

Ti 颗粒表面包覆处理对镁基复合材料界面及力学性能的影响

汪逸飞^{1, 2}, 李新涛², 郑开宏², 刘建永¹, 韩胜利², 潘复生²

(1. 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 湖北十堰 442002; 2. 广东省科学院新材料研究所, 广东广州 510650)

摘要: 以AZ91D作为基体, Ti颗粒和利用电爆沉积法在Ti颗粒表面包覆Al的Al-Ti颗粒作为增强颗粒, 使用搅拌铸造工艺分别制备了Ti_p/AZ91D和(AI-Ti)_p/AZ91D两种复合材料。使用扫描电子显微镜(SEM)对复合材料中Ti颗粒分布的均匀性进行了观察, 并进一步的对增强体与基体间的界面进行了分析。通过拉伸试验, 考察了复合材料的屈服强度、抗拉强度及伸长率等力学性能指标, 并对断口进行了分析。由于表面包覆后的Al-Ti颗粒能够提供更好的界面结合, 因此与Ti_p/AZ91D复合材料相比(AI-Ti)_p/AZ91D复合材料具有更高的力学性能。

关键词: Ti颗粒; 镁基复合材料; 表面包覆; 界面结构; 力学性能

作者简介:

汪逸飞(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为颗粒增强镁基复合材料。E-mail: 269706786@qq.com

通讯作者:

李新涛, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。电话: 13914913193, E-mail: lxt_hq@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0498-05

基金项目:

广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目(2020GDASYL-20200101001); 广东省基础与应用基础研究重大项目(2020B0301030006)。

收稿日期:

2023-10-31 收到初稿,
2023-12-28 收到修订稿。

镁合金具有密度低, 比强度和比刚度高等特点, 在汽车、电子等领域有广阔的应用前景^[1-2]。但是, 镁合金的强度和韧性偏低使其应用受到限制。向镁合金中加入增强体制备镁基复合材料是一种较为有效的提高镁合金性能的方式^[3]。

金属颗粒作为增强体有良好的塑性和协调变形能力, 在复合材料承受拉伸载荷时基体与增强体能够共同发生协调变形, 有效传递载荷^[4-5]。镁基复合材料常用的金属颗粒的有Cu、Ni、Ti和Zr等。其中, Ti和Mg都具有相同的密排六方结构晶体结构, 在镁熔体中表现出很好的润湿性, 且Ti在Mg中的固溶度非常小, 能较好的形成复合材料^[6]。同时, Ti元素能够细化晶粒, 进一步改善镁基复合材料的力学性能^[7]。

近年来, 研究者采用粉末冶金、搅拌铸造等方法制备镁基复合材料进行了大量的研究^[8-9]。谢耀等人通过搅拌铸造法制备了Ti_p/AZ91D复合材料, 研究了Ti颗粒对复合材料组织与力学性能的影响, Ti颗粒增强镁基复合材料具有比镁合金更好的性能^[10]。Bo Li等人采用粉末冶金法制备了不同Ti含量的(Ti + Mg₃Sb₂)/Mg复合材料, 研究了Ti含量对复合材料的显微组织和力学性能的影响, Ti含量在一定范围内能够提高复合材料的力学性能, 含量过多会导致复合材料的性能下降^[11]。然而, 直接采用Ti颗粒作为增强颗粒制备的镁基复合材料, Ti颗粒与基体之间结合力较弱, 受拉伸载荷时容易脱离基体, 导致材料断裂失效, 限制了材料的应用。

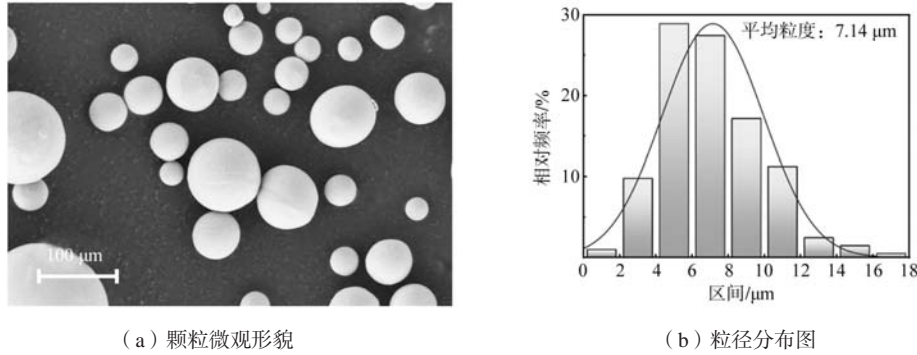
本研究分别采用Ti颗粒和进行了表面包覆的Al-Ti颗粒作为增强颗粒, 以Mg和AZ91D镁合金为基体, 采用搅拌铸造法制备了镁基复合材料。研究了表面包覆对Ti颗粒与基体之间的界面结构和复合材料力学性能的影响, 并对机理进行了初步探讨。

