

轧制及 T6 处理对 $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ 复合材料拉伸力学性能的影响

刘守法¹, 乔 勋¹, 周兆锋², 刘丹成³

(1. 西京学院 机械工程学院, 陕西 西安 710123; 2. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051;
3. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 对铸态 $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ 复合材料分别实施了热轧及热轧+T6 处理两种后处理工艺, 采用扫描电镜、X 射线衍射仪及拉伸试验设备, 研究了热轧及 T6 处理对复合材料显微组织及抗拉强度的影响。结果表明, 热轧可以有效地细化铸态 $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ 复合材料内的增强颗粒, 并消除材料内部孔洞, 从而提高材料的抗拉强度。试样在拉伸外力作用下, 在增强颗粒与基材间的界面处首先出现裂纹, 裂纹扩展后使试样整体断开, 热轧后对试样进行 T6 处理可以有效地消除轧制引起的增强颗粒与铝基材界面处的残余应力, 提高增强颗粒与基材间的浸润性, 从而提高材料的抗拉强度。在拉伸外力作用下试样中的增强颗粒首先开裂, 裂纹扩展后使试样整体断裂。 $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ 复合材料随着轧制压缩率的增大, 材料的抗拉强度先增大后减小, 轧制压缩率为 60% 的热轧+T6 处理的试样在室温和 200 °C 下的抗拉强度均达到最大, 分别为 350 和 290 MPa。

关键词: $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ 复合材料; 热轧; T6 处理; 显微组织; 抗拉强度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.023

中图分类号: TB331 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0165-06

Influence of rolling and T6 treatment on tensile mechanical properties for $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ composites

Liu Shoufa¹, Qiao Xun¹, Zhou Zhaofeng², Liu Dancheng³

(1. School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China;
2. College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;
3. Xi'an Space Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: The as-cast $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ composites was subjected to two post-treatment processes of hot rolling and hot rolling+T6 treatment, respectively. Then, the influences of hot rolling and T6 treatment on the microstructure and tensile strength of the composites were studied by scanning electron microscope, X-ray diffractometer and tensile test equipment. The results show that hot rolling can effectively refine the reinforced particles in the as-cast $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ composites and eliminate the internal pores of material to improve the tensile strength of material. Under the action of external tensile force, the sample first appears cracks at the interface between reinforced particles and base material, and then the cracks expand to disconnect the sample as a whole. T6 treatment for sample after hot rolling can effectively eliminate the residual stress at the interface between reinforced particles and aluminum base material caused by rolling, improve the wettability between reinforced particles and base material, so as to improve the tensile strength of material. Under the action of external tensile force, the reinforced particles in the sample crack first, and then the whole sample breaks after the cracks expand. With the increasing of rolling compression ratio, the tensile strength of $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ composites increases first and then decreases, and the tensile strength of hot-rolling+T6 treatment sample with a rolling compression ratio of 60% reaches the maximum at room temperature and 200 °C, which are 350 and 290 MPa, respectively.

Key words: $\text{SiC}_p/\text{6061Al}$ composites; hot rolling; T6 treatment; microstructure; tensile strength

铝基复合材料 (Aluminum Matrix Composites, AMCs) 是一种比强度高、质量轻、热胀系数低、耐磨性和耐蚀性好的先进材料, 渐渐在汽车和航空航

天工业中得到了广泛应用^[1-2]。AMCs 由硬陶瓷相作为增强相嵌入至铝合金基体中制备而成, 具有普通单一合金所不具备的独特性能, 常用的增强相有 SiC 、 TiC 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 和 B_4C ^[3-7] 等。研究认为 SiC 最适合作为增强相制备 AMCs, 可使复合材料兼具良好的抗拉强度和耐磨损性能^[2, 8]。

由于熔铸工艺简单易操作且可批量生产, 常用

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-05-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JM-645)

作者简介: 刘守法 (1980-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: liushoufa807456@163.com

