

铸造镁合金 A-TIG 补焊工艺分析

张兆栋, 杨俊慧, 宋刚, 王吉宁

(大连理工大学 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 文中研究了 TIG、A-TIG 焊接方法对铸件焊缝熔深和缺陷的影响规律, 并完成模拟铸件孔洞类缺陷的补焊试验。结果表明, 在 TIG 与 A-TIG 对不同尺寸孔洞愈合的试验中, 在相同的焊接参数条件下, A-TIG 愈合孔洞的深度明显高于 TIG, 且焊缝中无焊接缺陷; 在相同的补焊熔深条件下, TIG 焊接电流远大于 A-TIG, 同时出现热影响区 (HAZ) 组织恶化, 焊接缺陷产生。分析表明, A-TIG 补焊工艺性能优于 TIG 补焊工艺性能主要是由于活性剂与电弧、熔池的相互作用导致。

关键词: 铸造镁合金; A-TIG 焊; 补焊; 缺陷

中图分类号: TG 455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)03-0087-04

0 序 言

镁合金具有密度小、比强度高、比刚度高、阻热性和导热性优良等优点, 广泛应用于航空航天、汽车、电子通讯等领域, 目前工业领域广泛应用的镁合金以铸造件为主^[1]。镁合金在铸造过程中极易出现各种类型的缺陷, 如裂纹、气孔等, 或者机械加工和运输过程中产生的缺陷而使铸件成为不合格品, 不仅造成了材料的极大浪费而且影响产品的交付使用, 所以对铸件缺陷的修补具有重要的经济效益和社会效益^[2,3]。

镁合金铸件的补焊采用较多的是传统钨极惰性气体保护焊 (TIG), 它凭借较高的经济性和操作性在镁合金铸件补焊实际生产中获得广泛应用, 但是因其熔深较浅, 需要进行多层多道补焊, 增加补焊工艺的复杂性, 降低生产效率, 同时补焊后的试件中易产生焊接裂纹、气孔等缺陷, 降低成品率。为了提高 TIG 焊焊缝熔深并且改善焊缝质量, 人们提出活化钨极氩弧焊 (activating flux TIG, A-TIG) 焊接方法, A-TIG 焊焊接方法是焊前在母材表面涂覆一层活性剂, 在相同焊接工艺下, A-TIG 焊具有增加焊缝熔深、大幅度地消减焊缝气孔等优势^[4]。因此, 文中将 A-TIG 焊焊接方法应用于镁合金铸件补焊, 提出一种新型 A-TIG 补焊方法, 研究其与 TIG 补焊工艺的区别, 以便提高补焊效率和成品率。

1 试验方法

试验材料为 6 mm 厚的 AZ91 铸造镁合金。试验使用的设备是松下 YC-300WX3HGE 焊机, 为了更好地去除氧化膜, 采用交流柔性 TIG 焊接模式, 焊接工艺参数为焊接电流 120 ~ 200 A, 焊接速度 5 ~ 7 mm/s, 钨极高度 1 ~ 3 mm, 氩气流量 10 ~ 15 L/min, 活性剂采用自制复合活性剂, 主要成分包括 MnCl_2 , TiO_2 , ZrO_2 等。

对 AZ91 铸造镁合金试样作如下处理: 先用无水乙醇清除试板表面的油污, 利用砂纸去除试板表面的氧化膜。将自制的复合活性剂粉末经过研磨、烘干、过筛到 200 目, 用精度为 0.01 mg 的电子天平称取复合活性剂, 然后与无水乙醇混合成溶液以备用。采用处理后的试板进行 TIG 和 A-TIG 焊焊缝熔深试验。

为了模拟镁合金铸件孔洞类缺陷, 在试板中钻取不同孔径 ($\phi = 2 \sim 5 \text{ mm}$)、不同孔深 ($h = 1 \sim 5 \text{ mm}$) 的孔洞, 然后用无水乙醇清洗试板, 最后将试板放入预置温度为 100 °C 烘干箱进行 10 ~ 15 min 恒温烘干, 以便去除板材中残留的乙醇和结晶水, 图 1 为模拟孔洞类缺陷补焊的示意图, 分别研究 TIG、A-TIG 补焊对不同尺寸孔洞类缺陷的愈合情况。

