

铸造镁合金搅拌摩擦加工工艺及其应用

邹文兵 张旭亮 潘 龙 李 蒙

[新江科技(江苏)有限公司]

摘 要 针对镁合金舱体铸件缺陷修复合格率低的问题,采用搅拌摩擦加工技术(Friction Stir Processing,FSP)实现缺陷修复。首先采用 ZM5 合金试板,研究了单道次 FSP、多道次 FSP 以及 TIG 填料+多道次搅拌摩擦加工 3 种工艺对合金试板组织及力学性能的影响。结果表明,对于壁厚为 10 mm 的舱体薄壁缺陷部位,采用针长为 8 mm,旋转速度为 600 r/min,前进速度为 80 mm/min,下压力为 1.0~1.5 mm,回抽距离为 100 mm 的工艺条件,FSP 修复区域的晶粒从 120~160 μm 细化至 10~30 μm ,力学性能显著改善。采用 TIG 填料+多道次 FSP 方法修复了某型号镁合金舱体铸件缺陷,铸件无损检测合格,修复部位本体剖切试样抗拉强度达到 260.2 MPa,伸长率达到 9.8%。

关键词 ZM5 镁合金;搅拌摩擦加工;缺陷修复

中图分类号 TG453;TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Friction Stir Processing Technology and Its Application for Cast Magnesium Alloy

Zou Wenbing, Zhang Xuliang, Pan Long, Li Meng

[Xinjiang Technology (Jiangsu) Co., Ltd.]

Abstract: Aiming at the low qualification rate of defect repair for magnesium alloy cabin castings, a method of using Friction Stir Processing(FSP) to achieve defect repair was proposed. Firstly, ZM5 alloy test plates were used to investigate the effects of different processes, such as single pass FSP, multi pass FSP, and TIG filler+multi pass friction stir processing, on the microstructure and mechanical properties. The results reveal that for the thin-walled defect parts of the cabin with a wall thickness of 10 mm, taking process parameters such as needle length of 8 mm, rotational speed of 600 r/min, forward speed of 80 mm/min, downward pressure of 1.0 to 1.5 mm, and extraction distance of 100 mm, the grains in the FSP repair area are refined from 120~160 μm to 10~30 μm , improving mechanical properties significantly. The defect of a certain type of magnesium alloy cabin castings was repaired using the TIG filler+multi-pass FSP method, and the non-destructive testing was qualified. The tensile strength of the sectioned specimen at the repaired part reaches 260.2 MPa, and the elongation reaches 9.8%.

Key Words: ZM5 Magnesium Alloy, Friction Stir Processing (FSP), Defect Repair

高品质镁合金铸件对实现飞行器结构件轻量化制造具有积极意义,但因高温镁合金液化学性质活泼、铸件产品结构复杂,易形成缩松、缩孔、偏析等缺陷,缺陷修复对改善镁合金的性能影响受到重视^[1-2]。采用手工钨极氩弧焊(TIG)对铸件缺陷部位进行修复,在合金熔化、凝固结晶过程中,熔池内容易产生气泡、氧化夹杂;焊接熔池凝固速度快,冷却过程中易产生裂纹、缩松、缩孔、变形以及热影响区母材力学性能降低等问题^[3-4],质量控制难度大,修复合格率低。搅拌摩擦焊是一种固相连接方式,搅拌针与工件高速摩擦生热,在搅拌刀柄轴肩下压力及摩擦生热的共同作用下,使金属材料受热软化,延展性显著提高而产生流动性,消除界面并发生再

结晶,能避免熔池内的二次缺陷问题。基于搅拌摩擦焊提出搅拌摩擦加工(Friction stir processing,FSP)工艺,多用于材料的表面改性,局部强化、表面复合材料制备等^[5]。KUMAR S D 等^[6]研究了搅拌摩擦焊接后 AZ31B 镁合金的硬度分布。李亚杰等^[7]对 AZ31 镁合金搅拌摩擦工艺参数进行了优化,发现当焊接速度为 300 mm/min,主轴转速为 1 400 r/min 时,合金抗拉强度为 252 MPa,伸长率为 16.5%。黄磊^[8]研究了 FSP 对 Mg-4.5Al-1.2Sn-0.7Zn(ATZ511)镁合金显微组织和力学性能的影响,发现焊接速度为 75 mm/min 时,焊缝处的力学性能达到母材的 90% 以上。DANIELS 等^[9]采用 ZE41 镁合金搅拌摩擦焊接工艺,发现焊接速

收稿日期:2023-03-20;修改稿收到日期:2023-05-13

第一作者简介:邹文兵,男,1987 年出生,高级工程师,江苏南通(226100),E-mail: 15214358756@163.com

引用格式: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.

