

钻地武器的毁伤效应及深地下防护工程关键科学问题

范鹏贤¹, 王明洋^{1,2}

(1. 解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

[摘要] 防护工程是国防威慑力量的重要组成部分,具有重要的战略地位。美俄等军事大国大力发展的深钻地(核)武器已经对我国重要防护工程的生存造成了严重的威胁。总结了外军现役钻地(核)武器的性能指标与发展前景,对钻地武器的毁伤效应进行了评估和分析,综述了侵彻效应、爆炸成坑效应、爆炸地冲击效应等方面的研究成果。针对新时期面临的主要威胁,简述了提高防护工程的防护能力的主要措施和技术途径,提出了主被动结合的综合防护体系、深部非线性岩体力学、摆型波与超低摩擦现象、多弹聚集打击效应等目前亟需开展研究的关键科学问题。

[关键词] 钻地武器;毁伤效应;深地下;防护工程

[中图分类号] E928;E955 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)05-0047-12

1 前言

防护工程能确保国家领导人和指挥体系的安全与指挥稳定,能有效保障有生力量和战争潜力的安全,是国防威慑力量的重要组成部分,具有重要的战略地位^[1]。世界主要军事大国无不十分重视防护工程的建设 and 加固改造。

20世纪80年代以前,美国一向以进攻性武器系统作为国防威慑力量。但是,在世界军事大国的进攻性武器发展到能“确保相互摧毁”的情况下,防护就上升到了至关重要的地位。谁既能攻又能防,谁就占有真正的优势。美国经过反复论证,得出结论^[2]:“在未来战争中,最后胜利者不是握有武器最多的国家,而是经受打击能生存下来并能迅速恢复国民经济的民族”。

海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争和伊拉克战争等战争实践表明,完善的防护工程体系在高技术局部战争中仍具有极为重要的作用。但是,随着

世界新军事变革和信息化战争的新发展,防护工程建设面临着诸多新的严峻挑战。为了应对新军事变革挑战,适应信息化战争要求,各国都加大投入,研究现代化战争条件下防护工程面临的新问题,努力构建一体化、信息化的高抗力防护工程系统。

2 钻地武器发展现状

重要军事目标的坚固化和地下化大大促进了侵彻技术和钻地武器的发展。在近期的多场局部战争中,钻地武器得到了较好的运用,发挥了巨大的威力,成为摧毁敌方坚固目标及地下深层目标的有力武器。近年来,钻地武器的毁伤能力得到了很大提高,已对我军地下防护工程造成了巨大的威胁。

2.1 钻地常规武器

钻地弹又称深侵彻炸弹,是一种能够钻入目标深层引爆的弹药,主要用于攻击机场跑道、地面加固目标和地下深层设施。依据钻地原理的不同钻地炸弹主要分为两类:第一类是使用串联式战斗部

[收稿日期] 2013-03-20

[基金项目] 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目(51021001);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目资助(2010CB732003);国家自然科学基金杰出青年基金项目(50825403)

[作者简介] 范鹏贤(1983—),男,江苏赣榆县人,博士,讲师,主要研究方向为地下工程防护与岩石力学;Email: fan-px@139.com

破坏防护层的钻地弹。其主要原理是在主战斗部前面加装一个聚能装药战斗部,利用聚能装药产生的自锻弹丸打出一个较大的穿透孔,然后主战斗部通过这个孔侵入地下工事内部进行爆破。第二类是以动能进行侵彻的钻地弹。其主要原理是利用动能弹头对目标进行高速撞击,侵彻地下设施的防护层。

动能钻地弹的威力较串联式钻地弹更大,对土壤的侵彻力能达到300 m,也能穿透30 m厚的混凝土防护层,因此受到美俄军方的热捧。动能钻地弹的钻地性能主要取决于钻地弹与目标的碰撞速度,由此产生的问题包括研制可承受高冲击过载的壳体材料和钝感炸药。有报道指出,美国空军正在试验火箭助推GBU-27/B和GBU-28/B炸弹,从而将对目标的碰撞速度提高到1.0~3.5马赫^[3]。然而受壳体材料性能的影响,动能钻地武器在不受损前提下与目标的碰撞速度是有限制的,这也限制了钻地武器的钻地深度。

西欧国家通常采用的复合(串联)战斗部设计钻地弹。通过使用先驱空心装药战斗部削弱目标,复合战斗部钻地弹增强了小口径动能钻地弹的效能。对比分析表明:复合战斗部钻地武器能够更好地对付混凝土目标,而且复合战斗部钻地武器对付目标时对武器与目标表面碰撞角角度的要求较低,即使碰撞角度较小,武器仍能有效地对付目标。

目前美军正在开发的若干种新技术使炸弹能够钻进地下更深,并能够更准确地命中地下掩体^[4]。大多数现役钻地武器都是利用下落期间重力的作用来获得撞地速度(约450 m/s)。装上火箭推进装置后,可以使碰撞速度增加1倍。这样钻地弹在硬花岗岩地层中钻进的深度可以增加75%,而在软土层中钻进的深度可以增加近10倍。

根据美国国防部战略计划局和美国空军技术预研室的设想,未来美军钻地弹头将具备击穿整个花岗岩山体,摧毁假想敌国位于地下300~800 m的中央指挥中心的能力。为了达到这个目标,美战略计划局和空军拨款进行了一系列先进技术研发。比如,更加适合钻地弹头的“多事件硬目标引信”,为钻地弹探测地下设施深度和具体位置的“地下目标综合情报系统”,利用数字仿真技术对钻地弹进行研发的“数字钻地弹”技术。

美国空军提出了未来钻地弹的几大构想,其中包括:从近太空轨道发射的“箭”式钻地弹以超高速直射地球上的地下坚固堡垒,它可以达到800 m的

穿深;利用精确制导技术引导多枚重型钻地炸弹反复对同一目标进行贯穿,从而达到鱼贯式钻地轰炸的效果。美国还在研究使用洲际导弹来运载巨型穿地弹头进行全球钻地打击的可能性。这种项目一旦成为现实,钻地弹就将升级为具有全球打击能力、能够对敌国地下要害目标进行一击必杀的具有战略意义的打击兵器。

总体来讲,美国钻地弹技术发展最快,装备的钻地弹品种数量最多,并已发展成庞大的钻地弹家族。图1为目前美军现役的先进钻地武器及其后续发展方向,预计在不远的将来,美军将有能力将常规钻地弹的钻地能力提高到60 m以上混凝土(岩石)或300 m以上土壤,并将常规钻地武器的相关技术应用于钻地核武器的研发,从而将钻地武器的侵彻能力和核武器的爆炸毁伤能力结合起来。

