

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.013

## ZK61M 镁合金表面无针搅拌摩擦加工改性及性能

赵柯<sup>1,2</sup>, 曹春<sup>1,2</sup>, 孙航<sup>1,2</sup>, 杨沛东<sup>1,2</sup>, 张奎<sup>1,2</sup>, 彭银利<sup>1,2</sup>, 赵亚忠<sup>1,2</sup>

(1. 南阳理工学院 河南省增材制造航空材料工程研究中心, 河南 南阳 473004; 2. 南阳理工学院 南阳市增材制造技术与装备重点实验室, 河南 南阳 473004)

**摘要:** 为改善 ZK61M 镁合金表面组织, 提高其硬度、摩擦磨损性能和耐腐蚀性能, 利用无针搅拌摩擦加工技术制备了镁合金表面改性层。采用光学显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机及电化学工作站等观察分析了不同行进速度下改性层的表面形貌、微观组织、显微硬度、摩擦磨损性能及耐腐蚀性能。结果表明: 无针搅拌摩擦加工改性技术有效改善了镁合金的晶粒分布, 提高了材料硬度、摩擦磨损性能及耐腐蚀性能; 随行进速度的增加, 改性层晶粒尺寸减小, 显微硬度增大, 摩擦系数减小; 当行进速度为 400 mm/min 时, 改性层显微硬度最大, 达 119.3 HV, 摩擦系数达到最小值 0.316; 随行进速度的增加, 改性层抗腐蚀能力降低, 行进速度为 100 mm/min 时自腐蚀电流密度最小, 为  $4.913 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

**关键词:** 无针搅拌摩擦加工; 摩擦磨损性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TQ132; TG178 文献标志码: A

## Surface modification and properties of ZK61M magnesium alloy by pinless friction stir processing

ZHAO Ke<sup>1,2</sup>, CAO Chun<sup>1,2</sup>, SUN Hang<sup>1,2</sup>, YANG Peidong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xi<sup>1,2</sup>, PENG Yinli<sup>1,2</sup>, ZHAO Yazhong<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Additive Manufacturing Aeronautical Materials of Henan Province, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China; 2. Nanyang Key Laboratory of Additive Manufacturing Technology and Equipment, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

**Abstract:** To improve the surface microstructure of ZK61M magnesium alloy and enhance its hardness, friction and wear properties, and corrosion resistance, surface modified layer of magnesium alloy was prepared via the pinless friction stir processing (FSP) technique. The surface morphology, microstructure, microhardness, friction and wear properties, and corrosion resistance of the modified layers under different feed speeds were observed and analyzed by optical microscope, XRD, microhardness tester, friction and wear tester, and electrochemical workstation. The results show that the pinless FSP modification technique effectively refines the grain distribution of magnesium alloy and enhances the hardness, friction and wear properties, and corrosion resistance of the material. With increasing of feed speed, grain size of the modified layer decreases, and the microhardness increases while the friction coefficient decreases. At a feed speed of 400 mm/min, the modified layer exhibits maximum microhardness of 119.3 HV and minimum friction coefficient of 0.316. However, corrosion resistance of the modified layer decreased with the increasing feed speed. At a feed speed of 100 mm/min, the self-corrosion current density is the

收稿日期: 2025-08-09 修回日期: 2025-11-16

作者简介: 赵柯(1989—), 男, 博士, 高工, 研究方向为有色金属加工及金属基复合材料, e-mail: xxdhcyzk@nyist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52201044); 河南省自然科学基金(232300420326); 南阳市科技攻关资助项目(24KJGG091, 24KJGG092)

引用信息: 赵柯, 曹春, 孙航, 等. ZK61M 镁合金表面无针搅拌摩擦加工改性及性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 88-94.  
ZHAO Ke, CAO Chun, SUN Hang, et al. Surface modification and properties of ZK61M magnesium alloy by pinless friction stir processing[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 88-94.

lowest, with a value of  $4.913 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