1 试样制备与方法

1.1 Al-Ti 颗粒制备

本文所用Ti颗粒的平均粒径为7 μm, 微观形貌及粒径分布如图1所示。

利用电爆沉积法, 将Al原位包覆于Ti颗粒表面形成Al-Ti颗粒。其中, Al: Ti质量比为2: 100。制备Al-Ti颗粒如图2所示, 纳米量级的Al颗粒弥散分布于Ti颗粒表面。



(a) 颗粒微观形貌

(b) 粒径分布图

图1 金属Ti颗粒微观形貌及粒径分布图

Fig. 1 Microstructure and particle size distribution of metal Ti particles

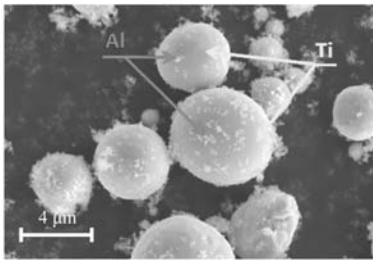


图2 Al-Ti颗粒形貌图

Fig. 2 Morphology of Al-Ti particles

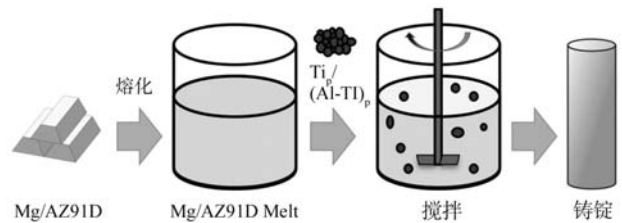


图3 搅拌铸造法制备Ti_p/AZ91D和 (Al-Ti)_p/AZ91D复合材料过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of preparation process of Ti_p/AZ91D and (Al-Ti)_p/AZ91D composites by stir casting

1.2 复合材料制备

AZ91D镁合金基体的化学成分如表1所示。

表1 AZ91D镁合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy
w_B/%

Al	Zn	Mn	Mg
8.99	0.771	0.268	余量

采用搅拌铸造法制备Ti_p/Mg、Ti_p/AZ91D和 (Al-Ti)_p/AZ91D复合材料过程如图3所示。熔炼炉为真空电阻加热炉，搅拌器材质为钛合金。将Mg或AZ91D置于高纯石墨坩埚内，5vol.%增强颗粒置于料斗，抽真空至100 Pa后开始熔炼，熔炼和搅拌过程中采用CO₂+SF₆混合气体进行保护，将熔体温度控制在590~620 °C范围开始搅拌，搅拌速度600 rpm/min，搅拌开始后添加增强颗粒，颗粒添加完毕后再搅拌5~10 min，然后升

温至650~670 °C浇入直径为125 mm的金属模具，从铸锭1/2半径处切取金相试样，采用扫描电镜进行界面分析。相同位置切取棒状拉伸试样进行室温拉伸试验，试验重复3次取平均值，棒状拉伸试样尺寸如图4所示。试验采用DNS200型万能材料试验机，拉伸速度为1 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 表面包覆对镁基复合材料界面组织的影响

图5分别给出了Ti_p/AZ91D和 (Al-Ti)_p/AZ91D复合材料的宏观形貌图像，两种复合材料的增强颗粒分布较均匀，无明显的缺陷。

图6分别给出了Ti_p/AZ91D和 (Al-Ti)_p/AZ91D复合材料的微观组织图像。三种复合材料中增强颗粒与基体之间的界面化合物形貌有较大差异。从图6a可以看

