

碳化硅增强铝基复合材料研究进展

赵志伟¹, 刘晓艳^{1,2*}, 朱晓松¹, 刘传志¹, 刘家宇¹, 高飞¹

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年7月3日; 录用日期: 2023年7月26日; 发布日期: 2023年8月7日

摘要

碳化硅铝基复合材料(Aluminum Matrix Composites, AMCs)具有弹性模量高、尺寸稳定性高等优点被多领域广泛地应用。碳化硅(SiC)作为增强体有着不同的形态, 主要有碳化硅颗粒(SiCp)、碳化硅晶须(SiCw)以及碳纳米管(CNT)。近年来, SiC作为强化相增强铝基复合材料成为了新的研究热点。本文从碳化硅增强铝合金的研究出发, 概述了碳化硅增强铝基复合材料的国内外研究现状, 从制备技术和增强机制等方面, 分析了该材料发展过程中存在的一些问题以及相应的改进措施, 并且指出了该材料今后发展的方向。

关键词

铝基复合材料, 碳化硅, 制备技术, 增强机制

Research Progress in Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites

Zhiwei Zhao¹, Xiaoyan Liu^{1,2*}, Xiaosong Zhu¹, Chuanzhi Liu¹, Jiayu Liu¹, Fei Gao¹

¹College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications, Handan Hebei

Received: Jul. 3rd, 2023; accepted: Jul. 26th, 2023; published: Aug. 7th, 2023

Abstract

Silicon carbide aluminum matrix composites (AMCs) are widely used in various fields due to their

*通讯作者。

文章引用: 赵志伟, 刘晓艳, 朱晓松, 刘传志, 刘家宇, 高飞. 碳化硅增强铝基复合材料研究进展[J]. 材料科学, 2023, 13(8): 718-725. DOI: 10.12677/ms.2023.138078

high elastic modulus and high dimensional stability. Silicon carbide (SiC) has different forms as reinforcement, mainly including silicon carbide particles (SiCp), silicon carbide whiskers (SiCw), and carbon nanotubes (CNTs). In recent years, SiC as a strengthening phase reinforced aluminum matrix composite material has become a new research hotspot. Starting from the research on silicon carbide reinforced aluminum alloy, this article summarizes the current research status of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites at home and abroad. From the aspects of preparation technology and reinforcement mechanism, it analyzes some problems and corresponding improvement measures in the development process of this material, and points out the future development direction of this material.

Keywords

Aluminum Matrix Composite Material, Silicon Carbide, Preparation Technology, Reinforcement Mechanism

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

信息、材料、能源是人类的支柱，如今材料已经成为国际竞争、国民建设、日常生活的重要部分。近年来我国在高尖端武器的研发、神州系列载人飞船的发射、交通等方面取得了重大突破，这些成果充分体现了材料的研究充满了前景与挑战。铝合金具有高强度、密度小、耐腐蚀好等特点，被广泛应用于航空航天、海洋船舶、生物医药、电子器械、包装运输等领域中。随着科学技术的发展，人们对高性能、低成本的材料的需求越来越迫切。科研学者在铝合金的热变形、热处理等方面进行调整，虽然提高了其性能但并没有得到跨越式的进展。在进一步探索的过程中，研究人员将目光转向了铝基复合材料[1]。铝基复合材料具有高强度、高塑性、耐腐蚀性等特点，被广泛的应用于航空工业中[2] [3]。铝基复合材料的增强体种类较多，主要有：纤维、石墨、碳化硅、碳化硼等。增强体可以分成颗粒增强体、纤维增强体、晶须增强复合材料。纤维成本高且对身体有害，故应用范围小。碳化硅颗粒具有高熔点，硬度可媲美金刚石，在耐磨材料中应用广泛。碳化硅晶须又称碳化硅纳米线，独特的纳米线形态使其具有极高的强塑性。碳化硅晶须结晶成分均匀，较颗粒来说在生产实践中纯度较高。无论是颗粒还是晶须，纳米材料存在较强的范德华力，使其在基体材料中缠绕或团聚[4]，从而制备的AMCs的性能不稳定。这里将对碳化硅增强铝基复合材料的制备工艺、分散方法以及其性能提升机制做出探讨。