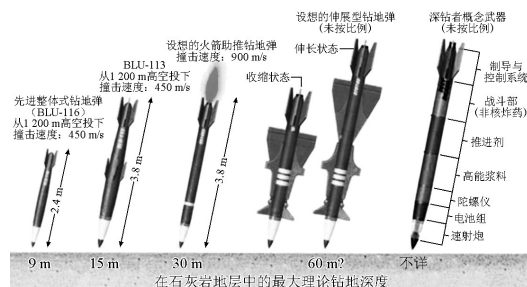


图1 钻地弹发展趋势

Fig.1 Development tendency of earth penetrating weapons

2.2 钻地核武器

2.2.1 研制背景

随着地下防护工程技术的飞速发展,各国修建了大量防护能力更强的地下加固深层设施,用来保护具有战略意义的军事设施^[5]。常规钻地武器对付地下深层设施仍然力不从心。要对付深埋战略设施,必须使用核钻地武器。

目前,美国已经装备了B61-11核钻地弹,并计划研制当量更小的坚实型深钻地核武器^[6]。

坚实型核钻地弹也称为“地堡炸弹”,或称为“掩体终结者”^[7]。促使美国研究坚实型核钻地弹计划的始作俑者是2001年的《核态势审议报告》。该报告称^[8]，“目前有70多个国家将地下设施用于军事目的。全世界共有10 000多个地下设施,其中将近1 400个被确认或怀疑为战略目标(大规模毁伤性武器、弹道导弹基地、领导或高层指挥控制中心)所在地。”美国政府官员认为,用常规武器很难摧毁加固

的防护工程,因此必须发展能摧毁深埋地下目标的核弹头。

目前,美国的核战略力量规划从以往的“基于威胁”模式转向“基于能力”模式^[8]。后一种模式更注重对手可能如何作战,而不是对手可能是谁或者战争可能在哪里发生。军事分析家认为,当前世界上有上万个地下加固设施,为适应未来战争的需要,它们将只会更深、更坚固;“基于能力”的模式不会放弃对付地下加固设施的手段;因此,钻地弹与深埋加固防护工程的矛、盾之争将是长期的。

2.2.2 美国钻地核武器的发展历史

为了能在核打击中首先摧毁苏联导弹发射井、地下指挥中心等地下高价值战略目标,从上世纪50年代中期开始,美国主要依靠当量900万t、弹坑深达150m的B53型核航弹作为钻地核弹。由于当量太大、弹头的重量和尺寸太大、且只能用笨重的B-52战略轰炸机携带,给作战使用带来诸多不便。

随着弹道导弹技术和核弹头小型化的飞速发展,美国于1979年研制可用于中程弹道导弹“潘兴”II上的钻地核弹头。后很快研制成功美国也是世界第一种钻地核弹头W86。

20世纪80年代末,美国制定了一项新战略^[9],旨在使苏联的战争机器在冲突爆发后数小时便处于瘫痪,为此“美将发展一种威力强大到完全能穿透苏联最深处地下堡垒、在战争爆发后数小时便把隐蔽在那里的苏联领导人全部消灭的新武器”。正是在这种战略思想支配下,钻地核航弹B61-11(见图2)问世了。截至1998年4月,该弹共进行了26次空投试验,被钻地介质有沙地、硬质地层、坚实地面、岩石、混凝土、坚硬冻土等。该弹战斗部重549kg,外径0.34m,长0.37m,威力300t~30万t当量,穿透能力2~15m,端头材料为含有强穿透能力贫化铀的合金钢钻地头锥,弹头引爆深度3~6m,对地下目标的毁伤半径为几百米量级^[10]。



图2 B61-11钻地核弹

Fig.2 B61-11 earth penetrating nuclear weapon

美国于1998年春天开始部署B61-11。估计目前至少已装备了50枚。这是美国自苏联解体以来首次为其核武库补充新的钻地核航弹。美国逆时代潮流,公然装备这种当量可调、适于多种机型投放、能执行特种作战任务的第三代核武器,对我国战略防护工程的生存造成了严重的威胁。

2.2.3 钻地核武器技术的发展前景

目前制约钻地核武器研发的主要关键问题主要有3个:a.进一步提高战斗部的侵彻能力;b.确保钻地过程中核弹头的可靠性;c.在确保摧毁目标的同时,减小放射性物质扩散和核污染。

侵彻能力的问题,是常规钻地武器和钻地核武器的共同问题,因而完全可以在常规武器的框架下进行。目前比较可行的方法,一是提高弹体飞行速度和攻击速度,二是优化弹形参数,如提高弹体的长径比等,来达到增强侵彻能力的目的。由于这部分研究不受核武器相关公约的限制,因而有望在近期内取得较大突破,在10至20年内,钻地武器战斗部的侵彻能力有望提高到60~300m。

常规钻地战斗部在应用于核弹头时,还涉及到核弹头的可靠性问题。核弹头结构复杂,一般情况下,高速撞击将会导致弹体内部的器件、装置材料被损坏,导致爆炸序列、引信、火工品以及所用的电子元器件受到严重破坏或早爆。这是研制钻地弹能否成功的关键技术障碍。这一问题使钻地核武器的研发受到了一定的制约。因而研制既耐冲击、又能在最佳时刻引爆的新型核战斗部是未来一段时间的重要课题。

钻地核武器目前还不可能钻到不泄露核爆炸放射性物质的深度。美国在内华达州进行了大量地下核试验,得出结论:100t级核弹在70m以上深度,1000t级核弹在135m以上深度才有可能避免产生核物质泄漏。核物质泄漏问题是目前制约小当量钻地核武器发展的主要问题。如果这一问题得到解决,钻地核武器的主要舆论障碍将不复存在。

一些武器科学家希望,采用包覆超高硬度的纳米材料等措施,低当量钻地核武器能够深入地下花岗岩30m以上。预计2015年前后,美军小当量深钻地核武器技术将趋于成熟,2020年前后,小当量深钻地核武器很可能会研制成功并应用于实战中。当前,美国正在寻求新的设计方法,其近期目标是把B61-11的钻地深度由2~15m提高到20~150m,并尽量减少附带毁伤,以摧毁在300m深的

坚硬岩石中的防护工程。

3 钻地(核)武器的毁伤效应

钻地(核)武器对地下防护工程的毁伤效应主要有侵彻效应、成坑效应和地冲击效应等。

3.1 侵彻效应

对侵彻问题的研究可以追溯到18世纪。1742年Robbinst和Euler就开展了弹体对靶体的侵彻的实验研究。目前,工程上所采用的侵彻深度计算公式大多属于经验公式,其中影响较大的有美国桑地亚实验室推出的Young公式及Forrestal公式,美军陆军工程兵推出的ACE公式,美国防护研究委员会推出的NDRC公式,前苏联别列赞公式等。

所有的经验公式可以分为两大类,一类是以NDRC公式为代表的半经验、半分析类公式。该类公式主要是根据空腔膨胀理论利用不同的阻力假设导出不同的侵彻深度预估公式。另一类是以Young公式为代表的纯经验公式,该类公式是利用大量的实验数据拟合出来的。这些公式对于土体等软弱介质的侵彻深度计算公式比较成熟,各个经验公式的计算结果精确度较高。而对于岩石和混凝土等脆性固体介质的侵彻深度经验公式就不够理想。

