



Smoke Movement and Control
in Long and Narrow Spaces

狭长空间烟气流动特性
及控制方法

纪杰 钟委 高子鹤 著



科学出版社

狭长空间烟气流动特性及控制方法

纪 杰 钟 委 高子鹤 著

丁

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为详尽地介绍了作者及国内外同行多年来在狭长空间火灾烟气流动特性及控制方法方面的研究成果,内容主要包括典型狭长空间建筑火灾危险性与发展特性,狭长空间火灾的模型实验、全尺寸实验和基本的数值模拟研究方法,狭长空间烟气流动特性,城市地下公路隧道竖井自然排烟机理,公路隧道机械防排烟有效性,地铁站内紧急通风控制模式等。

本书可作为从事火灾安全工程、建筑防火设计等的研究人员和工程技术人员的参考书籍,也可作为高等学校消防工程、安全工程、工程热物理、城市地下空间工程等专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

狭长空间烟气流动特性及控制方法/纪杰,钟委,高子鹤著. —北京:科学出版社, 2015.5

ISBN 978-7-03-044441-7

I. ①狭… II. ①纪… ②钟… ③高… III. ①火灾-烟气-气体流动-流动特性 ②火灾-烟气控制 IV. ①TU998.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 114381 号

责任编辑:刘凤娟 赵敬伟 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈 敬 涂 然

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第一版 开本:720×1000 B5

2015年10月第一次印刷 印张:21 5/8

字数:425 000

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着社会经济的飞速发展和城市化进程的不断加快,复杂、特殊的建筑结构形式越来越多,如各类隧道和以大型交通枢纽为代表的大体量建筑。在这些建筑内部,普遍存在一类特殊的建筑空间形式——狭长型空间。就结构特点而言,狭长空间纵向尺度远大于竖向和横向尺度,出口一般较少,且多位于两端;就功能特点而言,各类狭长空间作为人员通行和交通运输的主要通道,也是火灾时人员逃生的必经路径。这种建筑结构形式在发挥自身重要作用的同时,也存在着较高的火灾风险。近年来,国内外发生了多起重特大隧道、地铁火灾等狭长空间火灾事故,造成了惨重的人员伤亡和财产损失。统计结果表明,火灾中的人员伤亡主要源于烟气中毒和窒息。为有效地抑制狭长空间内的火灾蔓延并控制高温有毒烟气的扩散,需要对受限火羽流的行为特征、烟气在狭长空间内的流动特性及其特征参数的沿程分布规律等进行系统研究,提出切实可行的防火设计对策,提高狭长空间的消防安全性。

本书较为详尽地介绍了作者及国内外同行多年来在狭长空间火灾烟气流动特性及控制方法方面的研究成果,可作为从事火灾安全工程、建筑防火设计等的研究人员和工程技术人员的参考书籍,也可作为高等学校工程热物理、安全工程等专业高年级本科生和研究生的教材。全书共6章,由纪杰、钟委、高子鹤等共同撰写,纪杰和钟委对全书进行了统稿。第1章主要由纪杰、高子鹤、韩见云撰写,主要介绍了典型狭长空间建筑内的火灾危险性、烟气流动理论基础以及主要的烟气控制方式。第2章主要由钟委、杨健鹏、高子鹤撰写,主要介绍了模型实验的流动相似理论,小尺寸和全尺寸实验方法以及数值模拟方法和常用的数值模拟工具。第3章主要由付艳云、纪杰、蒋亚强撰写,主要介绍了顶棚射流火焰长度和顶棚下方最高温度的预测关系式,狭长空间烟气层中CO的输运特性、烟气蔓延各阶段的质量卷吸模型。第4章主要由范传刚、纪杰、高子鹤撰写,重点对城市地下公路隧道采用自然排烟的有效性进行了介绍,并得到了计算竖井最佳排烟高度的判据,提出了改进竖井排烟效果的方法。第5章主要由纪杰、高子鹤、彭伟撰写,主要介绍了隧道型狭长空间机械防排烟的有效性,对机械排烟中存在的烟气层吸穿现象和烟气层分叉等现象进行了系统研究。第6章主要由钟委、杨健鹏、高子鹤撰写,主要对地铁站台和站厅的机械排烟有效性进行了研究,分析了正压送风挡烟和空气幕挡烟的烟气控制效果以及活塞风等对站台和站厅火灾的影响。

