



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FUND PROJECT

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

地下空间防爆与反恐

王明洋 宋春明 蔡浩 编著



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

地下空间防爆与防恐

王明洋 宋春明 蔡 浩 编著



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

地下空间防爆与反恐/王明洋,宋春明,蔡浩编著. —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 978-7-5608-5662-9

I. ①地… II. ①王…②宋…③蔡… III. ①地下建筑物—防爆②地下建筑物—反恐怖活动 IV. ①TU92 ②D815.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 239527 号

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

地下空间防爆与反恐

王明洋 宋春明 蔡浩 编著

策 划: 杨宁霞 季 慧

责任编辑: 季 慧

责任校对: 徐春莲

装帧设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(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 10.5
字 数 262000
版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-5662-9
定 价 68.00 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。

全书围绕地下空间日益严重的以爆炸方式为主的恐怖袭击和防护问题,系统分析了地下空间的目标特性,爆炸、撞击和生化及放射性恐怖威胁三类恐怖灾害的特点、破坏效应(危害)及其分析方法,以及预防技术和应对措施。本书内容丰富,反映了当前地下空间防爆与反恐方面的新成果,旨在提高国家和公众科学认识及防范地下空间恐怖活动的能力。

本书专业性较强,可供土木工程、地下工程、防护工程及相关专业的科研人员、工程技术人员和大专院校师生学习和参考。

《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

王明洋 工学博士,中国人民解放军理工大学首席教授、博士生导师,爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室主任,全军科技领军人才,全国优秀科技工作者,国家杰出青年科学基金获得者,“新世纪百千万人才工程”国家级人选,“长江学者奖励计划”特聘教授,科技部“爆炸冲击效应与工程防护”国家重点领域创新团队带头人,江苏省中青年首席科学家,享受国务院政府特殊津贴专家,加拿大不列颠哥伦比亚大学高级访问学者,国际岩石力学学会中国国家小组副主席,中国岩石力学与工程学会副理事长,中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会理事长,中国力学学会爆炸力学专业委员会委员,中国土木工程学会防护工程分会理事,《爆炸与冲击》、《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》、《兵工学报》等多家重要期刊编委。长期从事防护工程、爆炸力学和岩土工程领域的教学和科研工作,先后主持和参与国家自然科学基金杰出青年基金项目、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目、国家和军队科技重大专项等 10 余项;研究成果获国家科技进步一等奖 1 项,国家科技进步二等奖 3 项,省部级科技进步一等奖 6 项;发表学术论文 150 余篇,其中 SCI/EI 收录 90 篇,出版专著 2 部。

宋春明 工学博士,中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室讲师,中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会副秘书长。主要从事防护工程方面的教学和科研工作,先后主持国家自然科学基金青年基金项目、中国博士后面上资助基金项目以及军队课题等,参与国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题、国家自然科学基金面上项目、军队重点课题等 10 项;先后获得国家科技进步二等奖 1 项,省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 2 项;出版专著 1 部,参与制定国家军用标准 1 部,发表论文 30 余篇,其中 SCI/EI 收录 20 篇。

蔡 浩 工学博士,中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室副教授,获评理工大学首批优秀人才培养计划之“百名青年英才”、理工大学学习成才标兵、国防工程学院首届“铸城之星”。长期从事危险气体扩散规律与灾害防治、危险气体泄漏源辨识、气体爆炸灾害防治等方面研究工作,主持纵向项目 9 项,包括国家自然科学基金(青年基金)、中国博士后基金特别资助、中国博士后基金一等资助、江苏省自然科学基金(面上项目)各 1 项;近 5 年发表论文被 SCI 和 EI 收录 20 篇;应美国 NOVA 出版社邀请撰写英文反恐通风专著 1 部,作为全书负责人和第一完成人出版译著 2 部,合作完成编著和译著各 1 部。

■ 总 序 ■

FOREWORD

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

PREFACE

美国“9·11”恐怖袭击事件以后,恐怖主义已经成为当今世界最主要的非传统安全问题,也是我国面临的安全威胁之一。城市地铁、地下隧道等地下空间结构,由于其封闭性、救援困难、抵御内部灾害的能力弱等特点,更易遭受恐怖袭击,地下空间以防“恐怖袭击”为主的灾害问题也日益引起各国的重视。目前,恐怖袭击的主要方式包括爆炸、冲击、毒气和火灾四类,其中爆炸袭击,由于其破坏和杀伤力大、易发动、难防范等特点,成为当代恐怖袭击的最主要方式,因此,地下空间的防爆与防恐已成为当前迫切需要研究和解决的问题,是维护国家安定,构建和谐社会的重要任务。

