



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.06

7075-2A12 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织性能分析

李志强, 飞尚才

青海高等职业技术学院, 青海 海东 810799

摘要: 固定搅拌头转速和焊接速度, 以前进侧(AS)材料为变量, 对6 mm厚7075和2A12铝合金板材进行搅拌摩擦焊接试验, 研究不同AS侧材料下焊缝形貌、显微组织、力学性能的变化规律。结果表明, 搅拌头转速800 r/min, 焊接速度50 mm/min时, 可获得不同AS侧材料的7075-2A12焊接接头, 当AS侧材料为7075时, 溢出带较少, 成形较好; 7075-2A12异种接头WNZ组织晶粒细小, 为细小等轴晶, 与AS-TMAZ有明显分界线, 与RS-TMAZ无明显分界, TMAZ组织发生较大程度的弯曲变形; AS侧材料由7075变化为2A12时, 焊接接头7075侧TMAZ组织晶粒尺寸在长、宽两个方向均出现尺寸增大现象, 而2A12侧TMAZ组织晶粒尺寸有所减小; 7075-2A12异种铝合金焊接接头显微硬度分布呈不规则“W”形, AS侧由7075变化为2A12时, WNZ硬度略有增大, 接头抗拉强度和伸长率、冲击韧性均有略微升高。综合分析, AS侧材料为2A12时, 可获得晶粒较细、力学性能较好的搅拌摩擦焊接接头。

关键词: 异种铝合金; 搅拌摩擦焊; 宏观形貌; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG453+9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0048-07

Analysis of Microstructure and Properties of 7075-2A12 Dissimilar Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joint

LI Zhiqiang, FEI Shangcai

Qinghai Higher Vocational & Technical Institute, Haidong 810799, China

Abstract: A friction stir welding experiment was conducted on 6mm thick 7075 and 2A12 aluminum alloy plates with fixed stirring head speed and welding speed, with the advance side (AS) material as the variable. The changes in weld morphology, microstructure, mechanical properties, etc. were studied under different AS side materials. The results show that when the stirring head speed is 800r/min and the welding speed is 50 mm/min, 7075-2A12 welded joints of different AS side materials can be obtained. When the AS side material is 7075, there is less overflow zone and the forming is better; 7075-2A12 dissimilar joint WNZ has fine grains and is a fine equiaxed crystal, with a clear boundary with AS-TMAZ and no clear boundary with RS-TMAZ. The TMAZ structure undergoes significant bending deformation; When the AS material changes from 7075 to 2A12, the grain size of the TMAZ structure on the 7075 side of the welded joint increases in both the length and width directions, while the grain size of the TMAZ structure on the 2A12 side decreases; The microhardness distribution of the 7075-2A12 dissimilar aluminum alloy welded joint shows an irregular "W" shape. When the AS side material changes from 7075 to 2A12, the WNZ hardness slightly increases, and the tensile strength, elongation, and impact toughness of the

收稿日期: 2024-10-08 修回日期: 2024-12-21

基金项目: 青海高等职业技术学院科研项目经费资助(GZYKY202302)

作者简介: 李志强(1990—),男,讲师,主要从事材料成形及控制技术研究。E-mail: lizhiqiang@qhvtc.edu.cn。

joint also slightly increase. Based on comprehensive analysis, when the AS side material is 2A12, a dissimilar stir friction welded joint with finer grains and better mechanical properties can be obtained.

Keywords: dissimilar Al alloy; FSW; macro morphology; microstructure; mechanical properties

引用格式:李志强, 飞尚才. 7075-2A12 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织性能分析[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 48-54.
Citation:LI Zhiqiang, FEI Shangcai. Analysis of Microstructure and Properties of 7075-2A12 Dissimilar Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joint [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 48-54.

