

集团装药爆炸下新型结构的削波性能

高光发^{1,2}, 李永池², 罗文超², 姚磊²

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

摘要:采用含孔穴的新型结构作为人防工程中的分配层,利用集团装药爆炸模拟航弹触地爆炸,对4种分配层结构抗集团爆炸载荷的防护效果进行了相似模拟室外化爆试验,并利用非线性软件LS-DYNA对该4种模型进行了数值仿真。结果表明:同样厚度下,孔穴的存在使得后方的应力峰值被明显削弱,而且圆形孔穴对应力峰值的削弱程度要明显强于矩形孔穴;但在孔穴上方加入薄钢板层后,孔穴对其后方应力的削弱效果减弱,这是因为嵌含薄钢板后应力波的透射系数增大。研究结果为抗爆防震工程中新型防护层的科学设计提供了一定理论依据。

关键词:工程研究;爆炸试验;爆炸力学;抗爆设计;分配层;孔穴

中图分类号: TU751. P 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)03-0057-06

Clipping Performance of Advanced Structure under Explosion of Mass Ammunition

GAO Guang-fa^{1,2}, LI Yong-chi², LUO Wen-chao², YAO Lei²

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, P. R. China;
2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, P. R. China)

Abstract: An advanced structure containing cavities is adopted in distribution layers. A series of large-scale similarity-simulation tests are carried out on defense effect of the four structures for mass ammunition, and numerical simulations are developed by LS-DYNA software. The results indicate that the stress peak is distinctively decayed behind the cavities, and the defense effect of circular-section cavity is more effective than that of rectangle-section cavity. But because the transmission coefficient of stress waves of the structure increases, the defense effect is weakened when a thin steel plate is laid above the cavities.

Key words: engineering research; explosion testing; mechanics of explosion; anti-explosion design; distribution layer; cavity

目前,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”的有限核打击的可能性反而大大增加^[1]。人防工程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如图1所示,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。

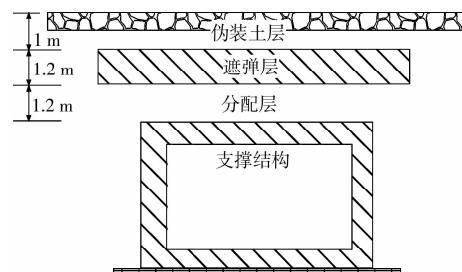


图1 典型成层式防护结构示意图
赵跃堂^[2]对不同厚度的分配层的防护效果进行

收稿日期: 2010-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50802092); 国家人防科研“十一五”规划项目

作者简介: 高光发(1980-),男,博士,副教授,主要从事应力波理论及应用、工程安全及防护技术研究, (E-mail) gfgao@ustc.edu.cn.

了研究,研究认为分配层的厚度增大时,其对来自遮弹层的冲击波载荷削弱作用愈加明显,且支撑结构上的载荷愈加均匀,有利于防护。Yankelevsky^[3]对地下土壤内近固壁的柱状装药爆炸的情况进行深入的研究,认为装药中心与固壁的距离等因素对土壤中的应力分布有很大的影响。Wang^[4]、董永香^[5]等人利用自编有限元程序、LS-DYNA 软件模拟出平面爆炸波在半无限混凝土介质中的传播与衰减特性,当厚度较小时,发现增加厚度能够在一定程度上提高衰减效果,但增大到一定值时,这种衰减效果就愈加不明白了。因此单方面的增加分配层厚度是不科学的。Wu^[6]等人研究表明沙土介质对爆炸波有较好的吸收阻尼作用。陆渝生^[7]、张亚栋^[8]等人对分配层结构和材料做了初步的研究,王肖钧^[1,9]、王礼立^[10]、Wang^[11]等人研究表明:合理的分层形式对核爆炸载荷的防护效果明显优于单层结构。

本文对不同形状、排列形式和结构的新型含孔穴结构的分配层进行了数值和试验研究。

1 理论分析

1.1 分层结构

事实上,在一维线弹性情况下,假定强度为 σ_i 的入射波从声阻抗为 $\rho_0 c_0$ 的介质垂直入射到声阻抗为 $\rho_1 c_1$ 的介质,可知入射波经过界面后透射波的强度 σ_T 为:

$$\sigma_T = \frac{2\sigma_i}{(1+\lambda)}, \lambda = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \quad (1)$$

