高压物理学报

硬质相形状对Ti-Al_3Ti仿生复合材料断裂行为影响的数值模拟研究

修承东 王长峰 李冰 管仁国

Numerical Simulation Study on the Influence of Hard Phase Shape on the Fracture Behavior of Ti-Al_3Ti Bionic Composites

XIU Chengdong, WANG Changfeng, LI Bing, GUAN Renguo

引用本文:
修承东, 王长峰, 李冰, 等. 硬质相形状对Ti-Al_3Ti仿生复合材料断裂行为影响的数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(4):044201. DOI: 10.11858/gywlxb.20230629
XIU Chengdong, WANG Changfeng, LI Bing, et al. Numerical Simulation Study on the Influence of Hard Phase Shape on the Fracture Behavior of Ti-Al_3Ti Bionic Composites[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4):044201. DOI: 10.11858/gywlxb.20230629

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230629

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

3D打印浆砌层合结构复合材料层间断裂韧性的数值模拟
Numerical Simulation on Interlaminar Fracture Toughness of 3D Printed Mortar Laminated Composites
高压物理学报. 2020, 34(4): 044206 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190827

冲击载荷下$Ni_{52}Ti_{48}$合金的微观响应特性
Micro-Scale Response Characteristics of $Ni_{52}Ti_{48}$ Alloy under Shock Loading
高压物理学报. 2021, 35(4): 040107 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210769

冲击载荷下仿贝壳珍珠层Voronoi结构的动态力学响应
Dynamic Responses of Nare-Like Voronoi Structure under Impact Loading
高压物理学报. 2020, 34(6): 064201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200559

冲击载荷下Al_2O_3陶瓷的失效与破碎特性
Failure and Fracture Characteristics of Al_2O_3 Ceramics under Impact Loading
高压物理学报. 2019, 33(5): 054202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180695

含有断裂缺陷的复合材料壳体的力学行为
Mechanical Behavior Analysis of Composite Shell with Fracture Defect
高压物理学报. 2021, 35(3): 034205 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200649

超高速撞击下47Zr45Ti5Al3V合金的宏观与微观响应行为
Macro- and Micro-Damage Behaviors of 47Zr45Ti5Al3V Alloy in Hypervelocity Impact
高压物理学报. 2017, 31(3): 231 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.03.004

DOI: 10.11858/gywlxb.20230629

硬质相形状对 Ti-Al_3Ti 仿生复合材料断裂行为影响的数值模拟研究

修承东[1,2], 王长峰[1,2], 李 冰[1,2], 管仁国[1,2]

(1. 大连交通大学连续挤压教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116028;
2. 辽宁省近净成形重点实验室, 辽宁 大连 116028)

摘要: Al_3Ti 具有低密度、高硬度等特点, 然而, 由于其具有较高的脆性, 导致较小的变形下便会发生破碎。为了提高 Al_3Ti 的应用范围, 受生物结构的启发, 根据贝壳珍珠层、海螺壳和鱼鳞的几何结构, 建立了 Ti-Al_3Ti 仿生有限元计算模型, 研究了硬质相形状和加载速度对材料断裂的影响, 从断裂行为、裂纹扩展过程和吸能效果等角度分析仿生复合材料的抗断裂机理。定义了形状系数, 并对结构进行优化设计。结果表明, 在准静态条件下, 硬质相形状对仿珍珠层试样的断裂行为有显著影响。长方形硬质相能更好地抑制裂纹向载荷端扩展, 从而提高试样的承载能力。形状系数在 5.0 左右的试样表现出最优的抗断裂能力和吸能效果。在动态冲击条件下, 软质相抑制裂纹扩展的能力增强, 使长方形试样的抗断裂能力和吸能效果得到进一步提高。

关键词: 珍珠层; Ti-Al_3Ti 复合材料; 断裂; 有限元分析

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A

随着航空航天、武器工业和交通运输等领域的高速发展, 人们对材料性能提出了更高的要求, 即轻质、高比强度、高比刚度[1]。单一材料往往难以满足需求, 受贝壳珍珠层的启发, 通过在硬质相中引入软质相, 使材料不仅具有硬质相的高强度和高刚度, 而且兼具软质相的高断裂韧性[2]。Al_3Ti 具有低密度、高硬度、高弹性模量的特点, 是理想的硬质相材料[3−4]。Harach 等[5] 研究发现, 由 Ti 箔和 Al 箔经热压处理后制备出的 Ti-Al_3Ti 复合材料具有很强的可设计性。Price 等[6] 和 Li 等[7] 对 Ti-Al_3Ti复合材料的压缩行为和压缩性能进行了研究, 发现软质相 Ti 的体积分数影响 Ti-Al_3Ti 复合材料的抗压强度: 当加载方向平行于层向时, 硬质相 Al_3Ti 层先发生破坏, 然后在软质相 Ti 层中发生屈曲变形; 当加载方向垂直于层向时, 硬质相 Al_3Ti 在拉应力的作用下发生破坏, 而软质相 Ti 层以剪切的形式发生破坏。Adharapurapu 等[8] 通过拉伸实验对 Ti-Al_3Ti 复合材料的裂纹扩展行为进行了研究, 发现 Ti-Al_3Ti 复合材料在断裂过程中由于软质相 Ti 的桥接作用, 韧性和抗疲劳性能得到明显的提升。Ti-Al_3Ti 复合材料具有一定的防弹能力, 在轻质装甲结构中具有很大的应用潜力。张海广等[9] 的冲击实验结果表明, 仿贝壳复合材料具有很强的断裂韧性。武晓东等[10] 建立了铝/乙烯基仿贝壳珍珠层的随机 Voronoi 结构模型, 研究了 Voronoi 结构和规则片板在冲击载荷作用下的力学性能, 发现随机 Voronoi结构具有更优异的吸能能力, 可以抑制应力集中现象。

