

磁场下镁合金 A-TIG 接头成形性及显微组织分析

苏允海^{1,2}, 林金梁¹, 蒋焕文¹, 刘政军¹

(1. 沈阳工业大学 辽宁省先进焊接技术及自动化重点实验室, 沈阳 110870;

2. 辽宁聚龙金融设备有限公司 国家级工程技术中心, 鞍山 114041)

摘 要:在对 5 mm 厚的 AZ31B 镁合金板材进行 A-TIG 焊接过程中引入外加纵向磁场, 试验所用的活性剂是以氧化物为基的活性剂, 试验中改变磁场参数, 对焊接接头的成形性、组织及性能进行试验和检测, 研究磁场参数对镁合金 A-TIG 焊过程的影响规律。结果表明, 活性剂及磁场共同作用可以改善焊接接头的成形性和组织形态, 在磁场频率为 10 Hz, 磁场电流为 2 A 时, 焊接接头的成形系数和性能得到了最佳值, 此时成形系数为 2.304, 硬度为 980.98 MPa; 外加磁场通过电磁搅拌作用与活性剂相结合, 改变了熔池的流行形态, 使金属液由四周向中心流动并伴有搅拌, 进而使焊缝熔深增大的同时细化组织, 改善接头力学性能。

关键词: 磁场; 成形性; 镁合金; 活性钨极氩弧焊

中图分类号: TG422 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)11-0013-04



苏允海

0 序 言

随着 21 世纪工业迅猛发展, 金属材料的开发和应用受到各界人士越来越多的关注。目前常用的金属材料除了钢、铁和铝之外, 镁合金位列第四, 在有色金属中仅次于铝合金。镁合金有质轻、减震和易回收等优点被广泛应用于汽车行业, 同时在航空航天、笔记本电脑、数码视听设备、数码摄像机和手机等领域也有十分广阔的应用前景^[1,2]。

随着镁合金应用领域和产品种类的不断扩大, 镁合金的成形技术也得到极大的发展。镁合金的焊接技术作为一种重要的成形技术已成为研究热点, 为广大焊接工作者所热衷。钨极氩弧焊(TIG)由于采用惰性气体(Ar)作为保护气体, 特别适合焊接镁合金这类活性金属, 但其焊接效率较低限制了它的推广使用, 活性钨极氩弧焊(A-TIG)是为了解决这一问题迎刃而生的^[3,4]。A-TIG 中的活性剂可以提高焊缝的熔深, 但对焊缝的组织影响较小, 因此 A-TIG 对镁合金焊接接头的力学性能影响较小。磁控焊接技术作为新兴的焊接技术, 可以通过外加磁场对焊接电弧和熔池产生电磁搅拌作用, 进而细化焊缝晶粒、改善焊接性、提高焊接接头力学性能^[5,6]。

目前对于镁合金的 A-TIG 已有报道, 但对磁场状态下活性剂研究未见报告。文中将对不同参数下镁合金的活性焊接进行研究, 分析磁场参数和活性剂对镁合金焊缝成形性、组织及性能的影响, 并探究磁场和活性剂的作用机理。

1 试验方法

试验以 AZ31B 板材作为母材。试件规格为 50 mm × 40 mm × 5 mm, 具体成分为(质量分数, %): (2.5% ~ 3.5%) Al, (0.5% ~ 1.5%) Zn, (0.2% ~ 0.5%) Mn, 0.10% Si, 0.05% Cu, 其余为 Mg。

试验采用 WSE-500 钨极氩弧焊对镁合金 AZ31B 板进行平板堆焊, 试验过程中氩气流量为 10 L/min, 钨极直径为 2 mm, 喷嘴直径为 10 mm, 焊接速度为 30 cm/min, 焊接电流为 100 A。外加磁场由安装在试件下方的励磁线圈产生, 线圈的匝数为 430 匝, 试件放置在线圈的中心位置, 保证试件在焊接过程中一直处于纵向磁场状态下。焊接过程中磁场频率为 5 ~ 15 Hz, 以 5 Hz 的幅度变化。调节磁场电流(I_m) 范围为 1.5 ~ 3 A, 变化幅度为 0.5 A。试验选用的活性剂是自行配制的活性剂配方, 主要成分为 30% Cr₂O₃, 50% TiO₂ 和 20% CaO 三种氧化物, 采用丙酮将活性剂混合均匀, 用毛刷将活性剂涂敷到待焊工件表面, 待丙酮挥发后进行焊接。

