

# 石墨烯增强铝基复合材料研究进展

张园<sup>1</sup>, 刘晓艳<sup>1,2\*</sup>, 武常生<sup>3</sup>, 朱晓松<sup>1</sup>, 赵志伟<sup>1</sup>, 高飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

<sup>2</sup>河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心, 河北 邯郸

<sup>3</sup>新兴铸管股份有限公司, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年3月13日; 录用日期: 2022年7月21日; 发布日期: 2022年7月29日

## 摘要

自从石墨烯被发现以来, 由于其独特的性能优势, 是铝基复合材料中理想的增强体材料。随着对石墨烯增强铝基复合材料研究的不断深入, 其制备工艺和方法越来越多。同时, 铝基复合材料中存在的问题逐一展露, 包括增强体团聚、界面结合不佳和严重界面反应等都会严重影响铝基复合材料的最终性能, 制约石墨烯增强铝基复合材料的发展。本文综述了石墨烯增强铝基复合材料国内外研究现状, 阐述了增强体氧化石墨烯、还原氧化石墨烯和石墨烯纳米片的选择, 介绍了石墨烯增强铝基复合材料的制备方法, 分析了目前石墨烯与铝基体的界面问题, 以及石墨烯在基体中的定向排列, 最后简要阐述了石墨烯增强铝基复合材料未来的研究方向。

## 关键词

石墨烯, 铝基复合材料, 制备方法, 界面, 定向排列

# Research Progress of Graphene Reinforced Aluminum Matrix Composites

Yuan Zhang<sup>1</sup>, Xiaoyan Liu<sup>1,2\*</sup>, Changsheng Wu<sup>3</sup>, Xiaosong Zhu<sup>1</sup>, Zhiwei Zhao<sup>1</sup>, Fei Gao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>2</sup>Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications, Handan Hebei

<sup>3</sup>Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd., Handan Hebei

Received: Mar. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Since its discovery, graphene has become an ideal reinforcement material for aluminum matrix composites due to its unique performance advantages. With the development of the research on

\*通讯作者。

graphene reinforced aluminum matrix composites, more and more preparation technologies and methods have been found. Meanwhile, the existing problems are also revealed one by one, such as reinforcement agglomeration, poor interfacial bonding and severe interface reactions, and so on. All these problems can seriously affect the final performances of aluminum matrix composites and restrict the development of graphene reinforced aluminum matrix composites. In this paper, the current research status of graphene reinforced aluminum matrix composites at home and abroad were summarized, elaborates the selection among reinforced graphene oxide, reduced graphene oxide and graphene nanosheets, and the preparation method of graphene reinforced aluminum matrix composites were introduced. In addition, the interfacial issue between graphene and aluminum matrix and the directional alignment of graphene in the matrix were analyzed. Finally, the future research direction of graphene reinforced aluminum matrix composites was briefly expounded.

## Keywords

Graphene, Aluminum Matrix Composites, Preparation Method, Interface, Directional Alignment

