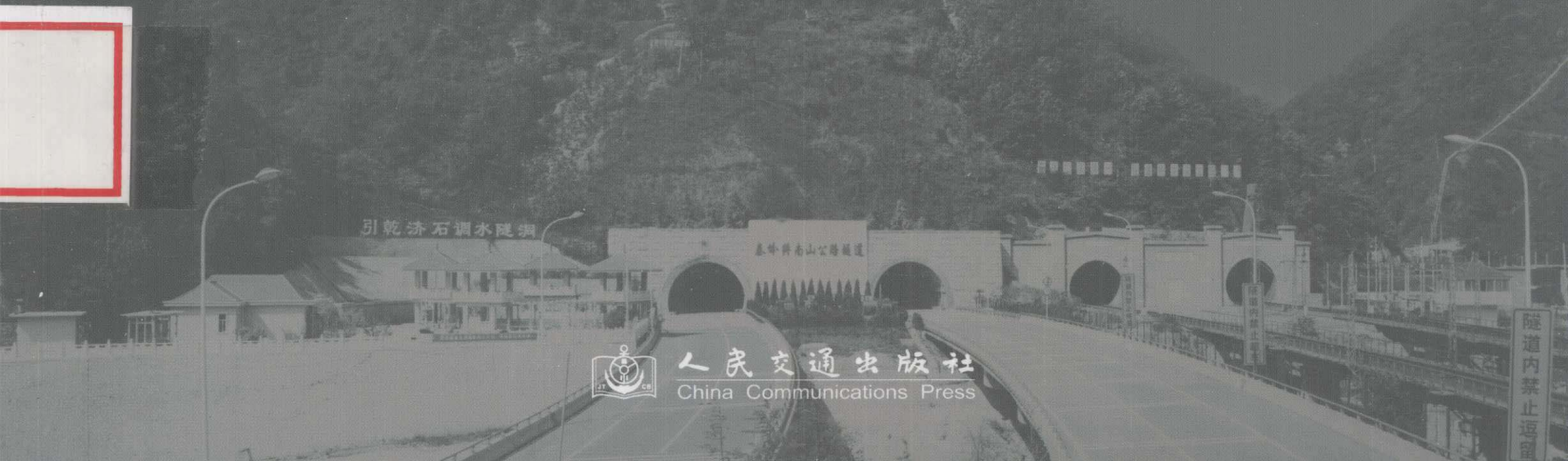


Research on the Key Technique of Super Long
Highway Tunnel at Qinling Zhongnan Mountain

秦岭终南山特长公路隧道 关键技术研究

袁雪戡 蒋树屏 谢永利 等 著
杨其新 韩 直 于 征



人民交通出版社
China Communications Press

秦岭终南山特长公路隧道 关键技术研究

袁雪戡 蒋树屏 谢永利 等 著
杨其新 韩 直 于 征

人民交通出版社

内 容 提 要

秦岭终南山特长公路隧道是世界长度第一、规模最大的高速公路隧道(单洞长 18.02km,双洞总长 36.04km)。为了解决特长高速公路隧道“畅通、安全、环保、经济”运行的技术问题,交通运输部组织有关单位联合开展了“秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究”科技攻关。本书即是对这些关键技术科研成果的系统总结。主要内容包括:特长公路隧道的通风技术研究、防灾救援技术研究、监控技术研究、管理与养护系统研究以及成果在依托工程中的应用测试与运营总结。本书内容对于今后特长隧道的建设与运营具有重要的参考意义。

本书可供公路隧道相关技术人员使用,也可供相关院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究/袁雪戡等著.

北京:人民交通出版社,2010.6

ISBN 978-7-114-08228-3

I. 秦… II. 袁… III. 终南山—公路隧道—隧道工程—
工程技术—研究 IV. U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019817号

书 名: 秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究

著 作 者: 袁雪戡 等 著

责任编辑: 沈鸿雁 郑蕉林

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969,59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 26.75

彩 插: 4

字 数: 843 千

版 次: 2010年6月 第1版

印 次: 2010年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08228-3

印 数: 0001~1500 册

定 价: 100.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

编 委 会

主 编 袁雪戡 蒋树屏

副主编 谢永利 杨其新 韩 直 于 征

编 委 袁雪戡 蒋树屏 谢永利 杨其新 韩 直 于 征

李宁军 陈荫三 刘浩学 王明年 郭 春 刘大刚

王玉琐 于 丽 蔺安林 钟新樵 刘 伟 周 健

涂 耘 王小军 邓顺熙 韩 森 董雨明 陈海峰

魏 聪 徐 燕 郭 伟 刘 鹏 于用真 卢志勇

林德彬 程兴新 孙三民 王选仓 封捍东 胡 雷

严金秀 王 彬 胡元芳 叶守杰 王亚琼

统 稿 杨晓炜 孙志晓 郭 春 周 健 王亚琼

序

巍巍秦岭,是黄河水系与长江水系的分水岭,千百年来其天然屏障严重阻隔了秦岭南北的交通联络。秦岭主脊海拔高而南北两侧地形陡峻,沟壑纵横,地质条件复杂多变。原先既有公路为三、四级标准,其中越岭段展线通过山脊垭口,由于技术标准低,行车条件差,事故灾害频发,运输效率十分低下。为了降低越岭高程,缩短公路里程,改善行车条件,按照国家西部开发规划,陕西省于1999年10月决定修建西安—安康高速公路,通过多种技术方案的比选、优化与反复研究,最终选定以长达18.02km的特长公路隧道——秦岭终南山公路隧道,一次穿越秦岭,由此可净缩短公路里程63km,降低公路高程达975m。

