DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4016

氮化硼颗粒增强铝基复合材料研究进展

怯喜周[1],单　颖[1],彭艳杰[2],王宇慧[1],陈　刚[1],许晓静[2]
(1. 江苏大学 材料科学与工程学院，江苏 镇江 212000; 2. 江苏大学 先进制造与现代装备技术工程研究院，江苏 镇江 212013)

摘　要:铝基复合材料作为一种轻质高强度材料具有广泛的应用前景。本文综述了当前氮化硼纳米颗粒增强铝基复合材料的研究进展,通过液相法和固相法的分类详细介绍了搅拌铸造、超声辅助铸造、选择性激光熔化(SLM)、热挤压等制备氮化硼纳米颗粒增强铝基复合材料的方法,总结了所制备复合材料的力学性能和功能特性。最后指出了不同制备方法存在的问题,并且对氮化硼纳米颗粒增强铝基复合材料的未来进行了展望。

关键词:氮化硼;铝基复合材料;制备方法;力学性能;功能特性
中图分类号:TG113.25; TB331　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)02-0114-12

Progress in the Preparation of Boron Nitride Nanoparticle-reinforced Aluminum Matrix Composites

KAI Xizhou[1], SHAN Ying[1], PENG Yanjie[2], WANG Yuhui[1], CHEN Gang[1], XU Xiaojing[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China; 2. Institute for Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aluminum matrix composite materials, which are lightweight and high-strength materials, have broad application prospects. This article reviews the current research progress on boron nitride nanoparticle-reinforced aluminum matrix composites. The preparation methods of boron nitride nanoparticle-reinforced aluminum matrix composites, including stirring casting, ultrasonic assisted casting, selective laser melting (SLM), and hot extrusion, are described in detail through the classification of liquid-phase and solid-phase methods. The mechanical properties and functional characteristics of the prepared composite materials are summarized. Finally, problems associated with different preparation methods are noted, and the future prospects of boron nitride nanoparticle-reinforced aluminum matrix composites are discussed.

Key words: boron nitride particles; aluminum matrix composites; preparation method; mechanical properties; functional characteristics

随着航空航天、轨道交通、新能源汽车等载运工具的快速发展和“双碳”战略的实施,对材料轻量化、高性能提出了更高的要求[1-4]。以当前飞速发展的新能源汽车为例,“以铝代钢”是其轻量化的重要发展方向,轮毂、控制臂、减震塔、副车架等部件采用高性能的铝合金已使新能源汽车减重达 10%以上,显著降低了能耗并提升其续航里程和碰撞安全性[5-6]。然而,铝合金相对较低的强度、抗疲劳性能和高温性能,使其应用受限[7-8]。如超高强的 7075 铝合金在 300 ℃下,抗拉强度仅为室温的 1/10,严重影响其应用。因此,进一步提升铝合金的综合性能并扩展其应用已成为当前研究的热点[9]。铝基复合材料是以铝或铝合金为基体,同时以纤维、晶须、陶瓷颗粒、纳米管、纳米片等为增强体,通过一定方法制备的轻质和结构功能一体化材料，既保留了铝合金轻质的优点，又赋予了复合材料增强体优异的力学和功能特性[10]。与铝合金相比,铝基复合材料表现出更高的强度、抗疲劳性能、耐高温性能等,以及高导热、低膨胀、高阻尼、中子吸收等功能特性[11-14]。

氮化硼(BN)是一种超低密度的轻质陶瓷增强体材料,其密度仅为 2.25 g/cm^3,小于铝(2.7 g/cm^3)和常规增强体颗粒,例如 B_4C(2.52 g/cm^3)、SiC(3.22 g/cm^3)和

收稿日期:2024-01-16
基金项目:国家自然科学基金(U20A20274, 52071158, 51701085)
作者简介:怯喜周,1984 年生,博士,副教授,硕士生导师. 研究方向为高性能铝合金及其复合材料的设计制备与成形加工. Email:kaixizhou@ujs.edu.cn
引用格式:怯喜周,单颖,彭艳杰,等. 氮化硼颗粒增强铝基复合材料研究进展[J]. 铸造技术,2024, 45(2): 114-125.
KAI X Z, SHAN Y, PENG Y J, et al. Progress in the preparation of boron nitride nanoparticle-reinforced aluminum matrix composites [J]. Foundry Technology, 2024, 45(2): 114-125.

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

Al_2O_3(3.97 g/cm^3)。此外，BN 还具有高导热性、高中子吸收、低介电常数以及微波透明性等[18-20]。当前，国内外学者对不同方法制备 BN 陶瓷颗粒增强铝基复合材料的研究表明，BN 纳米颗粒(BN_{NP})可在显著提高铝基强度的同时，保持铝合金良好的塑韧性[19-21]。通过高压扭转技术(high pressure torsion technology, HPT)制备的质量分数为 1%的 BN_{NP}/Al 复合材料抗拉强度达 420 MPa，较基体合金提高了 80%，依然保持 16%的断后伸长率[21]；采用球磨与放电等离子烧结相结合的方法制备质量分数为 1%的 BN_{NP}/Al 复合材料，抗拉强度达 152 MPa，较纯铝基体提高了 69%[22]。然而，BN_{NP} 增强铝基复合材料存在制备成本高、复合效率低等问题，制约了其规模化制备和工程应用[19,23-26]。

本文主要介绍了近年来制备 BN_{NP} 增强铝基复合材料的研究进展，探讨了不同制备方法及 BN_{NP} 添加方法和含量对复合材料性能的影响，总结了现阶段制备方法存在的问题，并进一步展望了规模化制备工艺需要解决的关键问题和发展方向。

1　氮化硼纳米颗粒增强铝基复合材料的制备方法

如表 1 所示，根据 BN_{NP} 增强颗粒加入铝合金基体的方式不同，BN_{NP} 增强铝基复合材料的制备方法可以分为液相法和固相法，以及一些新兴的特殊方法[27-35]。

表 1 BNNP增强铝基复合材料制备方法
Tab.1 Preparation methods for the BNNP reinforced aluminum matrix composite materials

制备方法	优点	缺点
搅拌铸造[27]	工艺简单、加工成本低、Al 基体材料选择多样	BN_{NP} 颗粒难以均匀分布
超声辅助铸造[28-29]	BN_{NP} 颗粒均匀分布、改善 BN_{NP} 颗粒与 Al 基体的润湿性	高温腐蚀熔体产生污染、机器寿命减少
选择性激光熔化[30-31]	生产效率高、制备精细的 BN_{NP} 增强 Al 基复合材料	易形成孔隙、BN_{NP} 颗粒的高热导性不利于成型
粉末冶金[32-34]	BN_{NP} 颗粒可均匀分布、界面反应可控制、工艺参数易选择	成本高、原料制备难、成品致密度低
热挤压	成品组织致密、内部缺陷少	成本高、工艺效率低
喷射沉积法[35]	制备工艺灵活、设备简单	成本高、易产生孔隙、致密度低

1.1　液相法

与其他工艺技术相比，液相法具有界面结合良好、工艺简单、制备成本低、可实现近净成型等优点[36]。常见的液相法主要包括搅拌铸造法和超声辅助铸造法。

1.1.1　搅拌铸造法

搅拌铸造法是制备金属基复合材料的常用方法，其目的是通过搅拌作用实现增强体颗粒在基体中的均匀分布。该工艺通过图 1 所示的机械搅拌装置将增强体颗粒在金属熔体中分散，使其充分混合，最终将复合材料熔体浇铸于模具中，从而制备出复合材料的方法[37-39]。

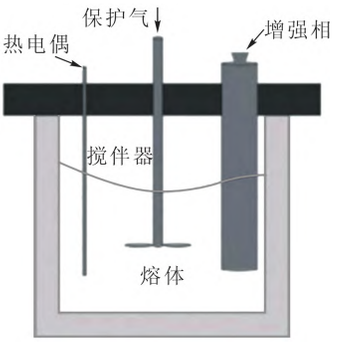


图 1　搅拌铸造示意图[37]
Fig.1　Schematic diagram of the stir casting[37]

