

深埋地铁车站 火灾实验与数值分析

史聪灵 钟茂华 涂旭炜 符泰然 何理 著



科学出版社
www.sciencep.com

深埋地铁车站火灾实验 与数值分析

史聪灵 钟茂华 涂旭炜 符泰然 何理 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要运用模型实验与数值分析的方法对深埋地铁车站的火灾安全若干问题开展研究。全书共分为7章,主要介绍了国内外深埋地铁发展现状、多层结构深埋车站建筑及消防设计、地铁火灾烟气运动的基础理论、深埋地铁车站火灾数值分析、深埋地铁车站火灾模型实验、地铁人员疏散动力学特性研究等。

本书可供从事地铁设计、火灾安全的技术人员参考,也可作为高等院校安全工程专业高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

深埋地铁车站火灾实验与数值分析/史聪灵等著. —北京:
科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024926-5

I. 深… II. 史… III. 地下铁道-火灾-实验-数值分
析 IV. U231-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 111900 号

责任编辑: 明晓春 书 沁 / 页任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009年8月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—1500

字数: 344 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

地铁作为现代化的城市轨道交通工具之一,承担着越来越重要的大客流运输任务。从城市化、能源、效率与环境等方面考虑,地铁具有运量大、速度高、低污染、低能耗等特点,符合可持续发展的原则。发展城市轨道交通对缓解交通压力、促进城市经济和社会快速发展都具有重要作用。未来 20 年,我国的地铁建设将处于大规模的发展时期。与此同时,未来部分地铁的发展趋势为埋深逐渐增大,如经过老城区时须穿越大片房屋桩基,地质条件复杂,施工难度大,工程实施上线路和车站均需要较大的埋深。深埋暗挖方案降低了对路面交通、高层建筑的影响,减少了房屋拆迁量,改善了区间施工条件,但同时也对地铁的火灾安全提出了更高的要求。因此,对我国深埋地铁工程的火灾烟气运动、通风排烟、应急疏散等问题进行的深入研究,对于提高我国地铁安全建设与运营水平具有重要的指导意义。

本书利用模型实验和计算模拟技术对深埋地铁工程的火灾安全若干问题进行了研究。主要包括深埋地铁车站火灾烟气运动、通风排烟技术、多层结构深埋地铁车站设计、地铁人员疏散动力学特性等。同时作者针对典型深埋地铁车站,对消防工程设计的新理论、新方法和火灾模型实验及数值模拟技术进行了介绍。

全书共分为 7 章:第 1 章为概论,主要介绍我国地铁发展现状、地铁典型灾害事故、深埋地铁火灾的危害性及挑战。第 2 章系统介绍国内外深埋地铁的发展、地铁深埋车站的结构特点、通风排烟和人员疏散系统设施,为今后我国深埋地铁的工程设计提供参考。第 3 章主要介绍多层结构深埋车站建筑及消防设计成果,包括车站建筑、系统设备、通风排烟和人员疏散通道的新型设计。第 4 章主要介绍地铁火灾研究的相关理论和工程计算方法。第 5 章主要针对第 3 章的设计方案,开展深埋地铁车站火灾的数值研究,包括对烟气运动规律、气流组织形式和通风排烟模式的分析等。第 6 章主要介绍深埋地铁车站火灾模型实验的尺度模拟技术、相似模型律和模型实验结果。第 7 章主要介绍地铁应急疏散的相关理论、疏散模型和地铁人员疏散的策略,以多层结构深埋车站为原型,用数值方法验证了火灾情况下深埋车站内人员疏散的安全性,系统研究了地铁火灾时人员疏散特性和疏散策略。

本书为国家自然科学基金项目(编号:50704027,50674079,50606033)、国家高技术研究发展计划“863”项目(编号:2006AA01Z336)及中国安全生产科学研究院和广州市地下铁道设计研究院联合专题“广州市轨道交通六号线深埋站点火灾安全模型实验与数值模拟研究”等项目研究成果的结晶。其中,国内外深埋地铁调研和深埋车站设计得到了广州市地下铁道设计研究院徐明杰教授、农兴中教授、毛宇丰教授、刘忠诚教授、张建根教授,广州市地下铁道总公司何霖教授、刘应海高级工程师、蔡昌俊高级工程师、冯国冠高级工程师、黄文昕高级工程师、韩瑶高级工程师,广州市消防局常磊高级工程师,广州市地铁公安分局陈阮全高级工程师等的大力支持和帮助,作者在此深表谢意。本书撰写

过程中得到了中国安全生产科学研究院刘铁民研究员、吴宗之研究员、李克荣研究员、陈江研究员、张兴凯教授、邓云峰博士、石杰红工程师,广州市地下铁道设计研究院的姚应征、王静伟、高俊霞、王丹平、翁德耀、涂小华,中国科学技术大学霍然教授、廖光焯教授、张和平教授、陆守香教授、厉培德老师、张林鹤博士,清华大学陈涛博士,中南大学易亮博士,公安部消防局陆强博士等的帮助,在此深表谢意!

