

高等防护工程

■ 李秀地 孙建虎 王起帆 刘元雪 等编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

高等防护工程

李秀地 孙建虎 王起帆 刘元雪
王培勇 苗朝阳 耿振刚 杨 森 编著

国防工业出版社

·北京·

本书共9章。主要内容包括常规武器、核武器及其效应,空气冲击波,冲击侵彻与工程防护措施,震塌破坏与工程防护措施,地冲击,防护结构动力响应分析与应变率效应,防护工程爆炸冲击试验研究,防护工程爆炸冲击数值模拟研究等。书中内容丰富,既有系统深入的防护工程分析理论,也有实用的工程防护措施、防护工程爆炸冲击试验与数值模拟研究等,许多内容是作者多年来从事防护工程教学与科研工作的一些原创性研究成果。

本书既可作为从事防护工程方面教学、科研和工程技术人员理论分析、数值模拟和模型试验的参考书,也可作为相关专业本科生和研究生的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

高等防护工程/李秀地等编著. —北京:国防工业出版社,2016.6

ISBN 978-7-118-10872-9

I. ①高… II. ①李… III. ①防护工程 IV. ①TU761.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第116986号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张14 字数318千字

2016年6月第1版第1次印刷 印数1—1500册 定价68.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

打击武器与防护工程相生相克、交替发展。信息化条件下新的军事理论和作战样式,以及日新月异的信息化工武器装备迅速发展。信息化战场的透明性提高了防护工程被发现的可能性,大量精确制导武器的使用增大了防护工程被毁伤的概率,多种杀伤手段的应用增大了防护工程的防护难度。信息化条件下新的军事作战理论、作战样式及信息化工武器装备的迅速发展,不仅决定了防护工程存在的必要性,也对防护工程的安全防护提出了更高的要求。

近年来,防护工程分析理论、试验研究、数值模拟及工程防护措施等方面有了许多新的进展。国内外相关人员也相继出版了一些防护工程方面的著作。本书与这些防护工程著作有一定的互补性,主要特色是既有系统深入的防护工程分析理论,也有大量实用的工程防护措施;防护工程爆炸冲击试验和数值模拟等内容是作者多年来从事防护工程教学与科研工作的一些原创性研究成果。

本书共9章。第1章简要介绍了信息化战场环境、信息化条件下防护工程面临的威胁与防护工程防护的指导思想。第2章介绍了高技术常规武器、核武器及其效应,也是防护工程防护的主要对象。第3章从爆炸、炸药基本概念及空气冲击波的主要特征出发,介绍了无约束爆炸冲击波、坑道内爆炸冲击波的传播规律及其主要参数的预测方法。第4章介绍了局部破坏作用、冲击侵彻的理论分析与经验预测方法,及相应的抗侵彻工程防护措施。第5章介绍了震塌破坏的机理、影响因素、破坏准则、震塌破坏理论分析与经验预测方法,及相应的震塌工程防护措施。第6章分别介绍了地冲击分析的TM5-855-1方法和其他等效药包叠加分析方法。第7章介绍了爆炸冲击荷载作用下防护结构动力响应的分析技术及应变率效应。第8章首先介绍了作为防护工程试验设计和数据处理等依据的爆炸相似律、复制律,然后分别介绍本书作者多年来在防护工程领域进行的主要爆炸冲击试验工作,包括坑道内爆炸冲击波试验、防护门破坏剩余冲击波试验、橡胶材料的SHPB冲击试验、钢筋混凝土靶体抗侵彻试验等。第9章首先介绍了防护工程数值模拟的基本理论,然后介绍了作者多年来在防护工程领域从事的主要数值模拟工作,包括坑道内爆炸冲击波传播、防护门爆炸动力响应、岩土中爆炸效应、地下结构震动破坏极限分析、混凝土冲击局部破坏等。

本书深入浅出,内容丰富,既有系统深入的防护工程基础理论,也有大量实用的工程防护措施,许多内容是作者原创性的研究成果。可作为从事防护工程及相关专业的教学、科研和工程技术人员的参考书,也可作为防护工程及相关专业本科生和研究生的教科书。

后勤工程学院郑颖人院士对本书的爆炸试验和数值模拟部分给予很多指导,石少卿教授在百忙之中认真地审阅了全书;本书在编写过程中,参考了国内外相关研究成果。特此表示衷心的感谢。

由于研究问题的特殊性和复杂性,再加上编写时间仓促及编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请各位读者、同行批评指正。

