

Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 锆合金搅拌摩擦焊工艺及焊缝组织和性能

张超, 周猛兵, 陶欣, 郑云西, 王治国, 魏连峰, 杨灿湘

(中国核动力研究设计院第四研究所, 成都, 610213)

摘要: 文中对 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 锆合金搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 工艺、微观组织和腐蚀性能进行了分析。结果表明, 采用 W-25%Re 的搅拌工具在转速 250 r/min、焊接速度 40 mm/min、顶锻压力 10 kN、氩气保护条件下可以获得成形良好且无焊接缺陷的锆合金 FSW 接头。搅拌区 (stir zone, SZ) 剧烈的塑性变形促进动态再结晶、合金元素扩散和晶粒细化, 晶粒尺寸随着转速增加而增大, 同时 SZ 内在晶界位置处析出大量的形状不规则的第二相粒子。不同焊接参数制备的 FSW 接头在 360 °C、18.6 MPa 中性水中腐蚀 72 h 后均表现为黑色、光亮、致密的氧化膜, 但随着转速增加接头耐腐蚀性能降低。

创新点: (1) 利用搅拌摩擦焊技术开展 4.5 mm 厚的锆合金工艺探索及微观组织分析。
(2) 对锆合金搅拌摩擦焊接头开展高压釜腐蚀性能试验。

关键词: 锆合金; 搅拌摩擦焊; 焊接工艺; 微观组织; 腐蚀性能

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20221202001

0 序言

锆合金具有优异的力学性能、抗腐蚀性能、抗中子辐照性能以及较小的热膨胀系数等优点^[1], 因此, 被认为是核反应堆的关键结构材料, 广泛应用于压水堆燃料包壳管、沸水堆通道箱以及核动力装置燃料元件等关键结构部件^[2]。在锆合金结构件的加工制造过程中, 焊接成为必不可少的关键技术和工艺。目前, 对于锆合金的焊接多采用熔化焊接工艺, 主要包括钨极氩弧焊、电子束焊接、等离子束弧焊以及电阻焊^[3-4], 由于锆合金很容易与空气中的氧气和氮气发生反应生成脆性化合物, 导致焊接接头塑性、韧性及腐蚀性能降低, 而在熔化焊接过程中严格控制焊接气氛, 增加了工程应用的难度和成本^[5-6], 同时, 熔焊工艺经历了快速加热熔化、快速冷却凝固的焊接热循环, 易导致焊接缺陷和粗大的不均匀微观组织形成, 严重恶化了焊接接头力学性能、抗腐蚀性能。

搅拌摩擦焊技术是英国焊接研究所 (The

Welding Institute, TWI) 于 1991 年发明的新型焊接技术, 利用搅拌头轴肩、搅拌针与周围材料摩擦产生热量, 使待焊处材料局部产生热塑性流动, 在固相状态下实现可靠冶金连接^[7]。与熔焊方法相比, FSW 技术的优势主要表现在热输入低, 在焊接过程中不会形成熔池, 避免了焊缝金属化学成分稀释以及气孔、裂纹等焊接冶金缺陷, 同时, 还具有焊接热输入低、焊接变形小、焊接结构应力低和焊缝深宽比可控等优点^[8-10]。在 FSW 焊接过程中, 搅拌工具周围的材料会产生严重的塑性变形和大量的摩擦热, 导致动态再结晶的发生, 促进焊缝区域晶粒细化、位错增殖, 进而改善 FSW 的组织 and 性能^[11]。

国内外目前关于锆合金 FSW 的研究还比较少, 因此, 采用 FSW 技术对厚度为 4.5 mm 的 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 锆合金板材进行焊接试验, 研究焊接工艺参数对锆合金 FSW 焊缝成形、微观组织和腐蚀性能的影响, 为优化焊接工艺、组织性能提供重要依据。

1 试验方法

试验材料为 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 锆合金, 其化学成分见表 1。焊接母材在真空热处理炉中进行热处

理,具体的热处理制度为在 580 °C 下保温 240 min,随后随炉冷却至室温,母材试板厚度为 4.5 mm.采用型号为 FSW-3LM-020 的焊接设备完成 FSW 焊接试验,使用的搅拌工具由 W-25%Re 合金制成,其搅拌工具形状为带螺纹的圆锥形,搅拌针长度为 3.5 mm,轴肩尺寸为 15 mm,如图 1 所示.