0 前言

随着“双碳”目标的提出,能源问题和环保问题在工业发展中不容忽视,高强轻质材料的开发与应用将逐步取代传统钢铁材料。铝合金是一种典型的轻质合金材料,被广泛应用于汽车、轨道、航空、船舶等工业领域^[1-2]。2XXX 系和 7XXX 系铝合金因其密度低、强度高、韧性高、抗疲劳性好、耐蚀性高等优点^[3-4],被广泛应用于航空构件的制造,异种铝合金的焊接也成了难以避免的难题。当采用 TIG、MIG 等传统熔焊方法施焊时,焊缝中易形成夹杂、裂纹、气孔等焊接缺陷^[5-6],降低构件的力学性能。搅拌摩擦焊(FSW)是一项固态连接技术,其使用功率小,金属无熔化,无焊材消耗,无有害气体,自动化程度高,无紫外和电磁辐射等优点,同时由于其固态性质,焊缝成形美观,同时消除了诸如裂纹、气孔、孔隙率等焊接性问题,被广泛应用在铝及铝合金的焊接中。

近年来,同种或异种铝合金搅拌摩擦焊方面的研究较多,肖雪敏^[7]采用 SEM、TEM、硬度试验、拉伸试验等对 7075 铝合金薄板的搅拌摩擦焊(FSW)及焊后热处理工艺进行了研究,谭盖^[8]固定搅拌头转速和焊接速度,以 5 mm 2A12 与 7075 为研究对象,对异种铝合金 2A12-7075 FSW 对接接头的组织与性能进行研究。然而关于 7XXX 系和 2XXX 系异种铝合金 FSW 研究较少,大多都是薄板和厚板,开展 7XXX 系和 2XXX 系异种铝合金中厚板 FSW 对接试验研究,对 FSW 技术在现代工业中的应用具有重要意义。选取具有代表性的 2A12 与 7075 为研究对象,固定搅拌头转速和焊接速度,研究不同 AS 材料对 7075-2A12 异种铝合金 FSW 接头成形、微观组织及力学性能的影响,为进一步开展大范围试验参数对 7075-2A12 异种铝合金搅拌摩擦焊接,探究良

好参数匹配奠定基础。

1 试验材料与方法

试验材料为 6 mm 厚 2A12-T4 铝合金冷轧淬火板和 7075-T6 铝合金热精轧淬火板,试板尺寸为 6 mm×60 mm×200 mm,两种铝合金材料的化学成分见表 1,力学性能见表 2。

表 1 试验材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of experimental materials (wt. %)						
材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni
2A12	0.07	0.17	4.3	0.63	1.6	0.01
7075	0.12	0.25	1.5	0.14	2.6	—

材料	Zn	Fe+Ni	Ti	Cr	Al
2A12	0.16	0.18	0.03	—	余量
7075	5.6	—	0.03	0.21	余量

表 2 试验材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental materials			
材料	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A /%
2A12	454	295	21
7075	562	490	12

试验用 BR-VMC-L53 立式铣床改装搅拌摩擦焊机,试验用搅拌头材料 H13,搅拌针为锥形,轴肩直径 16 mm,倾角 2°,搅拌针针长 5.7 mm,根部直径 6.5 mm。焊前铣削加工板对接装配面,用机械方法去除板材切割毛刺,并清洗表面油污和氧化膜。固定转速和焊接速度,以 AS 侧材料为变量,进行异种铝合金搅拌摩擦焊接试验,焊后对中截取金相试样,并在水磨砂纸上磨样,用 Keller 试剂(1 mL HF, 1.5 mL HCl, 2.5 mL HNO₃, 95 mL H₂O)进行腐蚀,其中 2A12 侧腐蚀 30 s 左右,7075 侧腐蚀约 60 s,在 ZEISS Vert.A1 倒置金相显微镜观察焊接接头各区域组织。然后进行硬度测试、拉伸试验、冲击试验,分析异种铝合金搅拌摩擦焊接时,AS 侧材料对焊缝