本书针对地下空间所面临的日益严重的爆炸恐怖袭击与防护问题,系统介绍了地下空间的目标特性(第2章),爆炸、冲击和生化及放射性恐怖威胁三类恐怖灾害及其特点(第3章),破坏效应(危害)及其分析方法(第4章),恐怖灾害的预防技术和应对措施(第5章和第6章)等方面的研究成果。本书内容丰富,反映了当前地下空间防爆与反恐方面的最新成果。该书的出版将提高公众对地下空间恐怖活动和爆炸灾害的科学认识和防范能力。

本书的研究成果是在国家自然科学基金项目“钢筋混凝土结构在低速冲击下局部与整体响应研究”(项目编号:50578158)和“提高防护结构抗爆承载力的动支座技术研究”(项目编号:51008305)成果的基础上完成的。

本书第1章、第2章由王明洋、宋春明撰写,第3章由高康华、宋春明、蔡浩撰写,第4章由王明洋、宋春明、赵跃堂撰写,第5章由王明洋、卢浩撰写,第6章由蔡浩撰写。全书由王明洋修改、补充和定稿。

感谢同济大学出版社对本书出版发行的大力支持以及所做的辛勤工作。

限于水平有限,时间仓促,书中缺点及不足之处,恳请读者批评指正。

王明洋 宋春明 蔡 浩

2014年6月于中国人民解放军理工大学

■ 目 录 ■

CONTENTS

总序 前言

1	绪论	1
1.1	地下空间特点	2
1.2	地下空间面临的主要安全威胁	3
1.2.1	爆炸威胁	3
1.2.2	撞击威胁	5
1.2.3	生化及放射性恐怖威胁	6
2	地下空间目标特性	9
2.1	地下空间几何特征	10
2.1.1	地下空间竖向深度	10
2.1.2	地下空间的构成方式	11
2.1.3	地下空间的组合形式	11
2.2	地下空间功能特性	13
2.2.1	交通功能	13
2.2.2	商业功能	13
2.2.3	公共服务保障功能	14
2.2.4	防空防灾功能	14
2.3	地下空间成灾特性	16
2.3.1	直接毁伤效应	16
2.3.2	间接毁伤效应	17
2.3.3	地下空间灾害的特点	18

3	地下空间爆炸、撞击和生化及放射性恐怖威胁	19
3.1	爆炸威胁	20
3.1.1	爆炸事故分类	20
3.1.2	爆炸荷载确定方法	22
3.2	撞击威胁	33
3.2.1	撞击事故的分类	34
3.2.2	撞击荷载的确定方法	35
3.3	生化及放射性恐怖威胁	45
3.3.1	地下空间生化及放射性恐怖灾害的特点	45
3.3.2	我国城市地下空间防护的安全问题	47
4	地下空间内的爆炸、撞击效应	49
4.1	爆炸的破坏效应	50
4.1.1	对建筑物的破坏	50
4.1.2	对人员的伤害	51
4.2	结构的撞击破坏效应	52
4.2.1	局部破坏作用	52
4.2.2	局部破坏作用的计算方法	53
4.2.3	整体破坏作用	65
4.2.4	整体破坏作用的计算方法	69
4.3	次生灾害问题	74
4.3.1	爆炸引起次生破坏效应	74
4.3.2	撞击引起次生破坏效应	74
4.4	爆炸破坏效应的常用分析方法	75
4.4.1	单自由度体系分析方法	75
4.4.2	多自由度体系分析方法	77
4.4.3	连续体系分析方法	80
4.4.4	构件的等损伤图	89
4.4.5	矩阵力法	97
4.4.6	数值分析方法	106
5	地下空间爆炸冲击的预测、预报与预防	117
5.1	防灾理论与技术	118
5.1.1	地下空间爆炸冲击灾害预测理论	118

5.1.2	地下空间爆炸冲击灾害预报技术	129
5.1.3	地下空间爆炸冲击灾害预防技术	131
5.2	减灾工程技术措施	135
5.2.1	事故调查与评估	135
5.2.2	应急响应措施	138
5.2.3	工程技术措施	138
6	地下空间生化及放射性恐怖袭击的应对措施	141
6.1	安全防范措施	142
6.1.1	简易型防范措施	142
6.1.2	加强型防范措施	145
6.2	应急处置措施	147
6.2.1	生化及放射性污染物的检测	147
6.2.2	人员的疏散	148
6.2.3	人员的就地避难	148
6.2.4	个人防护措施	148
6.2.5	空气过滤与净化措施	148
6.2.6	应急通风措施	149
6.3	事后恢复措施	149
	参考文献	150
	索引	154



