

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.01.015

铝镁合金焊接接头组织与力学性能的不均匀性研究

蹇海根^{1, 2}, 王业东¹, 杨孝梅¹, 吴若涛¹, 雷新蕾¹, 黄渊平¹

(1. 湖南工业大学 冶金与材料工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 昆士兰科技大学, 昆士兰 澳大利亚 4001)

摘 要: 采用 Al-Mg 合金焊丝多层多道 MIG 焊焊接 10 mm 厚铝镁锰合金热轧板材, 运用金相组织分析、扫描电镜分析 (含能谱和电子背散射衍射) 等分析手段对焊接接头的组织不均匀性和力学性能进行了研究。结果表明, 由于焊接循环热、冷却速率以及 Al_3Zr 等热稳定相粒子的不同作用, 焊接接头不同区域内组织与力学性能均呈现出一定的不均匀性。焊缝区为典型的铸态组织, 热影响区为保留部分变形特征的再结晶组织, 熔池边界由于 Al_3Zr 粒子非均匀形核核心的作用, 形成强化效果不明显的细晶薄层, 其显微硬度值分别小于焊缝区和热影响区, 而两焊道交界面的晶粒沿散热方向外延生长, 粗化明显, 显微硬度值最低。

关键词: 铝镁合金; MIG 焊; 组织不均匀性; 粗晶区

中图分类号: TG406

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)01-0092-07

引文格式: 蹇海根, 王业东, 杨孝梅, 等. 铝镁合金焊接接头组织与力学性能的不均匀性研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(1): 92-98.

Research on Inhomogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Al-Mg Alloy Welded Joints

JIAN Haigen^{1, 2}, WANG Yedong¹, YANG Xiaomei¹, WU Ruotao¹, LEI Xinlei¹, HUANG Yuanping¹

(1. College of Metallurgy and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Queensland University of Technology, Queensland 4001, Australia)

Abstract: The multi-layer and multi-pass MIG welding with Al-Mg alloy welding wire has been used to weld 10 mm thick hot rolled aluminum magnesium manganese alloy plate, followed by a detailed study on the microstructure and mechanical properties of welded joints by means of metallography, scanning electron microscopy (including energy spectrum and electron backscatter diffraction). The results show that the microstructure and mechanical properties of the welded joints in different regions show certain inhomogeneity due to the different effects of welding thermal cycle, cooling rate and such heat stabilized phase particles as Al_3Zr . The weld zone is a typical casting microstructure, and the heat-affected zone is a recrystallized structure which with some deformation characteristics. Due to the effect of the inhomogeneous nucleation of Al_3Zr particles on the boundary of the molten pool, the fine grain thin layer with little strengthening effect is formed, with the microhardness value smaller than that of the weld zone as well as the heat affected zone. However, the grain at the interface of the two passes grows along the direction of heat dissipation, with an obvious coarsening and the lowest degree of microhardness.

Keywords: Al-Mg alloy; MIG welding; microstructure inhomogeneity; coarse grain zone

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4060), 国家级大学生创新训练基金资助项目 (201811535021), 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目 (2018660)

作者简介: 蹇海根 (1980-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事焊接物理冶金过程方面的教学与研究, E-mail: jianhaigen2001@163.com

1 研究背景

铝镁合金属于典型的不可热处理强化合金, 具有中强可焊、耐蚀性好等特点, 被广泛应用于大型船舶的上层结构和舾装件中。考虑到船体结构所承受载荷及腐蚀环境两个因素, 研究用的铝镁锰合金是最基本的船用焊接结构材料^[1-3]。船舶焊接技术在提高造船生产效率、降低成本及减重方面的作用不可小视, 且焊接方法很多, 如熔化极气体保护电弧焊、钨极氩弧焊 (tungsten inert-gas welding, TIG)、搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 等。经过近几十年的发展, MIG 焊 (metal inert-gas welding) 从焊接设备、焊接材料到工艺, 都日趋成熟, 是目前用得最多的一种焊接方法, 也是自动线上和焊接机器人的首选熔焊方法, 国内外 90% 以上的铝合金焊接采用 MIG 焊^[4-8]。

