● 铝基复合材料 Aluminum Matrix Composites ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3202

铝基复合材料研究进展及其航空航天应用

曹 遴[1],陈 彪[1,2],贾振东[1],高江霖[1],李金山[1,2]

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学重庆科创中心,重庆 401135)

摘 要:以铝及其合金作为基体的铝基复合材料不仅继承了铝合金选择范围广、易于加工制备及可热处理等优点,同时利用了不同类型增强体的优势,具有良好的综合力学、物理及化学等性能。高性能的轻质高强铝基复合材料的出现,为满足航空航天领域的应用需求提供了新途径,逐渐替代传统铝合金及其他基体类型的复合材料,在航空航天领域具有广阔的应用前景。基于此,本文介绍了铝基复合材料的基本分类,综述了近年来国内外铝基复合材料制备方法的主要进展,总结分析了铝基复合材料的物理、化学、力学、摩擦等性能,概述了铝基复合材料在航空航天领域的应用情况,最后展望了铝基复合材料的发展及应用,以期对促进铝基复合材料的发展及在航空航天领域的应用有所帮助。

关键词:铝基复合材料;制备方法;力学性能;物理化学性能;航空航天应用

中图分类号:TB331 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)08-0685-21

Research Progress and Aerospace Applications of Aluminum Matrix Composite

CAO Lin[1], CHEN Biao[1,2], JIA Zhendong[1], GAO Jianglin[1], LI Jinshan[1,2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: Aluminum matrix composites (AMCs) using aluminum and its alloys as the matrix not only inherit the advantages of a wide selection range of aluminum alloys, easy processing and preparation, and good heat treatment performance but also utilize the advantages of different types of reinforcements, which make AMCs have excellent comprehensive mechanical, physical, and chemical properties. The emergence of high-performance lightweight and high-strength aluminum matrix composites has broad application prospects, which provides a new way to meet the application needs of the aerospace field and gradually replace traditional aluminum or other types of composite materials to become an important component of aerospace materials. Based on this, this article introduces the basic classification of aluminum matrix composites, summarizes the main preparation methods and characteristics of aluminum matrix composites in recent years, and analyses the physical, chemical, mechanical, friction and other properties of aluminum matrix composites. Finally, the application of aluminum matrix composites in the aerospace field is summarized, and the development and application of aluminum matrix composites are discussed. It is hoped that this article will be helpful for better promoting the development of aluminum matrix composites and their applications in the aerospace field.

Key words: aluminum matrix composites; preparation method; mechanical property; physical and chemical properties; aerospace applications

作为地壳中含量最丰富的金属元素,铝(Al)及其合金因密度低、导电导热性好、比强度高等优点成为交通运输、兵器武装等领域的关键材料。航空航天的“门槛”高,对基础材料提出了严苛的性能要求,铝及其合金因具有轻质、耐腐蚀及良好的导热导电等诸多优异性能,成为航空航天领域材料的重要组成部分,被广泛应用于飞行器天线、蒙皮、支撑等重要零部件[1-3]。随着现代服役条件对铝材料强度、模量、高温、耐磨及腐蚀等综合性能要求的不断提高,传统的铝合金材料难以满足更高的性能需求。以铝及其合金作为基体的铝基复合材料(aluminum matrix composites, AMCs)不仅继承了 Al 合金选择范

收稿日期:2023-07-21

基金项目:国家自然科学基金(52071269;51901183);重庆市杰出青年基金(cstc2021jcyj-jq0115)

作者简介:曹 遴,1993 年生,博士生. 研究方向为晶内 CNTs 增强铝基复合材料研究. Email: cleocaolin@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:陈 彪,1987 年生,博士,教授. 研究方向为轻合金及其复合材料研究. Email: chen@nwpu.edu.cn; biao.chen521@gmail.com

引用格式:曹遴,陈彪,贾振东,等. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023,44(8): 685-705.

CAO L, CHEN B, JIA Z D, et al. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite[J]. Foundry Technology, 2023, 44(8): 685-705.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围广、易于加工制备及热处理性能好等优点，而且兼具良好的综合力学、物理化学性能，得到了广泛关注。高性能的轻质高强铝基复合材料的出现，为满足航空航天领域的应用需求提供了新途径，逐渐替代了传统的铝及其他类型的复合材料，是航空航天材料中不可或缺的组成部分。

根据增强体的不同，可以将铝基复合材料分为纤维增强铝基复合材料、颗粒增强铝基复合材料、晶须增强铝基复合材料及新型铝基复合材料等。纤维增强金属基复合材料的快速发展是自 20 世纪 80 年代开始，以美国为代表的国家逐渐将复合材料应用于空天领域，仅在 1980 年，估算美国在航空及宇航领域应用的硼纤维高达 23 000 kg。纤维增强的铝基复合材料具有比强度高、比模量高、尺寸稳定性好等优异性能，主要应用于航天领域，作为航天飞机、人造卫星、空间站等的结构材料。从纤维尺寸上可将纤维增强铝基复合材料分为连续纤维增强和非连续纤维增强铝基复合材料，其中连续纤维的长度可以贯穿整个金属基体，而非连续纤维的长度一般为数毫米。连续纤维增强铝基复合材料表现出明显的各向异性，非连续纤维增强铝基复合材料中纤维在基体内取向随机分布，复合材料表现出各项同性的特点。目前应用于铝基体中的纤维增强体代表有硼纤维(B_f)、碳纤维(C_f)、碳化硅纤维(SiC_f)和氧化铝纤维(Al_2O_{3f})等。

颗粒增强体具有高比强度、高比模量、低密度及良好的高温性能，并且具备耐磨损、耐疲劳、热膨胀系数低及导热性良好等诸多优势，代表有碳化硅(SiC_p)、氧化铝(Al_2O_{3p})、碳化硼(B_4C_p)和硼化钛(TiB_{2p})颗粒等。颗粒增强铝基复合材料被誉为 21 世纪最具发展前景的先进航空材料之一，按照颗粒尺寸可以分为微米颗粒增强和纳米颗粒增强复合材料，其中添加纳米颗粒的铝基复合材料表现出更加优异的性能。目前颗粒增强的铝基复合材料也已经在飞机内部支架、波音 777 客机风扇出口导流叶片等部位得到应用。

此外还有晶须增强铝基复合材料，得益于晶须的高强度、耐磨、耐热、绝缘、防腐、导电、吸波、减振等性能，晶须在铝基复合材料中得到了广泛应用。常用的增强体晶须主要包括硼酸铝 ($Al_{18}B_4O_{33w}$)、硼酸镁($Mg_2B_2O_{5w}$)、碳化硅(SiC_w)、氧化铝(Al_2O_{3w})等。早在 60 年代美国就开始生产 SiC_w，并制造其复合材料，随着晶须生产工艺不断改进，工艺成本逐渐降低，使得晶须增强铝基复合材料得到了广泛研究，并且在许多领域得到应用[4]。

近年来随着一些新的增强体被发现，例如碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)、石墨烯(graphene nanoplatelets, GNPs) 及新型过渡金属碳/氮化物二维纳米层状材料(XMene)等，这些增强体制备的铝基复合材料呈现出了优异的综合性能，增强相的增强效果明显，可以在较低含量时获得优异的室温及高温性能，例如碳纳米管增强铝基复合材料已在火箭结构件及舱体部位尝试应用，新型铝基复合材料在航空航天领域具有广阔的应用前景[4]。

为贯彻落实国家“十三五”规划纲要和《中国制造 2025》，工信部联合发展改革委、科技部、财政部研究编制了《新材料发展指南》，并在其中明确指出“航空航天等重点领域急需的新材料”。而铝基复合材料作为铝合金在航天航空领域中的突破方向，具有重要的研究意义，因此发展高性能铝基复合材料刻不容缓。本综述将对目前发展的铝基复合材料的制备方法、性能及其在航空航天领域的应用等方面进行总结介绍，进一步展望了未来铝基复合材料的发展。

1 铝基复合材料的制备方法

目前制备铝基复合材料的方法根据成形时材料的状态主要分为液态、半固态及固态成形 3 类，其中液态成形方法主要包括搅拌铸造法、压力浸渗法、选区激光熔化法等；固态成形的主要方法有搅拌摩擦法和粉末冶金法等；其他方法包括半固态搅拌法、原位合成法等。下面将分别对制备铝基复合材料的不同方法及研究现状进行综述。

1.1 液态成形主要方法

搅拌铸造法由传统铸造法改进而来，具备传统铸造法价格低廉、设备简单、生产效率高、适用范围广和加工大型部件等优势。相比于传统铸造，搅拌铸造法在铸造过程中引入搅拌器对金属熔体和增强体的混合物进行搅拌，能一定程度上缓解传统铸造中增强体团聚的问题。因此，搅拌铸造法是目前工业化生产颗粒增强铝基复合材料的主要制备方式。液态搅拌的金属基体加热至液相线温度之上，充分搅拌之后直接浇铸，典型的搅拌铸造方法制备的铝基复合材料组织如图 1 所示[5]。虽然搅拌铸造法工艺简单、成本低廉，被广泛应用于生产中，但是搅拌铸造法在制备铝基复合材料方面仍要注意：①增强体的均匀分布。通常增强体与金属熔体之间润湿性差，且存在密度差异，所以在搅拌过程中增强体难以均匀分布在熔体中，易产生团聚，因此如何获得增强体均匀分布的铝基复合材料是搅拌铸造法的关键。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

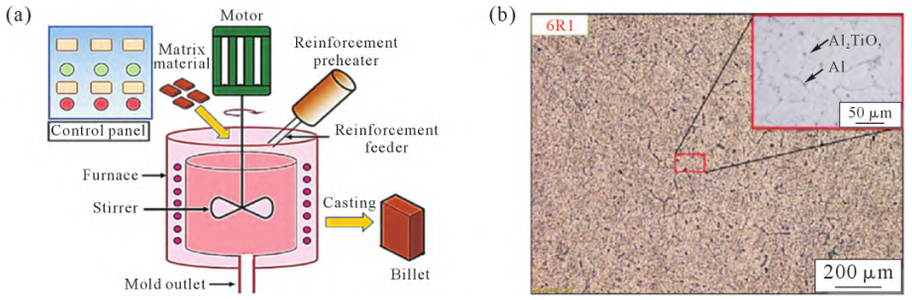


图 1　搅拌铸造及制备的铝基复合材料组织：(a) 搅拌铸造示意图，(b) 搅拌铸造 Al_2TiO_5/Al 复合材料组织[5]

Fig.1　Structure of aluminum matrix composite materials prepared by stir casting: (a) schematic of stir casting, (b) structure of Al_2TiO_5/Al composite fabricated by stir casting[5]

②由于铸造法的温度较高，增强体和基体熔体之间进行长时间的紧密接触，这容易引起金属基体与增强体之间的过度界面反应。例如在 SiC/Al、CNTs/Al、GNPs/Al 等复合材料体系中，增强体会与 Al 发生严重的界面反应形成 Al_4C_3，而 Al_4C_3 是一种脆性相，影响复合材料的性能。此外，由于搅拌铸造法需要对熔体进行搅动而形成旋涡，在非真空条件下容易卷入气体，同时增强体的加入会降低熔体的流动性，导致气体不易逸出，最终形成孔隙。孔隙直接影响着复合材料的性能，所以如何降低复合材料中的孔隙率是搅拌铸造法需要解决的问题之一。

尽管搅拌铸造法高效、廉价、工艺简单并且能制备形状复杂的大型构件，但某些领域需要大体积分数且分散均匀的铝基复合材料，并且部分材料要求增强体为各种纤维，这是搅拌铸造法无法满足的，可以考虑通过浸渗法制备，浸渗法主要有压力浸渗、气体压力浸渗和熔融浸渗等。压力浸渗法的过程示意图如图 2 所示[6]，先将增强体制备成预制件，然后将熔融金属引入预制件并对其施加压力使得熔融金属填充预制件所有开放孔隙。Yang 等[7]采用压力浸渗的方法制备了石墨烯增强铝基复合材料，发现界面反应小且石墨烯分散较为均匀。当石墨烯含量为 0.54%时，复合材料的屈服和抗拉强度分别增加了 116%和 45%，进一步引入挤压过程，石墨烯增强铝基复合材料的屈服和抗拉提升量达到 228%

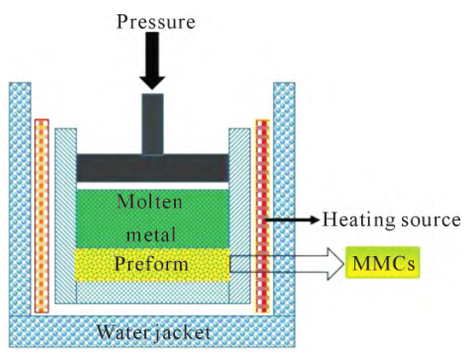


图 2　压力浸渗过程示意图[6]

Fig.2　Schematic diagram of pressure infiltration[6]

和 93%。Narciso 等[8]采用压力浸渗法制备了石墨增强的 Al-12Si 复合材料，力学性能提升的同时热膨胀系数明显降低，满足活塞发动机的使用要求。

选区激光熔化(selective laser melting, SLM)是一种针对金属粉末的新型成形方法，具有可设计性强、效率高等优势，SLM 过程示意图如图 3 所示[9]。采用SLM 打印制备铝合金等金属与传统粉末冶金、熔铸方法相比具有如下特征：①瞬时温度高，可达 5 000 ℃以上[10]，远高于金属与陶瓷的熔点，加速合金元素溶解；②加热与冷却速率快，速率高达 10^3~10^6 ℃/s[11]，且高温驻留时间短，有效抑制凝固过程中析出相长大；③高温度梯度造成强烈的马兰戈尼对流现象，使得局部熔体流动速度～10^7 μm/s[12]，促进合金原子与增强体颗粒的分散。因此，SLM 铝合金组织细化、成分均匀，具有优异的综合力学性能[13]。但

