

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.6062

铝基复合材料设计制备及其耐热性能研究进展

鲁江, 朱娟, 曾乐涵, 张治国, 刘洋振, 郭柏松
(暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632)

摘要: 铝基复合材料(aluminium matrix composites, AMCs)具备轻质、高比强度特点,是轻量化工业构件的主要候选材料。随着服役性能提升与燃油经济性要求不断提高,在 300~500 °C 温度区间服役的构件对 AMCs 的高温性能与热稳定性提出了更为严苛的要求。本文系统回顾了 AMCs 的制备方法及相关研究,结合若干先进耐热 AMCs 的最新研究成果,综述了对应高温性能的设计准则与构型的设计策略,并梳理了存在的问题及发展趋势。最后,对高性能 AMCs 关键开发技术与未来发展方向进行了总结与展望。

关键词: 铝基复合材料; 制备工艺; 高温性能; 热稳定性

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)05-0476-13

Research Progress on the Design, Preparation and Heat Resistance of Aluminium Matrix Composites

LU Jiang, ZHU Juan, ZENG Lehan, ZHANG Zhiguo, LIU Yangzhen, GUO Baisong
(Institute of Advanced Wear and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Aluminium matrix composites (AMCs) are important industrial component materials because of their light weight and high specific strength. With the increasing demand for higher service performance and improved fuel economy, components serving in the temperature range of 300~500 °C impose more stringent requirements on the high-temperature performance and thermal stability of AMCs. This review first summarizes the current fabrication methods and related research on AMCs. Afterward, on the basis of the recent new findings of advanced heat-resistant AMCs, the design principles and architectural strategies for achieving superior high-temperature performance are reviewed, and the key challenges and future trends are summarized. Finally, critical processing technologies and future development directions for high-performance AMCs are summarized and discussed.

Key words: aluminium matrix composites; fabrication processes; high-temperature properties; thermal stability

随着我国航空航天、高铁、汽车、电子通信领域的快速发展,对轻质高性能金属材料的需求不断增加。在轻量化金属材料体系中,铝基复合材料(aluminium matrix composites, AMCs) 因具有优异的综合性能而备受青睐。AMCs 是指以铝或铝合金作为基体,以颗粒^[1-2]、晶须^[3-4]及纤维^[5]等材料作为增强体,通过合适的制备工艺将增强材料均匀分布到铝基体中,从而利用增强体的强化作用显著提升材料的性能。由于 AMCs 能够融合铝基体和增强体的性能,往往具有低密度、高比强度、高比模量、优异的耐磨性能、良好的抗疲劳性能、低热膨胀系数和耐高温等

特点^[6]。与通过析出相强化的传统耐热铝合金相比,AMCs 中的陶瓷、碳材料等增强相具有更高的熔点和热稳定性,能够在 300~500 °C 下保持结构稳定,可有效钉扎位错和晶界,从而展现出更优异的高温抗蠕变和抗软化能力。耐热型 AMCs 可有效替代耐热铝合金、钢铁等材料,在轻量化和节能减排方面具有广阔应用前景。

本文综述了当前国内外 AMCs 的制备及其耐热性能研究现状,探讨了 AMCs 的发展趋势,以为该领域的研究人员和工程从业人员提供参考和借鉴。

收稿日期: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52271132); 广东省自然科学基金面上项目(2024A1515010416)

作者简介: 鲁江, 2001 年生, 硕士生。研究方向为轻质高强 AMCs。Email: 1220295510@qq.com

通信作者: 郭柏松, 1989 年生, 研究员, 博士生导师。研究方向为金属基复合材料、粉末冶金。Email: guobaisong@jnu.edu.cn

引用格式: 鲁江, 朱娟, 曾乐涵, 张治国, 刘洋振, 郭柏松. 铝基复合材料设计制备及其耐热性能研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(5): 476-488.

LU J, ZHU J, ZENG L H, ZHANG Z G, LIU Y Z, GUO B S. Research progress on the design, preparation and heat resistance of aluminium matrix composites[J]. Foundry Technology, 2026, 47(5): 476-488.

1 AMCs 的制备方法

在制备 AMCs 时,由于不同的制备方法会对金属基体和增强体之间的界面结合性能产生较大的影响,直接影响复合材料的增强体分布、界面结合状态和最终性能,所以在选择制备方法时要尽可能避免不良界面反应的发生。AMCs 的制备方法主要分为粉末冶金外加法、原位反应合成法、搅拌铸造及增材制造等^[7-8]。

1.1 粉末冶金外加法

粉末冶金外加法主要是将外加增强相和基体粉末混合,并通过压制和烧结等步骤获得致密的块体复合材料,典型的粉末冶金工艺流程如图 1 所示^[9]。粉末冶金外加法在低于基体熔点的温度下进行烧结,可有效抑制界面反应与晶粒粗化,并减少成分偏析,该方法成本低廉、成分调控自由度大、便于规模化生产。粉末烧结方法又分为普通烧结、快速热压烧结、放电等离子体烧结等,经过烧结处理后,可进一步通过挤压、锻造或轧制等工艺来提高材料的致密性和性能^[10]。此外,结构设计也是粉末冶金法的优势之一,上海交通大学张荻院士等率先提出生物拓扑构型化复合材料的概念,通过生物拓扑构型设计,不断突破复合材料的性能边界,创制出一系列具有超常性能的 AMC^s^[11-13],在国家航空航天工程中取得重大应用,同时丰富了 AMC^s 设计新理论与制备新技术。

1.2 原位反应合成法

原位反应合成法的基本原理是不同组元在基体中通过原位化学反应生成增强相并与韧性基体结合,从而利用原位增强相的强化作用提高材料性能。相较于传统的外加法,原位合成法中增强相与基体具有良好的相容性和易实现弥散分布等显著优点。以 Al-B-C 体系为例^[14],其原位合成反应过程中的微观演变如图 2a~d 所示。浸渗后,硼原子和碳原子均匀分散在 Al 颗粒表面(图 2a)。在后续的反应过程中,Al 基体与非晶 B 进一步反应生成 AlB_2 ,同时 C 元素和 B 元素固溶进入 Al 基体(图 2b)。随后, C 元素与 AlB_2 进一步反应生成 Al_3BC ,而 Al 基体

与非晶 B 的反应持续生成 AlB_2 (图 2c)。随着反应时间延长,所有 B 和 C 元素均与 Al 基体完全反应生成 Al_3BC (图 2d)。类似地,Shan 等^[15]以硼酸作为氧源,在球磨和烧结过程中诱导硼酸与 Al 原位反应成功制备了 Al_2O_3 和碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)协同增强 AMC^s,该材料具有 404 MPa 的抗拉强度和 9% 的伸长率,以及优异的强韧匹配性。

1.3 搅拌铸造法

如图 3 所示,搅拌铸造的核心原理是通过机械搅拌、电磁搅拌、超声波搅拌等方式,将增强体混入熔融铝液中使其均匀分散,随后浇铸成型、冷却凝固,得到块体复合材料。该工艺流程简单、成本较低、易于生产大尺寸或复杂构件等优点,但其主要挑战在于解决增强体与铝熔体之间的润湿性问题,并防止颗粒的偏析与团聚。为克服传统搅拌铸造的局限性,研究者发展了多种改进工艺,如真空/电磁搅拌铸造、超声辅助搅拌铸造、半固态搅拌铸造以及半固态搅拌+高能超声处理复合工艺等^[16-19]。这些工艺创新显著改善了增强颗粒的分散均匀性与界面结合质量,为制备高性能 AMC^s 提供了更可靠的技术路径。总体而言,搅拌铸造技术正朝着工艺复合化、控制精细化和效率高效化的方向发展。

1.4 增材制造法

增材制造(additive manufacturing, AM)是依据三维模型数据,通过逐层堆积材料的方式制造工件^[20]。AMCs 的增材制造技术主要包括激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)、电子束熔融成型、粘结剂喷射和定向能量沉积等^[20-21],以 LPBF 为例,图 4 展示了其设备组成及成形工艺^[22]。增材制造的主要优势在于无需模具即可快速成形复杂构件,其快速凝固特性可形成亚微米级晶粒和过饱和固溶体,从而显著细化组织、提升性能。

然而,该技术也面临诸多挑战,如铝合金对激光的高反射率、热裂纹敏感性、设备成本高昂及工艺控制复杂等^[23]。针对这些问题,研究者利用增材制造的空间设计自由度,探索材料-结构-功能一体化设计。He 等^[24]通过 LPBF 技术,制备了仿生拱形结构 AMC^s,实现了超轻密度(0.91 g/cm^3)、高相对屈服强

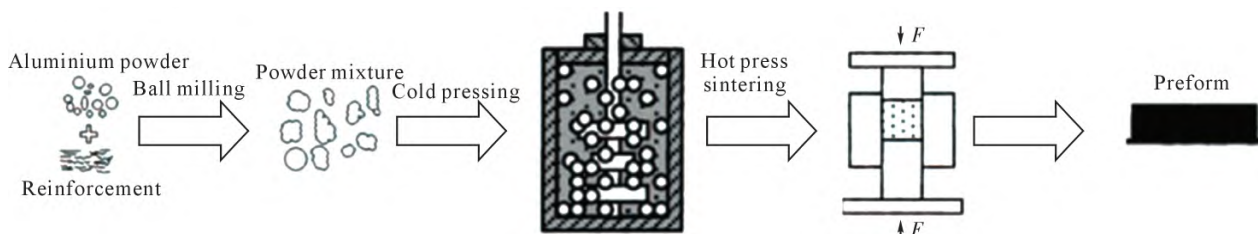


图 1 粉末冶金流程^[9]

