

学术著作

· 工程安全防护理论与技术系列



移动装配式防爆墙的 设计理论与方法

许金余 罗 鑫 白二雷◎著

YIDONG ZHUANGPEISHI

FANGBAOQIANG DE

SHEJI LILUN

YU FANGFA

西北工业大学出版社

学术著作·工程安全防护理论与技术系列

移动装配式防爆墙的设计理论与方法

许金余 罗 鑫 白二雷 著

国家自然科学基金资助项目(51378497)

爆炸冲击防减灾国家重点实验室开放课题资助项目(CRMEIKF 201406)



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书介绍移动装配式防爆墙的设计理论与方法,探讨两个层面的问题:一是工程技术问题,即研制适用于战时人防工程或爆恐袭击下重要建筑物防护的移动装配式防爆墙;二是科学问题,即防爆墙研制过程中的深层次抗爆防爆设计理论研究。其具体涵盖三个方面的研究内容:移动装配式防爆墙的系统设计研究,确定“刚柔结合”的设计理念;在设计理念的指导下,开展移动装配式防爆墙的刚性阻爆机制、柔性吸能机制和集成设计研究;移动装配式防爆墙的应用技术及效费评估。

本书适用于从事土木工程专业的人员和设计人员,以及高等学校的教师、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

移动装配式防爆墙的设计理论与方法/许金余,罗鑫,白二雷著. —西安:西北工业大学出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5612-4945-1

I. ①移… II. ①许… III. ①移动式—装配式衬砌—防爆—安全墙—结构设计—研究 IV. ①TU227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 199480 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:14.875

字 数:227 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

前 言

现代高技术战争条件下,战争形态的加速演变给人民防空带来严峻挑战,对人防工程提出了更高的防护要求。人防工程的出入口既是战时打击重点,又是防护的最薄弱部位,因此,人防工程的防护关键在于出入口防护能力的加强。“如何提高人防工程出入口的防护能力”是一个亟须思考的问题。

恐怖主义是一种复杂的政治、社会现象,目前已然发展成为全球的不稳定因素。恐怖袭击以血腥暴力和恐吓威胁为特征,往往造成大量人员伤亡和巨大社会影响,而众多袭击方式中,汽车炸弹最令民众恐慌。汽车炸弹在建筑物附近爆炸会产生大范围破坏,导致建筑物的坍塌并产生各种爆炸碎片,造成人员伤亡和灾难性后果。因此,“如何增强爆恐袭击下重要建筑物的生存能力”是一个值得深入探讨的课题。

就目前的科学技术手段来看,设置防爆墙是提高防护能力或生存能力中最有效的手段之一。现有的防爆墙存在总质量较大,防护能力弱,构筑时间较长,一般还需要使用机械进行安装等缺点,而战场或者恐怖袭击下的环境变化迅速,均需要短时间内建立有效的防护体系,因此,现有的各种防爆墙难以满足战时人防工程或爆恐袭击下重要建筑物防护的要求。由此可见,解决上述问题的关键在于研制出适用于此类特殊防护的防爆墙。

移动装配式防爆墙正是基于此类背景而提出的。本书是笔者深入研究这个课题后,总结多年研究成果而完成的。本书介绍移动装配式防爆墙的设计理论与方法,探讨两个层面的问题:一是工程技术问题,即研制适用于战时人防工程或爆恐袭击下重要建筑物防护的移动装配式防爆墙;二是科学问题,即防爆墙研制过程中的深层次抗爆防爆设计理论研究。本书包括三个部分的研究内容:第一部分,移动装配式防爆墙的系统设计研究,即防爆墙第一层次的设计,包括功能分析、空气冲击波对结构物影响的理论分析、概念设计、设计基础及其可靠性。该部分可视为防爆墙的“顶层设计”,确定移动装配式防爆墙“刚柔结合”的设计理念。第二部分,移动装配式防爆墙具体设计研究,即防爆墙第二层次的设计,涵盖刚性阻爆机制研究、柔性吸能机制研究和集成设计研