Copyright © 2022 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

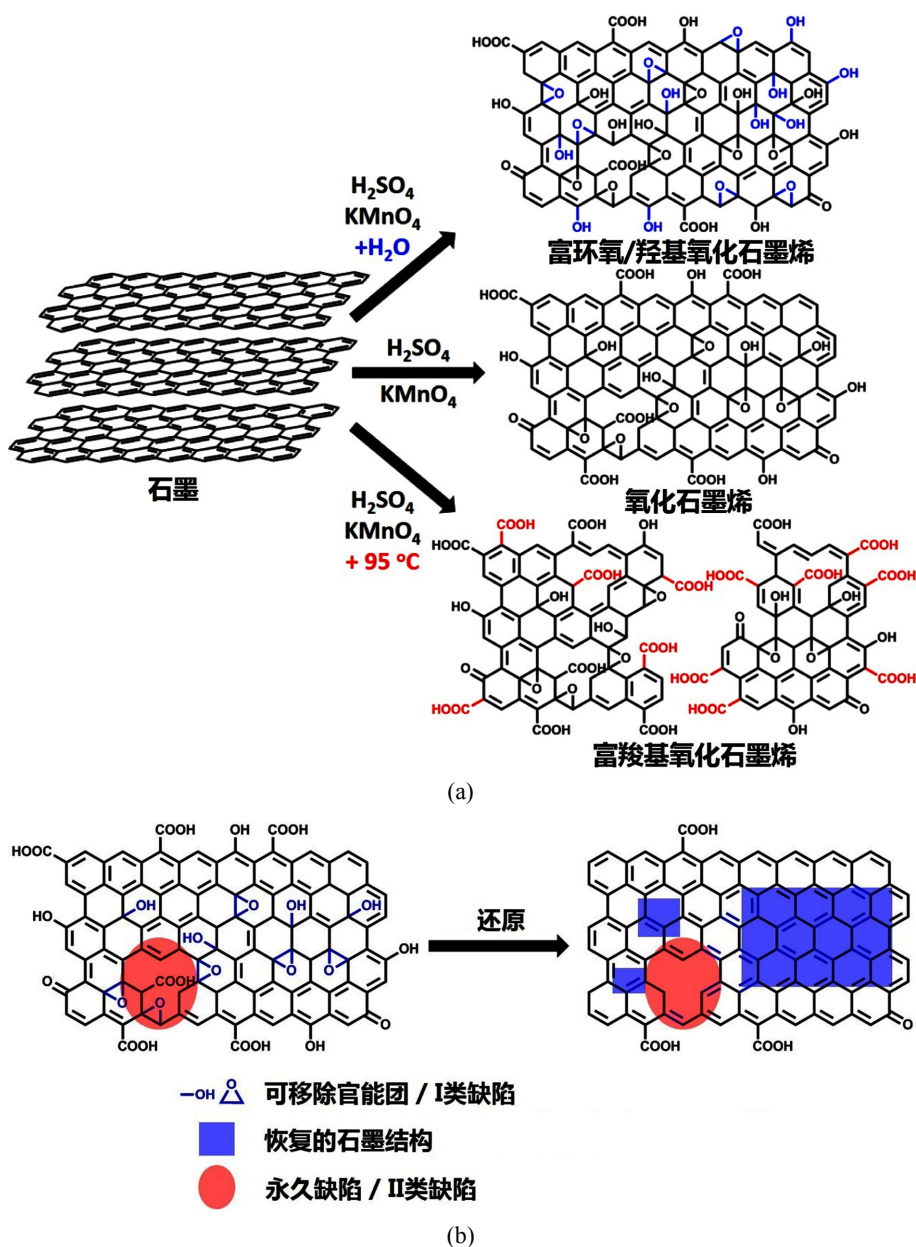
## 1. 引言

石墨烯因独特的二维结构具有比一维碳纳米管(CNTs)更高的增强效率,更能有效提高基体强度。石墨烯具有的褶皱形态也可避免复合材料塑性降低。同时由于石墨烯巨大的比表面积,使其更容易在基体中团聚。而且石墨烯与基体的润湿性原本就差,产生石墨烯增强铝基复合材料界面结合差的问题。随着研究的深入,铝基复合材料所存在的问题逐一展露,其中,增强体与基体之间的界面粘结,增强体团聚、界面结合不佳或严重界面反应会严重影响铝基复合材料的最终性能[1]。这些问题都阻碍着石墨烯增强铝基复合材料的研究。并且由于石墨烯在铝基体中的随机取向,使石墨烯增强铝基复合材料实验测出的性能比理论值要低很多,增强石墨烯在基体中的定向排列,提高石墨烯的强化效率,可大幅提高复合材料的力学性能。本文从增强体石墨烯及其派生物的选择、石墨烯增强铝基复合材料的制备方法、石墨烯与铝基体的界面问题、石墨烯在基体中的定向排列及未来研究方向进行阐述。

## 2. 石墨烯及其派生物

石墨烯是各个碳原子通过  $SP_2$  杂化轨道按蜂巢晶格排列的方式形成的单层碳原子二维晶体结构。石墨烯除了包括单层石墨烯外,还包括其它种类石墨烯结构的物质,比如氧化石墨烯(GO)、还原氧化石墨烯(RGO)以及石墨烯纳米片(GNPs)等。石墨烯纳米片是由单层石墨烯沿垂直于二维平面的方向上堆叠而成的层数比较少的石墨烯。还原氧化石墨烯是从由石墨氧化而得到的氧化石墨烯还原而获得的,但是还原法制备的石墨烯大多数都具有晶体缺陷[2]。通常,我们把厚度在纳米范围内的石墨烯称作石墨烯纳米片。

石墨烯表面的疏水特性和氧化石墨烯中羟基、羧基、羰基和环氧基的存在,使得氧化石墨烯比石墨烯更好地分散在水系溶液中[3]。陈骥[4]通过改变反应条件控制氧化石墨烯的官能团,得到富环氧/羟基氧化石墨烯、氧化石墨烯和富羧基氧化石墨烯,而 GO 和 RGO 中存在永久性的不可通过简单化学还原修复的缺陷,如图 1 所示。氧化石墨烯、还原氧化石墨烯和石墨烯纳米片各有优缺点,若使其作为增强体材料加入到铝基体中,还需进一步探索对比哪个能使基体的性能得到更强的提高。不同实验条件下石墨烯增强铝基复合材料的相关研究数据如表 1 所示。



**Figure 1.** (a) The schematic diagram of controllable preparation of functional groups of graphene oxide by changing reaction conditions, (b) Schematic diagram of two different defects in GO and RGO [4]