ZOU W B, ZHANG X L, PAN L, et al. Friction stir processing technology and its application for cast magnesium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):992-997.

度为 1 220 r/min 时,焊缝处没有其他缺陷,且焊接处的力学性能最高。

本研究将搅拌摩擦加工工艺应用于舱体铸件的缺陷修复,通过平板试验优化工艺参数,设计专用的舱体缺陷修复工装,并采用 X 射线无损检测手段及本体剖切力学性能评价修复效果,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用差压铸造工艺浇注的 ZM5 合金,尺寸为 180 mm×200 mm×12 mm,空气循环炉 T4 热处理后,采用 HT-JM20×22/2H 型龙门式二维搅拌摩擦焊设备进行搅拌摩擦加工。在常规的生产流程中,铸件在 T4 热处理及表面处理后,经一次拍片检查,根据标准以及操作规范,依据数字式 X 射线微焦点扫描图像及评片标准,可以得出 A、B、C、D 4 类铸件,二次拍片产生 E 类铸件,见图 1。A 类铸件,直接合格入库;B 类铸件是浅层轻微缺陷,一般根据检测人员的经验判定,可打磨后再次拍片,15%~20%的产品能合格入库;C、D、E 3 类铸件均需要进行补焊。C 类铸件一般是指缺陷的灰度较清晰,但面积不大,一般包括 3 级缩松、小面积 4 级缩松、线性微裂纹、树枝状和点状缩松等;D 类铸件一般是指面积较大的四级及以上缺陷;E 类铸件内表面通常已经有打磨凹坑,需要填料处理。对应可能的补焊工艺分为两种,C 类可以直接搅拌摩擦补焊,D、E 两类需要机械去除 TIG 焊填料后再进行搅拌摩擦修复。缺陷分为点、线、面 3 种,对应的搅拌摩擦加工缺陷修复模式为单道次 FSP 及多道次 FSP。因此,平板试验方案 1:针长为 8 mm,单道次 FSP,固定行走速度为 80 mm/min,旋转速度为 600 r/min,回抽距离为 100 mm;平板试验方案 2:针长为 8 mm,多道次 FSP,固定行走速度

为 80 mm/min,旋转速度为 600 r/min,回抽距离为 100 mm,道次间距为 6 mm(搅拌针根部直径的 1/2);平板试验方案 3:试板中心制作深 10 mm 的凹槽,TIG 填料并表面加工平整后,针长为 8 mm,多道次 FSP,固定行走速度为 80 mm/min,旋转速度为 600 r/min,回抽距离为 100 mm,道次间距为 6 mm(搅拌针根部直径的 1/2)。舱体缺陷修复设备及装夹工装见图 2。

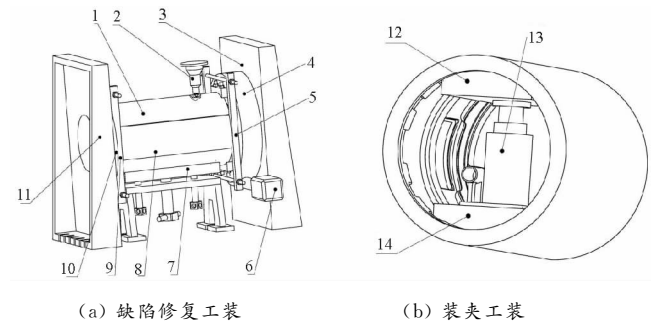


图 2 舱体搅拌摩擦加工缺陷修复工装示意图
Fig.2 Schematic diagram of repair tooling for cabin friction stir processing defects

- 1.舱体铸件 2.搅拌工具 3.装夹工作台前立座 4.回转减速机
- 5.前夹板 6.装夹工作台驱动电机 7.工件下部支撑 8.转盘连杆
- 9.后夹板 10.装夹工作台从动转盘 11.装夹工作台后立座
- 12.工件上部垫块 13.垫块支撑装置 14.工件下垫块

舱体铸件缺陷修复 FSP 数控程序流程见图 3,在搅拌针行走期间,根据铸件表面情况,手动实时调整下压力。在内壁缺陷部位去除缺陷后,TIG 填充补足,缺陷修复参数与多道次 FSP 一致。