究三方面的内容。其中刚性阻爆机制和柔性吸能机制研究是集成设计的基础,三者融合为一体,实现移动装配式防爆墙的稳定机制、吸能机制和组装机制三种功能机制,最终成果为研制成功的移动装配式防爆墙产品。第三部分,移动装配式防爆墙的应用测试研究,测试三大功能机制是否达到设计要求。

本书由许金余、罗鑫、白二雷撰写,由郑颖人院士审校。高原、聂良学、朱靖塞参与了试验研究、数据整理的部分工作,陆松、刘俊良等人参与了部分图表的绘制。在此谨向帮助完成此书的同志表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中难免有不足和欠妥之处,恳切希望读者予以批评指正。

著 者

2016年1月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	5
1.3 主要研究内容	11
第 2 章 移动装配式防爆墙的系统设计	14
2.1 引言	14
2.2 防爆墙的功能分析	14
2.3 “防”——空气冲击波	17
2.4 “护”——墙的阻波效应和削波效应	30
2.5 空气冲击波对结构物的影响的理论分析	35
2.6 移动装配式防爆墙的概念设计	42
2.7 设计基础及其可靠性	55
2.8 小结	55
第 3 章 移动装配式防爆墙的刚性阻爆机制研究	57
3.1 引言	57
3.2 防爆墙的整体优化设计	57
3.3 防爆墙的稳定结构设计	85
3.4 防爆墙装配元件的职能分析及设计雏形	92
3.5 小结	96
第 4 章 移动装配式防爆墙的柔性吸能机制研究	97
4.1 引言	97
4.2 测试技术及吸能指标	97

4.3	多孔材料	99
4.4	吸能材料与薄壁金属管的组合结构	105
4.5	层式结构的应用规律	116
4.6	柔性吸能机制的建立	120
4.7	小结	120
第5章	移动装配式防爆墙的集成设计研究	122
5.1	引言	122
5.2	移动装配式防爆墙的层次防护设计	122
5.3	防爆结构的弹塑性设计体系	128
5.4	移动装配式防爆墙的钢骨结构设计	137
5.5	移动装配式防爆墙的吸能层设计	152
5.6	防爆墙与地面的连接设计	156
5.7	移动装配式防爆墙的设计效果图	158
5.8	设计的防爆墙的抗力	160
5.9	小结	166
第6章	爆炸冲击波下防爆墙的动力响应特性	168
6.1	引言	168
6.2	基于悬臂梁连续模型的防爆墙的动力响应特性	168
6.3	基于单自由度体系的防爆墙的动力响应特性	173
6.4	防爆墙的动力响应特性的有限元分析	176
6.5	小结	186
第7章	移动装配式防爆墙的应用技术及效费评估	187
7.1	引言	187
7.2	移动装配式防爆墙的组装关键技术	187
7.3	特殊条件下应用的可行性分析	196
7.4	移动装配式防爆墙的实体现场爆炸测试	198
7.5	移动装配式防爆墙的效费评估	205

7.6 小结	209
第 8 章 本书的主要结论及进一步研究内容	210
8.1 主要结论	210
8.2 进一步研究内容	213
参考文献	214

第1章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 高技术战争下的人防工程

人民防空是保护民众生命、财产安全,保存战斗实力的重要战略措施,对于打赢现代化战争具有举足轻重的作用。人民防空的重要性日益提升,促使全国各级政府部门对人防工程的建设越来越重视。近年来,许多大中型人防工程^[1-2]成为城市的重点工程,如哈尔滨奋斗路地下商业街、沈阳北新客站地下城、上海人民广场地下停车场、郑州火车站广场地下商场等。“平战结合”是我国人防工程建设的指导思想,既要满足平时的使用功能需要,还要进行临战前转换设计,这向来是设计施工的难点所在。由于人防工程是一种有防护要求的特殊地下建筑,在进行人防工程建设的同时需要对其防护能力做严格的要求,这种要求与战争形式的发展息息相关。

随着科学技术的高速发展,大规模、高强度的连续空中打击已成为现代高技术局部战争^[3-4]的突出特点之一。其主要特征如下:①精确制导武器在空袭中的使用越来越频繁;②命中精度越来越高;③钻地越来越深;④爆炸威力越来越强;⑤投射距离越来越远;⑥空袭强度越来越大。由此可见,战争形态加速演变给人民防空带来严峻挑战,对人防工程提出了更高的防护要求。