目前, 业界关于铝镁系合金焊接及其焊接接头组织与性能方面的研究较多, 但是对多层多道次 MIG 焊焊接接头组织不均匀性的研究还鲜有报道。一般来说, 焊接接头的各个微区在成分、组织和性能上都不均匀^[9-13]。比如, 从焊缝到母材的焊接缺陷是不同的, 焊缝区是典型的铸态组织, 热影响区却呈现出再结晶特征, 焊缝表面性质和焊缝受力也不均匀。但是, 关于焊接接头的成分、组织的不均匀度并没有一个统一的评定标准, 一般的做法是通过对断面的金相观察、高倍形貌分析和硬度的变化曲线来定性表征其不均匀性。

本研究拟采用焊接机器人自动化焊接, 选择铝镁合金配用焊丝对 10 mm 厚铝镁锰合金热轧板材进行多层多道次 MIG 焊接, 运用金相组织分析、扫描组织观察及电子背散射衍射分析和显微硬度测试等对焊接接头的均匀性进行研究, 并进一步探讨熔池边界细晶层和焊道交界面区域粗晶形成及长大的微观机制。

2 试验材料与方法

试验用焊接基材为 10 mm 厚的 Al-Mg-Mn 合金热轧板材, 其主要化学成分如下: $w(\text{Mg})=6.58\%$, $w(\text{Mn})=0.55\%$, $w(\text{Cr})=0.20\%$, $w(\text{Zr})=0.15\%$, Al 余量。填充金属材料选择与基材相近的铝镁合金焊丝, 其主要化学成分如下: $w(\text{Mg})=5.73\%$, $w(\text{Mn})=0.49\%$, $w(\text{Cr})=0.15\%$, $w(\text{Zr})=0.15\%$, Al 余量。

焊接前对焊件进行表面清理, 用丙酮或酒精擦拭后, 再用钢丝刷将焊接区域表面刷净。所开坡口为 V 型坡口, 试验采用日本松下 YD-400GE 焊机, 在单一惰性气体 Ar (体积分数为 99.99%) 保护下进

行 MIG 手工焊, 焊接电流为 200 A, 焊接速度为 600 mm/min。焊接采用 3 层 4 道焊, 第一层为反面打底焊, 第二层为填充焊, 第三层为覆面两道焊, 具体的焊接接头示意图如图 1 所示。

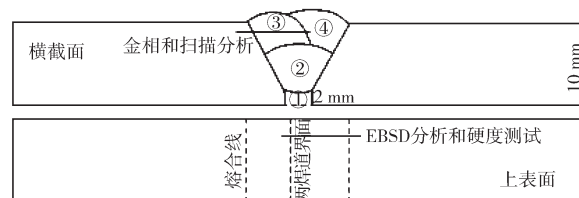


图1 焊接接头示意图

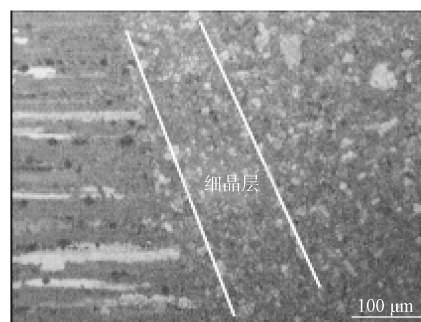
Fig. 1 Schematic diagram of welded joints

在焊接横截面选区进行金相和扫描形貌观察, 去除焊接余高后, 在接头上表面沿与焊缝垂直方向进行 EBSD 全貌分析和显微硬度测试, 其具体取样位置见图 1。金相显微组织观察试样需在磨样抛光后进行阳极覆膜, 溶液配比为 1 000 mL H_2O +30 mL HF+11 g H_3BO_3 , 实验电流保持在 0.1~0.2 mA, 覆膜时间约为 90 s。扫描形貌观察、能谱分析以及 EBSD 分析在日本电子 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜上进行。硬度测试在 HVA-10A 型低负荷维氏硬度计上进行, 负荷为 50 g, 持续时间为 15 s。