Fig.1 Process flow diagram of powder metallurgy^[9]

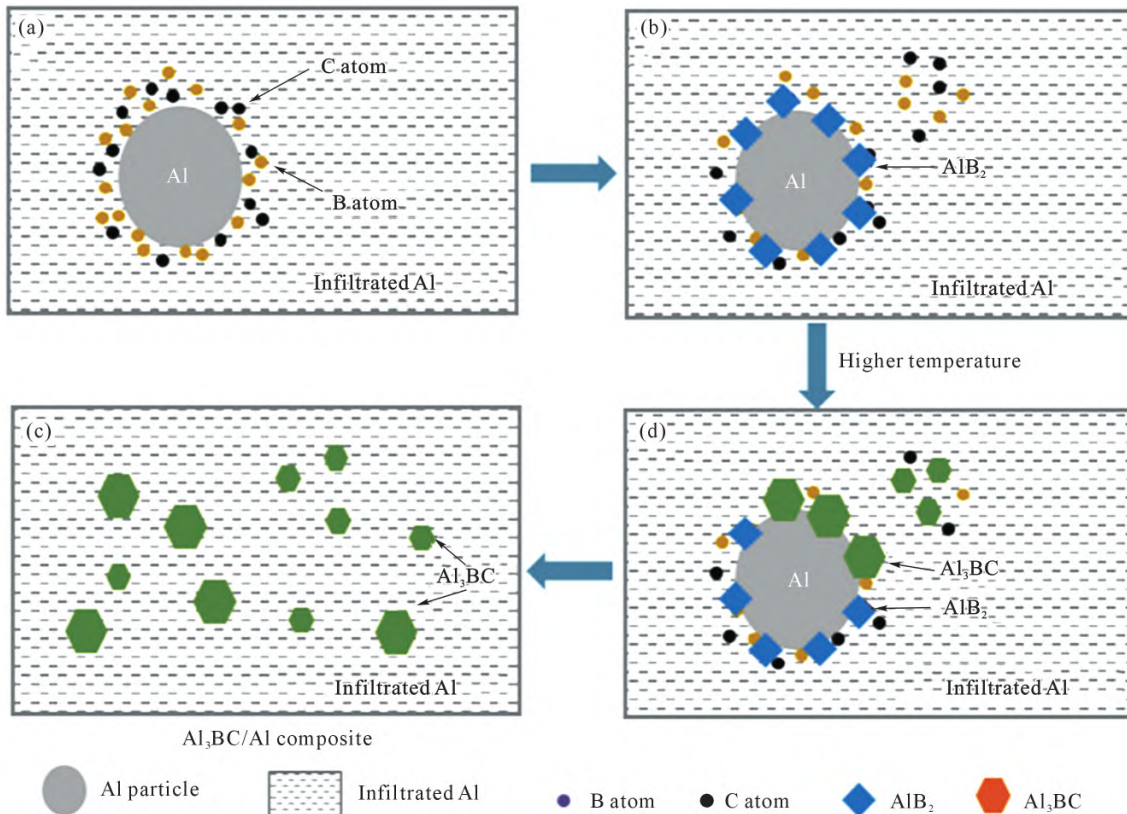


图2 Al-B-C体系原位反应合成法机理示意图:(a) 浸渗后,B与C原子分散于Al颗粒表面;(b) 反应初期,AlB₂生成及C、B元素固溶;(c) 反应中期,Al₃BC生成与AlB₂持续生成;(d) 原位Al₃BC完全形成^[14]
Fig.2 Schematic diagram of the mechanism of the in situ reaction synthesis of the Al-B-C system: (a) after infiltration, B and C are dispersed on the Al particle surfaces; (b) during the initial reaction stage, the formation of AlB₂ and the dissolution of C and B occur; (c) during the intermediate stage, the formation of Al₃BC and the continued generation of AlB₂ occur; (d) the in situ conversion of Al₃BC is complete^[14]

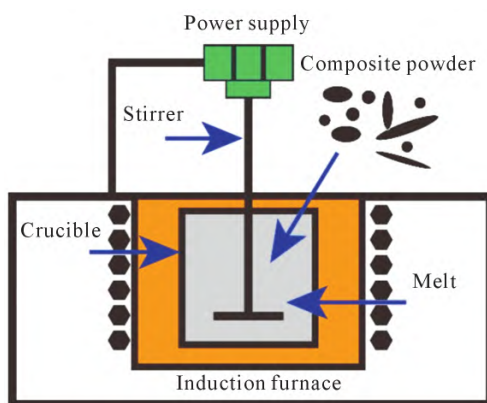


图3 搅拌铸造法示意图
Fig.3 Schematic diagram of the stir casting method

度(17.0%)和极高的比能量吸收(39.1 J/g),为可持续工程应用中抗冲击、轻量化部件的开发提供了新范式。Peng等^[25]在Al-Ce-Mg基体中复合石墨烯纳米片(graphene nanoplatelets, GNPs),利用LPBF的快速凝固特性,构建了α-Al与(Al, Mg)₁₁Ce₃共晶网络交织的独特微观结构。经热处理后,AMCs抗拉强度和伸长率分别达到406 MPa和12.8%,实现了强度-塑性的优异协同。该研究还将AMCs耐腐蚀性能

与传统铸造Al-Ce合金进行对比,热处理后AMCs的腐蚀电流密度为 9.0×10^{-8} A/cm²,比熔铸Al-Ce合金(6.8×10^{-7} A/cm²)更低,使AMCs耐腐蚀性得到显著提升。上述研究表明,增材制造不仅是材料合成技术,更是实现复杂构件形性协同及功能设计的重要技术途径。

2 增强相的类型与研究进展

增强相是AMCs性能的关键决定因素,其选择与设计直接影响了材料在航空航天、先进动力系统等特定工况下的服役可靠性。根据引入方式,增强相可分为外加增强相与原位增强相两类^[26-27]。图5展示了Chen等^[28]制备的AMCs中同时存在的外加碳纳米管与原位生成γ-Al₂O₃纳米颗粒,其中原位颗粒与铝基体形成了洁净、结合良好的半共晶界面。近年来,为满足构件不同部位对性能的差异化需求,研究者将设计策略聚焦于增强体在空间中的按需排布,发展出混杂增强、多尺度增强及构型化设计等方向^[29-30],实现了材料从均匀复合到结构功能一体化的跨越,代表了面向应用的高性能AMCs的重要发展方向。

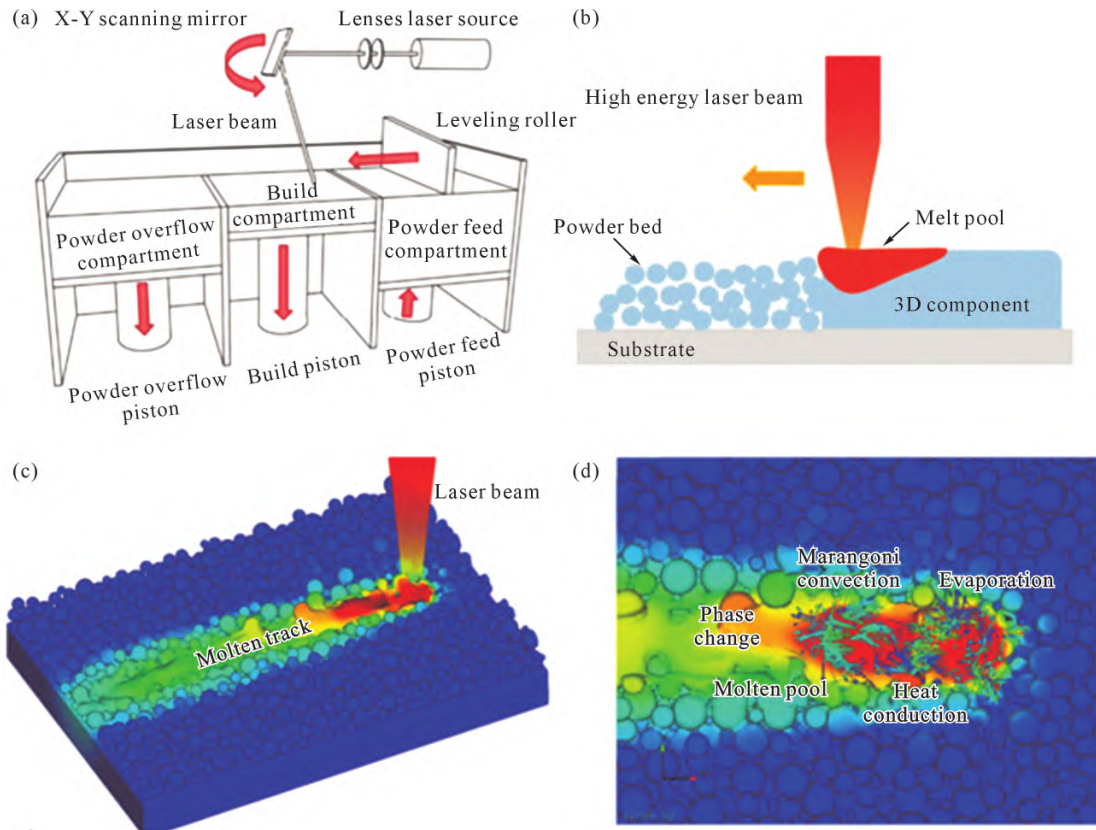


图4 LPBF设备组成及成形工艺:(a) LPBF设备基本原理;(b) LPBF成型过程示意图;(c) LPBF中的焊道形成;(d)粉末熔融中的物理化学现象^[22]