李秀地

2016年4月

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 信息化条件下的战场环境	1
1.1.1 精确制导武器是信息化战场的主角	1
1.1.2 体系化对抗是信息化战场的基本特征	2
1.2 信息化条件下的防护工程	3
1.2.1 防护结构与防护工程	3
1.2.2 信息化条件下防护工程面临的挑战	5
1.2.3 信息化条件下防护工程的防护	7
第2章 武器及其效应	10
2.1 常规武器及其效应	10
2.1.1 常规武器战斗部	10
2.1.2 高技术常规武器	13
2.2 核武器及其效应	23
2.2.1 核武器	23
2.2.2 核武器效应	24
2.2.3 爆炸方式	26
第3章 空气冲击波	28
3.1 爆炸现象与炸药	28
3.1.1 爆炸现象	29
3.1.2 炸药简史	29
3.1.3 炸药的分类	30
3.1.4 等效 TNT 当量	31
3.2 无约束爆炸空气冲击波	31
3.2.1 冲击波的形成	32
3.2.2 理想冲击波的主要特征	32
3.2.3 空气冲击波参数预测	34
3.3 坑道内爆炸空气冲击波	39
3.3.1 坑道对冲击波的约束作用	39
3.3.2 坑道内空气冲击波研究方法	40
3.3.3 坑道内空气冲击波参数预测	41
3.4 反射冲击波	48
3.4.1 反射冲击波的特征	48
3.4.2 正反射冲击波	48

3.4.3	斜反射冲击波	50
3.4.4	反射冲击波等效换算	50
第4章	冲击侵彻与工程防护措施	53
4.1	局部破坏概述	53
4.1.1	冲击局部作用	53
4.1.2	爆炸局部作用	55
4.1.3	冲击侵彻研究方法	56
4.2	冲击侵彻作用经验计算	57
4.2.1	混凝土中的侵彻作用	58
4.2.2	岩石中的侵彻作用	61
4.2.3	土中的侵彻作用	62
4.3	冲击侵彻作用理论研究	64
4.3.1	空腔膨胀理论	64
4.3.2	正交层状模型	67
4.4	抗冲击侵彻工程防护措施	69
4.4.1	防护措施分析步骤	69
4.4.2	抗冲击侵彻工程措施	69
第5章	震塌破坏与工程防护措施	78
5.1	震塌破坏概述	78
5.1.1	震塌破坏现象	78
5.1.2	应力波概述	80
5.1.3	震塌破坏机理	88
5.1.4	震塌破坏准则	91
5.1.5	影响因素分析	94
5.2	震塌预测经验方法	99
5.2.1	震塌经验预测曲线	99
5.2.2	震塌经验预测公式	101
5.3	震塌理论分析	103
5.3.1	Kot C. A. 理论方法	103
5.3.2	混凝土—岩石层状结构波动分析	104
5.3.3	钢板—混凝土—岩石层状结构波动分析	106
5.4	抗震塌破坏工程防护措施	110
5.4.1	避免或减少震塌的工程措施	110
5.4.2	保留震塌的工程措施	114
第6章	自由场地冲击	118
6.1	TM5-855-1 半经验方法	118
6.1.1	地冲击参数基本公式	118
6.1.2	结构处的地冲击参数	120
6.2	Malvern 等效药包法	121

6.2.1	等效药包法原理	121
6.2.2	柱状装药荷载函数	122
6.3	Starfield 等效药包法	123
6.3.1	波动方程的应力解	123
6.3.2	自由场应力状态	124
第7章	防护结构动力响应分析与应变率效应	126
7.1	等效单自由度分析方法	126
7.1.1	等效单自由度体系的建立	126
7.1.2	等效系数	127
7.1.3	等效体系的运动方程	129
7.2	等效弹性体系的动力分析	130
7.2.1	等效弹性体系的运动方程	130
7.2.2	空气冲击波荷载动力系数	131
7.3	等效弹塑性体系的动力分析	134
7.3.1	等效弹塑性体系的运动方程	134
7.3.2	整体响应损伤标准	136
7.4	结构响应的区域划分	136
7.4.1	动力响应放大曲线	136
7.4.2	响应区域划分	137
7.5	$P-I$ 图解	139
7.6	应变率效应	140
7.6.1	混凝土的应变率效应	140
7.6.2	钢筋动态性质的应变率效应	143
7.6.3	钢筋混凝土抗弯曲性质的应变率效应	144
第8章	防护工程爆炸冲击试验研究	145
8.1	防护工程爆炸冲击试验基本原理	145
8.1.1	爆炸相似律	145
8.1.2	复制律	147
8.2	坑道内爆炸冲击波试验研究	148
8.2.1	冲击波测试方案	148
8.2.2	试验测试结果	153
8.2.3	试验结果比较	156
8.3	装药长径比效应爆炸试验研究	157
8.3.1	爆炸试验方案	157
8.3.2	试验结果与分析	158
8.4	防护门板破坏剩余冲击波试验研究	160
8.4.1	爆炸试验方案	160
8.4.2	试验结果与分析	161
8.5	橡胶材料 SHPB 冲击试验研究	166
8.5.1	SHPB 实验系统	167

