

高压物理学报

3D打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为

侯祥龙 雷建银 李世强 王志华 刘志芳

Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre

HOU Xianglong, LEI Jianyin, LI Shiqiang, WANG Zhihua, LIU Zhifang

引用本文:

侯祥龙, 雷建银, 李世强, 等. 3D打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):014102. DOI: 10.11858/gywlb.20190768

HOU Xianglong, LEI Jianyin, LI Shiqiang, et al. Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):014102. DOI: 10.11858/gywlb.20190768

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190768>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拉伸载荷下含孔复合材料层合板的力学性能及失效机理

Mechanical Property and Failure Mechanism of Composite Laminates Containing a Circular Hole under Tension

高压物理学报. 2017, 31(4): 373 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.004>

基于3D-DIC对爆炸作用下碳纤维层合板的变形研究

Deformation of Carbon Fiber Laminates under Explosion Based on 3D-DIC

高压物理学报. 2019, 33(6): 064201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190739>

冲击荷载下植物纤维增强高聚物复合材料的力学性能

Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites under Impact Loading

高压物理学报. 2019, 33(2): 024204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180656>

基于Lagrangian分析法的梯度泡沫金属 动态力学行为研究

Dynamic Mechanical Behavior of Graded Metallic Foams Based on Lagrangian Analysis Method

高压物理学报. 2019, 33(1): 014104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180534>

一种超高温动态力学行为测试及原位图像获取方法

A Method for Testing Dynamic Mechanical Behavior of Materials at Ultra-High Temperature and *in-Situ* Observation

高压物理学报. 2018, 32(1): 013202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170522>

含缺陷的石墨烯对增强树脂基复合材料力学性能的影响

Effect of Defective Graphene on Mechanical Properties of Reinforced Resin Matrix Composites

高压物理学报. 2018, 32(6): 064101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180586>

3D 打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为

侯祥龙, 雷建银, 李世强, 王志华, 刘志芳

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 采用硬质和软质双组分材料, 通过调控两种基体材料的装配夹角, 采用光固化 3D 打印技术制备了不同装配方式的仿贝壳珍珠层复合材料, 开展了准静态拉伸实验, 结合扫描电镜观察, 分析了其拉伸力学性能、断裂及能量耗散机理。研究表明, 保持胞元边长不变, 随着面内装配角度增加, 仿贝壳珍珠层复合材料的强度呈线性增加趋势, 断裂应变呈线性减小的趋势; 随着面外装配角度增大, 断裂应变呈线性减小趋势, 而强度在面外装配角小于 45° 时呈增强趋势, 超过 45° 时趋于稳定; 面外装配角度为 45° 时, 材料的强度达到最大值。试样在断裂前主要通过硬质材料的拔出、软/硬相界面处微裂纹的生成及微裂纹在扩展过程中的合并和偏转等方式耗散能量。

关键词: 3D 打印; 拉伸力学行为; 仿生材料; 能量耗散

中图分类号: O341

文献标识码: A

贝壳珍珠层是一种具有高强度和高韧性的天然材料, 这种优异的性能主要与其由无机质和小体积分数的有机质所组成的“砖墙”式微结构有关, 其中文石片(无机质)的内聚和滑动以及有机质的桥接作用是其高韧性、止裂的关键因素^[1-2]。在受到外界作用时, 无机硬物质主要影响材料的强度, 有机软物质则影响材料的韧性, 在材料断裂前, 两种物质之间的耦合变形可以耗散大量能量^[3]。借鉴贝壳珍珠层的微结构设计的保护装置(如头盔和防弹衣), 在受到外界碰撞时能够有效吸收和耗散外部的冲击能量, 从而减小伤害^[4]。珍珠层软/硬镶嵌微结构可用于陶瓷、黏土等高强与聚合物高韧材料的复合, 能够实现高强高韧性能的结合, 拓宽了结构材料领域^[5]。珍珠层有机/无机界面复合材料还可用于陶瓷/金属材料的叠层复合, 很大程度提高了复合材料的断裂韧性与断裂功^[6]。贝壳由内到外具有 3 层组织结构, 如图 1(a) 所示。外层是角质层, 主要成分为有机质, 作用是防止外界的腐蚀; 中间层是棱柱层, 主要成分为方解石, 具有很高的强度; 内层为珍珠层, 该层有两种结构, 见图 1(b), 由文石片镶嵌在有机物质中构成, 具有比强度高、韧性好、止裂等独特力学性能, 其增韧机制主要包含裂纹偏转及钝化、无机质(文石片)拔出和有机质桥接^[7-9]。Barthelat 等^[10]对红鲍鱼珍珠层进行电子显微镜扫描, 发现珍珠层中片层成分主要是表面粗糙的单晶文石, 珍珠层在拉伸过程中粗糙文石会产生阻止相对滑动的阻力, 从而产生宏观拉伸应力, 文石片在纳米级尺度下的相对滑动使贝壳在宏观尺度上有较好的延展性, 同时也是珍珠层的主要增韧机制之一。