硬质相和软质相的几何结构影响复合材料的整体力学性能, 现有的 Ti-Al_3Ti 复合材料多采用钛箔

* **收稿日期:** 2023-03-27; **修回日期:** 2023-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3706801, 2022YFE0137900); 辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300003)

作者简介: 修承东(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事仿生复合材料研究. E-mail: xcdxcd1028@163.com

通信作者: 王长峰(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: chfwang@djtu.edu.cn

李 冰(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事轻质合金制备研究. E-mail: libing@djtu.com

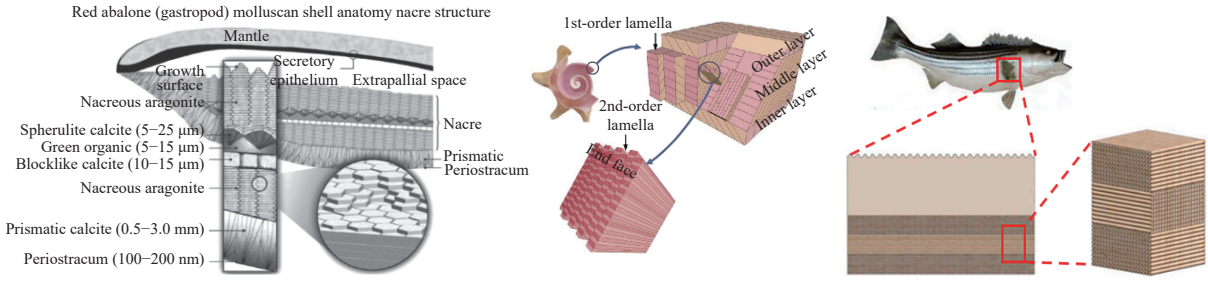
和铝箔逐层堆叠后再利用真空热压法制备而成，Ti 和 Al_3Ti 呈层状分布。贝壳的基本结构主要由角质层、棱柱层和珍珠层构成[11−13]，其中珍珠层是由软质相与硬质相交替堆叠而成的一种“砖-泥”结构，在生物材料中表现出卓越的力学性能[14−16]。珍珠层硬质相的存在可以抵御外界的攻击，软质相可以有效减轻外界带来的损伤，并通过独特的微结构阻碍裂纹扩展，在生物结构材料的增韧中起着关键作用。

本研究将设计并建立 3 种与珍珠层微观结构相似的仿生结构，探讨不同硬质相形状的仿珍珠层 Ti-Al_3Ti 复合材料在准静态和动态冲击作用下的破坏过程、应力分布以及能量吸收机制，为 Ti-Al_3Ti 复合材料的结构设计提供参考。

1　数值模拟

1.1　有限元模型

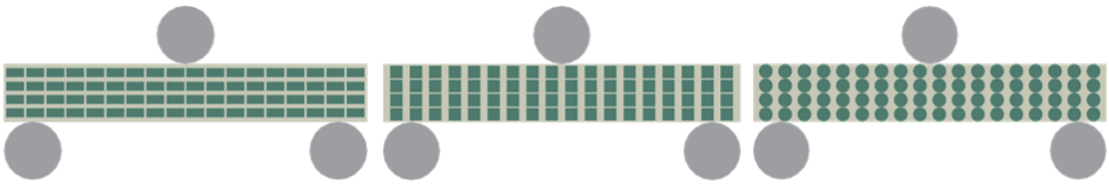
不同生物拥有独特的微观结构：贝壳珍珠层硬质相呈长方形，如图 1(a)[13] 所示；海螺壳硬质相呈正方形，如图 1(b)[17] 所示；鱼鳞硬质相呈圆形，如图 1(c)[18] 所示。基于不同的生物结构，建立仿生有限元模型，如图 2 所示，模型尺寸为 82 mm×13 mm×8 mm。为了确保模型具有相同的密度，设硬质相的体积分数均为 54%，均匀分布。仿生有限元模型用六面体网格划分，网格的特征长度为 0.25 mm。硬质相形状分为圆形（半径为 1.59 mm）、正方形（边长为 2.82 mm）以及长方形（尺寸为 2 mm×3 mm、2 mm×4 mm、2 mm×6 mm 和 2 mm×8 mm），相应的网格单元总数分别为 699 584、553 152、595 200、578 272、582 752 和 577 472。采用 ABAQUS 软件进行模拟计算，模型的网格类型均为 C3D8R。通过分析有限元模型在三点弯曲条件下的断裂行为，研究不同硬质相形状对断裂行为的影响。其中，三点弯曲压头的直径为 10 mm，支撑端直辊间距为 69 mm。



(a) Red abalone seashell[13]　　(b) Conch shell[17]　　(c) Fish scale[18]

图 1　不同生物的珍珠层结构示意图[13, 17−18]

Fig. 1　Schematic diagrams of pearl structures in different organisms[13, 17−18]