Fig.4 Composition and forming process of LPBF equipment: (a) basic principle of LPBF equipment; (b) schematic diagram of the LPBF formation process; (c) bead formation in LPBF; (d) physicochemical phenomena during powder melting^[22]

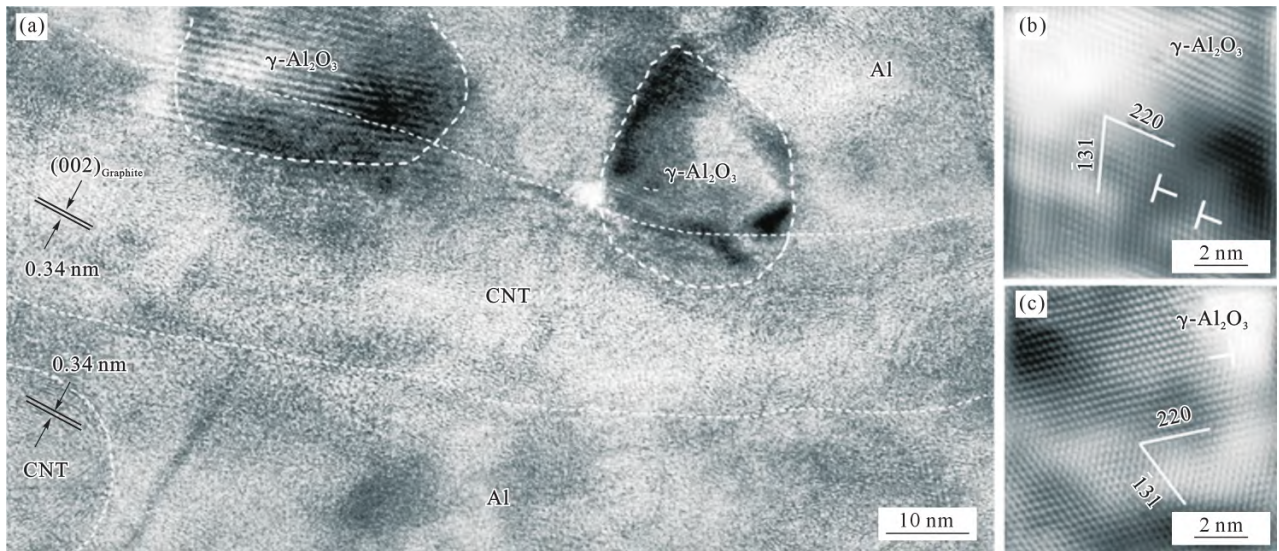


图5 AMCs中显微组织 TEM 图像:(a) 外加增强相及原位增强相在基体中的分布 TEM 图像;(b, c) 快速逆傅里叶变换图像^[28]
Fig.5 TEM images of the microstructure of AMCs: (a) TEM image showing the distribution of ex-situ and in-situ reinforcements in the matrix; (b, c) fast inverse Fourier transform images^[28]

2.1 外加增强相

外加增强相通过物理混合方式引入铝基体,其类型、尺寸、分布及界面状态是决定复合材料性能的关键因素。表1总结了当前外加增强相的主要类别。传统外加增强相主要包括陶瓷颗粒、碳材料及晶须等。近年来,高熵合金作为新兴类别增强相受到关注,其独特的成分和性能可在提升复合材料强

度的同时,缓解传统增强相导致的塑性骤降问题,为复合材料强韧化提供了新思路^[31]。

目前,外加增强相获得优异性能的核心在于解决界面结合与分散均匀性两大难题。对于界面问题,当前研究集中于增强体表面改性和基体合金化,以改善界面润湿性、抑制有害反应^[32]。针对纳米尺度增强体因范德华力易团聚的问题,研究者采用高能球

表1 各类外加增强相的优势与不足
Tab.1 Advantages and disadvantages of various ex-situ reinforcements

Category	Reinforcement	Advantages	Disadvantages
Ceramic	SiC, TiC, B ₄ C	High hardness, high modulus, high melting point	Poor interfacial bonding
Carbon	CNTs graphene	Excellent specific strength, electrical and thermal conductivity	1. Poor interfacial bonding, prone to adverse reactions 2. Nanocarbon materials are prone to agglomeration
Whisker	Al ₁₈ B ₄ O ₃₃ , MgAl ₂ O ₄	Ultra-high strength	High cost, disordered orientation in the matrix 1. Prone to interfacial reaction
Metals	High-entropy alloy ^[31]	Good wettability of reinforcement	2. Hardness and high-temperature stability inferior to traditional ceramics
Rare earths (RE)	CeO ₂ , La ₂ O ₃	High melting point, high hardness	1. High production cost 2. Environmental concerns

磨、超声辅助搅拌等分散工艺,或利用搅拌摩擦加工(friction stir processing, FSP)等后处理技术进行组织重构与均匀化^[17,33-34]。

2.2 原位增强相

与外加增强相不同,原位增强相是在制备过程中通过化学反应在基体内直接生成的,常用类别如表 2 所示。原位技术能够获得热力学稳定,与基体界面洁净且结合强度高的增强相,其与基体之间往往呈冶金结合或半共格界面,不存在外加颗粒常见的表面污染或润湿性问题。然而,原位技术在实际应用中仍面临严峻挑战。首先,原位反应过程及增强体特征的控制极为复杂,反应的热力学与动力学关系直接影响增强相的形貌、尺寸及分布均匀性。其次,许多原位反应的工艺参数敏感,工艺窗口狭窄,难以与现有低成本铸造或增材制造技术高效匹配。因此,如何利用原位自生增强相解决润湿性问题的同时,避免因增强相尺寸不当、分布不均或界面脆性相而损害材料的塑性与断裂韧性,仍是亟待解决的设计难题。

2.3 混杂增强相

单一增强相难以兼顾所有性能,因此将不同种

类、尺寸的增强体复合的混杂增强策略已成为前沿方向。其核心在于通过多尺度、多机制的协同设计,实现各增强相优势互补。如微米级增强体主要承担载荷、提升刚度,而纳米级增强体则可作为异质形核点细化晶粒、抑制裂纹扩展并改善塑性^[39],进一步引入片状石墨烯还能优化摩擦磨损性能^[40]。这种多尺度的复配能有效优化应力应变分布,促使裂纹偏转与分支,从而协同提升材料的强度、韧性及耐磨性等,是发展下一代高性能、可定制 AMCs 的有效策略。

3 AMCs 的耐热性能

材料的耐高温能力对工业装备的服役可靠性至关重要^[41],许多关键部件需要在较高温度下运行。例如,汽车发动机燃烧室内的部件通常在 200~400 °C 下服役,但长期的机械热疲劳使传统铝合金难以满足高功率发动机的高温服役环境要求。这是因为传统高强铝合金赖以实现强化作用的析出相,在 200 °C 以上会出现快速失稳粗化现象,使材料失去强化效果并迅速失效^[42-43]。尽管钛合金等高温合金可作为替代方案,但带来的结构增重与成本上升却让研究人

表 2 原位增强相的类别、优势与不足
Tab.2 Categories, advantages, and disadvantages of in-situ reinforcements

Category	Reinforcement	Reaction system	Advantages	Disadvantages
Oxides	Al ₂ O ₃	Al-CuO ^[35] Al-RE oxides ^[36]	High melting point, good chemical and thermal stability	1. Particles are prone to agglomeration 2. High-purity raw materials are expensive
Carbides	TiC, WC, VC	Al-FeTiO ₃ -C ^[37] Al-W-C Al-V-C	High hardness, high modulus	1. Complex reaction control 2. Risk of interfacial brittle phases
Borides	TiB ₂	Al-KBF ₄ -K ₂ TiF ₆ ^[38]	High hardness, industrially producible	1. Environmental pressure of the process 2. Difficulty in controlling morphology and size
Multi-type hybrid	Al ₂ O ₃ , TiB ₂ , TiC	Al-FeTiO ₃ -B ₂ O ₃ -C ^[37]	Clean interface, extremely high thermal stability	1. Difficulty in multiphase distribution and interfacial synergy 2. Complex reaction system

员和工程技术人员望而却步^[44]。在航空航天、交通运输等领域提速减重的迫切需求下,轻质高强耐热AMCs的需求日益增加。AMCs耐热性能主要体现在高温下抵抗软化、变形和破坏的能力,目前相关研究主要聚焦于高温强度、抗蠕变性能、热膨胀系数和热稳定性4个方面^[45-48]。影响耐热性能的关键因素包括:①增强体类型,即陶瓷颗粒、纤维及纳米材料因具有高熔点、高模量、低热膨胀系数,成为常用的耐热增强相;②界面结合强度,通过原位生成、增强体表面镀层或化学处理实现的良好界面结合能有效传递载荷,防止高温下界面失效;③微观结构设计,层状构型、复配增强等设计可优化应力分布,协同提升强度和韧性。下面将结合实例,具体介绍不同工艺制备的AMCs的耐热性能表现。

