



地下空间灾害防治
DIXIA KONGJIAN ZAIHAI FANGZHI

基于灾害分区防控理论的 地铁火灾烟气控制研究

赵明桥 彭立敏 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



地下空间灾害防治

基于灾害分区防控理论的 地铁火灾烟气控制研究

赵明桥 彭立敏 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书主要从三个方面对地铁火灾烟气分区控制展开系统研究。第一部分：分析了地铁的基本建筑形式和既有火灾烟气防控方法，基于灾害分区防控理论提出了地铁烟气分区的控制方法；第二部分：通过数值模拟和火灾实验分析论证了区间隧道纵向分区烟气控制方式的效果和可行性；第三部分采取数值模拟和火灾实验的方法对车站垂帘分区烟气控制方式进行论证分析。研究结果表明，烟气分区控制方法能使人烟有效分离，为人员疏散和消防救援创造良好条件，对减少地铁火灾危害和提高地下轨道交通安全具有理论指导意义。

本书的读者对象主要为从事隧道、地铁等地下空间的设计师与风险管理人员，以及消防、火灾安全技术人员和高等院校相关专业的师生。

图书在版编目 (C I P) 数据

基于灾害分区防控理论的地铁火灾烟气控制研究/
赵明桥, 彭立敏著. —成都: 西南交通大学出版社,
2012.8

ISBN 978-7-5643-1606-8

I. ①基… II. ①赵… ②彭… III. ①地下铁道—火
灾—烟气控制 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 154375 号

基于灾害分区防控理论的地铁火灾烟气控制研究

赵明桥 彭立敏 著

*

责任编辑 黄淑文

特邀编辑 周 杨

封面设计 李 易

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm × 240 mm 印张: 14.875

字数: 268 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1606-8

定价: 35.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着我国城市化进程的加快,为舒缓城市交通压力,地下轨道交通进入高速蓬勃发展阶段。地铁发生火灾的频次虽然较低,但灾害发生后烟气较难控制,对人们生命安全构成极大威胁,因此,加强对地铁火灾烟气控制的研究,提高地铁火灾安全防范能力关系重大。

本书基于灾害分区防控理论提出了在地铁区间隧道和车站中对火灾烟气进行分区控制的技术方案,并综合运用理论分析计算、流体力学数值模拟和火灾实验等研究手段,对所提烟气分区控制方法进行了系统深入的研究,其成果对于防止重大人员伤亡事故的发生、保障地铁安全运营有着重要的现实意义和理论价值。

在分析国内地铁建筑基本形式和地铁既有火灾烟气控制方式存在的不足之处后,本书将灾害分区控制理论和消防性能化设计理念引入地铁火灾灾害控制中,首次提出烟气分区控制方法及人员无烟疏散策略,并系统介绍了:结合区间隧道空间特性建立了隧道纵向分区烟气控制实施模式,通过数值模拟和火灾试验相结合的研究方法对不同通风方式、排烟速率和火源功率的纵向分区工况烟气控制效果和特点进行比较分析,结果表明该模式能有效阻止烟气侵入疏散通道中,既能确保人员安全疏散,又能降低火灾高温对隧道结构的损害;结合车站空间特点建立起车站垂帘分区烟气控制实施模式,采用数值模拟和火灾试验相结合的方法对不同的卷帘距地高度、不同火源位置大功率火灾垂帘分区烟气控制的效果和特点进行研究,揭示出着火分区形成负压环境有助于气流有序流动,并能长时间将火灾烟气和高温控制在着火分区范围内,充分证实了该模式应对地下空间复杂火情的能力和良好效果。

本书在撰写过程中,参考了有关论文、著作和同行们的相关研究成果,得到了湖南省交通规划勘察设计院隧道处的张进华总工、中南大学防灾科学与安全技术研究所的徐志胜教授和易亮博士、隧道工程系的施成华、张运良副教授等人的无私帮助及提出的宝贵建议,对此表示衷心的感谢。本书得到了国家 973 项目“城市轨道交通地下结构性能演化与感控基础理论——地下

