# 浙江省交通运输科技成果推广目录申报表

# 一、成果概况

成果 名称	特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术
成果 类型	⊙技术 ○工艺 ○材料 ○产品
专业领域	隧道工程
申报单位	浙江省交通规划设计研究院有限公司
联系人及电 话	方勇刚 13858126579
推广应用起 止时间	2020 年 6 月 ~ 2023 年 5 月
申报单位意见	我单位申请将上述成果列入《浙江省交通运输科技成果推广目录》,并承诺所有关于申请单位与成果的文件、证明、陈述均真实、准确。如有违背,我单位将承担由此产生的一切后果。  申报单位法人代表签字: 申报单位公章: 2020年5月16日
主管部门推荐意见	市交通运输局(委)或厅管厅属单位或省级有关单位意见。公章:

# 二、成果简介(可另附页)

特长公路隧道通风系统存在的系统庞大、设备闲置、资源浪费,采用互补式通风的新模式是实现特长公路低碳节能的新思路。但也衍生出新的消防安全隐患,即互补式通风所需设置的连接上、下行隧道的联络风道破坏了原本相互独立的两个防火分区,火灾烟气有从本隧道串流至相邻隧道的可能性。因此,如何快速切断烟流,防止烟流串流至相邻隧道,这是一个重要的消防议题,也是目前研究的空白。同时,国内对于公路隧道的防灾疏散救援缺乏定量化标准的支撑,在采用互补式通风的密度、大小等参数,更多的是凭经验和工程类比,依据不足、精细化程度不高,存在一定的安全隐患。为此,在结合 2017 年度浙江省交通的行科技项目——特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究(2017035),和多手段系统研究基础上形成了解决方案——特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术。

### 1、技术特点

本成果在采用特长公路隧道采用互补式通风模式实现特长公路隧道通风系统低碳节能的基础上,综合应用案例调研、理论分析、模拟计算、模型试验等研究手段,系统研究并掌握了特长公路隧道竖井送排结合互补式通风模式的适用范围、分析和设计方法、运营控制技术,竖井送排结合互补式通风模式下的公路隧道火灾规律,结合人员疏散规律研究,并首次调研了隧道内各机电设备的动作时间和联动关系,最终形成互补式通风模式下的隧道防灾救援联动控制策略。

成果简介

- (1)对互补式通风模式下的公路隧道消防安全研究填补国内外空白。国内在江西省武吉高速公路上 5.5km 的九岭山隧道、湖北省沪蓉高速公路上长 5.9km 的大别山隧道尝试采用了互补式通风模式。张光鹏等(2010)给出了该通风模式的具体算法; 夏丰勇等(2014、2015)提出该通风模式与全射流纵向通风模式的转换控制条件; 王亚琼(2015)等进一步研究了该通风模式的适用条件。但均未对互补式通风模式的消防安全开展系统研究,更未对如何阻止烟气串流的安全隐患提出解决方案。
- (2) 突破了国内外对互补式通风模式的适用长度的传统认识。受防灾能力及通风能力的制约,传统的竖井送排或者互补通风模式适用隧道长度有限,使用具有局限性,仅适用于两隧道总需风量小于2倍隧道最大允许通风风量,如隧道长度大于8km则可能就不适用了。本成果由于创造性的增加了具有送风、排风功能的竖井,使所述"双线隧道"增加了与外界空气交换功能,并与上下行隧道之间的内部空气交换功能结合,突破了"两隧道总需风量小于2倍隧道最大允许通风风量"的限制条件,比如,对于6~9km长度的特长隧道,采用本实施方式可以解决日常的正常营运通风需求,可以节省一处通风竖井。
- (3)形成了互补式通风模式防灾救援及消防性能化设计成套技术。 提供了互补式通风模式特长公路隧道可供利用的安全疏散时间分析方

法、人员必需安全疏散时间分析方法、以及隧道消防、机电系统性能化设计及防灾救援联动控制策略成套技术。

### 2、原理

- (1) 竖井结合互补式通风模式的设计及节能控制技术,分析了竖井结合互补式通风的适用范围,采用 CFD、模型试验等手段对气流特点进行,开发了竖井结合互补式通风的计算程序,进而对这种新型组合通风模式的以节能为目标进行全方位比较。
- ①竖井送排结合互补式通风模式的机理研究,对这种通风的适用范围进行了分析研究,即:两条隧道的间距不能过大,能够有条件在隧道间开通横洞用于构建双洞换气系统。两条隧道的通风负荷有较大差异(根据相关文献,相邻隧道之间的需风量之比,也就是通风负荷之比宜大于 1.5),单纯采用全射流纵向通风方式不能满足通风的需求,采用竖井分段纵向式通风则会造成不必要的经济浪费。两条隧道的通风总风量不大于其最大允许通风量之和,即 2 倍最大允许风速与隧道通风断面积之乘积。进一步从营运能耗经济性开展分析,提出了互补式通风的营运经济性条件,即:两条隧道的通风总风量不大于其最大交通活塞风对应的通风量之和。
- ②开发了互补式通风模式程序,主要功能包括:用户可以对不同特征年组合不同的分析工况,通过工况车速滚动条的拖动可以选择工况车速,左右洞的工况车速可以不一致,模拟相邻隧洞工况差异的情况;可以在互补风道的上游和/或者下游增加通风竖井,模拟竖井送排结合互补式通风模式;设置射流风机型号后,可以对各通风区段风压平衡进行分析,算出各区段所需的风机数量;对互补风量和互补风道的位置灵活调整,甚至可以自动搜索最优的位置;最强大的是可以一键形成运营工况表。即对输出各个特征年,各种工况组合下的通风设备开启情况控制表。
- ③对竖井送排结合互补式通风模式可能的节能控制方案进行全方位比较,包括:模式一: 纯射流纵向通风(左、右洞纯射流纵向通风),模式二: 右洞竖井送排+射流风机纵向通风,模式三: 竖井送排+互补+射流风机纵向通风。
- ④采用缩尺寸模型试验方法,对竖井、互补风道合理位置和间距进 行了分析。
- (2)建立了竖井结合互补式通风隧道火灾分析数值模型和竖井排烟的分析模型,搭建了隧道火灾模型试验平台,掌握了竖井结合互补式通风条件下的火灾烟气浓度、温度场的发展规律。
- ①提出了互补式通风模式下的特长隧道火灾参数设置、临界风速计算、防排烟区段的划分原则;
- ②形成了互补式通风模式下的火灾分析技术路线,推荐采用火灾动力学软件 FDS (Fire Dynamics Simulator),并通过 Pyrosim 软件建立隧道模型,使用 FDS 软件编写程序代码,采用稳态火源(定常火源);分析对象包括速度差、烟气场、温度场、能见度场;
- ③提出了几种防止烟气串流至相邻隧道的技术手段,包括水幕系统、湿式共振弦栅除尘装置和火灾防串烟装置。水幕系统可在第一时间

拦截烟气,设置于吸风口,与专用的火灾探测器联动,无需隧道管理中心确认即启动;湿式共振弦栅除尘装置对烟气进行"洗涤",来防止烟气串流;火灾防串烟装置能有效隔绝烟气进入非着火隧道,由火灾探测器、控制器、电磁释放器、闭门器构成的,用以在第一时间拦截烟气。

- (3)为了得到人员必需安全疏散时间,建立了公路隧道人员荷载的概率统计模型,提出了人员反应时间、人员疏散时间分析方法,得到人员必需安全疏散时间的确定方法。进而,通过调研隧道火灾探测时间、各设备系统的启动及联动控制时间调研,形成了互补式通风模式下的隧道性能化及防灾救援联动控制策略。
- ①首先建立了隧道人员荷载的计算方法,得到了载客系数、停车间距与人员荷载密度的关系图。
- ②其次提出人员必需安全疏散时间计算方法,即在公路隧道火灾原因、特点及危害分析的基础上,分析火灾发生后的火灾探测时间、人员反应时间、人员疏散时间,并将各部分时间求和。
- ③针对"人员疏散时间",建议采用 Pathfinder 建立隧道火灾疏散模型,通过数值模拟的方法得到人员必需安全疏散时间。
- ④提出了特长公路隧道的机电工程设置水平、主要系统的功能要求、消防设计的原则;
- ⑤首次对公路隧道内各消防设备联动时间进行了分析,结合对外部 救援力量到达现场时间的估测,提出了特长公路隧道专门管理机构的人 员、设施配备方案;
- ⑥提出了火灾情况下分离式隧道上、下行双洞内风机联动控制的 6 个方案,通过建立数值模拟和缩尺模型试验对各方案、多工况的横通道 风速风向、烟气控制效果分析,确定了双洞隧道联动控制方案——火灾 隧道开启火源上游风机,相邻非火灾隧道相向开启横通道两侧风机以形成正压。

## 3、适用性分析

目前,我国公路建设蓬勃发展,公路隧道无论是数量和长度均快速增长,已是公认的世界隧道大国。据统计,我国在建及拟建 5km 以上特长隧道 110 余座,互补式通风由于在节能减排方面有明显的优势,如果采用本成果,预计可节约投资 25.7 亿,25 年减少碳排放约 136 万吨。同时,本技术对互补式通风隧道火灾的安全性提供了解决方案和保证措施,具有较好的应用前景。

本技术研究力求方案创新,采用本技术可进一步提升互补式通风的 火灾安全性,更好地指导隧道火灾性能化设计,制定高效的火灾救援疏 散方案。该互补通风模式下的特长公路隧道防灾救援技术具备较好的技术经济比较优势,有很高的推广应用价值。

(申请号、申请日期、专利类型、授权号、简介等)

1、专利 1: 一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置

申请号: CN201920579120. X

申请日期: 2019-04-25 专利类型: 实用新型专利

专利

授权号: CN 210003321 U 授权日期: 2020-01-31

简介:本实用新型涉及一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置,属于公路隧道通风及消防技术领域。双隧道互补式通风系统包括用于连通相邻两隧道的横向互补风道及用于对风道进行启闭控制的风道火灾防串烟装置;风道火灾防串烟装置包括控制器,火灾探测器,可启闭地安装在风道侧墙上的防火门,用于将处于开启状态的防火门保持在开启状态的门保持器,及闭门器;控制器用于在接收到火灾探测器所输出表征发生火灾的探测信号时,向门保持器输出释放控制信号。通过在横向互补风道内增设风道火灾防串烟装置,可在隧道发生火灾时,快速地关闭用于连通相邻两隧道的横向互补风道,以减少由于串烟所产生的次生灾害,可广泛应用于隧道工程领域中。

2、专利 2: 一种可对双线隧道送排风的通风斜井

申请号: CN201810041699.4

申请日期: 2018-01-16 专利类型: 发明专利

授权号: CN 108343459 B 授权日期: 2019-08-06

**简介:** 本发明公开了一种可对双线隧道送排风的通风斜井,包括左线隧道、右线隧道、左线隧道送风孔、右线隧道送风孔、左右线隧道共用排风兼排烟孔、左线隧道送风道、右线隧道送风道及右线隧道排风兼排烟道,所述左线隧道上设有左线隧道送风口,所述的左线隧道送风道一端通过左线隧道送风口与左线隧道连通,另一端与斜井左线隧道送风孔连通;本发明的有益效果是,左线隧道与右线隧道通过左线隧道送风道及右线隧道送风道共用一处斜井,从而能够节省一处斜井或竖井的设置,使得土建结构的工程量减少近50%,工程造价相应减少,且大大缩短了施工工期。

3、专利 3: 一种基于可逆互补通风的双线隧道

申请号: CN201410587734.4

申请日期: 2014-10-28 专利类型: 发明专利 授权号: CN 104389620 B 授权日期: 2016-07-20

**简介:** 本发明公开了一种基于可逆互补通风的双线隧道,包括上行以及下行两条隧道及用于沟通这两条隧道的联络风道,各隧道在邻近联络风道处均设有延伸至本隧道行车建筑限界之外的断面扩展区,联络风道的开口处在该断面扩展区;每个断面扩展区均设置风道隔墙,该风道隔墙将联络风道的开口分隔为吹风口和吸风口,且对应地安装有吹风口风阀和吸风口风阀。风道隔墙对沿车流方向流动的隧道气流产生阻碍或进行分流,驱使隧道气流改变流动方向,进入联络风道内,进而转入对侧隧道,有效提高两隧道之间的通风效果;吹风口风阀和吸风口风阀有助于加大其回流通风效果;且风道隔墙和联络风道的开口均位于断面扩展区内,从而不会影响隧道内的行车安全。

4、专利 4: 一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置 申请号: CN201910338539.0 申请日期: 2019-04-25 专利类型: 发明专利 公开(公告)号: CN109958468A 公开(公告)日: 2019-07-02 简介: 本发明涉及一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置, 属于公路隧道通风及消防技术领域。双隧道互补式通风系统包括用于连 通相邻两隧道的横向互补风道及用于对风道进行启闭控制的风道火灾 防串烟装置;风道火灾防串烟装置包括控制器,火灾探测器,可启闭地 安装在风道侧墙上的防火门,用于将处于开启状态的防火门保持在开启 状态的门保持器,及闭门器;控制器用于在接收到火灾探测器所输出表 征发生火灾的探测信号时,向门保持器输出释放控制信号。通过在横向 互补风道内增设风道火灾防串烟装置,可在隧道发生火灾时,快速地关 闭用于连通相邻两隧道的横向互补风道,以减少由于串烟所产生的次生 灾害, 可广泛应用于隧道工程领域中。 软件著作权 (登记号、发表日期、权利取得方式及范围、简介等) 标准规范 (名称、编号、发布时间、主要内容、应用情况等) 1、课题鉴定结果为国内领先 2、2019 获中国安全生产协会第一届安全科技进步三等奖 3、2019年获共青团浙江省委、浙江省国资委第二届浙江省青工创新创 其它已取得的 成果 效大赛优秀奖 4、发表论文7篇 5、培养硕士研究生3名

# 三、有关指标(可另附页)

技术指标	1、新型低碳节能的竖井送排结合互补通风技术,突破了"两隧道总需风量小于2倍隧道最大允许通风量"的限制条件,对于6~9km 长度的隧道,可节省1处通风竖井,通风设备安装功率降低约45~50%,运营能耗降低30%。 2、对互补式通风模式下的公路隧道消防安全研究填补国内外空白。掌握了竖井结合互补式通风条件下的火灾烟气的发展规律,提出了几种防止烟气串流至相邻隧道的技术手段。 3、形成了互补式通风模式防灾救援及消防性能化设计成套技术。提供了互补式通风模式特长公路隧道可供利用的安全疏散时间分析方法、人员必需安全疏散时间分析方法、以及隧道消防、机电系统性能化设计及
	防灾救援联动控制策略成套技术。

### 经济指标

据依托工程测算,采用本成果后 5km 以上特长隧道每座直接节约投资约 2340 万元, 25 年累计减少碳排放约 12360 吨。

# 可采取的推广 应用措施

- 1、积极在行业学会中进行技术推广,项目负责人于 2019 年 12 月在道路隧道全寿命期风险与安全防控国际学术会议(ICRTSR 2019)上作了项目的主题演讲报告,广受业界关注和好评。
- 2、作为省内龙头设计单位,将在生产项目中积极推广应用。
- 3、充分展示成果在安全保障下的节能降价优势,借助各级业主平台, 积极寻求更多的项目应用。

# 申报单位及其推广能力简介

浙江省交通规划设计研究院有限公司是集公路和水运规划、咨询、勘察(测)、设计、科研、设计施工总承包及建筑、市政设计和工程试验检测等功能于一体的科技型单位,拥有"九甲四乙一丙"勘察设计总承包资质、试验检测资质和外经贸权以及商务部对外援助成套项目资质,承担国家发改委委托投资咨询评估任务,并通过质量、环境和职业健康安全管理体系认证。为中国优秀勘察设计院,交通运输部优秀设计单位,浙江省高新技术企业。公司的主营业务为公路水运规划、勘察与设计,承担了省内外大量的公路设计任务,具备本成果推广应用的基本条件与优势。

申报单位作为《公路隧道设计规范》、《公路隧道通风设计细则》等行业规范的参编单位和中国公路学会隧道工程分会副理事长单位,将会把课题成果融入相关规范的修编,并在行业中积极推广。

(详细说明应用单位信息、应用工程信息、应用规模、时间、地点、经济社会效益分析、综合评价等)

1、应用实例 1: G25 建金高速公路金华山特长隧道 (7.4km)

应用单位: 浙江省交通规划设计研究院有限公司

应用工程:长春至深圳高速公路(G25)浙江建德至金华段公路工程(简称建金高速公路),项目起自建德市杨村桥镇北,接杭新景高速公路,经兰溪,终于金华市二仙桥东,接杭金衢高速公路,全长 58.09 公里。该项目中最长的特长隧道——金华山隧道,金华山隧道右线设计长度7398m,左线设计长度7378m。为了降低特长隧道建成后的运营能耗,金华山特长隧道通风系统设计和建设过程中借鉴和采用了本技术。

### 推广应用实例

应用规模: 金华山特长隧道(7.4km)1座

**时间:** 2017年—2018年 **地点:** 浙江省金华市

**经济社会效益分析:**降低了通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础。本项目实际减少建设投资3500万元,25年运营费用经测算能省3000万元。

2、应用实例 2: 延庆至崇礼高速公路河北段工程

应用单位: 四川公路桥梁建设集团公司

**应用工程:** 延庆至崇礼高速公路河北段工程是北京至张家口联合举办冬 奥会中连接延庆赛区和张家口赛区的主要公路通道。该工程位于张家口 市东部地区,途经怀来县、赤城县和崇礼区。由三条路段组成,分别是 主线、延伸工程和赤城支线,主线全长约 81.552 公里,采用双向四车 道高速公路标准建设。该项目中最长的螺旋隧道——金家庄特长隧道, 左线长 4228m, 右线长 4104m。

应用规模: 金家庄特长隧道(4.2km)1座

**时间:** 2018 年—2019 年 **地点:** 河北省张家口市

**经济社会效益分析**:通过本技术成果的采用,降低了土建规模和投资,为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础;并为特长隧道的火灾安全性提供了保证,当高速公路隧道遭受低于设防等级的火灾规模和人员荷载时,确保人员能安全地疏散,隧道主体结构不受损坏或不需修理可继续使用;当遭受相当于设防标准的火灾和人员荷载时,人员仍能安全撤离,主体结构可能有一定的损坏,经修理可继续使用。

## 3、应用实例 3: 杭绍台高速公路

应用单位: 浙江省交通规划设计研究院有限公司

应用工程: 杭绍台高速公路起自钱江通道南接线与杭甬高速节点齐贤枢纽处,终点在临海括苍镇北片区接台金高速,路线全长约166.22公里。应用规模: 陈家山特长隧道(5.9km)和镜岭特长隧道(5.5km)共2座

时间: 2017年—2018年

地点: 浙江省绍兴市

**经济社会效益分析:**降低了通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础。经陈家山隧道测算,竖井和通风机房能降低建设投资 2340 万元。应用本技术成果还为本项目互补式通风的火灾安全性提供了保证。

### 4、应用实例 4: G4012 浙江景宁至文成段高速公路工程

应用单位: 浙江景文高速公路有限公司

应用工程: 溧阳至宁德高速公路(G4012)浙江景宁至文成段工程是江苏溧阳至福建宁德(G4012)公路连接浙江境内最后建设的一段,路线总长约67.40km,全线设置5处互通立交,主线桥梁共12531.5m/36座,隧道共39075m/24座。

**应用规模:** 叶麻尖特长隧道(10.69km)1座

时间: 2017年—2018年

地点: 浙江省丽水市

**经济社会效益分析:**降低了通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础。

# 浙江省交通运输厅科技计划项目 成果鉴定证书

鉴定证书编号: 浙交鉴字〔2019〕14号

计划编号: 2017035

成 果 名 称: 特长公路隧道互补式通风系统防灾救援

及节能控制技术研究

第一完成单位: 浙江省交通规划设计研究院有限公司

其他完成单位:浙江临金高速公路有限公司

浙江交工集团股份有限公司

浙江工业大学

杭州新奥土木工程技术有限公司

鉴 定 形 式: 会议鉴定

组织鉴定单位:浙江省交通运输厅(盖章)

鉴定日期:

2019年6月12日

**鉴定批准日期:** 2019年6月28日

浙江省交通运输厅

2019 年制

# 简要技术说明及主要技术性能指标

### 简要技术说明:

本课题依托临金高速公路金华山隧道采用了互补式通风结合竖井排烟的新型通风模式,为了实现通风系统的低碳、节能,并为消防安全提供设计与运营管理方面的指导,开展了如下研究:

- (1) 互补式通风方式的节能设计及控制技术研究,包括基于通风网络及 CFD 分析的互补式通风道的合理位置及间距分析以及双洞需风量交替不平衡时双向互补式通风模式的工作机理研究;
- (2) 建立了互补式通风隧道火灾分析数值模型和竖井排烟的分析模型, 搭建了隧道火灾模型试验平台, 对互补式通风条件下的火灾烟气浓度、温度场的发展规律研究;
- (3) 通过调研隧道火灾发生后的探测时间、各设备系统的启动及联动控制时间,开展了 隧道防灾救援设施的联动控制技术研究:
  - (4) 高速公路隧道人员荷载调查及概率统计模型研究;
- (5) 在公路隧道火灾原因、特点及危害分析的基础上,对人员反应时间、人员疏散时间进行了分析,通过公式计算得到人员必需安全疏散时间。

### 主要技术性能指标:

- (1) 在适用性研究方面: 对互补式通风模式的适用范围进行了分析, 对纵坡采用人字形 双向坡的特长隧道, 获得了通风负荷比的简化分析方法, 用以评估互补式通风模式的适用性。
- (2) 在互补式通风模式设计方面:提出了两种互补式通风道的合理位置确定方法;并编制了竖井送排结合互补式通风模式的分析程序;
- (3) 在互补式通风模式的节能控制方面:提供了竖井送排结合互补式通风系统三种可能的设备开关组合模式。
- (4) 在互补式通风模式的防灾技术方面:提出了采用湿式共振栅除尘装置进一步提高互补式通风的消防安全,另外申请了一项发明专利——一种互补风道防串烟装置;
- (5) 在互补式通风模式的火灾联动控制方面:掌握了火灾发生后的探测时间,以及各设备系统的启动及联动控制时间,即从火灾开始到排烟风机开启的时间约为 160s(接近 3min);而到开足射流风机,形成稳定的临界风速所需时间约为 400s,接近 7min。而根据 RABT 和 HC 曲线,隧道内火灾通常在 5min 之内即达到峰值功率。并获得了火灾情况下最佳的双洞隧道风机控制方案,即火灾隧道开启上游风机、相邻隧道相向开启两端风机。

### 应用情况:

项目成果已应用于建金高速公路金华山隧道、景文高速公路叶麻尖隧道。

# 推广应用前景与措施

随着我国公路建设的蓬勃发展,隧道无论是数量和长度均快速增长。截至 2017 年底,我国大陆地区公路隧道 16229 处/1528.51 万米,增加 1048 处/124.54 万米,其中特长隧道 902 处/401.32 万米,长隧道 3841 处/659.93 万米。我国已建成秦岭终南山隧道(长 18km)等超长山岭隧道、崇明长江隧道(长 8955m)等大直径盾构隧道、港珠澳海底隧道(长 6265m)等沉管隧道,长度 10km 以上的公路特长隧道已达 10 余座,成为世界隧道大国。我省目前已经建成通车的高速公路里程近 5000km,在役超过 6km 的特长隧道有 5 座,尚有 5 座在建的长度超过 5km 的特长隧道。因此,应用前景良好。

本课题研究了特长隧道竖井送排风+互补通风的新型通风模式,研发了带多个通风竖井的互补式通风方式分析软件;开发了一种可有效隔绝烟气进入非着火隧道的火灾防窜烟装置。通过该科研成果的采用,降低了特长隧道通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础;还可进一步提升互补式通风的火灾安全性,更好地指导隧道火灾性能化设计,制定高效的火灾救援疏散方案。本课题研究力求方案创新,并且该方案具备较好的技术经济比较优势,推广前景良好。

# 项目经费使用情况

项目预算总经费80万元,全部为自筹。根据相关账簿及凭证,课题项目经费实际账面总支出86.52万元,其中省财政经费支出0万元、自筹经费支出86.52万元。

经审计,本项目预算经费使用情况较好,无截留、挪用、浪费和违反财经纪律等行为, 费用支付手续齐全。



浙江省交通运输厅于 2019 年 6 月 12 日在杭州召开了"特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究" (项目编号 2017035) 项目成果鉴定会。鉴定委员会 (名单附后) 听取了项目组的研究报告、科技查新报告、用户报告和项目经费内审报告,审阅了有关技术资料,经讨论,形成鉴定意见如下:

- 一、提交鉴定的技术资料齐全、规范、符合鉴定要求。
- 二、项目组结合工程实例,采用理论分析、CFD数值计算、模型试验等手段,研究了公路隧道互补式通风系统设计、风道位置及间距确定方法、节能控制技术、火灾工况下的烟气浓度场、温度场及人员疏散模拟及疏散安全标准等方面研究,开发了互补式通风模式的计算程序,研发了防止烟气串流的装置。研究成果在依托工程建金高速公路金华山隧道工程中得到了应用。
  - 三、项目研究的主要创新点为:
- 1. 提出了竖井送排结合互补式通风方式的解析算法,以确定互补式通风道的合理位置和合理风量;
- 2. 研发了带多个通风竖井的互补式通风方式分析软件; 开发了一种可有效隔绝烟气进入非着火隧道的火灾防窜烟装置。

四、项目预算总经费80万元,全部为自筹。根据浙江省交通规划设计研究院有限公司出具的财务内审报告,项目经费实际支出84.29万元。经费使用基本合理。

鉴定委员会认为项目研究已完成了项目合同书规定的各项任务,研究成果总体上达到国内领先水平。

建议推广应用研究成果。

鉴定委员会主任委员

2019年6月12日

# 主 持 鉴 定 单 位 意 见



主管领导签字:



(单位盖章)

2019 年 06 月 28 日

组织鉴定单位意见



主管领导签字:



(单位盖章)

2019 年 06 月 28 日

鉴定委员会名单

ſ		- \A			1		-		procession of the same of the		T
	三 30	of the same	是是	3hring	the file	卷多义	wan	( bield			
		1/2	<u> </u>	- Contracting	2	47	>	\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\			
	职称职务	教授级高工	教授级高工	教授级高工	教授级高工	教授	教授级高工	注册会计师			
	现从事专业	公路工程	公路工程	公路工程	公路工程	土木工程	隧道通风	财会			
	所学专业	公路工程	公路工程	公路工程	公路工程	公路工程	通风空调	财会			
	工作单位	浙江省公路学会	浙江省交通运输厅专家委	原浙江省公路管理局	浙江省交通工程管理中心	浙江大学	华东勘测设计研究院有限公司	杭州英杰会计师事务所			
	姓名	陆耀忠	下约霈	还银华	宣剑裕	黄志义	米。	向文成			
	鉴定会职务	主任委员	委员	委员	委员	委员	委员				
	华	-	2	က	4	ıc	9	2			

# 兴 丰 付 串 送 巛 眯 送 投 茶

①完成单位序号超过8个可加附页。其顺序必须与鉴定证书封面上的顺序完全一致。 洪

②完成单位名称必须填写全称,不得简化,与单位公章完全一致。 ③隶属省部是指本单位的行政关系隶属于哪一个省、自治区、直辖市或国务院部门主管。并将其名称填入表中。如果本单位有地方/部门双重 隶属关系,请按主要的隶属关系填写。

Hans with B

# 主 要 研 制 人 员 名 単

对成果创造性贡献	项目负责	技术负责	总体协调	报告撰写	总体协调	节能研究	防灾研究	报告撰写	报告撰写	防灾研究	节能研究	现场协调	数值计算	总体协调	数值计算	数值计算	节能研究
工作单位	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江省交通投资集团有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江工业大学	浙江临金高速公路有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江交工集团股份有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司
文化程度	硕士研究生	硕士研究生	本科	本本	硕士研究生	硕士研究生	硕士研究生	硕士研究生	博士研究生	本科	本科	本科	本科	本科	本科	硕士研究生	本科
技术职称	副高级	正高级	副高级	正高级	副高級	副高级	中级	副高级	副高级	中级	副高级	副高级	副高级	正高级	副高级	副高级	副高级
出生年月	1978.10	1969.03	1970.04	1973.02	1963.12	1975.08	1977.01	1980.04	1976.05	1986.03	1985.11	1982.02	1979.03	1967.09	1977.11	1985.04	1983.02
性别	出	用	用	用	用	田	男	用	用	用	眠	眠	眠	眠	用	出	出
姓名	方勇刚	李伟平	唐中华	36 辉	徐云涛	日後平	张森林	19 39	郑国平	郭清	徐志敏	播江波	徐健	徐建达	田俳	吴文琦	孙幸
京台	-	2	က	4	2	9	7	∞	6	10	11	12	13	14	15	16	17

防灾研究	数值计算	节能研究	现场监测	节能研究	经济评价	防灾研究	理论研究 理论研究	数值计算	数值计算	试验协调	数值计算	模型试验	节能研究	节能研究	防灾研究	节能研究	节能研究	理论研究	模型试验
浙江临金高速公路有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江交工集团股份有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江省交通规划设计研究院有限公司	杭州新奥土木工程技术有限公司	浙江交工集团股份有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江交工集团股份有限公司	浙江交工集团股份有限公司	浙江临金高速公路有限公司	浙江工业大学	杭州新奥土木工程技术有限公司						
本科	本科	本科	本科	本科	本科	本科	本科	硕士研究生	硕士研究生	本科	硕士研究生	硕士研究生	本科	硕士研究生	本科	本科	硕士研究生	博士研究生	硕士研究生
中級	副高级	副高级	副高级	中级	副高级	副高级	中级	中级	初级	正高级	副高级	初级	中级	初级	副高级	中级	正高级	正高级	初级
1973.05	1986.08	1970.11	1982.01	1988.05	1986.05	1983.06	1987.06	1990.03	1989.12	1972.02	1981.10	1994.03	1979.11	1990.03	1983.04	1984.06	1975.06	1964.07	1993.09
男	角	用	留	用	女	¥	女	用	用	田	用	田	用	田田	田	用	用	用	用
鲍永鑫	日 駐	李庆锡	王国树	徐凯	严整整	吴彩官	姬安	徐琨	陈礼明	周红升	李永明	一一條	程运信	牛恒达	陈万如	孙涛	方 锐	庄一舟	陈炯克
18	19	20	21	22	23	24	25	56	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37