在本书的撰写过程中，得到了范维澄院士、张和平教授、孙金华教授、刘乃安教授、杨立中教授等多位老师和学者的支持和帮助，并引用了国内外同行的相关研究结论，在此一并表示感谢。本书是作者们诸多科研项目研究成果的结晶，包括国家自然科学基金面上项目“纵向风作用下不同海拔公路隧道受限火羽流行为特征研究（51376173）”，国家自然科学基金青年基金“城市地下公路隧道竖井自然排烟时烟气层吸穿临界判据及卷吸特性研究（50904055）”“纵向风作用下城市隧道车辆火灾顶棚射流火焰动力学特性研究（51104132）”，国家重点基础研究发展计划（973）项目“城市高层建筑重大火灾防控关键基础问题研究（2012CB719700）”，中央高校基本科研业务费专项资金资助项目、中国科学院青年创新促进会资助项目等。在此衷心感谢国家自然科学基金委员会、国家科学技术部、国家教育部、中国科学院等部门在研究经费上给予的大力资助。

虽然作者在撰写过程中尽了自己最大的努力，但由于水平有限加上时间仓促，错误和疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

作者
2014年10月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 典型的狭长空间建筑形式	1
1.1.1 交通隧道	1
1.1.2 地铁站	2
1.1.3 人行通道	3
1.1.4 地下商业街	4
1.1.5 民用建筑长走廊	5
1.2 狭长空间建筑火灾危险性与发展特性	6
1.2.1 地铁火灾	6
1.2.2 交通隧道火灾	10
1.2.3 狭长空间火灾发展特性	12
1.3 狭长空间烟气流动理论基础	16
1.3.1 火灾燃烧基础	16
1.3.2 烟气流动基础	29
1.4 狭长空间建筑火灾烟气控制方式	36
1.4.1 隧道内烟气控制方式	36
1.4.2 地铁站内烟气控制方式	39
参考文献	44
第 2 章 狭长空间火灾特性研究方法	50
2.1 模型实验	50
2.1.1 流动相似理论	51
2.1.2 小尺寸实验的相似准则	56
2.1.3 小尺寸实验台介绍	65
2.2 全尺寸实验	69
2.2.1 隧道全尺寸实验介绍	69
2.2.2 地铁站全尺寸实验介绍	76
2.3 数值模拟方法	79
2.3.1 基本控制方程和模型	79
2.3.2 计算区域离散化与网格划分	82

2.3.3 控制方程的离散化	84
2.3.4 初始条件与边界条件	86
2.3.5 常用数值模拟工具	88
参考文献	94
第3章 狭长空间火灾发展及烟气流动特性	96
3.1 火焰发展规律及顶棚射流火焰长度	96
3.1.1 竖向及顶棚射流火焰形态	96
3.1.2 顶棚射流火焰长度	100
3.2 顶棚射流最高温度	106
3.2.1 近火源区顶棚下方最高温度	106
3.2.2 顶棚下方最高温度的纵向分布规律	121
3.2.3 顶棚下方最高温度的横向分布规律	123
3.3 狭长空间烟气层中 CO 的输运特性	128
3.3.1 CO 浓度随时间增长的理论模型	130
3.3.2 CO 理论模型的实验验证	133
3.4 烟气水平蔓延过程中的质量卷吸模型	141
3.4.1 烟气各蔓延阶段卷吸速率模型的建立	142
3.4.2 烟气各蔓延阶段卷吸速率模型系数的确定	145
参考文献	150
第4章 城市地下公路隧道自然排烟的有效性	155
4.1 竖井自然排烟	155
4.2 烟气层吸穿和边界层分离现象	156
4.2.1 实验现象	156
4.2.2 竖井排烟的临界 Ri' 数判据	164
4.3 竖井高度对自然排烟效果的影响	167
4.3.1 竖井排烟过程分析	167
4.3.2 火灾场景设计	168
4.3.3 稳定段选取	169
4.3.4 临界吸穿高度	170
4.3.5 自然排烟效果对比分析	172
4.4 竖井截面尺寸对自然排烟效果的影响	177
4.4.1 烟气溢流的理论模型	177
4.4.2 竖井宽度对排烟效果的影响研究	178
4.4.3 竖井长度对排烟效果的影响研究	184
4.5 纵向风对自然排烟效果的影响	188