在不同受力条件下仿贝壳珍珠层“砖墙”结构的断裂模式及增韧机理是目前研究的热点问题^[11-12]。国内外的研究者利用 3D 打印方式仿造贝壳微结构进行了一系列的结构设计, 并取得了不少成果。马骁勇等^[13]利用立体光固化三维打印技术制备了仿贝壳复合材料, 结合有限元模拟和准静态拉伸实验探究了砖块长宽比与材料弹性模量的关系, 并对其整体破坏模式进行了分析, 结果表明调控材料微观尺

* 收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(11602161, 11772216); 山西省 1331 重点创新团队项目

作者简介: 侯祥龙(1988—), 男, 硕士, 主要从事材料冲击动力学行为研究. E-mail: 592285804@qq.com

通信作者: 李世强(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事材料及结构冲击动力学行为研究.

E-mail: lishiqiang@tyut.edu.cn

寸可以控制宏观力学性能及破坏模式。Begley 等^[14]使用陶瓷与聚合物仿造贝壳珍珠层软硬镶嵌结构合成陶瓷/聚合物复合结构,探究了其在拉伸条件下弹性模量、强度和失效等力学行为与其内部胞元尺寸的关系,结果表明对胞元尺寸进行优化,可以调控结构的弹性模量、强度和失效模式等力学性能。总体来说,贝壳仿生复合材料具有优越的力学性能,“砖墙”式镶嵌微结构是控制其力学性能的关键因素。

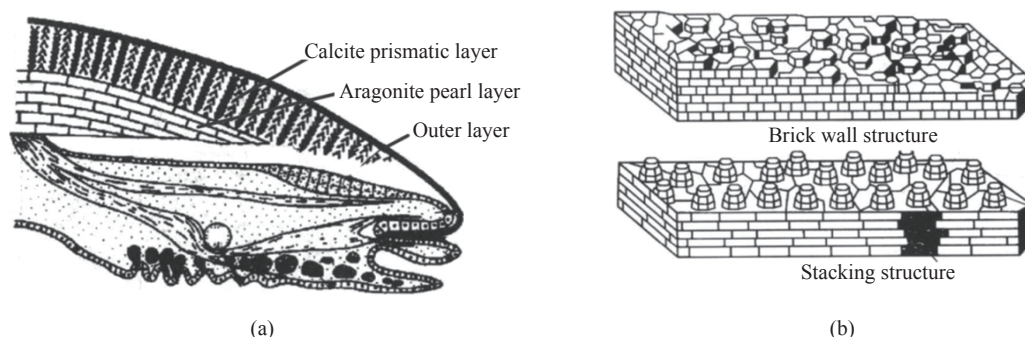


图 1 贝壳结构示意图^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of shell structure^[1]

借鉴贝壳珍珠层“砖墙”式微观结构,通过对微结构组合方式的优化设计,利用光固化 3D 打印技术制备了具有介观“砖墙”式构型的仿贝壳珍珠层材料,探究了这类材料在准静态拉伸条件下的力学响应、能量耗散及增韧机理。