结构性能与环境耦合作用机制”(编号:2011CB013802)、“湖南省科技计划项目“长沙地铁车站火灾分区控制研究”(编号:2007GK309)及湖南省交通厅“长大公路隧道火灾分区控制研究”(编号:200735)的资助,在此一并致谢。

由于作者水平和条件的限制,虽然尽了最大努力,但错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

作 者
2012 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外的研究现状	7
第 2 章 我国地铁建筑形式及人员疏散模式	14
2.1 我国地铁的建筑形式	14
2.2 地铁火灾危险性和火灾规模分析	18
2.3 地铁的环境控制	20
2.4 区间隧道人员疏散模式	21
2.5 车站人员疏散模式与火灾烟气的控制	24
第 3 章 地铁既有火灾烟气控制方式的数值模拟	29
3.1 数值模拟方案	29
3.2 区间隧道既有烟气控制方式的数值模拟	30
3.3 地铁车站既有烟气控制方式的数值模拟	33
第 4 章 地铁火灾烟气分区控制方法及无烟疏散策略	49
4.1 火灾烟气分区控制的理论基础	49
4.2 火灾烟气分区控制模式与人员无烟疏散策略	53
4.3 地铁区间隧道烟气分区控制模式	54
4.4 地铁车站垂帘分区烟气控制模式	61
4.5 地铁火灾垂帘分区烟气控制的临界排烟量	67
第 5 章 地铁区间隧道纵向分区烟气控制的数值模拟研究	77
5.1 烟气自然蔓延工况模拟结果分析	78
5.2 行驶区单侧排烟通风方式	81
5.3 行驶区双侧排烟通风方式	88
5.4 疏散通道正压送风通风方式	93
5.5 疏散通道送风及行驶区单侧排烟相结合的通风方式	96

第 6 章	地铁区间隧道纵向分区烟气控制的试验研究	101
6.1	试验目的与试验内容	101
6.2	区间隧道试验模型设计	103
6.3	试验结果与分析	119
6.4	试验结果与数值模拟的比较	141
第 7 章	地铁车站垂帘分区烟气控制的数值模拟	150
7.1	垂帘分区烟气控制模式的临界排烟量计算	150
7.2	地铁车站垂帘分区烟气控制的数值模拟	155
第 8 章	地铁车站垂帘分区烟气控制的试验研究	171
8.1	试验目的与试验内容	171
8.2	地铁车站试验模型方案	173
8.3	垂帘分区烟气控制模式的临界排烟量试验测值	184
8.4	地铁车站火灾垂帘分区烟气控制工况试验结果与分析	191
8.5	试验结果与数值模拟的比较	205
第 9 章	火灾烟气分区控制方法研究展望	211
9.1	地下铁道中烟气分区控制的应用研究	211
9.2	烟气分区控制方法在公路隧道中的应用展望	212
9.3	烟气分区控制方法在高速铁路隧道中的应用展望	217
9.4	垂帘分区烟气控制模式在其他建筑空间中的应用展望	218
参考文献		222

第1章 绪论

1.1 研究背景

1965年,我国第一条城市地铁建成于北京,之后上海、广州、天津、深圳、南京等城市的地铁也相继建成投入运营中,并很快在城市交通中发挥了重要作用^[1-5]。经过几十年的发展,我国的城市化进程大大加快,许多大城市的交通问题日益突出^[6],为此,国务院提出了“把发展大运量的快速轨道交通(包括地铁)提到日程上来”的方针。