来制造 AMCs^[9-10], 包括搅拌铸造^[11]、复合铸造^[12]、重力压铸^[2]、离心铸造^[13]和无压熔渗^[14]等。然而, 熔铸方式制造 AMCs 过程中, 材料易产生孔洞、偏析、中心开裂和热裂等缺陷, 导致材料的力学性能下降^[15]。研究人员应用挤压铸造和剧烈塑性变形工艺制造 AMCs, 结果表明, 挤压铸造及铸造后的剧烈塑性变形可以减少熔铸工艺中产生的一些缺陷^[16-17], 但是, 挤压铸造 AMCs 中的增强颗粒与铝基材界面处易出现残余应力, 导致材料的力学性能下降。本文对 SiC_p/6061Al 复合材料实施热轧及热轧+T6 处理, 分析了热轧及 T6 处理对 SiC_p/6061Al 复合材料力学性能的影响, 为 SiC_p 增强铝基复合材料的开发提供研究依据。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

选用 KIMS 试验室提供的 SiC_p/6061Al 复合材料铸锭, 其中, Si、Fe、Cu、Mn、Mg、Cr、Zn 和 Ti 的质量分数分别为 0.60%、0.70%、0.30%、0.15%、1.00%、0.30%、0.25% 和 0.15%, 其余为 Al。增强颗粒 SiC_p 的平均粒径为 20 μm, 质量分数为 15%。在 350 ℃ 下, 对 SiC_p/6061Al 复合材料分别实施 20%、40%、60% 和 80% 这 4 种轧制压缩率的单道次热轧, 以消除铸造过程中形成的孔洞, 轧辊直径为 Φ450 mm, 轧辊转速为 1 r·min⁻¹。对经过热轧处理后的 SiC_p/6061Al 复合材料实施 T6 处理。T6 处理为: 固溶处理 (530 ℃/2.5 h) + 水淬火 + 人工时效 (160 ℃/18 h)。所有的固溶处理均在盐浴炉中进行, 人工时效均置于油浴炉中进行, 淬火介质为室温下的 5% 盐水。

1.2 试验方法

根据 ASTM B557-15 标准^[18], 利用线切割加工出待测拉伸试样, 尺寸如图 1 所示。使用 RG2000-20 型拉伸机进行拉伸试验, 夹头的移动速率为 2 mm·min⁻¹。使用 S-3500N 型低真空扫描电镜 (LV-SEM) 观察试样及断口的显微形貌, 实施电压为 15 kV。使用 D/Max-2500V 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行观测, 试验参数为 30 kV/50 mA、Kα 波长为 0.154 nm、扫描速度为 0.02 (°)·s⁻¹、扫描范围为 2θ (2θ 为衍射角), 即 10°~90°。在室温环境下对试样进行往复滑动干摩擦磨损试验, 磨球为直径为 Φ10 mm 的 AISI 52100 铬钢球, 磨球硬度为 (62±2) HRC。磨损试验的施加载荷为 25 N、往复行程为 1 mm、频率为 20 Hz, 磨损时长为 45 min。

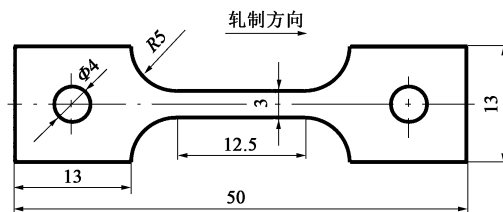


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile sample

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 2a 为轧制前 SiC_p/6061Al 复合材料的 SEM 形貌, 材料中的 SiC 颗粒的形状和大小各异, 且与基材结合良好, 基材内均匀分布着形状各异的孔洞。图 2b 为轧制压缩率为 40% 时热轧后 SiC_p/6061Al 复合材料的 SEM 形貌, 其中 SiC 颗粒变得更加细小, 未出现严重的聚集现象, 基材内的孔洞也消失。

