

• 前沿进展 Research Progress •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5189

液态外加纳米颗粒增强铝基复合材料制备方法 及其在汽车领域的研究进展

吴智敏¹, 李世龙^{2,3}, 李建宇^{2,3}, 吕书林¹, 吴树森¹, 徐世伟^{2,3}, 胡嘉瑞², 宋 华⁴, 鲁后国⁴, 张 羽⁴

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074 2. 湖南大学 机械与运载工程学院 整车先进设计制造技术全国重点实验室, 湖南 长沙 410082 3. 湖南大学苏州研究院, 江苏 苏州 215131 ; 4. 安徽江淮汽车集团股份有限公司, 安徽 合肥 223300)

摘 要: 铝基复合材料主要是以纯铝及铝合金作为基体材料, 引入纤维、晶须、颗粒等增强体组合制备而成。其中, 颗粒增强铝基复合材料具有更高的比强度和耐磨性、更低的热膨胀系数和更好的耐高温性能, 是轻质金属结构材料的重要发展方向, 且添加纳米颗粒的铝基复合材料表现出更加优异的性能。目前, 制造纳米颗粒增强铝基复合材料, 分为液态法和固态法。液态法中又根据颗粒加入方式分为外加法和原位自生法。本文主要介绍了液态外加纳米颗粒增强铝基复合材料制备方法及其在汽车领域的研究进展, 分析了这些技术的优缺点, 并对制备该材料的未来发展进行了展望。

关键词: 纳米颗粒; 铝基复合材料; 液态外加法; 制备方法

中图分类号: TG292; TB332; TB383

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)01-0025-14

Liquid-Added Nanoparticle-reinforced Aluminium Matrix Composites Preparation Method and Research Progress in the Automotive Field

WU Zhimin¹, LI Shilong^{2,3}, LI Jianyu^{2,3}, LYU Shulin¹, WU Shusen¹, XU Shiwei^{2,3},
HU Jiarui², SONG Hua⁴, LU Houguo⁴, ZHANG Yu⁴

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Suzhou Research Institute, Hunan University, Suzhou 215131, China; 4. Anhui Jianghuai Automobile Group Corp., Ltd., Hefei 223300, China)

Abstract: Aluminium matrix composites are mainly prepared by using pure aluminium and aluminium alloy as matrix materials and introducing fibre, whisker, particle and other reinforcement combinations. Among them, particle-reinforced aluminium matrix composites have higher specific strength, higher wear resistance, lower coefficients of thermal expansion and better high-temperature resistance, which is an important development direction for lightweight metal structural materials, and aluminium matrix composites with added nanoparticles show even better performance. Currently, the manufacture of nanoparticle-reinforced aluminium matrix composites can be divided into liquid- and solid-state methods. The liquid method, according to the method of particle addition, is the additive method and in situ autogenous method. This paper focuses on liquid-addition nanoparticle-reinforced aluminium matrix composite preparation methods and their research progress in the automotive field, analyses the advantages and disadvantages of these techniques, and looks forward to the development of this material.

Key words: nanoparticles; aluminium matrix composites; liquid addition method; preparation methods

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(52205364); 湖南省教育部优青项目(24B0033); 整车先进设计制造技术全国重点实验室自主课题(734215242); 高温电磁材料与结构教育部重点实验室开放基金(KB202505); 芙蓉计划科技创新类青年人才项目(2025RC3078)

作者简介: 吴智敏, 2000 年生, 硕士生. 研究方向为铝合金成型.

通信作者: 李建宇, 助理教授, 博士. 研究方向为新型铝、镁合金及先进复合材料的设计、制备成形技术. Email: lijianyu@hnu.edu.cn

引用格式: 吴智敏, 李世龙, 李建宇, 吕书林, 吴树森, 徐世伟, 胡嘉瑞, 宋华, 鲁后国, 张羽. 液态外加纳米颗粒增强铝基复合材料制备方法及其在汽车领域的研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(1): 25-38.

WU Z M, LI S L, LI J Y, LYU S L, WU S S, XU S W, HU J R, SONG H, LU H G, ZHANG Y. Liquid-added nanoparticle-reinforced aluminium matrix composites preparation method and research progress in the automotive field[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 25-38.

先进复合材料是一类具有高强度、高模量、轻质、良好延展性和其他所需功能特性的材料。一般来说,复合材料是指至少具有两相的材料,基体材料具有连续性是复合材料的主要成分,纯金属或其合金都可以作为制造复合材料的基体相。复合材料的次要成分是增强相,一般为非连续形式,有纤维、颗粒或晶须等多种类型。金属基复合材料(metal-matrix composite, MMC)是以金属为基体,增强相通常为氧化物、碳化物等微米级或纳米级陶瓷颗粒^[1],广泛应用于汽车、航空航天和军事工业。其中,颗粒增强的金属基复合材料具有各向同性、易于制造等特点,与纤维增强 MMC 相比更便宜。根据增强相的尺寸,金属基复合材料可分为使用宏观或微观尺寸颗粒增强的传统铝基复合材料和纳米颗粒增强的铝基复合材料。颗粒的尺寸通常为数十至数百微米,导致延展性、韧性和强度等机械性能大幅下降。而使用纳米级颗粒来强化金属基体,即所谓的金属基纳米复合材料(metal-matrix nanocomposite, MMNC),能同时保持良好的延展性、高温蠕变性和更好的疲劳性^[2]。

铝基复合材料基体主要有纯铝和铝合金两种。纯铝因其强度低、导热导电及塑性好等特点,常用于制备对强度要求较低但导热导电性能较好的复合材料。铝合金相比于工业纯铝展现出更高的强度,被广泛应用于铝基复合材料基体中。使用铝基复合材料(aluminium-matrix composites, AMCs)可以生产质量相对较低的高强度部件或机器^[3]。这种高强度、低质量的材料在航空航天和汽车领域具有很高的应用价值。常见有纳米颗粒 Al_2O_3 、 SiC 、 B_4C 、 TiC 等增强 AMCs。 Al_2O_3 、 SiC 和 B_4C 性能优越、容易获得、价格低廉,但如果有特殊性能要求,也可以选用成本较高的 TiC 等纳米颗粒^[4]。颗粒增强铝基复合材料目前主要通过固态加工(如粉末冶金、机械合金化等)、液态加工(如搅拌铸造、挤压铸造等)、固液混合法等制造。固液混合铸造工艺是 Chen 等^[5]于 2001 年提出的,近年来又出现了一些相关改进工艺。

在全球节能减排、绿色化发展的大背景下,世界新能源汽车的生产量逐年增加,汽车制造业正朝着轻量化、低能耗、高性能的方向发展,铝基复合材料质重比高、延展性好、热膨胀系数低,具有良好的耐磨性和阻燃性,被大量应用于汽车领域。

本文讨论搅拌铸造、挤压铸造、固液复合、复合烧结铸造等液态途径生产的外加纳米颗粒增强铝基复合材料,及这些方法对颗粒增强铝基复合材料性能的影响,重点介绍近年来在使用不同制备方法

加工纳米颗粒增强铝基复合材料方面开展的工作及其在汽车领域的应用,并对未来发展进行了展望。

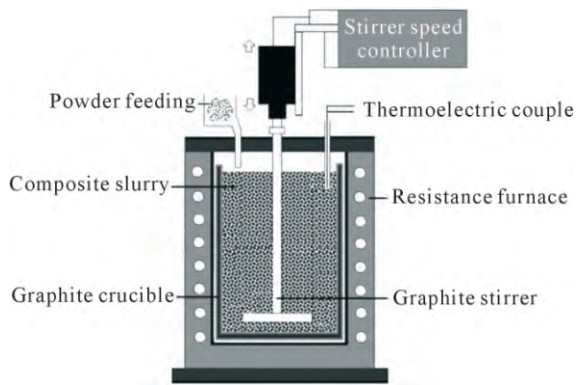
1 制备工艺和机械性能

1.1 搅拌铸造法

搅拌铸造是生产纳米颗粒增强铝基复合材料的一种简单而经济的液态方法,是传统铸造工艺的升级版。传统铸造法生产的铝基复合材料难以将增强材料均匀混合在基体中,基体和增强材料的密度差异阻碍了增强材料在基体中的分布,并造成了团聚的形成,而在熔融混合物中使用搅拌器可以一定程度避免这种情况的发生。将陶瓷纳米材料加入到熔融的铝合金基体材料中,使用高速旋转的机械搅拌装置均匀混合液相和固相,然后将混合物浇铸成铸锭,这种方法一定程度上使强化相能够均匀地分布在基体中,并且基体和强化相之间的界面结合比较好^[6]。

