

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5210

# ZnO@GNPs/ZK60 复合材料制备及其性能研究

孙晓杭<sup>1</sup>, 刘素清<sup>1</sup>, 安书江<sup>1</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 王卓<sup>2</sup>, 崔凯<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024 2. 山西银光华盛镁业股份有限公司, 山西 运城 043800)

**摘要:** 镁合金具有密度低、比强度高和导热性能良好等特点,但其强度和塑性较低,限制了工程应用。为提升其综合性能,本研究以 ZK60 镁合金为基体,引入氧化锌包覆石墨烯(ZnO@GNPs)作为增强体,采用超声波辅助机械搅拌铸造法制备了质量分数为 0%、0.1%、0.3%、0.5%和 0.7%的 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料。利用金相显微镜、配备能谱仪的扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度计、微机控制电子万能试验机及激光导热仪对复合材料的微观组织、力学性能和导热性能进行了分析。结果表明,适量的 ZnO@GNPs 能够均匀分布于镁基体中,有效促进晶粒细化并改善界面结合。当 ZnO@GNPs 含量为 0.7%时,复合材料的抗拉强度和伸长率分别达到 210 MPa 和 5.3%,较基体合金提高约 19.3%和 39.5%;当 ZnO@GNPs 含量为 0.5%时,硬度达到峰值 83.32 HV;当 ZnO@GNPs 含量为 0.3%时,复合材料的热导率达到峰值,为 112.19 W/(m·K),较基体合金提高 13.7%,之后随含量增加而下降。综合分析表明,ZnO@GNPs 通过弥散强化、晶粒细化、界面强化及降低界面热阻等多重机制,显著改善了 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的力学性能和导热性能。

**关键词:** ZnO@GNPs/ZK60 复合材料;石墨烯纳米片;显微组织;力学性能;导热性能

中图分类号: TG14; TB38; TB33

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)01-0060-07

## Preparation and Properties of ZnO@GNPs/ZK60 Composites

SUN Xiaohang<sup>1</sup>, LIU Suqing<sup>1</sup>, AN Shujiang<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, WANG Zhuo<sup>2</sup>, CUI Kai<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Yinguang Huasheng Magnesium Industry Co., Ltd., Yuncheng 043800, China)

**Abstract:** Magnesium alloys possess advantages such as low density, high specific strength, and good thermal conductivity, but their relatively low strength and ductility limit broader engineering applications. To enhance their overall performance, ZnO-coated graphene nanoplatelets (ZnO@GNPs) were introduced as reinforcements into a ZK60 magnesium alloy matrix. ZnO@GNPs/ZK60 composites containing 0 wt.%, 0.1 wt.%, 0.3 wt.%, 0.5 wt.%, and 0.7 wt.% ZnO@GNPs were fabricated via an ultrasonic-assisted mechanical stirring-casting method. The microstructure, mechanical properties, and thermal conductivity of the composites were examined via optical microscopy, scanning electron microscopy equipped with EDS, X-ray diffraction, microhardness testing, tensile testing, and laser flash analysis. The results show that appropriate additions of ZnO@GNPs are uniformly distributed within the magnesium matrix, effectively promoting grain refinement and improving interfacial bonding. When the ZnO@GNPs content reaches 0.7 wt.%, the ultimate tensile strength and elongation of the composite increase to 210 MPa and 5.3%, representing improvements of 19.3% and 39.5% over those of the base alloy, respectively. The hardness attains a peak value of 83.32 HV at 0.5 wt.%, whereas the highest thermal conductivity of 112.19 W/(m·K) is achieved at 0.3 wt.%, which is 13.7% higher than that of the ZK60 matrix. Overall, the enhancement in the mechanical and thermal properties is attributed to the combined effects of dispersion strengthening, grain refinement, improved interfacial bonding, and a reduction in the interfacial thermal resistance induced by the ZnO@GNPs.

**Key words:** ZnO@GNPs/ZK60 composites; graphene nanoplatelets; microstructure; mechanical properties; thermal conductivity

收稿日期: 2025-09-23

基金项目: 2024 年中央引导地方科技发展资金(YDZJSX2024D050)

作者简介: 孙晓杭, 1999 年生, 硕士生. 研究方向为镁基复合材料的性能研究. Email: s202314210401@stu.tyust.edu.cn

通信作者: 刘素清, 1966 年生, 教授. 研究方向为先进复合材料制备与成形技术. Email: kdlsq@tyust.edu.cn

引用格式: 孙晓杭, 刘素清, 安书江, 刘涛, 王卓, 崔凯. ZnO@GNPs/ZK60 复合材料制备及其性能研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(1): 60-66.

SUN X H, LIU S Q, AN S J, LIU T, WANG Z, CUI K. Preparation and properties of ZnO@GNPs/ZK60 composites[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 60-66.

