



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间防火与安全

朱合华 闫治国 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION
国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间防火与安全

朱合华 闫治国 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目

图书在版编目(CIP)数据

城市地下空间防火与安全/朱合华, 闫治国著. —上海: 同济大学出版社, 2014. 12

(城市地下空间出版工程·防灾与安全系列)

ISBN 978-7-5608-5702-2

I. ①城… II. ①朱…②闫… III. ①城市空间—地下建筑物—防火—研究 IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 278057 号

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间防火与安全

朱合华 闫治国 著

策 划: 杨宁霞 季 慧

责任编辑: 季 慧

责任校对: 徐春莲

封面设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址: 上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

制 作 南京前锦排版服务有限公司

印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.25

字 数 380000

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5702-2

定 价 98.00 元



版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内容提要

本书为国家“十二五”重点图书出版规划项目、国家出版基金资助项目、上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目。

本书围绕人们目前日益关注的城市地下空间防火与安全问题,较为系统地阐述了隧道火灾特性、隧道火灾应急通风与排烟、城市地下空间火灾报警与消防以及城市地下空间火灾疏散与救援等问题。全书内容丰富,反映了当前国内外城市地下空间防火安全方面的新成果与新趋势,有助于人们加深对地下空间火灾的认识,推动学科研究的深化发展和新成果的工程应用。

本书可供从事隧道及地下空间防火研究、设计、施工、运营的技术及管理人员学习参考,也可供高等院校相关专业的教师和学生使用。

《城市地下空间出版工程·防灾与安全系列》编委会

学术顾问

叶可明 中国工程院院士
孙 钧 中国科学院院士
郑颖人 中国工程院院士
顾金才 中国工程院院士
蔡美峰 中国工程院院士

主任

钱七虎

副主任

朱合华 黄宏伟

编委(以姓氏笔画为序)

王怀忠	王明洋	叶永峰	闫治国	刘曙光	宋春明
陈 峰	陈之毅	胡群芳	钟桂辉	袁 勇	顾雷雨
赫 磊	蔡 浩	戴慎志			

作者简介

朱合华 工学博士,同济大学特聘教授、隧道及地下建筑工程学科负责人,教育部土木信息技术工程研究中心主任,教育部长江学者特聘教授和长江学者创新团队计划带头人,国家 973 项目首席科学家,美国弗吉尼亚理工大学访问教授,国际岩土工程联盟数据标准化委员会、国际城市地下空间联合研究中心成员,英国剑桥大学智慧基础设施中心和日本大阪地域地层环境研究所国际学术顾问,中国岩石力学与工程学会副理事长,中国土木工程学会隧道及地下工程分会副理事长,中国公路学会隧道分会副理事长,上海市土木工程学会岩土力学与工程专业委员会主任, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 执行主编、《岩石力学与工程学报》和《现代隧道技术》副主编、《岩土工程学报》常务编委。曾入选上海市第六届教学名师,获科技部“十一五”国家科技计划执行突出贡献奖、中国科协“全国优秀科技工作者”称号和上海市“科技精英”提名奖。

长期从事隧道及地下建筑工程领域的教学与科研工作,主要研究方向涉及岩体破坏力学与模拟、隧道及地下结构全寿命设计理论、地下空间与工程数字化技术及防火安全。出版学术著作 7 部;在国内外核心学术期刊发表论文 300 余篇,其中 SCI 收录 60 余篇、EI 收录 200 余篇;主编国家和行业规范 1 部、参编 2 部;获得国家发明专利授权 20 余项;主持研发的同济曙光系列软件被中国《公路隧道设计规范》所推荐。获国家科技进步奖二等奖 1 项、省部级一等奖 7 项,并获国际计算和实验工程与科学年会(2013)国际学术贡献奖(THH Pian Medal)。