1 绪 论

人类社会的发展至今,除了要充分利用地面空间外,还可以把活动空间扩展到高空和地下。开发利用地下空间是提高土地利用效率与节省耕地、改善城市环境的最有效途径。城市地下空间是一个十分巨大而丰富的空间资源,如得到合理开发,其节约土地资源的效果将十分明显。因此,世界发达国家把地下空间作为新型国土资源。1863年英国伦敦建成世界上第一条地下铁道,预示着现代城市地下空间出现,1991年在东京召开的城市地下空间利用国际学术会议上通过了《东京宣言》,提出21世纪是人类地下空间开发利用的世纪。

目前,在我国北京、上海等特大城市已经进入了地下空间高速发展期,广州、深圳等沿海城市以及南京、武汉等经济发达、人口密集的大城市随着地铁建设也开始大规模进行地下空间开发利用。城市地下空间开发数量快速增长,总体规模和发展速度已居世界同类城市前列,中国已成为世界城市地下空间开发利用大国。

大量的工程实践,为地下空间利用奠定了牢固的可持续发展基础。地下空间已发展到土木工程的各个领域,在学科上也发展成为横跨地质、岩土、力学、结构、材料、机械、控制、灾害防御等多学科领域的大学科,“地下空间开发、利用与防护”的理论、技术和方法,正在逐步形成。

1.1 地下空间特点

地下空间是现代工业社会城市各种地下建筑的总称(徐梅,2006),主要包括单纯地下建筑,地面建筑中附建的地下室,地铁、隧道等交通要道,可以同时集聚交通、商业、市政等的综合体。为适应现代生活的需要,开发利用地下空间,特别是合理规划地下交通轨道,已经成为改善、健全城市功能的有效措施。因此,从整体、长远的利益出发,合理开发、利用地下空间,使地下空间利用形式与有限的地上设施相互协调、补充,融合城市空间,创建宜人舒适的城市环境,成为现代大城市的可持续发展的关键问题。

我国现阶段大城市和特大城市地下空间开发与利用主要包括:地下交通设施,包括地下轨道交通、地下道路和隧道、地下人行交通和地下停车设施;地下商业、文化、娱乐等公共设施,一般可设在城市中心区、交通枢纽等繁华地区;地下工业、仓储、市政基础设施和地下管线综合管廊,根据需要在有条件的地方建设。城市地下空间大规模的开发和利用,不仅仅是为了缓解地面空间压力,重要的是它有很好的抗灾性能,可弥补地面防灾空间的不足。对地面上难以抵御的外部灾害如战争空袭、地震、风暴、火灾等有较强的防御能力,当地面上受到严重破坏后能保存部分城市功能等。

目前城市地下空间发展的特点有:

- (1) 功能日趋复合,与城市建设密不可分。
- (2) 地下空间与多种交通方式相结合,形成空间网络。
- (3) 地上空间与地下空间相互融合。
- (4) 提供公共活动场所,提高城市生活品质。
- (5) 注重防灾减灾功能。

当前恐怖主义已成为影响世界形势的最主要的非传统安全问题,也是我国地下空间安全面临的主要威胁之一。我国虽然没有发生大规模恐怖袭击事件,但是随着对外开放与交流活动的日益密切,经济的快速发展和大型会议、赛事等重大活动的增多,国际恐怖组织针对我国的恐怖袭击的潜在可能性与日俱增。因此地下空间的防爆与防恐已成为维护国家安全稳定,保障人民生命财产,构建和谐社会的重要任务。

1.2 地下空间面临的主要安全威胁

地下空间的灾害包括地震等自然灾害和火灾、交通事故、恐怖事件等人为灾害等。此外,还要经常考虑可能出现的新生灾害(童林旭,1997)。

地下空间构筑在地下岩体或土体中,由于其本身的结构特性,它有着比地面建筑更多的不利因素:一是其空间相对封闭狭小;二是人员出入口数量少;三是自然通风条件差;四是难以实现自然采光,主要依靠人工照明。