4.5.1 隧道内烟气层厚度和温度	189
4.5.2 竖井和隧道内温度分布	190
4.5.3 竖井中速度矢量场	190
4.5.4 烟气速度和惯性力	192
4.5.5 竖井排烟量	194
4.6 斜角竖井对边界层分离现象的抑制作用	195
参考文献	200
第5章 隧道机械防排烟系统的有效性	203
5.1 横向排烟速率对烟气水平输运特性的影响	203
5.1.1 烟气输运特性参数	204
5.1.2 不同排烟速率下烟气层界面的形态特征	207
5.1.3 烟气层内最高温升随排烟速率的变化	209
5.1.4 烟气水平流动速度随排烟速率的变化	211
5.2 机械排烟引起的烟气层吸穿	212
5.2.1 机械排烟中的烟气层吸穿现象	212
5.2.2 排烟口高度和排烟速率对机械排烟效率的影响	213
5.2.3 隧道内发生吸穿的临界 Froude 数	220
5.3 射流风机作用下的隧道流场特性	227
5.3.1 射流风机在纵向排烟中的应用	227
5.3.2 射流风机对隧道流场的影响	229
5.4 纵向风对主辅双洞隧道火灾烟气的控制作用	239
5.5 隧道火灾烟气分岔流动现象	246
5.5.1 分岔流动现象的形成原因	246
5.5.2 分岔流动现象的实验和数值模拟	247
5.5.3 烟气分岔流动临界风速	258
参考文献	262
第6章 地铁站机械防排烟系统的有效性	266
6.1 正压送风挡烟	266
6.1.1 理论分析	266
6.1.2 正压送风挡烟的数值模拟验证	268
6.1.3 正压送风挡烟的全尺寸实验	271
6.2 空气幕挡烟	274
6.2.1 空气幕的流场结构	275
6.2.2 空气幕挡烟过程的理论分析	276
6.2.3 空气幕挡烟的数值模拟验证	280

6.3 站台机械排烟	287
6.3.1 站台火灾烟气流动状况	287
6.3.2 排烟口开启位置对站台机械排烟效果的影响	289
6.3.3 排烟口高度对站台机械排烟效果的影响	295
6.3.4 排烟盲区现象	299
6.4 地铁站通风排烟模式	304
6.4.1 地铁站通风排烟模式简介	304
6.4.2 起火站台层通风排烟模式	305
6.4.3 地铁站层间通风排烟模式	308
6.5 列车活塞风对防排烟系统的影响	316
6.5.1 场景设置	317
6.5.2 活塞风对站台火灾的影响	319
6.5.3 活塞风对站厅火灾的影响	329
参考文献	334
索引	337

第 1 章 概 论

随着社会经济的飞速发展和城市化进程的不断加快,复杂、特殊的建筑结构形式越来越多,如各类隧道和以大型交通枢纽为代表的大体量建筑。在这些建筑内部,普遍存在一类特殊的建筑空间形式——狭长型空间。就其结构特点而言,狭长空间纵向尺度远大于竖向和横向尺度,出口一般较少,且多位于两端;就其功能特点而言,各类狭长空间作为人员通行和交通运输的主要通道,也是火灾时人员逃生的必经路径,这种建筑结构形式在发挥自身重要作用的同时,也存在着较高的火灾风险^[1~6]。大量的火灾事故表明狭长空间火灾呈现出一些有别于常规建筑空间火灾的特点:一方面,由于空间相对狭长,烟气向两端蔓延积累并迅速沉降;另一方面,人员密集且只能向两端疏散,即烟气蔓延和人员疏散路径一致,极易造成群死群伤的惨剧。狭长空间建筑的大量出现,给建筑防火提出了新的难题。

1.1 典型的狭长空间建筑形式

典型的狭长空间包括:交通隧道、电缆隧道、地铁站、地下商业街、民用建筑走廊、立体式交通中的地下公路、地下人行通道等。要研究狭长空间的火灾发展及烟气控制,需首先分析其结构和功能。

1.1.1 交通隧道

交通隧道主要包括公路隧道、铁路隧道及城市地铁隧道^[7]。公路隧道和铁路隧道是为使道路从地表之下通过而修建的建筑物,分别供汽车和火车通行。这一类隧道通常用于穿越某一山脉或水域,如山岭隧道、过江隧道、海底隧道等,为车辆行驶提供较为平缓的道路。城市地铁隧道是一种特殊的铁路隧道,是为了解决城市交通问题而建造的特殊轨道交通隧道。近年来,我国的大中型城市为缓解交通压力,大力打造立体式交通隧道网络和枢纽,如上海虹桥机场高铁站、北京西单地下立体交通工程^[8]、武汉街道口立体交通网^[9]等。由于立体式交通枢纽结构复杂,车辆和人员密集,在提高了城市用地的使用率,缓解了交通压力的同时,也给消防安全提出了更高的要求。

