

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.02.008

搅拌摩擦加工对 AZ31 镁合金腐蚀行为的影响

刘刚^{1,2*}, 周元森^{1,2}, 张林³, 闫基森^{1,2}, 张玺^{1,2}, 解芳^{1,2}

(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; 3. 洛阳轴承研究所有限公司,
河南 洛阳 471039)

摘要: 为了探究搅拌摩擦加工对 AZ31 镁合金腐蚀性能的影响, 采用体视镜、光学显微镜、接触角测量仪、电化学工作站等设备研究了 AZ31 母材与不同工艺参数下 FSP-AZ31 在 3.5 wt.%NaCl 溶液中的腐蚀行为。结果表明: 在转速 800~1200 r/min、加工速度 80~120 mm/min 范围内, FSP-AZ31 与母材腐蚀机制均为点蚀。与母材相比, FSP-AZ31 点蚀程度较轻, 自腐蚀电流密度减小, 阻抗增大, FSP 均能够提高 AZ31 镁合金的耐腐蚀性能。当加工速度为 100 mm/min 时, 随着旋转速度增大, FSP-AZ31 自腐蚀电流密度不断减小, 耐腐蚀性能不断提升。试样在旋转速度为 1200 r/min 时自腐蚀电流密度达到最小值 $9.2 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。当旋转速度为 1000 r/min 时, 随着加工速度减小, FSP-AZ31 自腐蚀电流密度不断减小, 耐腐蚀性能不断提升。在加工速度为 80 mm/min 时试样的自腐蚀电流密度达到最小, 其值为 $7.6 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。相比 AZ31 镁合金, 1000 r/min 和 80 mm/min 条件下 FSP-AZ31 的接触角由 29.703° 上升至 58.448° 。

关键词: 搅拌摩擦加工; AZ31 镁合金; 工艺参数; 接触角; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

Effect of friction stir processing on corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy

Liu Gang^{1,2*}, Zhou Yuansen^{1,2}, Zhang Lin³, Yan Jisen^{1,2}, Zhang Xi^{1,2}, Xie Fang^{1,2}

(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; 3. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: In order to investigate the effect of friction stir processing on the corrosion performance of AZ31 magnesium alloy, the corrosion behavior of AZ31 base material and FSP-AZ31 under different process parameters in 3.5 wt.% sodium chloride solution was studied using stereoscopy, optical microscopy, contact angle measurement, electrochemical workstation and other equipments. The results show that the corrosion mechanism of FSP-AZ31 and the base metal is pitting corrosion in the range of rotating speed 800—1200 r/min and processing speed 80—120 mm/min. Compared with the base metal, FSP-AZ31 has a lighter degree of pitting corrosion, the self-corrosion current density is reduced, the impedance is increased, and FSP can improve the corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy. When

收稿日期: 2023-07-19

修回日期: 2023-08-19

*通信作者: 刘刚(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 轻合金塑性成型及连接技术, email: liugang@nyist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51701026); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102230049、232102221022); 南阳理工学院交叉科学研究项目(520067)

the processing speed is 100 mm/min, as the rotation speed increases, the self-corrosion current density of FSP-AZ31 is continuously decreased, and the performance of corrosion resistance is continuously improved. When the rotation speed is 1200 r/min, the self-corrosion current density of the sample reaches the minimum value of $9.2 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. When the rotation speed is 1000 r/min, as the processing speed decreases, the self-corrosion current density of FSP-AZ31 is continuously decreased, and the performance of corrosion resistance is continuously improved. When the processing speed is 80 mm/min, the corrosion current density of the sample reaches the minimum, with a value of $7.6 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Compared to AZ31 magnesium alloy, the contact angle of FSP-AZ31 is increased from 29.703° to 58.448° under 1000 r/min and 80 mm/min.

Keywords: friction stir processing; AZ31 magnesium alloy; process parameters; contact angle; corrosion performance

镁合金至今为止作为最轻的金属结构材料,由于其回收成本低廉兼具较高的比强度、易于铸造和锻造,以及便于切削加工等特点被广泛应用在军用、民用、航空航天等领域^[1-6]。但是镁合金自身的平衡电位较负,容易发生电化学腐蚀,极大程度上限制了镁合金的应用范围。

搅拌摩擦加工(Friction stir processing, FSP)通过快速旋转的搅拌头使加工材料发生剧烈塑性变形和混合,使其微观组织均匀、致密化^[7-11]。搅拌摩擦加工是一种操作简单、生产效率高、绿色无污染的表面改性技术,由于其适用性较好以及可以改变组织与缺陷(如细化晶粒、消除铸造孔洞等),具有十分广泛的应用前景^[12-15]。目前,国内外很多学者已经对其进行了广泛的研究,项超等^[16]通过观察金相发现搅拌摩擦加工有利于使镁合金中粗大且不均匀的第二相弥散且均匀地分布在加工区域。Wang Y 等^[17]采用 FSP 加工铸态 Mg-6Zn-1Y-0.5Zr 合金,研究表明随着前进速度的加快,晶粒更加细小,第二相均匀分布在基体内。龙飞等^[18]通过使用搅拌摩擦加工技术对镁合金进行加工,认为镁合金中的粗大的第二相晶粒的存在是使镁合金耐腐蚀性能显著降低的主要原因。刘奋军等^[19]通过将搅拌摩擦加工后的镁合金加工区域置于 3.5 wt.%NaCl 溶液中检测加工后区域在溶液中的动电位极化曲线。研究发现,经过搅拌摩擦加工的镁合金自腐蚀电位提高,耐腐蚀性能提高。目前,国内外主要集中研究关于不同工艺参数下镁合金板材进行搅拌摩擦加工后的组织和力学性能变化,以及镁合金经 FSP 后第二相对其腐蚀行为的影响,但针对不同工艺参数下 FSP 对 AZ31 镁合