Yathiraj 等[40]通过搅拌铸造法制备了不同颗粒含量的 BN_{NP}/Al6061 复合材料。显微组织研究表明，BN_{NP} 颗粒均匀分布在 Al6061 基体中。由于引入BN_{NP} 增强颗粒，复合材料能够承受更高的压痕载荷，并且随着 BN_{NP} 增强颗粒的含量增加，硬度逐渐提高。如图 2 所示，含量为 9%的 BN/Al6061 复合材料，硬度为 59.3 HBW，并且抗拉强度(UTS)也随之增加，UTS 达到了 156.82 MPa，与 Al6061 合金相比，复合材料的 UTS 提高了 53.3%。

Gangatharan 等[41]为了提高用于离心泵应用材料的摩擦性能，采用了搅拌铸造法制备 BN_{NP}/Al2024 复合材料，进一步通过销钉装置对质量分数为 4%的 BN_{NP}/Al2024 复合材料的摩擦磨损性能进行检测。研究表明，用 BN_{NP} 增强的 Al2024 复合材料与未增强的铝合金相比，干滑动阻力提高，因此质量损失较小。Hashim 等[38]采用搅拌铸造法制备了 BN_{NP}/A201 复合材料，研究表明，当 BN_{NP} 颗粒含量为 6%时，BN_{NP}/A201 复合材料的硬度最高，可达到 150.7 HV，相较于 A201 基体硬度提高了 66%。这是由于 BN_{NP} 增强颗粒有效地阻碍了位错运动，从而限制基体变形，提高了 BN_{NP}/A201 复合材料的承载能力，使硬度增大。此外，BN_{NP} 增强颗粒还具有自润滑能力，可在滑动过程中形成保护性润滑薄层，降低材料的磨损速率。如图 3 所示，在磨损试验中，当 BN_{NP} 颗粒的质量分数为 6%时，磨损率最小，为 4.98×10^{-9} g/cm^2，比基体合金的磨损率降低 61%。

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

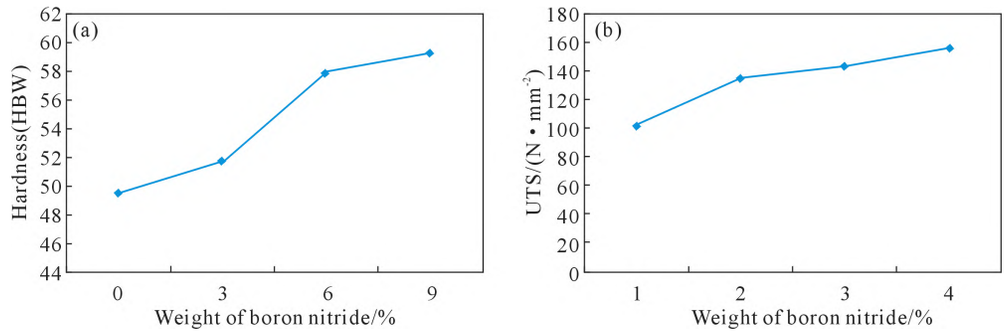


图 2 BN_{NP}/Al6061 实验结果：(a) 硬度 vs. w(BN)图，(b) UTS vs. w(BN) 图[40]

Fig.2 Experimental results for BN_{NP}/Al6061: (a) hardness test results for varying contents of boron nitride, (b) tensile test results for varying contents of boron nitride[40]

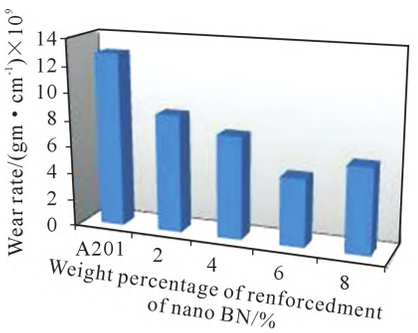


图 3 不同含量 BN_{NP}/A201 复合材料的磨损率数值[38]

Fig.3 Wear rate values of the A201 composites with various BN_{NP} contents[38]

1.1.2 超声辅助铸造法

超声振动已被广泛用于金属熔体的净化、脱气和细化，因为在液体中使用超声场会产生非线性效应，例如空化和声流。图 4 是熔融铝中的超声振动辅助原位技术示意图[42]。此外，超声振动可以改善增强颗粒与金属基体之间的润湿性，使颗粒均匀地分布在金属基体中。

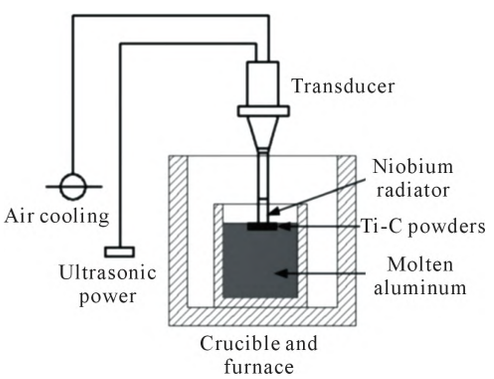


图 4 熔融铝中的超声振动辅助原位技术示意图[42]

Fig.4 Schematic of the ultrasonic vibration assisted in situ technique in molten aluminum[42]

Dirisenapu 等[43]采用超声辅助搅拌铸造法将等比例的 B_4C、BN_{NP} 颗粒加入到 Al7010 合金中。该制备方法的装置包括用于熔化铝合金的电阻加热炉、超声波发生器、超声波探头、换能器和惰性气体保护系统。研究表明，通过超声探头可破坏 BN_{NP}、B_4C 和颗粒团簇，增强体分布较为均匀。当颗粒含量为 2%时，与基体合金相比，(B_4C+BN_{NP})/Al7010 复合材料屈服强度为 225 MPa，提高了 14.2%，拉伸强度为 227 MPa，提高了 11.4%，强化效果最佳。主要的强化机理有细晶强化、位错增殖强化、Orwan 强化。但随着颗粒含量的增加，由于基体与增强体中存在杂质，材料的空隙也随之增加，致密度降低。Harichandran 等[44]使用特殊设计的用于熔融和超声处理的 EN8钢坩埚(图 5)，采用超声辅助搅拌法制备了(BN_{NP}+B_4C)/Al1030 混杂双相复合材料。研究表明，B_4C 和 BN_{NP} 颗粒在基体中分散较为均匀，界面结合良好且无界面反应。其中质量分数为 6%的 B_4C/Al1030 复合材料的强度和硬度都高于混杂复合材料，但是由于 BN_{NP} 颗粒的柔软性，其伸长率远高于 B_4C/Al1030 复合材料，同时抗冲击性能也相对较好。此外，通过摩擦实验表明，磨损率随着 B_4C 含量的增加而降低，当 4%B_4C 和 2%BN_{NP}(质量分数)颗粒混杂时，复合材料的磨损率最小，为 0.2 $cm^3/(N·M)$，比基体材料降低 30%(图 6)。这是由于 BN_{NP} 是一种固体润滑剂，在滑动过程中，销和盘之间形成薄的保护润滑剂层，防止材料表面的直接接触，降低了材料的摩擦系

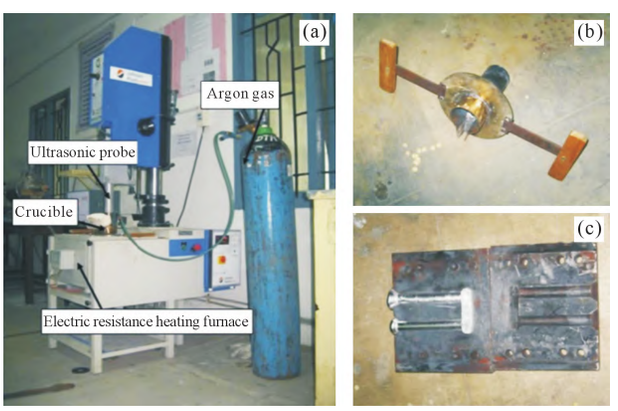


图 5 实验装置：(a) 制造复合材料的实验装置，(b) 专门设计的 EN8 坩埚，(c) 模具组件[44]

Fig.5 Experimental setup: (a) experimental setup for fabricating composites, (b) specially designed EN8 crucible, (c) mould assembly[44]

