

压铸镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊接头焊核演变机理研究

Evolution Mechanism of Weld Nugget Zone of FSW
Joint of Die Casting AZ91D Magnesium Alloy

游国强^{1,2}, 张均成¹, 谭霞¹

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2 重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

YOU Guo-qiang^{1,2}, ZHANG Jun-cheng¹, TAN Xia¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2 National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要: 搅拌针旋转频率为 1200r/min、焊接速率为 40mm/min 条件下, 对 4mm 厚的压铸镁合金 AZ91D 进行连接, 可获得无缺陷的焊缝接头。使用 OM, SEM 对焊缝接头微观组织进行观察。结果表明: 压铸镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊接头焊核区域微观组织呈现出较大差异, 顶部冠状区组织为均匀粗大、高致密度的再结晶晶粒, 平均晶粒约为 15 μ m; 中心环形区域及焊核底部组织相对细小, 均匀程度不如焊核冠状区; 焊核区组织均为再结晶晶粒, 晶粒形核模式与非连续动态再结晶模式类似。

关键词: AZ91D; 压铸态镁合金; 焊核; 演变机制

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.02.006

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)02-0029-05

Abstract: Die casting plates of AZ91D magnesium alloy with thickness of 4mm, were welded by friction stir welding at the rotating speed of 1200r/min and the welding speed of 40mm/min. The weld joint with no defect can be obtained. The joint microstructures were observed by OM, SEM. The results show that the microstructures are distinctly different in weld nugget zone. The grains of crown zone at the top of weld nugget are uniform, coarse and highly dense recrystallized grains with an average grain size 15 μ m; the grains of the central ring area and bottom zone are relatively fine and recrystallized and less uniform than that of the crown zone. The microstructures of weld nugget are recrystallization grain. The grain nucleation model are similar to the discontinuous dynamic recrystallization mechanism.

Key words: AZ91D; die casting magnesium alloy; weld nugget zone; evolution mechanism

搅拌摩擦焊是英国焊接研究所在摩擦焊基础上提出的一种新型焊接方法, 由于其具备普通熔化焊不可比拟的优势, 近 20 年来, 欧洲多个国家已经把搅拌摩擦焊技术运用到航天、航空、船舶、列车、电力等工业制造领域, 主要用于铝合金、镁合金、铜合金、钛合金、铝基复合材料的焊接^[1-4]。

镁合金作为目前最轻的商用金属结构材料, 在诸如交通工具等领域具有广阔的应用前景。镁合金具备优良的液态成型性能, 在实际工程中主要采用压铸成型。当前, 为了最大限度发挥镁合金的轻量化优势, 镁合金压铸件正在向大型化和复杂化的方向发展; 但由

于受到压铸设备吨位、工艺难度及成本等因素限制, 本国尚难以实现高性价比的生产大型复杂镁合金压铸件。在这样的背景之下, 将大型复杂铸件分块压铸, 然后进行拼焊“铸—焊”复合的成型技术就显示出诱人的应用前景。由于压铸镁合金自身气体含量高、熔化焊工艺导致的气孔缺陷问题尚未得到有效解决^[5-8], 以塑性变形实现固相连接的搅拌摩擦焊就成为压铸镁合金焊接最为可行的工艺之一。

关于压铸镁合金搅拌摩擦焊的研究鲜有报道, 尤其是压铸态镁合金搅拌摩擦焊接头微观组织演变机制方面的研究。张华等^[9,10]通过对变形态 AZ31 镁合金

搅拌摩擦焊接头焊核细化机制的研究,建立了母材缺陷形核机制。对变形态镁合金搅拌摩擦焊接头微观组织形核机理进行了初步探索。国内外对搅拌摩擦焊焊核区再结晶机理进行了大量实验^[11-14],且主要集中于铝合金,认为其再结晶机理主要存在三种可能:连续动态再结晶、不连续动态再结晶、几何动态再结晶。目前针对压铸镁合金搅拌摩擦焊焊核区域再结晶机理及β相Mg₁₇Al₁₂的消失未给予很好解释。本工作以压铸态镁合金AZ91D为研究对象,探索焊核的形核物理模型,分析压铸镁合金搅拌摩擦焊接头微观组织的演变过程。

