

陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的 制备及抗侵彻实验

郭锐^{1, 2, *}, 周昊^{1, 2}, 刘荣忠^{1, 2}, 朱荣³, 姜炜⁴

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学 智能弹药国防重点实验室, 南京 210094;

3. 南京理工大学 化工学院, 南京 210094; 4. 南京理工大学 材料工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高轻量化复合装甲的抗侵彻能力, 提出了内部填充陶瓷棒并由混杂短切玻璃纤维的环氧树脂封装的点阵金属夹层防护结构。首先, 通过弹道冲击实验研究了陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的抗弹丸侵彻能力; 然后, 结合失效模式和吸能效率, 综合分析了该夹层防护结构的抗侵彻机制。结果表明: 陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的主要失效模式包括点阵金属结构和混杂填充材料的拉伸断裂、陶瓷棒的破裂、面板和背板的局部剪切破坏以及背板的总体弯曲变形。在球形弹丸侵彻过程中, 由于点阵金属结构的塑性大变形和剪切扩孔、陶瓷棒和环氧树脂的断裂破坏以及面板的宏观弯曲变形, 防护结构的抗侵彻能力得到大幅提高。研究结果可为新型轻质复合装甲的防护设计提供一定参考。

关键词: 点阵夹层结构; 失效模式; 吸收能量; 抗侵彻; 机制

中图分类号: TB831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)04-0921-08

随着材料制备及机械加工技术的迅速发展, 轻质多孔点阵材料因其具有优良的结构效率和广泛的多功能应用特性, 已受到国内外航空、航天、航海及工业装备等诸多领域的广泛关注^[1-3]。轻质多孔点阵材料具有周期性拓扑结构和高空隙率, 可以根据实际需要来进行多功能一体化设计。如在高空隙率点阵结构中填充隔热纤维, 就可实现隔热功能^[4-5]; 利用点阵材料内部开孔进行对流换热, 就能满足结构温度控制需求, 进而实现承载与传热功能^[6-7]; 将点阵材料作为吸能材料, 可抵抗爆炸冲击及弹道侵彻^[8-9]; 点阵材料还可起到吸声降噪、屏蔽电磁辐射及结构促动等作用^[10-13]。

目前, 对于轻质多孔夹层材料抗弹道侵彻能力的研究主要集中于蜂窝夹层结构。Goldsmith 和 Louie^[14]通过一系列准静态和弹道冲击实验研究了铝蜂窝夹层结构的变形和破坏机制, 并给出了典型蜂窝夹层板的弹道冲击极限。Nia 等^[15]实验研究了金属蜂窝的弹道冲击极限、能量耗散以及破坏区域, 并与解析模型进行了对比。相比较而言, 对于点阵

夹层结构抗弹道侵彻能力的研究尚处于探索阶段, 仅有少数学者进行了实验和数值模拟研究。Yungwirth 等^[16]首次应用实验方法详细分析了点阵金属夹芯板抗球形弹丸侵彻的动态响应, 结果表明点阵金属夹芯板的抗弹道侵彻能力与同等质量的实心板相当。在此基础上, Yungwirth 等^[17]又将聚氨酯 (Polyurethane, PU) 1/PU2 聚合物、Spectra 编织纤维和金属包裹陶瓷柱添加到点阵金属结构中, 分别对 3 种夹层结构的抗侵彻能力进行了实验研究, 发现陶瓷柱填充聚合物封装夹层结构的抗弹道侵彻能力显著增强。倪长也等^[18-20]对空心金字塔点阵、嵌陶瓷柱金字塔点阵和陶瓷柱填充环氧树脂封装金字塔点阵 3 种点阵金属夹层结构抗钢质弹丸侵彻的性能进行了数值仿真研究, 量化分析了结构组分对此类超轻结构三明治板的弹道极限和抗侵彻吸能性能的影响规律。张俊等^[21]提出了一种由点阵金属结构、陶瓷锥柱、环氧树脂胶结剂、金属面板以及背板所组成的新型复合装甲结构, 并仿真分析了该型复合靶板受钢质弹丸在不同位置侵彻时的抗弹性能,

收稿日期: 2015-06-02; 录用日期: 2015-08-15; 网络出版时间: 2015-09-11 16:18

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20150911.1618.006.html

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11102088); 中央高校基本科研业务费专项资金(30915118821); 上海航天科技创新基金(SAST2013033)

通讯作者: 郭锐, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高效毁伤与防护工程。 E-mail: guoruid@163.com

引用格式: 郭锐, 周昊, 刘荣忠, 等. 陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的制备及抗侵彻实验[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 921-928.
GUO R, ZHOU H, LIU R Z, et al. Preparation and anti-penetration experiment of metal lattice truss cored sandwich structures filled with ceramic rods[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4): 921-928 (in Chinese).