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

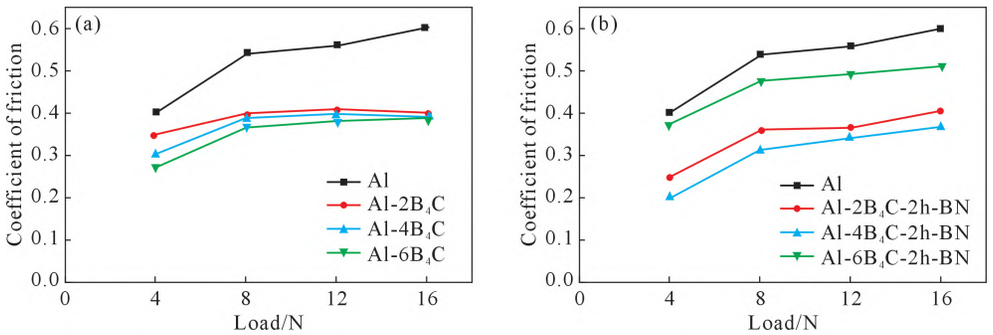


图 6 复合材料摩擦系数变化图：(a) Al-B_4C 纳米复合材料，(b) Al-B_4C-BN_{NP} 杂化纳米复合材料[44]

Fig.6 Variation in the friction coefficient of the composite materials: (a) Al-B_4C nanocomposite, (b) Al-B_4C-BN_{NP} hybrid nanocomposite[44]

数，从而降低了复合材料的磨损率。因此，相较于单一添加 B_4C 颗粒，混合添加 B_4C 和 BN_{NP} 颗粒的 Al1030 复合材料要具有更加良好的综合机械性能。

1.2 固相法

固相反应法是一种简便、易于生产的方法。从广义上说，只有固相参与的化学反应才能叫做固相反应；从狭义上说，固相反应是指固体和固体之间物质的反应，并形成新的固体，通常在较高温度下进行[45]。常见的固相法主要包括粉末冶金和热挤压。

1.2.1 粉末冶金

粉末冶金技术是一种以金属为基材的熔炼方法。将混合后的复合粉末，经过压制和烧结得到规定尺寸、形状的材料坯体。在生产过程中，根据确定的工艺参数，可生产出符合孔隙率、强度等要求的产品[46]。

Firestein 等[47]使用高能球磨法(ball milling, BM)和放电等离子体烧结法(spark plasma sintering, SPS)，以 Al 粉末为金属基体，氮化硼纳米片(BNNPs)和氮化硼微米片(BNMPs)为增强相，制备 BN 颗粒增强铝基复合材料。研究结果表明，使用 BM 和 SPS 后，BN/Al 复合材料在室温下和 500 ℃下都具有较高的硬度和抗拉强度。如图 7 所示，4.5%BNMPs/Al(质量分数)的拉伸强度达到 386 MPa，而 7%BNNPs/Al(质量分数)的拉伸强度才达到 386 MPa，这是由于在 BM 阶段之后，粉末混合物的均匀性较差，使用 BNMPs 在较小的 BN 相含量下达到最大的拉伸强度。与纯 Al 相比，增强 BNMPs/Al 和BNNPs/Al 复合材料可归因于两种强化机制：①由于在 Al 基体中存在硬夹杂物(BN、AlB_2 和 AlN)使其发生 Orowan 强化；②由于 BM 期间 Al 晶粒尺寸的减小而发生Hall-Petch 强化。

Steinman 等[48]使用平均粒径为 10 μm 的原样球形 Al 粉作为金属基体，BN_{NP} 颗粒为增强体加入。反应性球磨阶段使用高能球磨混合器以 800 r/min 的恒定转速进行 2 h，然后使用 SPS 技术将混合物压制，并在 600 ℃下烧结 1 h，以制备出BN_{NP}/Al 复合材料。当

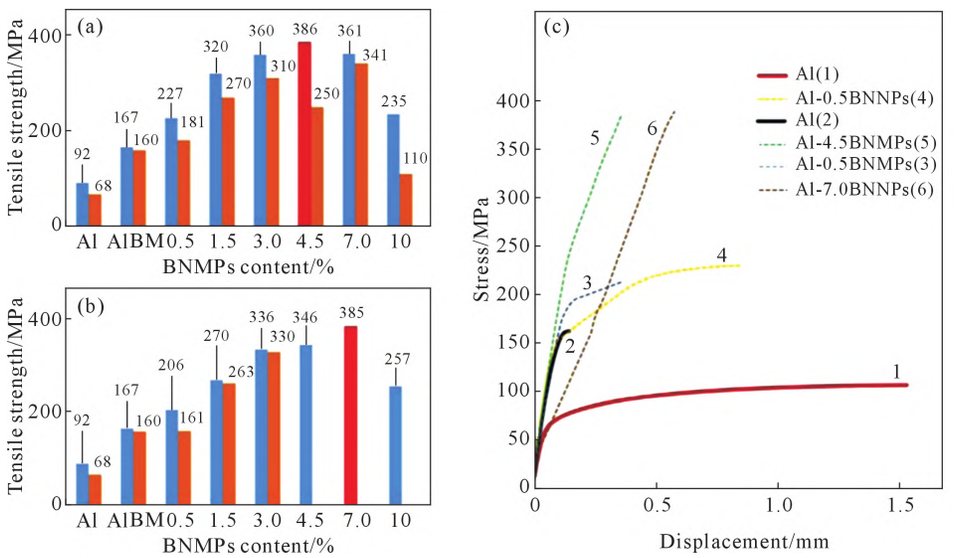


图 7 复合材料力学性能：(a~b) 室温拉伸性能(UTS- 蓝色柱；$\sigma_{0.2}$- 橙色柱，最高 UTS 值-红色柱)与 Al-BNMPs 和 Al-BNNPs 的 BN 相含量之间的关系，(c) 纯 Al 和具有最佳机械性能复合材料的应力-位移曲线[47]

Fig.7 Mechanical properties of the composites: (a~b) relationship between the room temperature tensile properties (UTS-blue bars, $\sigma_{0.2}$-orange bars, highest UTS values-red bars) and the BN phase content of the Al-BNMPs and Al-BNNPs, (c) stress-displacement curves for pure Al and the composites with the best mechanical properties[47]

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

BN_{NP} 质量分数为 5%时，BN_{NP}/Al 复合材料的最大拉伸强度为 380 MPa，与 BM 和 SPS 后纯铝比较，拉伸强度增强了 135%，且塑性很高。这是由于 BN_{NP}/Al 复合材料中的晶粒尺寸较小，增强相更均匀地分布在材料上，在球磨阶段实现了更好的均匀化，从而改善了塑性，材料断裂的 SEM图像也证实了 BN_{NP}/Al 试样的断口出现非常细小的韧窝结构。Rajkumar 等[49]使用烧结和热挤压法，以Al2119 为基体材料，BN_{NP} 颗粒为增强体制备出 BN_{NP}/Al2219 复合材料。通过将Al2219 铝合金与各种质量百分比的 BN_{NP} 颗粒结合来形成 Al2219 熔合材料试样，烧结法将Al2219 合金和 BN_{NP} 粉末在球磨机中研磨 2 h 以获得预混物。最后采用热挤压技术挤出直径为 25 nm 的 BN_{NP}/AA2219 复合材料。研究表明，制备出的所有样品的孔隙率都小于 3%，这是由于通过热挤压大规模变形引起的孔隙率降低。如图 8 所示，烧结和热挤压后的 BN_{NP}/Al2219 复合材料比烧结后的复合材料，抗压强度高出近 1.15 倍。抗压强度最初呈增加趋势，当 BN_{NP} 含量大于 2%时，抗压强度逐渐降低，这是由于更多的 BN_{NP} 增强颗粒引起聚集而降低了抗压强度，使抗压强度从 340 MPa 下降到 191 MPa，降低了 43.8%。

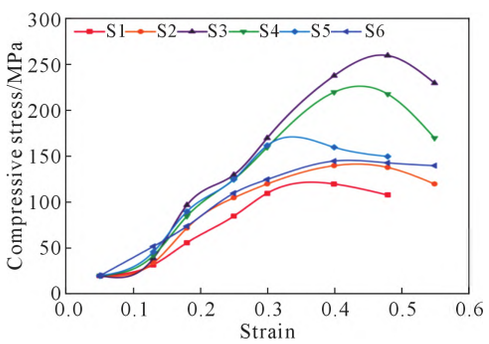


图 8 Al2219 混杂复合材料抗压强度[49]

