

50AlN/2024Al基复合材料制备及性能研究

杨鹏翔¹ 阎峰云^{1,2}

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 2. 甘肃省有色金属及复合材料工程研究中心, 兰州 730050)

摘要 采用直热法粉末触变成形工艺制备了AlN体积分数为50%的AlN/2024Al复合材料, 研究了成形工艺参数对复合材料组织及性能的影响。结果表明, 在成形温度为610℃、保温时间为20 min的条件下, AlN颗粒在复合材料中分散最为均匀, 缺陷较少, 材料综合性能最优, 其抗弯强度、热膨胀系数、热导率和硬度(HV)分别为497.7 MPa、 $9.01 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、74.604 W/(m·K)和394.4。

关键词 粉末触变成形; 复合材料; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TB333; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240120

Preparation and Properties of 50AlN/2024Al Matrix Composites

YANG Pengxiang¹, YAN Fengyun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050; 2. Gansu Nonferrous Metals and Composite Materials Engineering Research Center, Lanzhou 730050)

Abstract: AlN/2024Al composites with AlN volume fraction of 50% were prepared by direct heating powder thixoforming process, and effects of forming process parameters on microstructure and properties of composites were investigated. The results indicate that AlN particles are most uniformly dispersed in composites under 610 °C for 20 min with few defects, and desirable comprehensive properties are obtained, where the bending strength, thermal expansion coefficient, thermal conductivity and hardness of the composites reach 497.7 MPa, $9.01 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 74.604 W/(m·K) and 394.4 HV, respectively.

Key Words: Powder Thixoforming, Composites, Microstructure, Mechanical Properties

在新能源汽车、电子封装等领域快速发展的背景下, IGBT模块(Insulated Gate Bipolar Transistor)作为控制电能转换与传输的核心部件, 正朝着小型化、可靠化、高功率化发展, 这对IGBT的性能提出了更高的要求, 特别是在新能源汽车、光伏、轨道交通等领域。IGBT多应用于高压、大电流环境中, 需要更高的散热效率和稳定性^[1]。

AlN陶瓷具有高导热, 与Si相匹配的热膨胀系数, 强度高、耐腐蚀、电阻率大等特点, 是半导体中大规模散热基板的理想材料^[2-4], 但AlN基板生产成本低、工艺

复杂, 限制了其大规模应用。铝合金热导率高、成本低、易加工, 且AlN与铝不发生反应, 因此开发AlN/铝基复合材料应用在电子封装、电子散热基板等方面有广阔的发展潜力^[5]。XIE K W等^[6]采用双相颗粒增强6061铝合金, 制备了(8.2% AlN+1% Al₂O₃)/6061Al复合材料, 研究了室温和高温下的屈服强度和抗拉强度。BALOG M等^[7]采用原位合成法合成了体积分数为8.8%和14.7% AlN/Al金属基复合材料并对其组织和力学性能进行研究, 发现AlN在铝基体中分散均匀, 其抗拉强度为417 MPa。CHEN J等^[8]用粉末冶金方法制

收稿日期: 2024-03-23; 修订日期: 2024-04-19

第一作者简介: 杨鹏翔, 男, 1997年出生, 硕士研究生, E-mail: 1754789451@qq.com

通信作者: 阎峰云, 男, 1962年出生, 教授, E-mail: yanfy@lut.edu.cn

引用格式: 杨鹏翔, 阎峰云. 50AlN/2024Al基复合材料制备及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 009-1 013.

YANG P X, YAN F Y. Preparation and properties of 50AlN/2024Al matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 009-1 013.

[28] SARVARI M, GHAEMI K S, DIVANDARI M, et al. Dissimilar joining of Al/Mg light metals by centrifugal compound casting process[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(2): 998-1 007.

[29] WANG P J, CHEN Z J, HU C, et al. Effects of annealing on the interfacial structures and mechanical properties of hot roll bonded Al/

Mg clad sheets [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A792: 139 673.

[30] KUMAR S, WU C. Eliminating intermetallic compounds via Ni interlayer during friction stir welding of dissimilar Mg/Al alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4 353-4 369.

