

铝基复合材料的制备与研究现状

刘传志¹, 李晨雨^{1*}, 高 飞¹, 刘晓艳^{1,2,3*}, 刘家宇¹, 孙 忠³

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北工程大学河北省高强韧性耐磨金属材料重点实验室, 河北 邯郸

³邯郸市市政排水管理处, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月22日

摘 要

由于其重量轻, 密度小, 热膨胀系数小, 耐腐蚀, 高强度, 高刚度, 高强度和高热稳定性, 耐磨损, 抗疲劳等特点, 使其在工业中得到了广泛的应用。本文根据国内外铝基复合材料的发展状况, 综述了目前国内外常用的增强相类型及特性, 介绍了国内外常用的新型增强相的制造工艺, 并探讨了其主要应用领域。

关键词

铝基复合材料, 界面结合, 增强体, 制备方法, 应用

The Preparation and Research Status of Aluminum Matrix Composites

Chuanzhi Liu¹, Chenyu Li^{1*}, Fei Gao¹, Xiaoyan Liu^{1,2,3*}, Jiayu Liu¹, Zhong Sun³

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

²Hebei Key Laboratory of Wear-Resistant Metallic Materials with High Strength and Toughness, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

³Handan Municipal Drainage Management Office, Handan Hebei

Received: Apr. 10th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

Due to its characteristics such as light weight, low density, low coefficient of thermal expansion, corrosion resistance, high strength, high stiffness, high thermal stability, wear resistance, and fatigue resistance, aluminum matrix composites have been widely used in various industries. Based

*通讯作者。

文章引用: 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(2): 50-60. DOI: 10.12677/nanotechnology.2025.152007

on the development status of aluminum matrix composites both domestically and internationally, this paper reviews the types and properties of commonly used reinforcement phases, introduces the manufacturing processes of new types of reinforcement phases, and discusses their main application fields.

Keywords

Aluminum Matrix Composites, Interface Bonding, Reinforcement Phase, Preparation Methods, Applications

Copyright © 2025 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

铝基复合材料是以铝及其合金为基材，以纤维、晶须、陶瓷粒子和石墨烯为增强体，经特定工艺加工而成的一种新的复合材料。铝基复合材料兼具低密度、耐腐蚀、低热膨胀系数及良好的机械性能，可有效解决铝基材料自身强度低、硬度低、抗疲劳能力差的问题。铝基复合材料具有优异的机械性能，在航空航天、国防军工、交通工具、民用建筑等方面有着广泛的应用前景。经过数十年的发展，铝基复合材料的制备、制备及加工技术日趋成熟，其制备工艺日趋成熟，且具有更多的弹性可供选择。通过对目前常用的增强体、制备方法及应用范围等方面的综述，了解目前铝基复合材料的发展状况，为今后的研究工作提供借鉴。

2. 铝基复合材料的界面结合问题

复合材料的界面状态会直接影响复合材料的整体性能，所以如何提高复合材料的界面结合强度至关重要。在其中增强体的类型以及复合材料的制备方法都有种决定性作用。

2.1. 界面结合的类型与机制

铝基体与增强体的结合方式主要为两种方式，其中一种为通过物理键形成的弱界面结合，例如让基体和增强体通过表面进行嵌入作用的机械结合。这种结合方式主要依赖于表面粗糙度和物理嵌合作用；而另一种是由化学反应形成的强界面结合。这种方法也包含很多方式，比如氧化物结合、交换反应结合和混合物结合等方式。

除此之外还有另外一种方法为溶解与润湿结合，这种方法是在复合材料制造过程中，复合材料的基体和增强相先浸润，再互相溶合，是一种复合模式。由于温度越高，原子的扩散时间越短，浸润作用就越大，溶解作用就越小。这种方法与物理键的结合息息相关。

当增强相没有与基底进行反应时，则为物理键合状态，即界面间以范德华力相连。其中润湿角对于物理键结合有着重要的作用。一般来说润湿性越好，材料的性能就越好。根据润湿角的不同，其润湿性也不同。当润湿角 $< 90^\circ$ 时，表明有一些润湿性。当润湿角 $> 90^\circ$ 时，表明不具备润湿性。润湿角度较小时，对基体表面的浸润效应较好，而对基体表面浸润角较大，则会导致界面相斥，从而降低了粘接效果。

当增强体与基体发生反应时属于化学键的结合，因此在界面处会产生新的化合物。如 SiC 增强铝基复合材料中会产生 Al_4C_3 化合物。这些化合物使得增强体与基体形成了强界面结合。另外生成的化合物由

于晶格的不同,从而形成的化学键的强弱也不相同。但是,界面生成的材料通常是脆性的。因此,在界面反应过大的情况下,将导致界面粘结强度下降。这对材料的综合性能有很大的影响。因此,在生产过程中,必须对界面反应进行严格的控制。

2.2. 界面结合问题的优化

2.2.1. 优化界面反应

通过控制制备工艺参数的不同,如增强体的选择、温度、时间等条件来严格控制界面反应的生成,减少有害产物及脆性相的大量生成。例如通过研究发现,常用的 SiC 就能够和 Al 基体产生良好的界面,这类增强体与 Al 基体的化学结合力较强,因此能形成强界面。但同时经常会出现界面过度的情况,因此我们要严格控制其他反应的条件。

