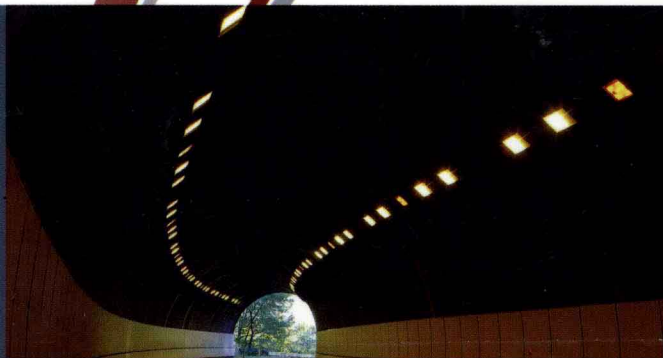


# 高速公路隧道及 隧道群防灾救援技术

王明年 杨其新 郭春◎编著

Highway Tunnel Disaster  
Relief Technology



人民交通出版社  
China Communications Press

Highway Tunnel Disaster Relief Technology

# 高速公路隧道及隧道群防灾

## 救援技术

王明年 杨其新 郭 春 编著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是在全面系统地总结多年来我国长大公路隧道防灾救援技术研究成果基础上完成的,主要内容包括隧道火灾数据库、隧道火灾模型试验、隧道火灾场景数值模拟、隧道火灾通风力计算及烟流控制标准、隧道火灾网络通风计算方法及程序实现、单座隧道防灾救援体系、隧道群防灾救援体系、公路隧道火灾预防技术、悬挂自反应移动式智能灭火消防装置、隧道防灾救援预案的风流组织现场测试等。

本书内容丰富,具有很强的实用性,可作为公路隧道设计、施工、管理人员的参考用书,亦可作为隧道专业本科生、研究生教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速公路隧道及隧道群防灾救援技术 / 王明年等编  
著. —北京:人民交通出版社, 2010.11  
ISBN 978-7-114-08518-5

I. ①高… II. ①王… III. ①高速公路—公路隧道—  
防火—研究 IV. ①U459.2 ②U458

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第118265号

书 名: 高速公路隧道及隧道群防灾救援技术

著 者: 王明年 杨其新 郭 春

责任编辑: 曲 乐 王文华

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: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20.25

字 数: 508千

版 次: 2010年11月 第1版

印 次: 2010年11月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08518-5

定 价: 42.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

目前,我国最长的高速公路隧道为秦岭终南山特长公路隧道,全长 18.020km,双洞双车道,正在规划或建设的 10km 以上高速公路隧道有 7 座。为了将“以人为本”的设计理念落实到公路隧道运营管理中,减小公路隧道发生火灾的概率和规模,杜绝公路隧道发生火灾可能造成的人员伤亡,降低公路隧道发生火灾可能造成的财产损失,减少公路隧道建设和运营投资,提高公路隧道运营管理水平,推动我国公路隧道防灾救援技术进步,交通部西部交通科技项目管理中心从 2001 年以来,系统地开展了我国公路隧道防灾救援技术的研究。这些研究成果,不仅直接指导我国特长公路隧道的设计,而且对构建我国长大公路隧道防灾救援体系,完善我国公路隧道防灾救援设计规范,提高我国公路隧道运营管理水平,都具有十分重要的意义。

本书共分 11 章,第 1 章绪论,第 2 章隧道火灾数据库,第 3 章隧道火灾模型试验,第 4 章隧道火灾场景数值模拟,第 5 章隧道火灾通风力计算及烟流控制标准,第 6 章隧道火灾网络通风计算方法及程序实现,第 7 章单座隧道防灾救援体系,第 8 章隧道群防灾救援体系,第 9 章公路隧道火灾预防技术,第 10 章悬挂自反应移动式智能灭火消防装置,第 11 章隧道防灾救援预案的风流组织现场测试。

本书是在总结近年来我国长大公路隧道防灾救援技术多项科研成果基础上完成的。书中引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果,在此一并表示感谢。虽然我们尽了很大努力,但由于学识水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2010 年 6 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 火灾风险研究现状 .....	2
1.2 火灾模型试验及数值模拟研究现状 .....	3
1.3 火灾通风及其设备研究现状 .....	5
1.4 火灾报警及逃生救援系统研究现状 .....	7
1.5 灭火系统研究现状 .....	13
1.6 火灾应急管理研究现状 .....	16
1.7 火灾反应与耐火性能研究现状 .....	17
<b>2 隧道火灾数据库</b> .....	18
2.1 隧道火灾案例 .....	18
2.2 隧道火灾数据库系统建立 .....	23
2.3 隧道火灾案例统计 .....	25
<b>3 隧道火灾模型试验</b> .....	27
3.1 相似关系 .....	27
3.2 试验平台建立 .....	29
3.3 单隧道火灾试验结果 .....	42
3.4 风流组织及烟流控制试验结果 .....	67
3.5 单隧道和通风井联合火灾试验结果 .....	86
<b>4 隧道火灾场景数值模拟</b> .....	120
4.1 隧道火灾场景的数值模拟技术 .....	120
4.2 隧道火灾场景的数值模拟方法检验 .....	121
4.3 单隧道火灾场景模拟结果 .....	127
4.4 双隧道火灾风流组织及烟流控制场景模拟结果 .....	136
4.5 单隧道和通风井联合火灾场景模拟结果 .....	140
<b>5 隧道火灾通风力计算及烟流控制标准</b> .....	157
5.1 隧道火灾通风力 .....	157
5.2 隧道火灾通风烟流控制标准 .....	169
<b>6 隧道火灾网络通风计算方法及程序实现</b> .....	175
6.1 隧道通风网络的基本理论 .....	175
6.2 风网的数学解法 .....	177