作为目前常用的轻质结构金属材料之一,镁合金凭借其密度低、比强度高、导热性良好以及可回收等特点,在航空航天、汽车轻量化及 3C 电子产品等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,镁合金的塑性差、强度低等限制了其在高性能工程结构件中的进一步推广应用<sup>[3-4]</sup>。因此,众多学者通过构建镁基复合材料,引入增强体的方法以改善其性能<sup>[5]</sup>。常用的增强体包括陶瓷颗粒<sup>[6]</sup>(如 SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiC)、金属粒子<sup>[7]</sup>(如 Ti、Ni、Cu)及碳基纳米材料<sup>[8-9]</sup>(如碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)和石墨烯纳米片(graphene nanoplatelets, GNPs))等,这些增强体在提高复合材料强度、硬度以及热导率方面表现出显著效果。Sun 等<sup>[10]</sup>采用半固态搅拌铸造制备了 SiCp/AZ91 复合材料,并采用慢速挤压进行后续加工。研究发现, SiCp 促进了 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相的析出与晶粒细化,显著提高了材料的屈服强度和抗拉强度。Wu 等<sup>[11]</sup>通过放电等离子烧结(spark plasma sintering, SPS)技术制备了 Ti 颗粒增强 AZ91 复合材料,结果表明 Ti 颗粒与镁基体之间界面结合良好,未形成脆性金属间化合物,从而显著提升了材料的屈服强度和抗压强度。Du 等<sup>[12]</sup>通过搅拌铸造与热挤压工艺制备了超低含量(0.04%,质量分数)石墨烯纳米片增强的 ZK60 镁基复合材料。结果表明,GNPs 的加入不仅显著提高了复合材料的屈服强度和冲击韧性,还提升了材料的热导率,实现了力学与导热性能的协同优化。

由于其二维片层结构,石墨烯具有比表面积大、导热性能好、抗拉强度和弹性模量高,以及载荷传递能力好的特点,被广泛用作增强体材料。将石墨烯引入镁基体中,能够显著提升其导热性和力学性能<sup>[13-14]</sup>。但是,石墨烯表面能高、易团聚、与金属基体界面润湿性差,导致其在镁合金中的分散性差、界面结合不良,从而削弱增强效果<sup>[15]</sup>。

为了改善石墨烯分散性和界面结合差的问题,研究者提出了多种表面改性策略,如金属或氧化物包覆等。Ye 等<sup>[16]</sup>通过化学还原法在石墨烯纳米片(graphene nanosheets, GNSs)表面包覆 Ni 纳米颗粒,制备了 Ni@GNSs/Mg-9Al 复合材料。研究表明, Ni 涂层能够改善石墨烯在基体中的分散性,还能与镁基体反应原位生成 Mg<sub>2</sub>Ni 界面相,该相能够与 GNSs 形成扩散界面,与 Mg 基体形成半共格界面,从而显著增强界面结合强度与晶粒细化效果,使复合材料的压缩屈服强度、极限抗压强度和塑性均得到了提升。Zhao 等<sup>[17]</sup>采用有机化学还原法在石墨烯表面沉积镁金属,制备了镁包覆石墨烯,并在后续热压烧结过程中使其原位反应生成 MgO 纳米颗

粒。结果表明, MgO 纳米颗粒能够改善石墨烯的分散状态,抑制磨损过程中的材料剥落与裂纹扩展,显著增强复合材料的耐磨性。安书江等<sup>[18]</sup>采用化学包覆法在石墨烯表面均匀沉积 ZnO 涂层,并通过搅拌铸造法制备 ZnO@GNPs/AZ31 复合材料。ZnO 涂层与熔融镁发生原位反应生成 MgO 界面产物,显著提高石墨烯在镁基体中的润湿性和分散性,促进应力传递与细晶强化,使复合材料的强度、硬度和塑性同步提升,其中 ZnO@GNPs 含量为 0.6%(质量分数,下同)的复合材料的抗拉强度和屈服强度分别达到 180 MPa 和 66 MPa,显微硬度达 81.9 HV;同时 0.2% 含量时的热导率较基体提高约 30%。

因此,本文采用 ZnO 包覆石墨烯(ZnO-coated graphene nanoplatelets, ZnO@GNPs)作为增强体,选用 ZK60 高强镁合金为基体,通过超声波辅助机械搅拌铸造工艺制备 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料,并系统研究显微组织、力学性能与导热性能,为高性能多功能镁基复合材料的开发提供实验和理论支撑。

## 1 实验材料与方法

选用石墨烯纳米片为增强体材料,其片径为 0.5 μm×0.5 μm~2.5 μm×2.5 μm,厚度为 2~4 nm,碳含量为 99.95%,比表面积为 401 m<sup>2</sup>/g,粒度为 0.045 μm。采用文献[18]的化学包覆法制备 ZnO 包覆的石墨烯纳米片(ZnO@GNPs)。基体材料为 ZK60 镁合金,其成分见表 1。

采用超声波辅助机械搅拌铸造法制备 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料。首先,将 ZnO@GNPs 与镁粉按质量比 1:2 混合均匀,利用压片机压制成药片状预制块,用铝箔包裹后备用。将坩埚置于电阻炉中预热至 300 ℃后,将 ZK60 镁合金置入并加热至 710 ℃,同时通入 SF<sub>6</sub> 和 CO<sub>2</sub>(1:99)混合气体。在合金完全熔化后,将炉温降至 650 ℃,加入预制的 ZnO@GNPs,机械搅拌 10 min(转速 450 r/min),然后进行 5 min 的超声处理,确保其均匀分散。超声处理完成后,将熔体快速浇注到预热至 300 ℃的钢模中,在模具内空冷 5 min 后脱模,并经水冷获得 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料铸锭。

ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的金相试样经打磨抛光后,在腐蚀液(3 g 苦味酸、50 mL 酒精、20 mL 乙酸、20 mL 水)中腐蚀,使用 Vert-A1 金相显微镜以及配备 OXFORD X-Max20 能谱仪的 ZEISS EVO 18 扫描电子显微镜观察显微组织。采用布鲁克 D8 X 射线衍射仪对上下表面平行的 5 mm×5 mm×5 mm 块状试样进行物相分析,测试条件为 Cu 靶,扫描

角度为  $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ , 扫描速率为  $10^{\circ}/\text{min}$ 。采用 HVA-1000A 显微硬度计测试硬度, 载荷 2 N, 保压 15 s。在 RGM-4200 微机控制电子万能试验机上测试拉伸性能, 拉伸速率为  $1\text{ mm}/\text{min}$ , 拉伸试样的尺寸和形状如图 1 所示。复合材料的导热性能采用 Net-

zsch LFA 467 激光导热仪测试, 试样为厚度 2 mm, 直径 12.5 mm 的圆片。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 ZnO@GNPs 含量对复合材料显微组织的影响

图 2 为 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的显微组织, 晶粒尺寸采用 ImageJ 软件进行统计分析, 所得结果为复合材料的平均晶粒尺寸, 如图 3 所示。ZK60 合金组织主要由粗大的多边形等轴晶组成, 晶界清晰、界限分明, 呈典型的铸态组织特征。随着

表 1 ZK60 镁合金化学成分  
Tab.1 Chemical composition of the ZK60 alloy  
(mass fraction/%)

Element	Mg	Zn	Zr	Al	Si	Fe	Mn	Ni
Content	Bal.	5.68	0.49	0.005	0.003	0.004	0.004	0.003

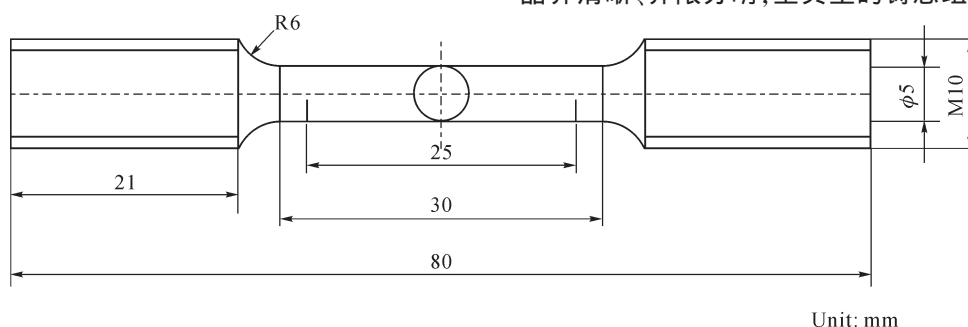


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimensions of the tensile test sample

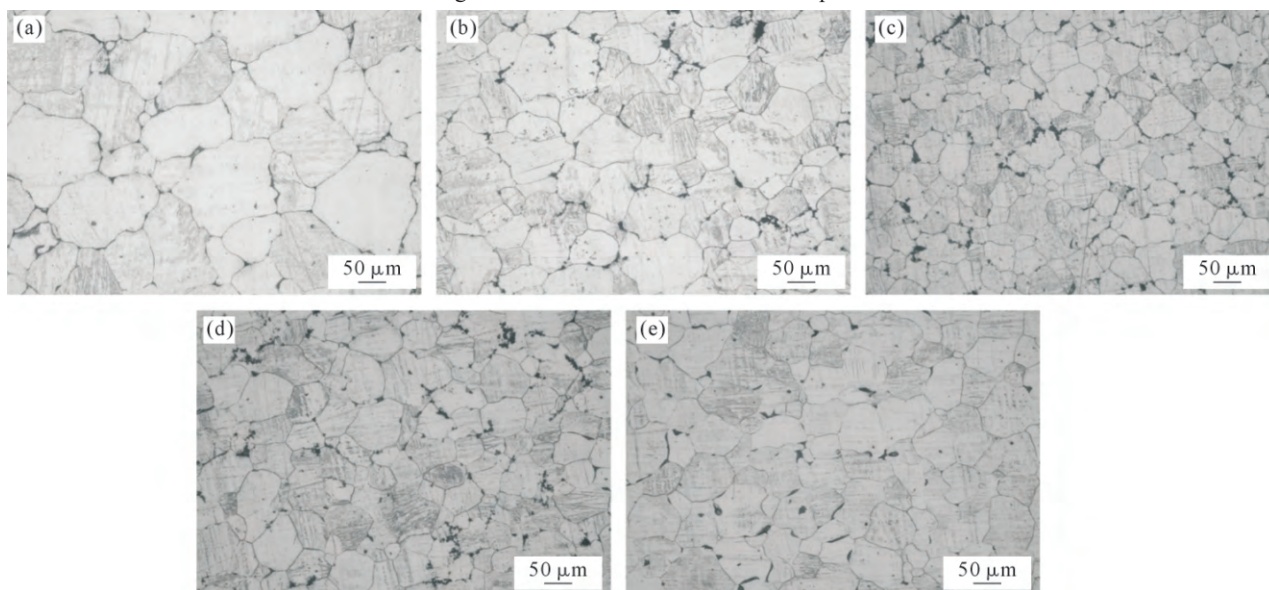


图 2 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料显微组织: (a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%; (e) 0.7%

