

仿贝壳 $\text{TiB}_2/\text{Al}-\text{Cu}$ 层状复合材料的组织及其力学性能

林波 王明辉 张文馨 肖华强 赵愈亮 张卫文

Microstructure and mechanical properties of nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al}-\text{Cu}$ composites

LIN Bo, WANG Minghui, ZHANG Wenxin, XIAO Huaqiang, ZHAO Yuliang, ZHANG Weiwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211020.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Mg对原位自生 $\text{TiB}_2/\text{Al}-4.5\text{Cu}$ 复合材料微观组织及力学性能的影响

Effect of Mg on microstructure and mechanical properties of in-situ $\text{TiB}_2/\text{Al}-4.5\text{Cu}$ composites

复合材料学报. 2021, 38(5): 1507–1516 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200814.003>

激光选区熔化成形原位自生 $\text{TiB}_2/\text{Al}-\text{Si}$ 复合材料的微观组织和力学性能

Microstructures and mechanical properties of in-situ $\text{TiB}_2/\text{Al}-\text{Si}$ composite fabricated by selective laser melting

复合材料学报. 2018, 35(11): 3114–3121 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180123.001>

搅拌铸造法制备短碳纤维/AZ91复合材料的组织与性能

Microstructure and mechanical properties of short carbon fiber/AZ91 composite fabricated by stir-casting

复合材料学报. 2019, 36(1): 159–166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180613.003>

高压扭转对 SiC_p/Al 复合材料微观组织和力学性能的影响

Influence of high pressure torsion on microstructure and mechanical properties of SiC_p/Al composites

复合材料学报. 2017, 34(5): 1016–1022 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160707.001>

$\text{Al}_3\text{Ti}/\text{A356}$ 铝基复合材料的显微组织及拉伸力学性能

Microstructure and high temperature mechanical properties of $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{A356}$ aluminum matrix composite by in-situ reaction

复合材料学报. 2021, 38(9): 2989–2996 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201126.001>

累积叠轧纯Mg/ZK60镁合金层状金属复合材料的组织与性能

Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/ZK60 laminated composite fabricated by accumulated roll-bonding

复合材料学报. 2019, 36(1): 178–185 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180606.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211020.001

仿贝壳 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料的组织及其力学性能



分享本文

林波^{*1}, 王明辉¹, 张文馨^{*1}, 肖华强¹, 赵愈亮², 张卫文³

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025; 2. 东莞理工学院 机械工程学院, 东莞 523808;

3. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 陶瓷增强铝基复合材料是轻量化结构件的较理想材料, 但随着陶瓷增强相含量的增加, 复合材料的韧性会降低, 导致复合材料服役过程中安全性的下降。因此如何实现复合材料高强韧性的匹配是制备陶瓷增强铝基复合材料一直存在的难题。根据仿生学思想, 采用冷冻铸造及压力浸渗技术制备了不同陶瓷初始固相含量 (20vol%、30vol%、40vol%) 的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料。采用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射分析 (XRD) 和力学性能测试研究了不同陶瓷初始固相含量对于 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料微观组织和力学性能的影响。实验结果表明, 随着陶瓷初始固相含量的提升, 复合材料中陶瓷片层厚度增加, 金属片层厚度减小, 复合材料的抗压强度有所提升但抗弯强度和断裂韧性下降。其中, 20vol% 陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料拥有较优的断裂韧性, 达到了 $(20.59 \pm 1.5) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; 40vol% 陶瓷初始固相含量制备的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料拥有较优的抗压强度, 达到了 $(670 \pm 20) \text{ MPa}$ 。这主要是因为随着复合材料中陶瓷初始固相含量的提升, 层状复合材料更容易发生界面脱层, 层状复合材料通过合金塑性变形等增韧效果减弱; 同时, 裂纹偏折、界面剥落、裂纹分支等增韧效果也降低。

关键词: 仿贝壳层状复合材料; 冷冻铸造; 压力浸渗; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)07-3554-10

Microstructure and mechanical properties of nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites

LIN Bo^{*1}, WANG Minghui¹, ZHANG Wenxin^{*1}, XIAO Huaqiang¹, ZHAO Yuliang², ZHANG Weiwen³

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Ceramic-reinforced aluminum-based composites are ideal materials for lightweight structural parts. However, as the content of the ceramic reinforcement phase increases, the toughness of the composites will decrease, resulting in a decrease in the safety of the composites during service. Therefore, how to achieve the matching of high strength and toughness of composite materials is a problem that has always existed in the preparation of ceramic reinforced aluminum matrix composites. According to the idea of bionics, the nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites with different ceramic initial solid contents (20vol%, 30vol%, 40vol%) were successfully prepared by freezing casting and pressure infiltration. The microstructures and mechanical properties of nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and mechanical testing. The experimental results show that with the increase of the initial solid content of the ceramic, the thickness of the ceramic sheet in the composite material increases, while the thickness of the metal

收稿日期: 2021-07-08; 修回日期: 2021-09-23; 录用日期: 2021-10-10; 网络首发时间: 2021-10-21 09:52:22

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211020.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52074131; 51704084); 贵州省千层次创新型人才项目 (贵大“千”层次 [2018]03); 贵州省自然科学基金一般项目 (黔科合基础-ZK[2021] 一般 267); 贵州省科技成果应用及产业化项目 (黔科合成果 [2021] 一般 067); 贵州大学培育项目 (2019[23])

通信作者: 林波, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为铝基层状复合材料 E-mail: linbo1234@126.com;

张文馨, 硕士, 研究方向为铝基复合材料 E-mail: 18813094070@163.com

引用格式: 林波, 王明辉, 张文馨, 等. 仿贝壳 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料的组织及其力学性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3554-3563.

LIN Bo, WANG Minghui, ZHANG Wenxin, et al. Microstructure and mechanical properties of nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3554-3563(in Chinese).

sheet layer decreases. The compressive strength of the composite material is improved, but the bending strength and fracture toughness decrease. The nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites with 20vol% ceramic initial solid content has the better fracture toughness, reaching $(20.59\pm1.5) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. The nacre-inspired $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites with 40vol% ceramic initial solid content has the better compressive strength, reaching $(670\pm20) \text{ MPa}$. This is mainly because as the initial solid content of the ceramic in the composite material increases, the nacre-inspired composite material are more prone to interface delamination, the toughening effect of the layered composite material through alloy plastic deformation is weakened. At the same time, the toughening effect of crack deflection, interface peeling, and crack branching is reduced.