本书撰写过程中,引用了大量的文献资料,在此深表感谢。

虽然作者在本书的撰写过程中尽了最大的努力,但由于水平有限,错误和不足之处在所难免,敬请读者和有关专家批评指正。

目 录

前言

第 1 章 概论	(1)
1.1 我国地铁建设现状	(1)
1.2 地铁灾害事故统计	(1)
1.3 地铁火灾的危害性	(4)
1.4 深埋地铁火灾研究热点	(7)
第 2 章 国内外深埋地铁的发展	(8)
2.1 深埋地铁的发展	(8)
2.2 地铁深埋车站的结构特点	(9)
2.3 国内外典型深埋地铁介绍	(11)
2.3.1 莫斯科地铁	(11)
2.3.2 圣彼得堡地铁	(26)
2.3.3 伦敦地铁	(30)
2.3.4 广州地铁(六号线)	(34)
2.3.5 东京地铁	(36)
2.3.6 平壤地铁	(37)
2.4 国内外深埋地铁防灾设施比较	(38)
第 3 章 多层结构深埋车站建筑及消防设计	(39)
3.1 深埋车站标准站设计	(39)
3.2 深埋车站防烟、排烟和事故通风设计	(41)
3.2.1 概述	(41)
3.2.2 系统的组成	(42)
3.2.3 隧道通风排烟系统	(42)
3.2.4 车站公共区通风空调排烟系统(车站大系统)	(44)
3.2.5 车站设备管理用房通风空调排烟系统(车站小系统)	(45)
3.2.6 风机设备型号	(45)
3.3 深埋车站站内紧急疏散设计	(46)
3.4 区间隧道紧急疏散设计	(47)
3.4.1 地下区间隧道疏散设施	(47)
3.4.2 地下区间隧道疏散方案	(47)

3.5	深埋车站站内消防设计	(47)
3.5.1	防火分区、防烟分隔	(47)
3.5.2	消防给水系统、排水系统配置	(48)
第4章	地铁火灾烟气运动理论基础	(49)
4.1	火灾热释放速率	(49)
4.2	烟气产生量	(52)
4.2.1	大面积火源羽流模型	(52)
4.2.2	弱羽流模型	(53)
4.2.3	强羽流模型	(54)
4.2.4	受限羽流模型	(56)
4.2.5	竖直开口溢流	(56)
4.3	顶棚射流	(59)
4.4	通风排烟	(60)
4.4.1	机械排烟	(60)
4.4.2	区间隧道烟气控制流速	(61)
4.5	地铁火灾区域模拟	(62)
第5章	深埋车站火灾烟气蔓延过程数值分析	(68)
5.1	计算流动、燃烧、传热模型	(68)
5.1.1	基本控制方程	(69)
5.1.2	湍流流动模型	(70)
5.1.3	燃烧模型	(71)
5.1.4	辐射传热模型	(72)
5.2	深埋地铁车站模型及通风排烟系统	(72)
5.2.1	车站模型情况	(72)
5.2.2	深埋地铁车站通风排烟系统	(73)
5.3	火灾模拟参数设置	(74)
5.3.1	火源设置	(74)
5.3.2	空间网格解析	(76)
5.3.3	模拟场景设计	(76)
5.3.4	车站三维模型构建	(77)
5.4	深埋车站站台火灾功率为 1.5MW 的计算结果分析	(81)
5.4.1	站台—设备层—站厅层烟气蔓延过程	(81)
5.4.2	站台—疏散楼梯间烟气蔓延过程	(86)
5.4.3	站台安全高度处烟气特征参数变化	(88)
5.5	深埋车站站台火灾功率为 2.5MW 的计算结果分析	(91)
5.5.1	站台—设备层—站厅层烟气蔓延过程	(91)

