

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.008

超声空化处理对冷金属过渡焊接过程的影响

张安¹, 邢彦锋¹, 曹菊勇¹, 王影¹, 于铁军²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海和达汽车配件有限公司, 上海 201799)

摘要:为了解决6061铝合金冷金属过渡(CMT)焊接过程中,因其表面的一层致密氧化膜而在焊接时产生焊渣与气孔缺陷的问题,课题组对此进行了研究,发现超声空化处理后的6061铝合金表面氧化膜厚度明显减小,可显著改善CMT焊接熔池的流动过程,减少焊渣缺陷。同时,超声空化处理可以减少熔池中的氧化膜颗粒,促进孔隙非均质形核向均质形核转变,减缓孔隙形核速率,降低孔隙形成直径。此外,寻求最佳的脉冲电流,控制熔池的温度梯度分布,减小熔池内部的洛伦兹力和熔池表面张力梯度引起的剪应力,可以获得更好的焊缝连接。实验结果表明:超声空化处理焊缝组织性能达到最佳时,脉冲电流较大,极限抗拉强度从158.7 MPa提高到208.7 MPa,组织性能明显优于普通焊缝。

关键词:冷金属过渡焊接;超声空化处理;熔池流动;气孔形核

中图分类号: TG456 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2022)01-0043-07

Effect of Ultrasonic Cavitation Treatment on Cold Metal Transfer Welding Process

ZHANG An¹, XING Yanfeng¹, CAO Juyong¹, WANG Ying¹, YU Tiejun²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Heda Auto Parts Limited Company, Shanghai 201799, China)

Abstract: In order to solve the welding slag and pore defects during the cold metal transfer (CMT) welding process caused by the dense oxide film on the surface of ordinary 6061 aluminum alloy, the research was carried out. It was found that the 6061 aluminum alloy treated by ultrasonic cavitation had a significantly smaller surface oxide film thickness, which can significantly improve the flow process of the molten pool of CMT welding and reduce welding slag defect. At the same time, the ultrasonic cavitation treatment can reduce the oxide film particles in the molten pool, promote the conversion of pore heterogeneous nucleation to homogeneous nucleation, slow down the pore nucleation rate, and reduce the diameter of pore formation. In addition, a better weld connection can be achieved by seeking the best pulse current, controlling the temperature gradient distribution of the molten pool, reducing the Lorentz force inside the molten pool and the shear stress caused by the surface tension gradient of the molten pool. The experimental results show that the pulse current is larger when the weld structure performance of the ultrasonic cavitation treatment reaches the best, and the ultimate tensile strength is increased from 158.7 MPa to 208.7 MPa, and the structure performance is significantly better than that of ordinary weld.

Keywords: CMT(Cold Metal Transfer) welding; ultrasonic cavitation treatment; molten pool flow; pore nucleation

传统电弧焊接的高热量输入会直接影响铝合金表面氧化膜在熔池中的分解和流动过程,导致焊缝缺陷。冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)焊接技术能在一定程度上减小氧化膜对焊接过程的影响,优化焊缝性

能,但由于氧化膜颗粒活跃的扩散性,依然对焊缝性能造成了不可忽视的影响。研究发现熔池中氧化膜颗粒的溶解量会改变熔池的流动模式^[1],特定质量分数的氧化膜颗粒可以降低组织压力引起的焊缝缺陷^[2]。

收稿日期:2021-08-09;修回日期:2021-11-25

基金项目:上海市自然科学基金项目:高强度钢-铝合金 CMT 缝焊热塑性变形及偏差传递机理研究(20ZR1422600)。

第一作者简介:张安(1996),男,江西九江人,硕士,主要研究方向为焊接材料、增材制造。E-mail:1518788962@qq.com

冷金属过渡焊接的低热量输入可以在很大程度上减小氧化膜颗粒的分解速率,氧化膜颗粒在熔池冷却结晶过程中固定^[3],较少的氧化膜颗粒可以提高焊缝强度^[4]。优化 CMT 焊接的脉冲电流可以减小氧化膜颗粒在熔池中的流动;控制特定的焊接脉冲电流可以使氧化膜颗粒不能到达熔池两侧的最宽区域^[5],并且能改变熔池浸润效果^[6]。另外,热量输入不合理会导致焊接过程不连续^[7-8],热量控制精确可以获得强度与铝合金基材相当的焊缝^[9-10]。实验表明气孔主要分布于焊缝上部^[11-12],创造气孔逃逸通道可以明显减少气孔缺陷的产生^[13-16]。铝合金表面氧化膜对 CMT 焊接熔池和焊缝性能产生较大的影响,而超声空化处理去除铝合金表面氧化膜是改善焊接性能的重要途径之一。因