交通隧道的兴起最早源于铁路隧道的修建。世界上的首条铁路隧道出现于 1826 年,英国修建了 770m 长的泰勒山隧道。2010 年 10 月 15 日,世界最长的

铁路隧道瑞士戈特哈德铁路隧道贯通，全长 57km。而世界上首条公路隧道则出现于 1927 年在美国修建的纽约哈德逊河底隧道，同时也是首条河底隧道。日本的青函隧道是世界上最长的穿越海峡的隧道，连接了本州的青森与北海道的函馆两个城市，隧道全长 53.85km，该隧道工程非常庞大，1971 年 4 月正式动工开挖主坑道，1988 年 3 月 13 日才正式通车^[10]。

我国自从 1965 年修建了第一条城市地铁隧道开始，目前已经成为铁路隧道建设、公路隧道建设以及地铁隧道建设规模最大、发展最快的国家之一^[11~13]。统计资料表明，截至 2013 年底，我国大陆拥有铁路隧道 11074 座，总长度达 8938.78km。2014 年贯通的新关角隧道，全长 32.645km，为中国最长的铁路隧道及世界最长的高原铁路隧道。2014 年贯通的兰新客运专线达坂山隧道，全长 15.918km，是世界上最长的高原高速铁路隧道。规划建设的烟大海底隧道，全长 123km，预计 2024 年建成，将成为世界上最长的海底隧道和铁路隧道。图 1.1 (a) 为世界上海拔最高的铁路隧道——青藏高原风火山隧道，2003 年 9 月 31 日建成通车，位于青藏高原腹地的风火山地区，全长 1338m，轨面海拔 4905.4m。截至 2013 年底，我国大陆拥有公路隧道 11359 座，总长 9605.6km，目前运营最长的公路隧道为秦岭终南山隧道，长 18020m，它也是我国自行设计施工的世界最长的双洞单向公路隧道^[14]，如图 1.1 (b) 所示。近十年来，我国隧道建设规模和速度都有了较快的发展，单洞长度达 20km 的特长铁路隧道和连拱、单洞双车道和四车道的公路隧道、双层水下公路隧道不断涌现，而且在技术上也得到了快速发展，在各种工法的应用方面也有不断突破。

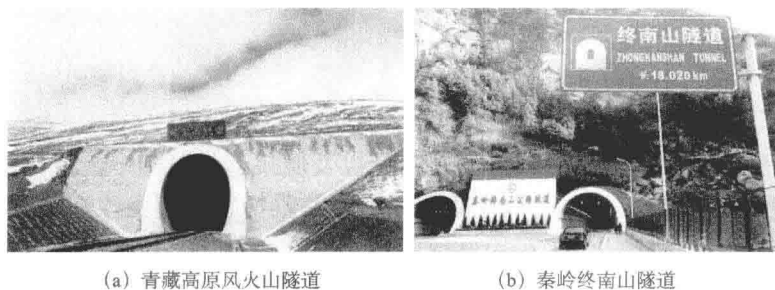


图 1.1 交通隧道

1.1.2 地铁站

随着城市经济的不断发展和人口的不断增长，地铁系统已经成为缓解城市交通压力的重要工具。

1863 年，英国开通了世界上的第一条地铁“大都会号”。时至今日，英国伦敦已经建成 12 条，总长度超过 400km 的线路网，有 160 余公里的线路位于隧道

内,地铁站多达270个,地铁已经成为伦敦市最重要的交通工具^[15]。世界上拥有地铁最多的国家是美国,它的线路总长占世界的20%,共有14座城市建有地铁。其中,纽约市拥有世界上最大、最复杂的地铁网络,共计27条地铁线路,地铁站多达468个^[16]。近年来,我国地铁建设也发展迅速。北京是最早建设地铁的城市,目前北京地铁共有18条运营线路(包括17条地铁线路和1条机场轨道),组成覆盖北京市11个市辖区,拥有318座运营车站、总长527km运营线路的轨道交通系统。上海利用2010年世博会的发展契机,目前已开通运营14条线路、337座车站,运营里程548km,是世界上规模最大的城市地铁系统。截至2013年底,中国大陆已有19个城市开通了地铁,拥有83条运营线路总里程达2746km,另有15个城市的首条地铁线正在建设中,目前全部在建的地铁线路达106条,总里程超过2400km^[17]。