收稿日期: 2012-07-01

基金项目: 辽宁省教育厅资助项目(201124125); 辽宁省博士启动基金资助项目(20131079)

焊接之后垂直于镁合金试样表面并垂直焊缝方向截取尺寸为 $15\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的金相试样, 在涂敷活性剂的每一侧分别截取 2 块试样, 以便测量熔深熔宽时多次测量取平均值以减小误差. 用型号为 OLMPUSBX-6 金相显微镜及扫描电镜观察焊缝的微观组织. 采用 XRD 分析试件的物相组成. 采用 HVS-1000 测量试样熔焊后横截面的硬度值.

2 试验结果与分析

2.1 磁场参数对镁合金 A-TIG 焊缝成型的影响

磁场的引入, 使焊接电弧发生旋转, 将影响焊缝熔深、熔宽及成形系数. 活性剂也会影响焊缝熔深、熔宽及成形系数. 为了研究活性剂及磁场共同作用下焊缝熔深、熔宽及成形系数变化规律, 明确相同活性剂不同磁场参数作用下焊缝熔深、熔宽及成形系数随磁场电流的变化规律, 对不同磁场参数下焊缝熔深和熔宽进行检测, 计算出焊缝成形系数.

图 1 为焊缝熔深随磁场电流的变化曲线. 从图 1 中可以看出, 不同磁场频率作用下的 3 条曲线变化趋势基本相同, 即在磁场频率相同的条件下, 焊缝熔深随着磁场电流的增加呈现先增大后减小的变化规律, 在磁场电流为 2 A 时达到最大值, 焊缝呈现焊透状态; 此外还可发现, 不同磁场频率状态下 3 条曲线的相对位置也发生一定的变化, 熔深随着磁场频率的增加也先增大后减小, 即在磁场频率为 10 Hz 时, 整体曲线达到了最高处. 因此综合上述分析可知, 当磁场电流为 2 A、磁场频率为 10 Hz 时, 焊缝熔深达到最大值, 此时已经为全焊透状态.

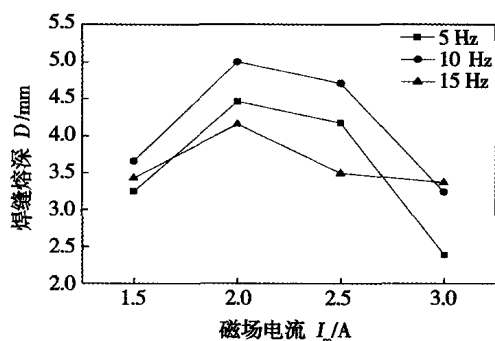


图 1 焊缝熔深随磁场电流的变化曲线

Fig. 1 Depth of welded joint with different magnetic field currents

图 2 为焊缝熔宽随磁场电流的变化曲线. 从图 2 中可以看出, 不同磁场频率作用下的 3 条曲线变化趋势基本相同, 即在磁场频率一定的条件下, 焊

缝熔宽随着磁场电流的增加呈现先增大后减小的变化规律, 在磁场电流为 2.5 A 时达到最大值; 同样在相同的磁场电流下, 随着磁场频率的增加, 整个曲线先向上平移而后再向下平移, 在磁场频率为 10 Hz 时曲线达到了最高处, 这说明焊缝的熔宽在磁场电流为 2.5 A、磁场频率为 10 Hz 时达到最大值.