# 承诺书

# 本单位和个人承诺:

- 1、本鉴定证书中所填写的各栏目内容真实、准确。
- 2、提供鉴定的技术文件和资料真实、可靠,技术(或理论)成果事实存在。
- 3、提供鉴定的实物(样品)与所提供鉴定的技术文件和资料一致,并事实存在。
- 4、本成果的知识产权或商业秘密明晰完整,归属本单位(或个人) 所有,未剽窃他人成果、未侵犯他人的知识产权或商业秘密。

若发生与上述承诺相违背的事实,由本单位(或个人)承担全部 法律责任。



2019年6月28日



证书号第9991472号





# 实用新型专利证书

实用新型名称:一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置

发 明 人:方勇刚;沈坚;崔优凯;黄挺;孙垚;顾永鑫;郑国平

专 利 号: ZL 2019 2 0579120. X

专利申请日: 2019年04月25日

专 利 权 人: 浙江省交通规划设计研究院有限公司;舟山市公路管理局

浙江工业大学

地 址: 310006 浙江省杭州市环城西路 89 号

授权公告日: 2020年01月31日 授权公告号: CN 210003321 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查,决定授予专利权,颁发实用 新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十 年,自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

# 

局长 申长雨 中午雨



第1页(共2页)



证书号第3482262号





# 发明专利证书

发 明 名 称:一种可对双线隧道送排风的通风斜井

发 明 人: 郑国平

专 利 号: ZL 2018 1 0041699.4

专利申请日: 2018年01月16日

专 利 权 人: 浙江工业大学

地 址: 310014 浙江省杭州市下城区朝晖六区

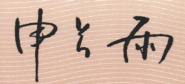
授权公告日: 2019年08月06日 授权公告号: CN 108343459 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查,决定授予专利权,颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年,自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长雨





第1页(共2页)



证书号第2148286号





# 发明专利证书

发 明 名 称:一种基于可逆互补通风的双线隧道

发 明 人: 郑国平

专 利 号: ZL 2014 1 0587734.4

专利申请日: 2014年10月28日

专 利 权 人: 浙江工业大学

授权公告日: 2016年07月20日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查,决定授予专利权,颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年,自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年10月28日前缴纳。未按照规定缴纳年费的,专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨 中台和





# 国家知识产权局

310013

浙江省杭州市西湖区竞舟路 1 号筑品金座 501 室 杭州天勤知识产权代理有限公司 何彬(0571-87755911),王琛 (0571-87755911) 发文日:

2019年04月25日





申请号或专利号: 201910338539.0

发文序号: 2019042501486160

# 专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

中请号: 201910338539.0

申请日: 2019年04月25日

中请人: 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 舟山市公路管理局, 浙江工业大学

发明创造名称:一种双隧道互补式通风系统及风道火灾防串烟装置

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

说明书 每份页数:9页 文件份数:1份

说明书附图 每份页数:5页 文件份数:1份

说明书摘要 每份页数:1页 文件份数:1份

权利要求节 每份页数:3 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 10 项

发明专利请求书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

专利代理委托书 每份页数:3 页 文件份数:1 份

实质审查请求书 每份页数:1页 文件份数:1份

### 提示:

- 1. 申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。
  - 2. 申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。
  - 3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后,依据专利法实施细则第9条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利原理审及流程管理部 三二 专利申请受理章

200101 纸件申请,回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产 2018.10 电子申请,应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有题

电子申请,应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定分1.3 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。

成果名称	《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》 (浙江省交通运输厅科技计划项目,编号 2017035)							
应用单位	杭州都市高速公路有限公司							
应用时间	2017~2018	产生的效益	3500 万元					
联系人	黄方成 联系电话 15158888035							

### 应用情况说明:

长春至深圳高速公路(G25)浙江建德至金华段公路工程(简称临金高速公路),本项目起自建德市杨村桥镇北,接杭新景高速公路,经兰溪,终于金华市二仙桥东,接杭金衢高速公路,全长 58.09 公里。该项目中最长的特长隧道——金华山隧道,金华山隧道右线设计长度 7398m,左线设计长度 7378m,起讫里程如下表所示。隧道内设计最大行车速度 100km/h,隧道区域夏季平均温度 32.5℃。

序号	隧道名称	起迄桩号	长度 (m)	施工图设计通风方式
1	1 金华山隧道	ZK2464+634~ZK2472+012	7378	竖井送排+互补式通风
1	世 一 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世 世	YK2464+632~ZK2472+030	7398	至开交排+互补"八通风

为了降低特长隧道建成后的运营能耗,特长隧道通风系统设计和建设过程中借鉴和采用了《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》(浙江省交通运输厅厅科技项目,编号 2017035),对隧道通风和消防系统进行了优化调整,施工图设计采用竖井送排+互补式的新型通风模式。该科研成果的采用,降低了通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础。

特此证明。



成果名称	《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》 (浙江省交通运输厅科技计划项目,编号 2017035)						
应用单位	四川公路桥梁建设集团公司延崇高速河北段 ZT10 合同项目部						
应用时间	2018~2019	产生的效益	/				
联系人	文展	联系电话	18980852077				

应用情况说明:

延崇高速河北段位于张家口市东部地区,途经怀来县、赤城县和崇礼区。由三条路段组成,分别是主线、延伸工程和赤城支线,主线全长约 81.552 公里,采用双向四车道高速公路标准建设。该项目中最长的螺旋隧道——金家庄特长隧道,左线长 4228m,右线长 4104m,隧道纵坡为单向坡,左线纵坡 1.84%,右线纵坡 1.91%,最大埋深 314m。

为了降低特长隧道建成后的运营能耗和改善消防应急救援条件,特长隧道通风系统设计和建设过程中借鉴和采用了《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》(浙江省交通运输厅科技项目,编号 2017035),对隧道通风和消防系统进行了优化调整,施工图设计采用互补式的新型通风模式。该技术成果的采用,降低了土建规模和投资,为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础;并为特长隧道的火灾安全性提供了保证,当高速公路隧道遭受低于设防等级的火灾规模和人员荷载时,确保人员能安全地疏散,隧道主体结构不受损坏或不需修理可继续使用;当遭受相当于设防标准的火灾和人员荷载时,人员仍能安全撤离,主体结构可能有一定的损坏,经修理可继续使用。荷载时,人员仍能安全撤离,主体结构可能有一定的损坏,经修理可继续使用。

通过《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》相关 技术的采用,取得了较好的经济和社会效益。

特此证明。

单位(盖章): 四川公路桥梁建设集团公司 延崇高速河北段 ZT10 合同项目部 2019.05.18

成果名称	《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》 (浙江省交通运输厅科技计划项目,编号 2017035)						
应用单位	杭绍台高速公路工程绍兴金华段第 HST-JL05 标段监理办						
应用时间	2017~2018	产生的效益	降低建安费 2340 万元				
联系人	徐贤方	联系电话	18262951611				

### 应用情况说明:

杭绍台高速公路工程绍兴金华段起于钱江通道南接线与杭甬高速公路交叉的齐贤枢纽(K0+000),路线往南跨过杭甬运河,下穿杭甬客运专线后,沿绍齐公路延伸至鉴湖镇附近与绍诸高速公路交叉,路线继续往南在甘霖与甬金高速公路交叉,经新昌澄潭镇、镜岭镇、磐安胡宅乡,终于大盘山隧道(左线ZK115+362,右线K115+338),路线全长约115.3km。该项目中(除大盘山特长隧道外)最长的两座隧道为陈家山隧道和镜岭隧道,按双向四车道设计,设计最大行车速度100km/h,起讫里程如下表所示。

序号	隧道名称	起迄桩号	长度 (m)	施工图设计通风方式	
1	1 陈家山隧道	ZK89+140~ZK95+104	5964	竖井送排+互补式通风	
1			5930	至开达排+互作式通风	
	+ 17 WA /A	ZK98+405~ZK103+915	5510	· 竖井送排+互补式通风	
2	镜岭隧道	YK98+382~YK103+965	5583	至开处排+生作式通风	

为了降低特长隧道建成后的运营能耗,特长隧道通风系统设计和建设过程中借鉴和采用了《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》(浙江省交通运输厅科技项目,编号 2017035),对隧道通风和消防系统进行了优化调整,施工图设计采用竖井送排+互补式的新型通风模式。该科研成果的采用,降低了通风系统的土建规模和投资(经测算,本项目陈家山特长隧道竖井和风机房建安费能降低约 2340 万元),为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础;课题研究的火灾防串烟装置和风机联动控制方案为本项目互补式通风的火灾安全性提供了保证。

特此证明。

单位 (盖章)

2018.1.15

	《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》 (浙江省交通运输厅科技计划项目,编号 2017035)							
应用单位	浙江景文高速公路有限公司							
应用时间	2017~2018	产生的效益	/					
联系人	姜芝坤	联系电话	0571-87835190					

### 应用情况说明:

溧阳至宁德高速公路(G4012)浙江景宁至文成段工程位于浙江丽水及温州市境内,是《国家公路网规划(2013 年~2030 年)》江苏溧阳至福建宁德(G4012)公路的组成部分,也是浙江省规划的"两纵两横十八连三绕三通道"高速公路网中的"一连"龙(游)丽(水)温(州)高速公路的组成路段,在国家及区域公路网中占有重要的地位。本项目为景宁至文成段,是江苏溧阳至福建宁德(G4012)公路连接浙江境内最后建设的一段,项目起点设置在景宁鸭卵坑,顺接云和至景宁段,终点在文成樟台顺接文成至泰顺段。全线特长隧道众多,其中叶麻尖 1#隧道与 2#隧道之间间距仅 38~47m,考虑到污染空气串流,通风系统按一座隧道考虑,隧道里程及长度如下表所示。

隧道名称 起讫桩号 隧道长度(m) 净宽/净高(m) 叶麻尖 1# ZK47+600~ ZK54+202 6602 10.25/5.0 隧道 YK47+684~YK54+201 6517 10.25/5.0 叶麻尖 2# ZK54+240~ZK58+380 4140 10.25/5.0 隧道 YK54+248~YK58+370 4122 10.25/5.0

表 1 隧道工程参数表

为了降低特长隧道建成后的运营能耗,叶麻尖隧道通风系统设计和建设过程中借鉴和采用了《特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究》(浙江省交通运输厅科技项目,编号 2017035),对原初步设计中的隧道通风和消防系统进行了优化调整,施工图设计采用竖井送排风+右线隧道补风方案的新型通风模式。该科研成果的采用,降低了通风系统的土建规模和投资,并为今后减少设备闲置和节约运营能耗打下良好基础。

特此证明。

单位(盖章)

2018.12.28

# 中国安全生产协会文件

中安协科技[2019]48号

# 中国安全生产协会关于公布 第一届安全科技进步奖获奖项目的通知

# 各有关单位和人员:

为贯彻落实安全发展理念,实施"科技兴安"战略,根据《国家科学技术奖励条例》和《关于进一步鼓励和规范社会力量设立科学技术奖的指导意见》,经批准,中国安全生产协会组织开展了第一届安全科技进步奖评奖活动。本次活动共收到来自机关、企事业单位、科研院所、高等院校、社会组织等 450 多家单位申报的 1113 个项目。经形式审查、专家网评、初评会审、社会公示、评审委员会审定,共评出获奖项目 462 项(名单见附件),其中:一等奖 27 项,二等奖 165 项,三等奖 270 项。

获奖项目涵盖了多个行业、领域,具有创新性和先进性, 代表了本行业、领域的安全科技水平,为安全科技创新做出 了突出贡献。获奖单位可根据工作实际,对获奖项目适当给 予奖励。同时,希望获奖单位和人员再接再厉,积极推进获 奖项目的成果转化和推广应用,继续发扬创新精神,完善科 技管理制度,加强科技人才培养,加大科技经费投入,为提 高安全科技水平,促进安全科技进步,推动应急管理事业发 展和安全生产形势持续稳定好转做出新的更大贡献!

附件: 第一届安全科技进步奖获奖项目名单



# 第一届安全科技进步奖获奖项目名单 (排名不分先后)

平 1 2 8 4 5	<ul> <li></li></ul>	27项) 単位 院责任公司 限公司 完全司 限公司 新院有限公司 有限公司 和城	李樹剛 赵鵬翘 肖 鵬 双海清 王学洋 以 华	
-------------	---------------------	--	-------------------------	--

严	项目名称	主要完成单位	主要完成人
9	低渗透高变质煤层开采瓦斯与煤 自燃耦合灾害协同防控关键技术 研究	安徽理工大学 兖矿贵州能化有限公司	石必明 张雷林 陈功华 孙振炎 宋建伟游先中 翟文杰 穆朝民
7	煤层顶板大直径定向钻孔技术与配套机具	中煤科工集团重庆研究院有限公司	闫保永 雷丰励 朱利民 王 杰 郝少楠孟祥辉 叶强波 郭向勇 陈泽平 阳廷军黄麟森 张 俞 刘思聪 赵志强 张先韬
∞	煤矿软岩巷道围岩锚固特性及控制技术研究	河南理工大学	张 辉 李兴旺 苏发强 王振峰 刘俊领韩威海 朱孟智 赵武迪 刘占阳
6	高瓦斯煤层群智能开采与安全保障关键技术及应用	华晋焦煤有限责任公司中国矿业大学	方新秋 梁春豪 张 磊 苏士龙 李 爽吴 刚 唐 俊 梁敏富 李进鹏 陈 帅薛广哲 刘 兵 姚晋国
10	低变质易氧化煤层自燃防治技术研究与应用	煤科集团沈阳研究院有限公司	宋双林 孙 勇 冯文彬 田富超 刘 磊王 刚 艾 兴 王 伟 贺明新 肖开泰赵亚明 陈庆丰 周 睿 鹿文勇 曹乃夫
11	易自燃环境大区域煤火演变规律及综合治理关键技术	中国矿业大学(北京) 南京工业大学 中煤科工集团重庆研究院有限公司	朱红青 谭 波 宋泽阳 张青松 赵金龙许向彬 王 巍 李 峰 陆新晓 姚勇征邵壮壮 霍雨佳 赵鸿儒 魏宏益 王浩然

70项)	单位 主要完成人	业有限公司 陈传海 黄孝奎 殷宪文 冯 永 刘 娟限公司	动化有限公司 谭国俊 李春峰 杨 波 王 磊 张 兵司顺和煤矿	限公司 司 有限责任公司	隻集团有限责任 王成龙 李圣文 陈 波 江守波 任 燕 图科技有限公司
三等奖 (270项)	主要完成单位	枣庄矿业集团高庄煤业有限公司山东山控信息科技有限公司	徐州中矿大传动与自动化有限公司永煤集团股份有限公司顺和煤矿	中国中煤能源集团有限公司 中煤资源发展集团公司 山西中新唐山沟煤业有限责任公司	山东科技大学 山东能源重型装备制造集团有限责任 公司 山东能源重装集团恒图科技有限公司
11	项目名称	基于大数据的选煤厂智能化技术 枣庄矿业集研究	新型堆栈式三电平提升机变频驱 徐州中矿大动系统与成套装备	薄煤层综采工作面切顶留巷无煤 中煤资源发 柱开来关键技术应用研究 山西中新唐	山东科技大司集性到板输送机检测及控制 山东能源重建技术 公司 山东能源重山东能源重加东坡
	1 全省	基于大数据( 研究	新型堆栈式:动系统与成	薄煤层综采. 柱开来关键	高可靠性刮材关键技术

序号	项目名称	主要完成单位	主要完成人
151	安全生产检测检验机构能力的通用要求	中国安全生产科学研究院煤科集团沈阳研究院有限公司	李双会 田 军 马守业 赵 阳 刘春富
152	辽宁省渔业船舶水上事故成因与对策研究	大连安全科学研究院	隋 旭 李志宏 李云帆 卢烨强 王 阳
153	粮食粉尘安全管控及风险防治系统关键技术及应用	哈尔滨理工大学	蔣永清 王 博 刘月蝉 孙 超 秦 勇
154	"生命卫士"呼吸面罩	北京机械设备研究所	邱旭阳 贾彦翔 宋 雷 刘 亮 黄启福
155	基于卫星监测盲区的输电线路通道山火防治方法研究	国网安徽省电力有限公司	肖安南 张蔚翔 丁 钧 焦玉平 崔泽宁
156	危险气体环境在线监测及风险管控技术研究与应用	浙江省安全生产科学研究院 中国移动通信集团浙江有限公司绍兴 分公司	包其富 贾 波 朱建淼 汪圣华 陈三强
157	互补通风模式下的特长公路隧道防灾救援技术	浙江省交通规划设计研究院有限公司 浙江临金高速公路有限公司 浙江交工集团股份有限公司	方勇刚 李伟平 翁 辉 徐云涛 郑国平



# 第一届安全科技进步奖

# 证书

为表彰在促进安全生产科学技术进步工作中做出突出贡献的个 人,特颁发此证书。

项目名称: 互补通风模式下的特长公路隧道防灾救援技术

奖励等级: 三等奖

获奖者: 方勇刚

证书编号: 2019-3-349-R01





HONORARY CREDENTIAL

特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究 项目

在第二届浙江省青工创新创效大赛中荣获

# 优秀奖

项目单位:杭州都市高速公路有限公司 浙江省交通规划设计研究院有限公司项目成员:徐志敏 方勇刚 吴娇娇 刘少华 沈耀剑 吴文琦 冯劲

共青团浙江省委员会

浙江省人民政府国有资产监督管理委员会











# 道路隧道全寿命期风险与安全防控国际学术会议

International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Prevention and Control (ICR7SR 2019)



方勇刚/浙江省交通规划设计研究院有限公司 高级工程师 特长公路隧道互补式通风系统防灾救援及节能控制技术研究



Thank you for attending the "International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Prevention and Control (ICRTSR 2019)" held on December 5-7, 2019, and presenting a wonderful report.

道路隧道全寿命期风险与安角防控軍

International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Preventipoand







# 现代隧道技术(增刊2)

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY (SUPPLEMENT 2)

# 2018 中国隧道与地下工程大会 (CTUC) 暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第二十届年会

# 论文集

(下册)

2018年11月 滁州

# 现代隧道技术 MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

次性付给,本刊不另付酬。凡不同意 入编的作者,请在投稿时声明。

第55卷(增刊2) 2018年11月出版 Vol.55(S2) Nov.2018 增刊备案号 511600201802

全国中文核心期刊	跨层引水隧洞长期稳定性的数值分析 金 鹏 谢立全等 !	916
中国科技论文统计源期刊		
(中国科技核心期刊)	运营安全与节能环保 	
CSCD 来源期刊	上海地铁盾构隧道病害影响因素及特征分析	922
RCCSE 中国核心学术期刊(A)	│ │ 基于全尺寸试验的典型公路隧道火灾自动报警系统对比分析	
中国期刊全文数据库(CJFD)全文收录期刊		930
中国核心期刊数据库(遴选)全文收录期刊		
1964 年创刊		937
主 管 中国铁路工程总公司	基于火灾动力学的竖井型自然通风模式烟气控制研究 … 郑国平 方勇刚等 !	942
<b>办</b> 中铁西南科学研究院有限公司	基于 CFD 动网格技术的竖井型自然通风效果研究 ······· 方勇刚 郭洪雨等 !	949
中国土木工程学会隧道及	软土地层顶管复合工法地铁车站抗震性能分析 马忠政 黄爱军等	957
地下工程分会	│ │ 掺建筑垃圾微粉渗透结晶型浓缩剂的制备与性能研究 ··· 林 志 王朝晖等 !	964
刊 号 <u>ISSN 1009-6582</u> CN51-1600/U	│ │ 公路隧道二次衬砌加固与排水系统恢复技术研究 ······ 林 志 叶剑可等 !	973
		981
发行范围 公开发行		
出 版 《现代隧道技术》编辑部 主 编 李 林		989
副 主 编 罗朝廷 严金秀	运营地铁盾构隧道结构安全评价现状与展望	996
责任编辑 王 彬 高成博 兰利敏	绿色隧道建造技术研究与应用	004
吴晶晶 董 敏	公路隧道内噪声控制技术研究 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	015
英文审校 Laura Skorczeski	│ │ 盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析 ····· 魏 纲 杨 波等 10	020
쓰 45 mt bl /6 Ht bl & 삼 H	   考虑固结效应的隧道开挖诱发邻近浅基础框架结构变形分析	
发 行 四川省报刊发行局 订 阅 全国各地邮局		028
国内代号 62-197	AND THE STATE OF T	520
广告经营许可证 5100004000028	新材料与新装备	
	│ │ 基于激光扫描的隧道管片结构变形数据处理及可视化分析方法 ····· 张 帆 1년	043
地 址 四川省成都市高新西区		
古楠街 97 号 郵 编 611731		051
电 话 (028) 67580049 (编辑)	│ 盾构隧道新型纵缝接头抗弯性能试验对比研究 ······· 柳 欳 李海涛等 1년 │	058
(028) 67580024 (广告)	风化泥岩地层相似材料配比试验研究 姚 剑 李 昀等 10	069
(028) 67580049 (广告)	纤维混凝土混合配筋隧道管片力学性能试验研究与理论分析	
传 真 (028) 67580024		080
M tit www.xdsdjs.org	   装配式波纹钢拱形棚洞结构的研究初探 ········ 许劲松 李国锋等 10	091
E-mail: xdsdjs@vip.163.com		099
印 刷 四川煤田地质制图印刷厂 定 价 20元	一	077
7G IN 207B	地下综合管廊	
本刊已入编中国学术期刊(光盘	   地铁隧道洞群与管廊施工顺序影响分析 ······· 高 超 张 骞等 1	108
版)、中国期刊网、中国科技期刊数据		
库、万方数据——数字化期刊群,作者		116
入编文章著作权使用费与本刊稿酬一	▍综合管廊电力舱规划布局策略探讨 张 慧 孙 毅等 1	122

文章编号:1009-6582(2018) S2-0942-07

DOI:10. 13807/j. enki. mtt. 2018. S2, 123

# 基于火灾动力学的竖井型自然通风模式 烟气控制研究

### 郑国平1 方勇刚2 郭洪雨2

(1 浙江工业大学,杭州 310014; 2 浙江省交通规划设计研究院有限公司,杭州 310006)

摘 要 临界风速(简称  $v_{\alpha}$ )是纵向排烟模式下既能控制烟气回流、又能让烟气层化流动的理想风速。竖井型自然通风模式是分散排放隧道内污染空气,降低对隧道周边环境影响的一种方式。为了定量化评估这种通风模式下的  $v_{\alpha}$ ,文章首先根据依托工程的几何参数并采用 Wu-Baker 经验公式算得到  $v_{\alpha}$ 为 3. 04 m/s,进一步采用计算流体力学(简称 CFD)对隧道在火灾情况下的烟气蔓延规律进行研究,从速度场分布、烟气蔓延规律、温度场分布以及能见度状况等多方面进行了分析,尤其是火灾发生后 10 s、50 s、200 s 和 600 s 等时间点的烟气场分布,确定了竖井型自然通风模式下的  $v_{\alpha}$ 。研究结果表明,当火灾发生在第一组竖井型自然通风口上游时,基丁火灾动力学数值分析得到的  $v_{\alpha}$ 与 Wu-Baker 经验公式计算得到的  $v_{\alpha}$ 大致相当;而火灾发生在两组自然通风竖井之间或下游时,由于竖井型自然通风口泄露了部分风量,导致所需的  $v_{\alpha}$ 大于 Wu-Baker 经验公式计算得到的  $v_{\alpha}$ 。这种不利因素是在配置排烟射流风机时应该考虑的。

关键词 竖井型自然通风 火灾 烟气 临界风速 中图分类号: U453.5 文献标识码: A

### 1 引 言

隧道作为相对封闭的人造空间,车辆行驶过程中将排放大量的污染物,包括颗粒物(尤其是小粒子 PM10,PM2.5)、气态一次污染物(CO,NO<sub>x</sub>,SO<sub>2</sub>,THC等)以及气态二次污染物(O<sub>3</sub>等)。这些污染物不仅影响司乘人员健康及行车视线,而且对隧道洞口居住区的空气质量有影响。为此,通常需要配置规模庞大的通风系统,其能耗在隧道运营费用中所占比例极高。

针对城市浅埋暗挖隧道埋深浅的特点,一种新颖、有效、节能的通风模式——竖井型自然通风模式于2005年在国内首次提出,目前已有成都市首红星路下穿隧道(800 m)、南京市通济门隧道(890 m)、西安门隧道(1410 m)、杭州市彩虹路隧

道(3 260 m)等采用该种通风模式。为了验证这种通风模式的防灾能力(主要是火灾),国内外学者开展了一系列研究。如,赵 冬、Chuan Gang Fan等「1-3」运用 CFD 方法研究不同烟囱高度下 CO 体积分数及烟气纵向蔓延规律和沉降规律;Yan Fu Wang等采用小尺寸模型试验和理论分析方法预测隧道顶板的最高温度 [4],采用烟羽流理论和 CFD 方法得到的回流长度均小于 60 m [5];W. Wang 和 Tiannian Zhou [6,7] 也开展了类似研究工作;基于烟气场、温度场、回流长度的分析,茅靳丰等 [8] 采用 CFD 方法、Fumiaki Ura 等 [9] 采用 1:12 缩尺模型试验方法,研究目标均为竖井型自然通风模式下的火灾逃生安全性。

上述分析所针对的隧道通常未设置射流风机进行烟气控制,任由火灾烟气自由发展。对于交通

修改稿返回日期:2018-08-26

作者简介:郑国平(1976-),男,硕士研究生,副教授,主要从事隧道及地下工程科研工作,E-mail:20931180@qq.com.

