

镀铜石墨烯片径对铝基复合材料组织与性能的影响

朱德智¹ 杨 莲¹ 刘一雄² 刘 健² 郑振兴²

(1.华南理工大学广东省金属新材料制备与成形重点实验室; 2.广东技术师范大学机电工程学院)

摘 要 采用超声分散与机械搅拌相结合的方法分散石墨烯,通过放电等离子烧结制备了石墨烯增强铝基复合材料。系统分析了石墨烯片径大小对复合材料组织与性能的影响。结果表明,镀铜石墨烯表面的铜部分向铝基体中扩散,加强了石墨烯与铝的界面结合,片径较大的石墨烯与铝基体的界面结合更好;两种不同片径的石墨烯对复合材料抗拉强度的增强效果相当,而片径较大的石墨烯更有利于实现强度与塑性的平衡。另外,片径较大的石墨烯对复合材料电导率的增强效果更好,但两种不同片径的石墨烯对复合材料热导率的增强效果不明显。整体上片径较大的石墨烯对复合材料的综合性能的增强效果更好。

关键词 铝基复合材料;石墨烯;表面改性;界面特征;性能

中图分类号 TB331;TG146.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

Effects of Copper Plated Graphene Sheet Diameter on Microstructure and Properties of Aluminum Matrix Composites

Zhu Dezhi¹, Yang Lian¹, Liu Yixiong², Liu Jian², Zheng Zhenxing²

(1.Guangdong Key Laboratory of New Metal Materials Preparation and Forming, South China University of Technology; 2.School of Mechanical and Electronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University)

Abstract: Through dispersing graphene by ultrasonic dispersion and mechanical stirring, graphene reinforced aluminum matrix composites were prepared by spark plasma sintering. Effects of graphene sheet diameter on the microstructure and properties of the aluminum matrix composites were analyzed. The results indicate that the copper particles on the surface of copper plated graphene are diffused into the aluminum matrix, strengthening the interface bonding between graphene and aluminum, leading to the better bonding between graphene with larger sheet diameter and aluminum matrix. The tensile strength of the composites reinforced by graphene with different sheet diameters is similar, and graphene with larger sheet diameter is contributed to achieving the better balance of strength and plasticity, which however, has better enhancement effect on the conductivity of the composite, while graphene with two different sheet diameters has no obvious enhancement effect on the thermal conductivity of the composite. Graphene with larger sheet diameter has better effect on the comprehensive properties of the aluminum matrix composites.

Key Words: Aluminum Matrix Composites, Graphene, Surface Modification, Interface Characteristics, Performance

随着科技的快速发展,传统的金属材料已不能满足设备在复杂和恶劣环境下的需求,因此开发具有高强度、高延展性及高导电性等综合性能优异的新材料受到关注。作为一种具有单层碳原子结构的新型材料,石墨烯引起了广泛关注,其兼具高强度、高韧性及优异的光学、导电与导热性能^[1,2],和传统的增强体材料相比,具有巨大的发展潜力。

采用石墨烯作为增强相,在提高材料强度的同时保

持良好的塑性,也可以对基体材料的导电性能和导热性能起到一定的改善效果。目前,许多研究集中在石墨烯的均匀分散以及石墨烯/铝复合材料的制备上。研究发现,石墨烯的平面尺寸及分布方向对复合材料的性能有明显的影 响,使其具有一定的可设计性。ZHAO L 等^[3]制备了平均片径为 186 nm 和 603 nm 的石墨烯,研究了石墨烯的平面尺寸对复合材料力学性能的影响,发现尺寸较小的石墨烯增强效果较好。ZHAO M 等^[4]

收稿日期:2021-07-10
基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010186001);佛山市核心技术攻关项目(1920001000412);广东省科技计划资助项目(2020B121202002);宜春市创新驱动“5511”工程专项科技计划项目
第一作者简介:朱德智,男,1980 年出生,副教授,广州(510640),E-mail:mezhudz@scut.edu.cn
引用格式:朱德智,杨莲,刘一雄,等. 镀铜石墨烯片径对铝基复合材料组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):133-138.
ZHU D Z, YANG L, LIU Y X, et al. Effect of copper plated graphene sheet diameter on microstructure and properties of aluminum matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):133-138.

