DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0643-06

新型空壳颗粒材料在人防工程中应用的实验研究*

孙晓旺[1],李永池[1],叶中豹[1],赵 凯[1],张春晓[2],马 剑[1],张永亮[1]
(1.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027;
2.总参工程兵科研三所,河南 洛阳 471023)

摘要:研发了一种内衬 PVC 壳体,外裹泡沫陶瓷壳体的新型空壳颗粒作为人防结构分配层。通过大比尺化爆实验,研究了爆炸载荷下新型空壳颗粒分配层人防结构和普通黄沙分配层人防结构的破坏情况和冲击波传播规律。实验证明:同样当量爆炸载荷下,相对黄沙分配层,新型空壳颗粒分配层可以降低应力峰值 50%左右;相对常规空壳颗粒,新型空壳颗粒分配层受损情况显著减小。这表明:新型空壳颗粒作为人防工程的分配层兼具显著的削波耗能效果和抵抗二次爆炸的能力,因此可以提高人防工程的抗爆能力,具有广阔的军事应用前景。

关键词:新型空壳颗粒;人防工程结构;分配层;爆炸波;削波耗能
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

目前人防工程中普遍采用成层式防护结构,从上到下依次为覆土层、遮弹层、分配层和结构顶板,一般分别采用自然土、钢筋混凝土、干沙和钢筋混凝土材料,分别具有伪装、抗侵彻、削弱冲击波和支撑的作用[1]。本文对高效削波耗能分配层进行研究。空壳颗粒(泡沫陶瓷壳体结构)融合了泡沫陶瓷和壳体结构的削波耗能效果[2-3],总体效果强于两者之和[4]。赵凯等[5]通过实验证明空壳颗粒分配层能够显著降低冲击波的强度。但是,空壳颗粒强度过低,不利于人防工程的整体强度和使用年限。因此本文中提出采用外裹泡沫陶瓷、内衬 PVC 壳体的新型空壳颗粒,在利用泡沫陶瓷和壳体结构削波优势的同时,大幅提高其强度。

本文中,通过大比尺化爆实验研究新型空壳颗粒分配层防护结构和黄沙分配层防护结构在爆炸载荷下的破坏情况和冲击波衰减规律,以验证新型空壳颗粒分配层的削波效果和二次抗爆能力,为提高人防结构的防护能力提供实验依据。

1 实验方案

2B 级人防工程的覆土层、遮弹层、分配层和结构顶板分别选用 1 m 厚自然土、1.2 m 厚钢筋混凝土、1.2 m 厚黄沙和 1.2 m 厚钢筋混凝土(人民防空指挥工程设计标准 RFJ1—99)。实验模型水平形状为边长 180 cm 的正方形,缩尺比取 1∶4,不考虑动荷载与结构顶部的耦合作用,结构顶板顶面以下视为自由土场,其中设置压力测点以测量冲击波,如图 1 所示。454 kg 普通航弹装药量约为 225 kg,TNT 当量系数为 1.35,根据实验缩尺比计算可得,装药量的相似系数为$(1∶4)^3=1∶64$,故实验中装药量为 4.75 kg TNT,置于遮弹层上表面中心。遮弹层采用 C40 钢筋混凝土,分别在遮弹层厚度 1/3 和 2/3 处设置钢筋网,钢筋直径 10 mm,网眼尺寸 20 cm×20 cm,两层钢筋网采用直径 6.5 mm 的箍筋联系,钢筋采用 HRB400 螺纹钢。标准实验和对比实验的分配层分别采用干沙和新型空壳颗粒,对比实验中错缝搭接放置 6 层新型空壳颗粒。

* **收稿日期**:2015-12-18;**修回日期**:2016-04-11
基金项目:国家自然科学基金项目(11472008,1402266);安徽省自然科学基金重点项目(KJ2016A315)
第一作者:孙晓旺(1987—),男,博士,讲师;**通信作者**:赵 凯,kzhao@ustc.edu.cn。

新型空壳颗粒外裹泡沫陶瓷壳体见图 2,其内径为 3.0 cm,外径为 6.0 cm;内衬 PVC 壳体见图 3,其内径为 2.75 cm,外径为 2.9 cm。泡沫陶瓷为多孔材料,本身具有较强的削波效果[6],基本力学性能见表 1,其中 ρ 为密度,K 为体积模量,G 为剪切模量,S_f 为屈服强度。实验采用总参三所研制的 CTYZ 型高频压力传感器和东华测试有限公司生产的 DH5960 信号测试分析系统,均满足实验频响要求。先后进行了两次标准实验和两次对比实验,在进行第 1 次标准实验时,传感器 S1～S7 的量程分别为 1、2、2、2、10、2、2 MPa,大部分的量程过低,因此只记录了两个完整的应力时程曲线。后 3 次实验中传感器 S1～S7 的量程分别为 2、5、2、5、10、5、2 MPa,满足测量要求。