闫治国 工学博士,同济大学土木工程学院副教授、硕士生导师,美国加州大学洛杉矶分校访问学者,国际土力学及岩土工程协会(ISSMFE)、国际岩石力学与工程学会(ISRM)及国际地下空间联合研究中心(ACUUS)会员,中国岩石力学与工程学会地下工程分会理事,中国土木工程学会隧道及地下工程分会地下空间专业委员会秘书长、隧道及地下空间运营安全与节能环保专业委员会副秘书长。主要从事隧道及地下工程防灾与结构材料自修复研究工作,主持和参与国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)、“十一五”国家科技支撑计划、西部交通建设科技项目、上海市科技攻关计划等项目 20 余项。获得国家科技进步奖二等奖 1 项、教育部科技进步奖一等奖 1 项、上海市科技进步奖三等奖 1 项、中国公路学会科技进步奖二等奖 1 项,获得全国优秀博士学位论文提名奖 1 项。主编和参编教材、著作等 7 部;发表论文 50 余篇,其中 SCI/EI 收录 27 篇;获得国家发明专利授权 10 项、实用新型专利 2 项、软件著作权 2 项,申请受理发明专利 6 项。

■ 总 序 ■

国际隧道与地下空间协会指出,21 世纪是人类走向地下空间的世纪。科学技术的飞速发展,城市居住人口迅猛增长,随之而来的城市中心可利用土地资源有限、能源紧缺、环境污染、交通拥堵等诸多影响城市可持续发展的问题,都使我国城市未来的发展趋向于对城市地下空间的开发利用。地下空间的开发利用是城市发展到一定阶段的产物,国外开发地下空间起步较早,自 1863 年伦敦地铁开通到现在已有 150 年。中国的城市地下空间开发利用源于 20 世纪 50 年代的人防工程,目前已步入快速发展阶段。当前,我国正处在城市化发展时期,城市的加速发展迫使人们对城市地下空间的开发利用步伐加快。无疑 21 世纪将是我国城市向纵深方向发展的时代,今后 20 年乃至更长的时间,将是中国城市地下空间开发建设和利用的高峰期。

地下空间是城市十分巨大而丰富的空间资源。它包含土地多重化利用的城市各种地下商业、停车库、地下仓储物流及人防工程,包含能大力缓解城市交通拥挤和减少环境污染的城市地下轨道交通和城市地下快速路隧道,包含作为城市生命线的各类管线和市政隧道,如城市防洪的地下水道、供水及电缆隧道等地下建筑空间。可以看到,城市地下空间的开发利用对城市紧缺土地的多重利用、有效改善地面交通、节约能源及改善环境污染起着重要作用。通过对地下空间的开发利用,人类能够享受到更多的蓝天白云、清新的空气和明媚的阳光,逐渐达到人与自然的和谐。

尽管地下空间具有恒温性、恒湿性、隐蔽性、隔热性等特点,但相对于地上空间,地下空间的开发和利用一般周期比较长、建设成本比较高、建成后其改造或改建的可能性比较小,因此对地下空间的开发利用在多方论证、谨慎决策的同时,必须要有完整的技术理论体系给予支持。同时,由于地下空间是修建在土体或岩石中的地下构筑物,具有隐蔽性特点,与地面联络通道有限,且其周围临近很多具有敏感性的各类建(构)筑物(如地铁、房屋、道路、管线等)。这些特点使得地下空间在开发和利用中,在缺乏充分的地质勘察、不当的设计和施工条件下,所引起的重大灾害事故时有发生。近年来,国内外在地下空间建设中的灾害事故(2004 年新加坡地铁施工事故、2009 年德国科隆地铁塌方、2003 年上海地铁 4 号线事故、2008 年杭州地铁建设事故等),以及运营中的火灾(2003 年韩国大邱地铁火灾、2006 年美国芝加哥地铁事故等)、断电(2011 年上海地铁 10 号线追尾事故等)等造成的影响至今仍给社会带来极大的负面