1 几何模型及材料属性

利用 Objet Connex350 光固化 3D 打印机,制备如图 2(a) 所示的仿贝壳珍珠层材料。软质材料(T 组分)为 Tangoblackplus,硬质材料(V 组分)为 Veromagenta,其中 T 组分的几何尺寸为 $t_1=0.1$ mm, $b=1$ mm。试件标距长度 $L_0=8$ mm,宽度 $W=8$ mm,厚度 $t=1$ mm,过渡角半径 $R=4$ mm。通过调控软质材料

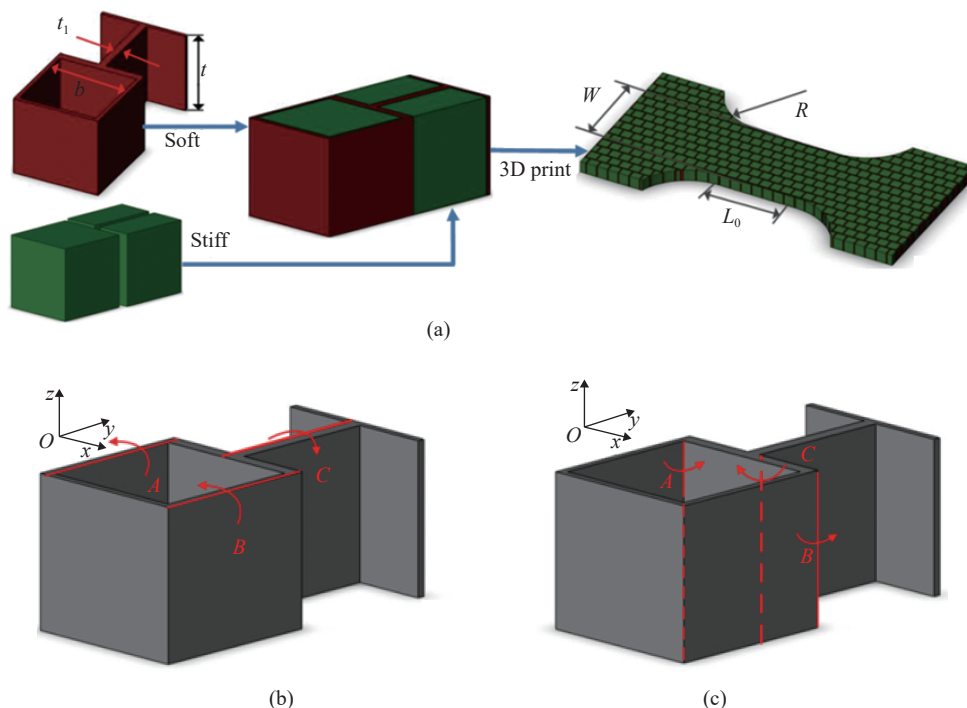
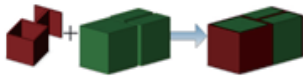
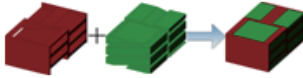
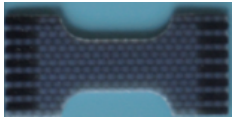
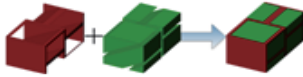
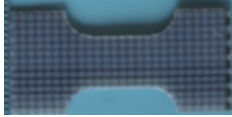
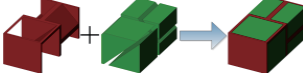
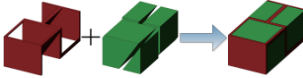
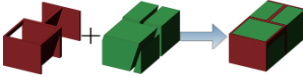
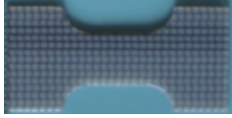
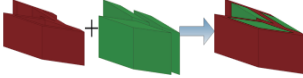


图 2 双相材料介观几何构型与组合方式以及结构优化示意图

Fig. 2 Mesoscale structure and combination of biphase materials and structural-optimized diagrams