8.5.2	SHPB 实验基本原理	168
8.5.3	橡胶材料 SHPB 冲击试验与结果	169
8.6	钢筋混凝土靶体冲击侵彻试验研究	170
8.6.1	试验概况	170
8.6.2	试验结果与分析	172
第9章	防护工程爆炸冲击数值模拟研究	174
9.1	数值模拟基本原理	174
9.1.1	LS-DYNA 基本理论	174
9.1.2	FLAC3D 基本原理	178
9.2	坑道内爆炸冲击波的数值模拟	180
9.2.1	数值计算方法	180
9.2.2	结果验证与影响因素分析	181
9.2.3	坑道中冲击波的传播规律	184
9.2.4	爆炸相似律分析	185
9.3	防护门爆炸动力响应的数值模拟	187
9.3.1	数值计算模型及验证	187
9.3.2	动力响应数值模拟结果	189
9.4	岩土中爆炸效应数值模拟	191
9.4.1	岩土中爆炸效应数值模拟方法	192
9.4.2	数值结果影响因素分析	194
9.4.3	数值模拟结果与分析	195
9.5	地下结构破坏极限状态数值模拟	199
9.5.1	地下结构强度折减法计算原理	199
9.5.2	整体式钢筋混凝土等效模型参数	200
9.5.3	静荷载作用下地下结构极限状态数值模拟	201
9.5.4	地震荷载作用下地下结构极限状态数值模拟	206
9.6	混凝土靶体冲击局部破坏现象数值模拟	209
9.6.1	数值计算模型	209
9.6.2	材料模型及参数	210
9.6.3	数值模拟结果与分析	211
参考文献	214

第 1 章

绪 论

1.1 信息化条件下的战场环境

国际安全形势的演变,特别是以信息技术为核心的高新技术在军事领域的广泛应用,推动了世界新军事变革的产生。高技术的本质就是信息化,信息化是当代科技革命、社会变革最重要的推动因素,也是世界新军事变革的本质和核心。人类战争形态正在进入信息化战争阶段。信息化战争是在核威胁条件下,交战双方以信息化军队为主要作战力量,在陆、海、空、天、电等全维空间展开的多军兵种一体化的战争。信息化战争是人类社会进入信息时代的必然产物,是运用信息、信息系统和信息化武器装备进行的战争,是信息时代战争的基本形态。

战争形态是人类社会经济形态的产物。农业时代的手工业生产方式决定了战争所使用的武器主要是冷兵器,称为冷兵器战争;工业时代机器大工业生产方式的出现,使人们能够大量使用机械化武器装备从事战争,称为机械化战争。传统战法往往通过突破边境、攻城掠地、歼灭敌有生力量来达到战争目的。

而信息时代的信息已与物质、能量同等重要,是现代军队最重要的作战资源。伊拉克战争中,美军大量运用数字通信技术、计算机技术、微处理技术、卫星定位和精确制导等技术,综合利用精确打击战、心理宣传战、全纵深立体战、机动战等作战样式,并直接实施“斩首”行动,最终以较少的兵力、最快的速度 and 较小的伤亡,达到了既定战争目的。如果说海湾战争是信息化战争的雏形,那么伊拉克战争已经具备了信息化战争的主要特征。

1.1.1 精确制导武器是信息化战场的主角

战史表明,两种战争形态的更替,有一个交错、漫长的过程。在可预见的将来,传统武力战是无法被完全替代的。未来战争将是信息化与机械化融为一体的信息化战争。首先,信息化带动了机械化,实现了对作战能力的网络化、自动化和实时化管理控制,使战场指挥近实时、火力更猛、机动性更强、节奏更快、效率更高、战场更透明;其次,机械化是信息化的基础。机械化的发展使信息化具有更为先进的平台,并进一步促进信息化的发展。同时,信息化与机械化是个统一体,二者相互依存,共同发展。只有将信息化与机械化有效整合,才能提高打赢信息化战争的能力。例如,美军为“战斧”巡航导弹加装了 GPS 接收机,补充或替换地形匹配制导,改进了数字式景象匹配末制导,使得导弹的任务规划时间大大减小,命中精度也显著提高;同时,导弹的射程增加,从而具备了大规模、全天候远

程精确打击的能力。

传统的武器装备由于精度不高,能量释放难以有效控制,只能以粗放式的面打击实现点摧毁,打击目标必然引发附带毁伤。机械化战争及以前的战争都从根本上表现为彻底的暴力性和摧毁性。信息化武器大量运用信息技术来实现信息的获取、传递、处理,并实现打击的精确、远程、高效、快速。海湾战争中精确制导武器仅占8%,而伊拉克战争中精确制导武器已达80%以上。因此,信息化战争中利用巡航导弹、防区外导弹、精确制导炸弹等精确制导武器进行精确点打击,代替以往的地毯式轰炸,是迅速达到战争目的、具有高效费比的首选作战手段。