Fig.8 Compressive strength of the Al2219 hybrid composites[49]

1.2.2 热挤压

热挤压是指在挤压过程中对材料进行加热成形，且加热温度在材料的再结晶温度以上，得到的挤压材料内部缺陷少、组织致密，铝合金的强度塑性可以得到充分提升[50]。其中烧结–热挤压是合成铝基复合材料的有效方法。此外，热挤压方法的加工温度可以避免基体和增强体之间的相互作用。

Gostariani 等[51]利用行星式球磨法以 Al 粉末为金属基体，BN_{NP} 颗粒为增强颗粒，制备了 BN_{NP} 质量分数为 1%、2%和 4%的铝基颗粒增强复合粉末，将研磨的粉末进行压实和固结，然后用热挤压法制备出不同含量的 BN_{NP}/Al 复合材料，图 9 为挤压棒坯的照片。研究结果表明，BN_{NP} 颗粒的存在，使复合粉末的形态更迅速地变化为等轴形状，并使颗粒尺寸减小，BN_{NP} 颗粒在复合材料中限制了晶界的移动，并影响了热挤压过程中超细/纳米结构的稳定性。最终的样品相对密度都高于 99%，接近理论值，说明热挤压也是一种可以消除孔隙，并达到全密度的复合粉末的固结有效方法。通过将 BN_{NP} 含量增加至2%(质量分数)，BN_{NP}/Al 复合材料的拉伸应力增加至约 330 MPa，这比研磨的纯 Al 的拉伸应力高 55%。另一方面，与 2%BN_{NP}/Al 纳米复合材料相比，当含量为 4%时，拉伸应力略有增加，并达到 333 MPa。具有最小含量的纳米 BN_{NP} 颗粒(1%BN)的 BN_{NP}/Al 复合材料拉伸强度与基质(研磨的纯 Al)拉伸强度相比增加了 40%。这是由于在复合材料样品中形成的原位相阻止了热挤压过程中的晶粒生长，并导致复合材料中的晶粒细化，可知提高挤压样品的力学性能主要是由于晶粒细化机制。

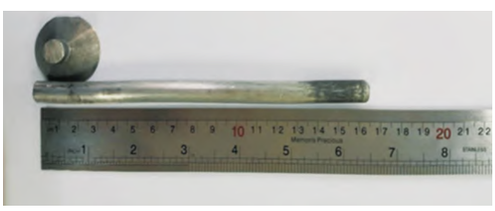


图 9 挤压棒坯[51]

Fig.9 Photograph of an extruded rod billet[51]

Arlic 等[52]通过球磨法使 Al 粉末和0.3%BN_{NP}(质量分数，下同)颗粒进行行星球磨形成混合粉末，封装在工业级铝胶囊中，采用热挤压法制备了 0.3% BN_{NP}/Al 复合材料。结果表明，制备的 0.3%BN_{NP}/Al 复合材料均具有非常细的晶粒结构，平均晶粒尺寸约为 2 μm。图 10 显微硬度测量显示，与纯铝样品相比，0.3%BN_{NP}/Al 复合材料的显微硬度明显增强，这是由于 Al/BN 界面处形成强的化学键合，这种化学键合提供了从基质到颗粒的有效载荷转移，可以提高强度。此外，0.3%BN_{NP}/Al 纳米复合材料在热循环后产生了新的位错，这是因为当室温和上限温度之间的差异达到 200 K 时，新的位错被诱导到 Al 基体中。由于钉扎点数目不变，位错密度及有效长度增加，临界应变降低，Al 基体逐步塑化。

Mukesh 等[53]以 Al6061 为基体，BN_{NP} 颗粒为增强相使用搅拌铸造法先制备 BN_{NP}/Al6061 复合材料，然后使用热挤压法对铸造的复合材料进行挤压。如图 11 所示，BN_{NP} 颗粒在 BN_{NP}/Al6061 复合材料中分布均匀，在添加 BN_{NP} 增强颗粒后，铸态样品和热挤压样品的硬度均提高，与 Al6061 基体材料相比，铸造 9%BN_{NP}/Al6061 复合材料的硬度为 81 VHN，热挤压 9%BN_{NP}/Al6061 复合材料的硬度为 84 VHN。拉

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

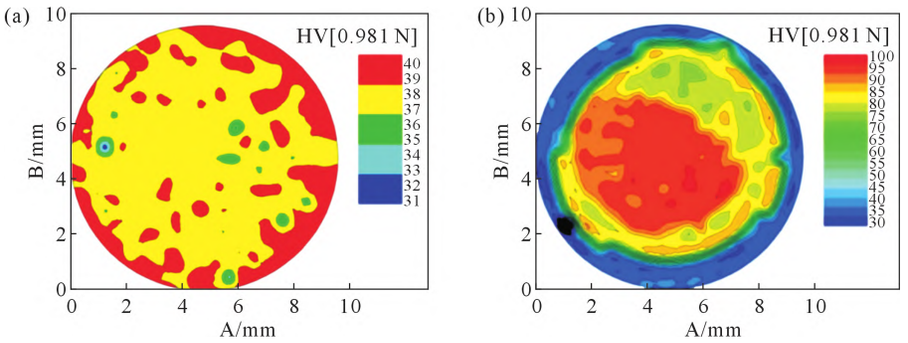


图 10 样本横截面显微硬度($HV_{0.1}$)：(a) 纯铝，(b) 0.3%BN_{NP}/Al[52]

Fig.10 Maps showing the microhardness ($HV_{0.1}$) measured in the cross-section of the samples: (a) Al, (b) 0.3%BN_{NP}/Al[52]

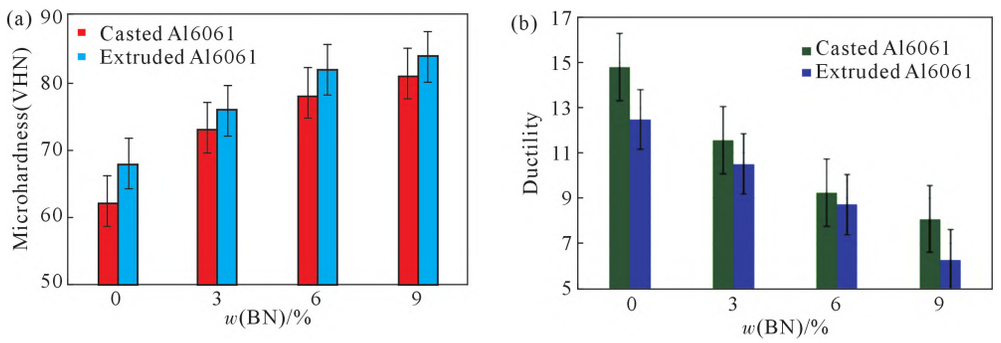


图 11 铸造和热挤压 BN_{NP}/Al6061 复合材料实验结果变化：(a) 显微硬度，(b) 延展性[53]

Fig.11 Changes in the experimental results of casting and hot extrusion of the BN_{NP}/Al6061 composite materials: (a) microhardness, (b) ductility[53]

伸实验表明，与 Al6061 基体材料相比，铸造 BN_{NP}/Al6061 复合材料的最大拉伸强度为 175 MPa，提高了 18.3%，热挤压 BN_{NP}/Al6061 复合材料的最大拉伸强度为 182 MPa，提高了 18.9%。与铸造合金样品相比，所有热挤压复合材料样品显示出更高的硬度值，这是由于在挤出过程中颗粒重新取向、晶粒细化和孔隙率的减少。随着 BN_{NP} 增强颗粒含量的增加，热挤压 BN_{NP}/Al6061 复合材料的塑性从 12%下降到 6%，塑性的降低可能是由于 BN_{NP} 颗粒在金属基体合金中形成团簇。在此期间，基体合金中颗粒之间的空间变得更小，并且表现出内部延展性的能力降低，以促进局部内应力。另一方面，基体合金中增强体的存在导致在凝固时压缩应力的增加。