**图 1.** (a) 通过改变反应条件达到氧化石墨烯的官能团可控制备的示意图, (b) GO 和 RGO 中两种不同的缺陷示意图[4]

**Table 1.** Preparation methods and mechanical properties of graphene and its derivatives reinforced Al matrix composites  
**表 1.** 石墨烯及其派生物增强铝基复合材料制备方法及力学性能

复合材料	制备方法	力学性能
1.0 wt.% GO/Al [5]	磁力搅拌 + 球磨 + 重复挤压	抗压强度提高 328.6%，屈服强度提高 321.4%，硬度提高 293%
0.75 vol.% RGO/Al [6]	复合粉末组装	抗拉强度提高 29%，杨氏模量提高 9%
2 vol.% GNPs/Al [7]	超声分散 + 低温研磨 + 冷压 + 真空热压烧结	平均抗压强度提高 586%

注：表中性能提高指相对各自基体材料的提升。

### 3. 石墨烯增强铝基复合材料

随着对石墨烯铝基复合材料研究的不断深入,其制备工艺和方法也越来越多。制备工艺主要分为石墨烯在铝基体中的均匀分散和复合材料成型两部分。制备混合粉末的主要方法为球磨,包括行星式球磨,高能球磨,分段球磨,干磨,湿磨等方式。制备成复合材料的主要方法为粉末冶金法,包括热压烧结、热等静压、热挤压等(如图2)。

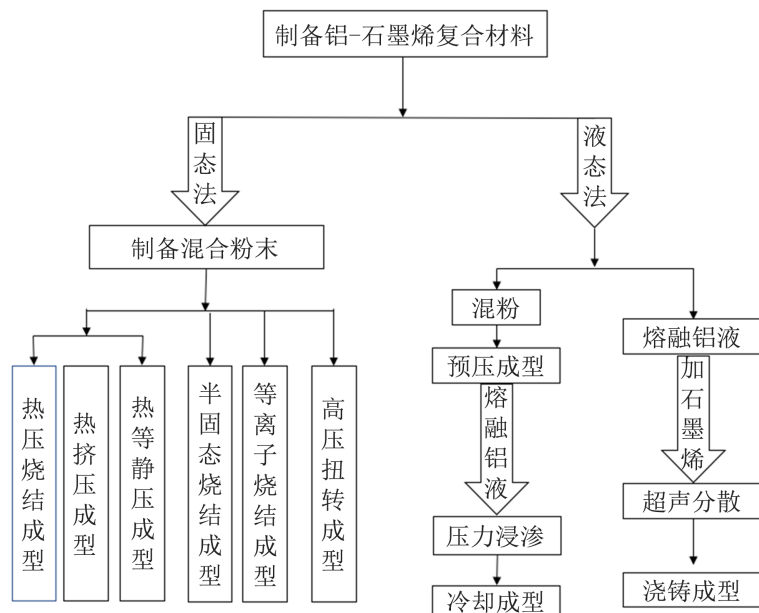


Figure 2. The common preparation methods of Al-graphene composites [8]

图2. 铝-石墨烯复合材料常见制备方法[8]

Han 等[9]采用分段球磨(SMBM)的方式,使高含量的石墨烯纳米片均匀分散在铝基体中,从而同时增强了强度和韧性。Gao 等[10]采用改进的 Hummers 法制备了带负电荷的氧化石墨烯片,并用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)包覆铝粉,使铝粉表面带正电荷,然后通过静电自组装实现氧化石墨烯纳米片在纯铝粉上的均匀吸附,如图3所示。

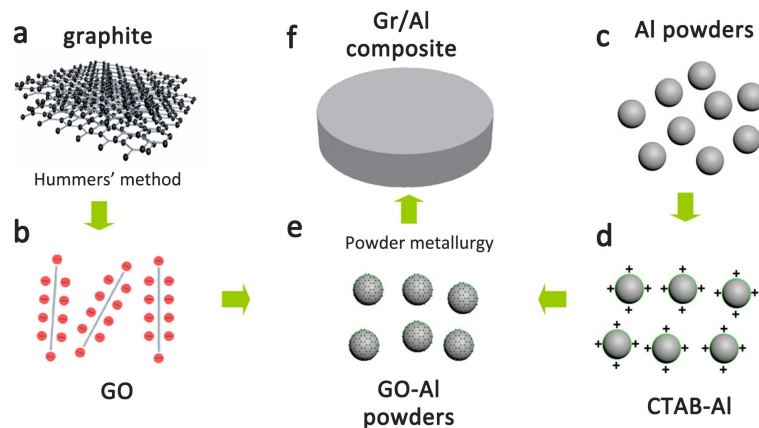


Figure 3. Schematic diagram of the preparation process of graphene reinforced aluminum matrix composites [10]

图3. 石墨烯增强铝基复合材料的制备过程示意图[10]

