

地铁结构的 内爆炸效应与防护技术

DITIE JIEGOU DE NEIBAOZHA XIAOYING YU FANGHU JISHU

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

孔德森 孟庆辉 张伟伟 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

地铁结构的 内爆炸效应与防护技术

孔德森 孟庆辉 张伟伟 著

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书系统介绍了作者近年来在地铁结构抗爆防护方面的研究成果。全书共分7章,详细论述了地铁车站和区间隧道在爆炸荷载作用下的内爆炸效应与防护技术。主要内容包括:炸药爆炸当量的估算方法、地铁隧道爆炸冲击反应数值计算模型、地铁隧道内爆炸冲击波的传播规律、爆炸荷载作用下地铁隧道的冲击反应、地铁车站内爆炸冲击波的传播规律和动力响应、地铁结构的抗爆防护技术等。

本书可供从事地铁结构和地下工程设计、施工、科研等工作的人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地铁结构的内爆炸效应与防护技术/孔德森,孟庆辉,
张伟伟著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-5024-6052-5

I. ①地… II. ①孔… ②孟… ③张… III. ①地下
铁道—铁路工程—工程结构—防爆—IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第19988 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 廖 丹 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6052-5

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2012 年 10 月第 1 版, 2012 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.75 印张; 169 千字; 173 页

20.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

20 世纪 60 年代以来，由于世界各国之间的发展不平衡，政治势力的尖锐对立以及宗教信仰间的剧烈冲突等原因，形形色色的恐怖主义活动日趋活跃。进入 21 世纪，国际恐怖主义呈愈演愈烈之势，严重危害了人民的生命财产安全，影响了社会稳定。在各种恐怖袭击手段中，爆炸袭击是恐怖分子采用最多、危害最大的方法。

地铁是现代城市交通的重要组成部分，是人员密集的高风险场所，由于其具有全线性、开放性、连带性、封闭性和群体性等特殊性质，极易成为恐怖爆炸袭击的目标之一。从 1998 年到 2003 年，全球共发生了 180 多起针对地铁的恐怖爆炸袭击事件，造成 400 多人死亡和数千人受伤。1995 年 7 月 25 日，巴黎米歇尔地铁站发生地铁车厢内恐怖爆炸，造成 8 人死亡，150 多人受伤；2004 年 2 月 6 日，交通高峰期间，一枚炸弹在莫斯科地铁通道内爆炸，导致 40 人死亡，134 人受伤；2004 年 12 月，恐怖分子在西班牙马德里地铁制造了爆炸惨案，造成 191 人死亡，1841 人受伤；2005 年 7 月 7 日，英国伦敦金融中心的地铁发生恐怖爆炸袭击，造成数人受伤；2010 年 3 月 29 日，俄罗斯首都莫斯科市中心地铁“文化公园站”和“卢比扬卡站”发生恐怖爆炸袭击，导致 41 人死亡，70 余人受伤。

地铁是城市的交通命脉，造价高，使用周期长，维护费用也

很高,运行期间内部人群密集,遭受恐怖爆炸袭击时,极易造成大量的人员伤亡,如伴随产生地铁结构破坏,将会造成难以预料的灾害和经济损失。目前,我国的地铁和轨道交通正进入一个前所未有的蓬勃发展时期。按照规划,到2015年,我国的轨道交通线路总长将达到2400公里,总投资超过8000亿元。但我国在地铁结构应对恐怖爆炸袭击时的防护技术和安全措施研究方面尚处于起步阶段,在地铁结构设计时没有针对地铁结构的抗爆防护进行强制性要求,存在安全隐患。因此,必须开展深入系统的地铁结构在恐怖爆炸荷载作用下的动力反应分析和破坏效应研究,发展合理可靠的地铁结构破坏效应分析模型,确定费效比合理的地铁结构抗爆设计方法和抗爆加固措施,制定地铁结构防恐怖爆炸袭击应急预案。

本书是作者多年来在地铁结构抗爆防护方面研究成果的总结,共分7章。第1章为绪论,介绍了地铁的发展、地铁结构抗爆防护的研究现状以及存在的主要问题;第2章研究了炸药爆炸当量的估算方法,提出了一种利用隧道衬砌质点振动速度进行炸药当量估算的方法;第3章建立了恐怖爆炸荷载作用下地铁隧道爆炸冲击反应数值计算模型;第4章研究了爆炸冲击波在地铁隧道中的传播变化规律;第5章分析了爆炸荷载作用下地铁隧道的冲击反应和破坏机理;第6章建立了地铁车站的爆炸冲击反应计算模型,研究了爆炸冲击波在地铁车站内的传播规律和地铁车站结构的冲击反应;第7章基于之前的研究成果,提出了费效比合理的地铁结构抗爆防护措施。