(a) Rectangle　　(b) Square　　(c) Circle

图 2　不同硬质相形状的有限元模型

Fig. 2　Finite element models with different shapes of hard phase

1.2　本构模型及参数

软质相采用 Johnson-Cook（JC）本构模型描述，硬质相采用 Johnson-Holmquist-Ceramics（JH-2）本构模型描述。模型状态方程及 JH-2 本构模型分别为

$$p = K_1\theta + K_2\theta^2 + K_3\theta^3 \tag{1}$$

$$\begin{cases} \sigma_{\mathrm{i}}^{*} = A(p^{*}+T^{*})^{N}(1+C\ln\dot{\varepsilon}) & D=0 \\ \sigma_{\mathrm{f}}^{*} = Bp^{*M}(1+C\ln\dot{\varepsilon}) & D=1 \\ \sigma^{*} = \sigma_{\mathrm{i}}^{*} - D(\sigma_{\mathrm{i}}^{*}-\sigma_{\mathrm{f}}^{*}) & 0<D<1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：p 为静水压力；K_1 为体积模量；K_2 和 K_3 为材料常数；σ_{i}^{*}、σ_{f}^{*}和σ^{*}分别为未损伤、完全损伤、部分损伤时材料的无量纲有效应力；D 为损伤度；A、N、C、B、M 为材料常数；p^{*}为无量纲静水压力，$p^{*}=p/p_{\mathrm{HEL}}$，p_{HEL}为材料处于 Hugoniot 弹性极限时的压力分量；T^{*}为无量纲最大静水拉应力，$T^{*}=T/p_{\mathrm{HEL}}$，T 为最大静水拉应力。软质相 Ti6Al4V 和硬质相 Al_3Ti 的 JC 模型和 JH-2 模型参数取值见表 1 和表 2，其中：ρ 为密度，G 为剪切模量，a、b、c、m、n 为 JC 模型参数，E 为弹性模量，D_1 和 D_2 为损伤度参数。

表 1　软质相材料 Ti6Al4V 的 JC 模型参数[19]

Table 1　Parameters of JC model for soft phase material Ti6Al4V[19]

ρ/(g·cm^{-3})	G/GPa	a/GPa	b/GPa	c	m	n
4.428	113.8	1.098	1.092	0.014	1.1	0.93

表 2　硬质相材料 Al_3Ti 的 JH-2 模型参数[20]

Table 2　Parameters of JH-2 model for hard phase material Al_3Ti[20]

ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	A	B	C	M	N
3.35	216	0.85	0.31	0.013	0.21	0.29
T/GPa	p_{HEL}/GPa	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
0.2	1.842	0.02	1.85	2.01	2.6	0

1.3　可靠性验证

采用 3D 打印技术制备了软质相 Ti6Al4V 骨架，骨架尺寸为 82 mm×13 mm×8 mm，骨架中留有通孔，尺寸为 2 mm×4 mm。将骨架进行酸洗晾干，然后放于模具内，并埋入铝粉中。利用真空热压烧结法制备 Ti-Al_3Ti 复合材料，Ti6Al4V 与 Al 的界面处形成 Al_3Ti 层。增加真空热压烧结时间，Al_3Ti 层厚度增大，最终通孔内形成 Al_3Ti 硬质相。Ti-Al_3Ti 复合材料试样如图 3 所示。

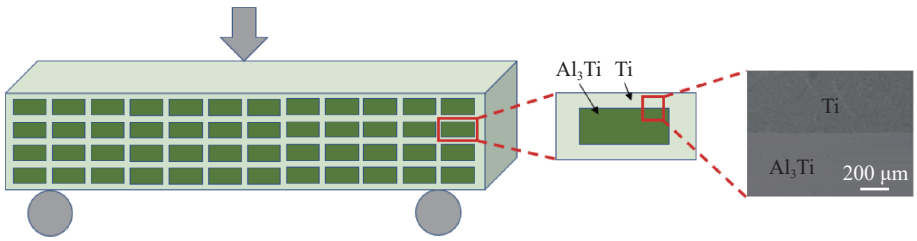
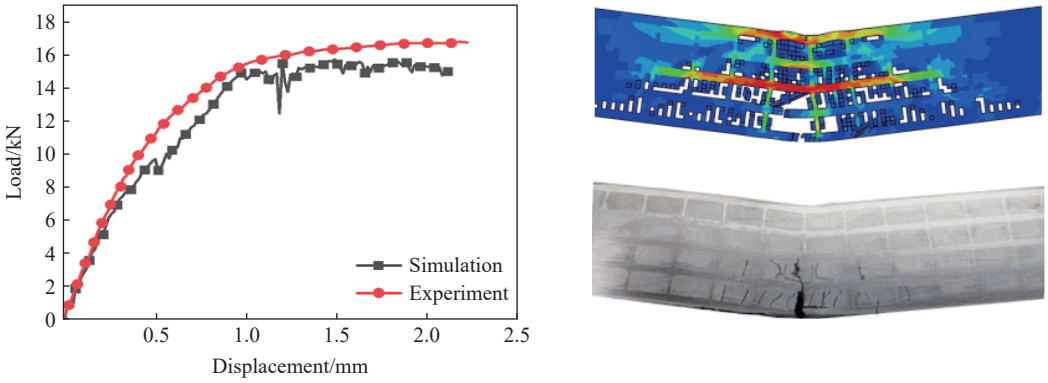


图 3　Ti-Al_3Ti 复合材料试样示意图

Fig. 3　Schematic diagram of Ti-Al_3Ti composite specimen

对制备的 Ti-Al_3Ti 试样进行三点弯曲实验，所得实验结果与同尺寸的有限元模拟结果进行对比，如图 4(a) 所示。可以发现，模拟的载荷-位移曲线与实验结果基本一致，弹性段吻合较好，塑性段的模拟结果略低于实验结果。由图 4(b) 可知，有限元模型的裂纹扩展模式与实验测得的裂纹扩展模式基本一致，均为试样中心部分先产生裂纹，并逐步向载荷端扩展。以上结果表明，有限元模型具有可靠性。