2.2.2. 提高界面强度

通过给增强体进行表面处理以及在其中添加合金元素都是常用的提高界面强度的方法。都是通过改善增强体与基体之间的界面润湿性,减低表面的张力。从而有效抑制界面过度现象产生。

3. 增强体类型

3.1. 碳纤维

碳纤维是一种以碳为基本成分的特殊纤维,其分子结构[1]介于石墨和钻石之间,呈不完整的轴向取向。每一平行层膜都是由原子排布而成的,其表面颜色为黑色,力学性能优异。该复合材料综合了碳材料优良的导电性、耐蚀性、耐热性、密度小、热膨胀系数小、强度高、比模量高等优点,并具备良好的柔韧性和可设计性。是一种重要的工业用纤维原料[2]。相对于用陶瓷粒子作为增强体,其对冲击韧度的改善效果更明显。因而经常作为一种理想的复合材料补强材料,被广泛应用于多种复合材料的制造中。然而,由于其与铝的浸润性较差,并且两者在界面处容易发生过度反应,生成 Al_4C_3 等脆性相,从而降低其力学性能[3]。截至当前,有两个方法改善此问题:(1) 在碳纤维表面进行表面改性,如在表面进行涂覆。该方法有效地使碳纤维和基体的界面反应得到改善,使得其脆相不易生成,有效地提高了界面润湿性,除此之外还能提高复合材料的力学性能。此外还可以添加 Ni [4]、Cu [5]等金属涂覆层或 Al_2O_3 [6]、TiC [7]、SiC [8]等陶瓷涂层。查阅资料可得,Cu 涂覆层能够和材料结合的较好,密度高,因此其使用 Cu 进行涂覆的效果比其他材料更好[9]。Yang [10]对 ZL205A 合金进行了表面处理,发现在 ZL205A 合金中添加 Cu 后,其延伸率提高了 200%,拉伸强度提高了 20.2%。但其制备工艺复杂、成本高,且易脆,易导致其形变性能下降。(2) 加入合金合金。例如:在铝合金中加入镁、钛等元素,可以有效地解决界面反应过多、润湿性能较差等问题。镁具有低表面张力,是一种优良的表面活性剂,将 Mg 添加到铝液中,可以有效地提高铝合金及增强相的浸润性[11];而 Ti 元素具有细化晶粒、提高再结晶温度、延缓 C 元素向 Al 基合金中的扩散和 Al_4C_3 的长大等作用,进而抑制过多的界面反应,增强润湿性,提升材料综合性能[12]。

3.2. 晶须

纳米晶须是一种结构规整、内部缺陷极少、机械性能优良的纳米晶须,其强度、模量均已达到理论值。当增强体为晶须的时候,例如: Al_2O_3 [13]、 $MgAlB_4$ [14]、 $MgAl_2O_4$ [15]晶须等,这样就使得复合材料完全兼顾了铝合金本身的轻质量、热膨胀系数低以及耐腐蚀的特点,还兼顾了晶须的高强度、高硬度和耐热等特点。其抗拉强度可达 330 MPa,弹性模量超过 100 GPa[16],可广泛应用于航空航天、航空航天等领域,也可用于航空航天、航空航天等航空航天、航空航天等飞行器的散热构件。然而,以晶须为增强相的复合材料在热处理过程中有一些不足。比如,由于基体塑性变形与晶须旋转方向不一致,使得

晶须在热处理时容易断裂,从而使其拉伸强度下降。通过对晶须进行包覆,可以很好地解决这一问题。Li [17]通过挤出浇铸法合成了 Bi_2O_3 包覆的 $\text{Al}_3\text{B}_4\text{O}_3$ 晶须/Al 基复合材料,通过多种测试方法,发现 Bi_2O_3 包覆后,其晶须断裂几率显著降低,并具有较好的机械性能,可显著提高其抗拉强度、断裂延伸率,降低界面反应,增加润湿性。此外,由于晶须的制备难度大,成本高,所以更适合使用廉价易得的晶须。如: $\text{Al}_3\text{B}_4\text{O}_3$ 晶须[18]。晶须是一种非常重要的增强相,但目前仍存在着品种单一、价格昂贵等问题。因此,开发低成本的晶须增强相成为亟待解决的问题。

3.3. 陶瓷颗粒

陶瓷颗粒(如: TC [19]、 TiB_2 [20]、 SiC [21]颗粒等)是铝基复合材料中最常见的增强体,具有较高的硬度,较高的弹性模量,较高的强度和熔点,以及较高的温度和耐磨性。在获得密度小于 2.8 g/cm^3 、强度 $400\sim 700 \text{ MPa}$ 、高刚性($80\sim 140 \text{ GPa}$)、拉伸强度高于铝合金 60%、热膨胀系数低、硬度高于基体 100%、具有良好的耐热、耐磨和耐腐蚀性能。然而陶瓷颗粒有一个缺点就是与铝基体的界面润湿性较差,让增强体在复合材料内部很难均匀分布。而解决此问题的方法就是采用原位合成法,此方法可以有效的解决其润湿性的问题,使得增强体在复合材料内部均匀分布[22]。Du [23]通过原位合成法获得 SiC/Al 基复合材料,其晶粒尺寸随温度上升而变大,且与基体润湿性好,避免了过多的界面反应,具有优良的机械性能。与传统的制备方法比较,原位法具有操作简单,成本低廉,不需要精密的仪器设备等优势,适于大规模生产。