Fig.2 Microstructures of the ZnO@GNPs/ZK60 composites: (a) 0 wt.%; (b) 0.1 wt.%; (c) 0.3 wt.%; (d) 0.5 wt.%; (e) 0.7 wt.%

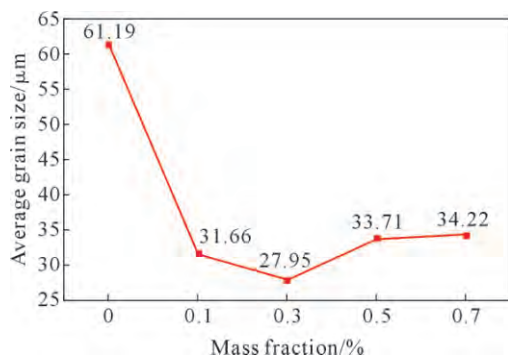


图 3 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料平均晶粒尺寸

Fig.3 Average grain size of the ZnO@GNPs/ZK60 composites

ZnO@GNPs 含量的增加, 晶粒细化明显, 晶粒平均尺寸由基体的  $61.19\text{ }\mu\text{m}$  降至  $27.95\text{ }\mu\text{m}$  (0.3%, 质量分数), 减大幅度超过 50%。这主要是颗粒在凝固过程中提供异质形核界面, 并对晶界迁移产生阻碍作用, 从而抑制了晶粒长大和第二相粗化。当添加量进一步增加至 0.5% 和 0.7% (质量分数, 下同) 时, 晶粒尺寸略有回升, 细化效果减弱。这是因为较高含量 ZnO@GNPs 在熔体中分散困难, 易发生团聚, 使部分颗粒失去有效形核作用; 同时团聚体在局部区域引起成分偏析与界面能不均, 削弱了整体的细化能

力,从而导致晶粒细化作用不明显。

图 4 为 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的 SEM 形貌, 图中箭头所示为分布于晶界处的 ZnO@GNPs 增强体。未添加 ZnO@GNPs 的 ZK60 合金中,灰色区域为基体  $\alpha$ -Mg, 晶界处分布有亮白色的块状或网状第二相,推测为  $MgZn_2$  相。随着 ZnO@GNPs 的加入,第二相由粗大连续向细小弥散化转变,分布更加均匀和离散。这主要是因为 ZnO@GNPs 在凝固过程中提供了异质形核核心, 降低了晶粒生长所需的临界过冷度<sup>[19-20]</sup>,促进了晶粒细化并抑制了第二相的粗化。ZnO@GNPs 在晶界处形成“Zener 钉扎”效应,有效抑制晶界迁移,减少了第二相沿晶界的连续析出。石墨烯的二维结构为合金凝固提供了有利的形核界面,而其表面包覆的 ZnO 提高了颗粒的热稳

定性和与基体的界面结合性,从而促进组织均匀化。当 ZnO@GNPs 含量为 0.3% 时,增强体分散性最佳,细化效果最显著;而在 0.5% 及以上时,局部区域出现白亮相富集,可能由于颗粒数量增多导致部分聚集或界面反应增强,形成较粗的  $MgZn_2$  或 Zr 富集相,破坏了组织均匀性。

图 5 为 0.5% ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的 EDS 面扫描分析图。C 与 O 元素分布于晶界白亮相区域,表明石墨烯及其 ZnO 包覆层在基体中得以保留;Zn 与 Zr 元素也集中分布于该区域,推测部分 ZnO 颗粒在熔炼过程中发生界面反应,生成  $MgZn_2$ 、Zr 富集相。这些细小弥散析出物一方面印证了前述的形核和钉扎机理,另一方面有助于晶界强化与界面结合。