的研究结果则相反。虽然国内外对石墨烯增强铝基复合材料的取得了一定进展,但关于石墨烯的片径对复合材料的性能影响的研究报道较少,相关机理有待深入研究。

本课题采用平均片径分别为 5.93 μm 和 25.85 μm 的两种镀铜石墨烯,检测相同含量的石墨烯对 6061 铝基复合材料力学性能及物理性能的影响。同时,采用相同工艺制备未添加石墨烯的 6061 铝合金作为对照组,进行了相同的力学性能及物理性能测试,分析不同片径的石墨烯对复合材料性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用平均粒径为 2 μm 的 6061 铝合金粉末作为复合材料基体。采用两种镀铜石墨烯作为增强体。根据原始石墨烯的 SEM 图片测算两种石墨烯的平均片径分别为 5.93 μm (小片径石墨烯, SGr) 和 25.85 μm (大片径石墨烯, LGr), 见图 1。其层数在 10 层以下, 为少层石墨烯。

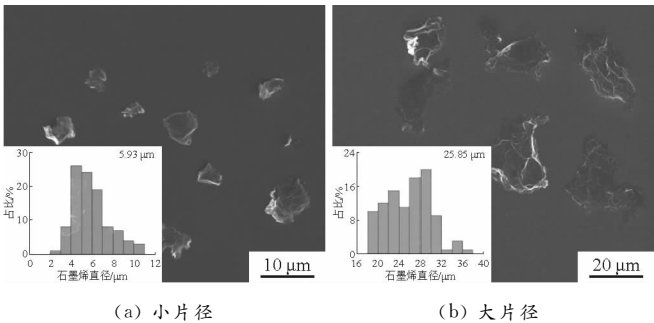


图 1 两种石墨烯的平均片径分布

Fig.1 Dimension distribution of graphene with different average diameters

镀铜石墨烯是将预处理之后的石墨烯和镀铜溶液混合搅拌,并水浴加热反应一段时间得到。图 2 为镀铜的小片径和大片径石墨烯(分别简称为 Cu-SGr、Cu-LGr)的 SEM,可见改性石墨烯呈半透明褶皱状,表面

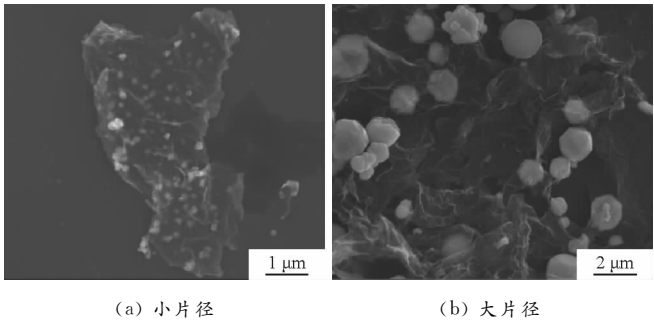


图 2 镀铜石墨烯的 SEM 图

Fig.2 SEM images of Cu-graphenes with different sheet diameters

的白色颗粒为 Cu。

1.2 试验方法

石墨烯增强铝基复合材料采用放电等离子烧结 (SPS) 工艺制备,复合材料中石墨烯质量分数为 0.5%。首先将表面镀铜处理后的石墨烯在无水乙醇中超声分散 1 h, 然后加入铝粉机械搅拌 1.5 h, 分散均匀之后将浆料过滤、烘干, 得到石墨烯均匀分散的石墨烯铝预混粉体。随后将石墨烯铝预混粉体装进 $\phi 40\text{ mm}$ 的石墨型, 在真空环境下, 施加 50 MPa 的压力, 在 530 $^{\circ}\text{C}$ 的烧结温度下进行放电等离子烧结, 制备出 $\phi 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的石墨烯增强 6061Al 基复合材料。

采用 Nova Nano SEM430 型扫描电镜观察粉体材料和试样中的石墨烯形貌特征及拉伸断口形貌。采用 FEI TECNAL G2 S-TWIN F20 型透射电镜观察石墨烯和铝基体的界面特征, 加速电压为 200 kV。使用 HB-3000 型布氏硬度计测量试样硬度, 压头选用直径为 5 mm 的淬火钢球, 载荷为 2 500 N, 保压时间为 30 s。室温拉伸性能测试在 AG-X100 kN 型万能材料试验机上完成, 加载速率为 0.6 mm/min。电导率使用 SIG-MATEST2.069 型便携式电导率测量仪进行测量, 热导率使用 NETZSCH LFA-447 型激光导热仪进行测量。