成形、微观组织、力学性能等的影响。

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝外观成形

搅拌头转速 800 r/min, 焊接速度 50 mm/min 时, AS 侧材料分别为 7075 和 2A12 的异种接头焊缝宏观形貌如图 1 所示。

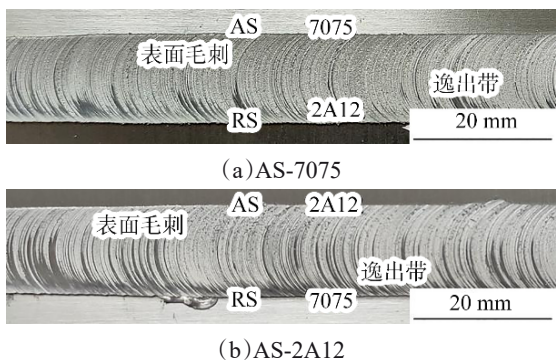


图 1 7075-2A12 异种接头焊缝宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of 7075-2A12 dissimilar joint welds

由图 1 可知, AS 侧材料为 7075 时, 环形纹路清晰可见, 焊缝表面呈磨砂状, 表面毛刺缺欠严重, 分布于整个焊缝上, AS 侧分布最为密集, 同时存在肉眼可见的逸出带; AS 材料为 2A12 时, 表面毛刺缺欠一般, 稀疏分布在 AS 侧, 存在密集的逸出带, 同时在 RS 侧存在少许飞边缺欠。这可能与 7075 和 2A12 两种材料不同的热导率有关, 也与两种材料的塑性流动有关, 7075 的热导率小于 2A12 铝合金, 7075 铝合金较 2A12 铝合金塑化困难, 在相同的焊接参数下, 7075 侧容易热量集中, 当置于 AS 侧时, 容易在表面出现毛刺缺欠。同时, 在搅拌针机械搅拌作用下, 母材金属由 AS 流动到 RS, 在流动过程中 AS 材料受拉, RS 材料受压^[9], 因 7075 塑化相对难, 在 AS 侧时有利于塑化, 促进 7075 向 RS 侧流动^[9], 而 2A12 置于 AS 侧时, 塑化程度高, 使得 2A12 铝合金粘性降低, 不利于向 RS 侧及搅拌头后方填充, 易在 RS 侧出现飞边缺欠。7075 置于 RS 侧, 因 7075 塑化不足或处于塑化时间过短, 表层粘度高, 在焊接过程中容易粘在搅拌头轴肩端面上, 在轴向力作用下被挤出形成逸出带^[9]。就焊缝外观成形来看, 当 AS 侧材料为 7075 时, 成形较好。

2.2 微观组织

图 2 为 7075 置于前进侧 7075-2A12 异种接头微观组织, 大致可分为焊核区(WNZ)、前进侧热机影响区(AS-TMAZ)、返回侧热机影响区(RS-TMAZ)、前进侧热影响区(AS-HAZ)、返回侧热影响区(RS-HAZ)、母材(BM)等区域。

图 2a、2b 为 7075 和 2A12 的 BM 组织, 为典型轧制组织, 黑色颗粒为中间相或强化相。图 2c~2e 为不同放大倍数 WNZ 组织, 可以看到异种金属分界分层明显, 晶粒与强化相分布均匀, 存在明暗相间分布纹路, 为典型“洋葱环”形貌, 与 BM 相比, WNZ 晶粒细小, 为细小等轴晶, 这与焊缝温度有关, 搅拌摩擦热使搅拌针周围金属充分塑化、流动, 达到再结晶温度的同时, 位错密度增加, 发生动态再结晶, 同时由于搅拌针的机械作用, 晶粒发生破碎, 形成细小等轴晶^[10]。图 2f 为 AS-TMAZ 组织, 在搅拌头剪切作用下形成突变型边界, WNZ 与 TMAZ 有明显分界线, 塑化金属流动痕迹清晰可见, 晶粒延流线方向被拉长, 发生了较大程度的弯曲变形, 并在焊接热作用下发生回复反应, 在板条状组织内形成了回复晶粒组织^[10]。图 2g 为 AS-HAZ 组织, AS-HAZ 与 AS-TMAZ 无明显分界线, 分界区域可见, 组织晶粒粗大, 长度和宽度稍微变形, 发生回复反应。图 2h 为 RS-TMAZ 组织, 在搅拌头挤压作用下形成扩散型边界, WNZ 与 RS-TMAZ 无明显分界, 晶粒延流线方向被拉长, 发生了较大程度的弯曲变形, 相比 AS-TMAZ, 该区域组织长大明显, 这与 7075 和 2A12 的热物理性能有关, 相同条件下 2A12 更容易长大。图 2i 为 RS-HAZ 组织, 晶粒粗大, 长度和宽度变形较大, 发生回复反应。