近期,武汉、西安、重庆、成都、哈尔滨、长春、沈阳、杭州、苏州、宁波、无锡、长沙、郑州、大连、南宁、福州、南昌、东莞、昆明等城市地铁正在开工建设或勘测设计中,一股二三线城市大规模建设地铁的浪潮席卷而来。按照国务院批准地铁建设的三项指标(即城市人口在300万以上、GDP在1000亿元以上、地方财政一般预算收入在100亿元以上)来衡量,目前全国有将近50个城市具备了地铁建设的需求和条件。从国务院已经批准和即将批准的城市轨道交通规划来看,共涉及20多个城市。2020年之前,轨道交通投资规模将超过1万亿元,其中主要是地铁投资,这是各个城市发展公共交通、缓解出行难的必然选择。

1.1.1 当代地铁发展的特点

经历了100多年发展后,现在的地铁在以下方面得到很大改善和加强:

(1) 安全性。

火灾是地下轨道交通最大的威胁,1863年建成的世界上第一条伦敦地铁,曾多次发生重大的火灾事故。在材料方面,最初的列车车厢是木制的,后来改为钢制^[7],1953年开通的多伦多的地铁车厢车架又改良为铝制,以减少火灾造成的危险。如今一些地铁车厢安装有烟雾传感器和火灾报警设施,内部座椅和装饰均采用了高标准防火材料,车站的装饰材料也全采用不燃材

料或难燃材料^[8]。新加坡地铁甚至在站台上都不设置垃圾箱,以减少发生火灾的可能性^[9],如图 1.1 所示。

在车站轨道区与站台之间安装屏蔽门,最初目的是为了降低空调能耗,后来发现可以避免乘客在候车时误入轨道区的事故发生,在车站发生火灾时也能更好地控制烟气扩散^[10],于是在建和新建的地铁几乎都设置有屏蔽门系统。

一些地铁入口区设置安全检查设备,杜绝带入易燃易爆危险物品;车站有明确的疏散标识,区间隧道设置疏散步道,使人们在紧急情况下能有序地撤离至安全地带;大量的新技术应用在地铁的建筑物结构、车辆、线路、监测控制方面^[11],使地铁应对火灾、水患、地震、停电等各类事故的整体安全性有了很大提高(见图 1.2 至图 1.4)。



图 1.1 新加坡地铁站台

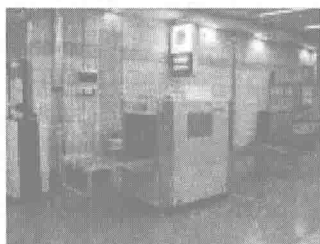


图 1.2 地铁安检设施



图 1.3 安全运输罐



图 1.4 简洁明了的标识

(2) 舒适性。

首条地下铁路建成之时,因电力还没有普及,使用的是蒸汽机车,会产生大量对人体有害的气体,虽然当时的隧道每隔一段距离便要有和地面连通的通风槽,但由于通风排烟设备还不够完善,内部环境仍很差。随着电力的普及和各种设备的不断完善,隧道内的照明、通风、排烟效果得到了较大改善^[12]。

以前老式地铁车厢内仅靠安置在车厢顶部的风扇换气送风,人多拥挤时难以缓解车厢内的闷热;现代地铁的列车车厢都有车载空调,地铁车站也采用中央空调系统,使内部环境和乘车舒适性得到了极大改善^[13-15]。现在,一

些国家和地区日益关注重视地铁对于车站环境、车厢环境给乘客的心理感受,并努力创造出新颖的、使人心情愉悦轻松的乘车环境(见图 1.5、图 1.6)。



图 1.5 北京奥运支线车站

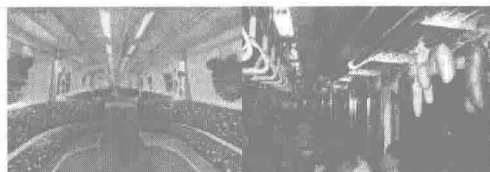


图 1.6 富有特色内饰的车厢

(3) 便捷性。

最初使用蒸汽机车时,地铁列车运行车速大约为 30 km/h,从 1890 年开始改用电力机车后,车速提高到 80 km/h,现在一些城市正在酝酿 120 km/h 的高速地铁^[16-21]。随着地铁线路的不断增加,地铁线路的分布就像一个网络,人们可以更方便地去更多的地方,一些帮助残疾人通行设备的普遍使用,使残疾人能和常人一样获得方便而又快捷的交通服务(见图 1.7)。