2 试验结果与讨论

2.1 微观形貌

在超声震荡作用下, 石墨烯片层之间的范德华力被破坏, 层数减少; 在机械搅拌过程中, 石墨烯受到铝粉的撞击以及各个方向的剪切力, 促使石墨烯在铝粉中分散均匀。混合粉末见图 3, 可见石墨烯在铝粉中为半透明褶皱状, 分散均匀, 层数较少。

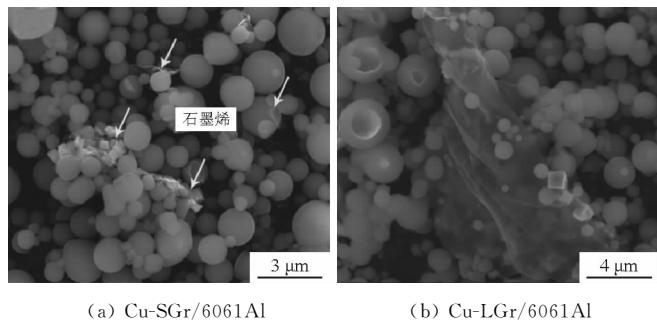


图 3 超声震荡后两种石墨烯增强 6061Al 基复合材料的显微形貌

Fig.3 Images of mixture of Cu-graphene and aluminum powder after ultrasonography

图 4 为 (Cu-LGr) 石墨烯/铝复合材料的 SEM 图和面扫描能谱图。可以看出, 复合材料中没有明显的组织缺陷, 没有出现较大的孔洞, 说明采用放电等离子烧结工艺制备的复合材料致密度较高。由于基体材料本身

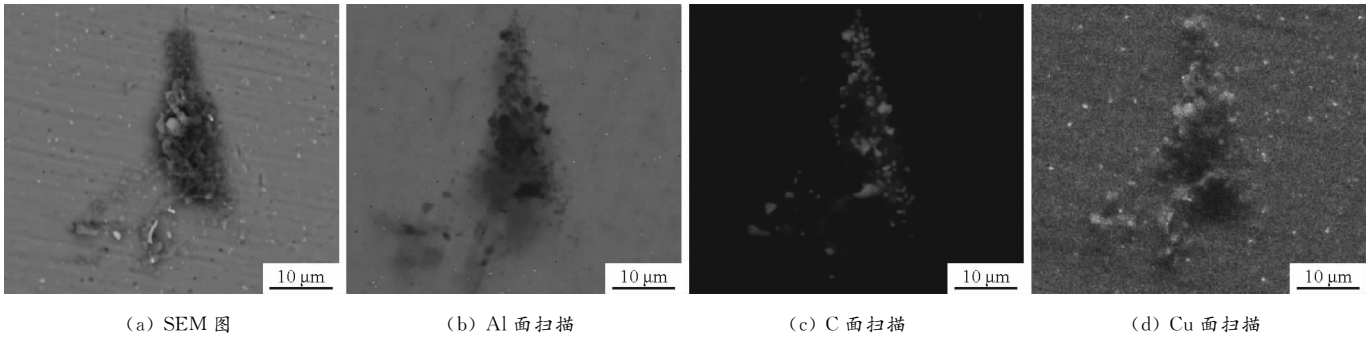


图 4 Cu-LGr 石墨烯/铝复合材料的扫描电镜图和面扫描能谱图
Fig.4 SEM and EDX images of Cu-LGr/6061Al composites

含有 Cu 元素,因此,从图 4d 中可以看出,有部分 Cu 元素在石墨烯的周围富集。

图 5 为镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的透射电镜图。石墨烯透光率较高,为半透明状,说明石墨烯的层数较少,烧结过程中没有发生严重的团聚。图 5b 中点 1 主要金属元素为 Al 和 Mg,这可能是在烧结过程中,晶界处析出的第二相。图 5c 中 Cu 颗粒分布在石墨烯褶皱点 2 处,能谱结果中不仅有 Cu,Al 和 Mg 含量也较高,分析表明,此处为石墨烯表面的 Cu 颗粒与基体铝合金的相互扩散区。图 5d 为该区域高分辨率透射电镜(HRTEM)图,左侧为铝基体的 HRTEM 图片及其沿[110]轴的选区电子衍射花样(SADP),右侧则为铜