结果表明用环氧树脂配合点阵金属结构可对陶瓷锥柱起到支撑约束与结构限制等作用,使该型装甲的抗弹能力得到了大幅度提高。

随着现代武器穿甲威力的不断提高,防护装甲越来越厚重,严重影响了机动性。为了提高防护装甲的轻量化程度,现代复合装甲中大量使用陶瓷和树脂基复合材料,但同时也牺牲了部分抗弹能力。并且,复合装甲仅仅由单一功能的复合材料叠层而成,结构形式简单且互换性差。

利用轻质点阵结构高空隙率和可设计性强的特点,在前期仿真研究的基础上^[21],笔者设计了一种工艺性较好的轻质夹层结构防护材料。首先,以单层金字塔型点阵金属结构作为支撑陶瓷棒的骨架,在点阵金属骨架的空隙中填充陶瓷棒;然后,选用混杂短切玻璃纤维的环氧树脂进行注塑密封,并在其上下表面焊接金属面板与背板,制成轻质夹层防护结构;最后,为研究该夹层结构的抗弹丸侵彻能力,进行球形弹丸侵彻弹道枪实验。研究结果可以为轻质复合装甲的防护设计提供参考。

1 实验方法

1.1 金字塔型点阵金属结构的制备

相对密度 $\bar{\rho}$ 为金字塔型点阵结构的密度与制备基体材料本征密度的比值。理论上,相对密度为

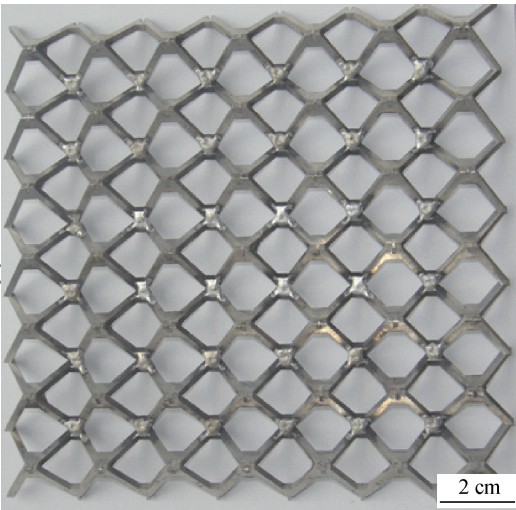
$$\bar{\rho} = \frac{tw}{l^2 \sin^2 \omega \sqrt{\cos(2\omega)}} \tag{1}$$

式中: t 为厚度, $t=2\text{ mm}$; w 为宽度, $w=2\text{ mm}$; l 为单胞中4个杆元的长度, $l=20\text{ mm}$; ω 为杆元与四棱锥基底夹角, $\omega=60^\circ$ 。

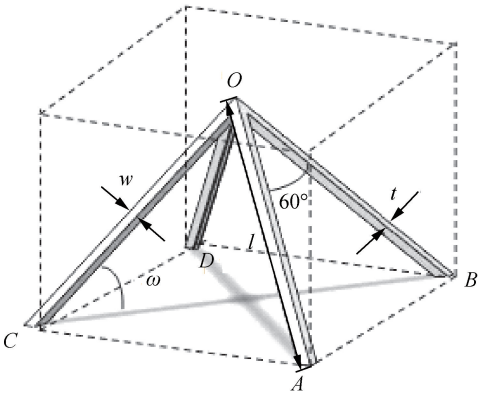
选择6061Al合金板材作为基体材料,基于三维点阵嵌锁工艺结合硬钎焊技术制备金字塔型点阵金属结构。图1(a)为金字塔型点阵结构的照片,图1(b)为单胞结构。首先,根据金字塔型点阵结构的周期性三维网架结构特点,设计分离出该点阵结构的基本格栅单元,并通过线切割技术加工出格栅单元;然后,将格栅单元超声波清洗,依次将格栅拼装成金字塔型点阵结构;接着,在格栅凸头与凹槽的接头处涂抹钎焊膏剂;最后,将拼装好的金字塔型点阵结构置于上下面板之中,放入马弗炉中进行钎焊。

1.2 金字塔型点阵金属结构力学性能的测试

采用Instron 8801型万能试验机,初始应变率取 10^{-3} s^{-1} ,对铝合金金字塔型点阵结构进行准静



(a) Photograph



(b) Unit cell structure

图1 相对密度为0.059的铝合金金字塔型点阵结构的照片及单胞结构

Fig. 1 Photograph and unit cell structure of aluminum alloy pyramidal lattice truss structure whose relative density is 0.059