此,课题组基于 CMT 焊接技术对超声空化处理铝合金薄板和普通铝合金薄板分别进行焊接,探究超声空化作用对焊接过程的影响。

1 焊接实验程序

1.1 焊接材料

在尺寸为 200 mm × 200 mm × 2 mm 的普通 6061 铝合金薄板和超声空化处理 6061 铝合金薄板上分别进行冷金属过渡搭接焊,普通铝合金薄板的表面氧化膜厚度为 50 ~ 60 μm,超声处理铝合金薄板的表面氧化膜厚度为 5 ~ 10 μm。CMT 搭接焊采用 ER4043 铝硅焊丝,焊接过程进行高纯氩气保护处理。6061 铝合金和 ER4043 铝硅焊丝的标准化学成分见表 1。

表 1 6061 铝合金和 ER4043 焊丝的标准化学成分

Table 1 Standard chemical composition of 6061 aluminum alloy and ER4043 welding wire

材料名称	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6061 铝合金	基础量	0.60	0.70	0.25	0.12	1.10	0.01	0.20	0.15
ER4043 焊丝	基础量	0.60	0.80	0.30	0.05	0.05	0.01	0.10	0.02

1.2 焊接流程

首先将普通 6061 铝合金薄板利用定位夹具固定在焊接平台上,KUKA 机械臂和焊丝馈送系统共同控制焊接过程,焊枪移动速度设定为 0.48 m/min,焊丝进给速度设定为 5.20 m/min,焊枪在移动过程中进给焊丝,熔滴在焊丝直线伸缩运动和熔池表面张力梯度的作用下完成过渡,并形成焊缝;而后将超声空化处理 6061 铝合金薄板进行相同操作,如图 1 所示。焊接过程中采用高速摄像机对熔滴过渡和熔池流动进行拍摄记录。焊接完成后首先采用冷风对焊缝进行冷却处理,以减小热变形;再对焊缝样品进行切割处理,观察焊缝截面焊渣的大小和分布,以及气孔的尺寸和分布,分析焊缝缺陷形成机制;最后对焊缝样品进行拉伸试验,分析焊缝截面的拉伸性能。

2 改善熔池流动模式

2.1 改变熔池流动过程

图 2 显示了普通 6061 铝合金薄板焊接过程中熔滴瞬态过渡和熔池动态流动。由于存在较厚的氧化膜,焊接过程中氧化膜受热分解成较多的氧化膜颗粒,氧化膜颗粒从熔池底部扩散到熔池表面,晶体异质形

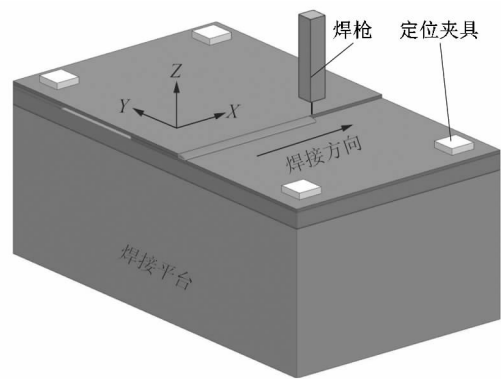


图 1 CMT 焊接装置和焊接过程

Figure 1 CMT welding device and welding process

核在熔池冷却过程中起主导作用,加速熔池的凝固。由于熔池两侧薄板的熔化区域较大,熔池边缘和薄板发生快速接触,浸润效果较差。熔滴在电弧压力和焊丝撞击的作用下,顺着熔池表面张力梯度向熔池两侧流动,氧化膜颗粒也顺着熔池向熔池两侧流动,最终汇聚在熔池液态和固态的边界处。在这种情况下,熔池的动态演变过程是侧向-回向循环流动。