表 1 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of the Zr-Sn-Nb-Cr-Fe zirconium alloy

| Sn | Nb | Fe | Cr | O | Zr |
|-----|------|------|------|------|----|
| 1.0 | 0.30 | 0.35 | 0.10 | 0.10 | 余量 |



图 1 搅拌工具照片
Fig. 1 Macro morphology of stir tool.

钎合金是一种高活性金属,在焊接过程中易与空气中的氮、氢、氧等气体发生反应,形成脆性化合物,导致其焊接接头的力学性能和腐蚀性能降低.因此,专门设计了钎合金 FSW 焊接过程惰性气体保护装置,在焊接过程中通过该装置制造高纯氩气,保护气氛实现对焊缝区域的局部保护,每次焊接过程中氩气流量和氩气保护时间均保持一致.

图 2 为 FSW 焊接工艺过程示意图,即搅拌工具以一定的转速进入焊接材料,待轴肩达到一定下压力时保压 5~10 s 后,载有焊接材料的工作平台沿一个方向以一定的焊接速度进行移动完成焊接过程.结合前期调研钎合金和钛合金 FSW 的相关文献,初步确定焊接参数为下压力 0.1 mm,焊接压力 10 kN,主轴倾角 2.5°,焊接速度 40 mm/min,改变搅拌针转速分别为 200, 250, 300 r/min,探索了钎合金 FSW 接头制备工艺可行性.

为了探索 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 焊缝表面成形、内部缺陷以及腐蚀性能,开展焊缝横截面金相形貌表征、高压釜腐蚀试验.垂直于焊缝方向上切取 20 mm × 5 mm 的金相试样,采用型号为 Axio Observer 7M 金相显微镜对焊接接头的宏观形貌进行观察分析,探索 FSW 接头内部缺陷控制情况和微观组织特征.采用型号为 JEOL-4800F 场发射电子扫描显微镜,对母材和 SZ 内析出相分布和形态进行观察.在垂直于焊缝方向上切取 30 mm ×

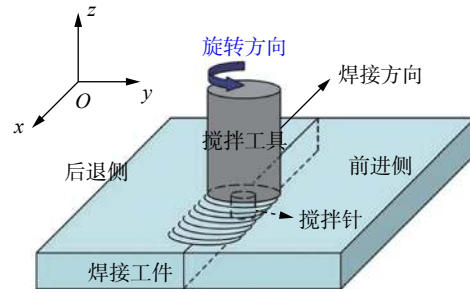


图 2 FSW 焊接过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of FSW process

20 mm,沿着焊缝方向厚度为 2.5 mm 的腐蚀试样,高压釜腐蚀试验条件为:按照 ASTM G2/G2M-2006 的要求在 360 °C, 18.6 MPa 的中性水中进行 72 h 腐蚀试验.

2 试验结果与分析

2.1 FSW 焊缝成形情况

图 3 为不同焊接工艺参数下 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 接头表面形貌,可以发现在转速 200~250 r/min 范围内、焊接速度为 40 mm/min、轴向顶锻压力为 10 kN 的焊接工艺条件下,可以实现钎合金稳定的焊接过程,所形成的焊缝表面平整、光滑,且焊缝表面表现为金黄色,而当转速增大至 300 r/min 时,焊缝表面粗糙、飞边严重、在厚度方向上金属损失严重,同时焊缝表面存在严重氧化色.这种焊缝成形和表面颜色的变化可能与转速的