对有限元模型进行网格收敛性分析，分析了 5 种有限元模型，特征长度分别为 0.50、0.40、0.30、0.25 和 0.20 mm。计算结果表明，随着网格特征长度的减小，计算所需的内存和时间增加，有限元模型的最大载荷趋于常值。对于特征长度为 0.25 和 0.20 mm 的模型，最大载荷的模拟结果与实验结果的相对误差小于 3%，表明特征长度为 0.25 mm 时计算结果已收敛。为保证有限元模拟结果的可比性，统一用 0.25 mm 的特征长度对不同的有限元模型进行网格划分。



(a) Load-displacement curves　　(b) Fracture behavior

图 4　模拟结果与实验结果的对比

Fig. 4　Comparison of simulation and experimental results

2　结果与讨论

2.1　硬质相形状的影响机理分析

不同硬质相形状下试样的载荷-位移曲线如图 5 所示，其中长方形硬质相试样的硬质相尺寸为 2 mm×4 mm。随着位移的增加，圆形硬质相试样的载荷线性增加。当载荷达到 6 kN 时，试样的支撑端出现裂纹，并沿着硬质相边界向载荷端扩展，导致试样迅速失效。当载荷为 7 kN 时，正方形硬质相试样在支撑端产生多条裂纹，仅少量裂纹向载荷端扩展，随着位移的增加，载荷不再增大，试样在位移为 1.0 mm 时失效。当载荷为 10 kN 时，长方形硬质相试样在支撑端中心出现多条横向分布的裂纹，随着位移的增加，载荷-位移曲线呈线性增加。当载荷达到 15 kN 时，裂纹从支撑端向载荷端扩展，支撑端微裂纹数增加，当位移接近 2.0 mm 时，试样仍保持一定的承载能力。对比不同硬质相形状试样的载荷-位移曲线，可以发现，长方形硬质相试样承受的最大载荷是圆形硬质相试样的 2 倍。当硬质相形状为圆形时，裂纹快速扩展。相反，长方形硬质相试样中的软质相能够有效阻碍裂纹扩展，使支撑端出现多条横向分布的裂纹，试样具有较高的承载能力。因此，当硬质相体积分数相同时，硬质相形状对试样的断裂行为具有重要影响。与圆形和正方形硬质相试样相比，长方形硬质相试样表现出优异的止裂能力和更强的承载能力。

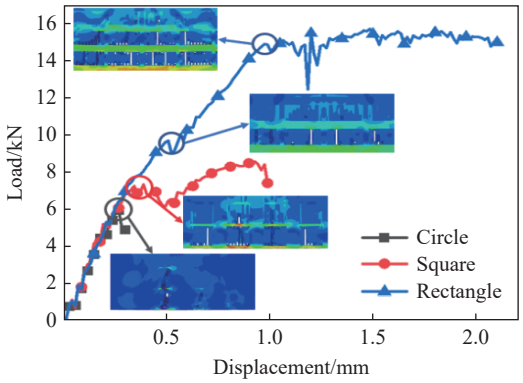


图 5　具有不同硬质相形状的试样的载荷-位移曲线

Fig. 5　Load-displacement curves for specimens with different shapes of hard phase

图 6 给出了不同硬质相形状试样三点弯曲时的等效应力云图。对于圆形硬质相试样：当位移为 0.30 mm 时，支撑端中心出现裂纹；随着位移的增加，裂纹逐渐从支撑端向载荷端扩展；当位移为 0.45 mm 时，裂纹扩展至载荷端顶部，最终试样失效。对于正方形硬质相试样：当位移为 0.45 mm 时，支撑端中心出现多条向载荷端扩展的裂纹；随着位移的增加，支撑端出现较多新裂纹，试样中心的裂纹向载荷端扩展；当位移为 1.20 mm 时，裂纹扩展至载荷端顶部，试样失效。对于长方形硬质相试样：当位移为 0.90 mm 时，裂纹扩展至试样中心位置，支撑端出现大量裂纹；当位移增加至 1.80 mm 时，支撑端的裂纹数增加。对比 3 种试样发现，硬质相形状对试样的裂纹扩展产生较大影响：圆形硬质相试样趋于产生朝载荷端竖直扩展的裂纹，而正方形和长方形硬质相试样则产生较多的横向裂纹，裂纹向载荷端扩展的速度较缓慢，较多的横向裂纹在加载过程中吸收大量能量，提升了试样的承载能力。为定量描