效应。因此,在开发利用地下空间的过程中需要有深入的专业理论和技术方法来指导。在我国城市地下空间开发建设步入“快车道”的背景下,目前市场上的书籍还远远不能满足现阶段这方面的迫切需要,系统的、具有引领性的技术类丛书更感匮乏。

目前,城市地下空间开发亟待建立科学的风险控制体系和有针对性的监管办法,《城市地下空间出版工程》这套丛书着眼于国家未来的发展方向,按照城市地下空间资源安全开发利用与维护管理的全过程进行规划,借鉴国际、国内城市地下空间开发的研究成果并结合实际案例,以城市地下交通、地下市政公用、地下公共服务、地下防空防灾、地下仓储物流、地下工业生产、地下能源环保、地下文物保护等设施为对象,分别从地下空间开发利用的管理法规与投融资、资源评估与开发利用规划、城市地下空间设计、城市地下空间施工和城市地下空间的安全防灾与运营管理等多个方面进行组织策划,这些内容分而有深度、合而成系统,涵盖了目前地下空间开发利用的全套知识体系,其中不乏反映发达国家在这一领域的科研及工程应用成果,涉及国家相关法律法规的解读,设计施工理论和方法,灾害风险评估与预警以及智能化、综合信息等,以期成为对我国未来开发利用地下空间较为完整的理论指导体系。综上所述,丛书具有学术上、技术上的前瞻性和重大的工程实践意义。

本套丛书被列为“十二五”时期国家重点图书出版规划项目。丛书的理论研究成果来自国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、“十一五”国家科技支撑计划、“十二五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、上海市科委科技攻关项目、上海市科委科技创新行动计划等科研项目。同时,丛书的出版得到了国家出版基金的支持。

由于地下空间开发利用在我国的许多城市已经开始,而开发建设中的新情况、新问题也在不断出现,本丛书难以在有限时间内涵盖所有新情况与新问题,书中疏漏、不当之处难免,恳请广大读者不吝指正。

刘七虎

2014年6月

■ 前 言 ■

由于地下空间环境的封闭性和逃生救援的困难性,一旦发生火灾,将会造成严重的伤亡和巨大的社会影响与经济损失。频繁发生的地下空间火灾事故,使人们对地下空间的防火安全越来越关注,并对地下空间的使用存在一定的恐惧心理。因此,在“城市向地下走”成为一种必然趋势的大背景下,如何探索地下空间的火灾规律,如何采用新理念、新方法和新技术,以确保地下空间的高安全性,避免地下空间的火灾灾害影响,消除火灾对人们造成的负面心理效应,成为目前地下空间设计、施工及运营管理等部门迫切需要解决的问题。

本书系统地介绍了作者近年来在地下空间的火灾特性、应急通风与排烟、火灾报警消防及疏散救援等方面的研究成果。该书的出版将有助于加深人们对地下空间防火重要性的认识,推动学科研究的继续深入,同时也有助于火灾安全领域的新方法和新技术推广应用到工程实践中,提升工程的运营安全与防火技术水平。

本书主要包括五个方面:

(1) 第1章绪论,通过分析国内外道路隧道、地铁及地下街火灾案例,总结了其发生火灾的原因及特点;同时,介绍了国内外地下空间防火与安全的研究现状与发展趋势。

(2) 第2章隧道火灾特性,分析了火灾发生时隧道内温度烟气场的特征及变化规律。同时,介绍了大断面道路隧道及高海拔道路隧道火灾的特性。

(3) 第3章隧道火灾的应急通风与排烟,以重点排烟为例,探讨了隧道火灾重点排烟模式与控制策略及各关键参数对通风排烟性能的影响。

(4) 第4章地下空间火灾的监控与预警,阐述了地下空间火灾探测预警技术原理、火灾监控预警系统设置及工程应用。

(5) 第5章地下空间火灾的疏散救援,介绍了地下空间火灾疏散的基本原理、典型地下工程火灾疏散仿真分析、隧道动态反馈式火灾疏散救援技术及应急疏散逃生通道技术。

本书涉及的研究成果是在“十一五”国家科技支撑计划课题(编号:2006BAJ27B04、2006BAJ27B05)、国家高技术研究发展计划(863计划,编号:2006AA11Z118)、上海市科技攻关(重点支撑)项目(编号:04dz12010、11231201200、13231200600)、交通运输部建设科技项目(编号:2011318499740、2013318J02120)等资助下完成的。在项目的实施过程中得到了国家科技部、上海市城乡建设和管理委员会、上海市路政局、上海市城市建设设计研究总院、上海市