伊拉克战争中联军的“斩首”作战企图十分鲜明,即打乱和瘫痪伊军指挥体系,推翻萨达姆政权,并除掉萨达姆。因此,联军总的作战指导就是打击要害、直取重心。种种作战行动都尽量避实就虚,减少对经济目标、交通枢纽的轰炸,并力争减少平民伤亡和士兵阵亡,以强大火力直接进行“斩首”式的打击。其最直接的表现形式就是直接攻击伊拉克首都巴格达。在首轮空袭中,联军发射巡航导弹,出动F-117隐身战斗机,投掷了多枚精确制导弹药,对位于巴格达郊外的伊领导人地下隐蔽所、萨达姆住宅及其亲属和高级助手的住地进行了突然的“斩首”攻击;地面部队在空中力量支援下,采取“蛙跳战术”,开战后的第二天便深入伊拉克腹地160km,第8天已突进440km,直扑伊拉克首都巴格达。

尽管信息作为一种战略资源,是信息化战争中双方争夺的焦点,然而,不能就此将信息化战争仅理解为“信息战”。伊拉克战争中美英联军尽管获得了制信息权的绝对优势,但仍然需要使用大量精确制导武器大规模轰炸巴格达的通信、新闻及共和国卫队等重要目标。美国作战理论认为:“现代战争,即信息化战争的主角将是高精度武器”。

1.1.2 体系化对抗是信息化战场的基本特征

信息化战争条件下,信息成了整个军队的核心,信息控制权将决定着信息化战场主动权,因此,制信息权必然成为战争的首要环节。伊拉克战争中,美英联军通过侦察卫星、无人驾驶侦察机和潜入敌后的特种部队等,将信息及时传送到战场指挥和控制系统及作战飞机上,再以信息化精确制导武器和数字化装备的机械化部队进行精确打击。据专家评论:“对美军来说,无论从侦察、情报、指挥、控制、作战、后勤保障、空间支援等环节,都体现了以信息为主导”。

从最近几次高技术局部战争来看,以太空卫星为主的监控技术引导下的导弹中远程海上和空中打击,是现代战争的重要打击方式。空袭前,一般首先要对对方进行电子战,压制、摧毁敌方的指挥通信、信息化武器系统,再距战区数十、数百甚至上千千米外,以海基巡航导弹和作战飞机进行凌空轰炸。伊拉克战争中联军充分利用空中优势,远离实际战区,利用防区外联合直接攻击弹药非接触作战,实现了有效打击对方的同时,对方却不能有效还击。

战争的一体化使空袭行动与地面行动的阶段性划分不复存在,做到了统一及配合更加直接,更多地表现为战术级的协同。伊拉克战争中,美英联军在对巴格达进行空袭的同时,地面部队也兵分三路向伊拉克发起进攻:美国陆军第三机械化步兵师第二旅从西部进入;海军陆战队第一远征作战部队和第一陆战师部分部队从东部攻入;美海军特种作战部队和英国皇家海军陆战队在法奥半岛进攻。在作战过程中,联军具有绝对的制空权,实现

战场信息实时共享,空中打击与地面部队密切协同、一体化作战。与以往战争均以空袭拉开序幕夺取制空权的大规模轰炸不同,伊拉克战争中美军一开战,美诸军兵种几乎在同一时刻在空、地、海、天、电等多维空间,史无前例地协调使用多种力量实施同步联合作战,充分发挥综合国力和联盟实力的整体效能。

航天技术特别是以计算机技术为核心的信息技术在战争中的应用,使作战空间从陆、海、空三维空间拓展到外层空间和信息空间,作战空间超大多维。信息空间包括电磁空间、网络空间和心理空间三个方面。伊拉克战争中美英联军空中既有从美国本土出发的 B-2 隐身轰炸机,从英国起飞的 B-52 巨型轰炸机,还有从伊拉克周边国家起降的 F-117;海上发射的巡航导弹既有从红海的潜艇也有波斯湾的水面舰艇;地面装甲、空中直升机前呼后应;在外层空间动用了包括侦察、通信、预警、导航定位的 50 余颗卫星服务于这次战争。不仅在信息空间联军抢占和破坏了伊拉克脆弱的信息系统,而且还进行了强大的攻心战。

可见,信息化战争以信息网络为主导,利用数字化设备将指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察等网络系统联成一个有机的整体,并将作战系统和信息系统有效整合,构成了信息化的作战系统。这样,陆基、海基、天基的作战平台和各类人员能实时交换作战信息,共享各类信息资源,形成机动作战、信息支援和精确打击有机结合的更加体系化的现代作战体系。信息化贯穿于整个作战过程,即贯穿于包括信息获取、指挥、控制、通信、精确打击、作战评估等作战的全过程;单就精确打击来说,信息化贯穿于侦察—识别—攻击—命中—摧毁—评估的打击全过程。“体系对抗将成为信息化战场对抗的基本特征”。