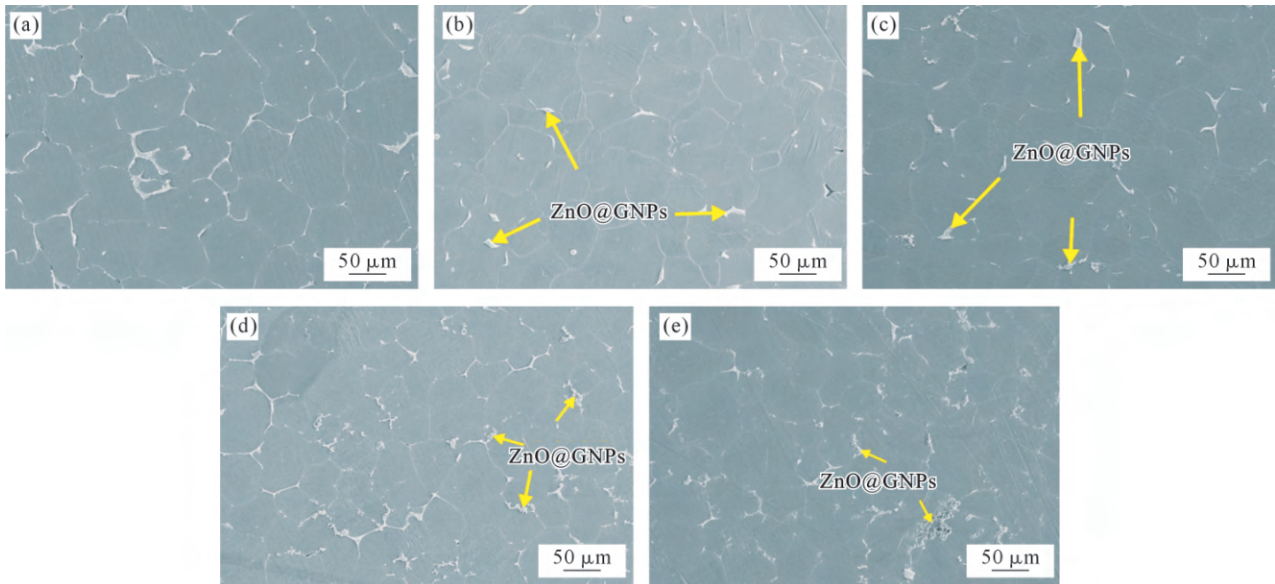


图 4 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料 SEM 像:(a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%; (e) 0.7%

Fig.4 SEM images of the ZnO@GNPs/ZK60 composites: (a) 0 wt.%; (b) 0.1 wt.%; (c) 0.3 wt.%; (d) 0.5 wt.%; (e) 0.7 wt.%

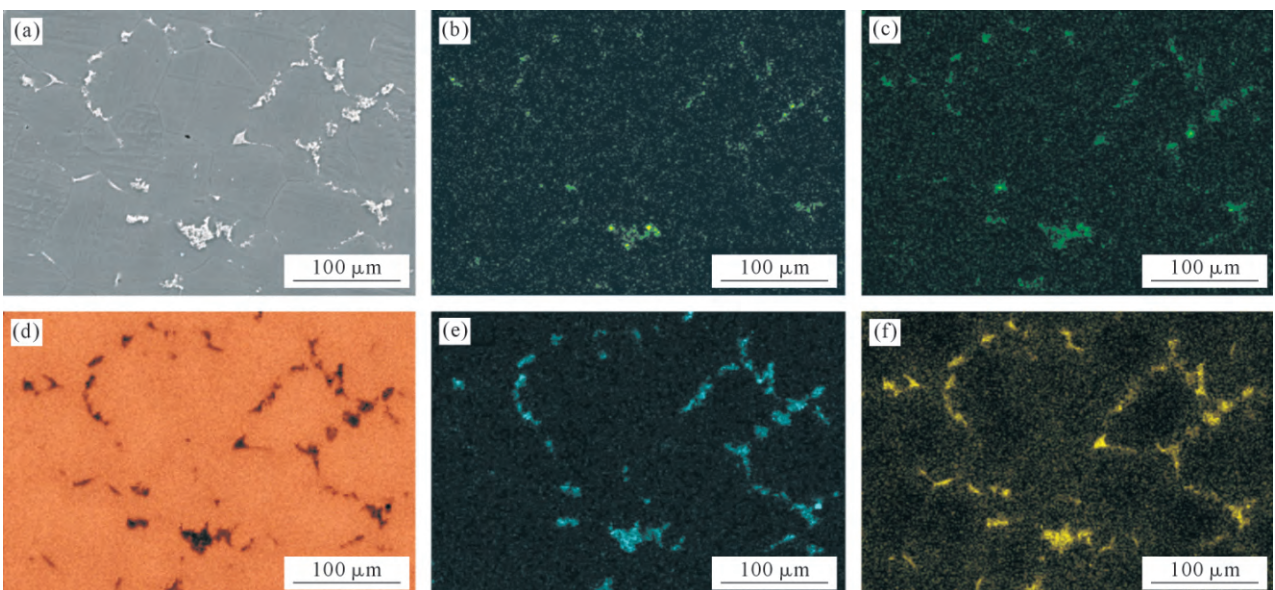


图 5 0.5%ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的 EDS 面扫描分析:(a) SEM image; (b) C; (c) O; (d) Mg; (e) Zr; (f) Zn  
Fig.5 EDS map of the 0.5 wt.% ZnO@GNPs/ZK60 composite: (a) SEM image; (b) C; (c) O; (d) Mg; (e) Zr; (f) Zn