补焊完成后, 沿焊缝方向和垂直焊缝方向对焊缝进行机械切割、研磨、抛光, 再经由 5 mL 醋酸、5 g 苦味酸、100 mL 酒精和 10 mL 水组成的混合溶液中腐蚀 50 ~ 70 s 后, 制备出金相试样。利用金相显微镜观察焊接接头微观组织和缺陷, 并利用显微硬度仪测量焊接接头显微硬度分布。

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-13-0079); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目 (LJQ2013007)

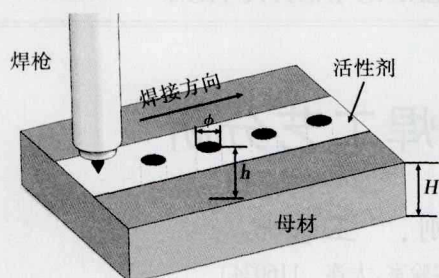


图1 模拟孔洞类缺陷补焊的示意图

Fig. 1 Simulating repair welding hole defects

2 试验结果与分析

2.1 TIG 与 A-TIG 焊焊缝横截面形貌对比试验

图2是不同焊接条件下焊缝横截面形貌,图2a, c分别是TIG焊接电流为120, 200 A时的焊缝形貌,图2b是A-TIG焊接电流为120 A时的焊缝形貌.从图2a, b可以看出,在相同的焊接参数($I = 120$ A, $v = 5$ mm/s)条件下,TIG焊焊缝横截面熔深为2 mm,并且焊缝区存在较小尺寸的气孔缺陷,而A-TIG焊焊缝横截面熔深为4 mm,并且焊缝中不存在缺陷,由此可知,A-TIG焊能够明显地增加焊缝熔深,其焊缝熔深比TIG焊焊缝熔深增加一倍,并且焊缝中没有缺陷.



图2 不同焊接条件下焊缝横截面形貌

Fig. 2 Appearance of weld cross-section

从图2b, c可以看出,TIG焊接电流为200 A时,焊缝熔深与焊接电流120 A时A-TIG焊焊缝熔深相当,但是从图2c可以看出,TIG焊焊缝中存在较大尺寸的宏观气孔缺陷.

2.2 TIG 与 A-TIG 补焊孔洞类缺陷的愈合试验

2.2.1 相同焊接参数条件下 TIG 与 A-TIG 补焊孔洞类缺陷的愈合试验

表1、表2分别是TIG和A-TIG在相同的焊接参数($I = 120$ A, $v = 5$ mm/s)条件下,补焊不同尺寸孔洞类缺陷的愈合的结果.从表1愈合结果中可以看出,TIG补焊时,可以完全愈合孔深 h 为1 mm缺口,当孔深 h 为2 mm时不能愈合,孔深 h 为3 mm时焊缝表面保留孔洞的形貌,难以愈合.从表2愈合情况表可以看出,A-TIG补焊可以完全愈合孔深 h 为

3 mm的缺口,当孔深 h 为4 mm时不能完全愈合,当孔深 h 为5 mm时,缺口难以愈合.

由表1,表2可以得出,A-TIG补焊孔洞类缺陷的愈合能力明显优于TIG补焊孔洞类缺陷的愈合孔洞的能力.

表1 TIG 补焊愈合的结果

Table 1 Healing results of TIG repair welding

孔深 h /mm	孔径 ϕ /mm			
	2	3	4	5
1	愈合	愈合	愈合	愈合
2	愈合	未愈合	未愈合	未愈合
3	未愈合	未愈合	未愈合	未愈合

表2 A-TIG 补焊愈合的结果

Table 2 Healing results of A-TIG repair welding

孔深 h /mm	孔径 ϕ /mm			
	2	3	4	5
1	愈合	愈合	愈合	愈合
2	愈合	愈合	愈合	愈合
3	愈合	愈合	愈合	愈合
4	愈合	愈合	未愈合	未愈合
5	未愈合	未愈合	未愈合	未愈合

图3给出了TIG与A-TIG补焊孔洞类缺陷的愈合试验焊缝表面及纵截面形貌,其中虚线表示补焊前孔洞的位置,图3a是TIG补焊孔深 $h = 1$ mm、孔径 $\phi = 3$ mm的孔洞愈合试验焊缝表面及纵截面形貌,图3b是A-TIG补焊孔深 $h = 3$ mm、孔径 $\phi = 3$ mm的孔洞愈合试验焊缝表面及纵截面形貌.