金耐腐蚀性能的影响研究较少。

本文采用不同工艺参数(旋转速度为 800 ~ 1000 r/min,加工速度为 80 ~ 120 mm/min)的 FSP-AZ31 以及 AZ31 母材在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的腐蚀行为,通过体视镜以及光学显微镜观察试样的腐蚀形貌,用电化学工作站测量试样的极化曲线以及阻抗来研究搅拌摩擦加工对 AZ31 耐腐蚀性能的影响。

1 材料与方法

本次实验选用 3 mm 的 AZ31 镁合金轧制板材进行搅拌摩擦加工,将镁合金板材进行线切割,切割后的尺寸为 200 mm×35 mm×3 mm。切割好的 AZ31 镁合金板材在搅拌摩擦加工之前使用砂纸打磨去除材料表面氧化物、油污等杂质,然后再经过丙酮清洗。将处理好的 AZ31 镁合金固定在铣床的工作台上,使用改装的 XA5032 立式升降台铣床进行逆时针旋转搅拌摩擦加工。搅拌摩擦加工选取的工艺参数如表 1 所示,使用搅拌工具轴肩的直径是 12 mm,使用具有右螺纹的圆锥形搅拌头,该搅拌头的长度为 2.5 mm,搅拌头顶端的直径为 2 mm,以及搅拌摩擦加工过程时搅拌头的倾斜角度为 3° 。

对 AZ31 母材以及不同加工参数的 FSP-AZ31 板材进行线切割作为浸泡试样。对 AZ31 母材和搅拌摩擦加工试样的上表面搅拌加工区用砂纸打磨并抛光,然后将其分为 4 组(其中一组为空白对照)在 3.5 wt.%NaCl 溶液中分别浸泡不同的时间(2 h、5 h、12 h)。随后通过 ZSA0850 体视镜和 OLYMPUS-BX53M 正置光学显微镜对试样表面形貌进行观察。

之后使用型号为SZ-CAMC33接触角测量仪测量AZ31母材和耐腐蚀性能最好的FSP-AZ31试样与3.5 wt.% NaCl溶液之间的接触角。通过Autolab PGSTAT 302N电化学工作站测量试样的极化曲线以及阻抗,采用三电极系统,辅助电极为Pt电极,参比电极为氯化银电极,试样为工作电极。极化曲线电位扫描范围为 $-1.35 \sim -1.75$ V,扫描速率为1 mV/s,EIS谱测量的频率范围为 $5 \times 10^{-3} \sim 10^5$ Hz,正弦波激励信号幅值为 ± 5 mV。

表1 搅拌摩擦加工参数

Tab.1 The parameters of friction stir processing

试样	下压量/mm	旋转速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	加工速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
1 [#]	0.15	1000	80
2 [#]	0.15	1000	100
3 [#]	0.15	1000	120
4 [#]	0.15	800	100
5 [#]	0.15	1200	100
6 [#]	AZ31 镁合金母材(BM)		

2 结果与讨论

2.1 腐蚀形貌分析

如图1(a)、(c)、(e)、(g)、(i)和(k)所示分别为FSP-AZ31试样以及母材试样浸泡2 h的形貌图,图1(b)、(d)、(f)、(h)、(j)和(l)为对应的局部放大图,试样经过2 h浸泡之后均发生了点蚀(图中红圈为点蚀坑),试样表面形貌均为镁合金基体以及点蚀扩展形成的局部腐蚀、蚀坑,但是FSP-AZ31试样点蚀的程度远比母材轻。1[#]试样的表面完整度最好,5[#]试样次之,试样表面仅发生轻微的点蚀和扩展,产生腐蚀点的数量也相对母材少。4[#]试样的腐蚀面积较母材大,但是母材的腐蚀深度深,腐蚀区域的颜色也较4[#]试样重,能够明显看见较深的蚀坑。根据试样的腐蚀形貌可知母材的耐腐蚀性能不及FSP-AZ31试样。

如图2(a)、(c)、(e)、(g)、(i)和(k)所示分别为FSP-AZ31和母材试样浸泡5 h的形貌图,图2(b)、(d)、(f)、(h)、(j)和(l)为对应的局部放大图,图2所示经过浸泡5 h之后,所有试样的表面基体均受到更为严重的腐蚀破坏。1[#]试样的基体被裂纹分割,中间夹杂着明显的点蚀坑(图中红圈为点蚀坑),2[#]试样呈现出FSP后轴肩作用的环状纹理。3[#]试样在右

