

镁合金高转速搅拌摩擦焊工艺研究

侯晶, 秦鼎强, 毛悦, 倪昱, 肖旋, 傅莉

(西北工业大学 材料学院 凝固国家重点实验室 陕西省摩擦焊接技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究镁合金高转速搅拌摩擦焊工艺及其对组织与性能的影响规律。**方法** 采用光学显微镜观察以及拉伸性能测试等方法, 探索了1.5 mm厚AZ31B镁合金高转速搅拌摩擦焊接工艺, 对其接头组织与力学性能进行了测试分析。**结果** 采用6000 r/min转速时, 随着焊速从600 mm/min降低至100 mm/min, 焊接接头隧道型孔洞缺陷消失; 采用600 mm/min焊速时, 2000~4000 r/min转速范围内可获得无缺陷的接头。拉伸测试结果表明, 6000 r/min-100 mm/min焊接工艺下接头的拉伸性能最优, 抗拉强度为235.33 MPa, 为母材强度的87.92%。**结论** 镁合金采用高转速搅拌摩擦工艺可获得无缺陷的焊接接头, 且采用高转速匹配低焊速的工艺可使接头的拉伸性能得到提升。

关键词: 高转速搅拌摩擦焊; AZ31B镁合金; 微观组织; 拉伸性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.019

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0127-08

High Speed Friction Stir Welding Process of Magnesium Alloy

HOU Jing, QIN Ding-qiang, MAO Yue, NI Yu, XIAO Xuan, FU Li

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the high-speed friction stir welding process of magnesium alloy and its influence on microstructure and properties. The high-speed friction stir welding process of 1.5 mm thick AZ31B magnesium alloy was investigated by optical microscopy and tensile properties test. The joint microstructure and mechanical properties were tested and analyzed. As a result, when the rotational speed was 6000 r/min, along with the welding speed decreased from 600 mm/min to 100 mm/min, the defect of tunnel hole in the welded joint disappeared. When 600 mm/min of welding speed was adopted, the joints without defects can be obtained at 2000-4000 r/min. The tensile test results showed that the tensile properties of the joints were optimal at 6000 r/min-100 mm/min, and the tensile strength was 235.33 MPa, which was 87.92% of the strength of the base metal. Defect-free welded joint of magnesium alloy can be obtained by high-speed friction stir process. The high-speed combined with the low welding speed process can improve the tensile properties of the joint.

KEY WORDS: high speed friction stir welding; AZ31B magnesium alloy; microstructure; tensile properties

镁合金是一种绿色工程材料,性能优异,在航空、航天等领域具有广阔的应用前景^[1]。在镁合金的实际应用中,最常见的方法为熔焊,但该方法在连接过程

中易产生气孔、夹杂等缺陷,严重影响镁合金的使用性能^[2-4]。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一种固相连接技术,具有焊接变形小、接头质量高

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51575450)

作者简介: 侯晶(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为镁合金高转速搅拌摩擦焊接及加工。

通讯作者: 傅莉(1968—),女,教授,主要研究方向为特种焊接技术与机理。

等优点,是镁合金的理想连接方法,受到人们的广泛关注^[5-6]。

镁合金具有典型的密排六方结构,其塑性流变能力较低,在利用常规的FSW进行镁合金焊接时,接头处易产生各向异性,性能较差,由此制约了FSW技术在镁合金焊接中的应用^[7]。针对镁合金接头性能的各向异性,国内外学者开展了大量的研究工作,Xin等^[8]研究了焊接参数对AZ31B镁合金织构分布和塑性变形行为的影响,确定了通过调整焊接参数可以对接头的力学性能进行调控。Suhuddin等^[9]研究了镁合金搅拌摩擦焊过程中的微观结构演变,发现强织构的形成是由大量的基面滑移造成的;在搅拌摩擦焊中,高转速不仅可以获得超高热输入,还可以获得超高应变速率,从而影响焊缝接头的组织和力学性能。

文中对1.5 mm厚AZ31B镁合金进行高转速搅拌摩擦焊工艺实验,探究高转速下不同焊接参数对AZ31B镁合金焊接接头组织和力学性能的影响规律,为促进镁合金搅拌摩擦焊的应用提供实验依据。

1 实验

采用1.5 mm厚的AZ31B轧制镁合金板,其化学成分如表1所示。将AZ31B镁合金轧制板切割成规格为190 mm×65 mm×1.5 mm的待焊接件,焊前将焊件待焊表面进行打磨和清洁。实验采用型号为

FSW-TS-F08-DZ的微型台式高转速搅拌摩擦焊机,搅拌头的轴肩直径为8 mm,针长为1.2 mm,搅拌头由三螺旋线型沟槽的轴肩和圆台形的搅拌针组成,焊接方向沿板材的轧制方向,接头形式为对接。

通过查阅文献可知,搅拌摩擦焊接过程中的热输入可用式(1)表示^[10]。

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\alpha \mu p N R^3}{v} \quad (1)$$