颗粒的 HRTEM 图片及其沿[112]轴的选区电子衍射花样,可见二者都为面心立方结构。铝基体与铜颗粒之间存在着明显的界面结合。图 5e 中,石墨烯分布在晶界处,附近的晶粒内发现大量位错,这是由于界面处的石墨烯阻碍了位错移动,造成位错堆积。图 5f 为复合材料界面处的线扫描结果,可见在界面处 C 含量缓缓下降而 Al 含量则逐渐升高。通过高分辨率透射电镜观察石墨烯与铝基体的界面,图 5g 和图 5h 分别为 Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的界面高分辨图,可见图 5h 中石墨烯与铝基体的扩散层比图 5g 中更宽,表明 Cu-LGr/6061Al 复合材料的界面结合比 Cu-SGr/6061Al 更强。

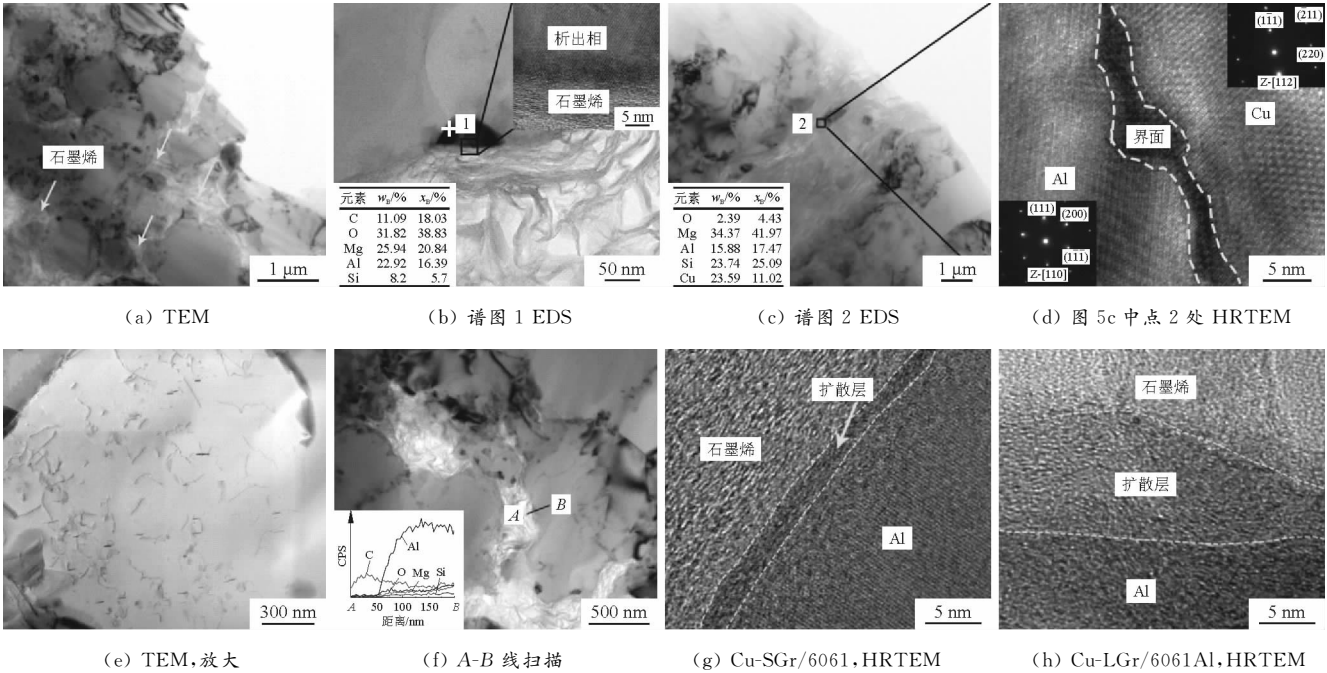


图 5 镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的透射电镜照片

Fig.5 TEM images of Cu-graphene/6061Al composites

2.2 石墨烯增强铝基复合材料的力学性能

图 6 为 6061 铝合金和石墨烯/6061Al 复合材料的力学性能。可以看出,Cu-SGr/6061Al 复合材料的抗拉强度为 220 MPa,比 6061 铝合金高 23.9%,Cu-LGr/