Keywords: nacre-inspired composites; freezing casting; pressure infiltration; microstructures; mechanical properties

随着环境保护和低碳经济的发展, 具备良好强度、韧性、高耐磨、高耐热等特点的轻质结构材料在军事工业、航空航天和交通运输领域备受关注。其中陶瓷增强铝基复合材料 (Aluminum matrix reinforced with ceramics, AMCs) 兼具高比强度、高耐磨、高耐热等特点是最有前途的轻质结构件材料^[1-3]。但是, 为了追求更高的耐磨或耐热性能, 往往需要向陶瓷增强铝基复合材料中添加更多的陶瓷增强相, 这会造成复合材料韧性大幅度下降, 降低复合材料服役过程中的安全性^[4]。因此, 如何实现复合材料高强韧性匹配是制备陶瓷增强金属基复合材料一直存在的难题^[5]。

在材料学发展的过程中, 自然界存在的许多生物都给予了人们很大的启发, 许多天然生物材料表现出了良好的强度与韧性, 例如贝壳的珍珠层。贝壳珍珠层主要由矿物 (碳酸钙, 体积分数占比为 95%) 和少量较软的有机生物聚合物 (体积分数占比为 5%) 组成, 但因其独特的纳米级“砖-泥”结构, 使其不仅具有较高的强度, 还表现出了良好的断裂韧性和优异的耐磨性能^[6-7]。因此采用仿生原理制备陶瓷增强铝基复合材料成为解决复合材料高强韧匹配问题的有效途径。

目前, 已经通过自组合法^[8-9]、层层组织法^[10]、电泳沉积法^[11]等技术制备了仿生层状复合材料。然而, 其制备的层状有机-无机薄膜片层间距过小、机械性能较低, 难以大规模应用。其中, 新兴的冷冻铸造-熔渗法被证明是一种高效、环保制备仿贝壳层状复合材料的新兴技术^[12-13]。目前, 已经通过冷冻铸造及熔渗技术成功制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ ^[14]、 SiC/Al ^[15]、 TiC/Al ^[16-17] 层状复合材料, 但其中 Al_2O_3 陶瓷与 Al 基体润湿性较差, 不利于完全浸渗^[18]; SiC 和 TiC 又极易与 Al 基体发生界面反应, 生成脆性的 Al_4C_3 或 Al_3Ti 相^[19-20], 不利于复合材料综合力学性能的提高。在陶瓷增强铝基复合材料的

增强相体系中, TiB_2 陶瓷具有高模量、高强度、高熔点和良好的稳定性, 并且 TiB_2 陶瓷与 Al 有着优异的润湿性, 是作为冷冻铸造制备层状 Al 基复合材料增强较优质选择^[21-22]。

本文配制不同陶瓷初始固相含量的 TiB_2 陶瓷浆料, 采用冷冻铸造及压力浸渗方法成功制备了仿贝壳珍珠层 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料, 研究了不同陶瓷初始固相含量对于复合材料微观形貌、力学性能和断裂机制的影响。

1 试验材料及方法

1.1 预制体的制备以及铝合金熔炼

本实验使用材料包括二硼化钛 (TiB_2) 粉末、纯钛粉、柠檬酸钠、硅溶胶及去离子水、纯铝锭、Al-50%Cu、Al-10%Mn、Al-5%Mg、Al-5%Ti-B。

使用平均粒径 $3\sim5 \mu\text{m}$ 的商用 TiB_2 粉末配制陶瓷初始固相含量为 20vol%、30vol% 和 40vol% 的陶瓷浆料, 将占浆料总质量 0.5wt% 的柠檬酸钠 (分散剂)、占浆料总质量 2wt% 的硅溶胶 (粘结剂) 放入陶瓷浆料中, 采用磁力搅拌将陶瓷浆料混合均匀并真空脱气。然后, 将均匀混合后的陶瓷浆料倒入冷冻铸造装置中进行单向凝固, 脱模后获得直径为 30 mm、高度为 25 mm 的 TiB_2 陶瓷预制体, 其中冷冻铸造装置示意图如图 1 所示。随后, TiB_2 陶瓷预制体放入真空干燥装置中, 在低温、低压条件下进行冰晶升华并获得 TiB_2 多孔陶瓷预制体。最后, TiB_2 多孔陶瓷预制体在真空热压烧结炉 (HP-12×12×12, Centorr vacuum industries) 中进行高温烧结, 烧结温度为 1600°C , 目的是使 TiB_2 多孔陶瓷预制体获得较高的强度, 保证其在压力浸渗下仍然拥有良好的层状结构, 高温烧结的升温 and 降温速度皆为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

将纯铝锭及中间合金放于高温电阻炉中, 升温至 730°C 使合金完全融化, 向坩埚中通入氩气进行除气, 加入精炼剂进行精炼处理, 最后静置

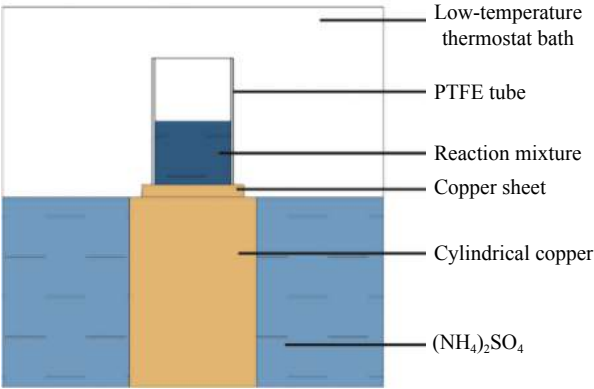


图 1 冷冻铸造实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the freeze casting process

20 min，采用光谱分析仪测定合金成分，实验性 Al-Cu 合金的化学成分如表 1 所示。将 TiB₂ 多孔陶瓷预制体在电阻炉中预热至 300℃，之后放于 H13 钢模具中，在 75 MPa 压力下将熔融状态铝合金渗入 TiB₂ 陶瓷预制体中，获得仿贝壳珍珠层 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料。

表 1 Al-Cu 合金化学成分

Table 1 Al-Cu alloy chemical composition

Element	Cu	Mn	Mg	Ti	Al
Content	5.04	0.56	0.1	0.08	Others

1.2 热处理工艺及微观形貌表征

TiB₂/Al-Cu 层状复合材料在 495℃ 下固溶处理 2 h，接着在 530℃ 下固溶处理 14 h，然后在 100℃ 的热水中进行水淬，最后在 200℃ 下时效处理 4 h，空冷。采用线切割从 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料上切取实验所需式样，其方向对应于复合材料纵向截面(平行于冷冻前沿方向)。通过 X 射线衍射 (D/max2200PC 型，日本 Rigaku 公司) 分析了 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料中的物相组成，采用光学显微镜 (XD30M 系列，宁波舜宇仪器有限公司) 和扫描电子显微镜 (SUPRA55 型，德国 ZEISS 公司) 对不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料进行了微观形貌观察。