图 3 显示了超声空化处理 6061 铝合金薄板焊接过程中熔滴瞬态过渡和熔池动态流动。由于存在较薄

的氧化膜,焊接过程中几乎不存在氧化膜颗粒,晶体均质形核在熔池冷却过程中起主导作用,减缓熔池的凝固。由于熔池两侧薄板的熔化区域较小,熔池边缘和薄板发生缓慢接触,浸润效果较好。熔滴在电弧压力和焊丝撞击的作用下,顺着熔池表面张力梯度向四周流动。在这种情况下,熔池的动态演变过程是周向-回向循环流动。

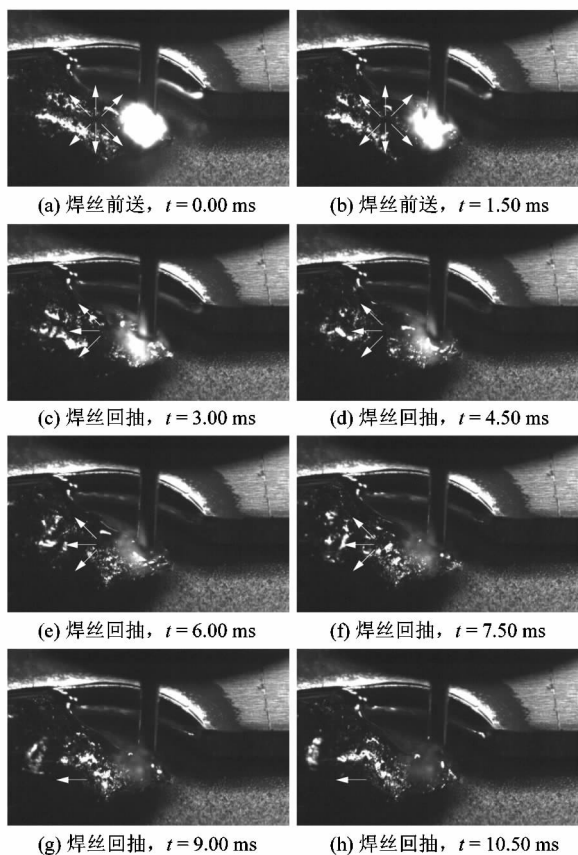


图2 普通6061铝合金薄板熔滴过渡和熔池流动

Figure 2 Droplet transfer and pool flow of ordinary 6061 aluminum alloy

2.2 改善熔池流动特点

对于不同类型的铝合金薄板,在焊接过程中,作用在熔池截面上的磁感应强度 B 相同,但作用在熔池内部的洛伦兹力和熔池表面张力梯度引起的剪切应力效果不同,熔池流动模式不同,如图4所示。普通6061铝合金薄板,焊接时会产生明显的熔池流动缺陷;超声空化处理6061铝合金薄板,焊接时不会产生明显的熔池流动缺陷。根据简化后的罗森塔尔方程^{[17]47},焊接过程中熔池动态温度分布可表示为:

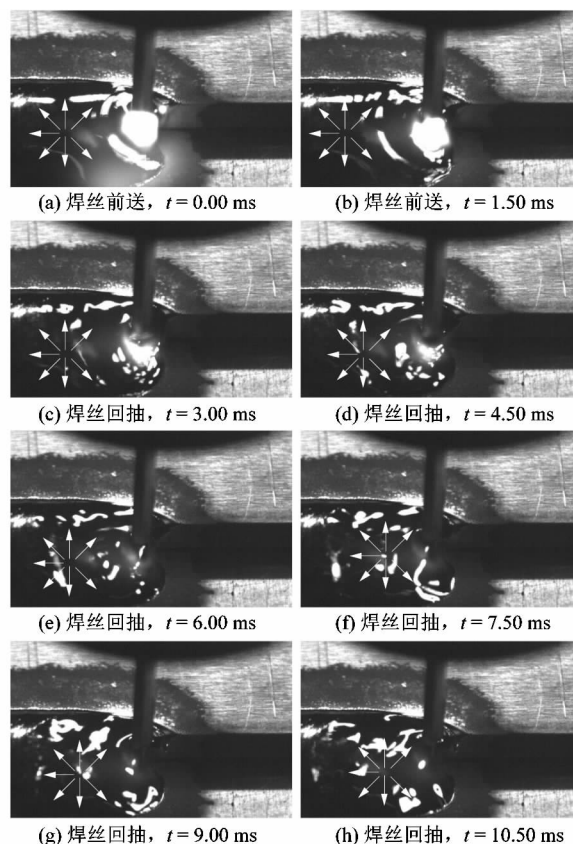


图3 超声空化处理6061铝合金薄板熔滴过渡和熔池流动

Figure 3 Droplet transfer and pool flow of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy

$$T = \eta EI \times \exp \frac{V}{2\alpha} + T_0 \quad (1)$$

式中: T 为熔池动态温度, η 为热源效率, E 为焊接电压, I 为焊接脉冲电流, V 为焊接速度, α 为薄板热扩散率, T_0 为环境温度。

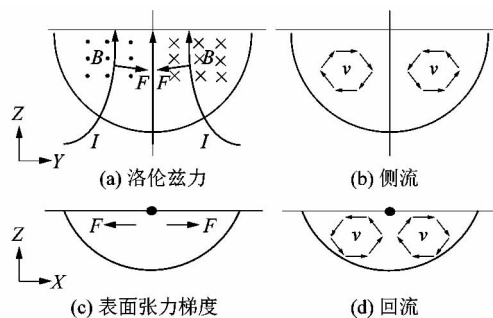


图4 熔池内部洛伦兹力和表面张力梯度引起的剪切应力

Figure 4 Internal Lorentz force and shear stress caused by surface tension gradient

在普通 6061 铝合金薄板的焊接过程中,氧化膜受热分解成颗粒并在熔池中流动。在垂直于焊枪移动速度的截面方向上,熔池内部洛伦兹力促进氧化膜颗粒向熔池两侧流动;在平行于焊枪移动速度的截面方向上,熔池表面张力梯度引起的剪切应力促进氧化膜颗粒向熔池凝固和非凝固的边界处流动,汇聚在顶部形成熔池缺陷。其中,熔池凝固区长度 D_b ,熔池非凝固区长度 D_f ,如图 5 所示。

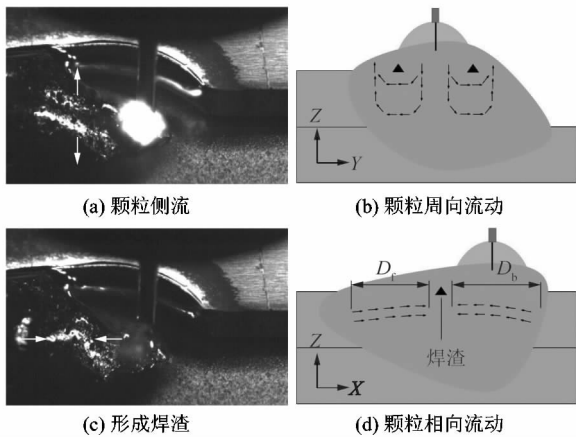


图 5 普通 6061 铝合金薄板熔池流动过程
Figure 5 Molten pool flow of ordinary 6061 aluminum alloy

在超声空化处理 6061 铝合金薄板的焊接过程中,熔池流动均匀稳定。在垂直于焊枪移动速度的截面方向上,熔池内部洛伦兹力促进液态金属循环流动,循环流动加快熔池的热量扩散,并且促进液态金属在垂直于焊枪移动速度的截面方向上成分均匀分布;在平行于焊枪移动速度的截面方向上,熔池表面张力梯度引起的剪切应力促进液态金属回流运动和向前运动。回流运动和向前运动的距离分别为 D_b 和 D_f ,回流运动和向前运动加快熔池的热量扩散,并且促进液态金属在平行于焊枪移动速度的截面方向上均匀分布,基本没有形成熔池缺陷。2 种驱动力共同辅助熔池的冷却结晶和凝固成型,如图 6 所示。