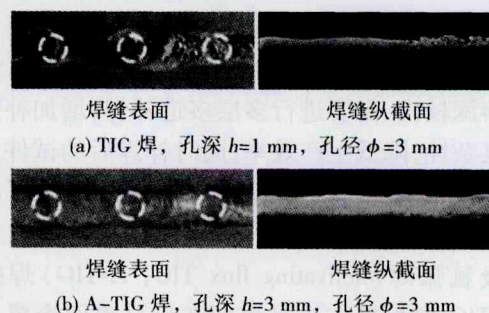


图3 TIG 与 A-TIG 补焊试验结果

Fig. 3 Results of TIG and A-TIG repairing welding

从图3a可以看出,TIG补焊时,焊缝表面存在较小尺寸的气孔,焊缝成形差;焊缝熔深浅,并且同样存在较小尺寸的气孔缺陷.从图3b可以看出,A-TIG补焊时,焊缝表面不存在气孔缺陷,焊缝成形良好,焊缝熔深较大,由此可知,A-TIG补焊不仅能够获得较大焊缝熔深,而且焊缝成形良好,无焊接缺陷.

2.2.2 同愈合程度下 TIG 与 A-TIG 补焊孔洞类缺陷的愈合试验

表3是TIG补焊孔深 $h=3\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 的孔洞愈合结果,其余焊接参数不变,改变TIG焊接电流,当焊接电流达到200 A时,孔洞愈合程度可达到A-TIG补焊孔深 $h=3\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 孔洞的愈合程度。

表3 不同电流下TIG补焊愈合结果

Table 3 Healing results of TIG repair welding in different currents

焊接电流 I/A			
140	160	180	200
不愈合	不愈合	不愈合	愈合

图4给出TIG焊在焊接电流200 A时对孔深 $h=3\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 孔洞愈合试验焊缝表面和纵截面形貌,从图4中看出,虽然孔洞愈合,但是从焊缝表面和纵截面图中可以明显看出,TIG补焊后焊缝中存在较大尺寸的气孔。

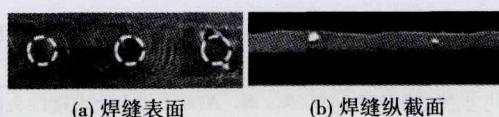


图4 TIG焊在 $I=200\text{ A}$ 时对 $h=3\text{ mm}$ 、 $\phi=3\text{ mm}$ 补焊结果
Fig. 4 Experimental results of TIG repair welding

2.3 补焊后焊接接头的微观组织

图5是TIG和A-TIG补焊后典型焊接接头的微观组织,图5a是试样在焊接电流为120 A时TIG补焊孔深 $h=1\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 孔洞后焊接接头的微观组织,图5b是试样在焊接电流120 A时,A-TIG补焊孔深 $h=3\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 孔洞后焊接接头的微观组织,图5c是试样在焊接电流200 A时,TIG补焊孔深 $h=3\text{ mm}$ 、孔径 $\phi=3\text{ mm}$ 孔洞后焊接接头的微观组织。

如图5a所示,TIG焊焊缝区的晶粒尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右,并发现尺寸 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右的焊接缺陷,热影响区晶粒粗大,晶粒尺寸为 $160\text{ }\mu\text{m}$ 左右;当TIG焊接电流增大到200 A时,如图5c所示,TIG焊焊缝区晶粒尺寸变化不大,但缺陷明显增多,并出现尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右气孔缺陷,热影响区组织明显恶化,平均晶粒尺度为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。与图5c相比,图5b中A-TIG补焊焊缝区没有发现明显焊接缺陷,热影响区的晶粒尺度 $200\text{ }\mu\text{m}$ 左右。从图5补焊后焊接接

