

搅拌头转速对 YL113 压铸铝合金 FSW 接头组织性能的影响*

吴春艳¹, 宋东福², 宋丽莉¹

(1 重庆电子工程职业学院机电学院, 重庆 401331; 2 广东省材料与加工研究所, 广州 510650)

摘要 对 4 mm 厚的压铸态 YL113 铝合金进行了搅拌摩擦焊工艺试验研究, 采用 OM、SEM/EDS、XRD、万能拉伸试验机等分析了搅拌头转速对接头的微观组织和力学性能的影响。结果表明, 当焊接速度为 40 mm/min 时, 搅拌头转速在 700~1 500 r/min 范围内均可获得成形良好、无外观缺陷的焊缝, 焊缝截面呈倒梯形, 前进侧有明显分界线, 而后退侧分界线模糊。热影响区保持铸态的枝晶形貌, 但晶粒有一定程度的长大。热机影响区组织呈带状并遗传了母材组织的孔洞缺陷, 其中前进侧的孔洞呈纤维状, 其数量和尺寸随搅拌头转速增加而增加; 后退侧除转速 700 r/min 时出现类裂纹状缺陷外, 其余转速均有大尺寸孔洞缺陷出现, 且数量和尺寸随搅拌头转速增加而增加。焊核区为典型变形组织, Si 和其他第二相均呈细小颗粒状弥散分布。随搅拌头转速增加, 焊接接头抗拉强度和伸长率均呈先增后减的规律, 搅拌头转速为 900 r/min 时, 抗拉强度和伸长率均达到最大值。

关键词 压铸 铝合金 FSW 组织 力学性能

中图分类号: TG456

文献标识码: A

Effect of Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of FSW Joints of Die Casting YL113 Aluminum Alloy

WU Chunyan¹, SONG Dongfu², SONG Lili¹

(1 School of Electromechanical Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331;

2 Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650)

Abstract The die casting plates of YL113 aluminum alloy were welded by FSW. The microstructure and mechanical properties of the joints were investigated by OM, SEM, EDS, XRD and universal testing machine. The results showed that the formation of weld is good with no appearance defects when the welding speed is 40 mm/min and the rotation speeds are 700—1 500 r/min, and cross section of the weld is inverted trapezoid with clear boundary at the AS(advancing side) and blurring boundary at the RS(retreating side). The microstructure in HAZ is dendrite as cast and the grains grow to some extent. The microstructure in TMAZ at AS is banded structure with some threadiness defects, the number and size of which increase with the increasing of the rotation speed. The microstructure in TMAZ at RS is banded structure similarly, and there are some hole defects of large size, the number and size of which increase with the rotation speed increasing, except that cracks appear at the rotation speed of 700 r/min. The weld nugget is typical deformation microstructure with dispersively distributed fine particles of Si and other secondary phases. The tensile strength and elongation of the welded joint increase firstly and then decrease with the increasing of rotation speed, and both reach the maximum at the rotation speed of 900 r/min.

Key words die casting, aluminum alloy, FSW, microstructure, mechanical property

0 引言

铝合金是当前工业中应用最广泛的轻合金材料^[1]。压铸作为一种先进、高效率的精密液态成型技术,能够制造出复杂、壁薄的铸件,是铝合金的主要成型制造方法之一^[2-3]。近年来,我国铝合金压铸业在汽车、通讯电子等产业的拉动下呈现高速发展态势^[4]。但是,压铸工艺由于其固有的高速充型特征,铝液充型中会产生卷气现象^[5-7],导致铸件中含气量高,不能进行热处理强化,更不能使用熔化焊方法进行焊接,因为熔焊的高温会导致焊接热影响区产生表面鼓泡现象,焊缝和熔合区还会由于气体释放和膨胀而导致严重的气孔缺陷,焊缝性能不佳。搅拌摩擦焊(FSW)作为一种先进的固相

焊接技术,焊接过程中金属不熔化,工艺温度低、无飞溅、无烟尘且无需填丝^[8],正好弥补了上述熔焊工艺的缺点,有望应用于压铸铝合金的焊接连接,打破了压铸件不能焊接连接的限制。

目前,国内外关于铝合金 FSW 工艺的研究主要集中在变形铝合金方面^[9-11],而压铸铝合金 FSW 的研究鲜有报道,仅 Kim 等^[12]研究了焊接速度对 ADC12 压铸铝合金 FSW 接头中焊核区组织的影响,但未考查接头力学性能。此外,游国强等^[13-14]以压铸 AZ91D 镁合金为母材,研究了 FSW 接头微观组织、性能及隧道状缺陷的形成机理。总之,由于变形态铝合金、压铸镁合金与压铸铝合金在化学成分及原始组织上存在巨大差异,其焊接工艺范围及焊缝组织特征也不尽相

* 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1402901);广东省科技厅科技计划项目(2014B090903005; 2015B090926013; 2014B090907008)