2. 碳化硅增强铝基复合材料

随着人们的深入研究，铝基复合材料的制备的工艺方法也越来越多。制备工艺的不同影响着最终制备出来的AMCw性能。制备工艺主要分为碳化硅在铝基体中的均匀分散和复合材料成型两部分。制备优异性能的铝基复合材料需要不断改善铝粉和增强体的界面结合效果。首先要解决的问题就是混粉问题。

表1总结了科研人员使用的混粉工艺，对于工业生产存在一定的指导意义。

球磨法的使用相对较广泛，主要是球磨能增加碳化硅和铝粉的表面活性，显著改善碳化硅和铝粉的团聚问题从而提高固结成型的成功率[5]。常见的固结成型工艺有粉末冶金、搅拌铸造、喷射沉积法、熔体浸渍法[6]等。

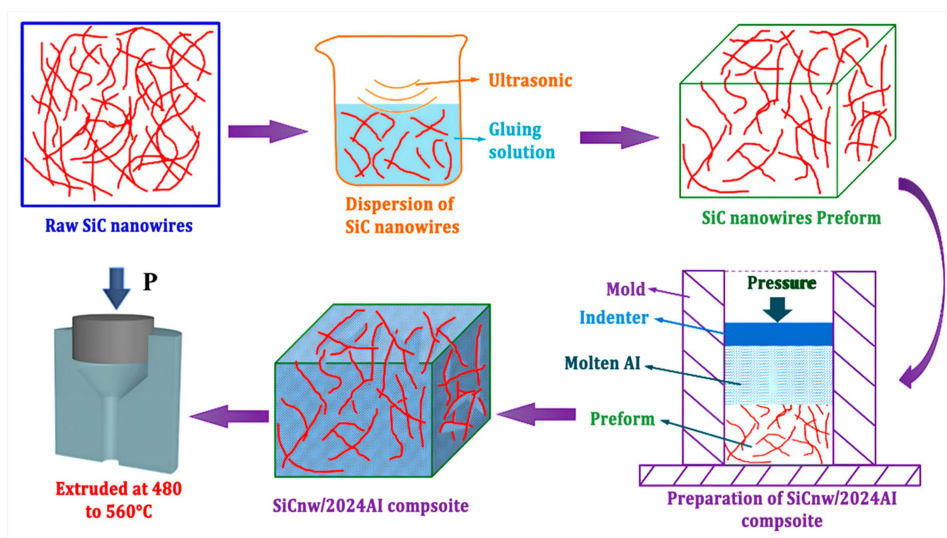
Table 1. Mixing process and forming method of aluminum matrix composite materials**表 1.** 铝基复合材料的混粉工艺及成型方法

复合材料	混粉工艺	成型方法	球料比	时间
30%SiCp/2024Al [7]	行星式球磨机低速混料	真空热压法	3:1	12 h
不同含量的 SiCp/6061Al [8]	行星式球磨机球磨	粉末冶金法	2:1	2 h
Mg-9Al-1.5SiC [9]	以离子气相合成法(PVD)	半固态搅拌	—	—
15%SiCp/6013Al [10]	行星式球磨机混料	热等静压工艺	9:4	1.5 h
20%SiC 晶须增强 2024Al [11]	水溶液吸收法制备 SiCW 预制件	熔体浸渍法	—	—
20%SiCp/Al-8.2Fe-1.6V-1.8S [12]	多层喷射沉积	喷射沉积法	—	—

2.1. 成型工艺

2.1.1. 粉末冶金

粉末冶金技术是金属粉末和增强颗粒机械均匀混合，在一定的温度和压力条件下经烧结成型后制造复合材料和金属材料的工艺技术。其制备流程由粉体均匀混合、冷压预成型、烧结成型以及后续的轧制、挤压、热处理、锻造等二次成型。其工艺流程如图 1 所示。传统粉末冶金方法的缺点是工艺复杂，生产周期长、成本高；烧结后成型的块体的大小受到限制，高温容易氧化。优点是可以制备高纯度材料，原料利用率高，可调配成分的比例。Xu [5]等采用粉末冶金法，对铝粉和 SiCw 增强体进行球磨、冷压、热压烧结、固溶处理得到 SiCw 体积分数的铝基复合材料。发现晶须分布较为均匀，对其进行表征和力学性能测试。发现在一定范围内随着 SiCw 含量的提高，材料的硬度、密度、压缩强度都有提高，5%SiCw 增强铝基复合材料的压缩强度为 658.9 MPa，伸长率为 13.9%。粉末冶金实现了晶须分布较为均匀，将 SiCw 含量控制在一定范围内测试其性能。