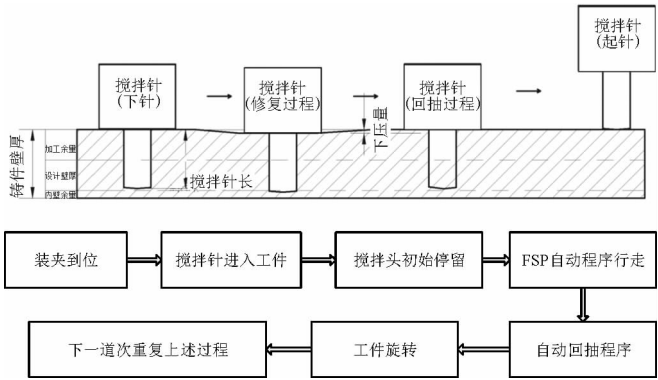


图 3 数控程序流程图
Fig.3 Flow chart of digital control program

金相试样截取自垂直加工方向的横截面,经过砂纸逐层打磨、机械抛光后,采用苦味酸酒精溶液进行腐蚀,待试样表面发灰后置于 DM2700M 型莱卡金相显微镜下进行观察;在 Philips XL30-FEG 型扫描电镜下观察断面形貌;垂直于加工方向截取常温拉伸试样,在 MTS-810 型液压伺服电子万能拉伸试验机上进行力学性能测试,拉伸速率为 1 mm/min。

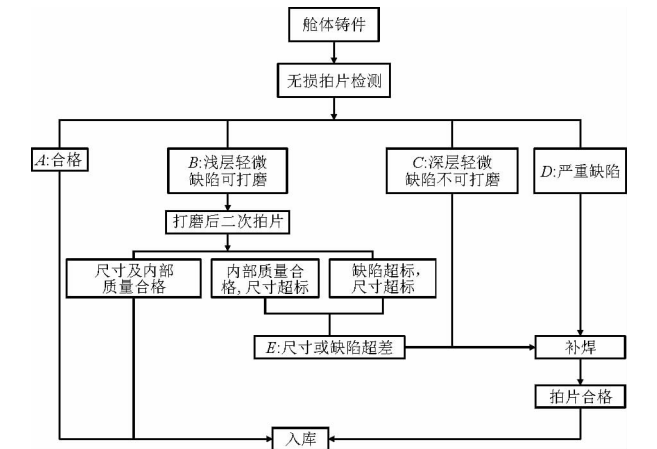


图 1 铸件缺陷修复工序分析图

Fig.1 Flow chart of casting defect repair process

2 试验结果与分析

2.1 单道次 FSP 平板力学性能测试与分析

图 4 为单道 FSP 焊平板试验结果,A 区为 ZM5 母材区,B 区为垂直于 FSP 焊缝取样,焊缝居中,焊缝宽度为 10 mm。图 4b 为母材域拉伸断口,图 4c 为单道次 FSP 处理后断口。从图 4d~图 4f 可以看出,母材区域的断口形貌和 FSP 处理试样断口形貌没有显著差异,