6061Al 复合材料的抗拉强度为 218 MPa,比 6061 铝合金高 23.2%。两种片径的石墨烯对抗拉强度的增强效果相近,均能有效提高 6061 铝合金的强度。Cu-SGr/6061Al 复合材料的伸长率为 9.7%,与基体相比降低了

40.9%，Cu-LGr/6061Al 复合材料的伸长率为14.3%，下降幅度较小。LGr 在提高 6061 铝合金强度的同时，仍然可以保持较好的塑性，而 SGr 虽然提高了 6061Al 材料的强度，但导致伸长率急剧下降。可见片径较大的石墨烯有利于实现复合材料强度与塑性的平衡。

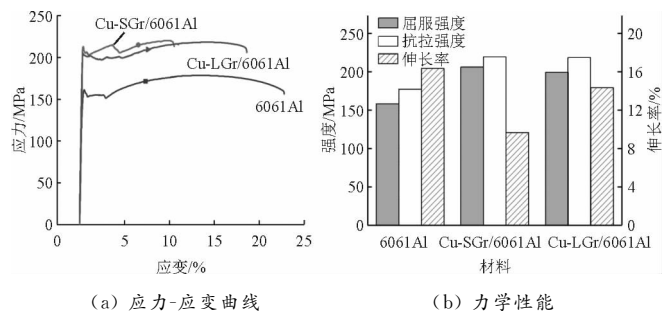


图 6 6061Al 基体和石墨烯/6061Al 复合材料的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of 6061Al matrix and graphene/6061Al composites

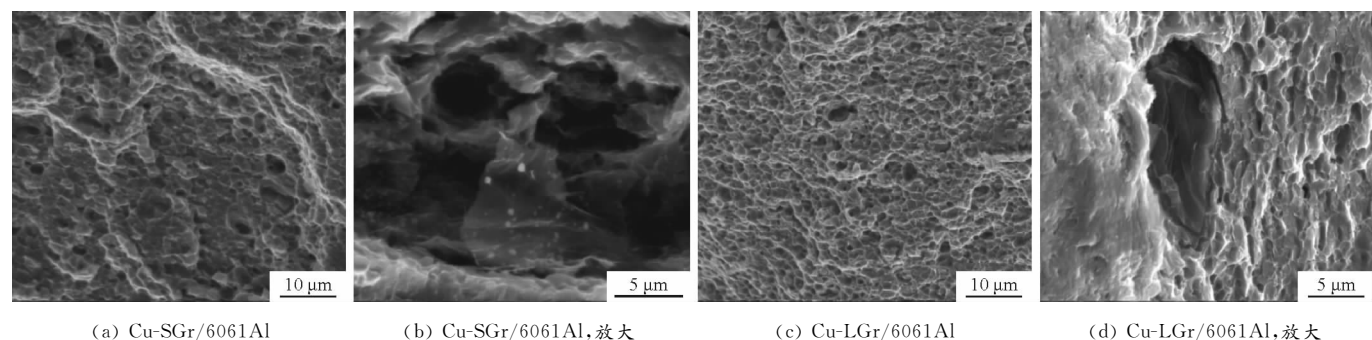


图 7 Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的拉伸断口 SEM 形貌

Fig.7 SEM images of tensile fracture of Cu-SGr/6061Al and Cu-LGr/6061Al composites

出，石墨烯嵌在韧窝之中，断裂处与断口平齐，说明石墨烯增强铝基复合材料在受力过程中，石墨烯的失效模式不止一种。根据 XIONG D B 等^[5]建立的模型，在石墨烯增强铝基复合材料中，石墨烯的失效模式与长径比有关，石墨烯长径比的临界值为 s_c ^[5]：

$$s_c = \sigma_p / \tau_y \quad (1)$$

式中， σ_p 为石墨烯的拉伸应力； τ_y 为铝合金基体的剪切强度。

长径比(s)较小($s < s_c$)的石墨烯在受力过程中主要呈现为拔出失效，而长径比较大($s > s_c$)的石墨烯倾向于在受力过程中呈现为断裂失效。按照文献[6]中的数据计算得出，石墨烯的拉伸强度约为 10~100 GPa，6061 铝合金的剪切强度约为 110~180 MPa。因此，根据公式(1)计算石墨烯的临界值约为 55~900。试验中的两种石墨烯平均尺寸与原子力显微镜所测的厚度比值均已超过 1 000。当石墨烯的实际厚度比值远超临界值时，石墨烯的失效模式主要表现为断裂。