5.5.2	站台—疏散楼梯间烟气蔓延过程	(95)
5.5.3	站台—隧道烟气蔓延过程	(94)
5.5.4	站台安全高度处烟气特征参数变化	(95)
5.5.5	改变排烟模式的数值模拟分析	(97)
5.6	深埋车站列车火灾功率为 5.5MW 的计算结果分析	(105)
5.6.1	隧道内火灾增长及烟气蔓延过程	(105)
5.6.2	隧道向车站站台的烟气蔓延过程	(108)
5.6.3	站台—站厅烟气蔓延过程	(112)
5.6.4	站台内部及站台向疏散楼梯间烟气蔓延过程	(117)
5.6.5	站台安全高度处的特征参数变化讨论	(117)
5.7	深埋车站列车火灾功率为 7.5MW 的计算结果分析	(122)
5.7.1	站台—设备层—站厅烟气蔓延过程	(123)
5.7.2	站台安全高度处的烟气参数变化	(123)
5.8	排烟方案的验证结论	(128)
第 6 章	深埋地铁车站火灾模型实验	(130)
6.1	模型实验的相似性理论分析	(130)
6.1.1	烟气流动控制方程无量纲化	(130)
6.1.2	地铁火灾实验的相似律	(135)
6.2	实验设计	(138)
6.2.1	实验模型设计	(138)
6.2.2	实验排烟系统设计	(140)
6.2.3	信号测量	(142)
6.2.4	测试方案	(145)
6.3	实验结果分析	(150)
6.3.1	列车火灾功率为 7.5MW 的实验结果与分析	(150)
6.3.2	站台火灾功率为 2.5MW 的实验结果与分析	(155)
第 7 章	地铁车站人员疏散研究	(160)
7.1	人员安全疏散判据	(160)
7.1.1	人员安全疏散的相关规范设计要求	(160)
7.1.2	火灾工程学中对人员安全疏散的要求	(161)
7.2	人员疏散密度、速度和流量之间的关系	(165)
7.3	人员疏散时间的计算公式	(166)
7.3.1	地铁疏散时间计算公式	(166)
7.3.2	多出口和多层建筑疏散时间计算公式	(167)
7.4	人员疏散计算模型	(168)
7.4.1	模型分类	(168)

7.4.2	主要模型介绍	(170)
7.5	地铁车站人员疏散策略研究	(177)
7.5.1	疏散人数	(179)
7.5.2	疏散路径	(179)
7.5.3	疏散安全区	(180)
7.5.4	疏散时间	(180)
7.6	深埋车站标准站疏散模拟分析	(181)
7.6.1	人员荷载计算	(181)
7.6.2	疏散通道与安全区	(181)
7.6.3	人员空间分布	(183)
7.6.4	疏散模拟策略	(183)
7.6.5	人员疏散模拟计算结果及分析	(184)
7.6.6	安全疏散分析与验证	(189)
7.7	火灾时地铁车站疏散特性模拟研究	(189)
7.7.1	车站结构和疏散通道设计	(190)
7.7.2	人员荷载计算	(191)
7.7.3	计算模拟场景	(193)
7.7.4	站台列车火灾人员疏散特性分析	(195)
7.7.5	站台行李火灾人员疏散特性分析	(205)
7.7.6	扶梯处火灾人员疏散特性分析	(206)
7.7.7	站厅火灾人员疏散特性分析	(211)
7.7.8	站台、站厅、扶梯火灾人员疏散对比分析	(217)
7.7.9	应急门疏散特性分析	(222)
参考文献		(230)

第1章 概 论

1.1 我国地铁建设现状

地铁是城市中的现代化交通工具。地铁与城市中的其他交通工具相比,除了能避免城市地面的拥挤和充分利用空间外,还具有运量大、速度快、无污染、准时、方便、舒适等优点,因而发展迅速并日益受到人们的青睐。目前全世界已有 100 多座城市开通了 300 多条地铁线路,总长度超过 6000km。

随着我国经济的高速发展,城市化程度越来越高,城市人口快速增长,城市交通问题成为许多大、中城市非常突出的问题。目前,许多城市的交通问题已经很难单靠地面和高架公路交通来解决。同时,由于地铁运量大、运行安全快捷、乘车环境舒适,必将越来越成为城市人口首选的出行方式;并且,轨道交通对提升城市的综合地位具有重大意义(孙章等,2000)。

目前,我国内地有北京、上海、广州、深圳、天津、大连、南京、重庆、成都、武汉、沈阳、西安、杭州、苏州等城市已经在进行大规模轨道交通的建设,在建线路总长超过 500km。截至 2008 年 8 月 8 日,我国内地城市已经运营的地铁线路总长达 746km,如图 1.1 所示。此外,东莞、佛山、南宁等多座城市也在进行城市轨道交通的规划和设计。据国家发展和改革委员会预测(郭小碚,2005),我国在近期将会出现较多城市轨道交通的建设高潮。2020 年,中国地铁线路总长(包括轻轨)将超过 1000km,总投资超过 6000 亿元;2050 年,包括轻轨线路,地铁线路总长度将达 2000km。