1 实验

1.1 实验材料及设备

实验材料为压铸态AZ91D镁合金,尺寸为100mm×40mm×4mm,化学成分如表1所示。搅拌头轴肩直径10mm、顶部直径2.8mm、根部直径4.2mm、长度4.0mm。分别使用了CX31型光学显微镜和VegaII型扫描电子显微镜进行焊缝接头微观组织研究。用1800型X射线荧光光谱对母材化学成分进行分析,结果如表1所示。

表1 实验用压铸态镁合金母材的化学成分
Table 1 Chemical composition of die casting AZ91D magnesium alloy

Element	Mg	Al	Zn	Mn
Mass fraction/%	90.03	8.83	0.86	0.28

1.2 实验过程

对母材进行物理和化学表面清理,去除表面的油污、水分、氧化膜等;用夹具将母材以对接形式刚性固定,对接间隙在0.3mm以内;对母材实施搅拌摩擦焊连接,轴肩下压量3.7mm,搅拌头倾斜角2.5°,搅拌针旋转频率为1200r/min、焊接速率40mm/min;观察焊缝外观成形,截取焊缝横截面(垂直于焊接方向)制备微观组织试样,采用苦味酸酒精溶液(苦味酸3g+酒精50mL+乙酸20mL+水20mL)进行腐蚀。然后分别使用光学显微镜和扫描电子显微镜等手段对焊缝接头的微观形貌进行研究。

2 焊缝组织观察与分析

2.1 接头横截面低倍形貌

图1为焊缝宏观形貌图,图2为焊缝横截面低倍

形貌。由图1,2可知,搅拌针旋转频率为1200r/min、焊接速率为40mm/min时,焊缝宏观成型美观,接头截面无宏观缺陷产生。

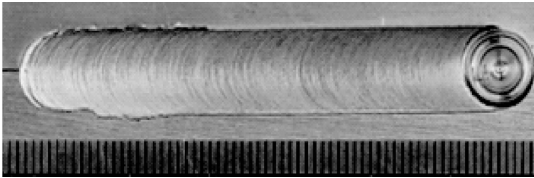


图1 焊缝宏观成形
Fig. 1 The profile of weld surface

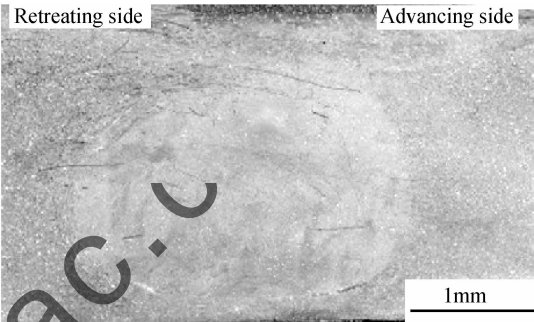


图2 接头横截面低倍形貌
Fig. 2 Overview of the weld cross section

通常搅拌摩擦焊焊缝分区为焊核区、热机影响区、热影响区。而压铸镁合金AZ91D搅拌摩擦焊的焊缝横截面呈现出典型的上大下小形貌,焊核区与热机影响区的过渡呈现出突变现象。图3(a)为焊缝后退侧与热机影响区的过渡趋势,图3(b)为焊缝前进侧与热机影响区的过渡趋势。由图3(a),(b)可见,前进侧过渡突变现象比返回侧更突出,焊核上部呈现出平底锅状形貌,焊核中心低倍形貌为未封闭的洋葱环,洋葱环在偏向前进侧与上部冠状区汇合,延伸至轴肩边缘。