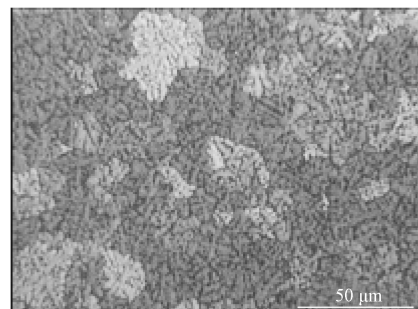
3 试验结果与分析

3.1 形貌观察

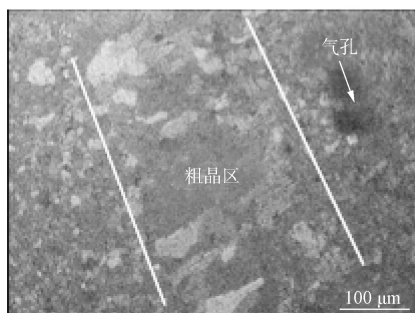
焊接接头横截面各区域的金相显微组织观察结果如图 2 所示, 其主要由热影响区、熔合区、焊缝区和粗晶区组成。



a) 热影响区+细晶层



b) 焊缝区



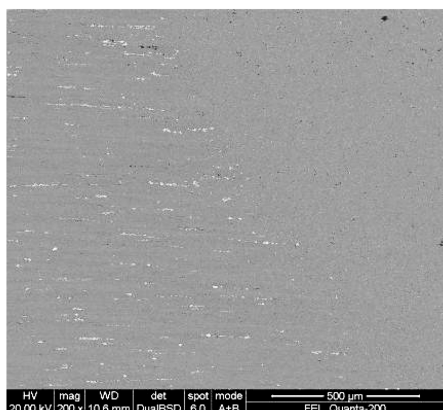
c) 粗晶区

图2 焊接接头各区域金相组织

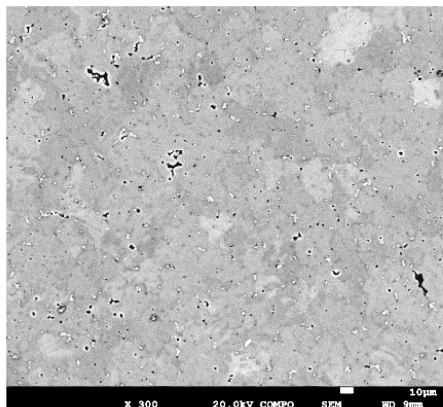
Fig. 2 Metallurgical structure of each zone of welded joints

由图2的金相组织观察结果可以看出,热影响区仍然保持轧制条带的基本组织特征,可以看到部分轧制过程未回溶的粗大相,且沿挤压方向分布,同时发生了一定程度的再结晶,主要表现为晶粒粗化。在焊接基材与焊缝区交界面存在一层细晶组织,晶粒很小,只有几微米,如图2a所示。焊缝区为典型的铸态组织,晶粒较为粗大,约为20~30 μm(见图2b)。而在第3、4焊道之间存在一个粗晶区,晶粒粗大且沿散热方向生长明显,最大晶粒尺寸近100 μm,且边界附近可观察到气孔的存在。

