



周期超声振动对 316L 不锈钢 TIG 焊缝成形及性能的影响

胡明珠¹, 陈琪昊^{2,3}, 杨志东¹, 王云海¹, 林三宝², 浦娟⁴

(1. 江苏科技大学, 材料科学与工程学院, 镇江, 212100; 2. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001; 3. 哈工大郑州研究院, 郑州, 450000; 4. 上海第二工业大学, 上海, 201209)

摘要: 为了弥补传统 TIG 焊接热输入大、组织和性能有待提升的问题, 采用超声振动直接作用于母材的方法将周期超声引入熔池, 研究了超声输入距离、超声施加时间及超声振幅对 316L 不锈钢 TIG 焊缝成形、组织、力学性能及耐腐蚀性能的影响规律, 探讨了周期超声振动对焊接效率提升的贡献。结果表明, 超声输入距离对焊缝成形影响较大, 当超声输入距离固定时, 超声能量过大, 出现焊穿现象; 当超声输入距离逐渐增大时, 焊缝熔宽减小且组织细化效果减弱; 随超声施加时间的增大, 焊缝深宽比呈增大趋势, 当超声施加时间为 0.5 s 时, 深宽比最大, 比原始焊缝提高 68.73%。合适的超声振幅可以同步提高焊接接头的强度和塑性, 当超声振幅为 20.5 μm 时, 晶粒细化效果较明显, 与无超声时相比, 抗拉强度提高 9.65%, 断后伸长率和断面收缩率分别提高 35.38% 及 11.22%, 硬度及耐腐蚀性能明显改善。施加周期超声振动且焊接速度提升 60 mm/min 后, 焊接接头力学性能仍有提升, 表明施加周期超声振动有利于提高焊接效率。

创新点: (1) 揭示了超声输入距离对焊缝成形及力学性能的影响。

(2) 分析了母材定点超声对提高 316L 不锈钢接头性能和焊接效率的作用。

(3) 探究了超声参数与接头组织、力学性能和腐蚀性能之间的相关性。

关键词: 316L 不锈钢; 超声; TIG 焊; 力学性能

中图分类号: TG 444.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240713001

Effect of periodic ultrasonic vibration on forming and properties of 316L stainless steel's TIG weld

HU Mingzhu¹, CHEN Qihao^{2,3}, YANG Zhidong¹, WANG Yunhai¹, LIN Sanbao², PU Juan⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212100, China;

2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 3. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou, 450000, China; 4. Shanghai

Polytechnic University, Shanghai, 201209, China)

Abstract: To deal with large heat input and improve the structure and performance of traditional TIG welding, ultrasonic vibration was adopted and directly acted on the base material to introduce periodic ultrasonic vibration into the molten pool, and the influence of ultrasonic input distance, ultrasonic application time, and ultrasonic vibration amplitude on the forming, structure, mechanical properties, and corrosion resistance of 316L stainless steel's TIG weld was investigated; the contribution of periodic ultrasonic vibration to the improvement of welding efficiency was explored. The results show that the ultrasonic input distance has a greater impact on weld forming. When the ultrasonic input distance is fixed, the ultrasonic energy is too large, and there is a weld penetration phenomenon. When the ultrasonic input distance is gradually increased, the melt width of the weld decreases, and the effect of structure refinement is weakened. The depth-to-width ratio of the weld increases with the increase in the ultrasonic

application time, and the ratio is maximized when the ultrasonic application time is 0.5 s, which is 68.73% higher than that of the original weld. The appropriate ultrasonic vibration amplitude can simultaneously improve the strength and plasticity of the welded joint. When the ultrasonic vibration amplitude is 20.5 μm , the grain refinement effect is obvious. Compared with no ultrasonic vibration, the tensile strength is increased by 9.65%; the elongation after fracture and sectional shrinkage are increased by 35.38% and 11.22%, respectively, and the hardness and corrosion resistance are significantly improved. After applying periodic ultrasonic vibration and increasing the welding speed by 60 mm/min, the mechanical properties of the welded joints are still improved, indicating that the application of periodic ultrasonic vibration is beneficial to the improvement of welding efficiency.

Highlights: (1) The effects of ultrasonic input distance on weld forming and mechanical properties were revealed.

(2) The effect of base metal fixed-point ultrasonic vibration on improving the performance and welding efficiency of 316L stainless steel joints was analyzed.

(3) The correlations between ultrasonic parameters and the joint's microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance were investigated

Key words: 316L stainless steel; ultrasonic vibration; TIG welding; mechanical property

0 序言

316L 不锈钢具有良好的力学性能及耐腐蚀性能, 在航空航天、海洋工程、油气运输等领域具有重要的应用价值^[1-2]. 钨极惰性气体保护焊 (TIG) 具有生产成本低、电弧稳定、工艺适应性强等优势, 被广泛应用于 316L 不锈钢的焊接^[3-4]. 但 TIG 焊接仍存在熔深浅、晶粒粗大和焊接效率低等问题, 影响了 TIG 焊接方法的进一步应用^[5-6].

关于 316L 不锈钢高效电弧焊接的方法主要有微束等离子弧焊 (MPAW)、活性剂钨极惰性气体保护焊 (A-TIG)、匙孔钨极惰性气体保护焊 (K-TIG)、深熔钨极惰性气体保护焊 (DP-TIG)、窄间隙 TIG 焊及复合 TIG 焊等. HALDAR 等人^[7]研究了 MPAW 对 AISI 316L 不锈钢薄板接头成形的影响; AHMADI 等人^[8]采用 A-TIG 研究了四种氧化物助熔剂对 316L 不锈钢性能的影响; 冯悦娇等人^[9]使用 K-TIG 成功实现了厚度为 10 mm 的 316L 不锈钢板的单面焊双面成形, 证明了 K-TIG 的有效性; 王耀伟^[10]利用 DP-TIG 焊接方法成功应用于 4 mm 厚 316L 不锈钢薄板的搭接; 毛楠^[11]采用窄间隙 TIG 焊接 316L 不锈钢管道, 并对试样组织和力学性能进行表征. 已有研究表明, 微束等离子弧焊主要适用于超薄板, A-TIG 增大了焊接的熔深, 但焊接速度没有明显提升, 活性剂的涂敷影响了焊接效率的提高; DP-TIG 焊能提高焊缝熔深和焊接速度, 主要应用于中厚板, 在低碳钢焊接时存在重复性差且焊缝组织粗大等问题; 窄间隙 TIG 焊接需要双重气体保护装置, 设备比较复杂且成本高^[12].