式中 λ 表示 2 种材料的声阻抗之比。当 $\rho_1 c_1$ 无穷小时,可知其透射波强度趋于零,因此,如能够在以上的分层介质中插入一层波阻抗无穷小即接近真空的介质材料,就能最大程度上消减应力波;然而,这种情况只是理论上存在,实际工程施工中是没法实现的,而利用孔穴代替普通分层介质就能够最大程度上接近这种情况,所以,在分配层中插入孔穴是一种在理论上最优的吸能设计。课题组曾就孔穴对应力波的绕射、隔离屏蔽作用进行了数值研究^[12-14],研究表明,孔穴的存在能够在较大程度上削弱应力波的强度,从而对孔穴后方的介质或结构起到保护作用。郑志辉^[15]等人的试验也表明在防护层中存在空隙可加强对应力波的耗散。

同时,笔者对在孔穴上方置入一层薄钢板的结构进行了研究。假设土的波阻抗为 $3.06 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,混凝土的波阻抗为 $8.05 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,钢板的波阻抗为 $40.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

令 λ_{ab} 、 T_{ab} 、 F_{ab} 分别表示 a 、 b 两者介质的波阻

抗比、交界面上的透射系数、反射系数, n 表示在钢板中的反射次数,即

$$\lambda_{ab} = \frac{\rho_a c_a}{\rho_b c_b}, T_{ab} = \frac{2}{1+\lambda_{ab}}, F_{ab} = \frac{1-\lambda_{ab}}{1+\lambda_{ab}} \quad (2)$$

则当分配层结构中不嵌含钢板时,爆炸冲击波由遮弹层进入分配层的透射系数为:

$$\eta_1 = T_{12} = \frac{2}{1+\lambda_{12}} = 0.551 \quad (3)$$

式中 1 代表遮弹层材料 C40 混凝土,2 代表分配层材料黄土。

在分配层的混凝土和黄土之间嵌含钢板时,爆炸冲击波由遮弹层进入分配层的透射系数为:

$$\eta_2 = \frac{1 - (F_{2,1} F_{2,3})^{n+1}}{1 - F_{2,1} F_{2,3}} \cdot T_{12} T_{23} \approx 0.557 \times (1 - 0.58^{n+1}) \quad (4)$$

式中 1 代表遮弹层材料 C40 混凝土,2 代表嵌含的钢板层,3 代表应力分配层材料黄土。其中,(4)式中 $n=1$ 时,即厚度足够而不用考虑反射场时,其值为 0.234,此时,嵌入钢板使得透射系数有所减小,即起到了削波的作用。

然而,当钢板足够薄时,冲击波在钢板中的反射场不得不考虑,此时 n 值足够大时,

$$\eta_2 \approx 0.557 \times (1 - 0.58^{n+1}) \rightarrow 0.557 > \eta_1 = 0.551 \quad (5)$$

从公式(5)可以看出,嵌入钢板结构不仅不能削波,反而比不嵌含钢板的结构的后方应力峰值更大。而本次试验中钢板厚度相当薄(0.3 cm),所以当嵌入钢板的方案 3 对应力波峰值的削波效果反而不如方案 2。

1.2 圆形孔穴截面形状

如图 2 所示,当强度为 σ_i 的压缩波从波阻抗为 $\rho_1 c_1$ 的介质入射到波阻抗为 $\rho_2 c_2$ 的介质,当入射角为直角时,如图 2(a)所示,其入射波和反射波皆为平面 P 波,其强度如(1)所示。 $\lambda > 1$ 时反射波为拉伸波,而 $\lambda < 1$ 时则为压缩波。

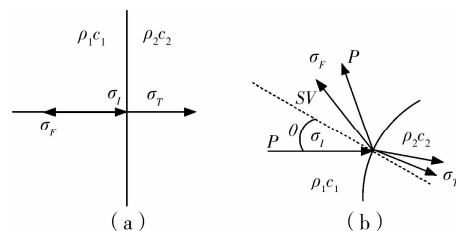


图 2 平面应力波在界面上的反射与透射

当入射角角度为 $\theta \neq \frac{\pi}{2}$ 且入射到自由界面时

(入射到其它界面时类似),如上图(b)所示,根据弹性波场理论可知,其反射波为一个 P 波(拉伸波)和一个 SV 波(剪切波),其 P 波的反射角也为 θ ,而 SV 波的反射角 θ' 根据 Snell 定律有:

$$\cot \theta' = \frac{c_1}{c_2} \sqrt{\cot^2 \theta + 1 - \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2}$$