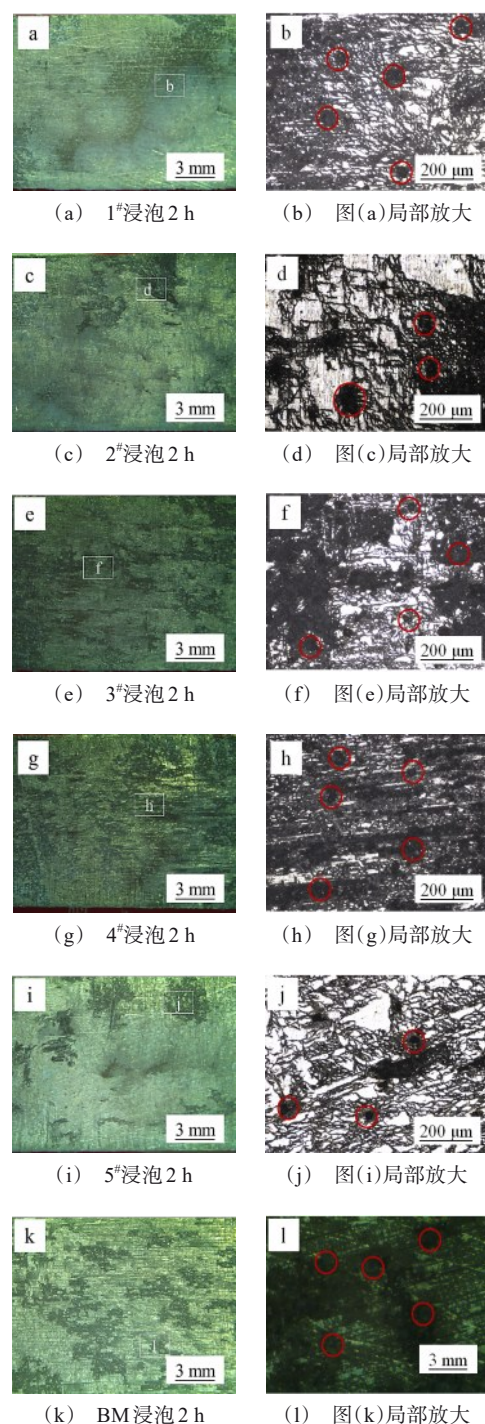


图1 不同工艺参数下试样在3.5 wt.% NaCl溶液中浸泡2 h的腐蚀形貌

Fig.1 Corrosion morphology of samples immersed in 3.5 wt.% NaCl solution for 2 h under different process parameters

下位置出现了明显的局部腐蚀区域并产生了较深的蚀坑。4[#]试样的表面腐蚀也为局部腐蚀,且腐蚀坑

较大也更为密集。 $5^{\#}$ 试样的表面仅存在点蚀以及轻微的局部腐蚀,并没有出现较大的蚀坑。而母材在

经过 5 h 浸泡之后,点蚀扩展的程度比 FSP-AZ31 试样高,局部腐蚀面积增大,试样表面腐蚀程度严重。

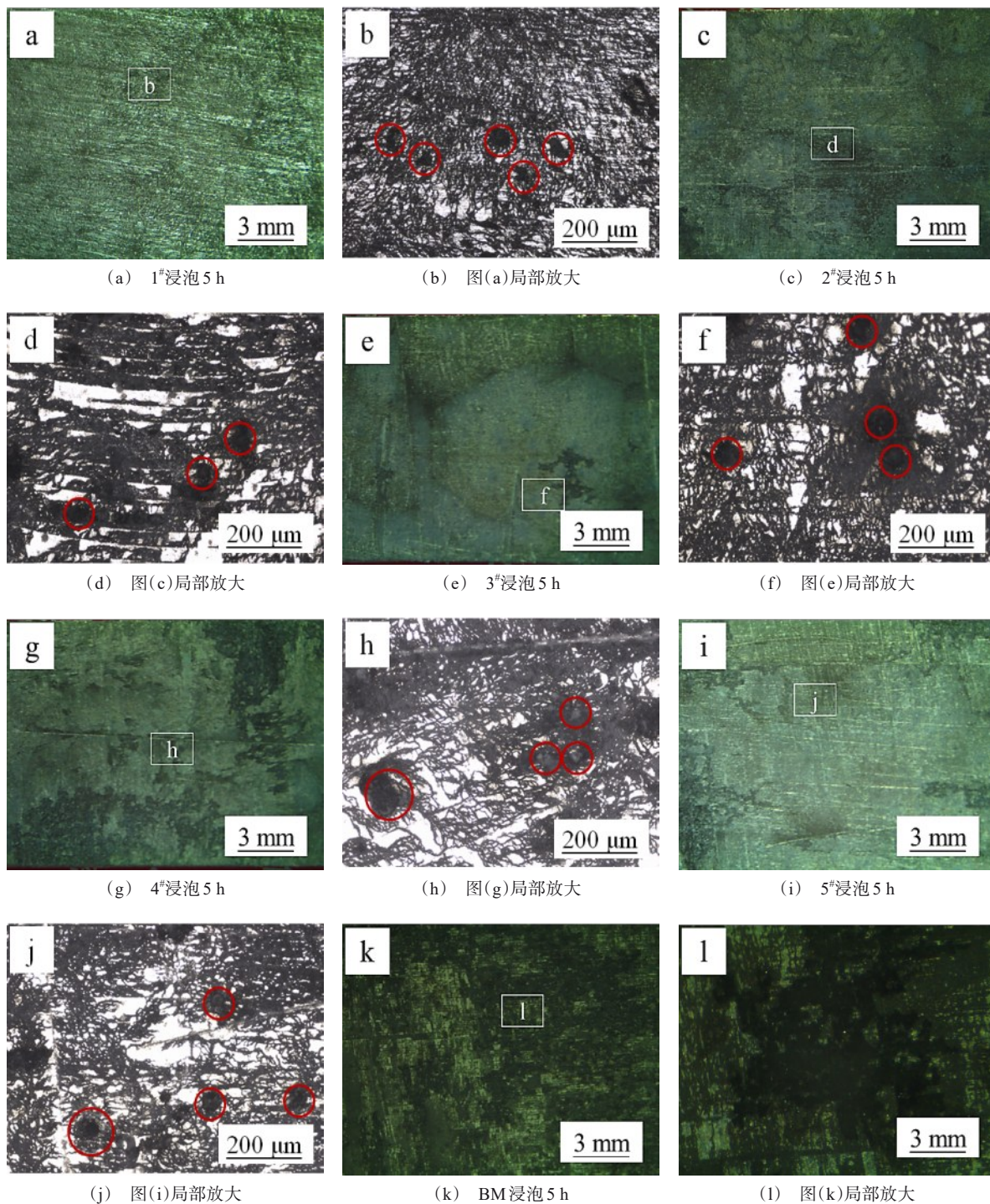


图 2 不同工艺参数下试样在 3.5 wt.%NaCl 溶液中浸泡 5 h 的腐蚀形貌

Fig.2 Corrosion morphology of samples immersed in 3.5 wt.% NaCl solution for 5 h under different process parameters