3.4. 石墨烯

石墨烯作为增强体加入铝基复合材料中,能够赋予复合材料优异的性能,包括耐磨性、高导电性、高硬度等。有研究表明,石墨烯增强铝基复合材料的硬度比铝基体高了 40%,其抗拉强度和屈服强度可达到 $300\sim 400 \text{ MPa}$ [24],因此在各个领域用途很广泛。但目前存在工艺复杂、成本高、质量差等问题,制约了其工业化量产。Tiwari [25]利用累加堆叠焊接(ARB)技术,可在较大程度上实现工业化应用,同时,该方法不仅简单、高效、易于规模化应用,还能够有效提高力学性能和抗腐蚀性能。李岳[26]等采用粉末冶金结合热压法制备了石墨烯/6061 铝基复合材料,并在 0.5%的石墨烯用量下获得了最佳的力学性能。除此之外,高博[27]以及曹子林[28]等人通过详细综述了石墨烯增强铝基复合材料的制备方法以及性能为石墨烯增强复合材料的未来奠定了基础。此外由于石墨烯与铝基体也会存在界面润湿性较差问题,也可以对石墨烯进行表面改性处理,提高其润湿性。Lian Yang [29]等人通过化学镀的方法在石墨烯表面进行镀铜,有效的提高了复合材料的力学性能以及电导率。

4. 铝基复合材料制备工艺

4.1. 粉末冶金法

粉末冶金法通过使用基体和增强体粉末混合之后,进行热压烧结工艺。如图 1 所示。这意味着使用比其他替代加工方法更低的温度,减少基体和增强之间的相互作用。为了获得良好的微观结构,所有颗粒均匀分布在混合物中是非常重要的。当晶须用作增强材料时,为了改善填充效果和使纤维在基体中得到良好的分散,需要使基体合金的颗粒更小。通过本项目的研究,获得了一种新的高性能复合材料。这种方法更适合颗粒和纤维强化铝基复合材料[30]。Zhang 等[31]采用粉末冶金法制备纳米 SiC 粒子及石墨烯/石墨复合强化 Al 基复合材料,利用 SiC 粒子对基体晶粒进行有效控制,制备出具有纳米结构的复合材料。然而,该材料具有较高的孔隙率、较低的致密度以及较多的缺陷,制备工艺较为复杂,并且容易出现局部应力以及石墨片层脱落等问题。Jia [32]用等离子体放电烧结的方法,在短纤维/6061 铝-碳化硼

复合材料基础上,研究表明,该复合材料的拉伸强度较 6061 铝合金高出 60%,维氏硬度高达 80%,并且具有较好的中子屏蔽能力。此外,Shuai Yang [33]等人还采用了一种新型的方法,即采用 Hummers 方法先制备出带负电荷的氧化石墨烯纳米片,并通过静电自组装将其吸附在带正电荷的铝粉上。在此基础上,利用粉末冶金法制备了具有良好力学性能的石墨烯/铝基复合材料。从而提高了复合材料的机械性能。粉末冶金法是一种高效、高效的加工工艺,但其内部含有气孔,强度偏低,产品结构及形状受限。在使用过程中,要根据具体的要求和情况,选用适当的工艺方案。