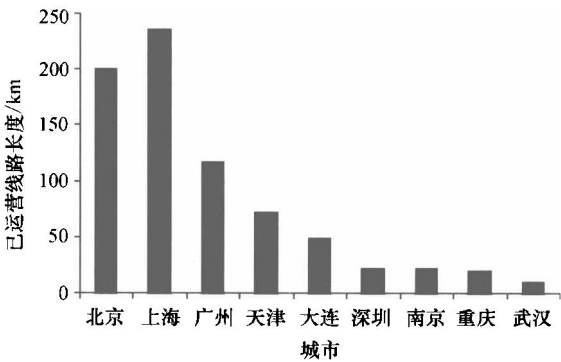


图 1.1 我国内地已开通地铁城市的地铁运营线路长度

1.2 地铁灾害事故统计

地铁主要是解决城市建成区的客流交通问题,线路走向一般沿城市建成区的主干道

敷设,线路沿线房屋密集、高楼林立、商业繁华、人流量大,如果一旦发生安全事故,影响非常大。地铁工程各个阶段可能发生事故的主要因素为:

施工期间:地下工程作业时引起的周边房屋倒塌和地层沉降;地下工程处于复杂地层(如软弱地层、软硬互层、溶洞、断层等)的工程实施风险等(施仲衡、张弥,1997;王梦恕,2004)。

运营期间:火灾事故、大客流的人群踩踏事故、地下工程水淹事故、恐怖袭击时的爆炸及毒气泄漏事故、高架线路列车脱轨事故等。

下面将国内外地铁火灾、水灾、停电、列车出轨或相撞、爆炸、毒物泄露等事故进行分类统计,具体统计结果见表 1.1 所示。

表 1.1 地铁事故分类统计表

事故发生时间	事故发生地点	事故产生原因及后果
1. 火灾事故		
1968 年 1 月	日本东京	日比谷线六本木站—神谷町站附近,列车运行中制动电阻器起火,3 节车厢被烧毁、11 人受伤(含消防人员)
1971 年 12 月	加拿大蒙特利尔	火车与隧道端头相撞引起电路短路,造成座椅起火,36 辆车被毁,司机死亡
1972 年 10 月	德国东柏林	车站和四辆车被毁
1973 年 3 月	法国巴黎	人为纵火,车辆被毁,死亡 2 人
1975 年 7 月	美国波士顿	隧道照明线路被拉断,引发大火
1976 年 5 月	葡萄牙里斯本	火车头牵引失败,引发火灾,毁车 4 辆
1976 年 10 月	加拿大多伦多	人为纵火造成 4 辆车被毁
1977 年 3 月	法国巴黎	天花板坠落引发火灾
1978 年 10 月	德国科隆	丢弃的未熄灭烟头引起火灾,伤 8 人
1979 年 1 月	美国旧金山	电路短路引发大火,死亡 1 人,伤 56 人
1979 年 3 月	法国巴黎	车厢电路短路引发大火,伤 26 人
1979 年 9 月	美国费城	变压器火灾引起爆炸,伤 178 人
1979 年 9 月	美国纽约	烟头引燃油箱,2 辆车燃烧,4 名乘客受伤
1980 年 4 月	德国汉堡	车厢座位着火,2 辆车被毁,伤 4 人
1980 年 6 月	英国伦敦	烟头引发大火,死亡 1 人
1980~1981 年	美国纽约	共发生 8 次火灾,重伤 50 人,死亡 53 人
1981 年 6 月	俄罗斯莫斯科	电路引起火灾,死亡 7 人
1981 年 9 月	德国波恩	操作失误引起火灾,车辆报废,无人员伤亡
1982 年 3 月	美国纽约	传动装置故障引发火灾,伤 86 人
1982 年 6 月	美国纽约	大火燃烧了 6 小时,4 辆车被毁
1982 年 8 月	英国伦敦	电路短路引起火灾,伤 15 人,1 辆车被毁
1983 年 8 月	日本名古屋	变电所内的整流器故障起火,变电所部分烧毁,由于停电导致 2 列车在隧道内停车,死亡 2 人(消防人员),伤 5 人