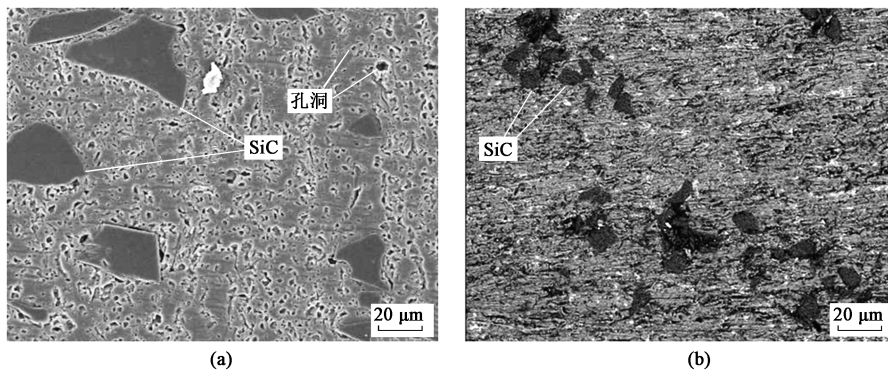


图 2 SiC_p/6061Al 复合材料 SEM 形貌

(a) 轧制前 (b) 轧制后

Fig. 2 SEM morphologies of SiC_p/6061Al composites

(a) Before rolling (b) After rolling

2.2 物相构成

图3为不同轧制压缩率下的 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的 XRD 衍射图谱。可见, 不同轧制压缩率材料对应的特征峰在不同角度 (2θ) 处的强弱不一, 但总的来说, 均是 Al 的特征峰较强, 材料中的铝基材均为单一的面心立方晶体结构, SiC 的特征峰较弱, $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料经热轧后未形成新的物相。

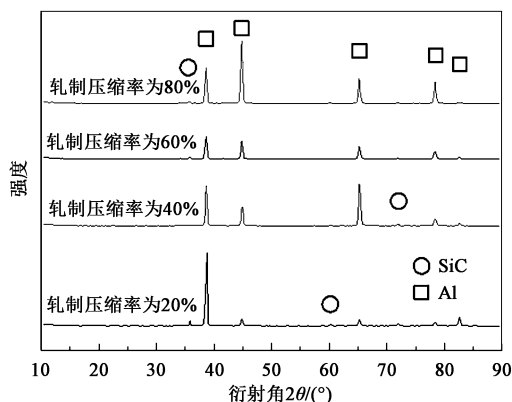


图3 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的 XRD 衍射图谱

Fig. 3 XRD diffraction patterns of $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ composites

2.3 抗拉强度

图4为热轧及热轧+T6处理后 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的抗拉强度曲线。由图4可见, 随着轧制压缩率的增大, 试样抗拉强度均增大至一定程度后即不再增大, 其中热轧+T6处理试样的室温抗拉强度和 200 °C 下的抗拉强度最大, 分别达到了 350 和 290 MPa, 而铸态 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的抗拉强度范围仅在 224~248 MPa^[19], 由于复合材料中含有增强颗粒, 轧制压缩率增大提高了材料的位错密度^[20], 有利于抵抗晶粒间滑移, 从而提高了抗拉强度。图5为 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的伸长率曲线, 可见, 热轧试样的室温伸长率和 200 °C 下的伸长率最大, 分别达到 12.9% 和 10.0%, 而铸态 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的伸长率仅为 2.7%~4.0%^[19], 轧制压缩率超过 40% 时伸长率减小很多, 这是因为轧制压缩率增大导致位错密度增大, 使得材料的塑性变差。

T6 处理有利于提高复合材料的抗拉强度, 这是由于复合材料中的增强颗粒与基材间浸润性不佳, 轧制后增强颗粒与铝基材界面间产生残余应力, 使增强颗粒周围产生不同程度的微裂纹, 为拉伸时的断裂裂纹扩展提供了条件, 从而导致抗拉强度下降, 而轧制后进行 T6 处理有利于消除复合材料内的残余

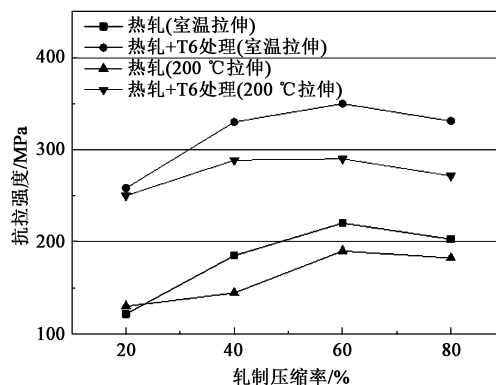


图4 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的抗拉强度

Fig. 4 Tensile strengths of $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ composites