吴春艳: 1975年生,硕士,副教授,主要研究方向为材料加工 E-mail: wcy.cy@126.com

同 亟待研究。

本工作以压铸态 YL113 铝合金为试验材料,重点研究搅拌头转速对 FSW 接头组织和性能的影响,并探讨其影响机制,旨在为开发压铸态铝合金搅拌摩擦焊技术提供理论支撑。

1 实验

采用压铸 YL113 铝合金板为焊接母材,其几何尺寸为 70 mm×50 mm×4 mm,化学成分如表 1 所示,抗拉强度为 219

表 1 YL113 压铸铝合金母材的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical compositions of YL113 alloy(wt%)

元素	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	Mg	Sn	Al
含量	9.6~12.0	1.5~3.5	≤1.3	≤1.0	≤0.5	≤0.5	≤0.3	≤0.2	余量

用 OM、SEM/EDS、XRD 对接头微观组织进行表征分析。

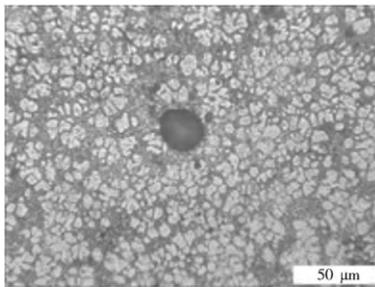


图 1 母材组织

Fig. 1 Microstructure of the base metal

MPa。图 1 为母材的金相组织,其存在明显的气孔缺陷,这是压铸件中最常见的缺陷之一。

母材经打磨和清理后用搅拌摩擦焊机(北京赛福斯特 FSW-3LM-4012)进行焊接,焊接工艺参数为:焊接速度 40 mm/min,搅拌头转速分别为 700 r/min、900 r/min、1 100 r/min、1 300 r/min、1 500 r/min。焊后,采用线切割取拉伸试样(如图 2 所示),在万能试验机上检测焊缝的拉伸性能。采

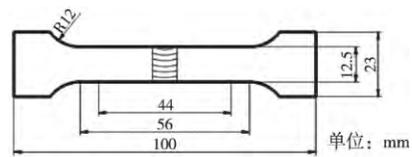


图 2 焊接接头拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimension of the tensile specimen for FSW joint

2 结果及分析

2.1 焊接接头宏观形貌及相组成

图 3 是不同搅拌头转速下接头的表面宏观形貌。由图 3

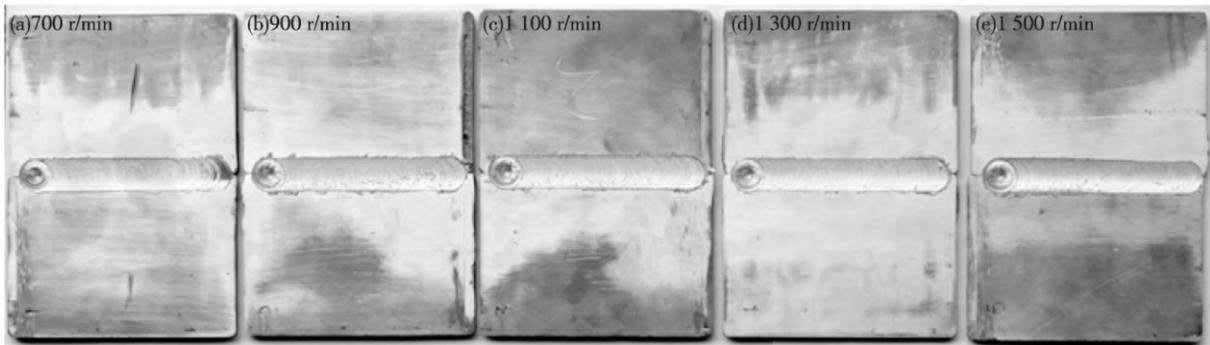


图 3 各搅拌头转速下得到的焊接试样示意图

Fig. 3 Appearance of the FSW joints at different rotation speeds

看出,在 5 个实验参数下,均可获得完整的 FSW 接头,焊缝成形良好,无外观缺陷。

焊接接头横截面的宏观形貌如图 4 所示。由图 4 可知,5 组参数下获得的焊接接头横截面基本形貌是类似的,焊缝大致呈现倒梯形,前进侧有较为清晰的分界线,后退侧则分界模糊。

对接头横截面的焊缝区域做 XRD 分析,焊缝区域主要的相为 Al 和 Si(如图 5 所示)。考虑到 YL113 合金中含有一定量的 Cu(1.5%~3.5%)和少量其他元素,理论上可能有少量含 Cu 相和含 Fe 相存在,但在 XRD 结果中这除了 Al 和 Si 外的其他相的衍射峰并不明显,这可能的原因是:一方面含量低,另一方面在焊缝区大强烈搅拌流动作用下成为非常细小的颗粒,且呈高弥散分布,因此 XRD 不能有效分辨。