Amouri 等^[7]用 A356 铝合金作为金属基体,平均粒径为 50 nm 和 5 μm 的 SiC 粉末作强化相,采用搅拌铸造技术生产了 A356- 纳米 SiC (0.5%和 1.5%,质量分数)和 A356- 微米 SiC (5%,质量分数)复合材料,测得含有质量分数为 1.5%的纳米 SiC 复合材料拉伸和压缩强度最高。Srinath 等^[8]采用标准搅拌铸造方法,成功制造出了含有质量分数为 5%、10%、15%和 20%纳米 SiC 颗粒增强材料的 Al-6082 合金复合材料。强度评估结果表明,对于需要最大硬度和压缩载荷的应用,含有 20%纳米 SiC 增强材料的 Al-6082MMC 最为合适。在需要最大拉伸载荷的应用中,添加 15%纳米 SiC 增强材料的 Al-6082MMC 最合适。此外,冲击强度评估表明,这种复合材料非常不适合在有冲击载荷的条件下使用。Karbalaei Akbar 等^[9]通过搅拌铸造法制备了体积分数为 1.5% Al_2O_3 和部分 Al_2O_3 金属混合粉末增强 A356 合金纳米复合材料,熔融合金使用配备石墨搅拌系统的电阻炉熔化并进行搅拌铸造,搅拌装置如图 1 所示。结果表明, Al_2O_3 混合金属粉末增强复合材料的晶粒尺寸小于纯 Al_2O_3 增强样品,且与纯 Al_2O_3 纳米颗粒增强复合材料相比,一些使用 Al_2O_3 金属混合粉末增强的复合材料显示出更高的机械性能,这种性能提升与微观结构研究显示的纳米颗粒均匀分布及 A356 基体晶粒细化密切相关。

Abdizadeh 等^[10]通过搅拌铸造和粉末冶金(powder metallurgy, PM)方法,使用 A356 铝合金和纳米 MgO 颗粒(1.5%、2.5%和 5%,体积分数)制备了 A356- 纳米 MgO 复合材料。搅拌铸造的加工温度分别为 800、

图1 搅拌装置示意图^[9]Fig.1 Schematic diagram of the stirring device design^[9]

850 和 950 °C, 粉末冶金加工温度为 575、600 和 625 °C。与搅拌铸造样品相比,粉末冶金样品显示出更多的孔隙率,说明搅拌铸造复合材料的密度值(接近理论密度)高于烧结样品,同时搅拌铸造复合材料的抗压强度值高于烧结样品,这主要是由于在搅拌铸造方法中,铝基体更均匀、孔隙率更小、纳米 MgO 颗粒的润湿性更好。Kaliappan 等^[11]采用搅拌铸造法成功制备了 Al-6061-AlN(50 nm)-SiC(50 nm)混合复合材料,加入纳米 SiC 和 AlN 颗粒后,AlN-SiC 增强颗粒在基体中均匀分散,颗粒-基体界面结合好,拉伸强度、压缩强度和硬度分别从 328 MPa 增加到 385 MPa, 145 MPa 增加到 178 MPa, 302 HV 增加到 724 HV。Suresh 等^[12]用纳米 Al₂O₃ 颗粒作为增强相与 Al-7075 合金和镁(固定比例为 1%)制成了一种混合铝基复合材料。结果表明,在铝基体中加入纳米 Al₂O₃ 增强颗粒可提高机械性能和耐磨性能。Harsha 等^[13]通过搅拌铸造工艺成功制造出了纳米 ZrO₂ 颗粒增强铝基复合材料,与未增强的样品相比,5% 纳米 ZrO₂ 颗粒增强铝基复合材料的硬度提高了 22.5%, 压缩强度增加了 23%, 纳米颗粒在基体中均匀分布,通过奥罗万绕过机制为主导,协同位错增殖、晶粒细化和载荷传递等多种方式,全方位、多尺度地阻碍位错运动,从而大幅提高了材料的屈服强度和抗拉强度。

显然,纳米颗粒可以显著增强铝基复合材料的性能。尽管与其他制备技术相比,搅拌铸造法有很多优点,如制造成本低,能轻松形成复杂的工件,工艺设备相对简单,可适应大规模生产等。但通过搅拌铸造技术加工 MMNC 的主要问题是难以实现纳米尺寸颗粒的均匀分散。由于纳米颗粒与基体合金的密度相差很大,而且增强纳米颗粒的比表面积会更大,导致增强材料与基体合金之间的润湿性很差。一方面,纳米颗粒与熔融金属的润湿性降低会导致纳米颗粒在 MMNC 很难均匀分布;另一方面,较弱的润湿性会导致各成分之间的载荷传递不完

全,从而降低材料的机械性能^[14]。

为了克服这一缺点,许多研究者采用了搅拌铸造与超声波空化相结合的方法,即在机械搅拌过程中将纳米尺寸的增强颗粒超声分散到熔融的基体合金中,破碎增强颗粒团和团聚体,使其均匀分散,然后再转移到铸造模具中进行凝固。使用高能超声波技术处理金属或合金熔体时,声空化效应产生的瞬时高压和高温可激活颗粒的表面能,降低熔体的表面能。在短时间内改善组分之间的润湿性和相容性,促进颗粒和熔体的融合。该技术是改善金属或合金凝固微观结构及机械性能的有效方法,被广泛应用于制备颗粒增强铝基复合材料中^[15]。

Venkatesh 等^[16]通过超声辅助搅拌铸造法合成了质量分数为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料,如图 2 所示。在 Al-0.5%SiC、Al-1.0%SiC 和 Al-1.5%SiC 复合材料中观察到纳米 SiC 颗粒均匀分散,其中 1.5% 纳米 SiC 颗粒增强的复合材料 UTS 值为 431 MPa,硬度为 163 HV,均优于 0.5%SiC、1.0%SiC 和 2.0%SiC 增强的复合材料。Rao 等^[17]采用超声波空化辅助搅拌铸造方法制造了纳米 SiC 颗粒增强的 Al-7075 基体复合材料,所有复合材料中都含有颗粒大小均匀且分散均匀的纳米碳化硅颗粒。通过 EDS 和 XRD 表征证实,复合材料中没有形成氧化物、次生相或杂质的痕迹。并且随着纳米 SiC 颗粒的增加,复合材料的机械性能也得到了显著改善。Madhukar 等^[18]通过超声波辅助搅拌铸造技术制造了 Al-7150-hBN(六方氮化硼)纳米复合材料,并对其机械和耐磨性能进行了研究,发现提高 hBN 含量可增加纳米复合材料的硬度和强度(151.3~180.2 HV 和 141~255 MPa),纳米复合材料的磨损损耗随着纳米 hBN 颗粒增加量的增加而降低。Balamurugan 等^[19]研究了 TiC 和稻壳灰(RHA)对采用两步超声辅助搅拌铸造工艺制备的 Al-6061 混合复合材料的增强效果。不同 TiC(3%、6%、9% 和 12%)作为增强相,RHA 质量百分比保持不变(3%)。研究表明,含 12%TiC 和 3%RHA 的复合材料显示出更好的抗侵蚀性。Yang 等^[20]采用超声波辅助搅拌铸造法制造了含有纳米尺寸 SiC 的块状 A356 纳米铝基复合材料,对其微观结构和力学性能进行了研究,结果表明超声波辅助搅拌铸造法可以改善增强体与基体之间的润湿性,促进颗粒分散,降低孔隙率,提高强度,因此可以作为辅助工艺来改善纳米颗粒在熔体中的分布。Soni 等^[21]采用超声液体处理(ultrasonic liquid processing, ULP)和球磨(ball milling, BM)进行了预处理辅助熔融搅拌铸造方法制备了 Al-6061 复

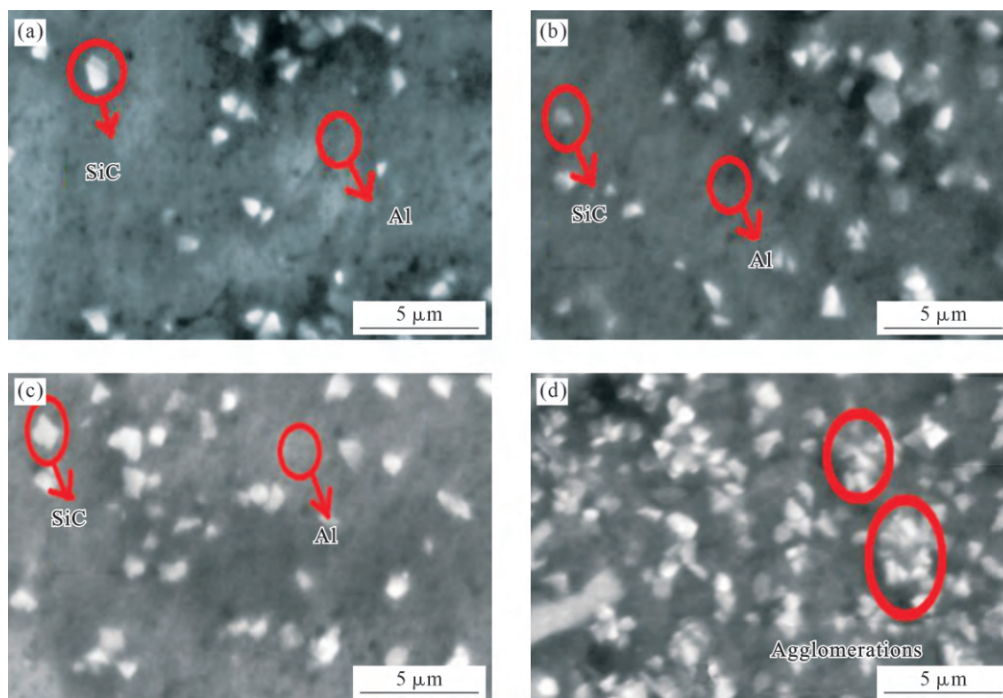


图2 铸造后复合材料的SEM像:(a) Al-0.5%SiC; (b) Al-1.0%SiC; (c) Al-1.5%SiC; (d) Al-2%SiC^[16]
Fig.2 SEM micrographs of the as-cast composites: (a) Al-0.5 wt.% SiC; (b) Al-1.0 wt.% SiC; (c) Al-1.5 wt.% SiC; (d) Al-2 wt.% SiC^[16]