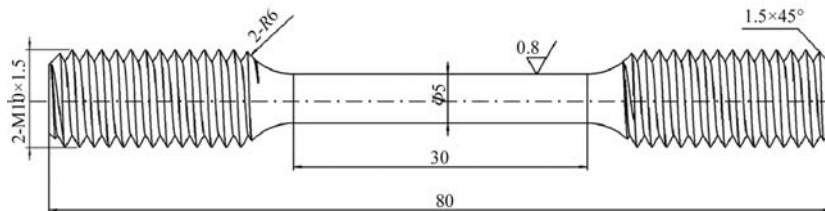


图4 棒状拉伸试样尺寸图

Fig. 4 Bar tensile specimen size diagram

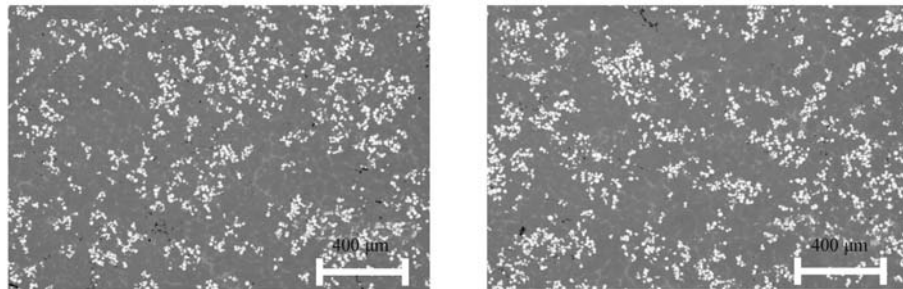
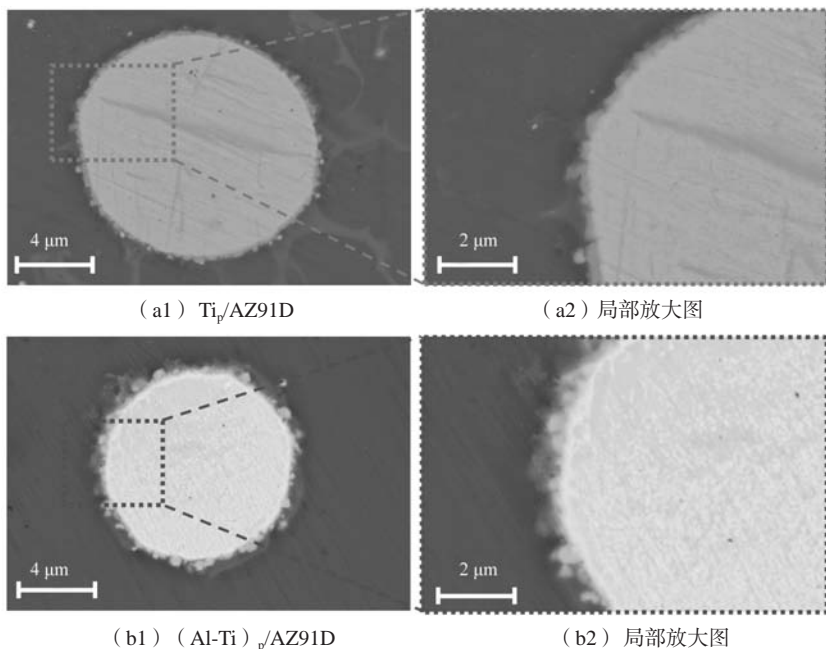
(a) $Ti_p/AZ91D$ (b) $(Al-Ti)_p/AZ91D$

图5 复合材料的宏观形貌图像

Fig. 5 Macroscopic morphology images of composite materials

(a1) $Ti_p/AZ91D$

(a2) 局部放大图

(b1) $(Al-Ti)_p/AZ91D$

(b2) 局部放大图

图6 复合材料的图微观组织图像

Fig. 6 Microstructure image of composite material

出,球形Ti颗粒与AZ91D基体界面化合物呈扁粒状分布于Ti颗粒表面,平均周向长度约为600 nm,界面化合物连续但厚度并不均匀,厚度为100~400 nm。从图6b中可以看出,球形Al-Ti颗粒与AZ91D基体界面化合物呈云团状分布于Al-Ti颗粒表面,界面层的厚度有明显的增加,厚度为200~900 nm。

而 $Ti_p/AZ91D$ 复合材料的Ti颗粒表面的化合物是由于基体中含有Al、Ti颗粒与表面接触的Al发生反应,形成了Ti-Al金属间化合物^[4, 12]。 $(Al-Ti)_p/AZ91D$ 中由于Ti颗粒表面包覆Al, Ti与基体界面处Al含量增加,界面处生成的化合物进一步增加。

$(Al-Ti)_p/AZ91D$ 相较于 $Ti_p/AZ91D$ 复合材料中Al的质量分数增加了0.25%,界面层的厚度增加了约1倍。通过以上分析,利用电爆沉积法进行Ti颗粒的表面包覆是有效增加界面层厚度的方法。且其特殊的云团状界面层使得钉扎作用更加明显。