秦岭终南山公路隧道穿越秦岭山脉主峰,是国家高速公路网内蒙古包头至广东茂名高速公路陕西境内的重要路段和控制性工程,也是陕西省“二六三七”高速公路网西安至安康高速公路的控制性工程。隧道按双向四车道高速公路标准建设,南北洞口间里程长18.02km,设计速度80km/h,建筑限界净高5m,净宽10.50m,行车道宽 2×3.75 m,侧向宽度1.5m,纵坡 $+0.3\%$ ~ -1.1% ,隧道进出口高程分别为897m和1025m。隧道所穿越的秦岭终南山段,其岩性主要为混合片麻岩和花岗岩,各类围岩长度比例为:II类3%,III类12%,IV类42%,V~VI类43%(此处按公路隧道设计新规范,对围岩级别已有变动),大小断层共约40余条。隧道施工采用钻爆法掘进开挖,主要地质灾害为施工开挖时围岩失稳和岭脊段局部有岩爆显现。需要特别提到的是:隧道施工组织利用了东侧当时正在扩挖的、相邻的西康铁路隧道右线作为施工平导,以八条施工横通道增加作业面,做到“长隧短打”,大大加速了开挖进度;并采用有轨车及汽车进行施工运输,曾创造全断面掘进月进尺429.5m的新纪录。

秦岭终南山公路隧道为世界级超特长隧道。在此之前,我国已通车最长的公路隧道仅4km左右,国外已通车最长的高速公路隧道长度为10.9km(日本关越隧道)。修建长度18.02km的特长公路隧道,无论是国内还是国外在工程建设、施工管理、建成运营等方面都无类似的工程技术经验可以借鉴,难度非常巨大。而其中最关键的则是特长公路隧道的运营通风、防灾救援、交通监控和运营维护与管理技术等几个方面,亟须开展科研攻关。

为此,交通运输部组织有关单位联合开展了“秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究”科技攻关。科研项目组采用产学研相结合的方式,针对特长隧道上述的通风、防灾、监控、运营管理等关键技术难题,通过理论分析、数值模拟、物理模型试验以及现场测试取得了多项创新性研究成果:

(1)首次系统开展了我国公路车辆一氧化碳、能见度的基准排放量研究,并提出了有关修正系数;以人体血液中碳氧血红蛋白饱和度安全值为限,提出了确定洞内一氧化碳允许浓度的方法,为制定特长公路隧道卫生控制标准提供了理论依据;通过对依托工程通风方案进行系统验证和局部构造优化,提出了送排风短道因子回流的量化指标;提出了隧道

运营通风工况模拟设计方法。上述成果较好地解决了该隧道采用三竖井送排式纵向通风方式所涉及的诸多技术难题。

(2)首次创建了能以模拟各种复杂工况的公路隧道火灾网络通风试验基地。基于多次火灾试验,提出了火灾通风控制基准;还首次提出了包含火风压、节流效应、烟流阻力等因素的公路隧道火灾工况下的动态网络通风计算方法,并研制出相应的程序软件。建立了一套完善的公路隧道防灾救援设计方法。

(3)首次提出了一种“安全置信系数法”,将之应用于特长公路隧道监控系统规模的确定;提出了基于滤波器与灰色系统的交通参数处理方法;建立了根据交通量—车速—洞外亮度的照明控制模型、基于模糊表格法的通风控制模型、隧道配电控制系统网络模型等;给出了配电网地理信息系统的功能要求和图形平台的选择方法。

(4)首创了编目、任务、管理三大体系的隧道管理模式,建立了秦岭终南山特长公路隧道交通安全管理体系,并建立了切实有效的应急预案;首次在隧道机电系统中引入“功能位置”的概念,提出了项目矩阵及故障分析方法,建立了一种隧道机电维护闭环控制体系;基于地理信息系统、虚拟现实等信息技术,开发了隧道管理系统软件,实现了资料信息的自动、快速、立体化搜索、查询与调用。

研究成果已适时应用于秦岭终南山特长公路隧道的设计、建设与运营管理等许多方面,取得了显著的经济效益和社会效益;同时,已推广应用于国内多座公路隧道,取得成功。本项目长达八年的科技攻关支撑、保障了秦岭终南山特长公路隧道的顺利建设和安全运营,整体上提升了我国公路隧道建设与运营的技术水平。

在秦岭终南山隧道建成通车近3年之际,隧道科研项目组将其研究成果著作成书,付梓问世。作为秦岭终南山公路隧道技术委员会的一员,对此我们深感欣慰和嘉许。希望这本著作的研究内容和研究方法对从事隧道勘察、设计、施工和科研方面的广大读者都能有所助益,为推动我国隧道工程技术的进步作出应有的贡献。

孙 钧 钱七虎 郑颖人

(孙 钧:中国科学院院士)(钱七虎:中国工程院院士)(郑颖人:中国工程院院士)

2010年2月15日

前 言

《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究》在各级领导和多位院士、学者的倡导与支持下,经过编辑人员的辛苦努力,终于和读者见面了。这本技术文献汇集了秦岭终南山公路隧道运营通风、防灾救援、交通监控、管理养护等四项关键技术的最新研究成果,表明了我国公路隧道建设和管理技术达到世界领先水平,使我国从“隧道大国”向“隧道强国”迈进的道路上跨出了可喜的一步。