经验公式均是依赖于各种模型实验数据及理论近似分析得出的,由于人为因素和实验环境的限制,目前还无法做到模型实验与原型的理想相似,且现在的钻地弹体形式多样,速度更高,而几乎所有的经验公式中都没有包括尺度效应,即缺乏最基本的物理基础,因而目前公布的各类预估公式只适用于各自的特定研究对象,具有很大的局限性。

空腔膨胀理论^[11-12]给出了弹体表面上压力的封闭解,并由此得出弹体侵彻的减速度-时间数据和总的侵彻深度。20世纪80年代,实际应用空腔膨胀理论时,摩擦力被考虑进理论模型。成功的模型会正确提供各种影响钻地深度的靶体参数,有助于了解钻地的机理。但经研究发现,空腔膨胀理论建立的侵彻近区的速度场分布规律是一个错误的表达式,且该模型对侵彻近区粉碎散体材料的性质缺乏表征,对靶体背面对侵彻过程的影响也缺乏研究。

微分面力法^[13]是20世纪70年代初Bernard提出的一种分析方法,它把弹体看成是具有六个自由度的刚体,给出了弹体外表面上每一点法向和切向应力的具体表达式。微分面力法实际上是弹体的六个自由度刚体运动分析,该方法的一个局限性在于

总共需要9个参量,而只有2个参量(密度和声速)是通常所知道的,其他参量需要通过靶体实验结果的分析 and 回归而经验性地确定,所以这种方法只能算是一种半经验半分析的方法。

我国在20世纪50年代开始进行常规武器作用下的结构破坏实验。由军委工程兵组织过一些实验研究,当时主要是为了验证和修订国外主要是前苏联提出的一些经验公式,以解决当时国防工程的计算问题。20世纪90年代开展的穿孔破甲弹对石灰岩和花岗岩侵彻研究更把这项研究和后期的穿甲弹侵彻混凝土研究推向了一个新的阶段。随着国内外侵彻武器的发展,对侵彻效应的研究逐步深入。从近几年国内的文献资料来看,在侵彻效应的实验研究、理论分析和数值计算方面都得到迅速提高。

在岩土类材料中的侵彻效应方面,解放军理工大学开展了大量的工作^[14-19]。钱七虎,王明洋等^[14,15]从防护工程角度出发,运用“短波”理论,提出了侵彻近区介质的广义内摩擦压缩模型,揭示了弹体侵彻介质的内摩擦状态的变化规律;提出了弹体侵彻和贯穿的相似规律,为得到具有宽广尺度应用的局部破坏计算理论和模拟实验技术提供了理论基础;建立了弹体斜侵彻钢筋混凝土、单层及多层岩土介质的最大侵彻深度及过载历程的计算公式,为防护工程和战斗部设计提供了环境力学参数。

总参防护工程研究所、中国工程物理研究院、北京理工大学等单位也开展了混凝土靶的侵彻/穿甲理论、混凝土的动态本构、弹形侵深系数、弹体侵彻的攻角效应等方面的研究工作。

国内关于侵彻毁伤效应的研究尽管研究单位众多,并且在某些领域已达到了一定深度,但偏重于机理的研究多,面向于应用的工程研究少。在目标的毁伤效应研究中,国内研究的差距主要表现在两个方面:一是基础研究缺乏系统性和延续性;二是应用研究和基础研究脱节,研究成果不能尽快形成和转化为战斗力。

3.2 爆炸成坑效应

爆炸成坑作用是早期核武器打击地下目标的主要毁伤效应之一^[20]。根据爆炸物埋深(炸高)的不同,爆炸的成坑作用有较大的差别。军事领域中,爆炸成坑作用被广泛用于钻地武器的研发和防护工程的优化设计。

图3为不同埋深(炸高)爆炸时岩土介质中的成坑作用的示意图。当爆炸物的埋深逐渐增大时,爆

炸的成坑作用逐渐增大。当爆炸比例埋深增加到一定数值时,爆炸抛掷飞散的岩土体最多,形成的弹坑体积最大,此时的比例埋深称为最佳埋深。爆炸物比例埋深超过最佳埋深时,爆炸的成坑能力逐渐变小。当抛掷飞散的岩土体为零,此时的比例埋深称为最大埋深或临界埋深。

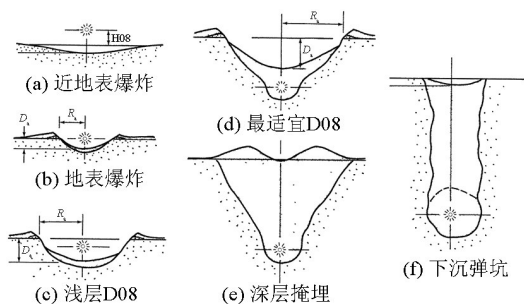


图3 爆炸成坑作用

Fig.3 Crater effect of underground explosions

对抛掷爆炸的研究主要关心两个方面的问题:一是如何最大限度地发挥爆炸的成坑作用以造成难以修复的损害;二是如何避免成坑作用以控制爆炸产物的飞散。因此,研究装药量与比例埋深、漏斗坑体积之间的关系等是该领域的核心问题。

利用抛掷核爆炸实验,美国和前苏联对抛掷核爆炸效应进行了深入的研究,并开展了大量的地下核爆炸和模型试验^[21]。地下核爆炸的经验表明,在核爆炸正常抛掷条件下,对于1 kt能量级别的弹药,单位耗能量约为10 kg/m³;当能量增加到100 kt时,单位耗能几乎增加了一倍。与化学爆炸相比,核爆炸较小的抛掷效应可以解释为这些爆炸在形成锅形空腔的能力上的差别^[22]。

当重力影响成为决定性的因素时,对弹药能量1~10 kt和埋设深度为40~400 m的成坑作用核爆而言,新计算方法的研究集中在对坐标中半径 B 、深度 H 和弹坑体积 V 等实验数据的概括上

$$\begin{cases} \frac{B}{q^{1/3}} = f_1 \left(\frac{h}{q^{1/p}} \right) \\ \frac{H}{q^{1/3}} = f_2 \left(\frac{h}{q^{1/p}} \right) \\ \frac{V}{q} = f_3 \left(\frac{h}{q^{1/p}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中 q 为爆炸当量, h 为弹药埋设深度, H 为弹坑深度, B 为弹坑半径, p 值为相似参数。

美国在1951—1968年期间进行了一系列抛掷爆炸实验。在对冲积层和玄武岩中的核爆炸和TNT爆炸获得的数据进行处理后,发现 $p=3.4$ 时实验关系式误差较小。深入的分析表明,在描述抛掷弹坑的半径、深度和弹药埋设深度时参数值 p 取了不同的数值。缺少一个统一的相似参数使得对埋设参数和核爆炸弹坑大小的预测变得复杂。在弹药埋设的岩石特性,特别是湿度变化的情况下,弹坑形成的过程不能满足简单的相似律,并且小当量的爆炸结论也不能推广到大当量的爆炸上^[23]。对于抛掷核爆而言,研究一些可以正确考虑到爆炸当量、爆炸源能量的高密度、围岩特性、以及岩块地质和地质构造的影响的计算方法是十分必要和有意义的。