与试件面内方向(y 轴, 图 2(b))和面外方向(z 轴, 图 2(c))的夹角, 得到不同的组合装配方式的试样。试样编号如表 1 所示, 其中单纯的软质材料和硬质材料试件分别记为 Soft 和 Stiff。复合材料初始构型(即传统砖墙式结构, 图 2(a))记为 B-M, 面内旋转记为 I, 面外旋转记为 O, 例如面内绕 y 轴旋转 15° 的试样记为 I-15, 面外绕 z 轴旋转 15° 的试样记为 O-15。

表 1 模型及试件编号
Table 1 Number of models and specimens

Type	Unit cell	Specimens
B-M		
I-15		
I-30		
I-45		
I-60		
I-75		
O-15		
O-30		
O-45		
O-60		
O-75		

采用 Instron5544 实验机, 在室温条件下分别对软质材料 Tangoblackplus 与硬质材料 Veromagenta 进行准静态拉伸, 应变率采用 0.001 s^{-1} , 其应力-应变关系如图 3 所示。可以看出, 两种材料在准静态拉伸下均未表现出明显的塑性变形和强化行为, 软质材料的抗拉强度约为 0.27 MPa, 失效应变约为 2.1, 硬质材料的抗拉强度约为 62 MPa, 失效应变约为 0.12。

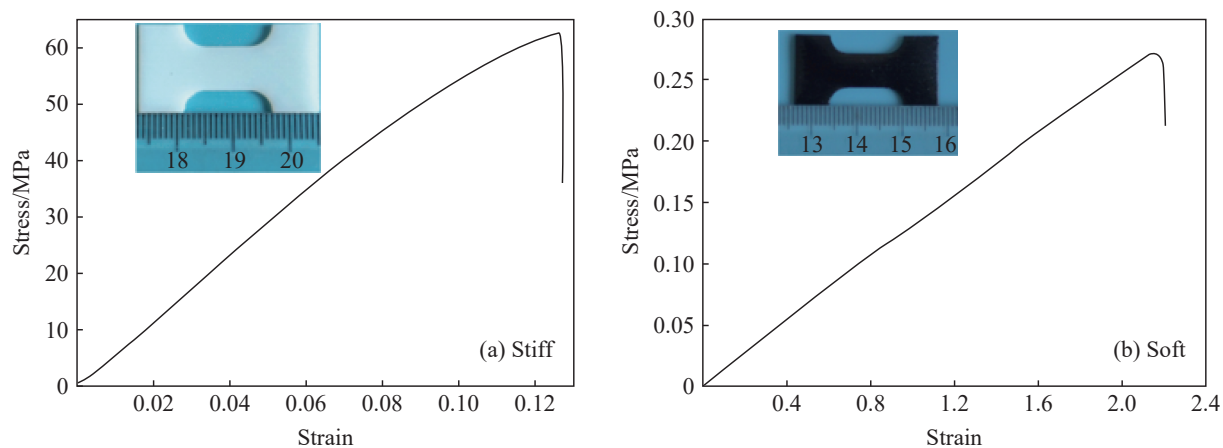


图 3 硬质材料 (a) 与软质材料 (b) 在准静态拉伸下的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain curve of stiff (a) and soft (b) phases under quasi-static tensile

2 结果与讨论

2.1 准静态力学性能

对 I 系列试样进行准静态拉伸, 实验应力-应变关系如图 4(a) 所示。可以看出, I 系列试样受拉时具有明显的弹塑性区域, 应力-应变曲线近似为双线性模型。拉伸强度与断裂应变随调控角度的变化关系如图 4(b) 所示, 可以看出, 断裂应变、拉伸强度与调控角度均呈线性关系, 随着面内调控角度的增大, 拉伸强度均有明显提升, 而断裂应变明显降低。