**Keywords:** pinless friction stir processing; friction and wear properties; corrosion resistance

镁合金具有低密度、高韧性、优异的减震能力、生物相容性以及易加工等特性,是一种重要的轻量化材料,同时兼具高效能、低能耗及易回收优势,高度契合可持续发展需求,在航空航天、电子产品、低空装备和人形机器人等新质生产力核心领域展现出广阔应用前景<sup>[1-7]</sup>。然而,镁合金固有的表面硬度偏低、耐磨性差及耐蚀性不足等缺陷,极大限制了其在高端关键结构件中的应用<sup>[6,8]</sup>。研究者们开发了多种表面改性技术,包括电镀、喷涂、激光熔覆、超疏水涂层构建及微弧氧化等,以实现镁合金表面性能的针对性提升<sup>[6-7,9-18]</sup>。张玺等<sup>[18]</sup>采用激光熔凝技术在ZK60镁合金表面形成了具有一定厚度、晶粒细小的熔凝层,离焦量对熔池厚度及宽度、熔凝层表面粗糙度及表面耐蚀性存在显著调控作用。黄仕高等<sup>[15]</sup>通过阴极沉积和超疏水改性,在稀土镁合金表面制备了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 薄膜超疏水涂层,试样自腐蚀电流密度相对于基体降低了3个数量级,特征阻抗模值提高了4个数量级。罗仲龙等<sup>[7]</sup>采用浸渍法在AZ31镁合金表面制备出稳定且耐腐蚀的磷酸氢二铝/聚甲基丙烯酸甲酯超疏水涂层,显著提高了其耐腐蚀性。邢爽等<sup>[16-17]</sup>采用等离子体电解氧化技术、微弧氧化着色技术在镁锂合金表面制备了热控膜层,材料热控性能得到明显改善。但上述研究中,镁合金表面改性层普遍由外界引入,部分工艺较复杂,且存在改性表层较薄、不耐磨等问题。

搅拌摩擦加工(FSP)是一种基于搅拌摩擦焊发展起来的固相加工技术,通过高速旋转的搅拌工具产生摩擦热并带动材料发生剧烈塑性变形,可细化晶粒、消除缺陷、提高材料性能<sup>[1,19-21]</sup>。FSP过程中无外界材料引入,温度低于熔点,可避免加工区域易脱落、污染等问题,适用于多种金属材料,且环保、节能。FSP技术在有色合金性能优化方面优势显著,可明显提升加工区域的硬度、耐磨性及耐腐蚀性能等<sup>[1-2,19,22]</sup>。但对于铝合金、镁合金等有色金属板材,搅拌头深入材料内部带来的剧烈塑性变形与大量摩擦热,易导致板材变形并造成一定的能源浪费。基于此,近年来无针FSP技术逐渐受到关注。无针FSP过程中搅拌工具仅轴肩部分与材料接触,加工时仅表层材料受到搅拌头的影响发生塑性变形,阻力小,摩擦热大幅降低,减少了材料变形风险,

同时节省了能源。Song等<sup>[23]</sup>采用无针搅拌头对H62铜合金进行了表面加工,改性层耐腐蚀性优于母材。朱先勇等<sup>[5]</sup>采用无针FSP技术对Mg-3.4Al-0.8Zn-0.4Sn镁合金进行了表面改性,改性层晶粒细化明显,硬度大幅提高。

目前无针FSP对镁合金的研究着重于温度场及硬度,对其摩擦磨损性能、耐腐蚀性能方面的研究仍十分欠缺,且不同的FSP参数对材料的微观组织和性能影响显著,需根据具体合金类型和应用需求确定合适的加工条件。本文采用无针FSP技术以不同的行进速度对ZK61M镁合金进行表面改性,分析行进速度对其表面形貌、微观组织、显微硬度、摩擦磨损性能及耐腐蚀性能的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验选用2 mm厚的ZK61M镁合金板材,其主要成分如表1所示。将板材激光切割成100 mm×30 mm×2 mm规格备用,切割完成后打磨表面氧化层,使用丙酮清洗掉表面杂质并吹干。

表1 ZK61M 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZK61M magnesium alloy

元素	Zn	Zr	Al	Si	Fe	Cu	Mg
含量/(wt.%)	5.43	0.65	0.1	0.1	0.1	0.1	余量

### 1.2 实验方法

将板材装夹在工作台上,使用搅拌摩擦焊机进行无针FSP加工,搅拌工具为轴肩直径为10 mm的硬质合金材质无针搅拌头,如图1所示。搅拌头逆时针旋转,转速800 r/min,倾斜角 $2.5^\circ$ ,行进速度分别为100、200和400 mm/min,轴肩下压量0.15 mm。