其中 c_1 和 c_2 分别表示纵波和横波的波速。如令

$$p_1 \equiv \cot \theta, p_2 \equiv \cot \theta'$$

则反射 P 波和反射的 SV 波的强度满足 Knott 方程:

$$\begin{cases} \sigma_P/\sigma_1 = \frac{[4p_1 p_2 - (1 - p_2^2)^2]}{[4p_1 p_2 + (1 - p_2^2)^2]} \\ \sigma_{SV}/\sigma_1 = \frac{4p_1(1 - p_2^2)}{[4p_1 p_2 + (1 - p_2^2)^2]} \end{cases}$$

由上可知,虽然此 2 种情况都能起到削波的作用,但弧形界面能够产生漫射效应,对于有效空间,后者所反射的应力波明显经过更长的路线,其反射波场明显大于前者,如反射的波强度大于介质的破坏强度,后者的耗能作用明显大于前者,所以,在分配层中布置弧形界面即圆孔的耗能效果应该强于矩形孔穴。这个结论与下文的现场化爆试验结果完全吻合。

2 试验设计及数值模型

试验主要针对集团装药加载即模拟 750 磅航弹触地爆炸或钻地爆炸载荷作用于防护结构上的情况。该航弹的装药量为 175 kg,装药的 TNT 当量系数为 1.35,由于试验模型的缩尺比 1:4,利用相似关系:

$$p_m = f\left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)$$

式中, p_m 、 R 、 Q 分别表示峰值应力、测点与爆炸源间的距离、炸药量。可知模型中装药量应取为 $175 \times 1.35/64 = 3.69$ kg,而实际中是由 18 个块状 TNT 绑在一起组成,实际重量约为 3.9 kg。试验时装药位于遮弹层正上方中心位置,如图 3 所示。图中数字单位为 cm, S1、S2、S3、S4、S5 分别表示压力传感器设置点,其中, S1、S4、S5 位置处于结构正下方的中心线上, S1、S2、S3 处于分配层正下部。试验中通过这些传感器所测得的电压时程曲线进行计算,从而获得该节点的压力时程曲线,并利用这些曲线及压力峰值分析研究。

2.1 室外化爆试验设计

集团装药下化爆试验在解放军工程兵科研三所进行,试验中,采用量程范围 10~300 MPa 的 PVDF 压力传感器、YBF-3 性宽带应变放大器、三所自行研

制的 DHF-1 宽频电荷放大器、CS22125 型瞬态采集系统分析仪采集和记录各测点数据并利用波形整形技术进行处理。

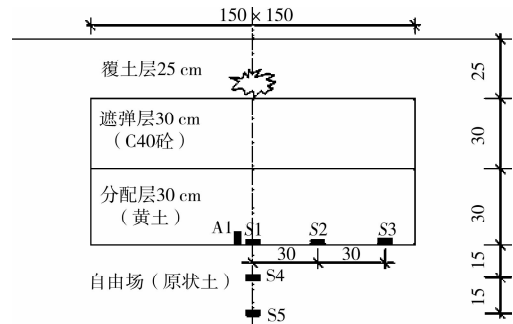


图 3 相似模拟试验模型

为了全面研究新型孔穴结构的吸能削波特性,试验采用 4 个方案,并对其进行对比研究。第 1 方案为参考模型,即原有的分配层形式(图 4);第 2 方案是在第 1 方案的分配层中加入直径为 16 cm 的圆管(图 5);第 3 方案是在孔穴上方加入一层厚度为 0.3 cm 厚的钢板(图 6);第 4 方案是将第 3 方案中的圆形截面孔穴替换为矩形截面的孔穴(图 7)。