复合焊中超声辅助脉冲 TIG 焊引起了学者的广泛关注. 一方面, 不锈钢的焊接中多采用脉冲 TIG, 脉冲 TIG 可以更好的控制热输入, 焊后热影响区范围和变形程度较小^[13]; 另一方面, 超声辅助 TIG 焊接可以增大熔深^[14-15]、细化晶粒^[3]、改善力学性能^[16]. 超声能量可以作用于焊接系统的不同部位, 包括超声作用于母材^[17]、超声作用于焊丝^[18-19]及超声作用于电弧^[20-21], 超声作用于不同部位时, 超声对焊接过程的影响机制也不同. 采用超声作用于母材的方式, 超声能量利用率高, 超声能量对熔池凝固的影响较为显著. 基于以上分析, 研究针对薄板 316L 不锈钢的 TIG 焊接, 为进一步提高焊接效率及焊接性能, 探索采用超声作用于母材的方式向熔池内施加周期性的超声振动, 研究焊接速度、超声参数与焊缝组织、力学性能和耐腐蚀性能之间的相关性.

以厚度为 2 mm 的 316L 不锈钢薄板对接焊为研究对象, 采用超声振动耦合脉冲 TIG 的焊接方法, 探究了超声输入距离、超声施加时间、超声振幅及焊接速度对焊缝成形、组织及性能的影响, 揭示焊接速度、超声参数与焊缝组织与性能之间的相关性, 为超声振动辅助 TIG 焊接技术在 316L 不锈钢薄板及薄壁管焊接领域的应用提供理论指导.

1 试验方法

1.1 材料与焊接方法

试验所用的母材尺寸为 500 mm \times 100 mm \times 2 mm, 316L 不锈钢的化学成分见表 1.

表 1 316L 不锈钢的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Fe
≤0.03	16-18	12-15	2-3	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	余量

试验采用的焊接系统示意图如图 1 所示, 主要包括脉冲 TIG 焊接装置 (焊机、冷却水箱、焊枪、工作台、氩气) 和超声辅助装置 (超声波电源、工具头、IO 控制器、电磁继电器、空气压缩机、气压调节阀及电磁阀), 通过此系统可以对超声工具头的移动方式、超声施加时间、超声非施加时间、超声振幅、焊接速度等进行控制。工具头可实现两种移动方式: 一种为工具头和电弧之间距离保持恒定 (间距为 110 mm), 被焊母材移动; 另一种为被焊母材和工具头固定, 电弧移动。通过 IO 控制器控制超声波电源的开通和关断时间, 从而调节超声施加时间和超声非施加时间, 控制精度为 0.01 s。超声频率固定为 28 kHz, 超声振幅的输出范围为 16.5 ~ 26.3 μm 。研究所用的工具头的形状为 U 形, 在焊接试验过程中, 工具头以一定压力作用于被焊工件的表面, 焊缝位于 U 形槽内部^[22]。

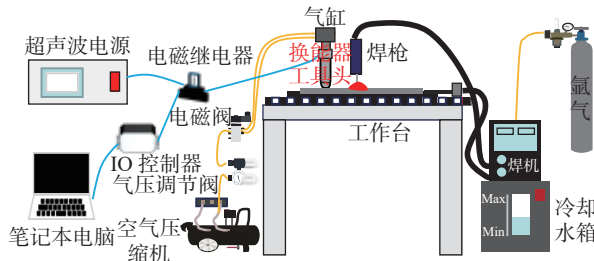


图 1 焊接系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding system

试验采用对接焊, 不开坡口, 不填充焊丝, 探究焊缝表面成形、焊缝组织及性能的变化规律。试验中, 脉冲 TIG 焊参数保持不变, 平均焊接电流为 220 A, 脉冲比为 70%, 脉冲频率为 300 Hz, 钨极伸出长度为 5 mm, 钨极尖端距母材表面距离为 1.5 mm, 焊接电流为 220 A。压缩气缸的压强为 0.1 MPa, 保护气体为纯度为 99.99% 的普通氩气, 保护气体流量为 15 L/min。为了防止焊接过程中发生严重的变形影响焊接过程, 在进行焊接之前, 对两块板材进行点焊。

超声输入距离对焊缝成形、组织及性能影响的相关试验, 采用两种不同的超声工具头移动方式。具体试验参数为超声振幅 22.8 μm , 超声施加时间 0.2 s, 超声非施加时间 0.1 s, 不断循环直至焊接结

束。研究了超声输入位置与熔池之间距离对焊缝表面成形的影响, 并研究了超声输入距离变化对焊缝成形、组织和性能的影响。

超声施加时间对焊缝成形影响的相关试验, 固定超声振幅 (22.8 μm)、焊接速度 (0.7 m/min) 及超声非施加时间 (0.1 s), 改变超声施加时间 (0.1 s, 0.2 s, 0.3 s, 0.5 s 和 0.7 s), 研究了超声施加时间对焊缝表面成形、焊缝熔宽、熔深及深宽比的影响。

超声振幅对焊缝成形、组织及性能影响的相关试验, 固定焊接速度 (0.6 m/min)、超声施加时间 (0.5 s)、非施加时间 (0.1 s), 改变超声振幅 (16.5 μm , 20.5 μm , 22.8 μm , 24.9 μm 和 26.3 μm)。

超声辅助对焊接效率影响的相关分析, 具体试验参数为焊接速度分别为 0.6 m/min, 0.7 m/min 和 0.8 m/min, 超声振幅分别为 0 μm 和 22.8 μm , 固定超声施加时间和超声非施加时间均为 0.1 s, 研究了超声辅助对焊接效率的影响; 并对比了焊接速度为 0.6 m/min 和 0.66 m/min 超声振幅为 0 μm 及焊接速度为 0.66 m/min 超声振幅为 20.5 μm , 超声施加时间 (0.5 s)、非施加时间 (0.1 s) 时的焊缝成形及力学性能的影响规律。

1.2 分析测试方法

对接焊后, 对焊缝表面形貌、截面形貌、微观组织、接头拉伸性能、硬度及焊缝耐腐蚀性能进行分析。采用普通相机对焊缝表面成形情况进行拍照。针对焊缝截面形貌及微观组织的分析, 首先利用线切割切取 12 mm × 6 mm 的 3 个横截面作为试样, 进行打磨抛光, 采用氯化铁溶液进行腐蚀, 腐蚀时间为 55 s, 采用智能 3D 视频显微镜 (Smart zoom 5) 拍摄试样的宏观形貌, 分析焊缝熔深及熔宽的变化规律。采用倒置显微镜 (ZEISS 倒置显微镜) 对焊缝微观组织进行分析, 采用电子万能试验机 (CMT5205) 对接头进行拉伸力学性能测试, 拉伸速率为 1 mm/min, 记录拉伸试样的最大拉力, 计算出断后伸长率、断面收缩率及抗拉强度。采用德国 KB 30S 维氏全自动显微硬度计对焊缝横截面硬度进行测量, 测量时加载载荷为 1 kg(HV1), 打点间距为 0.3 mm。

采用电化学工作站 (CHI600E) 对焊缝纵截面试样进行电化学性能测试. 分别以待测焊缝、饱和甘汞电极和铂电极作为工作电极、参比电极和辅助电极, 以 3.5 % NaCl (质量分数) 溶液作为电解液溶液, 在 25 °C 的恒温水浴锅中进行测试. 首先进行 4 500 s 的开路电位测试, 开路电位稳定后进行阻抗谱测量, 阻抗谱测量时采用实测稳定开路电压为初始电位; 采用 0.01 Hz 的低频扫描步长, 测试 3 次取最优结果; 最后对极化曲线进行测量, 设置初始电位为 1 V, 终止电位设为 -1 V, 扫描速率为 0.005 V/s.