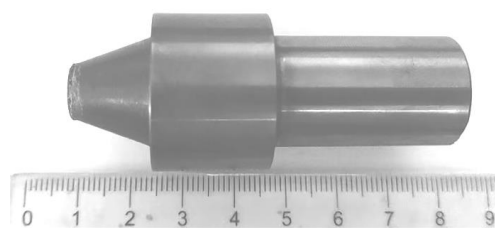


图1 无针搅拌头

Fig.1 Pinless stirring tool

采用激光共聚焦金相显微镜(OLYMPUS OLS4100)观察改性区表面三维形貌及磨损面三维形貌,采用光学金相显微镜(OLYMPUS BX53M)观察改性区微观组织形貌,部分试样需磨抛后进行腐蚀,腐蚀剂具体配方(体积分数)为:20%乙酸+1%硝酸+60%乙二醇+19%蒸馏水,腐蚀时间8~20 s。采用XRD(Rigaku-Smart Lab SE)对物相进行分析,扫描范围 $15^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。采用显微维氏硬度计(Innovatest FALCON501)测量改性层硬度,施加载荷100 g,保持时间15 s。使用高速环块磨损试验机(MR-H3B)对改性区表面进行摩擦磨损测试,测试力100 N,45钢环转速100 r/min,磨损实验时间10 min。使用电化学工作站(Autolab PGSTAT 302N)测量试样的极化曲线,测试前将试样用丙酮清洗干净、吹干,辅助电极为Pt电极,参比电极为AgCl电极,试样为工作电极。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌分析

无针FSP后ZK61M表面的宏观形貌如图2所示,3种行进速度下FSP区域附近均观察到飞边的存在。行进速度为100 mm/min时,加工区域飞边数量最多,随行进速度增加,FSP产生的飞边数量减小,当行进速度增至400 mm/min时,加工区域已无明显飞边存在。在搅拌摩擦设备旋转速度一定的情况下,行进速度缓慢时,加工区合金所吸收的热量充足,金属塑性、流动性增加,造成金属随搅拌头环形流动,部分软化金属外溢形成飞边,导致材料损耗,这对实际生产中合金的表面处理有着较大的影响<sup>[19]</sup>。表面改性区域的宏观形貌与搅拌摩擦焊所形

成的焊缝相似,呈现出弧纹特征。从图2中可以看出弧纹间距与行进速度正相关,行进速度增至400 mm/min时,弧纹间距最大。

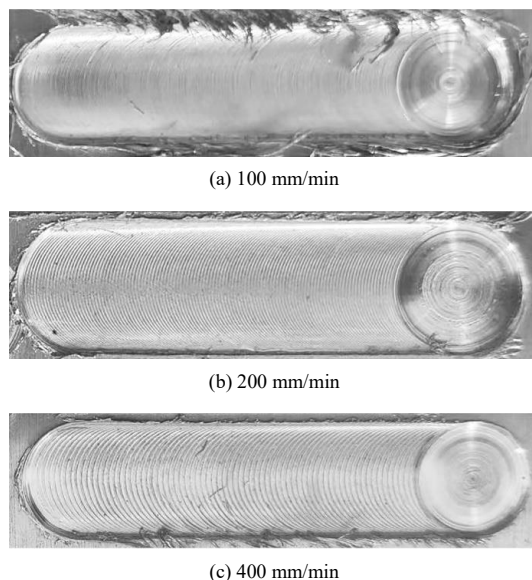


图2 不同工艺参数下改性层的宏观形貌

Fig.2 Morphology of the modified surface under different process parameters

无针FSP后ZK61M的表面三维形貌如图3所示,观测位置均位于加工区中段对应位置。图中可明显观察到改性区表层的弧纹特征,随着行进速度的增加,弧纹间距增加,且弧纹间的“峰-谷”高度差波动越发明显。行进速度为100、200和400 mm/min时,相对高度分别为255.8、388.4和464.6  $\mu\text{m}$ 。随行进速度的增加,摩擦热作用于合金的时间变短,金属塑性、流动性均受到影响,无针FSP改性层表面变得越发不平整,表面粗糙度增加。