秦岭终南山公路隧道是世界长度第一、规模最大的高速公路隧道(单洞长 18.02km,双洞总长 36.04km)。该隧道的建成通车,将我国公路隧道长度的纪录由 4km 提升至 18km,创造了工程领域的“终南奇迹”,为我国今后特长公路隧道的建设奠定了技术基础,是我国公路隧道建管技术进入世界先进行列的里程碑。由于秦岭终南山隧道的修建,净缩短公路里程 63km,并降低公路高程 975m,在行车快捷、安全、节约、环保等方面产生了巨大的社会经济效益。

在 20 世纪末确定修建该隧道之时,我国通车的最长公路隧道单洞长度仅为 4km 左右。几乎与此同时,欧洲几座特长公路隧道相继发生了火灾事故,造成车毁人亡的惨重损失,震惊世界。在这种形势下提出修建长达 18km 的高速公路隧道,不能不说是冒着极大的风险和面临着世界性的技术难题。为了解决特长高速公路隧道“畅通、安全、环保、经济”运行的技术问题,交通运输部科技司特将《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究》科研项目立项,项目主持单位陕西省公路局组织国内知名科研院所、重点大学、建设与管理等十多个单位的专家、教授、工程技术人员一百余人联合攻关。科研人员收集、整理、调研了国内外百余座公路隧道的详细资料,通过理论分析、数值模拟、物理模型试验及现场测试,经过八年的努力奋斗,系统地解决了特长公路隧道通风、防灾、监控、环保、运营管理等系列技术难题,取得主要科研成果 37 项,发表了科技论文 179 篇,积累技术资料 64 卷(1 400 余万字),在此基础上,科研项目组撰写了《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究总报告》。该项目于 2009 年 7 月经交通运输部鉴定验收,鉴定验收委员会认为该项目圆满完成了科研任务,实现了预定目标,取得了总体达到国际领先水平的研究成果。

这些研究成果,为秦岭终南山特长公路隧道这一旷世的伟大工程提供了坚实的技术支撑,成功应用于该隧道的建设和管理之中。自 2007 年 1 月通车三年多以来,隧道运营正常、管理规范,进一步验证了这些技术成果的科学性、适用性和可靠性。

为了与业内同仁共享研究成果,促进我国公路隧道技术的不断发展,我们在《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究总报告》的基础上,编辑出版了这本技术文献。《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究总报告》共包括七个课题,其中:运营通风研究课题由长安大学主持;防灾救援研究课题由西南交通大学主持;交通监控研究课题由重庆交通科研设计院主持;管理与养护系统研究课题由陕西省公路局、厦门市路桥信息工程有限公司、

陕西秦岭终南山公路隧道有限责任公司等承担;隧道环保研究课题由长安大学、铜川公路管理局等承担;隧道定额研究课题由陕西省交通厅交通工程定额站、长安大学、陕西省公路局、陕西秦岭终南山公路隧道有限责任公司等承担;隧道科技信息研究课题由中国铁路工程西南科学研究院有限公司承担;各研究课题之间的技术接口、技术协调与技术把关由袁雪戡、蒋树屏负责。本文献汇集了运营通风、防灾救援、交通监控、管理养护四大核心课题的研究内容和成果(环保研究部分内容及定额研究已由人民交通出版社单独出版)。

参加编写本书的主要人员有:

第1章:袁雪戡、孙志晓、杨晓炜、郭春。

第2章:谢永利、王亚琼、陈荫三、李宁军、刘浩学、邓顺熙。

第3章:杨其新、王明年、郭春、刘大刚、王玉锁、于丽、蔺安林、钟新樵。

第4章:韩直、蒋树屏、刘伟、周健、涂耘、王小军。

第5章:于征、魏聪、徐燕、郭伟、刘鹏、于用真、卢志勇、林德彬。

第6章:谢永利、李宁军、王亚琼、王明年、郭春、杨其新、周健、杨洋、王小军。

统稿:杨晓炜、孙志晓、郭春、周健、王亚琼。

审定:袁雪戡、蒋树屏。

秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究,始终得到了交通运输部、陕西省人民政府及各级领导的关怀,得到了隧道参建各方的大力协助,以孙钧、王梦恕、钱七虎、郑颖人四位院士领衔的秦岭终南山公路隧道技术委员会对研究工作和本文献的编写给予了具体指导和帮助。谨在此表示我们的深切谢意。

我国公路建设事业的发展日新月异,公路隧道技术的进步突飞猛进。希望这本饱含集体智慧结晶的公路隧道技术文献,能为我国公路隧道技术的进一步发展和完善起到推动作用,同时也能为隧道建设管理和科研工作者们提供借鉴和帮助。

限于编写人员的水平,这本技术文献的缺点和错误之处在所难免,我们恳切地希望业内同仁和读者多提宝贵意见,以便纠正和改进。

作 者

2010年2月15日

目 录

第 1 章 综述	1
1.1 项目立项的背景和目的	1
1.2 项目主要研究内容	5
1.3 国内外相关技术及研究现状	6
1.4 主要研究成果	11
第 2 章 通风技术研究	14
2.1 概述	14
2.2 汽车动态排放参数研究	18
2.3 通风控制标准	25
2.4 隧道复杂通风网络分析技术	29
2.5 隧道通风物理模型试验技术	38
2.6 隧道通风方案研究	45
2.7 通风系统优化的数值仿真分析	48
2.8 通风系统优化的物理模型试验分析	61
2.9 通风参数现场测试分析	76
2.10 通风系统工况模拟研究	89
2.11 交通量分析及风机控制研究	93
2.12 主要成果	99
本章参考文献	107
第 3 章 防灾救援技术研究	112
3.1 概述	112
3.2 火灾数据库系统	116
3.3 火灾物理模型试验	122
3.4 火灾数值模拟	149
3.5 火灾模式下的通风技术	164
3.6 公路隧道火灾报警系统	170
3.7 公路隧道防灾救援体系	175
3.8 隧道衬砌结构火灾损伤评定办法及修复加固技术	180
3.9 装运易燃易爆和危险品车辆进入隧道的安全运输管理办法	183
3.10 主要成果	190
本章参考文献	201
第 4 章 监控技术研究	205
4.1 概述	205
4.2 隧道交通监控设施配置原则与方法研究	205