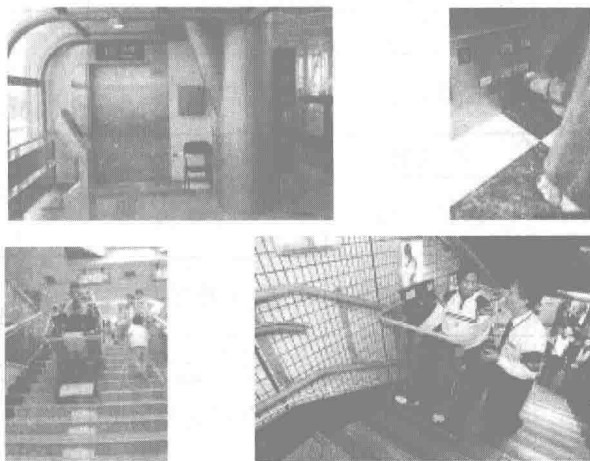


图 1.7 帮助残疾乘客通行的设备

1.1.2 地铁火灾的危害

1.1.2.1 国内外地铁的火灾事故

在地铁各类事故中,火灾发生频度高、造成的人员伤亡大,自 1863 年首条地铁建成以来,一些惨痛的火灾事故教训不断上演,表 1.1 是国外 30 余年来一部分有人员伤亡的重大地铁火灾事故^[22-31],如图 1.8 所示为韩国大邱地

铁火灾初期、救援及灾后的勘查阶段。

表 1.1 国外重大地铁火灾事故

时间	地点	火灾原因	伤亡损失
1977 年 11 月 6 日	苏联莫斯科	爆炸物爆炸	6 人死亡
1980 年 4 月 8 日	德国汉堡	人为纵火	4 人受伤
1984 年 4 月 3 日	德国汉堡	人为纵火	1 人受伤
1987 年 11 月 18 日	英国伦敦	自动扶梯起火	35 人死亡
1991 年 4 月 16 日	瑞士苏黎世	人为纵火	58 人重伤
1995 年 4 月 28 日	韩国大邱	煤气泄漏发生爆炸	103 人死亡、 230 人受伤
1995 年 7 月 25 日	法国巴黎	爆炸物爆炸	8 人死亡、86 人受伤
1995 年 10 月 28 日	阿塞拜疆巴库	电气设备故障	558 人死亡、 269 人受伤
1996 年 6 月 11 日	俄罗斯莫斯科	爆炸物爆炸	4 人死亡、15 人受伤
1996 年 12 月 3 日	法国巴黎	爆炸物爆炸	4 人死亡、86 人受伤
2000 年 8 月 8 日	俄罗斯莫斯科	爆炸物爆炸	13 人死亡、 90 多人受伤
2000 年 11 月 11 日	奥地利	设备故障	155 人死亡 18 人受伤
2003 年 2 月 18 日	韩国大邱	人为纵火	198 人死亡、 146 人受伤
2004 年 2 月 6 日	俄罗斯莫斯科	爆炸物爆炸	39 人死亡、 134 人受伤
2005 年 5 月 16 日	瑞典斯德哥尔摩	列车起火	12 人受伤
2005 年 7 月 7 日	英国伦敦	人为制造爆炸	56 人死亡、 700 多人受伤
2005 年 8 月 6 日	法国巴黎	列车故障	19 人受伤