在化爆条件下抛掷爆炸时岩土介质的最大破坏体积与装药量的关系类型可以表示成公式

$$V = aq + bq^{0.75} \quad (2)$$

其中 a 和 b 均为与介质有关的常数。

破坏体积的形成主要源于两个不同的过程:岩土自中心区向外的位移和岩土本身的抛掷。其中岩土的位移取决于其物理力学特性,近似服从几何相似律;而岩土的抛掷则发生在重力场中,因此必须考虑重力的影响。公式对核爆炸的适用性,还需要从物理意义和试验数据处理两个方面进行分析和验证。目前这方面的工作尚不完善。

3.3 爆炸地冲击效应

地下核爆炸时,大多数能量通过冲击波的形式传播到周围的介质中,从而对地下防护结构造成毁伤。钻地武器的地冲击作用是其主要毁伤作用,对地下防护工程的安全造成了直接的威胁。

3.3.1 质点速度、加速度和永久位移

图4为在内华达岩石靶场和法国拉甘花岗岩靶场(撒哈拉)中记录的质点速度的结果,该测量是在无自由面(地面)的影响下完成的。

图5为不同类型岩体中加速度峰值随比例爆距的关系。从图中可知,与坚硬的花岗岩相比,在凝灰岩、冲积岩等较软的岩石中,质点速度的峰值大约要小一个数量级。这就说明地冲击波的参数及其衰减的性质与围岩介质类型是密切相关的,较坚硬的围岩介质可获得较大的地冲击参数。比例爆距的远区,在坚硬的、有稍微裂隙岩石中的地下核爆炸作用下,质点速度峰值是介质爆炸运动中的一个稳定属性。

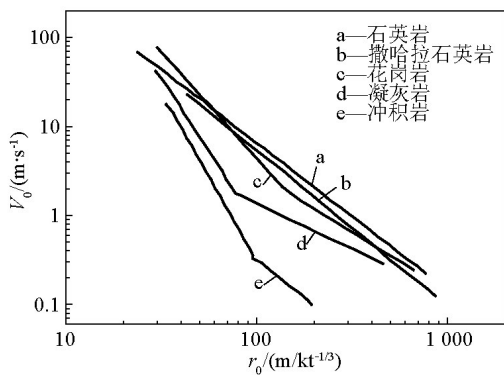


图4 质点速度峰值与比例爆距的关系

Fig.4 Relationship between particle maximum velocity and proportion of detonation distance

爆炸力学中,一般将某一区域地冲击参数利用爆炸相似律简化为几何相似律,即立方根相似律,下式可很好地描述质点速度与比例爆距关系:

$$v = A \left(\frac{r}{q^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

式(3)中, r 为与爆源间的距离, q 为爆炸当量, v 为测点速度,系数 A 和衰减系数 n 取决于进行爆炸的条件和岩石的物理力学性质。

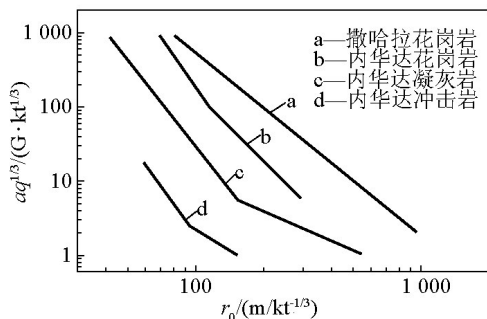


图5 加速度峰值与比例爆距的关系

Fig.5 Relationship between particle maximum acceleration and proportion of detonation distance

实验结果表明,不同介质中不同药量爆炸所引起的最大质点速度统一于相同的的关系式,这表明不同介质中的封闭爆炸,在评价波动参数时利用按 $\sqrt[3]{Q}$ 的几何相似原则是正确的,并且几何相似在跨越10个数量级中是一个科学的模拟准则^[24]。

50~1 000 m/kt^{1/3} 当量范围内地下核爆的质点永久位移与质点速度峰值的变化规律大致相同,即硬岩中的永久位移幅值大于软岩,结合速度和加速度规律,说明较软的岩石衰减能量更快^[25,26]。

3.3.2 应力波参数及其衰减规律

对大范围的地下目标的毁伤效应,应力波起主要作用。公开的地下核试验资料较少公布完整的应力-时间曲线,关于应力时间的更多的成果来自各种理论计算^[14]。

应力波特征时间包括应力波走时、应力波升压时间 t_r 和正相持续时间 t_+ 。图6为理论计算得到万吨级别TNT核爆应力波到达测试点耗时。从图中可以看出,在接近爆心区域,激波速度远大于介质声速,因此表征波阵面速度的曲线斜率较大,具有非线性。随着传播距离增大,激波逐渐变为弹性波,故曲线后部分表现为线性,且其波速较小^[27]。

对地下核爆炸而言,当冲击波能量衰减蜕化为应力波后,其波形可近似用三角波描述^[14]。给出应力波正相作用时间(半周期)为

$$t_+ = \frac{r}{2C_p} \quad (4)$$

升压时间近似为

$$t_r = \frac{r}{6C_p} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, r 为距离爆心的距离, C_p 为岩石介质中的纵波速度。

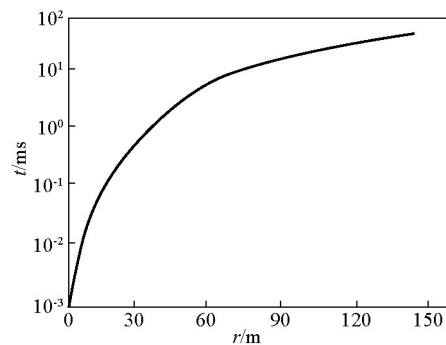


图6 理论计算应力波到达时间

Fig.6 Analytical arriving time of shock wave

在具有内摩擦力及相对小的体积改变(坚硬岩石)中应力波的传播的非定常问题的解表明,应力波的衰减近似服从下列规律^[28]

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{A}{r_0^{2-\alpha}}, 2-\alpha=n \quad (6)$$

式(6)中, A 为常数; $\alpha = \frac{\nu}{1-\nu} \approx 0.2 \sim 0.4$, ν 为泊松比; r_0 为装药半径。

在低压力区中,应力波的衰减取决于爆炸当量的大小。如图7所示,由于介质中应力波的衰减依

赖于波的频率。在均匀介质以及单晶石中,弹性纵波的衰减与频率的平方成正比。

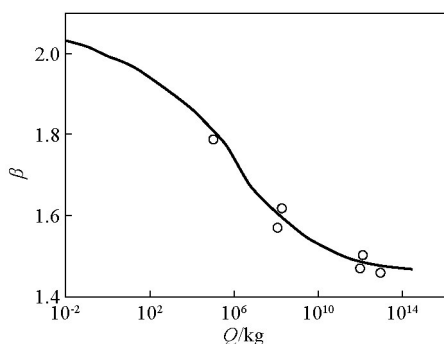


图7 不同规模爆炸时岩石中爆炸波的衰减指数
Fig.7 Attenuation indexes of explosions in rock with different charges