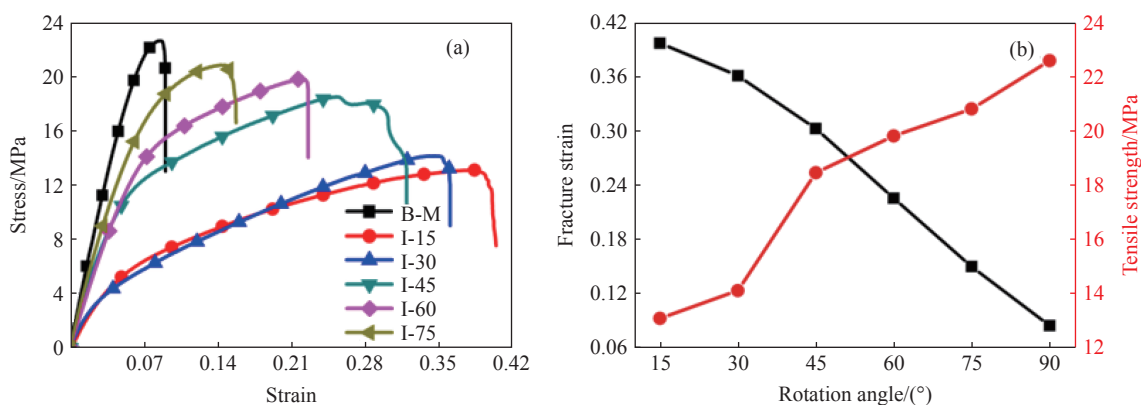


图 4 (a) I-15~I-75 及 B-M 试样准静态拉伸应力-应变曲线, (b) I-15~I-75 及 B-M 试样断裂应变及拉伸强度

Fig. 4 (a) Stress-strain curve of I-15~I-75 and B-M specimens under quasi-static tensile;

(b) fracture strain and tensile strength of I-15~I-75 and B-M specimens

对 O 系列试样进行准静态拉伸实验, 结果如图 5(a) 所示。由图可知, O 系列试样的受拉过程分为 3 个阶段: 首先复合试样进入初始拉伸的弹性阶段, 随后试样表面开始出现横向裂纹, 弹性段结束进入塑性阶段, 此阶段横向裂纹稳定扩展, 使得应力接近于平台阶段, 结合电镜扫描断面形貌分析发现, 主裂纹是由微裂纹扩展形成的, 主裂纹的失稳扩展, 表明材料进入软化断裂阶段。由图 5(b) 可知, 对于面

外优化的 5 种试样, 随着调控角度的增大, 断裂应变整体呈减小趋势, 而拉伸强度初始呈线性增大趋势, 当调控角超过 45°时, 拉伸强度趋于稳定状态, 不再增大。

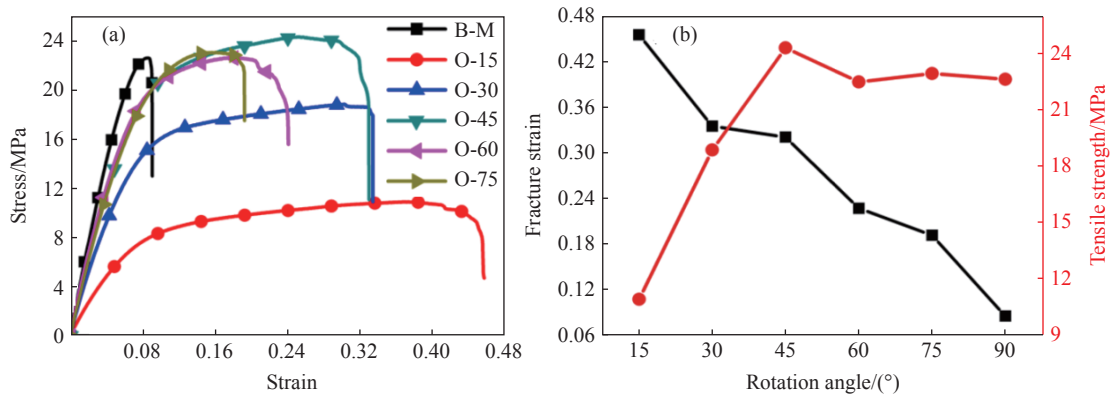


图 5 (a) O-15~O-75 及 B-M 试样准静态拉伸应力-应变曲线, (b) O-15~O-75 及 B-M 试样断裂应变及拉伸强度

Fig. 5 (a) Stress-strain curve of O-15~O-75 and B-M specimens under quasi-static tensile, and (b) fracture strain and tensile strength of O-15~O-75 and B-M specimens