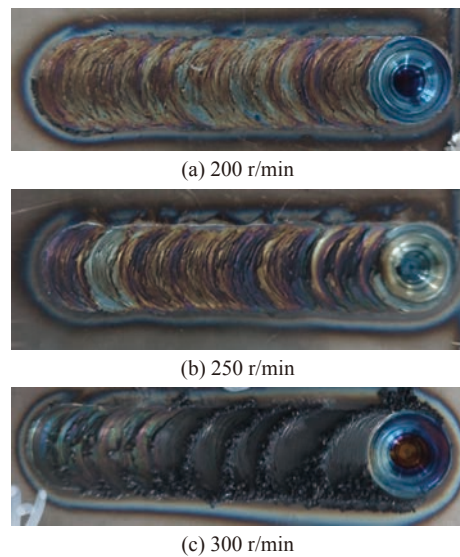


图 3 不同焊接工艺参数下的 FSW 焊缝表面形貌
Fig. 3 Surface morphology of FSW weld under different welding process parameters. (a) 200 r/min; (b) 250 r/min; (c) 300 r/min

变化造成焊接热输入差异有关。

根据已发表的研究结果可知, 通过计算 FSW 过程的产热量可以间接地得出焊接热输入, 具体计算的表达式如下^[12-16]

$$Q_{TH} = \frac{2}{3} \pi [\delta \tau + (1 - \delta) \mu P] \omega [(R_S^3 - R_P^3) (1 + \tan \alpha) + R_P^3 + 3R_P^2 H_P] \quad (1)$$

式中: δ 是搅拌工具轴肩与焊接工件之间的滑动常数; τ 是母材的剪切屈服强度; μ 是摩擦系数; P 是轴向压力; ω 是搅拌头的角速度; R_S 是搅拌工具轴肩直径; α 是搅拌工具轴肩的锥角度; R_P 和 H_P 分别是搅拌针的半径和长度, 并且在 FSW 过程中 83% 的热量来自于轴肩的摩擦热, 17% 来自于搅拌针的摩擦热, 搅拌工具轴肩的摩擦热, 即

$$Q_{AS} = 2\pi \mu F_n R_i n \quad (2)$$

式中: μ 是轴肩摩擦系数 (为常数 0.3); F_n 是 FSW 过程稳定阶段的轴向力; R_i 是轴肩半径; n 是搅拌针的转速, 因此, FSW 过程中的焊接热输入 (heat input, HI) 可以用以下公式来计算, 即

$$E = \frac{Q_{TH}}{v} = \frac{Q_{AS}}{0.83v} = \frac{2\pi \mu F_n R_i n}{0.83v} \quad (3)$$

研究中不同焊接工艺参数下, 焊接热输入计算结果为转速 200 r/min 时热输入 1.022 kJ/mm, 转速 250 r/min 时热输入 1.277 kJ/mm, 转速 300 r/min 时热输入 1.532 kJ/mm. 当转速较高时, 焊接热输入随之增大, 焊缝区域内产生过热现象, 材料塑性流动越好, 在焊缝表面残余金属较多, 同时焊缝区经历的焊接热循环峰值温度越高, 焊接完成停止氩气保护后焊缝的温度较高, 容易与空气中的 O_2 和 N_2 等气体反应, 导致焊缝表面出现氧化现象。

2.2 焊缝内部缺陷情况

在保持焊接速度、轴向顶锻压力、轴肩下压量等参数不变的情况下, 为了探索转速对焊缝内部缺陷控制方面的影响, 对焊缝成形良好的两个工艺参数分别为转速 200 r/min 和 250 r/min 的焊接接头进行内部焊接缺陷观察分析. 沿垂直于焊缝方向切取焊接接头的横截面金相试样, 并通过光学显微镜观察、评价焊接接头质量和其缺陷的分布特征。

图 4 是在转速 200 r/min 和 250 r/min、焊接速度为 40 mm/min 的焊接工艺条件下形成的钎合金 FSW 接头的横截面宏观形貌, 从图 3 中可以看出转速为 250 r/min、焊接速度为 40 mm/min 的工艺条

件下可以制备无缺陷的焊接接头, 而在 200 r/min、40 mm/min 的工艺参数下制备的 FSW 接头上方存在孔洞缺陷, 同时在热力影响区 (thermally affected zone, TMAZ) 和热影响区 (heat affect zone, HAZ) 结合的局部位置处存在“隧道型”焊接缺陷, 这是由于转速较低, 焊接热输入低, 焊接接头内达到塑性化状态的材料不足, 材料塑性流动不充分, 导致 TMAZ 和 HAZ 结合的局部区域内材料未完全闭合而形成孔洞和“隧道型”焊接缺陷。