3.1 粉末冶金及原位合成AMCs

粉末冶金法制备的复合材料经冷/热加工处理(如轧制、挤压)后,可进一步改善颗粒与基体间的界面结合,细化其微观结构,并提高致密度、强度和塑性^[49]。

Chen等^[50]通过粉末冶金与热挤压工艺,在合金中构建了由微米级和纳米级金属间化合物,如 $Al_{17}-(FeNiMn)_4Si_2$ 、 Al_3Ni 及双尺度 TiB_2 颗粒组成的多层片状异质结构。该结构通过协调不同尺度区域的塑性变形,产生了明显的异质变形诱导(heterogeneous

deformation induced, HDI)硬化效应,在容纳高体积分数的同时避免了脆性,同时提升了合金的室温强塑性和高温强度保持能力。图6展示了该多尺度异质结构AMCs的力学性能,包括室温和高温拉伸曲线,与其他高强Al-Si合金及耐热铝合金的对比、加载-卸载-再加载曲线以及背应力分析结果。

图7展示了Bai等^[51]提出的界面置换分散策略。该策略通过简单的机械球磨-粉末冶金工艺,在铝基体内实现了体积分数为8%的单粒子级超细MgO颗粒的均匀分散,制备出一种氧化物弥散强化的AMCs。该AMCs在500℃下仍具有约200MPa的抗拉强度和优异的抗蠕变性能,突破了传统AMCs在300℃以上力学性能急剧下降的瓶颈,其高温耐热性能优于目前其他工艺制备的AMCs。

原位合成方面,Zhou等^[36]通过高能球磨实现了铝与氧化镧(La_2O_3)的室温原位反应,成功制备出由非晶 Al_2O_3 膜和纳米 $Al_{11}La_3$ 颗粒协同增强的AMCs。该研究表明,非晶 Al_2O_3 膜能有效包裹并抑制增强相的粗化。当热压温度控制在590℃以下时, Al_2O_3 可保持非晶态, $Al_{11}La_3$ 保持纳米尺度,从而使复合材料在350℃下获得190MPa的高温抗拉强度,比增强相粗化状态提升约44%,显著提高了材料的高温稳定性与力学性能。如图8所示,该复合材料在室温和350℃下的抗拉强度均明显高于未

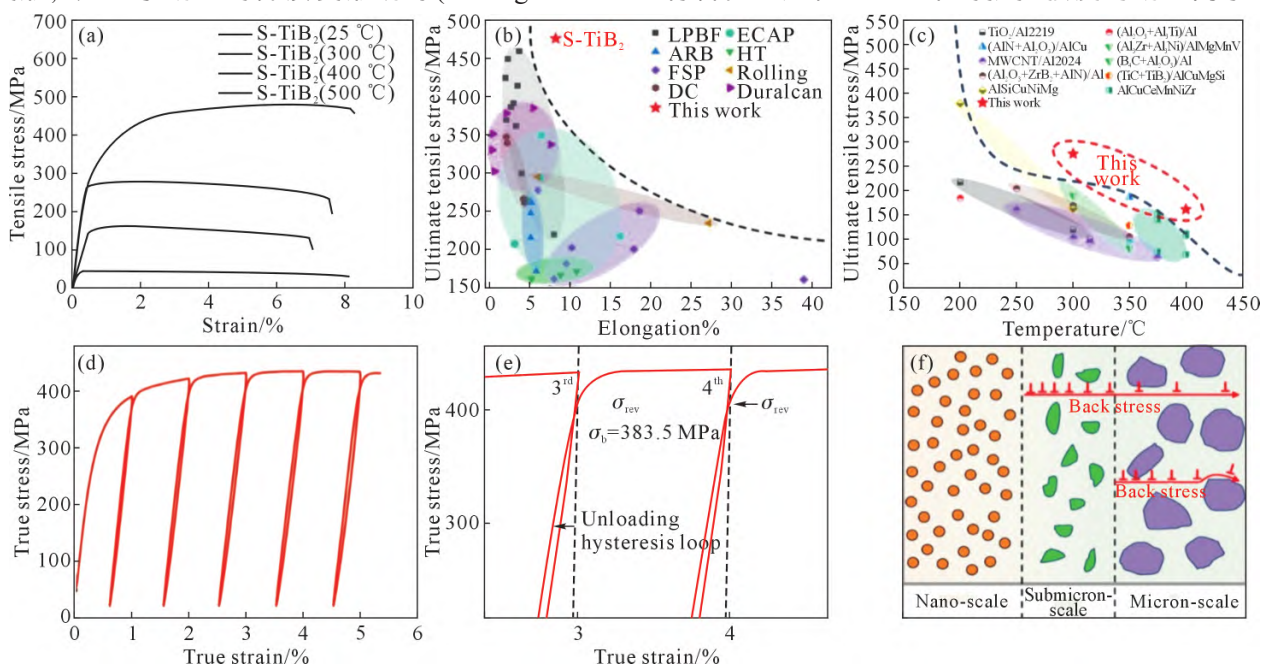


图6 多尺度异质结构AMCs力学性能表现:(a) S-TiB₂在室温和高温下的拉伸曲线;(b)与不同工艺成型的高强Al-Si合金室温下力学性能比较;(c)与其他耐热铝合金高温抗拉强度比较;(d)加载-卸载-再加载(LUR)拉伸曲线;(e)滞后环和背应力;(f)多尺度异质结构变形过程中的背应力示意图^[50]

Fig.6 Mechanical performance of multiscale heterostructured AMCs: (a) tensile curves of S-TiB₂ at room and elevated temperatures; (b) comparison of room-temperature mechanical properties with those of high-strength Al-Si alloys fabricated by different processes; (c) comparison of high-temperature tensile strength with those of other heat-resistant aluminium alloys; (d) loading-unloading-reloading (LUR) tensile curves; (e) hysteresis loops and back stress; (f) schematic illustration of back stress during deformation of the multiscale heterostructure^[50]

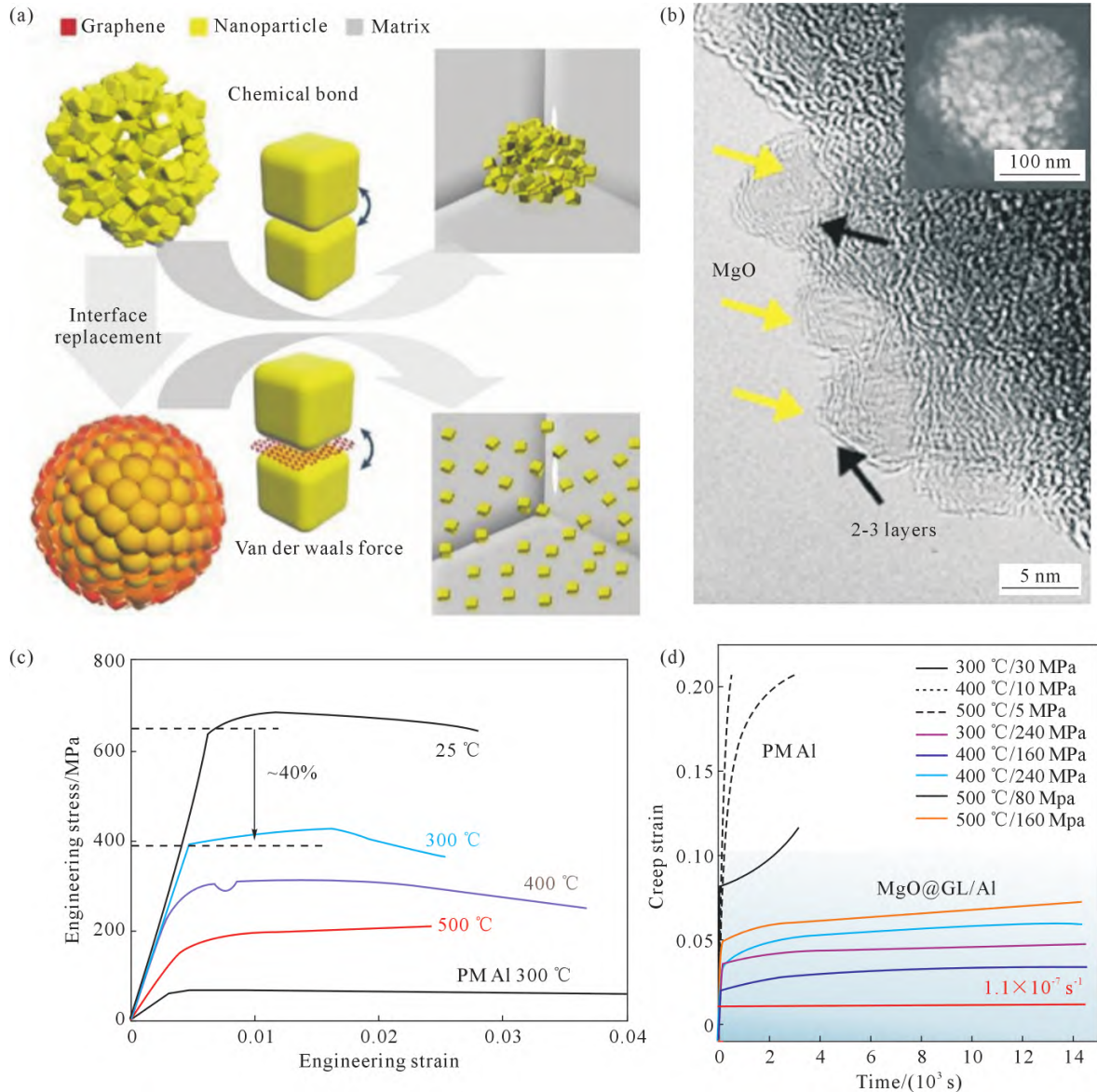


图7 界面置换分散策略及材料性能:(a)界面置换分散思路示意图;(b)少层石墨包覆 MgO 纳米颗粒的 TEM 形貌;(c)弥散 MgO NPs 增强 AMC 的室温与高温力学性能;(d)复合材料抗高温蠕变性能^[51]