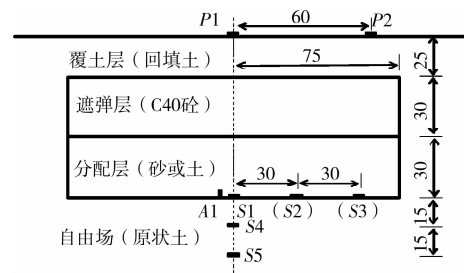


图 4 原始参考试验布置图

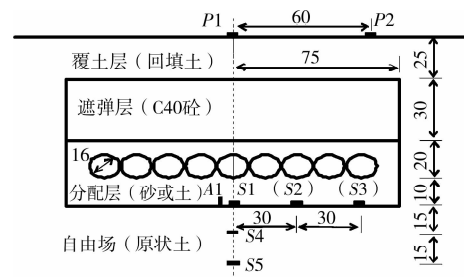


图 5 方案 2 试验布置图

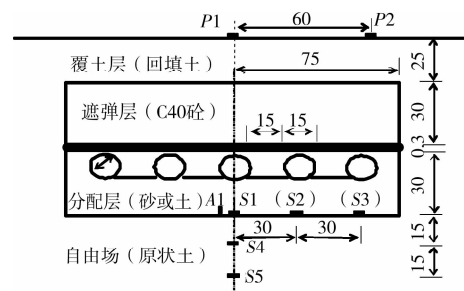


图 6 方案 3 试验布置图

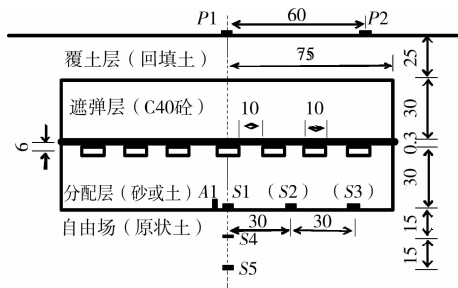


图 7 方案 4 试验布置图

2.2 数值计算模型

为了更系统地研究新型防护结构的防护效果, 利用商业非线性软件 LS-DYNA 对其进行数值模拟, 其中模型的平面图与上图一致, 模型厚度与宽度一致, 并取 1/4 模型; 同时, 在四周的外表面和底面约束其法向位移, 并将其外表面边界条件设为透射边界。本构模型方面, 覆土和遮弹层中的钢筋混

土取理想弹塑性模型, 下部砂土取帽盖模型。

3 研究结果和分析

图 8 表示 4 种方案中 S1 点的波形图。从图中, 可以得到最大电压及其上升时间, 再根据 Y/V (应力-电压) 转换参数即可求出其应力峰值, 表 1 即为 4 种方案中 5 个测点的相关数据, 其中测点 S3 点在方案 1 和方案 4 中由于采集的数据波形出现异常, 仅供参考。将表 1 中的测点 S1、S4、S5 的应力峰值用图形表示, 可得图 9; 将其中的 S1、S2、S3 的应力峰值用图形表示, 可得图 10。另一方面, 我们通过利用 LS-DYNA 进行数值计算, 可得对于这 4 个方案中此 3 个测点的应力峰值如图 11、12 所示。从图 9—12 可以看出, 数值计算结果与试验研究结果吻合较好。