合材料(2%SiC)和Al-6061复合材料(2%BN、2%TiO₂、2%Al₂O₃),机械性能调查显示,通过超声波辅助熔融搅拌法制备的试样比通过传统熔融搅拌技术制备的试样具有更高的强度和硬度。

综上所述,超声波辅助搅拌铸造可以有效地将纳米颗粒(小于100 nm)分散到合金熔体中,并增强其润湿性,提高其性能,为制备高性能MMNC提供了理想选择。

1.2 挤压铸造法

挤压铸造是将熔融合金通过冲头挤压填充模具在高压下凝固,最后产生轻微变形(变形量等于凝固过程中的合金收缩量)。挤压铸造的特点是采用大浇口面积(与传统压铸相比)和平面填充模具型腔内的金属前沿。这种技术生产的零件具有优越的表面光洁度和较小的孔隙率,兼具铸造和锻造的优点。因此,挤压铸造也被用于制备铝基复合材料。其工

艺原理如图3所示,熔融金属被倒入模具,并在挤压杆的高压下凝固^[22]。挤压铸造能有效实现所需的机械、物理和冶金性能。

Kannan等^[23]分别用挤压铸造和搅拌铸造制备了质量分数为2%的纳米Al₂O₃颗粒增强Al-7075铝合金,与搅拌铸造相比,挤压铸造的纳米颗粒增强复合材料极限抗拉强度提高了约16%。Alizadeh等^[24]采用搅拌铸造和挤压铸造相结合的工艺制备了质量分数为20%、25%和30%SiCnp增强的Al-5083复合材料。结果表明,在含有30%SiC的样品中,挤压铸造通过高压迫使金属熔体高速冲散团聚的SiC颗粒,并将其强行渗透到团聚体的缝隙中,使其破碎、分离从而减少SiC颗粒的团聚来改善其颗粒分布,并将样品的孔隙率从2.32%降低到1.29%,这些改性导致了机械性能的增强。此外,由于磨损碎片的尺寸减小以及磨损区域更小,通过组合铸造方法制备的

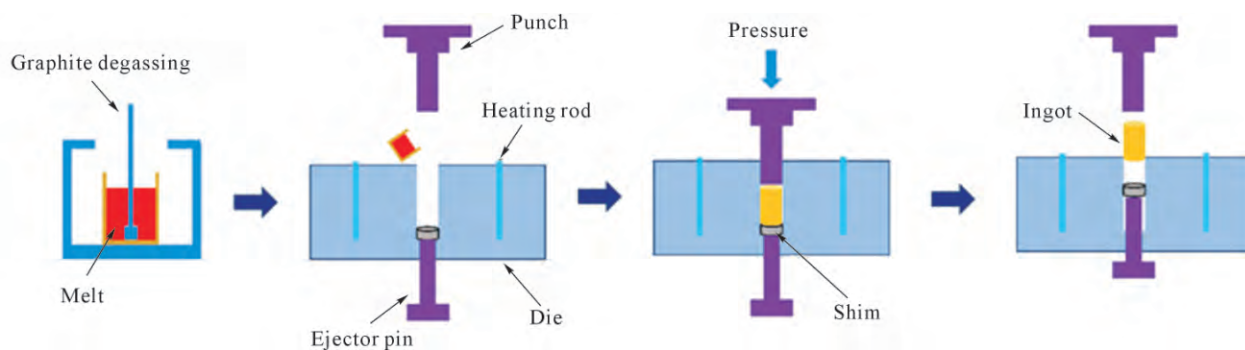


图3 挤压铸造工艺示意图

Fig.3 Schematic diagram of the squeeze casting process

样品耐磨性提高。Zhu 等^[25]采用挤压铸造(squeeze casting, SC)和搅拌铸造相结合的方法制备了 SiCnp/Al-6082 铝基复合材料,结果见图 4。采用搅拌铸造法,复合材料的铸造极限拉伸强度、屈服强度和断后伸长率与未添加 SiCnp 的 6082 基合金相比,分别提高了 8.92%、12.16%和 12.60%;而经过 SC 处理的 SiCnp/Al-6082 复合材料致密性显著提高,晶粒也进一步细化,与重力铸造(gravity casting, GC)获得的 6082 铝合金相比, SiCnp/Al-6082 复合材料的极限拉伸强度、屈服强度和伸长率分别提高了 29.81%、43.18%和 226.28%。

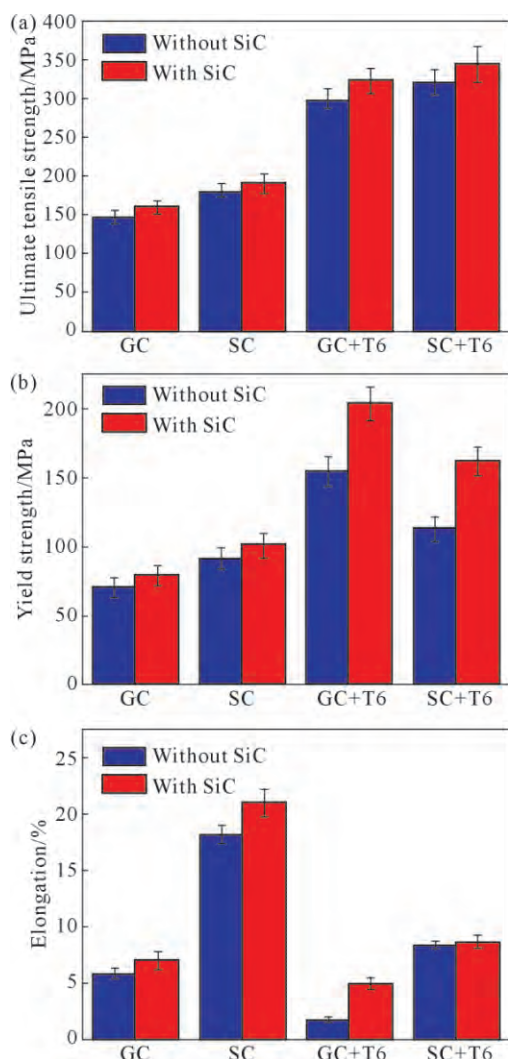


图 4 不同铸造方法获得的 6082 铝合金及 SiCnp/Al6028 复合材料在铸态和 T6 热处理条件下的力学性能:(a) 抗拉强度;(b) 屈服强度;(c) 伸长率^[25]

Fig.4 Mechanical properties of the 6082 aluminium alloys and SiCnp/Al6028 composites obtained by different casting methods under as-cast and T6 heat treatment conditions: (a) ultimate tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation^[25]

与搅拌铸造类似,许多研究者将挤压铸造与超声波空化相结合实现纳米颗粒增强体的均匀分布。Singh 等^[26]以 Al-6061 为基体材料,制备纳米 Al_2O_3

颗粒增强铝基复合材料,并将超声挤压铸造工艺与超声搅拌铸造工艺制备的复合材料力学性能进行对比,结果表明超声辅助挤压铸造工艺制备的复合材料的抗拉强度、抗压强度和硬度等力学性能均高于超声辅助搅拌铸造工艺制备的复合材料。Gnanavelbabu 等^[27]研究了超声波辅助挤压铸造参数对 AA-2014/ Al_2O_3 纳米复合材料制造的影响,结果表明最佳参数组合为超声波功率 2.248 9 kW、超声波时间 15.91 min、浇注温度 700.67 $^{\circ}\text{C}$ 、挤压力 41 MPa 和增强体质量百分比 1.85。

综上所述,挤压铸造制备的纳米颗粒增强铝基复合材料由于在压力下凝固,挤压铸造件通常具有更均匀的密度、精细的结构和较高的力学性能,为制备形状复杂、尺寸精度要求高的零件提供了一个理想选择。

1.3 复合烧结铸造法

烧结工艺广泛应用于固态法制备颗粒增强铝基复合材料,近年来也出现了将其与液态铸造工艺相结合制备纳米颗粒增强铝基复合材料。首先,机械球磨法能将纳米颗粒团簇被提前打散,有利于纳米颗粒在基体中的分散;其次,将 Al 与纳米颗粒烧结以混合压坯的形式加入到铝熔体中,实现了纳米颗粒在基体中的均匀分散,同时成功避免了纳米颗粒与熔融纯 Al 的界面反应;最后通过重力或搅拌等铸造成型。这种结合了烧结和铸造的方法可以克服单一铸造方法中颗粒分布不均匀和界面结合不良的问题,同时也能够提高材料的致密度和力学性能^[28]。

Su 等^[29]在高纯度氩气环境下,将商品铝粉和纳米 Al_2O_3 粉以不同球磨时间混合,得到的复合粉末在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下烧结 2~5 h,然后加入熔体中,并对液态铝进行机械搅拌后将浆料倒入预热的钢模中铸造。图 5 展示了不同球磨时间复合粉末表面的代表性 SEM 像。图 5d 中的纳米 Al_2O_3 颗粒在球磨 10 h 后更均匀地分布在铝粉表面。为便于比较,还在相同条件下制备了 Al-2024 合金。与传统的搅拌铸造相比,0.6% Al_2O_3 /Al-2024 纳米复合材料的拉伸强度、屈服强度和硬度分别提高了 59%、58%和 16%。