搅拌头转速 800 r/min, 焊接速度 50 mm/min, 不同 AS 侧材料异种铝合金 FSW 接头的焊缝微观组织如图 3 所示。图 3a 为 7075 置于 AS 侧的 WNZ 组织, 图 3b 为 7075 置于 RS 侧的 WNZ 组织, 均存在明暗相间弧形纹路, WNZ 组织均为细小等轴晶, 晶粒及强化相分布均匀, 当 7075 置于 RS 侧晶粒更为细小, 这与 7075 和 2A12 铝合金不同的热物理性能差异有关, 2A12 较 7075 更容易塑化, 流动性更强。7075 置于 RS 侧相对置于 AS 侧, 在焊接过程中流动距离更远, 将流向距离焊缝中心更远的区域, 搅拌作用大

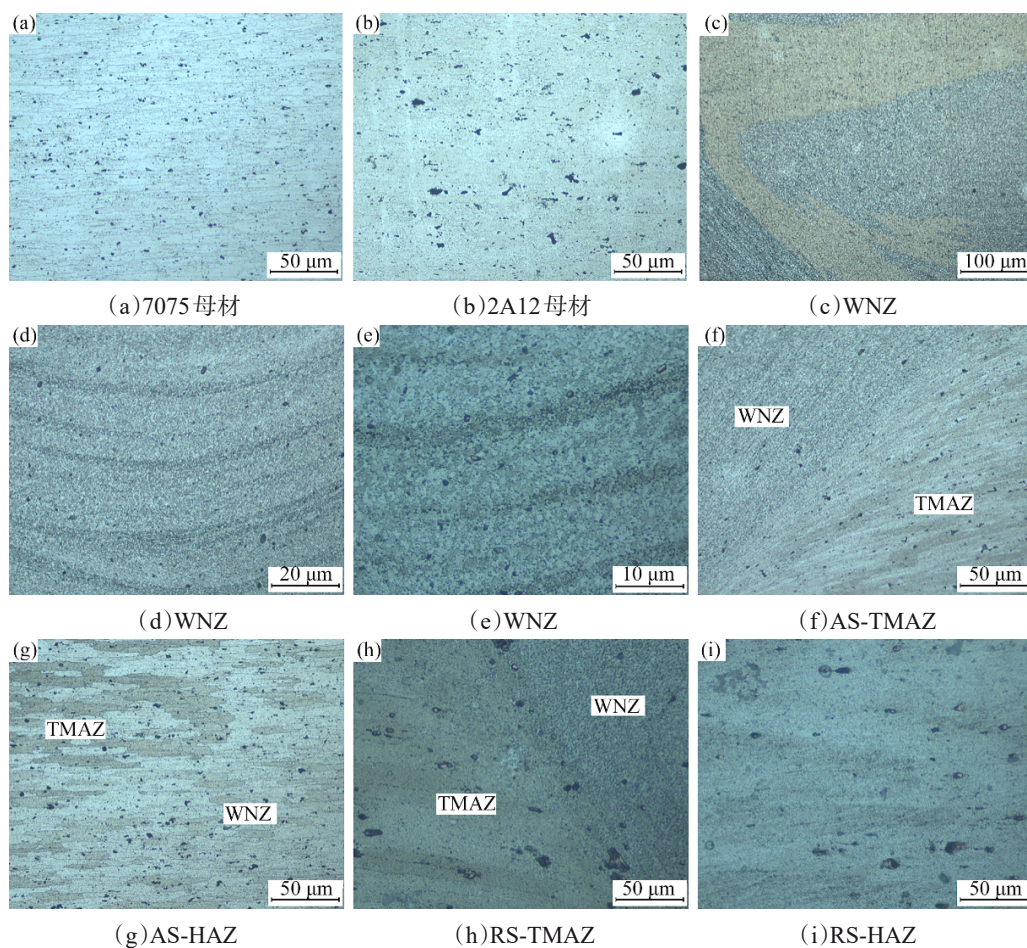


图2 7075置于前进侧7075-2A12异种接头微观组织

Fig. 2 7075 placed on the AS 7075-2A12 heterogeneous joint microstructure

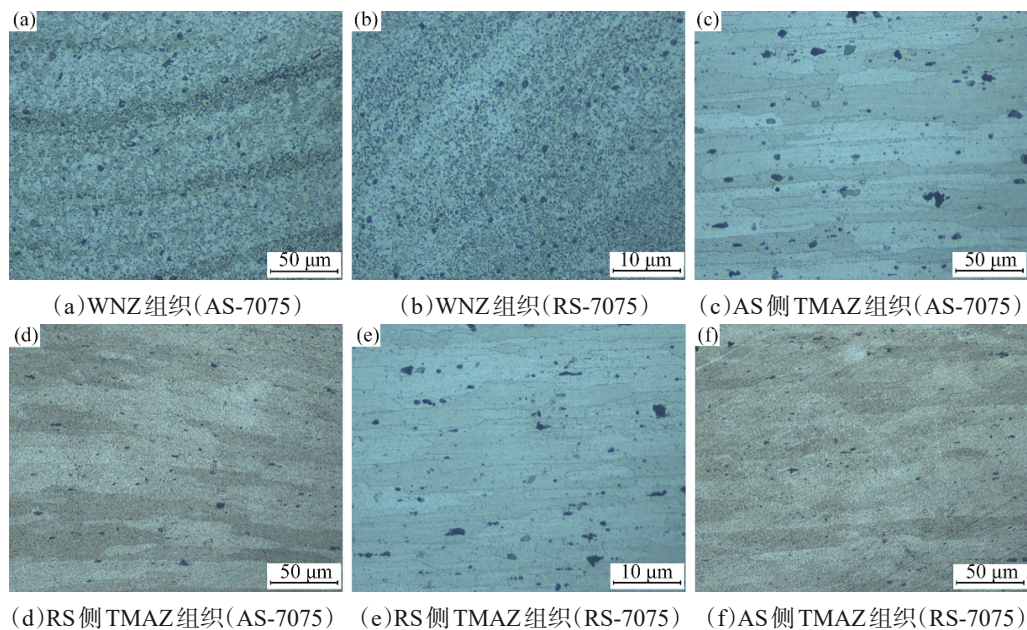


图3 7075置于不同位置的焊接接头组织

Fig. 3 7075 welding joint organization placed in different positions

大减弱,更容易获得晶粒细小的组织^[9]。因焊接接头 HAZ 组织较母材组织变化不大,仅分析当 7075 置于不同位置时 AS 侧和 RS 侧的 TMAZ 组织。7075 置于 AS 侧,7075 侧和 2A12 侧 TMAZ 组织如图 3c、3d 所示,7075 置于 RS 侧,7075 侧和 2A12 侧 TMAZ 如图 3e、3f 所示,由图可知,AS 侧材料对异种接头 TMAZ 组织晶粒大小的影响不容忽视,当 AS 侧材料由 7075 变化为 2A12 时,7075 侧 TMAZ 晶粒尺寸在长和宽两个方向上均出现尺寸增大现象,而 2A12 侧 TMAZ 晶粒尺寸有所减小^[9]。究其原因,这与焊接过程塑化金属的流动有关,在搅拌针机械搅拌作用下,焊区金属发生塑化,高温塑化材料由 AS 侧流向 RS 侧,在 RS 侧热作用更强,而 AS 侧热作用变弱所致,同时也与两种金属不同的热物理性能有关。