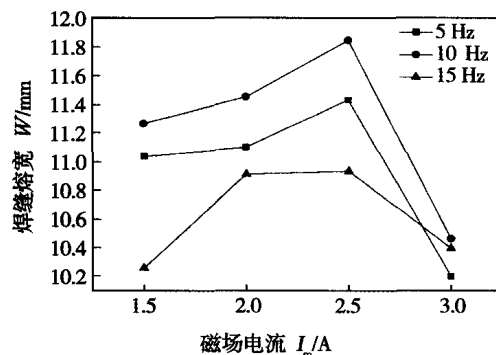


图 2 焊缝熔宽随磁场电流的变化曲线

Fig. 2 Width of welded joint with different magnetic field currents

通过图 1 和图 2 的曲线可以发现, 焊缝的熔深和熔宽随磁场电流的变化规律基本相同, 都随着磁场电流的增大呈现出先增大后减小的变化趋势, 这使得很难明确外加磁场电流对焊缝成型状态和效率的影响, 为此需对不同磁场电流下焊缝的成形系数进行汇总, 结果如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 不同磁场频率作用下的 3 条曲线变化趋势基本相同, 焊缝成形系数随着磁场电流的增加呈现先减小后增大的变化规律, 焊缝成形系数在磁场电流为 2 A 时达到最小值, 只有磁场频率为 15 Hz, 磁场电流超过 2.5 A 时曲线的变化规律稍有不同, 呈下降的变化趋势; 此外随着磁场频率的变化, 整个曲线的趋势虽然没有太大的变化, 但是曲线的相对位置还是发生了明显的变化, 具体表现为随着磁场频率的增大曲

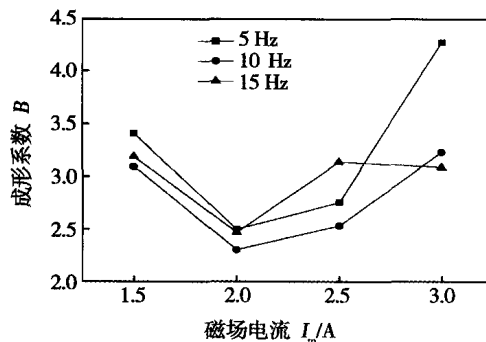


图 3 成形系数随磁场电流的变化曲线

Fig. 3 Form factor with different magnetic field currents

线先上移而后下移,在磁场频率为 10 Hz 时达到了最下端.由此可以得出,当磁场电流为 2 A、磁场频率为 10 Hz 时,焊缝的成形系数最小达到 2.304,此时焊缝相对于其它参数的焊缝而言是一个窄而深的焊缝,这对提高焊接效率十分有益,此外 2.304 大于相关标准中规定的成形系数最小值 1.5,这说明此时焊缝中的气体有充足的时间上浮,对接头的性能没有太大的影响,所以此时焊缝成形达到最优.

2.2 磁场参数对镁合金 A-TIG 焊显微硬度的影响

材料的硬度是材料重要的力学性能指标之一.显微硬度的测量能够反映焊接接头微观组织的细微变化.为了研究磁场和活性剂共同作用下焊缝区显微硬度的变化情况,对磁场作用下 A-TIG 焊缝区进行显微硬度测量,结果如图 4 所示.从图 4 中可以看出,磁场频率相同时,焊缝显微硬度随着磁场电流的增大,首先呈现增大的趋势,在磁场电流为 2 A 处出现最大值,之后随着磁场电流的增大又呈现减小的变化趋势;而针对固定的磁场电流,显微硬度从大到小的分布依次为 10, 15, 5 Hz,综合磁场频率和磁场电流对镁合金焊缝硬度的影响情况而言,当磁场频率为 10 Hz,磁场电流为 2 A 时,焊接接头的硬度取得了最大值,其值为 980.98 MPa.