式中: Q 为焊接热输入; α 为热输入系数; μ 为摩擦因数; p 为压力; N 为搅拌头转速; R 为搅拌头的轴肩半径; v 为焊速。

为探究搅拌摩擦焊的焊速和转速对AZ31B镁合金的组织性能的影响,采用5组工艺参数进行对比研究,如表2所示。表2中的焊接工艺参数既可探究焊速一定时,转速变化对AZ31B镁合金的组织性能的影响规律,亦可探究转速一定时,焊速变化对其组织和性能的影响规律。

焊后以焊缝为中心将接头切割成横截面尺寸为50 mm×5 mm×1.5 mm的试样,经镶嵌磨抛制备成金相试样后,采用腐蚀液(4.2 g苦味酸、10 mL乙酸、10 mL蒸馏水、70 mL乙醇)腐蚀10 s左右,用显微镜观察接头微观组织。采用如图1所示的尺寸制备拉伸试样,并用CLY30型电子万能材料试验机测试其拉伸性能,拉伸加载速率为1 mm/min。采用TESCANVEGA 3 LMU钨灯丝扫描电镜观察焊接接

表1 AZ31B镁合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy

元素	Mg	Al	Si	Ca	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni
质量分数/%	余量	2.5~3.5	0.08	0.04	0.6~1.4	0.2~1.0	0.003	0.01	0.001

表2 AZ31B镁合金搅拌摩擦焊实验工艺参数
Tab.2 Experimental parameters of AZ31B magnesium alloy friction stir welding

试验编号	转速 $N/(r \cdot \min^{-1})$	焊速 $v/(mm \cdot \min^{-1})$	下压量/ mm
1#	2000	600	1.4
2#	4000	600	1.4
3#	6000	600	1.4
4#	6000	100	1.4
5#	6000	200	1.4

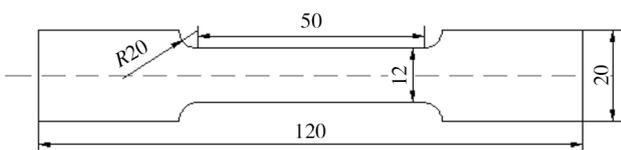


图1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Tensile specimen size

头的拉伸断口形貌。

2 结果及讨论

2.1 焊接接头宏观组织

图2为不同工艺下AZ31B镁合金FSW接头宏观形貌。由图2可知,焊缝表面无缺陷,成形光滑,弧纹清晰。相同焊速下对图2a, 2b, 2c进行对比,焊接参数为6000 r/min-600 mm/min的弧纹间距较小。相同转速下比较图2c, 2d, 2e, 6000 r/min-100 mm/min工艺下的弧纹间距较小。搅拌摩擦焊接过程中接头表面弧纹的产生主要与搅拌头的轴肩挤压作用有关^[11-13],搅拌头的焊速越小,转速越大,焊接热输入越高,接头的弧纹间距越小。

2.2 焊接接头微观组织

图3是4000 r/min-600 mm/min工艺参数下镁合

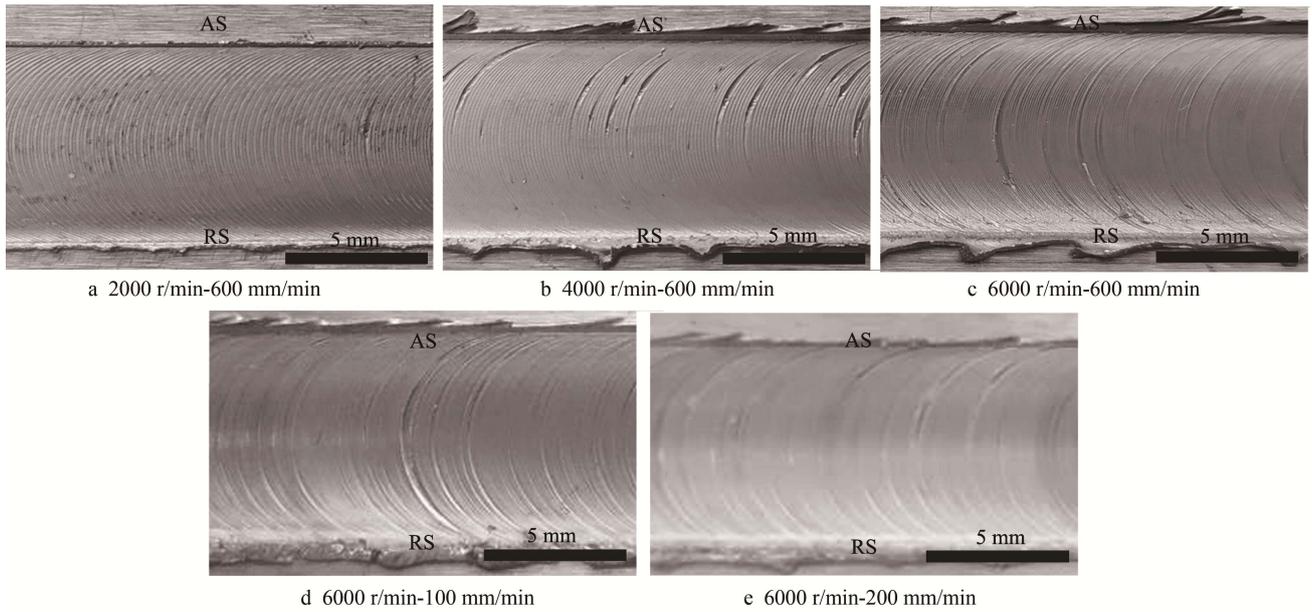


图 2 不同工艺下 AZ31B 镁合金 FSW 焊接接头宏观形貌
 Fig.2 Macroscopic morphology of AZ31B magnesium alloy FSW welded joint under different processes