对于大多数的岩石来讲,这种依赖关系为线性的。因为爆炸波的频率随爆炸的当量增加而减小,也因此减少了能量的吸收。对于由小当量爆炸所产生的短爆炸波,自由裂缝可以是完全的内部反射的边界,这样爆炸波就在一个岩石结构块中衰减。随着爆炸当量的增加,通过裂缝的波动能量份额增加。在发生大当量爆炸时,爆炸波的波长远大于岩石结构块的特征尺寸,这时岩石的裂隙特征对于爆炸波的影响很弱,在这种情况下,自然的块状岩石可以看成为均匀介质。虽然对于其他岩石,衰减指数随当量的增加而变化的范围不一样,但衰减的规律是一样的。

3.4 钻地核武器耦合到地下的能量诱发地震效应

钻地核弹对地下加固目标的破坏,主要依赖于核爆效应的能量向地下的耦合,表达为武器的核爆总能量转变为运动介质动能的份额。它取决于核爆深度、地质条件与核弹设计。

地面核爆炸时,爆心以上的能量不能作用到地下,此时耦合到地下的能量是爆炸能量通过汽化、液化以及高压做功引起的。由于气体、固体的密度差异很大,高压做功的维持时间也短,耦合到地下的能够有效维持地下应力波传播的能量很少。当爆炸在一定埋深条件下发生时,在地面拉伸波影响到爆心前,爆心位置的高压一直存在,使得耦合到地下的能够有效维持地下应力波传播的能量大大增加,也使得对地下目标的破坏大大增强^[29]。

一般认为,只要具有数米的埋深,耦合到地下的能量就比地面爆炸耦合到地下的能量增加一个

量级左右。图8说明了随着比例埋深的增加,耦合到地下的能量大幅增加,比例埋深从0增加到0.2 m/kg^{1/3}时,与地面爆炸相比,耦合到地下的能量增加了1个多量级,随后的增加趋势变缓^[30]。

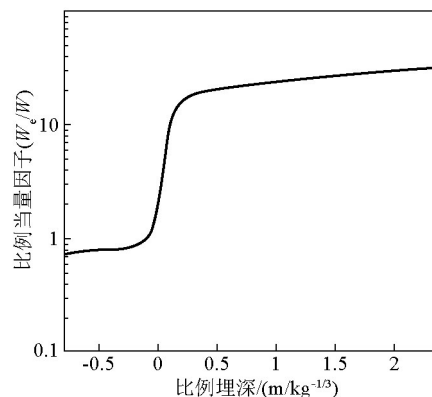


图8 核爆炸耦合到地下的能量与比例埋深的关系
Fig.8 Relationship between proportional buried depth and energy coupling to earth in underground nuclear explosion

美国国防部国防威胁缓解局(DTRA)的效应手册-1(EM-1)定义一个等效当量因子(EYF),表示总能量与地下冲击波能量随比深(或比高)的关系。研究表明,300 kt钻地武器在地下3 m处核爆时(比深为0.45)地下冲击波的EYF约为20,即相当于6 000 kt触地爆对地下的力学效应。这充分说明钻地武器在大大减小核爆当量的条件下提高了对地下加固的摧毁能力。

美俄地下核试验资料表明,耦合到地下的核爆炸能量,能诱发地下岩体的地震效应,使块系岩体产生运动和永久位移。这既是岩石动力学的科学前沿课题,也是深地下防护工程设计必须应对的关键课题。

3.5 核生化和电磁效应

地下核爆炸时的深度,达到不会在地面产生危及人员生存的放射性污染,这个深度就是封闭深度。现有钻地武器的侵彻深度远远未达到所需的封闭深度。由于钻地武器的侵彻深度不足于自封,它爆炸时大量的放射性尘埃和产物将从弹坑喷射到空气中和周围区域。因此,任何坚实型深钻地核爆炸也不能避免出现放射性等附带毁伤效应。

一些支持低当量钻地核武器研发和使用的人士认为,核爆炸产生的高热可以用来打击和销毁敌对国家的地下生化武器和大规模杀伤性武器。然

而,由于地下爆炸汽化区和熔化区范围并不大,核弹头必须精准地袭击地下生化武器库,才能保证销毁所有的生化毒素。如果没有准确击中目标,将有可能造成毒素大面积扩散,从而带来严重的不利后果。

核爆炸中,电磁脉冲所占能量的比例仅为0.1%左右,然而,核爆炸早期裂变产物发射出的贯穿能力很强的中子流和 γ 射线,可以轻易贯穿岩土介质和工程结构,可在大范围内对战略指挥系统、无线通信系统、各类电子设备等造成严重损害,甚至导致指挥体系的瘫痪。

4 防护工程面临的威胁及其主要防护措施

4.1 我国防护工程面临的威胁

我国的地下防护工程大多建于上世纪六七十年代,工程抗力设计标准偏低,伪装问题突出,综合防护能力薄弱。近十年来,高抗力防护工程相关研究受到重视,但总体来讲,形势仍不容乐观。

钻地弹爆炸后,冲击波向外传播,典型的破碎区延伸至1.5~3倍空腔半径,这个区域中的多数结构将被完全破坏。处于远区的洞库结构所受地冲击压力的大小则取决于它与爆心的距离以及介质的性质。研究表明,在花岗岩中1 kt填实封闭爆炸的峰值压缩应力在60 m远处可以超过100 MPa,10 kt爆炸在140 m远处也可超过100 MPa。完全无衬砌的坑道在10 MPa应力水平下即可能坍塌,导弹发射竖井之类的加固结构也只能承受约50 MPa的压力。因此,即便是小当量钻地核弹,只要突破钻地深度这个技术关口,钻到足够深度后引爆,对任何浅埋洞库的毁伤性打击将是无疑的。防护工程的设防应该首先要选择高质量的围岩作为被覆层,立足于降低侵彻深度;其次应该具有足够的埋深,使爆炸冲击波有足够的距离衰减;除此之外,还应加强自身的抗毁伤能力,包括结构抗力、抗震减震和抗电磁毁伤效应措施等。

4.2 抗常规钻地武器直接打击

武器对防护工程的直接打击主要依靠战斗部的侵爆效应完成。目前对防护工程的口部防护主要通过伪装和工程结构本身的抗力实现。而遮弹层是重要工程口部防护的重要措施。

对遮弹层的研究分为材料和结构两个方面^[31]。在遮弹层材料方面,主要采用各种纤维混凝土和活性粉末混凝土等高性能材料提高遮弹层的抗侵彻

能力。试验表明,在混凝土中加入纤维,能有效提高混凝土的韧性,减小弹坑尺寸,提高遮弹层的冲击抗力,而采用粉末混凝土则可以大大提高混凝土的强度,降低钻地弹的侵彻深度。在遮弹层结构研究方面,主要关注其使钻地战斗部偏航、滞速、破坏等性能,并适当考虑其经济实用性。如美军的交叠式钢筋混凝土中空梁板结构。