Fig.7 Interface replacement dispersion strategy and proposed material properties: (a) schematic diagram of the interface replacement dispersion concept; (b) TEM morphology of few-layer graphene-coated MgO nanoparticles; (c) room-temperature and high-temperature mechanical properties of MgO nanoparticle dispersion-strengthened aluminium matrix composites; (d) high-temperature creep resistance of the composites^[51]

增强的铝基体。

上述粉末冶金与原位合成策略各有侧重。Chen 等^[50]通过多尺度异质结构在中等温度范围(≤300 °C)实现了强塑性协同,但更高温度的性能尚待验证。Bai 等^[51]利用超细氧化物弥散突破了 500 °C 的性能瓶颈,代表了当前粉末冶金路线耐热 AMC 的领先水平,但工艺窗口较窄、对原料要求极高。Zhou 等^[36]通过原位非晶界面设计,在 350 °C 下展示了界面结构调控对复合材料热稳定性的贡献。综合来看,实现纳米增强相的高度均匀分散是突破高温性能瓶颈的关键,而异质结构设计则提供了一条兼顾强塑性的有效途径。未来研究应致力于将超细弥散强化与多尺度异质结构设计相结合,在获得超细弥散分布

的同时构建多尺度组织,以进一步拓宽 AMC 的高温服役窗口。

3.2 搅拌熔铸及增材制造 AMC 的

铸造工艺在耐热铝合金领域发展多年且较为成熟,已广泛应用于汽车、航空航天、船舶等领域^[52]。Hao 等^[53]利用传统的搅拌铸造方法制备出一种耐热 AMC,在 300 °C 下具有 163.83 MPa 的抗拉强度与 9.19% 的伸长率。该研究结合了目前发展迅速的机器学习设计方法,利用集成算法优化耐热铸造铝合金成分,取代了传统的经验试错模式,高效明确了钛(Ti)和钒(V)是提升铝合金高温强度的关键增强元素。

Turan 等^[54]利用搅拌熔铸和热挤压方法,在 2024

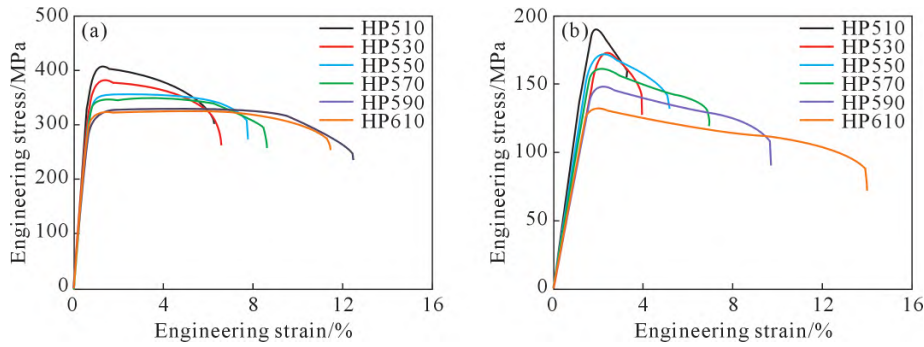


图8 原位合成强化 AMCs 力学性能表现:(a) 室温拉伸;(b) 350 °C 下拉伸^[36]

Fig.8 Mechanical performance of in-situ synthesized reinforced AMCs prepared: (a) tensile test at room temperature; (b) tensile test at 350 °C^[36]

铝合金中掺入多壁碳纳米管,所得 AMCs 在 250 °C 下的抗拉强度达 310 MPa,伸长率为 15%。该项工作还重点研究了高温磨损性能,图 9 展示了该 AMCs 在不同条件下的表面磨损形貌。随着温度升高,铝基体出现软化,界面结合减弱,从基体到强化相的载荷传递效率逐渐下降,揭示了该 AMCs 的磨损机制由磨粒磨损向黏着磨损、氧化磨损直至热磨损演变。因此,该复合材料的高温磨损性能并不理想。

在增材制造领域,LPBF 是制备 AMCs 应用最广泛的技术之一。He 等^[55]选择热力学稳定的陶瓷增强相 TiCN,利用 LPBF 方法制备了 TiCN 增强 AMCs。在成型过程中,TiCN 颗粒受到熔池中高热梯度的冲击,破碎为亚微米及纳米级颗粒,成为异质形核点,促进了等轴晶形成,最终获得由细小等轴晶与精细共晶组织构成的双峰微观结构,实现了完全致密且无裂纹的成形。图 10 对比了 TiCN/AlSi10Mg 复合材料与未增强 AlSi10Mg 合金在不同温度下的拉

伸性能。结果表明,TiCN 增强相显著提升了材料在各温度下的抗拉强度,该 AMCs 在 200 °C 时的抗拉强度达 270 MPa,显著高于未增强的 AlSi10Mg 合金。这一优异的力学性能主要归因于其双峰微观结构及 TiCN 颗粒在高温下对晶界和位错的钉扎效应。

Li 等^[56]通过 LPBF 技术在 2219 铝合金中添加质量分数为 1%的低成本纳米 TiO₂ 颗粒,制备出相对密度达 99.97%,且无热裂纹的高强耐热 AMCs。在 LPBF 过程中,高温熔池诱导铝热反应还原出 Ti 元素,利用其溶质效应在熔池边缘形成细小等轴晶,内部形成细小柱状晶,构成双峰晶粒结构,从而有效抑制了粗大柱状晶的形成和热裂纹的产生。经直接时效处理后,该复合材料在室温和高温下均表现出优异的强度与塑性匹配。图 11 对比了打印态和热处理态复合材料与打印态未改性 2219 铝合金在不同温度下的力学性能。结果显示,添加纳米 TiO₂ 颗粒后,复合材料在室温和高温下的力学性能均显著优

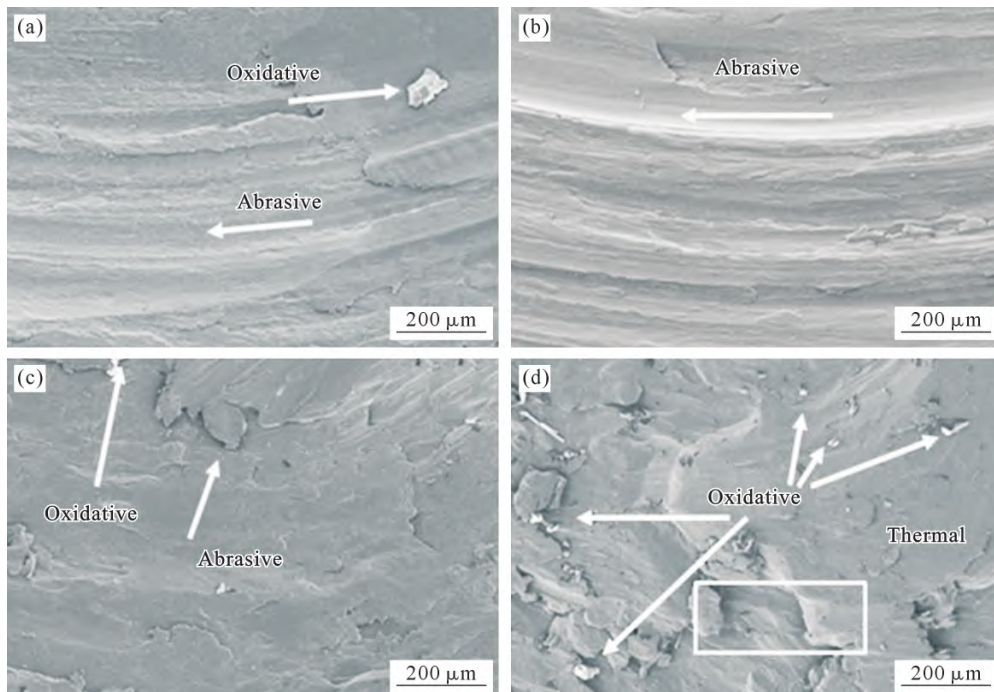


图9 AMCs 磨损表面:(a) 室温,20 N;(b) 室温,40 N;(c) 150 °C,20 N;(d) 250 °C,20 N^[54]

Fig.9 Wear surfaces of AMCs: (a) room temperature, 20 N; (b) room temperature, 40 N; (c) 150 °C, 20 N; (d) 250 °C, 20 N^[54]

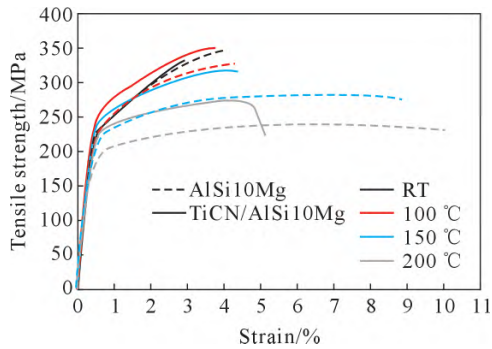


图 10 TiCN/AlSi10Mg 复合材料与 AlSi10Mg 在不同温度下的拉伸性能对比^[55]

Fig.10 Comparison of tensile properties between the TiCN/AlSi10Mg composite and AlSi10Mg at different temperatures^[55]