Wang 等^[30]通过半固态搅拌铸造和热挤压烧结联合工艺,将纳米级 SiCp/Al 烧结块体分散到熔融 Al-Cu 合金中,成功制备了含有纳米级 SiCp 的 Al-Cu 基复合材料。研究发现在铝铜基体中加入纳米级 SiCp 后,复合材料的拉伸强度显著提高,尤其是在 453 K 的温度下,但其塑性仍然很高,提高了铝基复合材料作为轻质材料在高温下应用的可能性。Zhang 等^[31]采用半固态搅拌结合热挤压烧结的方法,成功

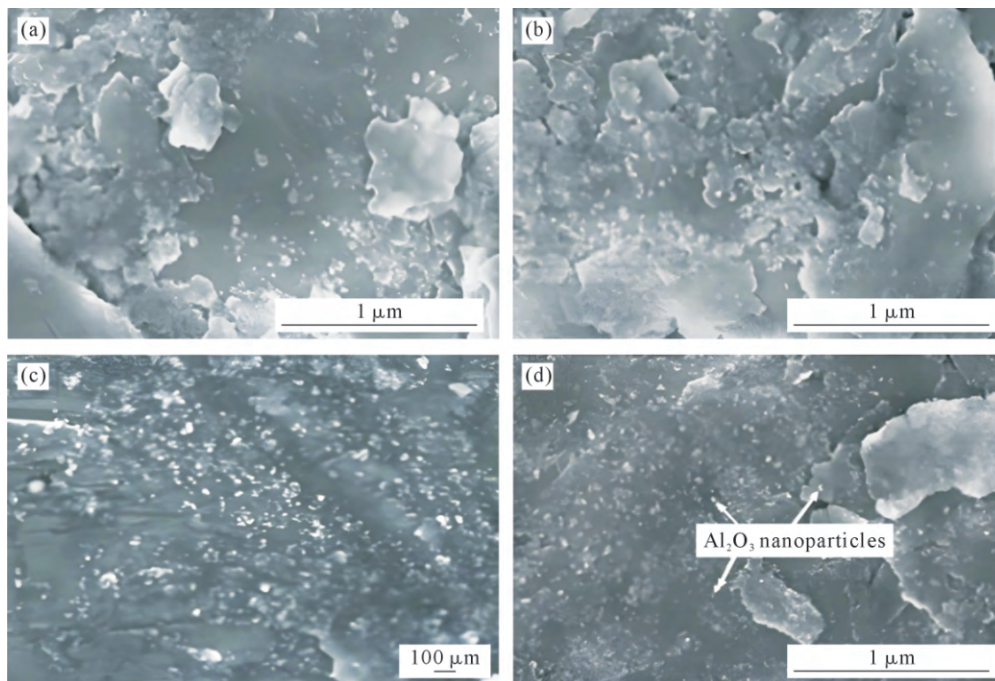


图 5 不同球磨时间纳米 Al_2O_3 -Al 粉末混合物 SEM 像: (a) 2 h; (b) 5 h; (c) 8 h; (d) 10 h^[29]

Fig.5 SEM images of nano- Al_2O_3 -Al powder mixtures with different ball milling times: (a) 2 h; (b) 5 h; (c) 8 h; (d) 10 h^[29]

制备了纳米 SiC 颗粒增强的 Al-2014 基复合材料,发现添加体积分数为 0.5% 的纳米级 SiC 颗粒可显著提高 Al-2014 合金的抗拉强度,同时不影响延展性。与 Al-2014 合金相比,0.5% 纳米 SiCp/Al-2014 复合材料的屈服强度、极限拉伸强度和断裂应变分别从 242、460 MPa 和 17.1% 提高到 306、532 MPa 和 17.7%。Li 等^[32]通过球磨首先将 Al 粉和纳米 SiC 粉均匀混合后冷压烧结,并结合超声波搅拌铸造将纳

米 SiCp(60 nm)以不同体积分数(即 1%、3%、5%、7% 和 9%)添加到工业纯 Al 中,结果表明当体积分数为 7% 时,纳米 SiCp 在基体中获得了相当均匀的分散。Zhou 等^[33]成功利用烧结和重力铸造制备了 Ni 包覆纳米 TiCp 增强 Al-Cu 基复合材料。不同纳米 TiC 颗粒增强的 Al-Cu 复合材料的典型工程/真实应力-应变和加工硬化率曲线如图 6 所示。研究发现,质量分数为 0.8% 的纳米 TiCp/Al-Cu 复合材料具有最

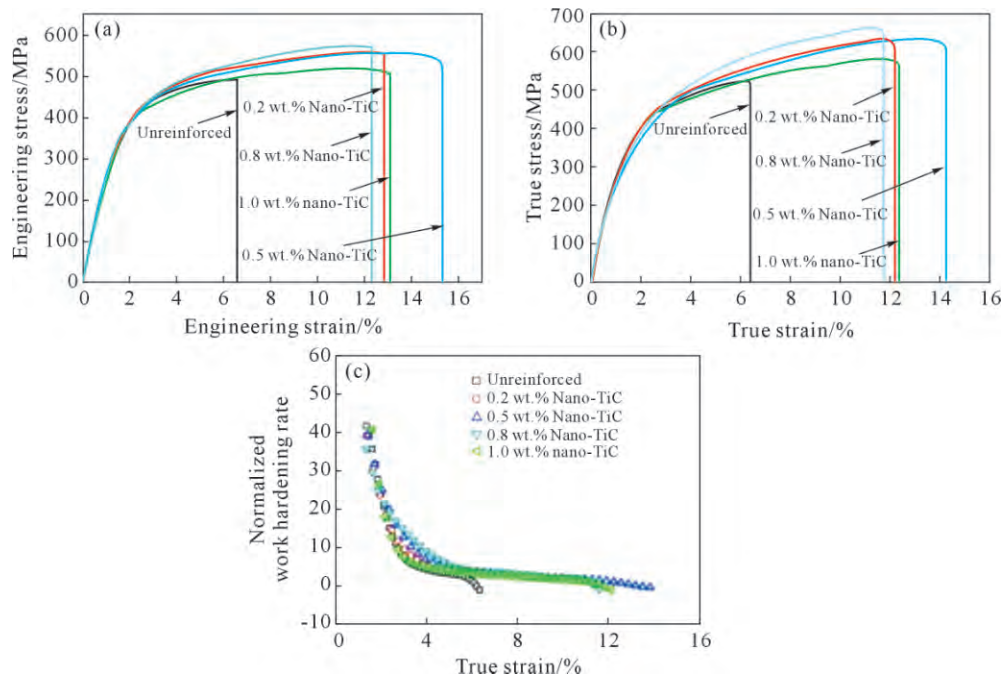


图 6 不同纳米 TiC 颗粒含量的 Al-Cu 合金和纳米 TiCp/Al-Cu 复合材料的力学曲线: (a) 工程应力-应变曲线; (b) 真实应力-应变曲线; (c) 加工硬化率-真实应变曲线^[33]

Fig.6 The mechanical curves of Al-Cu alloys and nano-TiCp/Al-Cu composites with different nano-TiC particle contents: (a) engineering stress-strain curves; (b) true stress-strain curves; (c) work hardening rate-true strain curves^[33]

高的抗拉强度(573 MPa)和良好的伸长率(12.4%),其抗拉强度和延展性比 Al-Cu 合金分别提高了 18% 和 88%。Dong 等^[34]通过真空烧结和重力铸造成功制备了纳米 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料,研究了 TiB₂ 颗粒尺寸和形态的调整机制,复合材料中的 α -Al 树枝状原生析出物、共晶硅析出物和 θ' 析出物分别细化了 79.2%、51.9%和 37.6%。Tian 等^[35]通过烧结和重力铸造制备了不同量的纳米 TiCp(0.1~0.7%)增强 Al-Cu 基合金,研究了温度和应变速率对 Al-Cu 基合金和纳米 TiCp/Al-Cu 复合材料高温拉伸性能和 θ' 析出物沉淀尺寸的影响。结果表明,复合材料在 453 K 时屈服强度的提高主要归因于精制 θ' 析出物和 TiCp 的强化作用。而在 493 K 时,由于 θ' 析出物在此温度下显著粗化,只有 TiCp 的强化作用占主导地位。

综上所述,复合烧结铸造法可以通过精确控制烧结和铸造参数,获得具有优良性能的颗粒增强铝基复合材料,但其整个制备过程相对复杂,且成本较高。

1.4 固液复合法

搅拌铸造由于颗粒的分散性和润湿性问题使颗粒难以均匀分布在熔融金属中,而挤压铸造工艺在生产铝基复合材料的过程中也发现了团聚和多孔现象,这两种现象都会对复合材料的特性产生影响。为了进一步使颗粒在基体中分散均匀,促进增强体与基体之间界面的结合,出现了将高能球磨与超声辅助挤压铸造相结合的固液复合新技术。首先将增强体粉末与 Al 粉球磨获得增强体/Al 复合颗粒,再将复合颗粒加入熔体中超声分散进行挤压铸造。

高能球磨在固相法中较为常用,首先将增强材料和其他粉末混合,提供一个新界面,即 Al/Al 界面,以取代添加到 Al 熔体中的陶瓷增强材料和 Al 熔体之间的界面,然后通过机械搅拌实现增强体与 Al 熔体之间的预混合^[36]。高能球磨可以明显降低反