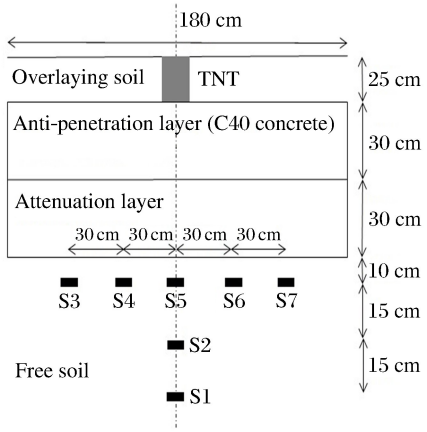


图 1 实验方案示意及压力测点分布图

Fig. 1 Sketch of test and sensor distribution



图 2 泡沫陶瓷壳体

Fig. 2 Ceramic foam shell

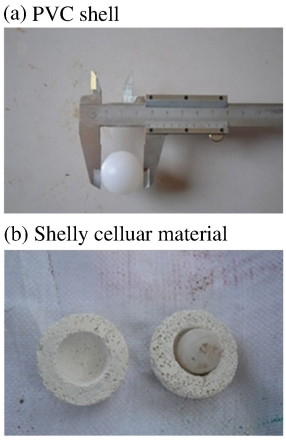


图 3 新型空壳颗粒材料

Fig. 3 Novel shelly cellular material

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	ρ/(kg/m^3)	K/MPa	G/MPa	S_f/MPa
C40 钢筋混凝土	2 500	19 910	14 860	
黄沙	1 800	3 000	600	
泡沫陶瓷	930	510	540	8.5

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

两次标准实验遮弹层的破坏形态相近,如图 4(a)～(b)所示。遮弹层正面弹坑的直径约为 90 cm,均深约为 5 cm;完全破碎区直径约为 30 cm,最大深度约为 15 cm;10 条大裂纹呈辐射状,最大宽度约为 2 cm。遮弹层背面明显凸起,密布网状裂纹,但是无裸露钢筋,无贯穿和大块脱落的现象。两次对比实验遮弹层破坏形态相近。由图 4(c)可知,对比实验正面弹坑的直径约为 110 cm,均深约为 8 cm;完全破碎区直径约为 55 cm,最大深度约为 30 cm;16 条大裂纹呈辐射状,最大宽度约为 4 cm。起吊过程中遮弹层中心有直径约为 50 cm 的混凝土脱落,上下贯穿。遮弹层背面出现混凝土大面积脱落,大量钢筋暴露,辐射状裂纹密布的现象,如图 4(d)所示。

综上所述,对比实验遮弹层的破坏更加严重,从而消耗了更多的能量,降低了传入分配层的冲击波能量。由图 4(e)可知,对比实验分配层的中心出现了直径约为 80 cm、深约为 20 cm 的成坑,坑中泡沫陶瓷破碎严重;周围部分破碎主要集中在上两层。两次对比实验共回收得到 5 个破碎的 PVC 壳体,如图 4(f)所示。本次实验条件与文献[5]相同,与之相比,本次实验中分配层的破坏情况明显减弱,且绝大多数 PVC 壳体没有破损,能继续起到支撑和削波作用,因此,新型空壳颗粒分配层可以显著提高防护结构的二次抗爆能力。