量较大、人员负荷比较重的隧道中存在一定的安全隐患。"临界风速"(以下简称 $v_{cr}$ )是防止火灾逆流蔓延到火源上游所需要的最小排烟通风风速,是纵向排烟模式下进行烟气控制的最有效手段。但目前对于竖井型自然通风模式下的 $v_{cr}$ 问题尚未引起有效重视。为此,拟根据依托工程的几何参数,分别采用 Wu-Baker 经验公式和 CFD 方法,对依托隧道在火灾情况下 $v_{cr}$ 问题开展研究。

#### 2 依托工程概况

浙江省宁海县西店湾隧道为明挖暗埋法修建的隧道,全长1590 m,净空断面积为89.55 m²,周长39.22 m,当量直径为9.13 m,纵断面设计为W型,坡度分别为-2.9%、-0.3%、0.3%和2.75%。设计行车速度为80 km/h,近远期设计交通量分别为24687 Pcu/d和28816 Pcu/d,设计火灾热释放功率为30 MW;采用竖井型自然通风模式,即在隧道后半段设置两组自然通风竖井,每组由5个通风井组成,每个通风井截面积尺寸为7 m×2.5 m(长×宽)。

# 3 基于 Wu-Baker 经验公式的隧道火灾烟气控制 $v_{cr}$

我国《公路隧道通风设计细则》根据不同的火灾规模给出不同的 $v_{\rm cr}$ ,对于30 MW 火灾,给出了 $v_{\rm cr}$ 值为3~4 m/s。

Wu 和 Baker 从试验和数值模拟两方面对相同高度、不同宽度的 5 种矩形断面隧道进行研究,采用隧道水力高度作为特征长度定义了无量纲热释放速率  $Q^*$  和无量纲风速  $v^*$  ,提出  $v_{\rm er}$ 计算公式:

$$\overline{H} = 4A/P \tag{1}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_{\rm p} T_0 g^{1/2} \overline{H}^{5/2}}$$
 (2)

$$v^* = \frac{v_{\rm cr}}{\sqrt{gH}} \tag{3}$$

当  $Q^* < 0.20$  时,  $v^* = 0.40(0.20)^{-1/3}Q^{*1/3}$ ;  $Q^* \ge 0.20$  时,  $v^* = 0.40$ 。

式中: A 为隧道横截面面积( $m^2$ ); P 为隧道湿周(m); Q 为热释放速率(W);  $\rho_0$  为空气密度, 为 1. 293 kg/ $m^3$ ;  $C_p$  为空气热容, 为 1×1 $^3$  J/kg·K;  $T_0$  为初始温度, 为 298. 16 K; g 为重力加速度, 为 9. 8  $m/s^2$ 。

根据依托工程的设计参数,可以算得最不利的 火灾排烟 $v_{cr}$ 为 3.04 m/s,此值在《细则》的建议值 范围内。

#### 4 基于火灾动力学的 v er 分析方法

#### 4.1 分析软件

Yan Fu Wang 等采用全尺寸实体隧道内的火灾试验测试成果与 CFD 分析成果进行对比,获得较好的吻合效果;因此,采用 CFD 分析方法来研究采用竖井型自然通风模式的隧道在火灾下的反应是可行的<sup>[10]</sup>。FDS(Fire Dynamics Simulator)软件是美国国家技术标准局 NIST 研究开发的专门解决火灾动力学发展的大涡模拟(LES)通用程序,并可以借助其它三维建模软件和网格生成工具,处理较为复杂的几何场景。FDS 主要是计算火灾发展过程中,热传递和烟气流动的过程,计算出温度、压强等一系列状态参数。可以解决火灾发生及烟气的发展和蔓延过程,还可以研究相应的消防设施对于火灾发展的影响。主要是用来解决火灾场景中遇到的一些实际问题,也可以在理论上,为科学研究提供指导。

#### 4.2 隧道火灾场景设置

依托工程隧道属于公路长隧道,为分析竖井型自然通风口对  $v_c$ 的影响,将隧道划分为 3 个排烟分析区段,即进洞口至第一组自然通风口为区段一、第一组自然通风口至第二组自然通风口之间为区段二、第二组自然通风口至隧道出口为区段三。3 个区段的长度如图 1 所示。

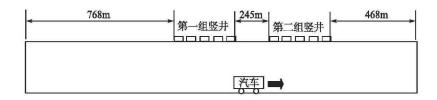


图 1 隧道竖井型自然通风口位置示意

Fig. 1 Longitudinal layout of shaft-shape natural vents in tunnels

#### 4.3 火源类型确定

火灾的发展过程类型分为两种:一种是准稳态 的,即在火灾的发展过程中火源的热释放速率在整 个过程中恒定不变;另一种是非稳态的,在火灾的 发展过程当中,火源的热释放速率会随着火灾的发 展而改变,常用 $t^2$ 火源表示。鉴于 $t^2$ 火较为复杂、 计算量大、所需时间长,且数值模拟的过程中会消 耗大量的计算机资源,且本项目中主要关注火灾达 到稳定状态时的参数,因此,采用了稳态火源类型。

#### 4.4 模型尺寸与网格划分

为了分析3个区段的 v。变化,且考虑到竖井对 v。可能产生的影响,因此采用全尺寸隧道模型进行 数值模拟(图2)。为了保证数值模拟的结果不发 散,一般情况下要求模型在3个维度上的网格数目 是2、3或5的整数倍。为了得到符合事实的可靠结 果,同时又尽可能的节省资源和时间,选取大小合 适的网格十分重要。

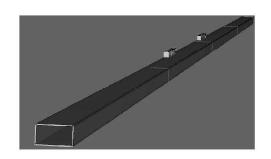


图 2 西店湾隧道模型整体效果图 Fig. 2 Overall model of Xidianwan tunnel

FDS 用户手册给出以下公式用来计算合适的 网格尺寸, $\delta$ , 是网格的公称尺寸,D\*代表火源的特 征直径(如公式 4),当 $D^*/\delta_x$ 的值在4到16之间 时,选取的网格大小即符合要求:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_{p} T_{\infty} \sqrt{g}}\right) \tag{4}$$

式中: $\dot{Q}$  为火源能量释放速率(kW); $\rho_{\infty}$ 为环境空气密 度 $(kg/m^3);c_n$  为环境空气比热 $(kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1});T_s$ 为环境空气温度(K);g 为重力加速度( $m \cdot s^{-2}$ )。

本项目取  $T_{\infty} = 298 \text{ K}, \rho_{\infty} = 1.29 \text{ kg/m}^3, c_n =$ 1.005 kJ/(kg·K), $\dot{Q}$  = 30 MW,得到  $D^*$  = 3.61 m<sub>o</sub> 模型采用的最粗网格尺寸大小为 0.5 m,即有  $D^*/\delta_x = 7.22$ ,可见网格大小符合要求(图3)。

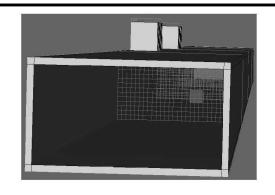


图 3 西店湾隧道网格划分示意 Fig. 3 Model grid of Xidianwan tunnel

#### 模拟结果分析

(1)火源位于位置1处时,不同纵向风速下隧 道内的温度场分布如图 4 所示。从图中可知:纵向 通风时,烟气迅速向下游蔓延,下游温度迅速升高。 烟气到达第一组排烟竖井处,大量烟气经排烟竖井 排出,烟气层高度和温度迅速下降。由于纵向通风 带来大量的冷空气,因此火源附近的最高温度在 170℃左右。随着烟气蔓延距离的增加,烟气层的 温度逐渐下降;纵向断面风速为 2.5 m/s 时,向上游 蔓延的烟气较少,浓度较低,隧道上游温度较低,有 温升的距离为 24 m, 然而却不能完全阻止烟气回 流,因而未达到临界风速;纵向断面风速为3.0 m/s 时,烟气不向上游蔓延,在发生火灾的整个过程中 上游没有温升;由对比可知,3.0 m/s 的风速刚好能 够阻止烟气回流的产生。

火源位于位置1处时,不同纵向通风风速模式 下,隧道内的速度场分布如图 5 所示。从图中可 知:纵向风速分别为 2.5 m/s 和 3.0 m/s 时,火源附 近由于火焰的卷吸作用,造成局部风速增大,风速 在5 m/s 左右;火源下游由于烟气自身速度和纵向 通风的叠加作用,速度增大;到达第一组排烟竖井 时,大量烟气经排烟竖井排出,隧道内的空气流量 减小,导致隧道内的风速迅速减小;通风风速为 2.5 m/s 时,不能阻止烟气回流的产生,未达到临界 风速,因此火源上游24 m范围内,隧道顶棚空气流 速很低,即是回流层;由对比可知,风速为3.0 m/s 时刚好能阻止烟气回流的产生,因此火灾功率为 30 MW 时,隧道的临界风速取为 3.0 m/s 是合 适的。

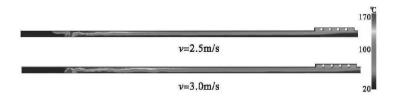


图 4 火源位置 1 对应的温度场分布

Fig. 4 Temperature field corresponding to fire position 1

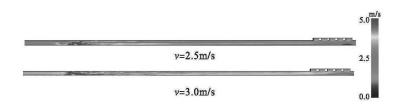


图 5 火源位置 1 对应的速度场分布

Fig. 5 Flow velocity field corresponding to fire position 1

(2)火源位于位置2时,不同纵向通风风速模 式下,隧道内的温度场分布如图 6 所示。从图中可 知:纵向风速为3.0 m/s 和3.5 m/s 时,烟气迅速向 下游蔓延,下游温度迅速升高。到达第二组排烟竖 井处,在竖井处形成烟囱效应,大部分烟气由第二 组竖井排出,烟气层的厚度迅速降低,温度也迅速 降低到50℃左右;由于竖井的抽吸作用,竖井下方 烟气层厚度较薄,烟气蔓延过竖并后,烟气层逐渐 下降,烟气层厚度增加;由于纵向通风带来大量的 冷空气,因此火源附近的最高温度在170℃左右。 随着烟气蔓延距离的增加,烟气层的温度逐渐下 降;风速为3.0 m/s 时,向上游蔓延的烟气较少,浓 度较低,因此隧道上游温度较低,有温升的距离为 15 m,不能完全阻止烟气回流的产生,未达到临界 风速;纵向风速为 3.5 m/s 时,烟气不会向上游蔓 延,在发生火灾的整个过程中上游没有温升。

火源位于位置2处时,不同纵向通风风速模式 下,隧道内的速度场分布如图 7 所示。从图中可 知:纵向风速分别为 3.0 m/s、3.5 m/s 时,火源附近 由于火焰的卷吸作用,造成局部风速增大,风速在 6 m/s 左右;火源下游由于烟气自身速度和纵向通 风的叠加作用,速度增大;烟气层到达第二组排烟 竖井时,大量烟气经排烟竖井排出,隧道内的空气 流量减小,导致隧道内的风速迅速减小;通风风速 为3.0 m/s 时,到达烟气层处的风速在2.6 m/s 左 右,不能阻止烟气回流的产生,未达到临界风速,因 此火源上游 15 m 范围内,隧道顶棚空气流速很低, 即是回流层;由对比可知,风速为3.5 m/s时,到 达火源处的风速在 3.3 m/s 左右, 刚好能阻止烟 气回流的产生,因此火灾功率为30 MW时,由于 排烟竖井的影响,隧道的临界风速取为 3.5 m/s 较合适。



图 6 火源位置 2 对应的温度场分布

Fig. 6 Temperature field corresponding to fire position 2

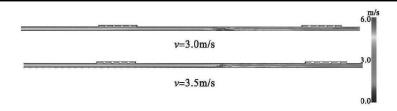


图 7 火源位置 2 对应的速度场分布

Fig. 7 Flow velocity field corresponding to fire position 2

(3)火源位于位置3处时,不同纵向通风风速模式下,隧道内的温度场分布如图8所示。从图中可知:纵向风速为4.0 m/s 和4.5 m/s 时,烟气迅速向下游蔓延,下游温度迅速升高。由于纵向通风带来大量的冷空气,因此火源附近的最高温度在220℃左右。风速为4.0 m/s 时,向上游蔓延的烟气较少,浓度较低,因此隧道上游温度较低,有温升的距离为43 m,不能阻止烟气回流的产生,未达到临界风速;纵向风速为4.5 m/s 时,烟气不向上游蔓延,在发生火灾的整个过程中上游没有温升;由对比可知,4.5 m/s 的风速刚好能够阻止烟气回流的产生。

火源位于位置3处时,不同纵向通风风速模式下,隧道内的速度场分布如图9所示。从图中可

知:纵向风速分别为 4.0 m/s 和 4.5 m/s 时,火源附近由于火焰的卷吸作用,造成局部风速增大,风速在 5.5 m/s 左右;火源下游由于烟气自身速度和纵向通风的叠加作用,速度增大;由于隧道中两组排烟竖井的影响,大量空气由排烟竖井排出,隧道内的空气流量减少,导致隧道内的风速减小;通风风速为 4.0 m/s 时,到达烟气层处的风速在 2.7 m/s左右,不能阻止烟气回流的产生,未达到临界风速,因此火源上游 43 m 范围内,隧道顶棚空气流速很低,即回流层;由对比可知,风速为 4.5 m/s 时,到达火源处的风速在 3.2 m/s 左右,刚好能阻止烟气回流的产生,因此火灾功率为 30 MW 时,由于两个排烟竖井的影响,隧道的临界风速取为 4.5 m/s 较合适。

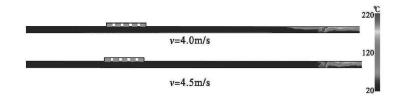


图 8 火源位置 3 对应的温度场分布

Fig. 8 Temperature field corresponding to fire position 3

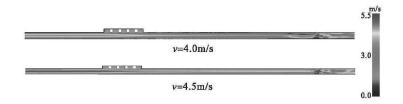


图 9 火源位置 3 对应的速度场分布

Fig. 9 Flow velocity field corresponding to fire position 3

#### 6 总 结

临界风速 v<sub>a</sub>是纵向排烟模式下既能控制烟气

回流、又能让烟气层化流动的理想风速。《细则》给出的 $v_{cr}$ 值为 $3\sim4$  m/s,采用 Wu-Baker 临界风速经验公式算得的隧道 $v_{cr}$ 为3.04 m/s。进一步采用火

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY (S2)

灾动力学软件 FDS 对依托隧道在火灾情况下的烟气蔓延规律进行研究,从发生火灾时的速度场分布、火灾烟气蔓延规律、温度场分布以及能见度状况等多方面进行了分析,尤其是火灾发生后 10 s、50 s、200 s 和 600 s 等时间点的烟气场分布是确定竖井型自然通风模式下 v。的主要依据。

分析结果表明,当火灾发生在位置一即第一组 竖井型自然通风口上游时,基于火灾动力学数值分 析得到的 $v_{cr}$ 值为3.0 m/s,与 Wu-Baker 经验公式计算得到的 $v_{cr}$ 大致相当;而火灾发生在位置二时,由于竖井型自然通风口的存在,泄露了部分风量,导致所需的 $v_{cr}$ 增加为3.5 m/s,大于 Wu-Baker 经验公式分析结果;而火灾发生在位置三时,两组自然通风口均泄露了风量, $v_{cr}$ 值增加至4.5 m/s,大于《细则》建议值。因此,在配置排烟射流风机时,应该考虑这种不利因素。

#### 参考文献

#### References

- [1] 赵 冬,周 汝. 烟囱效应作用下竖井型隧道火灾时的烟气扩散[J]. 消防科学与技术,2013,32(7):724-727. ZHAO Dong, ZHOU Ru. Tunnel Fire Numerical Simulation with the Force of Shaft's "Chimney Effect" [J]. Fire Science and Technology,2013,32(7):724-727.
- [2] CHUAN GANG FAN, ZHENG FENG JIN, JIA QING ZHANG, et al. Effects of Ambient Wind on Thermal Smoke Exhaust from A Shaft in Tunnels with Natural Ventilation [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117:254 262.
- [3] C. G. FAN, J. JI, W. WANG, et al. Effects of Vertical Shaft Arrangement on Natural Ventilation Performance during Tunnel Fires
  [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73:158 169.
- [4] YAN FU WANG, XIAO FEI SUN, BIAO LI, et al. Small-scale Experimental and Theoretical Analysis on Maximum Temperature Beneath Ceiling in Tunnel Fire with Vertical Shafts[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114(5):537-544.
- [5] YAN FU WANG, XIAO FEI SUN, SHUAI LIU, et al. Simulation of Back-layering Length in Tunnel Fire with Vertical Shafts [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109:344 350.
- [6] 茅靳丰,邢哲理,周 俊,等. 城市隧道竖井型自然排烟安全性分析[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(4):32-35.

  MAO Jinfeng,XING Zheli,ZHOU Jun, et al. The Analyze of the Natural Ventilation Tunnel Safety with Vertical Shafts[J]. Building Energy & Environment,2011,30(4):32-35.
- [7] FUMIAKI URA, NOBUYOSHI KAWABATA, et al. Characteristics of Smoke Extraction by Natural Ventilation during a Fire in a Shallow Urban Road Tunnel with Roof Openings [J]. Fire Safety Journal, 2014, 67:96 106.
- [8] W. WANG, Layout of Vertical Shaft of Natural Smoke Exhaust in Urban Underground Tunnel [J], Fire Sci. Technol, 2013, 32;598 601.
- [9] TIANNIAN ZHOU, JIAHAO LIU, QINPEI CHEN, et al. Characteristics of Smoke Movement with Forced Ventilation by Movable Fan in a Tunnel Fire [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 64:95 102.
- [10] YAN FU WANG, TAO QIN, XIAO FEI SUN, et al. Full-scale Fire Experiments and Simulation of Tunnel with Vertical Shafts [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105, 243 255.

# Study on Smoke Control for Natural Ventilation with Vertical Shafts based on Fire Dynamics

ZHENG Guoping <sup>1</sup> FANG Yonggang <sup>2</sup> GUO Hongyu <sup>2</sup> (1 Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2 Zhejiang Provincial Communications, Planning, Design & Research Institute Ltd. Co. Hangzhou 310006)

**Abstract** The critical air velocity ( $v_{cr}$ ) is an ideal air velocity which can avoid smoke backflow and make the smoke layer flow in the longitudinal smoke exhaust mode. The natural ventilation with shafts is a kind of way to

reduce the air pollution inside and outside of tunnels. In order to quantitatively evaluate the  $v_{\rm cr}$  value for this ventilation mode, Wu-Baker empirical formula is adopted in concern of the geometric parameters of the studied tunnel, with a calculation result of 3. 04 m/s. Furthermore, computational fluid dynamics (CFD) is used to simulate the flow velocity field, smoke spread law, temperature distribution, visibility conditions and other aspects in case of the fire scenario. Especially, the smoke fields at 10 s,50 s,200 s and 600 s after the fire are the main basis to determine  $v_{\rm cr}$  value in natural ventilation mode with shafts. Research shows that when the fire occurred in the upstream from the first opening group, the  $v_{\rm cr}$  values calculated by CFD and Wu-Baker formula are almost the same; while the fire occurred between two opening groups or downstream of the second opening group, the  $v_{\rm cr}$  values calculated by CFD is greater than the value calculated by Wu-Baker formula because the ventilation openings would let out part of the air. This unfavorable factor should be considered in configuration of exhaust jet fams.

Keywords Road tunnel; Natural ventilation with shafts; Fire; Smoke; Critical air velocity

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY (S2)

文章编号:1009-6582(2018)S2-0949-08

DOI:10. 13807/j. cnki, mtt. 2018. S2. 124

# 基于 CFD 动网格技术的竖井型自然 通风效果研究

方勇刚1 郭洪雨1 郑国平2

(1 浙江省交通规划设计研究院有限公司,杭州 310006; 2 浙江工业大学,杭州 310014)

摘 要 竖井型自然通风模式是分散排放隧道内污染空气,降低对隧道周边环境影响的一种方式。为了定量化评估依托工程的自然通风效果,采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,以下简称 CFD)动网格模拟技术,分析了汽车在隧道内行驶所产生的活塞风量大小,以及汽车经过各个竖井型自然通风口时排出及吸入的风量大小,并比较了两组自然通风口的风量差异。结果表明,交通活塞风速在1.5~2.0 m/s 之间,自然通风口吸入的空气量约54 m³/s,排出的空气约80 m³/s。因此,竖井型自然通风模式的效果是良好的。

关键词 隧道 竖井型自然通风 CFD 动网格中图分类号: U453.5 文献标识码: A

#### 1 引 言

隧道作为相对封闭的人造空间,车辆行驶过程 中将排放大量的污染物,包括颗粒物(尤其是小粒 子 PM10, PM2.5)、气态一次污染物(CO, NOx, SO3, THC 等)以及气态二次污染物(0,等)。这些污染 物不仅影响司乘人员健康及行车视线,而且对隧道 洞口居住区的空气质量产生影响。为此常常需要 采用机械通风加大换气量,导致特长隧道中通风系 统的安装规模和能耗均大得惊人。比如,10 km 长 的泥巴山隧道通风系统规模达 6 500 kW, 按每天开 8 h 计算,每年耗电约1 800 万元;18.02 km 长的秦 岭终南山通风系统规模达 11 274 kW, 每年耗电约 3 100 万元,占隧道运营能耗的 70% [1]。为了降低 通风系统能耗,目前已提出了采用前馈式模糊控制 策略[2,3],充分利用有规律的自然风[1,4]以及利用 相邻下坡隧道低浓度空气的互补式通风等 技术[5,6]。

针对城市浅埋暗挖隧道埋深浅的特点,一种新 颖、节能的通风模式——竖井型自然通风模式于 2005 年首次在国内提出,目前已有成都市红星路下 穿隧道(800 m),南京市通济门隧道(890 m)、西安 门隧道(1410 m),杭州市彩虹路隧道(3260 m)等 工程中开展应用,但现行《公路隧道通风设计细则》 中并未包含竖井型自然通风模式的设计方法。国 内外学者针对这种通风方式,采用理论分析、数值 模拟、模型试验、实体试验等手段进行了研究。如 朱培根等[7,8]对其原理与流动特征进行分析后建立 了隧道内有害气体浓度分布的数学模型,进而搭建 了南京中山东路隧道缩尺寸模型,研究了隧道阻滞 状况下的自然通风特性: 童 艳等[9,10] 将竖井型自 然通风公路隧道划分为多个控制体,并在考虑了紊 流扩散的前提下建立其污染物扩散方程,同时研究 了在不同竖井间距、截面尺寸、交通量、车速和主体 长度工况下,隧道内气流与污染物的分布状况。基 于上述研究,江苏省编制了《城市隧道竖井型自然

修改稿返回日期:2018-08-29

作者简介: 方勇刚(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、隧道工程方面的设计、咨询和科研工作, E-mail: 89113307@ qq. com. 通讯作者: 郑国平(1976-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程科研工作, E-mail: 20931180@ qq. com.

通风设计与验收规范》。

上述针对城市隧道顶部开孔自然通风的研究 成果主要基于一维恒定流假设和局部单向化假设, 没有对隧道气流进行动态分析,一定程度上忽略了 交通活塞风作用下的非恒定流特点。而当汽车驶 人隧道时,在汽车的推动下隧道内空气的流动速度 是随着时间而发生变化的,尤其是在活塞效应作用 下,竖井型自然通风口的气流状态呈非恒定流动状 态,所得结果与实际运行是否存在差异还不是很清 楚,对于隧道顶部自然通风口的布设位置也缺乏系 统的研究。因此,根据流体连续性方程、非恒定流 的伯努利方程、标准k-s湍流模型,并基于动态分 层模型的动网格技术,拟采用计算流体动力学软 件,分析竖井型自然通风模式下各通风口在汽车活 塞效应作用的气流场特征,对明挖浅埋隧道利用自 然通风口进行换气的通风模式进行研究,并针对不 同位置的通风口组在车辆活塞作用下的通风换气 风量进行对比研究,从而评估该通风模式的有 效性。

#### 2 隧道通风的空气动力学基础

#### 2.1 空气动力学原理

空气的流动要受到物理守恒定律的支配,其理 论基础是空气动力学原理,即质量、能量、动量守恒 定律。车辆在隧道内运行产生的活塞风在隧道内 与竖升内的流动过程非常复杂,受到风升结构、风 井位置、朝向等因素的影响,难以用简化的公式进 行描述。因此,针对这一情形,利用流体动力学软 件进行数值方法模拟,以期得到对隧道内活塞风流 场结构分布情况。

#### 2.2 湍流模型

标准  $k - \varepsilon$  湍流模型是以湍流动能 k 和耗散项  $\varepsilon$  为输运方程建立起来的半经验模型,具有很好的 收敛速率和相对较低的内存要求,对于复杂几何周围外部流动问题的求解效果较好,因此,模拟过程采用了该湍流模型。获得该模型需要用到控制方程的雷诺平均数。

#### 2.3 动网格技术

模拟汽车运动的过程时,车身周围的网格会不断发生变形,因此模型必须保证将每一个时间步长内的网格结构变形信息及时地提供用于计算,然后将计算结果用于调整下一时间步长的网格形状。

这一过程的实现需要运用动网格技术。

常用的动网格模型有动态分层模型、弹簧近似 光滑模型和局部重划模型。其中动态分层模型的 中心思想是依据相邻运动边界网格层的高度变化 情况来改变动态层。CFD 软件可以通过设置拉伸 因子等参数,自动更新每一时间步长内边界层。

为降低网格运动产生的误差,在生成网格的过程中同样需要满足网格守恒方程。有限体积法将计算域离散成有限数目的控制体,在任意一个控制体中,广义标量的积分守恒方程可以表示为;

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int_{v} \rho \varphi \, \mathrm{d}V + \int_{\partial V} \rho \varphi \left( \overline{\mu} - \overline{\mu}_{\mathrm{g}} \right) \cdot \mathrm{d}\overline{A}$$

$$= \int_{\partial V} \Gamma \, \nabla \varphi \cdot \mathrm{d}\overline{A} + \int_{V} S_{\Phi} \, \mathrm{d}V$$
(1)

式中: $\rho$  为流体密度; $\mu$  为流体速度向量; $\mu_{\varepsilon}$  为运动 网格的网格速度; $\Gamma$  为扩散系数; $S_{\Phi}$  为  $\Phi$  的源项;  $\partial V$ 代表控制体的边界。

#### 3 竖井型自然通风系统的数值建模

#### 3.1 工程概况

浙江省宁海县西店湾隧道采用明挖暗埋法修建,全长 1590 m,按设计行车速度为80 km/h的一级公路六车道标准设计,横断面布置为两孔一管廊型式,行车孔的单孔净空断面积为98 m²。根据交通量预测结果,近远期设计交通量分别为24687 Pcu/d和28816 Pcu/d。按照《公路隧道通风设计细则》,算得需风量为134 m³/s(换气次数要求的需风量控制)。由于隧道周边有居民小区,为了防止洞口集中排放带来的环境污染问题,同时考虑环境评价报告的要求,设计采用竖井型自然通风模式,以实现污染空气的分布式排放,从而降低隧道出口的污染空气浓度。具体地说,就是在隧道后半段设置两组自然通风竖井,每组由5个通风井组成,每个通风井截面积尺寸为7.0 m×2.5 m(长×宽),纵向间距为5.0 m(图1)。

#### 3.2 CFD 模型的建立

根据大、小型车的比例和大、小型车正面投影面积,可以确定等效汽车截面积为3 m²,并取等效长度为6 m。于是,根据隧道实际几何尺寸,采用FLUENT软件建立了1:1数值分析模型(图2),且运用非结构化网格划分方法,隧道内网格尺寸为1 m,汽车网格尺寸为0.5 m。同时对自然通风口位

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY (S2)

置处的局部网格进行适当加密(图3)。隧道整体模型所划分的计算网格数量约为238万,并将汽车的

区域设定为移动区域,其余隧道区域为固定区域(图4)。

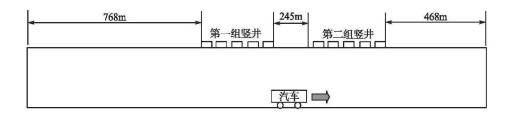


图 1 隧道竖井型自然通风口位置示意

Fig. 1 Longitudinal layout of shaft-shape natural vents

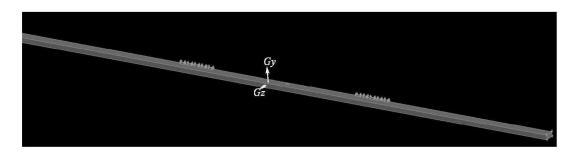


图 2 隧道 CFD 分析模型

Fig. 2 CFD model of the background tunnel

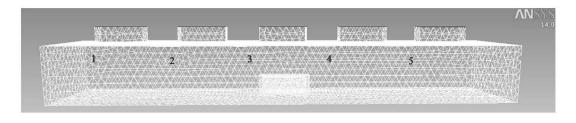


图 3 隧道局部网格划分

Fig. 3 Enlarged grid division of typical tunnel part

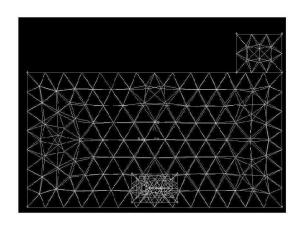


图 4 隧道横断面网格划分

Fig. 4 Section meshing of tunnel cross section

#### 3.3 边界条件及求解设置

隧道各出口均设置为压力出口边界条件,压力值为当地大气压,隧道内环境温度取常温 298 K。 隧道进出口为 Outflow 边界条件。动网格区和静网格区通过滑移网格交界面进行连接,汽车所在区域的四周边界设为墙体,为无滑移三维固体边界条件。运动方式自行定义,运动速度赋值给汽车头部和尾部两边界面,四周固体边界则随之运动。流场区域内的空气随汽车的运动而改变,属于变形运动。

考虑到由车辆运动产生的活塞风气流在隧道 内会继续流动一段时间,故将动态模拟时长设置为 25 s。同时设置:时间步长为 0.02 s,每时间步长运算迭代 20 次,残差收敛标准为  $1 \times 10^{-3}$  ;在 t=0 时,隧道洞口及竖井口内外相对大气压力及速度都为 0 ;t>0 时,隧道出人口及风井出口都为大气压力边界;所有壁面采用非滑移壁面。假定车辆运行是引起隧道内空气流动的唯一动力源,忽略其他车辆对空气流动的影响。

应用标准 k- s 湍流模型计算分析车辆运行过程中形成的气流速度场和压力场;采用 PISO 算法计算瞬态的速度与压力耦合问题,因为其具有计算非定常流动的优势,且适合计算高倾斜网格。对流与扩散项的离散采用二阶迎风格式,瞬态运算的时间离散采用一阶隐式。

#### 4 自然通风的效果分析

#### 4.1 隧道内活塞风速的模拟分析

车辆在隧道内行驶将引起前后两端压力差并形成风流,即所谓"活塞效应(piston effect)"和交通活塞风。活塞效应可以带入室外新鲜空气,排出隧道内污染空气,从而提高隧道内空气质量。隧道内活塞风的雷诺数 Re > 2 000,属于紊流流动,用隧道内气流的平均流速代表活塞风速(图 5)。从模拟结果可以看出,隧道前方的气流由车辆推动向前运动,隧道后部的气流向车辆后方形成的负压区移动。隧道内汽车以正常速度通过时,在隧道内产生的活塞风速在 1.5~2.0 m/s。

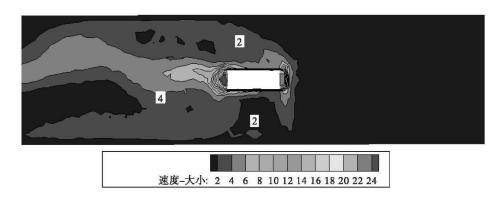


图 5 隧道内活塞风大小

Fig. 5 Piston wind in a tunnel

#### 4.2 竖井型自然通风口的气流规律分析

首先设定6个时间点(即汽车所在位置),分别为:汽车到达1号竖井通风之前、汽车位于1~2号通风口之间、汽车位于2~3号通风口之间、汽车位于3~4号通风口之间、汽车位于4~5号通风口之间、汽车开过6号通风口,并定义气体吸进隧道为正,气体排出隧道为负。采用CFD动网格分析技术

对自然通风口的气流规律进行模拟,获得了各个时间点对应的各通风口气流分布状态如图 6~图 11 所示。由图中数据可见,由于活塞效应的作用,车辆前方的竖井均排出空气,而后方的竖井则吸入空气。通过通风口风速与面积的积分,获得了 5 个自然通风口的流量汇总如图 12 所示,共计吸进外界新鲜空气 53.70 m³,排出隧道内气体 82.57 m³。

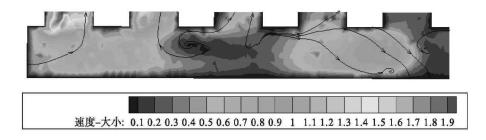


图 6 汽车行驶至位置 1 时各竖井通风口流场分布

Fig. 6 Flow field near shaft vents while the vehicle at section 1

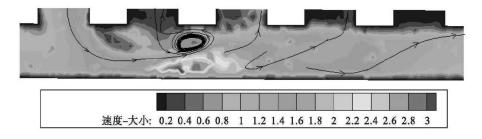


图 7 汽车行驶至位置 2 时各竖井通风口流场分布

Fig. 7  $\,$  Flow field near shaft vents while the vehicle at section 2

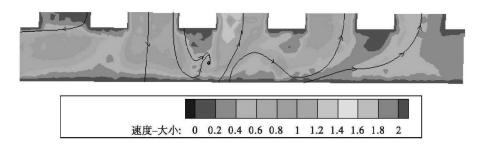


图 8 汽车行驶至位置 3 时各竖井通风口流场分布

Fig. 8 Flow field near shaft vents while the vehicle at section 3

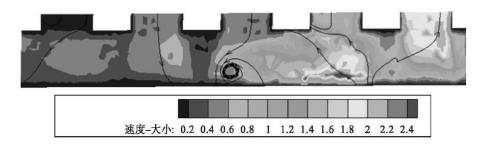


图 9 汽车行驶至位置 4 时各竖井通风口流场分布

Fig. 9 Flow field near shaft vents while the vehicle at section 4

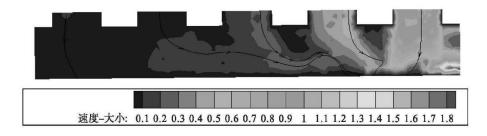


图 10 汽车行驶至位置 5 时各竖井通风口流场分布

Fig. 10 Flow field near shaft vents while the vehicle at section 5

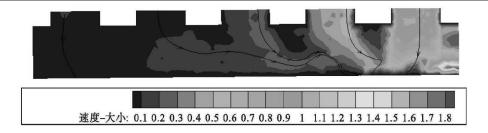


图 11 汽车行驶至位置 6 时各竖井通风口流场分布

Fig. 11 Flow field near shaft vents while the vehicle at section 6

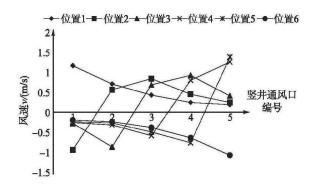


图 12 汽车行驶至不同位置时各竖井通风口流速分布 Fig. 12 Flow velocity distribution of each vent while the vehicle at different sections

#### 4.3 两组竖井通风口流量对比分析

第一组竖井通风口与隧道进口距离为767.5 m, 与隧道出口距离为757.5 m;第二组竖井通风口与 隧道进口距离为1067.5 m,与隧道出口距离为 467.5 m。两组竖井通风口由于所处位置不同,上 下游的沿程风阻大小亦不同,反映到风压及流场也 会有所差别。

经模拟分析,车辆经过第二组竖井由 1 号通风口处运动到 5 号通风口处这一过程中,1 号通风口排出气体 9.54 m³,吸进气体 14.28 m³;2 号通风口排出气体 11.32 m³,吸进气体 13.24 m³;3 号通风口排出气体 17.77 m³,吸进气体 9.45 m³;4 号通风口排出气体 19.13 m³,吸进气体 7.37 m³;5 号通风口排出气体 21.50 m³,吸进气体 10.43 m³;5 个通风口共吸进外界新鲜空气 54.77 m³,排出隧道内气体 79.26 m³。

车辆经过第一组通风口排出的气体量大于经过第二组通风口排出的空气量,而车辆经过第一组通风口吸入的气体量则小于经过第二组通风口时吸入的空气量。

#### 5 结 论

竖井型自然通风模式明挖浅埋隧道利用汽车活塞效应和自然通风口的"呼气"、"吸气"实现空气的交换。为了评估这种通风模式的有效性,利用Fluent 动网格技术对隧道内车辆经过产生的活塞风速以及车辆经过时隧道内自然通风口的气流规律进行数值模拟研究,并针对不同位置的通风口组在车辆活塞作用下的通风换气风量进行对比研究,获得如下结论:

- (1)由于行车活塞效应,车辆前方的自然通风口有气体被挤出隧道外,而车辆后方的自然通风口吸进隧道外的新鲜空气。
- (2)当车辆以 80 km/h 的速度通过竖井通风口,第一组竖井自然通风口吸进外界新鲜空气53.70 m³,排出隧道内气体82.57 m³;第二组竖井通风口吸进外界新鲜空气54.77 m³,排出隧道内气体79.26 m³。可见,车辆经过第一组通风口时,由于下游距离较长,通风阻力较大,通风口排出的气体量较大,而吸进的气体量较小,但两组通风口吸进排出的量相差不大。
- (3)综合分析,可以确定隧道内利用车辆运动产生的活塞风以及隧道内部设置的自然通风口进行隧道通风换气即带入新鲜空气,排出隧道内污染空气是可行的。

#### MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY ( ${ m S2}$ )

#### 参考文献

#### References

- [1] GUO Chun, WANG Mingnian, YANG Lu, et al. A Review of Energy Consumption and Saving in Extra-Long Tunnel Operation Ventilation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, (53):1558-1569.
- [2] 何 川,李祖伟,方 勇,等. 公路隧道通风系统的前馈式智能模糊控制[J]. 西南交通大学学报,2005,10(40):78-83. HE Chuan,LI Zuwei,FANG Yong, et al. Feed-forward Intelligent Fuzzy Logic Control of Highway Tunnel Ventilation System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2005,10(40):78-83.
- [3] 党江杰. 基于模糊控制的隧道通风节能控制模型研究[D]. 西安:长安大学,2013.