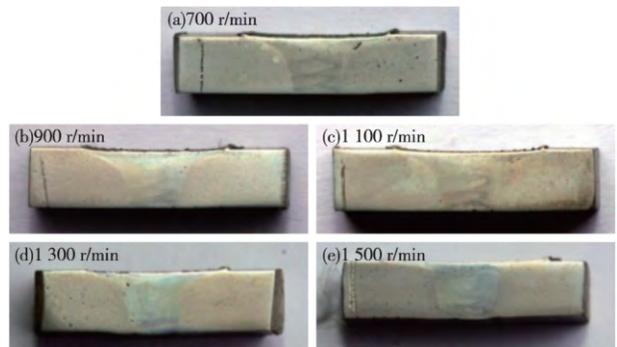


图 4 焊缝横截面宏观形貌

Fig. 4 Cross-section of the FSW joints at different rotation speeds

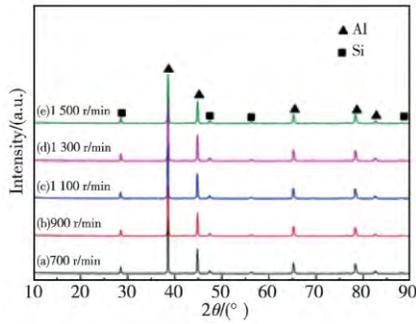


图 5 各搅拌头转速下获得的焊缝 XRD 结果
Fig. 5 XRD results of the FSW joints at different rotation speeds

2.2 焊接接头微观组织

2.2.1 OM 结果

用光学显微镜对各参数下的焊缝横截面进行低倍观察，观察区域分别为前进侧分界线、焊核、后退侧过渡区(如图 6 所示)结果如图 7—图 11 所示。各参数下获得的焊缝光学组织有相同特征，也有不同的特征。

在前进侧，焊缝与热影响区的分界明显，组织上呈突变特征；在后退侧，焊缝与热影响区分界模糊，组织上呈渐变特征。这应该这是由于前进侧和后退侧塑性体流动时相对速度

不同所致^[15]。在前进侧，焊核区与非焊核区的速度梯度大，塑性流动和变形程度相差较大，组织发生回复再结晶的程度也相差较大，组织形貌显著不同，形成明显的分界线；而后退

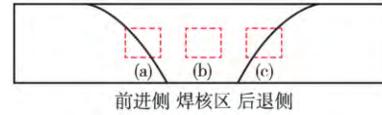


图 6 OM 观察区域示意图

Fig. 6 The regions for OM observation

侧相反，无明显分界线。其次，焊核区域均出现了洋葱环层状结构特征，且随着搅拌针转速的增加，洋葱环的间距不断减小，洋葱环的形成主要是由于金属塑性流动，洋葱环即为沿搅拌针方向金属塑性流动留下的痕迹，搅拌针速度增大，单位焊缝长度搅拌针旋转的次数增多，其金属塑性流动留下的痕迹也越多，间距逐渐减小。

此外，搅拌头转速不同，后退侧的缺陷形貌及数量有所不同。转速为 700 r/min 时，无明显孔洞缺陷，但有少量纤维状的微裂纹存在；转速为 900 r/min 时，有少量小尺寸的“腰果”形孔洞缺陷；随着转速增加，孔洞状缺陷的尺寸和数量随之增加。其原因可能是转速增加，后退侧的焊核与热影响区之间的速度梯度增加，引起两个区域塑性流动程度差增加，导致缺陷集中，这将对焊缝力学性能产生不同程度的影响。