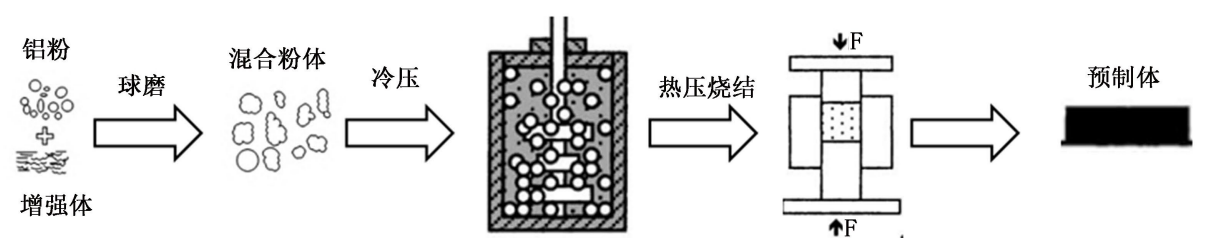


Figure 1. Flowchart of powder metallurgy process
图 1. 粉末冶金法流程图

4.2. 搅拌铸造法

如图 2 所示。目前的搅拌铸造技术主要有液态搅拌和半固态搅拌混铸两大类。液态搅拌铸造是将基体金属加热至熔融状态,然后在熔融状态下迅速加入增强相,通过机械搅拌、电磁搅拌等方法使增强相均匀分布于金属基体内,然后通过浇注成形、冷却等方法实现强化相的均匀分布,从而有效地提高复合材料的力学性能等特点,此方法经常用于颗粒增强体[34]。此法的优点是设备相对简单,操作便捷,能够显著提高生产效率,缩短生产周期。并且可以有效地减少铸造缺陷和气孔,提高铸件的机械性能和表面质量,使得产品具有更高的可靠性和耐用性。其缺点在于搅拌过程中容易卷入气体和夹杂物,导致金属熔体氧化,同时夹杂物和气体使铸造材料形成孔洞,降低材料的性能。另外,在添加高温流体的情况下,增强体也会在高温下发生氧化,所以需要对其进行保护[35]。因此,提高复合材料制备技术的关键在于适当地控制添加量及添加方法、减小气孔等缺陷;为了减少复合材料在基体中的不均匀性,必须采用合适的混合方法。例如:电磁搅拌,摩擦搅拌等[36]。

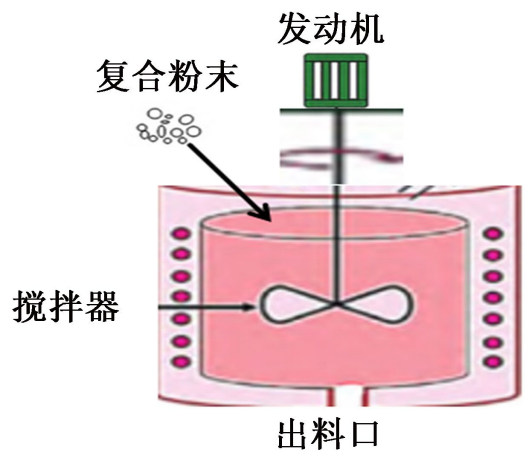


Figure 2. Schematic of stir casting method
图 2. 搅拌铸造法示意图

4.3. 喷射沉积法

如图3所示,喷射沉积法是基于粉末气体雾化(由高压气体雾化的金属熔体组成)。在喷雾形成雾化光束的情况下撞击中间预成形体。通过这种方法制造的复合材料是通过在雾化束内引入增强颗粒以并入固化合金中来制造的。这种加工方法使得到的零件具有良好的组织,增强材料分布非常均匀,并能在溶液中保留大量的合金元素。并且通过这种方式,可以最大限度地减少脆性和不需要的界面化合物的形成[37]。

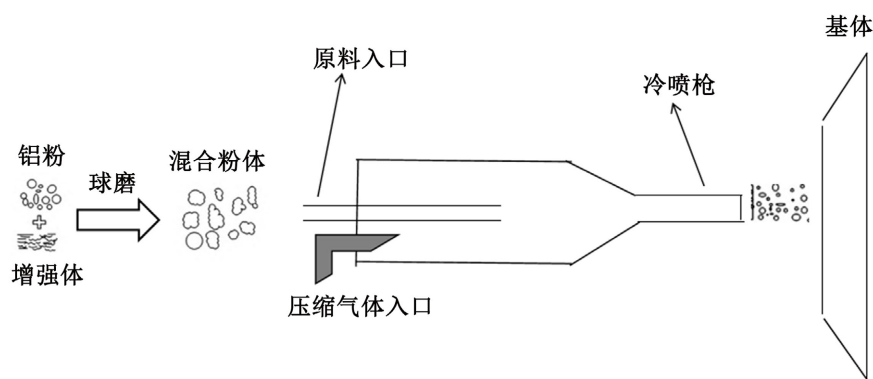


Figure 3. Schematic of spray deposition method

图3. 喷射沉积法示意图

4.4. 原位复合法

原位合成法是一种在反应过程中直接合成复合材料的方法,它能够在制备过程中实现增强体与基体材料的原子级结合,从而形成均匀、稳定的复合材料[34]。该方法的核心特点是通过化学反应在材料的合成过程中,在基体中原位生成增强相(如纳米粒子、纤维、石墨烯等),避免了传统合成方法中常见的增强体与基体分离或不均匀分布的问题。常见的原位合成法有:气液反应合成法、直接熔体氧化法、自蔓延高温合成法和放热反应法等。

与其它制备方法不同的是,原位复合法不需要人工加入,而是在铝合金中发生化学反应。其优点有:

- (1) 原位复合法通过材料内部自身所发生的化学反应来形成增强相,这样生成的增强相表面洁净,避免了外来杂质的污染。
- (2) 因为发生了化学反应所以在界面内部生成了增强相,这些增强相和界面的结合较为紧密,没有任何外来元素的干扰,因此有效地提高了复合材料的性能。
- (3) 原位复合法能够使得增强相在基体中均匀弥散地分布,这种均匀地分布有助于提高复合材料的整体性能。
- (4) 通过调整反应条件和反应物的比例,可以实现对增强相种类、形状、大小以及含量的精确控制,从而制备出具有特定性能的复合材料。但是目前此方法的运用通常都是颗粒增强体。所以,在制备试样时,应首先选择合适的组分,以便能在基体中生成高效、适宜的增强相。

