

GNPs 含量对 2024 铝合金摩擦 磨损性能的影响

张书维, 王琳, 潘绪全, 宋宝成

(江苏安全技术职业学院 机械工程学院, 江苏徐州 221000)

摘要: 采用超声熔铸的方法制备了GNPs(石墨烯微片)增强2024铝合金, 探究不同GNPs添加量对2024铝合金微观组织、显微硬度及磨损性能的影响。结果表明: GNPs的添加细化了2024铝合金的基体组织, 在超声波振动的作用下GNPs均匀分散在2024基体中, GNPs的加入同时也提高了合金的硬度和耐磨性能。GNPs的最佳添加量为0.8wt.%, 复合材料的显微硬度增加至HV122.81, 与2024合金相比提高了30.94%。此时复合材料的磨损率和摩擦系数均为最低, 分别为 $0.672 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 和0.328 1, 与2024合金相比分别降低了62.71%和10.87%。

关键词: 石墨烯; 2024铝基复合材料; 摩擦磨损性能; 磨损机制

铝合金因其质量轻、比模量和强度高优点被广泛应用于汽车制备、航空航天和电子通讯等领域^[1-2]。但力学性能和耐磨性能较差。近些年, 大量科研人员发现通过粉末冶金、搅拌摩擦加工和搅拌铸造等方法制备碳纳米材料可提升铝合金的综合性能^[3-5]。其中, 石墨烯微片作为碳纳米增强体中的一员, 因其独特的二维结构、极高的强度和刚度、优异的传热性和低膨胀系数等优点引起了人们的广泛关注^[6-9]。Wu等^[10]利用真空热压烧结的工艺制备了Ni@GNPs增强AZ31镁基复合材料。结果表明: Ni@GNPs均匀地分散于基体中, 与基体材料相比, 复合材料的显微硬度、抗压强度和磨损性能均有显著提高。GNPs含量是影响磨损性能的重要因素, GNPs加入之后复合材料的磨损率和摩擦系数均降低。张亚锋^[11]采用放电等离子烧结工艺制备了GNPs增强7075铝基复合材料, 研究了不同烧结工艺对复合材料的耐腐蚀性和力学性能的影响。结果表明: 在同等烧结条件时, GNPs/7075复合材料的显微硬度明显高于7075合金, GNPs/7075复合材料的磨损率和摩擦系数均低于7075合金, 这主要归因于GNPs与Al基体之间界面结合较好, 并且GNPs能够均匀分散。Li等^[12]通过连续铸造和轧制技术制备了Al-GNPs铝基复合材料, 结果表明: 在相同条件下, Al-0.2wt% GNPs的抗拉强度比纯Al基体的抗拉强度提高了36.8%, 这主要是归因于GNPs的层状结构和载荷传递强化引起的效果。

尽管石墨烯微片对金属基复合材料的研究在近些年颇多, 但是通过超声熔铸的工艺制备GNPs增强Al-Cu-Mg系合金的力学性能的研究还较少, 尤其是GNPs对Al-Cu-Mg合金的磨损性能的报道更少。因此, 作者采用超声铸造的工艺制备了不同含量的GNPs/2024铝基复合材料, 探究GNPs含量对铝合金的磨损性能的影响。

1 试验材料与方

2024铝合金铸锭为本次试验的基体材料, 其化学成分如表1所示。增强体选用石墨烯微片, 石墨烯微片的层数在10~20层, 片径在5~20 μm 之间, 质量分数大于95%, 其微观形貌如图1a所示。纯铝粉被用作制备Al-GNPs中间预制块, 粒径在

作者简介:

张书维(1987-), 男, 讲师, 工程硕士, 研究方向为材料成形技术。电话: 18651770751, E-mail: 573593534@qq.com

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

05-0604-06

收稿日期:

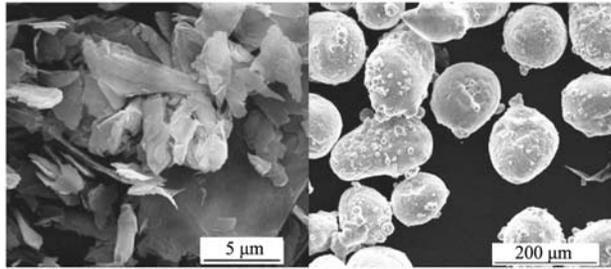
2021-08-25 收到初稿,

2021-11-30 收到修订稿。

表1 2024铝合金的化学成分

Table 1 Chemical ingredient of 2024 aluminum alloy $w_B/\%$

Al	Si	Mg	Cu	Mn	Ti	Cr	Zn	Fe
余量	0.12	1.55	4.71	0.62	0.12	0.01	0.15	0.17



(a) 石墨烯纳米片

(b) 纯Al粉

图1 石墨烯纳米片与纯Al粉的扫描电镜微观形貌

Fig. 1 SEM morphologies of the GNPs and pure Al powders

50~150 μm, 质量分数大于99.5%, 形状为近球形, 其微观形貌如图1b所示。

首先铝粉与GNPs按照比例(GNPs占混合料的6wt.%)调配, 混合料被放入装有钢球的球磨罐中, 球料比7:1, 球磨速率300 r/min, 时间3 h。将球磨完的混合料装入液压模具中, 在300 MPa的液压机下压成饼块状Al-GNPs中间预制块, 把预制块切碎成小块用铝箔纸包好。称量约100 g的2024铝合金, 然后把合金和铝箔纸包好的小块放入200 °C真空干燥箱中干燥30 min。再把2024合金放入已经升温至750 °C的熔炼炉中保温30 min, 确保合金完全熔化。把铝箔纸包好的小块缓慢加入熔体中, 待其完全加完之后机械搅拌5 min, 再施加超声波振动, 把超声杆伸入熔体中, 超声振动15 min, 超声频率为1 kHz, 功率为1 000 W。除渣之后, 迅速浇注到已经预热的钢模具中, 得到了GNPs/2024复合材料。

把不同含量GNPs/2024复合材料切割成的圆柱形铝销, 铝销和摩擦副均被打磨、抛光、清洗和烘干。其中摩擦副的材质为45号钢, 硬度为HRC52。在销盘式干滑动摩擦磨损试验机上对试样进行摩擦测试, 外加载荷为30 N, 摩擦转速为150 r/min, 摩擦时间为10 min, 试验前后都要把铝销放入超声波清洗池内清洗10 min, 并且利用电子天平(精度0.000 1 g)称量铝销试验前后的质量, 计算磨损质量差值, 通过公式(1)可获得试样的磨损率。

$$P=M/\rho(F \times S) \quad (1)$$

式中: P 为磨损率; M 为磨损前后试样的质量差值; F 为外加载荷; S 为摩擦总距离。

采用光学显微镜分析不同含量GNPs/2024复合材料的微观组织, 在扫描电子显微镜下分别观察GNPs与Al粉末的形貌、GNPs/2024复合材料的微观组织形貌、摩

擦磨损测试之后的试样磨损面形貌。采用HXS-1000Z显微硬度计评价试样的显微硬度值, 在试样的随机7个位置打点, 求平均值, 硬度计加载0.3 kg, 时间15 s。采用型号为WDW-10PC控制万能试验机测试材料的室温力学性能, 拉伸速率为1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的维氏硬度与微观组织