1.3 力学性能测试

采用线切割从不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料纵向截面上切取了尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm 的抗压强度试样，其中压缩实验的压头加载速率为 0.5 mm/min。

切取尺寸大小为 3 mm×4 mm×20 mm 的三点抗弯强度试样，其中三点弯曲实验压头加载速率为 0.5 mm/min，试样跨距为 10 mm。复合材料的抗弯强度 σ_f 根据下式算出，具体的计算方法如下：

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2BH^2}$$

式中： P 为试样断裂时的最大载荷 (N)； L 为跨距 (mm)； B 为试样宽度 (mm)； H 为试样高度 (mm)。

采用线切割机从不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料纵向截面上切取尺寸大小为 2 mm×4 mm×22 mm、缺口宽度 0.3 mm、缺口深度 2 mm 的单边缺口梁 (SENB) 试样。其中断裂韧性实验压头加载速率为 0.1 mm/min，试样跨距为 10 mm。复合材料的断裂韧性 K_{IC} 根据下式算出，具体计算方法如下：

$$K_{IC} = \frac{3PL\sqrt{10a}}{200BH^2} \left[1.93 - 3.07\left(\frac{a}{H}\right) + 14.53\left(\frac{a}{H}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{H}\right)^3 + 25.8\left(\frac{a}{H}\right)^4 \right]$$

式中： K_{IC} 为试样断裂韧性 (MPa·m^{1/2})； P 为试样断裂时的最大载荷 (N)； a 为试样缺口深度 (mm)； L 为跨距 (mm)； B 为试样宽度 (mm)； H 为试样高度 (mm)。

2 实验结果

2.1 微观形貌

图 2 显示了不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料的 XRD 图谱。从图中可以看出复合材料中含有 TiB₂、Al、Al₂Cu 和 T(Al₂₀Cu₂Mn₃)

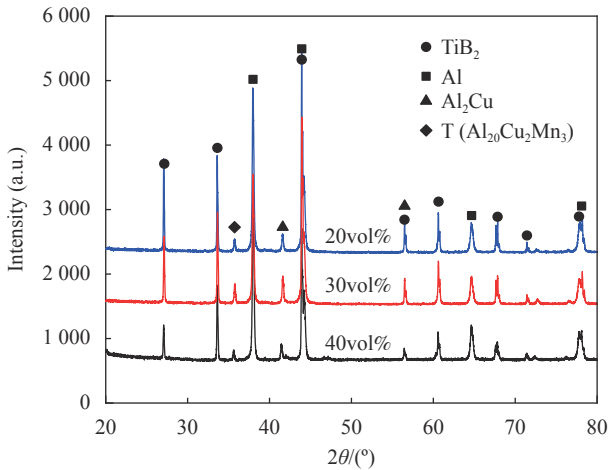


图 2 不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of the TiB₂/Al-Cu composites corresponding with different ceramic initial solid contents

相。采用冷冻铸造法制备的仿贝壳珍珠层 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料中没有其他相或杂质生成,表明材料中没有其他反应物生成。

图 3 显示了 30vol% 陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料纵向截面试样 SEM 微观形貌和 EDS 元素分析结果。如图所示,采用冷冻铸造及压力浸渗制备的复合材料,拥有良好的层状结构。其中,Al、Ti、Cu、B 元素绝大部分呈现层状分布,Mn、Mg 元素呈现均匀分布。这主要是由于在热处理过程中,Mg 和 Mn 元素扩散较充分,因而呈均匀分布^[23]。并且在陶瓷层中也发现了大量 Al 相,这进一步证明了压力浸渗下的完全渗透。

图 4 显示了不同陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料纵向截面试样的微观形貌。如图所示,不同陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料均形成了良好的层状结构。采用 20vol% 陶瓷初始固相含量制备的层状复合材料(图 4(a)),金属层的平均厚度约为 100 μm ,陶瓷层的平均厚度约为 50 μm ,其金属层与陶瓷层的厚度比约为 2:1。随着陶瓷初始固相含量的增加,复合材料中陶瓷层厚度增加,金属层厚度减小。当陶瓷初始固相含量增加到 30vol% 时,复合材料陶瓷层和金属层厚度均约为 50 μm ,厚度比为 1:1;当陶瓷初始固相含量为 40vol% 时,复合材料中陶瓷层厚度明显增厚,复合材料陶瓷层和金属层厚度约为 75 μm 和 25 μm ,其金属层与陶瓷层的厚度比约为 1:3。此外,在陶瓷层中发现了一定量的 Al 相,这表明压力浸渗下铝合金的完全渗透。

2.2 力学性能

图 5 显示了不同陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料应力-应变及力-位移曲线。复合材料的强度与断裂萌生韧性具体数值如表 2 和图 5(d) 所示。图 5(a) 显示了陶瓷初始固相含量分别为 20vol%、30vol%、40vol% 的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料压缩应力-应变曲线。从图中可以看出,随着复合材料中陶瓷含量的增加,其抗压强度有明显提升但应变逐渐减小。

表 2 显示了本研究所制备的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料基体及不同陶瓷初始固相含量试样的力学性能。从表中可知,当陶瓷初始固相含量为 40vol% 时,复合材料纵向截面试样具有较高的抗压强度,为 (670 ± 20) MPa,高于 20vol% 和 30vol%

陶瓷初始固相含量复合材料的抗压强度,相比基体也有了显著的提升。众所周知, TiB_2 陶瓷的抗压强度远远高于铝合金,在本研究中,随着陶瓷体积分数的增加,冷冻过程中水分减少,导致陶瓷层的厚度增大,从而使复合材料抗压强度提高^[24]。此外压力浸渗作用下陶瓷跟金属层良好的界面结合也有利于复合材料抗压强度的提高^[25]。而复合材料应变值的减小说明了材料裂纹扩展韧性的降低。图 5(b) 显示了不同陶瓷初始固相含量 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料三点弯曲试验的应力-应变曲线,其具体数值如表 2 所示。随着陶瓷含量的增加,复合材料抗弯强度有所下降,当陶瓷初始固相含量为 40vol% 时,复合材料纵向截面试样具有较低的抗弯强度,为 (551 ± 15) MPa。这主要是由于随着陶瓷含量的增加,复合材料陶瓷层厚度增大,陶瓷层为脆性相而抗弯能力差,导致复合材料抗弯强度下降^[26]。图 5(c) 显示了不同陶瓷初始固相含量 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料单边缺口梁试样力-位移曲线,同样随着陶瓷含量的增加,复合材料裂纹萌生韧性 K_{IC} 值有所下降,当陶瓷初始固相含量为 20vol% 时,复合材料获得了相对较好的裂纹萌生韧性,达到了 (20.59 ± 1.5) $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,而 40vol% 陶瓷初始固相含量时,复合材料的断裂韧性仅有 (14.13 ± 1.3) $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