解放军理工大学近年来开展了大量侵爆效应试验,先后研制了具有屈曲、偏转、滞速等作用的不同种类遮弹层材料^[32-38],如刚玉块石混凝土、钢纤维活性粉末混凝土、纤维陶瓷等。王明洋团队根据侵爆效应与弹体和靶体参数的相互作用机理,研制了系列新型抗侵爆材料与复合结构,防护能力可达C40钢筋混凝土结构的4倍以上,实现了头部结构抗高速度、大口径钻地弹打击的能力。

4.3 坑道削波措施和防护门

坑道中的爆炸波传播时,由于坑道壁面的限制,压力、冲量和热量无法及时向外扩散,易对坑道内部的人员和设备造成严重的毁伤。坑道内冲击波的传播和衰减规律受到多种因素的影响,其中坑道截面形状、几何布局和坑道中的障碍物设置等对削减冲击波的毁伤作用具有重要意义^[39-41]。

美军北美防空司令部夏延山地下指挥中心的入口通道不设防护门,而是把防护门设在接近工作区的地方,且面对中央入口通道的侧向,避开冲击波的反射压力作用。这样不仅可减轻防护门重量和降低造价,而且可有效抗住进入通道内的高强度冲击波。这种设置方式对我军防护工程具有很强的借鉴意义。研究表明,T形坑道布局、变截面结构、坑道内设置水袋,以及自封装置等,均是行之有效的坑道消波技术。

防护门是防护工程出入口内抵抗武器毁伤的主要防护设备。对高抗力防护门的研究主要集中在两个方面:一是新型高性能材料的研发和应用;另外一方面是采用结构优化的方法对防护门的结构形式、支撑形式等进行优化。随着核武器命中精度提高,国外大量工程中井盖及其防护门已经采用了抗正向入射空气冲击波超压36 MPa以上技术,而目前我国大多数重要工程抗空气冲击波超压为10 MPa,难以满足现代战争的防护要求,因此迫切需要突破以往防护理念,研究超高抗力防护门。

4.4 抗爆抗震减震措施

试验和理论计算表明,即使工程结构能抗住核

弹的袭击,往往也会因震动毁伤而使工程内人员伤亡,从而丧失其防护效能。因此,即使是深埋而坚固的高抗力防护工程,如果不采取有效隔震减震措施,防护工程内部的人员和设备也可能会受到严重震动毁伤^[42,43]。

目前,在防护工程的爆炸冲击震动控制中,主要是采用地板隔震等方式为主的被动控制。地板隔震是在工程结构底板与房间地板之间设置隔震装置,用以吸收爆炸冲击震动能量,从而减小地冲击对结构和设备的损坏。常见的隔震装置有钢丝绳隔震器支承的隔震地板和垫层材料支承隔震地板以及由螺旋钢弹簧支承的隔震地板等。被动隔震装置具有隔震机理明确、结构简单、成本低等优点,但被动隔震缺乏对环境变化的适应能力,控制效果和范围有限,对较宽范围的爆炸冲击震动和大跨结构的控制效果不理想。随着自动控制、信号处理等技术的迅速成熟,震动的主动控制技术逐渐发展起来。主动控制系统通常由传感器、运算器和施力作动器三部分组成,是将现代控制理论和自动控制技术应用于结构震动控制的新技术。但也存在控制装置复杂、需要外部能量输入、可靠性差等缺点。混合控制是不同控制方法相结合的组合控制,可以合理选取不同控制方式的优点。而半主动控制与被动相结合的混合控制应该成为今后工程结构震动控制研究的主要方向之一^[44,45]。

目前的防护工程隔震系统设计仍然主要基于经典的线性隔震理论,通过隔震频率设计和隔震器的阻尼设计来解决隔震问题。已广泛应用于防护工程的钢丝绳隔震器虽具有非线性特性,初始刚度大、平时使用稳定性好,但仍按照简化线性设计,造成隔震系统需要的配重过大。因此,需要进一步研究隔振器的非线性设计理论,并研制适合防护工程智能组合控制的新型隔震系统。针对防护工程日益提高的隔震要求,隔震器弹性单元的材料也从单一材料向组合、复合材料的方向发展,从单一隔震向隔震与抗冲兼容方向发展,从以位移、加速度等单一物理量控制向最小能量传递和最小震动传递率等多目标控制方向发展。

4.5 电磁防护措施

国内外对于电磁脉冲防护的研究,以核电磁脉冲防护研究较为系统。在美国陆军工程部门针对防护工程编写的《地下设施防电磁脉冲与电磁信息泄漏的工程设计》中,系统给出了工程设计指南。

我国在军事工程建设和人防工程建设中也已发布了相应的标准。虽然工程电磁防护设计开展已有多年,但目前的电磁防护设计仍旧是一个单向的过程,设计方案是根据规范条文要求和设计人员经验而确定的,缺乏反馈评估的过程。从综合考虑不同电磁环境的影响、合理分配防护指标、优化设计方案和评价防护效果的角度考虑,迫切需要开展电磁防护效能综合评估技术的研究^[46,47]。

防护工程内部的信息系统和电子、电气系统分布广、构成复杂、重要程度高,电磁防护技术研究面临如下三方面新的挑战:a. 综合防护针对的频段大幅度拓宽,急需有效的分析与描述模型;b. 复杂电缆系统对工程内部电磁环境形成重要影响,急需开展环境评估与防护技术研究;c. 对大范围、复杂体系结构的工程系统难以开展整体电磁防护试验验证,急需系统级的电磁防护效能评估手段。

5 防护工程的发展趋势及主要科学问题

5.1 从被动防护向综合防护发展

信息技术和高技术武器的快速发展深刻影响了战争形态。高度信息化的武器和日益增强的打击能力对防护工程构成了巨大的威胁。防护工程的防护应对措施必须系统化,消除短板,形成综合防护效应,从而实现战场生存能力的提升。

综合防护系统是近些年才出现的新概念^[48],其基本思路是将各种防护技术有机结合,实现总体防护效能的最大化。其总体架构可用图9表示。

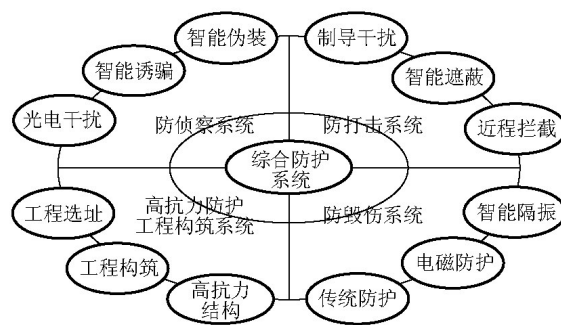


图9 综合防护系统示意图

Fig.9 Sketch map of comprehensive protection system

被动防护是工程防护的基础。坚固是军事与国防防护工程赖以生存的物质基础。坚固性主要包括三大要素:一是足够的防护层厚度,利用防护层使武器毁伤效应自然衰减;二是构建高抗力结