应活化能、细化晶粒、极大提高粉末活性和改善颗粒分布均匀性及增强体与基体之间界面的结合^[37]。然而,由于纳米颗粒的高比表面积会导致其在铝熔体中的润湿性较低,因此很难将混合物中的增强体从熔体中释放出来,所以出现了将高能球磨与超声处理相结合的新技术,超声波振动可打破纳米颗粒在熔融铝液中的团聚,改善其润湿性,同时,声流可促进纳米颗粒在熔融金属池中的均匀混合。

Woo 等^[38]采用高能球磨法合成了纳米金刚石增强铝基复合材料,研究了各种研磨条件对所得 MMC 粉末结构和性能的影响,发现球粉比为 10:1、研磨时间为 10 h、纳米金刚石含量为 10%(质量分数)最能有效获得小粒径粉末、小尺寸铝晶体,并改善机械性能,使硬度达到 3.46 GPa,比未经处理的原始铝粉(1.10 GPa)提高了 210%。Kandemir 等^[39]采用球磨、超声波辅助挤压铸造制备了 A357/0.5%(质量分数)纳米 SiC 复合材料,对制备的纳米复合材料微观结构和机械性能进行了研究。发现纳米 SiC 颗粒在熔融合金中实现了相对有效的脱聚和均匀分散。纳米复合材料的硬度和拉伸性能与经超声波处理的未增强的 A357 合金相比有了明显改善,这表明纳米颗粒具有增强能力,并且在颗粒增强界面处获得了良好的结合。

Arunkumar 等^[40]利用 Al6061 合金与纳米级 SiC (ALS)、Al₂O₃(ALSA)和 TiO₂(ALST)作为增强材料,通过高能球磨、超声辅助挤压铸造制造出混合金属陶瓷,如图 7 所示。通过拉伸、磨损和热研究,评估了纳米颗粒对物理、热和机械性能的影响,与基础合金 Al-6061 相比,ALS、ALSA 和 ALST 的极限拉伸强度分别提高了 21.36%、35.68%和 27.5%。同样,硬度也比基础材料提高了 10.29%、14.28%和 15.7%;混合金属陶瓷的磨损率和腐蚀率分别降低了 71.52%(20 N 负载)和 97%(ALST 复合材料)。

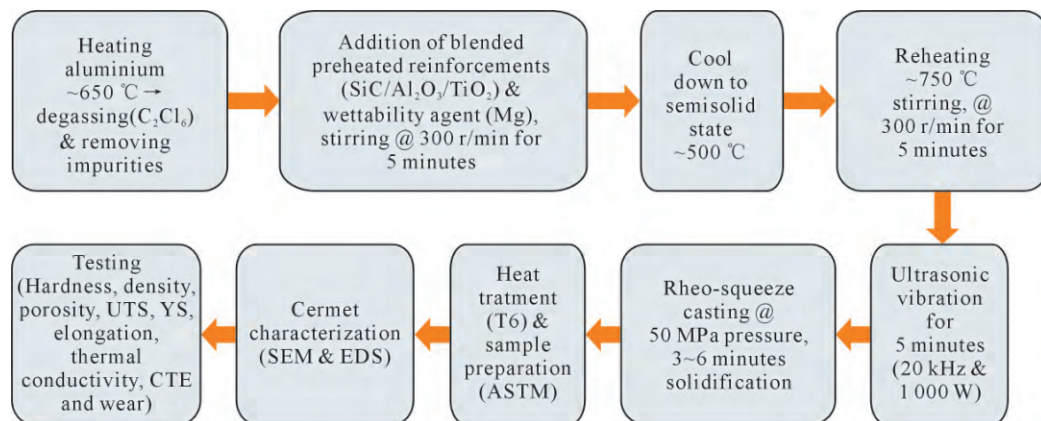


图 7 制造陶瓷颗粒增强铝基复合材料的工艺流程^[40]

Fig.7 Process flow chart for manufacturing ceramic particle-reinforced aluminium matrix composite materials^[40]

Li 等^[41]通过干法高能球磨、超声波振动和挤压铸造联合工艺制备并改善了纳米级 SiC 颗粒(SiCnp)增强 Al-5Cu 合金基复合材料的颗粒分布,图 8 为超声波振动处理系统示意图。复合材料分别用超声处理 1、3 和 5 min,颗粒在基体中的分布情况如图 9 所示。采用超声处理后,纳米级 SiCp 的分布得到了极大改善。同时,与 Al-5Cu 基合金相比,经超声处理 5 min 的 1% 纳米 SiCp/Al-5Cu 复合材料极限拉伸强度、屈服强度和伸长率分别为 270、173 MPa 和 13.3%,提高了 7.6%、6.8%和 29%。

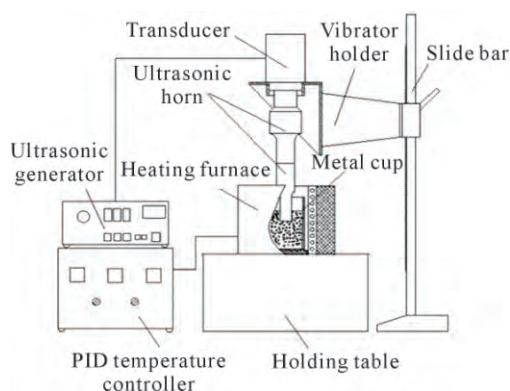


图 8 超声波振动处理系统简图^[41]

Fig.8 Schematic diagram of the ultrasonic vibration treatment system^[41]

Yuan 等^[42]通过高能球磨和超声辅助挤压铸造合成了含有 2% 纳米 SiCp/A356 铝基复合材料,纳米碳化硅颗粒在基体中分散良好,没有发现严重的

团聚现象。同时研究了超声波振动(ultrasonic vibration, UV)处理和挤压铸造对细化的影响,并重点探讨了纳米 SiCp 分布对细化的作用,结果表明,超声处理和挤压铸造两种工艺都可以通过调节纳米碳化硅的分布来影响细化效果。纳米 SiCp 的分散性越好, α -Al 和共晶 Si 相的细化效果就越好。图 10 显示了在不同压力下通过挤压铸造制备的 2% SiCp 增强 AMCs 的扫描电镜图像。从图中可以推断出,共晶区域面积随着施加压力增加而迅速减小,这与铝晶粒数量的增加一致。在传统铸造中,即在 0 MPa 时,共晶硅相的平均直径和长宽比分别为 1.2 和 2.8 μm (图 11)。当施加的压力为 100 MPa 时,复合材料中共晶 Si 相的平均直径和长宽比分别为 0.92 和 2.33 μm 。但随着压力进一步升高,共晶硅相的形态变化很小。

Pragathi 等^[43]通过球磨、超声波辅助挤压铸造和传统挤压铸造两种铸造工艺制造了铝基复合材料。铝基复合材料是用两种不同的碳化硅(SiC)(质量分数为 1%和 2%,平均粒径为 288 和 272 nm)和废催化剂(WSC)加固而成。根据微观结构特征,与传统的挤压铸造工艺相比,超声波辅助挤压铸造工艺提高了强化颗粒的均匀分散性,使用超声波辅助挤压铸造法生产的 2%SiC 铝基复合材料的最大拉伸强度为 375 MPa,比传统挤压铸造法高 64.47%;硬度比传统挤压铸造法生产的高 65.59%。总之,与挤压铸造方法相比,超声波辅助挤压铸造可

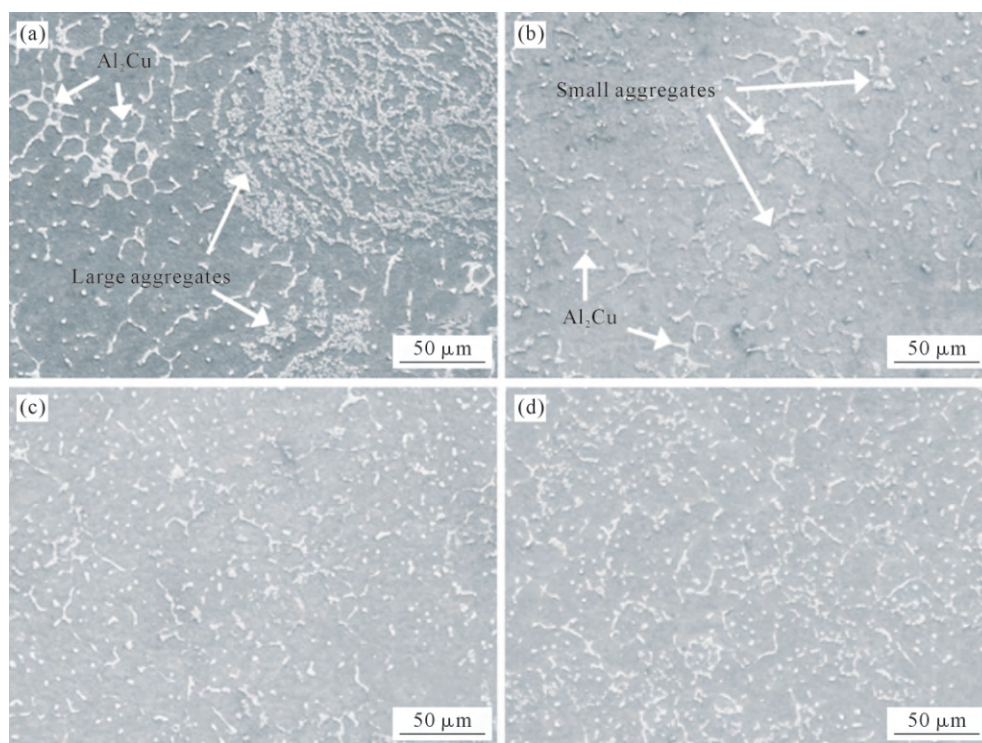


图 9 不同超声处理时间复合材料相中的颗粒分布:(a) 0 min; (b) 1 min; (c) 3 min; (d) 5 min^[41]

