

防护工程中分配层研究进展与展望

高光发^{1,2}, 李永池¹, 赵凯¹, 罗文超¹

1. 中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027

2. 安徽理工大学能源与安全学院; 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽淮南 232001

摘要 以防护工程中分配层的设计为研究对象, 总结分析了分配层的研究现状以及存在的问题, 认为理想的分配层应满足安全可靠、经济合理、工艺可行、结构和材料可靠等条件, 应具备足够的抗静压强度和一定的抗冲击载荷强度, 能够最大程度地削弱入射应力波强度并充分吸收爆炸产生的能量, 并且具备抵御二次或多次爆炸冲击的功能。对今后分配层设计中亟待解决的问题及其发展趋势进行了初步探讨, 研究表明, 今后一段时间内分配层的材料还是以混凝土、普通砂土等为主, 分配层结构应采用分层结构和含空壳结构相结合的结构。研究结果为今后防护工程中分配层的研究和设计提供一定的参考。

关键词 爆炸力学; 防护工程; 分配层; 分层结构; 空穴; 应力波

中图分类号 X932, TU928

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.11.013

Research Progress and Prospect on the Distribution Layer in Protective Engineering

GAO Guangfa^{1,2}, LI Yongchi¹, ZHAO Kai¹, LUO Wenchao¹

1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

2. Key Laboratory of Safe and Efficient Mining Cosponsored by Anhui Province, Ministry of Education; School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui Province, China

Abstract Aimed at the design of distribution layer in defense works, the status and problems involving distribution research were summarized and analyzed. The perfect distribution layer should be safe, economical, practicable, and reliable, and have enough static compressive strength and good resistance to the impact, which should weaken the stress wave strength and absorb the energy deriving from explosion to the greatest extent under the condition of repeated impact loadings. And some issues that need to be resolved and the development tendency in the design of distribution layer were discussed. The results show that the main materials in the distribution layer are still concrete or soil at the present stage and days to come, and the perfect structure should be the combination of layered structure and cavities-contained structure. All those could give a reference to the design of advanced distribution layer in defense works.

Keywords explosion mechanics; defense works; distribution layer; layered structure; cavity; stress waves

0 引言

军事斗争在物质上可归结为矛与盾的较量。防护工程是“盾”的主要形式, 它是指利用工程措施隔断或减弱武器效应对特定目标的破坏作用, 其在战时肩负着抗核武器非直接命中和常规武器直接命中的防护使命。挖掘修建的成层式浅埋结构是人防工程的常见形式, 典型的成层式人防工程结构主

要有伪装土层、遮弹层、分配层和支撑结构 4 部分, 其中分配层的主要作用是对爆炸波削弱、吸收、屏蔽, 即抗爆防震。

随着军事科技的发展, 武器装备的性能不断提高, 常规武器的命中精度越来越高, 武器的装药量和爆炸威力越来越大, 最高达 2000kg 以上。同时, 随着核武器向着小型化、钻地化、精确化、实用化和常规化方向发展, 实施“外科手术室”的

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2011-03-28

基金项目: 总装备部武器装备探索研究项目(7131013); 国家自然科学基金项目(50802092); 国家人防办“十一五”科研项目; 安徽理工大学博士科研启动基金项目

作者简介: 高光发(中国科协所属全国个人会员登记号: S031900290M), 副教授, 研究方向为应力波理论及应用、工程安全及防护技术, 电子信箱: gfgao@ustc.edu.cn

有限核打击的可能性反而大大增加。可以说,在高技术战争实施的高速度、高精度、高强度打击下,即使人防指挥工程的遮弹层能有效拦截来袭弹药,使其在工程表面爆炸,爆炸产生的巨大的冲击波仍很有可能对工程顶板造成震塌破坏。

然而,迄今为止,国内外的绝大多数研究工作都集中在防护结构中新型遮弹材料、遮弹层结构形式和抗侵彻能力以及相应的设计计算方法方面。分配层的研究很少见报道,现阶段主要还是利用普通砂土作为分配层的主要材料。随着武器命中精度和破坏威力的增加,对防护工程结构抗爆性能的要求越来越高。在实际工程中,由于受到经费和地质条件的限制,不可能通过无限制地增加防护层厚度来达到抗爆要求。因此,研究新型分配层从而有效提高地下防护结构对各类航弹、炮弹、钻地弹及导弹的抗御能力,延长其生存寿命并保证其安全工作,始终是防护工程领域的核心研究课题,具有极其重要的价值。