图6为ZnO@GNPs/ZK60复合材料的XRD谱。所有样品均以 $\alpha$ -Mg为主要相,并检测到 $\text{MgZn}_2$ 和少量 $\alpha$ -Zr相,说明合金的基本相组成保持稳定。随着ZnO@GNPs含量的增加, $\text{MgZn}_2$ 相的衍射峰逐渐增强,表明Zn元素在凝固过程中易在晶界偏聚并与Mg反应生成 $\text{MgZn}_2$ 强化相。此外,图中未出现明显的石墨烯特征峰,这可能是因为其添加量较低,在基体中高度分散,或呈无序堆积状态而难以被XRD检测到。同时可以观察到 $\alpha$ -Mg主峰位置随ZnO@GNPs含量的增加呈现先左移后右移的趋势。这一现象主要与基体中Zn元素的固溶度变化及晶格应变效应有关:当ZnO@GNPs含量较低时,部分Zn反应生成 $\text{MgZn}_2$ 后导致基体中Zn固溶量下降,使晶格参数略有增大,从而引起衍射峰向小角度偏移(左移);而在较高含量下,Zn元素进一步偏聚并重新富集于基体中,同时 $\text{MgZn}_2$ 相数量增加,造成晶格收缩与残余应力升高,从而使峰位向高角度偏移(右移)。

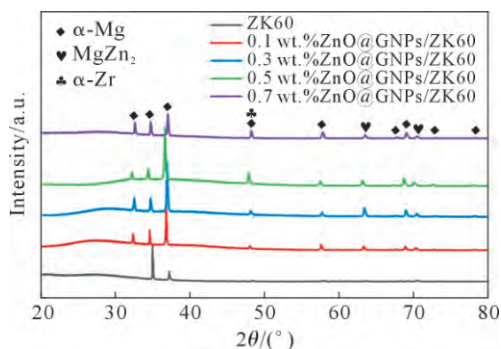


图6 ZnO@GNPs/ZK60复合材料的XRD谱

Fig.6 XRD patterns of the ZnO@GNPs/ZK60 composites

## 2.2 ZnO@GNPs含量对复合材料力学性能的影响

图7为ZnO@GNPs/ZK60复合材料的拉伸应力-应变曲线。由图可见,ZK60镁合金的抗拉强度为176 MPa,伸长率为3.8%。当ZnO@GNPs含量增加至0.7%时,抗拉强度和伸长率分别提高至210 MPa和5.3%,较基体合金分别提高约19.3%和39.5%。而屈服强度始终维持在66~71 MPa之间,表明增强体的加入对屈服行为影响有限,但显著提高了材料的极限抗拉强度和塑性。图8为ZnO@GNPs/ZK60复合材料的硬度变化曲线。ZK60合金的硬度为67.67 HV,随着ZnO@GNPs含量逐渐增加,在0.5%时达到峰值83.32 HV,较基体合金提高约23.1%。当含量继续增加至0.7%时,硬度下降至71.39 HV。这一结果表明,适量的ZnO@GNPs能够显著增强合金的抗塑性变形能力,但过量添加会导致颗粒分布不均,产生团聚或界面结合不良,从而削弱强化效果。

结合显微组织表征可进一步解释该现象,即低

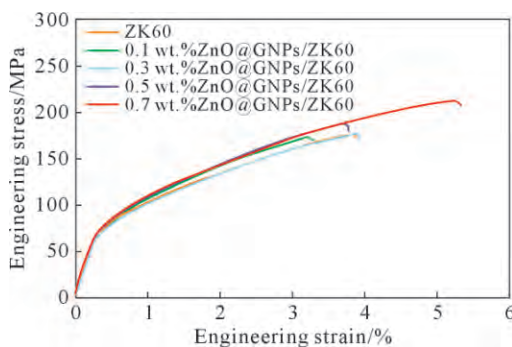


图7 ZnO@GNPs/ZK60复合材料拉伸应力-应变曲线

Fig.7 Tensile stress-strain curves of the ZnO@GNPs/ZK60 composites

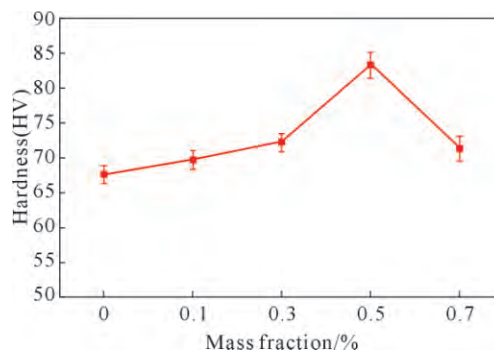


图8 ZnO@GNPs/ZK60复合材料硬度变化曲线

Fig.8 Hardness variation curves of ZnO@GNPs/ZK60 composites

含量时,ZnO@GNPs在基体中弥散均匀,作为异质形核点促进晶粒细化,从而提高材料的强度与硬度;当含量升至0.7%时,颗粒在局部区域发生团聚,细化作用减弱,界面结合不均导致强化作用分布不均。此时,分布较均匀的增强体仍能发挥载荷传递作用,使拉伸强度保持提升,而局部应变分布不均在一定程度上缓解了应力集中,从而改善塑性;但由于颗粒团聚导致强化作用不均,部分区域承载能力减弱,从而使得复合材料硬度下降。