2.2 焊核区微观组织

图4(a)为焊核冠状区组织,图4(b)为焊核环形区组织,图4(c)为焊核底部组织。虽同为焊核区组织,焊核顶部至焊核底部高倍下呈现出不同的微观形貌,冠状区平均晶粒尺寸约15μm,组织均匀,不易腐蚀,致密度高。环状区与焊核底部组织形貌类似,由大小不均匀的α-Mg组成,环形区晶粒尺寸范围约为3~10μm,焊核底部尺寸约为2~15μm。

究其原因主要与搅拌针的旋转摩擦以及搅拌头的产热密切相关。搅拌摩擦焊的产热主要来源于轴肩与母材的摩擦生热,其次为搅拌针与母材之间的旋转摩擦生热。可知搅拌摩擦焊过程焊缝顶部所承受的热量

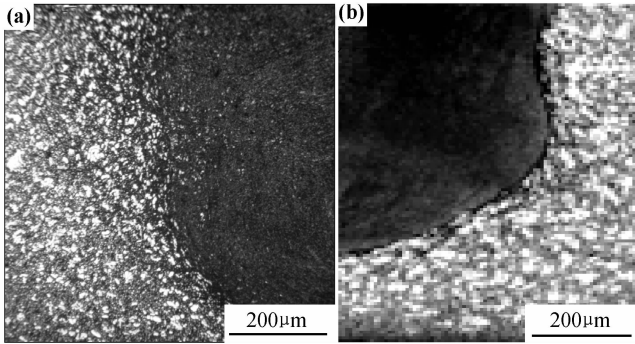


图 3 焊核与热机影响区的过渡 (a)后退侧;(b)前进侧

Fig. 3 The transition of WNZ and TMAZ (a)retreating side;(b)advancing side

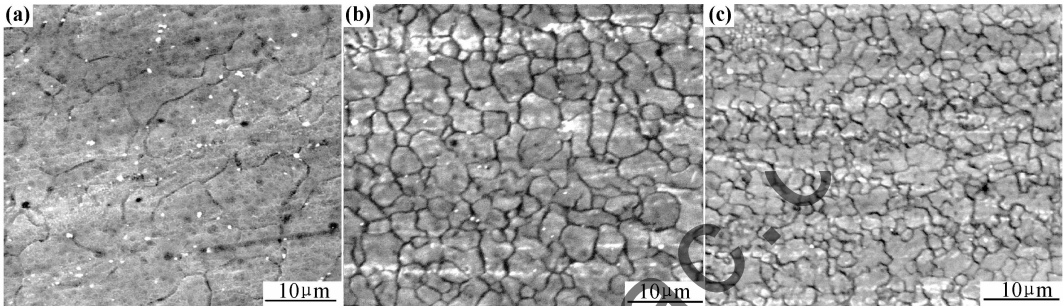


图 4 镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊接头焊核区的 SEM 照片 (a)顶部;(b)中心;(c)底部

Fig. 4 The weld nugget SEM micrographs of the friction stir welding of die casting magnesium AZ91D

(a)top;(b)centre;(c)bottom

最多。同时焊缝顶部材料受到强烈的轴肩下压力以及搅拌针的旋转摩擦作用,在高热量和强机械力的共同作用之下,焊核冠状区微观组织呈现出高致密状,晶粒尺寸明显大于环形区和焊核底部。环形区域组织呈现出大小相间的 α -Mg,主要是由于其受到的热量低于冠状区,受到的机械搅拌作用主要为搅拌针的旋转摩擦,因此再结晶形核后的组织细小,但致密度以及组织均

匀程度不及冠状区。

2.3 焊核区组织细化机制

图 5(a)为压铸母材微观组织,图 5(b)为焊核区微观组织。由图 5(a)可知,压铸态镁合金 AZ91D 原始组织由粗大不均匀的 α -Mg 和第二相 β -Mg₁₇Al₁₂ 构成,搅拌摩擦焊接头焊核区微观组织为细小的 α -Mg 组成,在搅拌头和轴肩共同的热机械作用下,基体发生