如图3浸泡12 h后1[#]、2[#]、3[#]、4[#]和5[#]试样表面均受到不同程度的腐蚀,但是相比于母材轻,试样的表面被厚度不一的腐蚀产物所覆盖,表面基体较多的区域更加明亮,而蚀坑部位颜色较深。4[#]试样的表面出现了腐蚀产物脱落的现象,而母材的

表面已经被完全破坏,试样表面被厚度不均的腐蚀产物所覆盖,局部腐蚀坑面积和深度大,形成了粗糙的腐蚀面,右部的蚀坑的颜色较左部深,其原因是由于裂纹的扩展使母材表面的腐蚀产物发生了脱落。

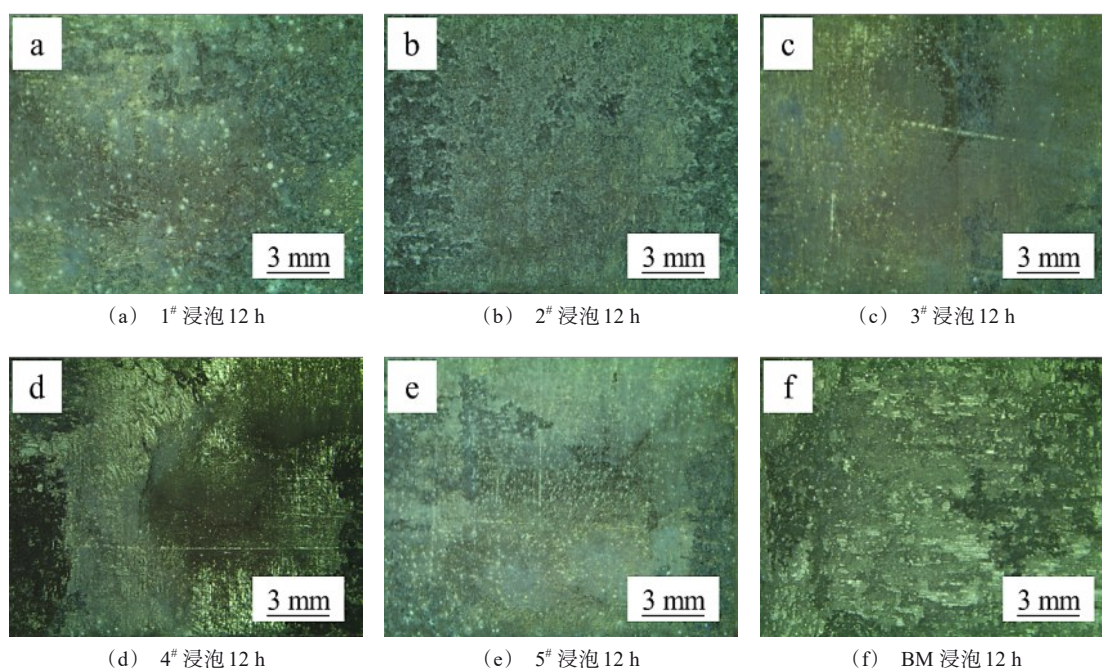


图3 浸泡12 h的腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphology after soaking for 12 h

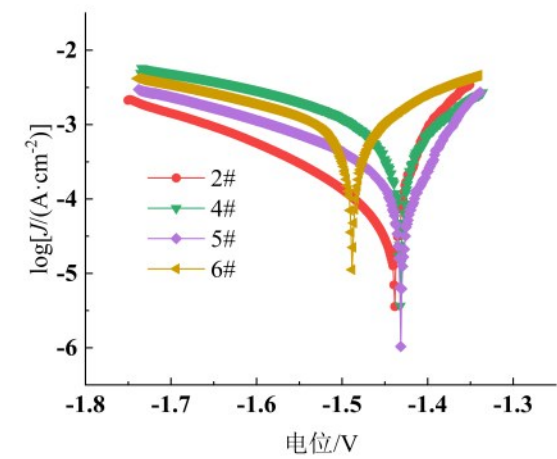
2.2 旋转速度对耐腐蚀性能的影响

图4为不同旋转速度下FSP-AZ31的极化曲线和阻抗谱,表2为BM以及不同旋转速度下FSP-AZ31加工区的电化学拟合参数。由图4(a)和表2可知自腐蚀电流密度由高到低的顺序为:BM>4[#]>2[#]>5[#]。自腐蚀电流密度是指材料在发生电化学腐蚀时,描述材料的腐蚀速率快慢的一个指标,是一个热力学参数,材料的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^[20]。图4(b)阻抗图由高频容抗弧、低频容抗弧以及低频感抗弧组成。高频容抗弧的半径越大表明试样的腐蚀性能越好,而低频容抗弧与溶液中的电解质在膜层的扩散有关。低频感抗弧的出现表明材料发生了点蚀。通过图1可知所有试样均发生了点蚀。试样的高频阻抗弧半径由大到小的顺序为5[#]>2[#]>4[#]>BM。说明耐腐蚀性能由大到小的顺序为5[#]、2[#]、4[#]和BM,与极化曲线的结果一致。所以试样的耐腐蚀性能随着旋转