由此可见,复合材料的力学性能的提升不仅与增强体的含量有关,还与多重强化机制的协同作用有关。首先,均匀分布的ZnO@GNPs通过Orowan弥散强化机制阻碍位错运动,提高了材料的变形抗力<sup>[21]</sup>。其次,纳米增强体在凝固过程中作为异质形核点促进晶粒细化,根据Hall-Petch关系,晶粒尺寸减小,显著提升了材料的硬度和强度<sup>[22]</sup>。此外,ZnO包覆石墨烯改善了增强体与基体的界面润湿性,提高了载荷传递效率,进一步增强了承载能力。

## 2.3 ZnO@GNPs含量对复合材料导热性能的影响

由图9可以看到,随着ZnO@GNPs含量的增加,热扩散系数和热导率均呈现先升高后下降的趋势。当含量为0.3%时,热导率达到112.19 W/(m·K),较ZK60基体合金的98.66 W/(m·K)提高约13.7%,这

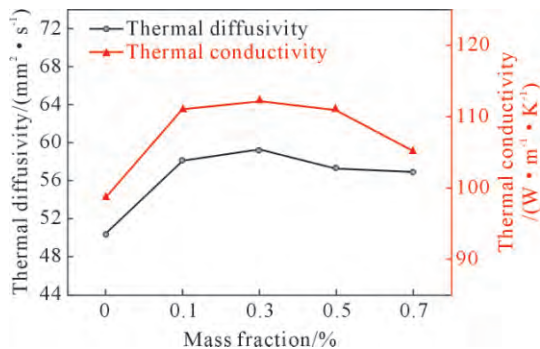


图9 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料的热扩散系数和热导率变化曲线

Fig.9 Thermal diffusivity and thermal conductivity variation curves of the ZnO@GNPs/ZK60 composites

一变化趋势与复合材料内部热传导机理有关。在低含量时,ZnO@GNPs 通过构建热传输网络显著提升导热性能。一方面,GNPs 具有高达 $5\,300\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的面内导热率<sup>[23]</sup>,加入到合金中后,作为导热通道促进了热流的传输;另一方面,ZnO 包覆层改善了GNPs 与镁基体的润湿性,并在界面处发生部分反应生成MgO 界面产物,从而增强界面结合、降低界面热阻,促进热流传导<sup>[24]</sup>。此外,ZnO@GNPs 还能促进晶粒细化,较小的晶粒尺寸优化了晶界传热,使得热流路径更加连续,从而提升了导热性能。

当 ZnO@GNPs 含量增加至 0.3%时,增强体的数量与分散性达到最优平衡,导热通道连续且界面结合良好,界面热阻最低,导热性能达到峰值。相比之下,低含量时增强体数量不足,难以形成有效的导热网络;而在 0.5%及以上时,ZnO@GNPs 间相互作用增强,部分颗粒发生团聚,破坏了热流通道的连续性。过量颗粒与基体晶格失配加剧界面热阻,并形成大量相界和界面作为声子散射中心,降低声子平均自由程。随着含量增至 0.7%时,热导率降至 $105.14\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,导热通道被破坏、热流传递受阻。

### 3 结论

(1)采用超声波辅助机械搅拌铸造法制备了 ZnO@GNPs/ZK60 复合材料。复合材料的硬度在0.5%时达到最大值 83.32 HV,较基体提升约 23.1%,抗拉强度和伸长率在 0.7%时分别达到 210 MPa 和 5.3%,较基体分别提高约 19.3%和 39.5%。

(2)在 ZK60 合金基体中加入 ZnO@GNPs 可显著细化晶粒,当添加量为 0.3%时,晶粒平均尺寸由 $61.19\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $27.95\text{ }\mu\text{m}$ ,减大幅度超过 50%。

(3)随着 ZnO@GNPs 的含量的增加,复合材料的导热性能得到提升,其中 0.3%ZnO@GNPs/ZK60 的热导率达到 $112.19\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,比基体提高约13.7%,