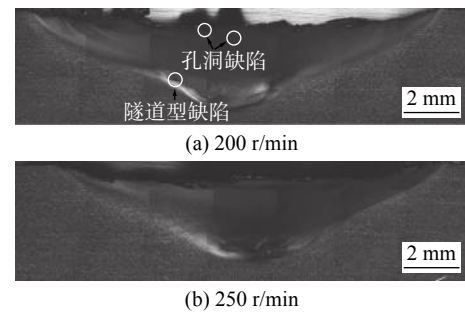


图 4 不同焊接工艺条件下的 FSW 接头横截面形貌
Fig. 4 Cross section morphology of FSW joint under different welding process conditions. (a) 200 r/min; (b) 250 r/min

2.3 微观组织演变

图 5 为焊接母材和不同焊接工艺条件下 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 接头 SZ 的金相组织. 焊接母材为退火态, 由大量的等轴晶 α 相组织和少量的 β 相组织组成, 经过焊接后, 焊缝内仍呈 α 相的等轴晶组织特征, 即表明在转速在 200 ~ 250 r/min、焊接速度为 40 mm/min 的条件下, 焊缝经历的焊接热循环峰值温度均低于 α/β 相转变温度 (根据文献 [17] 可知, Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 合金的 α/β 相转变温度约为 825 °C 左右), 无相变发生。

与母材相比, 焊缝内的晶粒发生明显细化, 晶粒尺寸由焊接母材中 10 μm 左右细化至 3 ~ 5 μm , 这主要与 FSW 焊接过程中严重塑性变形, 促进动态再结晶 (包括晶粒破碎引起的几何动态再结晶和低角度晶界向高角度晶界转变引起的连续动态再结晶), 以及氩气保护加快焊缝的冷却速率, 有效限制晶粒长大有关. 同时由于焊接热输入的增加, 焊缝内晶粒尺寸随着转速的增大而逐渐增大。

为进一步观察焊缝中第二相粒子分布特征, 利用型号为 JEOL-4800F 场发射电子扫描显微镜, 对焊接母材和焊接接头 SZ 的微观组织进行观察分析, 如图 6 所示. 母材中晶界及晶内分布有大量

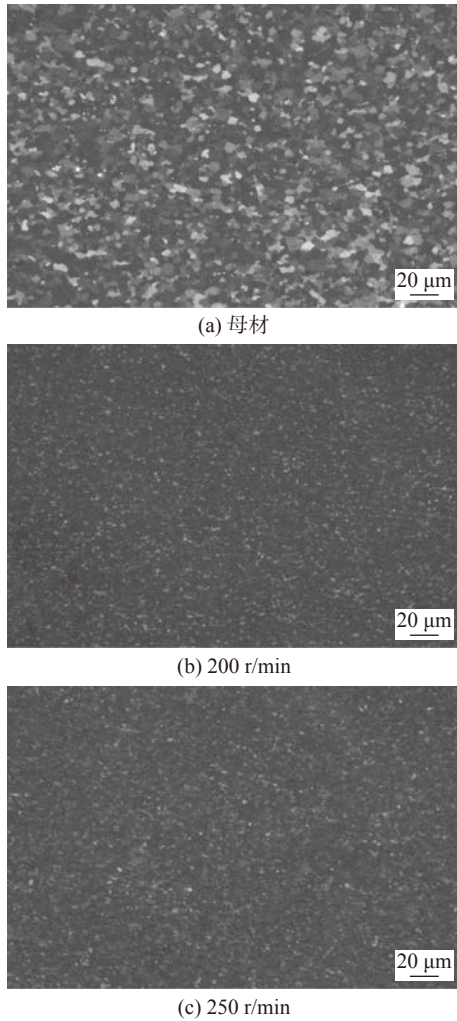


图 5 母材与 FSW 接头 SZ 的微观组织

Fig. 5 Microstructure of base metal and SZ of FSW joint. (a) BM; (b) 200 r/min; (c) 250 r/min