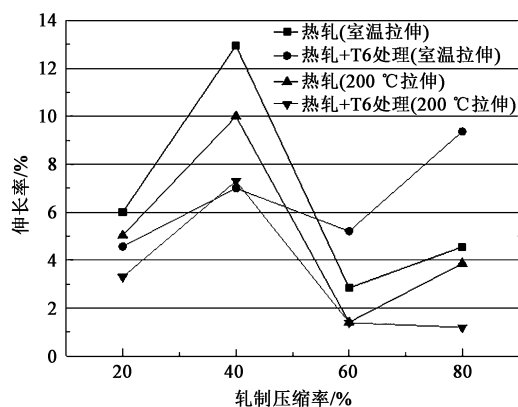


图5 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 复合材料的伸长率

Fig. 5 Elongations of $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ composites

应力, 提高增强颗粒与基材间的浸润性, 从而提高材料的抗拉强度。

从图4和图5可以看出, 高温 (200 °C) 下的抗拉强度比室温下的小, 而高温 (200 °C) 下伸长率却比室温下的伸长率大。这是由于高温下金属原子热振动的振幅增大, 原子间的结合力减弱, 从而降低了复合材料的抗拉强度; 此外, 金属在高温下将发生回复和再结晶过程, 致使由于塑性变形所产生的加工硬化得以消除, 变形抗力降低, 从而提高了伸长率^[21]。

2.4 拉伸断口形貌

颗粒增强铝基复合材料的拉伸断口主要有两种形态^[22], 即界面剥离和增强颗粒开裂。

图6为不同轧制压缩率下热轧材料的室温拉伸断口的 SEM 形貌, 其中圆圈内为断口内的韧窝, 方框内为开裂的 SiC 颗粒。可见轧制压缩率为 20%、40% 和 80% 时复合材料断口处布满韧窝, 裂缝起始于增强颗粒与铝基材界面, 并形成韧窝, 随着应变的增加, 韧窝逐渐变大, 最后韧窝之间