续表

事故发生时间	事故发生地点	事故产生原因及后果
1983 年 9 月	德国慕尼黑	电路着火,2 辆车被毁,伤 7 人
1984 年 9 月	德国汉堡	列车座位着火,2 辆车被毁,伤 1 人
1984 年 11 月	英国伦敦	车站月台库房起火,18 人受伤
1985 年 4 月	法国巴黎	垃圾引发大火,伤 6 人
1985 年 9 月	日本东京	列车在车站内停车过程中的机车下部轴承破损发热而起火。车厢部分烧毁,没有死伤,2800 人紧急疏散
1987 年 11 月	英国伦敦	售票处大火,死亡 31 人
1991 年 4 月	瑞士苏黎世	地铁机车电线短路,重伤 58 人
1994 年 6 月	中国台北	变电室火灾,3 名消防员受伤
1995 年 10 月	阿塞拜疆巴库	机车电路故障;死 300 多人,伤 200 多人
2003 年 2 月	韩国大邱	人为纵火,导致 198 人死亡,147 人受伤

2. 水灾事故

2001 年 9 月	中国台北	纳莉台风带来的暴雨和洪水,造成 18 座车站淹水,使台北地铁陷于瘫痪
2003 年 7 月	中国上海	施工隧道渗水,隧道部分坍塌。造成一幢 8 层楼房裙房坍塌,附近一段长约 30m 的防汛墙受地面沉降影响沉陷、开裂
2007 年 8 月	美国纽约	暴雨导致地铁运输系统瘫痪

3. 停电事故

1996 年 1 月	中国北京	高压输电线被砸断,造成北京地铁 57 辆列车突然断电被迫停运,堵塞长达 146 分钟
2003 年 8 月	英国伦敦	停电之后,近三分之二的地铁列车停运,大约 25 万人被困在地铁中,许多地铁站被迫暂时关闭
2007 年 10 月	日本东京	东京地铁大江户线突然停电,进而造成全线停止运行,1300 人被困在列车中,10 人因身体不适被送医院治疗

4. 列车出轨、相撞事故

1991 年 5 月	日本滋贺	列车相撞,42 人死亡,527 人受伤
1991 年 8 月	美国纽约	列车出轨,至少 6 人死亡,100 多人受伤
1999 年 8 月	德国科隆	列车相撞,67 人受伤
2000 年 3 月	日本东京	列车出轨,3 人死亡,44 人受伤
2000 年 6 月	美国纽约	列车出轨,89 位乘客受伤
2003 年 1 月	英国伦敦	列车出轨,32 名乘客受伤
2003 年 10 月	英国伦敦	列车出轨,7 人受伤
2005 年 4 月	日本兵库尼崎	列车出轨,107 人死亡,400 多人受伤

续表		
事故发生时间	事故发生地点	事故产生原因及后果
5. 爆炸事故		
1995 年 7 月	法国巴黎	发生炸弹爆炸,8 人死亡,117 人受伤
1996 年 6 月	俄罗斯莫斯科	列车发生爆炸,4 人死亡,7 人受伤
1998 年 1 月	俄罗斯莫斯科	发生地铁爆炸意外,造成 3 人受伤
2001 年 8 月	英国伦敦	发生地铁爆炸意外,造成 6 人受伤
2004 年 2 月	俄罗斯莫斯科	列车发生爆炸,至少 30 人死亡,70 人受伤
6. 毒气泄漏事故		
1995 年 3 月	日本东京	3 条线路的 5 节车厢同时发生被称为“沙林”的神经性毒气泄漏,12 人死亡,5000 多人受伤
2006 年 9 月	韩国首尔	首尔地铁一号线钟阁站,发生毒气泄漏事件,33 人中毒
7. 地震		
1985 年 9 月	墨西哥	1985 年墨西哥地震(8.1 级),在软弱地基上的地铁结构在车站侧墙与地表相交处发生结构分离
1995 年 1 月	日本阪神	1995 年 1 月 17 日在日本阪神地区发生 7.2 级地震。共有 5 个地铁车站和约 3km 的地铁隧道发生破坏
8. 其他		
1999 年 5 月	白俄罗斯明斯克	地铁车站人数过多意外,54 人被踩死

对表 1.1 所统计的部分重大地铁事故,根据事故类型可绘制出地铁事故分布图(图 1.2)。从中可以看出火灾事故是威胁地铁安全的主要因素,火灾事故约占地铁事故总数的 57%。