2.2 能量耗散

图 6 给出了不同试样断裂前能量耗散情况, 试件断裂前的能量耗散记为 $W^{[13]}$

$$W = \int F d\delta$$

式中: F 与 δ 分别是拉伸的力与位移。由图 6 可以看出, I、O 两种系列试样在断裂前吸收的能量均大于 B-M 结构吸收的能量。在旋转同样角度的情况下, 面外旋转吸收的能量大约为面内旋转时的 1.2~1.4 倍。在 I 系列试样中, I-45 试样在断裂前吸收的能量最大, 约为 294 N·mm; 在 O 系列试样中, O-45 试样在断裂前吸收的能量最大, 约为 423 N·mm。由此可以看出, O-45 试样的断裂韧性最高。

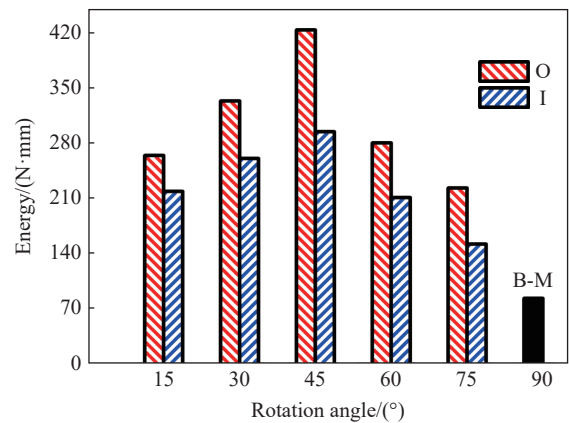


图 6 断裂前试样的能量吸收

Fig. 6 Energy absorption of specimens before fracture

图 7(a) 给出了 B-M 试样发生断裂后的裂纹形态。从图中可以看出, 发生拉伸断裂时, “砖块”会发生相对滑移, 界面即软材料会受到剪切作用而发生破坏。另一方面, 软硬材料之间的相互作用力超过其剪切黏结强度时, “砖块”拔出也会消耗能量。图 7(b) 给出了 O-45 试样发生断裂后的裂纹形态。从图中可以看出, 试样在发生断裂时会出现与试样边界成 45°的微裂纹, 与结构设计时软材料的分布方向相同, 微裂纹主要在软材料处产生, 微裂纹产生与扩展过程中能够耗散更多的外界能量, 从而增强结构的断裂韧性。图 7(c) 给出了 I-15 试样发生断裂后产生的裂纹形态。从图 7(c) 中可以发现, 在试样发生完全失效前, 试样的边界处生成 3 条微裂纹, 随着拉伸的继续, 微裂纹继续扩展, 最终形成一条主裂纹, 这条裂纹会导致结构的最终断裂, 在主裂纹附近伴有新的微裂纹的生成。与脆性材料相比, 多条微裂纹生成这一力学行为能够耗散更多的能量, 缓冲结构的断裂, 有效增强结构的断裂韧性。图 7(d) 和图 7(e) 给出了 I-30 试样发生断裂后的裂纹形态, 从图中可以看出, 在主裂纹附近会产生多条偏转的裂纹, 裂纹产生、扩展、偏转及支裂纹的生成能够耗散外界能量, 从而增强结构的韧性。图 7(f) 给出了 O-60 试样发生断裂后的侧面裂纹形态。从图中可以看出, 主裂纹附近的微裂纹在扩展过程中发生偏转, 这是由于裂纹扩展过程中能量逐渐减小, 当剩余能量不足以穿过硬质材料时, 会绕过硬材料沿着软材料继续扩展, 裂纹发生偏转过程中会耗散外界能量, 从而增强结构的断裂韧性。