本书第3~5章由孔德森撰写,第6章和第7章由孟庆辉撰

写，第1章和第2章由张伟伟撰写。在本书写作过程中，张秋华和史明臣等研究生做了大量的数据整理工作，同时，书中还引用了国内外众多研究机构和个人的研究成果与工作总结，在此谨向他们致以衷心的感谢。

本书的出版得到了山东科技大学学术著作出版基金的资助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处，恳请读者给予批评指正。

作 者
2012年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状与进展	4
1.3 本书主要内容	7
第 2 章 炸药爆炸当量的估算方法	9
2.1 现场作用痕迹估算法	9
2.1.1 按爆炸产物起始作用痕迹估算炸药当量	9
2.1.2 按爆炸产物抛掷作用痕迹估算炸药当量	10
2.1.3 按爆炸产物极限作用痕迹估算炸药当量	10
2.2 峰值超压估算法	11
2.2.1 已有破坏伤害数据分析	11
2.2.2 爆炸荷载的确定	13
2.2.3 爆炸当量的确定	17
2.3 数值模拟估算法	20
2.4 爆炸相似模型试验法	21
2.5 质点振动估算法	22
第 3 章 地铁隧道爆炸冲击反应数值计算模型	27
3.1 动力分析软件 LS-DYNA 简介	27
3.2 流固耦合分析	29
3.2.1 Lagrange 算法	29
3.2.2 Euler 算法	29
3.2.3 ALE 算法	30
3.2.4 Euler-Lagrange 耦合算法	33

3.3 地铁隧道数值计算模型	34
3.4 材料模型	35
3.4.1 高能燃烧模型	35
3.4.2 空气材料模型	36
3.4.3 土材料模型	37
3.4.4 混凝土材料模型	37
第4章 地铁隧道内爆炸冲击波的传播规律	39
4.1 密闭结构内爆炸产生的超压作用	39
4.1.1 爆炸问题的分类	39
4.1.2 爆炸波的形成	41
4.1.3 内爆炸的超压问题	41
4.1.4 冲击波的传播规律	41
4.2 爆轰波的 C-J 理论	43
4.2.1 基本方程	43
4.2.2 C-J 条件	44
4.3 冲击波的反射	47
4.3.1 正反射	47
4.3.2 斜反射	48
4.4 冲击波传播的数值计算分析	49
4.4.1 冲击波在地铁区间隧道内的传播过程	49
4.4.2 不同工况下的压力时程曲线	54
4.4.3 理论公式计算	81
4.4.4 冲击波对人员的损伤	82
4.4.5 最大超压沿纵向距离的衰减规律	83
4.4.6 冲击波到达各测点的时间	84
第5章 爆炸荷载作用下地铁隧道的冲击反应	87
5.1 应力波的分类	87
5.2 土中爆炸的特性	89
5.2.1 无限界土体中的爆炸特性	89

5.2.2 有自由表面的土体中的爆炸特性	90
5.3 数值计算结果分析	90
5.3.1 10kg TNT 炸药作用下的动力响应	90
5.3.2 20kg TNT 炸药作用下的动力响应	100
5.4 两种工况计算结果的对比分析	112
5.4.1 衬砌的速度和加速度变化情况	112
5.4.2 对断面位移的影响	113
5.4.3 对周围土体的影响	113
第 6 章 地铁车站内爆炸冲击波的传播规律和动力响应	115
6.1 材料模型及状态方程	116
6.1.1 炸药燃烧模型	116
6.1.2 空气材料模型及状态方程	117
6.1.3 衬砌材料模型	119
6.1.4 周围土体材料模型	120
6.2 地铁车站模型的确定	121
6.3 LS-DYNA 与流固耦合算法	122
6.3.1 ANSYS/LS-DYNA 程序的使用方法	122
6.3.2 流固耦合分析	123
6.4 爆炸冲击波在地铁车站内的传播规律	125
6.4.1 爆炸冲击波的传播过程	125
6.4.2 不同参考点的压强时程曲线	132
6.5 爆炸冲击波作用下地铁车站的动力响应	139
6.5.1 顶板和地面参考点速度和加速度时程曲线	139
6.5.2 侧壁参考点速度和加速度时程曲线	144
第 7 章 地铁结构抗爆防护技术	151
7.1 建筑物抗爆防护研究	151
7.1.1 爆炸荷载作用下建筑物的防护等级	152
7.1.2 防护距离的确定	153
7.1.3 爆炸荷载的预测	154