Fig.9 Particle distribution through the bulk matrix of composites treated with UV light for different durations: (a) 0 min; (b) 1 min; (c) 3 min; (d) 5 min^[41]

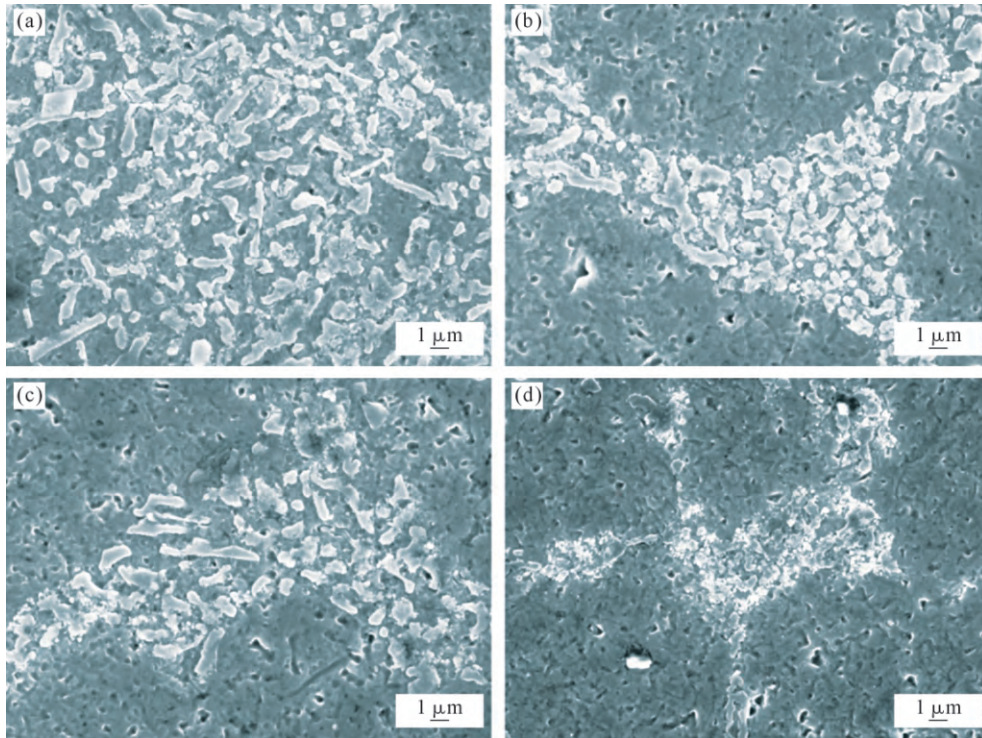


图 10 不同压力挤压铸造的 2%SiCp/AMCs SEM 像:(a) 0 MPa; (b) 100 MPa; (c) 200 MPa; (d) 400 MPa^[42]

Fig.10 SEM images of 2 wt.% SiCp/AMCs squeeze cast at different pressures: (a) 0 MPa; (b) 100 MPa; (c) 200 MPa; (d) 400 MPa^[42]

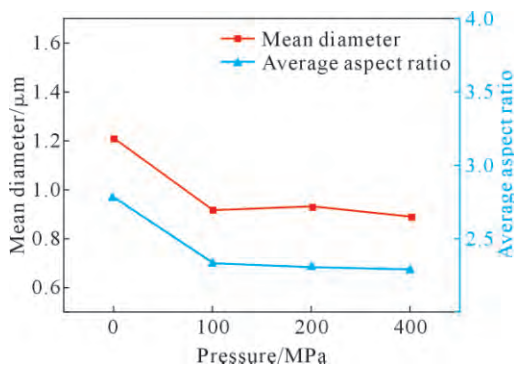


图 11 以不同挤压压力制备的 2%AMNCs 平均直径和外形^[42]

Fig.11 Mean diameter and aspect of 2 wt.% AMNCs prepared with different applied pressures^[42]

改善复合材料的微观结构和机械特性。Su 等^[44]通过球磨结合超声波处理,成功制备了纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ -2024 复合材料。研究发现,添加经研磨的纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合粉末有助于缓解熔体中润湿性差和纳米颗粒分布不均的问题。凝固过程中对复合材料浆料进行超声波振动有利于细化晶粒微观结构,改善纳米 Al_2O_3 在基体中的分布。同时与合金基体相比,1%纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/2024$ 复合材料的极限拉伸强度和屈服强度分别提高了 37%和 81%。Murthy 等^[45]通过球磨、超声波辅助途径成功制备了铝-粉煤灰(物相主要是 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)纳米复合材料,基体和增强剂之间的润湿性得到了增强,所制造的纳米复合材料不含任何来自大气的额外污染,且随着纳米粉煤灰

用量增加,复合材料硬度也随之增加。Chen 等^[46]通过固液复合法研究了纳米 Al_2O_3 在 Al-7075 中的分布和团聚程度与合金微观结构的关系,讨论了凝固前沿前方存在的纳米颗粒对界面形状的影响。微观结构研究表明,复合材料的微观结构取决于纳米 Al_2O_3 团聚的尺寸和程度。局部熔体的成分过冷和颗粒后面溶质的积累导致了胞状界面的形成。

综上所述,固液复合法可以通过球磨超声改善金属间界面结合、均匀分散增强颗粒,从而大大提升铝基复合材料的性能。

2 铝基复合材料在汽车领域的应用

汽车领域对高性能、轻量化的需求奠定了铝基复合材料作为先进材料的地位。利用不同增强体及基体的特性所制备的轻质高强、耐腐蚀及优异导热导电等诸多性能的铝基复合材料,逐渐成为汽车领域应对不同服役条件的关键材料,被广泛应用于汽车重要零部件中。在汽车动力组成中,气缸、缸盖、缸套、离合器和变速器(凸轮轴、差速器和传动轴等)都使用铝基复合材料铸件。在机械组成和内饰中,车轮、刹车片、悬架(控制臂、底座)、导向片(安全气囊支撑、传动轴、万向节)、座椅、轮子和仪表板等也都使用了铝铸件。此外,铝基复合材料还在保暖防护、防撞保护、气动框架、油底壳、位置轮廓、副作用板等方面有不同的应用。

2.1 铝基复合材料车身

采用铝基复合材料作为车身材料可以极大地减轻整车质量,从而达到实现轻量化、减少排放的目的。最新研究表明,以铝代钢可以减少整车质量约30%,而每减少10%的整车质量,可以减少约7%的燃料消耗和尾气排放^[47]。现在大部分新能源汽车也普遍采用全铝车身减轻质量、提升整体动力学性能。此外,铝合金及铝基复合材料是制作前后端结构、汽车保险杠和其他碰撞管理部件的重要材料,在车辆撞击时,可以有效吸收撞击产生的能量,起到缓冲作用。英国 Alvant 公司以先进液体压力成型(advanced liquid pressure forming, ALPF)的工艺开发了一种适用于车身结构强化部分的高性能铝基复合材料,这材料具有轻质、高强度、高耐磨性等特点。奇瑞新能源汽车选择铝合金挤出型材和纤维增强铝基复合材料分别作为车身骨架和覆盖件材料,利用一体化制造,实现了短流程、低耗材、低排放和智能化生产。宝马新3系保险杠系统中也应用了铝基复合材料,通过精密的设计和材料选择,实现了在碰撞时的有效能量分散和乘员保护。本田 NSX 的冲压车身结构和外部面板就使用了 210 kg 的铝基复合材料,如图 12 为奥迪 AL2 概念车,其采用全铝基复合材料车身,比使用传统材料车身轻了 40%。铝基复合材料在车身结构中的应用通过轻量化设计、提高刚

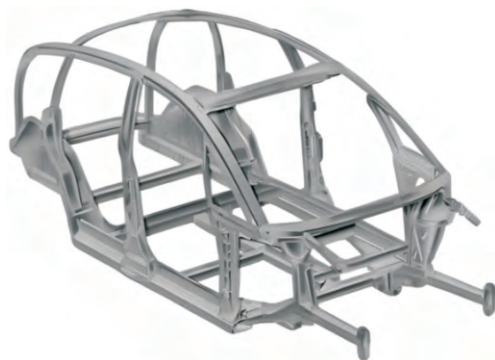


图 12 奥迪 AL2 采用全铝基复合材料车身结构示意图

Fig.12 Audi AL2 using all aluminium matrix composite body structure diagram

性和吸能性等方式,显著提升了汽车的性能和安全性。需要通过选择合适的材料和合理的加工工艺,使铝基复合材料具有优异的性能,以适应汽车车身对轻质高强、安全性、耐久性的要求。