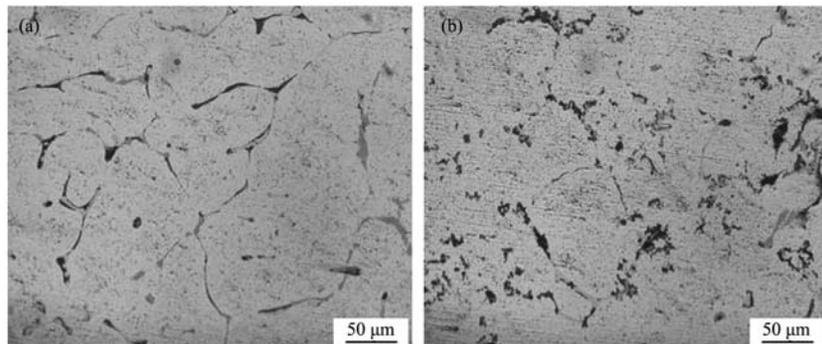
石墨烯含量对2024合金力学性能的影响如表2所示。由表可知, 2024基体合金的抗拉强度、伸长率及显微硬度均最小。随着GNPs含量的逐渐增加, 复合材料的抗拉强度、伸长率及显微硬度逐渐升高, 至峰值而后降低。当GNPs的含量为0.4%时, 复合材料的力学性能提高不明显, 这是因为GNPs含量较少, 强化效应较小。而当GNPs的含量达到0.8wt.%时, 复合材料的力学性能达到峰值, 数值分别为240.7 MPa、5.6%和HV122.81, 与2024基体合金相比分别提升了34.09%、40%和30.94%, 根据Hall-Petch理论^[13], 复合材料力学性能的提高主要是因为GNPs在基体中起到了细化晶粒的作用, 阻碍Al基体的长大, 从而达到了细晶强化的效果, 并且GNPs在Al基体中分布较为均匀, GNPs本身具有非常优异的力学性能, 当外加载荷作用于铝基体时, 载荷通过界面剪切应力从基体传递给GNPs增强相, 此时性能优异的GNPs成为载荷的主要承受者, 从而极大提高了复合材料的力学性能。然而, 当GNPs含量为1.2%时, 材料的力学性能明显降低, 这可能是GNPs在基体中出现了团聚现象, 引起了材料内部孔洞和缺陷的增多, 使得材料的致密性急剧降低, 导致材料的力学性能降低^[14]。

图2a、b为2024基体合金与0.8wt.%GNPs/2024铝基复合材料的金相组织形貌。图2a中基体合金初生晶粒粗大, 以无规则的枝晶为主, 多个晶粒之间晶界相连, 在晶界周围富集了大量第二相元素。如图2b所示, 添加0.8wt.%GNPs之后, 在合金基体中大量黑色相沿着晶界处分散, 黑色相分散均匀, 没有明显团聚现象, 并且随着GNPs的加入, 初生晶粒变小, 纳米增强相的加入有细化晶粒的效应。因为GNPs在结晶过程中成为结晶形核的核心, 提高了形核核心, 增大了形核

表2 材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of materials

材料	极限抗拉强度/MPa	伸长率/%	显微硬度HV
2024	179.5	4.0	93.79
0.4wt.%GNPs/2024	199.1	4.5	105.53
0.8wt.%GNPs/2024	240.7	5.6	122.81
1.2wt.%GNPs/2024	218.7	5.1	101.67



(a) 2024合金

(b) 0.8wt.%GNPs/2024复合材料

图2 2024合金及0.8wt.%GNPs/2024复合材料的光镜组织

Fig. 2 Optical microstructures of the 2024 alloy and 0.8wt.% GNPs/2024 composite

率, 并且GNPs沿晶界处分散, 抑制了晶界向外扩展生长, 使得晶粒变得更加细小^[15]。

为了进一步分析0.8wt.%GNPs/2024复合材料中石墨烯微片及第二相元素分布, 对其进行了SEM及元素面扫描分析, 如图3所示。在SEM图片中有大量黑色的相形貌为长片状, 有平行、垂直或呈一定角度分布在基体中, 并对其进行了面扫描分析。从图中可以看到, Al、Cu、Mg、C等元素的分布, 根据EDS面扫描

分析可知C、Cu、Mg等元素分散都较均匀, 其中C元素主要是分布于Cu元素周围, C元素富集规律与SEM图片中黑色相相一致, 由此可知, SEM图片中黑色的相即为石墨烯微片。