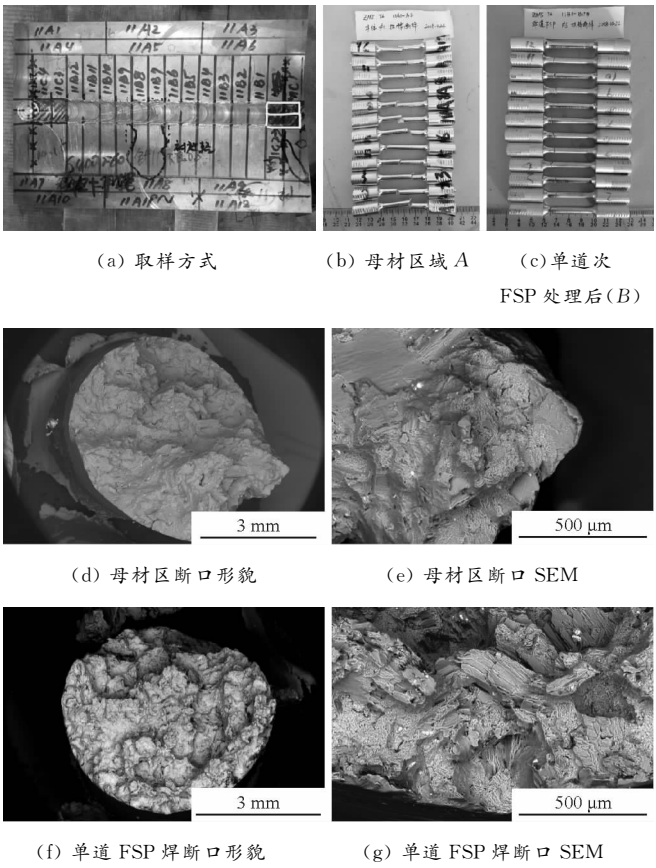


图 4 单道 FSP 焊缝试棒(A 区为母材区, B 区为 FSP 区,FSP 焊缝宽约为 10 mm)
Fig.4 Single pass FSP weld test rod

都是断裂在母材区域,FSP 区域的强度略低于母材区,但伸长率更好。力学性能测试结果见表 1 和表 2。

表 1 A 区母材拉伸测试结果

Tab.1 Mechanical properties of base metal in zone A				
试样编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂位置
A ₁	221	117	2.5	本体
A ₂	198	121	3	本体
A ₃	215	107	3	本体
A ₄	205	123	3	本体
A ₅	210	120	3	本体
A ₆	206	100	3.5	本体
A	209	115	3	—

表 2 单道次 FSP 加工区域拉伸性能测试结果

Tab.2 Mechanical properties of single pass FSP processing area				
试样编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂位置
B ₁	210	108	3	本体
B ₂	208	112	3.5	本体
B ₃	215	107	4.5	本体
B ₄	210	108	3	本体
B ₅	195	115	3.5	本体
B ₆	205	114	4.5	本体
B	207	110	3.6	—

2.2 多道次 FSP 平板力学性能测试与分析

图 5 为多道次密排 FSP 焊平板试验结果,C 区为 ZM5 母材区,D 区为纯 FSP 处理区取样,其力学性能结果见表 3 和表 4。由图 5d 和图 5e 可知 FSP 焊区的拉伸试棒断口组织非常致密,可见大量韧窝,韧性断裂特征十分明显。力学性能测试结果表明,ZM5-T4 母材的平均抗拉强度为 212.2 MPa,平均屈服强度为 109.5 MPa,平均伸长率为 4.5%;FSP 焊缝的平均抗拉强度为 282 MPa,平均屈服强度为 115 MPa,平均伸长率为 14.8%;FSP 处理区域的抗拉强度为母材的 132.8%,屈服强度为其 105%,伸长率为其 329%,明显高于母材可见;FSP 处理显著强化母材综合力学性能。

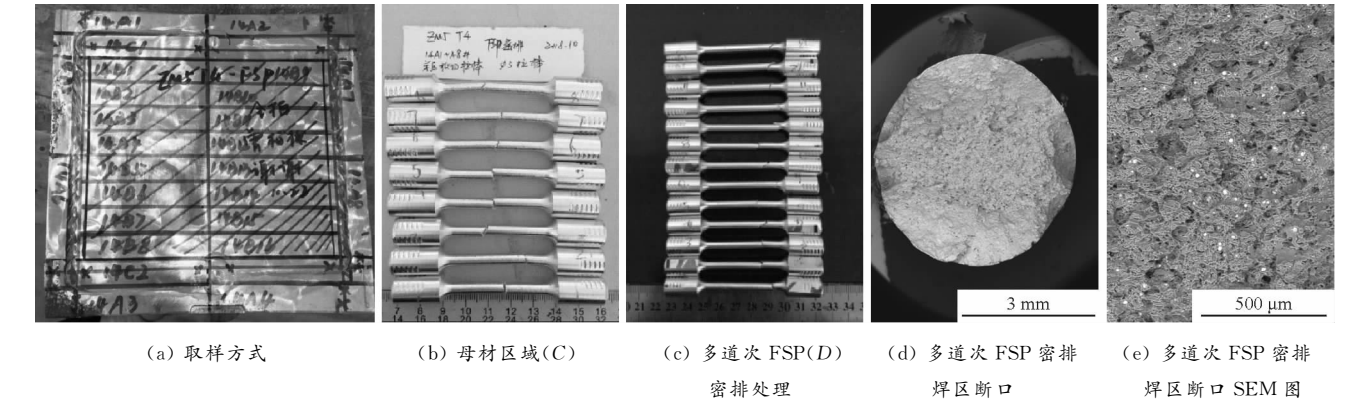


图 5 多道 FSP 密排焊试棒
Fig.5 Multi-pass FSP tight welding test rod

表 3 母材区域(C 区)拉伸测试结果

Tab.3 Mechanical properties of base metal area in zone A				
试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂 位置
C ₁	210	109	4	本体
C ₂	216	110	4.5	本体
C ₃	198	105	5	本体
C ₄	205	108	5	本体
C ₅	226	116	4.5	本体
C ₆	220	109	4	本体
$\bar{C}$	212.2	109.5	4.5	—