6.3	网络通风程序实现	183
6.4	隧道火灾模式下风机数量及布置方式确定方法	191
<b>7</b>	<b>单座隧道防灾救援体系</b>	<b>221</b>
7.1	隧道交通工程等级划分	221
7.2	隧道交通工程设施配置	222
7.3	隧道监控系统设计	223
7.4	隧道设施地址编码	228
7.5	火灾模式下隧道设备控制台数及位置	247
7.6	隧道防灾救援预案制订	248
7.7	隧道防灾救援预案执行策略	250
<b>8</b>	<b>隧道群防灾救援体系</b>	<b>258</b>
8.1	隧道群的定义	258
8.2	隧道群联动控制预案制订原则	261
8.3	隧道群应急响应流程及外部消防衔接	263
8.4	隧道群监控系统构成	266
8.5	隧道群火灾预案制订	267
<b>9</b>	<b>公路隧道火灾预防技术</b>	<b>290</b>
9.1	危险物品分类	290
9.2	危险品引起隧道火灾的特点	294
9.3	装运危险品车辆通过隧道的安全运输管理办法	295
<b>10</b>	<b>悬挂自反应移动式智能灭火消防装置</b>	<b>300</b>
10.1	基本观点	300
10.2	隧道悬挂自反应移动式智能灭火消防装置的设计	301
10.3	系统的主要技术性能	305
<b>11</b>	<b>隧道防灾救援预案的风流组织现场测试</b>	<b>307</b>
11.1	典型防火分区选择	307
11.2	测试计划	308
11.3	测试工况	309
11.4	测试结果及分析	312
	参考文献	314

# 1 绪 论

目前,世界上已建成的长度超过 10km 的公路隧道达 14 座之多。公路隧道运营通风方式分为自然通风和机械通风两大类。其中,机械通风分为纵向式、半横向式、全横向式及在这三种基本方式基础上的组合通风方式。长度超过 10km 的公路隧道通风模式见表 1-1<sup>[1]</sup>。

10km 以上公路隧道通风模式

表 1-1

序号	隧道名称	国家	修建年代 (年)	长度 (m)	通风方式	竖井数 (个)	井深 (m)	斜井数 (个)	斜井长 (m)	最大通风 长度(m)
1	Aurland Laerdal	挪威	1995 ~ 2001	24 500	纵向			1		18 000
2	秦岭终南山	中国	2001 ~ 2007	18 020	纵向	3	180 ~ 661			5 494
3	圣哥达 (St. Gothard)	瑞士	1970 ~ 1980	16 918	横向	2	522 303	2	513 896	1 597
4	阿尔贝格 (Arlberg)	奥地利	1978 ~ 1982	13 927	横向	2	736 218			2 470
5	弗雷儒斯 (Frejus)	法国 ~ 意大利	1974 ~ 1979	12 901	横向	1	735	1	705	2 345
6	雪山 (Pinglin)	中国台湾	1993 ~ 2004	12 900	纵向	3	249 ~ 501			
7	勃朗峰 (Mt. Blance)	法国 ~ 意大利	1959 ~ 1965	11 600	横向					1 450
8	居德旺恩 (Gudvanga)	挪威	~ 1991	11 400						
9	包家山	中国	2005 ~ 2009	11 200	纵向	2	235	3	950	4 940
10	Folgefonn	挪威	~ 2001	11 100						
11	关越 II (Kan-Etsu)	日本	~ 1990	11 010	纵向	2				3 735
12	关越 I (Kan-Etsu)	日本	1977 ~ 1985	10 920	纵向	2				3 735
13	Hida	日本	~ 2010	10 750						
14	格兰萨索 (Gran Sasso)	意大利	1968 ~ 1984	10 173 10 170						

由表 1-1 可见,20 世纪 80 年代以前修建的长度超过 10km 以上的公路隧道,大都采用横向式通风,20 世纪 80 年代以后修建的特长公路隧道基本都采用纵向式通风,15km 以上的三



座公路隧道中,挪威的 Aurland Laerdal 和中国的秦岭终南山公路隧道都采用了纵向式通风,只有圣哥达(St. Gothard)公路隧道采用了横向式通风。可见,纵向式通风是当前和未来特长公路隧道的主流通风模式。由表 1-1 还可以看出,特长公路隧道在纵向式通风模式下,基本都采用了分段通风模式,一般分段长度不超过 6 000m。

特长公路隧道一般在设计、施工、运营过程中,防灾救援都是其考虑的重点之一<sup>[2]</sup>。但是,在特长公路隧道的运营期间内,仍然会发生灾难性事故<sup>[3]</sup>。1999 年 3 月 24 日,勃朗峰隧道发生火灾,死亡 41 人,36 辆汽车被毁,燃烧了 53h;1999 年 5 月 29 日,奥地利的陶恩隧道内由于后方的大货车高速撞上前方停放的小汽车而导致大火,造成 14 辆货车、26 辆小汽车烧毁,12 人死亡,49 人受伤;2001 年 10 月 24 日,瑞士圣哥达隧道发生火灾,11 人丧命;2005 年 6 月 4 日,弗雷儒斯隧道内由于燃油泄漏致使一辆运载轮胎的载货汽车起火,2 名驾驶员死亡,多辆汽车被毁。另外,1977 年 4 月上海打浦路隧道火灾,1991 年上海延安东路隧道火灾,2002 年 1 月 10 日浙江猫狸岭隧道火灾等,都给人们留下了深刻的教训。