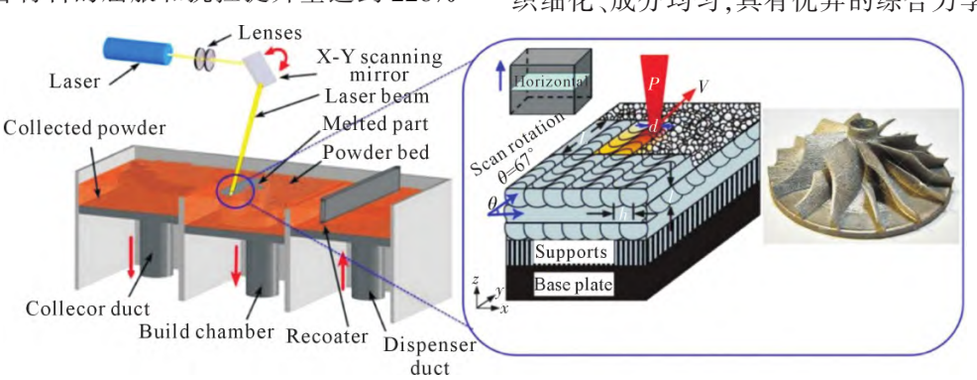


图 3　选区激光熔化过程示意图及成形零件[9]

Fig.3　Schematic of SLM processing and the components prepared by SLM[9]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于 Al 的激光反射率高，过低的能量输入易导致未熔合产生，而过高的能量输入导致熔池不稳定从而产生气孔、裂纹等缺陷。因此铝及其复合材料在激光增材制造过程中加工工艺窗口的确定十分重要。对于 2 系、6 系及 7 系铝合金，增材制造过程容易出现裂纹等缺陷，可通过引入增强体的方式调控晶粒形貌，增加异质形核位点，进而降低缺陷含量，显著提高复合材料的力学性能。Li 等[14]通过气雾化制备了原位纳米 TiB_2 修饰的 AlSi10Mg 粉末，复合材料的粉末激光吸收率明显高于纯合金粉末。随后采用 SLM 制备了高致密度无裂纹的纳米 TiB_2 增强的 AlSi10Mg 复合材料，强度达 530 MPa，塑性15.5%，硬度 191 $HV_{0.3}$，性能超过了大多数传统的铝合金。Jiang 等[15]通过溶液超声将 CNTs 分散至 AlSi10Mg 粉末表面，进一步通过 SLM 成形制备 CNTs 增强 AlSi10Mg 复合材料块体，其致密度达 98.53%，硬度 143.33 HV，强度达到 499 MPa。

1.2 固态成形主要方法

搅拌摩擦加工(friction stir processing, FSP)于 1999 年由 Mishra 在搅拌摩擦焊接的基础上改进而来[16]，是一种特殊的表面复合材料制备技术。传统的表面复合材料制造技术涉及高温液相处理，如激光熔体处理和等离子体喷涂，这可能导致复合材料性能恶化，主要是由于基体与增强体间的界面反应无法控制。此外，为了获得理想的表面凝固后组织，还需要精确控制加工参数，这使得表面复合材料加工工艺成本昂贵且时间长。而搅拌摩擦法是通过搅拌摩擦头与基板的高速旋转使基板在摩擦头附近的区域熔化，并在摩擦头高速旋转作用下对熔池进行高速搅拌，从而制备复合材料的一种方法。图 4(a)为采用搅拌摩擦方式制备的 CNTs/Al 复合材料，对 CNTs 区域及其周围区域进行摩擦搅拌。搅拌头通常由针部(pin)和轴肩(shoulder)组成，通过搅拌头的旋转将 CNTs 均匀分散至基体内，同时可以实现晶粒的细化，从而获得良好的力学性能[17]。此外搅拌摩擦系统也可由立铣床改造而来，如图 4(b)所示[18]，在摩擦头的搅拌挤压作用下，复合材料产生热和剧烈变形，从而获得高性能增强体均匀分散的铝基复合材料。因此搅拌摩擦加工在制备表面复合材料时，很少或没有界面反应。该方法可以在不影响材料本体性能的情况下提高材料的耐磨性、硬度、强度、伸长率、耐腐蚀性、疲劳寿命和成形性等性能。赵霞等[19]利用搅拌摩擦成形的方法制备了 CNTs/Al 复合材料，其选用的基体为工业纯铝 1060 板材，搅拌头转速为 950 r/min，移动速度为 30 mm/min，偏转角为 2°，试验过程均采用 5 次 FSP 搅拌混合。研究表明，CNTs 含量为 0、1.6%、3.5%、4.5%、5.5%、7.0%(体积分数)时，拉伸强度依次为 91.2、121.9、133.1、155.1、178.0、201.0 MPa，随着 CNTs 含量增加，复合材料的强度提高，其中当 CNTs 含量为 7.0%(体积分数)时，拉伸强度是 FSP 后纯铝的 2.2 倍。同时通过显微组织表征发现，在搅拌摩擦中心区域晶粒细小，CNTs的分散较为均匀，CNTs 和基体的界面结合情况良好。

粉末冶金是固态法制备铝基复合材料中应用最广泛的方法，该方法是指以纯铝或铝合金粉末颗粒为原料，采用相关工艺使粉末固结成特定形状的一种成形工艺，可以有效避免合金成分偏析，同时可以保持粉末中原始晶粒尺寸，从而获得优良的力学性能[20]。典型的粉末冶金过程如图 5 所示，包括了球磨制备铝基复合材料粉体和后续的烧结挤压过程[21]。除传统的热压烧结、微波烧结，等离子烧结也是制备铝基复合材料常用的制备方法[22-23]，同时烧结过后的大塑性变形过程可以进一步提高铝基复合材料的性能。有学者研究了挤压成形对一次颗粒边界的消除作用，发现在烧结后的材料中存在由氧化膜和孔隙等形成的一次颗粒边界，而在经过挤压成形后氧化膜被打碎，形成少量的氧化铝颗粒，起到类似增强相的作用。此外热挤压对氧化膜的破碎效果，同时热挤压过程中发生的动态再结晶会使 Al 晶界在迁移过程中将 SiC 颗粒吞并至晶粒内部，实现 SiC 颗粒的晶内分散，进一步促进 SiC 颗粒的弥散分布，提高强化效果[25]。Saboori 等[24]将快速凝固技术与粉末冶金

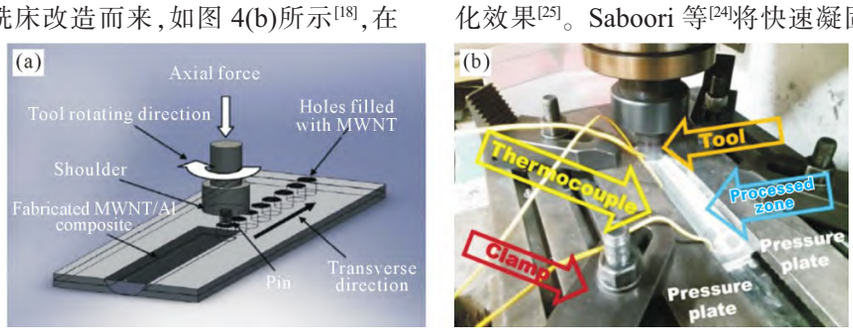


图 4 搅拌摩擦成形技术：(a) 加工示意图，(b) 由立铣床改造的搅拌摩擦焊装备[17-18]

Fig.4 Friction stir processing technology: (a) schematic diagram, (b) friction stir processing equipment transformed from a vertical milling machine[17-18]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

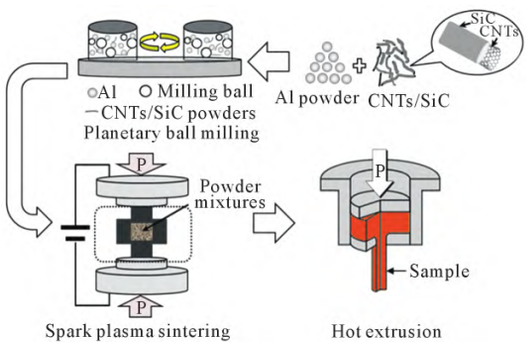


图 5 粉末冶金过程示意图[21]

Fig.5 Schematic diagram of the powder metallurgy process[21]

工艺相结合，通过将合金熔体雾化成金属粉末，再将粉末与增强体混合、压制、烧结、挤压成形，可制备出性能优良的晶须增强铝基复合材料。Zhang 等[22]研究了 SiC_w 体积分数对铝基复合材料组织性能的影响，成形工艺为湿磨 SiC_w、混合湿磨 SiC_w 和合金粉、球磨混合粉、热等静压(HIP)、热压、固溶时效处理。实验结果表明，随着 HIP 热压 SiC_w/Al 复合材料中 SiC_w 含量的增加，复合材料中颗粒的流动性增加，SiC_w 的团聚和孔隙率导致界面结合力减弱，这将极大程度上削弱复合材料的性能，最终研究发现，含有 2.5%体积分数 SiC_w 的铝基复合材料性能最优。

1.3 其他成形方法

除了液态和固态成形方法，制备铝基复合材料还有一些其他的方法，例如半固态铸造、原位合成法等。

半固态成形搅拌过程中温度保持在液固两相区，采用机械搅拌使增强体分布均匀；相比于液态搅拌，半固态搅拌由于温度低，基体温度保持在固液温度区间之内，熔体粘度大，相对于液态搅拌可以保持熔体的静止，不会因为密度差异而导致增强体的偏析，所以能实现增强体的均匀分布[25-26]。但该方法仅限于结晶温度区间较大的铝合金基体，且对搅拌温度控制严格。Zhang 等[25]采用半固态搅拌结合热挤压的方法制备了纳米 SiC_p 增强 2014 铝基复合材料，研究发现加入仅 0.5%(质量分数)的 SiC_p 可使复合材料在不损失伸长率的情况下强度得到显著提高。

原位反应合成是指通过熔融金属和增强成分之间的放热反应形成分散增强相的过程。由于它们之间的化学反应，最终复合材料的组织均匀且增强体与基体的界面结合强。但该方法对原材料成分有特殊要求，使其适用的材料受到了一定的限制。Ramesh 等[27]使用反应原位合成制备 TiB_2/Al6061 多金属复合材料，并研究其微观结构和力学行为。TiB_2 颗粒在铝基体上的分布均匀，同时由于晶粒细化，晶粒尺寸减小，复合材料具有良好的强塑性匹配。Du 等[12]利用 Ti 与 B_4C 的化学反应在 TC18 合金中原位生成了 TiB 和 TiC 增强颗粒。增强颗粒的引入促进了 TC18 基体中 α 相的球化过程，改善了复合材料的结构均匀性，使复合材料的强塑性得到了整体提升。

2 铝基复合材料性能

铝基复合材料的性能取决于基体合金和增强体的特性、含量、分布等，与基体合金相比，铝基复合材料具有更多优异的性能，例如良好的力学性能、摩擦性能、导电性能、导热性能等。本文将主要从铝基复合材料的物理(导电、导热)、化学(腐蚀)、力学和摩擦性能 4 个方面进行介绍。

2.1 物理性能

在物理性能方面，铝基复合材料由于具有出色的电学、热学特性，使其在导线、半导体、电子封装等领域得到一定的应用，是未来航空航天工业以及先进武器系统中不可或缺的优质轻金属导电、导热复合材料。目前在导电材料方面，学者们都致力于提高输电导线的传输效率和性能，以此降低导线在使用过程中温度的过度升高，导线温度过高会导致一次或多次蠕变损伤、疲劳应力或老化等问题，这些问题大多都可以通过研发高性能导线材料得到更好地解决[28]。铝及铝合金由于具有铜所缺乏的大多性能成为高性能导线的首选材料。但由于铝及铝合金缺乏足够的强度、抗蠕变性、抗疲劳性和热稳定性来改善输电线路所面临的挑战，因此铝基复合材料逐渐得到了深入的研究[28]。

由于碳纳米管和石墨烯具有优异的热、电、机械等性能使其成为了铝基复合材料中优异的增强体，用碳纳米管或石墨烯增强的铝及铝合金不仅可以提高强度，还可以提高摩擦学、腐蚀、热学和电学性能。因纳米碳增强体与铝及铝合金基体热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)差异极大，故在碳纳米管/石墨烯增强铝基复合材料的制造过程中，会产生很大的热失配现象，导致在纳米碳与铝基体的界面处引起高密度几何必须位错堆积，从而引起复合材料的加工硬化。Ujah 等[29]研究表明，当在铝合金中添加 4%(质量分数)的碳纳米管时，复合材料的摩擦系数(COF)提高了 52%，磨损量减少了 23%，热导率提高了 35%，电导率也有 2%的提高。Cao 等[30]以 CVD 生长的石墨烯膜和铝箔为原材料，通过将完整石墨烯膜转移至铝箔表面，采用压力烧结工艺，制备了石墨烯连续分布的叠层石墨烯增强铝基复合

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

材料。并采用导电探针原子力显微镜(CP-AFM)分析了复合材料的微观导电性能,表征示意图和测试图如图 6 所示[31]。在该叠层材料中,石墨烯处的最大电流(29.3 pA)是附近铝基体电流的 73 倍,说明该复合材料中石墨烯的导电性能远高于铝基体。计算表明,当石墨烯含量为 0.15%(体积分数)时(单层石墨烯 0.34 nm, 铝箔厚度 500 nm),采用该工艺制备的石墨烯增强铝基复合材料导电性能将比纯铝基体材料提高约 10%。综上所述,碳纳米管/石墨烯增强铝基复合材料体系是一种潜在的导体材料,有望在增加电网功率方面表现出优异的性能。