2.2 拉伸性能

$Ti_p/AZ91D$ 和 $(Al-Ti)_p/AZ91D$ 复合材料的室温拉伸应力-应变曲线和拉伸力学性能如图7所示。 $(Al-Ti)_p/AZ91D$ 复合材料的屈服强度、抗拉强度和断裂伸长率分别为145 MPa、163 MPa和3%。对比 $Ti_p/AZ91D$ 复合材料, $(Al-Ti)_p/AZ91D$ 复合材料的屈服强度提高10%,抗拉强度提高6%,断裂伸长率无明显变化。Ti颗粒进行表面包覆Al能有效提升复合材料的拉伸力学性能。

图8所示 $Ti_p/AZ91D$ 和 $(Al-Ti)_p/AZ91D$ 拉伸断口SEM照片。从图8a可以看出,Ti颗粒有部分被包入基体中且有部分的化合物在Ti颗粒表面,观察到有典型的河流纹和韧窝,根据断裂伸长率判断为准解理断裂。图8b所示Al-Ti颗粒表面粗糙,增强颗粒被界面化合物完全包裹。对图8b中的指定位置做EDX分析如图8c所示,可见存在大量的Mg元素。对比图2的原始Al-Ti颗粒形貌,可以清晰看出存在基体包覆于Al-Ti颗粒表面,表明界面化

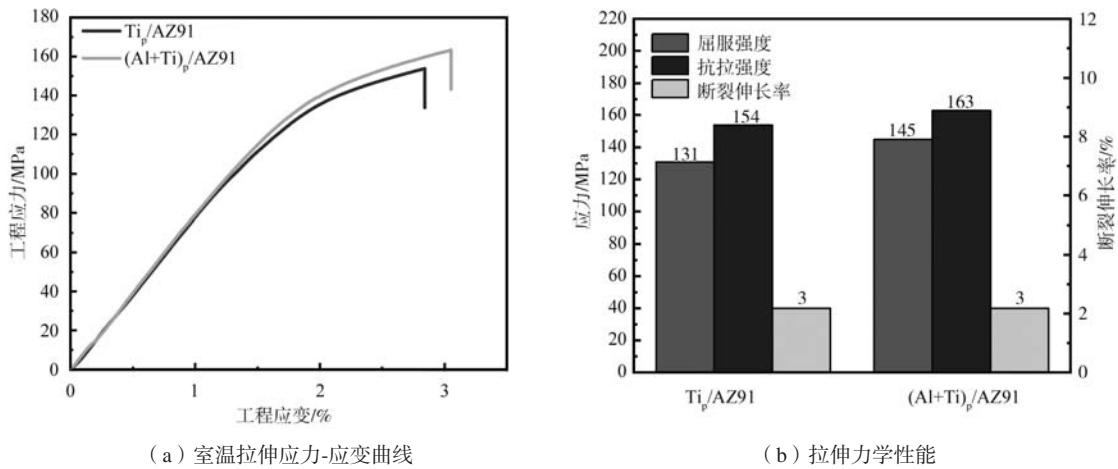


图7 Ti_p/AZ91D和 (Al+Ti)_p/AZ91D复合材料的室温拉伸应力-应变曲线和拉伸力学性能

Fig. 7 Tensile stress-strain curves and tensile mechanical properties of Ti_p/AZ91D and (Al+Ti)_p/AZ91D composites at room temperature

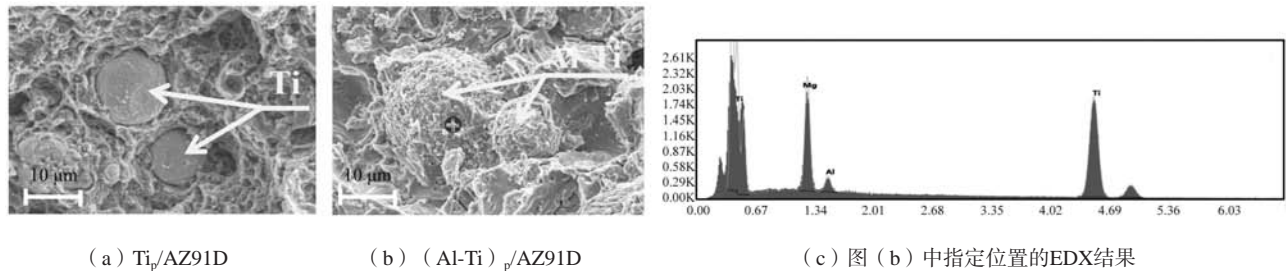


图8 复合材料拉伸断口形貌及EDX结果

Fig. 8 Tensile fracture morphology and EDX results of composites

合物与基体有较好的结合。

此外, Ti颗粒增强镁基复合材料中Ti颗粒均没有发生开裂的现象^[13], 因此, 界面层与基体的结合强度为主要影响复合材料拉伸性能的因素。(Al+Ti)_p/AZ91D复合材料的界面厚度较Ti_p/AZ91D有较大提升, 提高了Ti颗粒增强镁基复合材料的拉伸力学性能。