长大公路隧道的火灾,尽管发生频率很小,但是,一旦发生,由于隧道内火灾温度高、烟雾大,疏散、扑救困难,因此,造成的影响和损害程度是巨大的。这种损害不仅危及人的生命、车辆被毁、交通中断,还损伤隧道结构,影响其使用寿命,甚至会导致局部地区生产秩序的混乱或停顿。因而,国内外对交通隧道火灾的研究一直没有停止,并且取得了很多有意义的成果。

## 1.1 火灾风险研究现状

1967 年,PIARC(世界道路协会)东京会议首次提出了烟气控制理论,随后在勃朗峰隧道做了第一个烟气控制试验<sup>[4]</sup>。

1987 年,PIARC 布鲁塞尔报告提出了隧道排烟系统设计依据<sup>[4]</sup>,随后,总结了从 1949 年到 1995 年近半个世纪时间里,80 多个 PIARC 成员国家发生的隧道火灾情况,表明隧道火灾造成如下损害:

- (1)人员伤亡(例如旅客、驾驶员、消防人员等);
- (2)热量、烟气、缺氧和较低的能见度易导致人员晕倒、窒息、烧伤,甚至死亡;
- (3)隧道设备破坏(例如照明、通风、无线电通信等);
- (4)隧道结构破坏,包括混凝土的剥裂,钢筋温度超限,顶板劣化和通风管倒塌;
- (5)车辆和车辆内货物的严重破坏或者烧毁;
- (6)中断隧道交通等。

公路隧道火灾主要由以下几个因素引起:

- (1)电器使用不当(过度频繁地使用电力启动);
- (2)紧急制动(根据法国统计资料显示,60%~70%的火灾是由载货汽车引起的);
- (3)其他过失导致的汽车失火。

其他比较少见的原因:

- (1)碰撞;
- (2)隧道设备操作不当(自燃);
- (3)隧道内的养护工作。

隧道火灾发生频率与隧道长度、交通流密度、设计速度、线形和坡度等有关。

PIARC 布鲁塞尔报告提出了确定热释放率的建议,在隧道中发生火灾后最大热量的释放会持续一段时间,具体数据如下:



1 辆小客车	2.5MW
1 辆大客车	5MW
2~3 辆客车	8MW
1 辆载货汽车	15MW
1 辆公共汽车	20MW
1 辆有货物的客车	20~30MW

对于大型载货汽车,特别是装有危险物品的车辆,释放的热量更大,EUREKA 货车火灾试验表明,释放热量会有一个短时间的高峰期,其值可达到 100~120MW。峰值的大小随车辆类型、货物类型、通风、燃烧率的不同而不同。对油罐车而言,由事故引起的渗漏和隧道排水系统对热量的释放影响很大。

PIARC 布鲁塞尔报告分析了客车、公共汽车、载货汽车引起的火灾烟气体积变化情况,能见度是通过透过率和二氧化碳的集中程度来衡量,对烟流温度进行修正后,透过率和二氧化碳的集中程度呈线性关系。当 10m 范围内透过率达不到  $0.13\text{m}^{-1}$  时,就需要提供照明;在火灾下风侧浓烟引起的能见度极低。

## 1.2 火灾模型试验及数值模拟研究现状

### 1.2.1 等比例模型试验研究现状

1965 年,瑞士公路隧道安全委员会为了研究 60 个隧道工程在火灾情况下的通风量,在 Ofenegg 隧道进行试验。试验以一条铁路隧道作为场地,并把隧道距入口 190m 处进行了封闭。采用  $6.6\sim 95\text{m}^2$  的汽油燃烧床模拟了大约 11 组火灾。测试的内容包括温度、风速、气体(CO 和  $\text{O}_2$ )浓度和能见度。

1970 年,英国火警研究站与格拉斯哥隧道消防队在格拉斯哥隧道进行火灾试验,主要研究烟雾扩散规律等。

1974 年,日本在宫古线某隧道内对运行列车进行着火试验,认为列车着火后再运行 15min 是安全的。

1975 年,在 Zwenberg 隧道进行与奥地利两项主要的高速公路工程有关的试验,共测试了纵向通风方式和半横向通风方式两种系统,一共进行了 30 组火灾试验。燃烧床从  $6.8\sim 13.6\text{m}^2$ 。测试内容包括温度、气体(CO、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_2$ )浓度、能见度和热释放率。

1980 年,日本公共事业研究协会(PWRI)采用 700m 长的导洞和 3300m 长的公路隧道进行等比例模型试验。火源采用汽油燃烧床( $4\text{m}^2$  试验 10 组, $6\text{m}^2$  试验 2 组)、客车(试验 6 组)和公共汽车(试验 6 组)。把火灾期间隧道内的自然条件与紧急情况下需风量结合起来进行考虑,测试了纵向风速的影响。