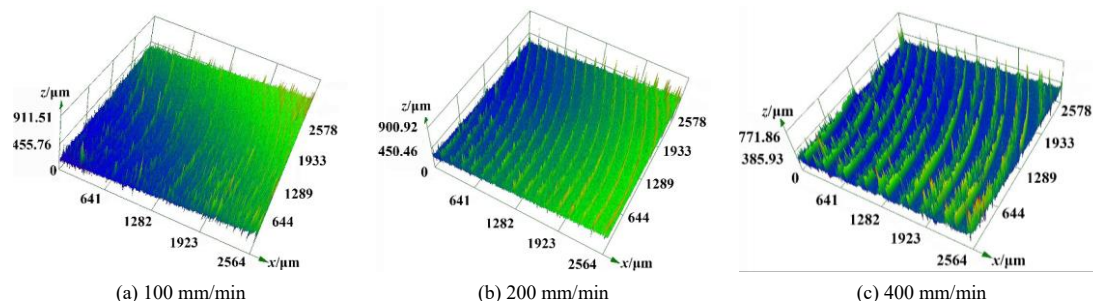


图3 不同工艺参数下改性层表面三维形貌图

Fig.3 3D morphology of the modified surface under different process parameters

### 2.2 微观组织分析

图4为母材及无针FSP表面改性层晶粒分布情况图。ZK61M母材组织严重不均匀,存在大量纤维

状组织,纤维状组织外分布着大量粗大晶粒。无针FSP处理后,原始的粗大晶粒及纤维组织被破碎,同时在轴肩与镁合金的摩擦热作用下发生了动态再

结晶, 镁合金改性层晶粒尺寸变得均匀<sup>[2]</sup>。随行进速度的增加, 晶粒尺寸逐渐变小。当搅拌工具以固定速度旋转时, 随着行进速度的降低, 其作用于被加工区材料的时间增加, 加工区材料的总热输入量增大, 散热速度变慢, 改性层发生再结晶后受到的热影响时间增加, 导致晶粒增大幅度较大; 而行进速度较高时, 搅拌工具停留时间变短, 热输入量较小, 故改性层晶粒长大幅度有限, 晶粒较细。相比有针FSP处理工艺, 无针搅拌头在加工过程中产生的热量及材料变形量较小, 未观察到板材发生翘曲等变形。

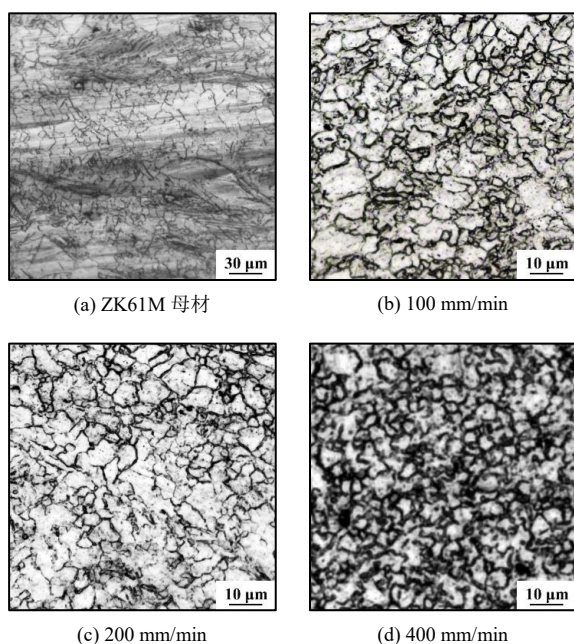


图4 不同工艺参数下表面改性层的微观形貌

Fig.4 Microstructure of the surface modification layer under different process parameters

图5为不同材料XRD图, 可以看出ZK61M镁合金的主要相组成为 $\alpha$ -Mg相和 $MgZn_2$ 相。无针FSP处理后试样中无新相析出, 并未改变合金的物相组成。但无针FSP处理后 $MgZn_2$ 相的信号强度较母材均明显降低, 且不同行进速度的改性层中 $MgZn_2$ 相的含量差异明显, 100 mm/min时 $MgZn_2$ 相含量最低, 400 mm/min时 $MgZn_2$ 相含量最高。FSP加工过程中, 合金随着搅拌工具的旋转发生剧烈塑性变形, 组织中的第二相一部分被破碎, 另一部分受摩擦热效应的影响溶解入基体中<sup>[24]</sup>。当行进速度较低时, 热输入时间和变形时间最长, 第二相的破碎、溶解效果相对充分, 可检测的 $MgZn_2$ 相含量最少。当行进速度为400 mm/min时, 材料所受热效应和破碎效果不