2 结果与讨论

2.1 超声输入距离对焊缝成形及组织和性能的影响

固定工具头与 TIG 焊枪, 移动母材, 焊接方法示意图如图 2 所示, 焊接试验中, 控制行走平台使母材移动, U 形工具头作用于焊缝两侧的固体母材, 工具头在母材的上表面滑动, 工具头与钨极尖端之间的距离固定为 110 mm. 由于焊接过程中超

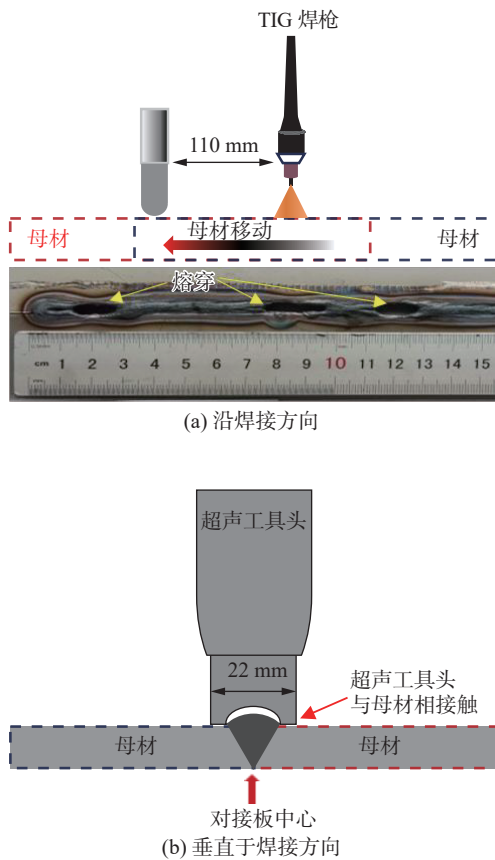


图 2 焊接方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of welding method. (a) along the welding direction; (b) perpendicular to the welding direction

声输入位置与熔池之间的距离始终保持一致, 超声振动从超声输入位置传播到熔池内, 熔池内的超声能量不会发生明显的衰减, 较大的超声能量导致焊缝出现焊穿等缺陷, 如图 3 所示.

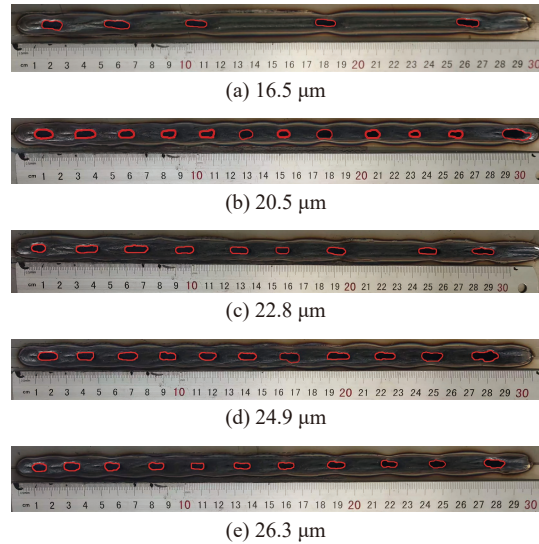


图 3 不同超声振幅下的焊缝正面形貌

Fig. 3 The appearance of weld front at different ultrasonic amplitudes with fixed ultrasonic input distance. (a) 16.5 μm ; (b) 20.5 μm ; (c) 22.8 μm ; (d) 24.9 μm ; (e) 26.3 μm

对图 3 中的焊穿孔洞数量及面积进行统计, 结果如图 4 所示, 当超声振幅为 16.5 μm , 20.5 μm 和 22.8 μm 时, 焊穿孔洞总面积较小; 当超声振幅为 16.5 μm 时, 焊穿孔洞总面积最小, 且焊穿的孔隙数最少, 焊穿的敏感性最低. 可以看出适当降低超声振幅, 对改善焊穿现象有一定的效果. 总的来说, 在设备允许可调的超声振幅范围内 (16.5 ~ 26.3 μm), 均出现焊穿现象.

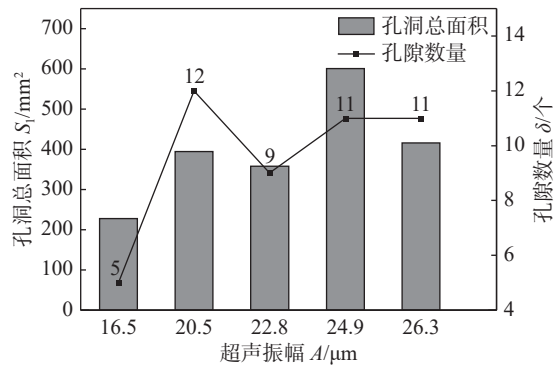


图 4 不同超声振幅下的焊穿孔洞数量和面积

Fig. 4 Number and area of welded holes under different ultrasonic vibrations

当固定工具头与母材的位置, 移动 TIG 焊枪时, 超声工具头与钨极尖端之间的距离不固定, 焊接示意图及对应的焊缝表面成形如图 5 所示. 焊接

过程中, 随着 TIG 焊枪的移动, 超声输入位置与熔池之间的距离逐渐增大, 熔池内的超声能量逐渐下降, 从而有效避免了图 3 所示的因超声能量过大导致焊穿的问题. 从图 5 中可以看出, 熔池内的超声能量适中, 焊缝正面形貌较好, 没有出现焊穿现象.

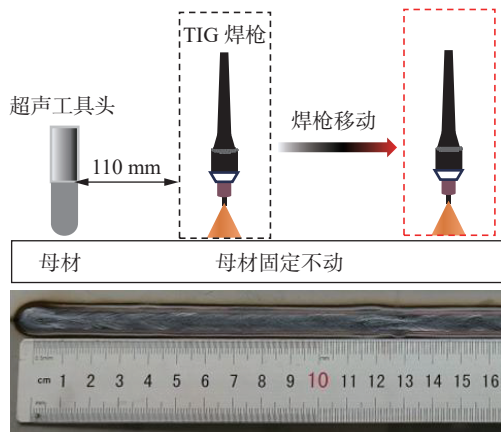


图 5 焊接方法示意图及焊缝正面形貌

Fig. 5 Schematic diagram of welding method and appearance of weld front

鉴于超声输入距离固定时, 较大的超声能量导致焊缝出现焊穿缺陷, 后续相关研究都采用固定工具头和母材, 移动 TIG 焊枪的焊接方式. 研究了此焊接方式下沿焊缝长度方向不同位置处的焊缝宽度、焊缝面积、微观组织和力学性能的变化. 沿焊缝长度方向不同位置取样示意图如图 6 所示, 1 号试样位于焊缝前部, 2 号试样位于焊缝中部, 3 号试样位于焊缝后部.