在现代电子工业中,电子元件的小型化及大功率微芯片的出现,研发高热传递效率和低热膨胀系数的材料成为现代电子工业的主要目标。定制高导热率和低热膨胀系数的材料可以通过两种或多种材料性能的有机组合来实现。例如用碳纤维、AlN 或 SiC、金刚石、BeO 等低热膨胀系数的增强体增强铝或铜等高导热金属。另外复合材料的热膨胀系数不能过高,从而实现使用过程中最小的热应力,复合材料的热性能主要由增强体、基体及其之间的界面特性决定。

对于复合材料,热或电传输受费米能级电子存在的影响[32]。Tatar 等[33]研究了颗粒增强铝合金(6061)复合材料的热导率和电阻率之间的关系,所制备的复合材料采用了粉末冶金工艺,他们通过改变颗粒尺寸(15、30 和 45 μm)、体积分数(15%、30%和 45%)来表征样品,并观察到具有较小颗粒的复合材料的热导率更稳定。这是由于存在密集的可用电子,因此可用于传输的导电路径更厚。Karthikeyan 等[34]提出了颗粒的体积分数对尺寸稳定性的影响,他们采用搅拌铸造法比较了 7075 铝合金和 SiC_p 增强 7075 铝合金复合材料的热物理性能,其中 SiC_p 的体积分数分别为 10%、15%和 20%。研究发现,复合材料的尺寸变化随温度升高呈线性变化,具有 20%(体积分数)的 SiC_p 的 MMC 在 100～400 ℃的温度范围内呈现出更稳定的尺寸。图 7 展示了不同体积分数的 Al/SiC 复合材料体系的热膨胀系数变化[35],未增强的 Al-Si 合金在 200~300 ℃的温度范围内由于 Si 的析出加速了膨胀,但由于 Si 的溶解而进一步下降。研究指出,密集堆积的 SiC 颗粒的热膨胀系数不仅取决于增强体,还取决于基体合金,与无硅的基体合金相比,互连 SiC-Si 网络的形成导致热膨胀系数低,Nam 等[36]的研究也发现类似的结果。

在特定范围内,可以通过选择增强体颗粒的体积分数和粒径来调整复合材料的热特性,以此适用于多种应用。Molina 等[37]采用液体浸润法制备了平均尺寸为 170 和 16 μm 的高体积分数双峰 SiC_p 增强铝基复合材料,并讨论了粒度及其分布对SiC_p/Al 复合材料导热率的影响。研究表明,在相同 SiC_p 体积分数(即～56%)下,当平均粒径分别从 8 μm 增加到 170 μm,热导率从 151 W/mK 增加到 216 W/mK,此外,热导率随着双峰复合材料中粗颗粒体积分数的

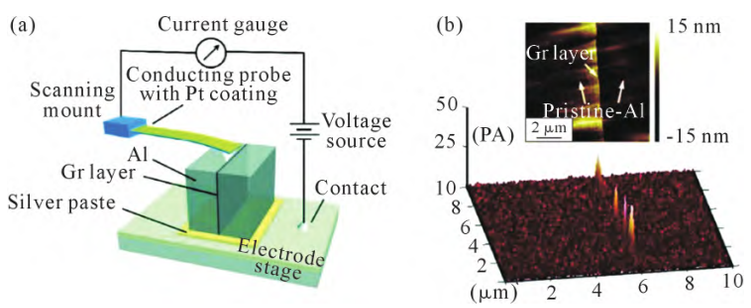


图 6 叠层石墨烯增强铝基复合材料微观导电性能:(a) 测试示意图,(b) 测试结果[31]

Fig.6 Microconductivity of stromatolite graphene reinforced aluminum matrix composites: (a) schematic diagram of the testing process, (b) testing results[31]

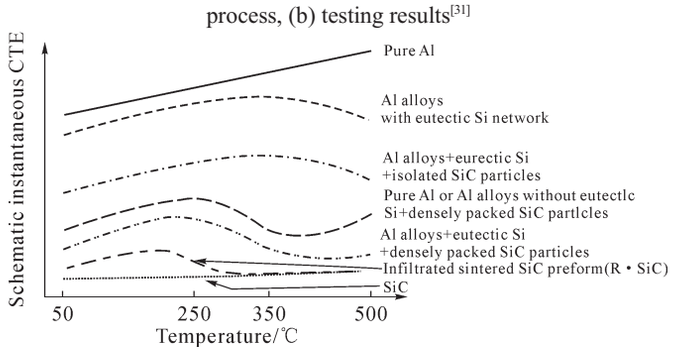


图 7 不同组合的 Al/SiC 复合材料的热膨胀系数比较[35]

Fig.7 Comparison of thermal expansion coefficients of the Al/SiC composite materials with different combinations[35]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

增加而增加(～220 W/mK)。Saadallah 等[38]研究了用1%(质量分数)碳纳米管增强的铝基复合材料，结果表明，晶粒界面中氧化铝和碳化硅的存在可以防止加热过程中铝基体的膨胀，从而降低 CNTs/Al 复合材料整体的膨胀。然而，碳化铝的形成反映 Al 和CNTs之间的反应，说明了 CNTs 结构劣化，这对复合材料的力学性能产生了负面影响。此外，与纯 Al 相比，在热重分析过程中 CNTs 降低了 CNTs/Al 复合材料的质量损失，提高了铝基复合材料的热稳定性。热膨胀系数也是评价铝基复合材料热性能的重要指标，Shin 等[39]使用高能球磨法将 5%(体积分数)的 CNT 分散到 Al2024 粉末中，然后通过热压和烧结制备复合材料块体。研究表明，CNTs/Al2024 复合材料的热膨胀系数为 18×10^{-6} /K，比商业铝合金(AlSi12CuMgNi)降低了 20%，证明铝基复合材料在热性能方面比纯铝更具有优势。

2.2　化学性能

由于铝是一种活泼金属，在干燥空气中铝的表面会立即形成厚约 5 nm 的致密氧化膜，使铝不会进一步氧化并具备一定的耐腐蚀能力，铝基复合材料同样延续了这种优异的化学性能，使其在易腐蚀和低温环境应用产品方面发挥着重要作用，例如苔藓型和 SPB 型储罐(LNG 运输船绝缘系统)、北极化学加工设备、压力容器、海底管道和钻杆 (海上结构)。许多研究主要集中在一种用于腐蚀和低温环境的替代材料，该材料可以延长使用寿命而不影响性能。

目前有许多测试可以研究铝基复合材料中的腐蚀行为，如浸泡测试、侵蚀腐蚀测试、盐雾测试等[40]。EL-Aziz 等[40]在 Al-Si 基体中添加 Al_2O_3 颗粒，采用搅拌铸造法制备了不同含量的 Al_2O_3 增强铝基复合材料，并对其湿态和腐蚀行为进行研究。试验中使用直径为 10 mm、厚度为 3 mm 的圆盘状试样，研究发现添加 Al_2O_3 颗粒可提高铝基复合材料的耐腐蚀性。Krupakara[41]研究了不同含量赤泥增强 6061 铝合金复合材料的腐蚀特性，并用不同比例的浓缩氯化钠溶液对复合材料进行了腐蚀试验。实验中氯化钠溶液的浓度为 0.035%、0.35%和 3.5%，将已知质量的试样浸入腐蚀剂中，并间隔 24、48、72 和 96 h 称量其质量。通过计算质量损失，并以每年的渗透密尔表示腐蚀速率。研究发现，合金和复合材料的腐蚀速率随暴露时间的延长而降低。复合材料的腐蚀速率低于相应的合金。Samal 等[42]研究了采用搅拌铸造技术制备的 SiC/Al-Mg 复合材料的腐蚀行为，使用静态浸没法在环境温度下，在浓度为 5%(质量分数) 的氯化钠水溶液中对该复合材料进行腐蚀试验，试样的尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm，时间为 12 h。根据复合材料与标准铝的比较，确定复合材料的质量损失率为 3.53%，表明其适用于海洋/盐水环境。Muthazhagan 等[43]对铝硼碳化物–石墨复合材料腐蚀行为进行研究。其中该复合材料由不同比例的增强体(5%，10%，15%(质量分数)的碳化硼及石墨)制成，并使用浓度为 4%，8%，12%的氯化钠溶液在室温下进行腐蚀试验，试样尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm。研究结果表明，复合材料的腐蚀速率随石墨和碳化硼添加到铝基体中而增加。此外，5083 铝合金也被选为许多海洋和低温应用的基体材料[44]。通过在 AA5083 中添加合适的增强体，可以进一步提高材料的耐腐蚀性。图 8 揭示了铝基复合材料在 NaCl 溶液中的腐蚀过程，铝合金的高耐腐蚀性归因于表面形成致密连续的氧化膜[45]。若增强体与基体的结合不好，则会成为腐蚀的起点，增强体的存在削弱了氧化层的保护，腐蚀开始后，缺陷处由于没有氧化层的保护会加速腐蚀的过程，逐渐形成多段不连续的区域，图 8(e~f)[46-52,53-60]展示了不同类型铝基复合材料在 3.5%NaCl(质量分数)溶液中的的腐蚀速率[45]。

除了宏观增强体外，纳米颗粒也可作为铝基复合材料的增强体[61]，并且研究发现纳米颗粒增强铝基复合材料具备更加优异的性能。根据前人研究结果，在铝基复合材料中添加纳米颗粒作为增强材料以获得高增强效果之前，需要考虑 3 个重要机制：Orowan 机制、热失配和载荷转移，它们是用于增强金属基体的机制。大多数研究表明，碳纳米管可以有效的作为铝基体的增强材料，具有改善机械性能和腐蚀性能的能力。例如采用 4%(质量分数)的碳纳米管分散在铝基体[62]中时，在 NaCl 和 H_2SO_4 介质中的腐蚀速率分别降低了 46%和 47%。Samuel 等[63]研究了不同含量多壁碳纳米管增强铝金属基体的腐蚀行为，所制备复合材料中碳纳米管质量分数为 1%、1.25%、1.5%和 1.75%。通过在室温下将复合材料浸入 90 ml HCl 稀释溶液中进行腐蚀试验。相比于氯化钠溶液，HCl 溶液酸性更强，结果表明，随着碳纳米管的含量增加，复合材料的耐腐蚀性能提高，因此该复合材料可用于腐蚀性环境。与 5083 铝合金相比，碳纳米管增强 5083 铝合金复合材料的寿命更长。当材料为 1.75% MWCNT 含量的 5083 铝合金时，腐蚀速率为 448.88 mm/y，相对较低，因此提高碳纳米管的质量分数可增强材料的耐腐蚀性。综上所述，碳纳米管增强铝基复合材料体系是一种潜在的耐腐蚀铝

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

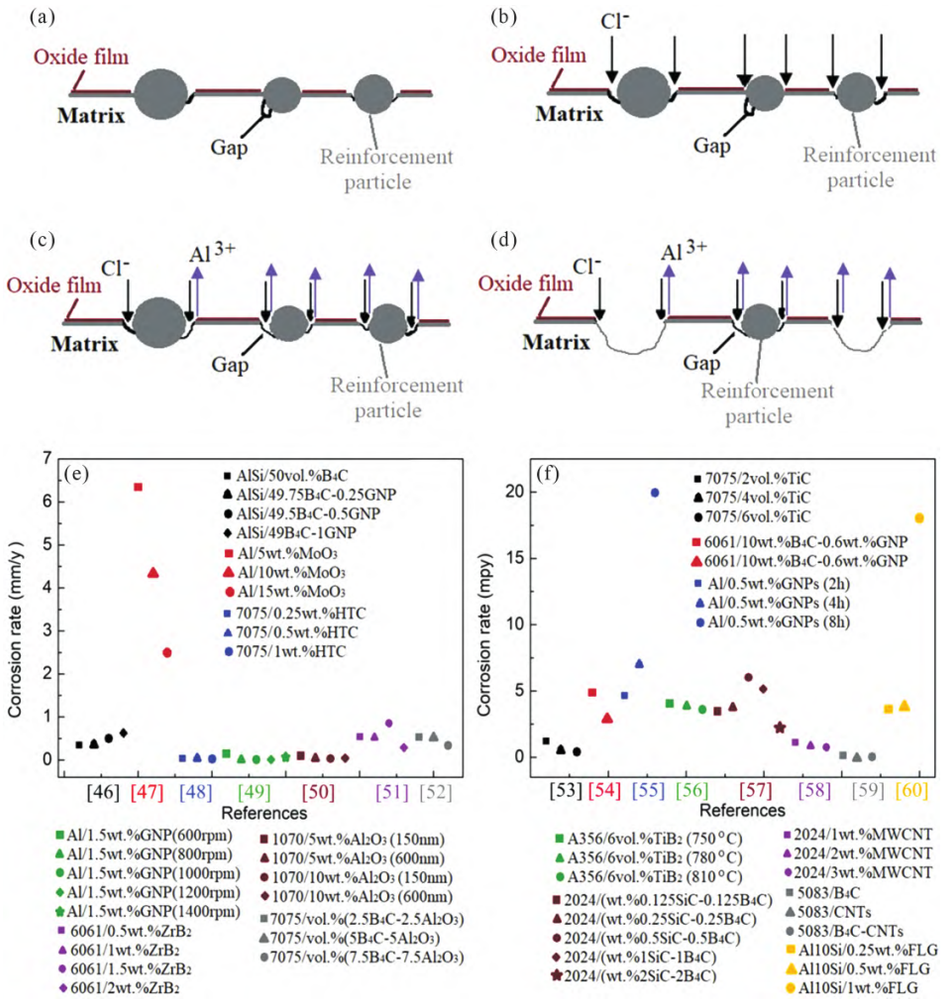


图 8 铝基复合材料的腐蚀机理及耐蚀性能对比：(a~d) 铝基复合材料在氯化钠盐溶液中的腐蚀机理，(e~f) 不同类型铝基复合材料在 3.5 wt.% NaCl 溶液的腐蚀速率[45-60]

