



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国重大隧道及地下工程建设项目技术总结

# 公路隧道火灾烟雾控制

## ——独立排烟道集中排烟系统研究

Fire Smoke Control in Road Tunnels - Research  
on Multi-point Smoke Extraction System  
with Special Exhaust Duct

吴德兴 徐志胜 李伟平 著



人民交通出版社  
China Communications Press



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
中国重大隧道及地下工程建设项目技术总结

# 公路隧道火灾烟雾控制

## ——独立排烟道集中排烟系统研究

本书基于《公路隧道火灾独立排烟道排烟关键技术研究》子课题，该课题荣获中国公路学会科学技术一等奖，并获得两项发明专利（专利号：ZL 2006 1 0052065.6和ZL 2008 1 0060731.X）。

吴德兴 徐志胜 李伟平 著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是在荣获 2011 年中国公路学会科学技术奖一等奖、2012 年第三届中国消防协会科学技术创新奖二等奖的科研课题基础上编著而成。

本书共分 11 章。第 1 章主要阐述了隧道火灾的原因、特点及危害以及国内外研究现状,并介绍了国内外公路隧道火灾案例调研情况;第 2 章介绍了当前国内外公路隧道通风排烟设计概况,系统阐述了不同通风排烟模式的工作原理并开展了比较研究,开展了纵向通风模式下不同独立排烟道系统比较研究,并提出了特长公路隧道通风排烟设计新理念及模型试验研究思路;第 3 章主要论述了隧道内火灾时烟气运动理论和隧道火灾排烟量的计算方法;第 4 章介绍了主要的隧道通风排烟研究方法,基于模型试验相似原理分析给出了试验模型系统设计方案。第 5 章开展了坡度对隧道火灾蔓延影响的理论分析和集中排烟模式下火灾烟气自由蔓延试验研究,进行了烟囱效应影响分析并给出了相应排烟对策;第 6 章分别研究确定了 30MW 和 50MW 火灾规模下合理诱导风速;第 7 章基于理论预测模型分析了排烟道系统内风流流速与压强分布规律,给出了排烟道流速分布模型试验测试结果和排烟阀流速分布模型试验测试结果;第 8 章开展了排烟阀排热效率研究和排烟风机排热效率研究;第 9 章给出了排烟阀排烟效率计算模型,并开展了集中排烟模式下排烟阀排烟效率分析研究;第 10 章开展了独立排烟系统合理的设置方案研究和独立排烟道系统排烟组织方案设计研究;第 11 章介绍了课题研究成果在工程实际中的推广应用,介绍了隧道工程集中排烟模式设计方案。

本书适合隧道设计、施工、管理运营人员和科研人员借鉴和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

公路隧道火灾烟雾控制:独立排烟道集中排烟系统研究 / 吴德兴等著. —北京:人民交通出版社, 2013.4  
ISBN 978-7-114-10541-8

I. ①公… II. ①吴… III. ①公路隧道—火灾—研究  
②公路隧道—烟气排放—研究 IV. ①U459.2②U453.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 069823 号

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国重大隧道及地下工程建设项目技术总结

书 名:公路隧道火灾烟雾控制——独立排烟道集中排烟系统研究

著 者:吴德兴 徐志胜 李伟平

责任编辑:卢仲贤 袁 方

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯鑫彩色印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:17.75

字 数:527 千

版 次:2013 年 4 月 第 1 版

印 次:2013 年 4 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10541-8

定 价:90.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



公路隧道最大的安全问题是火灾。近年来,我国高速公路建设规模日益扩大,公路隧道建设蓬勃发展,建成了一批特长、超长隧道,包括世界级的山岭隧道和水底隧道,如18km长的秦岭终南山隧道和近9km长的上海长江盾构隧道,这为公路隧道的火灾防治带来了新的挑战。目前,我国没有颁布公路隧道消防设计规范和标准,特别是在防灾通风排烟系统的关键设计参数选取和结构耐火设计方面,缺乏研究成果,缺乏规范、标准。隧道火灾中,火灾烟气是造成人员群死群伤的最主要因素。如何将隧道火灾烟气有效控制和排除已经是隧道消防工程和火灾科学研究的一个热点问题。

从我国已建成的长大隧道来看,基本采用通风换气与火灾排烟兼用的纵向排烟模式,但这种排烟模式下火灾烟雾在隧道车行空间内流动路径较长,烟气可控性差,特别是在双向交通、交通阻塞和二次事故导致火灾的情况下,对于交通量大的隧道,将难以满足防灾要求。自20世纪90年代以来,欧洲一些老隧道出现一些重大火灾伤亡事故,使得世界各国对隧道火灾与烟雾控制方面工作十分重视;欧盟提出了统一行动指令,在重要隧道中普遍采用独立排烟道集中排烟模式,包括对老隧道的改造。该排烟模式能将烟气控制在一定的范围内,具有良好的排烟效果,能提高隧道火灾时人员逃生疏散安全性与灭火救援及时性。而对于独立排烟道集中排烟模式的关键技术,国内外缺乏以理论分析、数值模拟和试验研究相结合的系统研究,缺乏研究成果的支持,限制了在我国公路隧道的推广应用。

针对我国公路隧道发展形势和需要,为填补国内外对公路隧道独立排烟道集中排烟系统研究的空白,自2005年以来,浙江省交通规划设计研究院和中南大学联合开展科研攻关,对公路隧道独立排烟道集中排烟模式的排烟机理和结构抗火关键技术开展了系统的试验研究、数值模拟和理论分析,申请并获得了浙江省科技计划项目(重大科技专项)“公路隧道火灾排烟与排烟道顶隔板结构耐火性能试验研究”(2008C13041-2)和浙江省交通运输厅科技计划项目“特长公路隧道纵向通风模式下的独立排烟道系统的研究与应用”(2008C02)的资助。

参与独立排烟道集中排烟系统排烟关键技术子课题研究的人员有浙江省交通规划设计研究院的吴德兴、李伟平、郑国平、高翔、郭霄、田伟、黄廷;中南大学防灾科学与安全技术研究所的徐志胜、易亮、彭锦志、裘志浩、倪天晓、赵望达、杨洋、赵红莉、李沿宗、吴小华、周湘川、张振兴、杨超琼、张仁兵、张崇、黄维、李辉强等。课题组成员在吴德兴教授级高工和徐志胜教授的带领与指导下,经过近7年的研究,获得了一系列的研究成果,研究成果创新性突出,经成果鉴定,“公路隧道纵向排烟模式与独立排烟道集中排烟模式模型试验研究”的



研究成果总体达到了国际领先水平;“公路隧道排烟道顶隔板结构耐火性能试验研究”的研究成果总体达到了国际先进水平,部分达到了国际领先水平;“特长公路隧道纵向通风模式下独立排烟道系统的研究与应用”的研究成果总体达到了国际先进水平。研究获得了2011年中国公路学会科学技术奖一等奖、2012年第三届中国消防协会科学技术创新奖二等奖,公开发表论文近60余篇,申请并获得授权发明专利2项(专利号:ZL 2006 1 0052065.6和ZL 2008 1 0060731. X),研究成果在浙江省钱江隧道等隧道工程中得到了成功应用。