构,使工程主体能抵抗强冲击压力和震动效应,三是合理的平面布局和长穿廊口部系统,提高战场生存能力。与此同时,进一步采取主动防护措施,将被动防护与主动防护有机结合,可以显著提高军事工程的生存能力。主动防护措施有三方面:一是以伪装求生存,隐真示假,使敌火失去目标;二是干扰、误导来袭武器的制导系统特别是末制导系统,使其偏离或丢失目标,降低其打击能力;三是发展超低空、低空拦截技术,摧毁来袭武器。

综合防护系统继承了传统的防护技术,结合了信息技术,是信息化条件下防护工程的必然选择。

5.2 重要防护工程向深地下发展

兵圣孙武说“善守者,藏兵于九地之下”。为应对坚实型小型钻地核武器的威胁,战略防护工程不断走向深部,以利用工程结构上部数百米的岩石层来抵御钻地核武器的攻击。

北美防空司令部夏延山地下指挥中心是美国全球指挥系统中的高级指挥控制系统之一,担负着美国空间探测和跟踪、战略预警、防空等任务。该工程1966年建成并投入使用,由作战坑道、设备与供应坑道及口部系统组成。作战坑道防护层厚度为420~525 m,设备与供应坑道防护层厚度为360~420 m,口部系统防护层厚度为240~360 m,为长穿廊式出入口。前苏联也在莫斯科建立了庞大而复杂的地下战略指挥系统^[49]。

为了提高战略指挥工程,特别是国家级指挥工程的生存能力,国外一方面准备兴建防护层厚度达1 000~1 200 m的超坚固地下工程,另一方面对许多老工程进行加固改造,以适应未来战场环境的防护需要。大力发展深地下防护工程的建设、防护相关科学技术已经成为共识。

5.3 面临的主要科学问题

5.3.1 深地下防护工程构筑问题

随着岩石工程向深部的转移,岩体地应力、温度和地下水渗透压将进一步增加,岩体结构的非均匀性、非连续性的特点更加突出,施工难度将进一步增大^[50]。由于深部岩体“高地应力、高温、高渗流”的特殊环境影响,发生了一系列新的特征科学现象,如分区破裂化、冲击地压、岩爆等,这些现象利用传统的连续介质力学、传统的断裂与损伤力学及传统的非连续变形块体分析法无法完全解释清楚^[51]。由于缺乏合适的理论指导,大部分深部工程的设计与施工还是依靠工程经验来进行,具有较大盲目

性,致使工程中遇到很多困难。因此,针对性地开展深层地下空间开发中的带有共性的关键技术的研究,对有效合理地开发地下空间、优化施工、确保工程顺利进行具有特别重要的意义。

5.3.2 钻地核武器毁伤效应

对大规模爆炸的地冲击效应的研究一直是防护工程领域的重要研究内容之一。在高地应力条件下,地下核爆炸诱发的块系岩体的运动能量显著大于爆炸能量,且会引发传播速度较慢的大振幅摆型波。深部大尺度块系岩体的运动将给没有合理设计的深地下工程带来毁灭性的破坏^[52]。深部岩体超低摩擦现象内在机理的研究对于建立非协调、非连续、非线性的块体力学理论及其在地震机理、岩石冲击、岩压的动力表现形式等领域的应用研究具有重要的理论和应用价值^[53]。冲击作用下深部岩体的摆型波和超低摩擦现象是深部防护工程研究中亟需解决的科学问题。

多枚弹同时打击深地下工程是钻地核武器的重要作战方式。将多枚钻地弹头投送到目标区实施同时爆炸,利用多弹爆炸所产生的多个应力波的聚集效应,在地下一定深度处形成高应力叠加区以摧毁深地下坚固设施。运用多弹爆炸聚集地冲击效应的原理,可以提高装药爆炸效能5至6倍,并可在地下深处,产生大范围的高应力区^[54]。因此,利用多弹爆炸对深地下高抗力结构将构成严重威胁。对于这一种新式的核武器使用方式,其毁伤效应和相应的防护措施均未得到很好的研究。

利用地质力学模型试验模拟大规模地下爆炸是《全面禁止核试验公约》生效以来研究地下核爆炸的主要方法之一^[55]。常规模型试验法和离心模型试验法已经被大量应用于相关研究。但迄今为止,还有很多没有解决的科学问题,包括:(1)相似条件难以全部满足,如何简化研究对象和选取决定性参数的问题;(2)地下爆炸过程是一系列连续过程,如何确定起始参数使模拟结果具有最大的可信度;(3)地下爆炸受到地质条件的影响,如何确定边界条件和几何特征才能合理地考虑地质构造的影响;(4)如何模拟原有系统初始地应力的影响;(5)如何提高大型模型的加载能力和精确量测,等等。

5.3.3 深地下防护工程抗毁伤能力

如何提高工程结构本身的抗毁伤能力,一直是防护工程研究的核心问题之一。抗毁伤能力的研究主要集中在结构隔震减震、新型高性能材料、新

型高抗力结构、平面布局优化设计、电磁脉冲防护、防护结构计算理论等方面。虽然这些问题经历了几十年高强度的研究,但由于防护工程问题涉及多个学科,因而仍处在不断发展之中。该领域是防护工程的传统研究领域,文献较多,不再赘述。

6 结语

防护工程是抵御外敌人侵、保障国家安全的有效盾牌,是国防实力的重要组成部分,对遏制战争进程和夺取战争的胜利具有重要的战略作用。随着高技术武器尤其是坚实型钻地核武器毁伤能力的显著提高,我国防护工程面临着严峻的挑战。

通过对美国新型钻地核武器的技术发展分析与预测,和钻地核武器对深地下防护工程毁伤效应的分析,指出我国防护工程面临的现实威胁,结合我军地下防护工程建设和防护的需求,提出了防护工程综合防护和深地下化的发展趋势,并指出了构筑超高抗力防护工程亟需解决的关键科学问题。

参考文献

[1] 赵杰,余松林.防护工程:打造未来战争的智能堡垒[N].解放军报,2012-11-15.

[2] 赵剑.美国核战略的“变”与“不变”——对奥巴马政府《核态势评估报告》的分析[J].和平与发展,2010(4):46-50.

[3] 陈黎.美国空军寻求新一代钻地炸弹[J].飞航导弹,2011(6):82-85.

[4] 何唐甫,赵琼华,相阳.国外钻地武器发展动态[J].中国人民防空,2008(3):60-62.

[5] 邓春涛,窦万和,何唐甫.世界主要国家和地区防护工程发展状况研究[R].中国国防科学技术报告.洛阳,2005.

[6] 何唐甫,卢晓江,刘恒,等.美国坚实型钻地核弹的发展前景[J].中国人民防空,2006(9):61-62.

[7] 刘华秋.美国核钻地弹计划的来龙去脉[J].现代军事,2006(1):26-28.