7.2	建筑物的抗爆防护措施	155
7.3	地铁车站抗爆防护技术	157
7.3.1	地铁车站抗爆防护的特点	157
7.3.2	外包钢防护技术	159
7.3.3	外包钢抗爆防护案例分析	160
7.4	地铁隧道抗爆防护技术	161
7.4.1	泡沫金属的特性	161
7.4.2	泡沫铝的特性	162
7.4.3	泡沫铝在地铁隧道抗爆防护中的应用	162
参考文献		167

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

地铁是现代城市交通的重要组成部分。地铁交通自诞生以来,得到了人们的广泛重视,并随着城市化的进程得到了迅速发展。21 世纪,城市人口的持续快速增加和经济的大发展,导致车辆增多,给城市带来交通拥挤、环境污染和能源危机等一系列问题。随着我国国民经济的飞速发展,城市化进程的加速,城市流动人口的增加,大城市交通状况可能进一步恶化。不少城市的交通拥堵问题日趋严重,发展城市公共交通,缓解交通拥挤是当今大城市迫切需要解决的问题。2010 年上海世界博览会的主题就是:“城市,让生活更美好。”世博会上,不少国家带来了缓解城市交通压力的实践作品。地铁与其他城市交通工具相比,除了能避免城市地面拥挤和充分利用空间外,还有很多其他优点^[1]。首先,地铁运量大,地铁的运输能力要比地面公共汽车大 7~10 倍,这是任何其他交通工具所不能比拟的;其次,地铁速度快,地铁列车的时速可以达到 80km;再次,地铁无污染,地铁列车以电为动力,不存在空气污染问题;最后,地铁行车准时,地铁使用专用车道,不存在堵车问题。鉴于上述特点,地铁交通日益受到人们的青睐而发展迅速。目前全世界已有 40 多个国家的 100 多座城市开通了 300 多条地铁线路,总长度超过 6000km,许多车站建筑雄伟壮丽,很多地铁已成为城市的重要旅游景点^[2]。

目前,地铁作为缓解城市交通紧张的有效工具,在许多国家和城市得到了广泛的应用^[3]。莫斯科地铁是世界上最繁忙的地铁之一,近 800 万莫斯科市民平均每天要乘坐地铁一次,地铁担负了该市客运量的 44%。东京地铁的运营里程和客运量与莫斯科十分相近^[4]。纽约地铁的运营里程居世界首位,日客运量已经超过 2000 万人次,

占该市各种交通运量的 60%。近几年来,上海地铁发展迅速,尤其是 2010 年上海世博会的开办,使上海地铁建设投入加大,建设速度加快,通车里程延长。香港地铁总长度虽然只有 43.2km,但是它的日客运量达到了 220 万人次,最高时可高达 280 万人次,如果按照地铁总长折算,完全可以和上述这些城市地铁相媲美^[5]。可以想象,如果没有地铁,这些城市的交通状况会怎样?如果没有地铁,这些城市就不会成为今天这样交通发达的现代化大都市^[6]。

20 世纪 60 年代以来,恐怖活动日益泛滥,危害了人民的生命财产安全,严重影响了社会稳定。在各种恐怖袭击手段中,爆炸袭击是恐怖分子采用最多、威力最大的方法。进入 21 世纪,国际恐怖主义愈演愈烈。2001 年美国“911 事件”后,反恐已经成为国际社会面临的共同责任^[7]。

从 1998 年到 2003 年,全球共发生了 180 多起针对地铁的恐怖爆炸袭击事件,造成 400 多人死亡和数千人受伤。1995 年 7 月 25 日,巴黎米歇尔地铁站发生地铁车厢内恐怖爆炸,造成 8 人死亡,150 多人受伤;2004 年 2 月 6 日,交通高峰期间,一枚炸弹在莫斯科地铁通道内爆炸,导致 40 人死亡,134 人受伤;2004 年 12 月,恐怖团伙在西班牙马德里地铁制造了爆炸惨案,造成 191 人死亡,1841 人受伤;2005 年 7 月 7 日,英国伦敦金融中心的地铁发生恐怖爆炸袭击,造成数人受伤^[8];2010 年 3 月 29 日,俄罗斯首都莫斯科市中心地铁“文化公园站”和“卢比扬卡站”发生恐怖爆炸袭击,导致 41 人死亡,70 余人受伤住院^[9]。频繁发生的地铁爆炸事件,在给人们带来巨大生命财产损失的同时,也给人们敲响了警钟。