2.2 磨损率与摩擦系数

GNPs/2024铝基复合材料通过摩擦磨损测试得到的磨损率和摩擦系数随GNPs含量的变化如图4所示。图4a为随GNPs质量分数的增加, 复合材料的磨损率变化情况。从图中可知, 2024基体合金的磨损率最大, 数值为 $1.802 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 基体合金的耐磨性能较差, 这与合金组织中粗大的晶粒和合金表现出较差的硬度有关。当GNPs的质量分数为0.4%时, 磨损率有所下降, 耐磨性能较基体合金有所提高。0.8wt.%GNPs/2024复合材料的磨损率最低, 数值为 $0.672 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 与基体合金的磨损率相比降低了62.71%, 复合材料之所以可以表现出较优的抗磨损性能主要是因为GNPs表面鳞片能够在磨损测试过程中起到润滑的作用, 减少基体表面与对偶件的磨损面积, 进而减小切向应力^[16]。然而, 当GNPs的添加量为1.2%时, 磨损率陡然上升, 这应该是GNPs含量过多而导致复合材料中孔隙和缺陷的增多, 进而降低了材料的耐磨性能。图4b为随GNPs质量分数的增加, 复合材料的平均摩擦系数变化情况。随着GNPs质量分数从0.4%到1.2%, 材料的摩擦系数呈现先降低后升高的趋势, 其中2024基体合金的摩擦系数最高, 0.8wt.%GNPs/2024复合材料的摩擦系数最低, 数值为0.328 1, 与基体合金的摩擦系数(0.368 1)相比降低了较多。当GNPs质量分数为1.2%时, 复合材料的摩擦系数有所提高, 也就意味着材料的耐磨性能已经偏离最佳状态。

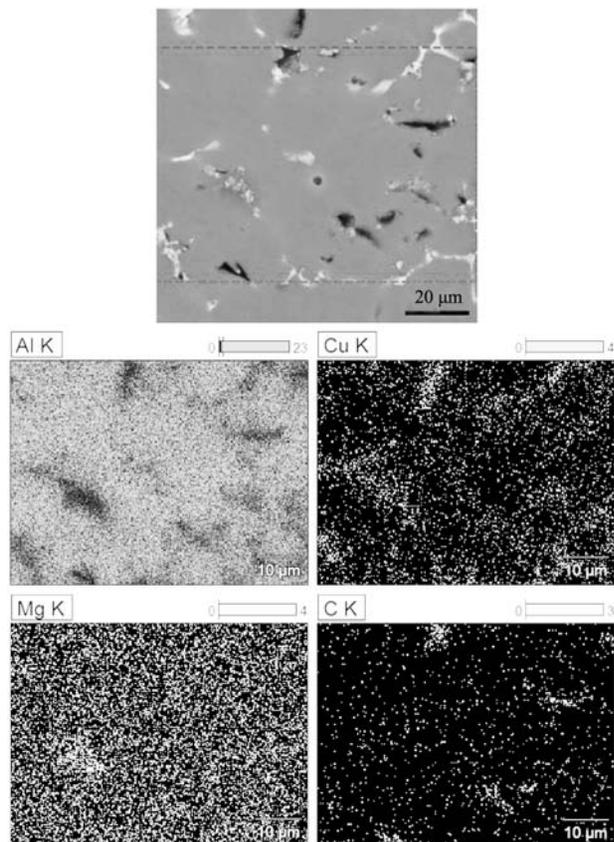


图3 0.8wt.%GNPs/2024铝基复合材料的SEM微观组织及局部元素面扫描

Fig. 3 SEM microstructure and local element surface scan of 0.8wt.%GNPs/2024 aluminum matrix composite