球状细小弥散的析出相。然而, SZ 内在晶界位置处析出形状不规则、尺寸较大的第二相粒子, 并且随着转速增加, 晶界处的第二相粒子尺寸增大。这是由于在 FSW 过程中发生剧烈的塑性变形, 产生了较大的形变能和更多的晶界、晶格缺陷(空位、位错等), 为第二相粒子的析出提供更多形核位置, 同时晶粒内的合金元素向晶界偏聚, 促进第二相析出, 并在晶界处形成第二相粒子团簇^[18-20]。

2.4 焊缝腐蚀性能

对转速为 200 ~ 250 r/min、焊接速度为 40 mm/min 条件下, 成形良好的 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 接头开展了高压釜腐蚀性能试验。FSW 接头腐蚀试验后的形貌, 如图 7 所示。FSW 接头和 Zr-4 标样在 360 °C、18.6 MPa 中性水中腐蚀 72 h 后, 均表现为黑色、光亮、致密的氧化膜, 无白色、棕色等异常腐蚀产物, 即表明 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合

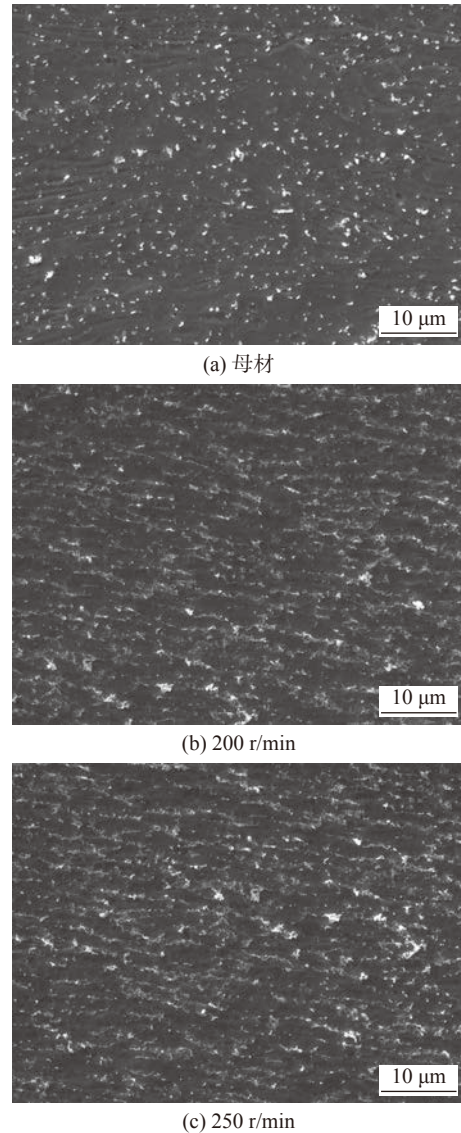


图 6 母材与 FSW 接头 SZ 扫描电镜下的析出相特征

Fig. 6 Characteristics of precipitates in base metal and SZ of FSW joint under scanning electron microscope. (a) BM; (b) 200 r/min; (c) 250 r/min

金 FSW 接头的腐蚀性能与 Zr-4 合金相当。

FSW 接头腐蚀试验后腐蚀增重结果见表 2。转速 200 r/min 接头和转速 250 r/min 接头的单位面积腐蚀增重分别为 4.59 mg/dm² 和 11.64 mg/dm², FSW 接头的单位面积腐蚀增重随着转速的增加而增大, 即表明焊接接头的耐腐蚀性能随转速的增加而降低。这可能是由于随着转速的增大, 焊接热输入、位错密度以及塑性变形量相应地增加, 有利于合金元素向晶界和晶格缺陷位置处偏聚, 导致基体 α 相晶粒内中 Fe, Nb, Sn 等合金元素贫化, 促进第二相粒子在晶界和位错位置处析出、聚集并形成团簇, 进而影响 FSW 接头的耐腐蚀性能^[21-24]。