态压缩力学性能实验。

1.3 轻质夹层防护结构的制备

以金字塔型点阵金属结构为骨架基材,在空心部分插入圆柱型陶瓷棒,并填充混杂短切玻璃纤维的环氧树脂材料,上下面板采用与点阵金属结构相同的均质金属板,最终构成复合三明治板结构材料。

根据填充材料的热固性和热塑性特点,以点阵结构金属骨架为基体,采用一步式真空吸塑注入固化成型工艺技术,制备尺寸和形状可控的夹层防护结构。图2为陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的制备过程。可见,其制备过程可分为以下3步:

(1) 将已拼接好的点阵结构与上下面板焊接成型,如图2(a)所示;

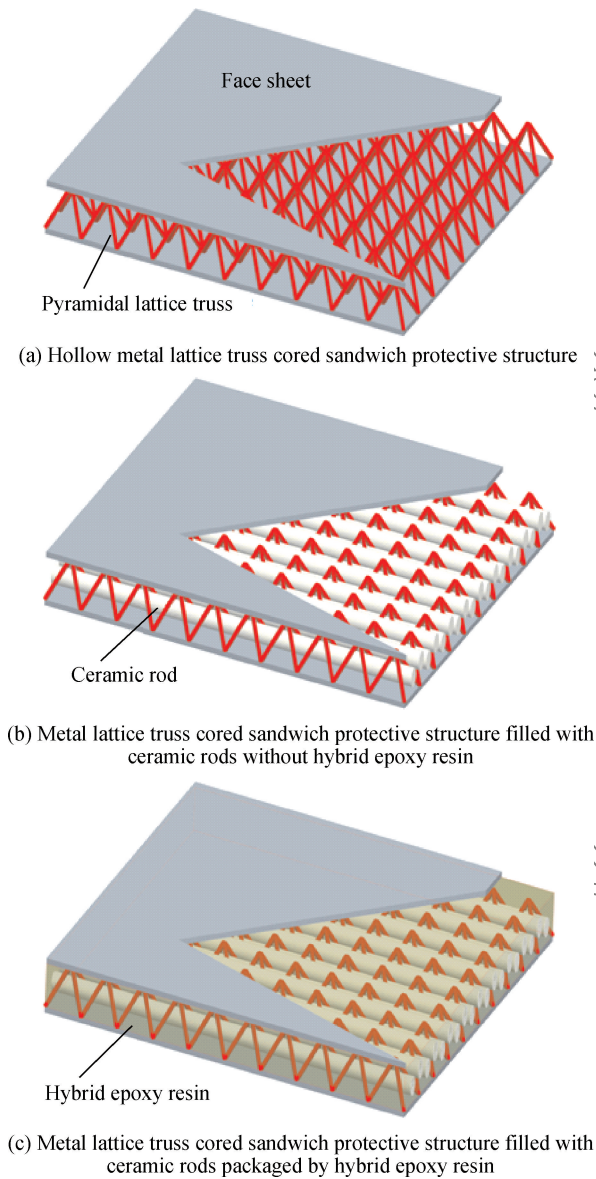


图2 陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的制备过程
Fig. 2 Preparation process of metal lattice truss cored sandwich protective structure filled with ceramic rods

(2) 在点阵夹层结构的周期性空隙中依次等距插入圆柱形陶瓷棒, 并填入短切玻璃纤维丝, 如图 2(b) 所示;

(3) 将夹层结构置于成型模具中, 密封后抽真空, 向成型模具中注入均匀混合的液态聚合物树脂、丙酮及固化剂的浆料, 一步固化成型, 如图 2(c) 所示。

上述各步骤都是在常温常压下进行的。

1.4 弹道冲击实验

为了评估结构的抗弹道侵彻能力, 利用球形钢质弹丸对其进行弹道枪侵彻实验, 以期获得弹丸侵

彻靶板前后的初始速度、剩余速度以及该型靶板的毁伤情况。

球形钢质弹丸垂直侵彻四边固支矩形复合夹层结构时, 靶板尺寸为 150 mm×150 mm×10 mm, 上下面板厚度均为 3 mm, 金字塔型点阵结构排列为 7×7 形式, 上下面板及点阵结构所用基材均为 6061-T6 铝合金, 密度为 2.85 g/cm³, 屈服极限为 276 MPa; 陶瓷棒尺寸为 $\varnothing 6$ mm×150 mm, 陶瓷材料为常见的 A95 陶瓷 (Al₂O₃ 含量为 95wt%), 密度为 3.65 g/cm³, 压缩破坏强度为 3.5 GPa; 混杂短切玻璃纤维的环氧树脂密度为 1 200 kg/m³, 其中单纤维抗拉强度为 2 800 MPa; 45 号钢质球形弹丸直径为 8 mm, 质量为 2.05 g, 屈服强度为 355 MPa; 侵彻速度范围为 900~1 200 m/s。图 3 为球形弹丸垂直侵彻陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构。