图 1.8 韩国大邱地铁火灾初期、救援及灾后勘查阶段

自 1969 年以来,我国地铁共发生火灾 156 起,其中重大火灾 3 起,特大

火灾 1 起。1969 年 11 月,北京地铁因电气故障使电气机车发生火灾,浓烟聚集,由于排烟设施不完善,未能形成有组织的排烟,因此烟气四处扩散,并从出入口逸出,给人员的疏散和救援带来极大困难,许多人被烟气熏倒,200 多人中毒受伤^[32]。目前我国有多个城市已经拥有或正在建设地铁,从国外地铁火灾的统计资料来看,在建期、运营初期是地铁火灾的高发期。因此可以预见我国在未来几十年内地铁火灾安全形势不容乐观,我国近期发生的重大地铁火灾事故见表 1.2^[33]。

表 1.2 我国重大地铁火灾事故

时间	地点	起火原因	伤亡损失
2004 年 3 月 17 日	北京	通风设备故障	无
2004 年 10 月 14 日	香港	列车电力故障	1 人受伤
2005 年 1 月 5 日	香港	人为纵火	14 人受伤
2005 年 8 月 26 日	北京	列车线路短路	19 人受伤

1.1.2.2 地铁火灾的特点

与地面火灾相比,地铁发生火灾后具有如下特点:

(1) 疏散难度大^[34-36]。

① 客流量大:上海已建成运营的地铁一号线、二号线和明珠线,全长 65 km,日均客流总量为 100 万人次,其中,地铁人民广场站日均客流量为 25 万人次,地铁的满载率和单车运行均居世界第一。在地铁突发火灾事故的情况下,如此大的客流量,人员要有序疏散就显得十分困难,若要确保所有乘客在允许的安全时间内全部逃生,难度可想而知。

② 逃生条件差:商业运营的地铁一般建在地下 15 m 左右,商业和战备兼顾的地铁一般建在深达 30~70 m 的地下,如日本东京都营大江户地铁线,其中六本木车站共七层,深入地下达 42.3 m,光台阶就有 200 多级。突发火灾事故后,乘客从站台及站厅层仅凭体力往地面逃生,既耗时又费力,对青壮年乘客而言安全逃生尚需抓紧时机,对于老弱病残的乘客而言,逃生难度更大。

③ 逃生途径少:地铁运营环境的特定性,决定了可供乘客安全逃生途径的单一性。除安全疏散通道外,既没有供乘客使用的垂直电梯(设计上仅考虑残疾人专用电梯),也没有紧急避难场所。在突发火灾事故中,大量乘客同时涌向狭窄的通道及楼梯,另有检票机等障碍物挡道,严重影响乘客快速逃

生。列车若在隧道内发生火灾,乘客则需要较长时间才能逃出车厢进入隧道,有可能还需在有烟气、昏暗的隧道中步行至就近车站,其疏散难度远甚于车站之中。

④ 逃生距离长:以上海地铁人民广场站为例,该站共有 12 个出入口,其中 5 个直通地面,7 个通道连通地下商场(4 个通道设有防火卷帘)。12 条疏散通道中有 10 条距离在 100 m 以上,最远路线的距离达 260 m。一旦突发火灾事故,乘客往往习惯性从平常行走相对熟悉的路线或盲目跟随他人逃生,这对选择较长路线逃生的乘客来说,被困受害的可能性也就随之增大。

⑤ 允许逃生的时间短:针对地铁火灾事故,日本消防部门曾做过试验,日本地铁的车厢虽被确认具有不易燃烧性,但起火后,快则 1.5 min、慢则 8 min 之后就会出现对人体有害的气体。着火 2~5 min 后,车厢内烟雾弥漫就无法看清楚逃生出口,相邻的车厢在 5~10 min 内也会出现相同情形。试验证明,允许乘客逃生的时间只有 5 min 左右。如果车内乘客的衣物或行李被引燃,火势能在短时间内扩大,则逃生的时间更短。