  DANG Jiangjie. Research of the Road Tunnel Ventilation Energy-saving Based on Fuzzy Control Model[D]. Xi'an; Chang'an University,2013.
- [4] 汤召志,王明年,于 丽,等. 港珠澳大桥沉管隧道通风变频节能技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(S1):1418-1421.
  - TANG Zhaozhi, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study on the Energy-saving Technology for Frequency Varied Ventilation in the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge's Tunnel Project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8 (S1): 1418-1421.
- [5] 王亚琼,蒋学猛,武义凯,等. 公路隧道双洞互补式通风适用性分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):14-22. WANG Yaqiong, JIANG Xuemeng, WU Yikai, et al. Applicability Analysis of the Complementary Ventilation System in Twin-tube Highway Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015,52(3):14-22.
- [6] 夏丰勇,王亚琼,谢永利. 公路隧道双洞互补式通风的设计方法与试验[J]. 公路交通科技,2015,32(3):103-108. XIA Fengyong, WANG Yaqiong, XIE Yongli. Design Method and Test of Twin-tunnel Complementary Ventilation for Highway Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(3):103-108.
- [7] 朱培根,罗春成,范 兰,等. 竖井型城市隧道自然通风理论研究[J]. 发电与空调,2009,30(1):11-14.

  ZHU Peigen,LUO Chuncheng,FAN Lan, et al. Study on the Natural Ventilation in the City Tunnel with Vertical-shaft[J]. Power Generation and Air Conditioning,2009,30(1):11-14.
- [8] 朱培根,梅 健,涂江峰,等. 竖井型城市隧道阻滞交通状况下自然通风模型试验研究[J]. 流体机械,2012,40(3):60-63. ZHU Peigen, MEI Jian, TU Jiangfeng, et al. Research on Natural Ventilation in City Tunnel by Model Experiment at the Status of Block [J]. Fluid Machinery,2012,40(3):60-63.
- [9] 童 艳,施明恒,龚延风. 竖井型自然通风公路隧道气流与污染问题研究[J]. 建筑热能通风空调,2009,28(4):18-22. TONG Yan,SHI Mingheng,GONG Yanfeng. Studying on Air Flow and Pollution of Natural Ventilation Tunnel with Shafts[J]. Building Energy & Environment,2009,28(4):18-22.
- [10] 童 艳, 苏荣华, 龚延风. 竖井型自然通风公路隧道气流与污染物分布的影响因素研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(6):92 -98.
  - TONG Yan, SU Ronghua, GONG Yanfeng. Research on Natural Ventlilation in City Tunnel by Model Experiment at the Status of Block [J]. Building Science, 2011, 27(6):92 98.

# Study on Performances of Natural Ventilation with Distributed Shafts Using CFD Dynamic Mesh Method

FANG Yonggang <sup>1</sup> GUO Hongyu <sup>1</sup> ZHENG Guoping <sup>2</sup>
(1 Zhejiang Provincial Communications, Planning, Design & Research Institute Co. Ltd., Hangzhou 310006;
2 Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

**Abstract** The natural ventilation mode with distributed shafts is a means to lessen the air pollution inside of tunnel and the surrounding environment. In order to quantitatively assess the effect of natural ventilation, computational fluid dynamics (CFD) and dynamic grid simulation technology are adopted to analyze the piston air flow caused by moving vehicles, as well as intake and exhaust air flowing through shafts during vehicle passing through. The volume difference between two groups of natural ventilation shaft is compared. The results show that the air velocity of the piston is at the range of 1.5 - 2.0 m/s and the air intake of the natural vent is about 54 m<sup>3</sup>/s, and the exhaust air is about 80 m<sup>3</sup>/s. Therefore, natural ventilation mode with distributed shafts shows good effect.

Keywords Road tunnel; Natural ventilation with shafts; CFD; Dynamic mesh

# 公路工程

GONGLU GONGCHENG

2019 ISSN 1674-0610 CN 43-1481/U



## HIGHWAY ENGINEERING

双月刊 1975年创刊 Bimonthly Since 1975 第44卷 第4期 总第197期 Vol.44,No.4 Serial No.197

全国中文核心期刊 RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1674-0610



主办:湖南省交通科学研究院

# 目 次

	н 🔨			公路工程
科学研究				公阳工性
基于节段模型测振的钢丝绳吊索	紫尾流致振试验研究 黄 君, 李;	基盆 邓兰星 败政法	(1)	GONGLU GONGCHENG
基于全息变形和遗传算法的装置				全国中文核心期刊
泡沫铝外包混凝土桥墩防撞性能	能研究 ······· 刘 ä	每证,李 睿,徐 征	(13)	RCCSE中国核心学术期刊
公路特长隧道互补式通风模式的	的火灾安全性研究 :·········· 方』 首地表沉降和围岩稳定的影响研究	<b>剪刚,王文星,郑国平</b>	(18)	中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
		东伟, 段东明, 武晋文	(22)	中国科技期刊网入网期刊
长沙地区超大断面暗挖地铁车站	站隧道结构断面形式的研究	何翊武, 傳鶴林	(30)	双月刊 1975 年创刊
套环四肢钢管混凝土格构在轴心 基于主应力迹线的有限土挡墙等	心受压承载力试验研究 主动土压力计算方法 黄	居西拜,初 作 鑫,曹文贵,刘 涛	(41)	STATE OF THE STATE
耐震时程法在钢 - 混混合结构中	中的应用	马国栋, 汪梦甫	(48)	
连续增大流量作用下泥石流冲刷	制起动实验研究 	学艺,陈发明,陈宝成	(54)	出版日期 2019 年 8 月 20 日
基于活化温度的橡胶沥青流变质 基于灰色关联与 Apriori 算法的	及微观性能研究 方 道路交通事故数据分析	烁,张广泰,叶 奋	(63)	主 管 单 位 湖南省交通运输厅
	·················· 江 山,宋 变形及抗紫外老化性能影响 ··· 程力			主办单位
集料粉尘对环氧沥青混合料强度			Trice Manager	湖南省交通科学研究院
系统最优的综合客运枢纽动静态	态配流模型 张显尊, 刘	瑛,周雪梅,姚 翔	(84)	本刊编委会
工程设计		and the same		主 任 委 员 吴亚中
基于 LS - DYNA 的偶数跨刚构		台灣 計 姓 赵 华	(90)	副 主 任 委 员 (以姓氏笔画为序)
风荷载作用下悬索桥受力分析与	····· 周亮福, 皂振涛, 李 杰, 胡信 与静风稳定性研究 ······	义化,杜 钦,处 干 黄 浩	(98)	万剑平 王 维 杨航宇
NURBS 曲线在隧道断面拟合及	变形中的应用研究 张	超,高新闻,熊 诚	(103)	郑健龙(院士) 赵明华
	【人口段软弱岩石力学及变形特性研		(108)	龚晓南(院士) 彭建国 蔡 长
高速公路观景台与中央隔离带队	坊眩设计 李	字坤, 苑剑英, 谢维嘉	(113)	委 员(以姓氏笔画为序)
土质边坡失稳破坏的双安全系数重庆市公路典刑路段交通安全位	数稳定性分析方法 刘 防真评价与安全	燕燕, 李修嘉, 冯明珠 赵安岭, 张建旭	(118)	卫 军 李志勇 肖汝诚 陆化普
季冻区绿色公路建设技术管理包	创新与实践			邵旭东 张建仁 施耀忠 徐 岳
	·····································		(130)	徐 建 黄立葵 黄晓明 符锌砂
施工技术	Y M IN CHANGE OF THE PARTY OF T		Diego.	曾梦澜 廖朝华
基于 BENTLEY 的桥梁快速智能	建造 BIM 系统解决方案研究			特 邀 编 委 (以姓氏笔画为序)
	张裕超, 曾绍武, 社		(140)	方联民 王解军 宁夏元 刘银生
下承式系杆拱桥施工阶段受力和	特性研究 ····· 李 大桥主墩施工中的应用 ·······	艳凤,于 欢,包龙生 	(149)	胡柏学 赵等层 黄向京
地铁隧道施工对既有城市道路的	的影响研究	乔 丹,任其亮	(158)	顾 问(以姓氏笔画为序)
高速公路瓦斯隧道煤层超前探测 土石交界地质条件下浅埋隧道的	则与瓦斯检测方法 赵 的开控反应研究	训, 李树清, 黄 飞	(163)	王国鼎 朱若常 张起森 林 建
	孙文君, 薛少强, 肖	成志,宋 杨,孙文杰	(169)	程翔云
聚合物注浆技术在某二级公路方	水泥混凝土路面脱空病害治理中的原	应用 程俊夕, 周茗如	(174)	主 编 龚赛群
质量管理				责任编辑李 梓 唐 敏 欧阳新亚
	和水稳定性初探 类	亮, 牟善友, 李永振	(178)	出 版 单 位《公路工程》编辑部
乳化沥青厂拌冷再生路面等效用	厚度系数研究 杨彦海,张	东,张怀志,杨 野	(184)	地 址 湖南省长沙市芙蓉中路三段 472 号
	研究 ········ 养护效益评价 ······· 马 磊, 董		(189)	电 话 (0731 )85221546
布袋灌注桩技术在软土路基处理	理工程中的应用研究	杨 慧,胡 隽	(202)	邮 编 410015
建筑垃圾在公路路基中的再生质	应用研究 ······ 因素分析 ·······		(208)	网址
精表处技术在公路沥青路面预图		1,=(1	( )	http://glgc. periodicals. net. cn/default. html
基于灰色系统理论的沥青路面包			(217)	E-mail glgczz@163.com
	·····································		(221)	印刷单位湖南敦昊彩色印务有限公司
	陷机理及防治措施研究 周		(232)	发 行 单 位 湖南省报刊发行局
其他				发 行 范 围 国内外公开发行
	助组合钢箱梁的应用研究 首		(239)	刊 号 ISSN 1674 - 0610 CN 43 - 1481/U
浅埋盾构隧道近接桩基础渗流质	析 ····································	张洪锋	(245)	广告发布登记号:湘广发登第 0072 号
匝道分合流点距匝道收费站安全	全间距研究	党 郷	(258)	国内邮发代号 42-301
雷达图法在干线公路城市过境; 高速公路高值方路提差呈河路	方案决策中的应用 ······ 特性研究 ······	····· 夏荽杰、程 玉	(264)	国外发行代号 Q 1870
沥青路面施工智能管控系统在包	佛山一环路面改造工程中的应用 …	刘新宇, 曾国东	(274)	国内定价20元
钢纤维在水泥基复合材料中粘线	结性能的研究进展 ······· 力学性能研究 ······	工术飞	(279)	
是巩上程型双任公路路基中的	ル子 II 肥 卯 允 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	工 条,工双展	(200)	

# JOURNAL OF HIGHWAY ENGINEERING

A Chinese Core Journal

A Statistic Source Journal of
Science and Technological Papers
in China

A Science and Technological Core Journal in China

Bimonthly since 1975 Vol. 44, No. 4 ( Serial No. 197)

August 20, 2019

Administration: Department of Transportation of Hunan Province

Sponsor: Hunan Communications research

Institute

Director: WU Yazhong

Associate Directors;

WAN Jianping

WANG Wei

YANG Hangyu

ZHENG Jianlong (Academician)

ZHAO Minghua

GONG Xiaonan (Academician)

PENG Jianguo CAI Chang

Chief Editor: GONG Saigun

Executive Editors: LI Zi TANG Min

OUYANG Xinya

Publishering Unit: Editorial Department of

Journal of Highway Engineering

Address: 472 Furong Road Middle, Section

3, Changsha, Hunan 410015, People's

Republic of China

Telephone: (0731) 85221546

Web site: http://glgc.periodicals.net.cn/default.html

E-mail: glgczz@163.com

Composing and Printing: Hunan Dunhao

Colour Printing Co. Ltd.

Distributor: Hunan Newspaper Board

Publication Code: ISSN 1674 - 0610 CN 43 - 1481/U

Domestic Distribution Code: 42-301

International Distribution Code: Q 1870

Domestic Price; 20 Yuan

#### CONTENTS

Meguerment of Segmental Models  mange Reintification of Prefehricans Stede-oncrete Composite Reum Based on Hologopaphic Deferrancial  mange Reintification of Prefehricans Stede-oncrete Composite Reum Based on Hologopaphic Deferrancial  mange Reintification of Prefehricans Stede-oncrete Composite Reum Based on Hologopaphic Deferrancial  mange and Carlos Alley of Bridge Pier with Aluminum Poam Outstourning Concrete  LIU Hainberg et al. (18 may on Road Transf Sadey in Case of Pier with Complementary Ventilation Model  Buried Soft Rock with Small-distance Turned  mange and Steder Steden			
Mequement of Segmental Models  mange Hentificiates Sect-concrete Composite Bram Band on Holographic Deformation and Genetic Algorithm  manage Hentificiates of Prefethricates Sect-concrete Composite Bram Band on Holographic Deformation and Genetic Algorithm  manage Hentificiates of Prefethricates Sect-concrete Composite Bram Band on Holographic Deformation and Genetic Algorithm  Mill And State of Tire with Complementary Ventificiates Mede  "TANG Towns and I all and a management of Markey Present Section Band Mede  "TANG Complement of Control Frence of Section I Frence of Long Angele Angele Mede  per Sectional Frence of Subservy Toronto-with Oversitied Sections to Changeha Area  "TANG Changhai et al. (22  unity on Stoorna's Sectional Frence of Subservy Toronto-with Oversitied Sections to Changeha Area  "TANG Changhai et al. (36  a Calculation Methods for Active Earth Frencer Against Retaining Wall of Sul' With Fisite With Band  on Principal Streas Trajectory  pulletation of Educations Time Method to Sectionary Tangent Change on the Present Against Retaining Wall of Sul' With Fisite With Band  on Principal Streas Trajectory  HUANG Xin et al. (4)  "TANG Changhai et al. (36  adaptais of Road Traffic Accident Data Band on Gery Relational Analysis and Apprint Algorith III. MNC Shan et al. (5)  adaptais of Road Traffic Accident Data Band on Gery Relational Analysis and Apprint Algorith III. MNC Shan et al. (6)  "FANG Shan of the Appliah III. Analysis of Sand Traffic Accident Data Band on Gery Relational Analysis and Appliah III. Analysis of Road Traffic Accident Data Band on Gery Relational Analysis and Appliah III. Analysis of Road Traffic Accident Data Band on Gery Relational Analysis and Sandriah III. Analysis of Sandriah III. Analysis	Scientific Research		
anage Mentification of Perfabricates Steel-concrete Composite Brean Based on Holographic Defarration and Genetic Algebriths	Experimental Investigation on Wake-induced Vibration of the Hangers of Wire Ropes Based on Vibration		
and Genetic Algerithm	Meqsurement of Segmental Models	1	
undy on Road Tumed Safey in Case of Fire with Complementary Ventilities Mode Buried Soft Rock with Small-distance Tumed Buried Soft Rock with Small Soft Buried Soft	and Genetic Algorithm SHAO Shuai et al. (		
### Studies of Rock October 10 Studies of St			
sudy on Stoutural Sectional Forms of Subwy Tunnels with Overnized Sections in Changaba Area	nfluence of Construction Methods on Surface Subsidence and Surrounding Rock Stability of Shallow		
Acial Loads  — TANG Changhui et al. ( 36 a calculation Method for Active Earth Pressure Apinas Retaining Wall of Sail Will Finite Wildth Based on Principal Stress Trajectory  — HUANG Xin et al. ( 41 sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow  — LU Wei et al. ( 54 sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow  — LU Wei et al. ( 54 sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow  — LU Wei et al. ( 54 study on Rheological and Microscopic Progressies of Rubbertlow Apphals Based on Activations Temperature ( 74 sperimental Study on Anti-permanene Deformation and Anti-UV Ageing Performances of DeUt Medited Apphals Water ( 74 spinal) Mixture  — May Calculated Temperature ( 75 sperimental Study on Anti-permanene Deformation and Anti-UV Ageing Performances of DeUt Medited Apphal Water ( 75 sperimental Study on Active Progression Continuous Ream Bridge Coupling Vibration of Even Span Rigid Frame-continuous Beam Bridge Based on LS-DYPA ( 75 sperimental Study on Mechanics and Deformation of Even Span Rigid Frame-continuous Beam Bridge Based on LS-DYPA ( 75 sperimental Study) on Mechanics and Deformation ( 75 sperimental Study on Mechanics and Deformation Characteristics of Weal Rock at the Entrance Section of Highway Depletion of WURS Curves in Tumod Section Fitting and Deformation ( 75 sperimental Study on Mechanics and Deformation Characteristics of Weal Rock at the Entrance Section of Highway Characteristics of Michael Study on Mechanics and Deformation Characteristics of Weal Rock at the Entrance Section of Highway Characteristics of Highway Characteristics of Thomps of Michael Study on Michael Study on Michael Study on Michael Study on Expressory Science Platform and Central Indaina Zoned	itudy on Structural Sectional Forms of Subway Tunnels with Oversized Sections in Changsha Area HE Yiwu et al (		
on Principal Stress Trajectory  HIANG Xin et al ( 44 sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow  MA Guodinger and ( 45 sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow  LI Wei et al ( 54 may on Reheadpoint and Microscopic Properties of Rubberford Apath Based an Activation Temperature  Analysis of Road Traffic Accident Data Based on Gery Relational Analysis and Apriant Algorith  JIANG Shap et al ( 65 daphal)  Apalysis of Road Traffic Accident Data Based on Gery Relational Analysis and Apriant Algorith  JIANG Shap et al ( 74 daphal)  Weitington the Influence of Aggregate Powder on the Strength and Faitige Performances of Epoxy Apalah Mixture  XU Wei et al ( 79 system Optimization-Based Studie and Dynamic Flow Assignment Model of Passenger Terminal  ZHANG Xianum et al ( 61 Englineering Design  Englineering Design  Englineering Design  Design  Design Charles on Static Wind Stability and Stress Analysis of Suspension Bridge under Wind Load   BUANG Rate et al ( 19 Syrvax  ZHOU Liangfu et al ( 90 secarch on Static Wind Stability and Stress Analysis of Suspension Bridge under Wind Load   BUANG Rate et al ( 19 July on Michanics and Deformation Characteristics of Weak Rock at the Entrance Section of a Highway  Tumed Based on MIDAS-CTS  ZHOU Middle Stress in Tumed Based on MIDAS-CTS  ZHOU Middle Stress in Tumed Based on MIDAS-CTS  ZHOU Middle Stress in Tumed Based on MIDAS-CTS  ZHO Commentation and Pactics of Technology and Management for Gereen Highway Construction in Season and Carter and Central Industrial Carden   Fine Region   CHANG Chang and Management for Gereen Highway Construction in Season   CHANG Chang and 112 for Construction of Pacty Permandent   Subgade   CHANG Chang and Linguistic Construction on Season of Pacty Permandent   Subgade   CHANG Chang and Linguistic Construction on Season in Changing   Fine Region   CHANG Chang and Linguistic Construction on Stabing Construction Stage   LI Yandre and   Fine Re	Axial Loads TANG Changhui et al (	36	
sperimental Study on Scouring and Initiation of Debris Flow with Continuous Increase of Waterflow	on Principal Stress Trajectory		
undy on Rheological and Microscopic Properties of Rubbertreed Asphain Based on Activation Temperature  FANG Shuo et al. ( 67  alajvia of Road Traffic Accident Data Based on Gery Relational Analysis and Aprient Algorith			
alsysis of Road Traffic Accident Data Based on Gery Relational Analysis and Aprion Algorith	study on Rheological and Microscopic Properties of Rubberized Asphalt Based on Activation Temperature		
Aughalt Mixture  **Eventigate en the Influence of Aggregate Powler on the Strength and Fatigue Performance Epoxy Asphalt Mixture  **XU Wei et al (79 yearen Optimization-Based Statie and Dynamic Flow Assignment Model of Passenger Terminal	nalysis of Road Traffic Accident Data Based on Grey Relational Analysis and Apriori Algorith JIANG Shan et al (		
restigate on the Influence of Aggregate Powder on the Strength and Fatigue Performance of Epuxy Apphalt Misture		74	
Engineering Design  chiele-bridge Coupling Vibration of Even Span Rigid Frame-continuous Beam Bridge Based on LS- DYNA  ZHOU Liangfie et al ( 90  cesearch no Static Wind Stability and Stress Analysis of Suspension Bridge under Wind Laad HUANG Hao ( 98  publication of NURBS Curves in Tunnel Section Fitting and Deformation — ZHANG Chao et al ( 103  undy on Mechanics and Deformation Characteristics of Weak Rock at the Entrance Section of a Highway  Tunnel Based on MIDAS/GTS — ZHU Xiaoxiao et al ( 108  ntiggare Design of Expressary Scenic Platform and Central Isolation Zonei — LI Yuulen et al ( 113  tability Analysis Method for Double Safety Factors of Soil Slope Fallure — LIU Yaupan et al ( 113  tability Analysis Method for Double Safety Factors of Soil Slope Fallure — LIU Yaupan et al ( 113  practice Safety Situation Evaluation and Safety of Typical Road Sections in Chengqing — ZHAO Almig et al ( 124  novation and Practice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal  Practice Safety Situation Evaluation and Safety of Typical Road Sections in Chengqing — CAO Shuushan et al ( 130  unserical Simulation Analysis on Annual Periodic Vertical Thermal Displacement of Patchy Permafrost  Subgrade — ZHANG Yuchao et al ( 140  undry on Mechanical Characteristics of Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage — LI Annual Control of Bridge — LI Yaufeng et al ( 140  undry on Mechanical Characteristics of Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage — LI Yaufeng et al ( 140  undry on Brotz-growing Growing Technology in Construction of Main Pier of a Special Bridge in  Guanglong  dudy on the Inflaence of Subway Tunnel Construction on Existing Urban Roads — QIAO Dan et al ( 158  dynaced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel  dudy on Evacation Reaction of Shallow Tunnel Under the Boundary Condition of Soil and Rock — SUN Wenjun et al ( 169  pplication of Polymer Growing Technology in Treatment of Cavitation Diseases of Cement Concrete  rength and Water Stability of Compou	nvestigate on the Influence of Aggregate Powder on the Strength and Fatigue Performance of Epoxy		
chicle-bridge Coupling Vibration of Even Span Rigid Frame-continuous Beam Bridge Based on LS-DYNA	그림안에 가장 보면 있었다고 있는 아이들이 되었다면 하고 있다면 하고 있다면 하는데 얼마나 되었다. 그렇게 되었다면 하는데 하는데 얼마나 되었다면 하는데 얼마나 되었다면 하는데 얼마나 되었다. 그렇게 하는데 얼마나 없는데 얼마나 되었다면 하는데 되었다면 되었다면 되었다면 되었다면 되었다면 되었다면 되었다면 되었다면		
DYNA escarch on Staile Wind Stability and Stress Analysis of Suspension Bridge under Wind Load	Engineering Design		
search no Static Wind Stability and Stress Analysis of Saupension Bridge under Wind Load	chicle-bridge Coupling Vibration of Even Span Rigid Frame-continuous Beam Bridge Based on LS-		
pplication of NURS Curves in Tunnel Section Fitting and Deformation — ZHANG Chao et al (103 tudy on Mechaniss and Deformation Characteristics of Weak Rock at the Entrance Section of a Highway Tunnel Based on MIDAS/CTS — ZHU Xiaoxiao et al (108 nti-glare Design of Expressway Secine) Platform and Central Isolation Zonei — LIU Yaushen et al (118 raffic Safety Simulation Evaluation and Safety Factors of Soil Slope Failure — LIU Yaushen et al (118 raffic Safety Simulation Evaluation and Safety of Typical Road Sections in Chongqing — ZHAO Anling et al (124 nonzetion and Tractice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal Evaluation and Safety of Typical Road Sections in Chongqing — ZHAO Anling et al (130 umerical Simulation Analysis on Annual Periodic Vertical Thermal Displacement of Patchy Permafrost Subgrade — CHANG Jiffeng et al (135 COnStruction Technology — CHANG Jiffeng et al (140 tudy on Mechanical Characteristics bif Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage — LI Yaufeng et al (140 tudy on Mechanical Characteristics bif Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage — LI Yaufeng et al (140 pplication of Post-grouting Grouting Technology in Construction of Main Pier of a Special Bridge in Ganagdong — YANG Zhanqun (154 udv) on Bechanical Characteristics bif Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage — LI Yaufeng et al (140 udv) on the Influence of Subway Tunnel Construction on Existing Urban Roads — QIAO Dan et al (158 dvanced Detection of Coal Seam and Methano Detection in Highway Gas Tunnel — ZHAO Xun et al (158 dvanced Detection of Coal Seam and Methano Detection in Highway Case Tunnel — ZHAO Xun et al (163 udv) on Execution Reaction of Shallow Tunnel Under the Boundary Condition of Sui and Rock — SUN Wenjun et al (169 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Gavitation Diseases of Genent Concrete Pervennent of a Class II Highway — Characterism of Soil Substrade to Class II Highway — Characterism Probago in Treatment of Gavitation Diseases of Genent Conc			
Tunnel Based on MIDAS-CTS  ILY valsen et al. (138  ability Analysis Method for Double Safety Factors of Soil Slope Failure  LIU Valvan et al. (138  CAO Shuchan et al. (130  CHANG Rifeng et al. (130  CONSTRUCTION Technology  escarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of  Bridge  CHANG Rifeng et al. (140  CHANG Rifeng et	application of NURBS Curves in Tunnel Section Fitting and Deformation ZHANG Chao et al (		
inability Analysis Method for Double Safety Factors of Soil Slope Failure  Artific Safety Simulation Evaluation and Safety of Typical Road Sections in Chongqing  ZHAO Anling et al (124 novation and Practice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal  Frozen Region  CAO Shochan et al (120 novation and Practice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal  Frozen Region  CAO Shochan et al (120 novation and Practice of Technology  escarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of  Bridge  CHANG Jifeng et al (135 Construction Technology  escarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of  Bridge  ZHANG Yuchao et al (140 novation and Practice)  Wiley on Mechanical Characteristics of Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage  LI Yanfeng et al (149 pplication of Post-grouting Technology in Construction of Main Pier of a Special Bridge in  Guangdong	Tunnel Based on MIDAS/GTS ZHU Xiaoxiao et al (		
movestion and Practice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal Prozen Region			
Every Region unserviced Simulation Analysis on Annual Periodic Vertical Thermal Displacement of Patchy Permafrost Subgrade			
Construction Technology  escarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction  Bridge	novation and Practice of Technology and Management for Green Highway Construction in Seasonal	124	0
construction Technology escarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of Bridge	umerical Simulation Analysis on Annual Periodic Vertical Thermal Displacement of Patchy Permafrost		
secarch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of Bridge		13:	,
Bridge ZHANG Yuchao et al ( 140 tudy on Mechanical Characteristics of Through Tied-arch Bridge at Cogstruction Stage LI Yanfeng et al ( 149 pplication of Poat-grouting Grouting Technology in Construction of Main Pier of a Special Bridge in Guangdong YANG Zhanqun ( 154 tudy on the Influence of Subway Tunnel Construction on Existing Urban Roads QIAO Dan et al ( 158 dwanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel ZHAO Xun et al ( 163 tudy on Excavation Reaction of Shallow Tunnel Under the Boundary Condition of Soil and Rock SUN Wenjun et al ( 169 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Cavitation Diseases of Cement Concrete Pavement of a Class II Highway Gas Tunnel Characteristics of Heat Observable of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement Pavement of Stabilized Silt with Emulaified Asphalt Pavement Pavement Pavement Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement WANG Zhile ( 189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation WANG Zhile ( 189 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al ( 202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIUX i ( 208 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIUX i ( 208 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory IIN Ming et al ( 217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory IIN Ming et al ( 221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guirhen ( 225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al ( 239 et and Analysis of Dynamic Characteristics of Long-span Cable-stayed Bridge Theory Though City Node Yang Series Spacing Between	Construction rechnology		
tudy on Mechanical Characteristics of Through Tied-arch Bridge at Construction Stage LI Yanfeng et al (149 pplication of Post-grouting Grouting Technology in Construction of Main Pier of a Special Bridge in Guangdong YANG Zhanqun (154 dvanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel ZHAO Xunt et al (158 dvanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel ZHAO Xunt et al (169 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Cavitation Oiseases of Cement Concrete Pavement of a Class If Highway CHENG Junxi et al (179 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Cavitation Diseases of Cement Concrete Pavement of a Class If Highway CHENG Junxi et al (178 midd you for Equivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt FAN Liang et al (178 midd you for Equivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement Midd you for Equivalent area Method* for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation Male et al (189 "Step Equivalent area Method* for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation Male et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile Duly in 213 pplication of Fenchology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement Based on Grey System Theory Wang Office of Pavement Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory In Company of Pavement Maintenance of Pavement Based on Grey System Theory In Ming et al (221 mids) on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Cuizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunay on Properties of Polyphosphoric Acid Composite Steel Box Girder with Riba of Flat Bulb Steel Theory Theore	desearch Based on BENTLEY About BIM System Solution for Rapid and Intelligent Construction of	1.0	0
udy on the Influence of Subway Tunnel Construction on Existing Urban Roads dvanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel  ZHAO Xun et al (163 dvanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel  ZHAO Xun et al (169 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Cavitation Diseases of Cement Concrete Pavement of a Class II Highway  CHENG Junxi et al (174  Quality Control and Quality Assurance  rength and Water Stability of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt  General Asphalt Favement  YANG Yanhai et al (184 esearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement  "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation  MA Lei et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project  And Harpington Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade  LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile  DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance Of Highway Asphalt Pavement  GOU Jing et al (217 esearch on Herofromance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey  System Theory  JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture  WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway  ZHOU Guanxue et al (239 est and Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge  Tannel  ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station  DANG Na (258 esign for Zhaohus Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs  of Flat Bulb Steel  ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station  DANG Na (258 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Emban			
dvanced Detection of Coal Seam and Methane Detection in Highway Gas Tunnel			
undy on Excavation Reaction of Shallow Tunnel Under the Boundary Condition of Soil and Rock SUN Wenjun et al ( 169 pplication of Polymer Grouting Technology in Treatment of Cavitation Diseases of Gement Concrete Pavement of a Class II Highway CHENG Junxi et al ( 174 CHENG Junxi et al ( 174 CHENG Junxi et al ( 174 Quality Control and Quality Assurance)  trength and Water Stability of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt FAN Liang et al ( 178 and yo nequivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement YANG Yanhai et al ( 184 esearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement WANG Zhile ( 189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al ( 195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al ( 202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU X; ( 208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi ( 213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al ( 217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory Jin Ming et al ( 221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen ( 225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al ( 239 est and Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield Tunnel ZHANG Hongfeng ( 250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na ( 258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node Theorems on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei ( 279 esearch Progress on Bonding Properties of Steel F			
Quality Control and Quality Assurance  rength and Water Stability of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt FAN Liang et al (178 undy on Equivalent Thickness Coefficient of Emulaified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement YANG Yanhai et al (184 csearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement WANG Zahile (189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al (195 pilication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 csearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU Xi (208 undy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 essearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey  System Theory IIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Ita Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel ZENG Manliang et al (232 Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Tunnel ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City  Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 udy on Differential Settlement Characteristics of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279	tudy on Excavation Reaction of Shallow Tunnel Under the Boundary Condition of Soil and Rock SUN Wenjun et al (		
rength and Water Stability of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt FAN Liang et al (178 udy on Equivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement YANG Yanhai et al (184 esearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement WANG Zhile (189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics  Miscellaneous Topics  Seign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel ZENG Manliang et al (239 est and Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge TANG Yan (245 tefty Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield Tunnel ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 udy on Differential Settlement Characteristics of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279 esea		174	4
rength and Water Stability of Compound Stabilized Silt with Emulaified Asphalt FAN Liang et al (178 udy on Equivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement YANG Yanhai et al (184 esearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement WANG Zhile (189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics  Miscellaneous Topics  seign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel ZENG Manliang et al (239 est and Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge TANG Yan (245 tefty Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield Tunnel ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 udy on Differential Settlement Characteristics of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279 esea	Quality Control and Quality Assurance		
nesearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement YANG Yanhai et al (184 esearch on Material and Structure of Self Heat Dissipating Asphalt Pavement WANG Zhile (189 "Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade L1UX (208 esearch on the Application of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DUY (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory WANG Guizhen (225 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Steel Steel Steel Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Tanhalysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge Tanhalysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield Tunnel ZHANG Hongfeng (250 tudy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 tudy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in Foshan City LIU Xinyu et al (274 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279		171	
"Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation MA Lei et al (195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel ZENG Manliang et al (239 est and Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge Tank Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 epilication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in Foshan City WANG Shufei (279 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites	tudy on Equivalent Thickness Coefficient of Emulsified Asphalt Central Plant Cold Recycling Pavement		
"Step Equivalent area Method" for Pavement Maintenance Effectiveness Evaluation Marchine Marchine 195 pplication Research of Injection Pile Technology in Soft Soil Subgrade Treatment Project YANG Hui et al. (202 esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade LUX (208 uddy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al. (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory JIN Ming et al. (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al. (232 Miscellaneous Topics esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Steel Steel Steel Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Steel Steel Steel Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel Tannel ZHANG Hongfeng (245 tudy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na. (245 uddy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na. (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia. (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al. (268 pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in Foshan City WANG Shufei (279 testarch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei. (279 testarch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites			
esearch on the Application of Construction Waste Regeneration in Highway Subgrade  LIU Xi (208 udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile  DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement  GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey  System Theory  JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture  WANG Guizhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway  Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel  TANG Yan (245 tefty Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge  TANG Yan (245 tefty Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield  Tunnel  ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station  DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City  Node  YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway  XIA Yingzhi et al (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway  LIU Xinyu et al (274 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites  WANG Shufei (279			
udy on Influencing Factors of Deformation of Soft Soil Roadbed Treated with Crushed Stone Pile DU Yi (213 pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement GOU Jing et al (217 esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory JIN Ming et al (221 tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture WANG Guirhen (225 tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of Liunan Railway ZHOU Guanxue et al (232 Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel ZENG Manliang et al (239 est and Analysis of Dynamic Charateristics of Long-span Cable-stayed Bridge ZHANG Hongfeng (245 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in Fosahan City WANG Shufei (279			
pplication of Fine Surface Technology in Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement			
sesarch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey System Theory			
tudy on Properties of Polyphosphoric Acid Composited Polymer Modified Asphalt and Its Mixture	esearch on Performance Prediction and Maintenance Decision of Asphalt Pavement Based on Grey		
Liuran Railway			
Miscellaneous Topics  esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel — ZENG Manliang et al (239  est and Analysis of Dynamic Characteristics of Long-span Cable-stayed Bridge — TANG Yan (245  fety Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield  Tunnel — ZHANG Hongfeng (250  udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station — DANG Na (258  pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City  Node — YANG Runxia (264  udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway — XIA Yingzhi et al (268  upplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in  Foshan City — LIU Xinyu et al (274  esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites — WANG Shufei (279	tudy on Ground Collapse Mechanism and Prevention and Control Measures of Fenghuang-Laibin of		
esign for Zhaohua Bridge in Xiangtan and Application Study on Composite Steel Box Girder with Ribs of Flat Bulb Steel			
of Flat Bulb Steel			
tety Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield Tunnel ZHANG Hongfeng (250 udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station DANG Na (258 pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node YANG Runxia (264 udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (268 pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in Foshan City LIU Xinyu et al (274 esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites WANG Shufei (279		239	,
udy on Safety Spacing Between Ramp Separation and Confluence Point and Ramp Toll Station	afety Analysis Considering Seepage-stress Coupling on Foundations Close Approach to Shallow Shield		
pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City Node			
udy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway	pplication of Radar Chart in Decision-making on Scheme of Arterial Highway Passing Through City		
Foshan City	tudy on Differential Settlement Characteristics of High Fill Embankment of Expressway XIA Yingzhi et al (		
esearch Progress on Bonding Properties of Steel Fiber in Cement-based Composites	pplication of Intelligent Control System for Asphalt Pavement Construction in the First Ring Road in  Foshan City LIU Xinyu et al. (	274	
udy on Mechanical Properties of Construction Waste in Highway Subgrade			