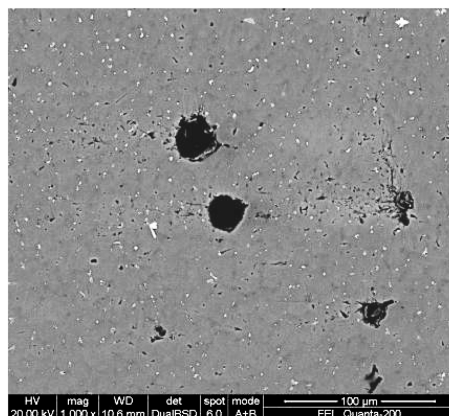
进一步对焊接接头各个区域进行扫描显微观察,其结果如图3所示。



a) 热影响区 + 细晶层



b) 焊缝区



c) 粗晶区

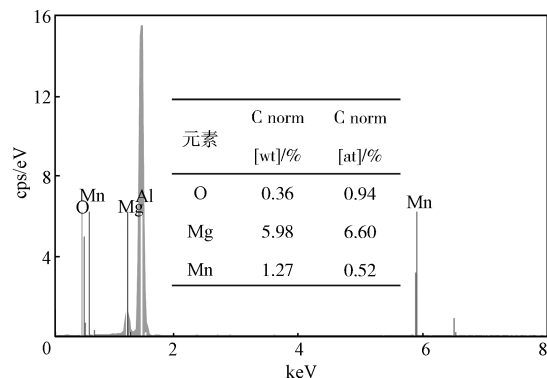
图3 焊接接头各区域 SEM 形貌

Fig. 3 SEM morphology of each zone of welded joints

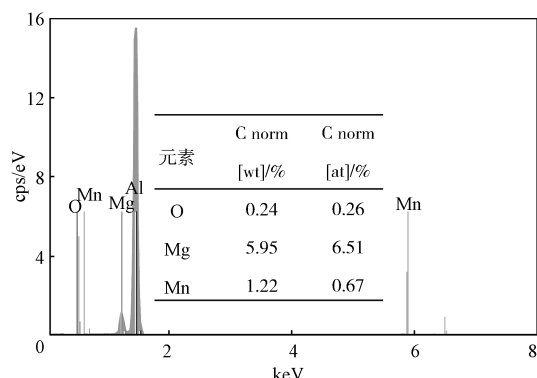
从图3的扫描结果可知,焊接热影响区与焊缝区分界较明显,沿轧制方向分布着一些粗大相粒子。焊缝区在晶内和晶界均有析出,但晶界析出量更大。因为在焊缝冷却过程中,随着晶粒长大相遇,低熔点物质更容易在晶界偏析。同理,在粗晶区附近也可观察到较大的焊接气孔,如图3c所示。

3.2 能谱分析

无论是整体组织形态,还是第二相分布和晶粒度的大小,焊接接头各区域均存在明显差异,呈现很大的组织不均匀性。为了进一步研究焊接接头各区域组织不均匀性的形成原因,分别对细晶层、焊缝区和粗晶区进行能谱分析,其检测结果如图4所示。



a) 焊缝区



b) 粗晶区

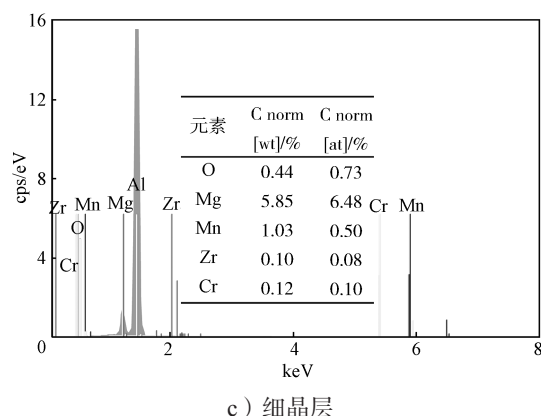


图4 焊接接头各区域能谱分析结果

Fig. 4 Energy spectrum analysis results of each zone of welded joints

由图4所示的能谱分析结果可以看出,除去焊接烧损和挥发之外,焊缝区和粗晶区的成分区别不大。细晶层却发现了微量的Zr和Cr,而这就是在熔池边界形成细晶层的主要原因。因为焊接基材在经过均匀化退火和后续热轧加工后,基材中形成了大量的 Al_3Zr 粒子,这些 Al_3Zr 粒子无论是晶格类型(LI_2 型)还是晶格尺寸均与 $\alpha(Al)$ 基体极为相近,且错配度非常小,在焊接冷凝过程中作为良好的非均匀质晶核在熔池壁上优先析出,从而在熔池界面形成一层细晶组织^[14]。在焊接冷凝过程中,焊缝金属中也有可能析出少量的初生 Al_3Zr 粒子。因为一方面该种粒子数量有限,另一方面初生的析出粒子对细化焊缝金属晶粒的作用不明显,所以焊接接头焊缝区的晶粒组织仍然较为粗大。

3.3 电子背散射衍射观察/EBSD分析

课题组为了了解焊接接头各区域,特别是熔合线和两焊道界面区域的晶粒形成及长大情况,对焊接接头进行电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, EBSD)全貌观察,其结果如图5所示。

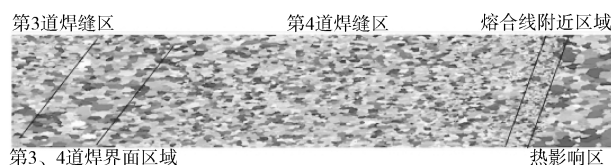


图5 焊接接头的EBSD分析结果

Fig. 5 EBSD analysis result of welded joints

由图5可知,焊接接头各区域的组织存在明显不均匀性,靠近焊缝的热影响区出现了明显的再结晶,熔合线附近区域存在细晶层,且晶粒沿焊缝中心方向逐渐粗化,因而在第3、4道焊界面区域形成了明显的粗晶区。