2014年,北京地铁的工作日日均客运量在1000万人次以上,并在2014年4月30日创下单日客运量最高值,达到1155.95万人次^[18]。地铁站是整个地铁系统中一个非常重要的组成部分,也是人流最密集的区域。因此,地铁站中的火灾安全是消防工程和管理重中之重。地铁站大致可分为三个部分,包括:站台和站厅、出入口及通道、通风系统^[19]。站台和站厅构成了狭长空间的主体,也是人员流动的主要区域;出入口及通道既是旅客进出地铁站的通道又是火灾发生时新鲜空气的进入通道;通风系统用于机械补风,保持地铁站内的空气质量,并用于火灾时的机械排烟。图1.2是地铁站站台结构,为典型的狭长空间建筑。

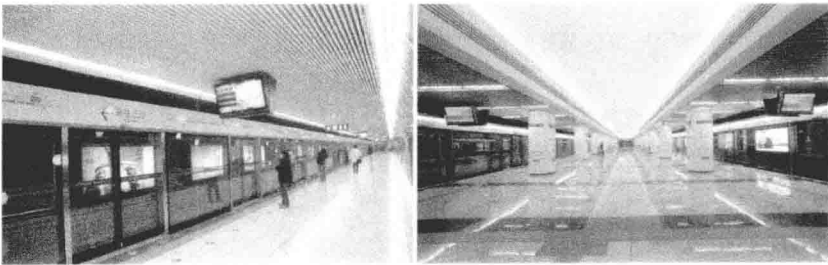


图1.2 地铁站台

1.1.3 人行通道

为适应城市现代化建设和可持续发展的需要,开发利用城市地下空间是城市发展的必然选择与趋势。合理的利用和开发地下空间已为解决大城市资源与环境危机的重要途径。近年来,我国地下建筑发展的步伐也在加快^[20~22]。地下餐厅、地下旅馆、地下商场、地下娱乐中心、地下商业街等建筑形式相继涌现出来^[22~25],其中地下通道是通向或连接这些地下设施的主要建筑形式^[26],既可

以拓展城市平面交通为立体交通,缓解交通压力,将机动车与行人进行分流;又扩展了城市空间,不但使商业、交通领域向下发展,还将已开拓的地下空间结构有机地结合了起来^[27],在社会中发挥着巨大作用。

多数地下通道具有较长的纵向尺度,可视为狭长空间,图 1.3 为典型的地下通道结构。

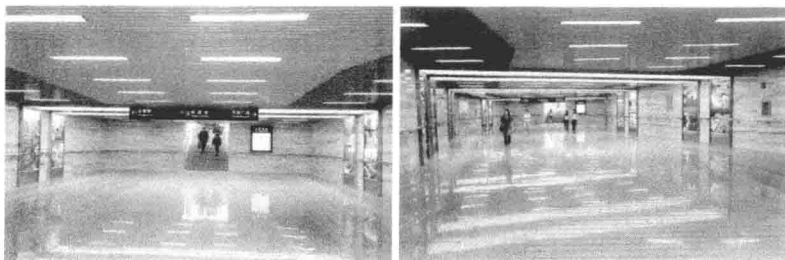


图 1.3 地下通道

1.1.4 地下商业街

很多大中型城市为了充分开发商业区的建筑用地,将商业街的地下也开发为宽阔的街道,街道两旁商店林立,同时避免了地上街道的车辆、噪音和灰尘。地下商业街是指修建在城市地下,并在其一侧或两侧开设商店和布置各种服务设施的建筑空间,简称地下街^[28],如图 1.4。

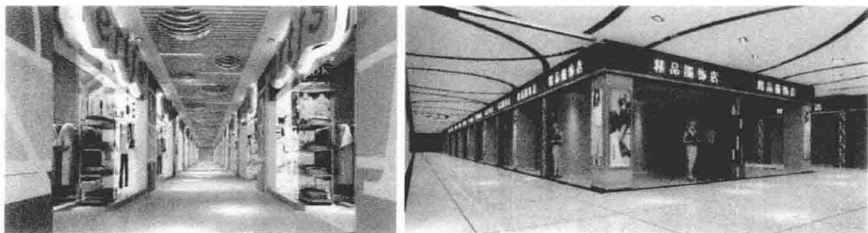


图 1.4 地下商业街

世界上第一条地下商业街出现在日本。1931年12月日本将上野火车站的地下通道改建成“上野地铁商店”,成为最早的地下商业街。之后的几十年中,日本的地下商业街逐年增长,仅东京就有14条,总面积达223000m²,日本各地大于10000m²的地下商业街共计26条^[29]。我国地下商业街的开发相对较晚。20世纪60年代,地下空间的开发以人防工程为主;进入80年代中后期,随着市场经济和城市化的发展,开始出现了以商业发展为目的的地下街^[30];随着我国经济高速腾飞,各大城市已开始大规模利用地下空间,如沈阳长江街地下商业街