Wang 等[11]采用化学气相沉积法在石墨薄片(Gr(GNP))表面生长垂直排列的石墨烯纳米片(GNP), 然后通过真空热压烧结法制备 Gr(GNP)/Al 复合材料。研究发现, 与未增强的铝基体相比, GNP 含量为 3.3 vol.%时, 透平面热导率提高 96.8%, 抗弯强度提高 122%。随着 GNP 含量的进一步增加, GNP 会在基体内发生团聚, 复合材料的透平面热导率和弯曲强度开始下降, 但仍高于 Gr/Al 复合材料。Kumar 等[12]用粉末冶金和热挤压技术制备不同含量石墨烯增强铝基复合材料。与铝和非挤压铝-GNPs 复合材料相比, 热挤压技术制备的 1.5 wt.% GNPs/铝复合材料的应变硬化指数和强度系数值要高出两倍。Han 等[9]采用分段球磨(SMBM)的方法将 Cu 纳米粒子修饰的石墨烯纳米片(Cu-GNPs)均匀分散在铝基体中, 然后用冷压、烧结和热挤压的方法制备成型。研究发现, 3.5 wt.% Cu-GNPs/Al 复合材料的屈服强度和极限抗拉强度分别为 418 MPa 和 480 MPa, 与未增强的铝基体相比提高了 150%和 140%。不同实验条件下石墨烯增强铝基复合材料的相关研究数据如表 2 所示。

**Table 2.** Preparation methods and mechanical properties of graphene reinforced Al matrix composites  
**表 2.** 石墨烯增强铝基复合材料制备方法及其力学性能

复合材料	制备方法	力学性能
0.3 wt.% GNPs/Al [4]	片状粉末冶金	拉伸强度提高 62%
0.4 wt.% GNPs/2024Al [13]	球磨 + 半固态搅拌 + 热挤压	抗拉强度为 465 MPa, 弹性模量为 81 GPa, 伸长率为 9.78%
0.5 wt.% GNPs/7075Al [14]	机械研磨 + 放电等离子烧结	硬度提高 18.6%
0.3 wt.% GNPs/7075Al [14]	机械研磨 + 放电等离子烧结	杨氏模量提高 35.9%
1 wt.% RGO/Al-4Cu [15]	高能球磨 + 分子水平混合 + 放电等离子烧结	屈服强度, 极限强度和维氏硬度分别提高 79%、49%和 44%
0.6 wt.% GNPs/ZL101Al [16]	球磨混粉 + 半固态电磁搅拌	抗拉强度提高 20.2%, 伸长率提高 70.9%, 硬度提高 23.5%
0.1%石墨烯/Al [17]	湿磨 + 热等静压	硬度提高 23.59%
1 wt.% GO/Al [18]	Hummers + 粉末冶金 + 放电等离子烧结	维氏硬度和压缩强度分别提高了 135%和 162%

注: 表中性能提高指相对各自基体材料的提升。

#### 4. 石墨烯与其它物质混杂增强铝基复合材料的制备

石墨烯与其它增强体复合添加至铝基体中, 能够提高铝基体的力学性能。石墨烯与其它物质混杂增强铝基复合材料有多种方式。两种增强相直接加入铝基体中, 或是由其中一种增强相包覆在另一种增强相的外面, 然后加入铝基体中, 提高基体的性能。

Xu 等[19]采用粉末冶金和热挤压的方法制备 GO-CNT 混杂增强铝基复合材料, 热挤压过程中的部分再结晶使复合材料的铝基体形成双峰晶粒分布, 提高了复合材料的应变硬化能力。从而提高了复合材料的延性, 实现了复合材料的强度和延性之间的平衡。Mohammed 等[20]采用火花等离子体烧结方法制备了氧化铝( $Al_2O_3$ )和氧化石墨烯(GO)混杂增强铝基复合材料, 先探究了最佳  $Al_2O_3$  含量, 之后进一步探究了 GO 含量, 得到性能优异的铝基复合材料。与 Al/10V% $Al_2O_3$  复合材料相比, Al/10V% $Al_2O_3$ /0.25wt.%GO 混合纳米复合材料的硬度提高约 13%, 抗压强度提高 34%, 并且表现出最低的热膨胀率。Zhang 等[21]采用粉末冶金法制备 SiC-石墨增强铝基复合材料和 SiC-石墨烯纳米片(GNSs)增强铝基复合材料。与石墨相比, GNSs 能更均匀地分散在基体材料中。不同实验条件下石墨烯与其它物质混杂增强铝基复合材料的

相关研究数据如表 3 所示。

**Table 3.** Preparation methods and mechanical properties of hybrid reinforced Al matrix composites  
**表 3.** 混杂增强铝基复合材料制备方法及力学性能