本研究中制备的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料的力学性能也与其他报道中采用冷冻铸造制备的仿贝壳珍珠层层状 AMCs 材料的力学性能进行了比较,包括有 TiC/Al ^[20]、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ ^[27-28]、 $\text{TiB}_2/\text{Al-Si}$ ^[25]、 $\text{SiC}/\text{ZL205A}$ ^[29] 等。从表中可以看出,本研究制备的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料拥有优异的综合力学性能,其强韧性高于大部分已报道的层状 AMCs 材料。与 ZHANG 等^[25] 的研究工作 $\text{TiB}_2/\text{Al-S}$ 以及沈平课题组^[29] 制备的 $\text{SiC}/\text{ZL205A}$ 层状复合材料相比,本研究制备的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料强度虽有下降,但是断裂韧性却得到极大的提升。这主要是由于 Al-Cu 合金良好的韧性、 TiB_2 与铝合金良好的润湿性以及压力浸渗下 Al 相的完全浸渗。

2.3 断口形貌

图 6 显示了不同陶瓷初始固相含量的 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料三点弯曲试样的断口形貌。从图中可以看出,当陶瓷初始固相含量为 20vol% 时(图 6(a) 和 6(b)),复合材料断口处呈现明显“台阶状”起伏,并且在断口处存在许多韧窝和撕裂

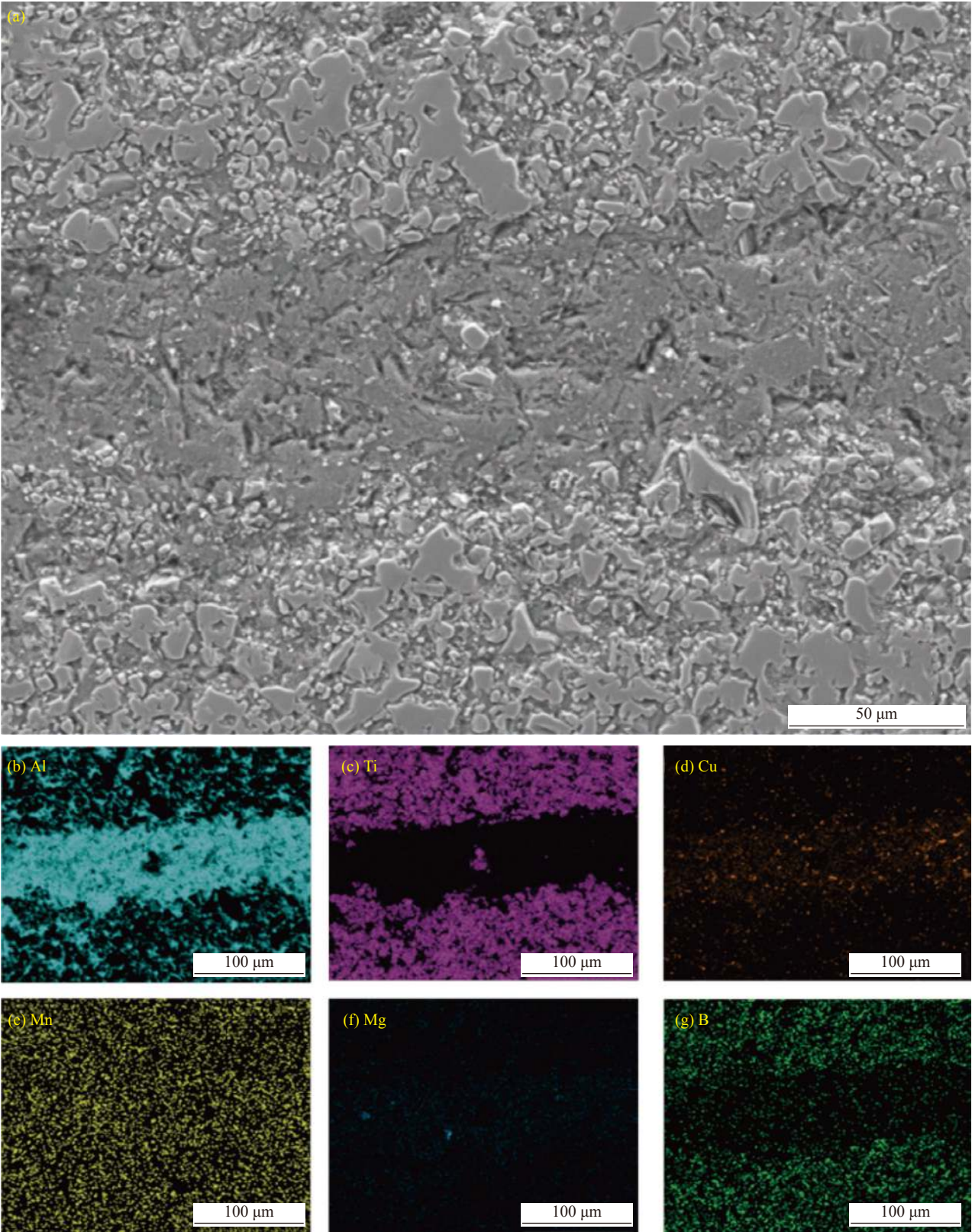


图 3 $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ 层状复合材料 30vol% 陶瓷初始固相含量试样的 SEM 图像 (a) 和 EDS 能谱图 ((b)-(g))

Fig. 3 SEM image (a) and EDS mappings ((b)-(g)) of the $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$ composites corresponding with 30vol% ceramic initial solid content

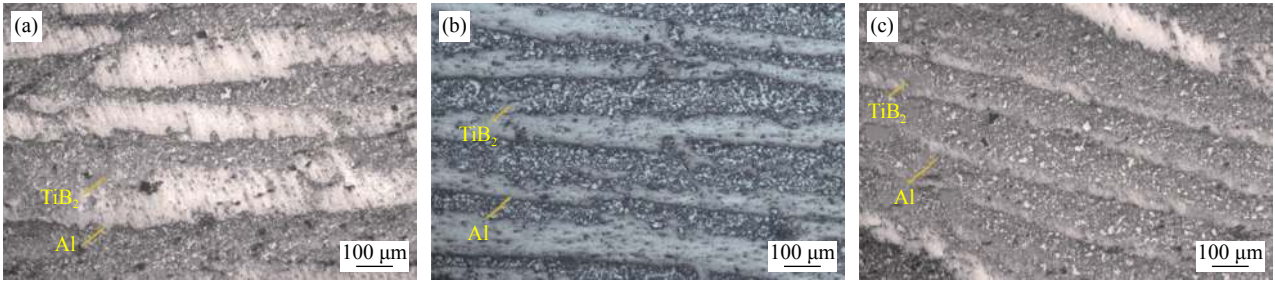


图 4 不同陶瓷初始固相含量的 TiB_2/Al -Cu 层状复合材料试样光学显微镜图像: (a) 20vol%; (b) 30vol%; (c) 40vol%

Fig. 4 Optical microscope images of nacre-inspired TiB_2/Al -Cu composites with different ceramic initial solid contents: (a) 20vol%; (b) 30vol%; (c) 40vol%