1.3 新型的制备方法

液相法和固相法仍存在一些无法避免的问题，并且受工艺参数选择的影响，很多研究者借助新兴的制备方法成功地改善了原本实验过程中润湿性和致密性影响，同时显著提高了 BN_{NP} 增强铝基复合材料的力学性能。

1.3.1 喷射沉积法

喷射沉积法是一种结合金属液雾化和沉积过程的成型工艺，在惰性气体作用下制备新型金属材料。其工艺过程包括基体金属熔化、液态金属雾化、颗粒加入及其金属雾化流的混合、沉积和凝固等，图 12 是喷射沉积工艺设备示意图[54]。该方法可用于制备

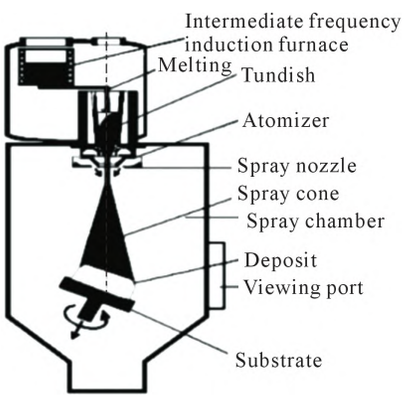


图 12 喷射沉积工艺示意图[54]

Fig.12 Sketch of deposition[54]

具有优异性能的铝合金材料，并在材料表面形成均匀、致密的结构，喷射沉积法因其高效、灵活和可控性，被广泛应用于航空航天、汽车制造和其他工业领域。

Dikici 等[55]采用大气等离子体喷涂法，将球磨 FeB 粉末喷涂到 A383 铝合金基体上，并使用质量分数为 5%的 BN_{NP} 粉末作固体润滑剂，制备了 FeB/BN_{NP} 复合粉体。如图 13 所示，BN_{NP} 改变了复合镀层的腐蚀形貌，金相观察表明，微裂纹颗粒的存在比无裂纹颗粒更能形成优先诱导腐蚀机制。因此，需要优化等离子体喷涂参数以避免涂层孔隙率的显著增加，并获得平衡的耐磨性和耐腐蚀性。因为与 FeB 涂层相比，含有 BN_{NP} 的涂层具有更高的耐磨

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

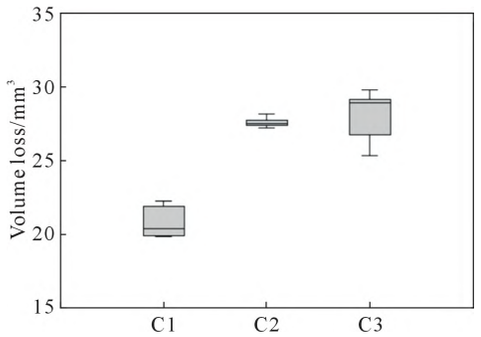


图 13 干砂磨损试验期间的体积损失[55]
Fig.13 Volume loss during dry sand wear testing[55]

性。先前的研究中,在热喷涂涂层中添加 BN_{NP} 材料作为固体润滑剂已用于增强这些涂层的摩擦学性质[56]。Hsiao 等[56]将 BN_{NP} 加入到镍铝合金(Ni-Al)中,制备等离子喷涂涂层,并对涂层的摩擦性能进行了研究。结果表明,BN_{NP}/Ni-Al 粉末可以混合沉积为等离子喷涂涂层,由于等离子喷涂过程中引入的热作用力和冲击力可以使 BN_{NP} 相转变为非晶态氮化硼,使涂层具有良好的润滑效果和摩擦学性能。

1.3.2 选择性激光熔化法

SLM 法作为一种快速烧结熔化金属粉末颗粒,同时在极短的时间再结晶成型零件的工艺方法,已被证明适合于在精细优化的工艺参数下制造铝基材料,图 14 是 SLM 成型原理图。由于 Al 对激光束具有高反射率,因此,即使打印方案或粉末成分的微小变化也会导致熔化区尺寸的变化,并增加材料孔隙率[30]。近年来,研究人员为得到良好性能的 SLM 成形铝合金进行了大量研究[57],主要方式[58]有:①调整粉末性能以便于后期加工;②改变 SLM 工艺参数(激光功率、扫描速度、层厚等)以得到较高致密度的零件,从而提高其力学性能;③通过后续热处理提高成型零件的硬度及抗拉强度,从而改善其综合性能;④添加 Cu、Ni、Sc、Zr、V 和 Zn 等元素以提高其性能。

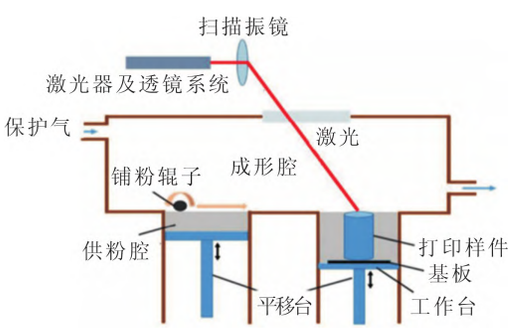


图 14 SLM 成型原理[31]
Fig.14 Schematic of SLM[31]

Konopatsky 等[59]采用 SLM 法以 BN_{NP} 薄片作为原料成功制备了 1%BN_{NP}/AlSi10Mg 复合材料,并模拟计算了 BN_{NP} 与熔体界面发生的结构转变,图 15 为 SLM 处理示意图。研究表明,BN_{NP} 与 Al-Si 基体界面无裂纹分层,结合良好、完全浸润。如图 16 所示,BN_{NP} 由于其各向异性而改变热传导过程,使得基体材料熔化过程受到影响,导致了熔池几何参数的变化和复合材料孔隙率的变化。且在界面处 BN_{NP} 会发生部分溶解,由于 N 原子在基体材料中的扩散速度比 B 原子慢,与 Al 生成 AlN 纳米颗粒。关于材料的力学性能变化,相较于 AlSi10Mg 基体合金,BN_{NP}/AlSi10Mg 的硬度提升 32%,可达 136 HV;抗拉强度提高 28%,可达 230 MPa。然而,添加 BN_{NP} 颗粒会使得材料孔隙率升高,这也是只有 BN_{NP} 含量为 1%才能制备成功的原因,同时也是 SLM 法制备 BN_{NP} 增强铝基复合材料需要解决的问题。Song 等[60]采用选择性激光熔融法制备了 BN_{NP} 增强 Ni_3Al 复合材料,在 Ni_3Al 基体中加入 BN_{NP} 后,由于 BN_{NP}/Ni_3Al 具有抗裂纹扩展的能力,使得复合材料的致密性略有提高。由于添加 BN_{NP} 形成的协同强化和增韧机制,BN_{NP}/Ni_3Al 复合材料具有优异的抗摩擦和抗磨损性能,摩擦系数和磨损率分别降低了 24%和51.2%。

2 问题与展望

目前,制备氮化硼纳米增强铝基复合材料的工艺已经有了显著提升。然而,制备出来的增强铝基复合材料在结构和功能方面仍存在一些欠缺,无法完全满足当前高科技发展对 BN_{NP} 增强铝基复合材料

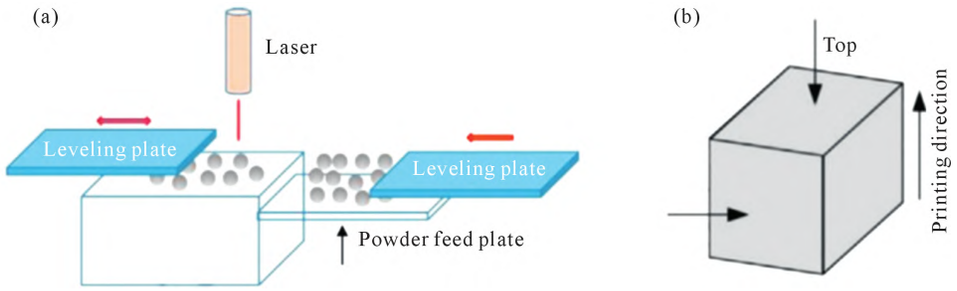


图 15 SLM 处理流程:(a) SLM 处理示意图, (b) 样品侧面相对于处理方向的指定[59]
Fig.15 SLM process flow: (a) schematic of SLM processing, (b) designation of sample sides relative to the treatment direction[59]