**Figure 1.** The schematic diagram of preparation and extrusion process of SiCnw/2024Al composite [13]**图 1.** SiCnw/2024Al 复合材料制备及挤压工艺示意图[13]

2.1.2. 搅拌铸造

搅拌铸造工艺是将增强体和液态金属基体通过机械搅拌均匀混合后再经压力铸造成型的一种技术。防止铝基体氧化需要不断通入惰性气体。这种固结成型工艺的优点在于均匀分散，将增强相(如碳化硅颗

粒)均匀分散在基体金属中。这有助于提高材料的均一性和一致性,并避免了增强相的团聚现象。同时,该方法具有低剪切力,在加工过程中施加的剪切力较小。这有助于降低金属和增强相之间的相互作用力,减少增强相的破碎和损伤。但是容易造成有气体和杂物的混入、颗粒分布不均匀等特点。

李早[14]等采用真空搅拌铸造制备了 SiCp/ZL101A 复合材料。进行显微组织观察和力学性能的研究。发现 SiCp 预处理有助于改善 SiCp 与熔体颗粒之间的润湿性,减少 SiCp 颗粒聚集,液面涡流有利于 SiCp 颗粒均匀化,增加搅拌器转速可使液面涡流深度增加,有助于液面边缘 SiCp 颗粒与熔体混合。

许志月[15]等将铝粉和 SiCw 进行球磨分散,铝粉和 SiCw 体积分数比例 7:3,球料比 10:1、填充系数 0.3、球磨转速 100 rpm、球磨时间 1 h 的条件下,发现晶须与铝粉均匀混合,无晶须缠结现象且晶须具有较高的长径比。通过半固态搅拌铸造法成功制备出(SiCp + SiCw)/2024Al 复合材料。在挤压温度 500℃、挤压比 16:1 条件下,10 mm/min 挤压速度下可以得到表面光滑的复合材料棒材。其复合材料致密度提高到 99%以上,同时 SiCw 沿着挤压轴向取向排列。材料经过固溶时效处理后复合材料的力学性能显著提高,其抗拉强度达到 450.7 MPa,延伸率 1.5%。弹性模量在 110 GPa 左右。

2.1.3. 喷射沉积法

如图 2,喷射沉积法是在惰性气体保护下碳化硅颗粒通过雾化室获得二相流体,以一定的速度和角度喷入合金液的流束中,与合金液同时沉积获得铸锭。这种工艺可通过气体流速的调控从而制备出不同大小的金属。但缺点在于该工艺复杂,容易造成粉末氧化。为了减少颗粒氧化,可以在工艺中增加惰性气体的保护,控制喷射速度和温度,或者使用表面处理方法来降低颗粒氧化的可能性。

陈振华[16]等采用多层喷射共沉积工艺制备 6066 铝合金/15%SiC 颗粒复合材料,得到了增强颗粒分布均匀,增强颗粒与基体界面洁净,基体冷凝速度高的沉积坯,沉积坯经挤压后进行 T6 状态处理,其力学性能为屈服强度为 640 MPa,抗拉强度为 510 MPa,弹性模量 133 GPa,延伸率 9.4%。

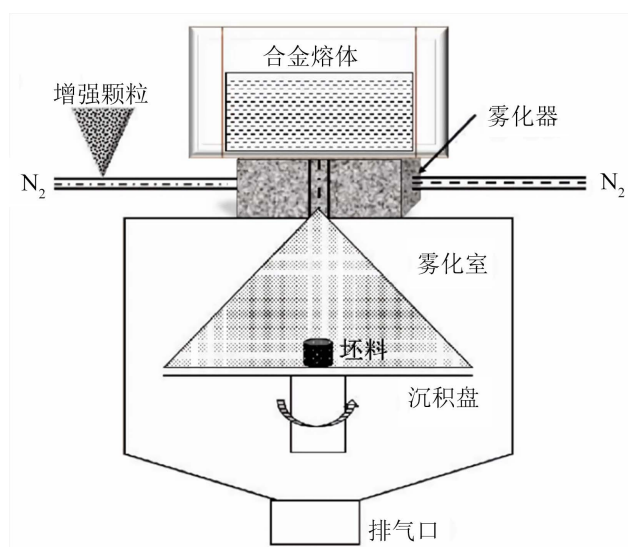


Figure 2. Schematic diagram of spraying equipment [17]
图 2. 喷射设备原理图[17]