采用 $\varnothing 14.5$ mm 滑膛弹道枪作为球形弹丸的发射装置, 采用火药推进方式加速弹丸, 通过适当调整装药量控制弹丸侵彻速度。等效靶弹道枪实验装置如图 4 所示。可见, 球形弹丸出枪口后, 在空气阻力的作用下, 弹丸与弹托分离, 弹托碎片被集弹器挡住, 弹丸通过集弹器中心的小孔飞向靶板。实验过程中, 测试弹丸侵彻靶板的侵彻速度和剩余速度, 由电子测时仪测量弹丸通过靶板前后锡箔靶的时间, 进而由锡箔靶间距计算出弹丸速度。实验后, 统计弹丸对靶板的毁伤程度。

实验用陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构如图 5 所示。可见, 夹层结构由空心点阵结构、增强陶瓷棒和混杂短切玻璃纤维的环氧树脂固封填充材料构成。对 3 块同样结构的靶板进行 3 次实验, 侵彻速度分别为 1 190.5、1 055.4、906.3 m/s。

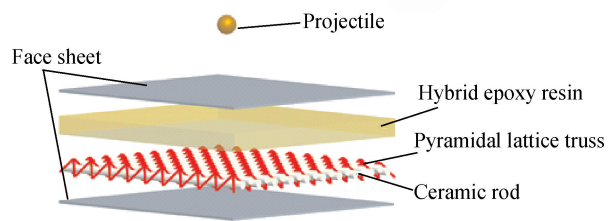


图3 球形弹丸垂直侵彻陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构

Fig. 3 Metal lattice truss cored sandwich protective structure filled with ceramic rods penetrated by spherical projectile perpendicularly

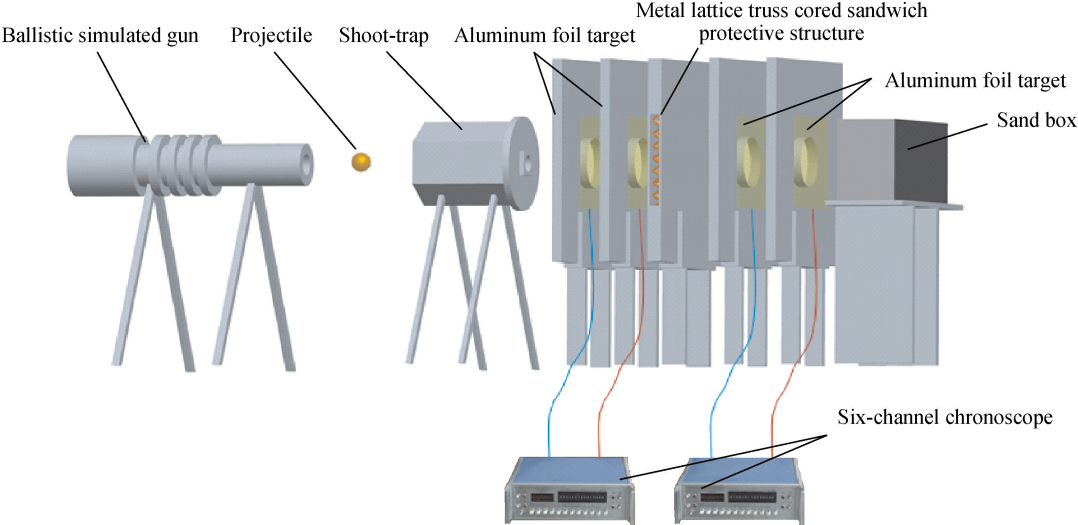
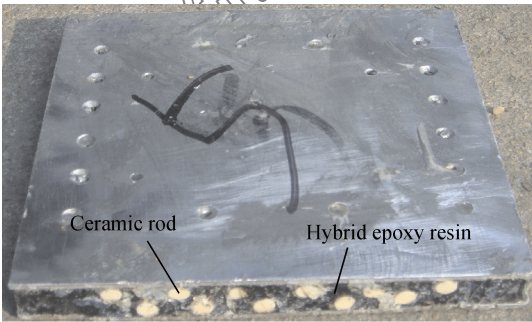
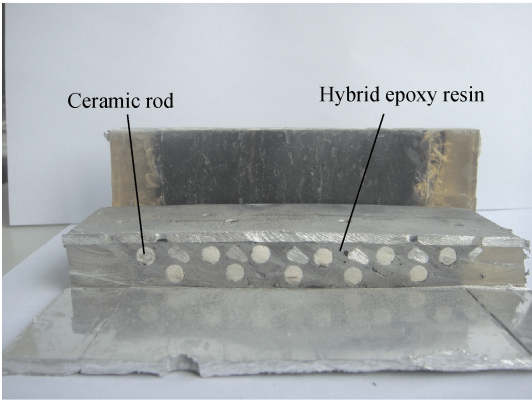