对焊接接头的热影响区、细晶层、焊缝区和粗晶区进行选区EBSD分析发现,不同区域的晶粒大小

明显不同,粗晶区晶粒最为粗大,而热影响区由于受到焊接热的影响,出现了一定程度再结晶而造成加工变形组织特征减弱,如图6所示。

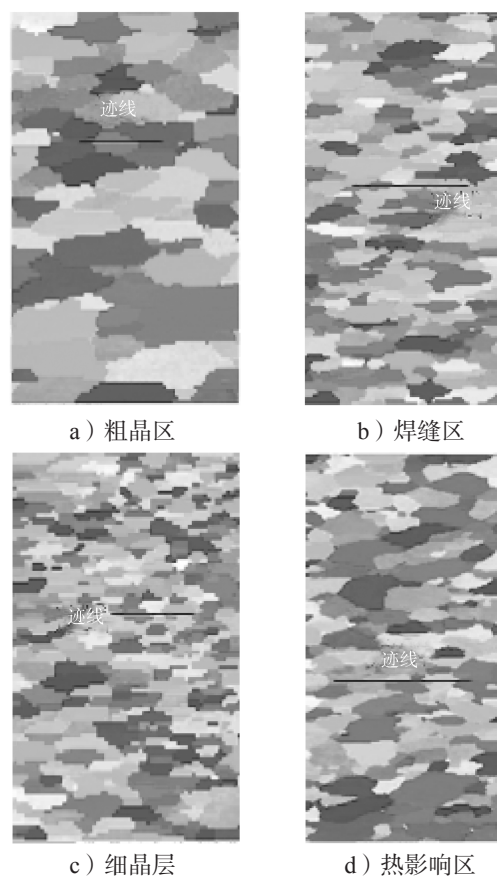


图6 焊接接头各区域的反极图

Fig. 6 Inverse pole figure of each zone of welded joints

3.4 统计分析

进一步对各选定区域进行晶粒大小、取向差等统计分析,结果如图7~10所示。

焊接接头各区域晶粒大小分析如图7所示。

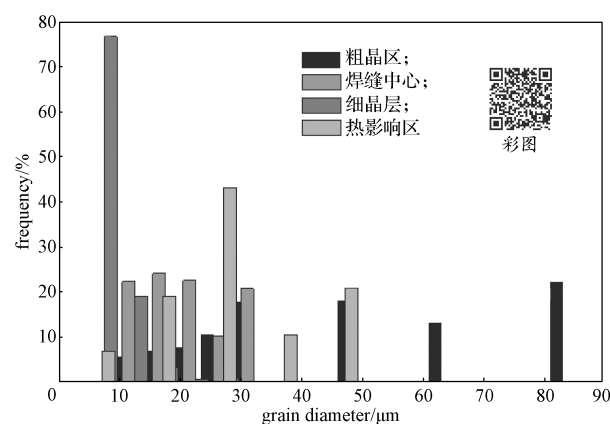


图7 焊接接头各区域晶粒大小分析结果

Fig. 7 Analysis result of grain size in different regions of welded joints

从图7的晶粒大小分析结果可以看出:粗晶区的晶粒普遍较大,最大的晶粒超过了80 μm ;焊缝区的

晶粒大小均匀, 平均晶粒尺寸约为 $20\ \mu\text{m}$; 细晶层的晶粒非常细小, 大部分晶粒直径小于 $10\ \mu\text{m}$; 而热影响区的晶粒大小则较为分散, 表明该区域的再结晶过程不完全, 这有可能跟距离焊接热源的远近有关。距离焊缝越远, 受到焊接热的影响越小, 再结晶程度越低。同时, 焊接冷却速率过大也将导致再结晶行为不充分。这从再结晶体积分数统计结果 (图 8) 中可得到证明。