4.5. 选择性激光熔化

选区激光熔融是一种新型的金属增材制造工艺,其核心思想是以高能量激光为热源,对金属粉体进行逐层熔融和凝固。通过对激光运动轨迹及能量的精准调控,实现金属粉层层熔接,从而获得三维立体结构,如图4所示。该技术是将金属粉均匀地分布于喷绘台上,然后根据预先设定好的3D模型,对粉体层进行逐层扫描,最终实现粉体熔凝。随着打印平台的逐层下降和新的粉末层的不断铺展,最终形成一个完整的金属零件。

D Ozherelkov [38]等人通过选择性激光融化技术成功制备出了碳纳米纤维增强铝基复合材料,并且通

过机械活化方法制备了粉末成分, 确定了 SLM 的最佳参数, 使得复合材料的显微硬度达到了 158 HV, 比普通合金提高了 20%。

SLM 方法可以加工高精度的零件, 并且致密度几乎能达到 100%, 还适用于内部有复杂结构的工件, 如空腔、三维网格等。并且由于计算机的快速发展, 使得 SLM 方法的效率得到了提高。但是作为一种新型的方法, 在目前的市场中还不够成熟, 设备昂贵、成本高并且只能用于激光束吸收良好的金属材料[39]-[41]。

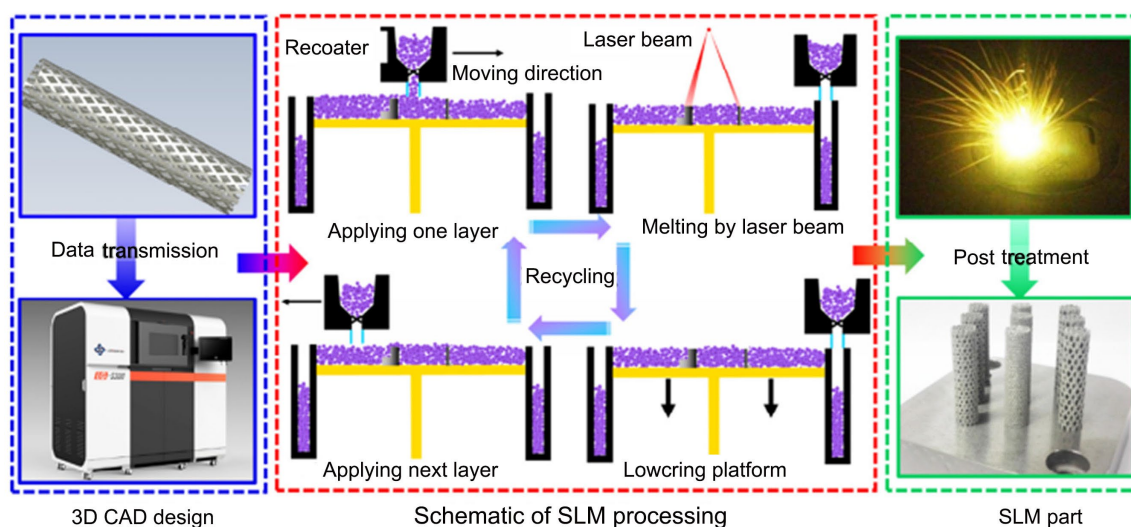


Figure 4. Schematic of SLM [40]

图 4. SLM 示意图[40]

5. 铝基复合材料的应用

5.1. 交通运输领域

随着科学技术的不断进步, 铝基复合材料的制备工艺和性能也在不断优化和提升。例如, 通过采用先进的复合技术和热处理工艺, 可以进一步提高铝基复合材料的强度和耐磨性, 满足汽车制造对高性能材料的需求。因此早在 1980 年左右, 日本就采用了铝基复合材料来制备汽车发动机中的零件, 目的是为了

5.2. 航空航天领域

随着航空航天等领域对轻量化和高性能化的要求, 铝合金基复合材料在先进材料领域的应用日益受到重视。采用不同增强相和基材的特点, 可获得轻质、高强、耐腐蚀、导热、导电等多种功能的铝合金基复合材料, 在航天、民航等航天器中具有非常大的应用范围。美国洛克希德马丁公司首次将铝基复合材料用于军用飞机, 例如: 机翼, 舵, 襟翼, 机身等部件[44]。此外, 铝基复合材料还可用于飞机的液压管路, 如飞机的起落架及阀体等[45]。

5.3. 光学仪器

对于一些高精度的测量设备, 所采用的材料必须是热膨胀系数很小的, 因而在各种情况下, 测量结

果不会受到太大的影响。铝基复合材料因其热膨胀系数低、抗磨损性能好, 适合用于高精密加工设备。本项目以铝合金为主要研究对象, 研究其对高精度光学定位及稳定性能的影响。例如, 美国 IBM 就采用了铝基复合材料作为 MCMs 装置的散热体系, 从而增强 MCMs 的散热性能, 从而提高了器件的散热效率。铝基复合材料在光学仪器万向支承、光学设备支承、望远镜支承和辅助支承等方面有着重要的用途。并且还运用与导航系统中的各种重要零件, 例如: 回转镜壳体、红外观察镜、激光陀螺、反射镜、镜座、精密仪器托架等[46]。使得这些精密仪器在各种环境下都可以具有良好的稳定性。