1982 年,日本建设省土木研究所进行实际隧道内使用水喷淋系统的效果以及对火灾的影响试验。

1985 年,德国在盖尔森基兴—俾斯麦市的地铁隧道进行火灾试验,得出在不同通风方式和火灾荷载条件下,温度与火灾持续时间的关系。

1989 年,中国广州铁路局科研所、铁科院西南研究所在四川华蓥山矿务局救护大队的训练巷道进行 1:3 隧道断面模拟试验,探索长隧道的消防方法。

1990~1992 年,挪威 Repparfjord 隧道试验在一个废弃的长达 2.3km 的采矿导洞(毛洞、横断面变化范围为  $30\sim 40\text{m}^2$ )中进行,共集合了 9 个欧洲国家的人员参与。采用铁路和地铁车

辆、客车、载重车辆及按要求分级的火灾(庚烷燃烧和木材堆燃烧)共进行了 21 组模拟试验。沿着隧道和燃料荷载的内侧共布置了大约 400 名观测者。测试的内容包括空气和墙壁的温度、隧道内风速、能见度、气体浓度、烟雾运动规律等。

1993 年,中国铁科院西南分院在四川芙蓉矿务局救护消防大队训练巷道对易燃液体在密闭空间内燃烧的时间进行测定。

1993 ~ 1995 年,美国在 Memorial 隧道进行试验,这项试验是由联邦公路管理局和马塞诸塞州为波士顿中心的 Artery 隧道工程共同提供经费而进行的。试验在位于西维吉尼亚一条废弃的长 850m 的公路隧道中进行。采用柴油燃烧床模拟火灾进行了大约 91 组试验。获得的热释放率从 10MW(4.5 m<sup>2</sup>)变化到 100MW(44.4 m<sup>2</sup>)。测试了全横向通风方式和纵向通风方式两种。隧道内共布置了 1 450 名观测者。每组试验收集了大约 4 百万个数据。

2001 ~ 2007 年,中国西南交通大学采用长 120m 的双洞隧道、三个横通道、两个竖井模型,进行了单隧道火灾、双隧道火灾、单隧道加竖井火灾的试验研究。

### 1.2.2 计算机数值模拟研究现状

1993 年前,不同国家对隧道防灾及空气动力学问题使用不同的计算机软件进行数值模拟,具体如表 1-2 所示<sup>[4]</sup>。

截至 1993 年时不同国家使用的数值分析程序

表 1-2

方法	方法名称	创造者	使用者	评价
一维模型	VENDIS-FS	INERIS, 法国	INERIS, 法国	
	MFIRE	美国矿务局, 美国	VTT, 芬兰	
	SES	Parsons Brinckerhoff, 美国	Parsons Brinckerhoff, 美国	
区域模型	TUNNEL	TNO, 英国海军协会	TNO, 英国海军协会	废弃(1988)
	BRI2	BRI, 日本	VTT, 芬兰	
	FAST	NIST, 美国	NIST, 美国	不用于隧道
	FASIT	利兹大学, 英国	利兹大学, 英国	
	CIFI	CSTB, 法国	CSTB, 法国	用于房建
CFD 二维和三维法	VESTA	TNO, 英国海军协会	TNO, 英国海军协会	发展中
	CHAMPION		Delft Univ. Techn, 英国海军协会	废弃
	PHOENICS	CHAM, 英国	Univ. Graz, 奥地利, INERIS, 法国, VTT, 芬兰	
	JASMINE	CHAM 和 FRS, 英国	火灾研究局, 英国, Univ. Lund, 瑞典	以 PHOENICS 为基础发展
	FLOW3D	原子能管理局, 英国	原子能管理局顾问, 英国, HSE, 英国, Mott Mac Donald, 英国, CETU, 法国, Univ. Graz, 奥地利	
	FLUENT	流体公司, 美国	FOA, 瑞典; ANSYS, 美国	
	STORM	ADAPTIVE, 美国	SCETAURROUTE, 法国	
	FIRR	AVI, 奥地利	Univ. Graz, 奥地利	
	FURNACE	澳大利亚	Univ. Sydney, 澳大利亚	

2009 年止,新增加了部分计算软件,如表 1-3 所示<sup>[5]</sup>。

截至 2009 年不同国家新增使用的数值分析程序

表 1-3

方 法	方法名称	创 造 者	使 用 者	评 价
CFD 二维和三维法	STAR - CD	英国	帝国理工大学,英国	
	FDS	NIST,美国	NIST,美国	
	CFX	AEA Technology,英国	ANSYS,美国	
	SMARTFIRE	FSEG,英国	FORUM8,日本	

### 1.3 火灾通风及其设备研究现状

1994 年,德国针对自然通风的应用,在 RABT 标准中认为长度 350m 的隧道(或不超过 700m)在发生火灾的情况下,无需使用应急出口与机械通风设备,即可确保隧道安全性。

法国国家公路网的隧道如果超过了如下长度,则需要采取火灾烟气控制措施:市区 300m,一般情况下非市区 500m,特殊情况下非市区 800 ~ 1 000m(如果单向交通流每天的流量低于 2 000 辆)。

英国采用自然通风的隧道长度可达到 400m,但是,需要进行可靠性证明。

荷兰根据风险评估来确定隧道所应采取的措施。

美国按照当前的 NFPA502 指导原则,长度达到 240m 的隧道可以采取自然通风的方法。

1987 年,PIARC 建议采用以下风速将烟气控制在火场的一侧:客车火灾为 1 ~ 2m/s;公共汽车或者载货汽车火灾为 2 ~ 3m/s;汽油油罐车火灾,则需要 5m/s。建议通风系统的最大设计风速为 3 ~ 6m/s,具体取决于设计火灾的规模。表 1-4<sup>[4]</sup>显示了近期几个国家根据进一步研究获得的成果而推荐的设计风速。