提高现代高技术战争条件下人防工程的生存能力对保护民众生命、财产安全具有十分重要的现实意义。因此,“如何提高现代高技术战争条件下人防工程的生存能力”是一个亟须思考的问题,也是一个值得深入探讨的课题。

人防工程被打击的重点在于其出入口,而通常出入口却又是人防工程的最薄弱部位。调查显示,目前对于人防工程出入口的防护措施仅为一道防护能力较弱的防护门,因此,提升人防工程的生存能力的关键在于出入口防护能

力的加强。

国内部分学者提出了一些方法以提高人防工程口部的战时防护能力。主要包括三类方法:封堵法、加固法和增设防爆墙^[5-6]。

1. 封堵法

口部封堵主要有两类:一类是在抗爆结构背爆面一侧构筑砖墙,然后在砖墙上选用性能良好的防水卷材粘贴在水泥砂浆的基面上;另一类是在抗爆结构迎爆面表面粘贴薄铁皮。实践证明,这两种方法存在着密闭转换时间太长及密闭性能难以满足密闭要求等问题。20 世纪末我国在某地火车站组织了出入口的快速封堵试验。当采用钢筋混凝土预制梁封堵口部时,单个封堵构件的质量太大,搬运和安装较困难,转换时限太长。

2. 加固法

加固法的具体措施有结构构件外包钢加固法、粘贴纤维加固法、粘钢加固法、加大被覆层厚度和增厚硬质防护层等。这些加固法虽然在工程领域都有一定的应用价值,但实践经验表明,加固法存在着质量难以保证、施工复杂、影响使用功能、施工和长期维护费用高等不足。

3. 防爆墙^[7-9]

防爆墙是具有抗爆炸冲击波的能力,能将爆炸破坏作用限制在一定的范围内的墙体,是目前防爆技术研究的一大热点。在人防工程的出入口增设防爆墙,能阻挡冲击波和碎片的直接破坏作用,对人防工程起到有效的保护,而且简单可行、设置费用低且速度快。

综上所述,设置防爆墙是提高人防工程的生存能力中最有效的手段,尤其是在现代高技术战争条件下,这种手段的优势显得尤为突出。

1.1.2 爆恐袭击下的重要建筑物

恐怖主义是一种复杂的政治、社会现象^[10],其本质是人类冲突的一种表现形式,但目前却已然发展成为全球的不稳定因素,被列入国际社会和平与安全的最大威胁之一,并受到各国重视,同时吸引了包括国际关系学、社会学、政治学、经济学、法律和哲学等诸多学科的关注。

不同于自然灾害,恐怖袭击具有预谋性和智能化等特点,随时间和空间不断变化。1937 年《防止和惩治恐怖主义公约》首次定义恐怖主义:故意危害国

家元首、执行国家元首特权的人、其法定继承人或指定继承人及以上人士的配偶或担任公职或负有公共任务的人的生命、身体、健康或自由的行为；故意毁灭或损害属于或在另一缔约国管辖下的公共财产或供公用财产的行为；故意通过造成共同危险危害生命的行为；构成上列犯罪的任何企图的行为；制造、获得、扣留或供给武器、军火、爆炸品或毒物的行为等；在一缔约国反对其他缔约一方的犯罪行为以及旨在完成以上行为的共谋、教唆、直接和公开煽动、故意参与、有意识地提供一切援助等犯罪行为。《中国大百科全书·法学》将国际恐怖主义定义为：个人或组织在国际间有意识地使用暴力制造恐怖，并以杀害或威胁杀害个人或人群的生命、破坏公私财产为手段，以实现某种政治或其他目的的行为。无论恐怖主义定义如何，它都具有明显的秘密性、暴力性、象征性、政治性和不可预测性，对社会政治、经济、文化等领域均具有极大的危害性，不仅危害人们的生命财产，还影响整个社会秩序和稳定。