2.1.4. 熔体浸渍法

熔体浸渍工艺是在特定环境下将金属液体浸渗到增强材料多孔预制件的孔隙中再经过固结成型后制备成金属基复合材料。该工艺的种类有压浸渗、无压浸渗两种。压力浸渗是将增强体材粘结后制备成预

制件, 再加入合金溶液, 对其施加一定的压力使其在内外压力差的作用下凝固生成复合材料的方法。无压渗透法以其设备简单、操作方便、成本低廉等优势得到了普遍应用。由于无压力导致环境气体及颗粒大小不可控, 增强体和溶液之间存在较多间隙。

薛海华[18]等通过压力浸渗 SiCp/ZL101 铝基复合材料的组织和性能颗粒氧化处理能够提高复合材料的热导率(提高 15.6%), 并降低复合材料的热膨胀系数(降低 14.4%)原始 SiCp/ZL101 铝基复合材料和氧化处理后复合材料的弯曲强度较铝合金分别提高了 23.28% 和 3.28%。通过压力浸渗和颗粒氧化处理可以改善 SiCp/ZL101 铝基复合材料的热导率、热膨胀系数和弯曲强度等关键性能。这对于进一步提升铝基复合材料的综合性能和应用潜力具有重要意义。

3. 碳化硅晶须增强铝基复合材料的性能和强化机制

3.1. 碳化硅晶须增强铝基复合材料的性能

铝基复合材料的性能受多种因素的影响, 如不同的基体的种类、增强体的含量、处理的工艺方式, 工艺参数等。科研学者制备出铝基复合材料后采用不同的表征方法和力学性能测试来分析其增强机理。

张旭[19]等采用球磨-热等静压-热压制备 SiCw/Al 复合材料组织和性能的影响。测试复合材料的主要性能, 包括密度、电导率和压缩力学性能。随着 SiCw 含量的增加, 材料的内部颗粒尺寸变小, 位错密度增大。随着 SiCw 含量的增加, 复合材料中发生了 SiCw 的聚集, 导致界面结合力减弱。5% SiCw/Al 复合材料的性能低于 2.5% SiCw/Al 复合材料。经 $121^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h}$ 时效处理后, 2.5% SiCw/Al 复合材料的硬度、抗压强度和断裂应变分别达到 $(217.7 \pm 11)\text{ hV}$ 、 $(674.4 \pm 13)\text{ MPa}$ 和 9.0%。可见 SiCw 含量对复合材料的组织和性能具有重要影响。合理控制 SiCw 含量和进行适当的时效处理, 可以实现复合材料的优化性能。

后续的锻造、热处理等二次加工对其性能影响也很大。轧制主要应用在喷射沉积法制备的板材中。贺毅强[20]等采用热压后多道次热轧制备喷射沉积 SiCp/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 复合材料板材。如图 3, 根据 XRD 图谱分析可知, 板材经过后续的热加工, 其衍射峰中未出现该耐热铝合金中在高温加热过程中易出现的 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相衍射峰, 这说明在后续热致密过程中 $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ 保持稳定。并且通过多道次热轧可实现沉积颗粒界限的消失、相对密度的提高和晶粒尺寸的调控。这对于材料的微观结构优化和性能提升具有重要意义。通过测试材料相对密度达 99.5%, 弥散粒子粒径约为 100 nm、晶粒粒径约为 $1\ \mu\text{m}$, 弥散粒子阻碍位错运动并产生位错缠结。

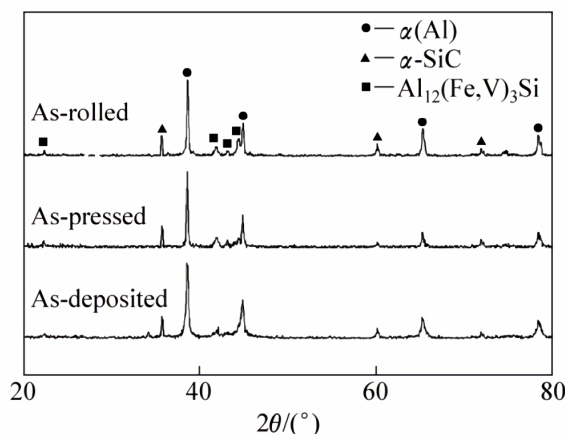


Figure 3. XRD patterns of Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si/SiC composite as-deposited, as-pressed, and as-rolled [20]