复合材料	制备方法	力学性能
0.3% GO-1% CNT/Al [19]	球磨 + 冷压 + 烧结 + 热挤压	拉伸强度提高 29.7%，与纯铝几乎相似的拉伸延性
GO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al [22]	复合粉末组装	硬度提高 210%，强度提高 223%， 刚性提高 78%，韧性提高 30%
0.7% Ni-GNPs/6061Al [23]	化学气相沉积 + 粉末冶金	屈服强度提高 75%，抗拉强度提高 30%

注：表中性能提高指相对各自基体材料的提升。

## 5. 石墨烯增强铝基复合材料的制备所面临的问题

在石墨烯增强铝基复合材料中石墨烯受到几个限制，石墨烯在基体中的均匀分散问题和石墨烯与铝基体之间的润湿性较差，导致界面结合不牢固和负载转移强化效果较低[23]。石墨烯增强金属基复合材料实际测出的力学性能一般都低于理论预测值，主要原因可能是由于石墨烯是二维材料，石墨烯的面内强度高于面外强度，表现出各向异性的性能特征。但是用常规方法制备的复合材料中，石墨烯都是在复合材料中随机分布，从而抑制了石墨烯的强化效率。因此，制备出高性能石墨烯增强铝基复合材料仍然面临着巨大挑战。

### 5.1. 石墨烯与铝基体的界面结合

在制备石墨烯增强铝基复合材料的过程中，石墨烯可能会在球磨过程中粘附在铝颗粒的表面，在机械合金化和随后的烧结过程中与铝基体之间发生界面反应，形成界面反应产物碳化铝(Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>)。Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>是一种脆性相，且具有吸湿性，若 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 大量存在于复合材料中可能导致复合材料的强度降低。然而，在少数情况下，Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 如果能够均匀地分散在复合材料基体上，也可以很好地起到载荷传递的作用，从而提高强度。Zhou 等人[24]通过研究，首次演示了通过适当的界面反应来改善薄层石墨烯/Al 复合材料的界面载荷传递和强度，并且获得了良好的电学性能。虽然适当的界面反应能对复合材料起到良好的作用，但是 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 在界面处的作用机制尚不明确，需要进一步的研究。

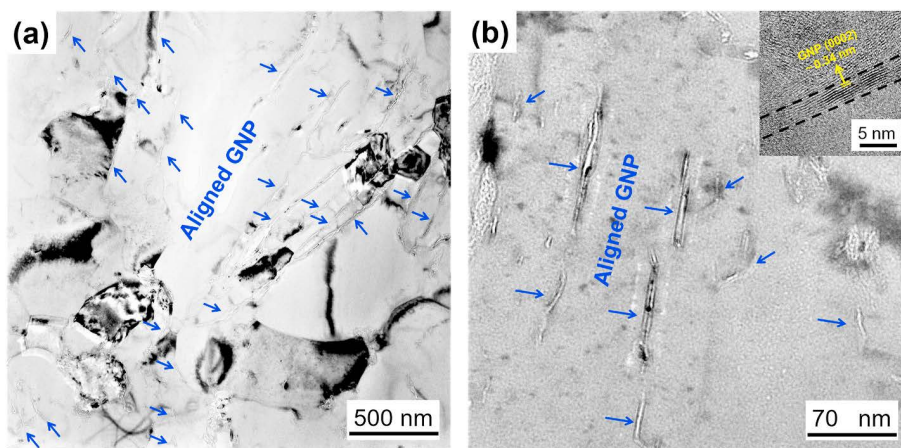
Li 等[25]研究了通过球磨、放电等离子烧结(SPS)和后续热挤压制备的 Al-GNPs 复合材料中石墨烯纳米片与铝基体之间的界面。在经过放电等离子烧结后的复合材料中观察到 5 层界面 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GNPs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al，热挤压后形成了一些新的 GNPs/Al 界面，形成 7 层界面 Al/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GNPs/Al/GNPs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al。通过对复合材料的强化分析，证实了界面间的载荷传递。Yu 等[26]也认为少量的界面反应可以提高界面的结合强度，通过调整球磨工艺控制界面结合，从而实现铝 - 石墨烯复合材料力学性能的调控。Xiong 等[27]根据晶粒细化增强、奥罗万增强、CTE 错配和荷载转移增强，研究了 GNP/Al 复合材料界面反应引起的增强作用。创新地提出了将 GNPs 和纳米 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相作为一个整体来讨论 GNPs/Al 复合材料的强化效果。界面纳米 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相对 GNPs/Al 复合材料的载荷传递有显著影响。郭等[28]认为，纳米级的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 可以提高 CNT/Al 复合材料界面的抗剪切应力和抗拉强度，而微米尺度的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 对其力学性能有害。Jiang 等[29]揭示了 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 在石墨烯纳米片/铝复合材料中的成核和生长机理。Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 主要在石墨烯纳米片的开放边缘成核，形成的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 大多沿铝晶界或成一定角度。Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生长受到平行于(003)平面的扩散生长和垂直于(003)平面的成核生长的控制。Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 沿(003)平面的纵向生长速度快于横向生长速度，大部分生长为杆状。这是因为 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的纵向生长受 C 和 Al 元素在 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 和 Al 基质中扩散的控制，而 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的横向生长受界面成核速度的影响。