随 ZnO@GNPs 含量增加略有下降。

### 参考文献:

- [1] SUN X Y, LI C J, DAI X B, ZHAO L X, LI B E, WANG H S, LIANG C Y, LI H P, FAN J W. Microstructures and properties of graphene-nanoplatelet-reinforced magnesium-matrix composites fabricated by an in situ reaction process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155125.
- [2] WANG X J, WANG N Z, WANG L Y, HU X S, WU K, WANG Y Q, HUANG Y D. Processing, microstructure and mechanical properties of micro-SiC particles reinforced magnesium matrix composites fabricated by stir casting assisted by ultrasonic treatment processing[J]. Materials & Design, 2014, 57: 638-645.
- [3] TRANG T T T, ZHANG J H, KIM J H, ZARGARAN A, HWANG J H, SUH B C, KIM N J. Designing a magnesium alloy with high strength and high formability[J]. Nature Communications, 2018, 9 (1): 2522.
- [4] MUNIR K, WEN C, LI Y C. Graphene nanoplatelets-reinforced magnesium metal matrix nanocomposites with superior mechanical and corrosion performance for biomedical applications [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 269-290.
- [5] 张斌,孙云霞,梁拓,李天,杨长林. 镁基复合材料的强韧化研究进展[J]. 铸造技术, 2023, 44(3): 203-220.
- [6] NIE K B, WANG X J, DENG K K, HU X S, WU K. Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles-a review [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1): 57-77.
- [7] FAN Y D, DENG K K, WANG C J, NIE K B, SHI Q X. Work hardening and softening behavior of Mg-Zn-Ca alloy influenced by deformable Ti particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 833: 142336.
- [8] ABBAS A, HUANG S J. Qualitative and quantitative investigation of as-cast and Aged CNT/AZ31 metal matrix composites[J]. JOM, 2020, 72(6): 2272-2282.
- [9] 陈雨豪. 石墨烯增强 Mg-Zn-Zr 复合材料的组织与性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2023.
- [10] SUN X F, WANG C J, DENG K K, NIE K B, ZHANG X C, XIAO X Y. High strength SiC<sub>p</sub>/AZ91 composite assisted by dynamic precipitated Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phase [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 732: 328-335.
- [11] WU B, LI J B, YE J L, TAN J, LIU L Z, SONG J F, CHEN X H, PAN F S. Work hardening behavior of Ti particle reinforced AZ91 composite prepared by spark plasma sintering[J]. Vacuum, 2021, 183: 109833.
- [12] DU X, DU W B, WANG Z H, LIU K, LI S B. Simultaneously improved mechanical and thermal properties of Mg-Zn-Zr alloy reinforced by ultra-low content of graphene nanoplatelets[J]. Applied Surface Science, 2021, 536: 147791.

- [13] 徐春杰, 武迈, 孙蕾, 张鹏, 杨怡, 张凯军, 马波, 张忠明. GNP/镁基复合材料的制备工艺及性能研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40(9): 883-887, 914.
- XU C J, WU M, SUN L, ZHANG P, YANG Y, ZHANG K J, MA B, ZHANG Z M. Preparation process and properties of GNP/magnesium matrix composites[J]. Foundry Technology, 2019, 40(9): 883-887, 914.
- [14] 袁秋红, 周国华, 廖琳, 晏旭辉, 彭路南, 马广祥, 杨春材, 王启儒. 不同纳米碳材料增强镁基复合材料的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 30-41.
- YUAN Q H, ZHOU G H, LIAO L, YAN X H, PENG L N, MA G X, YANG C C, WANG Q R. Microstructures and mechanical properties of Mg-based composites reinforced with different nano-carbon materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 30-41.
- [15] SUN X H, CHEN M F, LIU D B. Fabrication and characterization of few-layer graphene oxide reinforced magnesium matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 803: 140722.
- [16] YE J L, CHEN X H, LI J B, LIU C Q, WU B, PAN F S. Microstructure and compressive properties of Mg-9Al composite reinforced with Ni-coated graphene nanosheets[J]. Vacuum, 2020, 181: 109629.
- [17] ZHAO R X, ZHAO Z Y, BAI P K, DU W B, TIE D, ZHANG Z, WANG L Q, WANG Y. Research on tribological behavior of graphene with in-situ MgO nanoparticles reinforced AZ91 alloy composite[J]. Composites Communications, 2022, 30: 101086.
- [18] 安书江, 刘素清, 侯华, 魏梦雪, 武建国. 氧化锌包覆石墨烯纳米片/AZ31 复合材料的力学性能与热导率[J]. 铸造, 2025, 74(3): 327-334.
- AN S J, LIU S Q, HOU H, WEI M X, WU J G. Mechanical properties and thermal conductivity of ZnO-coated graphene nanoplatelets/AZ31 composites[J]. Foundry, 2025, 74(3): 327-334.
- [19] BOOSTANI A F, YAZDANI S, MOUSAVIAN R T, TAHAMTAN S, KHOSROSHAHI R A, WEI D, BRABAZON D, XU J Z, ZHANG X M, JIANG Z Y. Strengthening mechanisms of graphene sheets in aluminium matrix nanocomposites[J]. Materials & Design, 2015, 88: 983-989.
- [20] HAN G Q, WANG Z H, LIU K, LI S B, DU X, DU W B. Synthesis of CNT-reinforced AZ31 magnesium alloy composites with uniformly distributed CNTs[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 628: 350-357.
- [21] 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(10): 281-350.
- [22] DU X, DU W B, WANG Z H, LIU K, LI S B. Ultra-high strengthening efficiency of graphene nanoplatelets reinforced magnesium matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 711: 633-642.
- [23] LATORRATA S, BALZAROTTI R. Advances in graphene and graphene-related materials [J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8929.
- [24] WANG M, ZHAO Y, WANG L D, ZHU Y P, WANG X J, SHENG J, YANG Z Y, SHI H L, SHI Z D, FEI W D. Achieving high strength and ductility in graphene/magnesium composite via an in-situ reaction wetting process[J]. Carbon, 2018, 139: 954-963.

(责任编辑:李亚敏)