本文总结了近 20 年来防护工程中分配层的研究进展,并对其应用原理和不足之处进行分析研究,提出现阶段分配层研究亟待解决的几个问题,并对防护工程中分配层研究的发展趋势进行初步探讨。

1 单层分配层

1.1 增加分配层厚度

研究发现,强应力波在岩土介质中传播时,随着传播距离的增加,应力波峰值逐渐减小,即应力波峰值与传播距离成反比关系^[1-4]。因此,增加分配层厚度一般作为提高分配层削波性能的常用手段,数值计算也表明提高分配层厚度对削弱冲击载荷有明显的效果^[5]。

然而,纯粹通过增加分配层厚度削弱冲击载荷是不恰当的,主要有以下几个原因。

(1) 现阶段钻地弹装药量和爆炸威力远大于过去,只通过增加厚度的方法进行削波,分配层的厚度将非常大,这样既增加了成本,也会带来许多其他的工程问题。

(2) 虽然应力波峰值与传播距离成反比关系,但并不是线性关系,而是指数关系^[3]或幂函数关系^[1-4],即在爆炸区附近应力波衰减速度较快,而随着应力波峰值的降低其衰减速度也随着减小^[2,6]。这说明,当分配层厚度增加到一定值时,应力波强度随厚度的变化已经相对较小,再通过增加厚度的方式提高防护性能的效果较弱^[7]。

综上所述,通过无限制地增加分配层厚度进行削波,不仅在经济上不可行,在技术上也是不合理的。因此,合理的分配层设计应在保证分配层一定厚度的基础上,再采用其他方法和手段实现其功能。

1.2 分配层材料选择

试验^[8]和数值研究^[9]表明,应力波在不同性质的岩土介质中能量损耗和衰减速度相差较大,岩体中应力波的传播与岩石的质量及含水量明显相关。岩石质量好,应力波能量损耗

小、衰减慢;岩石质量差,能量耗损大、衰减快。对于存在裂隙、裂缝甚至破碎带的岩层,在含水情况下应力波衰减要比不含水的情况慢。因此,选择合适的分配层介质非常重要。

通过数值计算发现,随着材料的应变率影响因子黏度系数的增大(即应变率效应越明显),或材料屈服强度的减小,材料中的强应力波衰减速率增大^[10];而且,材料声阻抗值越小,应力峰值衰减就越快^[7]。因此,屈服强度相对较低、应变率较敏感、波阻抗较低的材料理论上是分配层的首选材料,如多孔材料和多胞材料等。近几年,多孔脆性材料(如多孔岩石或多孔混凝土)和泡沫材料在抗震工程中的应用受到关注。在多孔材料(多孔岩石^[11]、硬质聚氨酯泡沫^[12-13]、泡沫铝^[14]等)中,塑性压缩过程是多孔材料塑性力学行为的主要特征,孔隙坍塌效应使得应力波衰减加快,从而起到抗震吸能作用。

然而,多孔材料在分配层中的应用,现阶段很难得到推广,主要有以下几个原因。

(1) 多孔岩石和多孔混凝土虽然能够很好地起到削波吸能作用,但其抗压强度不能满足要求。而且长期在地下,孔隙容易被水注满,从而大幅减小其吸能特性。

(2) 泡沫铝和硬质聚氨酯泡沫虽然具有较强的吸能特性,但现阶段其工程造价过于高昂,将之用在分配层中不合实际,而且,如此大尺度泡沫材料的工艺和制造很难解决。

综上所述,分配层中纯粹利用单层吸能削波介质来大幅度提高分配层的抗爆抗震性能并不是行之有效的办法。

2 多层分配层

2.1 应力波在分层结构中的演化

根据波动理论可知,在一维线弹性情况下,假定强度为 σ_1 的入射波从声阻抗为 $\rho_0 c_0$ 的介质传播到声阻抗为 $\rho_1 c_1$ 的介质,其波阻抗之比 λ 为

$$\lambda = \rho_0 c_0 / \rho_1 c_1$$

则入射波经交界面后透射波强度 σ_T 和反射波强度 σ_R 为

$$\sigma_T = 2\sigma_1 / (1 + \lambda), \sigma_R = (1 - \lambda)\sigma_1 / (1 + \lambda)$$