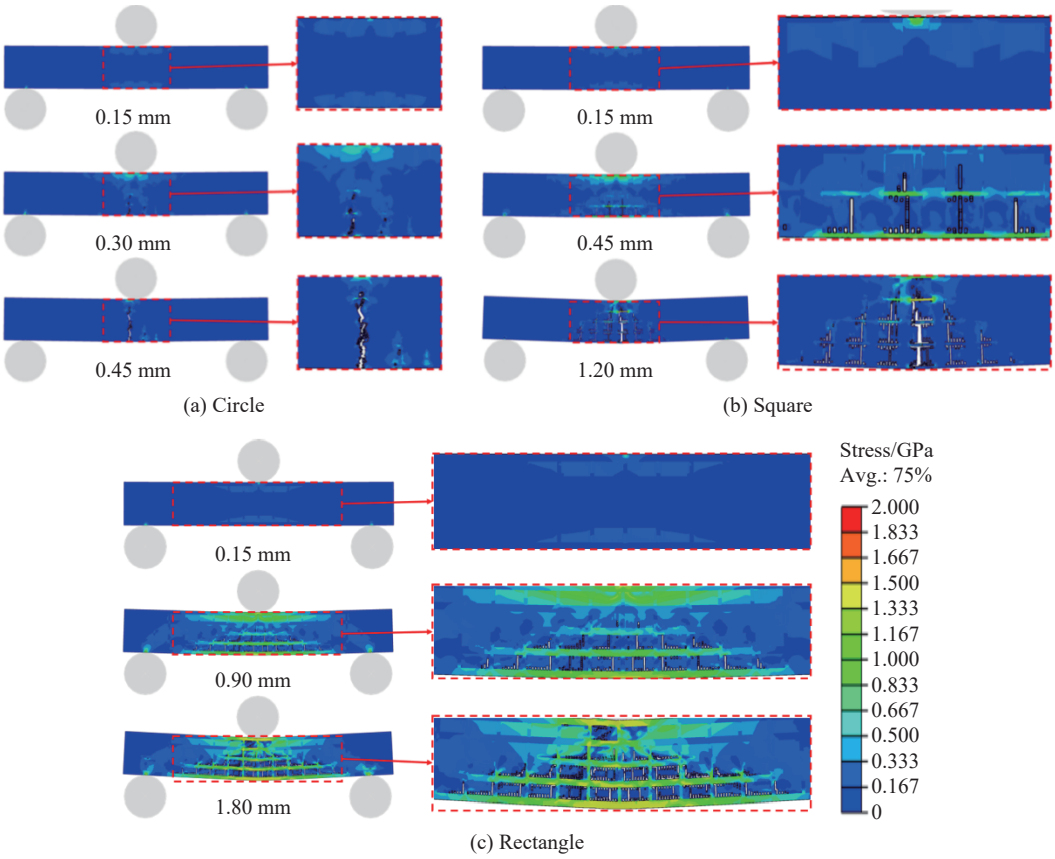


图 6　准静态条件下不同硬质相形状试样的等效应力云图

Fig. 6　Equivalent stress contours for specimens with different shapes of hard phase under quasi-static loading

述硬质相形状差异，定义无量纲形状系数 Φ

$$\Phi = \frac{L^2}{4\pi S}\frac{h_x}{h_y} \tag{3}$$

式中：S 为硬质相截面积，L 为硬质相周长，h_x 和 h_y 分别为硬质相在水平和竖直方向上的投影长度。圆形结构的形状系数定义为 1.0，正方形的形状系数为 1.3。图 7 显示了形状系数与比吸能的关系，可见，试样的比吸能随着形状系数的增大而增大。有限元模型中，形状系数为 5.0、硬质相尺寸为 2.00 mm×6.00 mm 的试样的吸能效果最好，承载能力最强。为防止复合材料的裂纹迅速扩展，提高承载能力，应将试样的形状系数控制在 5.0 左右。

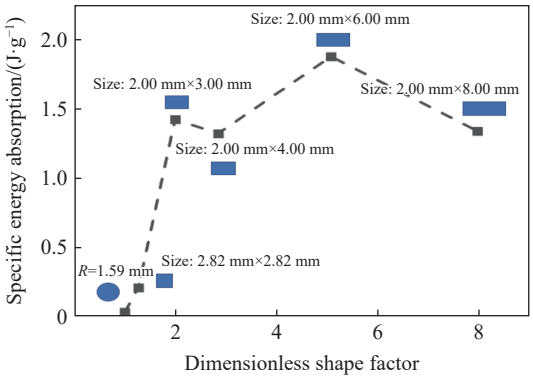
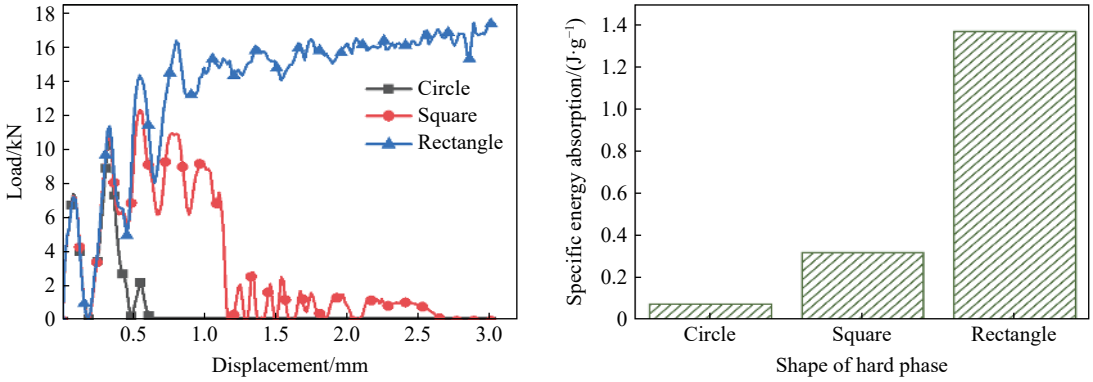


图 7　准静态条件下无量纲形状系数与比吸能的关系

Fig. 7　Relation between dimensionless shape factor and specific energy absorption under quasi-static conditions

2.2　冲击速度的影响机理分析

当压头的冲击速度为 5 m/s 时，不同硬质相形状试样的载荷-位移曲线见图 8(a)。随着位移的增加，试样载荷呈振荡式增大。圆形硬质相试样在位移为 0.50 mm 时失效。正方形硬质相试样失效时的位移是圆形硬质相试样的 2 倍；而长方形硬质相试样的载荷随着位移的增大而增大，位移为 3.00 mm 时仍未失效。图 8(b)给出了不同硬质相形状试样的能量吸收对比。圆形、正方形和长方形硬质相试样的比吸能分别为 0.076、0.320 和 1.367 J/g，长方形硬质相试样的比吸能是圆形硬质相试样比吸能的 18 倍。动态加载下，长方形硬质相试样的比吸能明显高于圆形和正方形硬质相试样。