Fig.8 Corrosion mechanism and properties comparison of aluminum matrix composite: (a~d) corrosion mechanism of aluminum matrix composite in sodium chloride solution, (e~f) the corrosion rate of different types of aluminum matrix composites in 3.5 wt.% NaCl solution[45-60]

基复合材料，有望在易腐蚀环境服役方面表现出优异的性能。

2.3 力学性能

不同增强体的类型、含量、尺寸、分布及不同基体类型等因素对铝基复合材料的显微组织和力学性能影响极大。表 1 为不同制备方法、不同颗粒类型、不同含量以及不同基体的微米颗粒增强铝基复合材料的力学性能，表 2 为纳米颗粒增强铝基复合材料的力学性能。可以看出随着增强体颗粒含量的增加，复合材料的弹性模量、屈服强度和抗拉强度都有明显提高，而伸长率在逐渐降低；对于纳米级颗粒增强铝基复合材料，当颗粒含量超过一定程度时，复合材料的力学性能发生显著下降。

增强相加入基体，铝基复合材料的弹性模量会显著提高。影响铝基复合材料弹性模量的因素主要有增强相种类、含量、长径比及分布等。基体与增强相之间界面结合力也是影响弹性模量的重要因素，良好的界面结合将赋予铝基复合材料更高的弹性模量。此外，基体与增强体之间的热膨胀系数差异导致的热残余应力分布不均匀也是不可忽略的因素。对于 Al_2O_3 复合材料而言，由于材料中热残余应力的存在，使铝基体处于拉应力状态，当材料受到拉伸载荷时，材料的应变可能会包括弹性应变和塑性应变。与基体合金相比，颗粒增强铝基复合材料的比例极限更低，因此测量复合材料的弹性模量比较困难。

弹性模量是一个对组织结构不敏感的力学性能指标，其表示材料的本征特性。除从经典材料力学的角度分析比较其大小外，采用复合材料的混合法则可以定量估算出整体复合材料的弹性模量数值[72]。设增强体体积分数为 V_f，则弹性模量通过下式计算[73-74]：

$$E_c=E_m(1-V_f)+E_fV_f \quad (1)$$

式中，E_c、E_m、V_f 分别为复合材料、基体和颗粒的弹性模量。该式是采用材料力学方法根据等应变假设推导出来的，是并联模型，计算得到的是铝基复合材料

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 微米颗粒增强铝基复合材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the micrometer particle reinforced aluminum matrix composites

工艺	材料种类	YS/MPa	UTS/MPa	El/%	E/GPa	Ref.
Duralcan 法 T6	6061	276	310	20	69	[64]
	10% Al_2O_3(体积分数,下同)-6061	297	338	7.6	81	
	15% Al_2O_3-6061	386	359	5.4	88	
	20% Al_2O_3-6061	359	379	2.1	99	
	2014	414	483	13.0	73	
	10% Al_2O_3-2014	483	517	3.3	84	
	15% Al_2O_3-2014	476	503	2.3	92	
	20% Al_2O_3-2014	483	503	0.9	101	
	A356	200	276	6	75	
	10% SiC-A356	283	303	0.6	81	
	15% SiC-A356	324	331	0.3	90	
	20% SiC-A356	331	352	0.4	97	
粉末冶金+挤压法 (570 ℃)	Pure Al	56.6	84	26.2		[65]
	4% SiC-Al	58.3	91	14.1		
	8% SiC-Al	59.7	96	12.5		
	12% SiC-Al	61.4	103	9.5		
	16% SiC-Al	62.9	115	8.4		
	20% SiC-Al	64.6	127	7.2		
累积轧制法	Pure Al	160	186	12.1		[66]
	1% Al_2O_3-Al	193	221	8.5		
	2% Al_2O_3-Al	215	279	7.6		
	3% Al_2O_3-Al	210	257	4.0		

表 2 纳米颗粒增强铝基复合材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of nanoparticle reinforced aluminum matrix composites

工艺	材料种类	YS/MPa	UTS/MPa	El/%	E/GPa	Ref.
球磨+搅拌铸造法	A356	122	145	6		[67]
	0.5% SiC(体积分数,下同)-A356	125	219	3.8		
	1.5% SiC-A356	133	238	3.8		
	2.5% SiC-A356	142		3.8		
	3.5% SiC-A356	145	285	3.7		
	4.5% SiC-A356	135	241	3.6		
搅拌铸造法	A356	71	145			[68]
	0.5% SiC-A356	80	200			
	1.5% SiC-A356	105	220			
	2.5% SiC-A356	120	245			
	3.5% SiC-A356	145	270			
	4.5% SiC-A356	110	230			
粉末冶金+挤压法	6061	131	205	16.5	68.5	[69]
	10% SiC(质量分数,下同)-6061	192	287	15	87	
	15% SiC-6061	229	329	14	103	
球磨+搅拌铸造法	2024	85	153	1.3		[70]
	0.5% Al_2O_3-2024	139	190	1.2		
	1.0% Al_2O_3-2024	155	210	0.9		
	1.5% Al_2O_3-2024	150	205	0.7		
	2.0% Al_2O_3-2024	145	200	0.5		
搅拌铸造法	A356	83	134	1.55		[71]
	1.0% Al_2O_3-A356	86	144	1.31		
	2.0% Al_2O_3-A356	98	152	1.21		
	3.0% Al_2O_3-A356	100	150	1.12		

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的纵向弹性模量，即弹性模量的上限值。如果采用等应力假设，即可得到串联模型，可推导出下式[73-74]：

$$\frac{1}{E_c}=\frac{(1-V_f)}{E_m}+\frac{V_f}{E_f} \quad (2)$$

该式计算的是铝基复合材料的横向弹性模量即弹性模量的下限值。结合表 1 和表 2 可以看出，随着增强体体积分数增大，弹性模量也随之增大。例如选择高模量的 SiC 增强体比 Al_2O_3 可以获得更高弹性模量的铝基复合材料。有研究表明，复合材料的弹性模量与基体的合金化影响不大，而不同的铝基复合材料的比模量存在一定差异。界面结合也是影响复合材料弹性模量的重要因素，通过对 SiC_p 研究表明，界面对载荷传递作用的发挥程度严重影响了复合材料的弹性模量。表 3 为 SiC_p 增强铝基复合材料弹性模量与温度的关系，可以发现 SiC_p 明显提高复合材料的弹性模量，并且高温下的稳定性随着颗粒体积分数的增加而增加。Cao 等[75]采用粉末冶金制备了 CNTs/Al 复合材料，利用纯铝能够大塑性变形的能力分散高含量 5%(体积分数)的 CNTs，CNTs 在高温下稳定基体组织并起到了良好的增强效果，制备的 CNTs/Al 复合材料高温性能相比于其他非连续增强体具有明显的高温强度优势，如图 9 所示[75]，在航空航天等高温应用场景具有良好的应用前景。

表 3 SiC_p 增强铝基复合材料弹性模量与温度的关系
Tab.3 The relationship between the elastic modulus and temperature in the SiC_p reinforced aluminium matrix composite

SiC_p 含量	SiC_p 尺寸	不同温度下的弹性模量/GPa				
volume fraction/%	/μm	室温	100 ℃	200 ℃	300 ℃	350 ℃
15	3.5	103.2	101.3	97.4	91.7	88.7
15	20	93.9	97.7	93.7	91.1	89.8
30	2	130	127.6	123.1	117.1	116.2

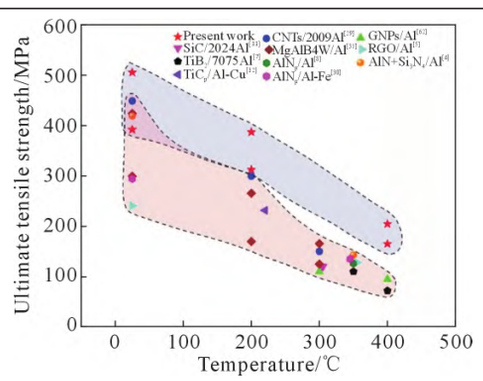


图 9 CNTs/Al 复合材料与其他非连续增强体铝基复合材料室温及高温力学性能总结[75]

Fig.9 Comparison of ultimate tensile strength for Al matrix composites with various discontinuous reinforcements at different testing temperatures[75]

关于铝基复合材料的强度，其强化机制主要分为 4 种，分别是奥罗万(Orowan)强化、载荷传递强化、位错强化和细晶强化，其中奥罗万强化和载荷转移是增强体直接的贡献，位错强化和细晶强化是增强体引入基体后导致基体的变化而间接引起的强化。在粉末冶金工艺中，增强体颗粒的粒径对基体的晶粒尺寸有细化作用，比如在高能球磨工艺中，高体积分数的增强体颗粒可以促使基体晶粒细化，进而导致整体复合材料强度提高。Chen 等[76]研究发现，随着球磨过程的进行，一维增强体 CNTs 对 Al 基体的增强机制从长径比较大时的载荷传递主导转变为长径比较小时的奥罗万机制主导，如图 10 所示。对于晶须增强或碳纳米管增强铝基复合材料，强化效果受到载荷传递的贡献。研究认为，当应力作用于复合材料时，载荷或应力可以通过铝基体传递到增强体上，由于增强体的强度远大于基体强度，所以增强体将承担更大应力，从而降低基体的承载水平。在铝基复合材料中，高应力区发生在增强体尖端处，但是当增强体落入相邻增强体的低应力区时在增强体两端的高应力区将会减少。

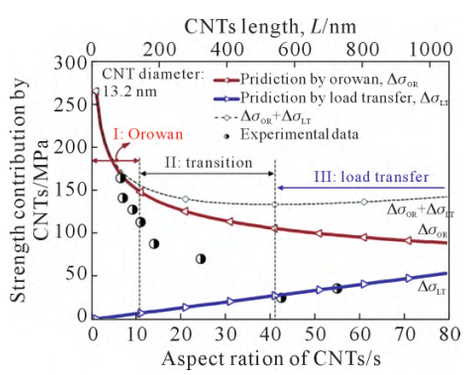


图 10 粉末冶金法制备的 Al-CNTs 复合材料中 CNTs 对强度贡献与 CNT 长径比的关系[76]

Fig.10 Dependence of the strength contribution by CNTs on the aspect ratio of CNTs for Al-CNTs composites prepared by the powder metallurgy process[76]

除了弹性模量和强度，增强体的引入也会导致复合材料的塑性发生变化。铝基复合材料的塑性是指其在断裂前能够承受最大残余变形的容量，而韧性是指复合材料在断裂前吸收的能量。铝基复合材料中低塑性和低韧性主要由 2 个因素造成：一方面与增强体相关。例如增强体的团聚、断裂、增强体与铝基体界面脱粘、致密度低等，研究表明，脆性增强体的加入使得铝基体的塑韧性都有一定程度的下降，而随着增强体体积分数的增加，复合材料的强化效果越好，而塑韧性均下降。对于纤维增强复合材料来讲，纤维是增强体，是应力承载体，而大多纤维为脆性相，因此纤维本身的断裂应变决定了整个铝基复合材料塑韧性主要有增强体含量控制。对于颗粒增强铝基复合材料，颗粒的大小、形状、分布以及制

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

备工艺等条件对材料的塑韧性有较大影响，最新研究表明，增强体网状构型有利于提高复合材料的塑韧性[77-80]。另一方面与基体相关，基体内复杂的应力状态，由于热膨胀系数差异大导致基体的硬化、基体的塑性流变收到限制等，实际上，这些因素往往共存且相互影响铝基复合材料的塑性性能。

2.4　摩擦性能

铝基复合材料除了具有优异的物理、化学、力学性能外，还具备优异的摩擦学性能。目前铝基复合材料已成为建筑[81]、结构和低碳钢轴承应用[82]的首选材料，用于制造气缸套、旋转叶片套筒、制动鼓等部件、气缸体、齿轮零件、活塞顶、曲轴、盘式制动器和驱动轴等[83-88]，在航天与国防等领域[89-90]引起了更多的关注[91]。以及一些其他领域，比如铁路运输[92]、运动器材[93]、压缩机活塞[94]、能源[95]等。这些应用领域表明，大多数铝基复合材料零部件易受高磨损率的影响[84]。因此，有必要研究这些复合材料的磨损特性，以增强对其服役行为的理解。图 11 为测试材料摩擦磨损性能常用的销盘式摩擦磨损试验机原理及实物图。

Sun 等[97]发现铝基体和复合材料试样的磨损量都随着外加载荷的增加而增加。研究发现，复合试样的摩擦系数低于铝基体，最大载荷值为 65 N，反之亦然。当载荷值为 50 N 时，铝基体的磨损条件发生转变，与合金试样相比，复合材料试样的耐磨性有所提高。在此阶段，基体合金的磨损量突然增加。因此，用 9%Sip(质量分数)增强的铝基复合材料比基体合金具有更好的耐磨性。Karun 等[96]通过搅拌铸造工艺制备了 SiC/A356 功能梯度复合材料，以研究其磨损行为。随着载荷的增加，复合材料的磨损率增加。合金表现出粘着磨损特征，而功能梯度复合材料中主要为磨粒磨损机制。Ramesh 等[98]研究了 TiB_2/Al 6063 复合材料的摩擦磨损性能，结果如图 12 所示，可以看到随着载荷增大，滑动速度的增大和滑动距离的增加，磨损率均逐渐增大。通过对比复合材料和纯合金，可以发现复合材料的磨损率均低于纯合金，且随着增强体 TiB_2 含量的增加，磨损率进一步降低，说明制备的铝基复合材料具有比纯合金更好的摩擦磨损性能。