表 4 多道 FSP 密排焊试板 FSP 区域(D 区)拉伸测试结果

Tab.4 Mechanical properties of FSP area of multi-pass FSP tight welding test				
试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂 位置
D ₁	288	117	16	FSP 区
D ₂	276	117	18.5	FSP 区
D ₃	273	111	14	FSP 区
D ₄	297	112	15	FSP 区
D ₅	276	113	11	FSP 区
D ₆	284	119	14.5	FSP 区
$\bar{D}$	282	115	14.8	—

2.3 TIG 焊填料+FSP 平板性能测试与分析

图 6 为 TIG+FSP 复合焊平板试验,E 区为 ZM5

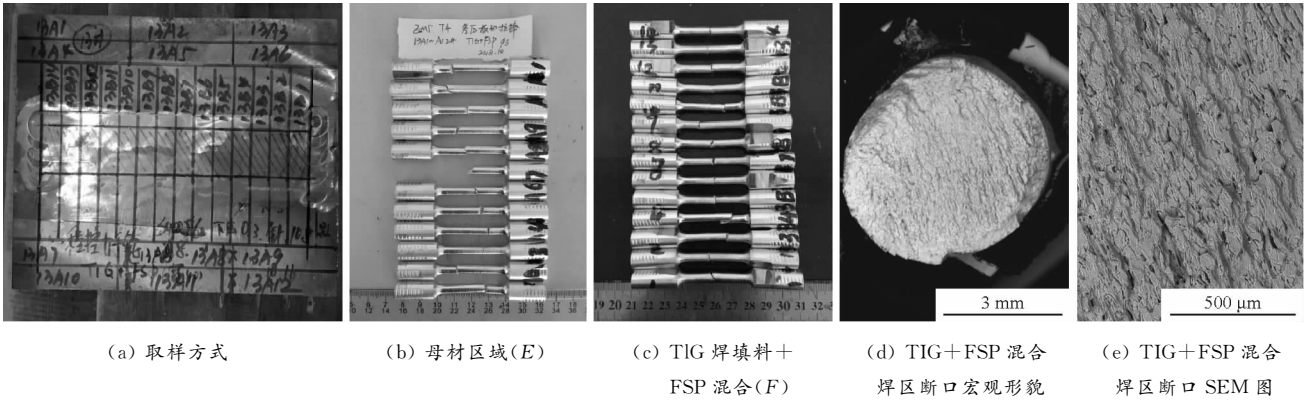


图 6 TIG+FSP 复合焊试板拉伸(复合处理区宽约 50 mm)
Fig.6 Drawing rod of TIG+FSP composite welding test plate

表 6 TIG+FSP 复合处理试板处理区域(F 区)拉伸测试结果

Tab.6 Mechanical properties of treatment area of TIG+FSP compound treatment test panel				
试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂 位置
F ₁	276	121	8.5	复合处理区
F ₂	279	122	8.0	复合处理区
F ₃	278	133	9.0	复合处理区
F ₄	284	116	8.0	复合处理区
F ₅	267	124	7.5	复合处理区
F ₆	258	130	7.0	复合处理区
$\bar{F}$	273.6	124.3	8.0	—

母材区,F 区为垂直于 TIG+FSP 混合焊缝取样,焊区居中(TIG 焊宽约为 20 mm,FSP 处理区域宽为 50 mm),FSP 焊区覆盖 TIG 焊区,其力学性能结果见表 5 及表 6。由图 6d 和图 6e 可知 TIG+FSP 复合处理区的拉棒断口组织特征与纯 FSP 密排焊区一致。由表 5 可知,ZM5-T4 母材的平均抗拉强度为 205.5 MPa,平均屈服强度为 112.8 MPa,平均伸长率为 4.3%;TIG+FSP 混合焊区的平均抗拉强度为 273.6 MPa,平均屈服强度为 124.3 MPa,平均伸长率为 8%;复合处理区的抗拉强度为母材的 133.1%,屈服强度为其 110.2%,伸长率为其 186%,明显高于母材。这是因为 FSP 焊缝的存在消除了 TIG 焊缝的不良影响,并显著强化了母材