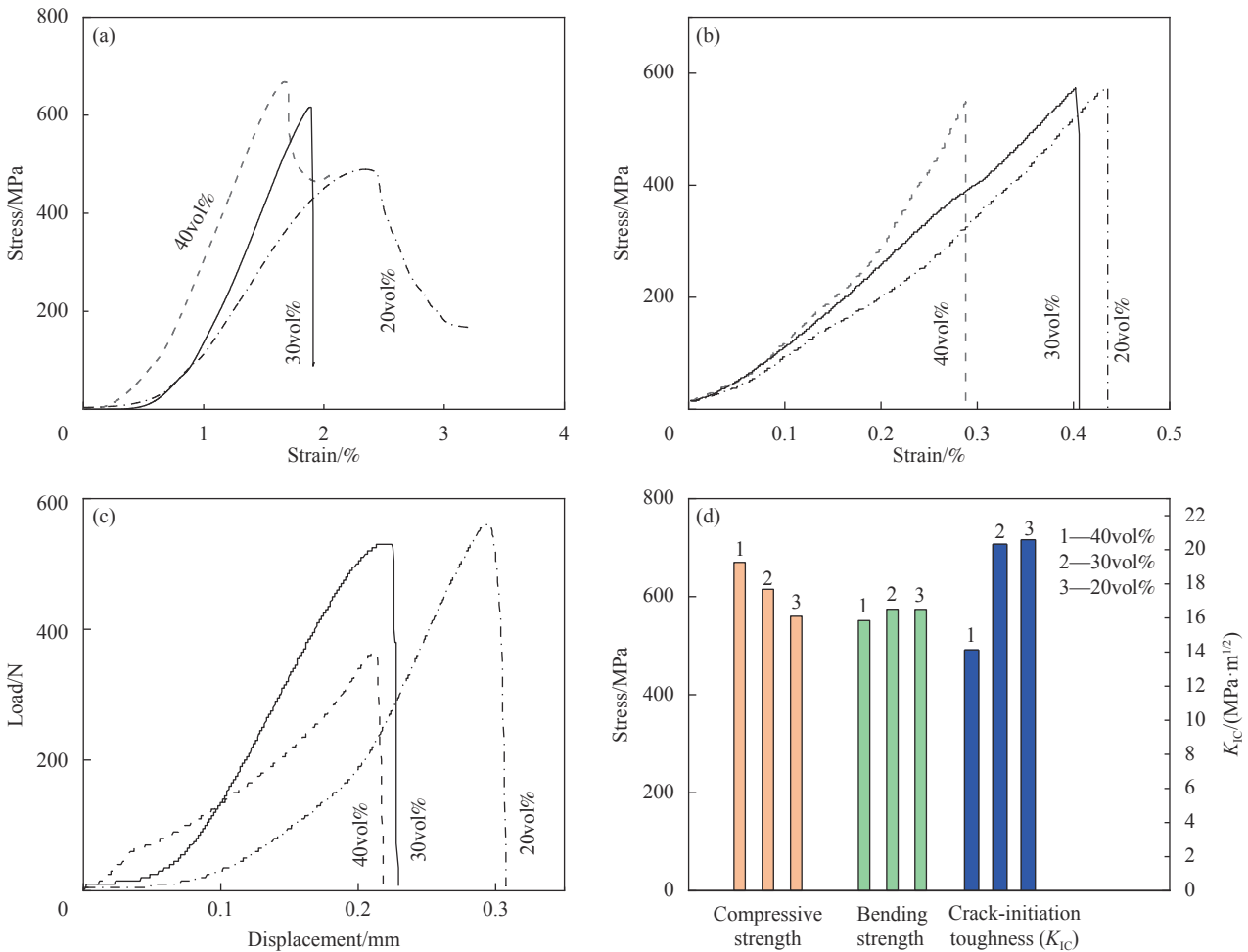


图 5 不同陶瓷初始固相含量 TiB_2/Al -Cu 层状复合材料试样的强度、应力-应变曲线和断裂韧性: (a) 压缩应力-应变曲线; (b) 三点弯曲应力-应变曲线; (c) 单边缺口梁 (SENB) 试样力-位移曲线; (d) 强度与断裂韧性

Fig. 5 Stress-strain curves and strength and crack-initiation toughness of the nacre-inspired TiB_2/Al -Cu composites with different ceramic initial solid contents: (a) Compressive stress-strain curves; (b) Three-point bending stress-strain curves; (c) Load-displacement curves of the SENB samples; (d) Strength and crack-initiation toughness

棱。这些特征的存在, 表明了复合材料在裂纹扩展时, 发生了裂纹偏折、Al 相和陶瓷层界面的剥落和裂纹分支, 同时金属层发生了塑性变形; 当初始固相含量为 30vol% 时 (图 6(c) 和 6(d)), 断口处的“台阶状”起伏的程度变缓, 断口处的微裂纹数量减少, 在断口处存在界面剥离现象; 当陶

瓷初始固相含量达到 40vol% 时 (图 6(e) 和 6(f)), 复合材料断口处存在较为明显的“台阶状”起伏但数量变少, 此时裂纹大部分在较厚的陶瓷层中扩展, 当裂纹扩展至金属层时, 由于金属层相对较薄, 金属层发生撕裂时裂纹尖端产生了微小偏折便扩展至下一陶瓷层, 使得整个材料发生断裂。

表 2 不同陶瓷初始固相含量 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料及其他仿贝壳珍珠层状陶瓷增强铝基复合材料 (AMCs) 的力学性能
Table 2 The mechanical properties of nacre-inspired TiB₂/Al-Cu composites with different ceramic initial solid contents and the other reported nacre-inspired lamellar structure AMCs