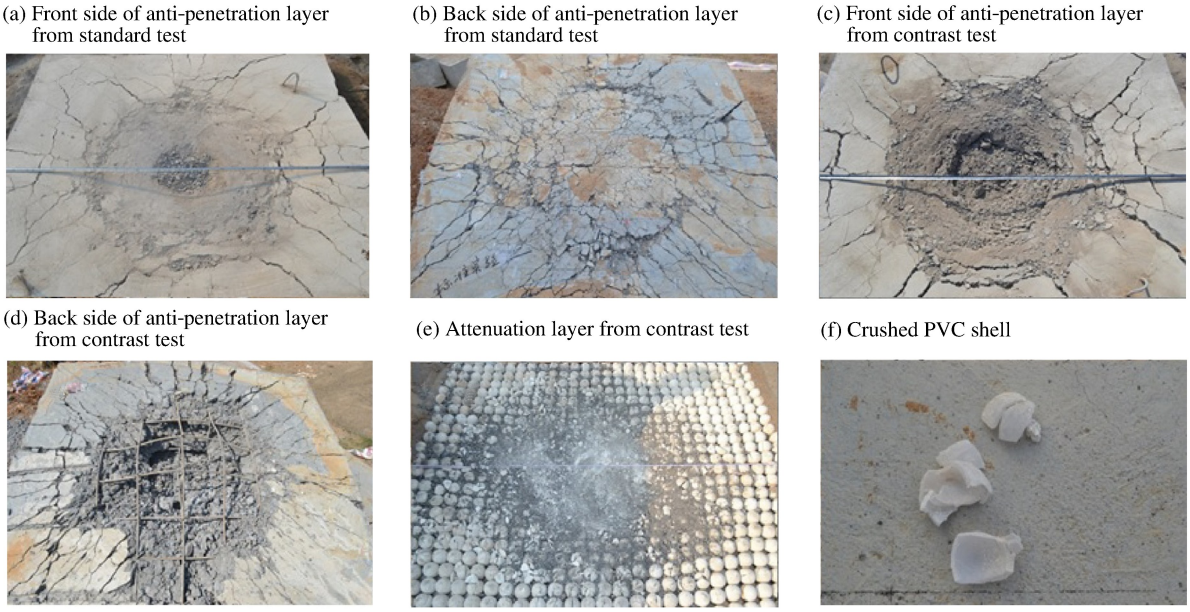


图 4　试件的破坏形态

Fig. 4　Failure patterns of specimens

2.2　冲击波形分析

由于曲线较多且基本规律相同，取标准实验 2 和对比实验 1 测点 S2 处应力峰值进行对比，如图 5 所示。从图 5 可以看出：标准实验 2 中冲击波作用时间短(8.1 ms)，上升沿极短(0.5 ms)，应力峰值高(4.20 MPa)；而对比实验 1 中冲击波作用时间和上升沿相对较长(分别为 17.9 和 2.9 ms)，应力峰值较低(2.07 MPa)。上升沿和应力峰值是衡量冲击波强度的重要指标，对比实验中冲击波上升沿超过标准实验的两倍，应力峰值小于标准实验的 1/2，冲击波以较缓和的方式通过防护结构，因此防护结构所受损伤降低，抗爆能力提高。另外，图 6 给出了黄沙和泡沫陶瓷应变能示意图，其中 σ_0 表示平台应力和压实应力之间的某个应力值。

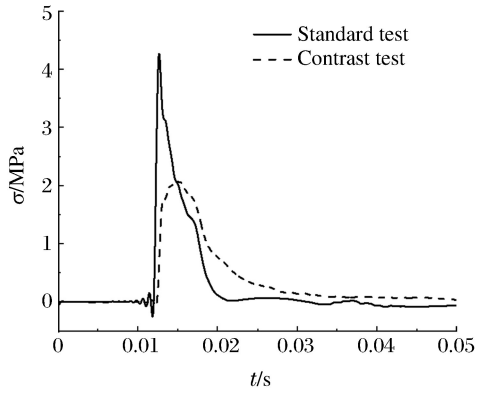


图 5　标准试验和对比试验中测点 S2 波形对比

Fig. 5　Comparison of waveform of sensor S2 in standard test with that in contrast test

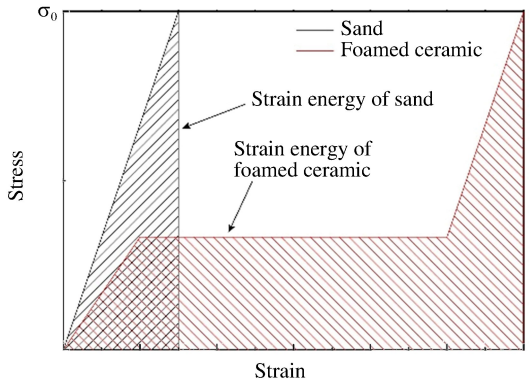


图 6　黄沙与泡沫陶瓷应变能示意图

Fig. 6　Sketch of strain energies of sand and foamed ceramic

冲击波的作用时间、上升沿、峰值和冲量数据见表 2，“—”代表无有效数据。由表 2 可知：每个测点对比实验冲击波的作用时间均为标准实验的 2 倍左右，上升沿是标准实验的 5～8 倍，说明新型空壳颗粒弥散冲击波的能力远超黄沙；对比实验中冲量减小程度不大，说明降低冲击波冲量不是新型空壳颗粒减弱冲击波破坏的主要因素。采用应力峰值比作为衡量分配层削波性能的指标：