表 5 母材区域(E 区)拉伸测试结果

Tab.5 Mechanical properties of base metal area in zone A				
试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断裂 位置
E ₁	216	114	5.0	本体
E ₂	207	113	3.5	本体
E ₃	208	129	5.5	本体
E ₄	194	108	3.0	本体
E ₅	187	114	3.0	本体
E ₆	221	99	5.5	本体
$\bar{E}$	205.5	112.8	4.3	—

综合力学性能。

2.4 显微组织分析

对试样进行截面取样金相分析,结果见图 7~

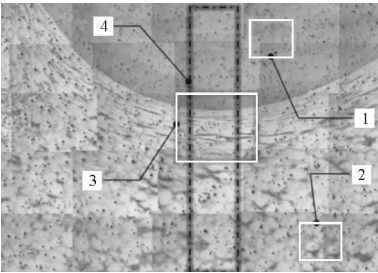


图 7 FSP 焊缝横截面金相组织(50X)
Fig.7 Cross-section microstructure of FSP welding joint

图 10,可见未处理的母材区域晶粒为 120~160 μm; FSP 处理区域晶粒为 10~30 μm。从母材区域至 FSP 细晶区域存在过渡区,可观察到晶粒变形、碎化现象。晶粒大小从细到粗依次为 FSP 区<FSP 过渡区<ZM5