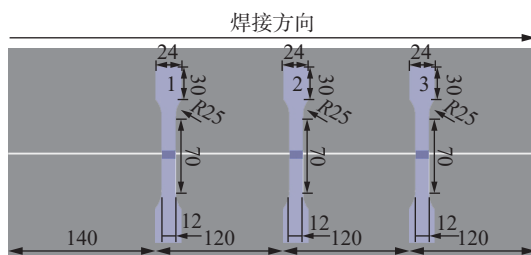


图 6 沿焊缝长度方向取样位置示意图 (mm)

Fig. 6 Schematic diagram of sampling locations along the weld length

图 7 为沿焊缝长度方向不同位置的熔宽和焊缝面积的变化情况. 可以看出, 随着超声输入位置与熔池之间的距离逐渐增大 (从前部到后部), 焊缝熔宽逐渐减小, 焊缝面积先减小后增大, 超声输入位置与熔池之间距离较近 (前部) 时, 焊缝面积和熔宽均最大. 焊缝面积和熔宽的变化规律不一致的情况主要出现在焊缝中部, 焊缝中部面积大小应该在前部和后部之间, 但实际测试结果中, 超声输入位

置与熔池之间距离较远 (中部) 时, 焊缝面积最小. 分析认为试验测得的熔宽是焊缝的上熔宽, 如图 7 所示焊缝上熔宽呈现逐渐减小的趋势. 但焊缝面积的大小还取决于焊缝下熔宽及焊缝熔体, 分析认为焊缝中部存在下熔宽较小的情况或焊缝熔体有振飞的情况, 导致焊缝面积减小.

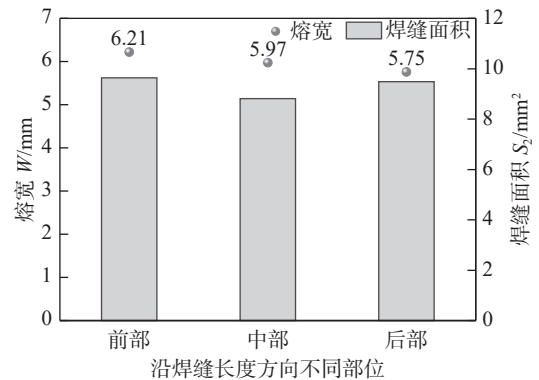


图 7 不同位置的熔宽及焊缝面积变化

Fig. 7 Weld width and weld area change at different positions along the weld length direction

沿焊缝长度方向不同位置的焊缝金相组织变化如图 8 所示, 常规 TIG 焊过程中, 不同位置的焊缝组织均为粗大的柱状晶, 施加周期超声振动后, 在距离超声声源较近的前部, 焊缝晶粒细化效果最明显, 粗大的柱状晶几乎完全转变为细小的等轴晶; 在距离超声声源较远的中部和后部, 部分晶粒变为细小等轴晶, 部分晶粒较为粗大甚至仍为柱状晶.

沿焊缝长度方向不同位置处焊接接头的抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率的变化趋势如图 9 所示, 可以看出, 有超声时, 抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率均比原始无超声时高, 但随着超声输入位置与熔池之间的距离逐渐增大, 抗拉强度沿焊缝长度方向有所减小. 结合图 8 的金相组织对此现象进行分析, 随着距离增加, 超声波的能量衰减, 柱状晶细化为等轴晶不完全, 部分晶粒仍为柱状晶, 导致抗拉强度有所降低.

2.2 超声施加时间对焊缝成形的影响

超声非施加时间固定为 0.1 s, 不同超声施加时间下接头的背面形貌如图 10 所示. 从图中可以看出, 在无超声及超声施加时间较短时 (0 s, 0.1 s 和 0.2 s), 都没有出现焊透现象, 这是由于超声施加时间过短, 熔池内的超声能量积累时间较短, 导致熔池内超声能量较小, 较小的超声能量难以起到增加焊缝熔宽和熔深的作用. 随着超声施加时间的延

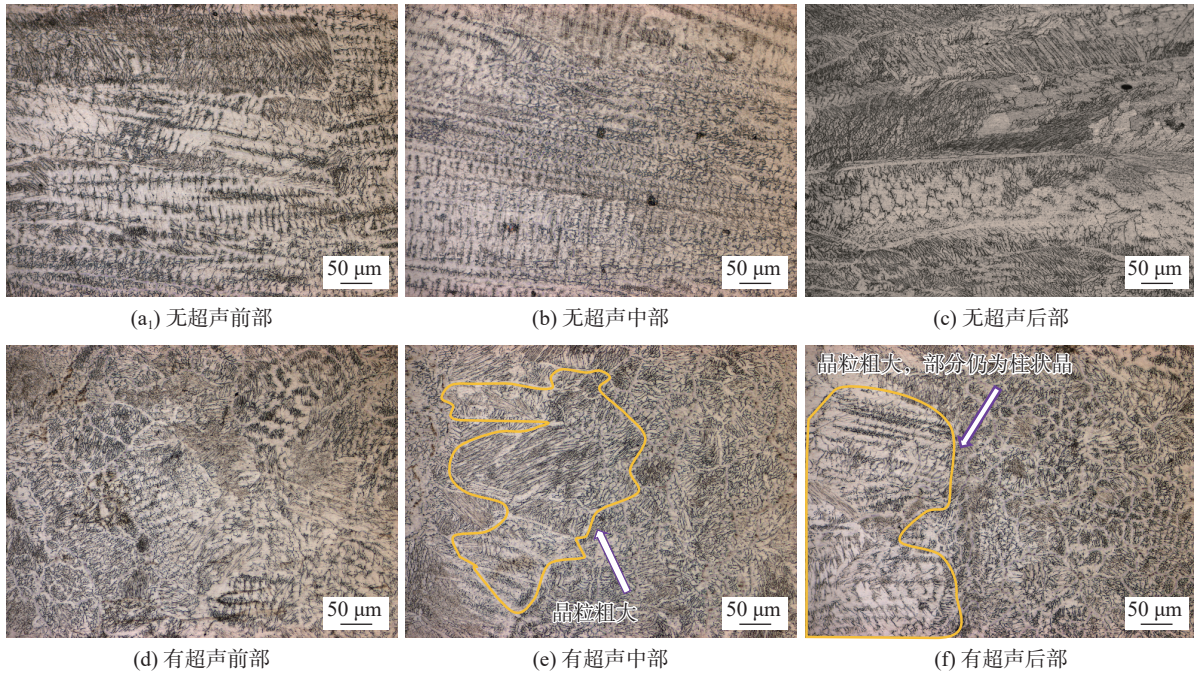


图8 有无超声时沿焊缝长度方向不同位置的金相变化

Fig. 8 Metallographic changes at different positions along the weld length direction. (a) front weld, without ultrasonic; (b) middle weld, without ultrasonic; (c) rear weld, without ultrasound; (d) front weld, with ultrasonic (e) middle weld, with ultrasonic; (f) rear weld, with ultrasound