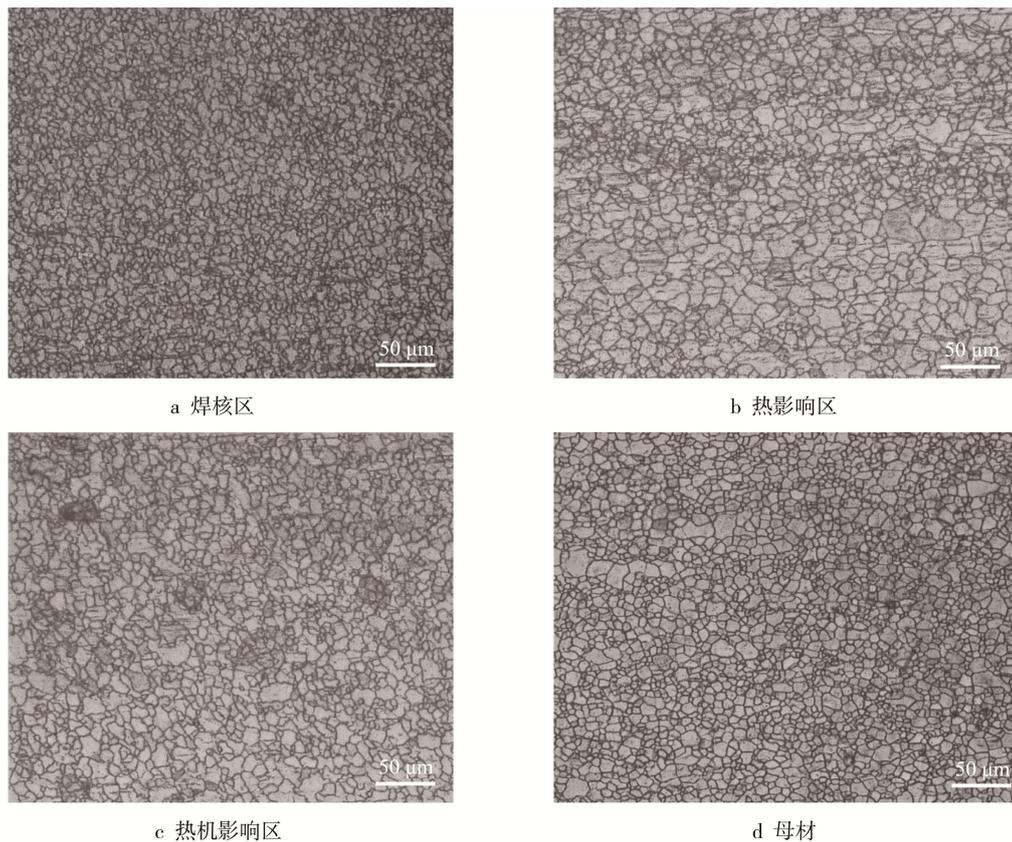


图 3 典型镁合金 FSW 接头的微观组织 (转速 4000 r/min, 焊速 600 mm/min)
 Fig.3 Microstructure of magnesium alloy FSW joint at 4000 r/min-600 mm/min

金 FSW 接头的微观组织。从图 3 可以看出 FSW 接头各区域的微观组织存在很大差异。AZ31B 镁合金原始母材 (Base Metal, BM) 组织为等轴晶^[14], 如图 3d 所示。在焊接过程中, 焊核区 (Nugget Zone, NZ) 金属及其附近材料与高速运动的搅拌头发生剧烈摩

擦和塑性流动, 在搅拌头的强烈运动和高温热循环的作用下, 焊合区热塑性金属发生动态再结晶, 形成了晶粒细小且均匀的焊核区, 如图 3a 所示。在焊接过程中, 热力影响区 (Thermo-mechanically Affected Zone, TMAZ) 也会受到搅拌头的搅拌作用和焊接热

循环影响,发生回复和部分再结晶,因而在热力影响区形成细小等轴晶组织,但其数量明显少于焊核区,尺寸较焊核区大;此外,热力影响区介于焊合区和热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)之间,强塑性变形、搅拌针的剧烈搅拌、再结晶反应不完全等因素,使得该区域形成大量变形晶粒,且晶粒取向一致,如图3c所示。焊接接头热影响区只受焊接热的影响,该区域晶粒长大和粗化,晶粒尺寸明显大于母材,如图3b所示。