为了推广应用公路隧道火灾独立排烟道集中排烟系统研究课题有关研究成果,与业内同仁共同努力,提升我国公路隧道防灾水平,我们组织研究人员对课题研究成果进行了系统梳理,编写了《公路隧道火灾烟雾控制——独立排烟道集中排烟系统研究》一书。吴德兴教授级高级工程师、徐志胜教授、李伟平教授级高级工程师、郑国平高级工程师、姜学鹏和赵红莉博士负责制定编写大纲,指导全书编写工作并参与编写;王闪、赵冬、杨琳琳、王冲、赵志远、周宏明等参与了整理与编写工作,历时近一年时间。最后由吴德兴校对修改定稿。

本书共分11章。第1章主要阐述了隧道火灾的原因、特点及危害以及国内外研究现状,并介绍了国内外公路隧道火灾案例调研情况;第2章介绍了当前国内外公路隧道通风排烟设计概况,系统阐述了不同通风排烟模式的工作原理并开展了比较研究,开展了纵向通风模式下不同独立排烟道系统比较研究,并提出了特长公路隧道通风排烟设计新理念及模型试验研究思路;第3章主要论述了隧道内火灾时烟气运动理论和隧道火灾排烟量的计算方法;第4章介绍了主要的隧道通风排烟研究方法,基于模型试验相似原理分析给出了试验模型系统设计方案。第5章开展了坡度对隧道火灾蔓延影响的理论分析和集中排烟模式下火灾烟气自由蔓延试验研究,进行了烟囱效应影响分析并给出了相应排烟对策;第6章分别研究确定了30MW和50MW火灾规模下合理诱导风速;第7章基于理论预测模型分析了排烟道系统内风流流速与压强分布规律,给出了排烟道流速分布模型试验测试结果和排烟阀流速分布模型试验测试结果;第8章开展了排烟阀排热效率研究和排烟风机排热效率研究;第9章给出了排烟阀排烟效率计算模型,并开展了集中排烟模式下排烟阀排烟效率分析研究;第10章开展了独立排烟系统合理的设置方案研究和独立排烟道系统排烟组织方案设计研究;第11章介绍了课题研究成果在工程实际中的推广应用,介绍了隧道工程集中排烟模式设计方案。

感谢课题组的所有研究成员多年的辛勤劳动和所在单位同事们的支持、帮助,同时对本书撰写过程中引用文献资料的作者,深表诚挚的谢意。

希望本书能为独立排烟道集中排烟模式的推广应用,提高我国公路隧道防灾减灾能力,推动行业技术进步起到作用,同时为隧道设计、建设、管理运营人员和科研工作者以及大专院校师生提供有益的借鉴和参考。限于撰写人员的水平,存在错误和不足之处在所难免,我们衷心希望业内同仁和读者多提宝贵意见,以便及时修正和改进。

编 者  
2013年3月



<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 隧道火灾的原因、特点及危害 .....	2
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.3 国内外公路隧道火灾案例调研 .....	9
<b>第 2 章 我国特长公路隧道通风排烟设计创新理念与研究思路</b> .....	20
2.1 国内外公路隧道通风排烟设计概况 .....	20
2.2 不同通风排烟模式的工作原理及其比较研究 .....	34
2.3 纵向通风模式下不同独立排烟道系统比较研究 .....	37
2.4 特长公路隧道通风排烟设计理念及模型试验研究思路 .....	49
<b>第 3 章 隧道火灾烟气运动理论基础</b> .....	55
3.1 火灾热释放速率 .....	55
3.2 隧道内火灾烟气运动理论 .....	59
3.3 隧道火灾排烟量的计算方法 .....	65
<b>第 4 章 隧道内火灾烟气运动研究方法及模型实验方案</b> .....	68
4.1 隧道通风排烟研究方法介绍 .....	68
4.2 数值模拟有效性验证 .....	76
4.3 模型试验相似原理分析及试验模型系统设计方案 .....	80
<b>第 5 章 坡度对隧道火灾烟气蔓延特性的影响研究</b> .....	102
5.1 引言 .....	102
5.2 研究现状 .....	103
5.3 坡度对隧道火灾蔓延影响的理论分析 .....	104
5.4 集中排烟模式下火灾烟气自由蔓延试验研究 .....	111
5.5 烟囱效应影响分析及排烟对策 .....	118
5.6 本章小结 .....	126
<b>第 6 章 集中排烟模式下诱导风速选择研究</b> .....	128
6.1 引言 .....	128
6.2 30MW 火灾下合理诱导风速的确定 .....	129
6.3 50MW 火灾下合理诱导风速的确定 .....	153

6.4	0% 坡度下合理纵向诱导风速数值模拟研究	178
6.5	不同坡度下合理纵向诱导风速	191
6.6	本章小结	194
<b>第 7 章</b>	<b>隧道排烟道及排烟阀流速分布规律研究</b>	<b>195</b>
7.1	引言	195
7.2	排烟道系统流速与压强理论分析	195
7.3	排烟道流速分布规律模型试验研究	202
7.4	排烟阀流速分布规律模型试验研究	211
7.5	本章小结	220
<b>第 8 章</b>	<b>隧道火灾下集中排烟模式排烟阀和排烟风机排热效率试验研究</b>	<b>221</b>
8.1	引言	221
8.2	排烟阀排热效率研究	222
8.3	排烟风机排热效率研究	228
8.4	本章小结	233
<b>第 9 章</b>	<b>集中排烟模式下排烟阀排烟效率数值模拟研究</b>	<b>234</b>
9.1	引言	234
9.2	排烟阀排烟效率计算模型	234
9.3	集中排烟模式下排烟阀排烟效率分析研究	236
9.4	本章小结	247
<b>第 10 章</b>	<b>集中排烟模式下排烟系统合理设置方案及排烟组织方案设计</b>	<b>249</b>
10.1	引言	249
10.2	独立排烟系统合理的设置方案研究	249
10.3	独立排烟道系统排烟组织方案设计研究	255
10.4	本章小结	258
<b>第 11 章</b>	<b>研究成果的推广应用</b>	<b>259</b>
11.1	应用工程概况	259
11.2	集中排烟关键参数的确定	261
11.3	排烟阀选型建议	266
11.4	本章小结	267
<b>参考文献</b>		<b>268</b>