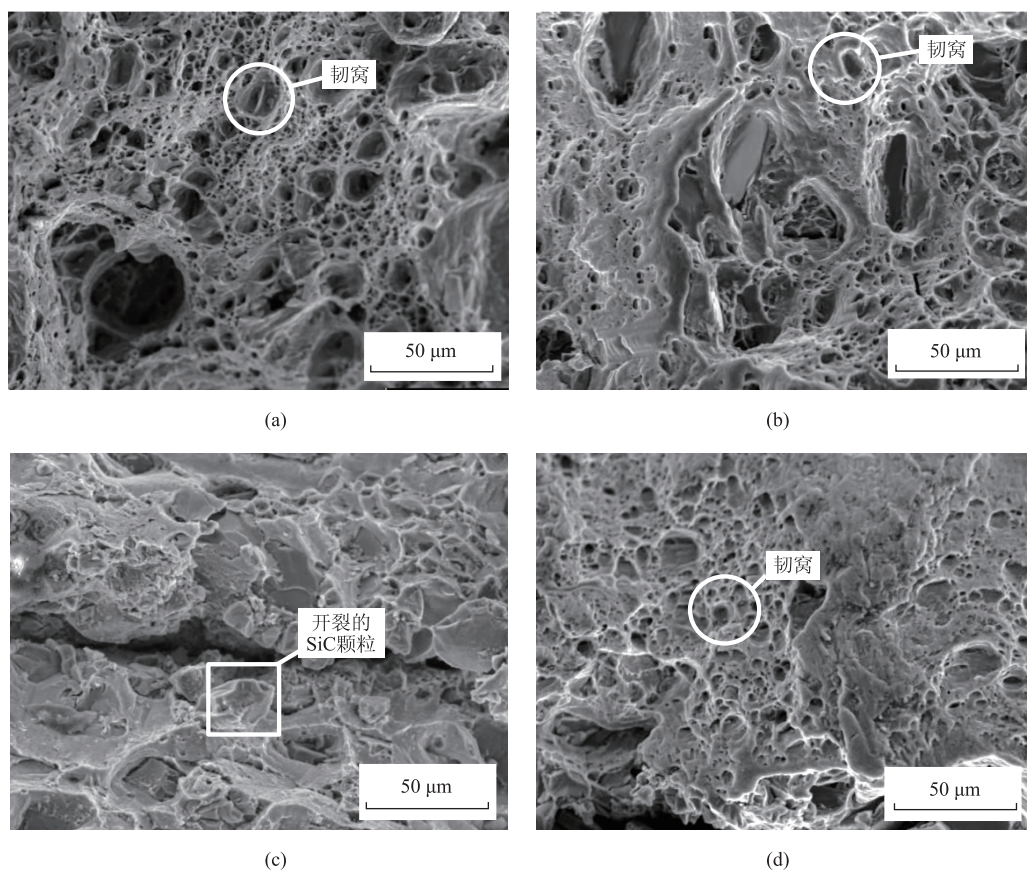


图 6 不同轧制压缩率下热轧复合材料的室温拉伸断口的 SEM 形貌

(a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80%

Fig. 6 SEM morphologies of tensile fracture for hot rolled composites at room temperature under different rolling compression ratios

结合起来导致材料断裂，此为典型的塑性断裂，因此，该试样的抗拉强度较低而伸长率较大。轧制压缩率为 60% 时复合材料断口处布满开裂的 SiC 颗粒，并伴有巨大裂缝产生，这是因为增强颗粒首先开裂，导致铝基材无法承受外力作用而迅速发生塑性变形，因此，该试样的抗拉强度较大而伸长率较低，最后断口处形成开裂的增强颗粒又伴有巨大裂缝^[23]。

图 7 为不同轧制压缩率下的热轧+T6 试样的室温拉伸断口的 SEM 形貌，均属于增强颗粒开裂型断口，其中方框内为开裂的 SiC 颗粒。可见，各轧制压缩率下的试样断裂均以 SiC 颗粒劈裂断裂形式为主，为典型的脆性断裂形式，因此，该试样的抗拉强度较大而伸长率较小，见图 4 和图 5。由于铸态 SiC_p/6061 复合材料经过轧制后，使 SiC 颗粒与基材间存在残余应力，导致拉伸时 SiC 颗粒与基材间容易产生开裂从而导致脆性断裂，而随后的 T6 热处理使 SiC 颗粒与基材间的残余应力消失，从而拉高了增强颗粒与基材间的浸润性，试样受

外部拉力后首先开裂于 SiC 颗粒处，最后导致试样突然断裂。

3 结论

(1) 热轧可以有效地细化 SiC_p/6061Al 复合材料内的增强颗粒并消除内部孔洞，也能保证热轧后复合材料的基材仍保持单一的面心立方晶体结构。

(2) 随着轧制压缩率的增大，复合材料的抗拉强度呈先增大后减小，其中轧制压缩率为 60% 时试样的抗拉强度最大，该试样在拉伸外力作用下，在增强颗粒与基材间界面处首先出现裂纹，裂纹扩展后使试样整体断开。

(3) T6 处理可以有效地消除轧制导致的增强颗粒与铝基材界面间的残余应力，提高增强颗粒与基材间的浸润性，从而提高材料的抗拉强度，在拉伸外力作用下该试样的增强颗粒开裂，裂纹扩展至基材从而导致整体断裂。