4.3 公路隧道交通控制技术研究	211
4.4 隧道通信控制网络研究	233
4.5 公路隧道通风、照明控制系统研究	248
4.6 配电自动化技术研究	263
4.7 软件开发	280
4.8 系统测试与试验	304
4.9 秦岭终南山公路隧道监控系统方案	306
4.10 主要成果	319
本章参考文献	322
第5章 管理与养护系统研究	324
5.1 概述	324
5.2 交通安全管理研究	326
5.3 结构养护管理研究	337
5.4 机电维护管理研究	358
5.5 应急救援管理研究	369
5.6 管养机构设置研究	381
5.7 信息技术应用研究	384
5.8 主要成果	396
本章参考文献	400
第6章 成果在依托工程中的应用测试与运营总结	404
6.1 科研成果在秦岭终南山公路隧道的应用测试	404
6.2 秦岭终南山隧道运营总结与回顾	412

第1章 综 述

1.1 项目立项的背景和目的

1.1.1 依托工程背景

秦岭终南山特长高速公路隧道位于国家高速公路网包头—西安—安康—重庆—北海国道主干线的西安—柞水段,是陕西省公路主骨架的重要组成部分,国家规划建设西部八条省际公路“阿荣旗—北海”线的重要工程,是西康高速公路的控制性工程和陕西省“十五”期间交通三大标志性工程之一。地理位置见图 1-1。



图 1-1 秦岭终南山特长公路隧道地理位置图

该隧道穿越秦岭山脉牛背梁区段,隧道经过地区为国家级牛背梁自然保护区,地震烈度 7 度。接线路基宽度 24.5m。秦岭终南山特长高速公路隧道为一次建成的四车道双洞(分为东线、西线)高速公路隧道,长 18.02km,计算行车速度 80km/h,建筑限界净高 5m,净宽 10.50m,其中行车道宽 $2 \times 3.75\text{m}$;在行车道两侧设 0.50m 的路缘带及 0.25m 的余宽;考虑检修通行的需要,在隧道内两侧设宽度为 0.75m 的检修道,高于路面 0.40m。秦岭终南山特长高速公路隧道与先期建设的西康铁路秦岭隧道毗邻,公路隧道在距铁路隧道进口南 450m 西 120m 处进洞,进口高程为 896.9m,西线隧道洞内以 2.83km

长、0.3%的上坡,11.7km长、1.1%的上坡,接以3.6km长、0.3%的坡度下坡,在小峪街铁路隧道出口西侧30m出洞,出口高程为1025.4m;东线隧道与西线隧道坡度相同。隧道建设总投资约31.93亿元,2002年3月开工建设,2007年1月主线建成通车,2008年8月31日三个隧道通风竖井建成,至此全部工程完成。总体布置图见图1-2。

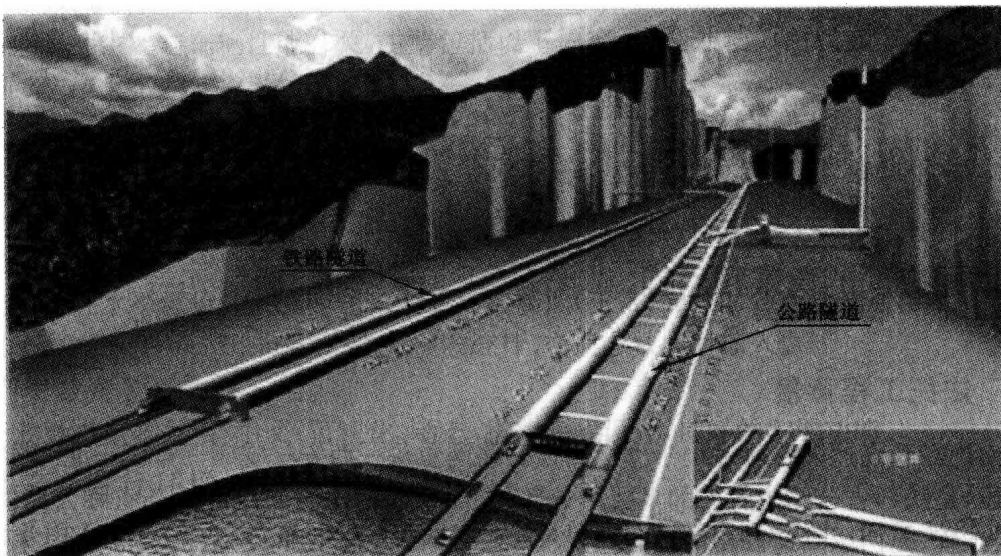


图1-2 秦岭终南山特长公路隧道总体布置图

以秦岭终南山特长公路隧道为控制工程的西柞高速公路建成后,西安至柞水段公路里程由原148km缩短至86km。不但缩短线路62km,而且高程由原来的2000m以上降至1025m。免除翻越海拔高程2000m以上的秦岭、黄花岭两座大山,使行车条件极大改善,特长隧道的方案基本上克服了对该处国家级自然保护区——牛背梁自然保护区的干扰,具有明显的社会、经济、环境效益。它的建成对于加快高速公路网的建设和推动区域经济发展、促进西部大开发发挥了重要作用;对我国公路隧道技术水平的提升具有十分重大的意义。