头区域的微观组织可以得出,在补焊相同的孔洞达到相同愈合程度条件下,A-TIG补焊接头微观组织明显优于TIG补焊接头。

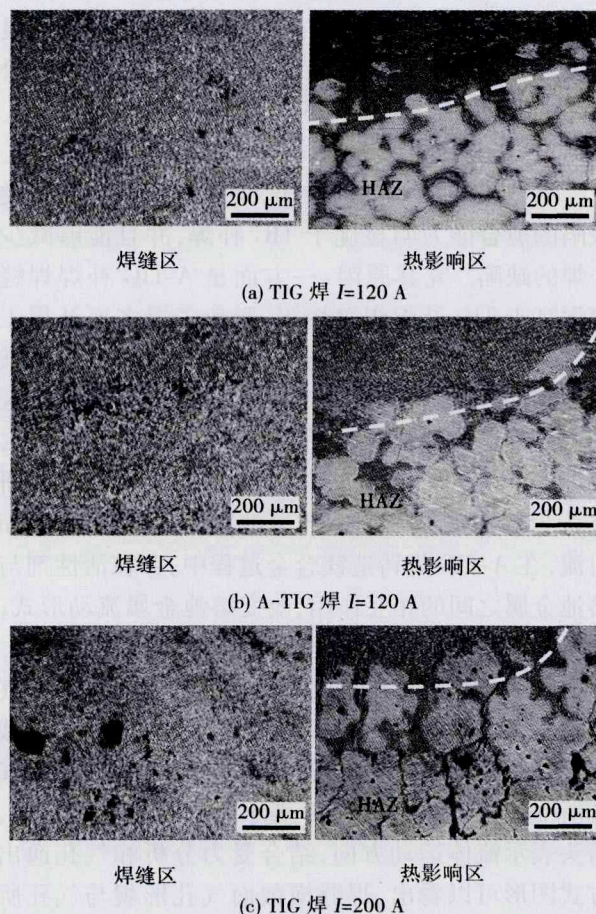


图5 焊接接头微观组织
Fig. 5 Microstructures of welded joints

2.4 补焊后焊接接头的显微硬度

分别利用TIG、A-TIG补焊愈合后的试样进行显微硬度测试,测试结果如图6所示。

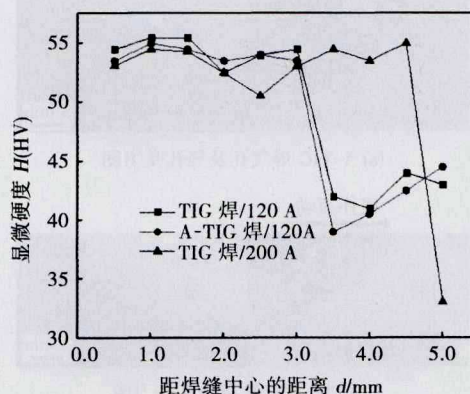


图6 补焊后接头硬度分布
Fig. 6 Hardness distribution after repair welding

从图 6 中可以看出,3 种补焊方式的焊缝区显微硬度值没有明显的差异,其显微硬度大约在 53 HV 左右,然而热影响区的显微硬度值明显下降,并且 3 种补焊方式的热影响区的硬度值出现明显的差异,当 TIG 焊接电流为 200 A 时,热影响区的显微硬度值达到最低 33 HV 左右,根据 Hall-Petch 公式,主要是由于热影响区的晶粒长大所致。

2.5 分析与讨论

从试验结果中可以看出,A-TIG 补焊对孔洞类缺陷的愈合能力明显优于 TIG 补焊,并且能够减少补焊的缺陷。究其原因,一方面是 A-TIG 补焊焊缝熔深高于 TIG 补焊焊缝熔深,避免多层多道补焊工艺,简化了补焊工艺,提高补焊效率;另一方面是镁合金铸件材质疏松,焊接时容易在焊缝与热影响区的交界处形成气孔,然后气孔向焊缝区扩展-长大,根据 Fuji 等人^[5],Tanaka 等人^[6]通过对 A-TIG 焊研究认为存在从熔池周围向熔池中心区的 Marangoni 对流,在 A-TIG 焊铸造镁合金过程中,存在活性剂与熔池金属之间的相互作用,改变熔池金属流动形式,从而改变气孔缺陷的上浮行为,减少焊缝气孔缺陷。图 7 为 A-TIG 焊和 TIG 焊条件下受力分析和焊缝气孔逸出方式,图 7a 为 A-TIG 补焊条件时,焊缝横截面气孔受力图和气孔形貌,其中 F_b 和 F_f 分别表示气孔所受的浮力和流体力, F 表示两个力的合力方向,箭头表示流体运动方向,结合受力分析和气孔逸出方式图形可以看出,焊缝横截面气孔形貌与气孔所受的合力方向 F 具有一致性,这种受力方式有利于气孔从熔池中排出,减少补焊缺陷,提高补焊效率,而 TIG 补焊时,焊缝横截面气孔形貌与气孔受力如图 7b 所示,这种受力方式不利于气孔缺陷的排除,易产生气孔缺陷。