李宁等[30]先对石墨烯进行化学镀铜,再采用球磨和真空热压方法制备镀铜石墨烯增强 7075 铝基复合材料。石墨烯镀铜后改善基体与增强相间的界面结合,使复合材料的硬度、抗拉强度和耐磨性较镀铜前均有一定程度提高。Wu 等[31]使用压力烧结的方法制备了二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )涂层石墨烯纳米片增强铝基复合材料。与基体相比经  $\text{TiO}_2$  涂层 GNP 增强的纳米复合材料的屈服强度、极限抗拉强度和显微硬度分别提高了 38.9%、34.4%和 20.1%,  $\text{TiO}_2$  涂层优化了石墨烯纳米片与铝基体之间的界面结合,提高了载荷传递效率。Wang 等[32]用化学气相沉积法(CVD)在 Gr 片上生长出高度约为 204 nm 的 GNP。并通过粉末冶金技术将 Gr(GNP)/2A12Al 复合材料进行固化。结果表明,该复合材料的界面粘合良好,同时界面区域的硬度和模量均有所提高。抗弯强度和抗拉强度显著增强。当增强体体积分数为 15 vol.%时,最大抗弯强度达到 344 MPa,抗拉强度达到 254 MPa。Zhou 等[24]通过适当的界面反应实现了少层石墨烯纳米片铝基复合材料(FLG/Al)中有效的负载转移。当烧结温度为 883 K 时,在 FLG/Al 界面产生少量单晶  $\text{Al}_4\text{C}_3$  纳米棒。由于  $\text{Al}_4\text{C}_3$  的锁定效应,FLG 与铝基质紧密结合,没有明显的界面滑移,导致复合材料的强度明显增强。此外,FLG/Al 复合材料的电导率几乎与纯铝一样高,这可能是制备高性能铝基导体的重要一步。

## 5.2. 石墨烯在基体中的定向排列

通常认为,当各向异性的增强体在基体中定向排列时,可最大程度强化基体材料。

可通过热挤出、热轧等变形手段,使复合材料发生塑性变形,基体中的增强体在力的作用下会沿着力的方向定向排列。Zheng 等[33]通过粉末冶金和多道热拉伸方法将 5% GNP 加入铝基体中,由此制备的复合材料中 GNP 均匀分布和较高的界面结合强度。并且复合材料经过多道热拉伸之后,GNP 不再随机分布,而是对齐排列(如图 4),同时形成 $\langle 111 \rangle$ 取向的织构,使复合材料具有各向异性的力学性能。



**Figure 4.** Microstructure of 5.0 vol.% GNP/Al composite processed by six-pass drawing. (a) Aligned GNPs at Al grain boundaries, (b) Aligned GNPs inside Al grains. The inset in (a) is a HRTEM image of GNPs [33]

**图 4.** 用六道次拉伸法加工了 5.0 vol.% GNP/Al 复合材料的显微组织。(a) 在 Al 晶界上对齐 GNPs, (b) Al 晶粒内对齐排列的 GNPs。(a)中的插图是 GNPs 的 HRTEM 图像[33]

Li 等[6]通过加工片状 Al 粉与 GO 得到 RGO/Al 复合粉末,再经烧结及热轧处理制备出完全致密的 1.5 vol.% RGO/Al 复合材料。结果显示,整个复合材料由石墨烯层、Al 层和无定形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成层状结构,且石墨烯沿轧制方向排列。

田旋坤[34]将一定量的 Ni 碳纳米相粉末与片状 Cu 粉进行低速球磨,得到 Ni 碳纳米相/Cu 复合粉末。将复合粉末放进石墨模具中并放入磁场内转动 2 min,从而使 Ni 碳纳米相粉末在磁场力的作用下定向排