⑥ 乘客逃生意识差异大:地铁站台(厅)或列车内突发火灾事故后,险恶的灾害形势使乘客容易产生恐慌及焦虑心理,这对逃生意识较强、对环境较为熟悉的乘客来说,还能冷静判断险情,相对准确地采取自救措施,安全逃生的可能性也就较大。但对自救意识较差的乘客而言,从众是多数人的选择,争先恐后拥向出口处时,被踩踏、推挤而倒地后,易导致群死群伤。另外,因恐惧迷失方向后,易导致被困直接致伤或致死。

(2) 火灾烟雾中的潜在危险大^[37-40]。

由于地铁系统的特殊性,使其在遭遇火灾时烟雾不易扩散,特别是地铁系统中使用的有机高分子装饰材料,一旦遇到火灾,很容易产生有毒气体。一些天然物质如木材、羊毛以及人工生产的塑料和橡胶等在燃烧时烟雾的主要成分是微粒和一些有毒有害气体,包括 CO 和 CO₂;较危险的气体有氰化氢、丙烯醛、氯化氢、氨、二氧化硫、硫化氢、硝酸气和硫酸气,还不同程度地存在甲酸和醋酸。烟雾中所含的有毒有害气体虽然含量不高,但当达到一定浓度时,短时吸入就会使人中毒,逐渐丧失判断能力和行动能力,时间一长会致人死亡。由于烟雾粒子对光具有很强的吸收和散射作用,可使能见度明显降低,加上烟气自然流动方向与疏散方向一致,人员在烟气围困下容易产生恐慌,在黑暗中找出正确逃生路径就更为困难。

(3) 灭火救援难度较大^[41, 42]。

首先,不论是区间隧道还是地铁车站都近似于封闭空间,火灾发生后会积聚大量烟雾,能见度低,散热慢,温度极端情况下可达到 1 300 °C,起火

点附近如未进行防火保护,承重结构体的混凝土在高温作用下容易发生崩落,对救援人员人身安全构成威胁。其次是烟气的毒性和热辐射作用,使得救援人员不易接近起火部位,将会延长扑救时间从而增加救援难度。

1.1.3 研究意义

随着我国经济和城市化进程的快速发展,作为城市公共交通运输重要设施的地铁得到长足发展,目前已有北京、上海等 10 余座城市的地铁建成投入运营,另有沈阳、哈尔滨、西安、重庆、武汉、长沙等近 20 个城市正在建设或规划建设中,预计到 2020 年投入运营的地铁线路长度将超过 2 500 km^[43]。

地铁的建设促进了国民经济的发展,缓解了城市交通的压力,为人们的出行带来便利。但地铁在运营中,有多种因素能引发火灾,由于地铁空间的特殊性,一旦发生火灾容易造成重大伤亡和财产损失。众多案例表明,火灾烟气是造成人员伤亡的元凶,因此地铁火灾的防灾减灾核心问题在于烟气控制。

如果能够在地铁发生火灾时有效地将烟气控制在特定局部范围内,就可以使人员与烟气分离,在疏散过程中远离火灾高温和烟气的伤害。因此开展地铁火灾烟气分区控制的系统研究对于减少人员伤亡和财产损失、提高我国地下轨道交通安全有着重要意义。

1.2 国内外的研究现状

鉴于地铁火灾危害的严重性,国内外纷纷加强了地铁的可燃材料燃烧性能、火灾烟气、人员疏散、监控预防技术、安全管理等领域的研究,采用的研究方法主要有理论计算、计算机数值模拟以及试验研究等。

1.2.1 地铁火灾研究的内容

1.2.1.1 材料的燃烧性能研究^[44-47]

地铁火灾的主要可燃物包括列车车体的地板、窗体、墙壁及天花板材料,座椅及装饰材料,旅客携带的行李物品,地铁站内的多种可燃物等。随着一些新型有机材料的应用,其燃烧后产生的有毒气体也大量增加,且地下通风