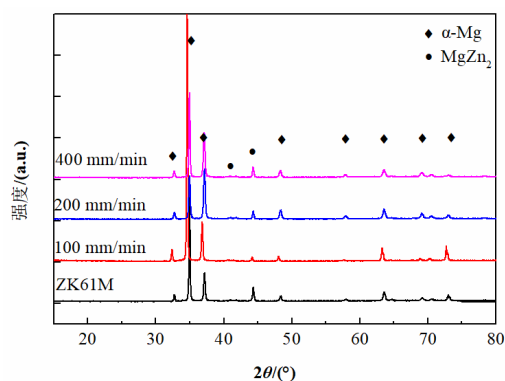


图5 未处理和不同FSP参数下镁合金XRD图

Fig.5 XRD patterns of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

足, 故合金中仍可检测到大量的 $MgZn_2$ 相。

### 2.3 显微硬度分析

未处理和经无针FSP表面改性的ZK61M镁合金显微硬度如图6所示。由图可见, 未处理镁合金显微硬度较低, 平均显微硬度约78.6 HV; 经无针FSP表面改性之后, 改性层的显微硬度明显提高, 且随行进速度的增加而增加, 400 mm/min时改性层的平均显微硬度为119.3 HV, 比未处理ZK61M提高了约50%以上。无针FSP改性过程中, 镁合金组织在摩擦热和大塑性变形的作用下变得致密、均匀, 消除了轧制板材中的显微组织及粗大晶粒。晶粒细化有利于细晶强化效果, 且部分粗大第二相在剧烈塑性变形下破碎, 有利于弥散强化效果的发挥; 少数 $MgZn_2$ 相在摩擦热作用下溶入基体中, 有利于发挥合金元素的固溶强化效果。

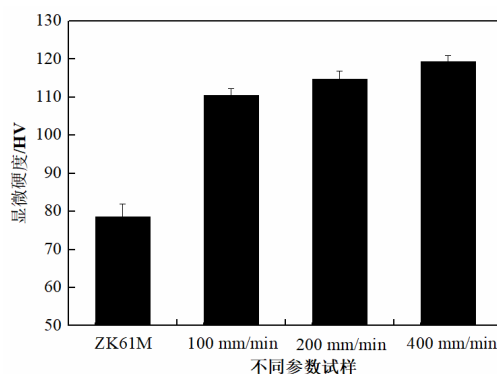


图6 未处理和不同FSP参数下镁合金显微硬度

Fig.6 Microhardness of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

### 2.4 摩擦磨损性能分析

图7是未处理及不同行进速度改性的ZK61M镁

合金表面的摩擦系数随时间变化情况。ZK61M母材摩擦系数明显大于无针FSP处理后试样，且其硬度较低(图6)，在摩擦过程中材料剥落产生的颗粒较多，影响了摩擦副与材料的接触，导致其摩擦系数波动较大。

各试样的平均摩擦系数及10 min磨损量如表2所示。结果显示，无针FSP改性层的摩擦系数和磨损量均低于母材ZK61M，随行进速度的增加，摩擦系

数持续减小。行进速度为400 mm/min时摩擦系数较母材下降了25.8%。但磨损量与行进速度的关系不明显，400和100 mm/min处理的样品磨损量基本一致。一般来说，硬度提高有利于提高材料的抗摩擦磨损性能<sup>[25]</sup>，400 mm/min处理的样品硬度高于100 mm/min处理的样品，但该样品中存在未溶解的粗大相，在摩擦时可能脱落，导致其磨损量低于另2组FSP改性试样。