Doi:10.19782/j. cnki.1674 - 0610.2019.04.004

## 公路特长隧道互补式通风模式的火灾安全性研究

方勇刚1,王文星1,郑国平2

(1. 浙江省交通规划设计研究院 浙江 杭州 310006; 2. 浙江工业大学 浙江 杭州 3100141)

[摘 要]互补式通风是近年来出现的一种新型、节能的通风模式。为了研究和评估其在火灾工况下的安全性,采用火灾模拟软件 FDS 建立了隧道局部模型。根据设备性能及管理水平,设定联络风道内风机及风阀关闭时间为 120 s。然后分析了着火后相邻隧道内的火灾烟气蔓延规律、温度场分布以及能见度状况。分析结果表明:联络通道风阀关闭前,将会有少量烟气蔓延至相邻隧道,根据温度场和能见度场判断,影响程度在可控范围内;联络通道内风阀关闭后,相邻隧道不再受着火隧道影响。对照国际道路协会(PIARC)研究报告中的人员安全标准,互补式通风模式能满足火灾情况下的安全运营要求。

[关键词] 公路隧道; 互补式通风; 火灾安全性; 数值模拟

[中图分类号] U 458

[文献标志码] A

[文章编号] 1674-0610 (2019) 04-0018-04

### Study on Road Tunnel Safety in Case of Fire with Complementary Ventilation Mode

FANG Yonggang1, WANG Wenxing1, ZHENG Guoping2

(1. Zhejiang Provincial Communications, Planning Design & Research of Institute, Hangzhou Zhejiang 310006, China; 2. Zhejiang University of Technology Hangzhou Zhejiang 310014, China)

[Abstract] A new energy - saving ventilation mode called complementary ventilation is adopted recently. In order to study and evaluate the safety in case of fire, a part CFD model of the tunnel is established by using fire simulation software FDS. According to the equipment performance and management level, set the fan and air regulator closing time is 120 s. Then, the law of fire smoke spread, velocity field distribution, temperature field distribution and visibility condition in 600 s after fire are analyzed. The results show that before closing the air valve in contact channel, a small amount of smoke spreads to the adjacent tunnel. According to the temperature field and field visibility judgment, the effect is limited; After closing the air valve in contact channel, no longer subject to influence of tunnel adjacent tunnel fire. According to the safety standards of personnel proposed in the PIARC1999 Research Report, a complementary ventilation system can meet the requirements of tunnel safety operation in case of fire.

[Key words] road tunnel; complementary ventilation; fire safety; numerical simulation

#### 0 引言

随着我国经济的飞速发展,公路建设水平也显著提高,我国长大公路隧道建设项目日益增多,然

而隧道内发生火灾事故的频率也日益上升。由于隧道结构复杂、通风条件差、温度蔓延快、烟气毒性强、人员疏散和灭火救援难度大等特点,通常造成巨大的经济损失和人员伤亡。如 1999 年连接意法

<sup>[</sup>收稿日期] 2018-04-27

<sup>[</sup>基金项目] 国家自然科学基金面上项目(51678530);浙江省交通运输厅科研计划项目(2017035)

<sup>[</sup>作者简介]方勇刚(1978-),男,高级工程师,研究生,主要从事岩土工程、隧道工程方面的设计、咨询和科研工作。

<sup>[</sup>引文格式] 方勇刚,王文星,郑国平. 公路特长隧道互补式通风模式的火灾安全性研究[J]. 公路工程,2019,44(4):18-21,53.

FANG Y G, WANG W X, ZHENG G P. Study on road tunnel safety in case of fire with complementary ventilation mode[J]. Highway Engineering,2019,44(4):18-21,53.

两国的 Mont Blanc 隧道火灾、2001 年瑞士 St Gotthard 隧道均造成大量人员伤亡; 2014 年 3 月 1 日,我国山西晋城岩后隧道两辆运输甲醇的铰接列车追尾相撞,造成 40 人死亡、12 人受伤和 42 辆车烧毁,大火持续 73 h; 2017 年 5 月 9 日,山东省威海市陶家夼隧道交通事故引发车辆起火造成 13 人死亡; 2017 年 5 月 23 日,河北省保定市浮图峪 5 号隧道交通事故引发车辆在隧道燃爆,致 12 人死 3 人重伤。

调查表明,火灾事故中70%以上的伤亡都是 由烟气造成的,对特长公路隧道火灾时的烟气控制 显得尤为重要。近年来国内外学者针对隧道火灾开 展了大量研究, Wu 和 Bakar[1] 通过大量的实体试 验和模拟研究发现临界风速与火灾功率以和隧道断 面形状有关; Fumiaki Ura 等[2]、吴德兴等[3]采用 缩尺模型试验方法研究了隧道不同通风模式和不同 纵坡条件下的火灾烟气的运动模式、排烟效率; Wang 等[4-5]结合缩尺寸模型试验和烟羽流理论预 测隧道顶板的最高温度,得到回流长度均小于60 m; 赵冬<sup>[6]</sup>、Fan 等<sup>[7]</sup>采用 CFD 方法研究烟囱效应 对烟气纵向蔓延规律和沉降规律的影响。世界道路 协会 (PIARC) 在 1999 年发布了《Fire and Smoke Control in Road Tunnels》报告,提出了判断火灾场 景下司乘人员安全的标准, 其中包括热辐射量界限 值 2.0~2.5 kW/m2; 空气温度不高于80°C; 能见 度不低于15 m。

另一方面,公路隧道中通风系统设备的安装功率往往占总设备功率的比重最大。如,10 km 长的泥巴山隧道通风系统安装功率 6 500 kW,18.02 km 长的秦岭终南山更是达到 11 274 kW;欧洲学者 Dzhusupova 等<sup>[8]</sup>以 Drecht 隧道、Heinenoord 隧道、Benelux 隧道、Coen 隧道为样本,统计了各类设备的功率,其中通风系统的安装功率占 43.6%。为了降低隧道通风系统的安装及运营功率,瑞士学者 Berner 等针对通风负荷不均匀的特长公路隧道首先提出了双洞互补通风的概念;国内胡彦杰<sup>[9]</sup>、王亚琼<sup>[10]</sup>、夏丰勇<sup>[11]</sup>等以湖北省大别山隧道为依托,采用隧道通风模型试验和现场测试,研究了互补式通风隧道内的风速场、风压场和污染物浓度的分布规律。

然而,目前国内外学者对互补式通风的研究集中于通风方式的设计、换气量计算、运营可行性上,而对这种新型节能通风模式在火灾情况下的安全性尚未开展系统研究。因此,拟以浙江金华山特

长公路隧道为工程依托,建立隧道火灾燃烧数学模型,通过观测温度场、能见度、速度场等指标分析,对火灾烟气在双洞互补式通风条件下的蔓延特性以及控制规律进行研究。

#### 1 工程概况

金华山隧道右线设计长度 7 398 m, 左线设计长度 7 378 m。设计行车速度为 100 km/h, 建筑限界净宽 11 m, 净高 5 m, 结构净空断面积 72.66 m², 周长为 33.4 m。纵断面设计成坡率为 -1.1%的单向坡,远期 2038 年预测交通量为 45 126 pcu/d。设计火灾规模取为 30 MW,并按照同时发生一起火灾进行考虑。

互补式通风的基本原理是以纵向通风系统为基础,在上下坡隧道之间的适当位置设置2条用于空气交换的联络风道,将原本独立的2隧道连通构成一个整体网络进行通风设计,利用了上下行隧道存在较大的浓度和需风量差异,用下坡隧道中的低浓度空气去稀释上坡隧道中的高浓度空气,巧妙地解决了某些上坡隧道需要修建竖井或斜井并配置大功率通风设备以解决通风的问题。

因此,为了降低金华山隧道通风系统的设施规模,采用互补式通风作为正常营运通风模式。即在靠近隧道小里程端洞口约1800m位置设置一对纵向间距为100m、呈反对称分布的互补式通风联络道,风道投影长度约为38m,采用侧面吸风、拱顶送风的方式,一般段净宽5m、净高4.5m,根据设备安装需要局部设置成变截面(见图1、图2)。根据计算,设计互补风量取为160m³/s。特长公路隧道在通风设计时必须考虑火灾对策,为了满足火灾烟气在隧道内的最大行程不超过5km的要求,在靠近隧道中点位置设置一处直径仅5m的排烟竖井。

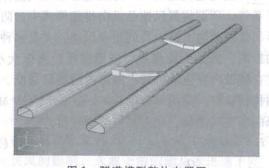


图 1 隧道模型整体布置图 Figure 1 Overall diagram of tunnel model

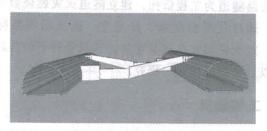


图 2 隧道横截面模型图

Figure 2 Cross section of tunnel of model diagram

#### 2 火灾分析模型及工况设置

为了研究和评估互补式通风模式在火灾工况下的安全性,采用 FDS (Fire Dynamic Simulator) 6.0 软件建立了火灾分三维析模型进行模拟分析。该软件是由美国国家标准技术研究所 (NIST) 研发并被世界各国广泛采用的计算流体力学软件,采用大涡模拟湍流,并对湍流进行了有效的简化。

为了减少模型的网格数量,提高分析效率,根据隧道结构设计参数截取互补式联络通风道附近300 m长度建立 CFD 模型,两端采用格栅的局部损失来模拟模型以外部分隧道的沿程损失。

根据 FDS 软件大涡模型中火焰特征长度  $D^*$  的计算公式:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 T_0 C_p \sqrt{g}}\right) \tag{1}$$

式中: Q 是火源功率, kW, 依托工程取为 30 000 kW;  $\rho_0$  是空气密度,  $kg/m^3$ , 取 1. 293  $kg/m^3$ ;  $C_p$  是空气比热容,  $kJ/(kg \cdot K)$ , 取 1. 0  $kJ/(kg \cdot K)$ ;  $T_0$  是环境温度, K, 取 298. 16 K; g 是重力加速度,  $m/s^2$ , 取 9. 8  $m/s_0$ 

因此,FDS 中要求  $D^*/dx$  (网格尺寸) 应当在  $4 \sim 16$  之间。根据设计火源功率可得  $D^*=3.7$ ,即 dx 应当在  $0.23 \sim 0.93$  m 之间,模型中取 dx=0.5 m,总网格数为 46 万。

对两座隧道模型的入口分别施加临界风速作为 边界条件。所谓临界风速是纵向排烟模式中、防止 烟雾回流并威胁上游人员的最小风速,并受多种因 素的影响,例如火灾规模、隧道坡度、火源大小、 火灾在隧道内发生的位置、隧道内的通风情况、隧 道结构特征等。采用 Wu 和 Baker 公式计算 30 MW 火源的临界风速值,代入相应数据可得到:

$$\overline{H} = 4A/P \tag{2}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} \overline{H}^{5/2}}$$
 (3)

$$v^* = \frac{v_{cr}}{\sqrt{g \, \overline{H}}} \tag{4}$$

当 Q \* < 0.20 时, v \* = 0.40(0.20) $^{-1/3}$  Q \*  $^{1/3}$  ; Q \*  $\geqslant$  0.20 时, v \* = 0.40 。

式中: A 为隧道横截面面积, m², 取为 72.66 m²; P 为隧道湿周长, m, 取为 33.4 m; H 为隧道水力高度, m, 可算得 8.7 m; Q\* 为无量纲热释放速率; 其余参数同公式(1)。从而得到本隧道理论的理论临界风速为 3.1 m/s, 此值也满足我国《公路隧道通风设计细则》中采用纵向排烟及火源功率为 30 MW 时临界风速取 3~4 m/s 的要求。

同时,在2个联络通道中分别设置风阀,根据监控系统联动控制要求及风阀的性能参数,在火灾发生60 s 内风阀即可关闭。保守起见,模拟分析时设定120 s 后风阀关闭,两个隧道的气流不再联通。火源放置在右线隧道的中心,采用木材作燃料,根据世界道路协会(PIARC)及我国《公路隧道通风设计细则》中对于30 MW 火源功率产烟率的要求,设置产烟率为5%,总产烟率约为80 m³/s。然后,在两个隧道的中心,沿纵向方向设置温度、浓度、速度和能见度切片,观察隧道内烟气的运动规律。分别在两个隧道的中心线、1.5 m 高度处,每间隔5 m 设置一个温度测点,记录温度的分布和变化。工况设置示意图见图3。

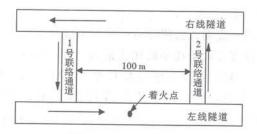


图 3 工况设置示意图

Figure 3 Schematic diagram of working conditions

#### 3 模拟结果分析

#### 3.1 烟气蔓延状况特性分析

图 4 为火灾发生后 10 min 内隧道内部烟气变化图。火灾发生 30 s 时,受到纵向风速的影响,烟气开始向下游蔓延,但整个过程没有出现烟气回流,说明设定的临界风速大小是合适的。烟气经过联络通道后开始向相邻隧道蔓延;120 s 时,联络通道风阀关闭,烟气不再向相邻隧道蔓延,此时烟气已经蔓延至模型左侧边界,据推算约蔓延 270 m 左右,但是在横断面上有良好的分层,烟气集中在

隧道路面2m以上,即司乘人员的视线高度以上。

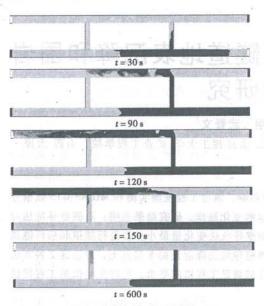


图 4 火灾烟气蔓延云图

Figure 4 Schematic diagram of fire smoke spread

#### 3.2 温度场分析

图 5 为火灾发生后 10 min 内温度场变化过程。 火灾发生 90 s 时,受到纵向风速的影响,火源下游的温度迅速升高,由于联络通道的作用,相邻隧道局部有温升;120 s 时,联络通道风阀关闭,未着火隧道不再受着火隧道的影响,温度迅速降低;着火隧道内由于纵向通风的影响,火源下游的温度迅速升高,上游温度始终保持在 20 ℃。

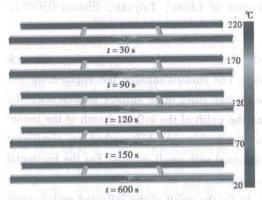


图 5 火灾烟气温度场云图

Figure 5 Schematic diagram of fire smoke temperature field

图 6 为着火隧道 1.5 m 高度处的温度分布图。可见,火灾发生后,火源下游温度迅速升高,90 s 时温度分布达到稳定状态,上游温度维持在  $20 \, ^{\circ}$ 、下游温度维持在  $50 \, ^{\circ}$  C 左右,约有  $50 \, ^{\circ}$  加范围的温度超过  $80 \, ^{\circ}$ 。

图 7 为未着火隧道中 1.5 m 高度处, 联络风道 附近各控制点温度随时间的变化曲线。可见, 最高

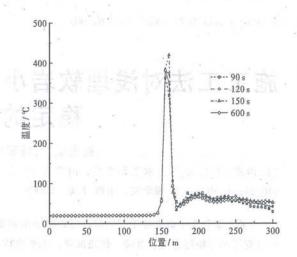


图 6 着火隧道高度 1.5 m 处温度分布曲线
Figure 6 Temperature distribution curve at the height of 1.5 m
at the height of a fire tunnel

温升小于 21 ℃,风阀关闭后,各测点温度迅速恢复到室温。所以由温度场分析,风阀在发生火灾后迅速关闭,可以保证一条隧道起火时,其相邻隧道中并没有明显的温升现象。

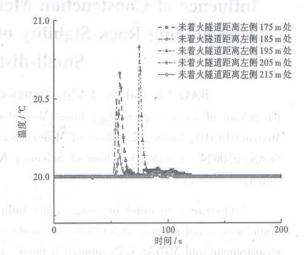


图 7 相邻隧道 1.5 m 高度处温度变化曲线
Figure 7 Temperature change curve at the height of 1.5 m in adjacent tunnel

#### 3.3 能见度分析

图 8 为火灾发生后 10 min 内能见度的变化过程。火灾发生 90 s 时,受到纵向风速的影响,着火隧道内火源下游的能见度迅速下降至 15 m 以下。由于联络通道的作用,相邻隧道局部能见度降低至 15 m 左右,纵向长度最大时约为 150 m,横断面上稳定在路面高度 2 m 以上;120 s 时,联络通道风阀关闭,未着火隧道不再受着火隧道的影响,能见度迅速升高,恢复到 30 m 以上;着火隧道内由于纵向通风的影响,火源下游的能见度迅速下降,能

[C]// 工程防震减灾新技术、新进展和新应用. 2016.

- [5] 狂梦甫, 龙思. 高层钢一混凝土混合结构抗震分析的耐震时程方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(4):1-11.
- [6] 王孝军, 霍正存, 马山明. 钢混混合桥梁结构等效阻尼比的 推算[J]. 公路工程, 2009, 34(1):81-83.
- [7] 杜修力, 贾鹏, 赵均. 水平双向加载条件下钢筋混凝土核心 筒抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10):47 -52.
- [8] 侯炜. 基于增量动力分析的钢筋混凝土核心筒抗震性能分析 与评估[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3):121-127.
- [9] 张令心,徐梓洋,刘洁平,等.基于增量动力分析的超高层混合结构地震易损性分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):19-25.
- [10] 王朋, 史庆轩, 田建勃,等. 双向地震作用下框架 核心筒结构 受力性能研究[J]. 建筑结构, 2016(sl):340-346.

#### (上接第21页)

见度不足 10 m,上游能见度始终保持在 30 m。所以由能见度分析,风阀在发生火灾后迅速关闭,可以保证在一条隧道起火时,其相邻隧道能见度几乎不受影响,可以确保其安全性。

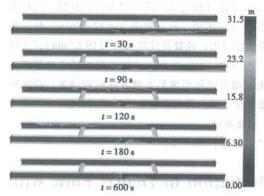


图 8 火灾烟气能见度变化云图 Figure 8 Diagram of fire smoke visibility

#### 4 结语

双洞互补通风模式由于其新颖性导致其发生火 灾时的通风排烟安全性需要进行深入的研究。为 此,利用计算流体动力学软件 FDS 建立了特长双 洞公路隧道火灾三维模型,基于数值模拟分析方 法,并根据设备联动控制时间设定火灾发生 120 s 时关闭风阀,研究了双洞互补式通风中火灾烟气的 蔓延规律、温度场、能见度场等,研究结果如下:

- a. 由于隧道中有纵向临界风速,因此火灾烟气迅速向下游蔓延。联络通道风阀关闭前,部分烟气通过联络通道蔓延至相邻隧道,但在横断面上有良好的分层,烟气集中在隧道路面2m以上,即司乘人员的视线高度以上。
- b. 就温度而言,相邻隧道的最高温度小于 21 ℃,风阀关闭后,各测点温度迅速恢复到室温。
- c. 从能见度场来看,相邻隧道局部能见度降低至15 m左右,纵向长度最大时约为150 m,横

断面上稳定在路面高度 2 m 以上。

d. 火灾发生后 120 s 时, 联络通道内的风阀迅速关闭, 未着火隧道将不再受着火隧道影响。

综上所述,并对照 PIARC1999 报告提出的人员安全标准,采用互补式通风模式能满足火灾情况下的安全运营要求。

#### [参考文献]

- WUY, BAKAR MZA. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity
   Fire Safety Journal, 2000, 35(4):363-90.
- [2] Fumiaki Ura, Nobuyoshi Kawabata, et. al.. Characteristics of smoke extraction by natural ventilation during a fire in a shallow urban road tunnel with roof openings[J]. Fire Safety Journal, 2014, 67: 96-106.
- [3] 吴德兴,徐志胜,李伟平.独立排烟道集中排烟系统研究——公路隧道火灾烟雾控制[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] Y. F. Wang, X. F. Sun, B. Li, et. al. . Small scale experimental and theoretical analysis on maximum temperature beneath ceiling in tunnel fire with vertical shafts [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114(5) March 2017, 537 - 544.
- [5] Y. F. Wang, X. F. Sun, Sh. Liu, et. al.. Simulation of back layering length in tunnel fire with vertical shafts [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109:344-350.
- [6] 赵冬,周汝. 烟囱效应作用下竖井型隧道火灾时的烟气扩散 [J]. 消防科学与技术. 2013, 32(7):724-727.
- [7] C. G. Fan, Zh. F. Jin, J. Q. Zhang, et. al. Effects of ambient wind on thermal smoke exhaust from a shaft in tunnels with natural ventilation [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117, 254 - 262.
- [8] R. Dzhusupova, J. F. G. Cobben, W. L. Kling. Zero energy tunnel: Renewable energy generation and reduction of energy consumption [C]. 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, 2012:1-6.
- [9] 胡彦杰,邓敏,杨涛. 双洞互补式通风在大别山隧道中的应用研究[J]. 交通科技,2011,(2):56-60.
- [10] 王亚琼,蒋学猛,武义凯,等. 公路隧道双洞互补式通风适用性分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):14-22.
- [11] 夏丰勇,王亚琼,谢永利.公路隧道双洞互补式通风的设计方法与试验[J].公路交通科技,2015,32(3):103-108.