恐怖活动在我国也同样存在,境内外政治敌对势力活动频繁,民族分裂分子甚至使用恐怖方式企图达到政治目的,社会极端分子和黑社会势力等各种犯罪团伙带有恐怖暴力倾向的犯罪活动也时有发生。近十几年来,新疆和西藏地区的恐怖主义、分裂主义和极端主义势力在我国境内外共制造了 260 多起恐怖事件。恐怖活动已经发展成为一种国际性的行为,对我国的安全稳定和经济发

展也构成了潜在威胁^[10]。

地铁作为一种重要的公共交通设施,是人员密集的高风险场所,

由于其具有全线性、开放性、连带性、封闭性及群体性等特殊性质,成为恐怖袭击中具有很高风险的目标之一。地铁遭受恐怖袭击后会造造成比地面其他恐怖事件更大的灾害,而且在一定时间内难以恢复正常^[11]。地铁的公共服务性质使恐怖分子很容易进入,在一定时间内封闭在地铁有限的区域中,发生恐怖爆炸事件时,除了人员会受到直接伤害外,也极易造成地铁结构、车辆和其他设施的毁坏。此外,由于地铁内部空间的局限性,在很短的时间内完成地铁系统的排烟、排毒气作业以及开展救援工作的难度很大,这又会进一步加重恐怖爆炸的次生灾害^[12]。因此,恐怖分子在地铁内纵火、爆炸或施放毒气、生物制剂等,极易造成群死群伤以及严重的经济损失和社会影响^[13]。

目前,我国的地铁和轨道交通正进入一个前所未有的蓬勃发展时期。按照规划,到2015年,我国的轨道交通线路总长将达到2400km,总投资超过8000亿元。截至目前,北京、上海、广州、南京、天津和深圳等城市已有地铁运行,青岛、苏州、杭州、沈阳、哈尔滨、福州、宁波、南昌、合肥等城市也正在或者即将建设地铁。地铁结构是重要的生命线工程,造价高,使用周期长,维护费用也很高,运行期间内部人群密集,遭受恐怖爆炸袭击时,极易造成大量的人员伤亡,如伴随产生地铁结构破坏,将会造成难以预料的灾害和经济损失。因此,地铁的大规模兴建均要考虑在恐怖爆炸袭击下的冲击反应及其防护措施^[14]。

恐怖主义的滋生和蔓延严重危害着人民的生命财产安全,同时,也严重影响了社会的安定和经济发展,地铁作为恐怖爆炸袭击的重要对象,更应加强警惕,因此,必须开展深入的研究工作,以期在地铁结构应对恐怖爆炸袭击方面有实质性的突破。研究成果将对我国的经济发展和社会稳定起到至关重要的作用,具有十分重要的经济价值和社会效益^[15]。

目前,我国在地铁结构设计时没有针对性地进行抗爆设计,存在安全隐患。因此,开展深入系统的地铁结构在恐怖爆炸荷载作用下的动力反应分析和破坏效应研究,通过理论分析和数值模拟,发展合理可靠的破坏效应分析模型,确定费效比合理的地铁结构抗爆

设计和抗爆加固方法,制定地铁防恐怖爆炸袭击应急预案,具有重要的理论科学意义和工程应用价值。

1.2 国内外研究现状与进展

饱受恐怖爆炸袭击之苦的国家,如美国、英国、以色列和俄罗斯等国,在长期的反恐斗争中,一方面不断完善法律法规,建立高效的应急机制,加强反恐怖力量建设;另一方面,针对恐怖爆炸活动的特点、环境效应和破坏效应,研究出了大量有效的防护技术和措施。我国也在不断加大反恐力度,有效促进和加强我国的反恐怖爆炸研究工作,确定符合我国国情的反恐怖爆炸策略,制定快捷高效的反恐怖爆炸防护措施^[16]。