图4为6000 r/min下镁合金FSW接头热力影响区微观组织。恒定高转速6000 r/min,焊速600

mm/min工艺下接头前进侧的热力影响区附近(焊核区底部)出现隧道型孔洞缺陷,如图4c所示,降低焊速至100 mm/min,缺陷消失,如图4a所示。当焊速不变,转速增大时,焊接过程中热输入增大,搅拌针附近的金属流动性增强,在搅拌针高速运动的作用下,大量变形金属迁移至焊缝的上部被挤出,向下流动的软化金属由于搅拌针的作用不能充分回流,填充搅拌针运动后方的空腔,从而导致600 mm/min下在前进侧出现隧道型孔洞缺陷。

图5为相同高转速(6000 r/min)工艺下镁合金FSW接头焊核区微观组织形貌。在高转速工艺下,

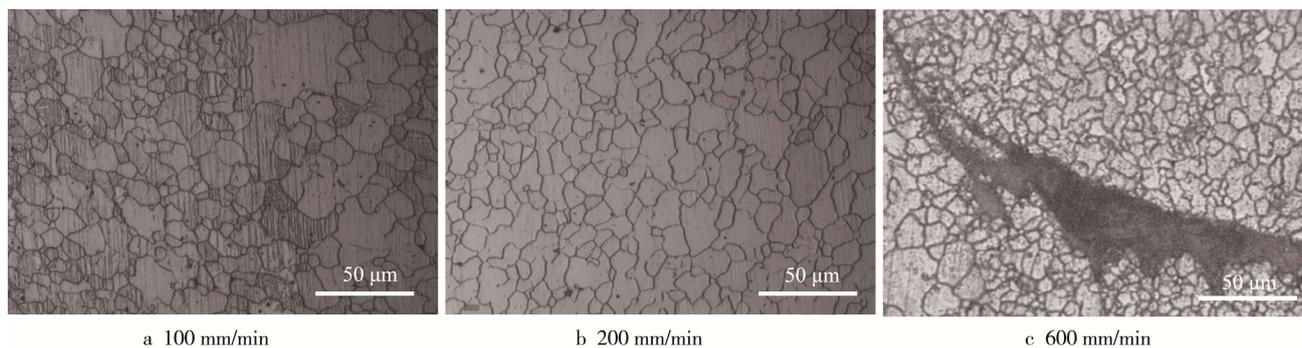


图4 焊速对AZ31B镁合金高速FSW接头TMAZ微观组织的影响

Fig.4 Effect of welding speed on microstructure of AZ31B magnesium alloy FSW Joint at high speed

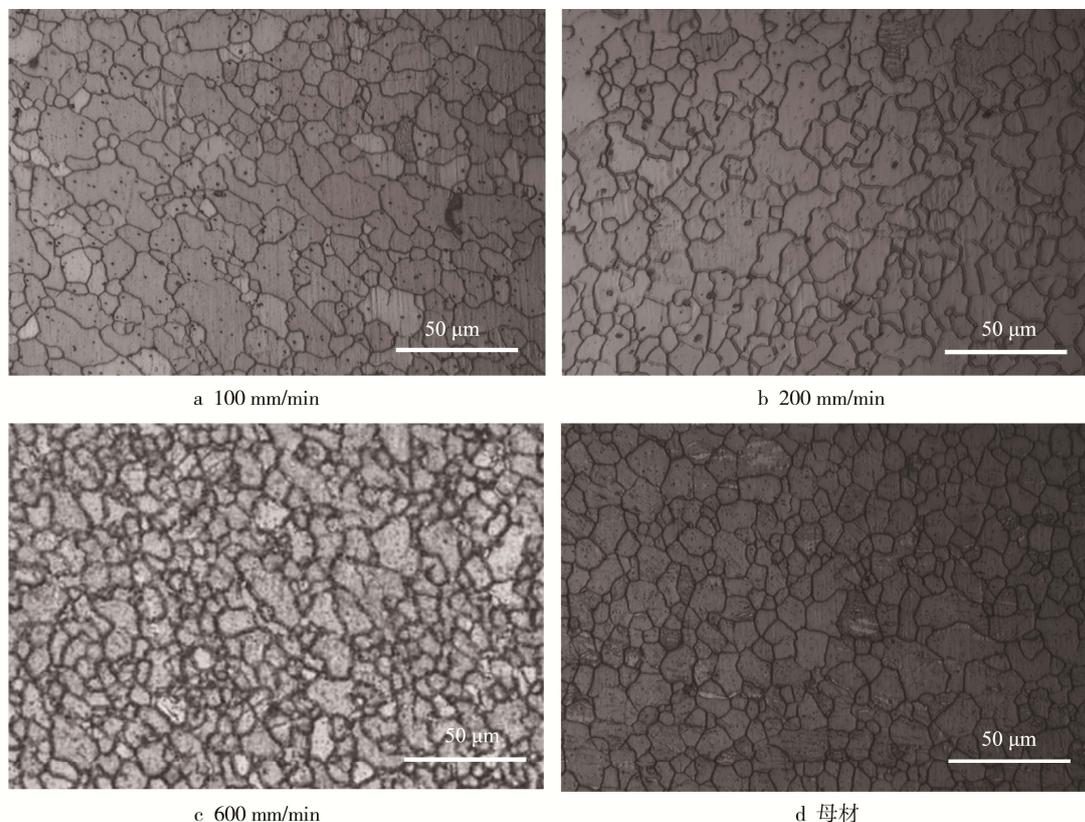


图5 焊速对镁合金高速FSW接头焊核区微观组织的影响

Fig.5 Effects of welding speed on microstructure of weld nugget area of magnesium alloy FSW joint at high speed