政工程设计研究总院(集团)有限公司、上海隧道工程股份有限公司等单位的大力支持和帮助,限于篇幅,不一一列出,在此谨表示衷心的感谢。

防灾课题组(按入学先后顺序)的曾令军、强健、姚坚、刘滔、尹玫、方银钢、常岐、梁利、沈奕、唐正伟、陈正发、陈庆、郭清超、王安民、徐婕、周帅、杨成、于鹏、赵黎、董泽宁、李浩然、田野及张耀等各位研究生为本书研究成果的取得付出了辛勤的努力;在本书编写过程中,上海市城市建设设计研究总院为本书提供了丰富的工程案例资料;研究生郭清超为本书编排做了大量的工作,在此一并深表谢意。

感谢同济大学出版社对本书的出版发行所做的努力和付出,尤其是杨宁霞和季慧两位女士,衷心地感谢她们的不懈努力。

由于地下空间火灾问题十分复杂,作者对之认识水平有限,且研究工作尚处于一定的阶段,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

2014年8月于同济园

■ 目 录 ■

总序 前言

1	绪论	1
1.1	概述	2
1.2	地下空间火灾事故案例	2
1.2.1	道路隧道火灾	2
1.2.2	地铁火灾	7
1.2.3	地下街火灾	9
1.3	地下空间火灾原因及特点	10
1.3.1	道路隧道火灾	10
1.3.2	地铁火灾	12
1.3.3	地下街火灾	13
1.4	地下空间防火与安全现状及发展趋势	14
1.4.1	国内外相关的研究组织及机构	14
1.4.2	国内外开展的隧道及地下空间防火安全研究工作	15
1.4.3	相关规范、标准、导则	20
2	隧道火灾特性	23
2.1	火灾时隧道温度烟气场特征及变化规律	24
2.1.1	概述	24
2.1.2	火灾升温速率	25
2.1.3	火灾中达到的最高温度	28
2.1.4	火灾持续时间	32
2.1.5	降温阶段的温度变化	33

2.1.6	温度横向分布	33
2.1.7	温度纵向分布	36
2.1.8	影响因素分析	37
2.2	大断面道路隧道火灾特性	41
2.2.1	试验概况	41
2.2.2	试验结果及分析	44
2.3	高海拔道路隧道火灾特性	51
2.3.1	试验隧道概况	51
2.3.2	试验火灾规模及工况设置	52
2.3.3	试验量测项目及测点布置	54
2.3.4	高海拔道路隧道火灾燃烧特性	56
2.3.5	高海拔道路隧道火灾温度场特性	58
2.3.6	高海拔道路隧道火灾火焰高度变化规律	61
2.3.7	高海拔道路隧道火灾烟气逆流特性	62
3	隧道火灾的应急通风与排烟	65
3.1	概述	66
3.2	隧道火灾排烟研究现状	66
3.2.1	长大道路隧道火灾排烟模式	66
3.2.2	国内外研究现状	68
3.3	隧道火灾 CFD 数值模拟研究方法	75
3.3.1	几何尺寸与边界条件	76
3.3.2	网格划分	77
3.3.3	火灾场景设置	78
3.3.4	重点排烟评价指标	80
3.4	重点排烟长大道路隧道火灾排烟策略	83
3.4.1	开启火源一侧排烟口时火灾特性分析	85
3.4.2	对称开启火源两侧排烟口时火灾特性分析	89
3.4.3	非对称开启火源两侧排烟口时火灾特性分析	94
3.4.4	排烟口间距对纵断面火灾特性的影响	100
3.5	重点排烟模式长大道路隧道火灾烟气流动特性影响因素	110
3.5.1	排烟口形状对重点排烟火灾特性的影响	113
3.5.2	火源位置对重点排烟火灾特性的影响	120
3.5.3	排烟速率对重点排烟火灾特性的影响	125