1.1.2 项目立项必要性

秦岭终南山特长公路隧道工程立项之初,我国已通车最长的公路隧道仅4km左右,国外已通车最长的高速公路隧道长度为10.9km(日本关越隧道)。修建长度18.02km超特长公路隧道,无论是国内还是国外在工程建设、工程管理、建成运营等方面都无类似工程实践、技术经验可借鉴,其难度非常巨大,其中最突出的是工程方案拟定、运营通风、防灾救援、隧道监控、管理技术、环境保护等方面技术问题。因此针对秦岭终南山特长公路隧道关键技术立项开展研究,是十分必要而迫切的。科研立项的必要性可从以下八个方面说明。

1) 秦岭终南山特长公路隧道设计长度居世界第二,建设规模居世界第一

统计资料显示,到目前为止,世界上已建成的超过10km以上的公路隧道有13座。从长度上来说,挪威的Aurland Laerdal隧道为24.5km,是目前世界上已建成的最长的公路隧道,秦岭终南山特长公路隧道为18.020km,为世界第二长公路隧道。但Aurland Laerdal隧道为单洞隧道。秦岭终南山特长公路隧道为双洞隧道,单洞累计总长度达36km,从建设规模来说,秦岭终南山特长公路隧道为世界第一,也是世界最长的双洞高速公路隧道。

2) 秦岭终南山特长公路隧道通风方案研究刻不容缓

特长公路隧道建设中首要的是确定通风方案,由其确定的通风系统将直接关系到通风效果、工程投资、防灾功能。如何构建符合秦岭终南山特长公路隧道条件的通风系统,国内外可直接借鉴经验很少,国外对公路隧道,特别是对特长公路隧道洞内空气污染问题的研究不是很多,许多方面还处在实验和数

值分析阶段。我国的研究仍处在探索性阶段,研究的对象限于较短公路隧道和铁路隧道通风与污染物浓度分布的数学模拟,对于复杂通风系统的特长公路隧道洞内空气污染的研究仍处于空白阶段。因而有必要就各种可能的秦岭终南山特长公路隧道通风方案进行研究和比选。目的是满足运营需要,降低秦岭终南山特长公路隧道通风系统的能耗,使之经济合理。因此,应从优选通风方案、优化通风配置、降低通风阻力、利用自然风力等方面加以深入研究。由此可见,秦岭终南山特长公路隧道通风方案研究是极其重要的,研究刻不容缓。

3)我国特长公路隧道通风研究严重滞后

我国特长公路隧道严重滞后主要表现在三个方面:

(1)我国汽车污染物排放法规滞后。

我国控制汽车排放起步较晚,1983年首次颁布了对汽车排放的控制限值与测试方法,1993年是我国汽车排放标准健全和完善的一年,不仅对原有的排放标准进行了严格化,同时增加了对汽车排放物中 NO_x 的控制,此标准相当于欧洲20世纪80年代排放法规的控制水平。2000年12月颁布并于2001年7月1日起实施的《在用汽车排气污染物限值及测试方法》(GB 18285—2000),其控制水平相当于现行美国在用车的控制水平。

(2)通风控制标准滞后。

我国对公路隧道通风与环保的研究起步较晚。1996年我国对成渝高速公路长隧道通风方式的研究中才开始涉及隧道内空气污染问题与污染控制标准的探讨。

(3)隧道通风技术滞后。

国内对公路隧道通风的研究起步较晚。20世纪90年代初,由西南交通大学、兰州铁道学院等单位参与的成渝高速公路《公路长大隧道纵向通风研究》项目,基本解决了成渝高速公路中梁山隧道和缙云山隧道的纵向通风问题;由交通部重庆公路科学研究所、浙江省交通规划设计院在国内率先研究长大公路隧道竖井送排式纵向通风技术,并用于同江—三亚国道主干线浙江大溪岭隧道。这些成果为以后的长隧道纵向通风技术提供了成功的经验。纵观国内隧道通风研究进展,近年来虽然取得不少突破,但还存在以下问题和不足:

①隧道通风规模小,通风形式单一,或为全纵向通风,或为竖井单排式通风,或为单竖井送排式通风,对多竖井组合式通风尚无研究;

②开发编制的通风计算程序适应性差,不能进行组合通风方式或各种运营工况的通风模拟;

③数值仿真分析多停留在通风局部,未能进行全面整体通风仿真。

4)秦岭终南山特长公路隧道火灾通风模式独一无二

目前,世界上已建成的长度在15km以上高速公路隧道有2座,即Aurland Laerdal隧道和St. Gothard隧道。挪威的Aurland Laerdal为单洞双向交通,采用纵向式通风,该隧道日交通量较小,且车型主要是小汽车。早期修建的St. Gothard隧道,载重货车年通过量达120万辆,采用了半横向式通风。秦岭终南山特长公路隧道为双洞单向交通,采用分段纵向式通风,考虑防灾要求,在双洞隧道之间将设置大量联络横通道,这与Aurland Laerdal单洞隧道分段纵向式通风相比,在火灾模式下,将有本质区别。与St. Gothard隧道相比,通风模式不同。与一般10km左右隧道相比,通风分段数多,而且每个通风分段长,最长分段长度达5km左右。因此,从防灾通风角度来看,这是世界上15km以上双洞隧道首次采用的通风模式。