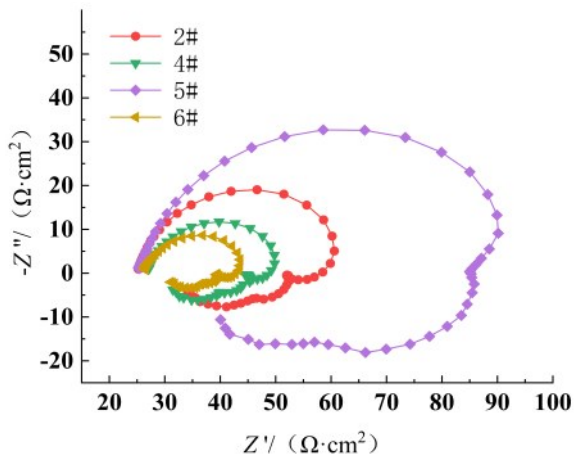
速度的增加而不断增加且增加速率不断减小。

2.3 加工速度对耐腐蚀性能的影响

由图5(a)和表3可知腐蚀电位由高到低顺序为:1[#]>2[#]>3[#]>BM,腐蚀电位最大为-1.392 V,而自腐蚀电流密度由高到低的顺序为:BM>3[#]>2[#]>1[#],自腐蚀电流密度最小为 $7.6 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。腐蚀电位越正说明材料腐蚀性能越好,而腐蚀电流密度越小材料的腐蚀性能越好。所以试样腐蚀性能由高到低为1[#]、2[#]、3[#]、BM。图5(b)阻抗图中高频阻抗弧半径由大到小顺序为1[#]>2[#]>3[#]>BM。说明腐蚀性能由大到小的顺序为1[#]、2[#]、3[#]、BM与极化曲线的结果一致。所有试样均出现了低频感抗弧,说明在腐蚀过程中所有试样中均发生了点蚀。结果表明搅拌摩擦加工确实能够提升材料的腐蚀性能,在旋转速度为1000 r/min,加工速度范围为80~120 mm/min时,随着加工速度的降低,试样耐腐蚀性能不断提升。



(a) 极化曲线



(b) 阻抗谱

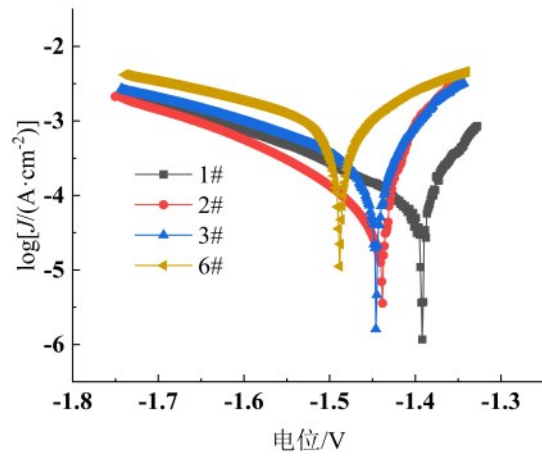
图 4 不同旋转速度下 FSP-AZ31 加工区在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线和阻抗谱

Fig.4 Polarization curves and impedance spectrum of FSP-AZ31 processing zone in 3.5% NaCl solution at different rotation speeds

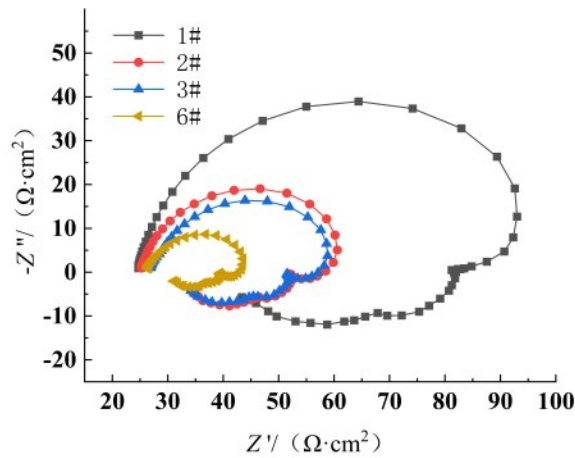
表 2 BM 与不同旋转速度下 FSP-AZ31 加工区电化学拟合参数

Tab.2 Electrochemical fitting parameters of BM and FSP-AZ31 processing zone at different rotation speeds

试样	腐蚀电位/ V(vs. SCE)	自腐蚀电流密度/ (A·cm ⁻²)
2 [#]	-1.438	9.6×10 ⁻⁵
4 [#]	-1.432	4.4×10 ⁻⁴
5 [#]	-1.431	9.2×10 ⁻⁵
6 [#] (BM)	-1.488	6.0×10 ⁻⁴



(a) 极化曲线



(b) 阻抗谱

图 5 不同加工速度下 FSP-AZ31 加工区在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的极化曲线和阻抗谱

Fig.5 Polarization curves and electrochemical impedance spectrum of FSP-AZ31 processing zone in 3.5 wt.% NaCl solution at different processing speeds

表 3 BM 以及不同加工速度 FSP-AZ31 加工区电化学拟合参数

Tab.3 Electrochemical fitting parameters of BM and FSP-AZ31 processing zone at different processing speeds

试样	腐蚀电位/ V(vs. SCE)	自腐蚀电流密度/ (A·cm ⁻²)
1 [#]	-1.392	7.6×10 ⁻⁵
2 [#]	-1.438	9.6×10 ⁻⁵
3 [#]	-1.446	2.2×10 ⁻⁴
6 [#] (BM)	-1.488	6.0×10 ⁻⁴