此外，Baradeswaran 等[99]研究了 Al_2O_3/7075复合材料在 10～40 N 载荷范围内的磨损性能。实验发现，复合材料的磨损率随着外加载荷的增加而增加(同时表面温度随之增加)，这是因为在规定的载荷范围内，磨损表面上不再观察到氧化膜。研究结果表明，纯合金的磨损率最高，而 6%Al_2O_3(质量分数)增强铝基复合材料的磨损率最小。氧化铝纤维的存在也会进一步影响铝基复合材料的摩擦磨损过程，通过加入氧化铝纤维可以明显改善材料的耐滑动磨损性能，因为在变形过程中阻碍了塑性变形并且抑制了裂纹的扩展，氧化铝纤维在摩擦过程中可以起到

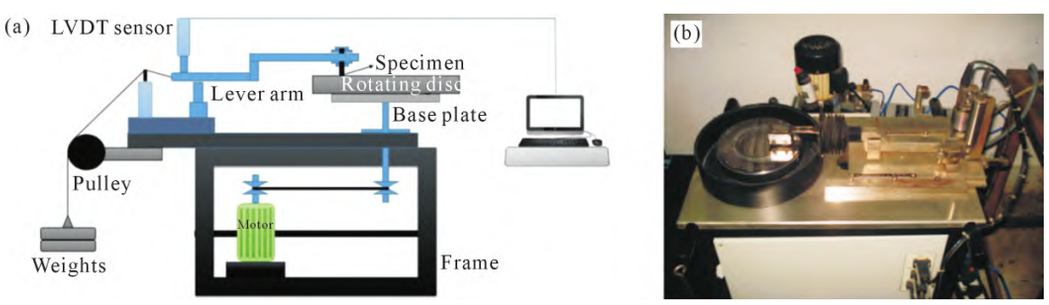


图 11　销盘式摩擦磨损试验机：(a) 结构示意图，(b) 实物图[6,96]

Fig.11　Pin-on-disc wear apparatus: (a) schematic diagram, (b) physical picture[6,96]

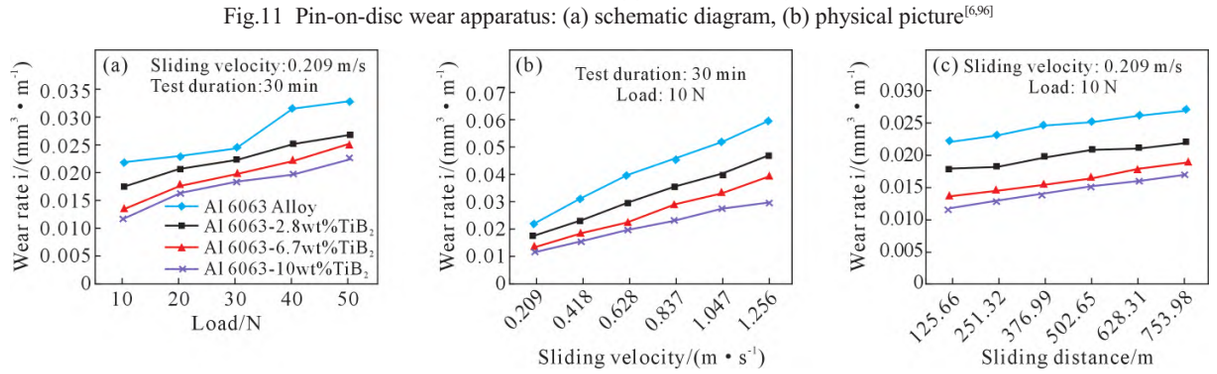


图 12　原位 TiB_2 增强 Al6063 复合材料和基体材料摩擦磨损性能对比：(a) 磨损率随载荷的变化，(b) 磨损率随滑动速度的变化，(c) 磨损率随滑动距离的变化[98]

Fig.12　Friction and wear behavior of cast Al6063 based in situ metal matrix composites and matrix alloy: (a) variation in wear rate with load, (b) variation in wear rate with sliding velocity, (c) variation in wear rate with sliding distance[98]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

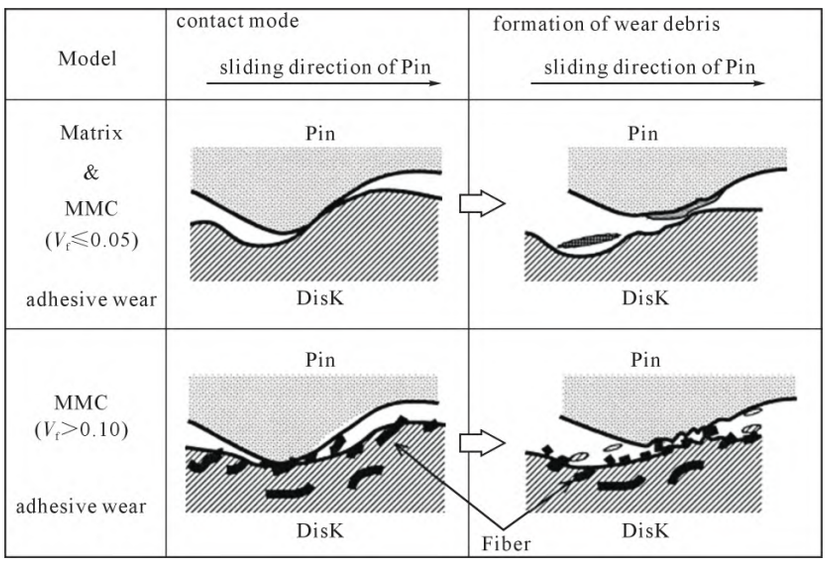


图 13 氧化铝纤维增强铝基复合材料磨损过程机理示意图[100]

Fig.13 Schematic diagram of the wear process mechanism of alumina fibre reinforced aluminum matrix composites[100]

如图 13 所示的效果,从而提高材料的耐磨性能[100]。Ravindran 等[101]研究了 5% SiC/x% Gr/Al-2024(x=0, 5, 10,质量分数)混杂复合材料在不同实验条件下的磨损行为。实验中同样观察到,随着载荷的增加,混杂复合材料的磨损量逐渐增加。据报道,所有样品的磨损率的急剧上升代表了磨损条件的转变。磨损率随载荷增加而增加(对于所有材料),可归因于较高载荷下磨损表面的大塑性变形。就复合材料的摩擦系数而言,载荷是最重要的因素(贡献率为 61.47%),而它对复合材料的滑动磨损行为有 13.78%的影响。因此,在选定的研究范围内,载荷作为复合材料磨损行为的重要因素的重要性是显而易见的。

也有研究发现了不同的磨损率变化,Rajeev 等[102]对 15%SiC_p(质量分数)增强铝基复合材料在 0.2～0.4 m/s 的速度范围内滑动磨损条件下的磨损行为进行了研究。研究发现,在这个速度范围内,磨损率呈二次曲线变化。磨损随着速度的增加而减少,在过渡速度处达到最小值,然后增加。这是因为应变率随速度增加而增加,反过来又增加了复合材料的硬度或流动强度。这会降低接触面积,从而降低磨损量(在 0.2～0.35 m/s 的速度范围内)。如果速度增加到超过 0.35 m/s,会导致温度升高,因为摩擦加热会软化磨损表面,从而增加接触面积。因此,在 0.35 m/s 的临界速度下,应变率的影响比温度影响更占优势,反之亦然。这些结果与 Ravindran 等[101]获得的结果一致,他们采用粉末冶金法制备了 5% SiC/x% Gr/Al-2024(x=0, 5, 10,质量分数)复合材料,研究发现复合材料的磨损率随着滑动速度的增加而减少(最高过渡速度为 5 m/s)。然而,在所有复合试样中,5% SiC/x% Gr/Al-2024(x=0, 5, 10,质量分数)复合材料的磨损率最低。结果表明,滑动速度对磨损行为的贡献为 12.43%,摩擦行为的贡献值为 8.86%。复合材料的磨损减少可能是由于复合材料中存在固体润滑剂(石墨)颗粒,从而在磨损接触表面上形成摩擦层。

3 应用

航空航天领域对高性能、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,逐渐成为航空航天领域应对不同服役条件的关键材料,被广泛应用于卫星、客机、运载火箭等飞行器的重要零部件上[1-3]。图 14 为在商业飞机中不同材料及复合材料的使用情况占比,可以看出铝是航空领域材料的重要组成部分[103-104],而与其相关的轻质高强铝基复合材料也具有广阔的应用前景。

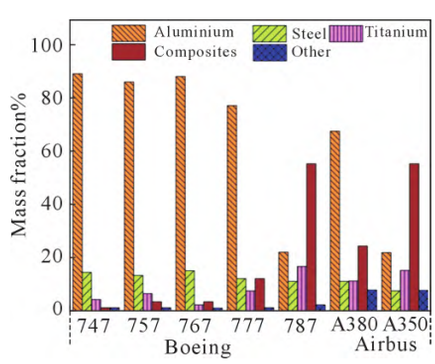


图 14 商业飞机中材料及复合材料的使用占比情况[105]

Fig.14 The proportion of materials and composite materials used in commercial aircraft[105]

航空领域因其特殊的环境条件,对于材料的性能要求更高,例如飞机起落架就要求材料具有高的比强度且兼具高的低频疲劳抗力。尤其当材料较薄

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且需要承受很高应力时，对强度和韧性的要求更高。轻质高强材料不仅有利于减重，同时也进一步提高发动机的推重比。连续纤维增强金属基复合材料的比模量及强度均明显高于未加增强体的传统材料。此外，复合材料的室温综合力学性能提升，高温强度明显提高，疲劳强度得到显著提升，这些性能的改变有利于其在航空领域的应用于铝基复合材料作为金属基复合材料的代表得到了广泛应用。铝基复合材料因增强体种类、纤维截面形状、增强体尺寸、制备工艺的不同而获得不同的组织结构，从而满足不同航空服役条件下的使用[106-107]。

3.1　铝基复合材料在航空领域的应用

我国从 20 世纪 60 年代开始进行复合材料在飞机结构上的应用研究，70 年代中期研制成功了复合材料战斗机进气道壁板，1985 年带有复合材料垂尾的战斗机成功首飞，1995 年成功研制出带有整体邮箱的复合材料机翼。目前，国内几乎所有在役军机均在不同部位处采用了复合材料[108]。这是由于飞机的工作环境特殊，飞机上采用的材料要求强度高、耐腐蚀、耐高温，同时具有轻质的特点，传统材料难以同时满足这些要求，复合材料的研制可以满足以上要求。复合材料因其在飞机上运行的安全性、经济性和可靠性等，迅速得到了发展，成为飞机制造中四大结构材料之一。自 20 世纪 80 年代起至 21 世纪初，复合材料在制造飞机使用材料中的比例显著提升，由 5%迅速涨至 46%，其中铝基复合材料因其轻质高强的特点，在飞机零部件中得到了广泛应用。在一些流行的商用飞机中，大约 50%的结构质量来自复合材料，如波音 787 和空客 350，其主要框架、机身/机翼皮和相关的桁材由碳纤维增强的复合材料制造[106,109]。硼纤维增强铝基复合材料是实际应用最早的金属基复合材料，美国和苏联的航天飞机中机身框架、支柱及起落架拉杆等部位均应用了该材料。此外，硼/铝复合材料具有良好的导热性，热膨胀系数与半导体芯片非常接近，因此在元器件发热时能最大限度地降低接头处的应力集中，不仅在结构件，而且在散热结构中都有广阔的应用前景[110-112]。硼/铝复合材料在喷气发动机风扇叶片、结构支撑件、飞机机翼蒙皮、飞机垂直尾翼、飞机起落架部件、导弹构件等航空结构件均有应用前景[113-115]。

SiC/Al 复合材料是航空航天应用最广泛的铝基复合材料之一，因其具有优异的耐热性和室温 / 高温力学性能，增强体碳化硅与 Al 之间的界面结合效果也较好，有助于 SiC_f/Al 复合材料在飞机、发动机构件及导弹结构件、飞机尾翼平衡器等位置得到应用[116-117]。北京有色金属研究总院采用粉末冶金法研制的 SiC/Al、B_4C/Al 复合材料及喷射沉积法制备的 Si/Al 复合材料已成功应用在航空领域的直升机、相控阵雷达等部位[109,118]。此外，美国主力战机“猛禽”F-22 中的发电单元、电子计数测量阵列、自动驾驶仪上均采用碳化硅颗粒增强的铝基复合材料来代替传统的封装材料。美国洛克希德·马丁公司用碳化硅颗粒增强 6061Al 基体，其中 SiC 颗粒含量为 25%，该复合材料具有良好的综合力学性能，被用于制造飞机上放置电气设备的支架，其刚度比所替代的 7075 高强铝合金高 65%，可以有效防止飞机在空中旋转和转弯时引起的弯曲现象。20 世纪 90 年代末，SiC_p/Al 复合材料在大型客机上得到了广泛应用，美国惠普公司从 PW4084 发动机开始，采用 DWA 公司生产的挤压态 SiC_p 颗粒增强变形铝合金复合材料来制造风扇出口处的导流叶片，最终应用于波音 777 客机。此外，英国的航天金属基复合材料公司采用经典的粉末冶金方法制备了颗粒增强的铝基复合材料，也已在飞机制造业中加以推广[106,109,119]。自其成功制备以来，SiC_p/Al 复合材料已经成功应用于包括战斗机腹鳍、飞机发动机导流叶片及直升机旋翼连接件等关键结构件上。DWA 复合材料公司与洛克希德·马丁公司制备的 SiC_p/Al6092 复合材料被应用到 F216 战斗机的腹鳍上，较原有的铝合金材料刚度提高了约 50%，使用寿命提升至约 8 000 h。英国 AMC 公司利用机械合金化粉末冶金法制备的 SiC_p/Al 复合材料生产了直升机旋翼系统连接用的模锻件，且已成功应用于 EC-120 及 N4 新型民用直升机上，如图 15 所示。相比铝合金，SiC_p/Al 复合材料的刚度提高约 30%，寿命提高约 5%；相比钛合金减重 25%，例如铝蜂窝复合板是较节省材料的结构，如图 16 所示，用这种基层做的板材强度大、重量轻、平整度高，且容量大、极其坚固，而且不易传导声和热，是理想的建筑及制造航天飞机、宇宙飞船、人造卫星等的理想材料[104,120-122]。