图 3. 复合材料在沉积态、挤压态和经热轧轧薄后的 XRD 谱[20]

王浩[21]通过将自主设计的 7 系铝粉和 SiCw 混合制备出铝基复合材料。根据 DSC 分析设计了 3 种多级强化固溶工艺,并在 121℃ 温度下时效了不同时间。发现采用不同热处理制度,同样可以大幅度提升其性能。而且实现了粉末冶金各流程工艺参数与性能间的有效调控。

3.2. 碳化硅晶须增强铝基复合材料的强化机制

铝基复合材料的强化机制主要分为直接强化和间接强化。直接强化就是引入的增强体,间接强化即位错强化、Orowan 弥散强化、晶界强化和细晶强化。增强体的自身具有的优异性能导致微观结构的改变。碳化硅改变了沉淀物的形态,均匀分散的小沉淀物(η' 相)和增加的位错密度对复合材料的力学性能有积极影响[22]。何可龙[23]等采用搅拌摩擦加工法制备纳米 SiCw 增强 ZL114A 铝基复合材料,并对其组织及性能进行分析,发现结构致密,没有明显孔洞的搅拌摩擦区,复合的区域晶粒细小,搅拌摩擦中心区 SiCw 分布较均匀。SiCw 的加入可以阻碍铝基复合材料中晶粒的长大,从而细化晶粒尺寸。这种细小的晶粒有助于提高材料的强度和延展性能。此外, SiCw 还可以作为位错和裂纹的钉扎点,阻碍其扩展,从而提高复合材料的韧性。复合材料经 T6 热处理后材料的伸长率得到改善,比基材提高 111.4%。

制备出优异的 AMCs 并不是只存在一种强化机制,而是由多种机制共同作用的。增强体的自身具有的优异性能导致微观结构的改变。SiCw 在铝基体中显著地阻碍了位错的释放和移动性,在固结成型状态下导致高密度位错产生,使铝基复合材料的性能得到提升。Dong [13]等人热挤压得到 2024Al/SiCw (15 vol%)合金,研究得到随挤压温度提高,合金性能得到提升,在 560℃ 时达到最大,拉伸测试的强度和弹性模量达到 709.4 MPa 和 109.8 GPa。其断裂表面如图 4 所示。在断口上观察到许多韧窝和撕裂棱(图 4(a)),表明铝基体严重变形。此外,还观察到了图 4(b)中黄色箭头所指出的几根断裂和拔出的碳化硅纳米线。

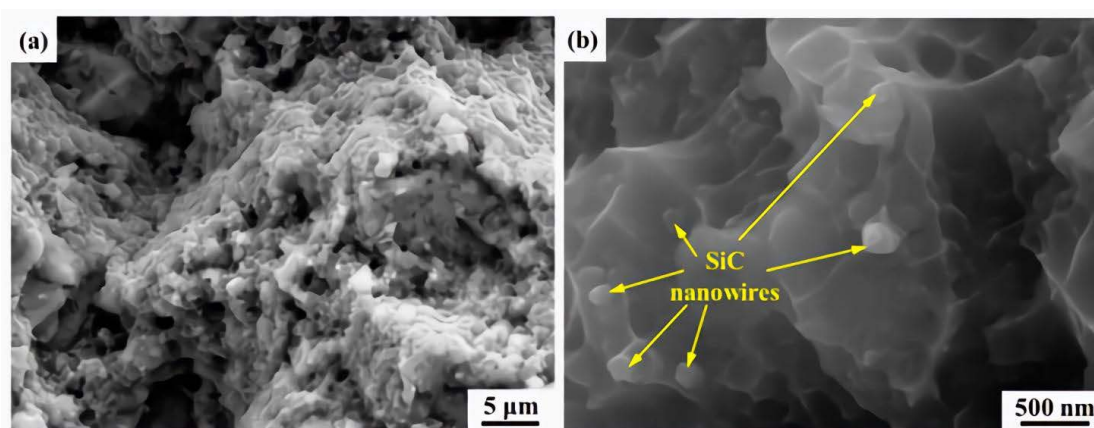


Figure 4. Fracture surface of SiCnw/2024Al composite extruded at 560°C [13]