由此可知,界面对应力波的反射和折射(透射)有较大影响,实验也证实了界面具有对冲击应变能的累积和阻滞作用^[15],因此,选择合适的分层结构能够起到较理想的削波作用。

2.2 分层分配层研究的现状和不足

研究表明,夹入波阻抗较低介质的多层结构对应力波强度衰减和能量吸收有着非常明显的作用^[16-17];将“软”、“硬”材料交替层叠构成的多层结构对应力波的衰减和弥散有较强作用^[18-19]。现场试验也表明^[20],分配层分层设置的人防工程对核爆炸冲击波峰值应力的衰减效果优于分配层单层设置的人防工程;在核爆炸条件下,分配层分层设置的人防工程结构顶面的应力冲量均小于分配层单层设置的人防工程;分配层分层设置的人防工程结构对核爆炸冲击波具有弥散效应,分层材料相同且各种材料的总厚度也相同时,采用周期循环布置时弥散效应明显加强,利用这一特性可显著降低核爆炸

空气冲击波产生的冲击对脆性材料的破坏作用。

然而,普通分层结构分配层存在以下不足之处。

(1) 分层结构中各层材料的排列方式还需进一步研究。并不是所有形式的分层结构都具有削波作用,当分层结构中各层按照波阻抗比递增的顺序排列时,反而起到增强应力波强度的效果。因此,必须按照各层材料的性能进行科学设计。

(2) 在分配层厚度一定的情况下,分层的层数、各分层的厚度还需进一步优化,这也是分层结构必须进一步研究的问题。事实上,虽然分层结构因界面的存在加强了结构的削波性能,但并不是分层越多越好,试验和理论分析^[21]都表明,当分层结构中单层厚度过小时,不仅起不到削波的作用,反而可能影响结构的整体吸能性能,不利于结构的削波吸能。

(3) 分层结构虽然能够对入射应力波起到一定的弥散作用,但由于界面为水平的,根据波动理论,其反射和透射角度较固定,特别是对于平面正入射波,其弥散功能非常有限,从而导致其吸能性能受到限制,局部破坏现象较明显。

3 新型空穴结构分配层研究中待解决的问题

从上面的分析可知,多孔材料或结构的削波和吸能作用非常明显,为克服普通多孔材料价格高、工艺难等困难,用新型含空穴结构作为防护工程中的分配层的思想逐渐被人关注。研究发现,应力波在经过空穴时发生明显的绕射和反射现象,空穴后方的应力峰值得到非常大的削弱,这说明空穴对应力波有较明显的绕射和屏蔽作用^[22-23],模型试验研究也证实了这一现象^[24]。

通过现场试验研究发现,含空穴结构的分配层对爆炸冲击波具有较强的削弱功能,相对于原始分配层,其后方的应力峰值缩小为原有的几分之一;含圆形空穴结构分配层的削波吸能性能强于同等条件下的含矩形分配层结构。这进一步说明了含空穴结构的新型分配层具有远强于原始结构的削波和吸能性能。

然而,在理论研究、数值计算和试验中均发现,新型结构存在以下有待解决的关键问题。

(1) 空穴的数量、大小及布置方式还有待进一步研究。

(2) 含空穴结构具备多孔岩石等多孔硬脆性材料同样的缺点,即随着空穴的增加结构的强度逐渐降低,结构强度和空穴量之间的优化是需解决的问题。

(3) 空穴在强爆炸冲击波的作用下由于层裂等效应迅速坍塌,可大幅减小后方应力波峰值和能量,但出现了两个问题:首先,对于现阶段串联钻地弹的第二次爆炸来讲,坍塌后的结构起不到原有的作用;其次,空穴完全坍塌后局部下陷过多,容易破坏上方遮弹层的整体性。