作为非常规突发事件，恐怖袭击以血腥暴力和恐吓威胁为特征，往往造成大量人员伤亡和巨大社会影响，可与战争、国家债务、人口膨胀、饥饿、贸易逆差、疾病等相提并论，甚至有人称之为“20 世纪的政治瘟疫”，还有学者认为恐怖主义应该与政治腐败、环境污染一起列为 21 世纪人类面临的三大威胁。

自有恐怖袭击以来，最令人们恐慌的恐怖袭击并不是人肉炸弹，也不是飞机撞大楼，而是汽车炸弹^[14]。所谓的汽车炸弹，顾名思义，是隐藏在汽车中的炸弹，为了达成某种政治目标或恐怖效果，以车辆（包括轿车、卡车、摩托车等）为爆炸物载体，对政府要害部门、政治敏感区域以及火车站、飞机场、购物市场、交通工具等人员集中的公共场所进行出其不意的恐怖爆炸袭击，造成大规模的人员伤亡、财产损失，引起极大社会恐慌的犯罪行为。这种恐怖袭击机动性强、速度快，且隐蔽性很好。汽车炸弹的检测难度增加了人们的恐惧感，也达到了恐怖分子制造恐慌的目的。

汽车炸弹袭击一般可分为自杀式汽车炸弹袭击和非自杀式汽车炸弹袭击两种类型。

自杀式汽车炸弹袭击包括两种：一是车载炸药实施攻击。恐怖分子驾驶装有炸药的车辆直接撞向目标并引爆炸药实施攻击，是一种自杀性的攻击。例如 20 世纪 80 年代，黎巴嫩真主党掀起的针对美国驻黎大使馆、驻黎多国维和部队军营等目标的自杀性恐怖犯罪浪潮。二是人体炸弹引爆汽车。例如

2007年12月27日,巴基斯坦前总理、人民党领导人贝·布托在伊斯兰堡邻近的拉瓦尔品第市举行的竞选集会上被开枪击中颈部和胸部,袭击者随后引爆了身上的炸弹,将其乘坐的汽车引爆炸毁。

非自杀式汽车炸弹犯罪包括三种:①触发起爆,即将炸弹装置与汽车车门或点火系统连接起来,当驾驶人打开车门或发动汽车时触发安装其中的炸药而引爆;②遥控起爆,将装载炸药的汽车停在目标附近,然后用遥控装置引爆炸药,而且恐怖分子往往多点放置汽车炸弹,待救援时制造二次爆炸;③延迟起爆,或定时起爆,恐怖分子将炸弹装在发动机、驾驶室、座位、车底盘等下面,用延时器连接,时间一到,炸弹爆炸。

汽车炸弹恐怖袭击主要有以下特征。

1. 制作技术简单

制作汽车炸弹并不需要很复杂的技术程序,只需要把炸弹的引信和发火装置由机械引爆变为手动引爆即可。

2. 容易隐蔽,难于发现

恐怖分子驾驶装有炸弹的汽车出现时,并不引人注意。这对汽车炸弹的防范造成了极大的困难。

3. 杀伤力大,破坏性强

汽车本身带有燃油燃气等大量易燃易爆物质,而且能够装载大量爆炸物,可运载几百千克至一两吨炸药,二者相结合,威力巨大。

4. 影响面广

汽车炸弹爆炸当量高、杀伤力强,更容易造成大的爆炸效应,一旦汽车炸弹成功爆炸,会造成建筑物严重破坏和大量人员伤亡,给社会造成极大的影响。

基于以上特征,汽车炸弹逐渐成为恐怖分子的“杀手锏”,加之汽车炸弹的制造技术在不断“进步”,各国政府对汽车炸弹采取的防范措施和探测技术也在不断进步,科研人员正在为消除汽车炸弹而努力。面对日益猖獗、手段越来越多的汽车炸弹袭击,反恐工作捉襟见肘。

汽车炸弹在建筑物附近爆炸会产生大范围破坏,导致建筑物的坍塌并产生各种爆炸碎片,造成人员伤亡和灾难性后果。就目前的形势分析来看,可主要从两方面来分析对策。

(1)“主动防御”。利用先进的爆炸物检测装置,对通过检测点的汽车进行检测,一旦发现汽车炸弹,立即启动汽车阻挡装置,对恐怖汽车进行迅速而有效的阻挡,防止其对既定目标的爆炸袭击。