列,并逐渐压实复合粉末,获得 Ni 碳纳米相沿磁场方向定向排列的复合粉末,其过程示意图如图 5 所示。

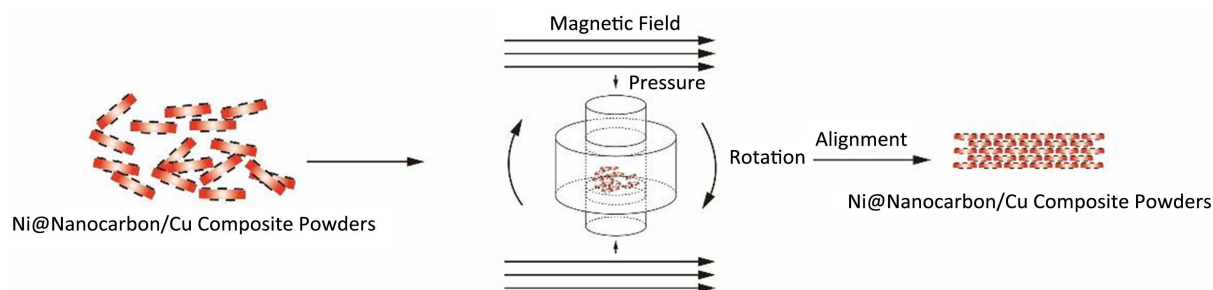


Figure 5. Schematic diagram of magnetic field processing [34]

图 5. 磁场处理示意图[34]

## 6. 未来研究方向

目前关于石墨烯铝基复合材料的研究大多都是强调石墨烯的均匀分散、抑制其团聚和提高界面结合强度,而在石墨烯铝基复合材料的微观结构方面的尝试有限。在不改变成分的情况下调整石墨烯的分布和方向,是提高复合材料增强效率或平衡强度和韧性的方法。未来对石墨烯增强铝基复合材料的研究应侧重于石墨烯的定向排列,使石墨烯在铝基体中充分发挥其优异的性能,这对进一步提高铝基复合材料的性能有很大的作用。同时实现工业上的大批量生产也是该领域的研究重点。

## 基金项目

河北省高校科学技术研究基金(ZD2018213)和邯郸市科学技术研究与开发项目(19422111008-20)对本研究工作提供了资助。

## 参考文献

- [1] 齐浩天. 石墨烯增强铝基复合材料的微观组织及磨损性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- [2] Geim, A.K. (2009) Graphene: Status and Prospects. *Science*, **324**, 1530-1534. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- [3] Paredes, J.I., Villar-Rodil, S., Martínez-Alonso, A. *et al.* (2008) Graphene Oxide Dispersions in Organic Solvents. *Langmuir*, **24**, 10560-10564. <https://doi.org/10.1021/la801744a>
- [4] 陈骥. 氧化石墨烯的制备及结构控制[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [5] Bahri, A., Askarnia, R., Esmailzadeh, J. and Roueini Fardi, S. (2021) Mechanical and Electrochemical Behaviors Assessments of Aluminum-Graphene Oxide Composites Fabricated by Mechanical Milling and Repetitive Upsetting Extrusion. *Journal of Composites and Compounds*, **3**, 152-158. <https://doi.org/10.52547/jcc.3.3.1>
- [6] Li, Z., Guo, Q., Li, Z.Q., *et al.* (2015) Enhanced Mechanical Properties of Graphene (Reduced Graphene Oxide)/Aluminum Composites with a Bioinspired Nanolaminated Structure. *Nano Letters*, **15**, 8077-8083. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b03492>
- [7] Li, D.S., Ye, Y., Liao, X.J. and Qin, Q.H. (2018) A Novel Method for Preparing and Characterizing Graphene Nanoplatelets/Aluminum Nanocomposites. *Nano Research*, **11**, 1642-1650. <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1779-9>
- [8] 刘洋, 李雷, 历长云, 许磊, 米国发. 高强高导铝-石墨烯复合材料研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(4): 358-365.
- [9] Han, T.L., Wang, F.C., Li, J.J., *et al.* (2021) Simultaneously Enhanced Strength and Ductility of Al Matrix Composites through the Introduction of Intragranular Nano-Sized Graphene Nanoplates. *Composites Part B: Engineering*, **212**, Article ID: 108700. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108700>
- [10] Gao, X., Yue, H.Y., Guo, E.J., *et al.* (2016) Preparation and Tensile Properties of Homogeneously Dispersed Graphene Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Materials & Design*, **94**, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.034>
- [11] Wang, C.Y., Su, Y.S., Ouyang, Q.B., *et al.* (2020) Enhanced Through-Plane Thermal Conductivity and Mechanical