复合材料受力过程中，应力由基体材料向石墨烯转移，石墨烯发生断裂失效，这是本试验复合材料中石墨烯主要的失效形式。然而两种片径的石墨烯与 Al 的

图 7 为 Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的拉伸断口 SEM 形貌。可以看出，由于石墨烯含量较少，复合材料的断口中韧窝分布均匀，两种复合材料的断口均表现出韧性断裂特征。Cu-SGr/6061Al 复合材料的韧窝更浅，Cu-LGr/6061Al 复合材料的韧窝更深，由此可见，Cu-LGr/6061Al 复合材料的塑性比 Cu-SGr/6061Al 复合材料更好。从两种复合材料的断口中都可以观察到石墨烯，说明石墨烯在复合材料受力过程中均起到了承载作用。

图 7b 和图 7d 分别为 Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的断口放大图。可见 Cu-SGr/6061Al 复合材料韧窝中拔出的石墨烯片较短，在韧窝底部，同时可以在断口的韧窝中观察到拔出的石墨烯片，而且被拔出的石墨烯片上有铜颗粒，由此可见，石墨烯与 Cu 的界面结合强于石墨烯与 Al 的界面结合。从图 7d 看

界面结合面积有差距，在一定范围内，界面层越宽，界面强度越高，越有利于载荷的有效转移，可提高石墨烯的增强效果。为了评估两种石墨烯在增强铝基复合材料上的差异，采用修正后的剪切滞后模型对其增强效果进行计算^[7]：

$$\sigma_c = \left(\frac{S}{4A} - 1 \right) V_m \sigma_n \quad (2)$$

式中， σ_c 为复合材料的抗拉强度； σ_n 为基体材料的抗拉强度； V_m 为复合材料中增强相的体积分数； S 为石墨烯与铝基体的界面面积； A 为石墨烯与铝基体沿拉伸方向的截面积。因此，石墨烯的增强效果与界面层的宽度与厚度的比值有关，界面层宽度与厚度的比值越高，载荷转移效应越大。在复合材料中，LGr 承受载荷的效应优于 SGr。

Orowan 强化也是石墨烯增强铝基复合材料的主要增强机理，采用 Orowan 模型计算其对复合材料的增强效率^[8]：

$$\Delta\sigma = \frac{0.8MGb}{2\pi(1-\nu)^{0.5}} \ln\left(\frac{\varphi}{b}\right) \frac{1}{(\lambda - \varphi)} \quad (3)$$

其中， λ 通过下式计算：

$$\lambda = \varphi(0.5\pi/\nu_{Gr})^{0.5} \tag{4}$$

式中, M 为泰勒系数(约为 3.06); G 为铝基体的剪切模量; b 为伯格矢量(约为 0.286 nm)^[9]; ν 为泊松比($\nu=0.33$); φ 为石墨烯片径($\varphi=25.85\ \mu\text{m}$)。

根据式(3)和式(4)可知, 石墨烯的片径越大, Orowan 强化的效应越低。根据式(3)可计算得 SGr 对 Orowan 机制引起的强度增加值约为 LGr 的 2.8 倍。

通过理论分析发现, 采用不同片径石墨烯作为增强相, 其主要增强机理的理论增加值会发生显著变化。在同等质量分数条件下, 石墨烯片径越小, 其数量越多, 分布更均匀, Orowan 机制引起的增强效应更强。片径更大的石墨烯与铝基体的界面结合面积更大, 有利于实现载荷的传递, 同时, 片径大的石墨烯在受力过程中起到的缓冲作用更好, 能有效控制复合材料塑、韧性的降低。