在国外,美国、英国、以色列和俄罗斯等国高度重视本国的防护技术研究,不断加强理论研究和转化力度,采取了大量切实可行的防护技术和措施。以美国为例,1989年美国土木工程师学会(ASCE)专门主办了一次加强安全和具体防护措施的结构专业会议。1995年,美国宾夕法尼亚州立大学举办了以北约国家为主的“现代防护结构”短期培训班,教材综合了美国在防护技术领域的最新成果,重点是针对恐怖破坏的具体防护措施和已建工程的加固改造技术。1999年和2003年,美国国防威胁减轻局(DTRA)对结构爆炸减轻计划(BMSP)的进展情况和现状进行了分析和总结,旨在不断提高建筑结构的抗爆性能。近年来,这些恐怖活动频发的国家,更是加大了反恐怖防护技术研究力度^[17]。

目前,国内在地铁结构应对恐怖爆炸袭击时的防护技术和安全措施研究方面尚处于起步阶段,研究成果较少,而且主要集中在建立高效快捷的地铁结构反恐应急机制、反恐装备和手段、爆炸物检测发现技术、爆炸后伤员救治和疏散技术等方面,这些大部分都属于宏观举措,需要政府相关部门的组织和协调。对于地铁结构的反恐安全设计和构造措施的研究还很少见,还没有对地铁结构在爆炸荷载作用下的动力反应和破坏效应进行系统研究^[18~20]。

地铁结构在恐怖爆炸袭击下的冲击反应和破坏效应研究是一个涉及多学科的课题,从爆炸源开始,经过冲击波在介质中的传播,

直到结构动力反应和破坏效应的研究,涉及爆炸力学、波动理论、流体动力学、损伤力学和结构动力学等,多学科的交叉造成了该课题研究的复杂性^[21~23]。针对该问题,目前采用的研究方法主要有理论研究、试验研究和数值模拟三种。试验研究的成本比较高,需要专门的爆炸试验现场和从事爆炸工作的专业人员,我国还没有进行相关试验,相比之下,另外两种方法相对容易操作^[24]。我国在地铁结构应对恐怖爆炸袭击的防护技术研究方面还只限于对国外研究成果的总结和发展,要改变我国在该领域研究落后的局面需要开展深入的研究工作,系统研究地铁结构在爆炸荷载作用下的动力反应及其内部爆炸波的传播变化规律、地铁结构内部环境特征对冲击波场的影响、爆炸产生碎片的飞散和侵彻模型、防爆墙的设置形式和安装方法、地铁结构抗爆加固方法等,以期在地铁结构应对恐怖爆炸袭击方面有实质性的突破^[25]。由于我国在地铁结构应对恐怖爆炸袭击的防护技术研究方面起步晚,基础薄弱,有很多问题需要进行深入研究。其中,以下几个问题亟待解决。

(1) 炸药爆炸当量的估算方法和设防标准的确定。炸药爆炸当量的估算方法和设防标准的确定是进行地铁结构应对恐怖爆炸袭击防护技术研究的前提。一般情况下,炸药当量的估算过程通常分为三个步骤,即破坏和伤害数据的收集,确定爆炸荷载的大小,使用标准的 TNT 表面爆炸空气冲击波曲线确定爆炸当量^[26]。随着炸药制造技术的不断发展,恐怖分子使用的炸药种类繁多,给炸药当量的估算增加了困难,如 TNT 炸药、黑索金、B 型炸药、C 型炸药、硝酸甘油胶质炸药、硝酸铵类炸药等,还有恐怖分子自制的各种炸药^[27]。在进行炸药当量的估算时,需要收集和整理大量恐怖爆炸破坏的数据,并通过爆炸效应模拟计算,推断恐怖分子所采用炸药的当量,然后,在概率统计的基础上,根据大量恐怖活动的实例,给出地铁结构应对恐怖爆炸袭击的设防标准。

(2) 地铁结构内冲击波场的研究。与地上环境相比,地铁结构内部环境是一个相对封闭的系统,存在一定的“封闭效应”,爆炸冲击波的传播规律更加复杂,爆炸产生的冲击波在地铁结构内部不断传播、反射,不像地上结构那样很快传到远处消失。冲击波的反射、

绕射、干涉和衰减规律也因环境的不同而呈现出特殊性,冲击波对地铁内部人员、车辆和设备造成破坏的机理将更为复杂^[28,29]。目前,对爆炸荷载作用下地下结构抗爆性能进行的试验研究和计算分析主要是在地下结构周围土中或空气中爆炸引起的地下结构的震动破坏、内部设备的损坏和人员的伤亡,即研究的是所谓“外爆炸”问题。而地铁结构内的恐怖爆炸所产生的冲击和破坏是“内爆炸”问题,其破坏效应更复杂,超压作用更强,破坏作用更直接,破坏威力也更大。在地铁结构的内爆炸中,除空气中的冲击波和爆炸碎片直接造成人员伤亡外,内爆炸冲击波对结构的作用和破坏规律也完全不同于外爆炸,内爆炸可使地铁结构直接产生拉力破坏,进而影响地铁结构的整体稳定。