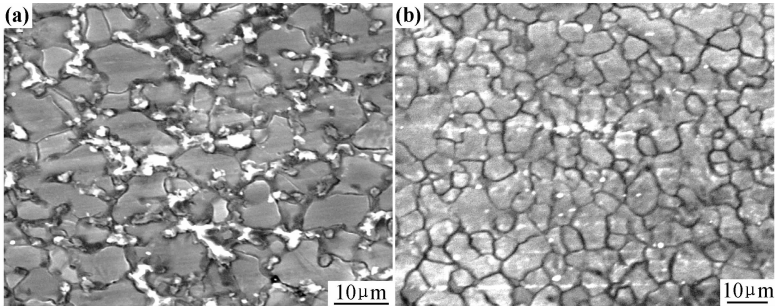


图 5 母材与焊核区微观组织 (a)母材;(b)焊核

Fig. 5 The micro-structure of base metal and weld nugget zone (a)base metal;(b)weld nugget

了动态回复再结晶。

要弄清楚压铸镁合金 AZ91D 焊核区域搅拌摩擦焊过程的动态再结晶机理,首先需要深入分析晶界的运动模式,因此必须探索出母材微观组织晶界处 β -

Mg₁₇Al₁₂ 的物理转变模式。在塑性状态下,基体的运动与 β 相的存在方式密切相关。

由图 5 可见,压铸镁合金母材晶界处分布着不连续的第二相共晶组织。采用搅拌摩擦焊连接时,在搅

拌头机械热共同的作用下,连续分布、粗大的共晶组织必然被搅碎。

为研究破碎的共晶组织运动状况,分别对母材及焊核区的基体组织进行 Mg-Al 二元成分定向分析,如图 6 所示。EDS 成分测试结果显示母材基体中 α -Mg 其平

均含铝量为 1.95%,焊核区域基体平均含铝量为 10.53%。根据对母材与焊核区域基体的含铝量分析可推出:搅拌摩擦焊过程,母材微观组织中被破碎的第二相在机械热的作用下,或以固溶的方式溶入基体,或在再结晶过程形成新的晶粒,促进压铸镁合金的再结晶过程。

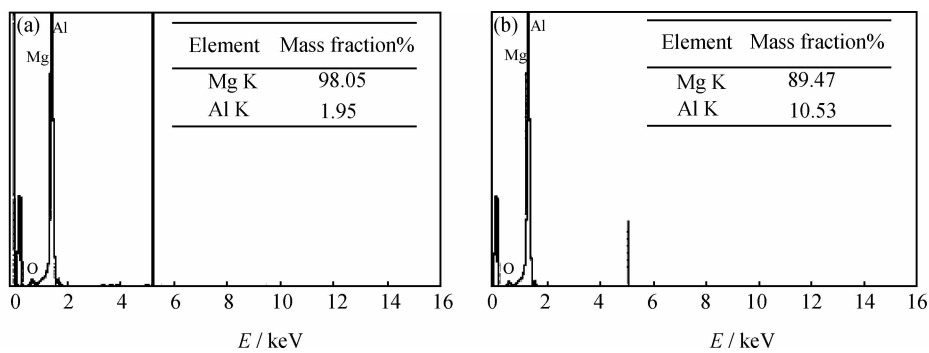


图 6 母材与焊核区 α -Mg 成分 (a)母材;(b)焊核区
Fig. 6 The composition of α -Mg in base metal and weld nugget zone
(a)base meal;(b)weld nugget zone

采用搅拌摩擦焊连接压铸镁合金 AZ91D 时,在搅拌针后方区域发生动态再结晶,根据前文可知, α -Mg 或被破碎后成为新的再结晶形核基体,不再成为晶粒之间相对运动的障碍。搅拌针后方区域的晶粒在轴肩下压力和搅拌头的挤压、摩擦的作用下,形成的切应力克服晶粒间彼此相对滑动的阻力,以及晶粒之间产生的相互作用力,形成一对力偶。因此就会导致晶粒之间出现相互滑动和转动的微观行为,如图 7 所示。