1.2 信息化条件下的防护工程

1.2.1 防护结构与防护工程

防护结构是指抵抗预定杀伤武器破坏作用的工程结构。通常包括工程主体结构(简称防护结构)、防护设备与设施(防护门、防护密闭门、消波系统等)。广义上泛指可能受到偶然性冲击和爆炸作用的结构物。

防护结构和为保证完成工程所担负的战时职能的其他系统(给排水、发供电、防电磁脉冲、消防、防火及隔震系统等)的总体称为防护工程。防护工程按所处的位置,可分为地面防护工程和地下防护工程。地下防护工程包括修建在山体中或地面以下一定深度的防护工程,如指挥防护工程、飞机洞库、舰(潜)艇洞库、武器弹药洞库等。

按作用不同,防护工程可分解为结构、防护层、防护设备、建筑设备、建筑装修等。防护结构主要有成层式结构、坑道式结构等不同类型。

1. 成层式结构

成层式结构是一种掘开式施工的结构。典型的成层式结构防护工程,主要由防护层和支撑结构组成。图 1-1 为常用的块石成层式结构。

成层式结构的防护层由伪装层、遮弹层及分配层组成。

伪装层:又称覆土层。一般铺设自然土层构成。主要作用是对下部防护结构进行伪装。伪装层不宜太厚,太厚反而会增加常规武器爆炸的堵塞作用。

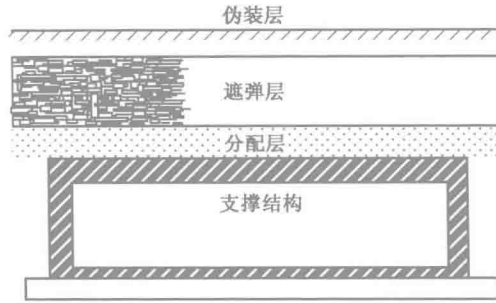


图 1-1 块石成层式结构

遮弹层:又称防弹层。这一层的作用是抵抗常规武器的冲击、侵彻并迫使其在该层内爆炸。遮弹层应保障常规武器不能贯穿。因此,这一层由坚硬材料构成,通常采用混凝土、钢筋混凝土、块石等。

分配层:又称分散层。它处在遮弹层与支撑结构之间,由砂或干燥松散土构成。它的作用是将常规武器冲击和爆炸荷载的作用,分散到较大面积上去。砂或土层同时也会削弱爆炸引起的震塌作用,能对支撑结构起良好的减震作用。

支撑结构是成层式结构的主要部分,一般用钢筋混凝土构筑。其主要作用是承受常规武器爆炸的整体作用和核爆炸冲击波引起的土中压缩波的作用。

成层式结构具有以下特点:

- (1) 消耗钢筋和混凝土材料较少,可利用就地材料,因而比较经济。
- (2) 防震、隔音较好,能有效地防止支撑结构震塌现象的产生。
- (3) 防护层在构筑后还可以进一步加固,破坏后易于修复。
- (4) 因埋深较大,使用受限制,高地下水位地区构筑困难。
- (5) 埋深大也使得基坑开挖土方量大,深基坑边坡支护复杂。
- (6) 对核爆压缩波的削弱能力无明显增强,且结构组成复杂。

2. 坑道式结构

坑道式结构是防护工程常用的一种结构形式,是利用工程上面的岩石层与支撑被覆结构共同构成的防护工程。坑道结构一般由头部、动荷重段和静荷重段三部分组成,如图 1-2 所示。

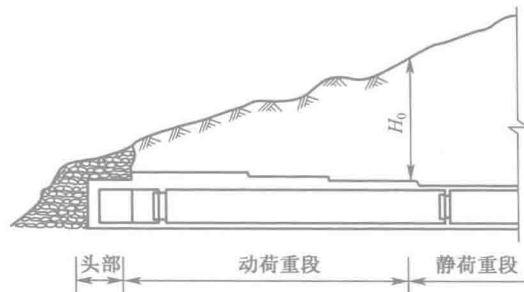


图 1-2 坑道式结构

(1) 头部。头部是坑道进入岩体的开口削坡部分,可以是掘开式施工的结构,需要承受常规武器的作用或核武器冲击波的作用荷载。从结构类型而言,坑道头部通常是整体

式钢筋混凝土或成层式结构。在个别较特殊的地形山体,如坑道口部有陡峭的近于垂直面的岩层面,也可以不构筑头部,直接开始暗挖进入山体内部。

(2) 动荷重段。暗挖施工,要抵御常规武器或核武器爆炸冲击波的作用,支撑被覆结构承受抗力要求的杀伤武器作用的动荷载。为了保持围岩的静态稳定并增强其抗动载的能力,在施工时应进行喷锚支护,少数抗力要求不高而围护石质条件好的坑道,也可不做动被覆结构,仅对围岩按抗动载要求用喷锚网支护加固。