# 第 1 章

## 绪 论

公路或道路是构建城乡交通网路的最重要基础设施之一,在我国经济社会各项发展中起先导引领作用,一直以来处于优先发展的地位并取得了巨大发展。公路隧道作为穿越山岭与江河等障碍的重要的地下构筑物在公路建设中无论是在克服障碍、改善线形、提高车速、缩短行车距离;还是降低交通事故发生率和保护环境等方面的优势越来越明显,并在公路建设中被大量采用,其规模和数量均快速发展。根据国家交通部发布的《2003 年公路水路交通运输业行业发展统计公报》,截至 2003 年底,我国公路隧道总数已达 2175 处、总长度 100.1 万 m,其中特长隧道 27 处、总长度 9.97 万 m,长隧道 243 处、总长度 38.56 万 m;交通运输部发布的《2011 年公路水路交通运输业行业发展统计公报》指出,截至 2011 年底,我国公路隧道总数已达 8522 处、总长度 625.34 万 m,其中特长隧道 326 处、总长度 143.32 万 m,长隧道 1504 处、总长度 251.84 万 m。可见,2003~2011 年的 8 年间,隧道数量与规模都增长近 3 倍(其中隧道处数年均增长约 15%,总长平均年增长率约 23%),尤其是长度超过 3km 的特长公路隧道,其数量与规模都增长 11 倍以上(其中特长隧道处数年均增长约 35%,总长平均年增长率约 38%),而浙江省更是一个多隧道省份,根据浙江省公路管理局统计,截至 2011 年底,全省公路隧道共 1370 处(约占全国公路隧道总数的 16%),总长度 85.60 万 m,其中特长隧道 25 处、共长 10.88 万 m,长隧道 230 处、共长 38.28 万 m。

目前,我国已经成为世界上公路隧道最多、发展最快的国家<sup>[1]</sup>,其建设与运营技术正进入世界先进行列。而近几年,长度超过 6km 的隧道也在不断增多,截至 2012 年 2 月底,我国已建成 20 多座长度超过 6km 的特长公路隧道,还有约 20 座尚处于建设中<sup>[2]</sup>。在国外,以瑞士、奥地利、挪威、日本为代表的发达国家,早在 20 世纪 60~70 年代就建成了一批特长隧道,如世界上最长的挪威 Laerdal 隧道,长度为 24.5km<sup>[3]</sup>。

公路隧道是狭长的管状构造物。驾驶员从明亮的露天段进入管体又从管体中穿出进入露天段,经历由明到暗,又从暗到明所带来的心理压力。因而,随着公路隧道数量、长度、密度的快速发展,以及行车速度和密度的加大,面临的安全隐患也越来越多。例如,特长隧道的通风、隧道的火灾防排烟、人员逃生及灭火救援安全等。汽车在特长公路隧道内行驶时排出的以一氧化碳为主的废气和卷起的尘埃会妨碍行





车安全和对人体造成危害<sup>[4-6]</sup>,同时车辆在隧道中的追尾事故及自燃等原因造成的隧道火灾事故的危险性亦呈上升趋势。20世纪80年代后期,据欧洲的统计资料显示:公路隧道发生火灾的概率是铁路隧道的20~25倍。有关资料统计分析:在隧道内汽车每行驶5000万辆公里就有可能发生一次火警<sup>[7]</sup>。尽管隧道火灾的发生率较低,然而隧道内一旦发生火灾,由于其狭长封闭的特性,其后果大大高于洞外露天段。英国、法国、意大利、日本、加拿大、奥地利、美国和德国都曾发生过严重的火灾事故并导致人员伤亡<sup>[8]</sup>。其中,近年来震惊世界的特长隧道火灾如下<sup>[9-13]</sup>:

1999年3月24日,位于法国与意大利间的勃朗峰(MontBlanc)隧道发生特大火灾,火势迅速蔓延,火灾形成的浓烟和高温辐射严重阻碍了消防人员灭火,大火燃烧了50多个小时,导致41人死亡,还有一名消防人员因伤势严重而死亡,43辆车烧毁,结构大面积破坏,隧道关闭近3年。

1999年5月29日,4辆轿车,2辆货车在穿越全长6.4km奥地利西部的陶恩隧道时,在隧道约700m处相撞着火。这场大火燃烧了十几个小时,烧毁14辆载货汽车和26辆小汽车,有12名乘客被火焰吞没或窒息死亡,另有49人受伤。

2001年10月24日,瑞士阿尔卑斯山区圣哥达隧道发生车祸,两辆载货汽车迎面相撞引发大火,有11人丧命,128人失踪。隧道内浓烟滚滚,空气难以流通,救援工作非常困难,隧道内的大火持续燃烧了一天一夜,40辆车被烧毁,运载轮胎的载货汽车起火燃烧后,有毒的黑烟使多人被熏死,包括驾驶员。而该隧道曾被认为是欧洲“最安全的隧道”,它不仅有一条平行的应急隧道,主隧道还安装了最先进的火灾探测系统和通风系统。即使如此,悲剧仍然没有避免。由于引起的大火燃烧过久,隧道圆拱顶部塌陷,短期难以修复通车,这条最重要的南北交通通道陷于瘫痪状态。

我国也曾发生过多次公路隧道火灾事故,如:1991年上海延安东路隧道发生火灾事故;1998年7月7日,福建盘陀山第二公路隧道因货车在隧道内起火发生火灾;1999年浙江大溪岭隧道发生火灾;2002年1月10日,浙江猫狸岭隧道火灾事故等<sup>[14]</sup>。近年来,随着国内公路隧道数量和规模双增长,发生隧道火灾事故事件也逐年增长。一些重大的恶性事故也出现,如2010年7月4日23时16分,无锡市内环高架快速路惠山隧道内发生的大客车自燃事故,导致乘客24死、伤19人,车辆被毁,隧道内设施受损,为近年来我国发生最严重的隧道火灾事故。

隧道火灾产生的高温烟气和有毒物质,会危及到隧道内驾乘人员的安全,导致洞内车辆和车上物资的毁损,带来隧道本身设施的损坏(包括通风设备、通信设备、照明设备、监控设备、电缆、电线等)。此外,隧道一旦发生火灾,势必要影响整条线路的交通,导致交通阻塞和中断,恢复运输要花几周、几个月甚至更长的时间。比如奥地利陶恩隧道的修复花了近三个月,勃朗峰隧道修复花了大约三年半的时间。为保证车辆在隧道内的安全行驶和良好的行车环境,以及火灾时人员和车辆的安全撤离,必须对隧道火灾进行有效的控制,因而在对特长公路隧道进行通风方案的设计时,除需满足交通运营通风外,还必须详细研究火灾发生时的通风排烟需求,即把正常运营通风和火灾时的通风排烟看作是整个通风系统的两种重要的工况进行系统全面研究,从而建立经济合理、安全可靠的防灾救援通风系统。鉴于特长公路隧道的建设在我国正处于快速发展阶段,而在隧道火灾安全方面的研究又处于滞后阶段,因此,针对特长公路隧道开展火灾条件下通风排烟研究成为目前亟须解决的重大关键技术问题之一。

## 1.1 隧道火灾的原因、特点及危害

### 1.1.1 隧道火灾发生的原因

联合国经济和社会理事会(Economic and Social Council)的研究报告《公路隧道火灾安全与专家组建议》(Recommendations of The Group of Experts on Safety in Road Tunnels)(2001)指出,根据国际上的调查统计,公路隧道火灾的主要原因有<sup>[15]</sup>:

- (1) 因电气系统缺陷、发动机过热或其他原因导致的汽车或所载货物的自燃;
- (2) 事故(碰撞、翻车)原因,世界14起最大火灾事故中有12起由此原因造成。

我国的隧道火灾也多为发动机自燃、轮胎发热自燃、碰撞漏油等因素引起。目前我国的部分营运车辆(特别是载货汽车)车况较差,超载情况较严重,特别是在单向长下(上)坡隧道中,长上坡路段由于发动机持续加热和长下坡路段长时间的制动引起温度升高,增加了发生火灾的可能性,尤其是在较大车流量的隧道中,产生这种情况的概率更大。因而,公路隧道火灾的产生是由车辆自身缺陷及随机发生的事由两方面引起的,是客观存在且无法完全杜绝的,只能采取必要措施降低发生概率和尽可能减少损失,所以必须引起高度重视。

### 1.1.2 隧道火灾的特点及危害

隧道结构和设施复杂、出入口少、疏散路线长、通风照明条件差,在通风的隧道内一旦发生火灾,其危害性极为严重。

- (1) 烟气产生量大,温度高,能见度低,蔓延速度快

隧道是近乎封闭的空间,在其中发生的火灾多为不完全燃烧,燃烧产生大量的烟雾和有毒气体CO等。同时由于很难进行自然排烟,热量不容易散发,烟气在高温产生的浮力和机械通风的作用下,会沿隧道纵向迅速蔓延。

- (2) 车辆多,通道容易堵塞

火灾发生时,如果交通控制不及时,大量车辆鱼贯而入,难以疏散,易造成严重堵塞。加之隧道内高温烟气蔓延速度快,极易造成火势顺车辆蔓延,扩大损失。

- (3) 人员疏散困难

当火灾发生时,由于隧道是管状构造物、内空狭长,加之障碍物多(车辆、隧道壁上分布的电缆架、消防箱等),能见度低,惊慌失措的逃难者从车辆中逃出后,因无法辨别方向而乱冲乱撞,严重影响疏散速度,甚至造成跌倒踏伤的后果。

- (4) 扑救难度大

由于隧道出入口少,内部能见度低、障碍物多,能深入火场内部的消防人员有限;另一方面,火灾烟气温度高,隧道内壁经长时间的烘烤,辐射出大量的热量,消防人员将面临高温考验;加之隧道发生火灾后,当隧道控制中心因断电不能正常运行时,消防队员不能从外部直接观察起火点的燃烧情况,这些都大大增加了扑救难度。

- (5) 通信困难,指挥不畅

隧道内一旦断电,有线应急电话和无线电话的使用有可能受到影响,同时消防通信头盔等装备的缺乏,也造成了隧道内外通信联系的困难。

综上所述,隧道火灾往往伴随着高温、烟气窒息、能见度下降,造成逃生困难,以及短时间内外部救援很难到达现场展开施救工作。同时,隧道火灾事故除造成人员伤亡、大量的物质毁损外,还常常对隧道设施造成极大破坏并长时间中断交通,火灾造成巨大的直接损失、间接损失难以估计。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国内外运营通风方式的研究现状

针对公路隧道为狭长的管状构造物特点,隧道通风问题因涉及安全和环境问题,故始终作为公路隧道技术的重要分支得以发展。特别是近几十年来,随着隧道越来越多、越来越长,对隧道行车环境质量要求和火灾事故危害重视程度也越来越高,各国针对公路隧道通风研究愈发重视并竞相开展。早期修建的



公路隧道,多依靠自然风和交通通风力,这也可以说是最早形成的纵向通风系统。但随着汽车时代的到来,交通量日趋增大,该通风方式在隧道超过一定长度或交通量达到一定值后,就不能满足稀释污染物浓度的要求,其适用性也受到限制<sup>[16]</sup>。

1924年美国匹兹堡市的自由隧道(长1800m)发生交通堵塞,洞内较高的CO浓度致使多名乘客昏迷,此次事故引起有关方面的重视,其后在修建霍兰隧道时,首次采用了全横向机械通风方式,并以美国矿业公司为主,在一些大学和研究所的协助下,对汽车尾气中CO的产生量和人体对CO的允许浓度进行了测试和研究,至此展开了公路隧道的汽车污染物排放和通风卫生标准的研究<sup>[17][18-22]</sup>。

继美国霍兰隧道首次成功采用全横向式机械通风后,1934年英国在Mersey隧道中成功运用了半横向式通风方式<sup>[23]</sup>。随后此两种通风方式被欧洲诸国普遍采用,并通过中部增设竖井将其运用到10km以上的特长公路隧道中。

但由于全横向和半横向这两种通风方式都需要隔离较大的隧道断面空间作为风道,需要大功率的轴流风机将洞内废气排出,因而需要花费较大的工程费用和营运费用。于是人们把目光重新转入最初的纵向通风系统。现代的纵向通风方式自1961年采用以来,由于其经济性和可靠性,迅速得到了推广应用,其形式也愈加多样化,适用范围也愈加广泛<sup>[17]</sup>。

在国外,日本对公路隧道运营通风问题研究比较系统,除污染物的排放、容许浓度及隧道污染物调查等方面的研究外,在通风方式及其计算理论的研究方面也取得了应用性的成果<sup>[24]</sup>。1963年修建在名(古屋)神(户)高速公路的天王山隧道使用了半横向通风方式,1966年在Okuda隧道中使用全射流纵向通风系统,同年竖井集中排出式纵向通风方式也在日本Womiyama隧道中投入使用。该通风方式通过在隧道中间设置竖井、横洞或斜井,加大了纵向通风的适用长度<sup>[25,26]</sup>。近年来,欧洲等发达国家新建的特长公路隧道也从初期的横向通风方式大多过渡为纵向通风系统。

在我国,公路隧道大量出现仅有20年的历史,其通风方式也经历了由全横向、半横向式向纵向式逐渐过渡的过程<sup>[24][27,28]</sup>。1999年通车的浙江省甬台温高速公路大溪岭—湖雾岭隧道全长4116m,为当时通车的国内双洞上下行分离的最长公路隧道。运营通风在国内首次采用竖井送排式分段纵向通风方式,为随后建设的国内特长、超长隧道运营通风技术提供了示范和先导作用<sup>[29]</sup>。近十多年的运营表明,该种纵向通风方式较为成功,并逐渐在国内特长公路隧道中推广<sup>[18][23][30]</sup>。

随着通风技术的发展,隧道通风理论研究也逐步深入,目前主要通过理论计算、数值模拟、模型试验及现场试验等手段来获得隧道内风速场、压力场、温度场的分布,从而制定出隧道通风的最佳方式和最佳控制系统。迄今为止,建立在流体力学和空气动力学基础之上的公路隧道通风一维计算理论已趋于完善,其理论基础是空气动力学中的连续性方程、动量方程和能量方程<sup>[17][30-32]</sup>。