因颗粒和晶须增强的铝基复合材料具有优异的性能，且制造方法相对简单，在航空航天领域得到越来越多的应用[106,113]。以 Al_2O_3 为代表的增强体制备而成的铝基复合材料具有明显的增强效果，这是因为增强体影响了基体的形变过程，且影响大塑性变形过程中的再结晶程度，同时对于铝合金中的时效过程也有益处。Al_2O_3 颗粒增强的铝基复合材料具有高强度、韧性的特点，增强体与基体之间界面结合良好。20%含量的 Al_2O_3 颗粒增强的 6061铝合金复合材料在飞机驱动轴上已经得到了应用，不仅

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

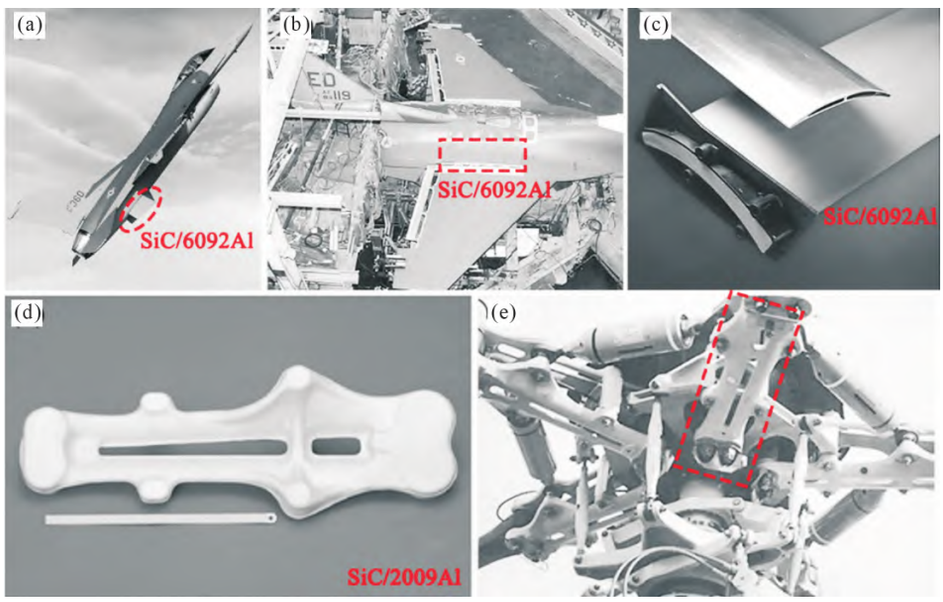


图 15 铝基复合材料在航空航天领域的应用：(a) 美国 F16 战机腹鳍，(b) F16 战斗机中心机架 23 号舱门，(c) 风扇出口引导叶片，(d~e) EC120 直升机转子叶片套筒[123-124]

Fig.15 Application of SiC reinforced aluminum matrix composites in the aerospace field: (a) American F16 fighter's abdominal fin, (b) F16 fighter center rack hatch 23, (c) Fan outlet guide blade, (d~e) EC120 helicopter rotor blade sleeve[123-124]



图 16 航空航天领域使用的铝基复合材料：(a~b) 金刚石/Al 基复合材料，(c) 蜂窝板[109,127]

Fig.16 Aluminum matrix composite materials used in the aerospace industry: (a~b) diamond/Al-based composites, (c) honeycomb board[109,127]

利用了其高强度和韧性，同时利用了低密度的特点，减重后的驱动轴进一步提高了飞机的性能。成形过程采用复合材料坯由芯杆穿孔，然后通过无缝挤压制成管状轴杆，获得的轴杆最高转速提高了约 14%[125]。

由于铝基复合材料在变形后相比于未加增强体的纯基体材料具有更高的储存能，导致其再结晶起始温度更低，如采用粉末冶金法制备的 Al/SiC_p 复合材料，在经过 60%变形后的 50%再结晶温度随着碳化硅颗粒含量的增加而出现明显下降，即高含量的增强体会增加体系的储存能，且形核点的数量随着碳化硅的尺寸减小而增多，这些综合因素导致再结晶温度出现了下降，最终使得复合材料中晶粒尺寸降低，材料的塑韧性得到同时提高。对于 2 系铝合金为基体的复合材料而言，SiC 颗粒含量的增加会降低 θ' 和 S' 相的形成温度，加速时效硬化过程。碳化硅颗粒增强的铝基复合材料也具有高的比刚度和比强度，比纯铝和中碳钢都高，且密度仅为钢的 1/3，在 300～350 ℃的高温下可以保持良好的性能。当 SiC_p 体积分数超过 50%时，高含量 SiC 颗粒增强铝基复合材料具有杰出的结构承载能力、独特的防共振能力和优异的热稳定性，其比模量可达传统 Ti 合金或 Al 合金的 3 倍，热膨胀系数低于 Ti 合金，此外热导率也明显优于铝合金，其平均谐振频率比传统金属如钛、铝、钢等高出 60%。这些优秀的综合功能/结构一体化复合材料得到了航空领域的青睐，在仪器结构件、微电子器件封装元件中具有广阔的应用市场[109,126-127]。

3.2 铝基复合材料在航天领域的应用

我国金属基复合材料在 2000 年左右也开始逐渐应用于航天器上。北京航空材料研究院研制的碳化硅颗粒增强铝基复合材料精铸件，包括支撑轮、镜身和镜盒，用于某型号卫星的遥感器定标装置，并成功地研制出空间光学反射镜坯缩比件[113,128]。哈尔滨工业大学团队制备出的碳化硅增强铝基复合材料管件成功应用于某型号卫星的天线丝杠。中国科学院金属研究所采用粉末冶金技术生产的 17% SiC/Al

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

复合材料列入航天材料采购目录，已批量用于空间飞行器结构。此外，上海交通大学制备了高性能原位自生纳米颗粒增强及碳化硅颗粒增强的铝基复合材料，具有轻质高强的特点，且在宽温度变化情况下尺寸稳定性好，具有优异的阻尼性能，能够满足航天恶劣环境服役条件的要求[118,121]。这些材料已正式在“天宫二号”空间实验室的量子密钥、激光通信、冷原子钟和光谱仪等多种精密关键构件上得到了应用，为这些精密设备仪器的安全稳定运行提供了强有力的保障。高性能轻质高强铝基复合材料构件也成功在“玉兔号”月球车的车轮和“嫦娥三号”的多种遥测遥感仪器中得到应用，助力“嫦娥三号”和“玉兔号”圆满完成任务[129]。

硼/铝复合材料具有良好的室温及高温强度，同时具有优异的疲劳强度，当含硼纤维体积分数为47%时，10^7 次循环后室温疲劳强度约为 550 MPa。硼/铝基复合材料在航天器上首次应用是美国航空航天局(NASA)将 B_f/6061Al 复合材料作为航天飞机货仓段(轨道器中段)机身构架的加强桁架的管型支柱，整体机身构架含有 300 件带有端接头和钛套环的硼纤维增强铝基复合材料管形支撑件。与未采用该复合材料的传统设计相比，其减重效率达 44%，减重 145 kg。碳化硅纤维增强铝基复合材料也在 20 世纪 90 年代应用于弹体(含弹头)结构上，制成了宇航结构，能够有效减轻宇航器的结构质量，从而进一步提高其承载能力，此外该复合材料的高温力学性能要优于传统的 LD_{10} 铝合金，更加适应宇航的严苛环境要求。

新型航天飞行器速度快、控制精度高，要求主体结构必须高刚度以避免振动，耐高温以承受气动加热，高强度以承受大过载。碳纤维增强铝基复合材料(C_f/Al)是现有比强度、比刚度最高的复合材料，但是 C 和 Al 界面反应十分严重，成为制备和批量生产的技术障碍。武高辉等深入研究了 C 和 Al 反应的热力学和动力学基础问题，发明简捷的工艺方法，无污染地解决了界面反应难题[118]；通过基体合金成分调整，使界面产物由有害的 Al_4C_3 转变为可强化的 β 相 Al_3Mg_2，低成本地解决了 C_f/Al复合材料横向强度问题。C_f/Al 复合材料已经用于复杂薄壁舱体结构，显示出优异的静态和动态力学特性，解决了对质量、强度、刚度、空间耐候性等综合性能有着严格要求的航天结构件材料选用问题[118]。此外碳纤维增强铝基复合材料因其低密度、轴向强度高、超低轴向热膨胀等特性，已经被成功应用于哈勃望远镜，位于波导(高增益天线悬架)上，该悬架长度达到 3.6 m，且材料需要满足轴向良好刚度和低的线膨胀系数，以保证在太空恶劣环境下位置准确及功能完好。作为波导功能材料，对其导电性也提出了较高要求，碳纤维增强铝基复合材料兼具良好的综合力学性能和导电性，此外，其质量也比传统设计使用的铝和碳/树脂基复合材料减重 30%，并且可以避免树脂材料在有放射性离子作用下发生化学降解过程，对宇宙环境的适应能力更强。因此碳纤维增强铝基复合材料同样可以应用于卫星抛物面天线、相机波导管、红外发射镜等部位[106,130]。

作为比碳纤维直径更细、长径比更大的一维增强体，碳纳米管逐渐成为新一代轻质高强铝基复合材料的首选增强体。2019 年，上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室张荻教授、李志强研究员团队与航天部门联合研制的某型新一代运载火箭碳纳米管铝基复合材料舱体，顺利通过了轴压静力试验考评[131]。如图 17 所示，该舱体属于国内首个，也是国际上首次采用碳纳米管铝基复合材料的航空航天产品。静力试验证明了该材料在多次轴压载荷下的性能稳定性，达到了结构优化设计的目标，验证了新材料的航天产品应用可行性，也证明金属基复合材料国家重点实验室在碳纳米管铝基复合材料制备、成形及应用技术方面达到了国内外领先水平。碳纳米管铝基复合材料舱体静力试验的成功，为我国航天结构轻量化设计提供了新的材料选择。

3.3　铝基复合材料应用展望

与传统铝合金相比，铝基复合材料具有更高的

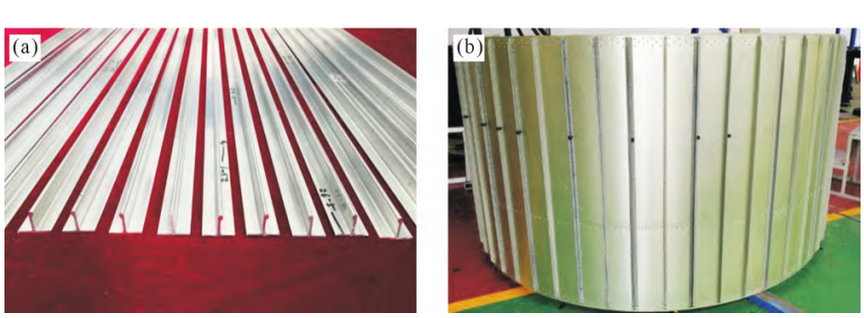


图 17　某运载火箭碳纳米管铝基复合材料结构件及舱体[131]

Fig.17　CNTs/Al composite structural components and cabin of a launch vehicle developed[131]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模量和强度，更高的使用温度及热稳定性，更优异的耐磨损和耐疲劳性能，同时兼具良好的阻尼性，热膨胀系数低等特点，是目前研究最多、应用最广泛的金属基复合材料。表 4 总结了纤维及颗粒增强铝基复合材料的性能特点及应用[132]，可以看出纤维及颗粒增强铝基复合材料具有优良的力学性能，并广泛应用于航空航天领域。随着研究者们对铝基复合材料研究的不断深入，对异质结构增强机制、增强体增强机制认识的不断深入，通过理论指导实践，逐渐制备出高性能的铝基复合材料来满足航空航天更严峻的工况条件。随着增强体的发展，以碳纳米管、石墨烯等为代表的高性能一维、二维增强体成为铝基复合材料新型增强体，进一步提升铝基复合材料的综合力学性能，同时对摩擦润滑、导电导热性等均有明显的作用，此外采用过渡金属碳/氮/碳氮化物(如 Ti_3C_2)衍生的二维层状材料(MXene)也成为新型增强体的代表，在铝基复合材料中得到应用。这些新型铝基复合材料相比传统的铝基复合材料具有更加优异的性能特点，在航空航天领域具有广阔的应用前景[133-134]。

表4 铝基复合材料的性能及航空航天应用[132]
Tab.4 Properties and applications of aluminum matrix composites[132]

增强体	铝基复合材料的性能	航空航天应用
B 纤维	沿纤维方向抗拉强度达 1 500 MPa，弹性模量为 210 GPa，疲劳强度稍低于碳纤维增强复合材料	航天飞机构件、飞机机身结构和飞机发动机风扇叶片、压缩机叶片等零部件
C 纤维	高强度、高弹性模量，耐磨性和导电性好，有优异的耐热性能，250 ℃的抗拉强度保持在室温的 80%以上，疲劳强度比铝合金高近 40%	航天器构件、飞机构件、发动机零部件、集成电路的封装件、电子设备的基板等
SiC 纤维	质量轻，高比强度、比刚度，优良的抗疲劳性能	飞机、导弹及发动机结构件，可替代 100～300 ℃服役的钛合金零件
Al_2O_3 纤维	比强度、比模量大，600 ℃的强度和弹性模量几乎与室温下相同，疲劳强度高，耐腐蚀性能比其他纤维增强复合材料好	航天器中某些设备和构件
碳纳米管	质量轻、高强度、高弹性模量，室温及高温力学性能优异，400 ℃强度保持 200 MPa[75]	运载火箭碳纳米管铝基复合材料结构件及舱体[135]
石墨烯	良好的综合力学性能，高比强度及比刚，良好的导电及低的热膨胀系数[136]	航空航天轻质构件，电子封装
SiC 颗粒	密度低、比强度及比模量高、热导率高、与基体热膨胀匹配、尺寸稳定性好	微电子器件、飞机蒙皮、发动机构件、设备支架、卫星支架、波导天线、导弹翼等
Al_2O_3 颗粒	密度低、比刚度高、韧性好	Al_2O_3/6061Al 用于飞机零部件

参考文献：

[1] GEORGANTZIA E, GKANTOU M, KAMARIS G S. Aluminium alloys as structural material: A review of research[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 11372.