上述压铸镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊过程的第二相转变以及晶界的滑动和转动都是为动态再结晶奠定基础。搅拌摩擦焊过程焊核区温度最高可达材料熔点的 80% 左右^[15]。在搅拌头的热及应力作用下,晶粒内部位错沿着基面或者非基面滑移^[16-18],内部位错发生塞积和相互之间的交互作用,位错发生重排与合并,形

成小角度晶界和胞状亚结构(图 8(a)),胞状亚结构进一步转化为亚晶粒(图 8(b)),亚晶界通过不断的吸收晶格间的位错以增大其取向差,最终转变为大角度晶

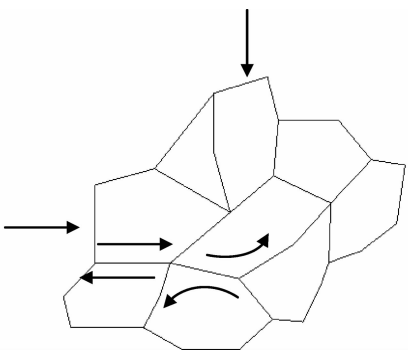


图 7 晶界之间的滑动和转动
Fig. 7 The sliding and turning among the grain boundary

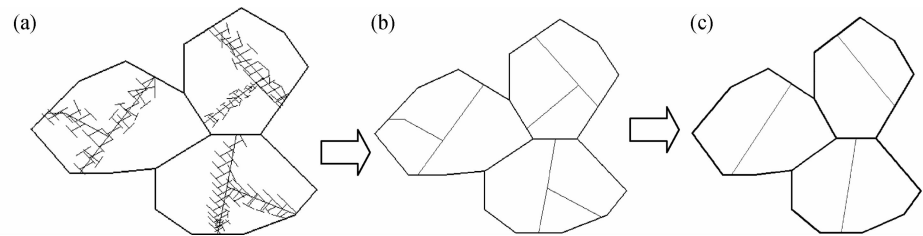


图 8 焊核区域动态再结晶示意图
(a)胞状结构;(b)亚晶界;(c)大角晶界
Fig. 8 Schematic of process of dynamic recrystallization of weld nugget zone
(a)cell formation;(b)subboundary formation;(c)formation of high-angle boundaries

界,在晶粒之间的相互转动与滑动作用之下,大角度晶界不断前移,部分亚晶界和晶界被消除,大角度晶界最

终转变为新的再结晶晶粒(图 8(c))。上述所推断的压铸镁合金搅拌摩擦焊动态再结晶机理,符合非连续

动态再结晶的模式。

3 结论

(1) 搅拌针旋转频率为 1200r/min、焊接速率 40mm/min 时,可以获得无缺陷的 AZ91D 压铸镁合金搅拌摩擦焊接头。

(2) 压铸镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊接头焊核区域微观组织呈现出较大差异:顶部冠状区组织为均匀粗大、高致密度的再结晶晶粒,平均晶粒尺寸约为 15 μm ;中心环形区域及焊核底部组织相对细小,均匀程度不如焊核冠状区。