(编辑: 彭瑾)

备了体积分数为 0.5%、10% 和 15% 的 AlN/Mg-Al 复合材料,研究了不同 AlN 含量下材料的力学性能。LI J 等^[9]等采用纳米颗粒增强制备了一种耐热(6.4% AlN+5% TiN)/Al 基复合材料,研究了其在高温和室温下的力学性能。综上,针对 AlN 增强铝基复合材料的研究多以小体积添加、力学性能增强为主,对高体积添加,热物性能的研究报道较少,且鲜有研究工艺参数对复合材料的影响,尚未形成完整的制备工艺路线和体系,难以发挥 AlN 在热物性和力学性能方面的特点,应针对具体制备工艺存在的问题优化相应参数^[10]。

直热法粉末触变设备可调节增强体体积分数,具有烧结时间短,制备的复合材料性能优良,组织致密等特点^[11]。课题组已采用直热法粉末触变成形工艺制备出多种颗粒增强金属基复合材料,研究了成形工艺参数等多种因素对复合材料的影响,发现成形温度、保温时间是成形工艺中的主要影响因素,对复合材料组织和性能有重要影响^[11-13]。因此采用课题组自研的直热法粉末触变成形工艺制备高体积分数的 AlN/2024Al 复合材料,研究不同成形工艺参数对复合材料组织、力学性能和热物性能的影响,优化 AlN/Al 基复合材料的制备工艺,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用粒径为 25 μm 的 2024 铝合金粉末作为基体材料,其化学成分见表 1。采用 AlN 颗粒作为增强颗粒,其纯度为 99%,平均粒径为 6 μm 。

表 1 2024 铝合金的化学成分

w_B								%
Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr	Al
4.5	1.4	0.5	0.5	0.48	0.25	0.15	0.1	余量

1.2 复合材料的制备

试验所用复合材料由直热法粉末触变成形工艺制备。对 AlN 颗粒进行预处理,利用无水乙醇对颗粒表

面清洗,在真空干燥箱中烘干备用。利用行星球磨机(QM-1SP4)将基体材料和 AlN 颗粒混合均匀,球料比为 2:1,混粉时间为 120 min,将混合均匀的粉末装进模具,预压后在不同工艺参数下利用直热法粉末触变成形设备通电加热烧结。将复合材料加工成要求的尺寸,进行组织观察和性能分析。

基于课题组已获得的正交试验最优方案(AlN 体积分数为 50%、成形温度为 610 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 20 min、成形压力为 50 MPa),通过控制变量法进行单因素试验,分别研究不同成形温度(550、580、610 和 640 $^{\circ}\text{C}$)、不同保温时间(20、40、60 和 80 min)对 AlN/2024Al 复合材料组织及性能的影响。

1.3 性能测试方法

将复合材料制成 40 mm $\times$ 3 mm $\times$ 2.5 mm 的试样,使用 401-3 型抗折弯仪测试抗弯强度,采用三点弯曲方式测量,测量跨距为 30 mm,加载速率为 4 N/s。将复合材料制成 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 5 mm 的正方形板,使用 Wilson VH1102 型维氏硬度测试仪进行测试,载荷为 100 N,每个试样等间距打 4 个点,取平均值。将复合材料制成 ϕ 12.7 mm 的试样,再用砂纸打磨至厚度为 2.5 mm,测试前在试样表面均匀喷涂导电石墨,自然晾干后用 LFA500 闪射法导热仪测试室温(25 $^{\circ}\text{C}$)下材料的热导率,测试时无气体保护。将复合材料制备成 25 mm $\times$ 3 mm $\times$ 3 mm 的试样,利用 DIL402EP 型电子热膨胀仪测试 25~300 $^{\circ}\text{C}$ 下材料的平均热膨胀系数,升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,无气体保护。

2 试验结果与分析

2.1 成形温度对复合材料的影响

2.1.1 显微组织

图 1 为不同成形温度下复合材料的金相显微组织。可以看出,随着成形温度升高,复合材料中未熔化的 2024 合金减少,AlN 颗粒和 2024 合金由聚集状态趋于均匀分布。在低成形温度(550 $^{\circ}\text{C}$)下,基体材料开始熔