(2)“被动防御”。在发现有汽车炸弹且无法阻止之后,迅速采取有效的应对措施,对袭击目标进行快速、有效、合理的防护,使损失降到最低。

针对“被动防御”,又可区分为“前期被动防御”和“后期被动防御”。“前期被动防御”是指重要目标在设计之初就应采用工程措施大幅度减少恐怖爆炸袭击带来的危害。例如,美国等西方发达国家在提高重要建筑物的防护能力、预防恐怖袭击等方面的研究以及实际应用方面开始较早,并进行了多方面的研究,而我国在相关领域的研究和应用还处于起步阶段,大多数重要建筑均未进行防爆设计或者抗爆防爆能力较弱。“后期被动防御”则是指对现有目标建筑在受到恐怖袭击时临时构建防护物,以减少人员伤亡和经济损失。因此,就目前形势来看,迫使我们必须在“后期被动防御”方面有所加强。

为提高重要建筑的“后期被动防御”能力,目前国内外采取的措施主要有两种:一是设置防爆路障,二是设置防爆墙。

设置防爆路障可增加汽车炸弹和重要目标的距离,降低爆炸危害。防爆路障是在重要建筑物周围适当部位利用各种障碍物阻滞恐怖分子利用行进中的汽车炸弹进行袭击的设施,使汽车炸弹与建筑物之间保持相当的距离。但路障的设置需要足够的时间,由于汽车炸弹很难检测,一旦被发现,留出的反应时间很短,因此一般情况下,并没有足够的时间在路面上设置路障。

设置防爆墙是一种退而求其次的方法,通过在目标建筑周围构筑抗爆防爆防护墙,抵挡汽车炸弹冲入目标建筑爆炸,将汽车炸弹阻挡在外,并且可以有效阻挡爆炸产生的冲击波。因此,在目标建筑外围设置防爆墙,是抵挡汽车炸弹的最有效措施。

1.2 国内外研究现状

防爆墙的研制需在分析、总结现有成果的基础上完成,因此,非常有必要对国内外防爆墙及其相关的材料、结构和理论进行整理、阐述。以下将从三方面进行说明:防爆墙的研究、抗爆吸能的材料及结构研究、结构冲击理论研究。

1.2.1 防爆墙的研究

资料显示,民用的防爆墙主要应用在以下领域:防御易燃易爆类物质的爆炸、防御恐怖爆炸袭击、防御海洋油气爆炸等。

1. 防御易燃易爆类物质的爆炸^[12]

此时的防爆墙主要是用于防内爆炸,以保护周边环境的安全。储存炸药的仓库、研制易爆化学产品的场所和测试易爆产品的实验室等有必要设置此类防爆墙。

2. 防御恐怖爆炸袭击^[13-15]

防御恐怖爆炸袭击的主要措施是设置防爆墙,能有效地抵挡汽车炸弹爆炸所形成的空气冲击波、弹片等,从而确保保护对象的安全。

3. 防御海洋油气爆炸^[16-20]

海洋油气生产开发平台大范围地运用防爆墙以减少油气可能爆炸而导致的损害。防爆墙承受爆炸荷载,将损害控制到最低,从而保护平台上的人员和设施。

根据不同的角度,防爆墙可以划分为不同的类型。

(1)从防护的方向来讲,防爆墙可以防构筑物内爆炸以保护构筑物外围(防内爆),也可以防构筑物外围爆炸以保证重要构筑物的安全(防外爆),或者二者兼而有之。

(2)从使用材料和整体结构受力特性来讲,防爆墙^[21-23]可以分为刚性防爆墙^[24-26]、柔性防爆墙^[27]。刚性防爆墙的强度、刚度较大,在设计冲击波的作用下,刚性防爆墙基本不会发生损坏和较大的塑性形变,主要通过对冲击波的“阻挡”作用来实现对构筑物的保护;柔性防爆墙在设计爆炸冲击波的作用下,将产生塑性变形或者破裂,尽管也会发生“阻挡”作用,但这种作用与刚性防爆墙的相比,要小得多,但是柔性防爆墙的塑性变形会耗散大量的爆炸冲击波能量,从而有效地降低构筑物上的压强。