焊接速度由 100 mm/min 增大到 600 mm/min 时，焊核区的晶粒尺寸逐渐减小。当转速恒定时，由式 (1) 可知，焊速增大，焊接热输入减小，接头受搅拌针机械搅拌和焊接热循环的作用减小，焊核区晶粒尺寸减小。图 6 为相同焊速 600 mm/min 下镁合金 FSW 接头焊核区微观组织，实验测试结果表明，当焊速保持恒定时，在高速范围内，焊核区等轴晶晶粒尺寸随转速增大而增大。

2.3 焊接接头力学性能

图 7 为不同焊接工艺下镁合金 FSW 接头的拉伸

性能。实验所用母材的抗拉强度为 267.67 MPa。恒定焊速 600 mm/min，转速 4000 r/min 时接头的抗拉强度最高，为 227.67 MPa，如图 7a 所示。恒定转速 6000 r/min，100 mm/min 焊速下接头的抗拉强度最大，为 235.33 MPa。当焊速不变，转速提高，镁合金接头的抗拉强度提高。但当转速过高，热输入过大时，焊接接头处易产生隧道型孔洞缺陷，拉伸性能较差，故 4000 r/min 下的拉伸性能优于 6000 r/min。当保持 6000 r/min 不变、降低焊速，接头的抗拉强度提高，达到 5 组工艺参数下的最高值。结果表明，高转速工艺能够增强接头拉伸性能，同时采用较低的焊接速

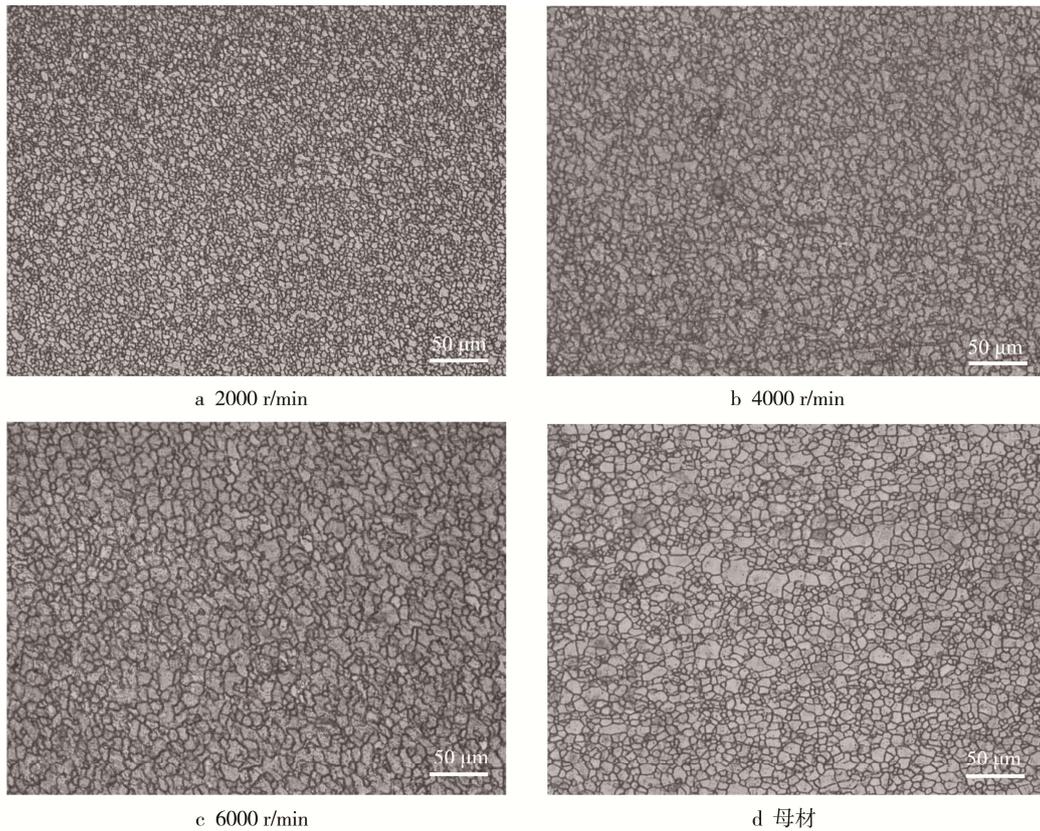


图 6 相同焊速下镁合金 FSW 接头焊核区微观组织

Fig.6 Microstructure of weld nugget area of magnesium alloy FSW joint at the same welding speed