5)秦岭终南山特长公路隧道防灾救援不容忽视

从世界上已建成的超过10km以上隧道来说,Mt. Blance隧道在1999年3月24日发生了火灾,死亡41人,36辆汽车被毁。St. Gothard隧道一度被认为是欧洲最安全的隧道,但在2001年10月24日也发生了火灾,造成6人死亡。就特长公路隧道火灾来说,虽然具有偶然性,也是必然的,只是火灾的发生概率大小、规模强弱、影响轻重有区别而已。

根据中华人民共和国国家标准《高速公路隧道监控系统模式》(GB/T 18567—2001)中的隧道事故

率的计算方法,结合秦岭终南山特长公路隧道的实际情况,到2025年以后,秦岭终南山特长公路隧道内每年的事故将达9次左右。根据德国和瑞士统计,在隧道内的事故中,火灾将达10%。可见,在未来秦岭终南山特长公路隧道的运营中,每年的火灾将在0.9次左右。统计资料显示,隧道内的火灾40%将被驾乘人员灭掉,60%需要专业消防队救助。在有监控系统的情况下,40%的隧道不会发生大的火灾事故。至此,可以推断,秦岭终南山特长公路隧道约平均每4~5年将会发生1次规模较大的火灾。由此可见,秦岭终南山特长公路隧道防灾救援是运营中的重要问题,必须引起高度重视。

6)世界特长公路隧道防灾救援技术研究不能满足工程需要

特长公路隧道在运营过程中,防灾救援都是作为最重要的问题被研究。但是,在特长公路隧道的运营期间,仍然会发生灾难性事故。可见特长公路隧道防灾救援理论研究还很薄弱,防灾救援设计方法研究深度还很不够,防灾救援技术现场实施特别困难。

1999年PIARC在总结了世界各国隧道防灾技术研究成果基础上,组织了16个国家23个隧道防灾救援技术研究方面的专家编著了《Fire and Smoke Control in Road Tunnels》,该专著从8个方面论述了隧道防灾救援技术研究的最新成果,主要包括:

(1)火灾及烟气控制的目标:主要包括火灾危害的种类、人能忍受的温度、最低能见度、火灾产生的有毒气体、最快逃生时间等。

(2)火灾风险和火灾通风设计:主要包括火灾发生频率、火灾温度、风速等设计参数。

(3)烟气蔓延:主要包括烟气扩散及蔓延速度、烟气逆流影响等。

(4)研究方法:主要包括模型试验(1:1模型试验、运营前或运营中的隧道火灾试验、小比例尺模型试验)、数值分析等。

(5)用于烟火控制的隧道通风设备:主要包括通风方式、通风装置要求、通风控制技术等。

(6)紧急出口与其他安全设施:主要包括紧急出口、火灾探测系统、灭火器、消防供水、自动喷淋灭火系统、紧急电话、闭路电视(CCTV)、扬声器、无线通信等。

(7)隧道火灾反应与耐火性能:主要包括材料遇火反应、隧道结构的耐火性能、设备的耐火性能等。

(8)火灾应急管理:主要包括火灾应急计划制定原则、防火测试等。

以上说明特长公路隧道防灾救援技术研究,世界各国已经做了很多基础性工作,但研究的深度仍然不能满足特长隧道防灾救援设计要求,主要集中在以下几点:

(1)早期的研究主要针对横向式和半横向式通风防灾救援,缺少纵向式通风防灾救援研究。

(2)对于火灾通风,主要集中在烟流扩散、温度变化、风速变化等直观参数上,对于引起这些参数变化的动力(即风压)变化几乎没有涉及。

(3)研究主要以小坡道隧道为对象,没有考虑特长隧道进出口高差大的影响,没有考虑火风压的影响,也没有进行火灾截流效应研究。

(4)所进行的研究都是单洞隧道,没有考虑横通道的影响,更没有考虑双洞通风的相互影响。

(5)没有考虑特长隧道设多竖井或斜井等分段通风情况,没有进行火灾模式下网络通风研究。

(6)没有进行特长公路隧道防灾救援设计方法研究。

(7)没有进行防灾救援预案制定方法研究。

(8)所进行的火灾试验主要采用大量的人工采集数据,没有采用高速数据量测和采集系统进行数据瞬态同步采集。

因此,对于特长隧道来说,特别是采用分段纵向式通风,其防灾救援设计技术是世界难题,到目前为止,没有成熟的经验。

7)特长公路隧道监控技术存在严重不足

目前,世界各国公路隧道监控系统在设施配置上基本相同,但考虑的因素不同,分类的方法不同,系统规模配置的等级不同。国外主要考虑交通组织、道路功能、地形特征等,分得较细,比较合理。我国没有考虑这些问题。此外,无论国内还是国外,都没有考虑经济基础对监控系统规模的影响。在发

家,这一问题还不突出,但在国内,由于地域广阔,经济发展极不平衡,有必要引入可靠性的概念,结合项目所在地的实际情况,在安全与经济中寻找平衡点。公路隧道监控系统规模与隧道长度、交通量、系统功能和经济发展水平相关,应结合隧道结构特征、交通流特征和交通组成特征,确定满足系统功能要求的安全系数,或者根据安全系数确定系统功能与设施配置。