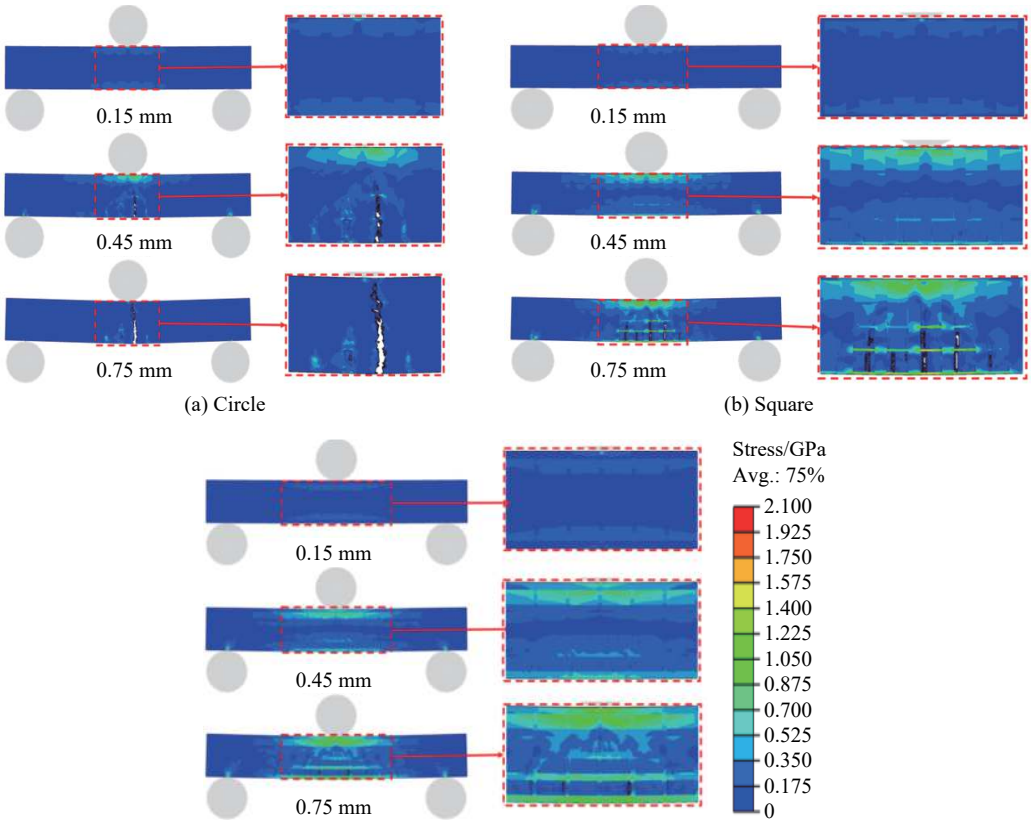


(a) Load-displacement curves　　(b) Specific energy absorptions of specimens

图 8　冲击速度为 5 m/s 时不同硬质相形状试样的载荷-位移曲线和比吸能

Fig. 8　Load-displacement curves and specific energy absorptions of specimens with different shapes of hard phase under the impact velocity of 5 m/s

图 9 显示了冲击速度为 5 m/s 时不同硬质相形状试样的等效应力云图。在初始阶段，应力主要集中在支撑端和中部；当位移为 0.45 mm 时，圆形硬质相试样的中心区域出现裂纹，而正方形和长方形硬质相试样中未见明显的裂纹；随着位移的增加，圆形硬质相试样的裂纹向载荷端扩展，导致试样在位移为 0.75 mm 时失效。与正方形硬质相试样相比，长方形硬质相试样表现出更强的抑制裂纹扩展能力，仅在支撑端出现细微裂纹，并且裂纹分布范围也更宽。长方形硬质相试样中的软质相有效地阻碍了裂纹沿竖直方向扩展，增大了失效位移，提高了试样的承载能力。



(a) Circle　　(b) Square

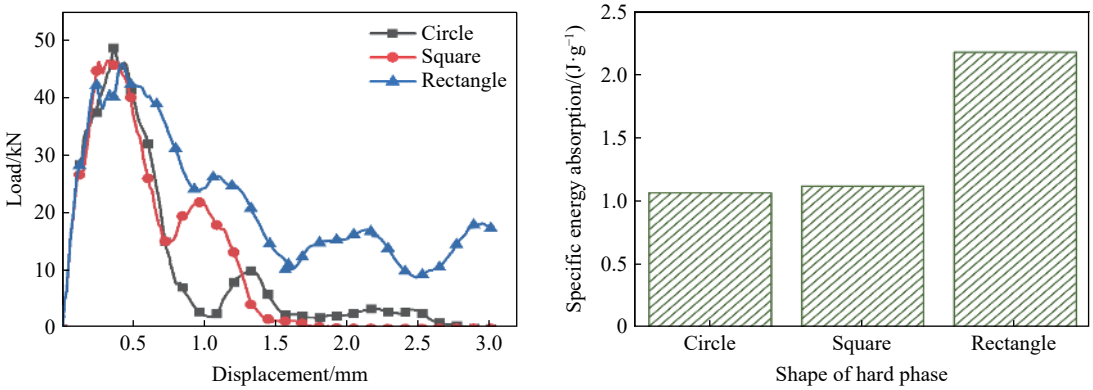
(c) Rectangle

图 9　冲击速度为 5 m/s 时不同硬质相形状试样的等效应力云图

Fig. 9　Equivalent stress contours for specimens with different shapes of hard phase under the impact velocity of 5 m/s

图 10(a) 给出了高速冲击下(50 m/s)不同硬质相形状试样的载荷-位移曲线。在起始阶段，3 种试样的载荷随位移的增加而线性增大；当载荷达到 50 kN 时，试样均发生破坏；随后，圆形硬质相试样的载荷急剧下降；当位移达到 1.00 mm 时，载荷趋于零。对于正方形硬质相试样，当载荷达到最大值后，试样仍保持一定的承载能力，当位移为 1.50 mm 时，试样失效。相比之下，长方形硬质相试样表现出更高的载荷和更大的失效位移。图 10(b) 显示了不同硬质相形状试样的比吸能。圆形和正方形硬质相试样的比吸能几乎相等，而长方形硬质相试样的比吸能是圆形和正方形硬质相试样的 2 倍。