$$B=\bar{\sigma}_{\mathrm{m}}/\sigma_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中：$\bar{\sigma}_m$ 和 σ_m 分别代表对比实验和标准实验同一测点的峰值。B 值越小，新型空壳颗粒的削波性能越强。由表 3 可知：全部测点的 B 值均小于 0.5，说明相对于黄沙，新型空壳颗粒具有突出的削波性能。另外，表 3 还对比了本实验与文献[5]在相近测点位置的 B 值，可以看出，本实验所得 B 值在大部分测点小于文献[5]，说明 PVC 内衬增强了削波能力。

表 2 4 次实验的冲击波数据对比

Table 2 Contrast of shock wave data in four tests

测点	作用时间/ms				上升沿/ms			
	标准实验 1	标准实验 2	对比实验 1	对比实验 2	标准实验 1	标准实验 2	对比实验 1	对比实验 2
S1	—	6.5	11.7	11.7	—	0.4	2.1	2.0
S2		8.1	17.9	14.0	—	0.5	2.9	2.5
S3	10.0	9.5	17.9	17.2	0.5	0.4	3.3	3.1
S4	—	—	13.3	12.1	—	—	2.1	1.9
S5	5.8	—	12.5	12.1	0.3	—	2.4	2.1
S6	—	6.6	10.5	9.5	—	0.2	1.6	1.3
S7	—	8.8	16.3	14.8	—	0.5	3.3	3.0
测点	应力峰值/MPa				总冲量/(kN·s)			
	标准实验 1	标准实验 2	对比实验 1	对比实验 2	标准实验 1	标准实验 2	对比实验 1	对比实验 2
S1	—	1.51	0.50	0.52	—	9.554	3.849	3.101
S2	—	4.20	2.07	2.02	—	13.928	11.759	10.447
S3	1.58	1.38	0.68	0.85	8.796	11.300	7.788	7.594
S4	—	—	0.54	0.77	—	—	3.452	3.980
S5	5.40	—	1.65	1.35	18.922	—	16.738	10.064
S6	—	2.10	0.70	0.47	—	13.606	3.786	3.333
S7	—	1.64	1.05	0.42	—	12.623	11.120	10.962

表 3 7 个测点的 B 值

Table 3 B values of 7 sensors

对比项	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
本实验 B 值	0.34	0.49	0.48	—	0.31	0.28	0.45
文献[5]中 B 值	—	0.31	0.58	0.39	0.44	0.39	0.58

2.3 结果分析

本节从多个角度对空壳颗粒削波耗能机理进行分析。首先，运用遮弹层/分配层界面应力波透射和反射作用说明新型空壳颗粒具有更好的削波耗能效果的机理，应力波的反射系数 R 与透射系数 T 的表达式为：

$$R=\frac{k-1}{k+1},\qquad T=\frac{2k}{k+1} \tag{2}$$

式中：$k=\rho''c''/(\rho'c')$ 为界面的波阻抗，其中 ρ'、c' 和 ρ''、c'' 分别为遮弹层和分配层材料的密度和波速。采用表 1 中的材料参数，通过计算可得黄沙分配层和泡沫陶瓷分配层的反射系数和透射系数为：

$$\begin{aligned} R_1&\approx-0.59,\qquad T_1\approx 0.41\\ R_2&\approx-0.81,\qquad T_2\approx 0.19 \end{aligned} \tag{3}$$

式中：下标“1”和“2”分别表示黄沙和新型空壳颗粒材料。由此可知，黄沙分配层结构产生了相当于入射波 0.59 倍的反射拉伸波；而在空壳颗粒分配层结构中，由于遮弹层/分配层界面包含混凝土/泡沫陶瓷和混凝土/空气两种，反射拉伸波强度相当于入射波的 0.81 倍。拉伸波是脆性材料层裂破坏的主要原

因，而新型空壳颗粒材料反射拉伸波更强，这是空壳颗粒分配层结构的遮弹层破坏更严重的主要原因，如图 4(c)～(d)所示。另一方面，黄沙作为分配层时，$T_1 \approx 0.41$，即相当于入射波的 0.41 倍的压缩波传入了黄沙分配层，而新型空壳颗粒材料作为分配层时，$T_2 \approx 0.19$，比分配层为黄沙时小，这是空壳颗粒结构应力峰值小于黄沙分配层结构的主要原因。