地下空间由于其自身的特点,一方面它对很多灾害的防御能力远远高于地面建筑,如地震灾害;而另一方面,当地下空间内部发生某些灾害时,所造成的危害程度又将远远超过地面同类灾害,如火灾、爆炸等。这就使我们一方面要充分利用地下空间良好的防灾功能,使之成为城市居民抵御自然灾害和战争灾害的重要场所;另一方面要重视地下空间内部防灾减灾技术的研究,防止灾害的发生,或将灾害的损失降低到最低限度。

1.2.1 爆炸威胁

爆炸事件是在城市地下空间中发生数量较多的恐怖行为,在美国“9·11”恐怖袭击事件以后,特别是近些年来多发的地铁恐怖爆炸事故,使地下空间结构以“防恐怖袭击”为主的爆炸灾害问题日益引起各国的重视。

当地铁给人们的出行带来极大便捷的同时,它也成为大城市中陌生人聚集最多的场所,由于客流量巨大,司乘人员几乎无法对每一个进入地铁的人进行检查,恐怖分子可以比较容易地混入,使地铁经常成为爆炸恐怖事故的频发场所。在当今恐怖主义尚未有效肃清的形势下,地铁内密集的人群和四周封闭的空间客观上为恐怖分子实施爆炸袭击创造了条件,一旦爆炸发生,其破坏和杀伤力极大,不仅会带来巨大的人员和财产的损失,而且还会造成全社会的极度恐慌。国外反恐专家指出,城市的地铁、机场和隧道是最易遭受恐怖分子袭击的三大“软肋”,其中地铁又是最软之处。国际恐怖势力就是盯住了这个“最软”之处,出于各种目的,频频制造恐怖事件,先后发生了日本毒气案、西班牙地铁爆炸案、韩国地铁纵火案、英国地铁系列爆炸案等恐怖案件。据国际反恐组织调查,近15年来,全球地铁恐怖事件成几何倍数递增。

2005年7月7日,英国伦敦地铁6个车站正当上班高峰时间几乎同时发生大爆炸,导致重大人员伤亡,其中50多人死亡,700多人受伤,地铁全线关闭。伦敦地铁拥有12条线路,车

站 270 多个,日客流量 300 万人次,是人们上班、旅行首选交通工具。然而,由于客流量大,根本无法对乘客逐一进行安检。乘客仅凭当日客票,就可在地铁各线畅通无阻。上午 9 点左右车厢内人满为患,谁也不会去关心放在角落的物品,恐怖分子携带小型爆炸物混进地铁很容易,从而导致爆炸案的发生很难避免。俄罗斯地铁是世界上遭受恐怖爆炸袭击最多的交通系统。2004 年 2 月 6 日由恐怖分子一手策划的莫斯科地铁爆炸案,即因其发生在一列满载旅客且正行驶于隧道中的地铁内而造成 50 人死亡、十多人受伤的惨剧。2010 年 3 月 29 日,俄罗斯首都莫斯科市中心卢比扬卡和文化公园地铁站先后发生两起爆炸,造成 39 人死亡、95 人受伤。这些恐怖案件使世界各国改变了对地铁的安全观念,开始重新审视地铁的安全性,纷纷加强和改进地铁的安全措施。

从 2004 年开始,国际上每隔两年举办一次隧道安全会议,会议发表的论文中有很一部分专门讨论隧道内爆炸和火灾的评估、分析方法、防御对策和应急演练等。美国联邦公路局(FHWA)2006 年制订了一个 6 年的桥梁和隧道安全研究计划(Martin Larcher, 2010),该计划的参与单位达到了 34 个,计划立项时首先对恐怖袭击的类型进行了统计分析。统计分析表明,对于恐怖袭击的方式包括火灾、撞击、生化攻击和爆炸四类,而对于地铁隧道等地下结构,超过 60%属于炸弹爆炸袭击方式。国内外发生的恐怖爆炸袭击方式主要有汽车炸弹、固定箱包炸弹、自然式人体炸弹和邮件(包)炸弹 4 种方式。而汽车炸弹由于炸药量大,破坏严重,对建筑物的破坏最为严重(孔新立,2007);而箱包式炸弹最为常见。