2.4 浸泡时间对耐腐蚀性能的影响

图6和图7分别为BM以及不同加工参数FSP-

AZ31加工区浸泡不同时间的极化曲线和阻抗谱图,表4为电化学拟合参数。

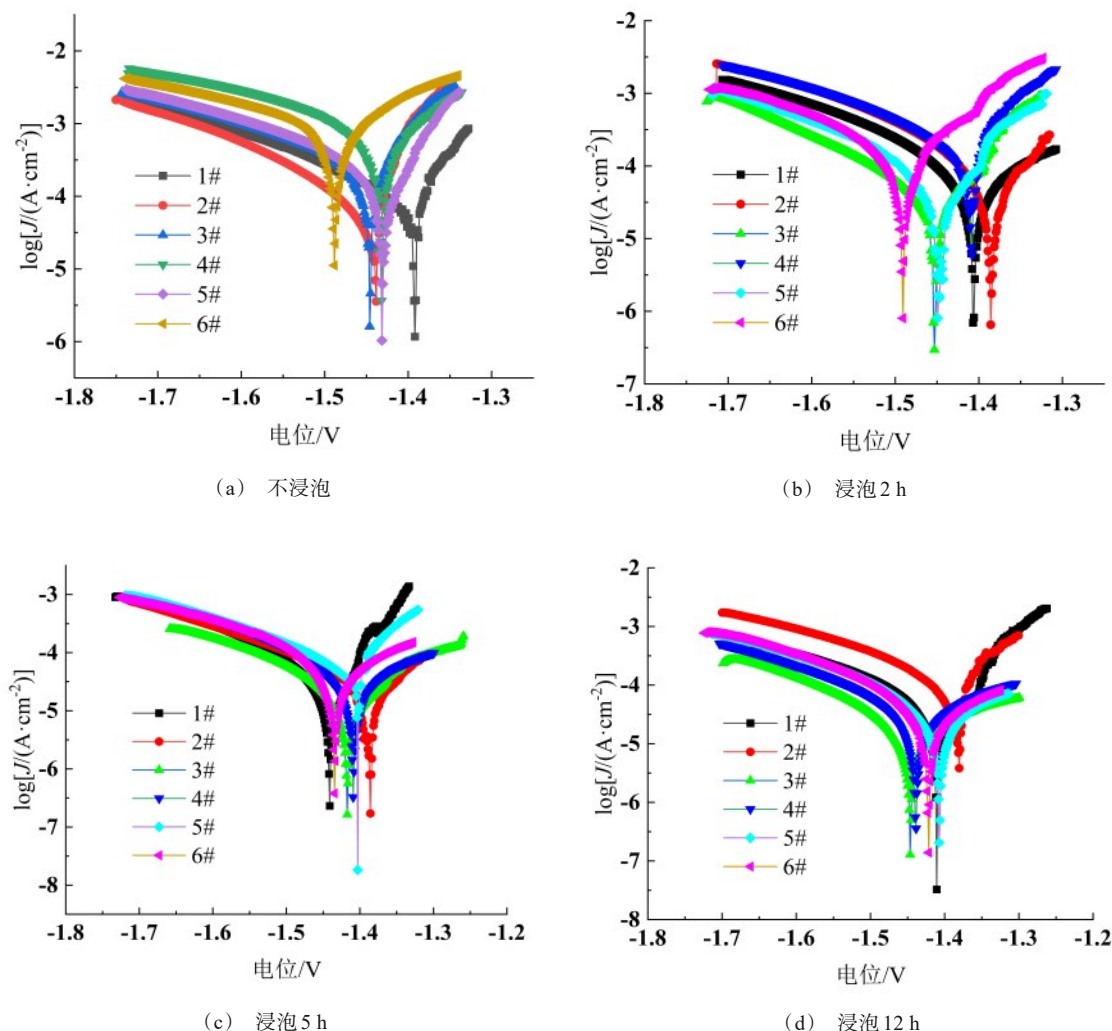


图6 BM以及不同加工参数FSP-AZ31加工区浸泡不同时间的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of BM and FSP-AZ31 processing zone with different processing parameters for different soaking times

由图6、7以及表4可发现随着浸泡时间的延长,其他试样(除了2#试样外)均表现为自腐蚀电流密度减小以及阻抗增大,试样的耐腐蚀性能得到提高。其原因是试样在浸泡处理的过程中产生了腐蚀产物,这些腐蚀产物不断在试样表面聚集增厚形成了保护膜,这一过程在一定程度上阻碍了Cl被基体吸附,使耐腐蚀性能得到提升。试样在浸泡时阻抗图除了高频容抗弧与低频感抗弧出现以外,在浸泡5 h时的3#试样以及浸泡12 h时1#与5#试样低频部分出

现了扩散曲线,扩散曲线的产生是由于电化学反应时的反应物在电极与溶液之中扩散所引起的。

2.5 搅拌摩擦加工前后的接触角

AZ31镁合金在未经过搅拌摩擦加工和在1000 r/min、80 mm/min(试样1#)工艺参数条件下搅拌摩擦加工后,3.5 wt.% NaCl在其表面的接触角如图8所示。搅拌摩擦加工后,AZ31镁合金表面接触角由未经过搅拌摩擦加工的29.703°增加到58.448°,表明经过搅拌摩擦加工后界面亲水性下