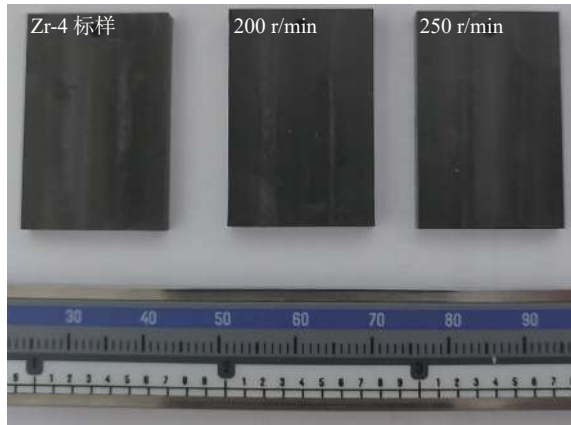


图 7 母材和 FSW 接头腐蚀后的宏观形貌

Fig. 7 Macro morphology of base metal and FSW joint after corrosion

表 2 腐蚀试验后 FSW 接头腐蚀增重结果

Table 2 Corrosion weight gain results of FSW joint after corrosion test

| 转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$ | 单位增重 $\Delta m/(\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2})$ |
|----------------------------------|--|
| 200 | 4.59 |
| 250 | 11.64 |

3 结论

(1) 通过对比分析不同焊接工艺参数下的焊缝成形、内部焊接缺陷等方面差异, 在转速 250 r/min、焊接速度 40 mm/min、顶锻压力为 10 kN、氩气保护的焊接工艺条件下可以获得表面成形良好且未发现内部缺陷的 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 接头。

(2) 母材表现为等轴晶组织特征, 晶粒尺寸约 10 μm , 在晶界和晶内弥散分布细小的球状析出相, 与母材相比, 由于焊接热循环和 SZ 内材料剧烈的塑性变形作用, SZ 内晶粒发生明显细化, 同时 SZ 内应变诱导析出形状不规则的第二相粒子, 并在晶界位置处出现长大、团簇。

(3) 不同焊接工艺条件制备的 Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 钎合金 FSW 接头在 360 $^{\circ}\text{C}$ 、18.6 MPa 中性水中腐蚀 72 h 后均表现为黑色、光亮、致密的氧化膜, 但 FSW 接头耐腐蚀性能随转速增加而降低。

参考文献

[1] 钟建伟, 安军靖, 丁怀博, 等. Zr-Sn-Nb-Fe-Cr 与 Zr-Nb-Fe 钎合金电阻点焊工艺及显微组织 [J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 82 -

90.

Zhong Jianwei, An Junjing, Ding Huaibo, *et al.* Welding processes and microstructures of weld bead of Zr-Sn-Nb-Fe-Cr and Zr-Nb-Fe zirconium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 82 - 90.

[2] Konishi T. Birth and infancy period of zircaloy materials[J]. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 2003, 45(7): 418 - 423.

[3] Bordoni R A, Olmedo A M. Microstructure in the weld region in seam welded and resistance welded Zircaloy 4 tubing[J]. Journal Materials Science, 1981, 16: 1527 - 1572.

[4] Yao M Y, Zhou B X, Li Q, *et al.* The effect of alloying modifications on hydrogen uptake of zirconium-alloy welding specimens during corrosion tests[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 350: 195 - 201.

[5] 左小涛. 钎 R60702 焊接接头性能研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.

Zuo Xiaotao. Study on properties of zirconium R60702 welded joint [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.

[6] 吴宏伟, 杭逸夫, 徐宇皓, 等. 钎 R60702 TIG 焊焊接工艺及接头性能研究 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(5): 83 - 84.

Wu Hongwei, Hang Yifu, Xu Yuhao, *et al.* Study on TIG welding procedure of Zr R60702 and properties of welded joints[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(5): 83 - 84.

[7] 薛海峰, 夏宁, 金文涛, 等. 不同焊接方法下 AZ31B 镁合金焊接接头组织性能研究 [J]. 焊接技术, 2019, 48(5): 77 - 80.