[8] 朱国强.评布什政府的全面威慑战略[J].国防,2002(4):23-24.

[9] 军事科学院外国军事研究部.美国军事基本情况[M].北京:军事科学出版社,1997.

[10] 庞立.美国研制低当量钻地核武器剖析[J].现代军事,2002(7):56-57.

[11] Bishop R F, Hill R, Mott N F. The theory of indentation and hardness tests [J]. Proc Phys Soc, 1945, 57: 147-159.

[12] Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. Int J Solids Struct, 1997, 34: 4127-4146.

[13] Bernard R S, Creighton D. Projectile penetration in soil and rock: Analysis for non-normal impact [R]. AD-A081044, 1979.

[14] 钱七虎,王明洋.岩土中的冲击爆炸效应[M].南京:江苏科技出版社,2010.

[15] 钱七虎,王明洋.高等防护结构计算原理[M].北京:国防工业出版社,2010.

[16] 王明洋,邓宏见,钱七虎.岩石中侵彻与爆炸作用的近区问题研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2859-2863.

[17] 王明洋,谭可可,吴华杰,等.钻地弹侵彻岩石深度计算新原理

与方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1863-1869.

[18] 尹放林,王明洋,钱七虎.弹体垂直侵彻深度工程计算模型[J].爆炸与冲击,1997,17(4):333-339.

[19] 金丰年,刘黎,张丽萍,等.深钻地武器的发展及其侵彻[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(2):34-40.

[20] 郝保田.地下核爆炸及其应用[M].北京:国防工业出版社,2002.

[21] Nordyke M D. The soviet program for peaceful uses of nuclear explosions [R]. PB97-174429, 1996.

[22] 乔登江,韩学安,李如松.地下核爆炸现象学概论(上册)[M].北京:国防工业出版社,2002.

[23] 岳松林,王德荣,范鹏贤.岩土中不同规模爆炸的抛掷成坑效应综述[J].武汉理工大学学报,2012,34(增刊),94-99.

[24] Kocharyan G G, Spivak A A, Bodkov A M. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. Part II: estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data [J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(2):149-168.

[25] Kocharyan G G, Spivak A A. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. Part I: experimental data [J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(1):64-76.

[26] Fokin V A. Estimates of the maximum displacements in a longitudinal loading wave during underground nuclear explosions [J]. Atomic Energy, 2001, 91(1):223-240.

[27] Melosh H J. Shock viscosity and rise time of explosion waves in geologic media [J]. Journal of applied physics, 2003, 94(7):4320-4325.

[28] 钱七虎.岩石爆炸动力学的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1945-1968.

[29] 钱七虎,戚承志,王明洋.岩石爆炸动力学[M].北京:科学出版社,2006.

[30] 范鹏贤,王明洋.钻地核武器毁伤效应论证报告[R].中国国防科学技术报告.南京,2012.

[31] 何江华,王浩,桑宝岩,等.防护工程遮弹层研究综述[C]//第15届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册)2006,445-448.

[32] 唐德高,贺虎成,陈向欣.刚玉石固体遮弹特性的试验等[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2005,6(3):258-261.

[33] 郭志昆,陈万祥,袁正如,等.新型偏航遮弹层选型分析与试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2007,8(5):505-512.

[34] 严少华,李志成,王明洋,等.高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(3):237-241.

[35] 王明洋,张胜民,国胜兵.接触爆炸作用下钢板钢筋纤维钢筋混凝土遮弹层设计方法(I)[J].爆炸与冲击,2002,22(1):40-45.

[36] 王明洋,钱七虎,赵跃堂.接触爆炸作用下钢板钢筋纤维钢筋混凝土遮弹层设计方法(II)[J].爆炸与冲击,2002,22(2):163-168.

[37] 王明洋,刘小斌,赵跃堂.弹体在含钢球的钢纤维混凝土介质中侵彻深度工程计算模型[J].兵工学报,2002,23(1):14-18.

[38] 王明洋,王德荣,葛涛.钢纤维RPC抗局部破坏作用实用设计方法研究[R].中国国防科学技术报告.南京,2006.

[39] 沈俊,李永池,庞伟宾.化爆冲击波在90°拐角通道内的到时规律[J].中国工程科学,2006,8(3):53-57.

[40] 庞伟宾,李永池,何翔.化爆冲击波在T型通道内到时规律的实验研究[J].爆炸与冲击,2007,27(1):63-67.

[41] 何翔,庞伟宾,曲建波,等.防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏[J].爆炸与冲击,2004,24(5):475-479.

[42] 李晓军,李殿臣,李清献.国外常规武器破坏效应与工程防护技术研究[R].中国防护工程科技报告.洛阳,2000.

[43] 严东晋,钱七虎,唐德高.爆炸冲击震动下隔震系统设计的可靠性[J].土木工程学报,2001,34(3):23-28.

- [44] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 1-12.
- [45] 杨迪雄, 李刚, 程耿东. 隔震结构的研究概况和主要问题[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 301-311.
- [46] 周璧华, 陈彬, 高成. 现代战争面临的高功率电磁环境分析[J]. 微波学报, 2002, 18(1): 88-92.
- [47] 王鹏, 李万玉. 高功率电磁效应及防护技术研究概述[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(1): 81-83.
- [48] 朱万红, 王凤山, 王可定. 军事工程综合防护模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 81-83.
- [49] 钱七虎, 任辉启. 深地下防护工程中的科学问题[C]// 钱七虎院士论文选集, 2007: 635-643.
- [50] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448-455.
- [51] 钱七虎. 战略防护工程面临的核钻地弹威胁及连续介质力学模型的不适用性[C]// 第五届全国工程结构安全防护学术会议, 南京: 2005.
- [52] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2825-2830.
- [53] 吴昊, 方秦, 王洪亮. 深部块系岩体超低摩擦现象的机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 30(5): 769-775.
- [54] 邓国强, 周早生, 郑全平. 钻地弹爆炸聚集效应研究现状及展望[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(3): 45-49.
- [55] 陈安敏, 冯进技, 张向阳, 等. 深地下防护工程面临的问题与实验研究对策初探[J]. 防护工程, 2010, 32(5): 66-69.

The damage effect of earth penetrating weapons and key scientific problems of deep buried protective engineering

Fan Pengxian¹, Wang Mingyang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] The protective engineering is an important constituent part of the deterrent force of national defense, and of great strategic position. The earth penetrating weapons (nuclear and non-nuclear) developing by countries with military power has already posed a great threat to the safety of our protective engineering. On the summary of the developing earth penetrating weapons, the damage effects of earth penetrating weapons are reviewed, with emphasis on penetrating effect, crater effect and explosion ground shock effect. Aim at the main threatens, the major measures and technological approaches are discussed. And several key scientific problems, including comprehensive protection system, nonlinear deep rock mass mechanics, pendulum type wave and ultra-low friction phenomenon, and gather effect of several n-bombs, are proposed, which are with urgent need to be researched.

[Key words] earth penetrating weapons; damage effect; deep buried; protective engineering