近年来,各国的隧道通风专业人员都致力于将纵向通风计算程序化,最具代表性的是瑞典的Axel Bring等在IDA(输入数据汇编程序)环境下编制的一套用模块模拟的程序<sup>[31][33]</sup>。英国的Alan Vandy根据气体流动的连续性方程、动量方程和能量方程,进行隧道内气流分布和污染物随时间分布的一维流动的非稳态模拟,编制了可应用于半横向通风和纵向通风的计算软件<sup>[32][34]</sup>。美国也于20世纪80年代中期研制出了用于纵向通风隧道一维稳定流场计算的TUNVEN软件,用于计算风流的速度、压力和污染物浓度分布。

但对于公路隧道纵向通风的多维和动态计算,由于其复杂性,多运用计算流体力学软件(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)进行模拟分析。欧洲国家从20世纪70年代初就开始对此进行了研究。

我国的公路隧道建设起步较晚,但随着20世纪90年代中期以来特长公路隧道的大量出现,近年来在该领域的基础及应用性研究也取得了长足进步。

国内最早对公路隧道通风进行研究的是20世纪80年代中期修建的上海打浦路黄浦江隧道。1989年成渝高速公路中梁山隧道和缙云山隧道采用纵向通风方式后,为深入研究特长公路隧道采用纵向通风系统的关键问题,重庆市重点公路指挥部和西南交通大学等开展了“公路长隧道纵向通风技术研究”,并建立了纵向通风一维常规与动态通风量、烟尘浓度反算的计算程序,同时借助CFD理论对全射流通风和

射流风机与竖井排出组合通风方式的风压和风速场进行二维有限元数值模拟。兰州铁道学院采用1:20的局部变态模型试验对中梁山隧道的通风流场分布进行了测试,对通风系统的合理性和可靠性进行了验证<sup>[23]</sup>。1998年大溪岭—湖雾岭隧道在国内首次采用竖井送排通风方式,浙江省交通规划设计研究院与交通部重庆公路科学研究所进行了该通风方式的研究。吴德兴、蒋树屏等在国内首次进行了竖井送排式纵向组合通风理论性和工程性研究<sup>[29]</sup>。2000年秦岭终南山隧道首次在国内采用了多竖井送排与射流风机组合的通风方式,长安大学对三竖井纵向分段通风方案进行了系统的验证和局部构造优化,提出了合理的送排风短道量化指标<sup>[35,36]</sup>。后来浙江苍岭隧道、双峰隧道、湖南雪峰山隧道在采用该通风方式时,进行了更加深入的研究。随着我国交通事业的飞速发展,关于公路隧道通风理论的研究也将逐步深入。

### 1.2.2 国内外隧道火灾通风的研究现状

世界上第一条发生火灾的隧道是美国纽约——新泽西的霍兰隧道,1949年由于汽车相撞引发了大火,这次事件唤起了专家对火灾潜在危险的意识,逐渐认识到隧道火灾问题是通风研究中不可缺少的重要组成部分,虽然公路隧道的火灾为数很少,但一旦发生,造成的损失巨大。近二三十年来,日本、瑞士、奥地利等国纷纷进行研究和实地模拟隧道火灾试验,研究了隧道火灾的危害性及其消防对策。

长期以来,试验研究一直是隧道火灾领域中的重要研究手段之一。在试验研究方面,针对火灾时的隧道通风状态及烟流控制等问题,国外做了大量的研究工作,并于1981年4月制定了《隧道防火设施技术标准》<sup>[37,38]</sup>。

20世纪60年代末~70年代,瑞士、奥地利和美国等分别在西梅昂等铁路、奥芬耐格隧道、格拉斯哥隧道和某矿山巷道中进行轿车、油罐车等不同火源的火灾试验,对火灾烟流层流动性态进行了研究。Heselden根据火灾的统计数据,定义了不同火源的火灾规模热释放率;提出了一种估测火灾烟雾的产生量、温度分布、不同量级火灾传播速率及火灾烟流初始厚度和初始流动速度的方法;并对假设各种火灾规模条件下的隧道烟流和火焰扩散进行了计算<sup>[39,40]</sup>。

近年来,随着计算流体力学、计算燃烧学和数值传热学的发展,用计算机模拟隧道火灾的发展及烟雾的流动越来越受青睐,已被应用于隧道火灾的许多方面。国外最早进行火灾数值模拟的是1970~1975年美国帕森斯·布林克霍夫林领导小组开发的地铁环境模拟(SES)计算机程序。20世纪70年代末,美国运输部委托帕森斯,开发了反映与隧道火灾相关的各种空气动力学热力学参数的地铁环境模拟火灾模型。这项工作开始于1978年,在1980年11月,研究出的地铁隧道火灾通风模型能够模拟隧道火灾的“综合效应”,系统中充分考虑了应急系统的适应性、火灾的热效应、浮力效应、密度对风机的作用效应,采用传热学的理论模拟隧道边墙表面温度的反应,预测火灾烟流的温度,这套系统随后在公路隧道中也得到了应用。

随后,英国火灾中心的Cox等人较早地采用CFD方法研究公路隧道火灾问题,建立了JASMINE数学模型<sup>[41-43]</sup>。该模型采用计算流体力学方法,根据研究对象的尺寸和形状,将其体积分成几千个很小的控制体积,使用有限差分法求解出控制偏微分方程。程序中考虑通风、坡度的影响,进行了稳定和不稳定火灾烟流场的三维数值模拟,得到不同风速下和不同时刻的速度分布、温度分布,并通过Zwenberg隧道的火灾试验验证其可靠性。英国Leeds大学在假设质量和能量守恒、压力差小、混合气流层的速度为热气流和冷气流层速度之和一半、隧道断面不变且平滑、羽流沿中心线呈正态分布的情况下开发了隧道内火灾增长和烟气的流动模型FASIT计算软件。20世纪80年代中期,根据完全燃烧时燃料的消耗化学反应的质量守恒方程计算产烟量,通过热量源和烟流源定义火灾,实现了火灾的三维数值模拟,开发了计算隧道火灾的SOLVENT软件。通过该软件的模拟可以确定火灾后的不安全区域,比较不同通风设施设置的有效性及其隧道的坡率、通风系统滞后时间等因素的影响。

从1983年Kumar建立火灾场模型以来,出现了许多场模拟的大型通用计算流体力学商业软件和火灾专用软件。通用商业软件以PHOENICS、FLUENT、CFX、STAR-CD、FDS为代表,这些软件被应用于隧道