3 优化焊缝缺陷

3.1 优化焊渣缺陷

对于铝合金薄板 CMT 焊接,当焊接脉冲电流 I 较小时,铝合金薄板焊接熔化效率较低,会出现 2 种结果:①铝合金薄板焊缝在截面上的宽度较窄,焊缝不能

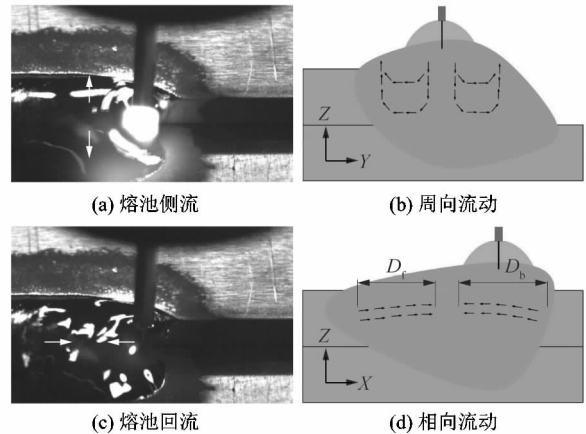


图 6 超声空化处理 6061 铝合金薄板熔池流动过程
Figure 6 Molten pool flow of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy

和上侧薄板形成有效连接;②铝合金薄板焊缝在截面上的深度较浅,焊缝不能和下侧薄板形成有效连接。简化后的焊接熔化效率经验公式^{[17]42}:

$$M = A \times \exp \frac{-(H_{base} + H_{filler})\alpha\mu}{\eta Elv} \quad (2)$$

式中: A 是焊接常数, H_{base} 是单位体积薄板熔化能量, H_{filler} 是单位体积焊丝熔化能量, μ 是动力黏度。

在普通 6061 铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为 82 A 时,洛伦兹力缓慢促进氧化膜颗粒的逆向流动,最终汇聚在焊缝顶部形成微小焊渣;表面张力梯度引起的剪切应力缓慢促进氧化膜颗粒的反向流动,最终汇聚在焊缝中部和后部形成微小焊渣缺陷。当 I 为 86 A 时,焊缝表面存在少量焊渣缺陷;当 I 为 90 A 时,焊缝表面存在较多焊渣缺陷;当 I 为 94 A 时,洛伦兹力加速氧化膜颗粒的逆向流动,导致焊渣缺陷加剧;表面张力梯度引起的剪切应力加速氧化膜颗粒的反向流动,导致焊渣缺陷加剧。焊缝的表面形态如图 7 所示。

在超声空化处理 6061 铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为 82 A 时,焊缝表面基本平整,上下薄板连接效果基本良好,表面没有焊渣;当 I 为 86 A 时,焊缝表面基本平整,上下薄板连接效果基本良好,表面没有焊渣;当 I 为 90 A 时,焊缝表面平整,上下薄板连接效果良好,表面没有焊渣;当 I 为 94 A 时,焊缝表面基本平整,上下薄板连接基本良好,表面没有焊渣。焊缝的表面形态如图 8 所示。

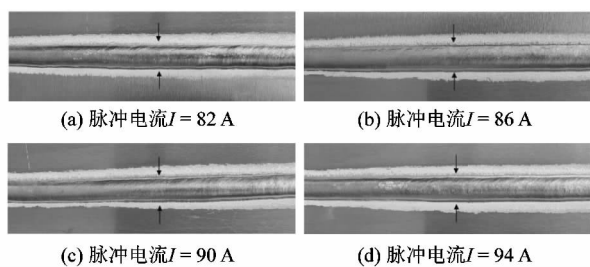


图7 普通6061铝合金薄板焊缝的表面形态

Figure 7 Weld surface of ordinary 6061 aluminum alloy

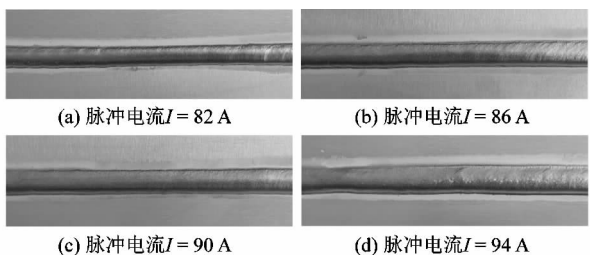


图8 超声空化处理6061铝合金薄板表面形态

Figure 8 Weld surface of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy

3.2 优化气孔缺陷

2种6061铝合金薄板在焊接时,气孔形核模式和形核过程不同:对于普通6061铝合金薄板,较多的氧化膜颗粒促进气孔异质形核,加快气孔形成速率;对于超声空化处理6061铝合金薄板,较少的氧化膜颗粒促进气孔均质形核,减缓气孔形成速率。