# 我将理工大学学报

全国优秀科技期刊 全国高校优秀学报 中国科技核心期刊

# 交通科学与工程版

第43卷 第2期 Vol.43 No.2

JOURNAL OF WUHAN
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
(TRANSPORTATION SCIENCE
& ENGINEERING)

ISSN 2095-3844

2019 WUHAN CHINA

## 目 次

低等级公路行车环境协调性评估技术研究	陈雨	陈雨人(183)
杭绍台高速公路特长隧道通风系统设施规模集约化研究 李伟平 吕俊平 冯 劲	郭霄	郑国平(188)
波纹夹层结构耐撞性影响因素分析	徐荣康	许明财(192)
基于 GWR 的城市轨道交通车站客流预测模型 程国柱	周林芳	徐慧智(198)
基于合作协同演化算法的斜拉桥索力优化	康俊涛	李 豪(204)
基于 Rasch 模型的公交服务质量研究	刘建荣	曹江昱(208)
基于 Spark 算法的船舶尾气排放实时计算方法研究		
	周春辉	张哲源(213)
基于二维云模型的桥梁施工风险评估 姜增国	吴 壮	张孝千(218)
基于 XFEM 的平板斜裂纹动态扩展数值模拟	杨平	柯叶君(222)
沥青混凝土道路温度主动控制实验与数值模拟研究	李婷婷	刘 洋(226)
基于 Xgboost 算法的共享自行车短时需求预测研究	张筑杰	王晓晴(231)
基于粒度划分的内河集装箱船全航线配载研究	张 煜	李 俊(236)
基于不同车轮联轴荷载的横隔板弧形缺口位置受力差异分析 何翠颖 傅中秋	赵嘉玮	孔祥明(242)
居民定制公交出行意愿影响因素分析 简奕灿	张 瑾	晋 松(247)
矿砂船舱口间甲板结构的横向强度评估	潘曼	朱 凌(253)
快速路组合匝道几何设计研究	张东明	周雪梅(258)
斜流中螺旋桨的水动力性能研究 胡 洋	胡健	刘亚彬(262)
一种 AUV 发射体发射操纵模型的简化方法 张焕清 石 英 牟军敏	谢凌云	罗佳齐(269)
基于自适应重组遗传算法的动力定位船舶水动力参数辨识 蒋 帆 徐海祥	余文瞾	李文娟(276)
城市公交空间公平性评估方法研究	陈方	李 武(281)
聚类算法在船舶能效数据挖掘中的应用 高梓博 杜太利	张 勇	黄连忠(286)
低碳约束下中国物流业全要素能源效率评价 江雨珊	戢晓峰	李杰梅(291)
新型高速 M 型船强度计算研究	徐峰	郑绍文(296)
基于 VSIMM-CKF 的机场场面运动目标跟踪 ······	孙寿宇	宫淑丽(300)
基于时间窗与优先级的网络共享停车匹配模型 路 扬 何胜学	王冬冬	高 蕾(306)
基于贝叶斯网络的船舶发电机运行过热故障分析 张仲懿	姚玉南	梁 言(311)
剪切压实仪压实均匀性研究 李伟聪	龚侥斌	李 浩(316)
兰渝运输通道内多种运输方式客流分担率研究 李文霞 张春民 李 卓	李家宝	潘 帅(321)
钻井船型线优化及月池附加阻力研究 张 琪 陈 鸧 张利军	曹凯	段 菲(327)
有机化改性镁铝型 LDHs 对 SBS 改性沥青抗老化性能影响		
宋 伟 吴少鹏 周震宇 李元元	李贺川	崔树华(332)
滑行艇静水性能试验研究 申云磊	高霄鹏	罗富强(337)
浇注式沥青混合料施工流动性研究		刘 克(341)
基于元胞自动机的收费通道通过能力仿真		杨家其(346)
基于空间滞后模型的出租车需求影响因素分析 张 自 荷		吴 瑞(351)
预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析 类 泽	曾明辉	胡志坚(357)
基于折衷规划的客车电池箱结构多工况拓扑优化 关俊山 杨大鹏		王进军(363)
过湿冰水堆积土路基填料掺灰改良试验研究		
基于 VAP 编程的干线协调下公交优先仿真实现		王 杉(373)

# 杭绍台高速公路特长隧道通风系统 设施规模集约化研究\*

郑国平3)\* 吕俊平2) 李伟平1)

(浙江省交通规划设计研究院有限公司<sup>1)</sup> 杭州 31006) (浙江临金高速公路有限公司<sup>2)</sup> 杭州 310024) (浙江工业大学建筑工程学院<sup>3)</sup> 杭州 310014)

摘要:为了降低通风系统设施规模和工程全寿命周期成本,以杭绍台高速公路为依托、以需风量及 通风计算为基础,综合采用了包括充分利用交通活塞风、积极采用互补式通风模式、尽力降低主隧 道内风速、推进与照明系统的协同设计等四项技术措施,在满足功能的前提下有效降低了通风系 统设施规模,形成了特长隧道通风系统集约化设计的理念,并为减少今后运营期间的设备闲置打 下良好基础.

关键词:特长公路隧道;集约化;四项措施;通风系统 中图法分类号:U453.5

doi:10.3963/j.issn.2095-3844.2019.02.002

#### 马 言

隧道作为相对封闭的人造空间,车辆行驶过 程中将排放大量的污染物,包括颗粒物(尤其是小 粒子 PM10, PM2. 5)、气态一次污染物(CO,  $NO_x$ , $SO_2$ ,THC等)及气态二次污染物( $O_3$ 等). 这些污染物不仅影响司乘人员健康及行车视线, 而且对隧道洞口居住区的空气质量产生负面作 用. 为此,常常需要设置庞大的机械通风系统来加 大换气量并降低上述污染物浓度,比如,18.02 km 长的秦岭终南山通风系统规模达 11 274 kW, 10 km 长的泥巴山隧道通风系统规模达 6 500 kW. 浙江省运营中的几座特长隧道通风设施规模 同样庞大(苍岭隧道 7.6 km,4 580 kW;双峰隧道 6.2 km,3 510 kW;括苍山隧道 7.9 km,5 095 kW;西周岭隧道 6.8 km,4 040 kW).

然而,通风系统的实际使用率却很低.根据欧 盟国家的统计,通风系统占隧道总安装功率的 44%,但实际营运功率仅占16%;而照明系统占 隧道总安装功率的 15%,但实际营运功率超过 50%[1-2]. 国内的情况类似,西南交通大学对四川 雅西高速泥巴山隧道、重庆水武路隧道群、陕西包 茂高速秦岭终南山隧道和包家山隧道、山西太古 高速西山隧道和上平高速虹梯关隧道的机电设施 运营情况进行过调研.这些隧道均采用了竖(斜) 井分段纵向通风模式,除包家山隧道外,其余隧道 一期工程均设置了轴流风机. 其中泥巴山和终南 山隧道每天定时开启射流及轴流风机,其余隧道 视环境情况,由人工判断开启,开启时间并不多, 而且有限次数的定时开启主要是为了检测其运行 状况.

另一方面,与文献[3]相比,文献[4]降低了汽 车尾气基准排放量,提高了隧道内通风卫生标准 和拖挂车的"考虑烟尘的柴油车车型系数",明确 了各类车辆的柴油发动机比例. 这些调整导致了 按稀释烟尘浓度的需风量较老规范提高约30%, 通风系统设施规模随之增大,因此,如何降低通风 系统设施规模,减少设备闲置是降低工程全寿命 成本的源头因素. Shou[5] 针对台湾某长大隧道进 行分析,提出利用自然通风可提供至少10%之通

收稿日期:2019-02-13

李伟平(1969一):男,硕士,教授级高工,主要研究领域为隧道及地下工程的设计与研究

<sup>\*</sup>通信作者:郑国平(1976—),男,博士,副教授,主要研究领域为隧道及地下工程节能与防灾

<sup>\*</sup>浙江省交通运输厅科研计划项目(2017035)、国家自然科学基金项目(51678530)资助

风需求,但这一结论因隧道而异,有一定的局限性;互补式通风对单向坡隧道有较好的适用性,王亚琼等[6-7]研究了互补式通风模式的设计方法;湖北省沪蓉高速公路上长 5.9 km 的大别山隧道已尝试采用该通风模式[8];另外,从设备选型角度,采用新型的香蕉形射流风机[9]、变频调速器、动叶可调轴流风机[10]及自动捕风排风装置等[11-12]也是提高通风系统集约化水平的有效手段.建设中的杭州一绍兴一台州高速公路(简称杭绍台高速公路)特长隧道众多,工程造价高、通风系统设计难度大,以此为依托介绍特长隧道通风系统集约化设计的理念和措施.

#### 1 工程概况

杭绍台高速公路是浙江公路交通"十二五"规划中新建和预备建设高速公路中里程最长的高速公路,工程路线全长 170.18 km,起点绍兴齐贤,终点临海括苍,总投资约 360 亿元.全线长度超过5 km 的隧道有3座:陈家山隧道(5 954 m)、镜岭隧道(5 527 m)和大盘山隧道(8 695 m).这些隧道在初步设计阶段均推荐采用竖井分段送排式通风模式,设置地面或地下风机房用于安装大型轴流风机.施工图设计阶段开展了节能专项设计工作以优化通风系统设计.

#### 2 通风系统设施规模集约化的措施

#### 2.1 利用交通活塞风量

汽车在管状隧道中行驶形成的活塞效应带动空气随着汽车行车方向流动而产生的风量称之为"交通活塞风".按照流体力学能量守恒定理,通过求解隧道内交通通风力=通风阻抗力时所对应的风量即可以求得交通活塞风量.文献[13-14]对影响交通活塞风的因素开展过敏感性分析,其中影响最大的是车速,交通流量和隧道长度的影响程度较小,尤其是后者.这为特长隧道利用交通活塞风实现无动力通风提供了理论依据.

以陈家山隧道为例,算得了远期设计交通量情况下、不同工况车速下,以及不同交通量情况下、正常行驶车时(80 km/h)的交通活塞风量、左右洞需风量,见图 1. 由图 1 可知,交通活塞风量完全能满足下坡隧道的通风需要,对于上坡隧道,通风系统设置的重点是弥补需风量与交通活塞风量之间的缺口.

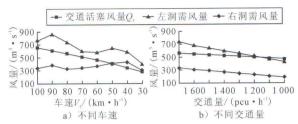


图 1 陈家山隧道不同车速和交通量时的 交通活塞风量与需风量对比图

#### 2.2 采用互补式通风模式

互补式通风模式的理念是将相邻左、右洞联通起来,用下坡隧道中相对清洁的空气去稀释上坡隧道中相对污浊的空气,从而实现左右洞通风负荷的均衡.经过换气后,隧道内污染浓度较低的气流与上坡隧道内污染浓度相对较高的气流混合,污染物浓度增加;而上坡隧道内的高污染空气浓度则下降.在两条隧道的出口端,污染物的浓度均达到最大,但均应小于污染浓度临界值.

这种通风方式有一定的适用条件,包括两条 隧道的间距不能过小,能够有条件在隧道间开通 横洞用于构建双洞换气系统;两条隧道的通风负 荷有较大差异(大于 1.5 倍);两条隧道的通风总 风量不大于其最大允许通风量之和,且小于其交 通活塞风量之和才经济.

根据需风量和交通活塞风量计算结果,陈家山隧道、镜岭隧道均满足上述条件,因此,正常营运的通风模式优化为互补式通风,保留的竖井仅用于火灾时排烟,见图 2.

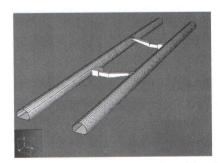


图 2 陈家山隧道和镜岭互补式风道布置图

#### 2.3 降低主隧道内风速

大盘山隧道远期需风量分别为 519.17 m³/s (右线)和 1 420.60 m³/s(左线),大于两条隧道的最大允许通风量之和,因此,仍推荐采用双竖井分段送排式通风模式.同时,拟定了两种方案:方案A(见图 3)是尽量利用竖井送排风,主洞内风量维持在交通活塞风左右;方案 B 是尽量增加主隧道进口的风量,从而降低竖井内的风量和轴流风机功率.根据两方案的同深度比较,方案 A 的通风能耗大大低于方案 B,原因在于主洞内风量的提

高,需要增加相应的射流风机进行调压,见表1.

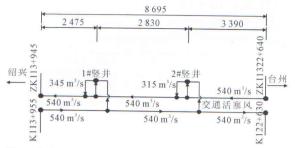


图 3 大盘山隧道双竖井送排通风模式方案 A 气流组织图

#### 2.4 与照明系统的协同设计

上坡隧道内的烟尘特别多且不易消散,隧道 照明系统既要考虑光线的穿透性能,也要考虑由 于烟尘反射而造成的亮度损失.而隧道通风则是 降低烟雾浓度的有效手段,可见照明节能和通风 节能之间存在一定的矛盾.另一方面,在设计单 位,供配电、隧道通风和隧道照明往往是三个相互 独立的专业,缺乏有效的沟通协作,如何协调通风 和照明两个专业达到最佳的节能效果值得探讨.

表 1 不同方案下的通风设备功率对比表

方案	隧道内空气流量/ (m³・s <sup>-1</sup> )	射流风机数量/ 台	$1$ 号竖井内交换空气量 $(m^3 \cdot s^{-1})$ 及轴流风机配置	2号竖井内交换空气量(m³·s- 及轴流风机配置	)总功率/ kW
A:尽量利用 竖井通风	540	0	115×3(送,250 kW/台) 115×3(排,200 kW/台)	105×3(送,215 kW/台) 105×3(排,170 kW/台)	2 505
B:尽量利用 主洞通风	683	40 (55 kW/台)	100×3(送,200 kW/台) 100×3(排,165 kW/台)	100×3(送,200 kW/台) 100×3(排,165 kW/台)	4 390

以陈家山隧道为例,如果全程采用 LED 灯,则烟尘设计浓度 K 按照文献[4]取为 0.005 0,导致所需通风设备数量较大.为此,提出一种根据通风烟雾浓度按需配置照明灯具类型的设计方法,即出口末端浓度超标段约1 370 m改用色温较

低、光线穿透力强的高压钠灯,则通风烟尘设计浓度 K 可取 0.006 5,需风量接近交通活塞风量(见图 4),通风设备数量减少,通风照明系统总安装功率明显降低,见表 2.

综合上述隧道在近远期的正常行车工况、缓

表 2 不同布灯方式下的通风十照明总能耗对比

kW

计算行车	LEI	)+高压钠灯(仅	末端 1 370 m)		LED灯				
速度 vt	射流风机数量	风机总功率	照明功率	总功率	射流风机数量	风机总功率	照明功率	总功率	
100	0	0	182.48	182.48	12	660	161.86	821, 86	
80	12	660	182.48	842.48	22	1210	161.86	1 371, 86	
60	6	330	182.48	512.48	12	660	161.86	821.86	

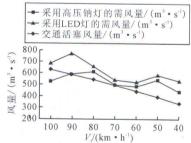


图 4 不同光源对应的需风量及活塞风量 速通行工况、交通阻滞工况和火灾排烟工况,确定 了通风系统的设施规模见表 3.

#### 3 结束语

在杭绍台高速公路特长隧道通风系统节能专项设计过程中,综合采取充分利用交通活塞风、积极采用互补式通风模式、尽力降低主隧道内风速、推进与照明系统的协同设计等四项技术措施,优化了通风系统设计,其中陈家山隧道和镜岭隧道正常运营通风改用互补式通风模式,火灾时仍采用竖井分段纵向排烟模式,大盘山隧道优化了主

表 3 优化前后的通风系统规模

	表 3 优化削后的通风系统规模							
序号	隧道名称	优化前的通风 设施规模	优化后的通风设施规模					
1	陈家山隧道	台 左洞:射流风机 24 台 轴流送风机:100 m³/s×2台	右洞:射流风机 16 台 左洞:射流风机 16 台 互补风道:送排各 100 m³/s×2 台 排烟竖井:轴流风机 100 m³/s×2 台 总功率:2 560 kW 竖井、风机房等土建 费用减少 1 286 万元					
2	镜岭隧道	右洞:射流风机 20 台 左洞:射流风机 14 台 轴流送风机:100 $m^3/s \times 2$ 台 轴流排风机:100 $m^3/s \times 2$ 台 总功率:3 070 kW	左洞:射流风机 14 台 互补风道:送排各 100 m³/s×2 台 排烟竖井:轴流风机 100 m³/s×2 台 总功率:2 340 kW 竖井、风机房等土建					
3	大盘山隧道	右洞:每处竖井中轴流送、排风机各3台;调压射流风机54台 右洞:调压射流风机54台 右洞:调压射流风机54	右洞:每处竖井中轴流送、排风机各3台;调压射流风机30台 右洞:调压射流风机30台 右洞:调压射流风机30台					

风道内的风速.以上措施的采用有效降低了通风系统安装功率,为减少今后运营期间的设备闲置和运营能耗打下良好基础.

#### 参考文献

- [1] JAMES P, MATTHEW W, ISABELA M, et al. Energy efficient tunnel solutions[C]. 6th Transport Research Arena, Warsaw, 2016.
- [2] DZHUSUPOVA R, COBBEN J F G, KLING W L. Zero energy tunnel: renewable energy generation and reduction of energy consumption [C]. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, 2012.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风照明设计规范: JTJ 026. 1—1999 [S]. 北京: 人民交通出版社,2000.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风设计细则:JTG/T D70/2-02-2014[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [5] SHOU K J. Natural ventilation and energy saving for a long tunnel[J]. Tunnel Construction, 2011,31 (1):1-5.
- [6] 王亚琼,蒋学猛,武义凯,等. 公路隧道双洞互补式通 风适用性分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):14-

22.

- [7] 夏丰勇,王亚琼,谢永利. 公路隧道双洞互补式通风的设计方法与试验[J]. 公路交通科技,2015,32(3): 103-108.
- [8] 胡彦杰,邓敏,杨涛.双洞互补式通风在大别山隧道中的应用研究[J].交通科技,2011(2):56-59.
- [9] TEBR C, OLIVIER V, HATEM M. Performance evaluation of alternative tunnel longitudinal ventilation systems using two inclined jets [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014,41:53-61.
- [10] 李广平,李志远,邢薇薇. 公路隧道通风节能技术研究[J]. 公路,2011(9):265-267.
- [11] 杜志刚,余昕宇,向一鸣,等. 基于交通事故预防的高速公路隧道光环境优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(5):715-719.
- [12] 汤召志,王明年,于丽,等.港珠澳大桥沉管隧道通风变频节能技术研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):1418-1421.
- [13] 郑国平,吴小云. 公路隧道中交通活塞风量的算法 及敏感性研究[J]. 交通科技,2017(1):100-103.
- [14] 杜志刚,徐弯弯,孟爽,等. 基于视错觉的公路隧道 环境改善研究新进展[J]. 武汉理工大学学报(交通 科学与工程版),2017,41(2):185-190.
- [15] 郑国平. 公路特长隧道利用交通风力实现无动力通风的研究[J]. 公路,2016(9):283-287.

## Study on Intensive Scale of Ventilation System Facilities in Extra-long Tunnel of Hang-Shao-Tai Expressway

LI Weiping<sup>1)</sup> LYU Junping<sup>2)</sup> FENG Jin<sup>1)</sup> GUO Xiao<sup>1)</sup> ZHENG Guoping<sup>3)</sup>

(Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications Co. Ltd., Hangzhou 310006, China)<sup>1)</sup> (Zhejiang Linjin Expressway Co. Ltd., Hangzhou 310024, China)<sup>2)</sup> (School of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)<sup>3)</sup>

Abstract: In order to reduce the scale of ventilation system facilities and the whole life cycle cost, based on Hangzhou-Shaoxing-Taizhou Expressway and the calculation of air demand and ventilation, four technical measures were put forward, including making full use of traffic piston air, actively adopting complementary ventilation mode, trying to reduce the wind speed in the main tunnel, and cooperative design of propulsion and lighting systems. On the premise of satisfying the function, the scale of ventilation system facilities is effectively reduced, the concept of intensive design of ventilation system for extra-long tunnels is formed, and a good foundation is laid for reducing equipment idleness during future operation.

Key words: extra-long highway tunnels; intensification; four measures; ventilation system

主管:中华人民共和国交通运输部 | 主办:交通运输部科学研究院 | 出版:交通运输科技传媒(北京)有限公司

# TRANSPORT RESEARCH SELECTION OF THE SEARCH SELECTION OF THE SELECTION OF THE SEARCH SELECTION OF THE SELECTION OF THE SEARCH SELECTION OF THE SELECTION OF THE SEARCH SELECTION OF THE SEARCH SELECTION OF THE SELECTION O

ISSN 2095-9931 CN 10-1323/U

第3卷 第6期 2017年12月

- 国家级学术期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)全文收录
- •中国知识资源总库(CNKI)全文收录
- 维普中文科技期刊数据库全文收录
- 万方数据库全文收录

ISSN 2095-9931

Vol.3 No.6 2017

# 交通运输研究

## 2017年12月 第3卷 第6期 (总第18期)

# 目 次

・战略与政策・				
公路运输统计指标数据质量评估方法研究	夏	[ 晶,	秦芬芬	(1)
中美两国旅游公路管理体制机制对比研究			…王 岁	Ĕ (9)
・城市交通・				
国际大城市机动化交通出行方式结构变化特征研究及应用	向	楠,	尤文晓	(15)
弹性需求下的出租车市场均衡模型 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		骁斌,	田丽君	(24)
・安全与环保・				
基于贝叶斯网络的长江航运安全状况监测模型研究陈朝,张庆年				
公路特长隧道通风与照明系统协同集约化设计探索吴德	兴,任	小峰,	郑国平	(40)
・运输与物流・				
市域轨道交通线路快慢列车停站方案研究 · · · · · · · · 姚国如,侯字	菲,顾	孟琪,	罗钦	(46)
基于 Influ-Logit 模型的综合运输方式货运量分担率研究				
——以四川省为例······徐飞i	远,李	尃威,	唐诗韵	(52)
・信息化・				
高速公路出行信息服务评价指标体系研究 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	泉,郭	增增,	梁锐	(61)
・工程技术・				
某三跨斜拉桥纵向设置液体黏滞阻尼器阻尼系数优化	·····李	世渊,	秦晶迪	(69)

期刊基本参数: CN 10-1323/U\*2015\*b\*大16\*74\*zh\*P\*¥20\*2000\*10\*2017-12

DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2017.06.006

# 公路特长隧道通风与照明系统协同集约化 设计探索

吴德兴1,任小峰1,郑国平2

(1. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了降低公路特长隧道通风与照明系统设施总规模和工程全寿命周期成本,以浙江杭绍台 高速公路陈家山特长隧道为依托,提出通风系统与照明系统协同设计的理念,即适应通风烟雾浓 度、按需配置照明灯具光源类型。采用LED+高压钠灯的混合光源方式,隧道末端的烟雾浓度指 标要求可以提高,而隧道需风量相应可降低约17%。在此基础上,积极采用互补式通风模式,利 用下坡隧道中的低浓度空气去稀释上坡隧道中的污浊空气,实现相邻隧道通风负荷的均衡。相对 于优化之前采用的单竖井送排通风模式及纯LED光源类型,隧道通风照明系统总安装功率下降 30%以上,从而有效提高了特长公路隧道通风系统设施规模的集约化水平,为减少今后运营期间

关键词:高速公路;特长隧道;通风系统;照明系统;协同设计

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-9931(2017)06-0040-06

# Collaborative Intensive Design of Ventilation and Lighting System of Highway Extra-Long Tunnel

WU De-xing1, REN Xiao-feng1, ZHENG Guo-ping2

(1. Zhejiang Provincial Institute of Communications, Planning Design & Research, Hangzhou 310006, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to reduce the scale and whole life cycle cost of ventilation and lighting system of highway extra-long tunnel, taking Chenjiashan Tunnel of Hangzhou-Shaoxing-Taizhou Expressway as a background project, a concept of collaborative design including both ventilation system and lighting system was put forward. That meant allocating different light source types according to smoke concentration. Adopting the mixed light source of LED and high-pressure sodium vapour lamp would contribute to increasing the index of smoke concentration and decreasing the ventilation demand by 17%. Furthermore, a complementary ventilation mode, which led low concentration air in the downhill tunnel to the uphill tunnel to dilute its foul air, was adopted to balance the ventilation loads of two adjacent tunnels. Compared with a tunnel with a single shaft ventilation and LED light source type, the total installed power decreased by more than 30%. As a result, the intensive ventilation system facilities laid a good foundation to reduce the idle equipment during the future operation.