2.3 石墨烯铝材料的物理性能

图 8 为 6061 铝合金和镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的电导率。6061 铝合金的电导率为 25.230 MS/m, Cu-SGr/6061Al 复合材料的电导率为 26.564 MS/m, 与基体材料相比提高了 5.4%, Cu-LGr/6061Al 复合材料的电导率为 27.028 MS/m, 相比基体提高了 7.1%。少量石墨烯的加入能提高材料的电导率, LGr 对铝合金的电导率的改善效果更好。

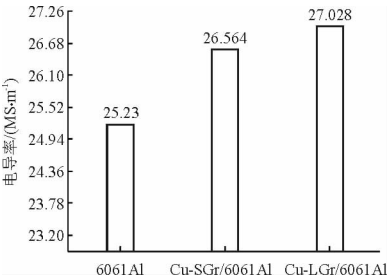


图 8 6061 铝合金和镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的电导率
Fig.8 Electrical conductivity of Cu-graphene/6061Al composites

两种片径的石墨烯对复合材料的电导率增强效果不同, 这与石墨烯在铝中的分散有关。LGr 在分散后与铝粉混合, 由于片径较大, 容易穿插在铝粉中间, 烧结后分散在晶界处, 可在较大的范围内形成导电通道, 而 SGr 容易依附于单个铝粉表面, 形成的导电通道范围也较小, 从而造成对复合材料电导率增强效果的差异。

图 9 为 6061 铝合金和镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的热导率。可以看出, 6061Al 铝合金的热导率为 161.4 W/(m·K)。Cu-SGr/6061Al 复合材料的热导率为 163.4 W/(m·K), 比 6061 铝合金高 2 W/(m·K), Cu-LGr/6061Al 复合材料的热导率为 163.0 W/(m·K), 相对基体提高了 1.6 W/(m·K)。

石墨烯作为增强相可以有效提高复合材料的热导率, 然而与石墨烯本身的热导率相比, 其增强效果并不

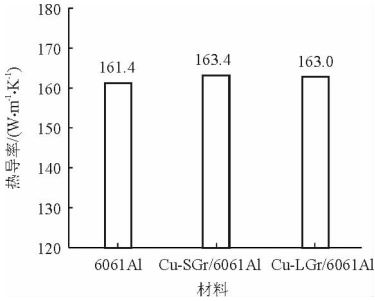


图 9 6061 铝合金和镀铜石墨烯/6061Al 复合材料的热导率
Fig.9 Thermal conductivity of Cu-graphene/6061Al composites

理想。目前的相关研究发现石墨烯在复合材料中的分布取向及其与基体材料的界面热阻是热导率的重要影响因素^[10,11]。此外, 石墨烯的尺寸大小对复合材料的热导率也会产生明显的影响^[12]。石墨烯在复合材料中的高定向分布有利于实现热传导, 对复合材料的热导率有利。然而, 石墨烯与 Al 基体的界面热阻会降低石墨烯与铝的热传导效率, 也会降低复合材料的热导率。

3 结 论

(1) 镀铜石墨烯表面的铜颗粒有部分向铝基体中扩散, 加强了石墨烯与 Al 的界面结合。片径较大的石墨烯与 Al 的结合界面比片径较小的石墨烯更宽, 界面结合更好。

(2) 不同片径的石墨烯均可改善 6061 铝基复合材料的力学性能。Cu-SGr 和 Cu-LGr 均可提高复合材料的强度, 但 Cu-LGr/6061Al 复合材料的伸长率更高, 片径较大的石墨烯更有利于实现复合材料强度与塑性的平衡。

(3) 不同片径的石墨烯均可改善 6061 铝基复合材料的物理性能。Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的电导率分别为 26.564 MS/m 和 27.028 MS/m, 与 6061 铝合金相比分别提高了 5.4% 和 7.1%。Cu-SGr/6061Al 和 Cu-LGr/6061Al 复合材料的热导率分别为 163.4 W/(m·K) 和 163.0 W/(m·K)。

参 考 文 献

[1] LEE C, KYSAR J W, WEI X, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5 887): 385-388.
[2] MEYER J C, GEIM A K, KATSNELSON M I, et al. The structure of suspended graphene sheets[J]. Nature, 2007, 446: 60-63.
[3] ZHAO L, GUO Q, LI Z Q, et al. Strengthening and deformation mechanisms in nano laminated graphene-Al composite micro-pillars affected by graphene in-plane sizes[J]. Int. J. Plasticity, 2019, 116: 265-279.
[4] ZHAO M, XIONG D B, TAN Z Q, et al. Lateral size effect of graphene on mechanical properties of aluminum matrix nanolaminated composites[J]. Scripta Mater., 2017, 139: 44-48.