(4) 由于空穴的形状是柱状的,其平行于轴向和垂直于轴向的应力分布不均,不利于下方洞室顶板的支护。

(5) 当空穴充满水时,其削波性能明显下降,如何防止空穴进水也是需研究的问题。

4 分配层研究的发展趋势

4.1 分配层的研究目标

考虑到防护工程中分配层的主要功能和现阶段主要攻击武器的爆炸威力,理想的分配层应具备以下条件。

(1) 经济上合理、工艺上可行,这是分配层设计的基本前提。中国人防工程非常多,而投入又非常有限,所以在分配层上不可能有过大的投入。

(2) 有足够的抗静压强度和一定的抗冲击载荷强度,能最大程度地削弱入射的强应力波并充分地吸收爆炸所产生的能量。人防工程多建在闹市,其上常有人、车或临时设施的存在,所以必须具备足够的抗静压强度;其次,为更好地吸能,分配层的抗冲击强度不能过大,但也不能过小,即不能在强爆炸载荷下不屈服以致于洞室顶板坍塌,也不能在很小的冲击载荷下就屈服;最后,结构应具备阻尼和弥散功能,以便强应力波在分配层中运行的路径更长,能量被吸收得更彻底。

(3) 具备抵御二次或多次爆炸冲击的功能。即不能在第一次爆炸冲击载荷作用后,分配层的削波和吸能性能就迅速下降而不能对紧接而来的强冲击载荷进行有效的防御。

(4) 结构和材料要可靠。人防工程的设计规范要求其在一定的年限内保证其原有的功能,即选用的材料应具备抗老化、抗腐蚀等基本特性,且在设计时应考虑地下水对分配层削波吸能的影响。

4.2 分配层研究的展望

随着钻地武器爆炸威力的增大,分配层在防护工程中的作用愈加不可忽视,然而,由于近几十年来,主要针对遮弹层的抗侵彻性能进行研究,对分配层的研究极少,且这些研究成果还远没有满足现场应用的要求。对分配层的进一步研究势在必行,结合其研究目标,认为今后分配层的研究可参考以下要求。

(1) 强度等参数的确定。在设计分配层之前应考虑可能的最大冲击载荷的强度、波长及下方洞室顶板结构可承载的额定、最大载荷,以确定分配层额定削波系数和吸能因子。

(2) 材料的选用。综合考虑材料的物理特性和施工工艺以及工程造价,现阶段分配层材料主要还是采用常用工程材料如混凝土、普通砂土、岩石、钢筋、钢管等,其中主要介质材料应为混凝土和砂土。

(3) 结构的设计和优化。今后的分配层结构应是分层结构和空壳结构(特别是球壳结构)的结合,应利用理论、数值计算和试验等手段对所设计结构进行优化,使得强应力波能够在分配层中得到最大程度的吸收、透射应力波的强度尽可能小、结构的局部变形尽可能小、施工工艺尽可能简单。

5 结论

本文对近些年来防护工程中分配层的研究进行总结和分析,并在此基础上对今后分配层的研究和设计进行初步的探讨,得到以下结论。

(1) 随着新型钻地弹的爆炸威力日益增大,设计新型的分配层势在必行。

(2) 理想的分配层应满足安全可靠、经济合理、工艺可行、结构和材料可靠等条件,应具备足够的抗静压强度和一定的抗冲击载荷强度,能够最大程度地削弱入射强应力波并充分吸收爆炸所产生的能量,并具备抵御二次或多次爆炸冲击的功能。

(3) 结合中国的人防工程实际情况,认为今后一段时间内分配层的材料还是以混凝土、普通砂土等为主,应主要从结构上进行改进以加强分配层的抗震、削波和吸能特性。

(4) 防护工程中的分配层结构应采用分层结构和含空穴结构相结合的结构,并可利用理论、数值计算和试验等手段对所设计结构进行优化,使得强应力波能够在分配层中得到最大程度的吸收、透射应力波的强度尽可能小、结构的局部变形尽可能小、施工工艺尽可能简单。

参考文献 (References)