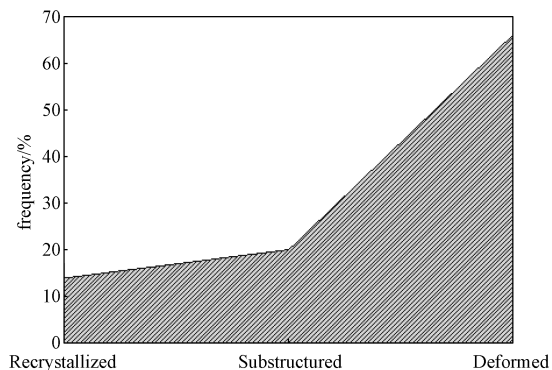


图 8 焊接接头热影响区的再结晶统计分析结果

Fig. 8 Statistical analysis result of recrystallization in HAZ of welded joints

焊接接头各区域晶粒微取向的分析结果如图 9 所示, 粗晶区、焊缝区、细晶层及热影响区都以大角度晶界为主, 只有少量的小角度晶界, 其中各区域小角度晶界的体积分数分别为 5%, 8%, 6% 和 18%。

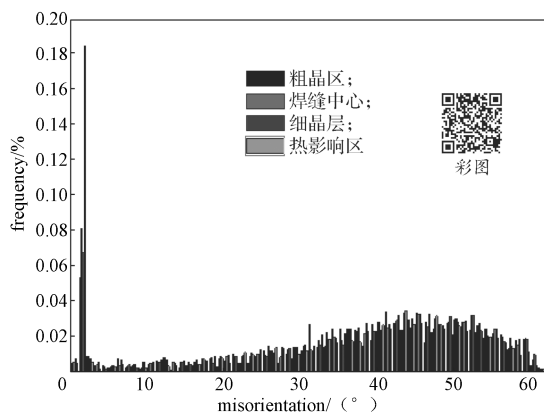


图 9 焊接接头各区域晶粒微取向分析结果

Fig. 9 Analysis result of microorientation of grain in different regions of welded joints

在合金凝固、变形、回复再结晶等过程中, 均有可能形成亚结构和亚晶界, 而亚晶界属于小角度晶界, 所以在焊接接头各区域都出现了部分的小角度晶界^[15]。但是多晶体金属材料的晶界多属于大角度晶界, 小角度晶界基本上是由位错构成。这就解释了为什么各区域都是以大角度晶界为主, 而热影响区由于残留部分的形变组织, 仍然保留一定数量的位错, 相比较而言, 其小角度晶界的体积分

数较大。

通过对图 6 中焊接接头各区域内所标记迹线的相邻晶粒间点对点微取向差分析表明, 焊缝区和细晶区内的相邻晶粒间的点对点微取向差更为明显, 如图 10 所示。

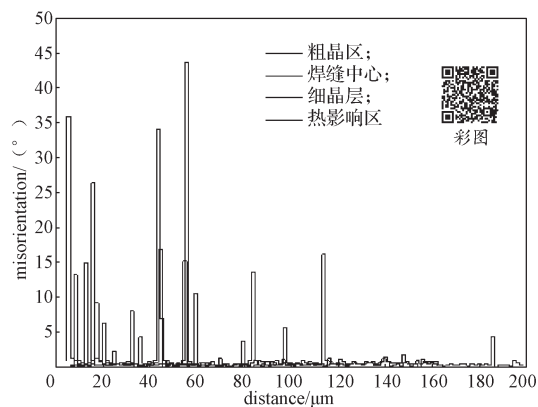


图 10 焊接接头各区域点对点微取向差分析结果

Fig. 10 Analysis result of point-to-point micro-orientation difference in different regions of welded joints

图 10 的分析结果表明, 各晶粒没有一致的取向, 即晶粒的生长在各个方向上具有一定的等效性, 这也印证了这两个区域内的晶粒大小更为均匀; 而粗晶区, 特别是热影响区, 相邻晶粒间的点对点微取向差很小, 说明相邻各个晶粒的取向具有相近性。