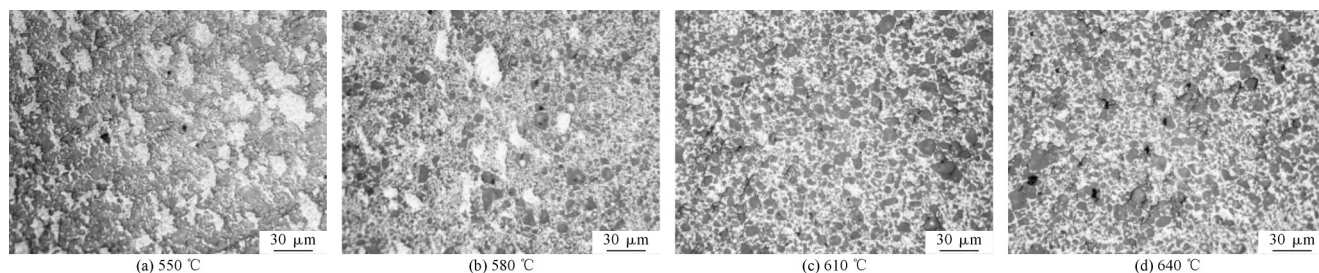


图 1 不同成形温度下 AlN/Al 复合材料的显微组织

Fig.1 Microstructure of AlN/Al composites at different forming temperatures

化,材料中固相较多,2024合金流动性差,呈聚集状态,对AlN颗粒的分散起到阻碍作用,部分铝液无法较好地填充到AlN之间,AlN颗粒出现团聚现象,材料中的孔隙等缺陷出现在增强颗粒团聚处。当温度升高到610℃时,大部分Al基体熔化,液相增多,铝液具有良好的流动性,能很好地填充到AlN增强颗粒之间,使AlN颗粒均匀分布,且材料中孔隙等缺陷减少。当温度升高到640℃时,材料中的2024合金几乎全部熔化,Al基体的流动性增大,黏性变差,在施加压力挤压过程中,会有部分铝液被挤出,铝液流动带动部分AlN颗粒重新排布,使得少量颗粒聚集在一起,材料中孔隙略有增加。

2.1.2 力学性能及断口形貌

图2为不同成形温度下复合材料的抗弯强度和硬度。可以看出,随成形温度上升,复合材料的抗弯强度和硬度都呈先增大后减小的趋势,610℃时,复合材料的抗弯强度和硬度(HV)均达到最大,分别为497.7 MPa和394.4。这是因为成形温度上升,液相增多,固相减少,合金流动性增大^[14],铝液充分填充到AlN颗粒之间,使得成形之后复合材料中孔隙团聚等缺陷减少。当成形温度为610℃时,AlN颗粒分布最为均匀,且复合材料缺陷最少,AlN阻碍了铝合金的变形和裂纹扩展^[15],使复合材料的抗弯强度和硬度最大。

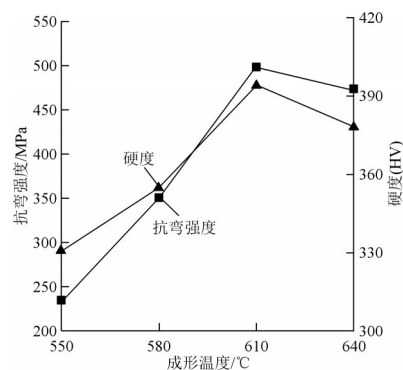


图2 不同成形温度下AlN/Al复合材料的抗弯强度和硬度
Fig.2 Bending strength and hardness of AlN/Al composites at different forming temperatures

成形温度上升到640℃时,合金的流动性进一步增大,相较于成形温度为610℃时,复合材料缺陷有所增多,对其力学性能有所影响。

图3为不同成形温度下复合材料的断口形貌。由图3a和图3b可以看出,在较低的成形温度下,材料断口处AlN颗粒分布不均,细小的AlN颗粒粘连在一起,呈团聚状态,且可以观察到未熔状态下的铝合金基体,韧窝较少,材料呈脆性断裂趋势。当成形温度升高到610℃和640℃时,AlN颗粒在材料中均匀分布,部分在断裂过程中被拔出,韧窝较多且连续分布,材料呈韧性断裂趋势。

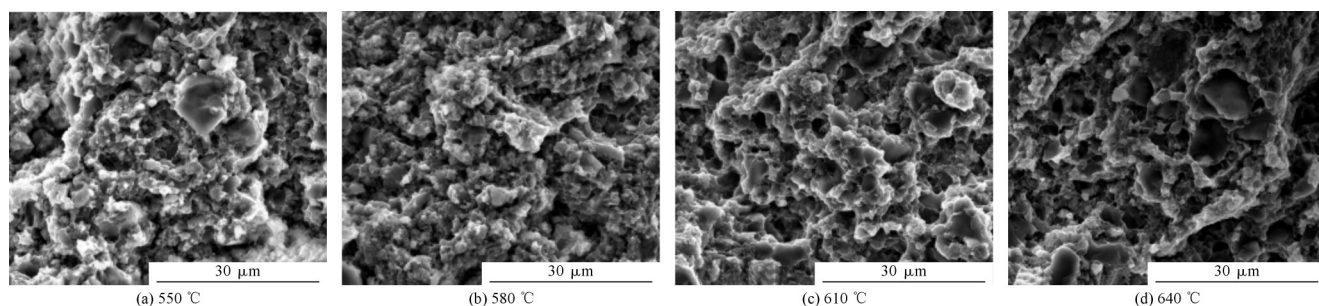


图3 不同成形温度下AlN/Al复合材料的断口形貌

Fig.3 Fracture morphologies of AlN/Al composites at different forming temperatures