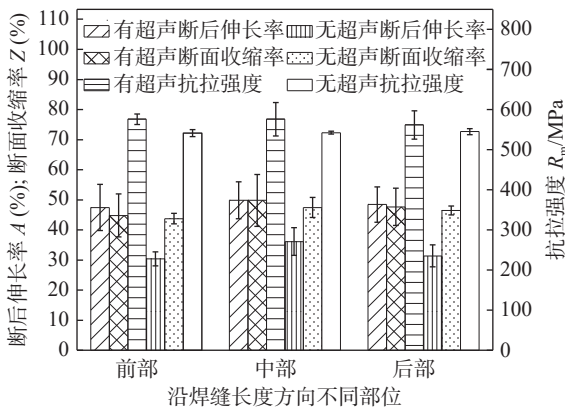


图9 沿焊缝长度方向不同位置的拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties at different positions along the length of the weld

长 (0.3 s, 0.5 s 和 0.7 s), 焊缝熔深得到明显改善, 开始出现熔透现象, 超声施加时间为 0.3 s 和 0.7 s 时, 出现间断熔透现象, 超声施加时间为 0.5 s 时, 焊缝出现连续熔透现象, 效果最好. 此结果表明引入合适的周期超声振动有利于熔池表面区域的流动, 从而更好地改善焊缝熔深.

对不同超声施加时间焊缝横截面宏观形貌进行拍摄, 并测量熔宽及熔深. 对熔宽 W 、熔深 D 及深宽比 D/W 的变化趋势进行统计分析, 结果如图 11 所示, 其中熔宽 W 呈现出先减小后增大的趋势, 熔深 D 及深宽比 D/W 呈现出先增大后减小的趋势. 当超声施加时间为 0.5 s 时, 熔宽最小, 熔深最大,

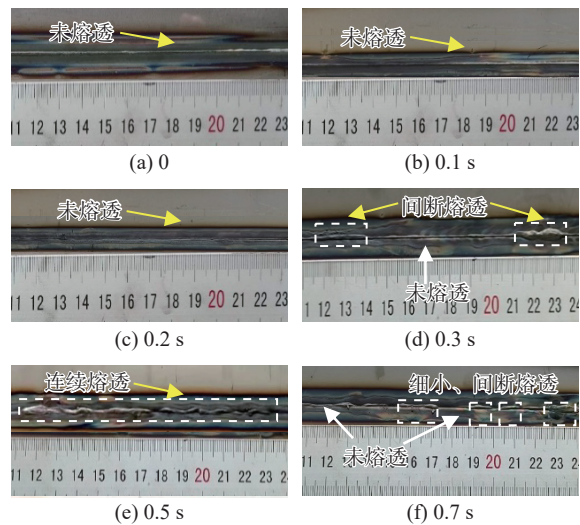


图10 不同超声施加时间接头背面形貌

Fig. 10 Morphology of the backside of the joint under different ultrasonic application time. (a) 0; (b) 0.1 s; (c) 0.2 s; (d) 0.3 s; (e) 0.5 s; (f) 0.7 s

深宽比最大, 与原始无超声相比, 熔宽减小幅度为 15.53%, 熔深增加幅度为 42.49%, 焊缝深宽比提升幅度为 68.73%. 结果表明, 施加超声会使熔宽减小, 熔深增大, 超声施加时间对熔深的影响大于对熔宽的影响.

2.3 超声振幅对焊缝成形及性能的影响

2.3.1 超声振幅对焊缝成形的影响

超声振幅对焊缝成形的影响, 试验参数见

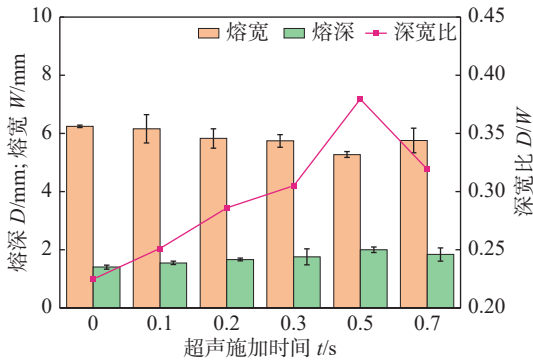


图 11 不同超声施加时间熔宽、熔深及深宽比

Fig. 11 Fusion width, fusion depth and depth to width ratio with different ultrasonic application time

1.1 部分, 对不同超声振幅下接头熔宽及焊缝面积进行测量, 测量结果如图 12 所示. 原始无超声时, 焊缝熔宽最宽. 加入超声后, 熔宽整体呈下降趋势. 当超声振幅为 16.5 μm, 20.5 μm 和 24.9 μm 时, 焊缝面积都比原始焊缝面积大, 超声通过促进熔池流动, 增大了焊缝面积.

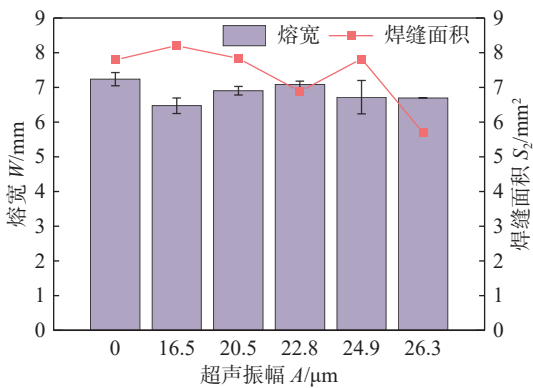


图 12 不同超声振幅下的焊缝熔宽和面积

Fig. 12 Fusion width and area of weld under different ultrasonic amplitudes

2.3.2 超声振幅对 316L 不锈钢焊缝组织及力学性能的影响

对不同超声振幅下 316L 不锈钢抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率进行测试, 其结果如图 13 所示, 从图中可以看出, 随超声振幅的增大, 抗拉强度、断后伸长率及断面收缩率的变化趋势相同, 均随超声振幅的增大呈现出先增大后减小再增大的趋势. 当超声振幅为 20.5 μm 时, 抗拉强度、断面收缩率及断后伸长率均最大. 焊缝晶粒细化程度与超声振幅之间呈非线性关系, 当超声振幅为 16.5 μm 和 24.9 μm 时, 晶粒尺寸较大, 当超声振幅为 20.5 μm 时, 晶粒细化效果最明显, 晶粒尺寸最小, 晶粒尺寸的减小能够阻碍位错运动, 并增加材料塑性变形的难度, 从而提高强度. 单位体积内晶粒数较多时, 变