- Properties of Vertically Aligned Graphene Nanoplatelet@Graphite Flakes Reinforced Aluminum Composites. *Diamond and Related Materials*, **108**, Article ID: 107929. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107929>
- [12] Kumar, R.V., Harichandran, R., Vignesh, U., *et al.* (2020) Influence of Hot Extrusion on Strain Hardening Behavior of Graphene Platelets Dispersed Aluminum Composites. *Journal of Alloys and Compounds*, **855**, Article ID: 157448. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157448>
- [13] 张哲. 搅拌铸造 GNP/2024 Al 复合材料制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [14] 马会中, 赵志凯, 夏慧敏, 张兰. 石墨烯增强铝基复合材料的制备与性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(20): 75-79.
- [15] Khoshghadam-Pireyousefan, M., Rahmifard, R., Orovciik, L., *et al.* (2020) Application of a Novel Method for Fabrication of Graphene Reinforced Aluminum Matrix Nanocomposites: Synthesis, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*, **772**, Article ID: 138820. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138820>
- [16] 梁建权, 赵宇宏, 陈利文, 张婷, 李沐奚, 侯华, 等. 石墨烯纳米片增强铝基复合材料的制备及研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(6): 652-656.
- [17] 王天琦, 李鹏旭, 陈彩英, Cai, R., 王维, 孟庆实. 石墨烯增强铝基复合材料硬度的研究[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2021, 38(4): 26-34.
- [18] 常庆明, 李宗伦, 许芳宇. 石墨烯增强铝基复合材料的制备及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2022(14): 70-73+77.
- [19] Xu, Z.Y., Li, C.J., Wang, Z., *et al.* (2020) Balancing the Strength and Ductility of Graphene Oxide-Carbon Nanotube Hybrid Reinforced Aluminum Matrix Composites with Bimodal Grain Distribution. *Materials Science and Engineering: A*, **796**, Article ID: 140067. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140067>
- [20] Mohammed, A.S., Alahmari, T.S., Laoui, T., *et al.* (2021) Mechanical and Thermal Evaluation of Aluminum Hybrid Nanocomposite Reinforced with Alumina and Graphene Oxide. *Nanomaterials*, **11**, Article No. 1225. <https://doi.org/10.3390/nano11051225>
- [21] Zhang, J.S., Liu, Q., Yang, S.F., *et al.* (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>
- [22] Zhang, Y.Y. and Li, X.D. (2017) Bioinspired, Graphene/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Doubly Reinforced Aluminum Composites with High Strength and Toughness. *Nano Letters*, **17**, 6907-6915. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03308>
- [23] Guan, R., Wang, Y., Zheng, S., *et al.* (2019) Fabrication of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Ni-coated Graphene Nanosheets. *Materials Science and Engineering: A*, **754**, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.068>
- [24] Zhou, W., Mikulova, P., Fan, Y., *et al.* (2019) Interfacial Reaction Induced Efficient Load Transfer in Few Layer Graphene Reinforced Al Matrix Composites for High-Performance Conductor. *Composites Part B: Engineering*, **167**, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.018>
- [25] Li, M., Zhang, Z., Gao, H.Y., *et al.* (2020) Formation of Multilayer Interfaces and the Load Transfer in Graphene Nanoplatelets Reinforced Al matrix Composites. *Materials Characterization*, **159**, Article ID: 110018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110018>
- [26] Yu, Z., Yang, W., Zhou, C., *et al.* (2019) Effect of Ball Milling Time on Graphene Nanosheets Reinforced Al6063 Composite Fabricated by Pressure Infiltration Method. *Carbon*, **141**, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.09.041>
- [27] Xiong, B.W., Liu, K., Xiong, W., *et al.* (2020) Strengthening Effect Induced by Interfacial Reaction in Graphene Nanoplatelets Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Journal of Alloys and Compounds*, **845**, Article ID: 156282. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156282>
- [28] Guo, B.S., Chen, B., Zhang, X.M., *et al.* (2018) Exploring the Size Effects of Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> on the Mechanical Properties and Thermal Behaviors of Al-Based Composites Reinforced by SiC and Carbon Nanotubes. *Carbon*, **135**, 224-35. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.048>
- [29] Jiang, Y.Y., Tan, Z.Q., Fan, G.L., *et al.* (2020) Nucleation and Growth Mechanisms of Interfacial Carbide in Graphene Nanosheet/Al Composites. *Carbon*, **161**, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.032>
- [30] 李宁, 杜晓明, 刘凤国. 石墨烯镀铜对铝基复合材料结构与性能的影响[J]. *沈阳理工大学学报*, 2021, 40(4): 73-77+87.
- [31] Wu, Q.J., Guo, Z.H., Li, N., *et al.* (2021) Titanium Dioxide Coated Graphene Prepared by Pressure Sintering as Reinforcement in Aluminum Matrix Composites. *Rare Metal Materials and Engineering*, **50**, 3068-3075.
- [32] Wang, C.Y., Su, Y.S., Ouyang, Q.B., *et al.* (2021) Enhanced Mechanical Behavior and Fabrication of Graphite Flakes

Covered by Aligned Graphene Nanoplatelets Reinforced 2A12 Aluminum Composites. *Vacuum*, **188**, 110150.  
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110150>

- [33] Zheng, Z., Zhong, S.J., Zhang, X.X., *et al.* (2020) Graphene Nano-Platelets Reinforced Aluminum Composites with Anisotropic Compressive Properties. *Materials Science and Engineering: A*, **798**, Article ID: 140234.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140234>
- [34] 田锭坤. 碳纳米相定向排列增强铜基复合材料研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.