5.4. 国防与军事领域

近几年, 铝基复合材料的研究日趋成熟, 性能也得到了极大地提高, 逐渐引起了军方的重视, 并得到了广泛的应用。纤维/铝基复合材料因其轻质、高强度、高刚度、高韧性等优点, 被广泛用于战车/装甲车辆的履带、壳体和发动机活塞等。如今, 随着光纤成本的降低, 以及新技术的出现, 其用途日益广泛, 如: 军事直升机壳体、导弹壳体、鱼雷壳体等[47]。不仅如此, 在当今各个国防领域, 如火箭、飞机、导弹等部件中, 铝基复合材料有着更加深远的影响[48] [49]。

5.5. 建筑领域

铝基复合材料具有轻质、高比强度、高比刚度、抗腐蚀性、低热膨胀系数及塑性等优点, 是一类具有很大大发展潜力和竞争力的新型金属基复合材料, 其主要特点是兼具铝的高韧性和高强度, 同时具有颗粒增强的特性[50] [51]。所以它在建筑业中的地位特别重要[52]。在建筑工程中, 可替代部分钢材。另外, 铝基复合材料对钢桥也有很好的作用, 可以有效地延长该桥的使用寿命。

6. 结论

(1) 铝基复合材料通常采用纤维增强体(如: 碳纤维, 金属纤维, 陶瓷纤维等), 颗粒增强体, 晶须, 石墨烯等。在这些复合材料中, 粒子增强相、晶须对复合材料的强度、硬度等性能有较大的改善, 而纤维增强相对冲击韧性有促进作用。另外, 纤维增强相与陶瓷相结合, 使其在复合材料中得到了更广泛的应用。

(2) 目前, 其制备方法主要有: 喷雾沉积、原位复合、粉末冶金、搅拌铸造等。比较而言, 粉末冶金和搅拌法制备工艺简便, 对设备的需求较小, 容易实现, 并有助于提高材料的强度、刚度; 通过自生法制备的复合材料, 界面粘结性能好, 机械性能明显改善, 但适用范围受限; 喷涂沉积可以提高材料的表面修饰能力, 提高其耐腐蚀性。

(3) 铝基复合材料广泛应用于汽车工业, 航空航天工业, 精密仪器, 运动用品, 军事设备, 建筑等领域。然而, 人们往往只注重材料的制作和性质, 而忽略了基础理论的研究。另外, 由于其生产成本较高, 因此, 降低成本, 简化工艺, 节约原材料是进一步研究的方向。

基金项目

作者感谢邯郸市科技研发项目(23422901056)、河北省 2024 年“三三三人才工程”项目(C2024019)。

参考文献

- [1] 费良军, 朱秀荣, 童文俊, 等. 纤维增强铝基复合材料及其应用[J]. 特种铸造及有色金属, 2001(S1):150-152.
- [2] Zhu, C., Su, Y., Wang, X., Sun, H., Ouyang, Q. and Zhang, D. (2021) Process Optimization, Microstructure Characterization and Thermal Properties of Mesophase Pitch-Based Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by Vacuum Hot Pressing. *Composites Part B: Engineering*, **215**, Article 108746. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108746>