2.2 铝基复合材料气缸套

缸套是发生点火的高温室,因此必须具有很好的耐磨性和抗蠕变性。传统的气缸套材料主要是灰铸铁,但随着发动机性能要求的提高,传统灰铸铁气缸套的性能已远不能满足要求,现在普遍用铝及其合金制造。根据气缸套的结构特点、安装方式和冷却液循环系统,气缸套可分为整体式、干式和湿式。整体式气缸套与缸体是一体铸造的,可减小气缸孔间距并减少缸体的整体轴向长度,整体缸套与冷却液直接接触,从而确保更好的热传递。由于外表面是与缸体同时铸造的,不平整且粗糙,因此更容易产生热变形,制造成本低是它的一大优势。湿式气缸套在一些重型大排量发动机中很常见,包括外部冷却剂循环装置,能确保在所有工作条件下都能更好地传热,这使得它们体积更大,成本更高,且单个缸套可以拆卸。干式气缸套是可拆卸式的,主要由铝硅合金制成。这些气缸套设计成简单的桶状,上端带有法兰。由于这些冷却器不与外部循环冷却液直接接触,因此不会出现泄漏、污染或气蚀,缺点是散热能力的降低。图 13a 和 b 分别为干式气缸套和湿式气缸套在气缸内的截面图。本田公司开发的增强铝基复合材料发动机缸套成功应用于该公司的 S2000 直列四缸发动机和 Acura 汽车 V6 发动机中。美国福特汽车公司利用热喷涂技术制造出的铝基复合材料缸套,用于福特野马 ShelbyGT500 发动机上。利用高共晶铝硅复合材料(Al-Si)制成的 MMC 气缸套不仅具有更好的热传导性,而且还能减轻电机的总体质量。这种复合材料被通用发动机、保时捷、奥迪、梅赛德斯-奔驰、大众汽车和宝马等汽车制造商广泛采用。利用初晶 Si、 Mg_2Si 颗粒增强铝基功能梯度复合材料制备的气缸套具有质量轻、高硬度、高耐磨、高



图 13 气缸套:(a) 干式气缸套;(b) 湿式气缸套

Fig.13 Cylinder liners: (a) dry cylinder liner; (b) wet cylinder liner

耐热性及较低的热膨胀性等特点,其通过离心铸造法制备内层富含高硬度、高耐磨性颗粒的增强层,外层没有或存在少量增强颗粒,具有良好的机械加工性能。Duralean 公司制造的气缸套、活塞等零部件均采用了这种铝基复合材料。Mallick 等^[48]讨论了离心铸造铝硅复合材料的详细制造过程,深入研究了各种参数对机械和摩擦学性能的影响,为开发气缸套的材料选择、参数选择和加工程序设计提供了新思路。

2.3 铝基复合材料活塞

活塞是汽车发动机的重要零件,其工作环境非常恶劣,承受着循环交变机械载荷和热载荷。所以活塞应具有良好的强度、出色的耐磨性和热膨胀系数。铝基复合材料在耐磨性、高温力学性及尺寸稳定性方面的研究已经取得了显著进展。铝基复合材料的晶粒强化相可以是 Al_2O_3 、 SiO_2 、 SiC 或者 TiB_2 等,通过超声空化等方式将这些颗粒材料添加到铝液中,使得颗粒均匀分散,从而提高整体和局部的耐磨性和高温力学性能。而且 AMCs 的热膨胀系数较低,可以减少对表面的磨损。Maciej^[49]在工业条件下,制备了 $\text{SiCp}10\%$ (体积分数)+ AlSi7Mg_2 复合材料,用于铸造系列半成品活塞,通过添加 2%Mg(质量分数)来改变基体合金的化学成分,有利于增强和基体结合,使 $\text{SiC}(10\%, \text{体积分数})$ 颗粒在基体中分布均匀。Dolata 等^[50]研究了碳化硅(SiCp)、玻璃碳(GCp)和混合颗粒($\text{SiCp}+\text{GCp}$)增强铝基复合材料制造的活塞和活塞环之间的摩擦学相互作用,结果表明 AlSi12CuNiMg/SiCp 和 $\text{AlSi12CuNiMg/SiCp}+\text{GCp}$ 复合材料均能有效降低被测摩擦副的摩擦因数及磨损。图 14 为使用铝基复合材料制备的柴油发动机活塞。

2.4 铝基复合材料制动系统

刹车盘在车辆制动系统中起着关键作用,AMCs 由于具有高耐磨性和高导热性等特点,被广泛用于汽车刹车盘的制造。采用非连续强化的铝基复合

材料(DRA)可将制动盘质量降低约 50%,从而增加燃油效率,缩短制动距离。保时捷 911、大众 Lupo、丰田 RAV-4EV 等的制动圈就是由非连续强化 AMCs 制成的。Babu 等^[51]通过离心铸造法制造 SiC 颗粒增强的铝复合材料制动盘,在制动盘中形成了功能分级结构,离心力将制动盘内部的硬质碳化硅颗粒迁移到制动盘的外部制动区域,从而提高了制动盘的硬度、强度和耐磨性。Kumar 等^[52]概述了硅作为主要合金元素对改善热特性的重要意义,并结合各种增强材料,以提高 AMCs 在制动盘中的耐磨性和热稳定性,重点介绍了 AMCs 制动盘与传统铸铁制动盘相比在热学和摩擦学方面的性能表现,讨论了评估制动盘摩擦学特性所需的设备,以满足工业要求。

2.5 其他铝基复合材料零部件

铝基复合材料也广泛用于汽车轮毂、进气阀、排气阀、连杆、传动轴、曲轴和凸轮轴等零件。用 SiC 和石墨强化的铝基复合材料制成的曲轴正处于改进阶段,碳纤维增强铝基驱动轴和颗粒增强铝基轮胎螺栓已经在车辆上得到了广泛应用,具有轻量化、强度高和动力性强等优势。 SiC 、 Al_2O_3 增强铝基复合材料制造的连杆,与钢制连杆相比,质量减少了约 57%^[53]。通过使用铝制连接杆,可以降低燃料利用率并提高电机效率。

3 总结与展望

纳米级颗粒增强的 AMCs 是一种非常重要的材料,在大量工业领域具有很高的应用潜力。目前,无论是基于搅拌铸造法还是挤压铸造法,已有多种液态工艺路线可用于纳米颗粒增强 AMCs 的制备,每种工艺都有各自的优势和局限性。制造技术的选择受许多因素的影响,如生产成本、加工效率、产品所需的质量及其应用等。

(1)最简单、最经济的工艺是搅拌铸造,但需要解决增强体的孔隙率和润湿性等难题。挤压铸造是

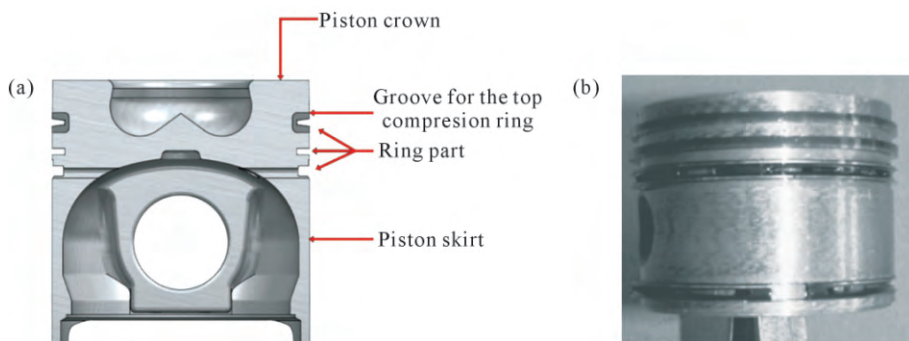


图 14 铝基复合材料制备的发动机活塞:(a) 截面示意图;(b) 实物^[50]

Fig.14 Engine pistons made of aluminium matrix composites: (a) cross-sectional diagram; (b) physical diagram^[50]

一种优异的工艺,同时具有铸造和锻造的优点,并且材料的产率很高。但需要使用专门的模具,压力、温度和模具材料等工艺参数需要根据不同材料在最佳水平上进行探索和使用。

(2)球磨和烧结工艺广泛应用于固态法制备颗粒增强铝基复合材料。机械球磨和烧结能将纳米颗粒与 Al 基体粉末混合,能提前打散团聚的纳米颗粒团簇,有利于纳米颗粒在基体中的分散,改善界面结合。超声处理可以改善增强体与基体之间的润湿性,促进颗粒分散,降低孔隙率。因此出现了固液复合法、复合烧结铸造等新工艺用于制备高性能的纳米颗粒增强铝基复合材料。但与此同时也造成了工序复杂化和生产成本的提高。增强材料的类型、尺寸、体积分数、混合增强材料和基体材料的类型都对复合材料的发展起着重要作用。合理选择铝基体、制造工艺和增强体,能使 AMCs 具有优异的机械性能和摩擦性能。

(3)铝基复合材料质重比高、延展性好、热膨胀系数低,具有良好的耐磨性和阻燃性,被大量应用于汽车领域,随着全球新能源汽车产量的增长,平均铝消耗量也持续上升,因此,对铝合金及其复合材料在汽车制造领域的研究也将越来越多。

(4)未来研究人员应集中精力研究制造高性能铝基复合材料及表面改性的方法,以促进铝基复合材料在汽车工程领域的推广应用。

参考文献:

- [1] CHAK V, CHATTOPADHYAY H, DORA T L. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1059-1074.
- [2] MALAKI M, XU W, KASAR A. Advanced metal matrix nanocomposites[J]. Metals, 2019, 9(3): 330.
- [3] KOLI D K, AGNIHOTRI G, PUROHIT R. A review on properties, behaviour and processing methods for Al-Nano Al_2O_3 composites [J]. Procedia Materials Science, 2014, 6: 567-589.
- [4] BHOI N K, SINGH H, PRATAP S. Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles-A review[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(6): 813-833.
- [5] CHEN D, CHEN Z. Preparation of several aluminum alloys by solid-liquid mixed casting process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1-2): 469-472.
- [6] MONDAL S, MONDAL P, MISHRA D P. Research progress on ceramic nanomaterials reinforced aluminum matrix nanocomposites[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(15): 1841-1857.
- [7] AMOURI K, KAZEMI S H, MOMENI A. Microstructure and mechanical properties of Al-nano/micro SiC composites produced by stir casting technique [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 674: 569-578.
- [8] SRINATH M K, PUNEETH H V, NAGENDRA J. Fabrication and strength evaluation of nano-SiC particulate reinforced Al-6082 MMC's[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 59: 66-71.
- [9] KARBALAEI AKBARI M, BAHARVANDI H R, MIRZAEI O. Fabrication of nano-sized Al_2O_3 reinforced casting aluminum composite focusing on preparation process of reinforcement powders and evaluation of its properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 55: 426-432.
- [10] ABDIZADEH H, EBRAHIMIFARD R, BAGHCHESARA M A. Investigation of microstructure and mechanical properties of nano MgO reinforced Al composites manufactured by stir casting and powder metallurgy methods: A comparative study [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56: 217-221.
- [11] KALIAPPAN S, SHANMUGAM A, JOHNSON P. Impact of AlN-SiC nanoparticle reinforcement on the mechanical behavior of Al 6061-Based hybrid composite developed by the stir casting route [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022: e1399618.
- [12] SURESH S, GOWD G H, DEVAKUMAR M L S. Mechanical and wear characteristics of aluminium alloy 7075 reinforced with nano-aluminium oxide/magnesium particles by stir casting method [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 273-283.
- [13] HARSHA R N, KULKARNI M V, SATISH BABU B. Study of mechanical properties of aluminium/nano-zirconia metal matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 3100-3106.
- [14] GENG R, QIU F, JIANG Q. Reinforcement in Al matrix composites: A review of strengthening behavior of nano-sized particles[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(9): 1701089.
- [15] SAMAL P, VUNDAVILLI P R, MEHER A. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 131-152.
- [16] VENKATESH V S S, RAO G P, PATNAIK L. Processing and evaluation of nano SiC reinforced aluminium composite synthesized through ultrasonically assisted stir casting process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 7394-7408.
- [17] RAO T B. Microstructural, mechanical, and wear properties characterization and strengthening mechanisms of Al7075/SiCnp composites processed through ultrasonic cavitation assisted stir-casting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 805: 140553.
- [18] MADHUKAR P, SELVARAJ N, RAO C S P. Fabrication and characterization two step stir casting with ultrasonic assisted novel AA7150-hBN nanocomposites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 152464.
- [19] BALAMURUGAN K, SHANMUGAM V, PALANI G. Effect of TiC/RHA on solid particle erosion of Al6061 hybrid composites fabricated through a 2-step ultrasonic-assisted stir casting process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 4888-4900.
- [20] YANG Y, LAN J, LI X. Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1-2): 378-383.
- [21] SONI S K, MANIMARAN D, THOMAS S B. Microstructure and

- mechanical characterization of Al6061 based composite and nanocomposites prepared via conventional and ultrasonic-assisted melt-stirring techniques[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 34: 105222.
- [22] YUE T M, CHADWICK G A. Squeeze casting of light alloys and their composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 58(2-3): 302-307.
- [23] KANNAN C, RAMANUJAM R. Comparative study on the mechanical and microstructural characterisation of AA 7075 nano and hybrid nanocomposites produced by stir and squeeze casting[J]. *Journal of Advanced Research*, 2017, 8(4): 309-319.
- [24] ALIZADEH A, KHAYAMI A, KARAMOUM M. Mechanical properties and wear behavior of Al5083 matrix composites reinforced with high amounts of SiC particles fabricated by combined stir casting and squeeze casting; A comparative study[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(1): 179-189.
- [25] ZHU J, JIANG W, LI G. Microstructure and mechanical properties of SiCnp/Al6082 aluminum matrix composites prepared by squeeze casting combined with stir casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116699.
- [26] SINGH M, RANA R S, PUROHIT R. Development and analysis of Al-matrix nano composites fabricated by ultrasonic assisted squeeze casting process[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2 (4-5): 3697-3703.
- [27] GNANAVELBABU A, SURENDRAN K T S, KUMAR S. Process optimization and studies on mechanical characteristics of AA2014/Al₂O₃ nanocomposites fabricated through ultrasonication assisted stir-squeeze casting[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2022, 16(2): 759-782.
- [28] TAHERZADEH MOUSAVIAN R, BEHNAMFARD S, HEIDARZADEH A. Incorporation of SiC ceramic nanoparticles into the aluminum matrix by a novel method: Production of a metal matrix composite[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27 (8): 2968-2976.
- [29] SU H, GAO W L, ZHANG H. Study on preparation of large sized nanoparticle reinforced aluminium matrix composite by solid-liquid mixed casting process[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 28(2): 178-183.
- [30] WANG L, QIU F, ZOU Q. Microstructures and tensile properties of nano-sized SiCp/Al-Cu composites fabricated by semisolid stirring assisted with hot extrusion[J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 195-200.
- [31] ZHANG L J, QIU F, WANG J G. Nano-SiCp/Al2014 composites with high strength and good ductility[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2017, 24(3): 353-359.
- [32] LI Q, QIU F, DONG B. Fabrication, microstructure refinement and strengthening mechanisms of nanosized SiCp/Al composites assisted ultrasonic vibration[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 735: 310-317.
- [33] ZHOU D S, TANG J, QIU F. Effects of nano-TiCp on the microstructures and tensile properties of TiCp/Al-Cu composites[J]. *Materials Characterization*, 2014, 94: 80-85.
- [34] DONG B X, LI Q, WANG Z F. Enhancing strength-ductility synergy and mechanisms of Al-based composites by size-tunable in-situ TiB₂ particles with specific spatial distribution[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 217: 108912.
- [35] TIAN W S, ZHAO Q L, ZHANG Q Q. Simultaneously increasing the high-temperature tensile strength and ductility of nano-sized TiCp reinforced Al-Cu matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 717: 105-112.
- [36] HE H, FAN G, SABA F. Enhanced distribution and mechanical properties of high content nanoparticles reinforced metal matrix composite prepared by flake dispersion[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 252: 110514.
- [37] TJONG S C. Novel Nanoparticle - reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(8): 639-652.
- [38] WOO D J, SNEED B, PEERALLY F. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal composite powders and coatings using high-energy ball milling and cold spray[J]. *Carbon*, 2013, 63: 404-415.
- [39] KANDEMIR S. Microstructure and mechanical properties of A357/SiC nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation-based dispersion of ball-milled nanoparticles[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(3): 395-404.
- [40] ARUNKUMART, PAVANAN V, MURUGESAN V A. Influence of nanoparticles reinforcements on aluminium 6061 alloys fabricated via novel ultrasonic aided rheo-squeeze casting method[J]. *Metals and Materials International*, 2022, 28(1): 145-154.
- [41] LI J, LYU S, WU S. Effects of ultrasonic vibration on microstructure and mechanical properties of nano-sized SiC particles reinforced Al-5Cu composites[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 814-822.
- [42] YUAN D, YANG X, WU S. Development of high strength and toughness nano-SiCp/A356 composites with ultrasonic vibration and squeeze casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 269: 1-9.
- [43] PRAGATHI P, ELANSEZHIAN R. Mechanical and microstructure behaviour of aluminum nanocomposite fabricated by squeeze casting and ultrasonic aided squeeze casting: A comparative study[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 956: 170203.
- [44] SU H, GAO W, FENG Z. Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al₂O₃ particle reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2012, 36: 590-596.
- [45] NARASIMHA MURTHY I, VENKATA RAO D, BABU RAO J. Microstructure and mechanical properties of aluminum-fly ash nano composites made by ultrasonic method [J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 55-65.
- [46] CHEN X H, YAN H. Solid-liquid interface dynamics during solidification of Al 7075-Al₂O₃np based metal matrix composites[J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 148-158.
- [47] DEV SRIVYAS P, CHAROO M S. Application of hybrid aluminum matrix composite in automotive industry[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 3189-3200.
- [48] MALLICK A, GANGI SETTI S, SAHU R K. Centrifugally cast functionally graded materials: Fabrication and challenges for probable automotive cylinder liner application[J]. *Ceramics International*

- al, 2023, 49(6): 8649-8682.
- [49] MACIEJ D. Aluminum matrix composite (AlSi7Mg2Sr0.03/SiCp) pistons obtained by mechanical mixing method[J]. Materials, 2018, 11(1): 42.
- [50] DOLATA A J, WIECZOREK J, DYZIA M. Assessment of the tribological properties of aluminum matrix composites intended for cooperation with piston rings in combustion engines[J]. Materials, 2022, 15(11): 3806.
- [51] VINOTH BABU K, MARICHAMY S, GANESAN P. Processing of functionally graded aluminum composite brake disc and machining parameters optimization[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 563-567.
- [52] KUMAR P K D, GNANARAJ S D. Aluminium-silicon based metal matrix composites for brake rotor applications: A review[J]. Engineering Research Express, 2023, 5(2): 022002.
- [53] SHOROWORDI K M, LAOUI T, HASEEB A S M A, CELIS J P, FROYEN L. Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study[J]. Materials Processing Technology, 2003, 142(3): 738-743.
- (责任编辑:李亚敏)