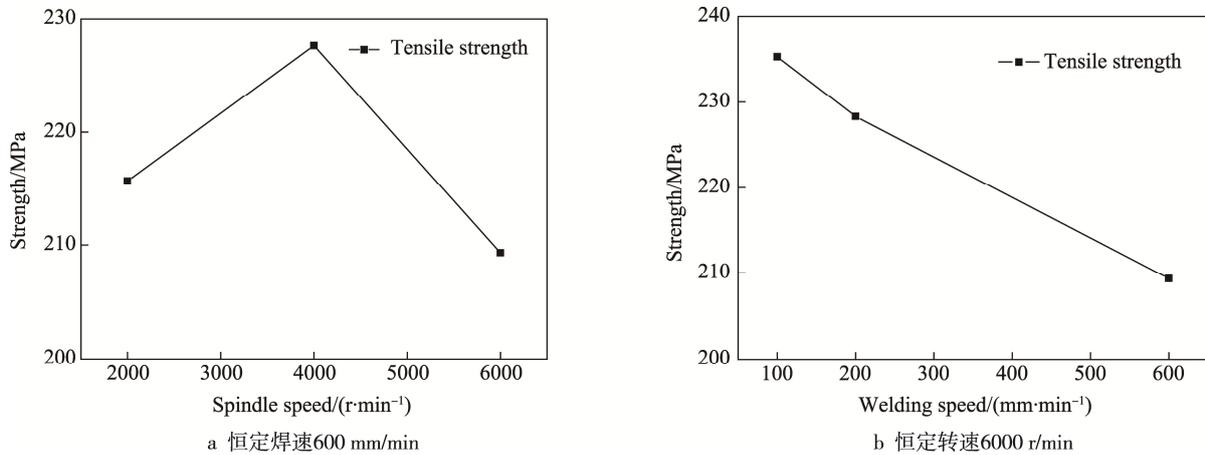


图 7 高转速工艺下接头拉伸性能

Fig.7 Tensile properties of joints under high speed process

度，有利于优化拉伸性能，提高抗拉强度。

2.4 断口分析

图 8 为高转速工艺下对接接头拉伸试样的断裂位置，由图 8 可知，5 组工艺参数的断口形貌分为两类：① 接头断裂面与试样表面呈 45°，如图 9a 所示；② 拉伸断口比较平齐，如图 10a 所示。

两种断裂方式的断口形貌如图 9 和 10 所示。图 9 为第一类拉伸试样断口形貌。从图 9b 可以看出，该参数下断口形貌较为均一，韧窝和撕裂棱明显（见图 9c），同时出现较小的“河流花样”^[15]，表现出韧性断裂和解理断裂的混合断裂模式。图 10 为第二类断裂方式的断口形貌。从图 10b 可以看出，断口形貌分为两种：A 区域断口存在等轴韧窝和撕裂棱，该区域抗拉强度较好，如图 10c 所示；而 B 区域由于隧道型孔洞缺陷的存在，使得断口出现准解理断裂，导致该参数下的抗拉强度整体降低，如图 10d 所示。

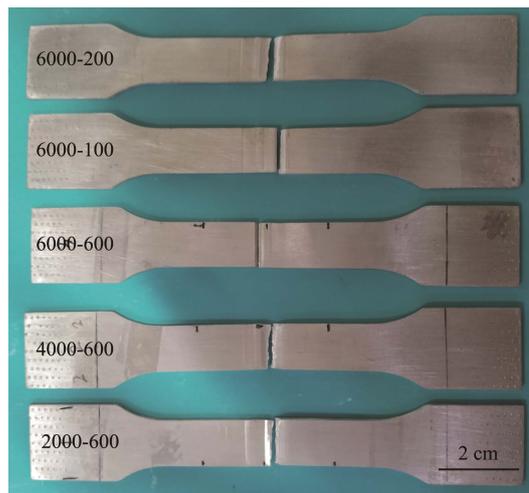
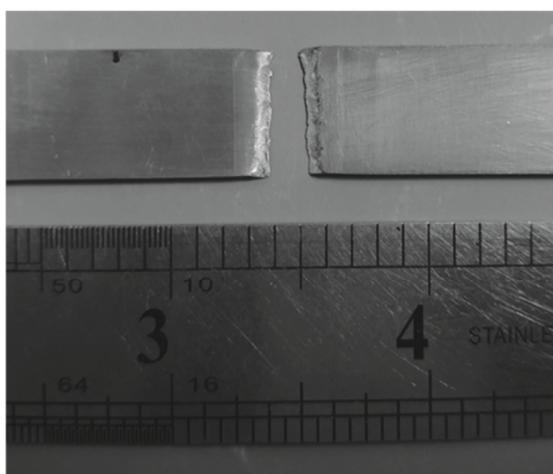
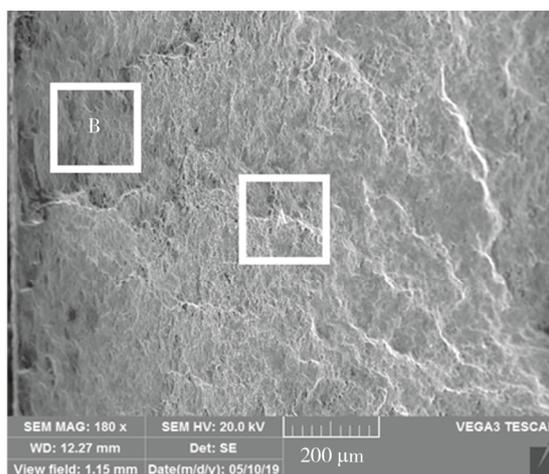