Key words: expressway; extra-long tunnel; ventilation system; lighting system; collaborative design

收稿日期: 2017-09-09

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2015J05)

作者简介:吴德兴(1962—),男,浙江缙云人,教授级高级工程师,主要从事公路及地下工程方面的科研、设

计和咨询工作。E-mail: wudx@zjic.com。

#### 0 引言

为了确保公路特长隧道的运营卫生标准,一方 面,需要设置规模庞大的通风系统。比如, 18.02km长的秦岭终南山通风系统的安装功率达 11 274kW, 10km长的泥巴山隧道通风系统的安装 功率达6 500kW。浙江省运营中的几座特长隧道通 风设施规模同样巨大,包括:苍山隧道长7.9km, 总功率为5095kW;苍岭隧道长7.6km,总功率为 4580kW; 西周岭隧道长6.8km, 总功率为4040kW; 双峰隧道长 6.2km, 总功率为 3 510kW。另一方 面,通风系统的闲置率却很高。根据荷兰埃因霍芬 理工大学对荷兰、挪威、奥地利等国典型隧道能耗 情况的调研, 通风系统的安装功率占隧道总安装功 率的44%, 但实际营运功率仅占16%; 而照明系统 的安装功率占隧道总安装功率的15%,但实际营运 功率超过50%[1-2]。我国西南交通大学对四川雅西高 速泥巴山隧道、重庆水武路隧道群、陕西包茂高速 秦岭终南山隧道和包家山隧道、山西太古高速西山 隧道和上平高速虹梯关隧道的机电设施运营情况也 进行过调研,结论类似。因此,如何控制通风系统 的规模、减少闲置是工程技术人员面临的一个共同 难题。

国外的 Dzhusupova、Peeling 等[1-2]学者提出了 零能耗隧道的理念,包括通过技术手段降低能耗、 提取隧道内热能、相邻隧道循环通风以及采用可再 生能源等。国内的郭春等四学者研究后认为自然风 有利于隧道通风节能;汤召志等"研发了自然捕风 装置;Shou<sup>[5]</sup>以台湾某隧道为例进行研究,结果表 明,利用自然通风可提供至少10%的通风需求;郑 国平等[6-7]提出要充分利用交通活塞风,并对其因 素进行了敏感性分析; 湖北沪蓉高速公路上长 5.9km的大别山隧道在国内率先尝试采用互补式通 风模式[8], 王亚琼、夏丰勇[9-10]等对其设计方法及适 用条件进行了研究; 另外, 从设备选型角度, 采用 新型的香蕉形射流风机!!!、变频调速器|4.12|以及动叶 可调轴流风机鬥等也是控制通风系统规模的有力抓 手。然而,对于从系统的角度考虑通风系统和照明 系统两者的协同设计从而实现隧道机电系统集约 化,目前尚未有深入研究。申来明等四仅研究了两 个系统各自的节能问题。李海文四仅从建成后运营 控制的角度阐述了两个系统之间的联动控制。为 此,本文以建设中的杭州—绍兴—台州高速公路(简 称杭绍台高速公路)陈家山特长隧道为依托,介绍特 长隧道通风系统集约化设计的理念和措施。

## 1 依托工程概况

杭绍台高速公路是浙江公路交通"十二五"规 划中新建和预备建设的高速公路中里程最长的,与 5.条已通车的高速公路(钱江通道、杭甬高速、绍 诸高速、甬金高速、台金高速)、5条国省道形成 互通连接。该工程路线全长170.18km,起点为绍 兴齐贤,终点为临海括苍,总投资约360亿元。

陈家山隧道采用高速公路双向行车4车道 (上、下行分离)标准,几何线形、断面净空及通 风照明按设计速度 100km/h 设计,近、远期设计交 通量分别为39 075pcu/d, 52 631pcu/d。左洞起讫里 程为ZK089+444~ZK095+398,全长5954m,为行 车上坡隧道,纵坡坡度为0.8%;右洞起讫里程为 YK089+430~YK095+370,全长5940m,为行车下 坡隧道。初步设计阶段结合地形条件, 推荐在 K92+610右侧40m左右设置1处竖井,深度约为 238m, 直径为9m, 左线采用竖井"一排一送"通 风,右线设置1处联络风道排烟,隧道内布置射流 风机进行调压。竖井地表井口附近位置围岩较好, 地势较平缓,有较好的条件设置地上机房,机房内 设置大型轴流风机。为了提高通风系统的集约化水 平,降低设施规模,施工图设计阶段开展了节能专 项设计工作以优化通风系统设计。

## 通风与照明系统协同设计的理念

## 2.1 LED 光源对烟尘设计浓度的要求

众所周知,汽车在上坡隧道内行驶产生的烟尘 比下坡隧道多旦不易消散,隧道照明系统既要考虑 光线的穿透性能,也要考虑由于烟尘反射造成的亮 度损失。在照明光源方面,发光二极管(Light Emitting Diode, 简称LED) 照明灯具是一种新型的 照明光源, 具有能耗低、光指向性好、寿命长、响 应快、无汞污染等优点,就照明系统自身的电耗而 言,能比使用传统的高压钠灯节约30%~40%。因此,近年来在公路隧道中,LED已逐渐取代高压钠灯被推广应用。但LED也有其自身的缺陷,比如前期投资高、光衰大、色温高、影响车灯光穿透力等。因此,《公路隧道通风设计细则》(JTJ/T D70/2—02—2014)(以下简称《细则》)中对采用LED灯的通风烟尘设计浓度提出了更高的要求<sup>[18]</sup>。

#### 2.2 通风与照明系统协同设计的概念

隧道通风是降低烟雾浓度的有效手段。照明节能与通风节能之间存在一定的矛盾。为了减小通风系统的规模,根据郑国平等人的前期研究成果,隧道通风系统设计首先要充分利用交通活塞风。所谓交通活塞风,即汽车在管状隧道中行驶形成的活塞效应带动空气随着汽车行车方向流动而产生的风量。可以根据流体力学能量守恒定理,通过求解"隧道内交通通风力=通风阻抗力"来求得交通活塞风量<sup>6-7</sup>。

尽管照明系统和通风系统两个专业息息相关, 但在设计过程中却通常是由不同专业的工程技术人 员来完成各自设计,而且与供配电专业也缺乏有效 的沟通协作,尤其是如何协调通风和照明两个专业 使其达到最佳的节能效果尚有待研究。

以陈家山隧道为例,如果全程采用LED灯,则根据《细则》,烟雾设计浓度 K应取为0.005。此时,若仅仅依靠交通活塞风,烟雾浓度就会在距离隧道出口1370m时突破限值(如图1所示)。为了使烟雾浓度不超标,就需要安装更多的通风设备以增加换气风量。为此,针对上坡隧道提出一种适应通风烟雾浓度、按需配置照明灯具类型的设计方法,即:出口末端烟雾浓度超标段约1370m改用

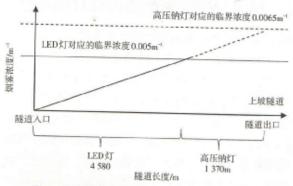


图1 上坡隧道中烟雾浓度与隧道长度关系图

色温较低、光线穿透力强的高压钠灯,此时的烟雾设计浓度 K 可提高至 0.0065 m<sup>-1</sup>,隧道需风量仅为全长采用 LED 灯时需风量的 83%,且接近交通活塞风量。图 2 为两种光源类型下的需风量与交通活塞风量的对比。表 1 是采用混合光源下的远期设计需风量和交通活塞风量。

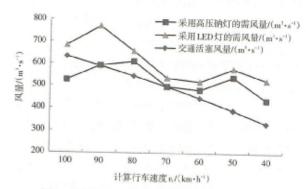


图 2 不同光源对应的远期需风量及活塞风量

表 1 陈家山隧道远期设计需风量和交通活塞风量

车速≈/(km·h⁻¹)	100	90	80
交通活塞风量/(m'·s-')	632.03	588.99	563.93
左洞稀释烟雾的需风量/(m'·s-')	525.66	591.36	610.14
右洞稀释烟雾的需风量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	345.06	388.20	331.79

#### 2.3 不同布灯方式的安装功率对比

按照这种理念设计的通风系统,通风设备的配置数量一是要能弥补需风量与交通活塞风量之间的缺口,二是要能提供火灾工况下的纵向排烟推力。表2为不同布灯模式下的通风及照明设备功率对比。可见,采用LED+高压钠灯的混合布灯方式时,尤其在计算车速大于90km/h时,可仅依赖交通活塞风实现无动力自然通风。因此,就通风系统和照明系统的总安装功率而言,规模大大减小。

表2 不同布灯方式下的通风+照明总能耗对比

计算 行车			高压钠 衛1 370		LED				
速度 */(km ·h <sup>-1</sup> )	射流 风机 数量 /台	风机 总功 率 /kW	照明 功率 /kW	总功 率 /kW	射流 风机 数量 /台	风机 总功 率 /kW	照明 功率 /kW	总功 率 /kW	
100	0	0	182.48	182.48	12	660	161.86	821.86	
80	12	660	182.48	842.48	22	1 210	161.86	1 371.86	
60	6	330	182.48	512.48	12	660	161.86	821.86	

#### 3 互补式通风模式的应用

#### 3.1 互补式通风的基本原理及适用条件

互补式通风模式的理念是将需风量差异较大的 相邻左、右洞联通起来(通常在上坡隧道的末 毒),用下坡隧道中相对清洁的空气去稀释上坡隧 道中相对污浊的空气,从而实现左右洞通风负荷的 均衡。经过换气后,隧道内污染物浓度较低的气流 与上坡隧道内污染物浓度相对较高的气流混合,下 坡隧道内的空气污染物浓度增加,而上坡隧道内的 空气污染物浓度则下降。在两条隧道的出口端,污 染物的浓度均达到最大,但均应小于污染物浓度临 界值。

互补式通风模式有一定的适用条件,包括:两条隧道的间距不能过小,能够有条件在隧道间开通 横洞用于构建双洞换气系统;两条隧道的通风负荷 有较大差异(通常宜大于1.5倍);两条隧道的通风 意风量不大于其最大允许通风量之和,等等[% 10]。 所谓最大允许通风量,通常认为是隧道净空断面与 《细则》所要求的最大断面风速10m/s的乘积。但 进一步的分析表明,当主隧道内风量大于交通活塞 风量时,由于通风路径长,通风沿程阻力将急剧增 大,所需的调压射流风机数量和通风能耗相应增加。这种情况下,互补式通风的经济性不及竖井送 排式通风。因此,就通风系统能耗经济性而言,两 条隧道的通风总风量应小于其交通活塞风量之和。

#### 3.2 互补风道的位置选择

一个完美的换气风量应使两条隧道出口的烟雾 浓度接近于《细则》中所要求的限值,因为出口处 浓度相对于《细则》限值过低就需要加大互补通风 量,从而增加通风系统的规模及能耗。从理论上可 以根据式(1)确定合理的互补风道位置。

$$x = \frac{K_{\text{max}} \cdot Q_{\text{hs}}^2 - (Q_{\text{hs}} - Q) \cdot (L - L_d) \cdot q_{i_{t-2}} - Q_{\text{hs}} \cdot L_d \cdot q_{i_{t-2}}}{Q \cdot q_{i_{t-2}} + Q \cdot q_{i_{t-2}}}$$
(1)

式中: x为互补送风道与隧道进口的距离 (m); L为上坡隧道全长 (m); La为互补送、排风道之间的短道长度 (m), 为了避免短道回流,应不小于 60m; Qb。为交通活塞风量 (m'/s),其计算方法可 参见文献[6]; qicia, q

(m<sup>3</sup>s),通常取送、排互补风道内的风量相等,以 使得左右隧道及同一隧道内前后区段内风速一致, 这有利于提高行车的舒适性。

另外需要满足的限制性条件为左、右洞各区段的末端烟雾浓度不超标。以左洞前半段末端烟雾浓度 $K_a$ 为例,即有:

$$K_{sl} = \frac{(L - L_d - x) \cdot q_{is-z}}{Q_s} \leq K_{max} \qquad (2)$$

以陈家山隧道为例,上坡隧道长度 L 为 5 954m, 互补送排风道之间的短道长度 La 取 100m。经分析,以远期行车速度 80km/h 为最不利工况,此时的交通活塞风量 Q<sub>be</sub>为 564m³/s,左、右洞每 1m 的烟雾排放量 q<sub>be</sub>之、q<sub>be</sub>分别为 8.02×10°m/s和 3.63×10°m/s,烟雾控制浓度 K<sub>bess</sub>为 0.0065m<sup>-1</sup>。根据式(1)和式(2)可以算得几组典型工况值,如表 3 所示。可见,互补风量太小将导致左洞前半段烟雾浓度超标,互补风量太大则左洞前半段烟雾浓度尚有较大的提高空间。互补风量 200m³/s是一个比较经济合理的取值。此时,互补送、排风道的里程桩号分别为 ZK90+789 和 ZK90+889。

表3 几组典型的互补风量、风道位置及上坡隧道 前半段末端烟雾浓度值

互补送排风量Q /(m'·s-')	150	190	200	250	400
互补风道与隧道进口 的距离 x/m	445	1 200	1 345	1 879	1 827
左洞前半段末端烟雾 浓度 K <sub>a</sub> /m	0.007 7	0.006 6	0.006 4	0.005 7	0.005 6

#### 3.3 陈家山隧道优化后的通风系统

由于陈家山隧道的上坡隧道采用了LED+高压 钠灯的混合布灯方式,上坡隧道内需风量下降明 显,两隧道需风量之和小于交通活塞风量之和。因 此,在施工图设计阶段将正常营运的通风模式优化 为互补式通风是经济合理的。同时,为了满足《细 则》中对于纵向通风模式下排烟距离不宜大于5km 的要求,在K92+610处保留1处专用于火灾排烟的 竖井,平时亦可以利用洞内外气压差进行自然排 风。竖井直径优化为5m,并设置于两隧道中间, 以提高火灾排烟及自然排风的效果。

优化后通风系统远期通风设备包括:左右洞射 流风机各16台,两处互补风道内及排烟竖井内各 设置2台风量为100m%的轴流风机,设备总功率 仅为2560kW,小于类似长度的隧道通风系统设施 规模。

进一步采用 CFD 数值分析软件对互补联络风 道及临近主隧道内的流场进行了分析,软件分析图 见图 3~图 5。经计算分析,未出现短道回流等不利 现象。

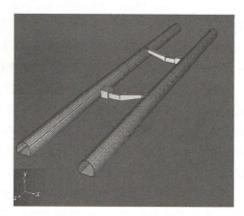


图3 陈家山隧道互补式风道布置图

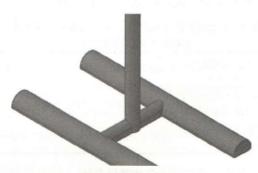


图 4 排烟竖井三维结构图

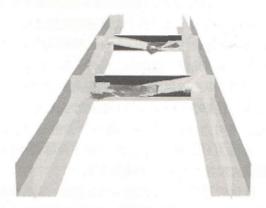


图 5 互补风道及临近主隧道内流场分布

# 4 结论与展望

以陈家山隧道为工程背景,提出了通风系统与 照明系统协同设计的理念。按照这一理念,陈家山 隧道左洞(上坡)采用LED+高压钠灯的混合布灯 方式,由此提高了其烟雾设计浓度并降低了需风 量,使得近期大部分工况下可利用交通活塞风实现 无动力通风,远期正常营运通风模式则由初步设计 方案中的竖井送排模式优化为互补式通风。同时, 为了满足《细则》中有关纵向排烟长度不宜大于 5km的要求,在两隧道之间且隧道埋深较浅位置设 置1处直径仅为5m的火灾排烟竖井。

按照这一理念设置的特长隧道通风系统,可以 使相邻两隧道的通风负荷趋于均衡,减小设备安装 功率,大大提高通风系统设施规模的集约化水平, 为减少今后运营期间的设备闲置打下良好基础。这 一理念可为类似工程提供借鉴。

不足的是,互补式通风模式存在火灾烟气通过 互补送排风道蔓延到相邻隧道的可能性。因此,这 种通风模式对隧道的消防应急管理能力提出了较高 要求,尤其是火灾探测和报警系统如何能在发现火 情的第一时间内联动通风系统切断互补送排风道内 的气流以防止烟气蔓延至相邻隧道,这方面尚需要 从设备、软件系统及管理水平方面展开进一步 研究。

# 参考文献

- DZHUSUPOVA R, COBBEN J F G, KLING W L. Zero Energy Tunnel: Renewable Energy Generation and Reduction of Energy Consumption[C]// IEEE. 47th International Universities Power Engineering Conference. London: IEEE, 2012: 1–6.
- [2] PEELING J, WAYMAN M, MOCANU I, et al. Energy Efficient Tunnel Solutions[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1472-1481.
- [3] 郭春, 王明年. 特长隧道自然通风节能设计研究[J]. 公路 隧道, 2014(3): 20-22.
- [4] 汤召志,王明年,于丽,等.港珠澳大桥沉管隧道通风变频节能技术研究[J].地下空间与工程学报,2012 (Z1): 1418-1421.
- [5] SHOU K J. Natural Ventilation and Energy Saving for a Long Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(Supp 1): 1-

- [6] 郑国平,吴小云.公路隧道中交通活塞风量的算法及敏 感性研究[J]. 交通科技, 2017(1): 100-103.
- [7] 郑国平. 公路特长隧道利用交通风力实现无动力通风的 研究[J]. 公路, 2016(9): 283-287.
- [8] 胡彦杰,邓敏,杨涛.双洞互补式通风在大别山隧道中 的应用研究[J]. 交通科技, 2011(2); 56-60.
- [9] 王亚琼,蒋学猛,武义凯,等.公路隧道双洞互补式通 风适用性分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 14-22.
- [10] 夏丰勇,王亚琼,谢永利.公路隧道双洞互补式通风的 设计方法与试验[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 103-
- [11] CHAMMEN T, VAUQUELIN O, MHIRI H. Performance Evaluation of Alternative Tunnel Longitudinal Ventilation Systems Using Two Inclined Jets[J]. Tunnelling and Under-

- ground Space Technology, 2014, 41: 53-61.
- [12] 邢荣军,徐湃,蒋树屏,等.交通隧道远程变频通风技 术研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 18-22.
- [13] 李广平,李志远,邢薇薇.公路隧道通风节能技术研究 [J]. 公路, 2011(9): 265-267.
- [14] 申来明, 严义斌, 黄延隧道通风照明节能研究[J]. 交通世 界, 2015(23): 82-83.
- [15] 李海文. 基于城市隧道照明与通风系统联动节能控制的 研究[J]. 科技创新与应用, 2016(6): 231-232.
- [16] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道通风设 计细则: JTJ/T D70/2-02-2014[S]. 北京: 人民交通出版

ISSN 1673-6478 CN10-1261/U

# 交通节能与环保

Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation

主管:中华人民共和国交通运输部 主办:人民交通出版社股份有限公司 交通运输部公路科学研究院

2017第 4 期

第13卷 (总第60期)



# 交通节能与环保

Energy Conservation Environmental Protection in Transportation

(双月刊 1986年创刊) 国内外公开发行

2017年第四期

第13卷(总第60期) 2017年8月出版

主管: 中华人民共和国交通运输部

主办: 人民交通出版社股份有限公司

交通运输部公路科学研究院

出版:《交通节能与环保》编辑部

网址: http://cbjl.cbpt.cnki.net

主编: 蔡凤田

副主编: 陈志敏 刘莉 邵江

执行主编: 陈跃峰

编辑: 李枭 刘君 刘家欣

电话: 010-62079736

Email: tseep@rioh.cn

地址: 北京市西土城路8号

邮编: 100088

国际标准刊号: ISSN1673-6478

国内统一刊号: CN10-1261/U

印刷: 北京中恒基业印刷有限公司

定价: 16.00 元人民币

# 目 录

# 汽车工程

		刘元鹏	
	轻型车国VI排放测试系统技术方案研究方燕华四川省绿色交通装备(天然气车辆)应用推广对策研究	魏凌云	(04)
		方晓丽	i (09)
	基于 TMS320F2812 的混合动力客车主控制器设计		
			(12)
		梁营力	
	城市交通能源计量体系研究及北京实践…徐 龙 刘 莹 公共交通一卡通终端升级方案研究与应用	张 克	(19)
		阮贤材	
	La1- <sub>x</sub> K <sub>x</sub> C <sub>o</sub> O <sub>3</sub> 钙钛矿型催化剂在柴油机尾气净化中的应用效	果研究	
	基于蛇形试验汽车操稳性主客观评价相关性研究	1017	(20)
		杨泽中	(32)
		席金波	
	运输工程		
	影响公路运输效率的因素分析	郑辟耳	4 (40)
	节能减排推动交通运输结构调整和发展方式转变		
	施工技术		
ía.	公路隧道太阳能自然通风系统设计与实现		
		方勇冈	(45)
	建筑垃圾再生填料路用性能试验研究	张名成	(49)
	探讨绿色低碳理念在公路设计中的体现		
		刘良生	(57.)
	基于节能环保理念的高速公路改建路基拼宽方案研究	* + 14	7 ((0)
	碳纤维材料在修复与加固桥梁设计施工中的应用…周建海	李东峰	
		余勇强 膝方勇	
	见按小年追附"祝木打"刀采明九	かいりき	(03)
	城市交通		
	地铁车站多工法施工关键技术数值模拟研究	周 佥	i] (69)
	苏州高新区城市公共自行车调度优化分析		. (0-)
		徐永实	(72)
		屈鹏举	
	城市交通碳排放计算方法比较研究方晓丽	骆 勇	§ (81)
	其 他		
	サエル連外で選集も知経された仕上の知知は知め	セャド	2 (0.4)
	基于收费站交通量及视频分析技术监测拥堵研究何杰松有源稳压滤波装置在铁路供电系统电能质量问题中的应用		
	生态型声屏障在高速公路建设中的研究与应用		
	预应力连续箱梁桥悬臂法施工技术的应用		

doi: 10. 3969/j. issn. 1673 - 6478. 2017. 04. 013

# 公路隧道太阳能自然通风系统设计与实现

马 哲,徐琨,方勇刚

(浙江省科威工程咨询有限公司,浙江 杭州 310013)

摘要: 传统隧道在进行通风时存在效率低、自然通风负压不达标、机械风机通风能耗大等问题,为了解决这一问题,文章提出了太阳能自然通风系统,该系统通过对太阳能热效率进行利用实现空气的加热,进而对"热和光进行转换利用",达到节能减排的目的。本文首先对公路隧道太阳能自然通风系统设计的意义进行了分析,然后对公路隧道太阳能自然通风系统的设计与实现进行了分析,最后对太阳能自然通风系统的设计与实现进行了探讨。

关键词: 公路隧道; 太阳能; 自然通风系统; 设计

中图分类号: U453.5

文献标实码: A

文章编号: 1673-6478 (2017) 04-0012-02

# Design and Realization of Natural Ventilation System for Highway Tunnel

MA Zhe, XU Kun, FANG Yonggang

(Zhejiang Kewei Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310013, China)

**Abstract:** In the traditional tunnel, there are some problems such as low efficiency, natural ventilation negative pressure and mechanical ventilation. In order to solve this problem, a natural ventilation system is proposed, which is used to realize the energy saving and emission reduction by "heating and heating the heat and light" by realizing the heating of the solar energy by using the solar thermal efficiency. In this paper, the significance of the design of the natural ventilation system of the tunnel tunnel is analyzed. Then, the basic principle of the natural ventilation system of the tunnel tunnel is analyzed. Finally, the design and realization of the solar natural ventilation system are discussed.

Key words: highway tunnel; solar energy; natural ventilation system; design

# 0 引言

ħ

支約

在公路隧道建设中合适的通风方式可有效提升 隧道行车的安全性和舒适感,同时节约隧道的运营 成本。本文提及的太阳能自然通风系统,主要借助 太阳能具有高的热效率,且属于绿色节能等优势, 通过在公路隧道的通风口上方布设太阳能接收器, 直接加热使得太阳能风泵系统内部因受热而形成空 气的上升动能。在太阳光照缺乏时,通过启动辅助 通风的,以电力驱动实现通风的系统,完成节能环境下的隧道通风。太阳能烟囱的通风技术主要应用在隧道上方太阳能资源充足的环境下,有效提升了公路隧道的自然通风能力,达到公路隧道的高效节能、减排目的。

### 1 太阳能自然通风设计在公路隧道建设中的意义

随着社会不断的进步和发展,使得能源需求也越来越高,能源匮乏已成为趋势,故而节能成为当

下最重要能源应用目标。公路隧道建设运营过程中,其资源耗费非常大。

我国山区公路隧道建设工程很多,尤其是西部地区存在许多长、大型的隧道建设工程,其建设和运营费用(包括通风、照明费用等)已成为当前运营单位最主要的运营负担。如目前我国最长的山区高速公路隧道——秦岭终南山公路隧道,其每个月的运营电费高达100多万元,成为主要的运营负担。假设以双向隧道的建设作为参考,结合通风、火灾及运营条件等,隧道约平均每公里需布设6台射流风机,每台风机功率约30kw,每天通风时长为6h,计算可得每公里每月所需通风费用为3万余元。

目前国内现有的特长隧道及需布设通风系统的 隧道在逐渐增多,按照不完全统计,截止目前我国 已运营通车的公路隧道总长不低于2600km。纵观 全世界,隧道长超过3km的公路共计400多条, 现有的隧道通风主要通过射流风机或轴流风机来 满足隧道的通风,特别是非常长的公路隧道,其 能源损耗更大。因此合理利用自然能源成为各专 业领域的研发方向。

在公路隧道通风领域发展中,自然通风是工程师所重点关注的地方,如何在公路隧道的通风系统利用热压和风压作用产生自然通风的驱动力成为研究重点。很多公路隧道内部都设计了一定高度的竖井,借助竖井的上下温差和压差产生隧道内空气的上升或下降的驱动力,使其可以顺着竖井方向实现有效的空气对流,即"烟囱效应"。借助太阳能实现烟囱效应的隧道通风换气设施称作太阳能烟囱<sup>11</sup>。结合调研发现,公路隧道多处于地势偏僻的山区,通常其自然能源非常丰富,尤其是太阳能供应相对很稳定且能量较高,可充分利用。

太阳能烟囱就是一种公路隧道中高效利用太阳能的典型设备,可借助太阳能实现自然通风,以及加强通风量,在强热压作用下,通过太阳辐射使得热能进一步转化成为动能,提供空气流动的浮升力,后将由烟囱底部进气口进入的空气纳入到烟囱中,形成烟囱效应,进而实现通风换气。

# 2 太阳能烟囱的设计原理

太阳能烟囱系统主要利用太阳能烟囱作为通风换气设备,借助太阳能加热系统内部的空气,使其上浮加速空气流程,该基本系统包含集热棚和烟囱

两部分,其中集热棚主要用来加热空气,烟囱主要 用来排出或收集空气。

在基本系统的基础上,可结合设计需求适当增设相应的设备或部件,如风帽、导流锥、发电装置等,详细的系统简图如图1。

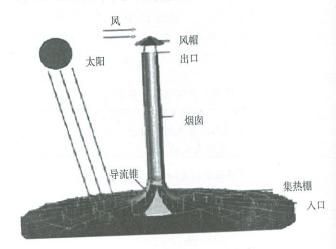


图1 太阳能烟囱的设计简图 Fig.1 Schematic diagram of solar chimney design

基本系统中,集热棚建设材料有玻璃或树脂等透热或集热材料,针对结构大的集热棚,可在集热棚内部布设金属支撑框架。集热棚的空气入口和隧道通风系统相接,通过集热棚顶或棚内地面的吸热材料进一步吸收太阳辐射能,集热棚内的吸热材料在充分吸收热量后,随着温度的上升,和棚内空气形成热传递,进而加剧棚内温度的升高,使得棚内热空气不断上浮而从烟囱流出。同时,因棚内空气不断排出使得棚内气压降低,进而外部空气不断被吸进集热棚,再进行空气的加热,形成一个不断流动的空气循环结构。

# 3 太阳能自然通风结构的设计

# 3.1 系统总体布局

我国的公路隧道多位于偏远的山区,在隧道较长时,通常会建设竖井来辅助通风。山坡斜面是建筑太阳能烟囱最有利的地势条件,故选用太阳能烟囱实现公路隧道的通风,这是一种因地制宜的方法,结合地理条件,选用倾斜式集热板的太阳能烟囱往往是最佳的选择方案。此外,竖井底部可当作空气入口,将集热棚布设于山坡上,再加以烟囱,进而形成最简单的太阳能烟囱通风结构。

公路隧道的太阳能烟囱通风结构详见图2。

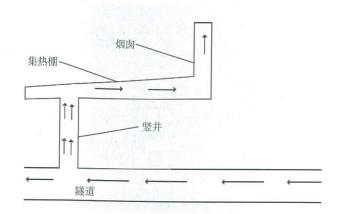


图 2 太阳能烟囱的通风结构简图 Fig.2 Solar chimney ventilation structure diagram

由图2可知,该系统的底端是连接集热棚和隧道的竖井,中间结构是太阳能空气加热的集热棚,通过收集太阳辐射能来实现棚内空气的加热,使得棚内热空气不间断的流向太阳能烟囱,利用烟囱上下的温差和压差产生空气向上的浮动力,进而加速底端空气不断向上端流动,最终由烟囱上排出。由于气体排出使得上端棚内压力降低,进而加速隧道气体向集热棚内涌入,实现隧道内外的不间断通风换气。

太阳能自然通风系统由两部分构成,分别是上端的太阳能风泵系统,以及通风竖井人口端的电力驱动通风系统<sup>[2]</sup>。其中,太阳能风泵系统包含了太阳能受热器和连通的烟囱,电力驱动通风系统主要用来辅助隧道的通风换气,由安设于竖井人口端的风流量传感器、控制器和风机构成,当风流量传感器感应到隧道通风量不够时,向控制器传输通风量不足的检测信号,控制器把控风机的开启、终止及调速,进而实现辅助隧道通风的目的。

## 3.2 太阳能受热器

公路隧道自然通风关键组成部分是太阳能风泵系统,该系统的完备性直接影响隧道的通风质量。为充分实现太阳能的利用,使其可以通过增加受热器内部温度来加大竖井负压,设计选用圆平面型受热器,同时为降低风阻可通过多根通风管道来实现竖井出口处空气的均匀输送,太阳能受热器安设在竖井出口端,受热器外部边缘和水平面的夹角是当地的纬度,太阳能风泵系统的剖视图详见图3。

太阳能受热器包含:透光层、吸热层和保温 层三部分。透光层的材料为硬质钢化玻璃,其表 层增设了一层增透膜,太阳光照穿过透光层深入 受热器内部,实现空气的加热;吸热层位于透光 层的下端,可对穿过透光层的太阳光照产生的热 量进行吸收,并对经过其表的空气进行加热,吸 热层正上方需布设散热齿,其中散热齿方向需和 空气流动方向相同<sup>[3]</sup>;保温层主要位于烟囱的顶 部,需要通过安设防雨罩来阻挡雨、雪等流入烟 囱和竖井。

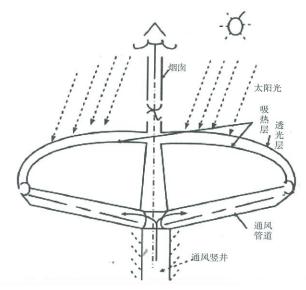


图 3 太阳能风泵系统剖视结构图

Fig. 3 Solar wind pump system section structure diagram

# 3.3 辅助通风的电力系统

本文所论述的公路隧道中的太阳能自然通风系统,当光照强度不足时,可选用辅助电力通风系统来实现隧道的通风换气补充。PLC最大的优势是安全可靠,在自动化领域的工业控制中占据着核心地位,故而本文选用西门子 S7 - 200 PLC来作为辅助通风电力系统的控制器,该系统的硬件系统主要有PLC控制器、风流量传感器、接触器、触摸屏、变频器等[4]。

风流量传感器设计在通风竖井处,可用来监测风速,通过 PLC 的模拟量模块实现通风量的分析处理,最终借助输出量来把控变频器,进而控制风机,最后通过触摸屏实现运行情况的监督和管控,硬件系统结构详见图4。

# 3.3.1 设计要求

电力辅助通风系统主要是根据竖井内风速、隧 道车流、火灾工况等参数来实现隧道系统的通风补 充控制。结合《公路隧道通风设计细则》要求,通风

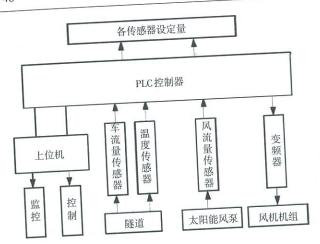


图 4 硬件系统的结构图

Fig.4 Hardware system structure

竖井内风速需控制在13~20 m/s, 在隧道内车流量 超过210辆/km时,会出现道路堵塞,此时需要对 火灾工况条件下的温度参数进行关注,详细要求如 下所示:

- (1) 当光照不足引起竖井内热能转化为空气上 浮动能量不够, 使得竖井内空气流速小于预设范围 时,控制器可通过接收到的传感器检测信号,调整 变频器频率来实现风机速率的盖板, 当主变频器到 达最大可允许频率时, 若风速还不能满足设计要 求,此时需开启备用变频器[5]。
  - (2) 当车流量密度超过210辆/km时,需同时 开启隧道的所有变频器。
  - (3) 当出现因火灾引起隧道内温度急剧上升, 超过45℃时需同时开启所有变频器。

# 3.3.2 系统设计流程

按照隧道通风系统设计要求,辅助电力通风系 统的流程详见图5。

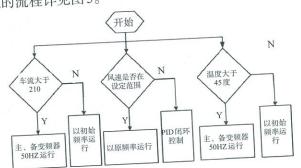
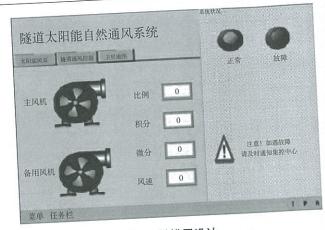


图 5 辅助电力通风系统的流程图

Fig. 5 Schematic diagram of the auxiliary power ventilation system



触摸屏设计 图 6 Fig. 6 Touch screen design

# 3.3.3 触摸屏设计

本文选取步科MT44O4TE触摸屏,借助EV5000 编程软件来实现,包含了监控和控制两部分,主界 面如图6所示。

# 4 结语

综上所述,为了满足公路隧道通风要求,降低 通风能耗, 本文对公路隧道太阳能自然通风系统的 设计进行了分析,通过充分利用太阳能进行通风, 充分降低了使用机械通风产生的高能耗问题。解决 了常规隧道通风技术通风负压不足的问题。可以根 据触摸屏上的报警状态,实时监控隧道的运营情 况, 具有较高的应用价值。

# 参考文献:

- [1] 龚恒翔,谢世列,邹政,等.基于太阳能烟囱效应的 光伏组件强化散热装置设计与数值模拟研究[J]. 可再 生能源, 2016, (07): 990-996.
- [2] 杨东,雷勇,涂国强,等. 基于西门子 PLC 控制的隧 道风机系统设计[J]. 自动化仪表, 2015, (09): 65-68.
- [3] JTG/TD70/2 02 2014, 公路隧道设计细则 [S]. 2014.
- 侯小刚,张显球. 隧道式烟囱太阳热风发电系统[J]. [4] 太阳能, 2005, (01): 40-41.
- [5] 陈长坤,王玮玉,史聪灵,等. 隧道内通风及障碍物 对甲醇蒸气扩散的影响分析[J]. 中国安全生产科学技 术, 2017, (03): 54-56.