条件不良,通常为不充分燃烧,会产生大量有毒烟气,对地铁内的人员安全构成巨大威胁。

对地铁材料燃烧性能的研究在国外开展了较长时间,主要是针对列车内火灾的研究。1906—1928年,美国宾夕法尼亚州基于安全及防火的考虑,将木质列车更换为全钢制列车,1966年已经开始对列车内应用材料的燃烧性能进行研究,主要是评估座椅材料的安全性。1979年,NBS的研究人员对华盛顿 WMATA 和 BART 的地铁列车火灾危险性进行了研究,通过几种列车内部材料的小尺寸试验以确定其燃烧特性,以及全尺寸模拟试验对地铁列车内的整体燃烧状况进行研究等。从 20 世纪 90 年代中期开始,NIST 的研究人员研究了列车内部材料的燃烧行为,通过小尺寸锥形量热计试验和大尺寸家具量热计试验对比研究了小尺寸与全尺寸试验的着火特性与烟气数据。

1.2.1.2 地铁火灾中的烟气研究^[48-51]

地铁火灾众多受害者中的大多数不是被烧死而是被窒息而亡的,许多地铁火灾案例的统计结果表明,火灾中 85% 以上的死亡者是由于烟气的影响,其中大部分是吸入了烟尘及有毒气体昏迷后而致死,因此地铁中的通风和排烟得到广泛研究。

20 世纪 90 年代后期,英国的建筑研究小组对隧道火灾中烟气及有毒气体的运动进行了模拟研究,将隧道温度、通风速度的模拟结果与试验测量值进行比较分析。同期,德国学者在这方面做了缩尺模型试验,试验对象是长 37 m 的隧道,试验断面圆弧直径 3 m,试验中采用的燃料是庚烷和汽油,并且考虑了自然对流和强迫对流两种情况,试验结果表明,有通风情况下的最高温度大于无通风情况下的最高温度。此外,他们还将试验结果与用 FLUENT 程序的数值模拟结果进行比较,发现对下层烟气数值模拟结果均高估,上层烟气因位置的不同有高估的情况也有低估的情况,总体上 FLUENT 模拟的效果不好。

1.2.1.3 紧急情况下地铁中人员疏散^[52-56]

地铁火灾由于其结构的特点,导致人员疏散距离和疏散时间都较长。再加上可燃物多、发烟量大、火势易蔓延、热量易积聚、出入口少、报警设施不完善、人员密集等原因,使得地铁火灾中人员疏散非常困难。烟气通过出口向上蔓延,消防救援人员在高温和浓烟的阻碍下,难以深入内部抢救人员和接近火源点,使救援很难迅速有效地开展。历史上一些重大事故,如 1903 年的巴黎地铁大火,1987 年的伦敦国王十字地铁车站大火,1995 年的东京地

铁沙林毒气事件, 1995 年的阿塞拜疆乌尔杜斯地铁大火, 1995 年和 2003 年韩国大邱地铁两次大火等地铁灾难, 无不因灾难发生时疏散困难而给世人留下惨痛的教训, 因此地铁火灾的人员疏散问题已经引起国际社会的广泛关注。

对于地铁中的人员疏散问题, 国际上正在进行的研究主要包括以下几个领域:

- (1) 基于地铁火灾中烟气运动规律的人员疏散研究。
- (2) 有效的报警系统和疏散设施的研究。
- (3) 基于信息技术的安全性研究, 特别是其在疏散引导方面的作用。
- (4) 基于建筑性能化设计和疏散方案的研究。
- (5) 人员疏散的计算模拟研究。

1.2.1.4 地铁火灾中监控预防技术^[57-60]

由于地铁火灾一旦发生, 危害和后果均极其严重, 因此非常有必要在地铁中建立健全的消防安全系统并对火灾进行早期探测, 火灾发生时在第一时间迅速灭火可以有效地抑制火灾, 将火灾损失减少到最小。