3 结论

研究了以Mg或AZ91D作为基体, Al-Ti颗粒或Ti颗

粒作为增强颗粒制备的三种复合材料中基体与增强颗粒的界面对拉伸力学性能的影响, 所得出的主要结论如下。

(1) Ti_p/AZ91D和 (Al+Ti)_p/AZ91D复合材料中的界面生成物的形貌有显著差异。

(2) (Al+Ti)_p/AZ91D复合材料比Ti_p/AZ91D具有更高的屈服强度和抗拉强度。

(3) (Al+Ti)_p/AZ91D复合材料中界面层更厚, 钉扎作用更加明显。

参考文献:

- [1] 李芳, 管仁国, 铁镛, 等. 我国先进镁合金材料产业2035发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 76-83.
- [2] KATARZYNA N, BRASZCZYŃSKA M. Types of component interfaces in metal matrix composites on the example of magnesium matrix composites [J]. Materials, 2021, 14 (18): 5182-5200.
- [3] MITRA R, MAHAJAN Y R. Interfaces in discontinuously reinforced metal matrix composites: an overview [J]. Bulletin of Materials Science, 1995, 18 (4): 405-434.
- [4] DENG K K, SHI J Y, WANG C J, et al. Microstructure and strengthening mechanism of bimodal size particle reinforced magnesium matrix composite [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43 (8): 1280-1284.
- [5] 张晓辉. 搅拌铸造金属Ti颗粒增强AZ91D镁基复合材料高温塑性变形组织与力学性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [6] 郭婷婷, 张晓辉, 康跃华, 等. 热处理对搅拌铸造Ti_p/AZ91D镁基复合材料组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (6): 673-679.

- [7] 李锋, 林立, 童晓旻, 等. 镁合金及其复合材料超塑性的研究现状 [J]. 铸造, 2003 (7): 455-461.
- [8] 赵杰. $Ti_p/AZ91$ 镁基复合材料组织与力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022
- [9] JIANG S, HUANG L J, AN Q, et al. Study on titanium-magnesium composites with bicontinuous structure fabricated by powder metallurgy and ultrasonic infiltration [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 81: 10-15.
- [10] 谢耀, 康跃华, 李新涛, 等. 搅拌铸造金属Ti颗粒增强AZ91D复合材料的组织与力学性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 793-799.
- [11] LI B, WEI L, ZHOU X P. The effect of Ti on the microstructure and mechanical properties of $(Ti+Mg_3Sb_2)/Mg$ composites [J]. Advanced Composites Letters, 2020, 29: 1-8.
- [12] YANG L Q, LI Z Y, LI B Q, et al. Simulations and experiments on the microstructure and property evolution of in situ $TiC+Al_3Ti$ -reinforced aluminum coatings on AZ91D magnesium alloy [J]. Crystals, 2023, 13 (7): 1151-1168.
- [13] WANG Y T, LI J B, GUAN B, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid graphene nanoplatelets/titanium particles reinforced AZ91 laminated composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 856: 144017-144028.

Effect of Ti Particle Surface Coating Treatment on the Interface and Mechanical Properties of Mg Matrix Composites

WANG Yi-fei^{1,2}, LI Xin-tao², ZHENG Kai-hong², LIU Jian-yong¹, HAN Sheng-li², PAN Fu-sheng²

(1. School of Materials Science & Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Hubei, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract:

In this study, based on AZ91D, Ti particles and Al-Ti particles coated with Al on the surface of Ti particles by the electroexplosive deposition method were used as reinforced particles. $Ti_p/AZ91D$ and $(Al-Ti)_p/AZ91D$ composites were produced by the stirring casting process, respectively. The uniformity of distribution of reinforced particles was observed by scanning electron microscopy (SEM), and the interface between the reinforced particles and the matrix were further analyzed. Besides, tensile tests were experimented on the composites, that the indexes of mechanical properties such as tensile strength, yield strength, and elongation of the composites were studied on and the fracture of the composites was analyzed. Since Al-Ti particles coated on the surface could significantly increase the thickness of the interfacial layer, and its special cloud-like interfacial layer made the pinning effect more obvious, compared with $Ti_p/AZ91D$ composites, $(Al-Ti)_p/AZ91D$ composites had higher mechanical properties.

Key words:

Ti particles; magnesium matrix composite; surface coating; interface structure; mechanical properties