# IOP Conference Series Materials Science and Engineering



Volume 741

Volume 741

Online ISSN: 1757-899X Print ISSN: 1757-8981

conferenceseries.iop.org/mse

IOP Conference Series

Online ISSN: 1757-899X Print ISSN: 1757-8981
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol.741
Electronically available at http://iopscience.iop.org







# International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Prevention and Control (ICRTSR 2019)

### **Preface**

The tunnel is an important transportation infrastructure. By the year of 2018, there were 17738 highway tunnels in China, 17236.1 kilometers long, thousands of urban tunnels and tens of thousands of railway tunnels. The tunnel is affected by the surrounding buildings, the crowded vehicles, the complex operation environment, the increase of bad disaster and the insufficient management level, which make the safety of operation and maintenance of the tunnel prominent and sensitive to the social impact. Therefore, it is particularly urgent and important to improve its operation and maintenance safety level. In the past few years, China, like other countries in the world, has seen a lot of accidents in tunnel operation and maintenance. At the same time, a lot of new technology for tunnel operation and maintenance has been put forward. This conference will provide a platform for scholars and tunnel managers all over the world to share the latest research results and management methods, and work together to improve the safety level of tunnel operation and maintenance.

The Organizing Committee of ICRTSR 2019 is pleased to announce that the International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Prevention and Control (ICRTSR 2019) has been held in Chongqing, China during December 05-07, 2019.

All papers submitted at the conference have been through rigorous review and process by the conference committee, and a volume of high-quality papers were selected for oral presentation and publication at the conference. We hope these books will serve as a reference for readers.

We would like to thank the conference committee for reviewing the papers impartially and responsibly. We also want to thank everyone and related institutions for their support and help. We sincerely hope the 2019 International Conference on Road Tunnel Safety and Risk Prevention and Control (ICRTSR 2019) will become a top conference, and we are convinced that the proceedings of this conference will be an important study reference and knowledge source, which can not only promote the progress of science and engineering, but also boost the development of other new products and processes.

The Organizing Committee of ICRTSR 2019

# Committee member

# **Scientific Committee**

### Chairman

Weiyu JI, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., China

### Vice chairman

Hao Ding, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., China

Wenqi Ding, Tongji University, China

Wenge Qiu, Southwest Jiaotong University, China

Li Lin, Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd

### Committeeman

Tesson Marc, Centre d'etudes des Tunnels (CETU), France

Borchiellini Romano, Politecnico di Torino, Italy

Wijaya Hadi, Land Tranport Authority, Singapore

Cheng Zhao, Tongji University, China

Huijian Zhang, Southwest Jiaotong University, China

Yong Cheng, CCCC Second Highway Consultant Co. Ltd, China

Jiguo Liu, CCCC Second Highway Consultant Co. Ltd, China

Scott Kieffer, Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Austria

Isam Shahrour, Laboratoire Genie Civilet geo-Environnement, University of Lille, France

Ahmadreza Hedayat, Colorado School of Mines, USA

Shinichi Akutagawa, Dept. of Civil Engineering, Kobe University, Kobe, Japan

Lyesse Laloui, Civil and Environmental Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, EPFL, Lausanne, Switzerland

Charles Augarde, Department of Engineering, Durham University, Durham, England, UK

Marcio Muniz de Farias, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasilia, Brasilia, Brazil

Gunther Meschke, Ruhr-University Bochum, Bochum, Germany

# **Organizing Committee**

### Chairman

Fumin Wang, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., China

### Vice chairman

Hao Ding, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., China

### Member

Ke Li, Jiong Zhu, Liang Cheng, Fei Ma, Xinghong Jiang, Yangyuyu Xia, Qingzhao Zhang, Cheng Zhao, Huijian Zhang, Lun Gong

ICRTSR 2019 IOP Publishing

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **741** (2020) 011002 doi:10.1088/1757-899X/741/1/011002

# Peer review statement

All papers published in this volume of *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* have been peer reviewed through processes administered by the proceedings Editors. Reviews were conducted by expert referees to the professional and scientific standards expected of a proceedings journal published by IOP Publishing.

# **Table of Contents**

011001	D f
	Preface  Rear region statement
011002	Peer review statement
Chapter	: 1. Underground and tunnel engineering
012001	Research on Low Altitude Illumination Configuration Technology of Highway Tunnel
	Dengrong Bei, Peng Liu, Fei Ma and Yangyuyu Xia
012002	Nonlinear Response of a Subsea Tunnel Constructed by Two Tunnelling Methods subjected to Strong Seismic Shaking
	Juntao Chen, Kun Hao, Jiabao Chen and Jianyun Ma
012003	Trial Study on Visual Recognition of Cross-channel Indication Signs in Limited-visibility Tunnels
	Pan Yong, Liu Shuai and Chen Jian Zhong
012004	Review on Tunnel Concrete Invert NDT Methods
	Liu Qiuzhuo and Zhou Yunteng
012005	Application of FCTEM60-1 Instrument in Invert Rebar Testing for Highway Tunnel
	Qiuzhuo Liu and Yao Wang
012006	Comparative Study on the Application Effect of Intelligent Evacuation System and Traditional Evacuation System in Road Tunnel
	Zhengmao Cao and Xiao Liu
012007	Strength Reduction Method Based Study on Tunnel Excavation Effect on Front Slope Stability
	Wu Mengjun, Xi Yang and Guo Hongyan
012008	Study on Luminance in the Threshold Zone of Highway Tunnel
	Wenwei Chang, Zihao Wang, Bingyin Jing and Fei Ma
012009	Study on Luminance in the Threshold Zone of Highway Tunnel
	Wenwei Chang, Zihao Wang, Bingyin Jing and Fei Ma
012010	Experimental Investigate on Pulling out of Anchor Based on Fiber Bragg Grating Monitoring
	Jun Duan, Chunhai Mou and Zhongwei Wang
012011	Monitoring and analyzing the shallow-buried highway tunnel in the soft stratum
	Zhihua Yang and Zhongwei Wang
012012	Study on Settlement Prediction of Soft Soil Subgrade Based on Grey Theory
	Jun Duan, Chunhai Mou and Zhongwei Wang
012013	Study on Slope Stability of Baoshi Expressway Based on the Analytic Hierarchy Process

Zhihua Yang and Zhongwei Wang

# 012103 Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in water-filled clay

Lishuai Wang, Chao Kong, Feng Peng, Baobao Zhang, Jiqing Deng, Song Gu and Ouan Sun

# 012104 Discussion on the Treatment of Karst Water of Jinmen Tunnel During Construction Li Xiaobo, Yu Shun and Zhu Jiong

# 012105 Analysis of controlled blasting for Large-span Tunnel Passing beneath Cultural Relics Building

Jun Xiong, Junling Si and Yuchao Zheng

# 012106 Study on the Seismic Response of Long and Large Tunnel under Non-Uniform Excitations

Xiwen Zhang, Weidong Zhu, Yan Liu and Jian Tang

# 012107 Study on the optimization of the approaching construction of the four-hole large-section municipal tunnels crossing railway tunnel

Lun Gong, Jingwen Yu, Xuefei Sun, Zhixin Zhang and Jinlin Wu

# 012108 Study on Fire Smoke Characteristic in Double-tube Road Tunnel with Complementary Ventilation System

Yonggang Fang, Jian Shen, Jianrong Chen, Jingyu Wang and Weiping Li

# 012109 Health Damage Assessment about Construction Noise of Tunnel Adopting Drilling and Blasting Method

Xiaofeng Chen, Chun Guo and Jianghao Cheng

# 012110 Study on the Standard of Fire Disaster Prevention for Super Large Cross Section Immersed Tunnels

Xiaohua Deng and Zhengmao Cao

# 012111 Monitoring Study on CO and Dust Diffusion in High Altitude Tunnel under Blasting Operation

Zongliang Zou, Xuebing Hu, Ye Yuan and Jianzhong Chen

# 012112 Research Progress on Smoke Control Technology for Highway Tunnel Fire

Fengyong Xia and Yuxuan Yang

# 012113 Design and construction example of inadequate embedded depth of retaining piles in ventilation tower basement excavation of underwater tunnel

Yang Linsong

# 012114 Design and Rapid Construction Technique for Bibanpo High-speed Railway Bifurcation Tunnel

Xinghong Jiang and Ke Li

### **PAPER • OPEN ACCESS**

# Study on Fire Smoke Characteristic in Double-tube Road Tunnel with Complementary Ventilation System

To cite this article: Yonggang Fang et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 741 012108

View the <u>article online</u> for updates and enhancements.

# Study on Fire Smoke Characteristic in Double-tube Road Tunnel with Complementary Ventilation System

# Yonggang Fang<sup>1\*</sup>, Jian Shen<sup>1</sup>, Jianrong Chen<sup>1</sup>, Jingyu Wang<sup>1</sup>, and Weiping Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

\*Corresponding author's e-mail: fangyg@qq.com

**Abstract.** Complementary ventilation is a new and energy-saving mode put forward recently. In order to address safety concerns under fire situation, the fire simulation software FDS has been adopted to build a tunnel model with two tubes. The fire smoke spread rule, temperature field and visibility distribution in two tubes after fire are analysed. Results show that before closing the air valve in connect duct, a small volume of smoke spreads to the adjacent tube. Judging from temperature and visibility, the influence is limited; after closing the air valve, the adjacent tube is no longer affected by the fire tube. According to the personnel safety standards stated in the PIARC2005 Research Report, the complementary ventilation system can meet the requirements of tunnel safety operation in case of fire. Finally, a wet resonance grille dust removal device is proposed to prevent smoke from flowing into the adjacent tube.

### 1. Introduction

With the rapid development of China's economy, more and more highways have been constructed with increasing number of highway tunnels. On the other side, fire accidents in tunnels happen frequently. Due to the closed space, poor ventilation conditions, rapid spread of high temperature smoke, strong toxicity, and limited evacuation and rescue routes, it is prone to causing massive casualties and serious economic losses. For example, fire accidents in Mont Blanc tunnel(1999), which connects Italy and France, and St Gotthard tunnel(2001) of Switzerland caused a large number of casualties; In Jincheng, Shanxi, China, two trains carrying methanol collided in the Yanhou tunnel and resulted in serious fire accident, which lasts 73 hours, on March 1, 2014, caused 40 deaths, 12 injuries and 42 vehicles burned; On May 23, 2017, in Baoding, Hebei, the traffic accident happened in Futuyu No.5 tunnel and led to fierce explode, causing 12 deaths and 3 seriously injured.

Investigations show that more than 70% of casualties in fire accidents are caused by smoke, which means the smoke control of the extra-long highway tunnel fire is particularly critical. In recent years, scholars from China and abroad have carried out numerous researches on tunnel fire. Wu and Bakar[1] found that critical wind speed and fire power are related to tunnel section shape through a great deal of physical tests and simulation studies; Fumiaki Ura et al.[2], Wu et al.[3] utilised scale model tests to study the motion pattern and smoke exhaust efficiency with different ventilation modes and different longitudinal slopes; Wang et al.[4~5] combined scale model tests and the plume theory to predict maximum temperature of the tunnel dome, and obtained that the return length is less than 60m; Zhao [6], Fan et al.[7] used the CFD method to study the influence of chimney effect on the vertical spread and settlement of smoke; The World Road Association (PIARC) released the *Fire and Smoke Control in Road Tunnels* report in 2005, which proposed the following safety criteria for drivers and passengers in fire scenes, the thermal radiation flux should be lower than 2.0~2.5kW/m²; the air

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

temperature should not be higher than 80°C; the visibility at 2.0m of the characteristic height of human eye should not be shorter than 15m.

In order to reduce the tunnel ventilation system installation and operation power, Swiss scholar Berner proposed the concept of double-tube complementary ventilation for the extra-long road tunnels with uneven demand air volume. Taking Dabieshan tunnel of Hubei Province as a background sample, which was equipped with a complementary ventilation system, Hu[8], Wang[9] and Xia[10] adopted model tests and field measurements to study the distribution law of wind speed field, wind pressure field and pollutant concentration.

However, existed researches on complementary ventilation mainly focus on ventilation system design, demand air volume calculation, and operational feasibility. The safety of this new energy-saving ventilation mode in fire situations has not been systematically studied. Therefore, it is necessary to conduct further researches on fire and smoke characteristics in tunnels with complementary ventilation system. By observing the temperature field, visibility, speed field and other indicators, the spread characteristics and control laws of fire smoke in double-tube tunnels with complementary ventilation system has been studied.

# 2. Structure design of complementary ventilation duct

The basic principle of complementary ventilation is based on the longitudinal ventilation system. Two air ducts for air exchange are arranged at appropriate positions to connect uphill and downhill tubes to form an integral ventilation network. A considerable gap of air demand exists in uphill and downhill tubes. The low concentration air in the downhill tube is induced to dilute the high concentration air in the uphill tube, which ingeniously avoids constructing ventilation shafts equipped with high-power fans for uphill tube.

According to the structural design of complementary ventilation connecting air ducts such as Chenjiashan tunnel, Jingling tunnel of Hangzhou-Shaoxing-Taizhou Highway and Jinhuashan tunnel of Jiande-Jinhua highway, the longitudinal spacing of paired connecting air ducts is set as 50~100m in an antisymmetric layout, so as to ensure that the distance between the air supply outlet of one connecting air duct and the air suction outlet of another is not less than 50m, which is specified in *Guidelines for Design of Highway Tunnel* (hereinafter referred to as *Guidelines*). The air duct, with a clear width of 5m and a clear height of 4.5m, adopts side air suction and arch roof air supply. It is partially set as a variable cross-section according to equipment installation needs.

### 3. Fire analysis model and working condition settings

# 3.1. Analysis model

In order to study and evaluate the safety of the complementary ventilation mode under fire conditions, the fire 3D analysis model was built by FDS (Fire Dynamic Simulator) 6.0 software for simulation analysis. This software is a computational fluid dynamics software developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) and widely used in countries around the world. It uses large eddy simulation turbulence and effectively simplifies turbulence.

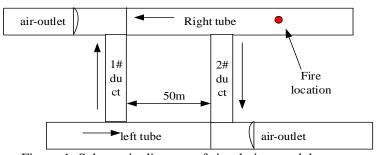


Figure 1. Schematic diagram of simulation model

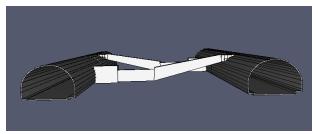


Figure 2. Cross section of model tunnel

In order to simulate the diffusion of fire smoke in a connecting air duct, the spacing of the connecting air duct is set as 50m in this study, and the ignition point is set at 30m upstream of the 2# connecting air duct, as shown in figure 1 and figure 2. In order to reduce the calculation load, the calculation range of right tube is 230m downstream of the fire origin and 20m upstream; the calculation range of left tube is 130m on the left side and 170m on the right side of the fire origin. Flame characteristic length D\* in the large eddy model of FDS software:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 T_0 C_n \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{1}$$

Where Q is fire power(kW), according to the *Guidelines*, the design fire scale of Highway and Grade I road tunnel with a length more than 5km is 30MW;  $\rho_0$  is air density(kg/m³), which is 1.293kg/m³;  $C_p$  is air specific heat capacity(kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), which is 1.0 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $T_0$  is ambient temperature(K), which is 298.16K; g is gravity acceleration(m/s²), which is 9.8m/s².

The FDS requires  $D^*/dx$  (grid size) to be between 4 and 16. Therefore,  $D^* = 3.7$ , which means dx should be between 0.23m and 0.93m. In this model, dx=0.5m, and the total number of grids is 460,000.

### 3.2. Boundary conditions

The wind speed boundary is imposed at the entrance of two tubes. The initial wind speed is the traffic piston wind speed, which is about 6m/s according to calculation. After a fire occurs in one tube, the traffic flow quickly stagnates, then the normal ventilation mode is switched to the emergency ventilation mode, and it is assumed that the initial wind speed is gradually reduced to the critical wind speed within 120 seconds. The so-called critical wind speed is the minimum wind speed in the vertical smoke exhaust mode to prevent smoke backflow and threats to the upstream occupants, and is affected by many factors, such as the fire size, tunnel slope, fire size, fire locations, ventilation mode, structural characteristics, etc.

Using Wu and Baker formula to calculate the critical wind velocity of 30MW fire source, substituting the corresponding data, we can get:

$$\overline{H} = 4A/P \tag{2}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} \overline{H}^{5/2}}$$
(3)

$$v^* = \frac{v_{cr}}{\sqrt{g\overline{H}}} \tag{4}$$

If 
$$Q^* < 0.20$$
,  $v^* = 0.40(0.20)^{-1/3}Q^{*1/3}$ ; if  $Q^* \ge 0.20$ ,  $v^* = 0.40$ .

Where A is cross sectional area of tunnel ( $m^2$ ); P is tunnel's hydraulic perimeter (m);  $\overline{H}$  is tunnel hydraulic height (m); Q\* is heat release rate (MW); other parameters are the same as formula (1). Therefore, the theoretical critical wind speed can be obtained, and it should meet the requirement of longitudinal smoke exhaust mode in the *Guidelines* when fire source power is 30MW, which is about  $3\sim4m/s$ .

### 3.3. Working condition settings

At the same time, air valves are separately set in the two connecting air ducts. According to the linkage control requirements of the monitoring system and performance parameters of air valves, they can be shut off within 60s after fire occurrence. Considering the action time of the fire monitoring system, conservatively, in simulation analysis, the air valves are closed after 120s, and the air flow of two tubes is no longer connected. The fire source is placed in the center of the right tube. Wood with high smoke production rate and diesel oil are used as fuel. Smoke production rate is set at 5%, and total smoke production flow is about  $80\text{m}^3/\text{s}$ .

### 4. Analysis of simulation results

In the center of two model tubes, temperature, concentration, velocity and visibility slices are set along the longitudinal direction to observe the movement of smoke. At the center line of two tubes and characteristic height of human eyes of 2.0m, a temperature measuring point is set every 5m to record the temperature distribution and change.

# 4.1. Characteristic analysis of smoke spread

In order to clearly show the spread of smoke under the influence of longitudinal wind speed when a fire occurs, Figure 3 shows the smoke spread process measured at 10s, 20s, 40s, 60s, 120s, 240s, 360s, 480s and 600s after a 30MW fire occurs.

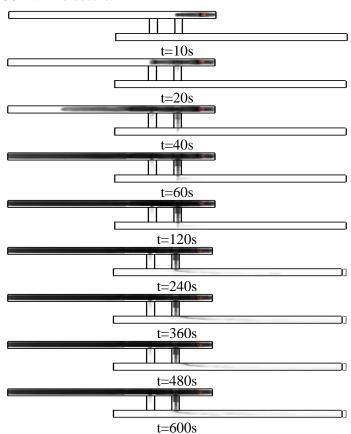


Figure 3. Schematic diagram of fire smoke spread

After 10s, affected by the longitudinal wind speed from right to left in the fire tube, smoke mainly begins to spread rapidly to the downstream. The longitudinal velocity of 6m/s in the fire tube completely restrains smoke from spreading to the upstream, which is far more than the critical velocity of fire. Within 20s after the fire, smoke has spread 80m. Under the simultaneous of hot air pressure and longitudinal wind speed in the tube, smoke from the downstream of fire source spreads to the tube

ICRTSR 2019 IOP Publishing

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 741 (2020) 012108 doi:10.1088/1757-899X/741/1/012108

very fast, and enters the 2# connecting air duct. Within 60 seconds, smoke has spread 200m. In the non-fire tube, due to the control of the longitudinal wind speed of 3m/s to the right, a small amount of smoke spreads to the upstream. The connecting air duct is closed at 200s, after which smoke cannot enter the non-fire tube from the fire tube along the duct. After 240s, 360s, 480s and 600s, most of smoke is concentrated in the fire tube, and part of it enters the connecting air duct and spreads to the non-fire tube. It can also be seen that only little smoke enters the non-fire tube. Because of strong longitudinal wind speed control, most smoke is concentrated in the downstream, little of which spreads to the upstream. It indicates that the longitudinal wind speed setting is effective and can ensure the safety of evacuation space of the upstream.

# 4.2. Temperature field analysis

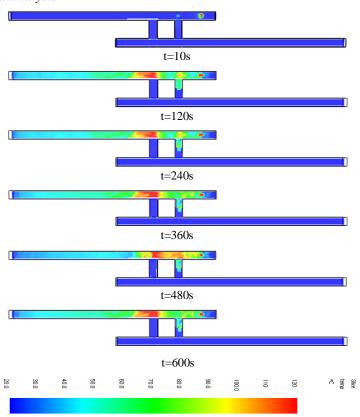


Figure 4. Schematic diagram of fire smoke temperature field

Figure 4 shows the temperature field change within 10 minutes after the fire. In case of fire, there is a longitudinal wind speed of 6m/s in the fire tube, so the smoke spreads rapidly to the downstream and temperature rises rapidly. Due to the obstruction of longitudinal wind speed, the upstream of the fire tube has less smoke and lower concentration, so the temperature in the upstream is also lower. It can be seen from the figure 4 that there is a fire in the tube with longitudinal ventilation, smoke mainly concentrates in the downstream area, and a small amount enters the non-fire tube through the connecting air duct. A similar rule can be obtained from the previous analysis of smoke spread. The temperature in the upstream is lower than that in the downstream. Smoke spreads to the 2# connecting air duct, the temperature in it rises about 60°C, and local temperature reaches 120°C. Although there is some smoke entering non-fire tube, due to the influence of longitudinal wind speed, the temperature at 2.0m above the ground has no obvious change, and the maximum temperature is only 21°C.

ICRTSR 2019 IOP Publishing

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 741 (2020) 012108 doi:10.1088/1757-899X/741/1/012108

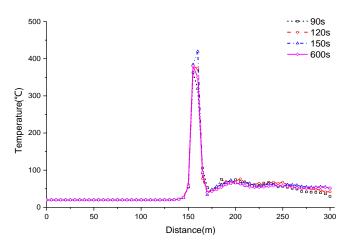


Figure 5. Temperature curve at the height of 2.0m in the fire tube

Figure 5 shows the temperature distribution at 2.0m height of fire tube. It can be seen that after the fire, the temperature in the downstream of the fire source rises rapidly. At 90s, the temperature distribution reaches a stable state. Upstream temperature is maintained at 20°C, downstream temperature is maintained at about 50°C, and there is a temperature of more than 80°C in the range of about 50m.

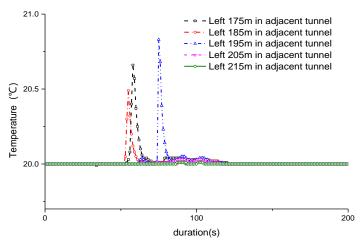


Figure 6. Temperature curve at the height of 2.0m in adjacent tube

Figure 6 shows the temperature variation of each control point near the connecting air duct at a height of 2.0 m in the non-fire tube. It can be seen that the maximum temperature rise is less than 21°C, and the temperature of each measuring point quickly returns to room temperature after the air valve is closed. Therefore, from the temperature field analysis, the wind valve can be closed soon after fire, which can ensure that there is no obvious temperature rise in the adjacent non-fire tube.

# 4.3. Visibility analysis

Figure 7 shows the change of visibility during the simulation of longitudinal ventilation conditions and the 30MW fire happens in the middle of the tube. Visibility slices are set in both tubes, respectively, measured at 10s, 120s, 240s, 360s, 480s, and 600s. When a fire occurs in one tube, smoke spreads continuously in this tube due to the longitudinal ventilation speed of 6m/s. Visibility of the downstream decreases rapidly, and only a small amount decreases at the tunnel dome in the upstream of the fire source, which is the same as the rule of temperature field and smoke spread in the previous discussion. Smoke in the downstream of the fire source loses thermal driving force to form stable

stratification under actions of longitudinal wind, and visibility in the whole downstream is reduced, which is extremely harmful to the evacuation of downstream personnel. As the fire smoke continues to spread, it gradually passes through the connecting air duct to the adjacent non-fire tube. The visibility at 2.0m height in the non-fire tube is partially affected. In a short time, local visibility is reduced to about 15m, and maximum longitudinal length is about 150m. Visibility below 2.0m height (characteristic height of human sight) is almost unaffected and has little impact on driving.

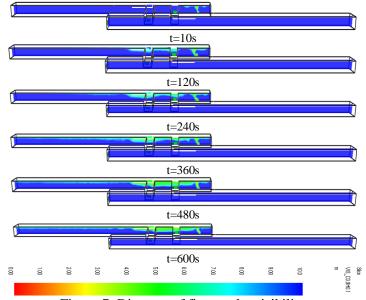


Figure 7. Diagram of fire smoke visibility

### **5.** Improvement measures

In order to prevent impact on driving safety of vehicles with higher cockpit, such as trailers, a wet resonance grille dust removal device (Figure 8) is adopted to prevent the smoke from flow into adjacent tube. This device consists of a spray system, a wet resonance grille dust removal system and a dewatering system. The basic principle is to force all the dusty airstreams to be washed through 3 water membranes, and smoke is left in the water while the clean air flow is discharged.

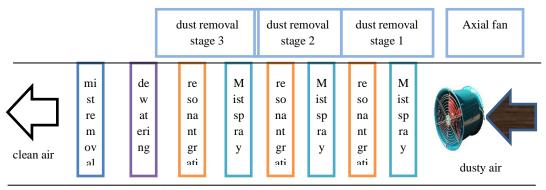


Figure 8. Schematic diagram of wet resonance grille dust removal device

### 6. Conclusions

The complementary ventilation system in double-tube tunnel requires further study due to lack of experience and corresponding fire safety concerns. A three-dimensional model of the extra-long tunnel with double tubes is established using the computational fluid dynamics software FDS. Based on the numerical simulation, propagation law, temperature field, visibility distribution impacted by fire smoke are studied. The results are as following:

- (1) Due to the longitudinal critical wind speed in the tube, fire smoke spreads downstream quickly. Before the air valve in the connect duct is closed, a small volume of smoke spreads into the adjacent tube. However, a good stratification in the cross section has been seen, and smoke concentrates above 2m height (characteristic height of human eyes), which is recognised as the sight height of drivers and passengers.
- (2) The maximum temperature in the adjacent non-fire tube is less than 21°C. After the air valve is closed, temperature of each measuring point quickly returns to room temperature.
- (3) According to the visibility field, the local visibility of the adjacent tube is reduced to about 15m, and maximum longitudinal length is about 150m. Visibility under 2.0m road height is almost unaffected, causing little impact on driving.
- (4) 120s after the fire, the air valve in the connect duct is closed quickly, and the non-fire tube will not be affected by the fire tube any longer.
- (5) To shed safety inhibition thoroughly, a wet resonance grille dust removal device is proposed to avoid smoke flowing into adjacent non-fire tube.

In conclusion, in accordance with the personnel safety standards stated in PIARC 2005 report, the complementary ventilation mode can meet the safety operation requirements in case of fire.

### References

- [1] WU, Y., BAKAR, M.Z.A. (2000) Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal, 35(4): 363-90
- [2] Fumiaki Ura, Nobuyoshi Kawabata, et. al.. (2014) Characteristics of smoke extraction by natural ventilation during a fire in a shallow urban road tunnel with roof openings[J]. Fire Safety Journal, 67: 96-106.
- [3] Wu, D.X., Xu, Z.S., Li, W.P. (2013) Fire Smoke Control in Road Tunnels Research on Mutipoint Smoke Extraction System with Special Exhaust Duct. China Communications Press, Beijing.
- [4] Wang, Y.F., Sun, X.F., Li, B. et. al.. (2017) Small-scale experimental and theoretical analysis on maximum temperature beneath ceiling in tunnel fire with vertical shafts[J]. Applied Thermal Engineering, 114(5) March 2017, 537-544.
- [5] Wang, Y.F., Sun, X.F., Liu, Sh. et. al.. (2016) Simulation of back-layering length in tunnel fire with vertical shafts[J]. Applied Thermal Engineering, 109: 344-350.
- [6] Zhao, D., Zhou, L. (2013) Tunnel fire numerical simulation with the force of shaft's "Chimney Effect" [J]. Fire Science and Technology, 32(7): 724-727.
- [7] Fan, C.G., Jin, Zh.F., Zhang, J.Q. et. al.. (2017) Effects of ambient wind on thermal smoke exhaust from a shaft in tunnels with natural ventilation[J]. Applied Thermal Engineering, 117, 254-262.
- [8] Hu, Y.J., Deng, M., Yang, T. (2011) Application Research for the Complementary Ventilation of Dabie Mountains Tunnel [J]. Transportation Science & Technology, (2): 56-60.
- [9] Wang, Y.Q., Jiang, M.X., Wu, Y.K. (2015) Applicability Analysis of the Complementary Ventilation System in Twin-Tube Highway Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 52(3): 14-22.
- [10] Xia, F.Y., Wang, Y.Q., Xie, Y.L. (2015) Design Method and Test of Twin-tunnel Complementary Ventilation for Highway Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 32(3): 103-108.