(3)从设置方式来讲,防爆墙可以分为两类:一是固定型,二是移动型。后续内容将具体阐述和说明现有的固定型防爆墙和移动型防爆墙。

1. 固定型防爆墙

固定型防爆墙即永久性的设置场所不可变动的防爆墙。目前这类防爆墙

主要有以下几类。

(1)混凝土^[28]及钢筋混凝土防爆墙^[29-30]:该类防爆墙的主要材料为混凝土或者钢筋混凝土,强度、刚度高。这种防爆墙的缺点是造价较高、施工周期较长,不宜用于临时性防爆。

(2)组合钢筋混凝土防爆墙:中国发明专利(CN1570303A)提到一种可用于人防工程防爆墙的组合钢筋混凝土墙结构,主要由三层构成,即两层钢筋混凝土墙和中间的加气混凝土砌块或者焦渣砖砌块。与相同厚度的钢筋混凝土防爆墙相比,其钢筋和混凝土的用量均减小,但相应地抗力也降低。

(3)波纹钢防爆墙^[31-32]:主体结构采用预制的波纹钢组合而成。波纹钢具有强度高、弹性模量大的特点,具有较强的韧性和塑性变形能力,其表面可设计多种形状,以有助于削弱应力波的峰值,但缺点是造价高。

(4)配筋砌体防爆墙^[33]:主要材料为钢筋、砖块、混凝土砌块和砌筑砂浆等。在较高的爆炸冲击波超压的作用下,该防爆墙会破碎破坏,产生大量的墙体碎片,而碎片飞散容易对保护对象造成破坏。

(5)国外开发了两款防爆系统(“MAYA DURISOL”防爆墙^[34]和组合防爆墙体系(Bi-Steel system)^[35]),测试结果表明,其抗爆、防爆性能远优于钢筋混凝土墙。

(6)中国发明专利(CN103981962A)提到一种仿生防爆墙,由鱼鳞状FRP层、橡胶层和聚氨酯泡沫塑性层和超高性能钢筋混凝土墙组成,具有轻质高强的特点,但同时也存在制备工艺复杂、成本较高的问题。

固定型防爆墙的缺点在于“固定”,一旦建成则无法再设置在其他部位,灵活性不够,在应用方面受到很大的限制。

2. 移动型防爆墙

移动型防爆墙^[36]即为临时设置的防爆墙,可根据需要随时随地设置。目前这类防爆墙主要有以下几类。

(1)水体防爆墙^[37-43]:由水构成的防爆墙。在爆炸冲击波的作用下,水体防爆墙中的水会飞散,从而耗散爆炸能量,同时不会形成二次毁伤或者次生灾害。水体防爆墙具有构建方便,运输便利,对环境污染较小,后期清理工序简单,主要原材料易获取,成本较低等特点,而且使用限制条件少。但该类防爆墙缺乏系统的研究,工程指导建设的难度大。

(2)柔性织物防爆墙:由外围的柔性织物和内部填充材料构成。该类防爆墙质量轻,人工搬运方便、安装快捷,适合应急时使用。

(3)堆土防爆墙:由松散土堆积而成,鉴于其强度低的弱点,可在构筑时,分层加入加强筋,构成加筋堆土防爆墙。

(4)土工防爆墙^[44]:将附近可获取的土、砂、石等材料装入土工合成材料包围的空间中所构成。砂袋防爆墙^[45]:由事先预制好的砂袋构筑的防爆墙。桶体式防爆墙、集装箱式防爆墙^[46]、塑料装配式防爆墙^[47-48]、折叠式防爆墙(中国专利,公告号 CN202990152U):将土等就近材料充填到桶体、集装箱、塑料箱体或折叠式金属箱中,再堆积而成。这几类防爆墙具有成本低、设置速度快等特性,但整个防爆墙的体积较大,防护性能差,只适用于紧急状态下临时使用或者野外防护。

(5)中国科学技术大学申请发明专利:可移动式防爆墙(申请公告号:CN101949184A)。该防爆墙由墙体芯、剪切增稠材料层和防护外层构成,剪切增稠材料是一种新型的智能材料,防爆吸能效果好。整体来看,该防爆墙可快速拆卸和移动,但作为核心材料的剪切增稠材料的价格贵,不易得,目前不具备可行性。