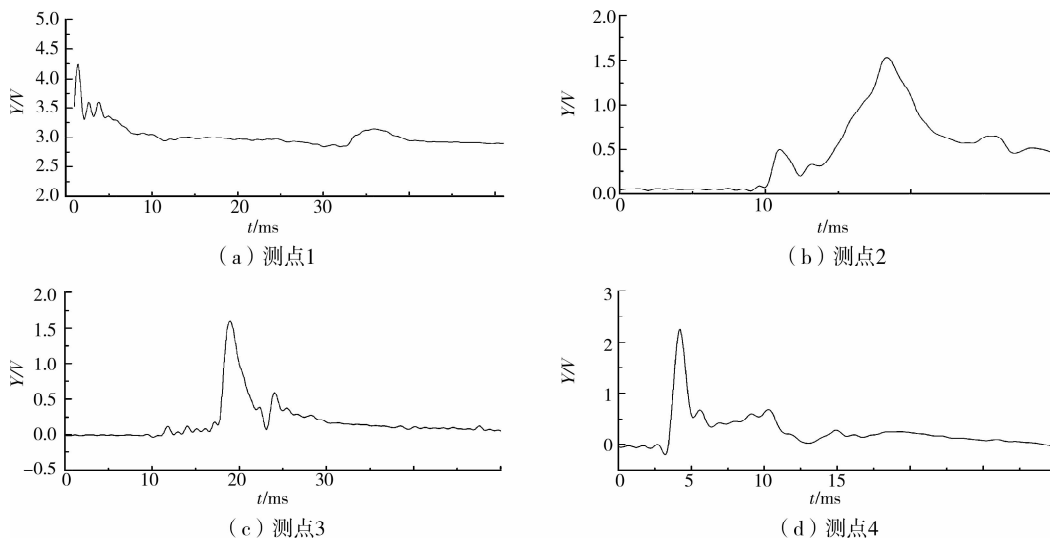


图 8 S1 波形图

表 1 应力峰值测量数据表

测点	电压/ V	转换系数	应力峰值/ MPa	上升时间/ ms
S1	4.24	0.87	3.67	0.45
	1.48	0.87	1.28	9.10
	1.61	0.87	1.39	8.10
	2.32	0.87	2.01	0.80
	3.76	0.76	2.85	0.35
S2	1.26	0.58	0.73	10.00
	1.19	0.58	0.69	10.55
	1.35	0.76	1.02	0.70
	1.66	0.58	0.96	0.40
S3	0.89	0.34	0.30	9.85
	0.19	0.34	0.06	7.75
	0.61	0.58	0.35	1.50

续表 1

测点	电压/ V	转换系数	应力峰值/ MPa	上升时间/ ms
S4	2.15	0.64	1.26	1.80
	1.29	0.64	0.83	8.05
	1.70	0.64	1.09	6.55
	1.39	0.64	0.90	0.60
	2.62	0.28	0.72	6.70
S5	1.01	0.42	0.42	10.85
	0.88	0.42	0.37	11.05
	2.09	0.28	0.58	1.50

从试验结果表 1、图 9—12 我们可以看出:

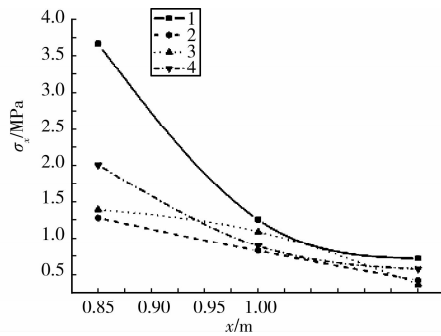


图9 4种方案中测点S1/S4/S5的应力峰值试验数据

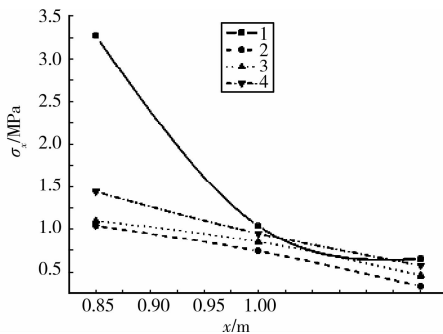


图10 4种方案中测点S1/S4/S5的应力峰值计算数据

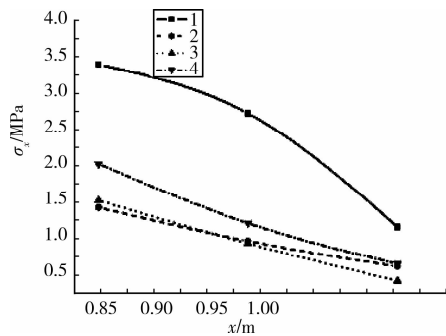


图11 4种方案中测点S1/S2/S3的应力峰值试验数据

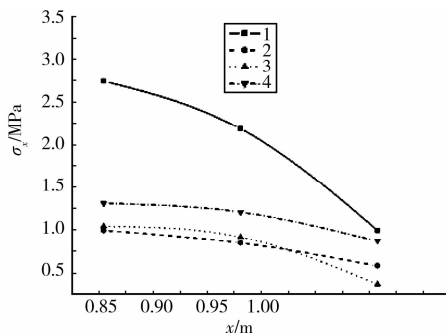


图12 4种方案中测点S1/S2/S3的应力峰值计算数据

1)图中方案2、3、4中的3个测量点的应力峰值低于方案1中3个测点的应力峰值,这说明:方案2、3、4的防护效果优于方案1,防护层中孔穴的存在能够起到削波吸能的作用,孔穴后方的应力峰值被明显削弱,而且,这种削弱效果随着测点距离孔穴越近而越明显,这与孔穴的隔离绕射的数值分析和理论研究结果相符合^[7-8]。

2)方案2的防护效果明显强于方案3。这说明:在孔穴结构上方加入很薄的一层钢板后,分配层结构的防护效果有较明显的减弱。这与前面的理论分析结论相一致。这说明在此种新型孔穴结构中嵌含一层薄钢板对分配层的削波性能是不利的,因此方案2的防护效果明显强于方案3。