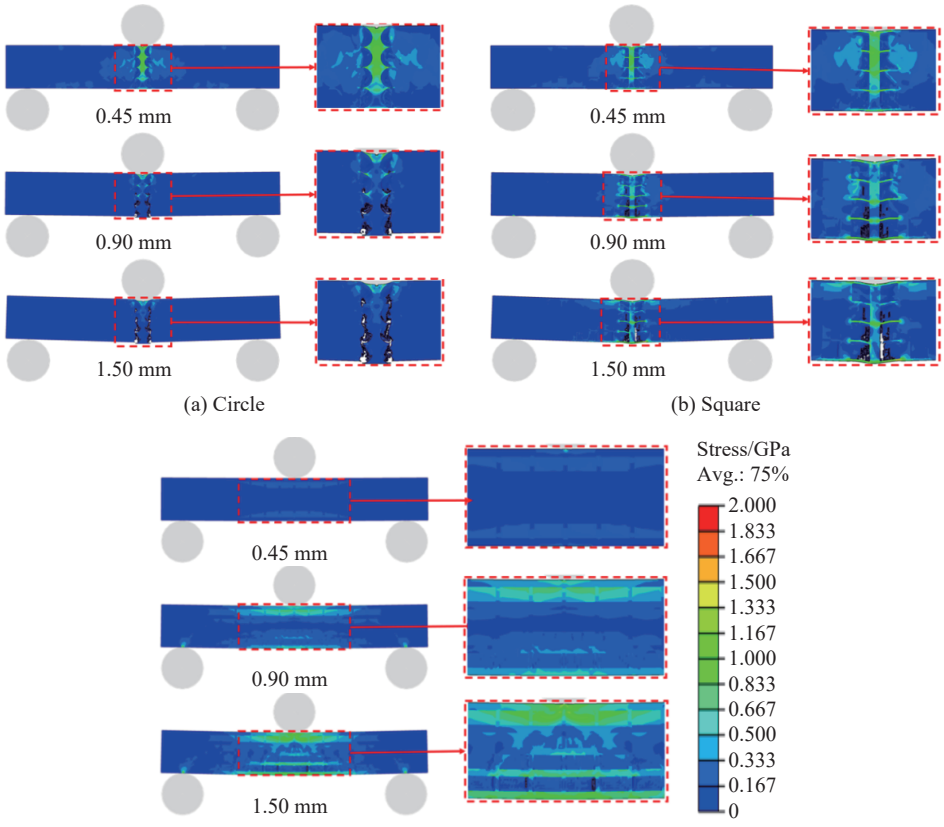
图 11 给出了不同硬质相形状试样在高速冲击下的等效应力云图。当位移为 0.45 mm 时，3 种试样均出现明显的裂纹，试样中心出现明显的等效应力较大的区域。当位移增加至 0.90 mm 时：圆形硬质



(a) Load-displacement curves　　(b) Specific energy absorptions of specimens

图 10　冲击速度为 50 m/s 时不同硬质相形状试样的载荷-位移曲线和比吸能

Fig. 10　Load-displacement curves and specific energy absorptions of specimens with different shapes of hard phase under the impact velocity of 50 m/s



(a) Circle　　(b) Square

(c) Rectangle

图 11　冲击速度为 50 m/s 时不同硬质相形状试样的等效应力云图

Fig. 11　Equivalent stress contours for specimens with different shapes of hard phase under the impact velocity of 50 m/s

相试样中心出现两条明显的竖向裂纹；正方形硬质相试样在支撑端出现较小的裂纹，裂纹长度小于圆形硬质相试样；而长方形硬质相试样中未出现明显的裂纹。当位移为 1.50 mm 时，圆形硬质相试样的裂纹由支撑端扩展至载荷端顶部，导致试样失效。由于软质相对裂纹扩展起阻滞作用，因此正方形硬质相试样中的裂纹向载荷端扩展的速度较圆形硬质相试样更缓慢。当位移为 1.50 mm 时，裂纹仅扩展至试样中心，试样仍保持一定的承载能力，而长方形硬质相试样仅在支撑端的少数硬质相中发生破坏，裂纹未发生扩展，软质相对裂纹的阻滞效果较好。

3　结　论

(1) 在准静态条件下，保持相同的硬质相体积分数，硬质相形状对复合材料的裂纹扩展和吸能能力有较大的影响。在圆形和正方形硬质相试样中，裂纹向载荷端扩展，软质相阻碍裂纹向载荷端扩展的效果不明显；在长方形硬质相试样中，软质相有效地阻碍裂纹向载荷端扩展，增大了失效位移，提高了试样的承载能力。

(2) 试样的比吸能随着无量纲形状系数的增大而逐渐增大。硬质相尺寸为 2.00 mm×6.00 mm 的试样表现出最好的吸能效果，而形状系数在 5.0 左右的试样具有最优的抗断裂能力和吸能效果。

(3) 当冲击速度为 5 m/s 时，圆形硬质相试样形成一条从支撑端向载荷端迅速扩展的裂纹，而正方形和长方形硬质相试样在支撑端产生细微裂纹，软质相有效地阻碍了裂纹向载荷端扩展。长方形硬质相试样表现出最优异的抗裂纹扩展能力和吸能能力。当冲击速度达到 50 m/s 时，圆形硬质相试样中的裂纹数量增多，而长方形硬质相试样中未出现明显裂纹。软质相阻碍裂纹扩展的能力随着冲击速度的提升而增强，致使长方形硬质相试样表现出更好的抗断裂能力和吸能效果。

参考文献：

[1] 李红, 闫维嘉, 张禹, 等. 先进航空材料焊接过程热裂纹研究进展 [J]. 材料工程, 2022, 50(2): 50–61.
LI H, YAN W J, ZHANG Y, et al. Research progress of hot crack in fusion welding of advanced aeronautical materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(2): 50–61.