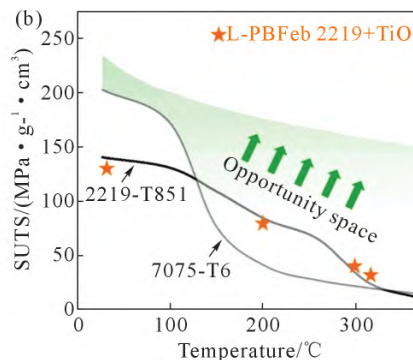
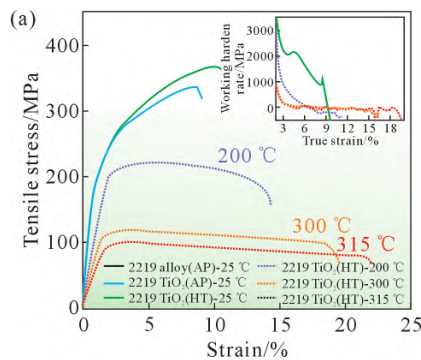


图 11 AMC 力学性能对比:(a) 打印态 2219 铝合金、打印态和热处理 NTM-2219 铝合金在不同温度下的工程应力-应变,以及经过热处理的 NTM-2219 铝合金的加工硬化速率曲线;(b) 热处理 NTM-2219 及其他常用高强度铝合金的比极限抗拉强度 (SUTS)与温度的关系^[56]

Fig.11 Comparison of mechanical properties of AMC: (a) engineering stress-strain curves of as-printed 2219 aluminum alloy, as-printed and heat-treated NTM-2219 aluminium alloy at different temperatures, and work hardening rate curve of heat-treated NTM-2219 aluminium alloy; (b) specific ultimate tensile strength (SUTS) as a function of temperature for heat-treated NTM-2219 and other commonly used high-strength aluminium alloys^[56]

化搅拌铸造工艺;对性能要求苛刻的复杂构件,则应发展增材制造及其与热处理耦合的复合工艺。此外,搅拌铸造路线还可借鉴增材制造路线中的微观组织设计理念,以弥补其在微观组织调控方面的不足。

4 挑战与发展趋势

4.1 存在的主要问题

当前 AMC 的发展与应用主要面临 3 大难题。

(1)制备成本高昂 成本问题贯穿原材料优选与制造工艺优化全链条。在原材料方面,高性能增强体(如纳米碳管、石墨烯、高品质 SiC 或 AlN 粉末)价格昂贵,且在高体积分数下的分散工艺复杂,导致成本大幅上升。在制造工艺方面,粉末冶金、增材制造等高性能制备技术设备投入大、能耗高;而相对低成本的搅拌铸造法又难以解决增强体分布均匀性与界面控制问题,导致性能不稳定。上述因素共同限制了 AMC 在民用高端装备和汽车等成本敏感领域的广泛使用。

于未改性合金,可与锻造 2219 铝合金相媲美。上述实例充分展示了 LPBF 技术制备的 AMC 在中高温工况下的应用潜力。

搅拌铸造与增材制造两条技术路线各有优劣。搅拌铸造路线成本低、易于规模化,但增强体分散性和界面控制仍是长期难题,高温磨损性能往往不理想,如 Turan 等^[54]的研究结果已充分证明这一点。相比之下,增材制造路线可借助快速凝固构建双峰晶粒、仿生结构等复杂构型,显著提升高温力学性能,但设备昂贵、工艺参数敏感,且易产生热裂纹。基于上述对比,对成本敏感的规模化生产应引入超声振动辅助分散、机器学习辅助成分设计等策略,优

(2)工艺控制复杂 工艺控制的复杂性主要体现在微观组织的精确调控上。首先,增强体分布的均匀性是关键挑战,尤其在搅拌铸造中,增强体易因密度差而产生偏聚或团聚,形成性能薄弱点。其次,界面反应控制至关重要。在高温制备或服役过程中,增强体与铝基体可能发生有害界面反应,如 SiC 和 Al 基体的界面反应产生的 Al₄C₃, 使力学性能严重恶化^[59]。如何通过工艺参数优化、增强体表面改性或采用原位自生技术来获得无污染、稳定的理想界面,是工艺研究的复杂难点。

(3)强塑性平衡 提升强度往往以牺牲伸长率为代价,该矛盾在复合材料中尤为突出。大量硬质增强体的引入虽能显著提升强度和模量,但也导致基体塑性流动受限;同时,因范德华力引起的增强体团聚会造成应力集中,成为裂纹萌生和扩展的起源。因此,如何在借助增强体获得高强度、高耐热性的同时,通过微观组织设计保留或引入塑性变形机制,实现强度与韧性良好匹配,是材料设计领域的长期挑战。

4.2 发展趋势

为突破上述瓶颈,未来研究将呈现多学科交叉融合的创新态势,主要从以下4个方向深入发展。

(1)新制备工艺开发 工艺开发将聚焦于降本增效与形性协同。一方面,优化和改进半固态搅拌铸造、挤压铸造等现有工艺,通过引入超声振动等辅助方式^[61],实现增强体的高效均匀分散与界面调控。另一方面,积极探索增材制造在AMCs中的应用,如激光选区熔化(selective laser melting, SLM)^[58-59]与搅拌摩擦增材制造(friction stir additive manufacturing, FSAM)^[60]。这些技术不仅能实现复杂构件的一体化近净成形、减少材料浪费,其快速凝固特性还有利于形成细化的微观组织,为性能优化开辟新路径。

(2)精细组织结构 材料设计将从传统的均匀分散理念转向空间构型化设计。例如,受自然界贝壳、骨骼启发,可设计砖-泥层状结构^[61]或构建三维网状增强体骨架^[62]。这类非均质构型能够有效引导裂纹扩展路径、分散应力集中,从而在提升强度的同时显著改善材料的韧性和损伤容限。

(3)新型增强体开发 增强体研发将朝着高性能化与多功能化方向发展。一方面,深入研究如AlN、MAX相等新型增强体,它们具有更高的热稳定性和更佳的界面相容性。另一方面,发展混杂增强策略,将纳米和微米尺度的颗粒、纤维/晶须或不同性质的增强体进行复合,发挥协同效应。同时,通过酸处理等技术对增强体进行精准表面涂层改性^[63],优化载荷传递效率与界面稳定性。

(4)强化机制深入研究 随着人工智能兴起,未来研究将深度融合计算热力学、相场模拟、分子动力学以及机器学习^[64-66]。通过机器学习构建预测模型,可加速新型合金成分与复合材料的发现。同时,多尺度模拟手段可深入揭示如非均质构型强化、界面在高温下的演化行为等复杂微观机制,为实验研究提供精准的理论指导。

5 功能导向的AMCs设计策略

AMCs的研究范式已从早期侧重于单一工艺开发与性能验证的经验试错模式,演进至以特定应用场景的功能需求为根本出发点的理性设计阶段。该转变的核心驱动力源于航空航天、先进动力系统等领域对材料性能日益严苛且差异化的要求。传统上试图以单一材料满足通用高性能的思路已难以应对实际需求,取而代之的是面向如高温承载、耐磨导热、复杂轻量化构件等具体服役环境的定制化材料设计。

在此背景下,AMCs的开发已演变为一项以功能为输入、性能为输出的工程。其内在逻辑为:①明确构件在真实工况下的核心功能指标,逆向推导并选择具有特定属性的增强相与基体,构建优化的材料体系;②根据该材料体系的特点及构件几何复杂性,匹配最合适的制备与成形工艺,确保设计目标能在最终部件中得以实现。

6 总结与展望

AMCs,特别是为提升耐热性能而设计的体系,近年来在以下3个核心方面取得了显著进展。

(1)制备工艺 搅拌铸造、挤压铸造等液态法及粉末冶金等固态法各具优势。其中,原位自生法因能形成热力学稳定、界面结合强的纳米增强相,在提升耐热性方面展现出独特优势,是制备高性能耐热复合材料的优选技术路径之一。

(2)构型设计 超越传统组织的随机分布,向仿生层状、网状、梯度等非均质构型发展,为同时提升材料的强度与韧性提供了革命性思路,代表了未来的重要设计方向。

(3)耐热机理 材料的耐热性并非单一机制作用,而是载荷传递、Orowan强化、细晶强化与热错配强化等机制的协同影响。通过引入SiC、AlN、TiB₂及稀土化合物等高熔点、高热稳定性的增强体,可有效钉扎晶界与位错,抑制高温下的组织软化和变形,进而提升AMCs的耐热性。

面向未来,AMCs的研究将从以下3个方向深入发展。

(1)研究范式转变 机器学习、多尺度计算模拟将与实验研究深度融合,加速成分、工艺与构型的优化设计,实现从经验试错到理论预测的转变。

(2)材料体系革新 材料开发将不再仅追求单一力学性能表现,而是向结构-功能一体化迈进,致力于研制兼具超常耐热性、高导热、低膨胀、抗疲劳等多功能特性的新一代复合材料。

(3)工程应用拓展 满足航空航天、先进动力系统等领域对材料在极端环境下服役的严苛要求,推动AMCs从先进材料走向成熟工程材料。

参考文献:

- [1] ZHANG J F, ANDRÁ H, ZHANG X X, WANG Q Z, XIAO B L, MA Z Y. An enhanced finite element model considering multi strengthening and damage mechanisms in particle reinforced metal matrix composites[J]. Composite Structures, 2019, 226: 111281.
- [2] DU A, LATTANZI L, JARFORS A E, ZHENG J, WANG K, YU G. On the efficient particle dispersion and transfer in the fabri-