3.5 热影响区织构分析

通过对热影响区的织构分析 (图 11), 可得到相一致的结果。由于受到焊接循环热的影响, 焊接接头的热影响区出现了一定的再结晶组织特征。

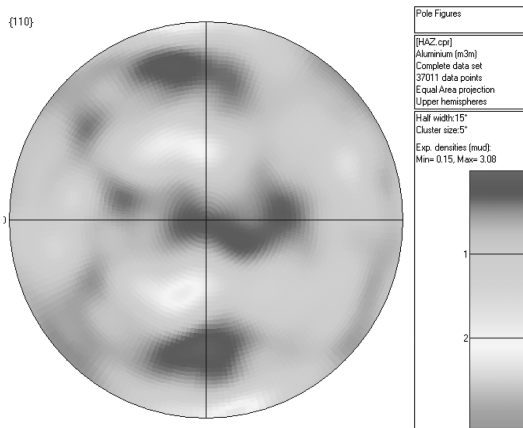


图 11 焊接接头热影响区的 (110) 极图

Fig. 11 EBSD IPFs of heat affected zone in (110) direction image

焊接接头的组织不均匀性导致各个区域的力学性能也不均匀, 其显微硬度分布曲线如图 12 所示。由图可知, 焊接接头硬度分布情况与显微组织有着密切的关系。在粗晶区, 由于晶粒过于粗大, 显微硬度值最低; 热影响区由于保留部分形变组织, 其显微硬

度还保持着较高值;而熔合区由于激冷凝固形成一层很薄的细晶层,对接头的力学性能没有明显的积极意义,其显微硬度值也较低。

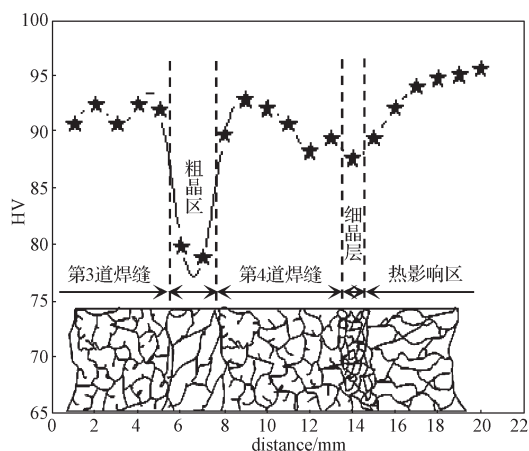


图 12 焊接接头显微硬度分布图

Fig. 12 Microhardness distribution of the welded joints

焊接冶金过程在一定程度上就是一个熔铸过程,因升温速度快,过热度高,导致冷却过程中熔池内各个区域的冷却速率不同,且受焊接热循环的影响也不均匀,最终导致焊接接头各区域出现不同的组织形态。冷却速率较快的熔合区,是由熔化的基材和填充金属两部分混合组成的,Zr、Cr等微量元素容易富集在固液界面前沿的液相中,阻止其他元素原子的迁移,且大量来自基材热稳定性好的 Al_3Zr 粒子作为非匀质形核的核心,从而形成细晶组织。焊缝区铸态组织的形成,则是由于后凝固的这些区域中溶质含量的降低,过冷度也开始降低,析出的形核质点减少,从而出现了稍微粗大的枝晶组织。热影响区在焊接热循环的短时高温作用下,板材中原先析出的大量 Al_3Zr 粒子会出现一定程度的粗化,但仍然保留在基体中对位错和亚晶界起到钉扎作用,部分抑制合金板材的再结晶,也保留了大部分变形组织的强化作用。但由于焊接循环热影响的强弱,距离焊缝越近,再结晶程度越大,热影响区各区域的组织与性能也表现出一定程度的不均匀性。在多道次焊接工艺中,前一焊道的焊缝区成为后一焊道的热影响区和熔池边界,焊道边界两侧均为相同的铸态组织,具有相同的晶体结构,结构的相似性减小了晶粒取向差,从而非常有利于晶粒的外延生长,在晶粒合并长大的过程中沿着散热方向呈现出了一定的方向性,从而在第3、4道焊的界面处可以观察到一个明显的粗晶区。同时,可能由于MIG焊接焊丝以熔滴形式进入熔池,熔滴比表面积较大、冷却速率较快,导致在焊道界面产生了少量焊接气孔,而该区域也成为焊接接头最为薄弱的位置。

4 结论

1) 多层多道 MIG 焊铝镁合金焊接接头由热影响区、细晶层、焊缝区及粗晶区组成,组织不均匀性非常明显。焊缝区为较粗大的枝晶组织,晶粒大小约为 $20\sim 30\ \mu m$;热影响区为保留部分变形特征的不完全再结晶组织,形成部分再结晶组织;在熔合线附近存在一层细晶组织,晶粒大小均匀,只有几微米;两焊道交界处的粗晶区,晶粒粗大,最大晶粒超过 $80\ \mu m$,且沿散热方向生长。