2.1.3 热物性能

图4为不同成形温度下复合材料的热导率和热膨胀系数。可以看出,复合材料的热导率随温度上升表现为先增大后减小,从42.204 W/(m·K)增大到74.604 W/(m·K),在610℃时出现峰值,温度升高到640℃时,材料热导率略有下降,为70.45 W/(m·K)。这是因为随温度升高,2024合金逐渐熔化,流动性增大,将AlN分散,铝液和增强颗粒同时分布均匀。复合材料的热膨胀系数随温度上升先减小后增大,在610℃时最小,这是因为在610℃时虽然铝合金基体主要以液相存在,但其中仍有少量固相,合金为半固态状态,且

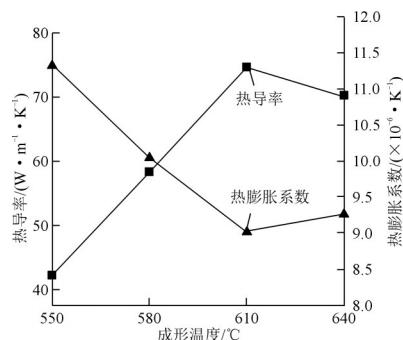


图4 不同成形温度下AlN/Al复合材料的热物性能

Fig.4 Thermophysical properties of AlN/Al composites at different forming temperatures

在加热过程中,为石墨上下同时加热,保证了合金粉末受热均匀,使得材料中固液相分布均匀,少量固相的存在可以很好地限制 AlN 颗粒由于压力作用而移动,使得材料中的 AlN 在很小的范围中活动,增强颗粒和基体材料相互制约,增强颗粒均匀分布在材料之中,对热膨胀系数和热导率有积极影响。

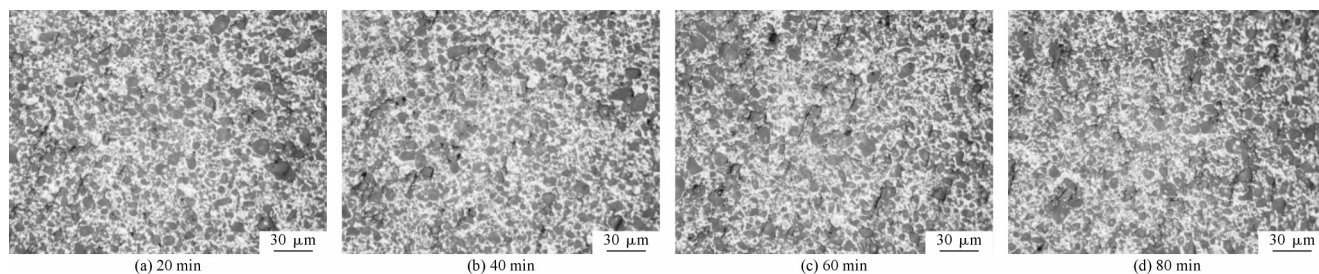


图5 不同保温时间下 AlN/Al 复合材料的显微组织

Fig.5 Microstructure of AlN/Al composites holding for different durations

长到 40 min,复合材料中的 AlN 颗粒受到长时间的挤压作用,在熔融态的 2024 合金的带动下,细小的颗粒会发生重排,出现破碎和聚集的现象,材料中孔洞等缺陷有所增多。

2.2.2 力学性能及断口形貌

图 6 为不同保温时间下复合材料的抗弯强度和硬度。可以看出,随时间延长,材料的抗弯强度和硬度都呈现下降趋势,抗弯强度和硬度 (HV) 分别从 497.7 MPa 和 394.4 下降到 452.3 MPa 和 354.4。保温 20 min 时,AlN 颗粒均匀分布,由于保温时材料受到压力作用,当保温时间进一步延长,原先分布均匀的 AlN 会在铝合金基体的带动下移动,少量颗粒会重新聚集,在颗粒和基体结合处界面增多,孔隙增多,使抗弯强度和硬度下降^[16]。

图 7 为不同保温时间下复合材料的断口形貌。可以看到,形貌中有较多韧窝,AlN 颗粒和 Al 合金结合良好,AlN 颗粒镶嵌在基体之中,未见颗粒被拔出,较硬

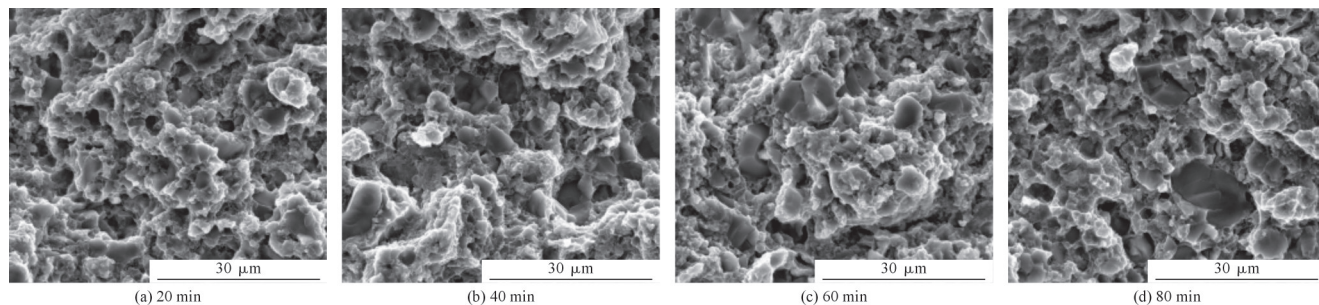


图6 不同保温时间下 AlN/Al 复合材料的抗弯强度和硬度
Fig.6 Bending strength and hardness of AlN/Al composites holding for different durations

的 AlN 颗粒在材料弯折断裂中提供了很大的阻力,提高了材料的抗弯强度。随着保温时间延长,出现破碎的 AlN 颗粒,这是长时间压力作用下,部分颗粒被挤压,破碎的颗粒仍聚集在一起,结合紧密,基体很难填充进破碎的 AlN 颗粒之间,对其进行分散。同时,AlN 颗粒之间的聚集增多,在颗粒聚集处孔洞、缝隙增多,降低了材料的力学性能。

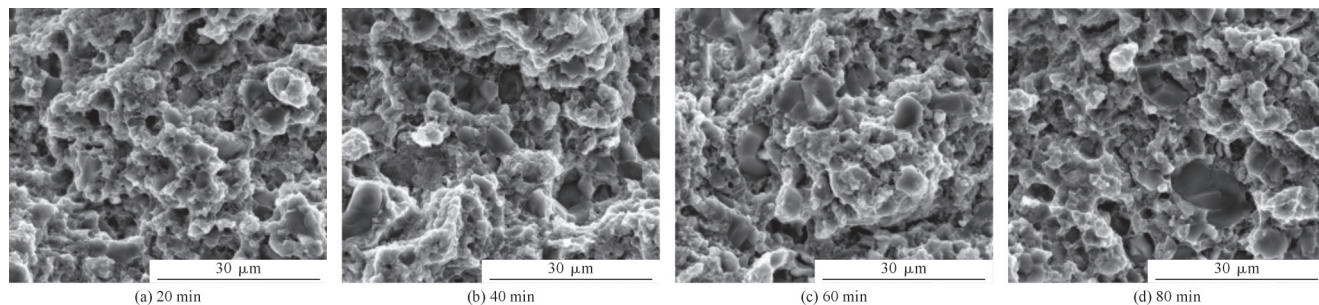


图7 不同保温时间下 AlN/Al 复合材料的断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of AlN/Al composites holding for different durations

2.2.3 热物性能

图 8 为不同保温时间下复合材料的热物性能。可

见随着时间延长,复合材料的热导率呈下降趋势,从 74.604 W/(m·K)降低到 65.736 W/(m·K)。热膨胀系

数呈上升趋势,从 $9.01 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增大到 $10.21 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。保温时间的延长对材料的热导率和热膨胀系数影响较小。热导率和热膨胀系数主要与材料中基体和增强颗粒界面结合效果和增强颗粒的分散程度有关。保温时间的延长使颗粒破碎,在热量进行扩散时界面增多^[17],材料的热扩散效率降低,热导率呈下降趋势。同时,孔隙的增加使得基体和增强颗粒之间的界面结合减弱,AlN颗粒限制材料受热膨胀效果减弱,增大了材料的热膨胀系数。

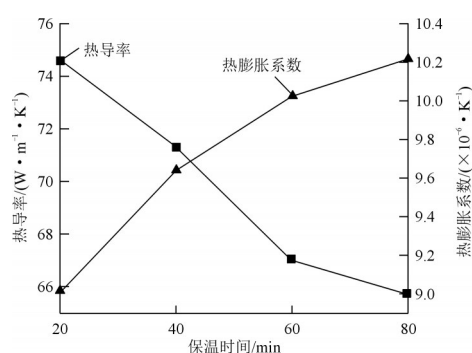


图8 不同保温时间下AlN/Al复合材料的热导率和热膨胀系数
Fig.8 Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of AlN/Al composites holding for different durations

3 结 论

(1)保温 20 min 时,随成形温度从 550 °C 升高到 640 °C,复合材料的抗弯强度和硬度呈先增大后减小的趋势,610 °C 时,复合材料的抗弯强度和硬度(HV)达到最大,分别为 497.7 MPa 和 394.4。热导率先上升后下降,610 °C 时最高,为 74.604 W/(m·K)。热膨胀系数先增大后减小,610 °C 时最小,为 $9.01 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

(2)成形温度为 610 °C 时,随保温时间从 20 min 延长到 80 min,材料的抗弯强度和硬度(HV)分别从 497.7 MPa 和 394.4 下降到 452.3 MPa 和 354.4。热导率呈下降趋势,从 74.604 W/(m·K) 降低到 65.736 W/(m·K)。热膨胀系数呈增大趋势,从 $9.01 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增至 $10.21 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

参 考 文 献

[1] 刘国友,黄建伟,覃荣震,等.高压大电流(4 500 V/600 A)IGBT 芯片研制[J].电工技术学报,2021,36(4):810-819.

- [2] 郑瑞剑,魏鑫,张浩,等.电子封装用高导热 AlN 陶瓷基板研究进展[J].中国陶瓷,2023,59(5):1-14,49.
- [3] JIANG H, WANG X H, LEI W, et al. Effects of two-step sintering on thermal and mechanical properties of aluminum nitride ceramics by impedance spectroscopy analysis[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019,39(2-3):249-254.
- [4] HUANG D, LIU Z, HARRIS J, et al. High thermal conductive AlN substrate for heat dissipation in high-power LEDs[J]. Ceramics International, 2019,45(1):1 412-1 415.
- [5] 张强,孙东立,武高辉.电子封装基片材料研究进展[J].材料科学与工艺,2000(4):66-72.
- [6] XIE K W, NIE J F, HU K Q, et al. Significant improvement of high-temperature strength of 6061 Al matrix composite reinforced by dual-phased nano-AlN and submicron-Al₂O₃ particles[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(10): 3 197-3 211.
- [7] BALOG M, KRIZIK P, SVEC P, et al. Industrially fabricated in-situ Al-AlN metal matrix composites (Part A): Processing, thermal stability, and microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 883:160 858.
- [8] CHEN J, BAO C G, CHEN W H, et al. Mechanical properties and fracture behavior of Mg-Al/AlN composites with different particle contents[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(7):668-674..
- [9] LI J, ZHAO K, REN L, et al. Microstructure evolution, mechanical properties, and strengthening mechanisms of heat-resistant Al-based composite reinforced by a combination of AlN and TiN particles[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5 628-5 641.
- [10] 阎峰云,孙晓昊,张燕强. AlN_p/Al(Mg)复合材料的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(2):145-152.
- [11] 李小红. Ti₂SnC 增强铜基复合材料的制备及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
- [12] 郭嘉鹏. 金刚石增强铜基复合材料的制备及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2022.
- [13] 刘兴丹. 直热法粉末触变成形 SiC_p/Al 复合材料的工艺及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
- [14] 王振. 直热法粉末触变成形参数对 SiC_p/2024Al 复合材料性能的影响[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
- [15] 李洪武,易丹青,刘会群,等. 亚微米 AlN_p/Al 复合材料的组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2004(2):10-12.
- [16] 鲁元,荆强征,龚楠,等. 挤压铸造法制备 Al/AlN 陶瓷基复合材料[J]. 中国陶瓷工业,2014,21(1):5-8.
- [17] 俞雨,程继贵,万磊,等. 无压渗透法制备 Al/AlN 复合材料及其性能[J]. 复合材料学报,2011,28(6):166-171.

(编辑:彭瑾)