- [3] Lalet, G., Kurita, H., Miyazaki, T., Kawasaki, A. and Silvain, J. (2014) Thermomechanical Stability of a Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Matrix Composite Fabricated by Spark Plasma Sintering in Various Pulse Conditions. *Materials Letters*, **130**, 32-35. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.070>
- [4] Zhang, J., Liu, S., Lu, Y., Jiang, L., Zhang, Y. and Li, T. (2017) Semisolid-Rolling and Annealing Process of Woven Carbon Fibers Reinforced Al-Matrix Composites. *Journal of Materials Science & Technology*, **33**, 623-629. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.01.002>
- [5] Oh, S., Lim, J., Kim, Y., Yoon, J., Kim, G., Lee, J., *et al.* (2012) Fabrication of Carbon Nanofiber Reinforced Aluminum Alloy Nanocomposites by a Liquid Process. *Journal of Alloys and Compounds*, **542**, 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.029>
- [6] 陈辉辉. 活塞用碳纤维铝基复合材料的制备方案研究[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2005, 21(3): 15-17.
- [7] Dong, Z.J., Li, X.K., Yuan, G.M., Cui, Z.W., Cong, Y. and Westwood, A. (2013) Tensile Strength, Oxidation Resistance and Wettability of Carbon Fibers Coated with a TiC Layer Using a Molten Salt Method. *Materials & Design*, **50**, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.084>
- [8] Lee, C., Kim, I., Lee, W., Ko, S., Jang, J., Lee, T., *et al.* (2010) Formation and Analysis of SiC Coating Layer on Carbon Short Fiber. *Surface and Interface Analysis*, **42**, 1231-1234. <https://doi.org/10.1002/sia.3495>
- [9] Sha, J., Lü, Z., Sha, R., Zu, Y., Dai, J., Xian, Y., *et al.* (2021) Improved Wettability and Mechanical Properties of Metal Coated Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Matrix Composites by Squeeze Melt Infiltration Technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **31**, 317-330. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(21\)65498-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(21)65498-5)
- [10] Yang, Q., Liu, J., Li, S., Wang, F. and Wu, T. (2014) Fabrication and Mechanical Properties of Cu-Coated woven Carbon Fibers Reinforced Aluminum Alloy Composite. *Materials & Design*, **57**, 442-448. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.064>
- [11] Bhav Singh, B. and Balasubramanian, M. (2009) Processing and Properties of Copper-Coated Carbon Fibre Reinforced Aluminium Alloy Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 2104-2110. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.002>
- [12] 刘连涛, 孙勇. 纤维增强铝基复合材料研究进展[J]. 南方金属, 2008(6): 1-4, 47.
- [13] Qu, X., Wang, F., Shi, C., Zhao, N., Liu, E., He, C., *et al.* (2018) *In Situ* Synthesis of a Gamma-Al₂O₃ Whisker Reinforced Aluminium Matrix Composite by Cold Pressing and Sintering. *Materials Science and Engineering: A*, **709**, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.063>
- [14] Li, J., Wang, F., Shi, C., Liu, E., He, C. and Zhao, N. (2021) High Strength-Ductility Synergy of MgAlB₄ Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composites Achieved by *in Situ* Synthesis. *Materials Science and Engineering: A*, **799**, Article 140127. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140127>
- [15] Zhou, Y., Yu, Z., Zhao, N., Shi, C., Liu, E., Du, X., *et al.* (2013) Microstructure and Properties of *in Situ* Generated MgAl₂O₄ Spinel Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Materials & Design* (1980-2015), **46**, 724-730. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.022>
- [16] 郝保红, 向兰, 方克明. 氧化铝晶须增强铝基复合材料的应用前景[J]. 新技术新工艺, 2006(6): 42-45.
- [17] Li, Z., Fei, W., Yue, H. and Wang, L. (2007) Hot Deformation Behaviors of Bi₂O₃-Coated Al₁₈B₄O₃₃ Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composite with High Formability. *Composites Science and Technology*, **67**, 963-973. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.009>
- [18] Pandey, N., Chakrabarty, I., Barkane, K., Mehta, N.S. and Majhi, M.R. (2020) Microstructure, Mechanical and Wear Properties of Aluminum Borate Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **30**, 1731-1742. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(20\)65334-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(20)65334-1)
- [19] Dhulipalla, A., Uday Kumar, B., Akhil, V., Zhang, J., Lu, Z., Park, H., *et al.* (2020) Synthesis and Machining Characteristics of Novel TiC Ceramic and MoS₂ Soft Particulate Reinforced Aluminium Alloy 7075 Matrix Composites. *Manufacturing Letters*, **24**, 82-86. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.001>
- [20] Rahman, M.H. and Rashed, H.M.M.A. (2014) Characterization of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Procedia Engineering*, **90**, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.821>
- [21] Sert, A., Celik, O. and Wear, N. (2014) Behavior of SiC-Reinforced Surface Composite Al7075-T651 Aluminum Alloy Produced Using Friction Stir Processing. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, **21**, 35-43.
- [22] Pugazhenth, A., Kanagaraj, G., Dinaharan, I. and David Raja Selvam, J. (2018) Turning Characteristics of *in Situ* Formed TiB₂ Ceramic Particulate Reinforced AA7075 Aluminum Matrix Composites Using Polycrystalline Diamond Cutting Tool. *Measurement*, **121**, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.039>
- [23] Du, X., Gao, T., Li, D., Wu, Y. and Liu, X. (2014) A Novel Approach to Synthesize Sic Particles by *in Situ* Reaction in Al-Si-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **588**, 374-377. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.099>