(3) 通过对母材与焊核区域微观形貌、成分进行研究,发现压铸态镁合金 AZ91D 母材组织转变为焊核区的再结晶组织,其形核模式与非连续动态再结晶类似。

参考文献

- [1] MA Z Y. Friction stir processing technology: a review[J]. *Metalurgical and Materials Transactions: A*, 2008, 39(3): 642—658.
- [2] GB 9125978—1991, Friction stir butt welding[S].
- [3] 栾国红, 关桥. 高效固相焊接新技术——搅拌摩擦焊[J]. *电焊机*, 2005, 35(9): 258—263.
LUAN Guo-hong, GUAN Qiao. High-effective, solid-phase new welding technology-FSW[J]. *Electric Welding Machine*, 2005, 35(9): 258—263.
- [4] 游国强, 张均成, 王向杰, 等. 压铸态 AZ91D 镁合金搅拌摩擦焊接头微观组织研究[J]. *材料工程*, 2012, (5): 54—58.
YOU Guo-qiang, ZHANG Jun-cheng, WANG Xiang-jie, et al. Microstructure of FSW joint of die-casting AZ91D magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, (5): 54—58.
- [5] KIEBUS A, RZYCHON T. Microstructure of AM50 die casting magnesium alloy[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, 18(1—2): 135—139.
- [6] SHEN J, YOU G Q, LONG S Y. Abnormal macropore formation during double sided gas tungsten arc welding of magnesium AZ91D alloy[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(8): 1059—1065.
- [7] MUNITZ A, COTLER C, STERN A. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 302(1): 68—73.
- [8] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. *Materials Science and Engineering: R*, 2005, 50(1—2): 1—78.
- [9] 张华, 林三宝, 吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接显微组织形成机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(7): 1021—1024.
ZHANG Hua, LIN San-bao, WU Lin. The microstructures evolution mechanism of friction stir welded AZ31 magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(7): 1021—

1024.

- [10] 张华, 林三宝, 吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头焊核区域成型过程及影响因素[J]. *航空材料学报*, 2004, 24(4): 6—9.
ZHANG Hua, LIN San-bao, WU Lin. The weld nugget formation of friction stir welded AZ31 magnesium alloy and its affecting factors[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(4): 6—9.
- [11] 王大勇, 冯吉才, 狄欧. 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区等轴再结晶组织的形成机制[J]. *焊接学报*, 2003, 24(8): 32—35.
WANG Da-yong, FENG Ji-cai, DI Ou. Forming process analysis of equiaxed grain in weld nugget zone during friction-stir welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2003, 24(8): 32—35.
- [12] DING C G, ZHOU H, HU F. Microstructure and impact toughness of friction stir welded joint of 7050 aluminum alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2010, 34(9): 27—30.
- [13] NANDANA R, DEBROYA T. Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2008, 53(6): 980—1023.
- [14] XUE W F, LIU J H, LUAN G H. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints in 2219-T6 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3460—3467.
- [15] 史清宇, 王细波, 康旭. 搅拌摩擦焊温度场[J]. *清华大学学报*, 2010, 50(7): 980—983.
SHI Qing-yu, WANG Xi-bo, KANG Xu. Temperature fields during friction stir welding[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2010, 50(7): 980—983.
- [16] 陈振华, 许芳艳, 傅定发. 镁合金的动态再结晶[J]. *化工进展*, 2006, 25(2): 140—146.
CHEN Zhen-hua, XU Fang-yan, FU Ding-fa. Dynamic recrystallization of magnesium alloy[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006, 25(2): 140—146.
- [17] 刘楚明, 刘子娟, 朱秀荣. 镁及镁合金动态再结晶研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(1): 1—5.
LIU Chu-ming, LIU Zi-juan, ZHU Xiu-rong. Research and development progress of dynamic recrystallization in pure magnesium and its alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(1): 1—5.
- [18] 何运斌, 潘清林, 覃银江. ZK60 镁合金热变形过程中的动态再结晶动力学[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(6): 1205—1212.
HE Yun-bin, PAN Qing-lin, QIN Yin-jiang. Dynamic recrystallization kinetics of ZK60 magnesium alloy during hot deformation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(6): 1205—1212.

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(CDJZR12130053)

收稿日期: 2012-07-14; 修订日期: 2013-01-07

作者简介: 游国强(1978—), 男, 博士, 副教授, 从事轻金属成型技术的研究, 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号重庆大学材料科学与工程学院(400044), E-mail: you_cqu@yahoo. com. cn.