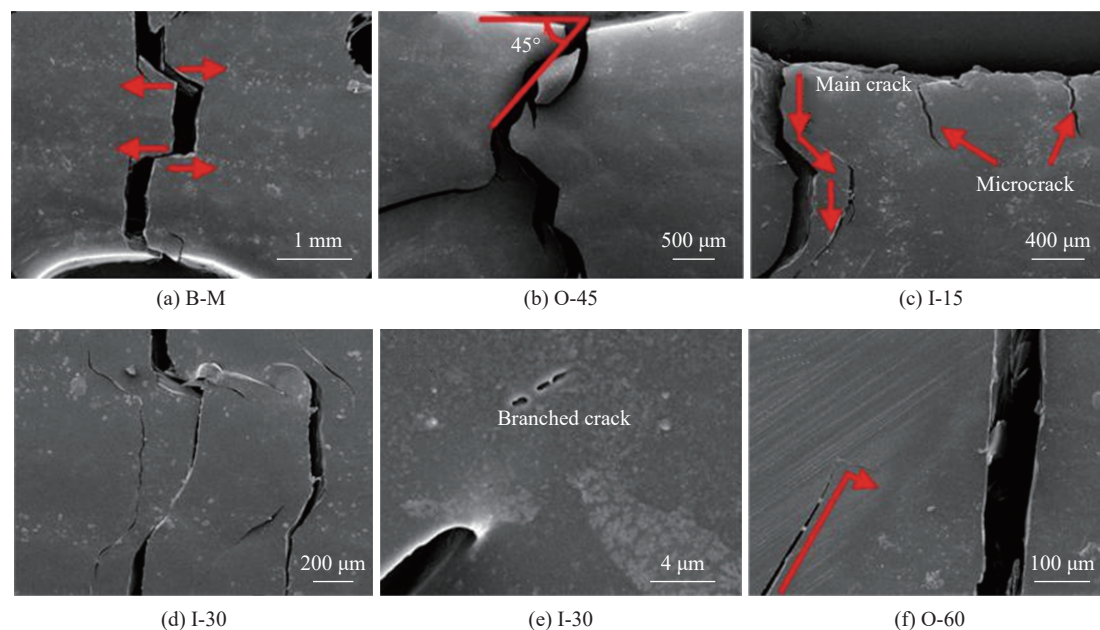


图7 试样的扫描电镜图像

Fig. 7 SEM images of specimens

3 结论

借鉴贝壳珍珠层“砖墙”式微观结构,通过对微结构组合方式及优化设计,利用光固化3D打印技术制备了具有“砖墙”构型的仿贝壳珍珠层及其结构优化复合材料,探究了这类复合材料在准静态拉伸条件下的力学行为及能量耗散机理。

(1)保持胞元的边长不变,沿面外方向调控软、硬质材料的组合角度,随着角度的增大,材料韧性呈线性降低,组合角小于 45° 时,强度线性增大,大于 45° 时强度趋于稳定状态;沿面内方向改变软、硬质材料的组合角度,随着角度的增大,材料断裂应变整体呈线性降低,强度整体呈线性升高。

(2)与B-M试样相比,I、O系列试样断裂前吸收的能量均有提升,且O-45试样断裂前吸收的能量最多,即断裂韧性最好。

(3)硬质材料的拔出,微裂纹的生成、传播、合并,以及裂纹在传播过程中发生偏转等行为是这类复合材料能量耗散的主要途径。

参考文献:

- [1] 贾贤. 天然生物材料及其仿生工程材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
JIA X. Natural biomaterials and biomimetic engineering materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] YARAGHI N A, KISAILUS D. Biomimetic structural materials: inspiration from design and assembly [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2018, 69: 23–57.
- [3] SONG F, SOH A K, BAI Y L. Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre [J]. *Biomaterials*, 2003, 24(20): 3623–3631.
- [4] GU G X, TAKAFFOLI M, BUEHLER M J. Hierarchically enhanced impact resistance of bioinspired composites [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1700060.
- [5] 赵赫威, 郭林. 仿贝壳珍珠母层状复合材料的制备及应用 [J]. 科学通报, 2017, 62(6): 576–589.
ZHAO H W, GUO L. Synthesis and applications of layered structural composites inspired by nacre [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(6): 576–589.
- [6] 赵建民, 麦康森, 张文兵, 等. 贝壳珍珠层及其仿生应用 [J]. 高技术通讯, 2003, 13(11): 94–98.