[2] KUMAR DEEPATI A, ALHAZMI W, BENJEER I. Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(6): 5139-5148.

[3] 曹遴，陈彪，郭柏松，等. 碳纳米管增强铝基复合材料分散方法研究进展[J]. 精密成形工程，2021, 13(3): 9-24.
CAO L, CHEN B, GUO B S, et al. A review of carbon nanotube is persion methods in carbon nanotube reinforced aluminium matrix composites manufacturing process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 9-24.

[4] 王祝堂. 汽车铝基复合材料的制备与性能[J]. 轻合金加工技术，2012, 40(1): 1-11.
WANG Z T. Manufacture and performances of aluminum matrix composites used for automobile[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, 40(1): 1-11.

[5] SENTHILRAJ K, RAJAMURUGAN G. Influence of Al_2TiO_5 particles on AA6061 composites fabricated by bottom pouring stir casting technique[J]. Materials Letters, 2023, 338: 134085.

[6] SAMAL P, VUNDAVILLI P R, MEHER A, et al. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 131-152.

[7] YANG W S, ZHAO Q Q, XIN L, et al. Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 732: 748-758.

[8] NARCISO J, MOLINA J M, RODRÍGUEZ A, et al. Effects of infiltration pressure on mechanical properties of Al-12Si/graphite composites for piston engines[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 91: 441-447.

[9] TAN C L, ZHOU K S, MA W Y, et al. Microstructural evolution, nanoprecipitation behavior and mechanical properties of selective laser melted high-performance grade 300 maraging steel[J]. Materials & Design, 2017, 134: 23-34.

[10] 顾冬冬，张红梅，陈洪宇，等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光，2020, 47(5): 32-55.
GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 32-55.

[11] CHEN B, MOON S K, YAO X, et al. Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 141: 45-49.

[12] DU D F, HALEY J C, DONG A, et al. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Materials & Design, 2019, 181: 107923.

[13] QIAN M, XU W, BRANDT M, et al. Additive manufacturing and

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties[J]. MRS Bulletin, 2016, 41(10): 775-784.

[14] LI X P, JI G, CHEN Z, et al. Selective laser melting of nano-TiB_2 decorated AlSi10Mg alloy with high fracture strength and ductility [J]. Acta Materialia, 2017, 129: 183-193.

[15] JIANG L Y, LIU T T, ZHANG C D, et al. Preparation and mechanical properties of CNTs-AlSi10Mg composite fabricated via selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 734: 171-177.

[16] MISHRA R S, MAHONEY M W, MCFADDEN S X, et al. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy [J]. Scripta Materialia, 1999, 42(2): 163-168.

[17] LIU Q, KE LM, LIU FC, et al. Microstruc ture and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing[J]. Materials & Design, 2013, 45: 343-348.

[18] SHARMA A, FUJII H, PAUL J. Influence of reinforcement incorporation approach on mechanical and tribological properties of AA6061-CNT nanocomposite fabricated via FSP [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 604-620.

[19] 赵霞，柯黎明，徐卫平，等. 搅拌摩擦加工法制备碳纳米管增强铝基复合材料[J]. 复合材料学报，2011, 28(2): 185-190.
ZHAO X, KE L M, XU W P, et al. Carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites by friction stirprocessing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28 (2): 185-190.

[20] ZENG X, TENG J, YU J G, et al. Fabrication of homogeneously dispersed graphene/Al composites by solution mixing and powder metallurgy [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(1): 102-109.

[21] ZHANG X, LI S, PAN B, et al. Regulation of interface between carbon nanotubes-aluminum and its strengthening effect in CNTs reinforced aluminum matrix nanocomposites [J]. Carbon, 2019, 155: 686-696.

[22] ZHANG X, XU XJ, JIANG Z, et al. Effect of SiC_w volume fraction on microstructure and properties of SiC_w/Al composite fabricated by hot isostatic pressing-hot pressing [J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 1165f4.

[23] CORROCHANO J, CERECEDO C, VALCÁRCEL V, et al. Whiskers of Al_2O_3 as reinforcement of a powder metallurgical 6061 aluminium matrix composite[J]. Materials Letters, 2008, 62(1): 103-105.

[24] SABOORI A, PAVESE M, BADINI C, et al. Microstructure and thermal conductivity of Al-graphene composites fabricated by powder metallurgy and hot rolling techniques[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(7): 675-687.

[25] ZHANG L J, QIU F, WANG J G, et al. Nano-SiC_p/Al2014 composites with high strength and good ductility [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2017, 24(3): 353-359.

[26] JARFORS A E W. Semisolid casting of metallic parts and structures[J]. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, 2022, 4: 100-116.

[27] RAMESH C S, PRAMOD S, KESHAVAMURTHY R. A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061-TiB_2 in-situ composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (12): 4125-4132.

[28] UJAH C O, VONKALLON D V, AIKHUELE D O, et al. Advanced composite materials: A panacea for improved electricity transmission[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8291.

[29] UJAH C O, POPOOLA A P I, POPOOLA O M, et al. Enhanced tribology, thermal and electrical properties of Al-CNT composite processed via spark plasma sintering for transmission conductor[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(22): 14064-14073.

[30] CAO M, LUO Y Z, XIE Y Q, et al. The influence of interface structure on the electrical conductivity of graphene embedded in aluminum matrix[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(13): 1900468.

[31] 李炯利，张海平，王旭东，等. 航空用石墨烯改性铝电缆导体研制进展[J]. 民用飞机设计与研究，2021(3): 75-80.
LI J L, ZHANG H P, WANG X D, et al. Developmentof graphene modified aluminum cable conductor for aviation [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2021(3): 75-80.

[32] HUMMEL R E. Electronic properties of materials[M]. New York: Springer, 2003.

[33] TATAR C, ÖZDEMIR N. Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α-Al_2O_3 particulate reinforced aluminum composites (Al/Al_2O_3-MMC) by powder metallurgy method [J]. Physica B: Condensed Matter, 2010, 405(3): 896-899.

[34] KARTHIKEYAN L, SENTHILKUMAR V S, PADMANABHAN K A. On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 761-771.

[35] HUBER T, DEGISCHER H P, LEFRANC G, et al. Thermal expansion studies on aluminium-matrix composites with different reinforcement architecture of SiC particles[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(13): 2206-2217.

[36] NAM T H, REQUENA G, DEGISCHER P. Thermal expansion behaviour of aluminum matrix composites with densely packed SiC particles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(5): 856-865.

[37] MOLINA J M, NARCISO J, WEBER L, et al. Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 480(1-2): 483-488.

[38] SAADALLAH S, CABLÉ A, HAMAMDA S, et al. Structural and thermal characterization of multiwall carbon nanotubes (MWCNTs)/aluminum (Al) nanocomposites[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 151: 232-236.

[39] SHIN S E, KO Y J, BAE D H. Mechanical and thermal properties of nanocarbon-reinforced aluminum matrix composites at elevated temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 106: 66-73.

[40] EL-AZIZ K A, SABER D, SALLAM H E-D M. Wear and corrosion behavior of Al-Si matrix composite reinforced with alumina [J]. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 2015, 1(1): 5.

[41] KRUPAKARA P V. Corrosion characterization of Al6061/red mud metal matrix composites[J]. Portugaliae Electrochimica Acta, 2013, 31(3): 157-164.

[42] SAMAL B P, KHUNTIA S K. Comparative analysis of AMMC and Al alloy produced by plunger technique for buckling of column using FEM [J]. International Journal of Applied Engineering

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Research, 2019, 14(11): 2630-2635.

[43] MUTHAZHAGAN C, GNANAVELBABU A, KALIYAMOORTHY R, et al. Corrosion behavior of aluminium-boron carbide-Graphite composites[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 591: 51-54.

[44] BASTWROS M M H, ESAWI A M K, WIFI A. Friction and wear behavior of Al-CNT composites[J]. Wear, 2013, 307(1-2): 164-173.

[45] AYDıN F. A review of recent developments in the corrosion performance of aluminium matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 949: 169508.

[46] POLAT S, SUN Y, ÇEVIK E, et al. Investigation of wear and corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated B_4C reinforced Al-Si matrix semi-ceramic hybrid composites[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(25): 3549-3565.

[47] STALIN B, SUDHA G T, KAILASANATHAN C, et al. Effect of MoO_3 ceramic oxide reinforcement particulates on the microstructure and corrosion behaviour of Al alloy composites processed by P/M route[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101655.

[48] ARSUN O, AKGUL Y, SIMSIR H. Investigation of the properties of Al7075-HTC composites produced by powder metallurgy[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(17): 2339-2348.

[49] XIE Y M, MENG X C, MAO D X, et al. Homogeneously dispersed graphene nanoplatelets as long-term corrosion inhibitors for aluminum matrix composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(27): 32161-32174.

[50] LOTO RT, BABALOLA P. Evaluation of the influence of alumina nano-particle size and weight composition on the corrosion resistance of monolithic AA1070 aluminium[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 65(3): 2138-2143.

[51] MORAMPUDI P, VENKATA RAMANA V S N, PRASAD C, et al. Physical, mechanical and corrosion properties of Al6061/ZrB_2 metal matrix nano composites via powder metallurgy process[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 59: 1708-1713.

[52] SAMBATHKUMAR M, GUKENDRAN R, VIJAYANAND M. Investigation of corrosion behaviour of Al 7075/B_4C/Al_2O_3 hybrid metal matrix composite[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50(5): 1606-1610.

[53] KUMAR S, KUMAR A, VANITHA C. Corrosion behaviour of Al 7075/TiC composites processed through friction stir processing[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 15(1): 21-29.

[54] SHAFQAT QA, RAFI-UD-DIN, SHAHZAD M, et al. Mechanical, tribological, and electrochemical behavior of hybrid aluminum matrix composite containing boron carbide (B_4C) and graphene nanoplatelets[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(18): 3116-3129.

[55] AKÇAMLı N, KÜÇÜKELYAS B, KAYKıLARLı C, et al. Investigation of microstructural, mechanical and corrosion properties of graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 115627.

[56] SENTHIL KUMAR P, KAVIMANI V, SOORYA PRAKASH K, et al. Effect of TiB_2 on the corrosion resistance behavior of in situ Al composites[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14(1): 84-91.

[57] KARABACAK A H, ÇANAKÇı A, ERDEMIR F, et al. Corrosion and mechanical properties of novel AA2024 matrix hybrid nanocomposites reinforced with B_4C and SiC particles[J]. Silicon, 2022, 14(14): 8567-8579.

[58] SHADAKSHARI R, NIRANJAN H B, PAKKIRAPPA H. Study of corrosion behaviour of Al2024 nanocomposite reinforced with MWCNTs[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 1226-1232.

[59] ANWAR J, KHAN M, FAROOQ M U, et al. Effect of B_4C and CNTs' nanoparticle reinforcement on the mechanical and corrosion properties in rolled Al 5083 friction stir welds[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2022, 62(1): 1-10.

[60] AKÇAMLı N, ŞENYURT B, GÖKÇE H, et al. Powder metallurgical fabrication of graphene reinforced near-eutectic Al-Si matrix composites: Microstructural, mechanical and electrochemical characterization[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2022, 31: 101052.

[61] LI QQ, ROTTMAIR C A, SINGER R F. CNT reinforced light metal composites produced by melt stirring and by high pressure die casting[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(16): 2242-2247.

[62] UJAH C O, POPOOLA A P I, POPOOLA O M, et al. Influence of CNTs addition on the mechanical, microstructural, and corrosion properties of Al alloy using spark plasma sintering technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7-8): 2961-2969.

[63] SAMUEL RKP S, ROBINSON SMART D S, JOHN ALEXIS S. Corrosion behaviour of aluminium metal matrix reinforced with multi-wall carbon nanotube[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2018, 5(1): 71-75.

[64] IBRAHIM I A, MOHAMED F A, LAVERNIA E J. Particulate reinforced metal matrix composites - A review[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(5): 1137-1156.

[65] SONG M. Effects of volume fraction of SiC particles on mechanical properties of SiC/Al composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(6): 1400-1404.

[66] ZHANG G P, MEI Q S, CHEN F, et al. Production of a high strength Al/($TiAl_3$+Al_2O_3) composite from an Al-TiO_2 system by accumulative roll-bonding and spark plasma sintering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 752: 192-198.