Xue Haifeng, Xia Ning, Jin Wentao, *et al.* Study on microstructures and properties of welded joints of AZ31B magnesium alloy welded by different welding methods[J]. Welding Technology, 2019, 48(5): 77 - 80.

[8] Xue P, Komizo Y, Ueji R, *et al.* Enhanced mechanical properties in friction stir welded low alloy steel joints via structure refining[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 606: 322 - 329.

[9] Han W, Chen D, Ha Y, *et al.* Modifications of grain-boundary structure by friction stir welding in the joint of nano-structured oxide dispersion strengthened ferritic steel and reduced activation martensitic steel[J]. Scripta Materialia, 2015, 105: 2 - 5.

[10] Kalvala P, Akram J, Misra M, *et al.* Low temperature friction stir welding of P91 steel[J]. Defence Technology, 2016, 12: 285 - 289.

[11] 张成聪, 常保华, 陶军, 等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊过程组织演化分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 57 - 60.

Zhang Chengcong, Chang Baohua, Tao Jun, *et al.* Microstructure evolution during friction stir welding of 2024 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 57 - 60.

[12] Schmidt H B, Hattel J H. Thermal modelling of friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 332 - 337.

- [13] Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43: 605 – 615.
- [14] Heurtier P, Jones M J, Desrayaud C, *et al.* Mechanical and thermal modelling of friction stir welding[J]. *Journal Materials Process Technology*, 2006, 171: 348 – 357.
- [15] Zhang C, Cui L, Liu YC, *et al.* Microstructures and mechanical properties of friction stir welds on 9%Cr reduced activation ferritic/martensitic steel[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, 34: 756 – 766.
- [16] 张超. 低活化铁素体/马氏体钢搅拌摩擦焊接组织与力学性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
Zhang Chao. Study on microstructure and properties of friction stir welds on reduced activation ferritic/martensitic steels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [17] Xu Nan, Song Qining, Bao Yefeng, *et al.* Achieving an excellent strength–ductility synergy in zircaloy-4 by FSW with rapid cooling[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34: 20 – 28.
- [18] 李中奎, 周廉, 张建军, 等. Zr-Sn-Nb-Fe 合金中铌的存在方式及其与热处理的关系 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(12): 1362 – 1364.
Li Zhongkui, Zhou Lian, Zhang Jianjun, *et al.* The existing form of Nb in Zr-Sn-Nb-Fe alloys and its dependence on intermediate annealing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(12): 1362 – 1364.
- [19] Tang R, Yang X. Dissolution and precipitation behaviors of hydrides in N18, Zr-4 and M5 alloys[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(17): 7269 – 7274.
- [20] 范清松, 杨忠波, 周军, 等. Zr-Sn-Nb-Fe 系锆合金中第二相粒子研究进展 [J]. *材料工程*, 2016, 44(4): 110 – 118.
Fan Qingsong, Yang Zhongbo, Zhou Jun, *et al.* Research progress of second phase particles on Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(4): 110 – 118.
- [21] Guanghai B, Rongshan W, Yanwei Z, *et al.* Effect of processing techniques on precipitation behavior of secondary phase particles in Zr-1Nb-0.01Cu alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(10): 2473 – 2479.
- [22] 李强, 黄昌军, 杨艳平, 等. N18 锆合金疝状腐蚀问题研究 [J]. *核动力工程*, 2012, 33(S2): 22 – 27.
Li Qiang, Huang Changjun, Yang Yanping, *et al.* Nodular corrosion investigation of N18 zirconium alloys[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2012, 33(S2): 22 – 27.
- [23] Kruger R M, Adamson R B, Brenner S S. Effects of microchemistry and precipitate size on nodular corrosion resistance of Zircaloy-2[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1992, 189(2): 193 – 200.
- [24] 武丹花. 新锆合金第二相粒子结构特征及显微组织演变 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Wu Danhua. Structural characteristics of second phase particle and microstructure evolution of new zirconium alloys [D]. Changsha: Hunan University, 2019.

第一作者: 张超, 硕士, 助理研究员; 主要从事低活化铁素体/马氏体钢连接机理、锆合金高能束焊接技术以及固相连接技术的相关研究工作; Email: 569405731@qq.com.