(3) 静荷重段。坑道静荷重段的被覆结构不承受抗力要求的计算杀伤兵器的荷载作用,仅承受围岩的山体压力或岩层中地下水压力以及结构自重等荷载。显然,静荷重段设计和一般民用暗挖的地下工程及隧道工程等类似。由此可见,静荷重段与动荷重段的分界处,支撑被覆结构动荷载等于0。其岩体覆盖层的厚度称为最小安全防护层厚度。

最近几次高技术局部战争表明,防护工程在对抗精确制导武器的打击方面具有不可替代的作用,特别是对深埋地下防护工程的摧毁,仍然是目前急需研究解决的问题。坑道式结构防护工程具有以下特点:

(1) 自然防护能力强。坑道式防护工程通常构筑在较厚的山体中,岩石覆盖层随进入距离的增大不断增厚,坑道式结构防护工程在防高空侦察、防精确打击等方面具有独特的优势。工程仅有少量的孔口与外界相通,再加上较厚的防护层厚度及钢筋混凝土防护结构,给防震动、吸收和屏蔽电磁能量提供了极好的屏障。

(2) 外界干扰少。工程由于建于岩石山体中,只有少量的孔口部分与外界接触,因而受自然界气候变化的影响和外界人为的干扰比较少。根据对地壳温度的观察,太阳辐射热一般只对地表下10~20m有影响,日变化的作用深度仅有0.5m左右,因而,坑道具有恒温、恒湿的特点。

(3) 毁林占地少。坑道除口部和堆渣场地要毁损少量森林、果木和占用少量可耕地、良田外,都不需要大量地毁林和占用耕地。

坑道式结构防护工程也有些不足。首先,由于是在岩石中挖出来的,它的形状和大小完全取决于围岩的性质、围岩的稳定性、施工方法与设备,以及堆渣场地、建设的经济性、山体的形状和对最小自然防护层厚度的要求等。因此,坑道式结构防护工程的空间受到很大限制,而不像地面建筑有很大的灵活性。从改善结构受力条件和方便施工出发,在一般地质条件下,其横剖面形式多数采用直墙圆拱形。在平面布置上,一般按单层与独立分散布置,相邻坑道必须要有足够的岩体间壁厚度。其次,由于坑道周围岩层不可能很完整而无裂隙,且地表多数是有积水的土层、坑洼和沟谷等,水难免会通过岩层的裂隙渗透到坑道内。总的来讲,坑道的防水防潮比地面建筑复杂、要求高,因而费用较大。最后,坑道一般采取暗挖施工,空间有限、作业面小、作业条件差,因而建设周期长,支护被覆费用高,致使工程总体造价较高。

1.2.2 信息化条件下防护工程面临的挑战

自从早期的战争出现以来,进攻和防守这两种战斗形态就同时相伴而生了。筑城的发展史表明,防护工程与打击武器是一对相生相克、交替发展的矛盾对立面。整个人类战争史,一直伴随着攻者利其器、守者坚其盾的发展过程。防护工程是国防力量的重要组成部分,可以把防护工程视为盾牌的扩展和延伸,是保障己方人员和武器装备安全的盾牌,

是武器装备发挥效能的倍增器,在战略威慑、巩固国防、抵御侵略及保障社会稳定等方面具有不可替代的作用。然而,每当一种新的打击武器系统问世,往往会使原有的防护手段显得相形见绌。随着侦察监视技术、精确打击技术的发展,许多重要目标面临着被直接命中摧毁的威胁。

1. 战场的透明性提高了防护工程被发现的概率

现代侦察手段包括侦察直升机、电子侦察机、预警机、卫星、舰船、雷达及侦听设施以及特工人员等,构成了完备的侦察预警系统。侦察范围从以可见光为主,转为可见光、雷达、红外等多谱段侦察;卫星上的高分辨率合成孔径雷达能克服各种自然条件的限制,实现全天候、全天时的侦察;在高科技的支持下,无人侦察机、间谍飞机和侦察卫星能够 24 小时不间断地向后方的指挥部发送实时的战场态势图像和情报。

在伊拉克战争中,美军构建了陆、海、空、天一体化的无缝隙全源情报体系,组成以侦察监视卫星为核心,辅以战略侦察机、无人侦察飞机、特种侦察部队和突击分队的信息获取力量。综合运用这些侦察手段,就形成了优势互补的高中低、全纵深、全天候、全时空的侦察监视网,从而减少了“战争迷雾”,使战场对美军“单向透明”。因此,防护工程建设将不可避免地面临来自空间、空中和地面的立体侦察监视及光学、电子、红外、雷达、毫米波等多频谱侦察威胁,战场表现出了前所未有的透明性,对防护工程的隐真示假提出了更高要求。