(6)伍俊等人^[49-53]提出了一种制式化程度高、可重复使用的新型装配式防爆墙结构(中国专利,公告号 CN101078243A),并对其性能进行了一系列的研究。但这种装配式防爆墙不仅价格高,而且不能折叠收拢。

(7)Langseth 等人^[54]介绍了一种防弹能力较好、填筑量小、便于快速构筑的防护结构,其结构单元为铝合金挤压成形的空心镶板,但铝合金空心镶板价格高,而且为刚性构件,不能折叠收拢、运输占空间大、抗爆炸冲击波整体作用性能较差。

移动型防爆墙的优点和缺点均很明显,优点在于“移动”,即可根据需求便捷安装设置;缺点在于设计难度大,存在矛盾点较多。例如,为具备“移动”的特性,需确保质量较轻,便于运输,在确保不降低防护能力的前提下,需应用轻质高强高性能材料,则成本大幅上升,这就存在如何协调“移动”“防护能力”“成本”之间的关系。

3. 研究内容及方向

目前对防爆墙的研究集中在以下几个方面。

(1) 防爆墙的作用研究。Philip^[55]对防爆墙的削弱作用开展过初步的实验研究,其后,Whitham 分析了防爆墙的阻挡作用;Rose, Smith^[55]和 Beyer^[56]均探索了防爆墙后的爆炸冲击波参数的变化规律并以此来研究防爆墙对后方保护对象的防护作用;Chapman^[57]基于模型试验提出了一种预测防爆墙后的冲击波反射超压的方法;Bevin 等人^[58]开展了防爆墙模型的爆炸试验和数值模拟,并进行了对比分析;Louca 等人^[59]采用非线性有限元分析方法讨论了材料密实程度与防爆墙整体防护性能的关系。

方秦等人^[60]建立了水体防爆墙混凝土防爆墙的实体模型和数值模型,开展了相对应的爆炸试验,并以此为基础对比分析了两类防爆墙的特性;严东晋等人^[61]从数值分析角度探究了防爆墙后爆炸冲击波的传播及削弱状况;Zhang Y^[62]建立了钢筋混凝土防爆墙和高强度聚乙烯纤维纺织防爆墙的有限元模型,研究了空气冲击波在刚性和柔性墙壁上的反射压力差,分析了冲击波在不同防爆墙上的反射系数。

(2) 爆炸冲击波的绕流效应研究。Hao Hong 等人^[63-64]分析了爆炸冲击波与结构的相互作用后所形成的反射冲击波的特性;宁建国^[65]等人,王飞^[66]等人和穆朝民等人^[67-69]均运用数值模拟手段对爆炸冲击波的绕流现象开展了深入的研究,并探究了各层次的内在规律,给出了若干有用的结论。

(3) 防爆墙的设计研究。FEMA^[70]和 Bowles^[71]较全面地介绍了防爆墙的压力荷载特性,并分析了设计方法;Roger Buckley 等人^[72]研究了防爆墙的防爆性能,并基于实体试验和仿真试验的结论提出了一种设计防爆墙的方法;Schleyer^[73], Rfmennikov^[74]开展了防爆墙设计方法的研究;Remennikov 等人^[75]将神经网络方法引入防爆墙的设计与效能评估;Hedayati M H^[76]探索出一种研究不锈钢异型墙的力学响应的新方法,结果表明,该研究方法有助于更好地对不锈钢异型墙进行优化设计。

马云玲等人^[77]对比分析了不同形式的防爆墙的防护效果;严东晋等人^[78]采用数值方法探讨了悬臂式防爆墙在冲击波作用下的破坏机理;Chen L^[79]利用 LS-DYNA 建立了三种材料(碳纤维增强聚合物条带,钢丝网及层压钢条)增强后的无筋砌体墙的有限元模型,开展了模拟爆炸试验来分析各种改造措施的有效性。这些研究结论对防爆墙形式的设计具有一定的借鉴意义。

(4) 防爆墙的动力响应问题研究。张丽等人^[80]采用数值分析方法对多种