[67] MAZAHERY A, SHABANI M O. Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 275-280.

[68] MAZAHERY A, SHABANI M O. Nano-sized silicon carbide reinforced commercial casting aluminum alloy matrix: Experimental and novel modeling evaluation[J]. Powder Technology, 2012, 217: 558-565.

[69] KNOWLES A J, JIANG X, GALANO M, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615 (Supplement 1): S401-S405.

[70] SU H, GAO W L, FENG Z H, et al. Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al_2O_3 particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design (1980-2015), 2012, 36: 590-596.

[71] SAJJADI S A, EZATPOUR H R, TORABI PARIZI M. Compari-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

son of microstructure and me chanical properties of A356 aluminum alloy/Al_2O_3 composites fabricated by stir and compo-casting processes[J]. Materials & Design, 2012, 34: 106-111.

[72] 黄绡咏，吴卫国，陈琳. 界面弹塑性对原位 SiC_p/7075Al 复合材料弹性模量影响的数值分析[J]. 材料导报，2015, 29(10): 143-147.
HUANG X Y, WU W G, CHEN L. Numerical analysis of the effect of interface elasticity-plasticity on the elastic modulus of in-situ SiC_p/7075Al composite[J]. Materials Reports, 2015, 29(10): 143-147.

[73] 亚斌，周秉文，黄炳坤，等. 碳纳米管聚合物复合材料弹性模量预测模型研究进展[J]. 功能材料，2015, 46(11): 11001-11005.
YA B, ZHOU B W, HUANG B K, et al. Research progress on prediction models for elastic modulus of carbon nanotube reinforced-polymer composites[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46 (11): 11001-11005.

[74] 潘静，张凌博，刘京红，等. 混杂短纤维增强复合材料弹性模量预测[J]. 力学季刊，2023, 44(1): 133-141.
PAN J, ZHANG L B, LIU J H, et al. Prediction of elastic modulus of hybrid short fiber reinforced composites[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(1): 133-141.

[75] CAO L, CHEN B, WAN J, et al. Superior high-temperature tensile properties of aluminum matrix composites reinforced with carbon nanotubes[J]. Carbon, 2022, 191: 403-414.

[76] CHEN B, SHEN J, YE X, et al. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites[J]. Acta Materialia, 2017, 140: 317-325.

[77] YAN Q, CHEN B, CAO L, et al. Improved mechanical properties in titanium matrix composites reinforced with quasi-continuously networked graphene nanosheets and in-situ formed carbides[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 96: 85-93.

[78] SHI W D, YAN Q, SHEN J H, et al. Quasi-continuous GNS network induced local dynamic recrystallization along interfaces in titanium MMCs under high strain rate loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 852: 143723.

[79] NIE J F, L U F H, HUANG Z W, et al. Improving the high-temperature ductility of Al composites by tailoring the nanoparticle network[J]. Materialia, 2020, 9: 100523.

[80] ZHANG X, X U Y X, WANG M C, et al. A powder-metallurgy-based strategy toward three-dimensional graphene-like network for reinforcing copper matrix composites[J]. Nature Communication, 2020, 11(1): 2775.

[81] IDUSUYI N, AJIDE O O, OLUWOLE O O, et al. Electrochemical impedance study of an Al6063-12%SiC-Cr composite immersed in 3 wt.% sodium chloride[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 7: 413-419.

[82] ALANEME K K, OMOSULE O I. Experimental studies of self healing behaviour of under-aged Al-Mg-Si alloys and 60Sn-40Pb alloy reinforced aluminium metal-metal composites[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2015, 3 (1): 1-8.

[83] ALANEME K K, EKPERUSI J O, OKE S R. Corrosion behaviour of thermal cycled aluminium hybrid composites reinforced with rice husk ash and silicon carbide[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2018, 30(4): 391-397.

[84] GARGATTE S, UPADHYE R R, DANDAGI V S, et al. Preparation & characterization of Al-5083 alloy composites [J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2013, 1 (1): 8-14.

[85] SARASWAT R, YADAV A, TYAGI R. Sliding wear behaviour of Al-B_4C cast composites under dry contact[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 16963-16972.

[86] WALCZAK M, PIENIAK D, ZWIERZCHOWSKI M. The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(1): 116-123.

[87] MAVHUNGU S T, AKINLABI E T, ONITIRI M A, et al. Aluminum matrix composites for industrial use: Advances and trends [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 7: 178-182.

[88] ADEBISI A A, MALEQUE M A, RAHMAN M M. Metal matrix composite brake rotor: Historical development and product life cycle analysis[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2011, 4: 471-480.

[89] DAYANAND S, BABU B S, AURADI V. Experimental investigations on microstructural and dry sliding wear behavior of Al-AlB_2 metal matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5 (10): 22536-22542.

[90] HOOKER J A, DOORBAR P J. Metal matrix composites for aero-engines[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(7-8): 725-731.

[91] RAMNATH B V, ELANCHEZHIAN C, ANNAMALAI R M, et al. Aluminium metal matrix composites -A review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2014, 38(1): 55-60.

[92] HARIHARASAKTHISUDHAN P, JOSE S, MANISEKAR K. Dry sliding wear behaviour of single and dual ceramic reinforcements premixed with Al powder in AA6061 matrix[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2018,8: 275-283.

[93] SIJO M T, JAYADEVAN K R. Analysis of stir cast aluminium silicon carbide metal matrix composite: A comprehensive review[J]. Procedia Technology, 2016, 24: 379-385.

[94] MISTRY J M, GOHIL P P. Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si_3N_{4p} reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 161: 190-204.

[95] NIETO A, YANG H, JIANG L, et al. Reinforcement size effects on the abrasive wear of boron carbide reinforced aluminum composites[J]. Wear, 2017, 390-391: 228-235.

[96] KARUN A S, RAJAN T P D, PILLAI U T S, et al. Enhancement in tribological behaviour of functionally graded SiC reinforced aluminium composites by centrifugal casting[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 50(16): 2255-2269.

[97] SUNZ Q, ZHANGD, LI GB. Evaluation of dry sliding wear behavior of silicon particles reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2005, 26(5): 454-458.

[98] RAMESH C S, AHAMED A. Friction and wear behaviour of cast Al 6063 based in situ metal matrix composites[J]. Wear, 2011, 271 (9-10): 1928-1939.

[99] BARADESWARAN A, ELAYAPERUMAL A, ISSAC R F. A statistical analysis of optimization of wear behaviour of Al-Al_2O_3

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

composites using taguchi technique[J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 973-982.

[100] IWAI Y, HONDA T, MIYAJIMA T, et al. Dry sliding wear behavior of Al_2O_3 fiber reinforced aluminum composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(9): 1781-1789.

[101] RAVINDRAN P, MANISEKAR K, NARAYANASAMY R, et al. Tribological behaviour of powder metallurgy-processed aluminium hybrid composites with the addition of graphite solid lubricant [J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1169-1182.

[102] RAJEEV V R, DWIVEDI D K, JAIN S C. Effect of experimental parameters on reciprocating wear behavior of Al-Si-SiC_p composites under dry condition[J]. Tribology Online, 2009, 4(5): 115-126.

[103] STARKEJR E A, STALEY J T. 24 - Application of modern aluminium alloys to aircraft[M]//LUMLEY R. Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Cambridge: Woodhead Publishing, 2011: 747-783.

[104] ZHANG XS, CHEN YJ, HU JL. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.

[105] AAMIR M, GIASIN K, TOLOUEI-RAD M, et al. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 12484-12500.

[106] 薛云飞. 先进金属基复合材料[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2019.
XUE Y F. Advanced Metal matrix composite[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019.

[107] 刘万辉. 复合材料[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.
LIU W H. Composite materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017.

[108] 王志凌. 压电超声相控阵结构监测方法的优化研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
WANG Z L. Optimization researchon monitoring methodbasedonpiezoelectric ultrasonic phased array[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[109] 武高辉. 金属基复合材料设计引论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
WU G H. Introduction to design of metal matrix composite[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[110] GARG P, JAMWAL A, KUMAR D, et al. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 (5): 4924-4939.

[111] RAMANJANEYULU R, RAJAGOPAL K, DURGAPRASAD B. Development and evaluation of mechanical properties of aluminium alloys and boron fiber composite material by powder metallurgy route[J]. Materials Today: Proceedings, 2023: 1-8.

[112] ZHU Z, HU Z, SEET H L, et al. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 190: 104047.

[113] 尹洪峰. 复合材料[M]. 北京:冶金工业出版社,2022.
YIN H F. Composite materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022.

[114] QADIR J, SAVIO LEWISE A, JIMS JOHN WESSLEY G, et al. Influence of nanoparticles in reinforced aluminium metal matrix composites in aerospace applications -A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2023.

[115] CHOUDHURY I A, KAFY A, RAHMAN A, et al. Review of recent developments in processing and application of aluminum matrix composites with alumina particles[M]. Amsterdam: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2023.

[116] 陈明伟,谢巍杰,邱海鹏. 连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷,2016, 37(6): 393-402.
CHEN M W, XIE W J, QIU H P. Research progress in continuous SiC fiber reinforced SiC ceramic matrix composite[J]. Advanced Ceramics, 2016, 37(6): 393-402.

[117] 孟龙. 纤维增强铝基复合材料的研究现状[J]. 科技信息,2009, (18): 437-438.
MENG L. Research status of fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Science & Technology Information, 2009, (18): 437-438.

[118] 武高辉, 匡泽洋. 装备升级换代背景下金属基复合材料的发展机遇和挑战[J]. 中国工程科学,2020, 22(2): 79-90.
WU G H, KUANG Z Y. Opportunities and challenges for metal matrix composite in the context of equipment upgrading [J]. Strtegic Study of CAE, 2020, 22 (2): 79-90.

[119] 董翠鸽,王日初,彭超群,等. SiC_p/Al 复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报,2021, 31(11): 3161-3181.
DONG C G, WANG R C, PENG C Q, et al. Research progress in SiC_p/Al composite materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (11): 3161-3181.

[120] 高经. 超声波处理包覆颗粒增强铝基复合材料的研究[D]. 桂林: 桂林理工大学,2015.
GAO J. Study on ultrasonic treatment of coated particle reinforced aluminum matrix composites [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2015.

[121] 怯喜周. 分级结构碳化硼/铝基复合材料的制备与力学性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
KAI X Z. Fabrication and mechanical properties ofhierarchical boron carbide/aluminummatrix composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[122] LI Y, XIAO Y, YU L, et al. A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 154: 106762.

[123] MOURITZ A P. Introduction to Aerospace Materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

[124] MOURITZ A P. Aluminium alloys for aircraft structures[M]//Bergmann C P. Aerospace Materials. Cambridge: Woodhead publishing, 2012.

[125] 付高峰,姜澜,刘吉,等. 反应自生氧化铝颗粒增强铝基复合材料[J]. 中国有色金属学报,2006, 16(5): 853-857.
FU G F, JIANG L, Liu J, et al. In situdecomposed Al_2O_3 particles reinforced aluminum matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(5): 853-857.

[126] 崔岩,郭顺,赵会友. 高体份 SiC_p/Al 复合材料型芯法无压浸渗

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

近净成形制备技术[J]. 航空材料学报，2010, 30(6): 51-56.
CUI Y, GUO S, ZHAO H Y. Near net-shanpe forming technique with mold core of high volume fraction SiC_p/Al composite in pressureless infiltration process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30 (6): 51-56.

[127] GANILOVA O A, CARTMELL M P, KILEY A. Application of a dynamic thermoelastic coupled model for an aerospace aluminium composite panel[J]. Composite Structures, 2022, 288: 115423.

[128] 杨玲. 离心铸造 SiC 颗粒增强铝基复合材料筒状零件的组织性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2008.
YANG L. Structure and properties of tube-shaped parts of SiC particle reinforced aluminum composite formed by centrifugal casting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[129] 龙金海. 纳米 TiC 颗粒增强铝基复合材料应用于铝合金熔焊的研究[D]. 桂林：桂林理工大学，2022.
LONG J H. Studyon the application of TiC nanoparticles reinforced aluminum matrix composites for fusion welding of aluminum alloy[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022.

[130] 贺福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京：化学工业出版社，2010.
HE F. Carbon fiber and graphite fiber[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

[131] 范根莲，谭占秋. 碳纳米管铝基复合材料舱体通过静力试验考评[EB/OL].(2019-9-29)[2023-8-24]. https://smse.sjtu.edu.cn/post/detail/2322
FAN G L, TAN Z Q. Static test evaluation of carbon nanotube aluminum matrix composite cabin[EB/OL]. (2019-9-29) [2023-8-24]. https://smse.sjtu.edu.cn/post/detail/2322.

[132] 李红英，汪冰峰. 航空航天用先进材料[M]. 北京：化学工业出版社，2019.
LI H Y, WANG B F. Advanced materials for aerospace applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

[133] 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.

[134] LAVA KUMAR P, LOMBARDI A, BYCZYNSKI G, et al. Recent advances in aluminium matrix composites reinforced with graphene-based nanomaterial: A critical review[J]. Progress in Materials Science, 2022, 128: 100948.

[135] GOHARDANI O, ELOLA M C, ELIZETXEA C. Potential and prospective implementation of carbon nanotubes on next generation aircraft and space vehicles: A review of current and expected applications in aerospace sciences[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 70: 42-68.

[136] 杨文澍，武高辉，肖瑞，等. 石墨烯 / 铝复合材料的研究现状及应用展望[J]. 新材料产业，2014(11): 20-23.
YANG W S, WU G H, XIAO R, et al. Research status and application prospect of graphene/aluminum composites[J]. Advanced Materials Industry, 2014(11): 20-23.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net