防护工程的口部及其附近的暴露征候,例如,口部劈坡、渣堆、接近路、烟囱排烟及热辐射、人员与车辆等的活动等,一直都是工程伪装的难点。信息化战场的透明性提高了防护工程被发现的概率,从而对防护工程的隐真示假构成了新挑战。

2. 精确打击战提高了防护工程被毁伤的概率

精确制导武器是信息化战场上的主要打击力量,射程和精度将进一步提高,可在复杂环境中识别目标,自主选择攻击的目标和攻击的方式,甚至能有选择地攻击目标的关键部位。武器种类包括硬杀伤性武器和软杀伤性武器。硬杀伤性武器具有直接杀伤、摧毁、破坏目标的作用,如各类精确制导炸弹、战术空地导弹和巡航导弹、电磁脉冲武器等;软杀伤性武器能够干扰、压制、弱化敌武器装备及其系统功能,如电子、光电和水声干扰器,计算机病毒等。

精确制导弹药对防护工程威胁较大,具有极大的作战效能优势。海湾战争中,多国部队发射的精确制导弹药只占发射弹药总量的 9%,却摧毁了约 80% 的重要目标。精确制导武器的特点如下:

(1) 命中精度高。在先进制导控制技术支撑下,最新精确制导武器在制导技术上更多地采用了卫星制导(GPS)、红外和激光制导技术,命中精度非常高。

(2) 侵彻深度深。美国已装备的钻地常规武器主要有钻地导弹和钻地炸弹两种。钻地导弹采用穿甲弹头,弹头重 50~135kg,撞地速度 600~800m/s,钻土 50~70m,钻钢筋混凝土 2~4m,钻混凝土高达 6m;而钻地制导炸弹分重磅和小型两种,其中重磅钻地弹重 500~2000kg,撞地速度 200~400m/s,钻土 30~70m,钻混凝土 2~6m。

(3) 爆炸威力大。从最近几次高技术局部战争来看,美军打击一般较坚硬的目标用 1000~2000lb^① 精确制导弹药,打击十分坚硬的目标用 3000lb 以上的钻地弹,防护工程将

^① 1lb(英磅)=0.454kg。

面临着越来越大口径常规武器的精确打击。

美国雷声公司 2008 年 1 月对 1000lb 两级串联战斗部进行试验,前级战斗部爆炸形成高达 10000m/s 的高温金属射流,在岩石或混凝土中穿孔,为后级随进战斗部进入坑道或掩体内爆炸开辟通道。据称,可穿透 11m 厚的花岗岩或 6.1m 厚的 86.8MPa 钢筋混凝土。

美军巨型钻地弹 MOP (Massive Ordnance Penetrator),代号为 GBU-57/A/B,重量为 13600kg,药量为 2700kg,是迄今为止美国拥有的威力最大的钻地武器,仍在 B-52H、B-2A 轰炸机上测试。宣称可穿透 8m 厚 69MPa 的钢筋混凝土、40m 厚中等强度的岩石或 60m 厚 35MPa 的钢筋混凝土。

3. 多种杀伤手段的应用增大了防护工程的防护难度

在最近几次高技术局部战争中,电磁脉冲炸弹、高功率微波武器、石墨炸弹以及温压弹等多种特种炸弹应用于战场,无疑增大了防护工程的防护难度。

以温压弹为例,与传统高爆炸药弹药相比,温压弹独特的爆炸毁伤效应主要体现在长持续时间高压冲击波和热杀伤上,以及因爆炸吸氧造成人员窒息伤害。温压弹的爆炸冲量大大高于传统 TNT 等高爆弹药,温压弹的爆炸效果比传统高爆弹药、甚至传统的燃料空气弹更强劲、持久,被认为同时具有传统高爆弹药和燃料空气弹的混合爆炸性能。实践表明,温压弹独特的爆炸毁伤效应特别适合于打击坑道等封闭空间内的人员和设备,信息化战场上防护工程面临温压弹精确打击的严重威胁。