2) 铝镁合金焊接接头的力学性能也呈现出与显微组织一致的不均匀性。其中,热影响区因残留部分变形组织,导致显微硬度值最高,达到 $95\ HV$ 左右;粗晶区晶粒过于粗大,且存在少量气孔,因而成为接头最薄弱的位置,显微硬度值最低,大约只有 $78\ HV$;细晶层和焊缝区的显微硬度值居中,细晶组织层的宽度很小,对力学性能的影响不大,而焊缝区组织疏松,晶粒较为粗大。

参考文献:

- [1] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 37-49.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [3] CHANG B, ALLEN C, BLACKBURN J, et al. Thermal and Fluid Flow Characteristics and Their Relationships with Porosity in Laser Welding of AA5083[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 478-487.
- [4] 罗 健, 蹇海根, 丁智辉, 等. 5356 铝合金焊丝组织与性能的试验对比研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(5): 92-96.
LUO Jian, JIAN Haigen, DING Zhihui, et al. An Experimental Comparative Study on the Microstructure and Properties of 5356 Aluminum Alloy Welding Wires[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(5): 92-96.
- [5] BOUKHA Z, SÁNCHEZ-AMAYA J M, GONZÁLEZ-ROVIRA L, et al. Influence of CO_2 -Ar Mixtures As Shielding Gas on Laser Welding of Al-Mg Alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(13): 5711-5723.
- [6] 何长树, 王 东, 张朝威, 等. Al-12.7Si-0.7Mg 合金脉冲 MIG 焊接接头组织与性能 [J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(4): 292-295.
HE Changshu, WANG Dong, ZHANG Chaowei, et al.

- Microstructure and Mechanical Properties of Al-12.7Si-0.7Mg Alloy Joints Welded by PMIG Welding[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(4): 292-295.
- [7] 彭小燕, 曹晓武, 段雨露, 等. 7020 铝合金 MIG 焊焊接接头的组织与性能 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 912-918.
- PENG Xiaoyan, CAO Xiaowu, DUAN Yulu, et al. Microstructures and Properties of MIG Welded Joint of 7020 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 912-918.
- [8] LIU H, ZHAO G, LIU C M, et al. Effects of Different Tempers on Precipitation Hardening of 6000 Series Aluminium Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(1): 122-127.
- [9] 吴豫陇, 郑 英, 刘胜胆, 等. 7055 铝合金板材搅拌摩擦焊接头的组织与力学性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(7): 2426-2431.
- WU Yulong, ZHENG Ying, LIU Shengdan, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 7055 Al Alloy Sheet Friction Stir Welded Joint[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(7): 2426-2431.
- [10] GUEMINI R, BOUBERTAKH A, LORIMER G W. Study of the Recrystallization Process of AlMgSi Alloys Containing Transition Elements[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1/2): 451-457.
- [11] 罗 健, 蹇海根, 徐国新, 等. 退火态 5083 铝合金焊接接头组织与性能分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(4): 59-64.
- LUO Jian, JIAN Haigen, XU Guoxin, et al. Analysis of Micro-Structure and Properties of Welded Joints of Annealed 5083 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(4): 59-64.
- [12] ZHAO J, JIANG F, JIAN H G, et al. Comparative Investigation of Tungsten Inert Gas and Friction Stir Welding Characteristics of Al-Mg-Sc Alloy Plates[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 306-311.
- [13] 李 会, 郭继祥, 何小勃, 等. 铝合金 MIG 焊常见焊接缺陷分析及预防措施 [J]. 电焊机, 2013, 43(4): 72-76.
- LI Hui, GUO Jixiang, HE Xiaobo, et al. Reason Analysis and Precautionary Measure on MIG Weld Defect of Aluminium Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(4): 72-76.
- [14] 蹇海根, 唐娴敏, 欧 玲, 等. 多道次 MIG 焊铝合金的焊接界面行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(2): 415-420.
- JIAN Haigen, TANG Xianmin, OU Ling, et al. Interface Behavior of Aluminum Alloy by Multipass MIG Welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(2): 415-420.
- [15] 陈树君, 夏 羽, 于 洋, 等. 铝-镁合金磁脉冲焊接界面形貌研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 352-355.
- CHEN Shujun, XIA Yu, YU Yang, et al. Morphology Study of Al-Mg Alloy Magnetic Pulse Welding Interface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 352-355.

(责任编辑: 申 剑)