2.3 磨损面 SEM 分析

图5显示了不同GNPs含量的GNPs/2024复合材料

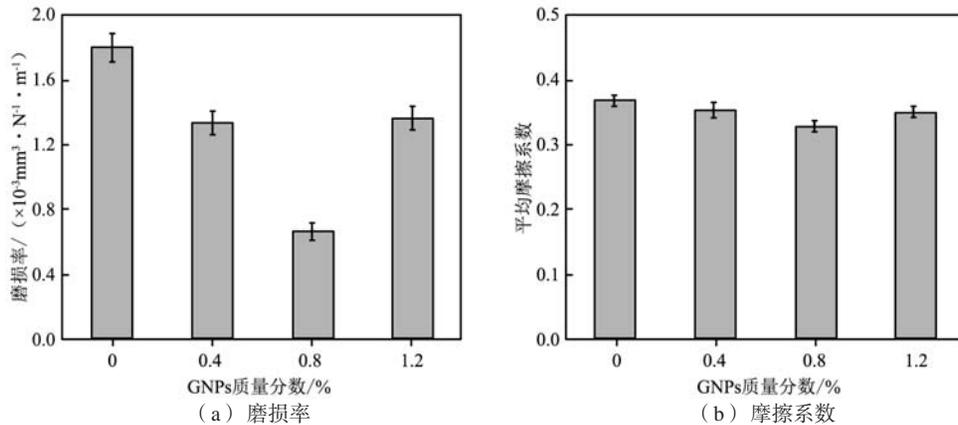


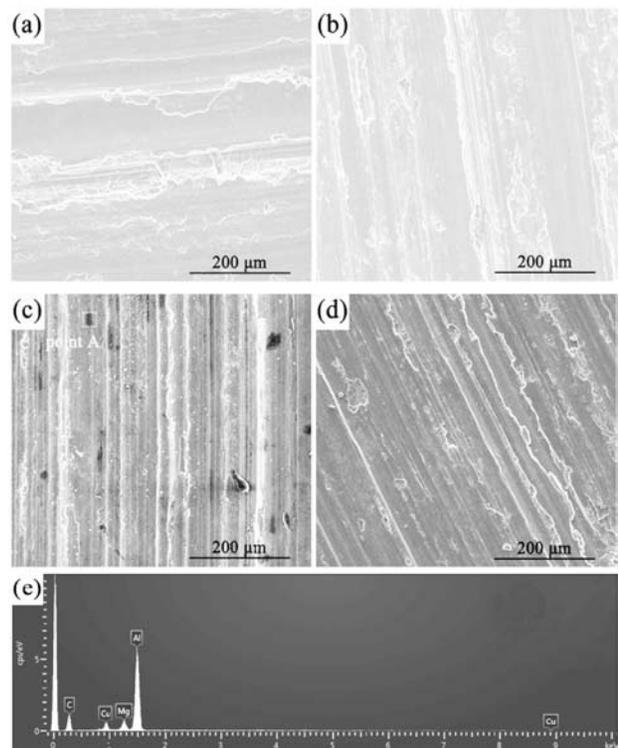
图4 不同GNPs含量的GNPs/2024复合材料的磨损率和摩擦系数

Fig. 4 Wear rates and friction coefficients of the GNP/2024 composites with different GNP contents

的摩擦磨损SEM表面及EDS分析能谱。在图5a中，2024基体磨损表面粗糙不平整，塑性变形和分层现象明显，磨损裂纹和疤痕清晰，2024基体合金表现出典型的分层磨损机制。在图5b中，少量GNPs添加到2024合金中后，复合材料的磨损SEM发生了变化，没有明显的分层现象，并且弹坑的深度和宽度明显减小，复合材料的耐磨性能有所提高，此时复合材料表现出粘着磨损的机制。在图5c中，0.8wt.%GNPs/2024复合材料的磨损表面较干净清晰，细小的磨损碎屑分布于磨面上。并且在磨损表面上出现了沿着滑动摩擦方向的犁沟，犁沟的产生是因为对偶件上的微凸体在磨损表面上产生微观切削和刮擦而形成犁沟状的痕迹^[17]。值得注意的是在磨面上观察到清晰的黑色相存在，为了确定其具体成分，对其进行了EDS检测，EDS检测结果表明：60.73at.%C，3.21at.%Mg，33.95at.%Al，2.11at.%Cu。由此可知，在磨损表面有碳膜的形成，在接触表面上具有优异润滑性能的GNPs减少了基体与对偶件的接触面积，提高了材料的耐磨性能，防止了基体的氧化^[18]。此时复合材料以磨粒磨损为主要磨损机制。在图5d中，当GNPs含量为1.2%时，连成片的大面积的弹坑重新出现在磨损形貌表面，材料的耐磨性能恶化，这可能是因为过量的GNPs团聚成块，而降低了复合材料的强度与硬度，进而使得材料的抗磨损性能有所降低。