降,从而使得腐蚀性介质在 AZ31 镁合金表面铺展

面积减小,提高了 AZ31 镁合金的耐腐蚀性能。

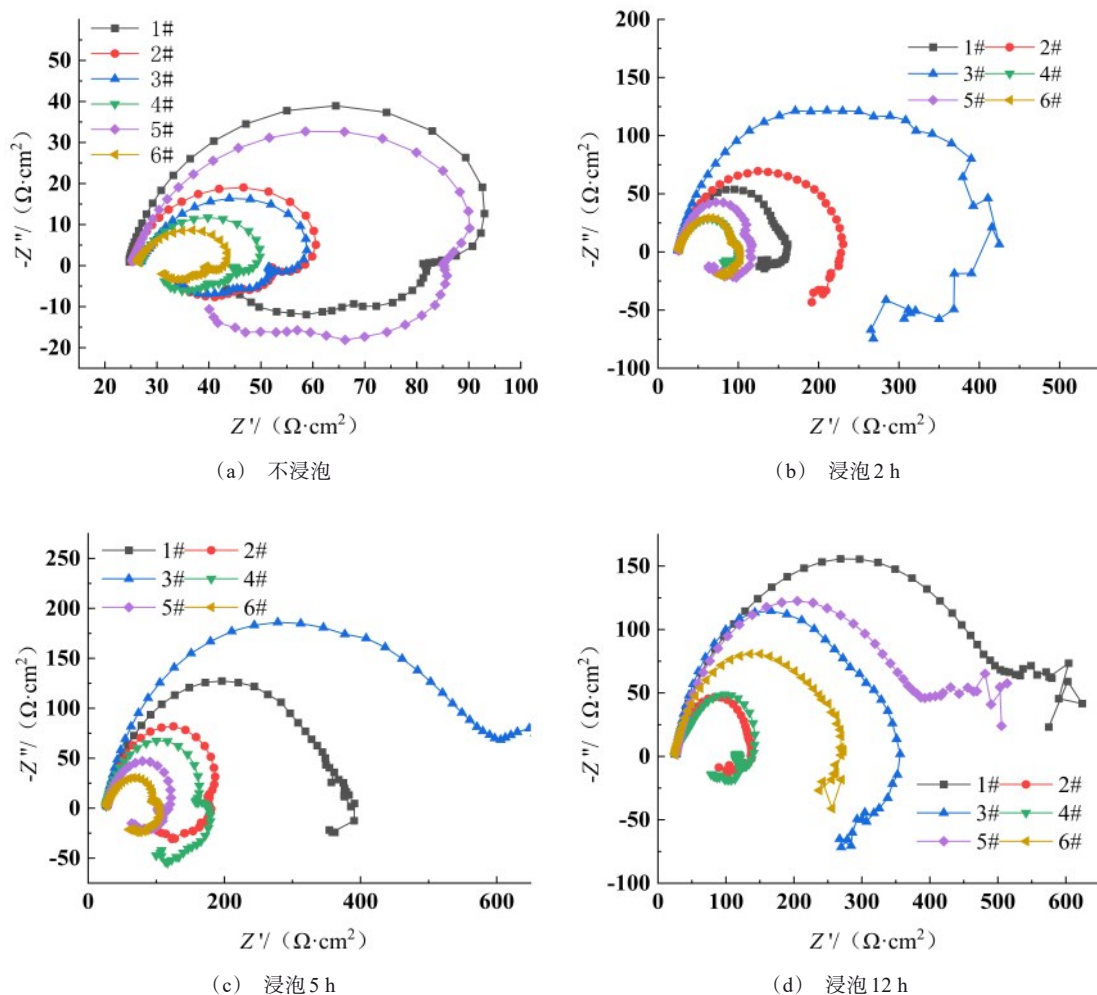


图 7 BM 以及不同加工参数 FSP-AZ31 加工区浸泡不同时间的阻抗谱

Fig.7 Electrochemical impedance spectrum of BM and FSP-AZ31 processing zone with different processing parameters soaking for different time

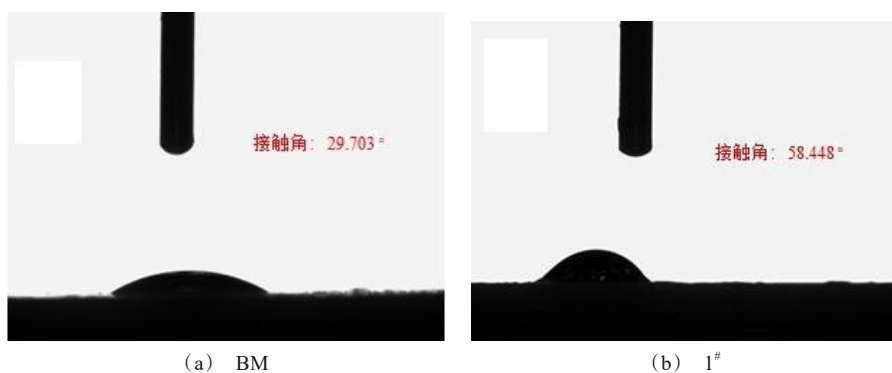


图 8 AZ31 镁合金搅拌摩擦加工前后的接触角

Fig.8 Contact angle of AZ31 magnesium alloy before and after friction stir processing

表4 BM以及不同加工参数FSP-AZ31加工区浸泡不同时间的电化学拟合参数

Tab.4 Electrochemical fitting parameters of BM and FSP-AZ31 processing zone with different processing parameters soaking for different time