另外,防空类地下空间还需要考虑战时空袭的威胁。和平与发展虽已成为当今世界的发展趋势,但是霸权主义和强权政治仍然存在,地区冲突不断发生,局部战争也时刻存在,如海湾战争、科索沃战争、伊拉克战争、利比亚战争和叙利亚战争等。这些局部战争表明,随着科学技术的迅速发展,高技术空袭武器已应用于战场,并随着现代高技术武器的发展,特别是钻地武器的发展,各种新式常规武器也在不断地向小型化、高、精、尖方向发展,其高技术含量、命中概率也越来越高,对世界上各种重要的军事和经济目标构成了越来越大的威胁。一旦发生战争,一些重要的大中城市将毫无疑问成为战时空袭的主要袭击目标,对城市的地下空间结构的防护能力提出了新的挑战,一旦地下空间结构遭受严重破坏,地下空间结构内的避难人员将受到威胁。

表 1-1 中地下空间爆炸事故统计表明,地下空间一旦发生爆炸并导致火灾,造成的人员伤亡和损失程度会十分严重(童林旭,1996)。主要原因如下:

(1) 烟害特别严重。据国内外资料表明,烟气致死人数约占总死亡人数的 60%~70%,在死亡的人群中,有不少人都是先窒息后被烧死的。由于地下空间的狭小封闭性,火灾时不完全燃烧会产生更多烟气、有害气体,大量热量和烟气得不到有效排除,将迅速充满整个地下空间,造成严重灾害。

(2) 人员疏散困难。地下空间与外界连通的出入口较少,在火灾情况下,人员的疏散和烟气流通的方向一致,且地下采用人工照明,烟气作用会降低结构内部的能见度,加之地下空间复杂、疏散线路过长,人群易产生恐慌而盲目逃窜,造成人员不能及时疏散而导致伤亡。

(3) 扑救工作十分困难(李英民,2011)。首先由于地下空间的相对封闭状态,难以确定发生火灾的具体准确部位;其次由于出入口较少,造成消防人员与疏散人员在进出之间形成人流交叉,会延误扑救时机;最后由于地下空间比较狭小,过多的有害烟气、毒气及高温热量快速积聚等因素,加大了火灾的扑救难度,有时在消防人员无法进入地下空间进行扑救工作的情况下,只能任其自动燃烧至熄灭,造成更为严重的经济损失。

表 1-1 地下空间的爆炸事件

时间	地点	爆炸原因	伤亡损失
1980-8-6	日本静岡地下街	管道漏气着火爆炸	伤 213 人
1990-7-3	四川铁路隧道	列车油罐突然爆炸起火	4 人伤亡,20 余人受伤
1995-7-25	巴黎地铁	炸弹爆炸	30 人死亡,70 人受伤
1996-6-11	莫斯科地铁	地铁行车时发生爆炸	4 人死亡,7 人受伤
1998-7-13	湘黔铁路隧道	液化气槽车爆炸	4 人死亡,20 人受伤
2000-8-8	莫斯科地下通道	恐怖袭击	8 人死亡,117 人受伤
2001-6-2	莫斯科地铁环线的白俄罗斯车站	一枚手榴弹	15 人受伤
2003-2-18	韩国大邱中央地铁站	投掷易燃液体纵火	198 人死亡,147 人受伤
2004-2-6	莫斯科地铁	恐怖袭击	39 人死亡,70 人受伤
2005-7-7	伦敦地铁	恐怖爆炸	52 人死亡,700 多人受伤
2010-3-29	莫斯科卢比扬卡和文化公园地铁站	人体炸弹袭击	39 人死亡,95 人受伤
2010-3-31	俄罗斯达吉斯坦	人体炸弹袭击	12 人死亡

1.2.2 撞击威胁

撞击威胁主要是指现代交通工具、机械振动或钻地弹体撞击建筑物结构,造成结构构件局部破坏、失稳,甚至引起整体结构倒塌,而导致内部人员伤亡和财产损失。

汽车和地铁作为交通工具已经成为人们生活中必不可少的一部分,而交通安全问题越来越引起人们的关注,在地下空间内交通工具撞击建筑物的事情也时有发生,如汽车失控撞击停车场内的钢筋混凝土承重柱等,地铁列车脱轨撞击车站承重结构,在交通工具破坏的同时,建筑物也有可能由于突然的撞击而损坏,甚至倒塌,这样将导致更大的人员伤亡和财产损失(刘兴远,2008)。

汽车撞击作用尽管属于偶然作用,但对地下停车场、地下行车道、地铁车站等建筑物而言仍是一种不可忽视的外部作用,其撞击毁伤效应以及地下结构物防撞措施等在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中并未考虑,因此需要研究撞击事故的预防技术、结构的抗撞防护技术和撞后的建筑物评估等问题。