- [24] Niteesh Kumar, S.J., Keshavamurthy, R., Haseebuddin, M.R. and Koppad, P.G. (2017) Mechanical Properties of Aluminium-Graphene Composite Synthesized by Powder Metallurgy and Hot Extrusion. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **70**, 605-613. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1070-5>
- [25] Tiwari, J.K., Mandal, A., Rudra, A., Mukherjee, D. and Sathish, N. (2019) Evaluation of Mechanical and Thermal Properties of Bilayer Graphene Reinforced Aluminum Matrix Composite Produced by Hot Accumulative Roll Bonding. *Journal of Alloys and Compounds*, **801**, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.127>
- [26] 李岳, 杜晓明, 刘凤国. 石墨烯增强 6061 铝基复合材料的组织与力学性能研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42(2): 49-55.
- [27] 高博, 王成辉, 余申卫. 石墨烯增强铝基复合材料制备方法及效果研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(24): 5-14.
- [28] Yang, X., Yang, L., Zhu, D., Wang, H., Chen, T., Chu, C., *et al.* (2024) Effect of Graphene Sheet Diameter on the Microstructure and Properties of Copper-Plated Graphene-Reinforced 6061-Aluminum Matrix Composites. *Journal of Materials Research and Technology*, **28**, 3286-3296. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.259>
- [29] 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.
- [30] Bodukuri, A.K., Eswaraiah, K., Rajendar, K. and Sampath, V. (2016) Fabrication of Al-SiC-B₄C Metal Matrix Composite by Powder Metallurgy Technique and Evaluating Mechanical Properties. *Perspectives in Science*, **8**, 428-431. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.096>
- [31] Zhang, J., Liu, Q., Yang, S., Chen, Z., Liu, Q. and Jiang, Z. (2020) Microstructural Evolution of Hybrid Aluminum Matrix Composites Reinforced with Sic Nanoparticles and Graphene/Graphite Prepared by Powder Metallurgy. *Progress in Natural Science: Materials International*, **30**, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.01.024>
- [32] Jia, C., Zhang, P., Xu, W. and Wang, W. (2021) Neutron Shielding and Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Aluminium 6061-Boron Carbide Hybrid Composite. *Ceramics International*, **47**, 10193-10196. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.131>
- [33] Yang, S., Gao, X., Li, W., Dai, Y., Zhang, J., Zhang, X., *et al.* (2024) Corrigendum to Effects of the Graphene Content on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Aluminum Matrix Composite. *Journal of Materials Research and Technology*, **30**, Article 1056. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.081>
- [34] Sharma, P., Khanduja, D. and Sharma, S. (2014) Tribological and Mechanical Behavior of Particulate Aluminum Matrix Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **33**, 2192-2202. <https://doi.org/10.1177/0731684414556012>
- [35] Akbar, H.I., Surojo, E., Ariawan, D., Putra, G.A. and Wibowo, R.T. (2020) Effect of Reinforcement Material on Properties of Manufactured Aluminum Matrix Composite Using Stir Casting Route. *Procedia Structural Integrity*, **27**, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.07.009>
- [36] Li, G., Qu, Y., Yang, Y., Zhou, Q., Liu, X. and Li, R. (2020) Improved Multi-Orientation Dispersion of Short Carbon Fibers in Aluminum Matrix Composites Prepared with Square Crucible by Mechanical Stirring. *Journal of Materials Science & Technology*, **40**, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.009>
- [37] Yin, Z., Tao, S., Zhou, X. and Ding, C. (2008) Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃-Al Composite Coatings Deposited by Plasma Spraying. *Applied Surface Science*, **254**, 1636-1643. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.07.135>
- [38] Ozherelkov, D.Y., Pelevin, I.A., Nalivaiko, A.Y., Zotov, B.O., Fedorenko, L.V. and Gromov, A.A. (2023) Use of Carbon Nanofibers in the Additive Manufacturing of Aluminum Matrix Composites. *Russian Metallurgy (Metally)*, **2023**, 1374-1381. <https://doi.org/10.1134/s0036029523100269>
- [39] Zhang, Z., Shi, Z., Yang, B., Ge, B., Zhang, X. and Guo, Y. (2019) Preparation and Anisotropic Thermophysical Properties of Sic Honeycomb/Al-Mg-Si Composite via Spontaneous Infiltration. *Progress in Natural Science: Materials International*, **29**, 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2019.02.004>
- [40] Liu, Y.J., Zhang, Y.S. and Zhang, L.C. (2019) Transformation-Induced Plasticity and High Strength in Beta Titanium Alloy Manufactured by Selective Laser Melting. *Materialia*, **6**, Article 100299. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100299>
- [41] Wang, P., Eckert, J., Prashanth, K., Wu, M., Kaban, I., Xi, L., *et al.* (2020) A Review of Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by Selective Laser Melting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **30**, 2001-2034. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(20\)65357-2](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(20)65357-2)
- [42] Koli, D.K., Agnihotri, G. and Purohit, R. (2015) Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. *Materials Today: Proceedings*, **2**, 3032-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.290>
- [43] 樊建中, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料研究与应用发展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 1-7.
- [44] Miracle, D.B. (2001) Aeronautical Applications of Metal-Matrix Composites. In: Miracle, D.B. and Donaldson, S.L., Eds., *Composites*, ASM International, 1043-1049. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003485>

-
- [45] Lino Alves, F.J., Baptista, A.M. and Marques, A.T. (2016) Metal and Ceramic Matrix Composites in Aerospace Engineering. In: Rana, S. and Figueiro, R., Eds., *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, Elsevier, 59-99. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100037-3.00003-1>
- [46] Haghshenas, M. (2016) Metal-Matrix Composites. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 99-117. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03950-3>
- [47] Kumar Sharma, A., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskienė, R. and Pinca-Bretotean, C. (2020) A Study of Advancement in Application Opportunities of Aluminum Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, **26**, 2419-2424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.516>
- [48] 乔文明, 李颖. 铝基复合材料的制备及应用[J]. 热加工工艺, 2013, 42(4): 126-128, 130.
- [49] 吕刚磊, 朱永刚, 张静, 等. Al-TiO₂-Gr 复合材料冷锻过程中的致密化与变形研究[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(6): 41-46.
- [50] 付永红, 何源, 张冉阳, 等. 颗粒增强铝基复合材料制备及成型技术研究现状[J]. 热加工工艺, 2010, 39(14): 75-79.
- [51] 李云平, 李溪滨, 刘如铁, 等. 多次锻造 SIC 颗粒增强耐热铝合金的研制与性能[J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(4): 247-251.
- [52] 吴渝玲. 锻造对建筑铝基复合材料性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(9): 50-53.