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

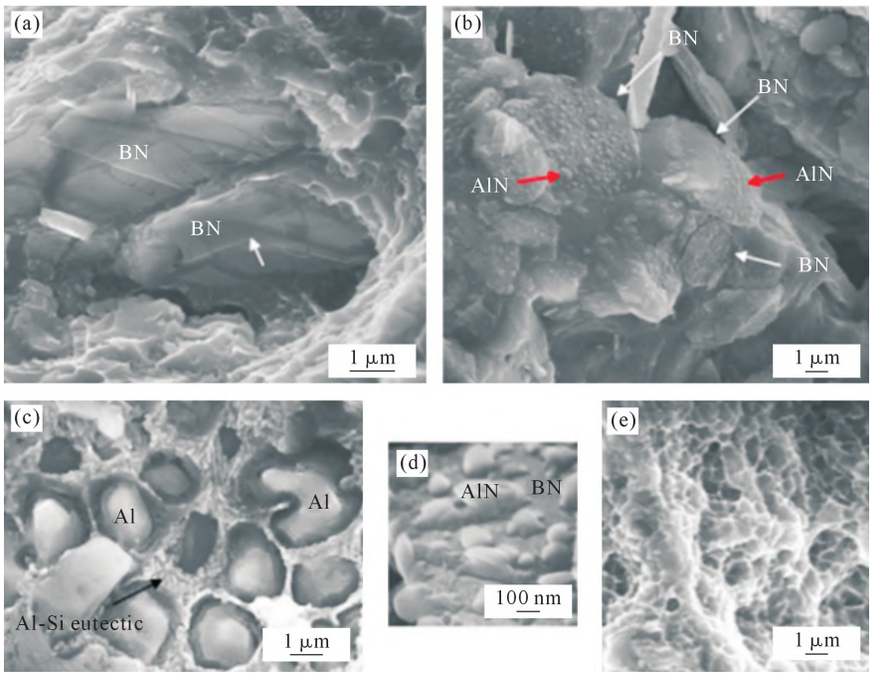


图 16 BN_{NP}/AlSi10Mg SEM 断口微观图：(a) 嵌入的 BN 薄片，(b, d) 覆盖有 AlN 纳米颗粒的 BN 薄片，(c) Al-Si 共晶结构，(e) Al 基体断口形貌[59]

Fig.16 SEM fracture micrographs of a BN_{NP}/AlSi10Mg composite: (a) embedded BN, (b, d) BN covered with AlN nanoparticles, (c) eutectic Al-Si, (e) cellular fracture morphology of the Al matrix[59]

高性能、多功能的要求[59,61]。因此，为了让 BN_{NP} 增强铝基复合材料能够更好应用于工程中，需要进一步研究 BN_{NP} 增强铝基复合材料的结构、性能等，并对其进行优化与创新，根据上述相关研究发现，在科学研究和工程实践中，制备氮化硼纳米增强铝基复合材料存在以下主要问题[62]。

2.1 BN_{NP} 增强颗粒与 Al 熔体的不完全润湿性

BN_{NP} 颗粒与 Al 熔体的润湿角大是导致陶瓷增强 BN_{NP} 颗粒与 Al 熔体润湿性差的原因，BN_{NP} 颗粒很难通过熔体搅拌法将颗粒直接加入熔体。有研究表明，通过对 BN_{NP} 增强颗粒表面镀金属元素如 Ti、Cu 和 Ni 等可以达到改善 BN_{NP} 增强颗粒润湿性的目的[63]。但是如果增强颗粒直径过小，容易发生被覆层的厚度不均问题，并且涂覆成本高，无法大规模生产应用。此外，增强颗粒表面附着的空气膜和熔体表面氧化形成的氧化膜导致颗粒无法与 Al 合金熔体直接接触，BN_{NP} 增强颗粒无法被润湿，这也是 BN_{NP} 增强颗粒与 Al 液的润湿性差的原因。

对于搅拌铸造法 BN_{NP} 颗粒的不完全润湿性，在制备过程中会影响 BN_{NP} 增强铝基复合材料的力学性能和功能特性：①BN_{NP} 颗粒与铝合金基体之间的不完全润湿性可能导致 BN_{NP} 颗粒与铝基体之间的界面黏附力不强，界面的弱化可能导致颗粒与基体之间的剪切或滑移[64]，从而降低材料的强度和刚度；②不完全润湿性还可能影响铝基复合材料的热传导性，BN_{NP} 颗粒与铝基体之间的不良接触可能导致热阻增加，从而降低材料的热导率，这可能对需要高热导率的材料应用(如散热器)造成影响；③不完全润湿性可能导致颗粒在基体中的分散不均匀，未完全润湿的颗粒可能会聚集或堆积在某些区域，造成局部浓度变化和非均匀性[65]，这可能导致材料的性能不一致或局部性能下降。

对于搅拌铸造法 BN_{NP} 颗粒的不完全润湿性，未来的研究过程中可以在以下方向进行优化和创新：

(1)表面处理　通过在颗粒表面施加化学或物理处理，可以改变其表面性质，增加与铝基体的相互作用力[66]，从而提高润湿性。例如，表面涂覆改性剂或进行等离子体处理等方法。

(2)添加助溶剂　在搅拌铸造过程中，可以向混合体系中添加适当的助溶剂。助溶剂具有降低表面张力和增强颗粒与基体之间相互作用的功能，有助于提高润湿性[67]。常见的界面剂包括表面活性剂、偶联剂等。

(3)优化工艺条件　调整搅拌铸造的工艺条件，如搅拌时间、搅拌速度、温度等，可以影响颗粒在基体中的分散情况和润湿性。通过合理的工艺参数选择，可以改善颗粒与基体的接触情况，提高润湿性，或者使用超声辅助搅拌，可以直接打碎 BN_{NP} 颗粒团簇，使 BN_{NP} 增强颗粒更加均匀的分布在 Al 熔体中。

2.2 BN_{NP} 增强颗粒铝基复合材料的致密性

BN_{NP} 增强铝基复合材料致密度的提高与半固态粉末锻造过程中液相的形成、流动和填充固相颗

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

粒间的间隙密切相关。当材料体系中存在大量液相时，在毛细管力和载荷的作用下，液相流动加速并填充孔隙，使材料更加致密。在丰富的液相中，细粉颗粒很容易旋转和移动在液相中，可以让 BN_{NP} 颗粒调整到最佳填充位置，提高致密化的程度，但是 BN_{NP} 颗粒的密度相比于 Al 粉略低，这表明 BN_{NP} 在某种程度上可能会阻碍致密化。在使用粉末冶金制备的样品中，BN_{NP} 颗粒主要沿着 Al 晶界嵌入，这是由 BN_{NP} 颗粒在晶界处的优先位置决定的，从而在单个 Al 晶粒之间产生结构失配，并沿着晶界形成许多微孔和结构不连续性，这对整体机械性能不利。

对于粉末冶金法铝基复合材料的致密性，添加了 BN_{NP} 颗粒导致增强铝基复合材料致密性降低，会影响 BN_{NP} 增强铝基复合材料的力学性能和功能特性：①强度和硬度：较低的致密性可能导致材料内部存在孔隙和缺陷，从而降低了材料的强度和硬度[68]。②疲劳性能：孔隙和缺陷的存在会加剧材料的疲劳损伤，降低其抗疲劳性能和寿命。③导热性能：孔隙和缺陷会限制热的传导，从而降低材料的热导率。④耐腐蚀性能：孔隙和缺陷为腐蚀介质提供了进入材料内部的通道，从而降低了材料的耐腐蚀性能[69]。

对于粉末冶金法的 BN_{NP} 增强铝基复合材料的致密性降低的问题，在未来的研究过程中，可以在以下方向进行优化和创新：

(1)优化粉末混合　确保颗粒与铝合金粉末和其他添加剂的均匀混合，可以提高颗粒的分散均匀性，减少颗粒聚集和堆积的现象。

(2)调整压制参数　在压制过程中，合理调整压制力、压制速度和保持时间等参数，适当的压制参数可以减少孔隙和缺陷的形成[70]，提高材料的致密度。

(3)优化烧结条件　调整烧结温度、烧结时间和气氛等条件，合适的烧结条件可以促进颗粒之间的结合，减少孔隙的形成。

(4)界面改性　通过界面改性技术，如表面涂覆或表面处理，改善颗粒与铝基材料的界面结合，这有助于提高颗粒的结合强度，减少界面的缺陷，提高材料的致密性[71-72]。