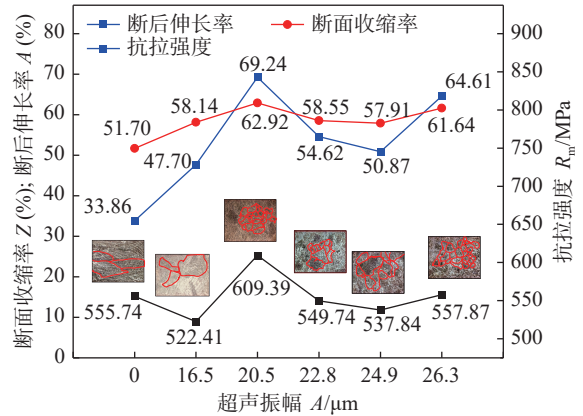


图 13 不同超声振幅下 316 L 不锈钢焊接接头拉伸性能

Fig. 13 Tensile properties of welded joints of 316 L stainless steel under different ultrasonic amplitudes

形较均匀, 因局部应力集中而引起材料开裂的几率较小, 材料在断裂前则能承受较大的塑性变形, 塑性提高.

针对超声振幅为 20.5 μm 情况, 系统分析了超声对焊缝内部组织的影响. 焊缝内部金相组织如图 14 所示, 无超声时, 常规 TIG 焊缝内部晶粒生长方向几乎平行于焊缝表面, 呈现明显的柱状晶形貌. 在超声振动作用下, 常规 TIG 焊缝中心粗大的柱状晶被细化, 凝固后的显微组织呈现出细小的等轴晶.

图 15 为有无超声时接头显微硬度分布曲线, 引入超声振动后, 焊缝区硬度明显提升. 原始无超声时, 焊缝区平均硬度为 164 HV, 施加超声振动后, 焊缝区平均硬度为 176 HV, 较原始无超声时的焊缝区硬度增加 7.3%, 说明超声振动辅助焊接可以提高焊缝的硬度, 分析认为, 硬度的改善是因为引入超声振动后焊缝区晶粒细化的结果. 根据 Hal-Petch 公式 ($\delta_s = \delta_0 + Kd^{-1/2}$, 其中 d 为晶粒尺寸, δ_0 和 K 为常数), 硬度与晶粒尺寸减小成反比, 焊缝区晶粒尺寸减小导致焊缝区硬度增大.

2.3.3 超声振幅对 316L 不锈钢焊缝腐蚀性能的影响

316L 不锈钢薄板工作环境中普遍存在氯离子, 会对金属表面的钝化膜造成破坏. 试验对焊接接头进行电化学测试, 分析焊接接头的耐腐蚀性能. 图 16 为不同超声振幅下焊缝纵截面的阻抗图, 从图中可以看到, 不同超声振幅下的 Nyquist 图均呈现单一的容抗弧, 说明表面形成了一定厚度的钝化膜. 容抗弧的半径越大, 电子在界面的转移越难, 耐腐蚀性能越好. 从图中可以看出, 原始无超声时,

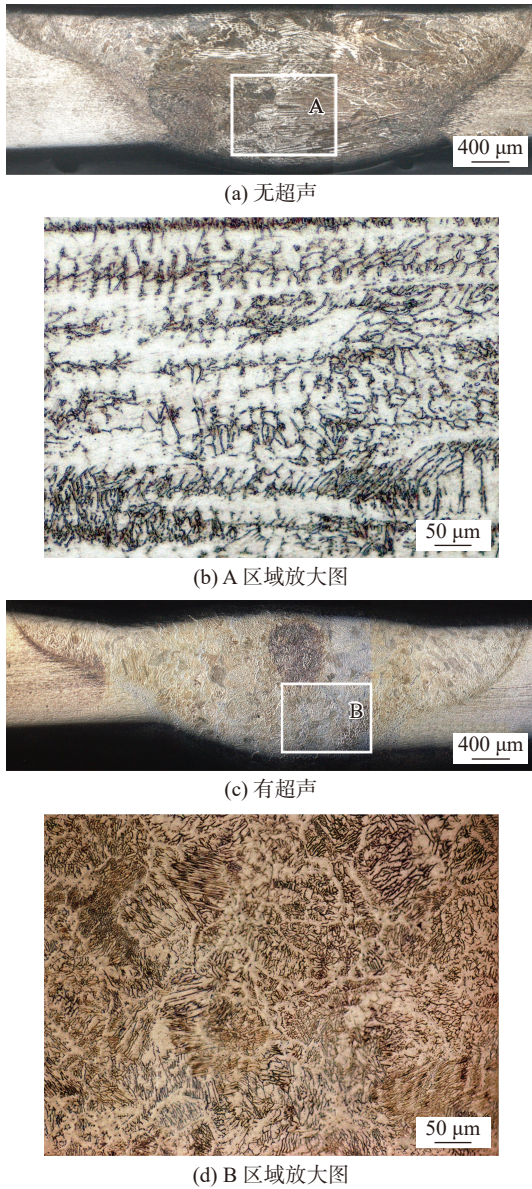


图 14 有无超声时的焊缝区金相组织变化

Fig. 14 Metallographic structure changes in weld zone. (a) without ultrasound; (b) enlarged view of area A; (c) ultrasound; (d) enlarged view of area B

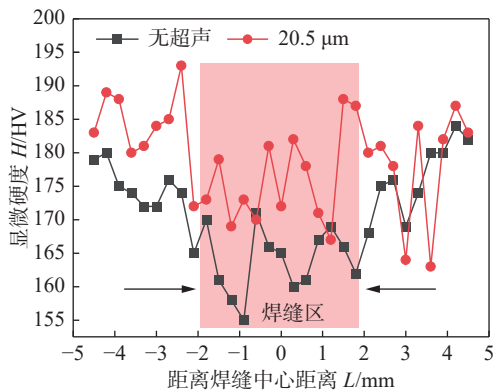


图 15 有无超声时接头显微硬度变化

Fig. 15 Change of microhardness of welded joint with or without ultrasound

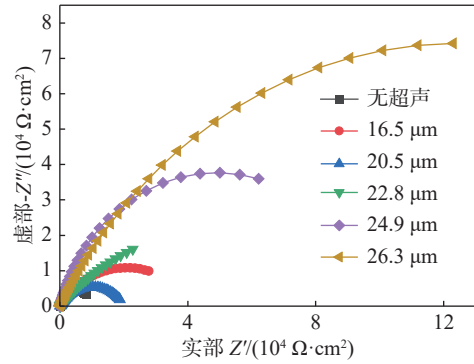


图 16 不同超声振幅下阻抗图

Fig. 16 Impedance diagram at different ultrasonic amplitudes

焊接接头耐腐蚀性最差, 加入超声后, 耐腐蚀性能得到了提高.