不同国家所使用的纵向风速

表 1-4

交通流类型	设计火灾 (MW)	设计风速 (m/s)		
		法国	荷兰	瑞典
仅允许客车通过	2.5 ~ 8	2	—	无通用规则
公共汽车与载货汽车	小于 100	3	3	
汽油油罐车	大于 100	4	5	

在瑞典,没有相关规范规定发生火灾情况下的通风风速。斯多克赫尔默环线公路的设计火灾规模为 100MW,相应的设计风速为 3m/s。该隧道限制运输闪点低于柴油的可燃液体。

目前还无法为汽油油罐车火灾提供更加精确的建议,油罐车火灾通常能够产生几百兆瓦以上的热释放率。上述几个国家所推荐的设计风速可以参考使用。

1994 年,荷兰交通部提出了议案,凭借该议案,进行了一系列火灾试验,从而能够判断是否需要提供能够在 1h 内承受 250℃ 高温的射流风机。

几个国家的标准对风机的耐热性进行了规定:澳大利亚、荷兰、英国与美国采用温度为 250℃ 时运行时间为 1h 的风机;法国采用温度为 250℃ 时运行时间为 1.5h 的风机;挪威、瑞典采用温度为 300℃ 时运行时间为 1h 的风机;德国、瑞士采用温度为 400℃ 时运行时间为 1.5h 的风机<sup>[4]</sup>。关于某些国家中耐火射流风机的指导原则见表 1-5。

关于某些国家中耐火射流风机的指导原则

表 1-5

隧道长及国家	射流风机的耐火性		在如下距离(m),所有射流风机均被毁损	
	温度(°C)	持续时间(h)	无危险货物	有危险货物
隧道长度大于 500m	400	1.5	70	200
	250	1.5	100	400
	无保护		500	(禁用)
北欧国家	250	1	距离火场下风向 150 ~ 300	

各国通过研究,针对大规模火灾(300MW)可以得出如下结论<sup>[4]</sup>:

(1)在风机适用于 360°C 的温度时,即使是在大规模火灾(在此情况下,所有风机距离火场下风侧约 50m)情况下,也能提供 10m/s 的通风速度。

(2)在通风速度为 7.5m/s 情况下,距离火场 250m 远的所有风机均不起作用。

(3)在通风速度为 5m/s 或者更低的情况下,沿着火场 300m 分布的风机将在 400°C 耐热温度下失去效用。而距离 300m 或者更远,这些风机将继续工作。

(4)如果风机适用于 250°C 的温度环境,那么,距离更远的所有风机将失去效用,这就导致在发生火灾的时候,隧道安全水平大大降低。

(5)如果在适当的时间和适当的地点发生了火灾,并且隧道中车流量很少,那么,通风速度很容易达到 5~10m/s。通过插补法并在表格中标明“\*”符号,能够计算出在通风速度为 7.5m/s 时的温度估计值。

(6)作为根据极少见到的火灾而得出的结论,如果风机能够承受 400°C 而非 200°C 的高温,则可以获得额外的安全水平。

针对中等规模的火灾可以得出如下结论:

(1)在中等规模火灾下以及在通风速度为 5m/s 情况下,如果风机能够承受 230°C 以上的高温,那么,距离火场 50m 的所有风机将保持运行状态。

(2)在中等规模火灾下以及通风速度大于 3m/s 情况下,如果风机能够承受 360°C 以上的高温,那么,距离火场 50m 的所有风机将保持运行状态。

(3)在通风速度低于 2m/s 情况下,在 410°C 以上温度条件下的临界距离为 100m,在 250°C 以上温度条件下的临界距离为 250m。

针对射流风机失效进行的研究,假定以“中心对中心”的方式配置风机,并且间隔为 25m,火场后面假定的隧道长度为 300m,在发生火灾时,表 1-6 中数量的风机将出现故障<sup>[4]</sup>。

射流风机失效研究

表 1-6

耐火能力(300MW)		在如下耐热性情况下失去效用的风机数量	
		250°C	400°C
通风速度(m/s)	10	12	1
	7.5*	12	2
	5	12	12
	3	12	12
	2	12	12

耐火能力(100MW)		在如下耐热性情况下失去效用的风机数量	
		250℃	400℃
通风速度(m/s)	5	12	1
	3*	12	2
	2	12	12
	1	12	12

注：\* 以内插值替换的数值。

## 1.4 火灾报警及逃生救援系统研究现状

### 1.4.1 火灾监测系统研究现状

1979年,PIARC 维也纳大会认为,由隧道内人员或者隧道操作人员利用适当的设备来探测火灾情况。在这一方面,闭路电视尤其有帮助作用,同时,可以设置辅助报警器,当有人取走手动灭火器时,会自动启动报警。在较长的隧道中,通过设定最高温度上限或者升温速度上限的手段,实现自动探测火灾。此外,通常需要使用交通量监视记录仪。

1983年,PIARC 悉尼大会建议,应该在控制室安装声音报警器,从而在有人使用警报按钮或者灭火器的时候,引起相关人员的注意。隧道内需要对火灾进行早期探测。下面的建议就是为了探测火灾:

(1)温度探测器。当温度出现如下情况时,将发出警报声音:温度超过预定值,上升速度高于正常速度。为最小化减少误报,必须合理设置报警设定值。

(2)烟气探测器。当能见度降低到预定水平时,将发出声音警报。在隧道中即使小规模火灾也能够生成大量危险的烟气。

(3)火焰探测器。探测器应该能够探测到 20L 汽油的燃烧情况;探测器应该安装在交通量繁重并允许运载危险物质的隧道中。

由此可知,探测器在整个隧道中安装,具有很重要的作用。尽管这些探测器的效果尚未被所有操作人员所认知,但是,这些探测器常常安装在较长并且交通繁忙的隧道中。应该同时设置两种类型的探测器,从而避免误报,而且探测器应与闭路电视联动。

1987年,PIARC 布鲁塞尔大会认为,火灾探测器应安装在火灾风险较大的隧道中,如交通繁忙的隧道、允许运输危险物资的隧道以及水下隧道。当温度或者温度增长速度超过预定值时,火灾探测器会将信号发送到控制中心。这些探测器应该能够探测到 20L 汽油的燃烧情况。

1995年,PIARC 蒙特利尔大会在自动事故探测方面,取得了很大的进展。探测方法简化为通过闭路电视(CCTV)监控的方式来探测事故。火灾探测系统可以应用在较长、复杂或者允许运载危险物资货车穿越的隧道中,并且该隧道需要在发生火灾时能够迅速报警或者确定发生火灾的位置。

烟气探测器能够实现早期报警,但由于柴油车所排放出的烟气较浓,会产生频繁误报。许多国家对于自动火灾探测系统的有效性持怀疑态度,觉得误报是一个较为严重的问题。为了研究该问题并评估对新开发系统的测试工作,PIARC 向各个成员国发放了一份调查问卷。下

面的国家回答了该调查问卷:澳大利亚、比利时、丹麦、法国、德国、日本、意大利、荷兰、挪威、瑞士、英国以及美国。

(1) 澳大利亚。所有长度超过 1 500m 的隧道均配备了火灾探测系统。通常采用线性感温探测器。澳大利亚所获得的经验表明:综合使用火灾探测器与闭路电视系统非常有效。一旦探测系统发出误报,则闭路电视系统会对其进行检验。

(2) 比利时。只有两条隧道(Liefkenshoek 以及 Tijsmans)配备了火灾探测器,并采用点式探测器,用来探测异常温度变化。只有专门用于运输危险货物的隧道才配备探测器。探测器向警察局发出警报,从而采取必要的措施。

(3) 丹麦。Guldborgsund 隧道在隧道顶板上每隔 10m 设置一个火灾探头,该系统为温度激发型。火灾信号会自动关闭隧道,同时向消防队报警。一般认为,火灾探测器报警没有火灾报警重要,火灾报警可以从隧道中设置的紧急控制箱上启动,隧道中的机动车驾驶员也可以使用移动电话发出紧急呼叫。

(4) 法国。法国没有配备隧道火灾探测系统。过去,法国通过 CO 及能见度仪来探测火灾,一旦烟气浓度达到通风要求上限,自动启动报警。如果配备了闭路电视,则可以通过闭路电视和紧急电话来探测火灾。法国计划在非 24h 有人值守的半横向通风隧道中配备火灾探测器。如果在此类隧道中探测到了火灾情况,那么,通风系统将开始从隧道下部送风,使烟气层次化。火灾探测器也计划被安装在运送危险物资的隧道中,尤其是在较长的双向行驶隧道中。火灾探测器将确定火灾的方位,从而能够适当地启动防排烟系统,实现远程控制。火灾探测系统与烟气控制系统联动。如果隧道有人控制,则该系统将向相关人员发出警报。如果隧道无人控制,则该系统应能关闭隧道并向消防队发出警报。

(5) 德国。在所有长度超过 350m 的隧道中,均要配置自动火灾报警器。探测器必须能够探测出相当于 20L 汽油燃烧的火灾情况。

(6) 意大利。意大利的电缆隧道配备火灾探测器。该系统也用于 Frejus 隧道以及 M5 和 M24 上的隧道。火灾探测器安装在较长的和较短但交通繁忙的双向行驶隧道。重要的是本系统要能够启动预设的通风排烟方式。已经在 Genoa-Principe 地铁站测试了光纤探测系统。

(7) 日本。于 1958 年在关门隧道最初开通并设置了火灾探测器<sup>[4]</sup>。关门隧道为双向行驶,车速被限制在 35km/h,横向通风方式,选用了热感式差动型火灾探测器,1m<sup>2</sup>汽油火盆火灾在 50m 以内能探测出来。

1960 年成立的名神高速公路隧道防火设备委员会,针对天王山隧道防火作了相应的对策研究,成功开发出火焰探测器。这种探测器,将对火焰辐射出的红外线以及红外线散发出的成分作出检测,在一定辐射量下开始运作,用于天王山隧道。火灾探测器的灵敏度为:一般小型汽车的火灾相当于 1m<sup>2</sup>汽油火盆点火后并在距离约 12m 前方都能探测到。

1973 年,日本惠那山隧道开始建设,经过无数次试验得出的结果,小型的座席和内装饰材料燃烧,相当于 1m<sup>2</sup>汽油火盆火灾,此时火灾探测器没有正常运作。由于这个原因,火灾探测器的灵敏度是以 0.5m<sup>2</sup>汽油火盆火灾为基准,并在 1975 年用于惠那山隧道。