在普通6061铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为82 A时,焊接热输入较小,焊缝截面不存在异质形核气孔;当 I 为86 A时,焊接热输入增加,焊缝截面存在较小的异质形核气孔;当 I 为90 A时,焊缝截面存在较大的异质形核气孔,其直径为0.9 mm;当 I 为94 A时,焊缝截面存在特大的异质形核气孔,其直径为1.2 mm,如图9所示。

在超声空化处理6061铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为82 A时,焊接热输入较小,焊缝截面不存在异质形核气孔;当 I 为86 A时,焊接热输入增加,焊缝截面不存在异质形核气孔;当 I 为90 A时,较少的氧化膜颗粒使焊缝截面不存在异质形核气孔;当 I 为94 A时,较少的氧化膜颗粒使焊缝截面不存在异质形核气孔,如图10所示。

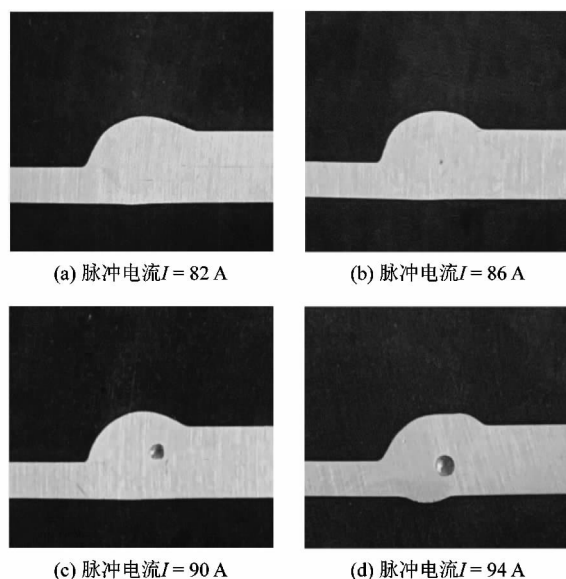


图9 普通6061铝合金薄板焊缝的截面形态

Figure 9 Cross section shape of ordinary 6061 aluminum alloy weld

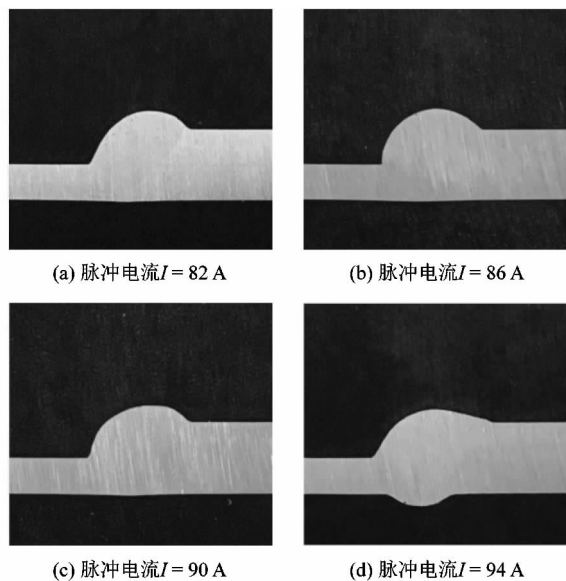


图10 超声空化处理铝合金薄板焊缝的截面形态

Figure 10 Cross section shape of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy weld

3.3 焊缝截面尺寸

在普通6061铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为82 A时,焊缝宽度为5.5 mm,焊缝高度为3.1 mm;当 I 为86 A时,焊缝宽度为5.9 mm,焊缝高度为3.0 mm;当 I 为90 A时,焊缝宽度为6.2 mm,焊缝高度为3.1 mm,焊缝出现轻微熔透现象;当 I 为94 A时,焊缝

宽度为 6.4 mm,焊缝高度为 3.1 mm,焊缝出现熔透现象。如图 11 所示。

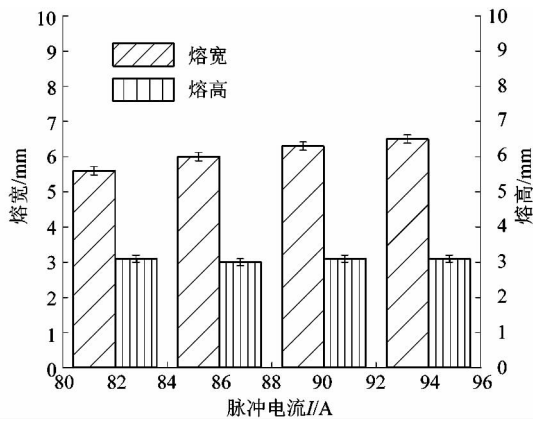


图 11 普通 6061 铝合金薄板焊缝的尺寸
Figure 11 Connection size of ordinary 6061 aluminum alloy weld