- cation of SiC-particle-reinforced aluminum matrix composite[J]. *Crystals*, 2023, 13(12): 1621.
- [3] PANDEY N, CHAKRABARTY I, BARKANE K, MEHTA N S, MAJHI M R. Microstructure, mechanical and wear properties of aluminum borate whisker reinforced aluminum matrix composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(7): 1731-1742.
- [4] ZHU S, IIZUKA T. Fatigue behavior of $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker-frame-work reinforced Al matrix composites at high temperatures[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(2): 265-271.
- [5] 王迎春, 李景明, 马小民, 路国通, 王心超, 康克家, 黄茜, 张士桐, 朱光远. 氧化铝纤维增强铝基复合材料的研究与应用进展[J]. *合成纤维工业*, 2025, 48(2): 61-67.
- WANG Y C, LI J M, MA X M, LU G T, WANG X C, KANG K J, HUANG Q, ZHANG S X, ZHU G Y. Research and application progress of alumina fiber-reinforced aluminum-matrix composites[J]. *Synthetic Fiber Industry*, 2025, 48(2): 61-67.
- [6] KUMAR A, SINGH V P, SINGH R, CHAUDHARY R, KUMAR D, MOURAD A-H I. A review of aluminum metal matrix composites: fabrication route, reinforcements, microstructural, mechanical, and corrosion properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(7): 2644-2711.
- [7] 丁志鹏. 纳米碳管/铝基复合材料制备及摩擦性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- DING Z P. Research progress in preparation process and properties of nano-carbon reinforced aluminum matrix composite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [8] 董海涛, 李登辉, 翟振杰, 孙长飞, 王喆, 陈聪. 高性能金属基复合材料研究进展[J]. *青海科技*, 2024, 31(1): 94-99.
- DONG H T, LI D H, ZHAI Z J, SUN C F, WANG Z, CHEN C. Research progress on high-performance metal matrix composites[J]. *Qinghai Science and Technology*, 2024, 31(1): 94-99.
- [9] 刘传志, 李晨雨, 高飞, 刘晓艳, 刘家宇, 孙忠. 铝基复合材料的制备与研究现状[J]. *纳米技术*, 2025, 15: 50.
- LIU C Z, LI C Y, GAO F, LIU X Y, LIU J Y, SUN Z. The preparation and research status of aluminum matrix composites[J]. *Hans Journal of Nanotechnology*, 2025, 15: 50.
- [10] 张兰, 夏慧敏, 马会中, 李纳, 成德森. 粉末冶金铝合金的研究综述[J]. *粉末冶金工业*, 2020, 30(5): 78-83.
- ZHANG L, XIA H M, MA H Z, LI N, CHENG D S. The research status and development of powder metallurgy aluminum alloy[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2020, 30(5): 78-83.
- [11] FENG S, GUO Q, LI Z, FAN G, LI Z, XIONG D B, SU Y, TAN Z, ZHANG J, ZHANG D. Strengthening and toughening mechanisms in graphene-Al nanolaminated composite micro-pillars[J]. *Acta Materialia*, 2017, 125: 98-108.
- [12] GU J, ZHANG W, SU H, FAN T, ZHU S, LIU Q, ZHANG D. Morphology genetic materials templated from natural species[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(3): 464-478.
- [13] LI Z, GUO Q, LI Z, FAN G, XIONG D B, SU Y, ZHANG J, ZHANG D. Enhanced mechanical properties of graphene (reduced graphene oxide)/aluminum composites with a bioinspired nanolaminated structure[J]. *Nano letters*, 2015, 15(12): 8077-8083.
- [14] MEI Y, LI H, YANG W S, WU J F, LI X, XIU Z Y, FU J R, HUSAIN M, CHEN G Q, WU G H. In-situ synthesis of Al_3BC/Al composites from amorphous boron and graphene nanoplates by solid reaction[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154912.
- [15] SHAN Y, PU B, LIU E, SHI C, HE C, ZHAO N. In-situ synthesis of CNTs@ Al_2O_3 wrapped structure in aluminum matrix composites with balanced strength and toughness[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 797: 140058.
- [16] 黄世源, 袁唐昊. 半固态搅拌铸造 $TiO_2/A356$ 复合材料的力学性能研究[J]. *铸造*, 2021, 70(4): 438-443.
- HUANG S Y, YUAN T W. Study on mechanical properties of $TiO_2/A356$ composites prepared by semi-solid stirring casting[J]. *Foundry*, 2021, 70(4): 438-443.
- [17] RAWAL S, SIDPARA A M. Microstructure and mechanical property variation of Al6061/GNP nanocomposite by Mg and ultrasonic vibration in bottom pouring stir casting[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(15): 2500024.
- [18] LAL S, KUMAR A, KUMAR S, GUPTA N. Characterization of A356/B4C composite fabricated by electromagnetic stir-casting process with vacuum[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 34: 832-841.
- [19] 薛鹏鹏, 曹富翔, 邓坤坤, 聂凯波, 刘力. SiCp/2024Al 复合材料板材的显微组织、力学性能及加工硬化行为[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(5): 20-28.
- XUE P P, CAO F X, DENG K K, NIE K B, LIU L. Microstructure, mechanical properties and work hardening behavior of SiCp/2024Al composite sheet[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(5): 20-28.
- [20] 吴灵芝, 温耀杰, 张百成, 尹海清, 曲选辉. 选区激光熔化铝合金制备研究现状[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(6): 549-562.
- WU L Z, WEN Y J, ZHANG B C, YIN H Q, QU X H. Research status of selective laser melting aluminum alloys[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(6): 549-562.
- [21] TANG S, UMMETHALA R, SURYANARAYANA C, ECKERT J, PRASHANTH K G, WANG Z. Additive manufacturing of aluminum-based metal matrix composites-a review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(7): 2100053.
- [22] 郭滕, 戴延丰, 黄斌达. 典型航空机电产品激光粉末床熔融技术应用现状与发展[J]. *中国激光*, 2023, 50(16): 242-258.
- GUO M, DAI Y F, HUANG B D. Application status and development of laser powder bed fusion technology in typical electromechanical aviation products[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(16): 242-258.
- [23] 刘倩, 卢秉恒. 金属增材制造质量控制及复合制造技术研究现状[J]. *材料导报*, 2024, 38(9): 182-189.
- LIU Q, LU B H. Review on quality control and relevant hybrid technology in additive manufacturing of metallic materials[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(9): 182-189.
- [24] HE X, LI G, ZHANG L, HUANG Y, XIE B, SHI Z, FENG G, LIU W, LYU F, WANG S, YU Z, LUAN J, ZHAO C, LU H, HU X, ZHU Q, LU J. Bio-inspired material-structure-function integrated additive manufacturing of Al-based metamaterials with surpassing energy absorption[J]. *Science Advances*, 2025, 11(46): eaea0430.
- [25] PENG P, JU J, FENG T, YANG T, XIAO B, LUAN J, WANG Y,