(编辑: 张基隆)

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074, China; 3. CARMAN HAAS Laser Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou, 215000, China). pp 94-102

Abstract: The oscillating laser-arc welding was carried out on the 6mm thick 6061 aluminum alloy locked bottom butt joint commonly used for the roof of high-speed rail, and the effect of oscillating frequency on the microstructure and mechanical properties of the weld was systematically studied based on SEM, EBSD and other characterization methods together with the penetration and porosity of the weld as indicators. The results showed that the porosity of the joint was reduced to less than 1% when the oscillating frequency sharply increased to 250 Hz. The weld area near the fusion line was primarily arranged with columnar dendritic structures, while the central arc region of the weld was chiefly composed of equiaxed dendritic structures. Laser oscillating frequency could affect the beam advance distance in per unit cycle, which posed a significant impact on the stirring action of laser beam behind the molten pool. With the increase of the oscillating frequency, the stirring effect of the molten pool was enhanced, which effectively refined the central equiaxed structures and dropped the dendrite sizes from 68 μm to 44 μm . The tensile strength reached their maximum value at the oscillating frequency of 250 Hz, with a maximum tensile strength of 229 MPa, which was about 73% of that of the base metal. Both the reduction of the porosity and the refined dendrites structures of the weld largely created favorable conditions for the improved tensile strength.

Highlights: (1) The oscillating laser-arc welding process was used to achieve high-quality welding of 6061 aluminum alloy locked bottom butt joint, and the tensile strength of the joint reaches 73% of that of the base metal.

(2) The correlation between porosity, microstructure and mechanical properties of 6061 aluminium alloy locked bottom joint was studied.

Key words: oscillating laser-arc welding; oscillating frequency; porosity; microstructure; mechanical properties

Friction stir welding process microstructure and property of weld for Zr-Sn-Nb-Cr-Fe zirconium alloys ZHANG Chao, ZHOU Mengbing, TAO Xin, ZHENG Yunxi, WANG

Zhiguo, WEI Lianfeng, YANG Canxiang(Fourth Institute of Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China). pp 103-108

Abstract: Process performance, microstructure and corrosion properties of friction stir welded (FSW) joints of Zr-Sn-Nb-Cr-Fe zirconium alloys were studied in the present paper. The results indicate that the recommended zirconium alloys FSW joints with good shape and no welding defects were obtained by W-25%Re stir tool under the conditions of 250 rpm rotational speed, 40 mm/min welding speed, 10 kN axial force and argon protection. In stir zone (SZ), the severe plastic deformation leads to dynamic recrystallization, diffusion of alloying element and grain refinement and grain size increases with the increase of rotational speed. As the same time, a large number of irregularly shaped second phase particles were precipitated at the grain boundaries. These FSW joints prepared by different welding parameters exhibited black, bright and dense oxide film after being corroded in neutral water at 360 $^{\circ}\text{C}$, 18.6 MPa for 72 hours. However, the corrosion resistance of FSW joints decreases with the increase of rotational speed.

Highlights: (1) Technological exploration and microstructure research of 4.5 mm thick zirconium alloy are carried out by using friction stir welding technology.

(2) The autoclave corrosion test on friction stir welding joints of zirconium alloy is carried out.

Key words: zirconium alloys; friction stir welding; welding process performance; microstructure; corrosion property

Effect of long term high temperature aging on CGHAZ microstructure of T23 water wall welded joint YIN Shao-

hua^{1,2}, WANG Yuwei³, SUN Zhiqiang¹, ZHANG Zhenhua⁴(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd, Suzhou 215004, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. CHN Energy Jiangsu Electric Power Co., Ltd, Nanjing 210036, China; 4. CHN Energy Xuzhou Power Co., Ltd, Xuzhou 221166, China). pp 109-115

Abstract: The micro-mechanism of reheat crack formation in coarse grain heat affected zone (CGHAZ) of welded joint of T23 water wall tube without heat treatment after welding was analyzed by high temperature aging method. It reveals the in-