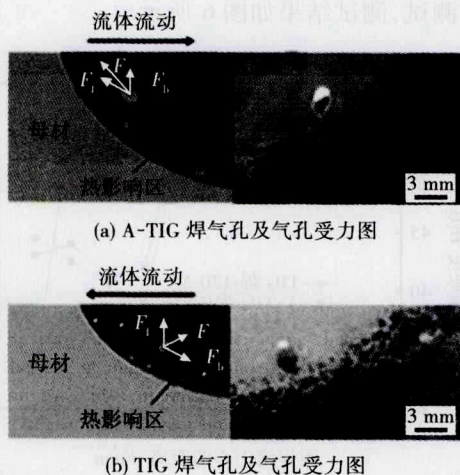


图 7 焊接气孔及气孔受力示意图

Fig. 7 Weld porosity and force of porosity

3 结 论

(1) 在相同焊接工艺参数条件下 ($I = 120$ A, $v = 5$ mm/s), A-TIG 焊焊缝熔深是 TIG 焊焊缝熔深的两倍,并且焊缝中无气孔缺陷;当 TIG 焊接电流增大到 200 A 时,可以获得同 A-TIG 焊接电流为 120 A 时相同的熔深,但是焊缝中出现气孔缺陷。

(2) 在相同焊接工艺参数条件下 ($I = 120$ A, $v = 5$ mm/s), TIG 补焊只可以愈合 1 mm 深的孔洞,而 A-TIG 可以愈合 3 mm 深的孔洞;同愈合程度条件下 ($h = 3$ mm、孔径 $\phi = 3$ mm) TIG 补焊在焊接电流 200 A 时可以获得同 A-TIG 补焊在焊接电流 120 A 时相同的愈合效果,但是前者焊缝中出现明显的气孔缺陷。

(3) 通过对补焊后焊接接头的微观组织和显微硬度观察发现,利用 A-TIG 进行补焊不但可以实现较深孔洞的愈合,而且可以减少焊缝气孔缺陷,具有提高效率和减少缺陷的效果。

参考文献:

- [1] 王向杰. 压铸镁合金表面局部重熔过程气孔问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [2] 闫忠杰, 陈书翔, 尚 哲, 等. A7N01 铝合金焊接接头的补焊性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 51-54.
Yan Zhongjie, Chen Shuxiang, Shang Zhe, et al. Property of repair welding joint of A7N01 aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 51-54.
- [3] 王 欣, 杨 闯, 冯吉才. ZM6 镁合金铸件 TIG 焊补焊工艺[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 34-36.
Wang Xin, Yang Chuang, Feng Jicai. Research on TIG repairing technology for ZM6 magnesium alloy casting[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 34-36.
- [4] 张兆栋, 曹全金. 金属单质活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 37-40.
Zhang Zhaodong, Cao Quanjin. Effects of metal activating fluxes on A-TIG welding of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 37-40.
- [5] Fujii H, Lu S P, Nogi K. Welding pool convection under microgravity and effect of Marangoni convection on weld shape[C]// Proceedings of IFWT in Aviation and Space Industries. Beijing, China Mechanical Engineering Society, 2004: 75-87.
- [6] Tannaka M, Shimizu T, Terasaki H, et al. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(6): 397-402.

作者简介: 张兆栋,男,1981 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要从事镁合金活性焊接技术方面的研究,发表论文 40 余篇。
Email: skyezdd@dlut.edu.cn

通讯作者: 宋 刚,男,副教授。Email: songgang@dlut.edu.cn