地铁消防安全系统的基本元素包括: 人员的疏散路径和出入口、火灾探测系统、烟气控制系统、灭火系统、紧急照明、疏散标志、紧急电话、无线通讯设施、消焰器、闭路电视、交通流监控器、消防栓及其升压泵、灭火器和输水软管等。其中, 对火灾进行监控和预防的关键在于火灾探测系统和灭火系统。

地铁火灾与安全已经引起了国际上的广泛关注和重视, 科技防灾减灾是实现地铁安全有效和综合效益最佳的途径, 一些关键技术的基础研究, 如火灾动力学、风险评估、安全工程性能设计和科学管理与应急预案研究得到蓬勃发展。

1.2.2 国外地铁火灾研究现状

1.2.2.1 国外相关技术标准与要求^[61-66]

在国外, 关于隧道的技术要求和标准比较全面。

荷兰编制了《TNO 报告 98-CBV-R1161 隧道防火》以及 TNO 测试标准《隧道防火测试方法》, 规定了隧道的火灾场景确定方法与相关消防安全工程设计方法以及隧道结构的耐火测试方法。

瑞典制定了《Tunnel 99》, 其中第四节对隧道防火作了专门规定, 包括火灾探测、烟流控制、逃生救援等内容。

德国 1985 年制定了《RABT 公路隧道设施及运行准则》，1994 年对其进行了第一次修订，2003 年进行了第二次修订，其中对隧道中的火灾规模作出了规定。1995 年制定了《关于公路隧道建设补充技术条款及准则》，其中第十章“建筑防火”规定了隧道内的升温曲线，以及建筑结构及其内部系统所应采取的防火措施。1997 年制定了《EBA. Ril Stmctural and Operational Denmands for the Protection against Fire and Catastrophes in Railway Tunnels》，对隧道内的逃生通道、紧急出口、照明、信号指示、紧急通讯等进行了规定。

英国制定了《公路及桥梁设计手册》BD78/99，用于指导隧道的消防设计。

法国 2002 年制定了《Risk studies for road tunnels, methodolgy guideline (preliminary version)》，其中给出了火灾的热释放速率、CO、CO₂ 生成量及氧消耗量。

美国消防协会制定了 NFPA 130《固定导轨运输和有轨客运系统标准》和 NFPA 502《公路隧道、桥梁及其他限行公路标准》，其中，NFPA 130 规定了地下铁道的消防安全设计、运营管理、应急以及车辆消防要求等，NFPA 502 规定了不同类型隧道的消防要求。

1.2.2.2 国外地铁火灾试验的研究

国外地铁火灾的试验研究开展得较早，在伦敦国王十字地铁火灾、阿塞拜疆巴库地铁火灾和韩国大邱地铁火灾暴露出现有地铁车站消防措施存在不足之后，促进了地铁火灾及烟气控制的试验研究。如 Drysdale^[67]等人建立了 1:15 比例的模型来研究国王十字地铁站中自动扶梯燃烧产生的沟槽效应 (Trench Effect)，其研究表明，由于沟槽效应产生的火焰加速蔓延现象是造成国王十字地铁站火灾惨重伤亡的主要原因。K.Moodie^[68, 69]等人也利用小尺寸模型研究了国王十字地铁站火灾的发展过程。

韩国大邱地铁火灾后，仁川大学的 Dong-HoRie^[70]等人建立了一个 1:40 的模型实验台对地铁站内机械排烟的模式进行了模拟，并结合数值模拟研究了地铁站内排烟口开启的最佳模式。韩国建筑技术协会的 J.Y.Kim^[71]等人建立了 1:20 的地铁隧道模型研究了由地铁车辆运行造成的活塞风。

1.2.2.3 国外地铁火灾的数值模拟研究

虽然试验研究为地铁防灾研究提供了宝贵而可靠的资料，但大量人力物力的投入使其应用受到限制，地铁火灾的数值模拟研究就得到快速发展。在 1973 年举行的第一次气体动力学和隧道通风国际会议上，地铁环境控制的数