图 4 等效靶弹道枪实验装置

Fig. 4 Ballistic gun experiment facilities of equivalent target



(a) Exterior



(b) Section

图 5 实验用陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构

Fig. 5 Metal lattice truss cored sandwich protective structure filled with ceramic rods used in experiment

2 结果与分析

2.1 金字塔型点阵金属结构的力学性能

相对密度为 0.059 的铝合金金字塔型点阵结构的准静态压缩过程及等效压缩应力-应变曲线如

图 6 所示。可见，当等效压缩应变为 0.15 时，等效压缩应力达到峰值 0.65 MPa；此后，等效压缩应力随等效压缩应变的增大而降低；当等效压缩应变为 0.25 时，部分杆件与面板的连接明显失效；当等效压缩应变进一步增大至 0.45 后，由于材料的致密化，等效压缩应力又随应变的增大而增加。此外，在实验过程中还发现，杆件与面板的连接强度和失效破坏模式将直接影响点阵结构的抗压性能。

2.2 失效模式与抗侵彻机制

图 7 为陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的抗弹毁伤破坏形貌。可以看出，高速弹丸在穿透有陶瓷棒填充的点阵金属夹层防护结构后，靶板的面板呈花瓣状延伸性扩孔破坏，弹孔周围存在明显的翻边。背板内残存有冲击断裂的陶瓷棒碎片，破孔处有明显的已断裂的点阵结构杆元露出。背板破孔直径远大于球形弹丸直径，这是因为在球形弹丸侵彻面板和混杂夹层材料后，与断裂的点阵结构杆元、陶瓷棒破碎体及冲塞下的混杂填充材料共同冲击背板，导致背板呈现出带总体弯曲变形的局部剪切失效模式。

由此，可以初步分析得到陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的抗侵彻机制，即在球形弹丸侵彻过程中，除面板和背板的局部剪切破坏外，由于点阵金属结构的塑性大变形和剪切扩孔、陶瓷棒和环氧树脂的断裂破坏以及背板的宏观弯曲变形，使得该型夹层防护结构可以吸收更多的弹丸动能，相比均质板和层合板结构，夹层结构的抗弹能力可以得到大