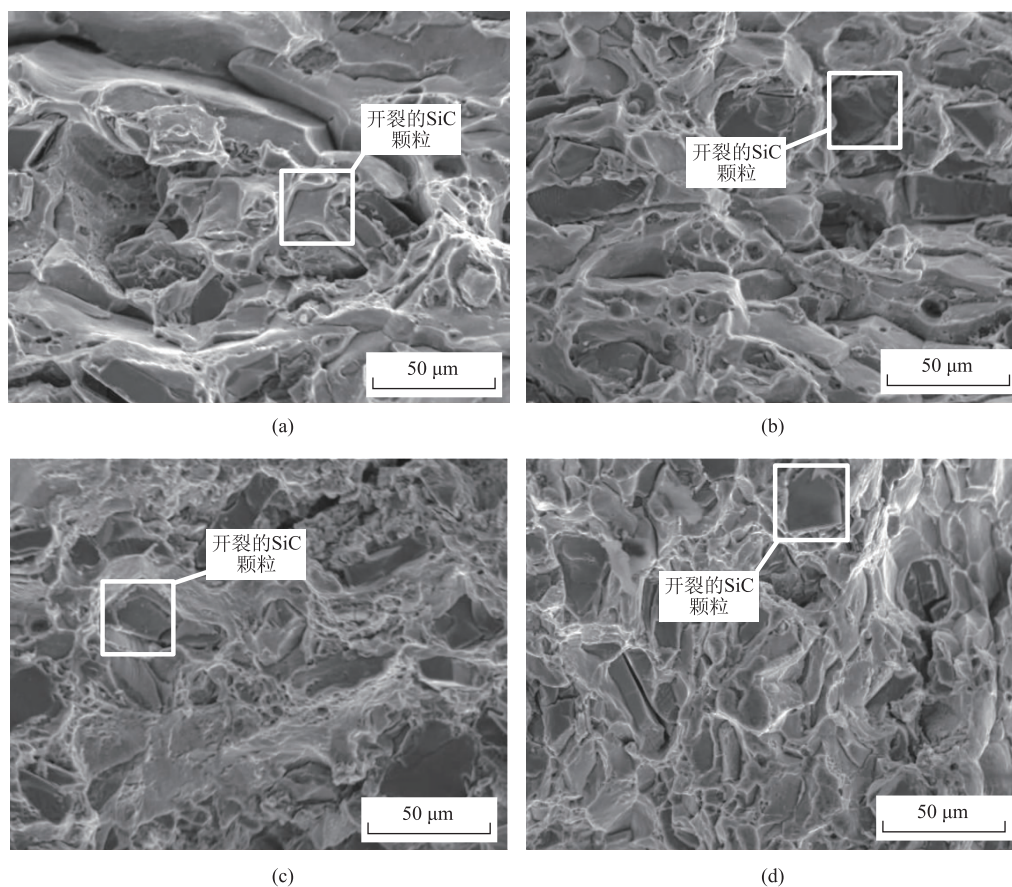


图 7 不同轧制压缩率下热轧+T6 处理复合材料的室温拉伸断口的 SEM 形貌

(a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80%

Fig. 7 SEM morphologies for tensile fracture for hot rolled+T6 treatment composites at room temperature under different rolling compression ratios

参考文献：

- [1] 石文超, 汪吉赛, 曹洪, 等. 纳米压痕和反演分析法确定 Al₁₈B₄O_{33w}/2024Al 复合材料基体力学性能 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 169-174.
Shi W C, Wang J S, Cao H, et al. Determination of mechanical properties of matrix in Al₁₈B₄O_{33w}/2024Al composites by nanoindentation and reverse analysis method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 169-174.
- [2] 刘守法, 周兆锋. 第二相增强金属基复合材料研究进展 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 14-16, 21.
Liu S F, Zhou Z F. Research progress on secondary phase-reinforced metal matrix composite [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (4): 14-16, 21.
- [3] Ezatpour H R, Torabi P M, Sajjadi S A, et al. Microstructure, mechanical analysis and optimal selection of 7075 aluminum alloy based composite reinforced with alumina nanoparticles [J]. Materials Chemistry and Physics, 2016, 178: 119-127.
- [4] 刘守法, 王晋鹏, 吴松林, 等. 基于镀铜 SiC-Cu 颗粒制备石墨烯片/SiC-Cu 和碳纳米管/SiC-Cu 增强体 [J]. 复合材料学报, 2017, 34 (11): 2544-2549.
Liu S F, Wang J P, Wu S L, et al. Preparation of graphene nano sheets/SiC-Cu and carbon nano tubes/SiC-Cu reinforcements based on Cu plating SiC-Cu particles [J]. Acta Materialae Compositae Sinica, 2017, 34 (11): 2544-2549.
- [5] Mohanavel V, Karthick M, Paul D L B. Fabrication and development of aluminum alloy AA6063-titanium carbide composite prepared by in situ method [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10 (5): 12475-12482.
- [6] Liu S F, Wang Y W, Muthuramalingam T, et al. Effect of B₄C and MOS₂ reinforcement on micro structure and wear properties of aluminum hybrid composite for automotive applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107329.
- [7] 刘守法, 夏祥春, 王晋鹏. 搅拌摩擦加工工艺制备 ZrO₂ 颗粒增强镁基复合材料的组织与力学性能 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (1): 35-38.
Liu S F, Xia X C, Wang J P. Microstructure and mechanical properties of ZrO₂ particles reinforced magnesium-based composites prepared by friction stir processing [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40 (1): 35-38.
- [8] Adebisi A A, Maleque M A, Ali M Y, et al. Effect of variable particle size reinforcement on mechanical and wear properties of 6061Al-SiC_p composite [J]. Composite Interfaces, 2016, 23 (6): 533-547.

