

随焊余高碾压 7075-T6 铝合金接头组织和性能

王泽杰, 宋刚, 刘黎明

(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: 为了改善 7075-T6 铝合金熔化焊接头的力学性能, 提出了随焊余高碾压 (welding with reinforcement rolling, WR) 方法, 采用自行设计的随焊碾压装置在焊接过程中对焊缝余高同步进行碾压, 利用万能试验机和维氏硬度计对不同工艺参数下的不同接头进行力学性能测试, 并通过配置能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 和电子背散射衍射 (electron back scatter diffraction, EBSD) 探头的扫描电镜对电弧焊接试样和随焊碾压试样的焊缝区和热影响区分别进行组织观察. 结果表明, 随焊余高碾压工艺成功通过一次成形获得 7075-T6 铝合金高强度焊接接头, 接头强度系数最高达到 81.4%, 相对电弧焊接接头提升 41.9%, 焊缝强度的提高主要由于位错密度的增大和小角度晶界的增加, 而晶粒尺寸及第二相分布对接头力学性能的影响比较小.

创新点: (1) 将随焊余高碾压工艺应用于 7 系铝合金.

(2) 随焊余高碾压工艺成功通过一次成形获得高强铝合金高强度焊接接头.

(3) 焊缝强度的提高主要由于位错密度的增大和小角度晶界的增加.

关键词: 随焊余高碾压; 7075-T6 铝合金; 接头软化; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231212001

Microstructure and mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy joint by welding with reinforcement rolling

WANG Zejie, SONG Gang, LIU Liming

(Liaoning Province Key Laboratory of Material Welding and Joining Technology, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China)

Abstract: To improve the mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy fusion welded joints, the welding with reinforcement rolling process was proposed. In-situ rolling of the weld reinforcement was performed during the welding process using a self-designed welding with rolling device. Vickers hardness tester and universal testing machine were used to show the hardness distribution and tensile strength of the joint at different rolling temperatures. The microstructure of the fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ) were observed by scanning electron microscope configured with EDS and EBSD. The results show that the hardness of the FZ and the solid solution region in HAZ of the joints can be significantly improved by the WR process, and the highest strength coefficient of the joints reaches about 81.4%, which is 41.9% higher than that of the conventional arc welded joints. Mechanical property is significantly improved due to the increase in low angle grain boundaries and dislocation density, with less correlation to grain size and second phase distribution.

Highlights: (1) The WR process is applied to 7000 series aluminum alloy.

(2) WR process successfully achieves high-strength welded joints by once-forming.

(3) Weld strength is improved due to the increase in low angle grain boundaries and dislocation density.

Key words: welding with reinforcement rolling; 7075-T6 aluminum alloy; joint softening; mechanical properties; microstructure

0 序言

7xxx 铝合金是航空航天领域中广泛使用的轻质材料,具有密度低、比强度高的特点,而 7075-T6 铝合金是该系列中十分经典的一种高强铝合金,室温下拉伸强度超过 500 MPa,被广泛应用于飞机桁架和机翼蒙皮。以上部件的组装,通常需要焊接来完成,由于熔化焊操作简单、生产效率高,得以在实际生产中实现广泛应用,但是 7075-T6 铝合金熔化焊接头性能较低,接头抗拉强度一般只能达到母材的 50%~60%^[1],其中焊缝区是接头性能最薄弱的区域,其原因主要包括低强度焊丝的使用、Zn/Mg 元素蒸发烧损以及晶粒粗大^[2],而热影响区的软化主要由强化相粒子的“过时效”粗化导致^[3]。此外,由于 Cu 元素的存在,7075-T6 铝合金在焊接过程中容易产生气孔和热裂纹等焊接缺陷^[4],严重影响焊接接头的使用性能和服役寿命。

研究者们通过多种方式来改善铝合金焊接接头的力学性能,包括调整焊接工艺^[5]、焊缝冶金改性^[6]和焊后热处理^[7]等,但是仅依靠调整焊接工艺和焊缝冶金改性等措施改善力学性能的效果非常有限,焊后热处理也有一定的局限性,例如不适合大型构件以及容易加剧焊接变形等。焊接过程中引入外部辅助手段在解决上述问题时显示出良好的效果,外部辅助手段包括施加机械力场^[8]、超声场^[9]和电磁场^[10]等,机械力场由于效果显著、设备简单而受到广泛关注,其中随焊控制工艺是其中一种比较有效而经济的手段,包括随焊锤击、随焊激冷和随焊冲击^[11]等,然而研究者多将重点放在了避免热裂纹和减少焊接残余应力及变形等方面,缺少对随焊控制参数—组织—性能关系的研究,对加工过程中组织和性能的演变规律以及可能产生的问题缺乏系统研究。

文中采用随焊余高碾压方式,通过热力耦合作

用改善 7075-T6 铝合金焊接接头组织和性能,这是一种局部变形工艺,即仅对焊缝余高进行碾压,随焊碾压过程融合了“焊接”和“变形”两个过程,但是又不同于“焊接”与“变形”两个过程的简单叠加,焊件余热尚未散失导致残余应力还未完全生成之时,焊缝便开始承受碾压变形,有助于减少变形开裂问题。尤其相比于普通板材的轧制变形,随焊碾压过程存在组织不均匀性、力学性能梯度和应变梯度,所以随焊碾压过程中组织和性能演变规律更加复杂。论文旨在探讨随焊余高碾压过程微观组织演变行为及其力学特征变化规律,对于揭示 7075-T6 铝合金随焊碾压接头在热力耦合作用下的性能强化机理具有重要的理论价值。

1 试验方法

试验材料为 7075-T6 铝合金板材,试件的加工尺寸为 100 mm × 60 mm × 1 mm,焊前使用钢丝刷对板材表面进行打磨,采用的焊接方法为 TIG 平板对接焊。焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER5356,母材和焊丝的化学成分见表 1。为了达到随焊碾压的目的,试验采用了自行搭建的随焊碾压设备,设备示意图如图 1 所示。碾压轮与焊枪同步移动,碾压轮的直径为 47 mm。为了获得尽可能小的碾压轮与焊枪之间的距离,同时保证焊接过程的顺利进行,经过前期试验,确定焊枪和焊丝与水平面的夹角分别为 65°和 12°,焊接电流为 105 A,焊接速度为 160 cm/min,送丝速度为 420 cm/min,保护气采用纯度为 99.99% 的氩气,气流量为 10 L/min。板材背面采用无凹型槽的强制成形,通过最大力控制法调节碾压轮的下压量,碾压轮的初始作用位置与母材齐平,通过调节碾压轮与焊枪之间的距离 D_{ra} 来控制碾压温度,由于碾压轮与焊枪的干涉轮枪距的最小距离为 35 mm,基于此,试验中轮枪距分别设置为 35、40 和 45 mm,样品编号为 WR35、WR40 和 WR45。

表 1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of base metal and wire

材料	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Si	Cr	Al
7075-T6	5.75	2.39	1.58	0.20	0.09	0.07	0.20	余量
ER5356	0.10	4.50	0.10	0.12	0.10	0.25	0.15	余量

沿垂直于焊缝方向截取拉伸试样,试样尺寸如

图 1 所示,拉伸试验采用 5982 型 Instron 电子万能

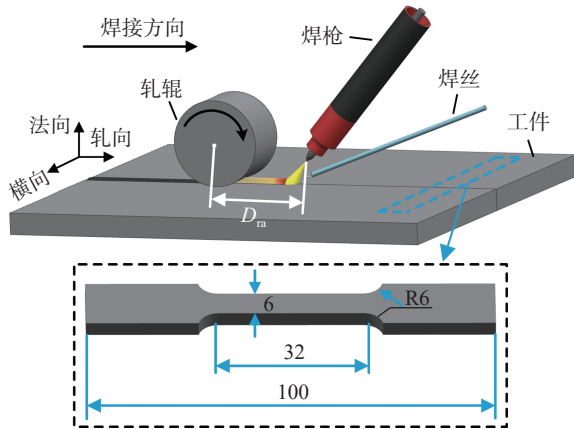


图 1 随焊碾压系统示意图及拉伸试样尺寸 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of welding with rolling system and dimensions of tensile specimen

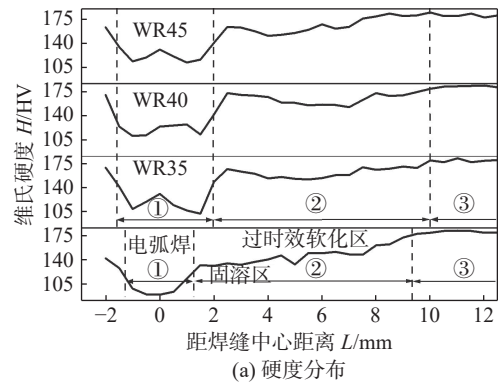
试验机, 加载速度为 1 mm/min, 试验结果为 3 个试样的平均值, 并通过 SUPARR 55 型扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察断口形貌. 通过维氏硬度计测试试样的硬度分布, 载荷 3 N 保压 12 s, 打点位置在试样横截面中心, 从一侧熔合线打点至另一侧的母材. 使用 EBSD 表征接头横截面处的晶粒取向和形貌, 通过 SEM 的背散射模式和 EDS 观察第二相的分布并分析其成分, 金相试样首先经过传统的机械抛光, 然后进行 2 h 的振动抛光.

2 试验结果及讨论

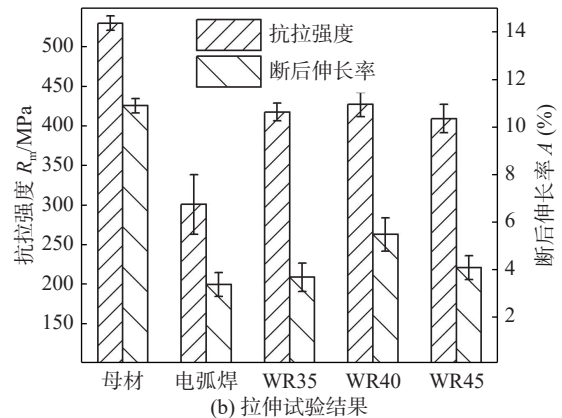
2.1 力学性能

不同接头的力学性能, 如图 2 所示, 图 2(a) 为电弧焊接头和随焊碾压接头的硬度分布曲线, 图中 ①为焊缝区; ②为热影响区; ③为母材区, 其中热影响区可以继续划分为固溶区和过时效软化区, 结果显示, 电弧焊接头硬度最低的区域为焊缝区, 固溶区的硬度值高于过时效软化区. 对于 WR35、WR40 和 WR45 接头, 其焊缝区和固溶区的硬度值均显著高于电弧焊接头, 说明碾压力除了直接作用于焊缝, 还通过间接变形对近缝区金属产生形变强化, 而距离焊缝较远的过时效软化区受到碾压力的影响比较小导致硬度值基本保持不变^[12]. 对母材、电弧焊接头和随焊碾压接头进行拉伸试验见图 2(b), 母材的平均抗拉强度为 525 MPa, 电弧焊接头的平均抗拉强度为 301.3 MPa, 接头强度系数为 57.4%. 当碾压轮与焊枪的距离 D_{ra} 为 40 mm

时, 随焊碾压接头的平均抗拉强度为 427.4 MPa, 接头强度系数达到了 81.4%, 比电弧焊接头提升了 41.9%, 当 D_{ra} 减小或者增大时抗拉强度均有小幅度下降, 强度系数分别为 79.6% 和 78.0%, 不能排除误差原因导致. 而接头断后延长率与抗拉强度呈正相关关系, 这是由于焊缝区强度增加以后, 接头各区域强度差异性减小, 导致拉伸过程中应变不再集中于焊缝区, 热影响区和母材可以提供额外的变形^[12]. D_{ra} 为 35 mm 时焊缝区碾压温度大约为 280 °C, 此温度尚未对轧制形成造成不良影响, 而 D_{ra} 较大时碾压温度较低, 则焊缝变形抗力和接头强化效果均与焊后冷轧相近, 当 D_{ra} 超过 45 mm 后, 碾压温度已经降低至 240 °C 以下.



(a) 硬度分布



(b) 拉伸试验结果

图 2 不同接头的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of different joints. (a) microhardness distribution; (b) tensile tests results

不同接头的横截面、拉伸断裂位置和断口形貌, 如图 3 所示. 如图 3(a) 所示, 由于设备最大碾压力小于接头的变形抗力, 焊缝区无法碾压至与母材齐平, 但不同接头承受碾压力相同. 如图 3(b) 所示, 接头断裂于熔合线附近, 由硬度分布曲线可知, 电弧焊接头焊缝中心硬度最低但余高较大, 增加了承载面积, 熔合线附近硬度同样较低且承载面积较小. 随焊碾压接头熔合线附近的硬度最低, 而且组

织差异性最大, 接头拉伸变形时更容易在此产生应力集中. 电弧焊接头以及随焊碾压接头的断口表面

均分布有大量的韧窝, 说明以上试件的断裂形式均为韧性断裂.

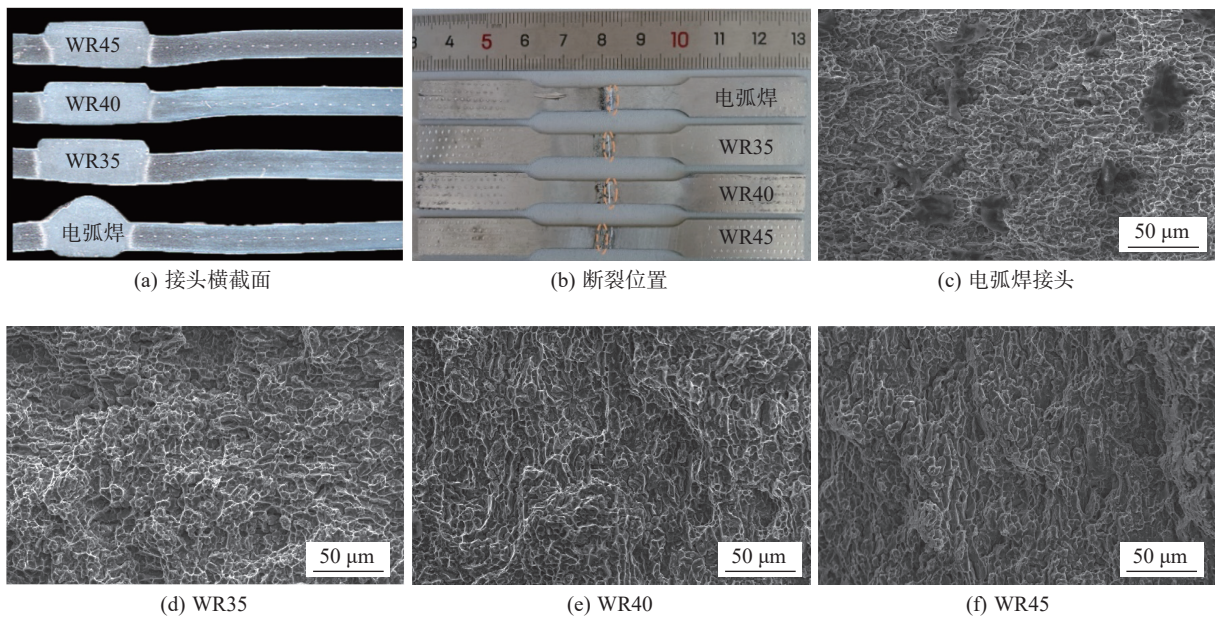


图 3 接头横截面及拉伸断口

Fig. 3 Cross section and fracture morphology of different joints. (a) joint cross section; (b) fracture location; (c) arc welded joint; (d) WR35 joint; (e) WR40 joint; (f) WR45 joint

2.2 微观组织分析

使用 EBSD 技术分析随焊碾压工艺对接头微观组织的影响, 电弧焊接头和 WR40 接头焊缝区和固溶区的晶粒形貌与晶界分布, 如图 4 所示, 硬度分布曲线显示过时效软化区硬度变化极小, 所以无须分析过时效软化区的组织演变. 为了详细表征晶界特征, 分别用细实线和实线表示取向差为 $2^\circ \sim 15^\circ$ 的小角度晶界和取向差大于 15° 的大角度晶界. 电弧焊接头焊缝区晶粒明显等轴化, 表明焊接冷却过程中发生了自由结晶, 固溶区呈现细长的条状晶粒结构. 随焊碾压接头的晶粒尺寸与电弧焊接头相似, 但是晶粒的宽径比相比于电弧焊接头略微增加, 即焊缝区和固溶区晶粒主要发生轧制法向 (ND) 方向上的压缩.

电弧焊接头的晶界类型主要是大角度晶界, 在焊缝区和固溶区所占的比例分别是 93.7% 和 94.1%. 随焊碾压接头的小角度晶界迅速增加, 在焊缝区和固溶区的比例分别增加到了 85.3% 和 71.6%, 这主要源于碾压过程中焊缝区和固溶区受碾压力的影响分别发生直接变形和间接变形, 位错迅速增殖并发生堆积进而导致产生位错缠结, 由于具有高层错能的铝合金在热变形过程中极易发生动态回复, 位错容易发生湮灭和重排, 从而形成小

角度晶界^[13].

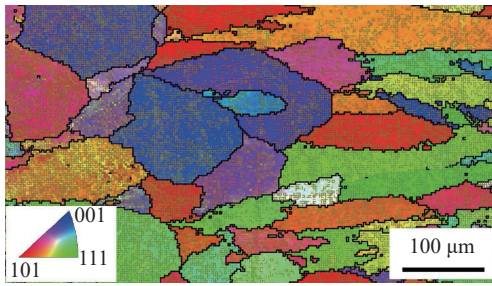
电弧焊接头和 WR40 接头焊缝区和固溶区的几何必须位错密度 (geometrically necessary dislocations, GND) 分布, 如图 5 所示. GND 密度与局部非均匀变形引起的塑性应变梯度有关^[14], 由于碾压过程引入了较大的塑性变形, 所以随焊碾压接头的位错密度相比于电弧焊接头急剧增加. 无论焊缝区和热影响区, 距离焊缝中心越近, 其变形程度越大, 所以呈现如图 5(b) 和图 5(d) 所示的位错密度分布梯度. 位错对材料强度的贡献与位错密度的平方根成正比, 所以随焊碾压过程通过提高焊缝的强度进而提升了整个接头的性能.

2.3 相组成分析

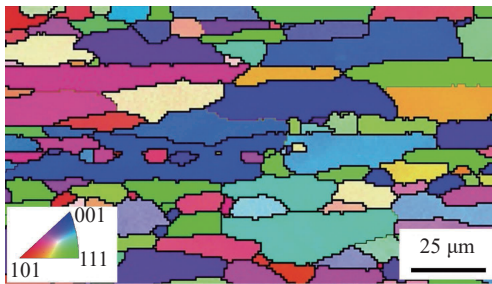
母材和电弧焊接头焊缝区的第二相粒子形貌及其分布, 如图 6 所示, 母材的第二相粒子粗大但数量较少, 并富集 Fe 元素. 焊缝区可继续划分为焊缝中心和靠近熔合线的部分熔化区 (partially melted zone, PMZ), 焊缝中心的第二相呈分散分布, 主要呈现点状和链状的外观, 根据表 2 所示的 EDS 分析结果, 第二相的主要组成元素为 Al, Zn, Mg 和 Cu 元素, 部分第二相中还有少量的 Fe 和 Cr 元素. PMZ 的第二相在晶界处呈链条状, 在晶内呈点状,



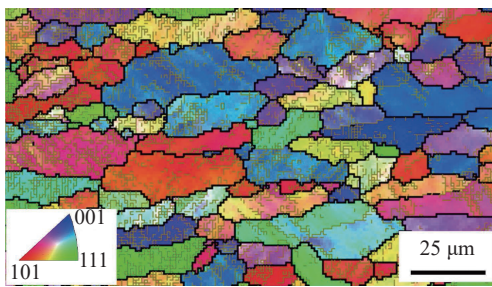
(a) 电弧焊-焊缝区



(b) WR40-焊缝区



(c) 电弧焊-固溶区

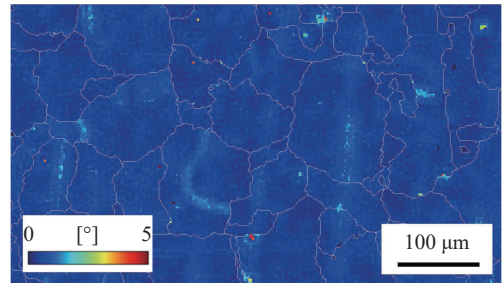


(d) WR40-固溶区

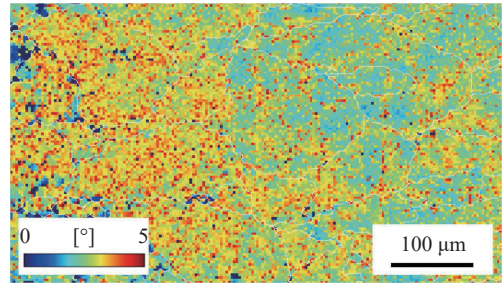
图 4 晶粒形貌与晶界分布图

Fig. 4 Grain morphology and grain boundary distribution map. (a) arc welded joint-fusion zone; (b) WR40 joint-fusion zone; (c) arc welded joint-solid solution zone; (d) WR40 joint-solid solution zone.

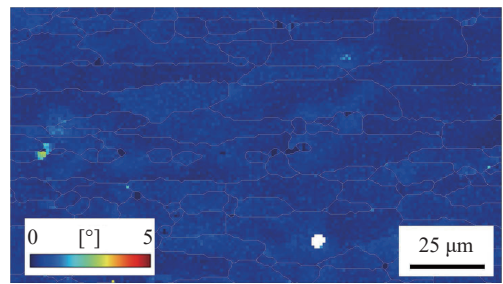
在邻近基体一侧呈现细小而弥散的分布, 第二相的主要组成元素依然为 Al, Zn, Mg 和 Cu 元素, 但是 Zn 元素和 Cu 元素所占的比例相比于焊缝中心有所增加. 由于焊接过程中 PMZ 的 Zn 元素相比于焊缝中心蒸发烧损较少, 同时在熔池凝固过程中 Zn 和 Cu 元素发生逆偏析^[15], 导致 PMZ 中 Zn 和 Cu 元素的含量高于焊缝中心, 由于成分过冷度大, PMZ 的 Zn、Cu 元素比焊缝中心更容易发生偏聚,



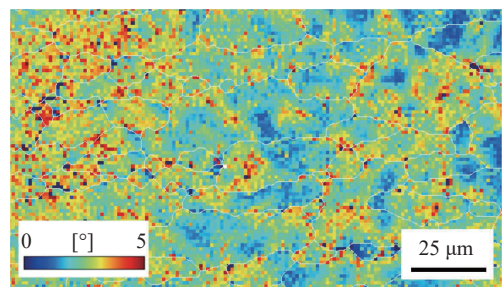
(a) 电弧焊-焊缝区



(b) WR40-焊缝区



(c) 电弧焊-固溶区



(d) WR40-固溶区

图 5 GND 密度分布

Fig. 5 Distribution of GND density. (a) arc welded joint-fusion zone; (b) WR40 joint-fusion zone; (c) arc welded joint-solid solution zone; (d) WR40 joint-solid solution zone.

继而在成分再分配的作用下析出 Zn、Cu 含量高的第二相粒子.

随焊碾压接头焊缝中心与部分熔化区的第二相粒子形貌及分布, 如图 7 所示, 随焊碾压接头焊缝区和部分熔化区的第二相粒子分布相比于电弧焊接头变化不大, 但随焊碾压接头焊缝中心的第二相呈现出一定的方向性, 主要是由于受到碾压力的影响晶粒发生压缩变形. 根据表 3 所示的 EDS 成

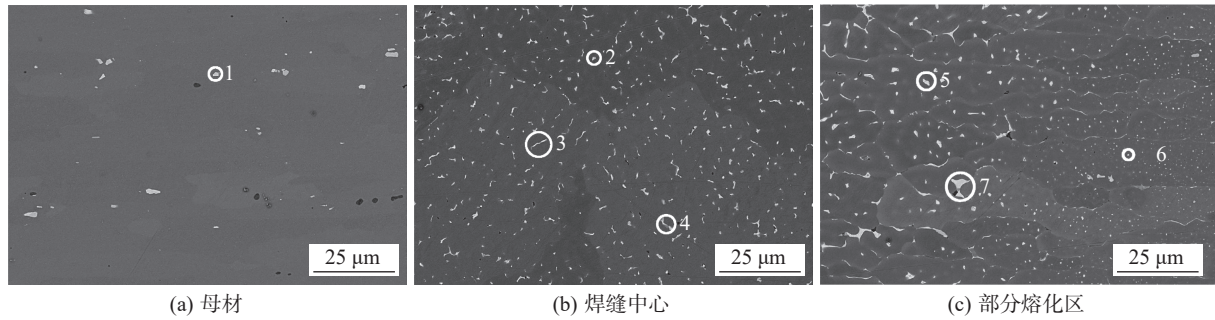


图6 电弧焊接头SEM

Fig. 6 SEM analysis of arc welded joint. (a) base metal; (b) weld center; (c) partially melted zone.

表2 电弧焊接头能谱分析结果(质量分数, %)
Table 2 Energy spectrum analysis results of arc welded joints

序号	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Cr
1	72.92	3.8	1.02	5.46	15.98	0.61	0.2
2	76.72	9.43	8.35	5.5	—	—	—
3	84.68	3.83	3.92	2.25	4.92	0.23	0.18
4	78.4	8.63	7.78	4.61	0.41	—	0.17
5	68.68	16.21	6.8	8.32	—	—	—
6	73.57	14.31	4.86	6.87	0.23	—	0.15
7	53.03	23.58	9.1	14.29	—	—	—

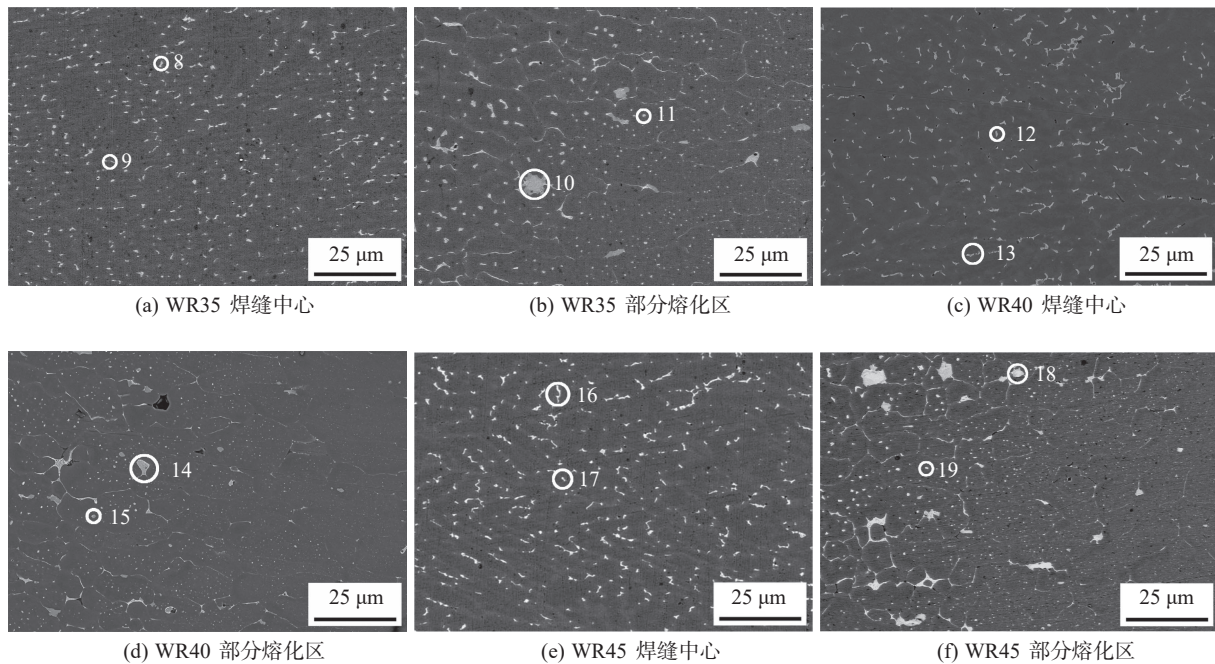


图7 随焊碾压接头焊缝区SEM

Fig. 7 SEM analysis of WR joint. (a) weld center of WR35 joint; (b) partially melted zone of WR35 joint; (c) weld center of WR40 joint; (d) partially melted zone of WR40 joint; (e) weld center of WR45 joint; (f) partially melted zone of WR45 joint.

分析结果, 焊缝中心和PMZ中第二相的主要成分均与电弧焊接头相似. 由于随焊碾压工艺无法减

表3 随焊碾压接头能谱分析结果(质量分数,%)
Table 3 Energy spectrum analysis results of WR joints

序号	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Cr
8	73.98	12.36	7.53	6.12	—	—	—
9	70.7	13.94	7.8	7.57	—	—	—
10	54.2	2.54	0.95	8.57	32.06	1.25	0.44
11	85.28	9.01	2.67	3.03	—	—	—
12	75.51	9.86	8.49	5.75	0.38	—	—
13	74.6	10.15	9.41	5.84	—	—	—
14	77.77	10.58	4.38	5.5	1.23	—	0.53
15	78.48	11.35	4.29	5.88	—	—	—
16	77.93	9.9	7.25	4.92	—	—	—
17	86.28	6.36	6.34	2.54	—	—	—
18	57.5	20.94	7.58	13.61	0.38	—	—
19	81.95	10.48	3.54	4.03	—	—	—

少 Zn 元素蒸发烧损,也无法改善 Zn 元素和 Cu 元素的逆偏析现象,所以随焊碾压接头的粗大第二相成分及其百分比含量相比于电弧焊接头并无明显改变。

3 结论

(1) 随焊余高碾压工艺成功通过一次成形获得7075-T6铝合金高强度焊接接头,接头强度系数最高可以达到母材的81.4%,相比于电弧焊接头强度提高41.9%。

(2) 焊缝强度的提高主要由于位错密度的增大和小角度晶界的增加,晶粒尺寸及第二相分布对其影响比较小。

(3) 电弧焊接头熔合线附近的硬度虽然稍高于焊缝中心,但是较大的余高可以增加其承载能力,而余高碾压变形后焊缝中心硬度增加,导致熔合线附近成为性能最薄弱区域,所以两种接头均断裂于焊缝区熔合线附近。

参考文献

- [1] Zhang L, Li X, Nie Z, *et al.* Softening behavior of a new Al-Zn-Mg-Cu alloy due to TIG welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25: 1870 – 1879.
- [2] Zhong S, Han S, Chen J, *et al.* Microstructure and properties of 7075 aluminum alloy welding joint using different filler metals[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103260.
- [3] 吴圣川, 张卫华, 焦汇胜, 等. 激光-电弧复合焊接7075-T6铝合金接头软化行为[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(7): 785 – 792.
Wu Shengchuan, Zhang Weihua, Jiao Huisheng, *et al.* Softening behavior of laser-arc hybrid welded 7075-T6 aluminum alloy joint[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2013, 43(7): 785 – 792.
- [4] Ma G, Yue K, Liu D, *et al.* Cracking susceptibility control of 7075 aluminum alloy in pulsed laser welding with filler strip[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108119.
- [5] 徐腾, 张春芝, 鲁宽亮, 等. 7075铝合金MIG焊接头金相组织、力学性能和耐蚀性的应力敏感性[J]. *焊接学报*, 2021, 42(7): 51 – 59.
Xu Teng, Zhang Chunzhi, Lu Kuanliang, *et al.* Microstructure, mechanical properties and stress dependence of corrosion resistance for MIG welded 7075 aluminum joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(7): 51 – 59.
- [6] Li S, Xu W, Xiao G, *et al.* Effects of Sc on laser hot-wire welding performance of 7075 aluminum alloy[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(10): 106506.
- [7] 陈超, 陈芙蓉, 张慧婧. 时效对7A52铝合金激光焊接头组织性能的影响[J]. *焊接学报*, 2017, 38(11): 66 – 70.
Chen Chao, Chen Furong, Zhang Huijing. Effect of aging treatment on the weld quality during laser welding of 7A52 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(11): 66 – 70.
- [8] Zhang C, Gao M, Zeng X. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 85 – 92.
- [9] Zhang H, Chen C. Effect of pulse frequency on weld appearance of Al alloy in pulse power ultrasonic assisted GMAW[J]. *Journal*

- of Manufacturing Processes, 2021, 71: 565 – 570.
- [10] Chen J, Wei Y, Zhan X, *et al.* Weld profile, microstructure, and mechanical property of laser-welded butt joints of 5A06 Al alloy with static magnetic field support[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1677 – 1686.
- [11] 杨建国, 王佳杰, 董志波, 等. 随焊冲击碾压整形对低匹配等承载接头硬度与残余应力的影响 [J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 37 – 40.
- Yang Jianguo, Wang Jiajie, Dong Zhibo, *et al.* Influence of weld shaping with trailing impact rolling on hardness and residual stress of under-matched equal load-carrying joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 37 – 40.
- [12] Wang Z J, Fan X Y, Zhang Z D, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy plates by welding with weld reinforcement rolling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 889: 145854.
- [13] Cheng J W, Song G, Zhang Z D, *et al.* Improving heat-affected zone softening of aluminum alloys by in-situ cooling and post-weld rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 306: 117639.
- [14] Jin Y H, Chen Y S, Ma Y M, *et al.* Fatigue crack propagation of 7050 aluminum alloy FSW joints after surface peening[J]. China Welding, 2023, 32(1): 18 – 26.
- [15] Wu S C, Yu X, Zuo R Z, *et al.* Porosity, element loss, and strength model on softening behavior of hybrid laser arc welded Al-Zn-Mg-Cu alloy with synchrotron radiation analysis[J]. Welding Journal, 2013, 92(3): 64 – 71.
-
- 第一作者:**王泽杰, 博士研究生; 主要从事铝合金焊接技术研究; Email: zejie_wang@163.com.
通信作者:宋刚, 博士, 教授, 博士生导师; Email: songgang@dlut.edu.cn.

(编辑: 刘启明)