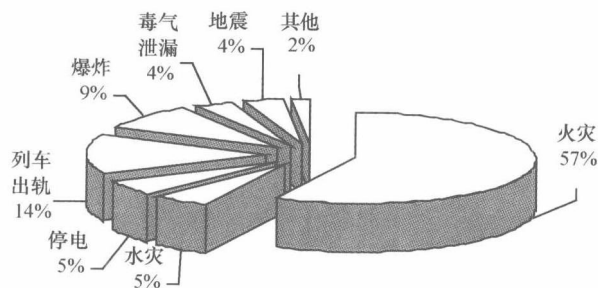


图 1.2 城市轨道交通事故分布图

1.3 地铁火灾的危害性

从地铁事故统计数据可见,无论发生哪种灾害事故,事故后果和影响都非常巨大。

地铁作为现代化的城市轨道交通工具之一,承担着越来越重要的大客流运输任务。地铁车站及地铁列车成为人流密集的公众聚集场所,是一座现代化城市的中枢,一旦发生突发事件,其社会影响力、政治影响力和国际影响力都十分巨大。

在地铁事故灾害中,危害最大的主要是地铁站台和地铁隧道内燃烧、烟气和毒害物质的扩散造成的人员伤亡。地铁火灾与地面或其他地下建筑火灾相比有其特殊性:地铁系统与外界的联系主要为出入口,人员密集、排除热量及烟气困难,因此与地面建筑火灾相比具有更大的危险性,主要表现在:

①地铁车站客流量大,人员集中,一旦发生火灾,容易造成群死群伤事故。地铁是大运量的城市交通工具,在运营时间内,地铁列车、站台、站厅聚集着大量的人员,特别是在早晚高峰时,其线路断面客流、进出站客流、换乘客流基本都处于最大客流量状态。同时,随着地铁运行年限的增加,客流量也不断增大,按照某地铁公司的实测数据,早高峰客流时部分车站节点的列车运载量可达到列车额定运载量的130%左右,已经达到并超过了当初地铁设计时的预测远期客流量。这样,一些按照预测客流设计的疏散通道数量和疏散能力在火灾时便无法满足实际客流疏散的要求,不能在可用的安全时间内及时的疏散乘客。同时,地铁作为火灾时需要纵向疏散的地下空间,随着地铁深埋程度不断增加,疏散难度也不断的加大,一些城市的地铁如莫斯科、平壤地铁地下埋深达到100~200m,东京地铁六本木站深入地下42m,地下共7层,有200多个台阶,这些给疏散造成了很大的困难。

②地铁列车本身有相应的电器设备,虽然车辆制造材料主要为不燃,但仍有少部分阻燃材料,火灾时还会产生一定的毒性气体。地铁机车底部及隧道内都具有大量的电力和通讯电缆,即使采用阻燃进行处理,在高温火焰的烘烤下仍然会燃烧释放出毒气。国内外有些地铁车站内还设有一些商用设施,内部堆积大量的可燃货物。同时,乘客携带有一定的可燃物(大多是固体可燃物),火灾时也会燃烧,加上地下供氧不足,燃烧不充分,烟雾较浓,发烟量也较大。

③地下车站与外界连通的通道、风道较少,通风主要靠与地面连接的风亭和风井。早期的有些地铁车站还不具备强制排烟系统,主要靠自然通风,烟气和热量较难向外界排放。地下空间火灾时如果不及时排除烟气,容易造成人员窒息。同时热量聚集导致空间温度上升很快,不仅会对人员造成一定的伤害,燃烧时间过长还会对设备和建筑结构造成破坏。由于地下空间的通风排烟困难,大量有毒烟雾和能见度低给疏散和救援工作造成障碍。火灾发生时,人员的逃生方向和烟气的扩散方向均由下往上,如果烟气排除控制不好,人员的出入口有可能就是喷烟口。因此地铁火灾中烟气的控制是地铁火灾中一个非常重要的问题。

2003年2月18日,韩国大邱地铁发生特大火灾事故,共造成198人死亡,147人受伤。火灾发生的原因人为纵火,当时1079号列车刚刚驶入中央路车站,一名乘客从黑色的手提包里取出燃料罐,向车厢泼洒汽油并点燃,首先是纵火位置的3号车厢起火,很快火势便蔓延到整个列车的6节车厢,其后驶入车站的1080号列车亦被波及而起火,大火3小时后才被扑灭。该次火灾中人员逃生至安全区域只需要2~3分钟,如果早一点逃离起火空间,很多人都会不会丧失自己的生命,造成如此惨痛的后果,其主要原因为:

①由于地铁运营公司方面调度错误,在第一辆列车起火后又允许另一辆列车进入中央路车站。因为供电中断,对面隧道驶入的列车进站后无法驶离已起火站台。统计显示,92%的死亡乘客是第二辆驶入车站的1080号列车上的乘客。