试样	浸泡时长/h	腐蚀电位/V(vs.SCE)	自腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)
1 [#]	0	-1.392	7.6×10 ⁻⁵
	2	-1.407	4.7×10 ⁻⁵
	5	-1.441	1.7×10 ⁻⁵
	12	-1.411	1.4×10 ⁻⁵
2 [#]	0	-1.438	9.6×10 ⁻⁵
	2	-1.380	4.5×10 ⁻⁵
	5	-1.386	2.3×10 ⁻⁵
	12	-1.380	7.3×10 ⁻⁵
3 [#]	0	-1.446	2.2×10 ⁻⁴
	2	-1.453	3.0×10 ⁻⁵
	5	-1.417	1.7×10 ⁻⁵
	12	-1.447	1.5×10 ⁻⁵
4 [#]	0	-1.432	4.4×10 ⁻⁴
	2	-1.408	1.8×10 ⁻⁴
	5	-1.409	2.8×10 ⁻⁵
	12	-1.438	2.3×10 ⁻⁵
5 [#]	0	-1.431	9.2×10 ⁻⁵
	2	-1.450	8.3×10 ⁻⁵
	5	-1.403	3.9×10 ⁻⁵
	12	-1.407	1.4×10 ⁻⁵
6 [#] (BM)	0	-1.488	6.0×10 ⁻⁴
	2	-1.491	1.3×10 ⁻⁴
	5	-1.434	6.1×10 ⁻⁵
	12	-1.421	3.7×10 ⁻⁵

3 结论

(1)将不同加工参数的FSP-AZ31与母材在3.5 wt.%NaCl溶液中进行浸泡不同时间处理,通过腐蚀形貌观察发现母材表面发生了严重的局部腐蚀且产生了较大面积的腐蚀坑,而FSP-AZ31试样腐蚀程度不及母材。对FSP-AZ31和AZ31试样进行阻抗以及极化曲线测量,得出阻抗升高与自腐蚀电流密度下降,FSP-AZ31试样的耐腐蚀性能要高于母材。在800~1200 r/min旋转速度范围、80~120 mm/min加工速度范围内,搅拌摩擦加工均能够提升AZ31的耐腐蚀性能。

(2)旋转速度为1000 r/min,试样的自腐蚀电流密度随着加工速度增加而不断变大,且在浸泡相同时间条件下试样表面腐蚀程度也越大,耐腐蚀性能不断降低。在加工速度为80 mm/min时,试样的自

腐蚀电流密度降至最小值 $7.6 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

(3)加工速度为100 mm/min,试样随着旋转速度增大,自腐蚀电流密度不断下降,且试样表面在浸泡相同时间条件下腐蚀程度也越小,耐腐蚀性能不断提升。在旋转速度1200 r/min下的自腐蚀电流密度达到最小值,为 $9.2 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。AZ31镁合金表面的接触角为 29.703° ,搅拌摩擦加工后,FSP-AZ31的接触角提高至 58.448° 。

参考文献

- [1] 李慧,徐荣正,侯艳喜,等. 镁锂合金的焊接技术及其在航天领域的应用[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 1-4.
- [2] 冯凯,李丹明,何成旦,等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 140-144.
- [3] Islam R, Hadadzadeh A, Wells M, et al. Characterization and analysis of hot compression behaviors of an ultra-

- light Mg-Li-Al Alloy [J]. *International Journal of Light Weight Materials and Manufacture*, 2019, 2(3): 217-226.
- [4] 圣冬冬, 施颖杰, 王茜茜, 等. 超轻镁锂合金的研究现状与发展趋势[J]. *轻合金加工技术*, 2021, 49(8): 8-12.
- [5] 江雯, 蒋璐瑶, 黄伟九, 等. 退火处理对搅拌摩擦加工 LZ91 双相镁锂合金微观组织及力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 307-311.
- [6] 李瑞红, 蒋斌, 陈志军, 等. Y 和 Sr 对 Mg-14Li-1Al 合金组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(14): 67-70.
- [7] 高雪, 张郑, 王快社, 等. 搅拌摩擦加工镁合金超塑性最新研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(5): 138-142.
- [8] 张会, 王进, 李宝阁, 等. AZ31 镁合金薄板的无针搅拌摩擦加工[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(3): 87-93.
- [9] 朱永成, 左立生, 顾胜宇, 等. 搅拌摩擦加工研究进展[J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 221-229.
- [10] 李莎莎, 王磊, 吕欣蕊, 等. 基于搅拌摩擦加工的汽车钛合金组织与性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3): 71-76.
- [11] 李阳, 刘瞿, 龙飞, 等. 搅拌摩擦加工 Mg-Zn 合金空蚀-腐蚀交互作用研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(2): 692-698.
- [12] 邹文兵, 张旭亮, 潘龙, 等. 铸造镁合金搅拌摩擦加工工艺及其应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(7): 992-997.
- [13] 冷文兵, 罗铭强, 陈树钦. 摩擦搅拌焊接和摩擦搅拌加工技术的应用现状[J]. *轻合金加工技术*, 2015, 43(11): 14-18, 23.
- [14] 江静华, 马爱斌, 赵建华, 等. 铝合金搅拌摩擦加工研究进展和应用[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(17): 5-8, 12.
- [15] 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*, 2023, 53(8): 2263-2271.
- [16] 项超. 搅拌摩擦加工镁合金的超塑性[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(18): 10-14.
- [17] Wang Y, Huang Y, Meng X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Mg-Zn-Y-Zr alloy during friction stir processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 69(6): 875-883.
- [18] 龙飞, 陈高强, 刘瞿, 等. 搅拌摩擦加工调控镁合金组织与耐腐蚀性能的发展现状与趋势[J]. *上海航天*, 2021, 38(2): 149-156.
- [19] 刘奋军, 张媛媛, 刘建勃, 等. 镁合金表面高转速搅拌摩擦加工区的微观组织和耐腐蚀性能[J]. *表面技术*, 2021, 50(3): 330-337.
- [20] Hoog C O, Birbilis N, Estrin Y. Corrosion of pure Mg as a function of grain size and processing route[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(6): 579-582.