Alloy	Direction	Compressive strength/MPa	Bending strength/MPa	Breaking tenacity K_{IC} /(MPa·m ^{1/2})	Ref.
0vol% TiB ₂ /Al-Cu	—	410±10	—	—	In this study
20vol% TiB ₂ /Al-Cu	Longitudinal	560±5	574±4	20.59±1.5	In this study
30vol% TiB ₂ /Al-Cu	Longitudinal	615±8	578±2	20.32±1.15	In this study
40vol% TiB ₂ /Al-Cu	Longitudinal	670±20	551±15	14.13±1.3	In this study
18vol% TiC/Al	Longitudinal	—	355	13.6	[20]
35vol% Al ₂ O ₃ /Al	Longitudinal	—	345	17	[27]
30vol% Al ₂ O ₃ /6 061	Longitudinal	538-854	278-350	7.6-9.2	[28]
30vol% TiB ₂ /Al-Si	Longitudinal	710	629	16.4	[25]
20vol% SiC/ZL205A	Longitudinal	—	760±10	14.7±0.3	[29]
30vol% SiC/ZL205A	Longitudinal	—	626±12	12.9±0.6	[29]
40vol% SiC/ZL205A	Longitudinal	—	445±15	7.3±0.4	[29]

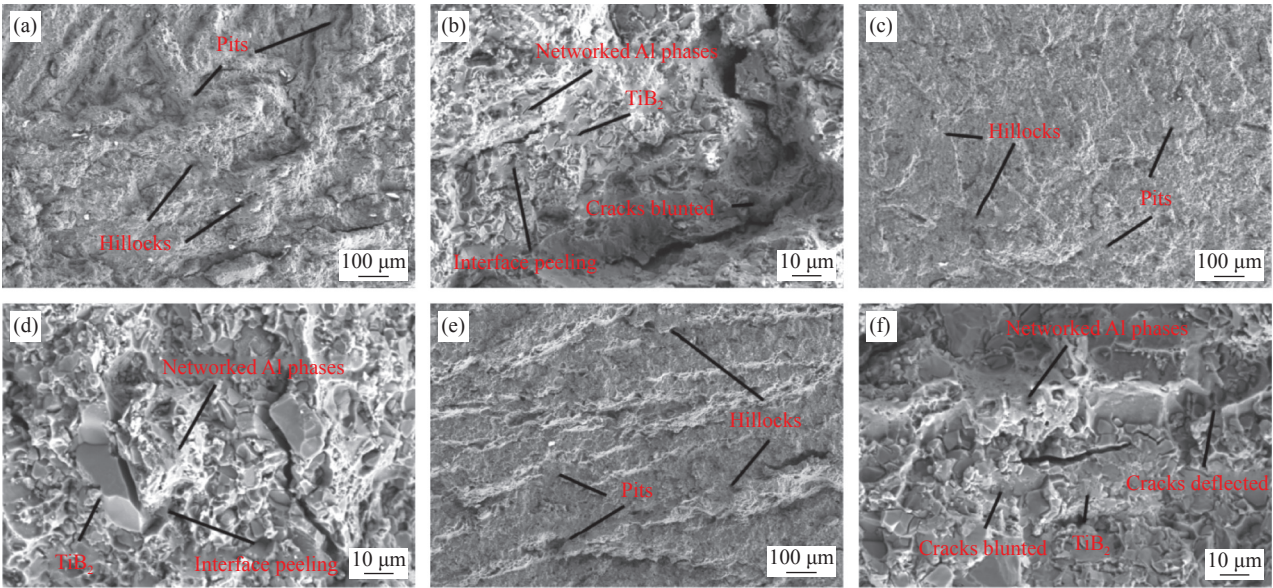


图 6 不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料弯曲试样断口形貌: ((a)、(b)) 20vol%; ((c)、(d)) 30vol%; ((e)、(f)) 40vol%
Fig. 6 Fracture surfaces of the samples after bending tests of the nacre-inspired TiB₂/Al-Cu composites with different ceramic initial solid contents: ((a), (b)) 20vol%; ((c), (d)) 30vol%; ((e), (f)) 40vol%

随着初始固相含量的提升, 复合材料中陶瓷层厚度增加, 金属层厚度减少, 层状复合材料通过合金塑性变形等增韧效果减弱; 同时, 裂纹偏折、界面剥落、裂纹分支等增韧效果也降低, 因此复合材料的抗弯强度和断裂韧性下降。

2.4 裂纹扩展形貌

图 7 显示了不同陶瓷初始固相含量的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料单边缺口梁试样断裂韧性裂纹扩展形貌。图 7(a) 和 7(b) 为陶瓷初始固相含量为 20vol% 的层状复合材料裂纹扩展路径。从图中可以看出, 裂纹首先在切口处的陶瓷层中产生, 随着外部载荷的增加, 裂纹通过陶瓷层和金属层进行扩展, 当裂纹扩展至金属层时优先沿着金属层

与陶瓷层之间的界面进行扩展, 因此裂纹产生了偏折现象。并且在陶瓷含量 20vol% 的复合材料试样中金属层较厚, 当金属层发生塑性变形但还未断裂时, 裂纹会随着金属层与陶瓷层之间的界面进行扩展从而形成裂纹分支; 随着金属层的断裂, 金属层与陶瓷层之间良好的界面结合, 也使得复合材料发生了金属层拔出现象, 这些现象都有助于增强复合材料的断裂韧性。同样, 在陶瓷含量为 30vol% 的复合材料 SENB 试样的裂纹扩展路径中, 我们同样发现了金属层的拔出现象以及未开裂的金属层桥接。而对于陶瓷含量为 40vol% 的复合材料而言, 当裂纹扩展至金属层时, 由于金属片层相对较薄而很快被撕裂, 裂纹未来得及产生