(5)优化颗粒特性　选择合适的颗粒尺寸、形状和表面特性等，以提高其与铝基材料的相容性和结合性，这有助于减少界面缺陷，改善材料的致密性。

3　结语

目前，制备纳米 BN 增强颗粒铝基复合材料的研究工作仍处于探索阶段，还需要大量研究工作去促进和推动其在航空航天、精密零件、汽车和体育用品领域中的应用发展。制备 BN_{NP} 增强颗粒铝基复合材料的工艺有很多，每个工艺都具有独特的特点和优势，但在制备过程中 BN_{NP} 增强颗粒在搅拌铸造法的不完全润湿性、在粉末冶金法的 BN_{NP} 增强颗粒铝基复合材料的致密性等问题都能够直接影响到制备成型后的 BN_{NP} 增强颗粒纳米铝基复合材料的力学性能和功能特性，如何解决这些制备过程中的问题，是优化 BN_{NP} 增强颗粒铝基复合材料制备工艺中最关键的一步，实现降低成本，批量化生产，并拓展其在更广泛的民用领域的应用。材料加工领域的主要目标是采用更加方便、廉价的技术来制备高性能材料的零件，对于能够大规模的制备高性能 BN_{NP} 颗粒增强铝基复合材料，促进其在国家重要领域的应用及推广具有重要意义。

参考文献：

[1] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 1995-2002.

[2] 曹子林，张林慧，仲斌年，等. 铝基复合材料的制备和研究现状[J]. 金属功能材料，2023, 30(2): 29-39.
CAO Z L, ZHANG L H, ZHONG B N, et al. Manufacture and current research of aluminum matrix composites[J]. Metallic Functional Material, 2023, 30(2): 29-39.

[3] 黄颖，李育川，雷波，等. 粉末冶金颗粒增强铝基复合材料的制备及研究进展[J]. 功能材料，2022, 53(10): 10071-10086.
HUANG Y, LI Y C, LEI B, et al. Preparation and research progress of powder metallurgy particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(10): 10071-10086.

[4] WANG J Y, LI Z Q, FAN G L, et al. Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(8): 594-597.

[5] 王祝堂. 铝合金添加剂的应用现状与发展[J]. 轻合金加工技术，2023, 51(1): 1-5.
WANG Z T. Application status and development of aluminum alloy additives[J]. Light Alloy Fbrication Technology, 2023, 51(1): 1-5.

[6] 胡海亮. 船舶与海洋工程中铝合金的运用研究[J]. 舰船科学技术，2023, 45(4): 45-48.
HU H L. Research on application of aluminum alloy in Ship and marine engineering[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(4): 45-48.

[7] 熊柏青，闫宏伟，张永安，等. 我国航空铝合金产业发展战略研究[J]. 中国工程科学，2023, 25(1): 88-95.
XIONG B Q, YAN H W, ZHANG Y A, et al. Development strategy for the aviation-grade aluminum alloy industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 88-95.

[8] 王欢. 铝合金板材在汽车生产中的应用探究[J]. 时代汽车，2022 (23): 154-156.
WANG H. Research on the application of aluminum alloy sheet in

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

automobile production[J]. Auto Time, 2022, 395(23): 154-156.

[9] AWOTUNDE M A, ADEGBENJO A O, AJIDE O O, et al. Influence of Ti/TiC interface and its site of formation on the properties of powder metallurgically fabricated Ti-based composites reinforced with carbonaceous materials: A review[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2023, 48(6): 643-667.

[10] TURAN M E, AYDIN F. Improved elevated temperature mechanical properties of graphene-reinforced pure aluminium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(10): 1092-1103.

[11] KWON H, CHO S, LEPAROUX M, et al. Dual-nanoparticulate-reinforced aluminum matrix composite materials[J]. Nanotechnology, 2012, 23(22): 225704.

[12] 魏征宇，赵国栋. 氮化硼粉末静电自动化喷涂技术在铝型材挤压上的应用[J]. 轻合金加工技术，2010, 38(11): 39-40, 50.
WEI Z Y, ZHAO G D. Usage of electrostatic auto-painting with born nitride powder during Al extrusion[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(11): 39-40, 50.

[13] XU Y, CHUNG D D L. Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments[J]. Composite Interfaces, 2000, 7(4): 243-256.

[14] PODGORNIK B, KOSEC T, KOCIJAN A, et al. Tribological behaviour and lubrication performance of hexagonal boron nitride (h-BN) as a replacement for graphite in aluminium forming[J]. Tribology International, 2015, 81: 267-275.

[15] XIA Z P, LI Z Q, LU C J, et al. Structural evolution of Al/BN mixture during mechanical alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 399(1-2): 139-143.

[16] PENG Q, JI W, DE S. Mechanical properties of the hexagonal boron nitride monolayer: *Ab initio* study[J]. Computational Materials Science, 2012, 56: 11-17.

[17] ZHENG Y T, LI H B, ZHOU T. Microstructure and mechanical properties of h-BN-SiC ceramic composites prepared by in situ combustion synthesis[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 540: 102-106.

[18] LEE K B, SIM H S, HEO S W, et al. Tensile properties and microstructures of Al composite reinforced with BN particles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(5): 709-715.

[19] XUE Y M, JIANG B Z, BOURGEOIS L, et al. Aluminum matrix composites reinforced with multi-walled boron nitride nanotubes fabricated by a high-pressure torsion technique[J]. Materials & Design, 2015, 88: 451-460.

[20] ZHANG Z W, LIU Z Y, XIAO B L, et al. High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing[J]. Carbon, 2018, 135: 215-223.

[21] PRASAD REDDY A, VAMSI KRISHNA P, NARASIMHA RAO R, et al. Silicon carbide reinforced aluminium metal matrix nano composites-a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 3959-3971.

[22] YASHPAL, SUMANKANT, JAWALKAR C S, et al. Fabrication of aluminium metal matrix composites with particulate reinforcement: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 2927-2936.

[23] RAHIMIAN M, PARVIN N, EHSANI N. Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(4-5): 1031-1038.

[24] YANG X D, ZOU T C, SHI C S, et al. Effect of carbon nanotube (CNT) content on the properties of in-situ synthesis CNT reinforced Al composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 660: 11-18.

[25] YAMAGUCHI M, BERNHARDT J, FAERSTEIN K, et al. Fabrication and characteristics of melt-spun Al ribbons reinforced with nano/micro-BN phases[J]. Acta Materialia, 2013, 61(20): 7604-7615.

[26] YAMAGUCHI M, MENG F Q, FIRESTEIN K, et al. Powder metallurgy routes toward aluminum boron nitride nanotube composites, their morphologies, structures and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 604: 9-17.

[27] HONG S J, KIM H M, HUH D, et al. Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering:A, 2003, 347(1-2): 198-204.

[28] YANG Y, LAN J, LI X C. 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.

[29] XU Z W, YAN J C, CHEN W, et al. Effect of ultrasonic vibration on the grain refifinement and SiC particle distribution in Zn-based composite filler metal[J]. Material Letters, 2008, 62(17-18): 2615-2618.

[30] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 401-477.

[31] 薛茂远. 管状铝合金零件选择性激光熔化(SLM)内表面顶部凸粒分析与抑制工艺研究[D]. 贵阳：贵州大学，2022.
XUE M Y. Analysis and suppression of top protrusions on the inner surface of selective laser melting(SLM) of tubular aluminum alloy parts[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.

[32] 冯志荣，易茂中，朱双星，等. 六方氮化硼和碳化硅对 C/C 复合材料摩擦性能的影响[J]. 炭素技术，2022, 41(5): 54-61.
FENG Z R, YI M Z, ZHU S X, et al. Effect of hexagonal boron nitride and silicon carbide on the tribological properties of C/C composites[J]. Carbon Techniques, 2022, 41(5): 54-61.

[33] 谢辉，邓福铭，王浩，等. 粉末冶金立方氮化硼聚晶材料的球磨混料工艺[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2020, 25(5): 424-432.
XIE H, DENG F M, WANG H, et al. Ball milling and mixing process for preparation of polycrystalline cubic boron nitride composites[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2020, 25(5): 424-432.