4	地下空间火灾的报警与消防	133
4.1	概述	134
4.2	地下空间火灾探测报警方法	134
4.2.1	火灾探测报警原理	134
4.2.2	典型火灾探测器	135
4.3	道路隧道火灾的自动报警	138
4.3.1	道路隧道火灾自动报警系统	138
4.3.2	典型城市道路隧道火灾报警系统设计	140
4.4	地铁火灾的自动报警	144
4.4.1	地铁火灾自动报警系统	144
4.4.2	典型地铁工程火灾报警系统设计	145
4.5	道路隧道火灾的消防与灭火	151
4.5.1	概述	151
4.5.2	道路隧道消防灭火系统	153
4.6	道路隧道火灾报警与消防系统运行现状及改善对策	154
4.6.1	道路隧道火灾自动报警系统运行现状	154
4.6.2	道路隧道水消防系统运行现状	155
4.6.3	城市道路隧道火灾报警与消防系统的改善对策	156
5	地下空间火灾的疏散与救援	159
5.1	道路隧道火灾的疏散救援模式	160
5.2	隧道火灾动态预警及疏散救援技术	163
5.2.1	概述	163
5.2.2	基本原理及系统框架	164
5.2.3	火灾实时温度场	166
5.2.4	火灾烟气扩散范围	167
5.2.5	火灾热释放率	172
5.2.6	火源点位置	177
5.2.7	工程应用	181
5.3	地铁应急疏散逃生通道技术	184
5.3.1	概述	184
5.3.2	地铁应急疏散逃生通道技术原理	186
5.3.3	地铁应急疏散逃生通道疏散仿真分析	189
5.4	地下空间火灾疏散分析的基本原理	192
5.4.1	概述	192

5.4.2	人员疏散的计算方法	193
5.4.3	外界环境对人员疏散的影响	193
5.5	典型地下工程火灾疏散仿真分析	194
5.5.1	长大越江道路隧道火灾疏散仿真分析	194
5.5.2	地铁枢纽站火灾疏散仿真分析	205
5.5.3	双层越江隧道烟气流动规律与疏散逃生救援策略	214
参考文献		222
索引		230



1 绪 论

1.1 概述

地下空间是城市十分巨大而丰富的空间资源。自 20 世纪 80 年代后期,国际隧道与地下空间协会(原国际隧道协会)(International Tunnelling and Underground Space Association, ITA)提出“大力发展地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议以来,地下空间开发利用作为解决城市人口、环境、资源三大难题的重大举措,在世界各国得到了积极的响应。

进入 21 世纪后,我国面临大规模开发利用地下空间资源、加速推进城市现代化进程的历史机遇,城市地下空间的数量、类型、规模都快速增长。以上海市为例,2006—2011 年间地下空间开发量增加了 3.6 倍。同时,到 2015 年,全国 25 个城市 87 条轨道交通线路将投入运营,总投资达 1 万亿元。

但当火灾发生时,由于地下空间环境的封闭性,排烟与散热条件差,会很快产生并积聚高温、高浓度的有毒烟雾,导致人员疏散、救援困难,并会使结构及内部设施产生严重损毁,造成严重的人员伤亡和巨大的社会负面影响。以道路隧道为例,火灾不但会导致整条线路交通的瘫痪,极大地影响人们正常的生产和生活,导致社会经济的损失,也会带来严重的社会负面影响,降低公众对隧道安全性的信任度。此外,火灾后的损伤评估、修复加固以及正常使用功能的恢复都会耗费相当数量的人力、物力和财力。因此,在城市地下空间大规模开发利用的背景下,探讨其防火与安全问题是非常必要的。