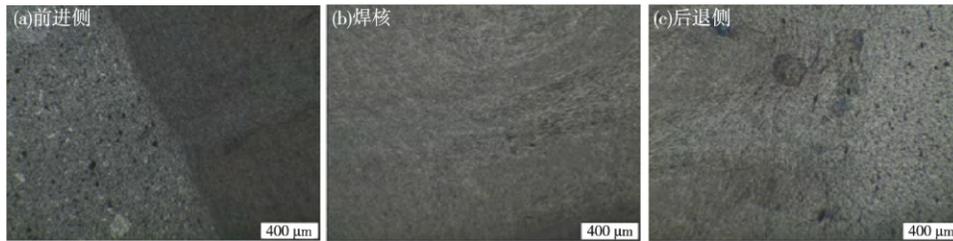


图 7 搅拌头转速为 700 r/min 的焊缝
Fig. 7 Weld at rotation speed of 700 r/min

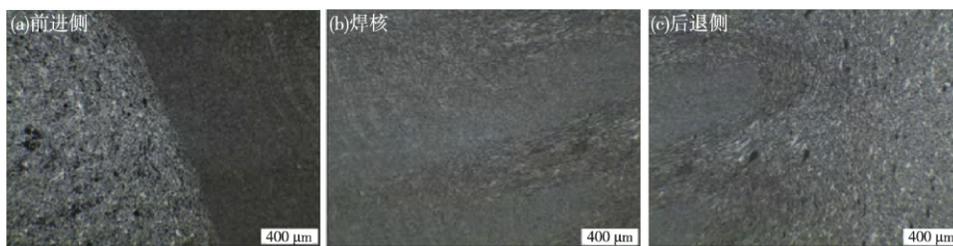


图 8 搅拌头转速为 900 r/min 的焊缝
Fig. 8 Weld at rotation speed of 900 r/min

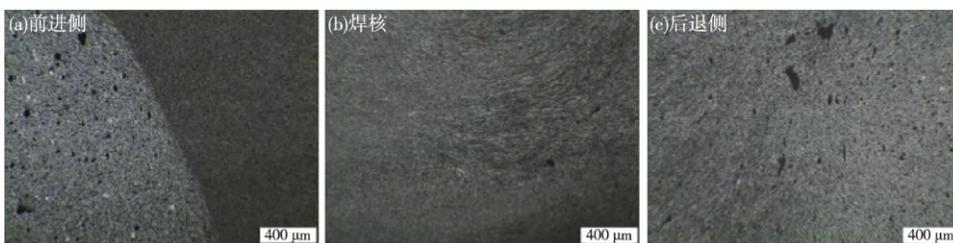


图 9 搅拌头转速为 1100 r/min 的焊缝
Fig. 9 Weld at rotation speed of 1100 r/min

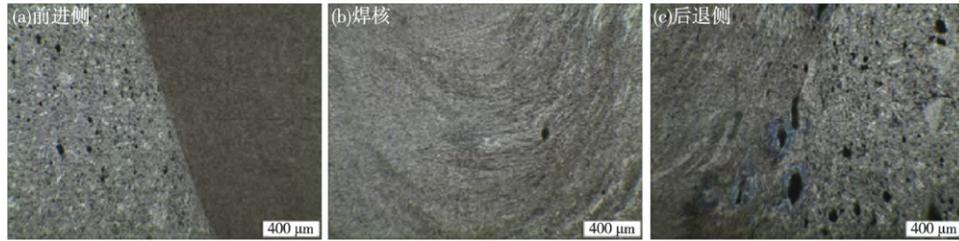


图 10 搅拌头转速为 1 300 r/min 的焊缝
Fig. 10 Weld at rotation speed of 1 300 r/min

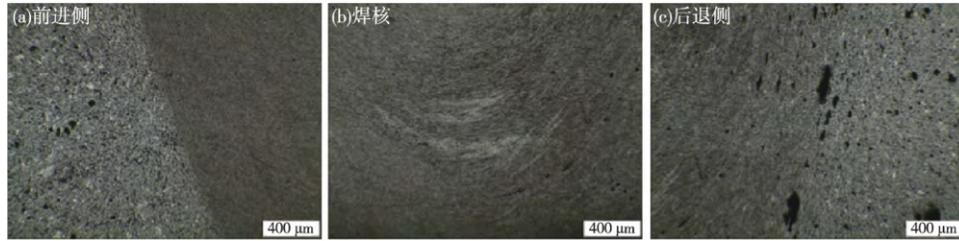


图 11 搅拌头转速为 1 500 r/min 的焊缝
Fig. 11 Weld at rotation speed of 1 500 r/min

2.2.2 SEM/EDS 结果

用 SEM 对各参数焊缝横截面的热影响区、焊缝-热影响区分界线、焊核区的微观组织形貌进行观察(观察区域如图 12 所示) 结果如图 13—图 17 所示。

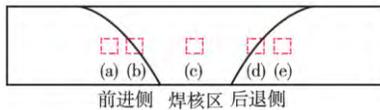


图 12 SEM 观察区域示意图
Fig. 12 The regions for SEM observation

热影响区: 前进侧和后退侧热影响区保持铸态枝晶组织特征,与母材相比,其枝晶有长大迹象,但枝晶长大趋势并未随搅拌头转速增加而显著增加,其原因可能是铝合金基体导热性能好,使搅拌头增加带来的焊接热输入增加被迅速传导,母材受热程度并未显著增加。

热机影响区(前进侧): 在前进侧,热影响区与焊核区分界线较为明显,靠热影响区侧有一个较窄的热机影响区,该区的宽度随搅拌头转速增加有一定程度的增大;该区晶粒有塑性变形拉长的迹象,组织整体上呈现带状形貌。与低倍 OM 观察不同,在高倍 SEM 下观察,发现该区域存在不同拉长程度的孔洞缺陷,且随着搅拌头转速增加,缺陷的数量和尺寸有增加的趋势。在搅拌头转速为 700 r/min 时,热机影响区很窄,缺陷被拉长程度低,基本保持原形貌;在搅拌头转速为 900 r/min 时,热机影响区宽度稍有增加,缺陷有拉长压

缩痕迹;在搅拌头转速为 1 100~1 500 r/min 时,缺陷拉长程度增加,而且缺陷数量变多,其原因应该是转速增加,在后退侧的焊核与热影响区之间的速度梯度增加,引起两个区域塑性流动程度差增加,导致缺陷集中,这对焊缝力学性能将产生不良影响。

热机影响区(后退侧): 在低倍光学显微镜下,后退侧的热影响区与焊核区分界线模糊,但在高倍 SEM 下,仍旧可以发现热机影响区存在,该区域为铸态组织和变形组织混合状态,且呈一定的带状特征;与前进侧类似,该区域的缺陷也有被拉长的迹象,且随着搅拌头转速增加,缺陷数量和尺寸有增加趋势。

焊核区域为典型的变形组织,原本近网状分布针/杆状第二相经大塑性变形后破碎成细小颗粒状,呈弥散分布,且颗粒尺寸大小随搅拌头转速增加先增后减。此外,在焊核区几乎没有孔洞缺陷存在,表明大塑性变形有利于缺陷的弥合。总之,焊核区经历了大塑性变形,组织大为改善。

对搅拌头转速为 900 r/min 的热影响区和焊核区进行 EDS 分析。结果表明,热影响区除了 Al 和 Si 相外,还存在少量 Cu 和 Fe 元素富集区(如图 18 所示),表明还存在含 Cu 相和含 Fe 相;对焊核区拍摄背散射像和进行 EDS 面扫描(如图 19 所示) 结合二者综合分析可知,焊核区中的颗粒主要是 Si 相(背散射像中呈浅灰色),有少数的含 Cu 相颗粒存在,应为 Al₂Cu 相(背散射像中的白亮点)。

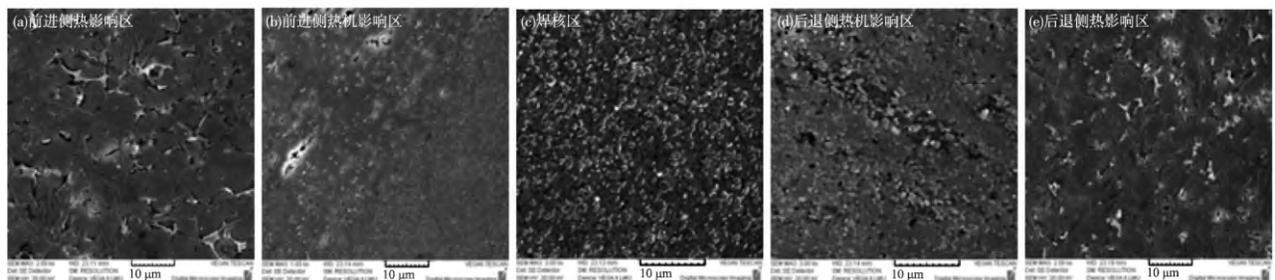


图 13 搅拌头转速为 700 r/min 时的焊缝微观组织形貌
Fig. 13 Microstructures of the weld at rotating speed of 700 r/min

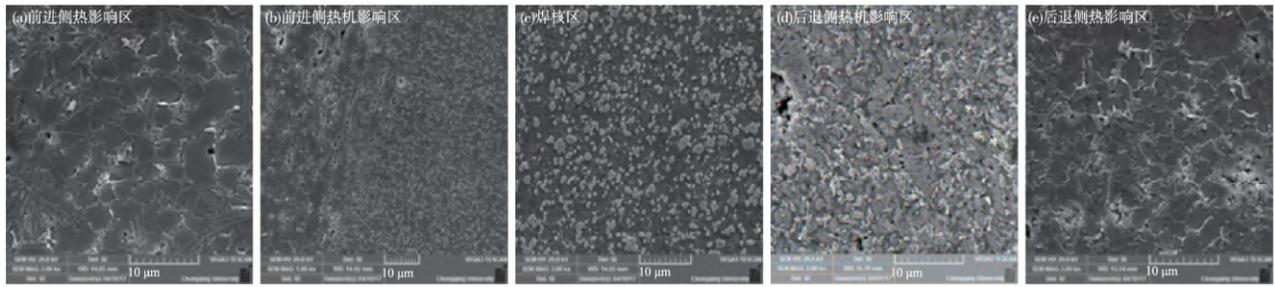


图 14 搅拌头转速为 900 r/min 时的焊缝微观组织形貌
Fig. 14 Microstructures of the weld at rotating speed of 900 r/min

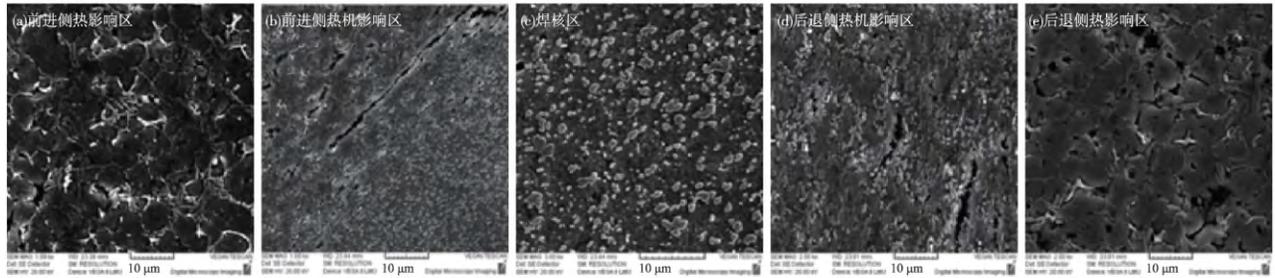


图 15 搅拌头转速为 1 100 r/min 时的焊缝微观组织形貌
Fig. 15 Microstructures of the weld at rotating speed of 1 100 r/min

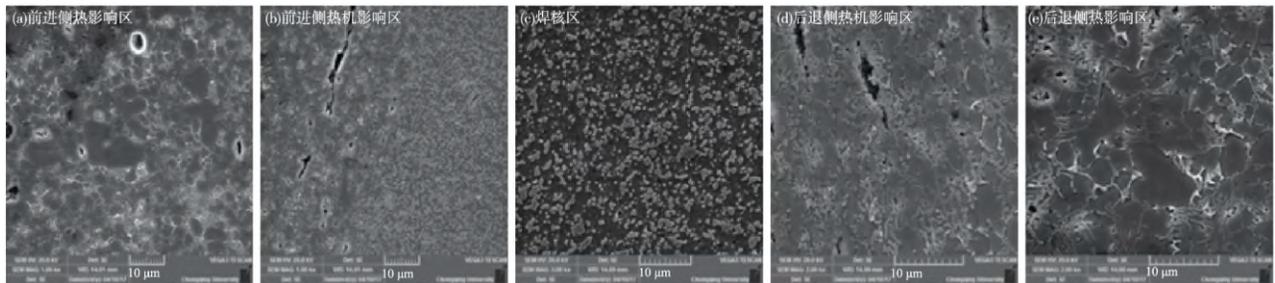


图 16 搅拌头转速为 1 300 r/min 时的焊缝微观组织形貌
Fig. 16 Microstructures of the weld at rotating speed of 1 300 r/min

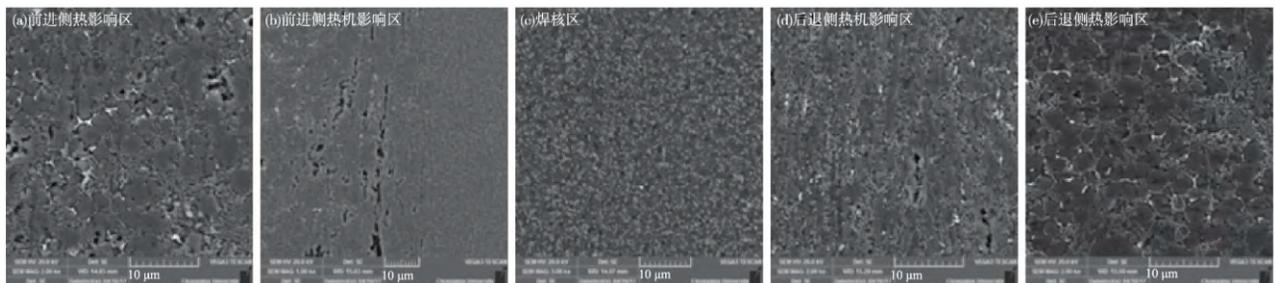
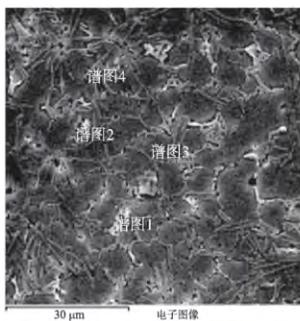


图 17 搅拌头转速为 1 500 r/min 时的焊缝微观组织形貌
Fig. 17 Microstructures of the weld at rotating speed of 1 500 r/min



元素	谱图1		谱图2		谱图3		谱图4	
	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%
MgK	0.22	0.26	1.00	1.24	0.29	0.32	0	0
AlK	73.71	79.39	74.05	82.36	95.58	96.15	76.22	77.21
SiK	13.61	14.09	7.71	8.24	3.25	3.14	2.99	22.39
MnK	1.36	0.72	0.16	0.09	0	0	0.21	0.11
FeK	7.45	3.88	0.26	0.14	0.12	0.07	0.60	0.29
CuK	3.64	1.67	16.81	7.94	0.76	0.32	0.00	0.00
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

图 18 搅拌头转速为 900 r/min 的热影响区 EDS 结果
Fig. 18 The EDS results of HAZ at the rotating speed of 900 r/min

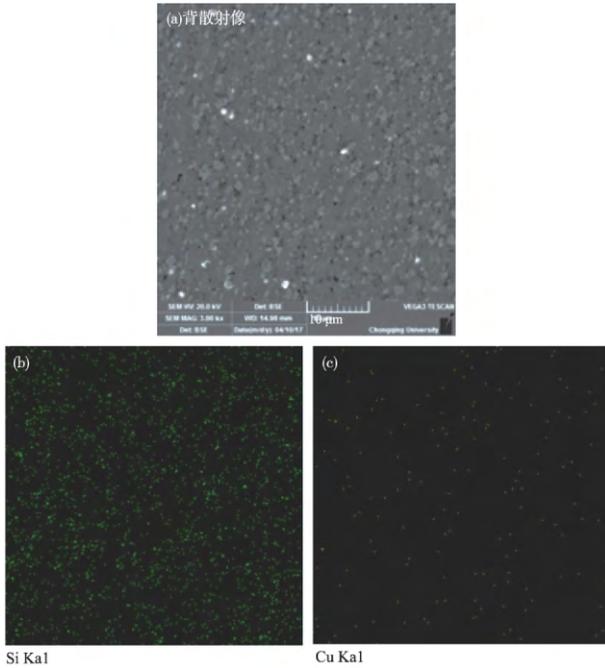


图 19 2 号试样(搅拌头转速为 900 r/min) 焊核区的背散射像和 EDS 面扫描结果
 Fig. 19 Backscatter image and EDS map scan results of weld nugget of specimen No.2

2.3 力学性能

焊接接头的抗拉强度和伸长率如图 20 和图 21 所示。焊接接头抗拉强度和伸长率均随搅拌头转速增加呈先增后降的趋势,且当搅拌头转速为 900 r/min 时,焊接接头抗拉强度和伸长率均达到最大值,其中,抗拉强度平均值为 209.51 MPa(为母材抗拉强度的 95.66%)。

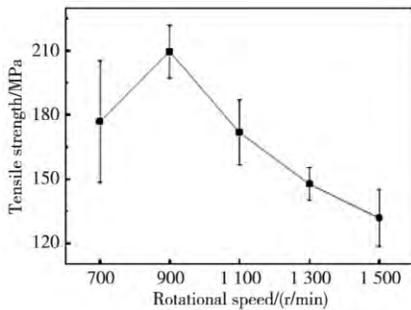


图 20 焊接接头的抗拉强度
 Fig. 20 Tensile strength of the FSW joints

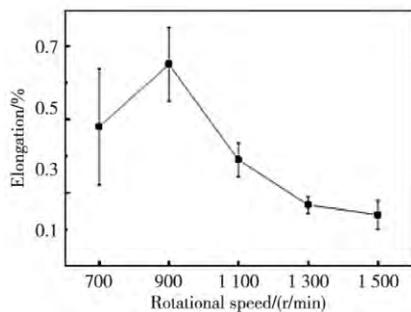


图 21 焊接接头的伸长率
 Fig. 21 Elongation of the FSW joints

由前文组织分析可知,随着搅拌头转速提高,焊缝的焊核部分微观组织稍有差异,但差异不大,其对性能的影响应该不大。低倍 OM 观察发现,后退侧均存在不同程度的大尺寸孔洞缺陷,且其数量和尺寸有增加趋势;最小转速(700 r/min)时的孔洞缺陷虽然较少,但存在类裂纹状缺陷,对性能有不利影响;转速为 900 r/min 时的缺陷数量和尺寸最小,对性能的不利影响也最小。高倍 SEM 观察发现,前进侧同样存在拉长的微观孔洞缺陷,且随着转速增加,其尺寸和数量增加,对力学性能的不利影响也随之增加。以上因素综合作用,导致焊接接头力学性能先增后降,转速为 900 r/min 时力学性能最佳。

3 结论

以 4mm 厚压铸 YL113 铝合金为母材,在焊接速度 40 mm/min、搅拌头转速 700~1 500 r/min 条件下进行了 FSW,并对焊接接头的组织和性能进行了研究,主要结论如下。

- (1) 焊缝成形良好,无外观缺陷,焊缝截面呈倒梯形,前进侧有明显分界线、后退侧分界模糊。
- (2) 热影响区组织保持铸态枝晶形貌;晶粒有一定长大,但长大趋势随搅拌头转速增加未明显增加。
- (3) 热机影响区组织呈带状;前进侧存在沿带状方向的微观纤维状孔洞缺陷,其数量和尺寸随搅拌头转速增加而增加;后退侧除转速为 700 r/min 时出现类裂纹状缺陷外,其余转速均有大尺寸孔洞缺陷出现,且数量和尺寸随搅拌头转速增加而增加。
- (4) 焊核区为典型变形组织,Si 和其他第二相被破碎成为细小颗粒,并弥散分布,颗粒尺寸随搅拌头转速增加先增后减,但变化不大。
- (5) 随搅拌头转速增加,焊接接头抗拉强度和伸长率均呈先增后减的规律,搅拌头转速为 900 r/min 时抗拉强度和伸长率均达到最大值。其中抗拉强度平均值为 209.51 MPa,为母材抗拉强度的 95.66%。

参考文献

- 1 王渠东,王俊,吕维洁. 轻合金及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社,2015.
- 2 朱必武,刘筱. 铝合金薄壁压铸件研究现状及进展[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(9):931.
- 3 黄晓锋,田载友,朱凯,等. 压铸铝合金及压铸技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2008,37(17):137.
- 4 黄正华,张银帅,宋东福,等. 压铸铝合金的应用及研究进展[J]. 材料研究与应用,2017(1):1.
- 5 Otsuka Yukio. Experimental verification and accuracy improvement of gas Entrapment and shrinkage porosity simulation in high pressure die casting process[J]. Mater Trans, 2014, 55(1): 154.
- 6 Zhao H D, Wang F, Li Y Y, et al. Experimental and numerical analysis of gas entrapment defects in plate ADC12 die castings [J]. J Mater Process Technol 2009, 209(9): 4537.
- 7 Ohnaka I, Sugiyama A, Ikeda T, et al. Mold filling and prevention of gas entrapment in high-pressure die-casting [J]. J Mater Sci Technol, 2008, 24(1): 139.

(下转第 326 页)

- [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 110.
- 35 邓少平, 邢丽, 杨成刚, 等. 异种铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(7): 31.
- 36 孙世烜, 李延民, 李超, 等. 厚板 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊缝组织及性能研究[J]. 铝加工, 2014(4): 15.
- 37 高洪林, 吴国元. Al-Li 合金的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 87.
- 38 尹登峰, 余志明, 陶颖, 等. Al-Li 合金的合金化及组织研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 84.
- 39 郑子樵, 李劲风, 陈志国, 等. 铝锂合金的合金化与微观组织演化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2337.
- 40 Steuwer A, Dumont M, Altenkirch J, et al. A combined approach to microstructure mapping of an Al-Li AA2199 friction stir weld[J]. Acta Mater, 2011, 59(8): 3002.
- 41 Fonda R, Bingert J. Precipitation and grain refinement in a 2195 Al friction stir weld[J]. Metall Mater Trans A, 2006, 37(12): 3593.
- 42 Guinel M J, Brodusch N, Sha G, et al. Microscopy and microanalysis of complex nanosized strengthening precipitates in new generation commercial Al-Cu-Li alloys[J]. J Microscopy, 2014, 255(3): 128.
- 43 Chen A, Peng Y, Zhang L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.2Zr alloy during heat treatment[J]. Mater Characterization, 2016, 114: 234.
- 44 余鑫祥, 余志明, 尹登峰, 等. 稀土 Ce 对新型 Al-Cu-Li 合金力学性能与组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(2): 495.
- 45 Li J F, Liu P L, Chen Y L, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg, Ag and Zn multi-microalloyed Al-(3.2-3.8) Cu-(1.0-1.4) Li alloys[J]. Trans Nonferrous Metals Soc China, 2015, 25(7): 2103.
- 46 Yu X X, Yin D F, Yu Z M. Effects of cerium and zirconium microalloying addition on the microstructures and tensile properties of novel Al-Cu-Li alloys[J]. Rare Metal Mater Eng, 2016, 45(8): 1917.
- 47 王华, 赵奇, 尹红霞. 微量 Ce 对 Al-Cu-Li 合金显微组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(7): 63.
- 48 李劲风, 刘丹阳, 郑子樵, 等. Er 微合金化对 2055 Al-Li 合金微观组织及力学性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(7): 821.
- 49 程彬, 郑子樵, 范春平, 等. 时效制度对新型 Al-Cu-Li 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 32(4): 926.
- 50 张健, 朱瑞华, 李劲风, 等. 时效前处理对新型 Al-Cu-Li-X 合金力学性能和显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(12): 3300.
- 51 刘平礼, 张健, 李劲风, 等. 二次时效对微合金化的 Al-Cu-Li 微观组织及力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(5): 50.
- 52 余爱武, 顾丹, 徐兵, 等. 铝锂合金 FSW 焊接接头的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2016, 45(5): 183.
- 53 董春林, 王立东, 孟强, 等. 典型焊接参数对铝锂合金 FSW 对接接头疲劳性能的影响[J]. 航空制造技术, 2012, 409(13): 125.
- 54 Jolu T L, Morgeneyer T F, Denquin A, et al. Fatigue lifetime and tearing resistance of AA2198 Al-Cu-Li alloy friction stir welds: Effect of defects[J]. Int J Fatigue, 2015, 70: 463.
- 55 张丹丹, 曲文卿, 尹娜, 等. 工艺参数对铝锂合金搅拌摩擦焊接接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 84.
- 56 张丹丹, 曲文卿, 杨模聪, 等. Al-Li 合金搅拌摩擦焊接接头的疲劳性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 674.
- 12 Kim Y G, Fujii H, Tsumura T, et al. Effect of welding parameters on microstructure in the stir zone of FSW joints of aluminum die casting alloy[J]. Mater Lett, 2006, 60: 3830.
- 13 游国强, 张均成, 谭霞. 压铸镁合金 AZ91D 搅拌摩擦焊接头焊核演变机理研究[J]. 材料工程, 2014(2): 29.
- 14 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.
- 15 王国庆, 赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 114.

(上接第 322 页)

- 8 孙宜华, 杜良. 搅拌摩擦焊的研究进展与应用[J]. 新技术新工艺, 2011(6): 70.
- 9 Cam G, Mistikoglu S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys[J]. J Mater Eng Performance, 2014, 23(6): 1936.
- 10 赵秋颖, 吴志生, 刘翠荣, 等. 铝合金搅拌摩擦焊研究现状[J]. 焊接技术, 2016(1): 1.
- 11 王廷, 刘会杰, 冯吉才. 铝合金搅拌摩擦焊研究现状[J]. 航空制造技术, 2009(20): 62.