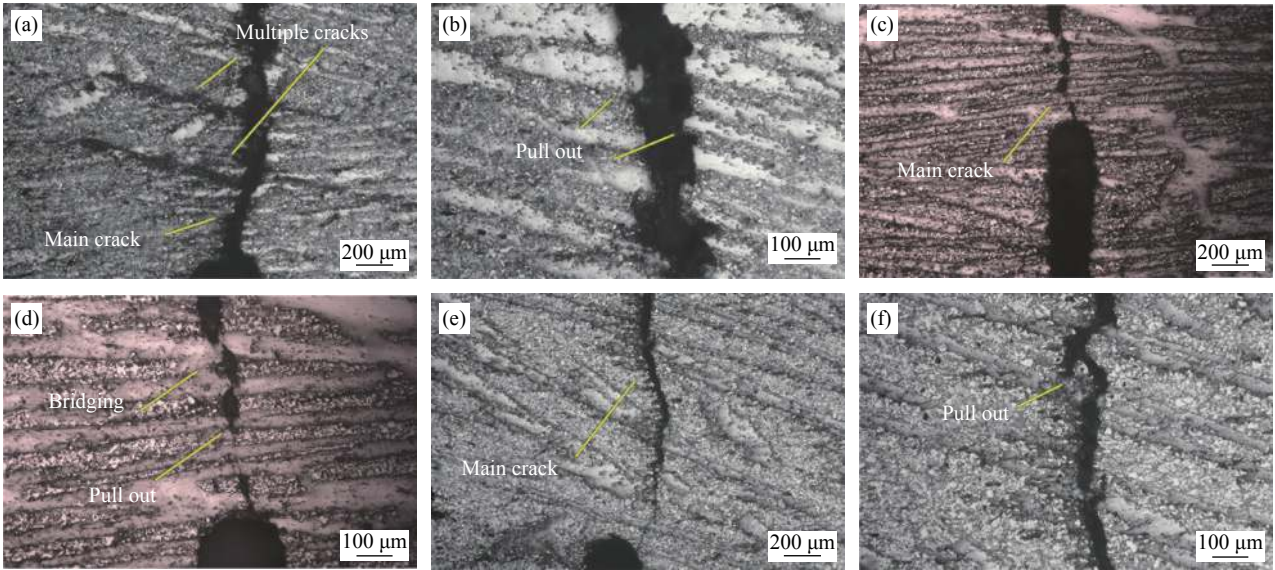


图 7 不同陶瓷初始固相含量 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料 SENB 试样裂纹扩展路径: ((a)、(b)) 20vol%; ((c)、(d)) 30vol%; ((e)、(f)) 40vol%
Fig. 7 Crack propagation path of SENB sample of nacre-inspired TiB₂/Al-Cu composite with different ceramic initial solid contents:
((a), (b)) 20vol%; ((c), (d)) 30vol%; ((e), (f)) 40vol%

偏折便扩展至下一陶瓷层, 从而导致材料的整体断裂。

3 分析与讨论

从以上结果可以看出, 仿贝壳层状 TiB₂/Al-Cu 复合材料随着陶瓷初始固相含量的增多, 复合材料的抗压强度增加但抗弯强度和裂纹萌生断裂韧性下降, 这主要跟陶瓷层厚度增加, 增韧效果减弱有关。

根据层状复合材料的断裂机制, 当层状复合材料为弱界面结合时, 断裂行为除了受到层厚尺度的影响外, 还与层厚比、组元层的屈服强度、断裂韧性有着明显的关系^[30]。大量研究结果表明, TiB₂ 与 Al 之间界面为半共格, 一般为弱界面结合^[31]。当层状复合材料为弱界面结合时, 则会发生一定程度的脱层断裂现象, 由图 7 可知, 本研究制备的 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料也发生了一定的脱层断裂现象。Hutchinson 研究结果表明, 界面脱层发生的条件可以用下式表示为^[32]:

$$J_{\text{int}} \geq 0.26 \frac{\pi t_B \sigma^2}{2E_B}$$

式中: J_{int} 为界面韧性; t_B 为脆性层厚度; E_B 为脆性层弹性模量; σ 为施加在材料上的应力。根据上述公式可知, 脱层断裂与脆性层的厚度、弹性模量和施加应力相关。因此, 随着陶瓷固相含量的提升, 脆性陶瓷层的厚度增大, 层状复合材料

更容易发生界面脱层, 从而导致材料韧性下降。

在层状复合材料裂纹扩展过程中, 多裂纹扩展模式相比单裂纹扩展模式而言, 需要消耗更多的能量, 对断裂韧性提高有利。根据裂纹扩展模型, 层状复合材料单裂纹扩展或者多裂纹扩展, 主要取决于金属层与陶瓷层厚度的比值, 当金属层与陶瓷层厚度的比值超过 3 的时候, 多裂纹更倾向于在层状复合材料中形成^[33-34]。由图 7 可见, 随着陶瓷固相含量的提升, 复合材料中陶瓷层厚度增加, 金属层厚度减少, 层状复合材料中的多裂纹减少, 从而导致层状复合材料断裂韧性下降。

总之, 随着陶瓷固相含量的提升, 复合材料中陶瓷层厚度增加, 金属层厚度减少, 层状复合材料通过合金塑性变形等增韧效果减弱; 同时, 裂纹偏折、界面剥落、裂纹分支等增韧效果也降低, 这是复合材料断裂韧性下降的主要原因。

4 结论

(1) 通过冷冻铸造及压力浸渗方法成功制备了 20vol%、30vol%、40vol% 陶瓷初始固相含量的仿贝壳珍珠层 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料。所制备的复合材料具有良好的层状结构, 并且随着陶瓷含量的增加, 层状复合材料中陶瓷层厚度有所增加而金属层厚度有所减小。

(2) 随着陶瓷初始固相含量的提升, 复合材料的抗压强度增加但抗弯强度和裂纹萌生韧性下降。

当陶瓷初始固相含量为 30vol% 时, 复合材料具有较好的综合力学性能, 其抗压强度、抗弯强度、断裂韧性分别为 615 MPa、578 MPa、20.32 MPa·m^{1/2}, 其强韧性高于大部分已报道的层状陶瓷增强铝基复合材料 (AMCs)。

(3) 与 Al-Cu 合金基体相比, 仿贝壳珍珠层 TiB₂/Al-Cu 层状复合材料抗压强度获得了明显提升, 当陶瓷初始固相含量为 30vol% 时, 层状复合材料的抗压强度, 相比基体提升了 50%。

(4) 随着初始固相含量的提升, 复合材料中陶瓷层厚度增加, 金属层厚度减少, 层状复合材料更容易发生界面脱层, 层状复合材料通过合金塑性变形等增韧效果减弱; 同时, 裂纹偏折、界面剥落、裂纹分支等增韧效果也降低, 这是复合材料断裂韧性下降的主要原因。

参考文献:

- [1] 聂金凤, 范勇, 赵磊, 等. 颗粒增强铝基复合材料强韧化机制的研究新进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9009-9015.
NIE Jinfeng, FAN Yong, ZHAO Lei, et al. Latest research progress on the strengthening and toughening mechanism of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 9009-9015(in Chinese).
- [2] HAN B, LIU S, WANG X, et al. Simultaneously improving strength and ductility of hybrid Al-Si matrix composite with polyphasic and multi-scale ceramic particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 804: 140517.
- [3] 曹遴, 陈彪, 郭柏松, 等. 碳纳米管增强铝基复合材料分散方法研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 9-24.
CAO Lin, CHEN Biao, GUO Bosong, et al. A review of carbon nanotube dispersion methods in carbon nanotube reinforced aluminium matrix composites manufacturing process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 9-24(in Chinese).
- [4] LEE T, LEE J, LEE D, et al. Effects of particle size and surface modification of SiC on the wear behavior of high volume fraction Al/SiCp composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 813: 154647.
- [5] 刘宝玺, 林曾孟, 殷福星. 多级结构的金属材料强韧化机理研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 49-61.
LIU Baoxi, LIN Zengmeng, YIN Fuxing. Research on the strengthening and toughening mechanism of metallic materials with multiscale hierarchical structure[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 49-61(in Chinese).
- [6] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. Nature Materials, 2015, 14(1): 23-36.
- [7] 朱德举, 张超慧, 刘鹏. 天然和仿生柔性生物结构的设计[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1636-1645.
ZHU Deju, ZHANG Chaohui, LIU Peng. Study on the design of natural and biomimetic flexible biological structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1636-1645(in Chinese).
- [8] PODSIADLO P, KAUSHIK A K, ARRUDA E M, et al. Ultrastrong and stiff layered polymer nanocomposites[J]. Science, 2007, 318: 80-83.
- [9] 张学鹭, 刘长利, 王建方, 等. 仿珍珠层自组装制备有机/无机纳米复合薄膜[J]. 复合材料学报, 2006, 23(4): 47-51.
ZHANG Xueao, LIU Changli, WANG Jianfang, et al. Self-assembled organic/inorganic nanocomposite thin film of mimic nacre[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(4): 47-51(in Chinese).
- [10] DAS P, MALHO J M, RAHIMI K, et al. Nacre-mimetics with synthetic nanoclays up to ultrahigh aspect ratios[J]. Nature Communications, 2015, 6: 5967.
- [11] 周宏明, 曾麟, 易丹青, 等. 电泳沉积制备BG/BG-FHA复合涂层[J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 194-199.
ZHOU Hongming, ZENG Lin, YI Danqing, et al. BG/BG-FHA composite coatings prepared by electrophoretic deposition method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(6): 194-199(in Chinese).
- [12] DEVILLE S, SAI E, NALLA R K, et al. Freezing as a path to build complex composites[J]. Science, 2006, 311(5760): 515-518.
- [13] 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(13): 99-112.
ZHANG Xun, LIU Shuhai, XIAO Huaping. Applying freeze-casting technique to the fabrication of nacre-like lamellar structured ceramic composites: A state-of-the-art review[J]. Materials Reports, 2017, 31(13): 99-112(in Chinese).
- [14] LI Y L, SHEN P, YANG L K, et al. A novel approach to the fabrication of hierarchical Al₂O₃/6061Al composites with high-volume fractions of hard phases[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 75-84.
- [15] LIU Q, YE F, GAO Y, et al. Fabrication of a new SiC/2024Al co-continuous composite with lamellar microstructure and high mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 146-153.
- [16] GUO R F, SHEN P, SUN C, et al. Processing and mechanical properties of lamellar-structured Al-7Si-5Cu/TiC composites[J]. Materials & Design, 2016, 106: 446-453.
- [17] WANG Y, SHEN P, GUO R F, et al. Developing high toughness and strength Al/TiC composites using ice-templating and pressure infiltration[J]. Ceramics International, 2017, 43(4): 3831-3838.
- [18] SCHULTZ B F, FERGUSON J B, ROHATGI P K. Microstructure and hardness of Al₂O₃ nanoparticle reinforced Al-Mg

- composites fabricated by reactive wetting and stir mixing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530: 87-97.
- [19] TONG H T, QIU F, ZUO R, et al. The effect and mechanism of alloying elements on Al/SiC interfacial reaction in Al melt[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 501: 144265.
- [20] GUO R F, WANG Y, SHEN P, et al. Influence of matrix property and interfacial reaction on the mechanical performance and fracture mechanism of TiC reinforced Al matrix lamellar composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 775: 138956.1-138956.8.
- [21] GENG J W, LIU G, HONG T, et al. Tuning the microstructure features of in-situ nano $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu-Mg}$ composites to enhance mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 775: 193-201.
- [22] ZHAO B, YANG Q, WU L, et al. Effects of nanosized particles on microstructure and mechanical properties of an aged in-situ $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu-Li}$ composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 742: 573-583.
- [23] RAKHMONOV J, LIU K, PAN L, et al. Enhanced mechanical properties of high-temperature-resistant Al-Cu cast alloy by microalloying with Mg[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 154305.
- [24] SHEN P, XI J, FU Y, et al. Preparation of high-strength Al-Mg-Si/ Al_2O_3 composites with lamellar structures using freeze casting and pressureless infiltration techniques[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27(5): 944-950.
- [25] ZHANG W X, LIN B, TANG Y, et al. Microstructures and mechanical properties of high-performance nacre-inspired Al-Si/ TiB_2 composites prepared by freeze casting and pressure infiltration[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(12): 16891-16901.
- [26] MAO H R, SHEN P, LIU Y H, et al. Nacre-inspired lightweight and high-strength $\text{AZ91D/Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ composites prepared by ice templating and pressureless infiltration[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(17): 12167-12177.
- [27] SUN M Q, SHEN P, JIANG Q C. Microstructures and mechanical characterizations of high-performance nacre-inspired Al/ Al_2O_3 composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121: 465-473.
- [28] LI Y L, SHEN P, YANG L K, et al. A novel approach to the fabrication of lamellar $\text{Al}_2\text{O}_3/6061\text{Al}$ composites with high-volume fractions of hard phases[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 754: 75-84.
- [29] SHAGA A, SHEN P, XIAO L G, et al. High damage-tolerance bio-inspired ZL205A/SiC composites with a lamellar-interpenetrated structure[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 708: 199-207.
- [30] LIU B X, HUANG L J, WANG B, et al. Effect of pure Ti thickness on the tensile behavior of laminated Ti- TiB_w/Ti composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 617: 115-120.
- [31] MA Y, ADDAD A, JI G, et al. Atomic-scale investigation of the interface precipitation in a TiB_2 nanoparticles reinforced Al-Zn-Mg-Cu matrix composite[J]. *Acta Materialia*, 2020, 185: 287-299.
- [32] KOSEKI T, INOUE J, NAMBU S. Development of multilayer steels for improved combinations of high strength and high ductility[J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(2): 227-237.
- [33] GUO R F, WANG Y, SHEN P, et al. Influence of matrix property and interfacial reaction on the mechanical performance and fracture mechanism of TiC reinforced Al matrix lamellar composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 775: 138956.
- [34] HUANG Y, ZHANG H W, WU F. Multiple cracking in metal-ceramic laminates[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1994, 31(20): 2753-2768.