2.3 力学性能

搅拌头转速 800 r/min,焊接速度 50 mm/min,分别从焊缝中心,距离上下表面各 1 mm 处进行硬度分析,7075 置于 AS 侧,7075-2A12 异种铝合金焊接接头侧面显微硬度如图 4 所示。整个硬度分布呈现不规则 W 形,AS 硬度高于 RS 侧,WNZ 硬度高于 RS 侧母材,这说明接头硬度值随着搅拌针的作用深度而增大,轴肩作用上表面硬度最小,这主要由于不同深度搅拌针的作用程度不同,搅拌针端部作用区域晶粒越细小,加之轴肩的作用效果减弱,第二相长大越不明显,导致接头显微硬度随着搅拌针的作用深度而增大。7075-2A12 焊接接头最高硬度出现在 WNZ 内,为 137.1 HV,接头最小硬度为 TMAZ,这主要是因为该区域在搅拌针机械搅拌作用下,晶粒变形并长大,同时轴肩压力及搅拌热作用减弱也是不可忽略的因素。搅拌头转速 800 r/min,焊接速度 50 mm/min,7075 置于接头不同位置,7075-2A12 异种铝合金接头显微硬度分布如图 5 所示,AS 侧材料由 7075 变化为 2A12 时,WNZ 硬度稍有增大,增值为 3.5 HV,在 7075 侧,可明显看到硬度有所下降,出现软化现象,而 2A12 侧,接头硬度稍有增大,这是因为在焊接过程中,高温金属流向 RS 侧,使得接头 RS 侧的热输入略有升高,造成 RS 侧组织晶粒及第二相发生粗化,软化程度增大^[9]。

搅拌头转速 800 r/min,焊接速度 50 mm/min,

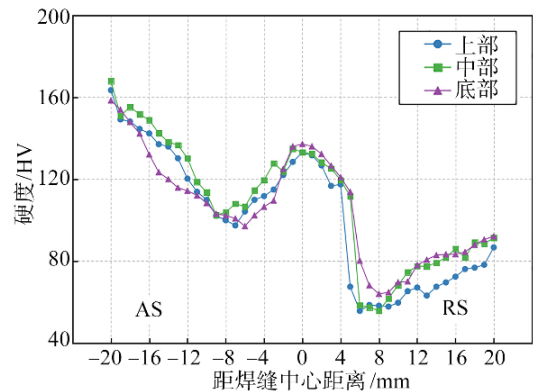


图 4 7075-2A12 异种铝合金焊接接头显微硬度

Fig. 4 Microhardness of 7075-2A12 dissimilar aluminum alloy welded joints

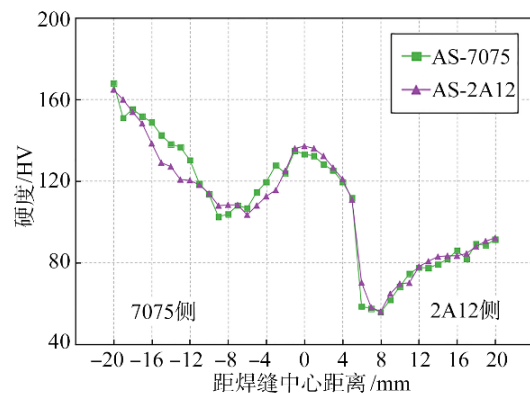


图 5 不同焊接位置 7075-2A12 异种铝合金接头硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution of 7075-2A12 dissimilar aluminum alloy joints at different welding positions

7075 置于接头不同位置,7075-2A12 异种铝合金接头抗拉强度、伸长率和冲击功如图 6 所示,由图 6a 可知,当 7075 铝合金置于 AS 侧,接头的抗拉强度为 363 MPa,为 7075 母材的 64.6%,为 2A12 母材的 79.9%,伸长率为 9.3%,为 7075 母材的 77.5%,为 2A12 母材的 44.3%。当 2A12 铝合金置于接头 AS 侧时,接头抗拉强度和伸长率均比 7075 置于 AS 侧略微升高,抗拉强度为 372 MPa,伸长率为 10.1%,这主要与搅拌摩擦焊接过程中材料的流向有关,高温材料流向 RS 侧,RS-HAZ 组织受热作用强,粗化严重,导致接头强度与塑性稍微提升。

对不同 AS 材料的异种铝合金 FSW 接头进行冲击性能测试,由图 6b 可知,AS 侧材料为 7075 时,2A12 置于 AS 时的冲击性能略高于 7075 为 AS 侧材料,增大约 5.95%,说明当 2A12 置于 AS 侧时,焊接接头韧性较好,这主要与焊接接头 WNZ 晶粒尺寸