火灾的各个方面。MTFVP 项目选择 FDS2 (Fire Dynamics Simulator Version 2.0) 用来模拟不同火灾规模下需要控制烟回流的风速。1991 年英国 Fletcher. D. F、Kent. J. H、Apte. V. B 和 S. R. Bishop<sup>[44-46]</sup>着手模拟纵向通风隧道中火势在物体间的蔓延问题。日本 M. Dobashi 和 T. Imai 等对横向通风和纵向通风系统在火灾模式下的通风问题进行了模拟,并将成果应用到 Higashiyama 隧道<sup>[47]</sup>。法国 F. Demou 和 D. Lacroix 对横向通风方式下的烟气流动进行了三维数值模拟<sup>[48]</sup>。美国 S. S. Levy 和 J. R. Sandzimier 通过三维瞬态数值模拟对 Ted Williams 隧道的派分量和烟气的效果进行了研究。瑞士的 C. Rudin 通过对特长公路隧道的烟气扩散的数值模拟,提出了隧道内设置救援站的原则<sup>[49]</sup>。瑞典的 Lund 大学,通过隧道内火灾物质燃烧时温度、烟气在隧道纵断面上的分布随时间和空间变化情况的模拟,对火灾烟气流动和安全疏散的相互作用进行了研究。近年来,挪威在规划修建的一越海通道工程采用 CFX 计算软件对下坡隧道中的火灾烟流瞬态数值模拟,证实了火灾通风中的“烟囱效应”现象。目前 CFD 计算已被广泛地运用于隧道火灾的模拟中,由于隧道火灾物理过程的不确定性,诺曼·劳得斯提出了影响隧道火灾模拟质量的若干因素(包括几何条件和边界条件、火焰的模拟等),为隧道火灾的数值模拟提供了参考<sup>[30]</sup>。

国外对隧道的火灾研究还在不断的深入中,对于火灾的研究也越来越系统,已经从单纯的火灾特性的研究上升到将火灾视作包括事故概率、火灾后果、人的反应、结构的反应、通风系统反应、紧急响应梯队以及隧道管理者等多方面的相互关联的体系来进行研究<sup>[30]</sup>。

国内对于公路隧道火灾方面的研究起步较晚,目前研究大多集中在特长隧道通风方面,而对于隧道火灾的模型试验研究开展得相对较少。

在全尺寸隧道火灾研究方面,霍然等在云南昆石高速公路阳宗隧道(长 2700m、宽 14.8m、高 8.9m)、元墨高速公路大风垭口隧道(长 3200m、宽 10.8m、高 7.2m)、元江 1 号隧道(长 1024m、宽 10.8m、高 7.2m)进行了现场试验,对隧道烟气层平均温度沿隧道的衰减规律进行了研究,建立了隧道火灾烟气逆流距离及临界纵向抑制风速的预测模型。

在隧道火灾模型试验方面,“八·五”期间,由铁道部科学研究院西南分院采用 1:3 的模型进行单线铁路隧道的火灾试验,对封堵燃烧火灾烟流及温度场扩散进行了研究,提出启封隧道的时间,并通过上坡隧道试验证实火风压的存在<sup>[50]</sup>。

中国科技大学李元洲等运用多单元的区域模拟和场模拟的方法对隧道内火灾烟流随时间的发展情况进行模拟,区域模拟采用的是多室的 CFAST 火灾发展程序<sup>[51]</sup>,CFD 场模拟采用的是 FDS 软件,无风条件下两者结果比较一致,区域模拟对风的反应不敏感,而场模拟时风对烟气场的发展具有较大的影响。2004 年采用 FDS 火灾计算软件对二郎山隧道火灾烟气的运动和蔓延进行了三维数值模拟,提出了排烟及人员疏散方案。张进华等分别采用 PHOENIC 软件对雪峰山隧道内烟气场、温度场的蔓延规律进行了模拟。

西南交通大学何川、曾艳华等针对高寒地区的鹧鸪山隧道,采用 CFD 三维数值模拟手段,解决了风流分汇流场的局部阻力损失问题,并以此为基础,通过对不同通风方式隧道内典型位置发生火灾控制分风的计算,提出不同通风方式下火灾通风组织和合理射流风机开启位置、设置地点及主风机的工作性能,为火灾通风设计提供了重要的指导意见<sup>[18]</sup>。范磊利用 CFD 三维数值模拟手段对浙江省境内括苍山特长公路隧道火灾条件下烟气场及温度场进行了研究,重点对有独立排烟通道的竖井送排式纵向通风排烟系统进行了分析。研究在不同风速,不同排烟口位置、不同开口尺寸及不同火灾释放率条件下的火灾流场特征,结合火灾特性和人员疏散特性,从安全性和经济性的角度出发,提出括苍山公路隧道进出口段和中间段的人行横通道间距设置的建议<sup>[52]</sup>。

浙江省交通规划设计研究院与中南大学防灾科学与技术研究所合作首次建立了 1:10 的缩尺寸独立排烟道隧道排烟试验模型,系统地研究了公路隧道火灾时独立排烟道集中排烟的排烟机理与烟气控制技术,并首次通过同一隧道模型,系统开展对独立排烟道集中排烟和纵向通风排烟的对比试验研究<sup>[53]</sup>。

随着国内特长公路隧道的迅猛发展,对营运期隧道发生火灾的危害性逐渐重视起来,目前国内已将



特长公路隧道的运营通风和火灾救援通风作为通风设计中密不可分的整体来进行研究。

### 1.2.3 正常工况需风量及火灾工况排烟量的发展趋势分析

随着机动车生产技术的日益进步,各个国家的机动车排放标准越来越高。以欧盟国家为例,欧盟关于柴油车 PM 排放标准的实施进度,每隔4年将进行一次标准的加严,从欧盟的欧 I 排放法规实施以来,目前已经制定了2005年实施欧IV排放法规。我国所有机动车辆(包括柴油车)的排放体系都是采用欧盟的排放标准,并在2000年开始等同采用欧 I 排放法规,目前与欧盟的差距在6年左右<sup>[54-55]</sup>。表1.1、表1.2为欧盟各个等级的排放标准<sup>[21]</sup>。

欧盟法规关于重型货车废气与颗粒物排放标准 $[\text{g}/(\text{km}\cdot\text{h})]$

表 1.1

重型货车 HGV	年份	试验规则 Test	CO	HC	NO <sub>x</sub>	颗粒物 PM
ECE R49	1982	R49	14.0	3.5	18.0	
pre EURO* (欧盟以前)	1991	R49	12.3	2.6	15.8	
ECE R49/02 (欧 I)	1992	R49	4.9	1.23	9.0	0.4 (>85kW) 0.68 (<85kW)
欧 II	1997	R49	4.0	1.1	7.0	0.15
欧 III	2000	EST	2.1	0.66	5.0	0.10
欧 IV	2005	EST/ECT	1.5	0.46	3.5	0.02
欧 V	2008	EST/ECT	1.5	0.46	2.0	0.02