1.2 地下空间火灾事故案例

1.2.1 道路隧道火灾

城市道路隧道作为立体交通方式之一,不仅可以缓解城市交通压力,解决交通干线跨江越海受到的限制,而且可以缩短线路里程,降低对周围环境的影响。但是,在道路隧道给人们生产、生活带来便利的同时,作为主要灾害的火灾也频繁发生,并造成了巨大的社会负面影响和经济损失。表 1-1 列出了国内外发生的部分道路隧道火灾事故案例。

表 1-1 道路隧道火灾事故案例

序号	隧道名称	长度/m	火灾时间	火灾原因及概况	火灾持续时间/h	人员伤亡、结构和设备损坏情况
1	纽约 Holland 隧道	2 550	1949 年	运送二硫化碳的重型卡车爆炸起火	4	10 辆卡车、13 辆小汽车烧毁;衬砌严重损伤超过 200 m;1 500 m 长的顶板塌落;电气设备遭到重大损坏
2	日本铃鹿公路隧道	246	1967 年	载有聚乙烯制成的容器的载重卡车发动机起火	—	2 人受伤;13 辆卡车烧毁

续表

序号	隧道名称	长度/m	火灾时间	火灾原因及概况	火灾持续时间/h	人员伤亡、结构和设备损坏情况
3	日本关门水下隧道	—	1967 年	载重卡车起火,火灾蔓延到其他车辆	—	1 辆大卡车被烧毁,2 辆普通卡车部分烧毁
4	德国 Moorfleet 隧道	243	1969 年	载有聚乙烯的卡车刹车时后轮胎起火,火焰蔓延到货物上引起火灾	1.5	1 辆卡车及拖车损坏;拱顶、边墙造成了严重损伤,严重损坏范围达 34 m
5	日本关门水下隧道	246	1971 年	1 辆大卡车撞击 1 辆小卡车,油箱起火	—	1 辆卡车烧毁
6	美国 Chesapeake Bay 隧道	—	1974 年	冷藏车爆胎侧翻后起火	—	卡车损坏;隧道拱顶损伤
7	日本都夫良野水下隧道	—	1977 年	卡车所载的木料过热起火	—	1 辆卡车烧毁
8	荷兰 Velsen 隧道	770	1978 年	4 辆卡车(无危险物品)、2 辆小汽车追尾起火	1.3	2 辆卡车、4 辆小汽车烧毁;衬砌严重损伤超过 30 m
9	美国 Baltimore Harbor 隧道	—	1978 年	卡车与油罐车追尾,卡车起火后蔓延到油罐车(包括危险品)	—	消防部门及时扑灭了火灾,隧道没有损伤
10	日本惠那山水下隧道	—	—	卡车的作业灯漏电起火	—	烧毁数辆货车
11	日本 Nihonzaka 隧道	2 045	1979 年	4 辆卡车、2 辆轿车相撞起火,火灾蔓延到隧道中的其他车辆(超过半数为货车,含有危险物品)	159	127 辆卡车、46 辆小汽车烧毁;衬砌严重损伤超过 1 100 m
12	日本 Kajiwarra 隧道	740	1980 年	1 辆运送涂料(含有危险物品)的卡车碰撞隧道侧壁,侧翻起火	—	1 辆 4 t 载重卡车、1 辆 10 t 载重卡车烧毁;衬砌严重损伤超过 280 m
13	日本福井县敦贺公路隧道	735	1981 年	1 辆大卡车油箱起火,火灾蔓延到对面开来的另一辆卡车上	1.6	1 辆卡车全部烧毁;另一辆卡车部分烧毁;火区附近 155 m 长范围内设备全部毁坏
14	美国 Wallace 隧道	—	—	1 辆卡车发动机起火引发火灾;通风系统失效,隧道内充满了烟雾,无法接近火源进行灭火	—	1 辆卡车完全烧毁