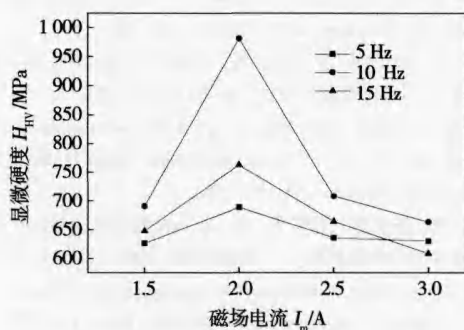


图 4 显微硬度随磁场电流的变化曲线

Fig. 4 Microhardness with different magnetic field currents

2.3 磁场参数对镁合金 A-TIG 焊显微组织的影响

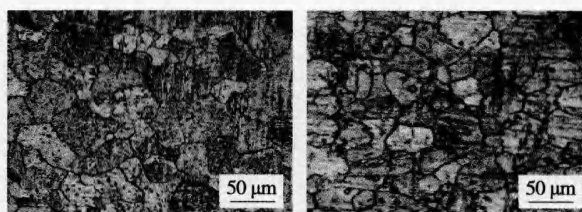
通过对比镁合金 A-TIG 焊接时磁场参数对焊接接头显微硬度的影响,可以分析得出在磁场频率为 10 Hz 时,焊接接头的显微硬度达到最优,因此主要针对磁场频率 $f=10$ Hz 时,不同磁场电流状态下焊缝显微组织进行分析,结果如图 5、图 6 所示.

从图 5、图 6 中可以看出,在活性剂和磁场双重作用下,当磁场电流较小时,焊缝中的显微组织较无磁场状态下变化不明显,如图 5 和图 6a 所示,即活性剂和磁场共同作用下焊缝组织与无活性剂无磁场时焊缝的显微组织组成相同.但当磁场电流增加到



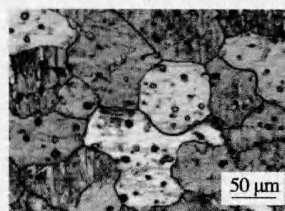
图 5 无活性剂无磁场时焊缝显微组织

Fig. 5 Microstructure without activating flux and magnetic field



(a) 磁场电流为 1.5 A

(b) 磁场电流为 2 A



(c) 磁场电流为 3 A

图 6 $f=10$ Hz 时不同磁场电流下焊接接头的显微组织形貌

Fig. 6 Microstructure of welded joint under different magnetic field current, when $f=10$ Hz

2 A 时,活性剂及磁场共同作用下,焊缝晶粒尺寸发生明显变化,焊缝晶粒明显变细,如图 6b 所示,当磁场电流进一步增加到 3 A 时,可以看出晶粒发生明显的粗化,如图 6c 所示.由此可以得出,含有活性剂状态下,随着磁场电流的增大,焊缝的显微组织先细化而后出现一定的粗化现象,这与焊接接头的力学性能相一致,进而验证了上述力学性能变化的真实性.

为了验证焊缝中的物相组成,对焊缝区进行 XRD 分析,结果如图 7 所示.从图 7 可以看出,焊缝区主要由 α -Mg 固溶体和 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 金属间化合物组成,而 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 的衍射峰较弱,说明焊缝中存在大量的 α -Mg 却仅有少量的 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$.原因是 AZ31 镁合金中 Al 元素的含量仅为 3% 左右,活性剂中只加入了少量的 Al 元素,大部分铝都以固溶体的形式溶入镁中形成 α -Mg,只有凝固过程时才有少量 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 析出.

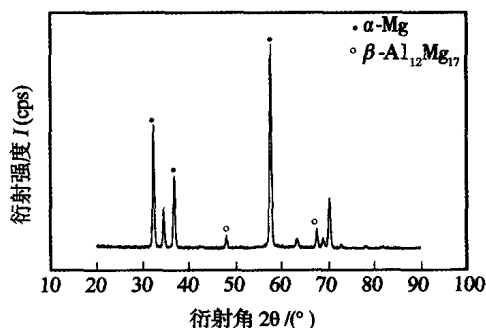


图 7 混合活性剂作用时焊缝区 X 射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray pattern of welding zone with mixture active agent