注:\*为德国标准 88/77/EWG。

欧盟法规关于乘用车废气及 PM 排放标准 $(\text{g}/\text{km})$

表 1.2

乘用车 Passenger cars	年份	试验规则 Test	CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC + NO <sub>x</sub>	颗粒物 PM
汽油车 ECE 15/04 gasoline <sup>##</sup>	1982	R15	16.5			5.1	
汽油车欧 I gasoline	1992	NEDC	2.72			0.97	
柴油车欧 I diesel	1992	NEDC	2.72			0.97	0.14
汽油车 I 欧 II gasoline	1997	NEDC	2.2			0.5	
柴油车 E2.3URO 2 diesel	1997	NEDC	1.0			0.7	0.08 (IDI) 0.10 (DI)
汽油车欧 III gasoline	2000	NEDC <sup>#</sup>	2.3	0.2	0.15		
柴油车欧 III diesel	2000	NEDC <sup>#</sup>	0.64		0.5	0.56	0.05
汽油车欧 IV gasoline	2005	NEDC <sup>#</sup>	1.0	0.1	0.08		
柴油车欧 IV diesel	2005	NEDC <sup>#</sup>	0.5		0.25	0.30	0.025

注:#为修正的试验规则;##为汽车质量小于1020kg的特定质量值。

从表1.1和表1.2中可以看出,各类柴油车的PM(Particle Matter)限制值的降幅均大于75%。柴油汽车的PM排放量的快速降低使得烟雾基准排放量也呈快速下降趋势。我国实行改革开放以来,汽车发达国家已在我国合资建厂制造新型车辆,且已大量投入生产和使用。我国最新的《汽车报废标准》规定:轻、微型载货汽车(含越野型)、带拖挂汽货车、矿山作业车及各类出租车使用8年。预计我国在“十二五”时期实施等效欧IV的排放标准(即国IV排放标准),到2022年所有柴油车(包括在用车和新生产车)都将达到欧IV标准,综合考虑各型柴油车烟雾排放的下降比例,即:2000~2022年,柴油车的烟雾排放将累计下降至少76%,年平均3.45%。2012年初国家环保部提出要求:2013年7月1日起生产的柴油压缩发动机及汽车均要达到国IV排放标准。可见节能减排和大气环境质量形势严峻,将加快控制排放的步伐。

CO的排放情况同样如此,2000~2025年,柴油车的CO排放将累计下降至少81.62%,年平均6.31%;汽油车的CO排放将累计下降至少63.24%,年平均3.78%。因此,可以预计隧道正常工况需风



量将逐年大幅下降。

欧盟在环保方面起引领作用,对汽车排放越来越严格。2007年欧盟通过“指令 715/2007”,对乘用车开始实施欧 V/VI 标准(2009/2014),2009 年达到欧 V,2014 年达到欧 VI 标准。欧 V/VI 实施法规引入了一种新的 PM 质量排放测试方法(与 US 2007 程序相似),这个方法由 UN/ECE PMP 开发。考虑到采用新旧方法造成结果差异,对 PM 质量排放限值进行了修改。除了基于质量的排放限值外,欧 V/VI 编委会还提出了粒子数(PN)排放限值<sup>[180]</sup>。在重载货车和公共汽车方面,2005 年提出,2008 年达到欧 V 排放标准;2009 年提出“指令 595/2009”,规定 2013/2014 年实施欧 VI 排放标准<sup>[180]</sup>。如轿车的欧 V/VI 排放标准见表 1.3;重载货车的欧 V/VI 排放标准见表 1.4。

轿车(passenger cars)的欧洲汽车废气排放标准(类别 M1\*)

表 1.3

阶段	实施时间	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM	PN
		g/km					
压缩式点火(柴油车)							
欧 Va	2009.09 <sup>#</sup>	0.50	—	0.23	0.18	0.005	—
欧 Vb	2011.09 <sup>##</sup>	0.50	—	0.23	0.18	0.005	$6.0 \times 10^{11}$
欧 VI	2014.09	0.50	—	0.17	0.08	0.005	$6.0 \times 10^{11}$
强制式点火(汽油车)							
欧 V	2009.09 <sup>#</sup>	1.0	0.10	—	0.06	0.005	—
欧 VI	2014.09	1.0	0.10	—	0.06	0.005	$6.0 \times 10^{11}$

注:#为 2011.01 适用于所有类型;##为 2013.01 适用于所有类型。

重型载货车柴油机的欧盟排放标准:稳态测试

表 1.4

阶段	实施日期	测试方法	CO	HC	NOx	PM	PN	排烟量 Smoke
			g/(km·h)				L/(km·h)	L/m
欧 V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
欧 VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.4	0.01	$8.0 \times 10^{11}$	

然而,隧道通风系统不但要满足正常运营工况的需要,即用新鲜空气稀释隧道中车辆排放的污染物,使其浓度保持在允许限度内,更要满足火灾工况的需要,即对火灾烟气进行有效控制,使人员逃生空间内的烟气层化流动,火灾上游人员能处于无烟环境,延长宝贵的逃生时间,大大增强消防能力,尤其是人员逃生与救援的安全性,并防止火势进一步扩大。尤其是近年来,世界多条特长隧道发生的火灾事故引起的巨大人员伤亡和财产损失,使隧道这种特殊的管状运输系统火灾安全问题日益受到各国政府重视。从重视营运“正常通风”向“正常通风与火灾通风”并重方向发展,烟气分离设计是其趋势<sup>[56]</sup>。

火灾需风量与隧道火灾设防规模即火灾热释放速率(Heat Release Rate,简称 HRR)有直接关系,国际道路协会 PIARC 推荐公共汽车(Bus)的 HRR 值为 20MW,货车(Truck load)的 HRR 值为 20~30MW,重型卡车(Heavy goods vehicle)的 HRR 值为 30MW<sup>[57]</sup>。

在欧洲大多数国家,隧道火灾规模按照 30MW 考虑,英国规范中,对于长度超过 2km 的城市主干道和高速公路隧道,火灾规模按照 50MW 考虑<sup>[57]</sup>。

根据 PIARC 的研究报告<sup>[57]</sup>,由于汽车排放量的逐年大幅降低,隧道正常工况需风量将逐年大幅下降。而随着各国对隧道火灾安全的日益重视,以及载货汽车日趋重型化,火灾工况的需风量将大幅增加。此消彼长的结果是火灾需风量成为对隧道需风量的控制。

#### 1.2.4 特长公路隧道通风排烟系统存在的问题及发展

我国自 1988 年进行有计划的隧道消防研究工作以来,虽对于火灾通风研究较多,但相比而言仍存在

诸多问题:由于经费等原因,未能进行隧道实体尺寸火灾试验,缩小比例的火灾实验也只进行过几次,且实验数据由于实验设备、测点的数目有限而不能给出完整的火灾信息,实验人员也很难观察到火灾烟流内部复杂的流动现象和特征。因而,国内从为数不多的实验中所获得的火灾参数还较为缺乏,总结出的火灾烟流流动和温度分布规律不够深入,对火灾现象和特征的分析不充分。然而,要达到对隧道火灾合理有效的控制,必须首先对隧道火灾现象及特征规律有清晰的认识。