监控系统是为了预防交通事故、消除安全隐患,在发生事故后及时救援与交通疏导,减少事故损失,更好地发挥社会与经济效益。

对于特长公路隧道监控技术,应考虑克服目前我国公路隧道监控系统规模确定方法不考虑地区经济发展不平衡性的缺点,使得在公路建设中,可结合当地经济发展水平和项目融资特点,合理确定系统规模,而且将监控系统目标——提高安全性,与系统规模直接相联系,克服国内外现有确定方法中根据假定的事故率确定系统规模的缺陷,使得系统规模的技术经济决策定量化,更有说服力,操作性更强。由此看来,结合秦岭终南山特长公路隧道工程,应对特长公路隧道监控技术进行深入研究。

8) 特长公路隧道管理与养护水平亟待全面提升

和一般公路隧道相比,秦岭终南山公路隧道属超特长的公路隧道。洞内有复杂的通风网络和庞杂的机电设备和交通工程设施,其管理与养护与一般公路隧道有质的差别,尤其是交通安全管理。

交通安全管理是特长公路隧道运营管理的一项中心任务,其基本要求就是尽量防止各类交通事故的发生,避免或减少事故造成的人员伤亡和财产损失。隧道建造在地理条件较为复杂的偏僻地带,隧道空间狭小,纵深较长,车辆和人员难以及时疏散,发生火灾事故的后果也比较严重,且一般距两端的专业消防队都比较远,容易造成大量人员被困和伤亡。特别是对近几年来国外几次人亡车毁的惨重公路隧道火灾事故的调查分析表明,其原因不仅在于隧道的设施存在缺陷,而且在隧道的管理方面也存在不少问题。秦岭终南山特长公路隧道双向通道总长度超过 36km,隧道内发生火灾事故的可能性就会随隧道长度的增加而增大;同时,隧道建成后是国家高速公路网阿北线贯穿秦岭的主要通道,车流密度相当大,所以隧道内发生火灾的概率较其他隧道要高。

因此,为配合秦岭终南山特长公路隧道通车后的运营管理,指导隧道管理机构、管理模式的建立,极需对特长公路隧道管理与养护系统进行研究,以期实现安全、畅通、经济的特长公路隧道管理与养护目标。同时在研究成果和成功应用经验的基础上,进一步总结完善,形成完整体系和成套技术,可全面提升我国特长公路隧道科学管理与养护的整体技术水平,逐渐缩小与国际先进水平的差距并步入特长公路隧道管理与养护世界先进行列。且把管理与养护研究成果和经验不断反馈到设计与施工中,对推动特长公路隧道建设水平的发展也将产生深远影响。

以上分析说明,对于秦岭终南山特长公路隧道来说,存在四个需要,即隧道建设的需要、技术进步的需要、推广应用的需要、提高管理水平的需要。为此,交通部^①西部交通科技项目管理中心在 2001 年决定以秦岭终南山特长公路隧道工程为依托,成立《秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究》项目,开展相关课题的系统研究。

开展以上研究,不仅可以直接为秦岭终南山特长公路隧道的设计、建设、管理提供技术支撑和保障,而且对构建我国长大公路隧道科研、设计、施工、管理体系,完善我国公路隧道设计规范和定额,提高我国公路隧道运营管理水平,都具有十分重要的意义。

1.2 项目主要研究内容

针对我国公路隧道和秦岭终南山特长公路隧道的实际,重点研究了以下四个课题。

^① 交通部现已更名为交通运输部,后同。

1.2.1 秦岭终南山特长公路隧道通风技术研究

- (1)构建了复杂通风网络技术理论。
- (2)开发了仿真计算机软件、通风设计平台。
- (3)确定了我国在用汽车排放因子及影响排放各因素的修正值。
- (4)进行了秦岭终南山特长公路隧道的通风方案比选、需风量和供风方式的确定和通风系统结构优化。

1.2.2 秦岭终南山特长公路隧道防灾救援技术研究

- (1)建立了国内外长大公路隧道火灾数据库。
- (2)建立了公路隧道火灾数值模型,进行火灾数值模拟计算。
- (3)进行大规模隧道火灾物理模型试验,为隧道防灾设计提供了基础数据。
- (4)完成了隧道火灾模式下的通风技术研究。
- (5)对公路隧道火灾监控和报警系统进行研究,给出了最终选型。
- (6)建立了一套适合我国国情的秦岭终南山公路隧道火灾救援体系。
- (7)建立了一套公路隧道衬砌结构火灾损伤评定方法。
- (8)建立了装运易燃、易爆和危险品车辆进入隧道的安全运输管理办法。

1.2.3 秦岭终南山特长公路隧道监控技术研究

- (1)提出了监控系统规模功能设计法。
- (2)提出了模糊综合判断的交通异常自动检测算法。
- (3)建立了基于交通量、车速、照度的隧道照明控制模型和组合式模糊表格法的通风控制模型。
- (4)确定了配电控制系统的网络模型、地理信息系统的功能要求。