3 讨 论

在磁场和活性剂双重作用下的焊接过程中,对焊接电弧形态进行了观察,结果并未发现电弧的收缩,相反在引入磁场后,焊接电弧出现明显的扩张现象.分析认为熔深增加机理可能是焊接过程中加入磁场,首先焊接电弧受到电磁力的作用,其形态呈现为“钟罩状”,其中大部分带电粒子集中在电弧的外表面,内部几近真空^[7].此时磁场作用下电弧发生旋转,施加在焊缝表面的电弧力增大,电弧施加在熔池表面活性剂的作用力也增加,镁合金的导热系数较大,使得大量热量被焊缝表层且靠近外侧的金属吸收,此时的活性剂很难电离进入电弧中,而是随着电磁搅拌作用进入焊接熔池,由于试验采用的是氧化物基活性剂,它们将改变焊缝熔池金属表面张力^[4],使外部金属优先熔化,熔池液态金属由四周开始向焊缝心部流动.随着磁场电流的增大,外加磁场强度的增大使得电弧受力增大,其“钟罩状”更加明显,大量带电粒子集中在电弧外侧,施加在焊缝表面的电弧力进一步增大,焊接电弧在磁场电磁力作用下旋转,使得电弧对熔池形成螺旋状的搅拌^[6],此时液态金属流动形式在电弧和活性剂共同作用下变成螺旋向下的转动,且呈锥形,电磁搅拌不断地将流动流体打断,最终就形成多个小螺旋转动的锥形流动流,导致焊缝熔深增加,同时“钟罩状”的电弧使熔深增加的同时熔宽也增加.只是熔深增加效果明显,最终焊缝成形系数减小,在参数最优匹配时达到最小值.但当磁场参数进一步增大时,成形系数又增加,这是由于磁场频率(或电流)过大使电弧受力过大,发生“飘移”现象,使成形系数在不同磁场电流下的变化规律不明显.关于磁场和活性剂双重作用下的焊接过程熔深增加机理仍需进一步研究.

4 结 论

(1) 将外加磁场引入到镁合金的 A-TIG 焊过程中,通过磁场的作用可以改善焊缝的成形性和接头的组织及性能.

(2) 在磁场频率为 10 Hz,磁场电流为 2 A 时,镁合金 A-TIG 焊焊接接头的成形状态和力学性能达到了最佳状态,磁场焊缝的成形系数为 2.304,硬度为 980.98 MPa.

(3) 外加磁场通过电磁搅拌作用与活性剂相结合,使金属液由四周向中心流动并伴有搅拌,使得焊缝熔深增大的同时细化组织,改善接头力学性能.

参考文献:

- [1] 李 铁,程培元,华 林. 镁合金在汽车工业和 3C 产品中的应用[J]. 江西有色金属, 2007, 21(2): 30-33.
Li Yi, Cheng Peiyuan, Hua Lin. Current application of magnesium alloy in automotive industry and 3C product fields[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2007, 21(2): 30-33.
- [2] 刘政军,苏允海,刘 铎,等. 镁合金及其成形技术概述[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(1): 14-20.
Liu Zhengjun, Su Yunhai, Liu Duo, et al. Review of magnesium alloy and their forming technologies[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(1): 14-20.
- [3] 徐 杰,刘子利,沈以赴,等. AZ31 镁合金活性 TIG 焊接头分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 54-57.
Xu Jie, Liu Zili, Shen Yifu, et al. A-TIG weld analysis of AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 54-57.
- [4] 马 翔,张兆栋,刘黎明,等. 单一及复合氧化物活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(9): 39-42.
Ma Xiang, Zhang Zhaodong, Liu Liming, et al. Effects of single and composite component oxides activating fluxes on A-TIG welding of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(9): 39-42.
- [5] 苏允海,蒋焕文,秦 昊,等. 镁合金磁控焊工艺参数的优化设计[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 84-88.
Su Yunhai, Jiang Huanwen, Qing Hao, et al. Optimum design of magnesium alloy welding parameters with GTAW under magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 84-88.
- [6] Su Yunhai, Liu Zhengjun, Liu Duo. Effect of magnetic field on microstructure and properties of magnesium alloy welded joint with GTAW[J]. Manufacturing Process Technology, 2011, (189/193): 3507-3511.
- [7] 罗 键. 外加纵向磁场 GTAW 焊接熔池流体流动与传热行为的研究[D]. 西安: 西安交通大学博士论文, 1999.

作者简介: 苏允海,男,1980 年出生,博士,讲师. 主要从事焊接冶金、特种焊接材料及表面强化方面的研究. 发表论文 25 余篇.
Email: 289646841@qq.com