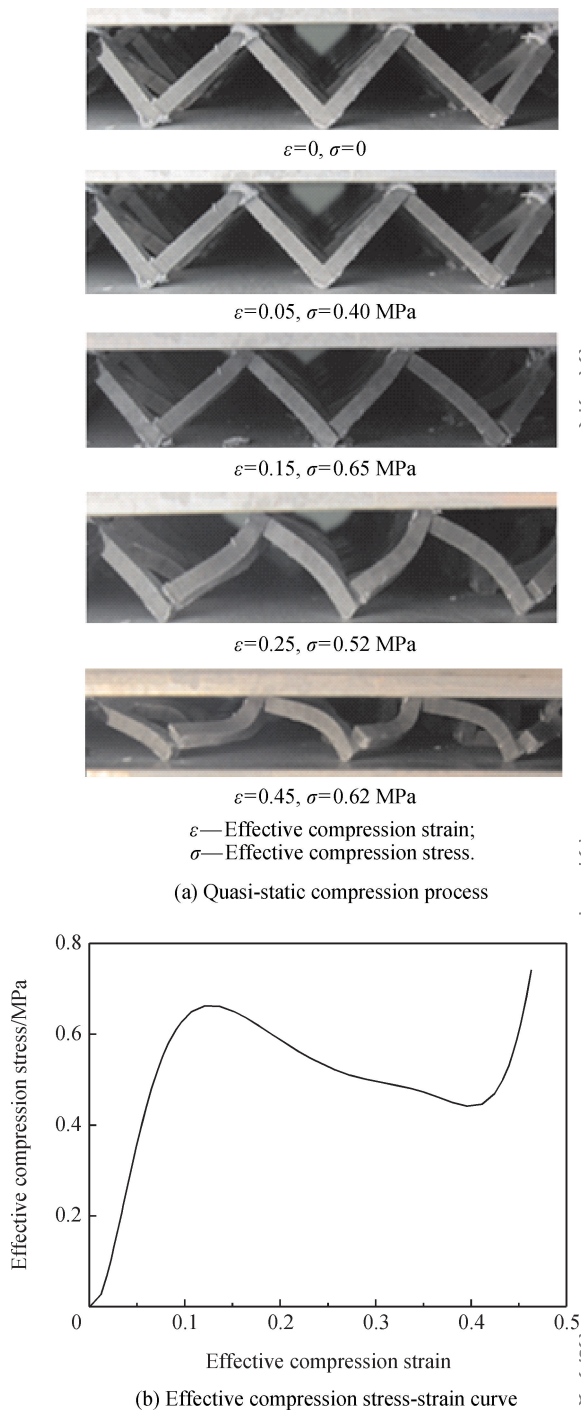


图 6 相对密度为 0.059 的铝合金金字塔型点阵结构的准静态压缩过程及等效压缩应力-应变曲线

Fig. 6 Quasi-static compression process and effective compression stress-strain curve of aluminum alloy pyramidal lattice truss structure whose relative density is 0.059

幅度提高。需要指出的是，由于制备工艺所限，该金字塔型点阵结构的最大压缩应力仅为 0.65 MPa，与文献[16-17]中的相差较大。若改进制备工艺方法，进一步提高金字塔型点阵结构的承载能力，该

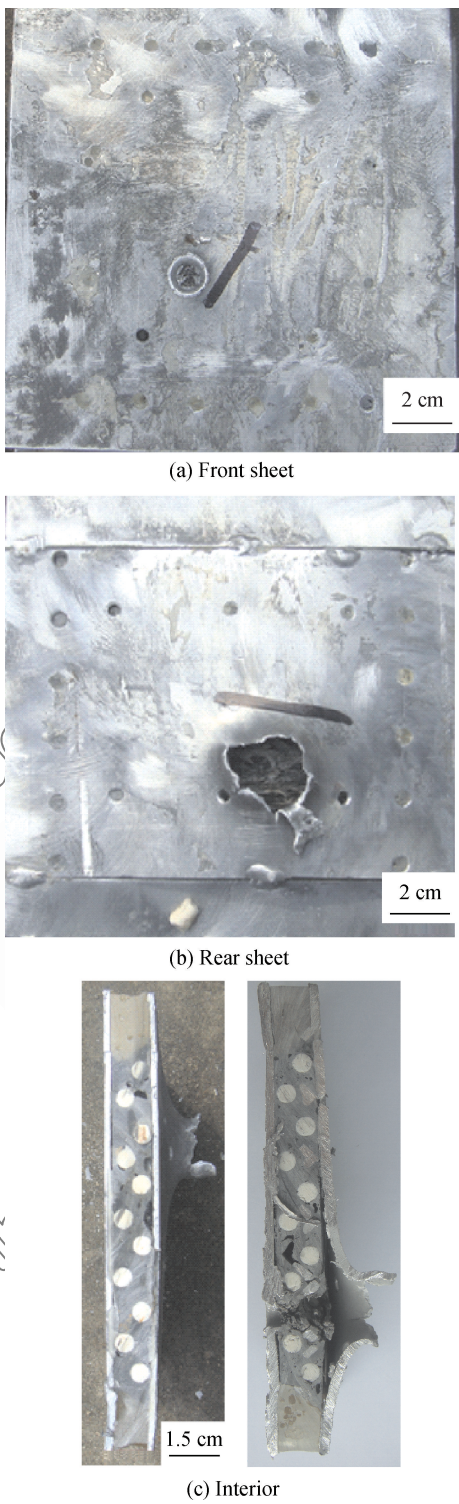


图 7 陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的抗弹毁伤破坏形貌

Fig. 7 Failure appearances for ballistic resistant damage of metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods

型夹层防护结构的整体抗弹能力还可以进一步增大。

2.3 侵彻剩余速度与吸能效率

2.3.1 侵彻剩余速度

陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的侵彻剩余速度如图 8 所示。可以看出，在侵彻速度远超过该