最宽处 7m, 但长度达到 1300m; 拟建的南京湖南路地下商业街, 设计宽度 20m, 全长 1130m, 包括地下商场、餐饮和停车场三层; 上海市人民广场地下商业街宽 36m, 长约 300m, 总面积 50000m², 已形成一个非常繁华的地下商业网络, 同时广州、重庆、沈阳、哈尔滨、西安、郑州、石家庄等地也都在建或新建了多条地下商业街^[31]。

地下商业街按照建筑模式和功能大致可分为 5 类, 包括: 作为地面商业街的延伸而建成的地下街, 如纽约市的曼哈顿区、多伦多市的中心区等; 利用地下通道建成的地下商业街, 如重庆市江北金观地下商业街; 用人防工程改造的地下商业街, 如包头市钢铁大街地下商业街, 哈尔滨红博地下商业街等; 结合地铁站综合利用而建成的地下商业街, 如上海人民广场地下商业街; 在城市主干道下建设的商业街, 如哈尔滨市东大直街地下商业街。

1.1.5 民用建筑长走廊

随着建筑功能多元化、建筑造型美观化需求的提高, 以及建筑空间和城市规划结合度的提高, 建筑物结构呈现高、大型化, 复杂化的趋势。因此, 建筑内部和相邻建筑之间也出现了越来越多的狭长走廊。走廊是建筑物的水平交通空间, 一般宽度较窄而具有较长的纵向尺度, 包括建筑内部走廊和连接相邻建筑的架空走廊, 所谓架空走廊是指建筑物与建筑物之间, 在两层或两层以上专门为水平交通设置的走廊, 建筑长走廊是典型的狭长空间, 如图 1.5 所示。

建筑物发生火灾后, 烟气从起火房间通过走廊向建筑物其他部位流动蔓延。火灾情况下, 建筑内人员的安全疏散主要靠楼梯, 人员疏散方向为: 起火房间—走廊—楼梯间前室—楼梯间—室外^[32]。可见, 走廊不仅是建筑物结构的重要组成部分, 更是人员向消防通道疏散的必经之路, 所以走廊烟气能否及时向外排出很大程度决定着建筑内人员是否可以安全逃生。

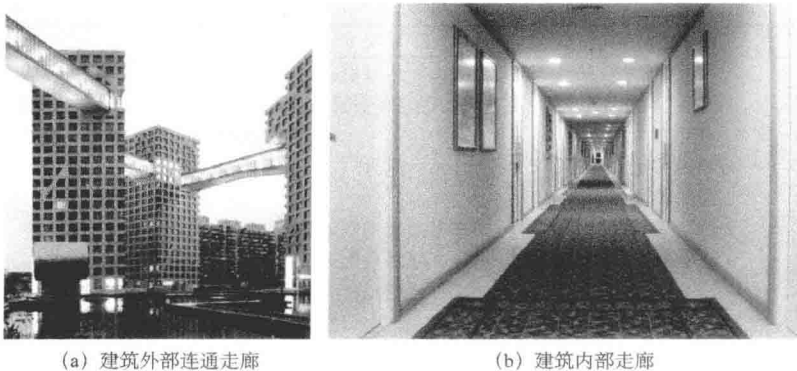


图 1.5 建筑长走廊

1.2 狭长空间建筑火灾危险性与发展特性

随着城市化进程的加快,隧道、地铁、地下商业街及各类通道等狭长空间建筑大量涌现,这些建筑在给我们的生活带来便利、美化城市的同时也增加了火灾事故发生的风险。20世纪下半叶以来,狭长空间火灾进入了一个多发阶段,呈逐年上升趋势且重特大事故时有发生,消防安全形势十分严峻。由于狭长空间纵横比大,横截面小,空间相对受限,一旦发生火灾,火势迅速蔓延、高温有毒烟雾易积累、火灾扑救难度大,很容易造成严重的经济损失和人员伤亡^[33~36]。其中尤以地铁和隧道火灾事故造成的损失最为严重,影响也最大。