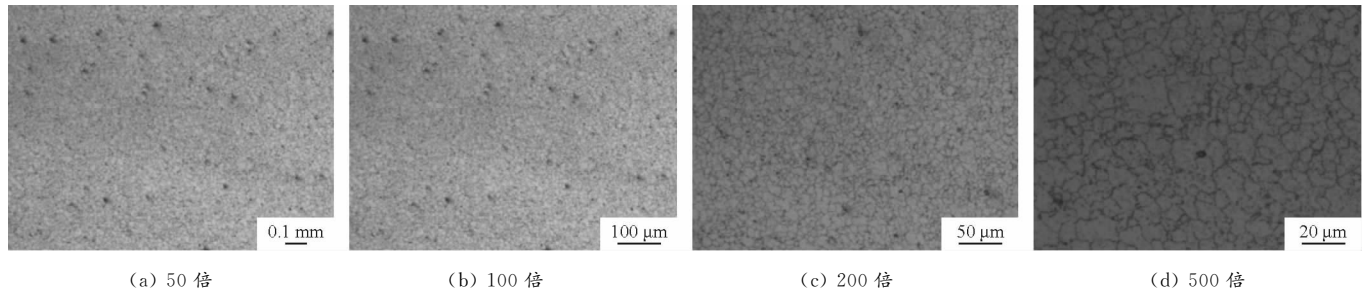


图 8 1 区金相组织
Fig.8 Microstructure of zone 1

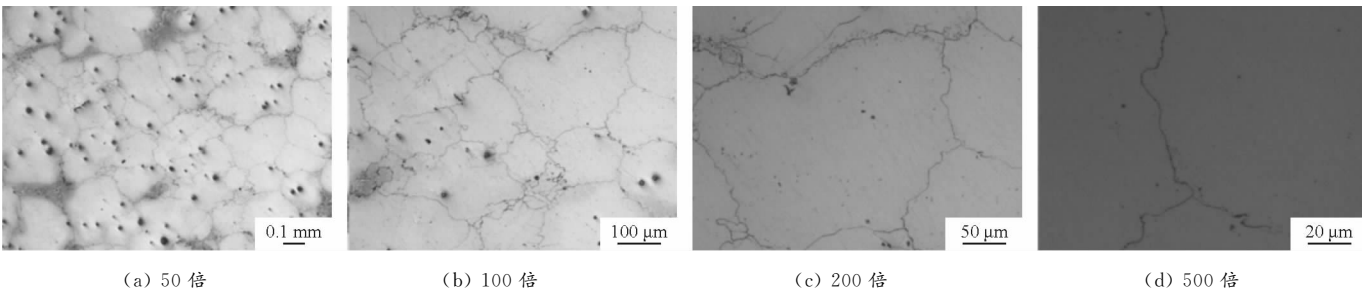


图 9 2 区金相组织
Fig.9 Microstructure of zone 2

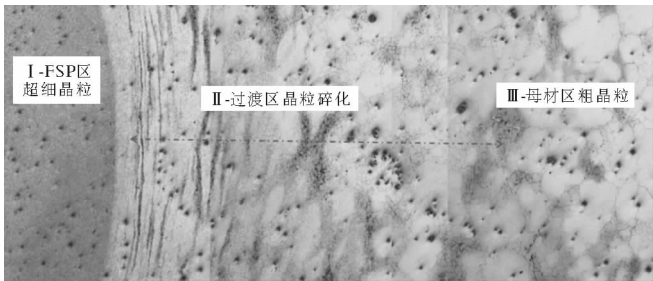


图 10 3 区金相(50X)
Fig.10 Microstructure of zone 3

2.5 舱体缺陷修复情况及力学性能

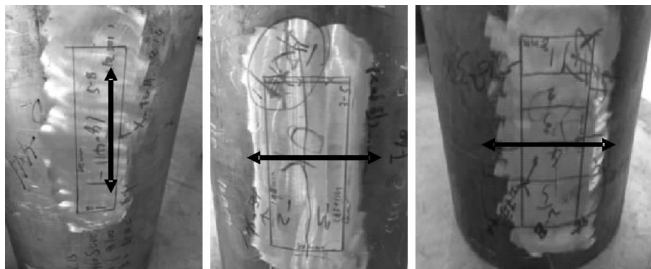
采用 TIG 填料+多道次 FSP 复合处理的方法修复了 30 件某型号舱段铸件,经 X 射线检测,缺陷消除。选取其中 3 件进行本体力学性能测试,取样方法见图 11,按照图 12 加工成拉棒试样,测试结果见表 7,抗拉强度平均值为 260.2 MPa,屈服强度平均值 109.4 MPa,伸长率平均值为 9.8%,远超标准规定值。

ZM5 舱体铸件的 FSP 区金相与母材区的金相对比见图 13,可见经 FSP 处理后,原本粗大的 ZM5 晶粒被碎化,平均晶粒尺寸约为 20 μm,相比晶粒尺寸为 100~200 μm 的母材区,得到了显著细化,按照经典的 Hall-Petch 关系^[10-11]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$
 (1)

母材区。与力学性能测试结果一致,FSP 区域的强度与伸长率均大幅提升,力学性能各指标由高到低依次为 FSP 区>FSP 过渡区>ZM5 母材,相较之下,母材更容易发生断裂。

式中, σ_y 为材料的屈服强度; σ_0 为移动单个位错时产生的晶格摩擦阻力; k 为 Hall-Petch 斜率,为常数, $k>0$;



(a) 试样 17-301X (b) 试样 18-411 (c) 试样 18-330

图 11 FSP 舱体铸件本体试棒取样方向示意图

Fig.11 Schematic diagram of sampling direction for tensile bar of FSP cabin

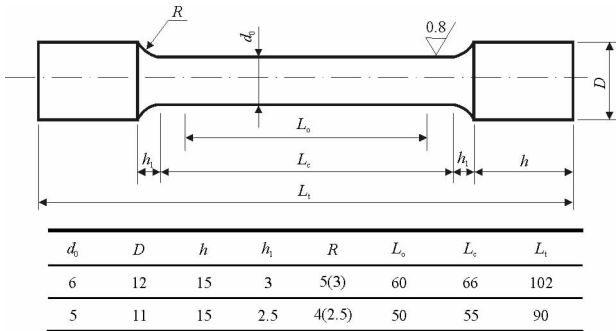


图 12 FSP 舱体铸件本体拉棒尺寸示意图
Fig.12 Schematic diagram of dimensions of tensile rod of FSP cabin

表 7 镁合金舱体铸件本体力学性能

Tab.7 Mechanical properties of magnesium alloy cabin castings				
序号	试样编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
1	17-301X-1	280	124	12.5
2	17-301X-2	300	130	12.5
3	18-411-1	277	104	10.5
4	18-411-2	229	114	6.5
5	18-411-3	267	118	9.5
6	18-330-1	264	102	10.0
7	18-330-3	214	105	6.0
8	18-330-4	254	88	10.5
9	18-330-5	257	100	10.0
铸件本体标准规定值		≥167	—	≥2.5
均值(9 根)		260.2	109.4	9.8