不同超声振幅下的极化曲线如图 17 所示, 从电化学热力学来看, 自腐蚀电位 E_{corr} 越低, 金属材料越易在电化学反应中失去电子, 材料受到腐蚀的倾向也越大. 原始无超声时的自腐蚀电位最低, 约为 -0.46 V , 具有最高的腐蚀倾向. 加入超声后, 自腐蚀电位均呈现出不同程度的增加, 腐蚀倾向降低.

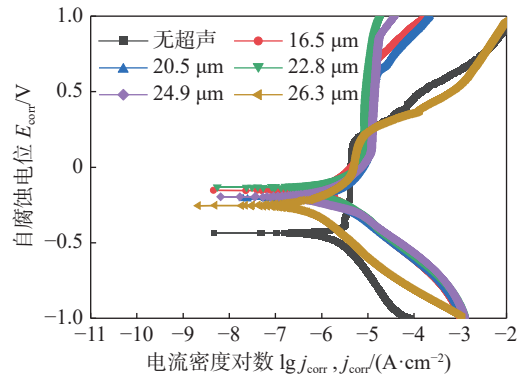


图 17 不同超声振幅下极化曲线

Fig. 17 Polarization curves at different ultrasonic amplitudes

在电化学测试过程中, 自腐蚀电流密度是判断耐腐蚀性能的重要因素, 自腐蚀电位、自腐蚀电流密度可以根据塔菲尔曲线外推法计算得出. 不同超声振幅下焊缝的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度如图 18 所示. 自腐蚀电流密度越小, 说明试样表面活性越低, 耐腐蚀性能越好. 对比不同超声振幅下测得的焊缝自腐蚀电流密度可知, 施加超声振动后, 焊接接头的自腐蚀电流密度整体呈下降趋势, 说明引入超声振动能够改善焊缝的耐腐蚀性能. 当超声振幅为 $26.3 \mu\text{m}$ 时, 焊缝试样的自腐蚀电流密度最小, 焊缝耐腐蚀性能最优, 数值约为 $1.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,

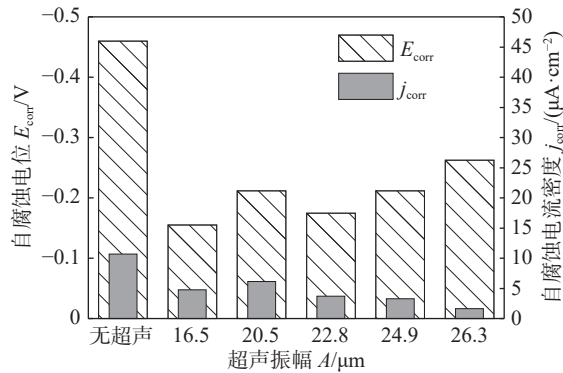


图 18 焊缝的自腐蚀电位及自腐蚀电流密度

Fig. 18 Self-corrosion potential and self-corrosion current density of weld

与阻抗图结果一致。

2.4 超声辅助对焊接效率提升的影响

不同焊接速度下有无超声时熔宽、熔深如图 19 所示。发现在不同焊接速度下,有无超声时的焊缝熔宽、熔深均随着焊接速度的增大而减小。在相同焊接速度下,有超声时的熔深均较大,当焊接速度为 0.7 m/min 时,与无超声作用时相比,施加超声振动后,焊缝熔深增大 17.86%;当焊接速度为 0.8 m/min 时,与无超声作用时相比,施加超声振动后,焊缝熔深增大 7.5%。因此施加超声后,在确保焊缝熔深的基础上能有效地提高焊接速度,进而提高焊接效率。

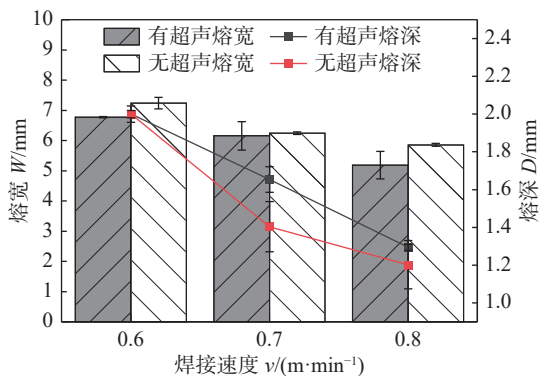


图 19 不同焊接速度下的熔宽与熔深

Fig. 19 Fusion width and depth of weld with or without ultrasound at different welding speeds

两种焊接速度下 (0.6 m/min 和 0.66 m/min) 焊缝成形见表 2,当焊接速度为 0.6 m/min 无超声时,焊缝背面完全熔透,当焊接速度为 0.66 m/min 无超声时,焊缝背面接近熔透临界值,焊缝背面熔宽最小。将焊接速度由 0.6 m/min 提升至 0.66 m/min,同时施加超声振动,焊缝背面完全熔透,焊缝背面熔宽最大。

表 2 两种焊接速度焊缝成形

Table 2 Weld forming characters under two welding speeds

焊缝成形情况	无超声	无超声	有超声
	0.6 m/min	0.66 m/min	0.66 m/min
正面熔宽 W/mm	7.236 5	6.253 9	6.774 7
熔透情况及背面熔宽 W/mm	完全熔透 (3.87 mm)	接近熔透临界值 (≤ 2 mm)	完全熔透 (4.61 mm)

根据表 2 的结果,分别测试焊缝成形良好的两组,焊接速度 0.6 m/min、原始无超声和焊接速度 0.66 m/min、施加超声后的接头力学性能,结果如图 20 所示,施加超声振动后,在焊接速度提升 60 mm/min(10%)后,焊接接头的断后伸长率、断面收缩率、抗拉强度仍然有所提升。焊接接头的断后伸长率和断面收缩率分别提升了 83.34% 和 22.21%,抗拉强度提升了 17.31%。

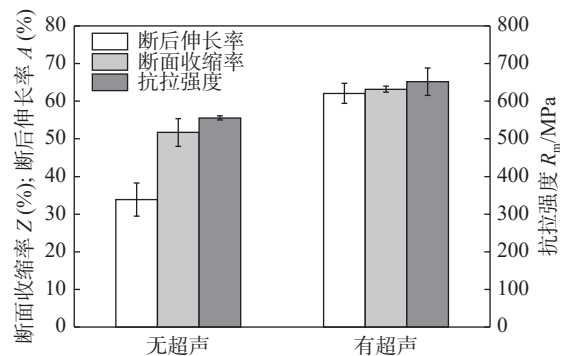


图 20 无超声和有超声抗拉强度、断后伸长率及断面收缩率
Fig. 20 Tensile strength, elongation and section shrinkage at without ultrasound and with ultrasound

接头试样的硬度测试结果如图 21 所示。从图中可以看出,对比原始无超声的焊接接头硬度测试结果发现,焊缝区硬度低于母材硬度。施加超声振动后,焊缝区的硬度有所提高,焊缝区的最大硬度