此外,随着国内带有长大坡度的特长公路隧道大量涌现,对于该类隧道由于火灾时产生的大量燃烧热后逐渐增加的隧道内温度差以及洞口之间、洞口与竖井之间的气压差而形成的“烟囱效应”问题被逐渐提出并得到工程界普遍关注。但鉴于国内外对于该方面的研究较少,缺乏可供参考的资料,而“烟囱效应”作为山岭隧道特有的现象存在时将可能导致隧道火灾时实际烟流速度与设计中存在较大差异,严重时将可能导致灾难性后果。因此,随着国内特长公路隧道建设的逐渐开展,对于特长公路隧道进行火灾条件下的“烟囱效应”分析已成为隧道消防设计中亟待解决的研究课题之一。

有鉴于目前我国特长公路隧道火灾条件下存在的诸多问题,为有效解决该类隧道营运过程中发生火灾条件下的通风排烟问题,近年来,以浙江省交通规划设计研究院为主体,在充分借鉴国外先进设计理念的基础上,针对车流量大或客流量大以及隧道安全管理要求高的特长公路隧道,提出了一种组合通风方式,即通过在隧道顶部或与主隧道分离的独立隧道设置独立的排烟道,将纵向通风与集中排烟通风进行有机结合使用,在正常(非火灾)工况条件下,排烟道一般不使用,排烟阀阀门关闭,利用竖(斜)井送排风+射流风机的纵向通风模式进行通风;在火灾工况条件下,利用专用排烟道,采用排烟轴流风机集中排烟+射流风机纵向诱导相结合的通风模式进行火灾通风排烟<sup>[58]</sup>。这是国内首次在公路隧道中提出该通风排烟模式,并在国内浙江钱江盾构隧道的通风防灾设计中得到了应用<sup>[53]</sup>。对于此种通风排烟方案下的烟控效果,国内多家单位曾采用数值分析方法进行过模拟,而其实际效果并没有通过试验验证。因此,对于隧道防灾通风排烟系统的技术参数,迫切需要开展理论分析和试验测试研究。

### 1.3 国内外公路隧道火灾案例调研

#### 1.3.1 国外公路隧道火灾案例调研

据有关资料显示,公路隧道的火灾风险为铁路隧道的20~25倍,国外发生的若干隧道火灾均证明了这一结果。表1.5为国外隧道重大火灾事故不完全统计表。

国外隧道重大火灾事故不完全统计表

表 1.5

年份	隧道名	隧道长度(m)	火灾原因	人员伤亡	汽车损坏情况	结构及设备损坏情况
1979	日本造贺隧道	2045	追尾	7人死亡,1人受伤	127辆载货汽车,46辆轿车	1100m范围严重损害
1982	阿富汗萨兰尼隧道	2700	碰撞油罐	>200人死亡		
1983	意大利萨沃纳皮克里拉伽利略隧道	662	追尾	9人死亡,22人受伤	10辆轿车	轻微损害
1999	法国—意大利勃朗峰隧道	11600	油泄漏	41人死亡	23辆载货汽车,10辆轿车,1辆摩托车,2辆消防车	严重损害,隧道关闭至2001年12月22日
1999	奥地利A10公路Tauern隧道	6401	4辆轿车和2辆卡车连环追尾	12人死亡,49人受伤	14辆载货汽车,26辆轿车	严重损害
2000	奥地利萨尔茨堡州卡普伦缆车隧道	4000	机械问题	死155人,伤18人		



续上表

年份	隧道名	隧道长度 (m)	火灾原因	人员伤亡	汽车损坏情况	结构及设备损坏情况
2001	意大利 A32 公路普拉博蒂隧道	4409	机械问题	19 人受伤		往西方向关闭至 6 月 6 日
2002	奥地利 Tauern 隧道	6401	车辆碰撞	1 人死亡		
2003	挪威 Fløyfjel 隧道	3100		1 人死亡	1 辆轿车	轻微损害
2004	苏格兰 Baregg 隧道	1080		1 人死亡, 1 人受伤	1 辆载货汽车, 1 辆轿车	严重损害
2005	法国/意大利 Frejus 隧道	12900	货车燃烧	1 人死亡, 21 人受伤	4 辆 HGV, 3 辆消防车	严重损害, 隧道关闭
2006	苏格兰 Crap-Teig 隧道	2171			1 辆 HGV	轻微结构破坏
2007	澳大利亚 Burnly 隧道	2900	车辆相撞	3 人死亡	4 辆 HGV, 7 辆轿车	轻微损害
2009	挪威 Eiksund 隧道	7700	车辆相撞	5 人死亡	1 辆 HGV, 1 辆轿车	
2010	斯洛文尼亚 Trojane 隧道	885		5 人受伤	1 辆 HGV	

通过上述公路隧道火灾统计并结合 PIARC 的调查分析可知<sup>[54]</sup>, 在欧洲, 火灾事故发生频率平均为 4 ~ 5 次/亿车公里, 法国隧道火灾频率为 0 ~ 10 次/亿车公里; 1999 年 PIARC 基于对许多地区的调查给出了以下结论<sup>[15]</sup>: 任何地区, 平均火灾频率最高小于 25 次/亿车公里。在特长隧道或交通量大的隧道或者两者兼而有之的隧道中火灾发生概率从 1 次/月到 1 次/年不等。表 1.6 列举了欧洲国家部分高速公路隧道的火灾发生频率。

高速公路隧道的火灾情况

表 1.6

国家	隧道	长度	调查年份	年交通量 (10 <sup>6</sup> 辆/年)	火灾信息 (比例单位: 10 <sup>8</sup> 辆·km)					
					客车		载货汽车		总数	
					数量	比例	数量	比例	数量	比例
法国	Dullin	1500	1984 ~ 1991	7.3	1	1.6	0	0.0	1	1.3
	Vuache	1400	1990 ~ 1993	4.8	1	3.0	0	0.0	1	2.0
	Chatillon	700	1990 ~ 1992	6.0	1	10.4	0	0.0	1	8.0
	St. Germain de Joux	1200	1990 ~ 1992	6.0	0	0.0	1	3.4	1	8.1
葡萄牙	L, Epine	3100	1984 ~ 1991	5.8	1	0.6	1	40.0	2	1.1
	Chamoise	3300	1988 ~ 1992	8.5	1	1.5	5	22.6	6	6.8
葡萄牙	Aguas Santas	300	1991	7.6	0	0.0	0	0.0	0	0
瑞典	Karra	400	1987 ~ 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Sorvik	200	1987 ~ 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Askloster	300	1987 ~ 1991	4.0	—	—	—	—	—	19.0
	Windo	500	1987 ~ 1991	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
澳大利亚	Perjen	2900	1987 ~ 1991	3.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Amberg	3000	1987 ~ 1991	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Pfander	6720	1985 ~ 1988	3.6	—	—	—	—	—	0.7
	Arbreg	14000	1987 ~ 1991	1.7	—	—	—	—	—	2.5
	Katschberg	5400	1987 ~ 1991	3.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Tauern	6400	1987 ~ 1991	4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0