图 4. 560℃ 挤压的 SiCnw/2024Al 复合材料的断口形貌[13]

才庆魁[24]等通过粉末冶金法制备碳化硅增强纯铝基复合材料,对微观结构和拉伸性能进行了研究,其拉伸强度和屈服强度跟纯铝相比提升了 89%、117.9%。认为高强度的原因是微观组织的变化,用弥散强化机制和位错密度强化进行了评估,预测的结果跟实验值十分吻合。因此,制备优异的 AMCs 需要综合考虑多种因素,包括增强体的选择、粒度、分布和界面结合等,以及合适的加工和热处理工艺。综合利用不同的强化机制,可以实现对 AMCs 性能的综合增强,并进一步提升其应用价值。

4. 存在的问题

碳化硅增强铝基复合材料的制备工艺中存在着许多问题,首先就是团聚问题,由于碳化硅自身纳米

级原因容易产生团聚，添加后生成的铝基复合材料不稳定。其次碳化硅颗粒与铝合金基体互不湿润，固结成型的高温下与合金发生反应，在界面生成不稳定的化合物 Al_4C_3 。

针对这些问题科研学者通过不同的方法进行了优化，团聚问题的解决方法主要就是表面改性剂，如使用具有表面活性剂性质的材料。界面反应问题的解决办法有是表面涂层，掺杂适量元素形成稳定的界面化合物。徐金城[25]等通过粉末冶金法制备了致密度较好的镀铜碳化硅增强铝基复合材料，经测试碳化硅表面镀铜较好地解决了碳化硅与基体的相容性问题。

我国“大飞机”计划已经启动，铝基复合材料的发展前景十分可观。因此，进一步探索铝基复合材料的利用率、优化处理工艺以节约能源是非常重要的研究方向。这也正是科研人员正在探究的方向。但研究并没有深入到微观结构，以及新型材料的设计开发等工作中。另外废用铝基复合材料的回收问题也应格外重视。

研究人员和学者应继续努力在铝基复合材料领域进行深入的研究和探索，通过深入理解材料的微观结构，可以优化材料的性能和使用寿命，并为新材料的开发提供设计指导。在材料利用率、处理工艺、和废弃材料回收等方面取得更多创新和突破。这将有助于促进我国铝基复合材料产业的可持续发展。

基金项目

国家自然科学基金(51601053)、邯郸市技术研究与发展项目(19422111008-201941222111008-20)、河北省自然科学基金会(E2021402002)和河北省教育厅(ZD2020195)对调查的资助。

参考文献

- [1] Liu, J.H., Khan, U., Coleman, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S. and Brabazon, D. (2016) Graphene Oxide and Graphene Nanosheet Reinforced Aluminium Matrix Composites: Powder Synthesis and Prepared Composite Characteristics. *Materials & Design*, **94**, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.031>
- [2] Michael Rajan, H.B., Ramabalan, S., Dinaharan, I. and Vijay, S.J. (2012) Synthesis and Characterization of *in situ* Formed Titanium Diboride Particulate Reinforced AA7075 Aluminum Alloy Cast Composites. *Materials and Design*, **44**, 438-445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.008>
- [3] Hartaj, S., Kapil, S., Sachit, V. and Sanjay, M. (2022) A Comprehensive Review on the New Developments Consideration in a Stir Casting Processing of Aluminum Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, **60**, 974-981. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.359>
- [4] Rahman, H. and Al Rashed, H.M.M. (2014) Characterization of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Procedia Engineering*, **90**, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.821>
- [5] X.J. Xu, Jiang, Z., Tabie, V., Mao, Q., Zhang, T.C., Cheng, H., Liu, Q.J., Zhang, X., Liu, Y.G., Xiao, Y.S. and Wang, H. (2019) Effect of SiCw Volume Fraction and Cold Pressure on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites. *Materials Research Express*, **6**, Article ID: 126597. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5b48>
- [6] Ren, S.B., He, X.B., Qu, X.H. and Li, Y. (2007) Effect of Controlled Interfacial Reaction on the Microstructure and Properties of the SiCp/Al Composites Prepared by Pressureless Infiltration. *Journal of Alloys and Compounds*, **455**, 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.01.127>
- [7] 谢敬佩, 王行, 王爱琴, 郝世明, 刘舒. 真空热压 SiC_p/2024Al 复合材料力学性能与显微结构[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(1): 22-26. <https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2015.01.005>
- [8] 郝世明, 谢敬佩. SiC 颗粒增强铝基复合材料的制备工艺和性能研究[J]. *粉末冶金工业*, 2014, 24(5): 38-43. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20140008>
- [9] 刘丽娜, 田晓光, 申勤兵. 碳化硅颗粒增强镁铝基复合材料的组织和性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(14): 104-106. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.14.026>
- [10] 傅定发, 彭克成, 陈爽, 刘海洋, 滕杰, 蒋福林, 张辉. SiC 颗粒增强 6013 铝基复合材料时效析出行为及力学性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(6): 137-143. <https://doi.org/10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2023301>
- [11] 许晓静, 戈晓岚. SiC 晶须增强铝基复合材料超塑性[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(3): 127-131.