在超声空化处理 6061 铝合金薄板的焊接过程中,当 I 为 82 A 时,焊缝宽度为 5.6 mm,焊缝高度为 3.1 mm;当 I 为 86 A 时,焊缝宽度为 6.0 mm,焊缝高度为 3.0 mm;当 I 为 90 A 时,焊缝宽度为 6.3 mm,焊缝高度为 3.1 mm,焊缝出现轻微熔透现象;当 I 为 94 A 时焊缝宽度为 6.5 mm,焊缝高度为 3.1 mm,焊缝出现明显熔透现象。如图 12 所示。

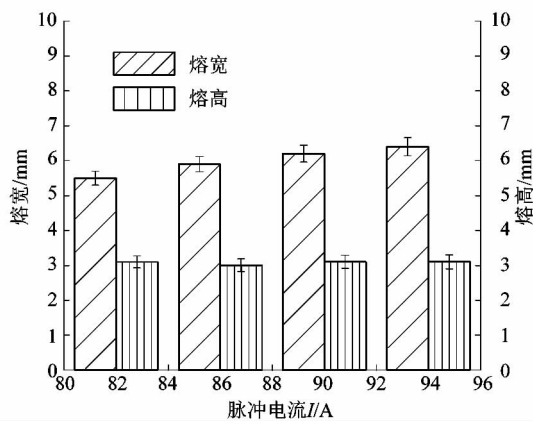


图 12 超声空化处理铝合金薄板焊缝的尺寸
Figure 12 Connection size of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy weld

3.4 焊缝拉伸性能

对于普通 6061 铝合金薄板的焊缝,当 I 为 82 A 时,焊缝抗拉强度为 146.8 MPa;当 I 为 86 A 时,焊缝抗拉强度为 158.7 MPa;当 I 为 90 A 时,焊缝抗拉强度

为 143.5 MPa;当 I 为 94 A 时,焊缝抗拉强度为 129.3 MPa。如图 13 所示,抗拉试验结果表明焊接脉冲电流在 86 A 附近时,焊缝抗拉强度较高。

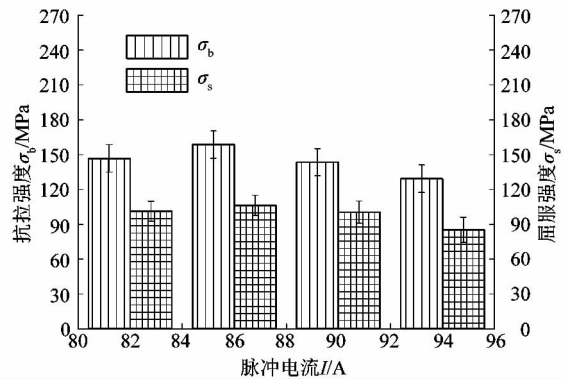


图 13 普通 6061 铝合金薄板焊缝的拉伸性能
Figure 13 Tensile test of ordinary 6061 aluminum alloy weld

对于超声空化处理 6061 铝合金薄板的焊缝,当 I 为 82 A 时,焊缝抗拉强度为 171.5 MPa;当 I 为 86 A 时,焊缝抗拉强度为 187.3 MPa;当 I 为 90 A 时,焊缝抗拉强度为 208.7 MPa;当 I 为 94 A 时,焊缝抗拉强度为 190.8 MPa。如图 14 所示,拉伸试验结果表明焊接脉冲电流在 90 A 附近时,焊缝抗拉强度较高。