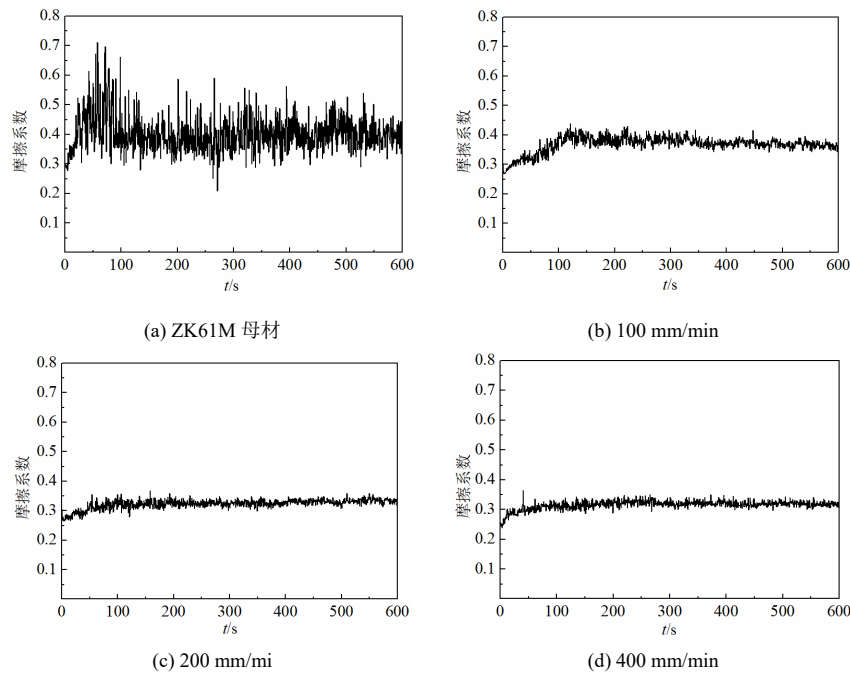


图7 未处理和不同 FSP 参数下镁合金摩擦磨损曲线

Fig.7 Friction and wear curves of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

表 2 未处理和不同 FSP 参数下镁合金平均摩擦系数及磨损量

Tab.2 Friction coefficient and wear loss of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

试样	平均摩擦系数	磨损量/g
ZK61M	0.426	0.1762
100 mm/min	0.369	0.1412
200 mm/min	0.324	0.1389
400 mm/min	0.316	0.1417

图8和图9为不同试样的磨痕形貌图及三维形貌图。可以看出，磨损表面均存在大量平行于磨损方向的犁沟，这是典型的磨粒磨损特征<sup>[26]</sup>。三维形貌观察结果显示，犁沟高度差约为30~150 μm，其中母材磨损面剥落及沟槽最为明显。

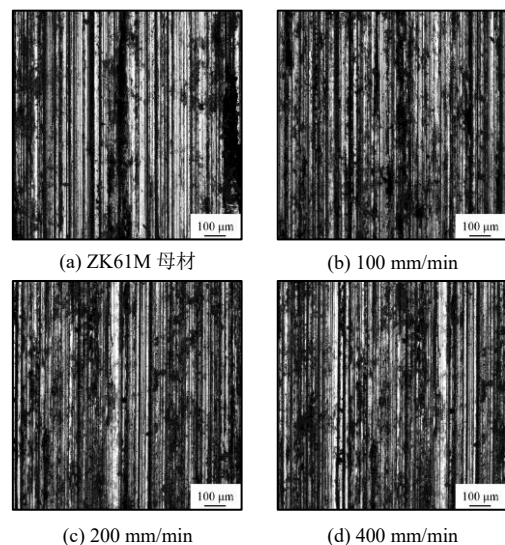


图8 未处理和不同 FSP 参数下镁合金摩擦磨损面形貌  
Fig.8 Worn surface morphology of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

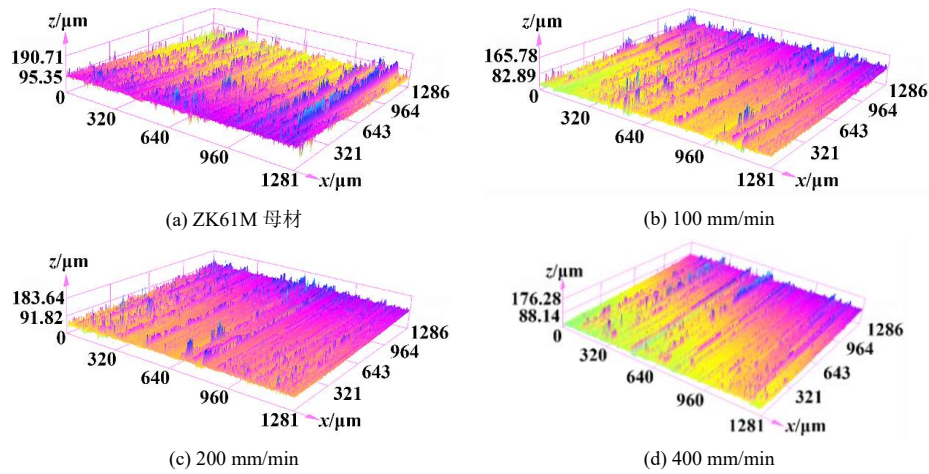


图9 未处理和不同FSP参数下镁合金摩擦磨损面三维形貌

Fig.9 Worn surface 3D morphology of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