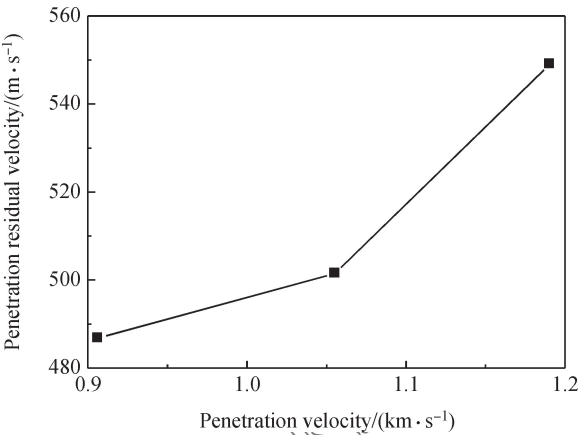
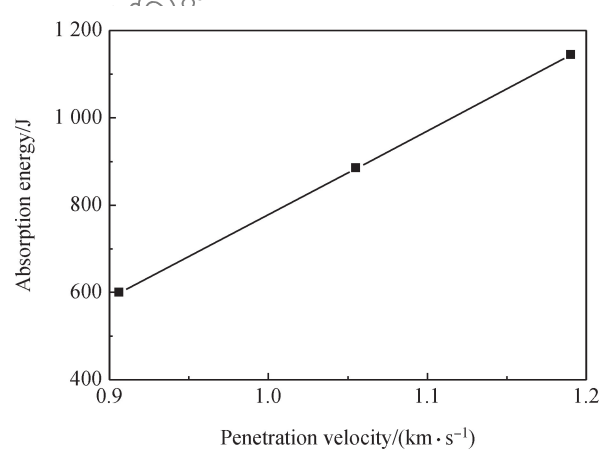


图 8 陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的侵彻剩余速度
Fig.8 Penetration residual velocities of metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods



(a) Absorption energy

夹层结构弹道冲击极限速度的条件下，弹丸的侵彻剩余速度随着侵彻速度的增加而增加。

2.3.2 吸能效率

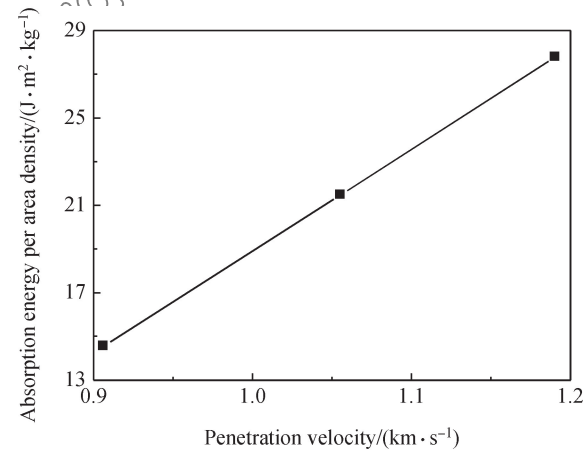
为比较夹层防护结构的吸能效率，计算夹层防护结构的吸收能量 E_a 和单位面密度吸收能量 E_a ：

$$E_a = \frac{1}{2} m_p v_p^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2 \tag{2}$$

$$E_a = \frac{E_a}{\rho} \tag{3}$$

式中： m_p 为破片质量； v_p 为靶前侵彻速度； v_r 为靶后剩余速度。

图 9 为陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的吸能效率。可以看出，夹层防护结构的吸收能量和单位面密度吸收能量均随着侵彻速度的增加而增加。在侵彻速度为 1 190.5 m/s 时，夹层防护结构的吸收能量和单位面密度吸收能量分别可达到 1 144 J 和 27.79 J·m²/kg。



(b) Absorption energy per area density

图 9 陶瓷棒填充点阵金属夹层防护结构的吸能效率

Fig.9 Energy absorption efficiencies of metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods

3 结 论

(1) 球形弹丸侵彻过程中，由于陶瓷棒填充点阵金属结构的塑性大变形和剪切扩孔、陶瓷棒和环氧树脂的断裂破坏以及面板的宏观弯曲变形，使得陶瓷棒填充金字塔型点阵金属夹层防护结构的抗弹能力得到大幅提高。

(2) 点阵金属结构和混杂填充材料的拉伸断裂、陶瓷棒的破裂、面板和背板的局部剪切破坏以及背板的总体弯曲变形构成该型夹层防护结构的主要失效模式。

(3) 实验的侵彻速度均远超过该型夹层防护结构的弹道冲击极限速度，这与所选制备材料有一定的联系。通过选择高强金属、陶瓷和纤维材料代替笔者使用的 6061-T6 铝合金、A95 陶瓷和玻璃纤维，夹层防护结构的抗弹效率有望进一步提高。

(4) 陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的抗弹丸侵彻能力与其内部组分参数有很大关系。通过合理优化设计，可以进一步提高此型夹层防护结构的抗侵彻吸能性能，从而为轻质复合装甲的防护设计提供参考。

参考文献:

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 1-35.
- [2] LU T J, ZHANG Q C, JIN F. Recent progress in the development of lightweight porous materials and structures[J]. Materials China, 2012, 31(1): 13-35.
- [3] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517-535.
LU T J, HE D P, CHEN C Q, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. Advances of Mechanics, 2006, 36(4): 517-535 (in Chinese).
- [4] 方岱宁, 张一慧, 崔晓东. 轻质点阵材料力学与多功能设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-9.
FANG D N, ZHANG Y H, CUI X D. Mechanics and multi-functionality design of light lattice materials[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-9 (in Chinese).
- [5] 范华林, 杨卫. 轻质高弱点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 99-112.
FAN H L, YANG W. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. Advances of Mechanics, 2007, 37(1): 99-112 (in Chinese).
- [6] LU T J, VALDEVIT L, EVANS A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50(7): 789-815.
- [7] LIU T, DENG Z C, LU T J, et al. Bi-functional optimization of actively cooled, pressurized hollow sandwich cylinders with prismatic cores[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(12): 2565-2602.
- [8] XUE Z, HUTCHINSON J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(4): 687-705.
- [9] RIMOLI J J, TALAMINI B, WETZEL J J, et al. Wet-sand impulse loading of metallic plates and corrugated core sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(10): 837-848.
- [10] 辛峰先, 张钱城, 卢天健. 轻质夹层材料的制备和振动声学性能[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 375-399.
XIN F X, ZHANG Q C, LU T J. Advances in lightweight sandwich materials and structures: Manufacture and vibro-acoustic performances[J]. Advances of Mechanics, 2010, 40(4): 375-399 (in Chinese).
- [11] FAN H L, YANG W, CHAO Z M. Microwave absorbing composite lattice grids[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15): 3472-3479.
- [12] LU T J, EVANS A G. Design of a high authority flexural actuator using an electro-strictive polymer[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2002, 99(3): 290-296.
- [13] WANG B, GUO H C, FANG D N. A protocol for characterizing the performance of light-weight truss-core actuators[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 58(11): 2365-2372.
- [14] GOLDSMITH W, LOUIE D. Axial perforation of aluminum honeycombs by projectiles[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32(8): 1017-1046.
- [15] NIA A A, RAZAVI S B, MAJZOobi G H. Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—Experimental study[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 488(1): 273-280.
- [16] YUNGWIRTH C J, RADFORD D D, ARONSON M, et al. Experiment assessment of the ballistic response of composite pyramidal lattice truss structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(3): 556-569.
- [17] YUNGWIRTH C J, WADLEY H N G, O'CONNOR J H, et al. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 920-936.
- [18] 倪长也, 金峰, 卢天健. 超轻金属点阵三明治板结构抗侵彻性能分析[J]. 兵工学报. 2009, 30(增刊 2): 94-97.
NI C Y, JIN F, LU T J. Numerical simulation of the ballistic performance of composite pyramidal lattice truss structure[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(Suppl. 2): 94-97 (in Chinese).
- [19] 倪长也, 金峰, 卢天健, 等. 3种点阵金属三明治板的抗侵彻性能模拟分析[J]. 力学学报. 2010, 42(6): 1125-1137.
NI C Y, JIN F, LU T J, et al. Penetration and perforation performance of three pyramidal lattice-cored sandwich plates: Numerical simulations[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(6): 1125-1137 (in Chinese).
- [20] NI C Y, LI Y C, XIN F X, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: Numerical and experimental assessment[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 46: 69-79.
- [21] 张俊, 郭锐, 刘荣忠, 等. 金属桁架增强陶瓷复合装甲抗弹性能研究[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(5): 773-778.
ZHANG J, GUO R, LIU R Z, et al. Anti-bullet property of metal truss structures enhanced ceramic composite armor[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(5): 773-778 (in Chinese).

Preparation and anti-penetration experiment of metal lattice truss cored sandwich structures filled with ceramic rods

GUO Rui^{1, 2, *}, ZHOU Hao^{1, 2}, LIU Rongzhong^{1, 2}, ZHU Rong³, JIANG Wei⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

3. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

4. School of Material Science & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the anti-penetration capacity of lightweight composite armors, metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods internally and packaged by epoxy resin hybridized with short cut glass fibers were proposed. First, the anti-penetration capacity for projectile of metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods was investigated by ballistic impact experiments. Then, considering failure mode and energy absorption efficiency, the anti-penetration mechanism of the sandwich protective structures was synthetically analyzed. The results show that the main failure modes of metal lattice truss cored sandwich protective structures filled with ceramic rods consist the tensile failure of metal lattice truss structure and hybrid fillers, the fracture of ceramic rods, the local shear failure of front sheet and rear sheet, and the overall bending deformation of rear sheet. In the penetration process of spherical projectile, the anti-penetration capacity of protective structures is significantly improved for the large plastic deformation and shear cavity of metal lattice truss, the fracture failure of ceramic rods and epoxy resin, and the macro-bending deformation of front sheet. The conclusions obtained can provide some references for the protective design of new lightweight composite armors.

Keywords: lattice truss sandwich structures; failure mode; energy absorption; anti-penetration; mechanism