- ZHAO J M, MAI K S, ZHANG W B, et al. A review on characteristic of nacre and its potential for biomimetic applications [J]. *High Technology Letters*, 2003, 13(11): 94–98.
- [7] 李恒德, 冯庆玲, 崔福斋, 等. 贝壳珍珠层及仿生制备研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(4/5): 41–47.
- LI H D, FENG Q L, CUI F Z, et al. Biomimetic research based on the study of nacre structure [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, 41(4/5): 41–47.
- [8] 梁艳, 赵杰, 王来, 等. 贝壳的力学性能和增韧机制 [J]. *机械强度*, 2007, 29(3): 507–511.
- LIANG Y, ZHAO J, WANG L, et al. Mechanical properties and toughening mechanisms of mollusk shell [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(3): 507–511.
- [9] MENIG R, MEYERS M H, MEYERS M A, et al. Quasi-static and dynamic mechanical response of *Haliotis rufescens* (abalone) shells [J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(9): 2383–2398.
- [10] BARTHELAT F, LI C M, COMI C, et al. Mechanical properties of nacre constituents and their impact on mechanical performance [J]. *Journal of Materials Research*, 2006, 21(8): 1977–1986.
- [11] 张勋, 刘书海, 肖华平. 冷冻铸造技术制备仿贝壳层状结构陶瓷复合材料研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31(7): 99–112.
- ZHANG X, LIU S H, XIAO H P. Applying freeze-casting technique to the fabrication of nacre-like lamellar structured ceramic composites: a state-of-the-art review [J]. *Materials Review*, 2017, 31(7): 99–112.
- [12] 侯东芳, 周根树, 郑茂盛. 贝壳珍珠层断裂过程的原位观察及其增韧机制分析 [J]. *材料科学与工程学报*, 2007, 25(3): 388–391.
- HOU D F, ZHOU G S, ZHENG M S. *In situ* SEM observation of crack propagation and analysis of the toughening mechanism in nacre [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2007, 25(3): 388–391.
- [13] 马骁勇, 梁海弋, 王联凤. 三维打印贝壳仿生结构的力学性能 [J]. 科学通报, 2016, 61(7): 728–734.
- MA X Y, LIANG H Y, WANG L F. Multi-materials 3D printing application of shell biomimetic structure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(7): 728–734.
- [14] BEGLEY M R, PHILIPS N R, COMPTON B G, et al. Micromechanical models to guide the development of synthetic ‘brick and mortar’ composites [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(8): 1545–1560.

Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre

HOU Xianglong, LEI Jianyin, LI Shiqiang, WANG Zhihua, LIU Zhifang

(*Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: Nacre inspired composite materials with different assembly modes were fabricated by photocurable 3D printing. The composite materials consist of two kinds of matrix materials. The tension mechanical properties, fracture and energy dissipation mechanism were analyzed by quasi-static tensile tests combined with scanning electron microscope (SEM). The results show that, keeping the length of the cell constant, the strength of nacre inspired composite materials increase linearly, while the fracture strain decreases linearly with the increasing of in-plane assembly angle. The fracture strain decreases linearly with the increasing of out-plane assembly angle. When the out-plane assembly angle is less than 45° , the strength of nacre inspired composite materials increases linearly with increasing such angle, but it tends to be stable when such angle exceeds 45° . The strength of the material reaches the maximum value when the out-plane assembly angle is 45° . Most of the tension energy is dissipated by pull-out of the hard materials, generation, propagation and combination of micro-cracks at the soft/hard interface and the crack deflection in the propagation process.

Keywords: 3D printing; tension mechanical behavior; bio-inspired material; energy dissipation