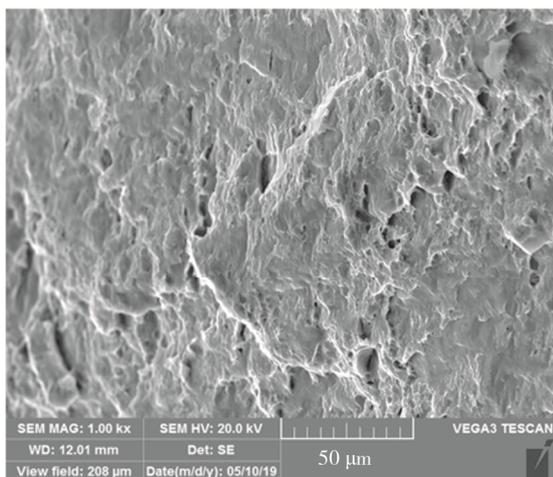
图 8 高转速工艺下对接接头拉伸试样的断裂位置
(左侧为前进侧，右侧为后退侧)
Fig.8 Fracture position of tensile specimen of the butt joint under high speed process



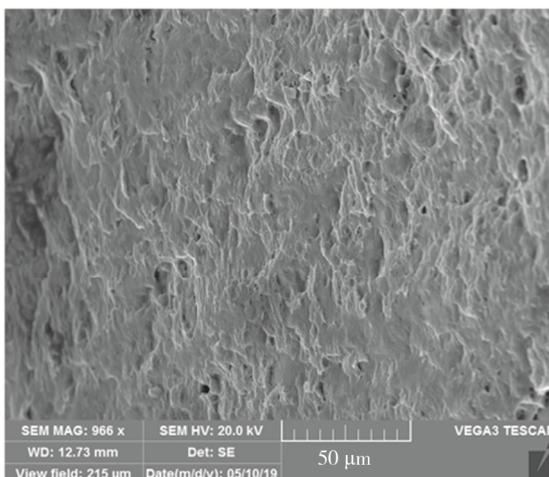
a 宏观断口



b 整体形貌



c 区域A断口形貌



d 区域B断口形貌

图 9 4000 r/min-600 mm/min 参数下拉伸试样断口形貌
Fig.9 Fracture morphology of tensile specimens at 4000 r/min-600 mm/min