4. 关于核武器的威胁

第二次世界大战后到 20 世纪 80 年代初,出于对爆发核战争的恐惧,防护工程主要是防核武器的破坏效应。自 20 世纪 80 年代后期开始,随着国际安全形势的转变,防护工程逐渐转向了防常规武器的破坏效应。信息化战争将是核威慑条件下的高技术局部战争。有核国家仍然视核武器为维护国家安全的重要基石,不断调整核战略,在继续发展核武器的同时,积极探索新的核武器技术。美国政府研究核钻地弹、低当量核武器和“除剂”武器,缩短核试验准备时间,并研究下一代核武器,以便破坏地下深埋掩体。俄罗斯努力研发新型机动弹头以及新一代重型洲际弹道导弹。英国秘密扩建核武器生产基地,并就合作开发新一代微型、廉价的核武器与美国进行多次谈判。法国对核战略进行了调整,增加了可用于打击“无赖国家”的核武器数量。印度在今后一段时期内,将重点构建以陆基核导弹为主、轰炸机和核潜艇为辅的“三位一体”战略核力量。朝鲜、伊朗、以色列等潜在的核国家也在极力试图发展核武器。此外,核大国正在利用计算机模拟和次临界试验等技术手段,保持现有核武器的有效性和探索新的核武器技术。

事实表明,世界爆发核战争的可能性依然存在,防护工程不应放弃对核武器的防护。目前,核武器正向精确化、钻地化、小当量、效应裁剪化(如 NEMP 武器)等方向发展。美国也将冷战时期的“核大战”转变为了“有限核打击”,重点打击对方地下指挥中心和战略武器基地等军事战略目标。所以,在未来冲突中,对手可能会将改造后的小型核武器用于打击重要防护工程,大大增加了防护工程被毁伤的概率。

1.2.3 信息化条件下防护工程的防护

精确制导武器是信息化战场上的主角,必然决定了防护工程存在的必要性。特别是

对弱国或以积极防御为主的国家,防护工程更是战胜高技术武器装备强国的王牌。因此,防护工程的地位只能加强,不能削弱。

信息化战争条件下,新的军事理论和作战样式,以及日新月异的武器装备发展都将对防护工程的防护提出更高要求。可以预见,目前乃至今后相当一段时期内,防护工程的防护仍以工程防护为主,并积极贯彻工程防护与主动防护相结合的综合防护指导思想。

1. 工程防护

工程防护,是依靠防护工程的结构、天然地质材料及人工遮弹材料等工程措施对抗来袭武器的传统防护手段,也称为被动防护。工程防护能充分利用天然岩体的防护层厚度,充分利用新材料、新技术,达到隐真示假、提高抗力的目的。

实践证明,工程防护仍是目前最为有效、可靠的防护手段。尽管工程结构受到效费比等因素的限制,但还有很大的发展空间,可以有所作为。工程结构采用新结构、新材料并综合集成多种防护技术,是抗精确制导弹药打击的重要保证。当防护工程的埋深达到一定深度时,现有的精确制导钻地武器就显得无能为力了。例如,GBU-28 在钢筋混凝土或中等坚硬岩体中的侵彻深度不超过 6.0m,据此可推断,坑道岩体防护层厚度大于 30m 时,可确保工程安全。即使考虑重磅钻地弹的重复打击时,所需要的岩体防护层厚度也不会超过 80m。

2. 主动防护

高技术战争条件下,防护工程伪装隐身和抗大威力精确打击的难度越来越大。因此,用防护高技术对抗高技术武器的防护技术应运而生。相对于被动防护,这种防护技术称为主动防护。主动防护是指采取各种高新技术,对来袭武器进行主动拦截、摧毁,或者干扰、引偏,将其距离防护目标一定距离时主动破坏或削弱其打击能力。主动防护变被动挨打为主动进攻,使来袭武器距离目标一定距离时爆炸,从而大大降低了对防护工程的破坏作用。

主动防护作为一种超近程反导系统,是工程目标信息化防护技术开发的重点,对提高目标防护的高科技水平以确保其防护效能具有重要意义。为确保工程的防护效能,必须设置由对来袭武器监测预警系统、计算机智能化控制系统以及受控发射拦截、破击系统组成的主动防护系统,对精确制导武器实施积极主动防护。

主动防护对精确制导武器的毁坏途径,既可以通过毁坏来袭武器的火工系统达到,又可以通过毁坏来袭武器的信息系统达到;主动防护对精确制导武器的毁伤手段,既可以通过主动防护体系的火工部分对来袭武器进行引爆,又可以通过主动防护体系的信息系统对来袭武器进行引偏。可能的主动防护手段包括射流、预制破片、爆炸成型弹丸、子弹、跳雷、电磁干扰等。

3. 综合防护

从本质上讲,现代战争是作战体系间的整体较量。同样地,防护工程受到多种武器与多种破坏效应的威胁,防护工程与打击武器间的较量,不可能依靠单一的对抗措施来提高防护工程的生存概率,而是防护体系与武器系统的综合较量。防护工程必须针对来袭武器发现、识别、命中、摧毁等的各个阶段,综合采取隐真示假、工程防护、主动防护等各种手段,即所谓的“综合防护”手段,提高防护工程的战时生存概率。

综合防护包括多种武器的防护和防护手段的多样化两个方面。多种武器包括各种侦