从耗能角度来讲：首先，黄沙的孔隙率小于 10%，而泡沫陶瓷的孔隙率则在 30%以上，并且其颗粒烧结在一起，压实过程中伴随破碎摩擦，能够消耗更多的能量；其次，如图 6 所示，泡沫陶瓷的应力-应变关系有很长的平台段[6]，当黄沙和泡沫陶瓷的应力同时达到 σ_0 时，泡沫陶瓷存储的应变能远大于黄沙，因此空壳颗粒可以比黄沙消耗更多的能量。根据弹塑性应力波知识，泡沫陶瓷应力-应变关系中的平台段对应力波有很强的弥散作用。应力波在泡沫陶瓷中传播时，分为较快的弹性波和较慢的塑性波，原来的阶跃波弥散为连续波，这是对比实验中冲击波作用时间和上升沿更长的原因之一。此外，空壳颗粒内部和它们之间大量存在的孔穴，对应力波有很强的绕射和弱化作用[6]。应力波绕射过程中，孔穴背后有一定范围的应力衰弱区[3]，因此对比实验中紧靠分配层的部分应力波峰值较小，随后先上升后下降，这是测点 S5 位置应力峰值高于 S2 位置应力峰值的原因。

3　结　论

通过集团装药大比尺野外化爆实验和对实验的理论分析，可以得到以下结论：

(1) 对比实验中遮弹层破坏程度更加严重，遮弹层消耗了更多的爆炸波能量，说明新型空壳颗粒分配层可以更好的反射冲击波；

(2) 相比普通空壳颗粒，新型空壳颗粒分配层的破坏情况大幅降低，PVC 壳体的完好率极高，大大提高了二次防爆能力，同时延长了人防工程的使用年限；

(3) 新型空壳颗粒分配层大大降低了应力波峰值并延长其作用时间和上升沿，削波耗能效果明显优于黄沙分配层，减少了爆炸波对结构顶板的破坏，其防护性能优于黄沙分配层防护结构。

参考文献：

[1] 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.

[2] Li X Y, Li Y C, Zhao K, et al. Mechanical properties of sialic foamed ceramic and applications in defense structure [J]. Chinese Physics Letters, 2014,31(8):086201.

[3] 李永池，姚磊，沈俊，等. 空穴的绕射隔离效应和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. Insulation effect of the cavity on stress wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(3):193-199.

[4] 宋宏伟，虞钢，范子杰，等. 多孔材料填充薄壁结构吸能的相互作用效应[J]. 力学学报，2005,37(6):697-703.
Song Hongwei, Yu Gang, Fan Zijie, et al. Interaction effect in energy absorption of porous material filled thin-walled structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005,37(6):697-703.

[5] 赵凯，罗文超，李煦阳，等. 人防工程中空壳颗粒材料抗爆性能试验研究[J]. 实验力学，2012,27(2):189-194.
Zhao Kai, Luo Wenchao, Li Xuyang, et al. Experimental study of explosion load bearing performance of shelly cellular material used in civil defense engineering[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012,27(2):189-194.

[6] 赵凯，罗文超，王肖钧. 粘土质泡沫陶瓷力学性能实验研究[J]. 振动与冲击，2012,31(21):50-53.
Zhao Kai, Luo Wenchao, Wang Xiaojun. Tests for mechanical behavior of clay ceramic foam[J]. Journal of Vibration and Shocks, 2012,31(21):50-53.

Experimental study of a novel shelly cellular material used in civil defense engineering

Sun Xiaowang[1], Li Yongchi[1], Ye Zhongbao[1], Zhao Kai[1],
Zhang Chunxiao[2], Ma Jian[1], Zhang Yongliang[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*;
2. *The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquaters of the General Staff, Luoyang* 471023, *Henan, China*)

Abstract: A novel shelly cellular material made of PVC lining and foamed ceramics shell was developed in this paper. Large scaled explosion tests were performed to study the damage condition and energy absorption performances of civil defense engineering using sand or the novel shelly cellular material as the attenuation layer. The test results show that the energy dissipation capacity of the shelly cellular material is better than that of sand, and the maximum stress in the test using novel material as the attenuation layer decreases by about 50% compared to that when using sand as the attenuation layer under the same explosion loading. In addition, the damage degree is much smaller compared with the conventional shelly cellular material. Therefore, it can be concluded that the novel shelly cellular material can significantly improve the capability of civil defense engineering and have broad prospects of military application.

Keywords: novel shelly cellular material; civil defense; attenuation layer; explosion wave; anti-explosion performance

(责任编辑 王玉锋)