3)方案3的防护效果强于方案4。与上文的理论分析一致,这主要是因为矩形孔穴主要对平面应力波进行正反射,而在矩形孔穴与钢板之间的介质太少,反射波在其中的路线过短,吸能效果有限,而且矩形孔穴的抗压吸能也远远不如圆形孔穴,但由于在孔穴上方嵌入钢板,所以其差距不是非常大。

4 结论

根据上述试验和数值计算结果及其理论分析可以看出:

1)孔穴在防护层的应力分配层设计中起到重要的作用,含不同形式的孔穴的分配层可以大大削弱航弹触地或钻地爆炸冲击作用在地下结构上的峰值载荷,因此在工程中具有重要的应用价值。

2)在分配层中孔穴结构的上方嵌入一层较薄的钢板后,孔穴后方的应力峰值应力不仅没有得到降低,反而出现增加的现象。这主要是因为钢板的厚度较薄和其影响孔穴表面的漫射从而影响结构的削波性能。

3)在分配层中嵌入孔穴的截面形状对其结构的削波吸能性能有很大的影响,其中,圆形截面的孔穴的防护效果明显强于矩形孔穴的防护效果。

参考文献:

- [1] 王肖钧. 分层人防工程防护结构对地下爆炸波的阻尼、耗散和导向作用研究[R]. 中国国防科学技术报告, 2004:3-7.
- [2] 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(S): 3540-3545.
ZHAO YUE-TANG, YU XIAO-CUN. Effect of thickness of attenuation layer on dynamic response of multilayer projective structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup): 3540-3545.
- [3] YANKELEVSKY D Z, FELDGUN V R, KARINSKI Y S. Underground explosion of a cylindrical charge near a buried wall [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 905-919.
- [4] WANG ZHI-LIANG, LI YONG-CHI, WANG J G. Study of stress waves in geomedia and effect of a soil

- cover layer on wave attenuation using a 1-D finite-difference method [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 1535-1543.
- [5] 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 YONG-XIANG, XIA CHANG-JING, DUAN ZHU-PING. Numerical analysis of plane explosive wave propagation with its attenuation behavior in semi-infinite medium[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(2): 60-65.
- [6] WU CHENG-QING, HAO HONG, LU YONG, et al. Numerical simulation of structural responses on a sand layer to blast induced ground excitations[J]. *Computers and Structures*, 2004, 82: 799-814.
- [7] 陆渝生, 连志颖, 邹同彬, 等. 柔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 YU-SHENG, LIAN ZHI-YING, ZOU TONG-BIN, et al. Dynamic photoelastic investigations on protective mechanism of flexible and rigid distributed layer[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2003, 4(6): 54-57.
- [8] 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 YA-DONG, ZHANG HONG, FANG QIN, et al. Determination of ground shock in soil under blast layer due to bomb impact [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004, 5(4): 53-56.
- [9] 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 YAN-ZHAO, WANG XIAO-JUN, WU XIANG-YUN, et al. Test study on layered structure's defense effect of distribution layer against nuclear explosive loadings [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(9): 931-935.
- [10] 王礼立, 杨黎明, 周风华. 强动载荷下结构的柔性防护和刚性防护[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 337-344.
WANG LI-LI, YANG LI-MING, ZHOU FENG-HUA. On flexible protection and stiff protection for structure safety under explosive/impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 337-344.
- [11] WANG Z L, KONIETZKY H, SHEN R F. Analytical and numerical study of P-wave attenuation in rock shelter layer [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30: 1-7.
- [12] 李永池, 姚磊, 沈俊, 等. 孔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 YONG-CHI, YAO LEI, SHEN JUN, et al. Insulation effect of the cavity on stress wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 193-199.
- [13] 王志亮, 李永池. 防护层中孔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 ZHI-LIANG, LI YONG-CHI. Study on diffracting and screening effects of cavities on axial stress waves in defense layer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1221-1226.
- [14] WANG ZHI-LIANG, WANG J G, LI YONG-CHI, et al. Attenuation effect of artificial cavity on air-blast waves in an intelligent defense layer [J]. *Computers and geotechnics*, 2006(33): 132-141.
- [15] 郑志辉, 胡时胜. 爆炸冲击波通过砾石层衰减规律的试验研究[J]. *工程爆破*, 2008, 14(1): 1-7.
ZHENG ZHI-HUI, HU SHI-SHENG. Experimental study on shock wave attenuation caused by gravel layer [J]. *Engineering Blasting*, 2008, 14(1): 1-7.

(编辑 王秀玲)