1979 年,日本坂隧道发生火灾事故,依据这次火灾事故的经验,在这之后做了很多汽车火灾试验,得出了高灵敏度探测器对于隧道内光度的影响不容易产生误报。以后,根据分析火灾的特性,并将新的技术运用在实际操作中,依据红外线检测原理和双波长闪烁型为基准,做了一系列方案。这种探测器,经过能量测定原理和一般辐射的比较,火焰和环境光的光谱分布特



性不同的原理,对于隧道内的环境充分的适应,探测视角度宽广并且具有高灵敏度,对于受光窗的破损也做了很强的对应。双波长式闪烁型探测器于1980年运用于谷稻叶隧道。

(8)挪威。没有隧道配备火灾探测器。由于系统成本高昂,并且隧道中车流量较低,不考虑使用火灾探测系统。在新修建的24km长的Laerdal隧道,对火灾探测器系统的采用进行了评估。

(9)瑞士。较长的隧道配备了线性火焰探测器。

(10)英国/荷兰。在这两个国家的隧道中并未使用火灾探测器。由于火灾探测系统的不可靠性与高昂的价格,这两个国家综合使用了闭路电视系统、能见度探测设备以及交通流探测器,从而指明发生事故的时间。

(11)美国。在公路隧道火灾探测方面,使用了许多系统,包括闭路电视系统、交通流探测器与火灾探测器。交通流探测器用以识别交通量的变化;闭路电视系统则用于核实事故情况。如果设置火灾探测器,则必须采用线性火灾探测器。

#### 1.4.2 闭路电视(CCTV)研究现状

1979年,PIARC维也纳大会认为,在进行火灾探测时,闭路电视尤其有帮助作用,并可辅助使用其他设备,例如,在取用灭火器和其他装置时发出警报的报警器。

1983年,PIARC悉尼大会认为,闭路电视将连续监控交通情况、快速探测所有的交通异常情况,并采取经过证明有效的所有措施来提高安全度。闭路电视系统是隧道运行中最有用的设备,并且是唯一能够精确显示可能火灾情况的设备。摄像机具有的特性为:

(1)摄像机具有方向性并配备了200mm镜头,可安装在隧道入口。

(2)在隧道内部,摄像机之间的距离与所采取的策略以及隧道性质有关;可以在整个测量范围内能够捕获信息,或者只是在可能出现问题的地方捕获信息(转弯处与分叉点)。

(3)对于一般的交通情况,摄像机之间的间隔可以超过200m。

(4)为了仔细观察车辆以及人行道中遇到困难的驾驶员,摄像机之间的间隔宜为150~200m。

(5)摄像机的位置应使其能够监控紧急地点。

1987年,PIARC布鲁塞尔大会认为,闭路电视是观察发生火灾等紧急情况下交通状况的一种非常有效的设备。闭路电视摄像机之间的间隔应该为150~200m,从而能够完全覆盖整个隧道。位于隧道外面的闭路电视摄像机(公路支线、平台、收费站、入口与紧急出口)应该配备放大镜头以及定位摄像机方位的装置。

1995年,PIARC蒙特利尔大会认为,电视监控网络必须覆盖整个隧道。彩色摄像机与监控器的使用使得人们能够快速探测到火灾情况。

(1)澳大利亚。澳大利亚的相关指导原则强制性规定,在长度超过1500m并配备有人值守的监控中心的隧道需安装闭路电视系统。

(2)法国。隧道对闭路电视系统的需求是基于综合考虑了其他诸如隧道长度、交通状况、线路类型以及操作模式等因素,而进行的研究工作。

(3)德国。在长度超过1050m的隧道中,可以选择安装闭路电视系统。摄像机的间隔为100~300m。

(4)日本。所有长度超过300m的隧道以及交通繁忙的较短隧道均应该安装闭路电视系统。双向行驶隧道中摄像机的间隔为200m。

(5)荷兰。需要使用闭路电视系统。



(6)挪威。日平均交通流量为 10 000 辆或以上的隧道以及长度超过 2 500m、交通量较低的隧道,可选用闭路电视系统。

(7)瑞典。需要分析来判断是否需要使用闭路电视系统。

(8)英国。所有隧道中,闭路电视系统作为事故监控设备的组成部分而加以安装。闭路电视系统确保了 100% 覆盖隧道内部与引道。

(9)美国。探测系统应包括具有交通监控功能的闭路电视摄像机。

#### 1.4.3 紧急电话研究现状

1979 年,PIARC 维也纳大会认为,在较长的隧道中,通常提供紧急电话网络与火灾警报。

1983 年,PIARC 悉尼大会认为,尽管电话具有非常高的可靠性,但是,由于驾驶员首先考虑逃生,再加由于有 CCTV 系统进行监视,因此,电话的实际使用率很低。如果要提高电话的使用率,则其安装与外表必须醒目,必须保持整洁,并尽可能安装在水密性、防尘的密封箱中。与 CCTV 一样,电话也是隧道中一种基本的安全设备;至少要在隧道入口处提供电话。

1987 年,PIARC 布鲁塞尔大会认为,在安装警报按钮时,建议仅提供一个按钮。如果同时提供几种含义不同的按钮,许多人可能按错按钮或者按下全部按钮。在双向行驶隧道中,紧急电话应安装在隧道墙壁上,并在隧道两侧相对安装。在单向行驶隧道中,应在临近慢行车道隧道墙壁的应急箱内设置电话。紧急电话不得安装在入口或者紧急出口区域;在隧道外面可以提供紧急报警站。隧道内部的紧急电话应该安装在降噪的小仓室中,或者有照明和清晰指示的应急箱中。打开电话间的门应该使壁凹上面的黄色指示灯闪亮。