2.5 耐腐蚀性能分析

未处理ZK61M及无针FSP改性层在3.5 wt.% NaCl溶液中的极化曲线如图10所示,采用塔菲尔外推法拟合计算的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度如表3所示。自腐蚀电流密度越大,证明材料的腐蚀速率越快,耐腐蚀性能越差。可以看出,未处理的

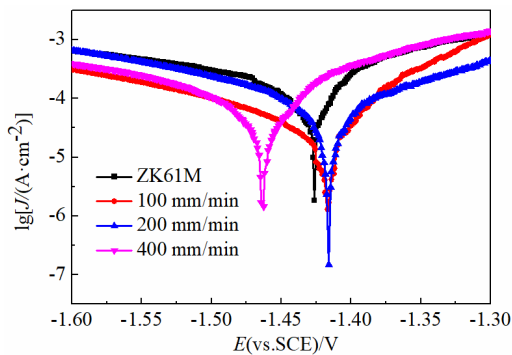


图10 未处理和不同FSP参数下镁合金极化曲线

Fig.10 Polarization curves of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

表3 未处理和不同FSP参数下镁合金腐蚀电位与腐蚀电流密度

Tab.3 Corrosion potential and corrosion current density of untreated and FSP magnesium alloys under different process parameters

试样	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A·cm <sup>-2</sup> )
ZK61M	-1.442	1.995×10 <sup>-4</sup>
100 mm/min	-1.439	4.913×10 <sup>-5</sup>
200 mm/min	-1.395	7.773×10 <sup>-5</sup>
400 mm/min	-1.479	9.292×10 <sup>-5</sup>

ZK61M腐蚀电流密度最高,为1.995×10<sup>-4</sup> A·cm<sup>-2</sup>,无针FSP改性层腐蚀电流密度均远低于未处理材料。材料的耐腐蚀性能影响因素众多,与组织均匀性、界面数量、析出相、成分、杂质等有重要关系<sup>[3,12,27]</sup>。无针FSP技术优化了母材不均匀的组织分布,促进了部分粗大析出相的溶解,有利于材料腐蚀性能的提高。

工艺参数对改性层的耐腐蚀性能也有着较大的影响。随着行进速度的增加,腐蚀电流密度随之变大,行进速度为100 mm/min时,改性层腐蚀电流密度最低,为4.913×10<sup>-5</sup> A·cm<sup>-2</sup>。随行进速度的增加,改性层材料晶粒进一步细化,而细晶材料的晶界密度和内能大于粗晶材料,腐蚀电位低于粗晶材料,导致其在腐蚀介质中降解倾向较高。同时随晶粒的细化,材料中晶界数量大幅增加,加剧了晶间腐蚀。此外,当行进速度较大时,母材中的MgZn<sub>2</sub>相未能充分溶入基体(如图5的XRD所示),可能与基体间形成电位差,导致腐蚀电流密度变大<sup>[27]</sup>。

3 结论

(1) 无针FSP技术制备的ZK61M改性层,组织均匀性得到改善,晶粒细化,硬度、摩擦磨损性能和耐腐蚀性能均优于ZK61M母材。

(2) 随行进速度的增加,改性层晶粒细化,硬度增加,摩擦系数减小。当行进速度为400 mm/min时,改性层显微硬度值最大,达119.3 HV,摩擦系数达到最小值0.316。

(3) 随行进速度的增加,改性层耐腐蚀性能下降。行进速度为100 mm/min时自腐蚀电流密度最

小,为 $4.913 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,远低于未处理母材的电流密度( $1.995 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。