- GAO H, LYU H, WANG J, SUN B. Unraveling the corrosion behavior and enhanced strength-ductility synergy mechanism of a novel Al-Ce/GNPs composite fabricated by selective laser melting [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 296: 112244.
- [26] 吕书林,郭文波,陈露,李建宇,严兆祥,吴树森. 颗粒增强铝基复合材料的制备方法及其热处理研究[J]. *铸造*, 2024, 73(6): 727-737.
- LYU S L, GUO W B, CHEN L, LI J Y, YAN Z X, WU S S. Study on preparation method and heat treatment of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. *Foundry*, 2024, 73(6): 727-737.
- [27] 周聪,管宇宁,王东,王全兆,肖伯律,马宗义. $(Al_{11}La_3+Al_2O_3)/Al$ 复合材料的高温性能及其强化机制[J]. *材料研究学报*, 2023, 37(2): 81-88.
- ZHOU C, ZAN Y N, WANG D, WANG Q Z, XIAO B L, MA Z Y. High temperature properties and strengthening mechanism of $(Al_{11}La_3+Al_2O_3)/Al$ composite[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2023, 37(2): 81-88.
- [28] CHEN B, ZHOU X Y, ZHANG B, KONDOH K, LI J S, QIAN M. Microstructure, tensile properties and deformation behaviors of aluminium metal matrix composites co-reinforced by ex-situ carbon nanotubes and in-situ alumina nanoparticles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 795: 139930.
- [29] SADEGHI B, CAVALIERE P, SADEGHIAN B. Enhancing strength and toughness of aluminum laminated composites through hybrid reinforcement using dispersion engineering[J]. *Journal of Composites Science*, 2023, 7(8): 332.
- [30] ZHUANG W C, HUANG Z Y, PEI D F, HU W Q, YU Q, WANG H T, LI X, WU Y, DU Z, SUN Q W. Achieving exceptional strength by multi-dimensional in-situ Al_3Ti , TiN , AlN reinforcements in Al matrix composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 997: 174880.
- [31] PENG Y Z, LI C J, SONG M, XU Z Y, YANG C M Y, LU Q, LIU L, CHEN X F, LIU Y C, YI J H. Breaking the strength-ductility trade-off in aluminum matrix composite through "dual-metal" heterogeneous structure and interface control[J]. *International Journal of Plasticity*, 2025, 185: 104216.
- [32] KUMAR N M S, SHASHANK T N, DHEERAJ N U, DHRUTHI, KORDJAZI A, ROHATGI P K, SADASHIVA M. Coatings on reinforcements in aluminum metal matrix composites[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2023, 17(2): 1049-1064.
- [33] 游远琪,李才巨,杨超,邢轅,彭言之,易健宏. 球磨方式对 CNTs/Al 复合材料显微组织与力学性能的影响[J]. *粉末冶金技术*, 2024, 42(4): 331-337, 345.
- YOU Y Q, LI C J, YANG C, XING Y, PENG Y Z, YI J H. Effect of ball milling process on microstructure and mechanical properties of CNTs/Al composites [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2024, 42(4): 331-337, 345.
- [34] 沈会,王江涛,王明智,陈佳伟,谢利,何明涛. FSP 和颗粒增强耦合工艺下铝基复合材料制备的研究进展[J]. *新技术新工艺*, 2023(5): 32-39.
- SHEN H, WANG J T, WANG M Z, CHEN J W, XIE L, HE M T. Development of aluminum matrix composites prepared by FSP and the particle reinforced coupling process[J]. *New Technology & New Process*, 2023(5): 32-39.
- [35] MAO D X, MA X T, XIE Y M, MENG X C, WANG N J, ZHANG Z Y, SUN X W, HUANG Y. In-situ solid-state deformation-driven rapid reaction towards higher strength-ductility Al-CuO composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 182:108174.
- [36] ZHOU C, LYU M, ZAN Y N, LIU Y, SHAO X H, WANG Q Z, WANG D, XIAO B L, MA Z Y. Microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites produced by Al- La_2O_3 in-situ reaction[J]. *Materials Characterization*, 2022, 188: 111887.
- [37] HOSEINPOUR M, KALANTAR M. Fabrication and characterization of alumina-based composites by in-situ combustion synthesis in Al-FeTiO₃-B₂O₃-C alumino-thermic system [J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2024, 60(4): 1249-1264.
- [38] 王磊,王浩伟. 航空用原位颗粒增强铝基复合材料研制与发展[J]. *民用飞机设计与研究*, 2022(1): 104-110.
- WANG L, WANG H W. Research and development of in situ particles reinforced aluminum matrix composites for aviation[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2022(1): 104-110.
- [39] ZHANG J J, QIAN M F, JIA Z G, ZHANG X X, LI A B, WANG G S, GENG L. Strength-plasticity relationship and intragranular nanophase distribution of hybrid $(GNS + SiC_m)/Al$ composites based on heat treatment[J]. *Materials*, 2024, 17(10): 2460.
- [40] KOLEV M, LAZAROVA R, PETKOV V, DIMITROVA R. Effects of graphene nanoplatelets and nanosized Al_4C_3 formation on the wear properties of hot extruded Al-based nanocomposites[J]. *Lubricants*, 2025, 13(2): 67.
- [41] MEETHAM G W. High-temperature materials-a general review[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(4): 853-860.
- [42] 高一涵,刘刚,孙军. 耐热铝基合金研究进展: 微观组织设计与析出策略[J]. *金属学报*, 2021, 57(2): 129-149.
- GAO Y H, LIU G, SUN J. Recent progress in high-temperature resistant aluminum-based alloys: Microstructural design and precipitation strategy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(2): 129-149.
- [43] POLMEAR I J, PONS G, BARBAUX Y, OCTOR H, SANCHEZ C, MORTON A J, BORBIDGE W F, ROGERS S. After concorde: Evaluation of creep resistant Al-Cu-Mg-Ag alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 1999, 15(8): 861-868.
- [44] 贾祥磊,朱秀荣,陈大辉,费良军. 耐热铝合金研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2010, 33(2): 108-113.
- JIA X L, ZHU X R, CHEN D H, FEI L J. Research development of heat-resistant aluminum alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, 33(2): 108-113.
- [45] BABALOLA P O, BOLU C, INEGBENEBOR A O, ODUNFA K M. Development of aluminium matrix composites: A review [J]. *Online International Journal of Engineering and Technology Research*, 2014, 2: 1-11.
- [46] GUDLUR P, FORNESS A, LENTZ J, RADOVIC M, MULIANA A. Thermal and mechanical properties of Al/ Al_2O_3 composites at elevated temperatures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 531: 18-27.
- [47] XIE K, NIE J, LIU C, CHA W, WU G, LIU X, LIU S. A novel Al-Cu composite with ultra-high strength at 350 °C via dual-phase particle reinforced submicron-structure[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(25): 2207208.

- [48] 杨寿奎,张翔,赵冬冬,何春年,赵乃勤. 铝基复合材料的高温蠕变性能研究进展[J]. 铸造技术, 2023, 44(8): 706-718.
YANG S K, ZHANG X, ZHAO D D, HE C N, ZHAO N Q. Progress on the creep resistance of aluminum matrix composites at high temperatures[J]. Foundry, 2023, 44(8): 706-718.
- [49] 陈峰,闫志巧,蔡一湘. 粉末冶金铝合金及复合材料的研究现状与发展趋势[J]. 材料研究与应用, 2014, 8(1): 1-5.
CHEN F, YAN Z Q, CAI Y X. Research status and development tendency of aluminum-based alloys and composites fabricated by powder metallurgy[J]. Materials Research and Application, 2014, 8(1): 1-5.
- [50] CHEN J S, CHEN L Q, LI X Y, AO Z X, ZHAO Y L, GUO W, WANG Z, ZHANG W W, LIU L H. Microstructural heterogeneity enabled balance of room-and high-temperature properties in high-volume intermetallics reinforced aluminum alloys[J]. Materials Research Letters, 2026, 14(1): 12-19.
- [51] BAI X, XIE H, ZHANG X, ZHAO D, RONG X, JIN S, LIU E, ZHAO N, HE C N. Heat-resistant super-dispersed oxide strengthened aluminium alloys[J]. Nature Materials, 2024, 23(6): 747-754.
- [52] 毕江,刘雷,张东生,王海翔,郑秋丽,董国疆. 铸造快凝及增材耐热铝合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(4): 969-996.
BI J, LIU L, ZHANG D S, WANG H X, ZHEN Q L, DONG G J. Research progress of casting, rapid solidified and additive manufactured heat resistant aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(4): 969-996.
- [53] HAO C, SUI Y P, YUAN Y, LI P, JIN H, JIANG A. Composition optimization design and high temperature mechanical properties of cast heat-resistant aluminum alloy via machine learning[J]. Materials & Design, 2025, 250: 113587.
- [54] TURAN M E, RASHAD M, ZENGİN H, TOPCU I, SUN Y, ASIF M. Effect of multiwalled carbon nanotubes on elevated temperature tensile and wear behavior of Al2024 matrix composites fabricated by stir casting and hot extrusion[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(8): 5227-5237.
- [55] HE P D, KONG H, LIU Q, FERRY M, KRIZIC J J, LI X D. Elevated temperature mechanical properties of TiCN reinforced Al-Si₁₀Mg fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 811: 141025.
- [56] LI G, HUANG Y H, LI X W, GUO C, ZHU Q, LU J. Laser powder bed fusion of nano-titania modified 2219 aluminium alloy with superior mechanical properties at both room and elevated temperatures: The significant impact of solute[J]. Additive Manufacturing, 2022, 60: 103296.
- [57] ZHU Y L, FANG X G, LYU S L, WU S S, LUO S F, YAN S L, LIU J G, YANG Y W, CHEN Y Q. Enhanced particle dispersion in aluminum melts using multi-source ultrasonic vibration: Simulation and experiments[J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19(3): 1773-1787.
- [58] FEREDUNI E, GHASEMI A, ELBESTAWI M. Selective laser melting of aluminum and titanium matrix composites: Recent progress and potential applications in the aerospace industry, Aerospace, 2020, 7(6): 77.
- [59] ZHANG S, CHEN Z, WEI P, LIU W J, ZOU Y T, LEI Y P, YAO S, ZHANG S W, LU B H, ZHANG L J. Wear properties of graphene/zirconia biphasic nano-reinforced aluminium matrix composites prepared by SLM [J]. Materials Today Communications, 2022, 30: 103009.
- [60] VENKIT H, SELVARAJ S K. Novel approach in manufacturing aluminum-based alternate layered composite material via friction stir additive manufacturing route[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107839.
- [61] WAN H B, LEUNG N, JARGALSAIKHAN U, HO E, WANG C L, LIU Q, PENG H X, SU B, SUI T. Fabrication and characterisation of alumina/aluminium composite materials with a nacre-like micro-layered architecture[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111190.
- [62] ZHUANG W, HUANG Z, LI X, WU Y, SUN Q, LIAO Z, ZHU Z, HAN H, HU W, PEI D. (Al₃Ti-TiN-AIN)/2024Al composite with an unprecedented backbone-like quasi-continuous network structure: Exceptional strength-ductility synergy and heat resistance[J]. Materials Characterization, 2025, 223: 114937.
- [63] YU W L, LUO S W, ZHOU W W, YANG Y, SONG M, CHEN B, JIA L, LIU Z Y, YU Z T, LI W, GUO B S. Unveiling the strengthening and toughening effects of copper-coated carbon nanotubes for the AlLiCu alloy matrix composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146561.
- [64] ZHAO L, LEE T, ZHENG S T, ZHENG W S, RYU S H, ZHANG D, GUO Q. Ultrastrong and deformable aluminum-based composite nanolaminates with transformable binary intergranular films[J]. Nano Letters, 2024, 24(13): 3843-3850.
- [65] HUANG J X, ANDO D, SUTOU Y J. Heat-resistant aluminum alloy design using explainable machine learning[J]. Materials & Design, 2024, 243: 113057.
- [66] ZHAO B B, ZHAN Y Z, TANG H Q. High-temperature properties and microstructural evolution of Al-Cu-Mn-RE (La/Ce) alloy designed through thermodynamic calculation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 758: 7-18.

(责任编辑:李亚敏)