(1)澳大利亚。在每一紧急报警电话以及所有隧道入口均需要提供消防按钮报警器。在所有长度超过 500m 的隧道中,在间隔为 250m 和 500m 的情况下,需要安装紧急呼叫装置。

(2)法国。在所有长度超过 200m(以及交通量很低、长度为 500m 的隧道)的隧道中,应安装紧急电话,其间隔为 200m。

(3)日本。在所有长度超过 500m 的隧道以及长度较短但是交通量繁忙的隧道中,需安装按钮报警器与紧急电话。

(4)荷兰。应急电话安装在公路两侧,间隔为 50m。

(5)挪威。在所有长度超过 7 500m 或者长度较短但是交通量繁忙的隧道中,需提供紧急电话。

(6)瑞典。在所有隧道中均提供了应急电话,而按钮报警器则只是安装在某些隧道中。

(7)瑞士。SOS 电话安装在间隔为 150m 的电话间内。

(8)英国。所有隧道在紧急停车带中以及隧道入口处,均配备了紧急电话。

(9)美国。建议所有长度超过 240m 的公路隧道配备应急通信系统与警报系统。

#### 1.4.4 无线电通信研究现状

1979 年,PIARC 维也纳大会认为,在较长的隧道中,隧道员工之间使用无线电通信。

1983 年,PIARC 悉尼大会认为,提供一种能够确保在隧道内部进行无线电再传送以及实现控制人员与机动车驾驶员之间沟通的系统。由于语言、技术与法律问题,该系统的应用也存在一定问题。

1987 年,PIARC 布鲁塞尔大会认为,利用辐射电缆或者天线(较短的隧道中)可以发送无线电信号。关于频率的信息标志应提供给驾驶人员。

1995 年,PIARC 蒙特利尔大会认为,无线电转播的首要目标就是安全,而第二个目标就是提高机动车驾驶人员的舒适度。隧道中的无线电转播使隧道操作人员或者救援小组能够在发

生紧急事故时,向机动车驾驶人员提供指导。

(1)澳大利亚。所有长度超过1 000m的隧道或者交通量繁重的隧道均配备无线电通信系统,从而能够持续接受交通信息频道。在可能的情况下,也应该提供将信息转发给驾驶人员的中继服务。

(2)法国。在长度超过800m的隧道中,通信系统必须要确保与维护总部沟通隧道内部的紧急维护情况。假如一个有人值守的控制中心,那么,当无线电频道为普通公众进行转播时,必须可以随时中断并发出紧急信息。

(3)德国。在德国,所有长度超过1 000m的隧道均配备了无线电通信系统。

(4)日本。在特殊环境下,在长度超过10 000m的隧道中安装了无线电转播装置。

(5)荷兰。需要无线电转播系统。

(6)挪威。在挪威,平均年度日车流量(AADT)超过5 000辆或者长度超过2 500m的隧道配备了无线电通信系统。

(7)英国。在所有的隧道中,均提供了所有应急服务所需的无线电转播设施。除特殊情况外,并未规定使用商用无线电或者移动电话,例如,Mersey隧道就使用了移动电话转发器。

(8)美国。在美国的许多公路隧道中,均安装有无线电转播系统。

#### 1.4.5 紧急出口研究现状

1979年,PIARC维也纳大会认为,在较短的隧道中,可以将隧道入口用作紧急出口。在较长的隧道中,逃生路线的长度取决于隧道内交通类型以及通风系统情况。如果能够通过通风系统改善生存环境恶劣及能见度较差的状况时,隧道内人员就能够很容易地逃生,因此,疏散距离可以相应加长。在长隧道中,如果很难通过通风方式来限制危险区域,则必须考虑人员在获得救援之前受到安全保护的可能性,例如:

(1)设置紧急出口或者通向相邻隧道的横通道,用于步行者和/或车辆逃生。

(2)步行者进入辅助隧道安全疏散。

(3)隧道内设置的安全空间(安全避难所,也称作避难所)。

(4)为车辆准备的紧急回车带。

很难针对疏散距离给出统一规定,而必须通过仔细研究隧道的具体设计及个别情况进行确定。

1995年,PIARC蒙特利尔大会中,提出了“隧道分类、现有指导原则以及建议”,强调了公路隧道中的安全设施与设备,文件涵盖了13个国家的各种指导原则:

(1)较浅的隧道中,根据车流量或者隧道所处位置设置横通道。例如,在法国,非市区隧道每隔400m就设置一个横通道,而在市区隧道中横通道间隔为200m。横通道的宽度与本地安全规范有关。水下隧道中,紧急出口位于隧道两端入口处,并可以配备自动扶梯或者电梯。在深埋隧道中,紧急出口通向沿着隧道管线修建的辅助(维修)隧道和在未配备辅助(维修)隧道的双孔隧道使用连接其他隧道的横通道。

(2)为避免由于相邻隧道交通流威胁疏散人员的安全,某些政府当局在封闭的横通道安装了配有电子闭门器的安全门,直到隧道内车流停止后才会解锁。而其他国家则认为,锁闭安全门可能会加大人员受困的风险。在双孔隧道横通道中也有装置压力闭门器的情况。这两种方法均可使用,但无论采取了哪种解决方法,都必须经过实际尝试,并且反复演练操作步骤来处理各种可能发生的事。

(3)在较长的并且未配备平行辅助隧道的单孔隧道中,一些国家规定在一定间隔处设置