- [1] 陆遐龄. 岩体中爆炸应力波的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 364-372.
Lu Xialing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1992, 11(4): 364-372.
- [2] 尚嘉兰, 沈乐天, 赵坚. 粗粒花岗岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 212-215.
Shang Jialan, Shen Letian, Zhao Jian. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 212-215.
- [3] 胡刚, 郝传波, 景海河. 爆炸作用下岩石介质应力波传播规律研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 270-273.
Hu Gang, Hao Chuanbo, Jing Haihe. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3): 270-273.
- [4] 李孝兰. 硬岩中大当量地下爆炸应力波的测试和分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(4): 393-395.
Li Xiaolan. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2001, 20(4): 393-395.
- [5] 赵跃堂, 于小存. 分配层厚度对成层式结构动力响应的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊): 3540-3545.
Zhao Yuetang, Yu Xiaocun. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S): 3540-3545.
- [6] 董永香, 夏昌敬, 段祝平. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 60-65.
Dong Yongxiang, Xia Changjing, Duan Zhuping. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(2): 60-65.
- [7] 张亚栋, 张虹, 方秦, 等. 航弹冲击引起的遮弹层下自由场应力确定[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2004, 5(4): 53-56.
Zhang Yadong, Zhang Hong, Fang Qin, et al. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2004, 5(4): 53-56.
- [8] 王占江, 李孝兰, 戈琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1827-1831.
Wang Zhanjiang, Li Xiaolan, Ge Lin, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1827-1831.
- [9] 周钟, 王肖钧, 赵凯, 等. 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 296-302.
Zhou Zhong, Wang Xiaojun, Zhao Kai, et al. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 296-302.
- [10] 姚磊, 李永池, 胡秀章, 等. 材料的弹粘塑性本构关系和应力波的演化[J]. 力学季刊, 2004, 25(3): 410-416.
Yao Lei, Li Yongchi, Hu Xiuzhang, et al. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2004, 25(3): 410-416.
- [11] 周钟, 王肖钧, 肖卫国, 等. 多孔岩石中应力波传播特性及震源函数的研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(11): 1310-1316.
Zhou Zhong, Wang Xiaojun, Xiao Weiguo, et al. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, 38(11): 1310-1316.
- [12] 任志刚, 楼梦麟, 田志敏. 聚氨酯泡沫复合夹层板抗爆特性分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(1): 6-10.
Ren Zhigang, Lou Menglin, Tian Zhimin. *Journal of Tongji University*, 2003, 31(1): 6-10.
- [13] 石少卿, 张湘冀, 刘颖芳, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料抗爆炸冲击作用的研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 56-58.
Shi Shaoqing, Zhang Xiangji, Liu Yingfang, et al. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(5): 56-58.
- [14] 石少卿, 刘仁辉, 汪敏. 钢板-泡沫铝-钢板新型复合结构降低爆炸冲击波性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4): 143-146.
Shi Shaoqing, Liu Renhui, Wang Min. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(4): 143-146.
- [15] 陆渝生, 张宏梅, 连志颖. 界面对应力波作用的动光弹试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 352-355.
Lu Yusheng, Zhang Hongmei, Lian Zhiying. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(4): 352-355.
- [16] 李夕兵, 古德生, 赖海辉. 爆炸应力波遇夹层后的能量传递效果[J]. 有色金属, 1993, 45(4): 1-6.
Li Xibing, Gu Desheng, Lai Haihui. *Nonferrous Metals*, 1993, 45(4): 1-6.
- [17] 董永香, 黄晨光, 段祝平. 多层介质对应力波传播特性影响分析[J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 59-65.
Dong Yongxiang, Huang Chenguang, Duan Zhuping. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(1): 59-65.
- [18] 赵凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
Zhao Kai. The attenuation and dispersion effects on explosive wave of layered protective engineering [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [19] Han C, Sun T. Attenuation of stress wave propagation in periodically layered elastic media [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 243(4): 747-761.
- [20] 李砚召, 王肖钧, 吴祥云, 等. 分配层分层结构对核爆炸荷载的防护效果试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(9): 931-935.
Li Yanzhao, Wang Xiaojun, Wu Xiangyun, et al. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(9): 931-935.
- [21] 毛勇建, 李玉龙. 杆中嵌入薄板的应力波传播行为[J]. 固体力学学报, 2008, 29(3): 239-244.
Mao Yongjian, Li Yulong. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2008, 29(3): 239-244.
- [22] 李永池, 姚磊, 沈俊, 等. 空穴的绕射隔离效应对后方应力波的削弱作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 193-199.
Li Yongchi, Yao Lei, Shen Jun, et al. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 193-199.
- [23] 王志亮, 李永池. 防护层中空穴对轴线应力波的绕射屏蔽效应研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1221-1226.
Wang Zhiliang, Li Yongchi. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1221-1226.
- [24] 陆渝生, 连志颖, 邹同彬, 等. 柔性及刚性分配层防护机理的动光弹试验分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2003, 4(6): 54-57.
Lu Yusheng, Lian Zhiying, Zou Tongbin, et al. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2003, 4(6): 54-57.

(责任编辑 代丽)