(3) 地铁结构恐怖爆炸效应模型的建立。对于地铁,除地铁结构本身外,地铁结构周围地基的特性以及顶部覆盖土的特性等都对地铁结构的内爆炸反应及其破坏产生显著影响。因此,进行地铁结构在爆炸荷载作用下的动力反应和破坏效应分析需要建立合理的分析模型。一个合理的地下结构分析模型既要考虑对半无限地基的模拟,还需要全面考虑几种非线性因素,如结构材料的非线性、结构各部分之间的动态接触非线性、地基非线性等,如果将爆源纳入一个统一系统中进行分析,还要考虑爆炸非线性、爆炸源与周围介质之间的流固耦合问题等^[30]。关于材料的非线性问题,由于爆炸冲击荷载频率高、历时短,材料在高速冲击作用下的应力-应变行为与加载速率的关系很大,这时,材料的率相关效应特别突出。如果考虑结构的破坏效应,还必须引入损伤变量来反映结构的破坏程度,这就需要在数值计算的模型中考虑材料非线性损伤本构关系^[31]。研究岩土、混凝土材料率相关的非线性本构关系,引入恰当的损伤变量模拟结构的破坏效应成为该课题的一个重要研究问题。

(4) 抗爆设计与抗爆加固方法研究。目前设计建造的地铁很少进行抗爆设计,不能应对目前日益增加的恐怖爆炸袭击。如果没有抗爆设计,地铁结构一旦遭受到恐怖袭击,不但不能承受爆炸和武器效应,而且还会增加对地铁结构内部人员的伤害,轻则碎片飞散伤人,影响地铁结构的正常运行,重则造成地铁结构顶部坍塌,而

且很难修复^[32,33]。因此,应当在经济允许的情况下,对地铁结构进行简单有效的抗爆加固。目前,针对地铁结构的抗爆加固设计研究还很少,但是对地上结构抗爆设计加固的研究,国外已经有很多研究成果可以借鉴,甚至已经形成了规范,我国在这方面的研究还非常落后^[34]。美国为了提高现有建筑物抗恐怖爆炸袭击的能力,已经提出一种钢筋混凝土建筑物抗爆加固的设计方法。为了验证该试验方法,研究者按照美国东海岸典型的钢筋混凝土办公楼设计了一个全尺寸结构,通过承受一系列爆炸荷载以测量对各种威胁水平的反应。典型的加固方法是通过采用钢和复合材料外壳来提高钢筋混凝土结构的抗爆性能。以色列对地上建筑通过全尺寸爆炸试验提出了一系列有效的加固措施,值得借鉴参考。这些加固方法主要有玻璃加膜、新型抗爆窗、天花板设置附加防弹材料、设置抗爆挡墙等^[35]。对于地铁结构的抗爆加固,需要在理论分析和数值模拟的基础上,提出简便实用的抗爆加固设计方法^[36]。

1.3 本书主要内容

本书采用理论分析、数值模拟和概率统计等方法,对地铁结构在恐怖爆炸袭击下的冲击反应与防护技术进行研究。通过建立合理有效的爆源-空气介质-结构-土系统动力相互作用整体分析模型,研究恐怖爆炸冲击波在地铁结构中的传播和变化规律,探讨地铁结构在内爆炸作用下的冲击反应和破坏机理,以此提出费效比合理的地铁结构防恐怖抗爆设计和加固方法,从而为地铁结构防恐怖爆炸袭击应急预案的制定和政府决策提供依据。

(1) 恐怖爆源参数的确定和模拟方法研究。由恐怖爆炸现场统计资料,针对不同的防护标准,研究确定爆炸炸药当量,建立高爆炸药材料的模拟方法。

(2) 建立合理而有效的爆源-空气介质-结构-土相互作用整体分析模型。选择或发展合适的与岩土、混凝土率相关的非线性本构关系,选择恰当的损伤变量,确定空气介质与结构之间、结构各部分之间、结构与岩土之间的界面条件,发展界面间接触非线性问题分析方法,研究模拟爆炸荷载下延伸的空气介质和半无限土介质的人