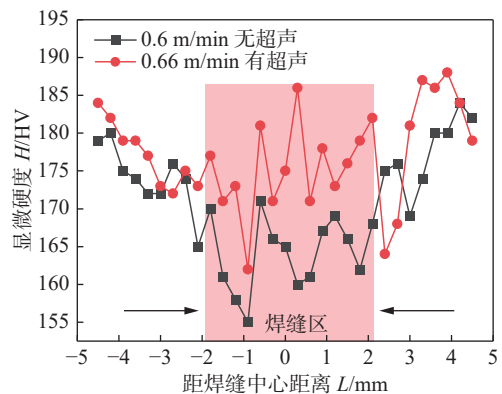


图 21 无超声和有超声硬度对比

Fig. 21 Hardness comparison of without ultrasound and with ultrasound

超过母材硬度,说明施加超声振动可以提高焊接效率的同时提升力学性能。

3 结论

(1) 超声输入距离对焊缝成形具有较大的影响,超声输入距离较近时,焊缝容易出现焊穿现象,通过减小超声振幅可以在一定程度上降低焊缝焊穿程度.随超声输入距离的增大,焊缝组织尺寸逐渐变粗大,焊接接头拉伸性能呈下降趋势。

(2) 超声施加时间对熔深影响较大.熔深随超声施加时间的增大呈现出先增大后减小的变化趋势,当超声施加时间为 0.5 s 时,熔深最深,深宽比最大。

(3) 接头力学性能与超声振幅之间存在非线性关系,当超声振幅为 20.5 μm 时,焊缝组织较为细化,接头抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率均较高.与无超声时焊接接头相比,硬度和耐腐蚀性能明显得到改善。

(4) 施加超声振动后,当焊接速度提升 60 mm/min 后,断后伸长率、断面收缩率、抗拉强度及硬度仍然有所提升.断后伸长率和断面收缩率分别提高 83.34% 和 22.21%,抗拉强度提高 17.31%。

参考文献

- [1] SLVA E M F D, DA FONSECA G S, FERREIRA E A. Microstructural and selective dissolution analysis of 316L austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4317 – 4329.
- [2] 胡若琪, 纪康康, 王颖, 等. 316L 不锈钢扩散焊接头组织性能分析 [J]. 焊接学报, 2023, 44(5): 1 – 6.
HU Ruoqi, JI Kangkang, WANG Ying, *et al.* Analysis of microstructure and properties of 316L stainless steel diffusion welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 1 – 6.
- [3] 朱平, 余春. 不同超声频率电弧下 316L 焊缝的微观组织分析 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(7): 46 – 50.
ZHU Ping, YU Chun. Microstructure analysis of 316L weld under different ultrasonic frequency arcs[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(7): 46 – 50.
- [4] 乔小丽, 曹帅, 武靖伟, 等. Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头微观组织及力学性能 [J]. 焊接学报, 2024, 45(6): 105 – 112.
QIAO Xiaoli, CAO Shuai, WU Jingwei, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Inconel 600 nickel-based alloy PAW + TIG joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(6): 105 – 112.
- [5] SINGH A K, DEY V, RAI R N. Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review)[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 1252 – 1259.
- [6] 王贤能. 随焊超声辅助铝合金 TIG 焊缝组织转变和作用机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Xianneng. Study on microstructure transformation and mechanism of aluminum alloy TIG weld aided by welding ultrasound[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [7] HALDAR V, BISWAL S K, PAL S. Formability study of microplasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(11): 546.
- [8] AHMADI E, EBRAHIMI A R. Welding of 316L austenitic stainless steel with activated tungsten inert gas process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(2): 1065 – 1071.
- [9] 冯悦皎. 中厚钢板的深熔 TIG 焊工艺研究及温度场数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
FENG Yuejiao. Study on TIG welding process and numerical simulation of temperature field of medium thick steel plate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [10] 王耀伟. 316L 不锈钢 DP-TIG 焊接工艺及接头性能研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
WANG Yaowei. Study on DP-TIG welding process and joint properties of 316L stainless steel[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [11] 毛楠. 316L 不锈钢焊接接头的组织和力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
MAO Nan. Study on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel welded joint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [12] 周培山, 唐珩崑, 李国超, 等. TIG 焊工艺发展研究 [J]. 焊接技术, 2023, 52(3): 14 – 19.
ZHOU Peishan, TANG Hengwei, LI Guochao, *et al.* Research on TIG welding process development[J]. Welding Technology, 2023, 52(3): 14 – 19.
- [13] 刘天祥, 陈焕明. 脉冲 TIG 焊工艺参数对薄板不锈钢焊缝成形的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 187 – 189.
LIU Tianxiang, CHEN Huanming. Influence of pulse TIG weld-

- ing parameters on the weld forming of sheet stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(19): 187 – 189.
- [14] SUN Q J, LIN S B, YANG C L, *et al.* Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(8): 765 – 767.
- [15] CHEN C, FAN C, CAI X, *et al.* Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46: 241 – 247.
- [16] DONG H G, YANG L Q, DONG C, *et al.* Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 424 – 435.
- [17] DAI X, ZHANG H, ZHANG H, *et al.* Joining of magnesium and aluminum via arc-assisted ultrasonic seam welding with Sn/Zn composite interlayer[J]. Materials Letters, 2016, 178: 235 – 238.
- [18] WATANABE T, OOKAWARA S, SEKI S, *et al.* The effect of ultrasonic vibration on the mechanical properties of austenitic stainless steel weld[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2003, 21(2): 249 – 255.
- [19] WATANABE T, SHIROKI M, YANAGISAWA A, *et al.* Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(12): 1646 – 1651.
- [20] 范阳阳, 孙清洁, 杨春利, 等. 基于超声振动的 304 不锈钢 TIG 焊接 [J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 91 – 94.
- FAN Yangyang, SUN Qingjie, YANG Chunli, *et al.* TIG welding of 304 stainless steel based on ultrasonic vibration[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 91 – 94.
- [21] WANG J, SUN Q, TENG J, *et al.* Enhanced arc-acoustic interaction by stepped-plate radiator in ultrasonic wave-assisted GTAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 19 – 31.
- [22] 陈琪昊, 王程程, 谢志宇, 等. 超声冲击作用下铝合金层片结构焊缝成形及性能 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2441 – 2455.
- CHEN Qihao, WANG Chengcheng, XIE Zhiyu, *et al.* Weld formation and properties of aluminum alloy lamellar structures under ultrasonic impact[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(8): 2441 – 2455.
-
- 作者简介:**胡明珠, 硕士; 主要研究方向为金属材料电弧焊接; Email: m_z_hu@163.com.
陈琪昊 (通信作者): 博士, 副研究员; 主要研究方向为轻质高强材料的高效化焊接、外部能场辅助电弧焊接; Email: chenqihao@hit.edu.cn.

(编辑: 郑红)