2.4 磨屑形貌分析

图6为2024基体合金与0.8wt.%GNPs/2024铝基复合材料的磨屑形貌。图6a中基体合金的磨屑尺寸巨大，宽而长的板块状磨屑为主，这主要是铝基体在摩擦磨损过程中脱落而形成的磨屑，这也同时表明了2024基体合金以严重的剥层磨损为主要磨损机制，表现出较差的耐磨性能。图6b为



(a) 2024基体合金；(b) 0.4wt.%GNPs/2024复合材料；

(c) 0.8wt.%GNPs/2024复合材料；(d) 1.2wt.%GNPs/2024复合材料；(e) 点A的EDS能谱

图5 不同GNPs含量的GNPs/2024铝基复合材料磨损表面SEM形貌及EDS分析图谱

Fig. 5 SEM morphologies and EDS analysis of the wear surfaces of GNP/2024 aluminum matrix composites with different GNP contents

0.8wt.%GNPs/2024复合材料的磨屑形貌，复合材料的磨屑尺寸明显减小，粒度较小的磨屑明显增多，这也印证了复合材料在摩擦试验过程中表现出较优的耐磨性能，这应该与GNPs碳膜的形成有关。但是在SEM中仍然存在尺寸较大的磨屑，因此复合材料在摩擦试验的过程中也存在轻微剥层磨损的迹象。

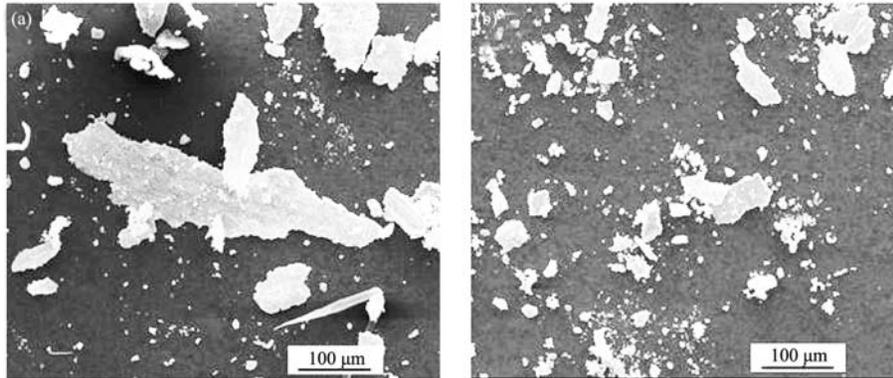


图6 2024基体合金及0.8wt.%GNPs/2024复合材料的磨屑SEM形貌

Fig. 6 SEM morphologies of wear debris of the 2024 matrix alloy and 0.8wt.%GNPs/2024 composite

3 结论

(1) 随着GNPs含量的增加, GNPs/2024铝基复合材料的显微硬度呈现先升高至峰值后降低的趋势, 当GNPs质量分数为0.8%时, 复合材料的显微硬度达到峰值为HV122.81, 与2024基体合金(HV93.79)相比提升了30.94%。此外, GNPs的添加对2024基体的晶粒具有明显的细化作用, 起到了细晶强化的效果, 在超声波振动的作用下GNPs在基体中沿着晶界均匀分散, GNPs

承载传递机制也是复合材料性能大幅度提升的重要因素。

(2) 0.8wt.%GNPs/2024复合材料的磨损率和摩擦系数分别为 $0.672 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 和0.328 1, 与2024基体合金的磨损率相比减少了62.71%, 主要磨损机制由基体合金的分层磨损转变为复合材料的磨粒磨损。并且GNPs的添加明显提高了合金的硬度, 硬度的提高有助于材料的抗磨损性能的改善。

参考文献:

- [1] TJONG S C. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2013, 74: 281–350.
- [2] ABBASIPOUR B, NIROUMAND B, MONIR V S M. Compositing of A356-CNT composite [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20: 1561–1566.
- [3] 繆宇, 夏春, 黄春平, 等. 搅拌摩擦加工制备GNPs/Al复合材料的微观结构与力学性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49 (12): 4329–4335.
- [4] 李春红, 佰峰, 何维均, 等. 添加CNTs对铝合金性能的影响研究 [J]. *功能材料*, 2016, 47 (2): 2104–2107.
- [5] WU Q J, YAN H, ZHANG P X, et al. Enhancing wear resistance of A356 alloy by adding CNFs based on ultrasonic vibration casting [J]. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2018, 31: 523–532.
- [6] 卢艳霞. 石墨烯研究现状及产业化进展 [J]. *河南化工*, 2016, 30 (11): 7–12.
- [7] YAN S, HE P G, JIA D C, et al. Effect of reduced graphene oxide content on the microstructure and mechanical properties of graphene-geopolymer nanocomposites [J]. *Ceramics International*, 2016, 42 (1): 752–758.
- [8] LIU J Q, HU N, LIU X Y, et al. Microstructure and mechanical properties oxide-reinforced titanium matrix composites synthesized by hot-pressed sintering [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14 (1): 1–12.
- [9] 毛宇新, 张建壮, 王业懿, 等. 基于分形理论对石墨烯增强铝硅基复合材料摩擦磨损性能研究 [J]. *铸造*, 2019, 68 (11): 1210–1214.
- [10] WU L Y, ZHAO Z Y, BAI P K, et al. Wear resistance of graphene nano-platelets (GNPs) reinforced AlSi10Mg matrix composite prepared by SLM [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 503: 144156.
- [11] 张亚锋. 石墨烯/铝合金复合材料的制备与性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [12] LI M, GAO H Y, LIANG J M, et al. Microstructure evolution and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites [J]. *Materials Characterization*, 2018, 140: 172–178.
- [13] CHEN Z H, HUI H Y, LI C L, et al. GNPs/Al nanocomposites with high strength and ductility and electrical conductivity fabricated by accumulative roll-compositing [J]. *Rare Metals*, 2021, 40 (9): 2593–2601.
- [14] 仇法文. 石墨烯增强铝基复合材料的制备及研究 [D]. 山东: 山东大学, 2020.
- [15] 王录社. 碳纳米管增强2024铝基复合材料铸态力学性能的研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2018.

- [16] 闫瑞芳. 高含量CNTs混杂增强2024Al基复合材料的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [17] 刘光磊, 李玉山, 李超, 等. T6态Al-10Si-5Cu-0.75Mg合金的干滑动摩擦磨损性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (2) : 620-625.
- [18] GAO X, YUE H Y, GUO E J, et al. Preparation and tribological properties of homogeneously dispersed graphene-reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials Science and Technology, 2018, 34 (11) : 1316-1322.

Effect of GNPs Content on Friction and Wear Properties of 2024 Aluminum Alloy

ZHANG Shu-wei, WANG Lin, PAN Xu-quan, SONG Bao-cheng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou221000, Jiangsu, China)

Abstract:

GNPs (graphene micro-sheets) reinforced 2024 aluminum alloy was prepared by ultrasonic casting method, and the effects of different GNPs addition on the microstructure, microhardness and wear properties of the 2024 aluminum alloy were explored. The research results showed that the addition of the GNPs refined the matrix microstructure of the 2024 aluminum alloy. With the help of the ultrasonic vibration, the GNPs were evenly dispersed in the 2024 matrix. The addition of the GNPs also improved the hardness and wear resistance of the alloy. The optimal addition of the GNPs was 0.8wt.%, and the microhardness of the composite increased up to HV122.81, which was 30.94% higher than that of the 2024 alloy. At this time, the wear rate and friction coefficient of the composite were the lowest, which were $0.672 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ and 0.328 1, respectively, which were 62.71% and 10.87% lower than those of the 2024 alloy.

Key words:

graphene; 2024 aluminum matrix composites; friction and wear properties; wear mechanism