[2] ESPINOSA H D, RIM J E, BARTHELAT F, et al. Merger of structure and material in nacre and bone-Perspectives on *de novo* biomimetic materials [J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(8): 1059–1100.

[3] MIZUTA N, MATSUURA K, KIRIHARA S, et al. Titanium aluminide coating on titanium surface using three-dimensional microwelder [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 492(1/2): 199–204.

[4] NOFAR M, HOSSEINI H R M, KOLAGAR-DAROONKOLAIE N. Fabrication of high wear resistant Al/Al_3Ti metal matrix composite by *in situ* hot press method [J]. Materials & Design, 2009, 30(2): 280–286.

[5] HARACH D J, VECCHIO K S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(6): 1493–1505.

[6] PRICE R D, JIANG F C, KULIN R M, et al. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti-Al_3Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(7/8): 3134–3146.

[7] LI T Z, JIANG F C, OLEVSKY E A, et al. Damage evolution in Ti6Al4V-Al_3Ti metal-intermetallic laminate composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 443(1/2): 1–15.

[8] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F C, et al. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al_3Ti metal-intermetallic laminate composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(6): 1595–1608.

[9] 张海广, 王瑜, 安连浩, 等. 冲击载荷下分支交错层状仿生复合材料动态断裂行为的实验研究和数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(1): 014101.
ZHANG H G, WANG Y, AN L H, et al. Experimental study and numerical simulation of dynamic fracture behavior of branch staggered laminated biomimetic composites under impact loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(1): 014101.

[10] 武晓东, 张海广, 王瑜, 等. 冲击载荷下仿贝壳珍珠层 Voronoi 结构的动态力学响应 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 064201.

WU X D, ZHANG H G, WANG Y, et al. Dynamic responses of nare-like Voronoi structure under impact loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(6): 064201.

[11] WANG R Z, SUO Z, EVANS A G, et al. Deformation mechanisms in nacre [J]. Journal of Materials Research, 2001, 16(9): 2485–2493.

[12] YOURDKHANI M, PASINI D, BARTHELAT F. Multiscale mechanics and optimization of gastropod shells [J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8(4): 357–368.

[13] ZAREMBA C M, BELCHER A M, FRITZ M, et al. Critical transitions in the biofabrication of abalone shells and flat pearls [J]. Chemistry of Materials, 1996, 8(3): 679–690.

[14] SARIKAYA M, GUNNISON K E, YASREBI M, et al. Mechanical property-microstructural relationships in abalone shell [J]. MRS Online Proceedings Library, 1989, 174(1): 109–116.

[15] JACKSON A P, VINCENT J F V, TURNER R M. The mechanical design of nacre [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1988, 234(1277): 415–440.

[16] NUKALA P K V V, SIMUNOVIC S. A continuous damage random thresholds model for simulating the fracture behavior of nacre [J]. Biomaterials, 2005, 26(30): 6087–6098.

[17] SHIN Y A, YIN S, LI X Y, et al. Nanotwin-governed toughening mechanism in hierarchically structured biological materials [J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10772.

[18] GHAZLAN A, NGO T, TAN P, et al. Inspiration from nature's body armours: a review of biological and bioinspired composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 205: 108513.

[19] LI T Z, GRIGNON F, BENSON D J, et al. Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al_3Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 374(1/2): 10–26.

[20] CAO Y, ZHU S F, GUO C H, et al. Numerical investigation of the ballistic performance of metal-intermetallic laminate composites [J]. Applied Composite Materials, 2015, 22(4): 437–456.

Numerical Simulation Study on the Influence of Hard Phase Shape on the Fracture Behavior of Ti-Al_3Ti Bionic Composites

XIU Chengdong[1,2], WANG Changfeng[1,2], LI Bing[1,2], GUAN Renguo[1,2]

(1. *Continuous Extrusion Engineering Research Center of the Ministry of Education*, *Dalian Jiaotong University*, *Dalian* 116028, *Liaoning*, *China*;
2. *Liaoning Key Laboratory of Near Net Forming*, *Dalian* 116028, *Liaoning*, *China*)

Abstract: Al_3Ti is characterized by low density and high hardness, however, due to its brittleness, it is prone to fracture under smaller deformation. To improve the application range of Al_3Ti, inspired by biological structures, a biomimetic finite element model was established based on the geometry of shell pearl layer, conch shell and fish scale, and the influences of hard phase shape, as well as impact velocity, were investigated to analyze the fracture resistance mechanism of bionic composites in terms of fracture behavior, crack propagation process and energy absorption effect. A shape coefficient was defined to optimize the structure design. The results show that the shape of the hard phase has a significant effect on the fracture behavior of the bioinspired pearl-like layer specimens under quasi-static condition. The rectangular hard phase can better hinder the crack growth toward the load end, thus improving the load-bearing capacity of the specimen. The specimen with shape factor around 5.0 shows the optimal fracture resistance and energy absorption. Under dynamic impact conditions, the soft phase has increased ability to hinder crack growth, which further improves the fracture resistance and energy absorption effect of the rectangular specimen.

Keywords: pearl layer; Ti-Al_3Ti composite; fracture; finite element analysis