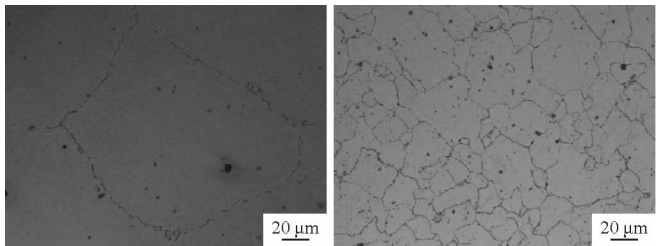


图 13 不同区域的金相组织对比

Fig.13 Microstructure of cabin at different zones

d 为平均晶粒直径。

晶粒细化至 1/10,屈服强度应该大幅提高,但是从测试的数据及显微组织分析可知,经 FSP 处理后,原本粗大的疏松组织被碎化,并弥散分布在晶界及晶粒内部,细晶强化作用对力学性能提升程度有所减轻。因此,可以认为,采用 FSP 进行缺陷修复过程的本质是通过搅拌摩擦加工过程中的热力耦合作用,细化 TIG 堆焊或铸件局部的晶粒起到强化作用,同时破碎并分散氧化膜层或成分偏析区域,降低铸件缺陷对性能的损害。

3 结 论

- (1)提出了采用搅拌摩擦加工方法修复 ZM5 镁合金铸造缺陷的措施,X 射线检测及理化分析检测结果显示,铸造缺陷可消除且力学性能得到强化。
- (2)单道次的 FSP,性能与母体相当,试样断裂在母材区域;多道次 FSP 处理区域的抗拉强度为母材的 132.8%,屈服强度为其 105%,伸长率为其 329%;TIG+FSP 复合处理区域的抗拉强度为母材的 133.1%,屈服强度为其 110.2%,伸长率为其 186%;FSP 焊缝的存在消除了 TIG 焊缝的不良影响,并显著强化了母材综合力学性能。
- (3)设计了舱体铸件搅拌摩擦缺陷修复工装并采用 TIG 填料+多道次 FSP 复合处理的方法修复了 30 件

ZM5 舱体,采用针长为 8 mm,转速为 600 r/min,前进速度为 80 mm/min,下压量为 1.0~1.5 mm,回抽距离为 100 mm 的工艺参数,修复区域的晶粒从 120~160 μm 细化至 10~30 μm ,修复部位本体剖切试样抗拉强度达到 260.2 MPa,伸长率达到 9.8%。

参 考 文 献

[1] 杨宏伟,王雅生.镁合金铸件缺陷补焊技术[J],焊接技术,2004,33(4): 32-33.

[2] 郑医,徐磊.ZM6 镁合金补焊的组织与性能[J],电焊机,2015,45(12): 3-6.

[3] 张兆栋,杨俊慧.铸造镁合金 A-TIG 补焊工艺分析[J],焊接学报,2017,38(3): 87-90.

[4] 曹爱崇.铸造镁合金 ZM5 的 A-TIG 多层补焊工艺研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2016.

[5] 崔成武,曾惠林,王斌,等.异种镁合金搅拌摩擦焊接头组织及力学性能研究[J].石油工程建设,2021,47(S1): 6-8.

[6] KUMAR S D, KUMAR S S. Effect of heat treatment conditions on ballistic behaviour of various zones of friction stir welded magnesium alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 156-166.

[7] 李亚杰,李峰峰,吴志生,等.工艺参数对 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报,2020,41(1):31-37.

[8] 黄磊. ATZ511 镁合金搅拌摩擦焊的工艺,组织与性能研究[D]. 长春:吉林大学,2023.

[9] DANIEL S, LAKSHMINARAYANAN A K. Comparative study of friction stir welding and underwater friction stir welding on magnesium ZE41 alloy[J]. Trends in Manufacturing and Engineering Management, 2021, 20(2): 112-125.

[10] AKTARERS M, SEKBAND M.Effect of two-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of as-cast binary Al-12Si alloy [J]. Materials Science&Engineering, 2015, A636: 311-319.

[11] MA Z Y, PILCHAKA L. Microstructural refinement and property enhancement of cast light alloys via friction stir processing[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 361-366.

(编辑:张正贺)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- 微官网
- 微商城
- 本刊会议
- 收录动态
- 稿件系统

- 行业动态
- 铸造前沿
- 经典案例
- 铸造学堂
- 专利与发明

- 联系我们
- 免费推广
- 铸造职场
- 产品库
- 企业库