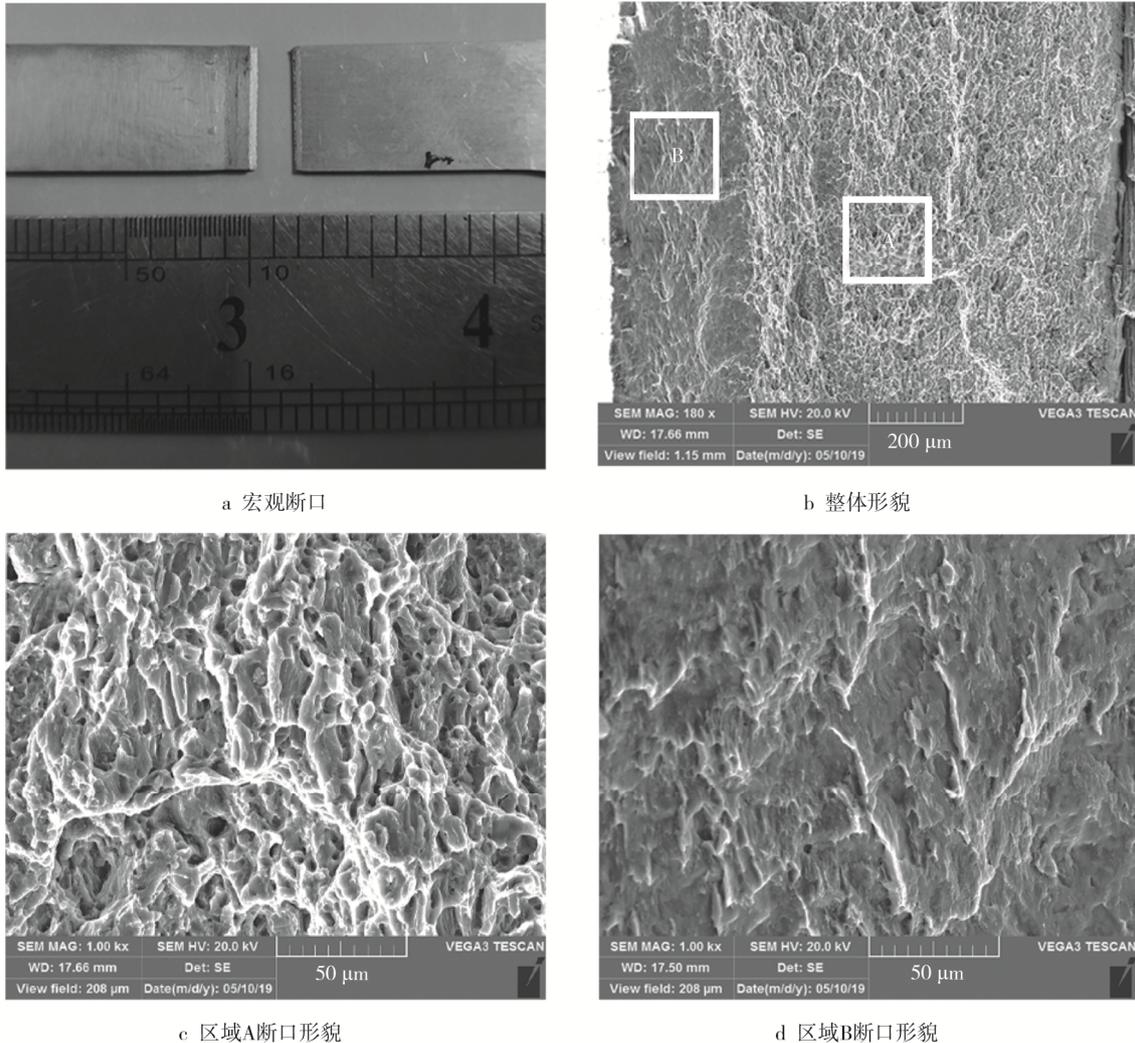


图 10 6000 r/min-600 mm/min 参数下拉伸试样断口形貌
Fig.10 Fracture morphology of tensile specimens at 6000 r/min-600 mm/min

3 结论

通过对 1.5 mm 厚镁合金进行高转速搅拌摩擦焊的工艺研究, 有如下发现。

- 1) 高转速搅拌摩擦工艺下, 其他条件不变时, 转速越大, 焊速越小, 接头的弧纹间距越小。
- 2) 6000 r/min 参数下, 随着焊速从 600 mm/min 降低至 100 mm/min, 焊接接头隧道型孔洞缺陷消失, 即高转速匹配低焊速有利于获得无缺陷接头。
- 3) 高转速工艺下, 6000 r/min-100 mm/min 焊接参数下的接头抗拉强度最高, 为 235.33 MPa, 抗拉强度为母材强度的 87.92%。高转速工艺能够增强拉伸性能, 同时采用较低的焊接速度, 有利于提高接头的抗拉强度。

参考文献:

[1] MA Zong-yi, SHANG Qiao, NI Ding-rui, et al. Research Status and Prospects of Friction Stir Welding of Magnesium Alloys[J]. Journal of Metals, 2018, 54(11): 1597—1617.

[2] JI Shu-de, NIU Shi-yu, LIU Jian-guang. Dissimilar Al/Mg Alloys Friction Stir Lap Welding With Zn Foil Assisted by Ultrasonic[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(8): 1712—1718.

[3] ZHANG Da-tong, SUZUKI M, MARUYAMA K. Microstructural Evolution of a Heat-resistant Magnesium Alloy Due to Friction Stir Welding[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(9): 899—903.

[4] CAO Xin-jin, JAHAZI M. Effect of Tool Rotational Speed and Probe Length on Lap Joint Quality of a Friction Stir Welded Magnesium Alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(1): 1—11.

[5] GUO De-peng, WANG Yong-zhen. Optimization of Nuclear Power Equipment Supervision and Management Work and Implementation[J]. Nuclear Power Engineering, 2009(S2): 77—80.

[6] LIANG Han-you, LIU Gang, YU Jia-yuan. Performance and Microstructure Analysis of AZ31 Magnesium Alloy Friction Stir Welding Butt Joint[J]. Hot Working Tech-

- nology, 2018, 47(15): 71—74.
- [7] AGNEW S R, ÖZGUR D. Plastic Anisotropy and the Role of Non-basal Slip in Magnesium Alloy AZ31B[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(6): 1161—1193.
- [8] XIN Ren-long, LIU De-jia, SHU Xiao-guang, et al. Influence of Welding Parameter on Texture Distribution and Plastic Deformation Behavior of as-rolled AZ31 Mg Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 670: 64—71.
- [9] SUHUDDIN U F H R, MIRONOV S, SATO Y S, et al. Grain Structure Evolution during Friction-stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(18): 5406—5418.
- [10] MISHRA R S, MA Zong-yi. Friction Stir Welding and Processing II[J]. *Materials Science and Engineering R Reports*, 2005, 50(1/2): 1—78.
- [11] UGENDER S, KUMAR A, REDDY A S. Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy by Friction Stir Welding[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 6: 1600—1609.
- [12] CHEN Yu-qiang. High Temperature Mechanical Behavior and Microstructure of Typical Magnesium Alloys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [13] DENG Yong-fang, ZUO Dun-wen, SONG Bo, et al. Analysis of Arc Formation Process and Main Influencing Factors of Aluminum Alloy FSJ Joints[J]. *Transactions of the China Welding Society*, 2014, 35(7): 43—465.
- [14] SINGH K, SINGH G, SINGH H. Review on Friction Stir Welding of Magnesium Alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(4): 399—416.
- [15] YIN Xin, LI Qi-lin. Effect of Stirring Head Morphology on Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheet FSW Joints[J]. *Thermal Process Technology*, 2017(15): 223—225.