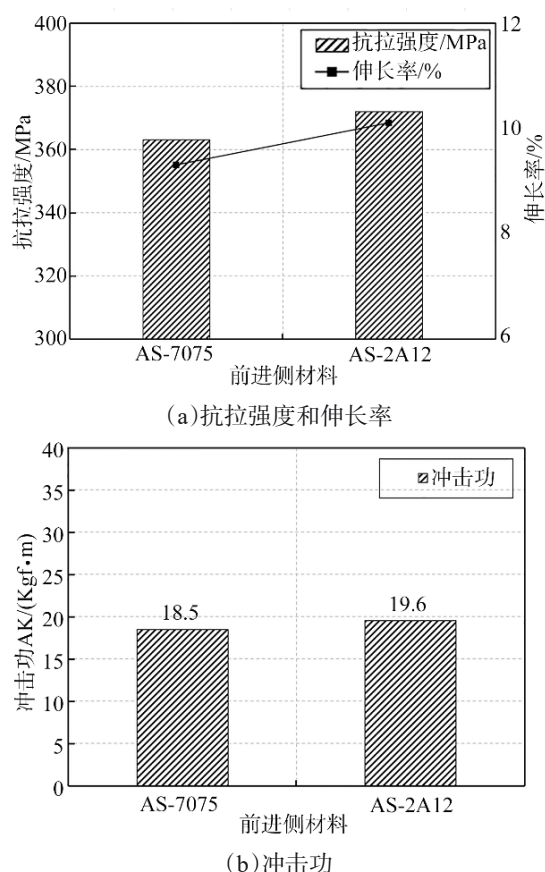


图6 不同焊接位置7075-2A12异种铝合金接头抗拉强度、伸长率和冲击功

Fig. 6 Tensile strength, elongation, and impact energy of 7075-2A12 dissimilar aluminum alloy joints at different welding positions

有关,当2A12置于AS侧时,晶粒尺寸较小,接头韧性较好。总之,从显微硬度、抗拉强度和伸长率、冲击性能方面考虑,当2A12铝合金置于AS侧时,7075-2A12铝合金异种接头性能优于7075铝合金置于AS侧。

3 结论

(1)固定转速800 r/min,焊速50 mm/min,AS侧材料不同时,均可获得不同AS侧材料的7075-2A12焊接接头,当AS侧材料为7075时,成形较好。

(2)7075/2A12异种接头WNZ组织晶粒细小,为细小等轴晶,与AS-TMAZ有明显分界线,与RS-TMAZ无明显分界,TMAZ组织发生较大程度的弯曲变形。AS侧材料由7075变化为2A12,焊接接头7075侧TMAZ组织晶粒尺寸在长和宽两个方向均

出现尺寸增大现象;而2A12侧TMAZ组织晶粒尺寸有所减小。

(3)7075-2A12异种铝合金焊接接头显微硬度分布呈不规则“W”形,AS侧材料由7075变化为2A12时,接头焊核区硬度略有所增大,在7075侧,接头硬度有所下降,发生软化,而2A12侧,接头硬度有所增大,接头软化程度减弱。

(4)7075-2A12异种铝合金接头强度、塑性、韧性均与AS侧材料有关,当AS侧材料为2A12铝合金时,接头抗拉强度、伸长率、冲击韧性等均略微升高。

参考文献:

- [1] 杨健,骆顺存,裴鹏飞,等. 异种铝合金焊接研究现状及展望[J]. 电焊机,2023,53(5):1-11.
YANG J, LUO S C, PEI P F, et al. Research Status and Prospect of Dissimilar Aluminum Alloy Welding [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(5): 1-11.
- [2] 雷驰宇,胡远照,朱善清,等. 异种铝合金搅拌摩擦焊接工艺研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(2): 12-13+16.
LEI C Y, HU Y Z, ZHU S Q, et al. Study on Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminium Alloy [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023(2): 12-13+16.
- [3] 卢柄希. 7XXX系铝合金板材搅拌摩擦焊接与接头轧制变形行为[D]. 辽宁:辽宁科技大学, 2020.
LU B X. Friction Stir Welding of 7XXX Series Aluminum Alloy Sheets and Rolling Deformation Behavior of the Joints [D]. Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2020.
- [4] 姜月,朱浩,齐芳娟,等. 7075铝合金搅拌摩擦焊接头在拉伸过程中的裂纹扩展行为[J]. 焊接,2019(03): 28-32+66-67.
JIANG Y, ZHU H, QI F J, et al. Behaviors of crack propagation in 7075 aluminum alloy friction stir welded joints during tensile process [J]. Welding & Joining, 2019(03): 28-32+66-67.
- [5] 王钟德,王瑞杰,刘国寿,等. 7075/2A12异种铝合金搅拌摩擦焊接接头疲劳寿命预测研究[J]. 现代制造工程,2023(10):135-144.
WANG Z D, WANG R J, LIU G S, et al. Fatigue life prediction of 7075/2A12 dissimilar aluminum alloys friction stir welding lap joints [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(10): 135-144.

- [6] 曾浩然,徐卫平,柯黎明,等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头表面在盐水环境中腐蚀坑形貌[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(03):54-59.
ZENG H R, XU W P, KE L M, et al. Morphology of Corrosion Pits on the Surface of Friction Stir Welded Joint of AA7075 Aluminum Alloy in Salt Water Environment[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2019, 33(03): 54-59.
- [7] 肖雪敏. 7075 铝合金薄板搅拌摩擦焊及焊后热处理工艺研究[D]. 广东:华南理工大学, 2022.
XIAO X M. Research on Friction Stir Welding and Post-weld Heat Treatment of 7075 Aluminum Alloy Sheet[J]. Guangdong: South China University of Technology, 2022.
- [8] 谭盖. 2A12/7075 异种铝合金 FSW 接头组织及性能研究[D]. 四川:西南石油大学, 2017.
- TAN G. Research on the Microstructure and Properties of 2A12/7075 Dissimilar Aluminum Alloys FSW Joints [D]. Sichuan: South West Petroleum University, 2017.
- [9] 韩金理. 异种铝合金搅拌摩擦焊数值模拟及工艺研究[D]. 四川:西南石油大学, 2018.
HAN J L. Numerical Simulation and Process Research of Dissimilar Aluminum Alloy Stirring Friction Welding [D]. Sichuan: South West Petroleum University, 2018.
- [10] 尹聪鑫. SiCp/6061-T6 铝基复合材料搅拌摩擦焊工艺及机理研究[D]. 河南:河南理工大学, 2022.
YIN C X. Research on Friction Stir Welding Process and Mechanism of SiCp/6061-T6 Aluminum Matrix Composites [D]. Henan: Henan Polytechnic University, 2022.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 36 页

- tomatic Detection Method of DR Digital imaging for Brazing Seam Defects of Thrust Chamber Body [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(1): 9-14.
- [11] 储钰昆,吴磊,杨洪刚,等. 基于 YOLOv8 的铸件 DR 图像小目标缺陷检测[J]. 特种铸造及有色合金, 2025 (1): 35-41.
CHU Y K, WU L, YANG H G, et al. Small Target Defect Detection in Casting DR Images Based on YOLOv8 [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025 (1): 35-41.
- [12] 曹帅,董立红,邓凡,等. 基于 YOLOv7-SE 的煤矿井下场景小目标检测方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50 (3): 35-41.
- CAO S, DONG L H, DENG F, et al. A small object detection method for coal mine underground scene based on YOLOv7-SE [J]. Journal Of Mine Automation, 2024, 50(3): 35-41.
- [13] 龙凌,陈浩,梁昊,等. 基于轻量化 YOLO 网络的实时 X 射线焊缝缺陷检测[J]. 网络新媒体技术, 2023, 12 (2): 30-38.
LONG L, CHEN H, LIANG H, et al. Real-time X-ray Weld Defect Detection Based on Lightweight YOLO Network [J]. Network New Media Technology, 2023, 12(2): 30-38.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>