1.2.4 秦岭终南山特长公路隧道管理与养护系统研究

(1)将系统工程理论和方法应用于公路隧道管理,在隧道机电系统中引入“功能位置”概念,建立了机电维护闭环控制体系。

(2)研发了特长公路隧道管理与养护系统(TMMS)。

(3)建立了“编目、任务、管理”三个阶段体系的通用管理模式。

(4)基于 GIS、VR 等信息技术,开发了管理系统软件,可实现隧道管理的立体展示、数据联动、三维定位和快速查询。

除上述四个核心课题外,我们还根据工程建设的实际需要和合同要求,开展了环保技术研究、定额研究及信息研究,完成了预定研究目标。

1.3 国内外相关技术及研究现状

1.3.1 特长公路隧道通风技术研究现状

国外汽车排放法规形成和发展大约经历了三个阶段:第一阶段(1966~1974年)是排放法规的形成阶段;第二阶段(1975~1992年)是法规的加强和完善阶段;第三阶段(1993年以后)加强对 HC 的限制,进入低污染车时期。

20 世纪 90 年代以来,由于我国汽车拥有量的急剧增加,汽车排放对城市造成的污染已经越来越严

重,因此北京市于1998年制订了控制汽车排放的地方标准,此标准等同于欧洲91/441/EEC的控制水平,尚未达到ECE/MVEG-1号法规控制水平。国家环保局和国家技术监督局于1999年和2001年相继颁布和修订了汽车排放国家标准,相当于ECE/MVEG-1号法规和ECE/MVEG-2号法规的控制水平。

我国1999年颁布的压燃式发动机车辆排放标准和2001年颁布的轻型汽车污染物排放标准,等效采用欧盟(EU)相关指令及其修订指令的全部技术内容,并参照采用有关法律的部分技术内容。因此我国的汽车排放标准将与欧洲汽车排放标准接轨。

我国实施现行排放标准将分阶段进行:从2000年至2004年实施的限值相当于欧洲的ECE/MVEG-1号法规的控制水平;从2004年至2007年实施的限值相当于欧洲的ECE/MVEG-2号法规的控制水平;从2007年起实施的限值相当于欧洲的ECE/MVEG-3号法规的控制水平;从2010年起实施ECE/MVEG-4号法规的控制水平,从此基本实现与欧洲排放法规接轨。

国外在公路隧道通风污染控制方面有代表性(或有影响)的研究成果有:Ohashi等(1982年)对日本KAN—ETSU公路隧道(10.885km)采用一维污染物扩散方程用数值求解的方法对隧道内污染物浓度纵向分布进行研究。Bellasio Roberto(1997年)对意大利一座1km长公路隧道采用一维扩散方程求数值解的方法对该隧道内污染物浓度的时间分布进行分析,并就隧道外环境的变化对隧道内污染物浓度的影响进行研究。Oettl Dietar(2002)提出了一个用于计算公路隧道出口污染物浓度分布的经验方法。该方法使用方便,但却不能考虑隧道口的地形、大气稳定度等环境因素的影响。

从1995年起,长安大学(原西安公路交通大学)承担了交通部“公路汽车污染物排放因子的研究”课题,曾对中国三座典型公路隧道内污染物浓度分布规律进行了系统实测,并通过建立公路隧道环境空气质量模型,确定我国公路机动车污染物排放因子。此外提出了常用通风方式下隧道内污染物浓度分布的解析计算方法。

为了验证通风系统的可靠性以及实用性,日本学者编制了一套程序对关越隧道通风系统进行模拟,研究内容包括了对空气的非稳态流模拟,空气污染物沿隧道全程的实时变化,以及紧急通风方案的建立等。此程序包括了动力学模型,污染模型,交通模型和控制模型四大部分。程序模拟结果证明静电集尘器加送排式竖井的纵向通风系统可以应用在关越隧道上,并得出了不论交通方式如何,不论隧道长短,均可采用分段纵向加静电集尘器通风的结论。

挪威Aurland Laerdal隧道是目前世界上最长的公路隧道,该隧道采用通风斜井与空气净化器、射流风机组合的纵向通风方式。通风斜井位于距隧道入口18km处,空气净化器安装在距隧道入口9.5km处,通风(或净化处理)分段的单段长度最大为9.5km。

近年来,世界各国的隧道专业人员致力于隧道通风计算程序的研究,最具代表性的是瑞典Axel Bring等编制的模块化模拟程序。其基本模块包括进口段、出口段、基本段、三通段和风机段等,并以此组装来模拟隧道通风系统。模拟结果包括空气压力、流速、污染物浓度沿隧道轴线的分布等。

对于隧道通风的动态模拟和局部多维模拟,多运用CFD进行模拟,其中比较常用的模拟软件有FLUENT,PHOENICS,CFX,CFDesign等。

重庆交通科研设计院于1996年建成了长度200m的1:1比例通风照明试验隧道(图1-3),并于1999年主持编写了现行《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999),对隧道通风设计有很强的指导意义,但鉴于编写时国内长大公路隧道建设刚刚起步,3km以上隧道凤毛麟角,尤其是3~5km以上隧道的通风技术难点还存在许多问题值得进一步研究和探讨。浙江省交通规划设计院与重庆交通科研设计院共同完成的《大溪—湖雾岭隧道营运照明与通风关键技术研究》项目,进行了隧道单竖井送排式加射流风机组合通风方式的理论研究到模型试验验证,并将成果首次应用于工程实际。西南交通大学在中梁山、缙云山纵向通风课题研究中编制了通风计算软件,在多维和动态方面,也作了初步的研究。他们用空气动力学模型、交通模型、污染模型以及控制模型对竖井排出式纵向通风系统进行了动态数值模拟。原兰州铁路学院的许云峰、高孟理利用有限差分法对射流通风的流场进行了分析,并试验研究了