1.2.1 地铁火灾

自地铁诞生之日起,火灾就时有发生。随着世界地铁建设的飞速发展,地铁线路和车辆不断增加,另外,经过多年运营,地铁站内各种设备逐渐老化,更是增大了发生火灾的可能性。20世纪下半叶,世界范围内地铁火灾事故频发,损失惨重^[4,37~45]。日本在1961~1975年共发生地铁火灾45起,平均每年3起;美国纽约地铁仅在1980~1982年就发生了10次火灾,造成了53人死亡,136人受伤,损失巨大。20世纪80年代末以来,地铁火灾又出现了新的特点,群死群伤的重特大火灾事故不断出现。1987年发生在英国伦敦的金十字地铁站火灾造成了31人死亡,100多人受伤;1995年发生在阿塞拜疆首都巴库的地铁火灾造成了558人死亡,269人受伤,这是迄今伤亡最惨重的地铁火灾案例;1995年和2003年发生在韩国大邱的两次地铁火灾也分别造成101人死亡,143人受伤和198人死亡,146人受伤,289人失踪。国外地铁重大火灾如表1.1所示^[46]。

表 1.1 国外地铁重大火灾情况^[46]

时间	火灾发生地点	原因	后果
1903.8	法国巴黎	列车在运行中起火	死亡84人
1971.12	加拿大蒙特利尔	列车撞击隧道端引起电路短路	毁车36辆,司机死亡
1972.10	德国东柏林		车站和4辆车被毁
1972	瑞典斯德哥尔摩	纵火	
1973.3	法国巴黎	纵火	车辆被毁,死亡2人
1974.1	加拿大蒙特利尔	废旧轮胎引发电路短路	毁车9辆
1974	苏联莫斯科	车站平台大火	
1975.7	美国波士顿	隧道照明线路拉断引发大火	
1976.5	葡萄牙里斯本	车头牵引失败引发火灾	毁车4辆
1976.10	加拿大多伦多	纵火	毁车4辆
1977.3	法国巴黎	天花板坠落引发火灾	

续表

时间	火灾发生地点	原因	后果
1978. 10	德国科隆	丢弃烟头引发火灾	伤 8 人
1979. 1	美国旧金山	电路短路引发大火	死亡 1 人, 伤 56 人
1979. 3	法国巴黎	车厢电路短路引发大火	毁车 1 辆, 伤 26 人
1979. 9	美国费城	变压器火灾引起爆炸	伤 148 人
1979. 9	美国纽约	丢弃烟头引燃油箱	毁车 2 辆, 伤 4 人
1980. 4	德国汉堡	车厢座位着火	毁车 2 辆, 伤 4 人
1980. 6	英国伦敦	丢弃烟头引发大火	死亡 1 人
1980~1981	美国纽约	发生 8 次火灾	死亡 53 人, 重伤 50 人
1981. 6	苏联莫斯科	电路引发火灾	死亡 7 人
1981. 9	德国波恩	操作失误火灾	车辆报废
1982. 3	美国纽约	传动装置故障	伤 86 人, 毁车 1 辆
1982. 6	美国纽约		毁车 4 辆
1982. 8	英国伦敦	电路短路引起火灾	伤 15 人, 毁车 1 辆
1983. 8	日本名古屋	变电所整流器短路引起大火	死亡 3 人, 伤 3 人
1983. 9	德国慕尼黑	电路着火	毁车 2 辆, 伤 7 人
1984. 9	德国汉堡	列车座位着火	毁车 2 辆, 伤 1 人
1984. 11	英国伦敦	车站站台引发大火	车站损失巨大
1985. 4	英国伦敦	垃圾引发大火	伤 6 人
1987. 6	比利时布鲁塞尔	自助餐厅引起火灾	
1987	苏联莫斯科	火车燃烧	
1987. 11	英国伦敦	烟头引燃木质扶梯引发大火	死亡 31 人, 伤 100 余人
1991. 4	瑞士苏黎世	电路短路导致车厢起火	重伤 58 人
1991. 6	德国柏林		伤 18 人
1991. 8	美国纽约	列车在运行中脱轨引起火灾	死亡 5 人, 伤 155 人
1995. 4	韩国大邱	施工损坏煤气管道导致爆炸	死亡 101 人, 伤 143 人
1995. 10	阿塞拜疆巴库	电动机车电路故障	死亡 558 人, 伤 269 人
1995. 7	英国伦敦	车站连续爆炸	死亡 8 人, 伤 200 余人
1998	俄罗斯莫斯科	地铁爆炸	伤 3 人
1999. 10	韩国汉城郊外	地铁发生火灾事故	死亡 55 人
2000. 4	美国华盛顿	隧道内电缆故障引发火灾	伤 10 余人
2000. 11	奥地利萨尔茨州	空调过热	死亡 155 人, 伤 18 人
2001. 8	英国伦敦	地铁爆炸	伤 6 人
2001. 8	巴西圣保罗		死亡 1 人死亡, 伤 27 人
2003. 1	英国伦敦	机械故障导致列车脱轨	至少伤 32 人
2003. 2	韩国大邱	纵火	死亡 198 人, 伤 146 人
2004. 2	俄罗斯莫斯科	恐怖袭击, 爆炸引发大火	死亡近 50 人, 伤 100 余人