高强韧异质钛合金的研究进展

梁顺星^{1,2,3} 刘凯洋¹ 尹丽霞¹ 王天一¹

(1.河北工程大学材料科学与工程学院; 2.河北省高强韧耐磨金属材料重点实验室;
3.河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心)

摘 要 钛合金的强度和塑(韧)性的倒置规律严重限制了其进一步发展和广泛应用。异质钛合金材料能够同时提高常规钛合金材料的强度和塑(韧)性,是获得高强韧钛合金的重要研究和发展方向。对异质钛合金的微观结构和力学行为特点以及强韧化机理进行了总结和分析。针对目前异质钛合金在上述方面的研究现状和不足,展望了未来的发展趋势和方向。

关键词 异质钛合金;微观组织;力学性能;强韧化机理

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in Heterogeneous Titanium Alloys with Extraordinary Strength and Ductility

Liang Shunxing^{1,2,3}, Liu Kaiyang¹, Yin Lixia¹, Wang Tianyi¹

(1.College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering;
2.Hebei Key Laboratory of Wear-resistant Metallic Materials with High Strength and Toughness;
3.Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications)

Abstract: The trade-off relationship between strength and plasticity (toughness) of titanium alloys seriously limits its further improvement and wide application. Heterogeneous titanium alloys can simultaneously improve the strength and plasticity(toughness) of conventional titanium alloys, which provides an important research and development direction to obtain titanium alloys with extraordinary strength and ductility. The microstructure, mechanical behavior characteristics and strengthening-toughening mechanism of heterogeneous titanium alloys were reviewed. Based on the current research status and shortcomings, future development trends and research directions of heterogeneous titanium alloys were put forward.

Key Words: Heterogeneous Titanium Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Strengthening-toughening Mechanism

收稿日期:2021-11-01
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2021402002)
第一作者简介:梁顺星,男,1983 年出生,教授,河北邯郸(056038),E-mail:liang.6@139.com
引用格式:梁顺星,刘凯洋,尹丽霞,等. 高强韧异质钛合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):138-143.
LIANG S X, LIU K Y, YIN L X, et al. Progress in heterogeneous titanium alloys with extraordinary strength and ductility[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):138-143.

[5] XIONG D B, CAO M, GUO Q, et al. Graphene-and-copper artificial nacre fabricated by a preform impregnation process: Bioinspired strategy for strengthening-toughening of metal matrix composite[J].Acs. Nano., 2015, 9(7): 6 934-6 943.

[6] ZANDIATASHBAR A, LEEG H, ANS J, et al. Effect of defects on the intrinsic strength and stiffness of graphene[J]. Nat. Commun., 2014(5): 3 186-3 195.

[7] HAN R Q, SONG H Y, WANG J Y, et al. Strengthening mechanism of Al matrix composites reinforced by nickel-coated graphene: Insights from molecular dynamics simulation[J]. Physical, 2021, B601: 412 620-412 630.

[8] GUO B S, CHEN Y Q, WANG Z W, et al. Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites[J]. Carbon, 2020, 159: 201-212.

[9] ATKINSA G. Deformation-mechanism maps (the plasticity and creep of metals and ceramics[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1984(9): 224-225.

[10] NGUYEND H, QUAN G H L, HE Q C, et al. The effective thermal conductivity of composites with interfaces oscillating in two directions around a curved surface[J]. Acta Mech., 2020, 231: 5 063-5 103.

[11] BODENA, BOERNERB, KUSCHP, et al. Nanoplatelet size to control the alignment and thermal conductivity in copper-graphite composites[J]. Nano Lett., 2014, 14: 3 640-3 644.

[12] WANG J, LI C, LI J, et al. A multiscale study of the filler-size and temperature dependence of the thermal conductivity of graphene-polymer nanocomposites[J]. Carbon, 2021, 175: 259-270.

(编辑:彭瑾)