- <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.2003.03.026>
- [12] 何宗霖, 连慧峰. 热轧温度对喷射沉积 SiC_p/Al 基复合材料组织和致密度的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 126-128. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.20.031>
- [13] Dong, S.L., Zhang, B., Zhan, Y.L., Liu, X., Xin, L., Yang, W.S. and Wu, G.H. (2019) Effect of Extrusion Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of SiC_{nw}/2024Al Composite. *Materials*, **12**, Article 2769. <https://doi.org/10.3390/ma12172769>
- [14] 李早, 王狂飞, 南红艳, 等. 真空搅拌铸造 SiC_p/ZL101A 复合材料显微组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(14): 107-110, 116. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.14.027>
- [15] 许志月. 搅拌铸造(SiC_p + SiC_w)/Al 复合材料热挤压组织与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.003503>
- [16] 陈振华, 张豪, 刘秋林, 陈刚, 孙章明, 杨伏良. 多层喷射共沉积法制备 6066 铝合金/SiC 颗粒复合材料[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 83-86. <https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.1996.04.018>
- [17] 唐彬彬. 喷射沉积 17 vol.% SiC_p/7055 Al 复合材料变形行为研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2021. <https://doi.org/10.27684/d.cnki.gxndx.2021.004781>
- [18] 薛海华, 张全. 压力浸渗 SiC_p/ZL101 铝基复合材料的组织和性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(3): 355-359. <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.2022.03.016>
- [19] Zhang, X., Xu, X.J., Jiang, Z., Mao, Q., Zhang, T.C., Cheng, H., Liu, Q.J. and Wang, H. (2019) Effect of SiC_w Volume Fraction on Microstructure and Properties of SiC_w/Al Composite Fabricated by Hot Isostatic Pressing-Hot Pressing. *Materials Research Express*, **6**, Article ID: 1165f4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3aba>
- [20] 贺毅强, 李俊杰, 周海生, 冯立超, 陈志钢. 喷射沉积 SiC_p/Al 基复合材料致密化及其显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(7): 1352-1360. <https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.07.05>
- [21] 王浩. SiC_w 增强高合金化 7000 系铝基复合材料的制备与组织性能研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [22] Pu, B.W., Lin, X.B., Li, B.W., Chen, X.F., He, C.N. and Zhao, N.Q. (2020) Effect of SiC Nanoparticles on the Precipitation Behavior and Mechanical Properties of 7075Al Alloy. *Journal of Materials Science*, **55**, 6145-6160. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04381-4>
- [23] 何玉松, 高文理, 陆政, 张辉. 喷射沉积 7075Al/SiC_p 铝基复合材料板材的高温拉伸变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2007(9): 1516-1520. <https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.2007.09.022>
- [24] 才庆魁, 贺春林, 赵明久, 毕敬, 刘常升. 亚微米级 SiC 颗粒增强铝基复合材料的拉伸性能与强化机制[J]. 金属学报, 2003, 39(8): 865-869.
- [25] 徐金城, 邓小燕, 张成良, 田亮亮. 碳化硅增强铝基复合材料界面改善对力学性能的影响[J]. 材料导报, 2009, 23(2): 25-27.