- [9] Baradeswaran A, Elaya Perumal A. Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al₂O₃/graphite hybrid composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56: 464-471.
- [10] David R S J, Robinson Smart D S, Dinaharan I. Microstructure and some mechanical properties of fly ash particulate reinforced AA6061 aluminum alloy composites prepared by compocasting [J]. Materials & Design, 2013, 49 (16): 28-34.
- [11] Soltani S, Khosroshahi R A, Mousavian R T, et al. Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites [J]. Rare Metals, 2017, 36 (7): 581-590.
- [12] David R S J, Dinaharan I, Mashinini P M. High temperature sliding wear behavior of AA6061/fly ash aluminum matrix composites prepared using compocasting process [J]. Tribology Materials Surfaces & Interfaces, 2017, 11 (1): 39-46.
- [13] Jayakumar E, Jacob J C, Rajan T P D, et al. Processing and characterization of functionally graded aluminum (A319)-SiC_p metallic composites by centrifugal casting technique [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47 (8): 4306-4315.
- [14] Wang D, Zheng Z, Lyu J, et al. Enhanced thermal conductive 3D-SiC/Al-Si-Mg interpenetrating composites fabricated by pressureless infiltration [J]. Ceramics International, 2016, 43 (2): 1755-1761.
- [15] Ghomashchi M R, Vikhrov A. Squeeze casting: An overview [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101 (1): 1-9.
- [16] Sarfraz M H, Jahanzaib M, Ahmed W, et al. Multi-response parametric optimization of squeeze casting process for fabricating Al 6061-SiC composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (1-4): 759-773.
- [17] Erturun V, Karami M B. Effects of reciprocating extrusion process on mechanical properties of AA 6061/SiC composites [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2016, 26 (2): 328-338.
- [18] ASTM B557-15, Standard test methods for tension testing wrought and cast aluminum-and magnesium-alloy products [S].
- [19] Sarfraz M H, Jahanzaib M, Ahmed W, et al. Multi-response parametric optimization of squeeze casting process for fabricating Al 6061-SiC composite [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 759-773.
- [20] Chu H S, Liu K S, Yeh J W. Study of 6061-AlO composites produced by reciprocating extrusion [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2000, 31 (10): 2587-2596.
- [21] 欧阳攀, 叶鹏, 欧晓昇, 等. 热拉伸变形对 AZ21B 镁合金板材力学性能与组织的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2011, 39 (2): 21-24.
- Ouyang P, Ye P, Ou X S, et al. Influence of thermal tensile deformation on mechanical properties and microstructure of AZ21B magnesium alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39 (2): 21-24.
- [22] Gupta M, Surappa M K, Qin S. Effect of interfacial characteristics on the failure-mechanism mode of a SiC reinforced Al based metal-matrix composite [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 67 (1-3): 94-99.
- [23] 吴洁君, 王殿斌. SiC_p 增强铝基复合材料的铸造缺陷分析 [J]. 金属学报, 1999, 35 (1): 103-108.
- Wu J J, Wang D B. Analysis of casting defects in SiC_p reinforced aluminum matrix composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35 (1): 103-108.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •