● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4049

碳纤维铝基复合材料制备及合金化研究现状

金瑛栋[1],郝景莹[1],赵春然[1],董占远[1],王成伟[2],康 烁[2],杨玲玲[3],董书琳[1],李广龙[1]
(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110870; 2. 抚顺煤矿电机制造有限责任公司,辽宁 抚顺 113122; 3. 阳泉华盛矿用设备厂有限公司,山西 阳泉 045008)

摘 要:碳纤维铝基复合材料具有优异的抗拉性能、耐磨性和抗疲劳性能等特点,广泛应用于飞行器、军工用品、汽车等领域。针对目前碳纤维铝基复合材料制备成形困难和界面结合性能差等问题,本文论述了近年来国内外各种碳纤维铝基复合材料制备工艺,分析了各种制备工艺的特点,总结了基体合金化对界面反应和润湿性的影响。同时,对碳纤维铝基复合材料的未来发展进行了展望。

关键词:铝基复合材料;碳纤维;制备工艺;合金化
中图分类号:TB333 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2024)05-0494-09

Research Status of the Preparation and Alloying of Carbon Fiber Aluminium Matrix Composites

JIN Yingdong[1], HAO Jingying[1], ZHAO Chunran[1], DONG Zhanyuan[1], WANG Chengwei[2], KANG Shuo[2], YANG Lingling[3], DONG Shulin[1], LI Guanglong[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Fushun Coal Mine Motor Manufacturing Co., Ltd., Fushun 113122, China; 3. Yangquan Huasheng Mining Equipment Factory Co., Ltd., Yangquan 045008, China)

Abstract: Carbon fiber aluminium matrix composites have excellent characteristics such as good tensile performance, wear resistance and fatigue resistance, and are widely used in aircraft, military supplies, automobiles and many other fields. In view of the current difficulties in the preparation and formation of carbon fiber aluminium matrix composites and the poor interface bonding performance, the preparation processes of various carbon fiber aluminium matrix composites at home and abroad in recent years are discussed. The characteristics of various preparation processes are analysed, and the impact of matrix alloying on the interfacial reaction and wetting is summarized. At the same time, the future development of carbon fiber aluminum matrix composites is prospected.

Key words: aluminium matrix composites; carbon fiber; fabrication process; alloying

金属基复合材料因具有轻量化、比强度高、耐腐蚀、低膨胀系数等优异的综合性能,在航天和汽车等工业领域得到了广泛应用[1-3]。特别是在新能源汽车制造领域,为了降低车身重量、减少能耗,金属基复合材料被大量采用[4]。在众多金属基体中,铝具有质量轻、延展性高、机械性能好以及导电、导热能力强等优点,被许多研究人员认定为理想的金属基体。同时,碳纤维以其轻质、低膨胀系数、抗高温、耐磨损及良好的导电、导热性能,被视为理想的强化体材料[5]。近年来,随着纤维制备技术的发展,碳纤维制造成本逐渐下降,也得到更多研究者的青睐,研究人员通过将碳纤维和铝合金结合,成功制备出力学性能良好的碳纤维铝基(C_f/Al)复合材料,并被广泛应用于航空航天、汽车制造等领域[6]。例如,中国航空工业西锐公司的第二代“愿景”喷气机机身全部采用碳纤维增强的铝基复合材料制造,使其飞行高度

收稿日期:2024-03-11
基金项目:沈阳市科技人才专项优秀中青年项目(RC230930);辽宁省科技计划联合基金(2023-MSLH-253)
作者简介:金瑛栋,2003年生,本科生.研究方向为碳纤维铝基复合材料制备.Eamil: jinyingdong2021@163.com
通讯作者:李广龙,1990年生,博士,副教授.研究方向为碳纤维铝基复合材料制备,高性能球墨铸铁开发.Email:liguanglong1990@163.com
引用格式:金瑛栋,郝景莹,赵春然,董占远,王成伟,康烁,杨玲玲,董书琳,李广龙.碳纤维铝基复合材料制备及合金化研究现状[J].铸造技术,2024,45(5): 494-502.
JIN Y D, HAO J Y, ZHAO C R, DONG Z Y, WANG C W, KANG S, YANG L L, DONG S L, LI G L. Research status of the preparation and alloying of carbon fiber aluminium matrix composites[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 494-502.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

提升到 9 455 km，航程大于 2 222.4 km。在同类飞机中，具有宽敞的机舱空间，为乘客带来了更舒适的体验[7]。根据 Industry ARC 公司预测，2020~2025 年，碳纤维增强金属基复合材料年增长率会达到 10.5% 左右，预计整体的市场规模将近 280 亿美元。2019 年，碳纤维铝基复合材料已然占据了金属基复合材料总量的 35%，特别是在汽车和航空航天领域，对轻质材料需求的极速增加，极大地促进了碳纤维增强金属基复合材料市场的发展和壮大[8]。

虽然碳纤维铝基复合材料具有模量高、抗拉强度好且抗疲劳能力强等特性，但在常规的铸造温度下，碳纤维与铝基体之间的润湿性较差。因此，制备复合材料时，通常需要引入一个外场驱动力才可以实现铝液的完全浸渗，这对碳纤维铝基复合材料的制备工艺提出了更高的要求[9]。另一方面，当复合材料制备温度超过 500 ℃时，容易使碳纤维和铝基体之间发生界面反应[10]，导致脆性相 Al_4C_3 的产生；如果界面反应较为严重，生成的脆性相会对界面造成破坏，从而发生脆性断裂，导致碳纤维铝基复合材料的综合性能不满足使用要求[11-12]。为了解决上述问题，研究人员通常采用优化制备工艺和铝基体合金化的方法来改善浸渗过程，并抑制界面反应，以提升碳纤维铝基复合材料的综合性能[13-14]。

本文综述了当前国内外碳纤维铝基复合材料的研究现状，重点关注其制备工艺及用于改善界面的合金化方法。通过深入分析制备工艺与合金化在碳纤维铝基复合材料制备过程中的应用及其特点，探讨了碳纤维铝基复合材料的发展趋势，以寻求碳纤维铝基复合材料制备技术的新突破，并希望为该领域的研究者和应用者提供参考和借鉴。

1　碳纤维铝基复合材料的制备方法

为了实现铝液对碳纤维良好的浸渗和填充，研究人员不断优化复合材料制备工艺。不同的制备方法所得到的碳纤维铝基复合材料的性能也不尽相同，碳纤维在铝基体中的分布状态、铝液浸渗情况、两相界面结合状态都会存在一定的差异[15-16]。目前，碳纤维铝基复合材料的制备方法主要分为液态成形工艺和固态成形工艺 2 种。

1.1　液态成形工艺

1.1.1　搅拌铸造法

利用搅拌铸造法制备碳纤维铝基复合材料时，通过机械搅拌的方式将碳纤维晶须均匀分散在液态铝及其合金中，然后浇铸到模具中得到所需的坯料和零件，如图 1a 所示。这种方法可以分为全液态搅拌铸造、半固态搅拌铸造和搅熔铸造。孙小岚[17]以铝合金(1.5%Mg 和 0.15%Ti，质量分数)为基体材料，采用搅拌铸造工艺制备不同短碳纤维体积分数的铝基复合材料，当搅拌速度为 1 000 r/min，搅拌时间 4~6 min，模具预热温度为 500 ℃，浇注温度为 740 ℃，且碳纤维体积分数和长度分别为 6% 和 2 mm 时，所得到的碳纤维铝基复合材料中碳纤维可以均匀地分散到铝基体中，且能够与铝基体之间形成良好的界面结合，如图 1b 所示。通过线性回归分析，分别得到 5×10^6 循环周次下基体合金与复合材料的疲劳强度，复合材料的疲劳极限比基体合金提高了 28.8%，如

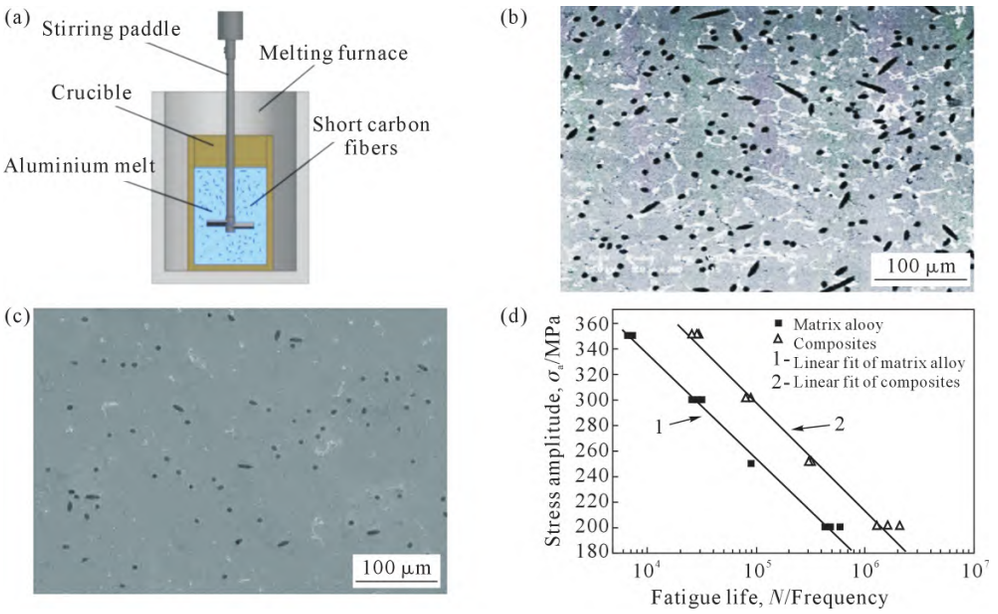

图 1　搅拌铸造法：(a) 原理示意图；(b) C_f/Al 复合材料的显微组织；(c) C_f/Al 金相组织；(d) 不同应力水平下基体合金与复合材料 *S-N* 曲线[17-18]

Fig.1 Mixing and casting methods: (a) schematic diagram of the principle; (b) microstructure of C_f/Al composites; (c) metallographic structure of C_f/Al; (d) *S-N* curves of matrix alloys and composites at different stress levels[17-18]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 1d 所示。本团队[18]以铝硅合金为基体材料，同样采用搅拌铸造法制备出了短碳纤维铝基复合材料(图 1c)，并在原有制备工艺基础上分析了搅拌过程中流场对纤维分散性的影响。但当碳纤维体积分数大于 5%时，由于铝液黏度增加和加料时间的延长，导致碳纤维分散性下降。所以，搅拌铸造法的优点是工艺和设备相对简单，生产成本低，生产效率高，可以对生产好的坯料进行二次加工，得到形状结构复杂的零件和型材。但仍存在高体积分数碳纤维难以均匀分散，容易产生团聚现象，且机械搅拌时间较长，温度较高，出现不良界面反应难以控制等问题。

1.1.2 挤压铸造法

挤压铸造法是碳纤维铝基复合材料制备中应用比较广泛的一种工艺，其工艺原理如图 2a 所示[19]。通过外部机械压力使液态铝基金属渗入到完全预热的碳纤维预制件中，并保持一定压力，直至液态金属完全凝固。挤压铸造法的主要优点是可以保证较低的制造成本，适用于大批量生产制备碳纤维铝基复合材料。在较高压力作用下，可以保证碳纤维与铝基金属之间有较好的润湿性，减少界面反应的强烈程度，压力可以破坏枝晶的生长，使得碳纤维铝基复合材料中缺陷减少，组织更加紧密均匀。但在挤压过程中，压力不宜太高，否则容易对碳纤维造成一定损伤。邝晓斌[20]以 Al-Cu 合金为基体，利用挤压铸造工艺在铸造压力为 100 MPa，保温时间为 2 min 的条件下制备了碳纤维铝基复合材料(图 2b)。铝液对碳纤维束间浸渗完全，且碳纤维分布均匀，未出现团聚现象。当碳纤维的体积分数为 50%时，制备的碳纤维铝基复合材料的抗拉强度和弹性模量分别为 512 N/mm^2 和 163 GPa，明显优于 Al-Cu 基体合金。Hajjari 等[21]同样通过挤压铸造工艺制备出了浸渗良好的碳纤维铝基复合材料，通过调节得出最优的浸渗压力为 30 MPa。

1.1.3 真空压力浸渗法

真空压力浸渗工艺首先将碳纤维增强体制备成预制体并固定在承压铸型中，随后放到真空压力炉中抽真空，待真空度达到要求后对铝基体加热，当加热到预先设定温度时，通入惰性气体，通过外部机械和气体压力，使得金属液强制压入碳纤维中，在凝固后得到碳纤维铝基复合材料。真空压力浸渗工艺原理如图 3a 所示[22]。由于该工艺在真空条件下进行，所以制得的复合材料可有效防止铝基金属和增强体长时间的氧化反应，使获得的复合材料组织更加均匀，降低了铸造缺陷。林磊[23]以铝硅合金为基体，利用真空压力浸渗技术成功制备出碳纤维铝基复合材料。在复合材料制备过程中发现，当长碳纤维预制体的预热温度较低时，不利于铝液的完全浸渗，易导致复合材料的致密度较低。而预热温度过高时，会使界面处反应产物增多。同时还发现，增大浸渗压力有利于浸渗过程的进行，从而提高材料致密度，减少复合材料中的空洞。当碳纤维预制体预热温度为 600 ℃，浸渗温度为 780 ℃，浸渗压力为 1.5 MPa，并在浸渗完成后通过水冷进行快速冷却，所制备出的碳纤维铝基复合材料性能最优。武高辉等[24]攻克了多项关键技术，摸索出了一套适合于碳纤维铝基复合材料体系的压力浸渗专利技术。通过该成型方法可制备出具有大尺寸、薄壁、形状复杂、高强度、高刚度等优异特性的结构件。如图 3b 所示，在该工艺条件下，碳纤维在铝基体中分布均匀，纤维和基体结合良好，复合材料无孔隙等缺陷，该种组织可使纤维均匀承载，同时基体会将载荷有效地传递给纤维，从而得到高性能的复合材料。图 3c 所示为利用真空压力浸渗法制备的尺寸为 800 mm×400 mm×300 mm 的样件。通过对样件检测发现，复合材料组织致密，纤维分布均匀，具备优异的力学性能，弯曲强度达到 1 400 MPa 以上。材料的比强度和比模量分别为 667 (MPa·cm^3)/g 和 110 (GPa·cm^3)/g。材料的纵向热膨胀系数为(0~2)×10^{-6}/℃，横向热膨胀系数为(17~20)×10^{-6}/℃。

1.1.4 超声波振动法

超声波振动辅助浸渗工艺常被用于连续碳纤维

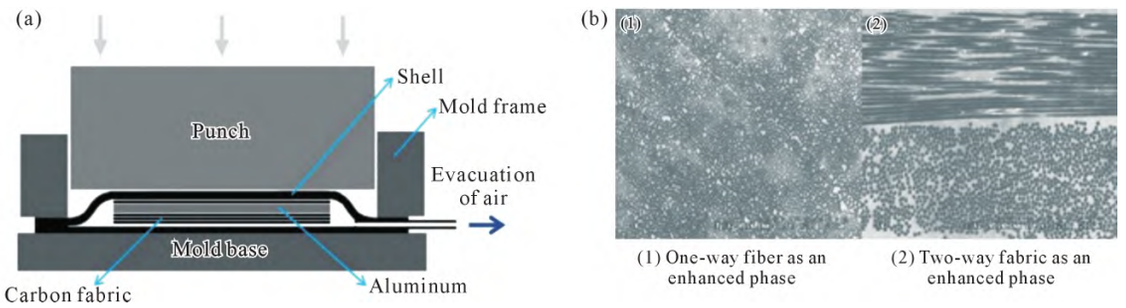

图 2 挤压铸造法：(a) 原理示意图；(b) C_f/Al 复合材料微观形貌[19-20]

Fig.2 Extrusion casting method: (a) schematic diagram of the principle; (b) micromorphology of the C_f/Al composite materials[19-20]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

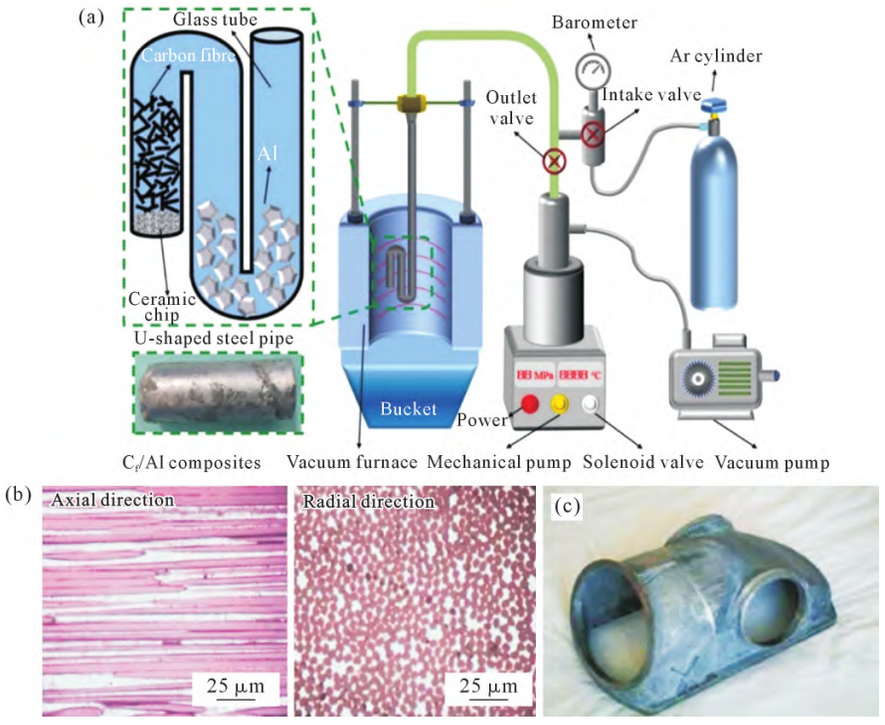

图 3 真空压力浸渗法：(a) 原理示意图；(b) C_f/Al 复合材料金相组织；(c) 采用碳纤维铝基复合材料制备的样件[22,24]

Fig.3 Vacuum pressure immersion method: (a) schematic diagram of the principle; (b) metallographic structure of the C_f/Al composite material; (c) simulation sample prepared with carbon fiber aluminium matrix composites[22,24]

或层状碳纤维铝基复合材料的制备，其工艺原理如图 4a 所示。当合金基体熔化后，将碳纤维预制体放入合金液中，将超声杆伸入金属液表面，并与预制体保持一定距离，在一定频率下施加特定时间的超声振动，最后冷却获得所需的碳纤维铝基复合材料[25]。此方法可以有效改善碳纤维和铝基体之间界面反应严重及润湿性差的问题[26]。

陈兴旺等[27]利用自制预制体通过超声波振动法成功制备了层状连续碳纤维铝基复合材料，结果表明，在复合材料制备过程中加入超声振动，可在铝液局部产生高压高速的液流，从而使得碳纤维束得到分散，加速了铝液浸渗，同时还可以缩短浸渗时间，减弱碳纤维与铝液间的界面反应，如图 4b 所示。通过调节碳纤维预制体的预紧应力为 4 N 时，使碳纤维实现了均匀分布，其抗拉强度可达 243.6 MPa。此外，本团队[28]还分析了超声工艺参数对碳纤维在铝熔体中分散性的影响，当振幅在 37~39 μm 时，碳纤维能够在合金基体中均匀地分布，且无团聚现象，此时复合材料的抗拉强度达到了 196 MPa。

1.2 固态成形工艺

1.2.1 热压扩散法

热压扩散法是一种制备碳纤维铝基复合材料的常用方法，该方法利用高温和压力使碳纤维和铝基体之间发生原子级别地结合，形成牢固的界面连接。热压扩散法制备碳纤维铝基复合材料的一般步骤是将预处理后的碳纤维按照一定的铺层方式进行排列，最后将混合好的碳纤维和铝基体放入热压成型机中，在高温和高压的作用下进行热压成型。这个过程需要控制温度、压力和时间等参数，以确保碳纤维和铝基体之间的充分扩散和结合。帅甜田[29]采用热压扩散法成功制备了层压编织 C_f/Al 复合材料，制备的复合材料复合效果良好，致密度较高，界面结合较好，没有孔隙、裂纹等缺陷。在热压温度 626 ℃、保温时间 50 min、压力 20 MPa 工艺条件下，制备出的层

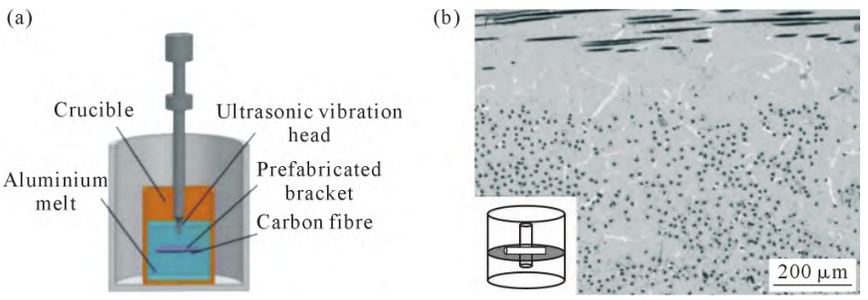

图 4 超声波振动法：(a) 原理示意图；(b) C_f/Al 复合材料微观形貌[25,27]

Fig.4 Ultrasonic vibration method: (a) schematic diagram of the principle; (b) micromorphology of C_f/Al composite materials[25,27]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压编织 C_f/Al 复合材料的致密度达到 99.05%，Al_4C_3 近似含量为 3.6%，铝与碳纤维排列均匀平直，碳纤维与铝基体复合较好。李洪军[30]系统研究了真空热压扩散法制备过程中热压工艺参数对复合材料微观组织和力学性能的影响规律。结果表明，当碳纤维布体积分数为 16.39%，在 600 ℃、70 min、15 MPa 工艺参数下制备出的复合材料结构完整，致密度达到 98.96%，且碳纤维与铝合金基体之间仅发生了微弱的界面反应，复合材料试样拉伸性能也可达到 123.92 MPa。

1.2.2 热等静压法

热等静压法结合了等静压技术和高温处理的优势，在材料制备过程中能够实现更均匀的压力分布和更少的缺陷。热等静压法制备碳纤维铝基复合材料的前期步骤与热压扩散法类似，同样是将碳纤维按照所需的体积分数和方向性排列在模具中，然后在模具中填充铝或铝合金粉末，确保碳纤维被铝粉完全浸润。最后将装填好的模具放入热等静压机的加热腔室内，在高温和高压的环境下，进行等静压处理。在这个过程中，高温促进了铝基体的流动和碳纤维与铝基体之间的界面反应，而高压则确保了材料在成型过程中的均匀性和致密性。Barriocanal 等[31]利用 2A12 铝合金粉末作为基体，采用热等静压工艺制备了连续碳纤维铝基复合材料。结果发现，基体粉末的形貌、粒度等参数对复合材料的致密度和力学性能都有较大影响。利用粒度分布在 150~180 μm 的球型粉末制备的出的复合材料具有较高的致密度，碳纤维与铝基体界面连接紧密无孔洞缺陷；与基体铝合金材料相比，复合材料的拉伸强度和断后伸长率分别提高 5%和 54%。孔德赐[32]以 ZL301 合金为基体，M40J 碳纤维为增强体，纤维预制体选用叠层穿刺结构，采用热等静压工艺制备了叠层穿刺 C_f/Al 复合材料。在铝合金 + 不锈钢双包套、130 MPa 保压压力条件下，复合材料致密度达到最高值 96.03%，相比于铸态提高了 2.05%；而在铝合金包套方式、130 MPa 保压压力条件下的致密度平均值达到了 97.38%，相比于铸态下的94.10%提高了 3.49%。表 1 为上述各种制备工艺总结。

综上所述，如何降低复合材料的制造成本，利用简单、高效的手段实现组织和性能的稳定，还需对目前制备工艺进行不断开发、改进和优化。

2 碳纤维铝基复合材料的基体合金化

基体合金化对碳纤维铝基复合材料的影响主要体现在材料的性能和应用方面。合金元素在铝基体中的分布对复合材料的性能有着严重影响。不同的合金元素，对碳纤维铝基复合材料的组织和抗拉强度影响不同。合金元素在碳纤维周围富集，能够阻碍脆性化合物的形成，还能显著提高复合材料的抗拉强度。所以，通过合理选择和调配合金元素，可以优化复合材料的性能，拓宽其应用领域。

2.1 Mg 元素

铝合金中添加适量的 Mg 元素，主要是为了起到固溶增强的目的，并且铝合金基体的强度会随着 Mg 元素加入量的增多而提高，但塑性会下降。而在碳纤维铝基复合材料中加入 Mg 元素后，不仅可以起到强化基体的作用，还可以有效抑制碳纤维与铝基体的界面反应，减少中间相 Al_4C_3 产生，从而进一步提高复合材料的强度。王旭[33]采用压力浸渗法制备了碳纤维体积分数为 60%的碳纤维铝基复合材

表 1 各种制备工艺对比
Tab.1 Comparison of various preparation processes

Preparation process	Advantage	Disadvantage
Mixing and casting method	Simple process and equipment; low production cost; high production efficiency; allowable secondary processing	Producing agglomeration phenomenon; long mechanical stirring time; high temperature; difficult to control the interface reaction
Extrusion casting method	Better wettability; reducing the intensity of the interface reaction	Excessive pressure; causing certain damage to carbon fiber
Vacuum pressure immersion method	Obtaining more uniform and dense structure of composite material with the uniform distribution of fiber; less casting defects; excellent mechanical properties	High production cost
Ultrasonic vibration method	Reducing the interfacial reaction between carbon fiber and aluminum matrix and improving the wettability	The volume of the prepared material should not be too large
Hot pressing diffusion method	Preparing composite materials with complete structure and high density	Under the condition of high temperature and pressure; large energy consumption of the equipment; high production cost
Hot isostatic pressing method	Carbon fiber distributed uniformly in the aluminum matrix; obtaining parts with high density	Producing thermal stress; resulting in cracks in the material

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料，并研究了不同含量的 Mg 元素对复合材料界面强度和力学性能的影响化规律。结果表明，当 Mg 元素的加入量达到 8.5%(质量分数，下同)以上时，可以有效抑制碳纤维和铝基体界面处 Al_4C_3 产生；当加入量达到 13%以上时，碳纤维与铝基体间的浸润性提升最明显。在力学性能测试中，Mg 的加入量由 0 增加至 17%时，复合材料的弯曲强度得到大幅提升，由 425 MPa 上升至 1 500 MPa。Wang 等[34]在制备碳纤维铝基复合材料时，分别在合金基体中加入了质量分数为 3.2%、4.5%、8.5%的 Mg 元素进行对比研究。结果表明，Mg 的加入改善了合金基体的浸润性和碳纤维的分散性，在复合材料中未发现明显气孔等缺陷。如图 5 所示，随着 Mg 元素加入量递增到 8.5%时，碳纤维铝基复合材料的界面反应程度降低，大量棒状的 Al_4C_3 中间相逐渐减小和减少，并直至消失。

2.2 Si 元素

Si 是一种常见的合金元素，在基体中加入 Si 元素可以提高熔融铝的流动性，有利于熔融铝更加流畅的浸渗到碳纤维束间隙中。除此之外，Si 元素的加入还可以抑制碳纤维中的 C 向基体中扩散，从而有效降低合金基体中 C 元素的溶解度，减小碳纤维和合金基体的接触范围。刘钧[35]采用挤压铸造法制备了碳纤维铝基复合材料，并结合理论计算的方法研究了 Si 元素对复合材料界面反应和润湿性的影响。结果如图 6 所示，随着复合材料中 Si 元素的增加，界面产物 Al_4C_3 的反应驱动力下降，形核阻力增大，而 SiC 的反应驱动力逐渐增大，形核阻力减小，这使界面产物从 Al_4C_3 向 SiC 转变。与未添加 Si 元素的复合材料相比，当 Si 含量为 20%时，Al_4C_3 相的含量由 17%降到了 10%，并生成了 10%的 SiC。除此之外，还发现在加入 Si 元素之后，复合材料的结合强度提高了约 32.1%，在 1 023～1 423 K 温度区间内，界面处发生反应润湿的润湿角减小到 60°~70°，如图 7 所示。Pelleg 等[36]在制备碳纤维铝基复合材料时，在其中 1 组合金基体中加入了 0.1%Si(原子分数)作为对照组，分析了 Si 元素对碳纤维铝基复合材料界面反应的影响，同样得出 Si 元素的加入可以有效抑制铝基体和碳纤维之间的界面反应的结论。

2.3 Ti 元素

在铝基体中加入 Ti 元素后，Ti 会偏聚在碳纤维和铝合金基体界面，从而达到提高碳纤维和铝合金基体相容性的目的。由于 TiC 的吉布斯自由能低于 Al_4C_3，Ti 元素就会优先与碳纤维反应生成 TiC，并且在部分条件下还会生成 Ti_2AlC，生成的反应物会像涂层一样将碳纤维表面包裹住，从而有效抑制了界面反应程度，减少了中间相 Al_4C_3 的生成，并改善碳纤维与铝基体间的浸润性[37]。Sobczak 等[37]通过研究发现，利用挤压铸造工艺制备碳纤维铝基复合材料时，在复合材料中加入 Ti 元素后，在界面位置生

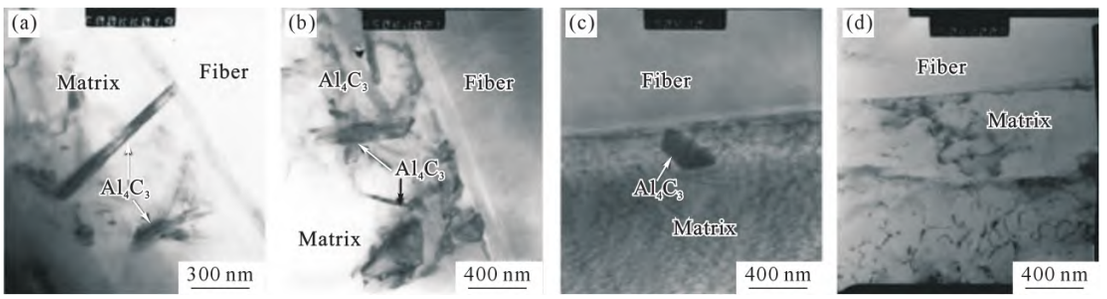

图 5 不同 Mg 含量的碳纤维铝基复合材料界面的 TEM 分析：(a) 0%; (b) 3.2%; (c) 4.5%; (d) 8.5%[34]

Fig.5 TEM analysis of the interface of carbon fiber aluminium matrix composites with different Mg contents: (a) 0 wt. %; (b) 3.2 wt. %; (c) 4.5 wt. %; (d) 8.5 wt. %[34]

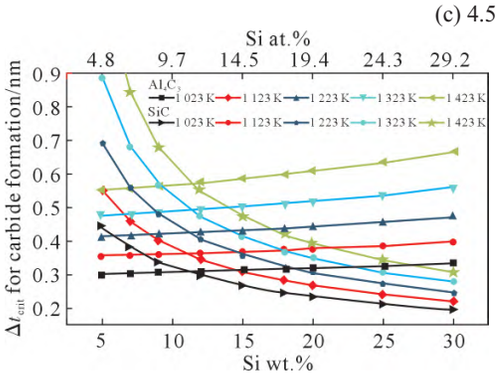

图 6 界面反应生产 Al_4C_3 和 SiC 的临界形核尺寸对比[35]

Fig.6 Comparison of the critical core sizes of Al_4C_3 and SiC produced by the interfacial reaction[35]

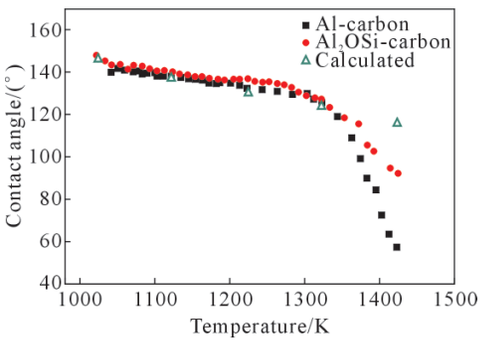

图 7 C_f/Al 与 C_f/Al20Si 润湿角随温度的变化关系[35]

Fig.7 Relationships between the C_f/Al and C_f/Al20Si wetting angles and temperature[35]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成许多细小的 TiC 颗粒，不仅改善了铝液对碳纤维的浸润能力，还有效抑制和减缓了界面碳化物 Al_4C_3 生成，只有在高倍放大图像中偶尔可以发现少量的针状相，如图 8 所示。但研究结果也显示，在复合材料的界面处会出现 TiC 和 Al_4C_3 双相共存的状态，两相比例的变化主要受挤压工艺参数的影响。崔曼[38]在利用超声振动法制备长碳纤维铝基复合材料时也发现，在铝基体中加入 1.0%Ti(质量分数)元素后，界面处 Al_4C_3 相含量明显减少，有利于在碳纤维和铝基体之间建立良好的界面结合状态，这使得复合材料弯曲强度提高了 63%，高达 280 MPa。

从当前基体合金化的研究现状来看，利用基体合金化工艺可以大幅提升碳纤维和铝基体的润湿性，还可有效抑制脆性相 Al_4C_3 地生成。在合金基体中添加 Mg 元素，主要是为了起到固溶增强的目的，并且铝合金基体的强度会随着 Mg 元素加入量的增多而提高，但塑性会下降。Si 元素的加入能够提高熔融金属的流动性，利于合金熔体顺利渗入到碳纤维间隙，但是 Si 元素的含量过大会严重影响复合材料的力学性能。因此，合金元素对碳纤维铝基复合材料的影响机制需要更加深入地研究，针对所需要复合材料的增强相、基体合金及结构特点，设计出更加优异的合金化元素，保证复合材料良好的界面结合、组织致密性和力学性。

3 总结与展望

碳纤维铝基复合材料的研究现状表明，碳纤维铝基复合材料的制备在现阶段虽然取得了一定进展，特别是在实验室中已基本掌握了碳纤维的分散工艺、组织调控机理和性能优化工艺，但整体制备工艺的复杂性和成本仍是制约其大规模应用的因素之一。

碳纤维铝基复合材料的合金化也面临着一些瓶颈。首先，碳纤维与铝基体之间的界面相容性问题是一个关键挑战。由于碳纤维与铝基体之间的物理和化学性质差异较大，往往难以形成良好的界面结合，这会影响复合材料的力学性能和稳定性。其次，合金元素的加入可能会改变铝基体的微观结构和性能，从而影响碳纤维与铝基体之间的界面性能和复合材料的整体性能。

碳纤维铝基复合材料未来的发展方向应简化制备工艺，通过优化合金元素的种类和含量，改善碳纤维与铝基体之间的界面相容性。并结合新的制备技术，提高复合材料的制备效率和性能。同时，也应探索如何降低生产成本，提高碳纤维铝基复合材料的竞争力和市场占有率，以促进碳纤维铝基复合材料的商业化应用。随着科技不断进步和研究的深入，相信这些问题将逐渐得到解决，碳纤维铝基复合材料将在更多领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] 孟龙. 纤维增强铝基复合材料的研究现状[J]. 科技信息，2009(18): 441-442.
MENG L. Research status of fiber-reinforced aluminum matrix composites[J]. Science & Technology Information, 2009(18): 441-

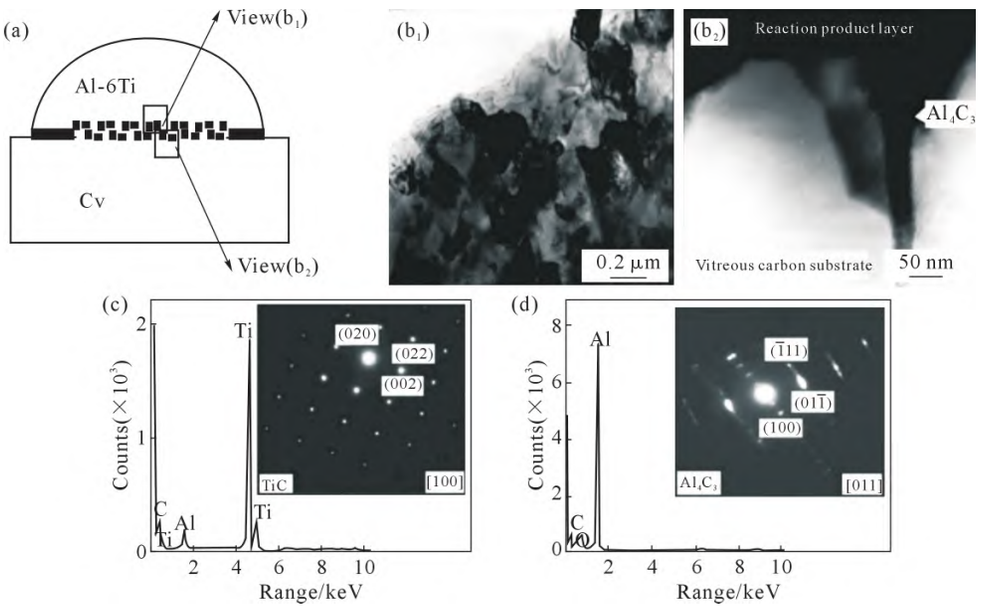

图 8 Al-6Ti/Cv 的 TEM 图：(a) 界面结合位置；(b_1, b_2) 界面结合位置高倍放大图像；(c) TiC 的 EDS 光谱和 SADPs；(d) Al_4C_3 的 EDS 光谱和 SADPs[37]

Fig.8 TEM images of Al-6Ti/Cv: (a) interface binding position; (b_1, b_2) high magnification image of the interface binding position; (c) EDS spectrum and SADPs of TiC; (d) EDS spectrum and SADPs of Al_4C_3[37]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

442.

[2] SHIRVANIMOGHADDAM K, HAMIM S U, AKBARI M K, FAKHRHOSEINI S M, KHAYYAM H, PAKSERESHT A H, GHASALI E, ZABET M, MUNIR K S, JIA S, PAULO DAVIM J, NAEBE M. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92: 70-96.

[3] 曹永友，李青青，王强. 碳纤维增强复合材料在汽车上应用的新进展[J]. 汽车工艺与材料，2008(10): 54-57.
CAO Y Y, LI Q Q, WANG Q. Latest development of application of carbon fiber reinforced composite material in automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2008(10): 54-57.

[4] 孙延. 碳纤维增强复合材料在新能源汽车上的应用形式及进展[J]. 粘接，2019, 40(9): 71-73.
SUN Y. Application forms and progress of carbon fiber reinforced composites in new energy vehicles[J]. Adhesion, 2019, 40(9): 71-73.

[5] 周翔. 非晶颗粒增强铝基复合材料组织与性能的研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2020.
ZHOU X. Study on microstructure and mechanical properties of amorphous particles reinforced aluminum matrix composites[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.

[6] 费良军，朱秀荣，童文俊，王荣，徐永东，齐丕骧. 纤维增强铝基复合材料及其应用[J]. 特种铸造及有色合金，2001(S1): 150-152.
FEI L J, ZHU X R, TONG W J, WANG R, XU Y D, QI P X. Fiber reinforced aluminum matrix composite and application[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001(S1): 150-152.

[7] 王岩，王祝堂. 铝基复合材料在飞机中的应用[J]. 轻合金加工技术，2019, 47(12): 1-4.
WANG Y, WANG Z T. Application of aluminum matrix composites in aircraft[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(12): 1-4.

[8] 刘晨曦，于惠舒，张楠楠，张一凡，张岩. 碳纤维增强铝基复合材料的研究现状[J]. 钢铁研究学报，2021, 33(12): 1205-1218.
LIU C X, YU H S, ZHANG N N, ZHANG Y F, ZHANG Y. Research status of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(12): 1205-1218.

[9] 李廷举，刘嘉鸣，杨茜，张宇博. 碳纤维增强铝基复合材料制备及强化机制研究进展[J]. 特种铸造及有色合金，2020, 40(11): 1177-1181.
LI T J, LIU J M, YANG X, ZHANG Y B. Research progress in fabrication and interfacial enhancement of carbon fiber reinforced Al-matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1177-1181.

[10] DENG C F, WANG D Z, ZHANG X X, LI A B. Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 444(1-2): 138-145.

[11] LI D G, CHEN G Q, JIANG L T, XIU Z Y, ZHANG Y H, WU G H. Effect of thermal cycling on the mechanical properties of C_f/Al composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 586: 330-337.

[12] SIEGERT K, UNSELD P, BAUR J, KAUFFMANN F, ARZT E, NIESSEN K. Thixoforging of continuous fiber-reinforced Al-Si/AlMg alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1227-1232.

[13] LEONHARDT G, KIESELSTEIN E, PODLESAK H, THAN E, HOFMANN A. Interface problems in aluminium matrix composites reinforced with coated carbon fibres[J]. Materials Science and Engineering: A, 1991, 135: 157-160.

[14] MATSUNAGA T, MATSUDA K, HATAYAMA T, SHINOZAKI K, YOSHIDA M. Fabrication of continuous carbon fiber-reinforced aluminum-magnesium alloy composite wires using ultrasonic infiltration method[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(8): 1902-1911.

[15] ALHASHMY H A, NGANBE M. Laminate squeeze casting of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2015, 67: 154-158.

[16] 李大光. 碳纤维增强铝基复合材料的微观组织结构与高温力学性能[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
LI D G. Microstructure and high-temperature mechanical properties of carbon fiberreinforced aluminum matrix composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[17] 孙小岚. 短碳纤维增强铝基复合材料的制备及其性能研究[D]. 沈阳：东北大学，2011.
SUN X L. Study on the preparation and performance of short-carbon-fiber reinforced aluminum alloy matrix composites[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[18] LI G L, QU Y D, YANG Y H, ZHOU Q W, LIU X S, LI R D. Improved multi-orientation dispersion of short carbon fibers in aluminum matrix composites prepared with square crucible by mechanical stirring[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 40: 81-87.

[19] GALYSHEV S, GOMZIN A, MUSIN F. Aluminum matrix composite reinforced by carbon fibers[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 11: 281-285.

[20] 邙晓斌. 碳纤维增强铝基复合材料的制备及力学性能研究[J]. 轻合金加工技术，2015, 43(7): 64-67.
MANG X B. Preparation and mechanical property of long carbon fibre reinforced aluminum matrix composite[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2015, 43(7): 64-67.

[21] HAJJARI E, DIVANDARI M, ARABI H. Effect of applied pressure and nickel coating on microstructural development in continuous carbon fiber-reinforced aluminum composites fabricated by squeeze casting[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(4): 599-603.

[22] LI G L, ZHANG J, WANG Z M, ZHOU S, LIU W J, ZHANG W, ZHANG H K, QU Y D. Effect of Ni coating thickness on microstructure and properties of C_f/Al composites prepared by vacuum pressure infiltration process[J]. Vacuum, 2024, 222: 113101.

[23] 林磊. 连续碳纤维增强铝基复合材料的制备及性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2015.
LIN L. Preparation and performance study of continuous carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[24] 武高辉，张云鹤，修子扬，姜龙涛. 碳纤维增强铝基复合材料及其成型技术研究进展[A]：大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集[C]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学金属复合材料与工程研究所，2007. 5.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

WU G H, ZHANG Y H, XIU Z Y, JIANG L T. Research progress of carbon fiber reinforced aluminum composites and their forming technology [A]. Proceedingsof the high-level forum on key technologies of large aircraft and the 2007 annual conference of the Chinese society of aeronautics[C]. Harbin: Institute of Metal Composite Materials and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2007. 5.

[25] 李广龙. 连续/非连续碳纤维增强铝基复合材料的制备及组织性能[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2020.
LI G L. Preparation, microstructure and properties of continuous/short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[26] MATSUNAGA T, MATSUDA K, HATAYAMA T, SHINOZAKI K, YOSHIDA M Fabrication of continuous carbon fibre-reinforced aluminum-magnesium alloy composite wires using ultrasonic infiltration method[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(8): 1902-1911.

[27] 陈兴旺. 超声波振动法制备层状碳纤维增强铝基复合材料[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2018.
CHEN X W. Preparation of layered carbon fiber reinforced aluminum matrix composites by ultrasonic vibration [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.

[28] LI G L, QU Y D, ZHOU Q W, WANG Y, ZHOU S, LI R D. The effect of carbon fibers distribution on fracture behavior of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites prepared by ultrasonic vibration[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9) : 095606.

[29] 帅甜田. 真空热压扩散法制备层压编织 C_f/Al 复合材料工艺及组织研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2015.
SHUAI T T. Fabrication process and microstructure of laminated woven fiber reinforced Al matrix composite manufactured by hot pressing diffusion bonding[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.

[30] 李洪军. 真空热压扩散法制备碳纤维布增强 Al 基复合材料组织及性能研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2015.
LI H J. Study on the microstructure and properties of carbon fiber cloth reinforced Al matrix composites prepared by vacuum hot pressing diffusion method [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.

[31] GARCÍA BARRIOCANAL J, PÉREZ P, GARCÉS G, ADEVA P. Microstructure and mechanical properties of Ni_3Al base alloy reinforced with Cr particles produced by powder metallurgy [J]. Intermetallics, 2005, 14(4): 456-463.

[32] 孔德赐. 叠层穿刺 C_f/ZL301 复合材料的热等静压工艺及其致密化机理研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2022.
KONG D C. Hot isostatic pressing process and densification mechanism of C_f/ZL301 composite with laminated puncture [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.

[33] 王旭. 合金元素对 C_f/Al 复合材料微观组织及性能影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
WANG X. Effect of alloy elements on the microstructure and properties of C_f/Al composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[34] WANG X, JIANG D M, WU G H, LI B, LI P Z. Effect of Mg content on the mechanical properties and microstructure of G_{rf}/Al composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 497 (1-2): 31-36.

[35] 刘钧. Cf/Al-Si 复合材料界面反应与润湿性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
LIU J. Study on the interfacial reaction and wettability of C_f/Al-Si composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[36] PELLEG J, ASHKENAZI D, GANOR M. The influence of a third element on the interface reactions in metal-matrix composites (MMC): Al-graphite system [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 281(1-2): 239-247.

[37] SOBCZAK N, SOBCZAK J, SEAL S, MORGIEL J. TEM examination of the effect of titanium on the Al/C interface structure [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81(2-3): 319-322.

[38] 崔曼. 碳纤维处理及 Ti 元素对碳纤维增强铝基复合材料的影响[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
CUI M. Effects of carbon fiber treatment and Ti elements on carbon fiber reinforced aluminum matrix composites [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net