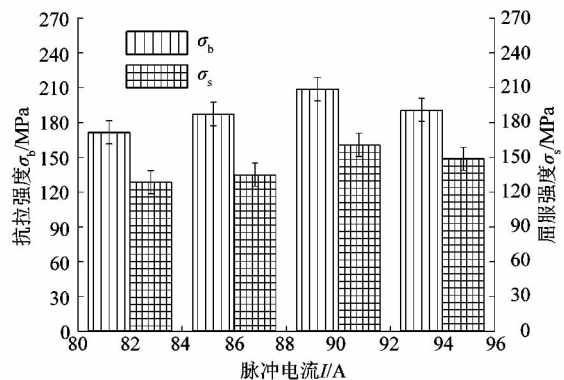


图 14 超声空化处理 6061 铝合金薄板焊缝的拉伸性能
Figure 14 Tensile test of ultrasonic cavitation treatment 6061 aluminum alloy weld

4 结论

课题组基于 CMT 焊接技术分别对超声空化处理铝合金薄板和普通铝合金薄板进行了焊接,在相同的实验条件下,探究了超声空化作用对焊接过程的影响,

其结论如下:

1) 普通铝合金薄板 CMT 焊接过程中的熔池动态演变过程是侧向 - 回向循环流动, 超声空化处理铝合金薄板 CMT 焊接过程中的熔池动态演变过程是周向 - 回向循环流动。

2) 超声空化处理铝合金薄板 CMT 焊接可以明显优化焊渣缺陷, 并减少焊缝中的氧化膜颗粒, 促进气孔异质形核转为均质形核, 减缓气孔形成速率, 减小气孔生成直径。

3) 超声空化处理铝合金薄板焊缝组织性能达到最佳时的脉冲电流较大, 且其极限抗拉强度由 158.7 MPa 提升到 208.7 MPa, 组织性能明显好于普通铝合金薄板焊缝。

参考文献:

- [1] AHSAN M R U, CHEEPU M, ASHIRI R, et al. Mechanisms of weld pool flow and slag formation location in cold metal transfer (CMT) gas metal arc welding (GMAW) [J]. *Welding in the World*, 2017, 61: 1275 - 1285.
- [2] ZONG R, CHEN J, WU C S, et al. Influence of molten metal flow on undercutting formation in GMAW [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(3): 198 - 207.
- [3] TIAN Y B, SHEN J Q, HU S S, et al. Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259: 282 - 291.
- [4] ZHANG X Y, ZHOU Q, WANG K H, et al. Williams S study on microstructure and tensile properties of high nitrogen Cr-Mn steel processed by CMT wire and arc additive manufacturing [J]. *Materials and Design*, 2019, 166: 107611.
- [5] MENG X M, QIN G L, ZOU Z D. Sensitivity of driving forces on molten pool behavior and defect formation in high-speed gas tungsten arc welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 1119 - 1128.
- [6] WANG P, HU S S, SHEN J Q, et al. Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245: 122 - 133.
- [7] 张栋, 陈茂爱, 武传松. 高速 CMT 焊送丝速度和焊接电流波形参数的优化 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(1): 119 - 122.
- [8] OROPEZA D, HOFMANN D C, WILLIAMS K, et al. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 834: 154987.
- [9] 秦国梁, 武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24): 24 - 35.
- [10] ZHOU S Y, WU K, YANG G, et al. Grain-refining of wire arc additive manufactured aluminum alloy with Nb powder addition [J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(2): 026520.
- [11] 李超豪, 华学明, 张跃龙, 等. 镀锌板 CMT 焊焊缝气孔影响因素及产生机理 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(1): 94 - 98.
- [12] LIZARAZU J, GOBEL L, LINNE S, et al. Experimental characterization and numerical analysis of additively manufactured mild steel under monotonic loading conditions [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2020, 5: 295 - 304.
- [13] 吴圣川, 谢成, 胡雅楠, 等. 中高强度铝合金熔化焊接接头的缺陷容忍评价方法 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(8): 46 - 59.
- [14] 胡丹, 高向东, 张南峰, 等. 焊缝缺陷检测现状与展望综述 [J]. *机电工程*, 2020, 37(7): 736 - 737.
- [15] COLDITZ P, GRAF M, HALSIG A, et al. Experimental investigation on the forming of additively manufactured components with regard to forming behavior and component properties [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 1164 - 1169.
- [16] TIAN Y B, SHEN J Q, HU S S, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V and AlSi5 dissimilar alloys using cold metal transfer welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 46: 337 - 344.
- [17] KOU S. 焊接冶金学 [M]. 闫久春, 杨建国, 张广军, 译. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 1 - 4894.