②大邱地铁列车内使用的装饰材料和座椅并不防火,玻璃纤维和硬化塑料在遇到火焰和高温后起褶,产生大量有毒烟雾。并且,该车站的通风空调系统只能保证平时的空气流通,火灾时排烟能力不够,不能及时排出浓烟和有毒气体,事故发生后3~4小时,救援人员一直都无法接近现场,导致大量乘客中毒死亡。

③疏散引导系统不能正常工作,当烟气蔓延的时候,紧急照明灯和出口引导灯均没有点亮,应急照明和导向装置的故障让乘客找不到出口,致使许多乘客在逃生途中窒息死亡。

④车站自动灭火能力不足,站台上无应对火灾的喷水消防装置,水喷系统只设在地下两层的站区内。同时地铁车厢内为了防止触电未安装自动报警设备和自动淋水灭火装置。

1995年10月28日,阿塞拜疆地铁发生火灾。这场火灾造成300多人死亡,200多人严重受伤。起火原因为车厢尾部电气设备发生故障,保险丝熔断,导致列车三、四节车厢交接处起火。由于司机缺乏经验,把车停在了隧道里,给乘客逃生和救援工作带来不利。火灾发生后,火灾产生的浓烟通过天花板上的通风设备被吸入车厢内。由于缺乏标志和信息,拥挤的车厢中乘客抵住了两个紧急出口,为了逃生人们将窗户击碎,但此举使烟进一步向车厢内蔓延。车厢内天花板及火车下的电缆由于烟气不断聚集,温度升高而加剧燃烧。从事故车厢向安全车厢撤离时,大量的乘客拥挤并发生踩踏事故。由于阿塞拜疆地铁的列车为20世纪60年代生产的,车辆使用的大部分材料都是易燃物,燃烧产生大量的有毒气体,导致了人员的大量伤亡。

综上所述,造成地铁的火灾的原因可主要归纳为设备因素、人为因素和环境因素(刘铁民等,2005):

(1) 设备因素

地铁火灾多由设备因素引发,其中包括电气设备因素、客车设备因素、地铁辅助设备因素。

电能是地铁的主要动力源,在地下各车站和行车隧道中均设有变电站、供配电控制设备、各种电缆及通风、照明、调度指挥等电气设备。电气设备种类多,数量大,在运行中发生短路拉弧、过负荷、过热等故障是造成地铁电气设备火灾的重要原因。

客车设备引发的火灾,主要集中于客车“受电弓”的支架固定螺栓无绝缘保护,行车中兜挂线路上的导体,造成“受电弓”短路拉弧,引发火灾;以及客车蓄电池受启动电阻高温影响,发生壳体破碎,电解液外溢造成蓄电池短路起火。

地铁辅助设备火灾主要是指在地铁工作人员值班室、生活用房、设备间、宿舍、仓库等地,由于电气线路短路,电热器、电炉等用电器具发生故障而引发的火灾事故。

(2) 人为因素

地铁建造时对工作人员生产生活设施考虑较少。随着时代发展,由于工作人员及乘客对地铁的环境的更高要求,地铁内部使用了大量的除湿器、电热器等电器。有些工作

人员违反安全用电制度,乱拉电线,擅自安装大功率设备,引发了大量火灾。此外,由于旅客在地铁里吸烟、乘车时携带易燃易爆物品引发的火灾也时有发生。

(3) 环境因素

主要包括地铁内部潮湿、高温、粉尘大、鼠害等因素。由于地铁内部通风不畅,洞体散热不良等原因,地铁内部温度逐步升高;工程结构出现多处漏水,地下湿气不易排出,地下相对湿度达85%;地铁内部老鼠等小动物啃咬电缆电线。上述原因都造成电气设备、线路绝缘性能下降,极易造成短路引起火灾。

1.4 深埋地铁火灾研究热点

通过对国内外地铁的调研可见,很多的地铁车站采用深埋方式敷设,有的是出于备战考虑(如莫斯科地铁),有的是由于施工条件复杂,为了减少对周围建筑的影响(如广州市地铁六号线)。

深埋暗挖方案减少了对路面交通、高层建筑的影响,减少了房屋拆迁量,改善区间施工条件,但同时也对地铁站点的通风、排烟设计的安全性提出了更高的要求。地下站台的防排烟系统设计一方面应保证起火站的烟气有效排放,另一方面起着保证不同站层连接开口处形成一定流速、控制烟气流向的作用。我国现行的《地铁设计规范》(GB50157-2003)规定的排烟量按照建筑面积 $\times \frac{1\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}^2}$ 设计,排烟设备按同时排除2个防烟分区配置,同时火灾时楼梯口需形成1.5m/s的向下风速。对于深埋站点,特别是采用多层结构的深埋车站,由于其结构的特殊性,带来较多的问题,例如:

① 由于站点较深,或车站层数多,风压损失较大,楼梯开口处是否可以形成一定的向下流速,阻止烟气向上方站层蔓延;

② 疏散距离大,人员安全疏散时间较长,是否可以保证人员在烟气达到危险时刻之前疏散到安全区;

③ 较深的竖直井道如疏散楼梯间在火灾时容易形成烟囱效应,加大对烟气的抽吸,如何确保深埋站点疏散楼梯间的正压性和无烟气进入。

因此,需要我们用科学的方法对深埋地铁火灾的安全问题加以研究、分析和验证。国内外针对深埋地铁火灾的研究主要包括以下领域:

① 烟气蔓延规律研究:深埋地铁车站、隧道内发生火灾时烟气的纵向和横向的蔓延规律,如烟气的温度、可见度、有毒气体浓度、压力及流场的时空演化规律。

② 烟气控制模式研究:列车在车站隧道、区间隧道及站台公共区火灾时深埋车站的烟气控制模式,如区间隧道通风系统、车站隧道通风系统、车站通风空调大系统及屏蔽门系统的运行模式;车站通风排烟设备的优化配置,以便满足火灾时的排烟要求。

③ 人员疏散规律研究:深埋地铁车站区间火灾时的人员疏散的策略、疏散行为特性、疏散时间及疏散准则研究。例如火灾情况下自动扶梯、楼梯、闸机口等疏散通道的运行原则;车站一端的疏散步行楼梯是否需要加压送风或排烟;车站客流疏散竖井内控制烟气并满足人员疏散条件所需要的空气流速。

第2章 国内外深埋地铁的发展

随着地铁建设的发展,不少城区的地下浅层空间已基本开发或受地面建筑物的限制难于继续开发,部分地铁线路的埋深将日益增大,经过老城区时须穿越高层建筑桩基,地质条件复杂,施工难度大,工程实施上线路和车站均需要较大的埋深。同时,早期地铁建造时出于备战考虑(如莫斯科地铁),深埋比浅埋更利于战时防备。因此,国内外有很多地铁站采用深埋方式敷设。本章对国内外已经投入运营的相关深埋地铁线路进行了调查,并分别介绍其深埋地铁的发展和防灾设备设施的特点。

2.1 深埋地铁的发展

从1863年伦敦修建世界第一条地铁以来,世界各国地铁的建设也随着工程技术的发展和城市密集化程度的提高而不断变化。地铁按照埋置深度不同可分为浅埋地铁、深埋地铁、地面地铁和高架地铁4种。在地铁线路选址时,沿线工程地质和水文地质条件以及沿线建筑及环境情况决定着地铁的建设方案。综合各种因素,在国内外的地铁建设中,采用深埋敷设方案的原因主要表现在3个方面:

① 随着城市的发展,在城市中心区,城市地下浅层空间已经得到充分的利用,再加上地价的高涨、城市地下管道的复杂化和线路的交叉,地铁不得不向地下深层空间继续开发,这也是深埋地铁的由来。例如日本东京地铁,从1959年开始至2000年,地下铁道埋置的深度便不断向深部推移(杨其新、关宝树,2007),如图2.1所示。2000年建设的都

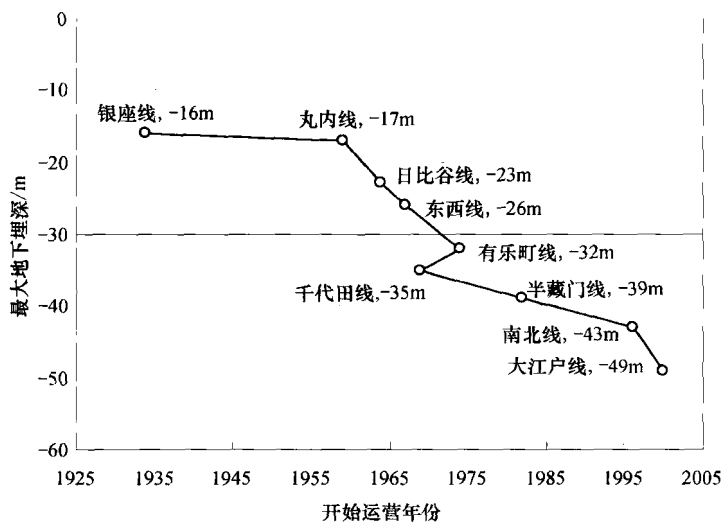


图 2.1 东京地铁埋置深度的发展状况