我国地铁自 1969 年以来, 共发生火灾 156 起, 其中重大火灾 3 起, 特大火灾 1 起^[47~48], 其中, 仅北京地铁火灾就造成 36 人死亡。目前, 我国有多个城市已经拥有或正在建设地铁, 其中北京、上海、广州等地铁已经过多年运营, 从国外地铁火灾的统计资料来看, 这个时期正是地铁火灾的频发期。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, 因此, 对地铁火灾的研究已成

为当前火灾安全中的热点问题。我国发生的地铁火灾情况如表 1.2 所示^[40]。

表 1.2 我国部分地铁火灾情况

城市	地铁简况	火灾原因	火灾情况
北京	运行路线: 18 条 线路总长: 527km	电器故障、违章操作	共发生火灾 156 起, 36 人 死亡, 烧毁客车 4 辆
天津	运行路线: 4 条 线路总长: 140km	值班室棉被被引燃	1 次火灾
上海	运行路线: 15 条 线路总长: 578km	设备过载、短路	2 次火灾, 经济损失 1725 万元
广州	运行路线: 9 条 线路总长: 260km	电气元件故障	1 次火灾, 直接损失 20 万元

上述国内外统计数据充分表明了地铁火灾的严重性, 一旦地铁火灾没有得到有效控制而充分发展的话, 将造成车辆烧毁、地铁站建筑结构受损和重大人员伤亡等直接损失, 而由火灾引起的交通中断等间接损失更是无法估量。下文以国内外几次重大地铁火灾事故为例, 详细论述地铁火灾的发展过程及其后果的严重性。

1. 阿塞拜疆地铁火灾^[39,40]

1995 年 10 月 28 日, 一列满载旅客的地铁列车, 刚刚驶离乌尔杜斯站站台 200m 进入地铁隧道, 由于机车电路故障诱发火灾, 导致第 3、4 节列车车厢着火。司机慌乱中紧急刹车将列车停在了隧道内。隧道内的大火直到第二天清晨才被最后扑灭, 救援工作持续了十多个小时, 整个隧道内和车厢内的残骸焦黑一片, 遍布死难者遗体。灾后调查显示造成大批乘客死亡的原因是神经麻痹毒气, 这是因为 60 年代制造的列车过多地采用可燃化合物材料装饰车厢, 燃烧时产生了大量烟雾和有毒气体。此次火灾造成 558 人死亡, 269 人受伤, 是阿塞拜疆自苏联时期至今发生的伤亡最惨重的一次火灾, 如图 1.6 (a)。

2. 韩国大邱地铁火灾^[42~43]

2003 年 2 月 18 日, 当载有约 400 名旅客的韩国大邱市地铁 1 号线 1079 号列车驶进中央路车站时, 车厢内一名男子点燃随身携带的装满液体燃料的瓶子, 引燃了座椅上的塑料物质和地板革, 整个列车随之起火。1079 号列车着火 4 分钟后, 车站的地铁调度员又错误地允许 1080 号列车进入中央路车站, 该列车载有旅客约 400 人。1080 号列车的驾驶员将列车驶入车站后, 发现黑烟渗入车厢, 遂试图将列车驶出车站, 但因为电流中断, 列车已无法移动。在一片混乱和黑暗中, 该列车所有乘客都被关在车厢内。某些乘客找到了应急装置, 用手动方式打开了车门得以逃生, 但是多数车门始终未能打开, 大部分乘客受困于车厢内, 遭浓烟窒息。1079 号列车的车厢门是敞开的, 大多数乘客得以及时逃生。此次火灾最终