## 参考文献

- [1] 马宗义, 商乔, 倪丁瑞, 等. 镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1597-1617.
- [2] 林君, 张大童, 张文, 等. 前进速率对搅拌摩擦加工 ZK60 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(1): 52-58.
- [3] 黄丽颖. 搅拌摩擦加工对医用镁合金腐蚀和力学性能的影响[J]. 石家庄职业技术学院学报, 2023, 35(4): 7-11.
- [4] 龙飞, 刘瞿, 朱艺星, 等. 搅拌摩擦加工改性 Mg-5Zn 合金的显微组织与耐蚀性能[J]. 金属学报, 2025, 61(7): 1071-1081.
- [5] 朱先勇, 谢良稳, 樊跃香, 等. 搅拌摩擦加工参数对镁合金表面改性层的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(8): 2263-2271.
- [6] 刘晓英, 方敏, 张欣芳, 等. 镁合金的增强改性技术及其在航天领域的应用进展[J]. 功能材料, 2025, 56(4): 4058-4068.
- [7] 罗仲龙, 朱莉, 张鹏, 等. AZ31 镁合金超疏水涂层制备及耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2024, 57(12): 17-26.
- [8] 潘虎成, 王森, 任玉平, 等. 复杂环境下服役的镁合金研究进展[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2025, 46(8): 1-16.
- [9] 肖雯心, 王叶, 马凯, 等. 镁合金表面化学转化涂层研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 192-203.
- [10] 张玺, 韩峰, 闫基森, 等. ZK60 镁合金激光表面熔凝处理及性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(7): 61-67.
- [11] 刘刚, 方诚, 武冰冰, 等. LZ91 镁锂合金植酸处理工艺及耐腐蚀性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(5): 21-27.
- [12] 叶轩成, 陈钰飞, 方倩雯, 等. 前处理工艺对 AZ91D 镁合金电镀镍耐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(2): 43-48.
- [13] 齐左飞, 吴志生, 陈金秋, 等. 镁合金表面耐蚀涂层现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2021, (20): 1-6.
- [14] 郭巧玲. 电弧喷涂法镁合金 AZ31 表面改性性能研究[J]. 材料开发与应用, 2018, (3): 39-44.
- [15] 黄仕高, 陈洪世, 马展雄, 等. 基于阴极沉积  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  薄膜的镁合金超疏水表面改性及其耐蚀性研究[J]. 材料保护, 2024, 57(8): 175-182.
- [16] 邢爽, 张敏, 王震. CIE 色度学系统在微弧氧化热控涂层中的应用[J]. 大学物理实验, 2022, 35(1): 1-6.
- [17] 邢爽, 张敏, 杨佳, 等. 硫酸铜浓度及反应时间对 LA103Z 镁锂合金 PEO 膜层热控性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 285-297.
- [18] 张玺, 韩峰, 赵柯, 等. 离焦量对 ZK60 镁合金激光表面熔凝组织及性能的影响[J]. 有色金属工程, 2023, 13(8): 56-61.
- [19] 薛鹏, 张星星, 吴利辉, 等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1222-1238.
- [20] 蹇文轩, 丛孟启, 雷卫宁. 基于搅拌摩擦加工技术的镁基复合材料研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 48-64.
- [21] 高士康, 赵洪运, 李高辉, 等. 铝基复合材料搅拌摩擦焊研究现状[J]. 材料导报, 2022, 36(24): 149-157.
- [22] 刘刚, 周元森, 张林, 等. 搅拌摩擦加工对 AZ31 镁合金腐蚀行为的影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(2): 52-61.
- [23] SONG W W, XU X J, ZUO D W, et al. Study on the corrosion of copper alloy by friction stir surface processing[J]. Anti-corrosion Methods and Materials, 2016, 63(3): 190-195.
- [24] 谢广明, 马宗义, 耿林. 搅拌摩擦焊接参数对 ZK60 镁合金接头微观组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, (6): 665-670.
- [25] 王若天, 朱帅帅. Mg-Gd-Zn-Zr 镁合金的摩擦磨损行为[J]. 金属热处理, 2024, 49(11): 23-28.
- [26] PATIL A, BONTA S, RAMESH M R. Effect of ECAP on sliding wear behaviour of Mg-Zn-Gd-Zr alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 20: 97-102.
- [27] 李普博, 刘旭辉, 邹天乐, 等. 激光增材制造镁合金的摩擦磨损和腐蚀性能[J]. 西北工程技术学报, 2025, 24(1): 88-96.