[34] 刘宏葆. 氮化硼基精铸复合型壳及制备工艺——一种新钛熔模精铸技术的可行性研究[D]. 上海：上海大学，2008.
LIU H B. The study on BN based investment shell mold used for casting Ti alloy and its preparation process[D]. Shanghai:

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

Shanghai University, 2008.

[35] STARKE E AJR., STALEY J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2-3): 131-172.

[36] RAJESH N, YOHAN M. Recent studies in aluminium metal matrix nano composites (AMMNCS)-A review[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2016, 7(6): 618-623.

[37] 王严,谢吉林,陈玉华,等. 镁基复合材料制备技术研究现状[J]. 精密成形工程,2022, 14(12): 119-127.
WANG Y, XIE J L, CHEN Y H, et al. Current status of magnesium matrix composites preparation technology research[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(12): 119-127.

[38] HASHIM F A, ABDULKADER N J, JASIM N S. Effect of nano BN addition on the properties of an aluminum metal matrix composite[J]. Engineering and Technology Journal, 2018, 36(6A): 691-695.

[39] CHEN C G, GUO L C, LUO J, et al. Aluminum powder size and microstructure effects on properties of boron nitride reinforced aluminum matrix composites fabricated by semi-solid powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 646: 306-314.

[40] YATHIRAJ K, CHANDRAIAH M T, MOHAN KUMAR A R. Evaluation of mechanical properties of aluminium 6061 reinforced with boron nitride MMC's using OM[J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2016, 5(9): 16128-16133.

[41] GANGATHARAN T, ANADHA MOORTHY A, RAMESHKUMAR T. Enhancing the tribological properties of composite materials for centrifugal pump applications [J]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2016, 3(3): 195-199.

[42] LIU Z W, HAN Q Y, LI J G. Ultrasound assisted in situ technique for the synthesis of particulate reinforced aluminum matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(7): 2080-2084.

[43] DIRISENAPU G, DUMPALA L, REDDY S P. The influence of B_4C and BN nanoparticles on Al 7010 hybrid metal matrix nanocomposites[J]. Emerging Materials Research, 2020, 9(3): 558-563.

[44] HARICHANDRAN R, SELVAKUMAR N. Microstruc ture and mechanical characterization of (B_4C+h-BN)/Al hybrid nanocomposites processed by ultrasound assisted casting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 144: 814-826.

[45] 张琰琰. 电子封装用 $Al_2W_3O_{12}/SiC_p$/Al 复合材料的制备及其性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
ZHANG Y Y. Fabrication and properties of $Al_2W_3O_{12}/SiC_p$/Al composite used for electronic packaging[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.

[46] ZHANG P, YUAN X B, LI Y D, et al. Influence of minor Ag addition on the microstructure and properties of powder metallurgy Cu-10 wt% Fe alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 904: 163983.

[47] FIRESTEIN K L, CORTHAY S, STEINMAN A E, et al. High-strength aluminum-based composites reinforced with BN, AlB_2 and AlN particles fabricated via reactive spark plasma sintering of Al-BN powder mixtures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 681: 1-9.

[48] STEINMAN A E, CORTHAY S, FIRESTEIN K L, et al. Al-based composites reinforced with AlB_2, AlN and BN phases: Experimental and theoretical studies[J]. Materials & Design, 2018, 141: 88-98.

[49] RAJKUMAR S, ARUL K, MAGESHKUMAR K, et al. Physical and mechanical properties of AA2219/BN composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 59: 1429-1433.

[50] 钱炜. 原位纳米颗粒与稀土耦合强化 AA6111 复合材料的设计、组织与性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
QIAN W. Design, microstructure, and properties of AA6111 matrix composites reinforced by the cooperation in-situ nanoparticles and rare earth[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.

[51] GOSTARIANI R, EBRAHIMI R, ASADABAD M A, et al. Mechanical properties of Al/BN nanocomposites fabricated by planetary ball milling and conventional hot extrusion[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 31: 245-253.

[52] ARLIC U, DROZD Z, TROJANOVÁ Z, et al. Characterisation of an Al-BN nanocomposite prepared by ball milling and hot extrusion[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 219: 012011.

[53] MUKESH Y B, BHARATHESH T P, SARAVANAN R, et al. Effect of hot extrusion on mechanical behaviour of boron nitride reinforced aluminium 6061-based metal matrix composites[J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2019, 10(2): 135-151.

[54] 潘利文,林维捐,唐景凡,等. 颗粒增强铝基复合材料制备方法及研究现状[J]. 材料导报,2016, 30(S1): 511-515.
PANG L W, LIN W J, TANG J F, et al. Preparation methods and research status of particle-reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials Reports, 2016, 30(S1): 511-515.

[55] DIKICI B, OZDEMIR I. FeB and FeB/h-BN based anti-corrosive composite coatings for aluminium alloys[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2012, 59(5): 246-254.

[56] HSIAO W T, SU C Y, HUANG T S, et al. The microstructural characteristics and mechanical properties of Ni-Al/h-BN coatings deposited using plasma spraying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(32): 8239-8245.

[57] BARTKOWIAK K, ULLRICH S, FRICK T, et al. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 393-401.

[58] 董庆楠,赵荣霞,赵占勇,等. 选择性激光熔化铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺,2022, 51(6): 1-5.
DONG Q N, ZHAO R X, ZHAO Z Y, et al. Research progress in selective laser melting of aluminum alloys [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(6): 1-5.

[59] KONOPATSKY A S, KVASHNIN D G, CORTHAY S, et al. Microstructure evolution during AlSi10Mg molten alloy/BN microflake interactions in metal matrix composites obtained through 3D printing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157765.

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

[60] SONG Y, HE G Y, WANG Y G, et al. Tribological behavior of boron nitride nanoplatelet reinforced Ni_3Al intermetallic matrix composite fabricated by selective laser melting [J]. Materials & Design, 2019, 165: 107579.

[61] TSUNEKAWA Y, OZDEMIR I, OKUMIYA M. Plasma sprayed cast iron coatings containing solid lubricant graphite and h-BN structure [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15: 239-245.

[62] MANNA A, BHATTACHARAYYA B. A study on machinability of Al/SiC-MMC [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1-3): 711-716.

[63] ANSARI J A, LIU C R, KHAN S A. MMC based MTDC grids: A detailed review on issues and challenges for operation, control and protection schemes[J]. IEEE Access, 2020, 8: 168154-168165.

[64] WU J H, ZHANG H L, ZHANG Y, et al. The role of Ti coating in enhancing tensile strength of Al/diamond composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 565: 33-37.

[65] JIANG J J, GUO Q, WANG B L, et al. Research on variation of static contact angle in incomplete wetting system and modeling method[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 504: 400-406.

[66] CHEN Y Q, XIE Q, SARI A, et al. Oil/water/rock wettability: Influencing factors and implications for low salinity water flooding in carbonate reservoirs[J]. Fuel, 2018, 215: 171-177.

[67] DE ALBUQUERQUE A C, JOSEPH K, DE CARVALHO L H, et al. Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(6): 833-844.

[68] CHEN P, LU C, YU Q, et al. Influence of fiber wettability on the interfacial adhesion of continuous fiber-reinforced PPESK composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102(3): 2544-2551.

[69] WANG T, HUANG Y F, MA Y Z, et al. Microstructure and mechanical properties of powder metallurgy 2024 aluminum alloy during cold rolling [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 3337-3348.

[70] WANG T, YANG L, TANG Z Z, et al. Microstructure, mechanical properties and deformation mechanism of powder metallurgy AZ31 magnesium alloy during rolling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 844: 143042.

[71] PRICOP B, ÖZKAL B, SÖYLER U, et al. Influence of mechanically alloyed fraction and hot rolling temperature in the last pass on the structure of Fe-14Mn-6Si-9Cr-5Ni (mass.%) shape memory alloys processed by powder metallurgy [J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2014, 8(3-4): 247-250.

[72] JIANG Q C, LI X L, WANG H Y. Fabrication of TiC particulate reinforced magnesium matrix composites [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(6): 713-717.

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