

罐式集装箱关键结构件焊接工艺优化研究

浦轲¹, 樊宇^{1, 2*}, 顾洪飞², 吴刚², 彭波², 杨晓燕²

(1 中国矿业大学材料科学与工程学院, 徐州 221116; 2 南通四方罐式储运设备制造有限公司, 南通 220371)

摘要: 在激光功率为 1350 W, 焊接速度为 0.8 m/min, 离焦量为 0 mm 的工艺参数下对板材进行对接焊, 研究发现该条件下的焊缝凝固过程为 F-A 模式, 室温下组织为奥氏体+蠕虫状铁素体。对焊接工艺参数进行研究, 发现激光功率和离焦量对熔深影响较大, 而焊接速度则对熔宽、束腰高和束腰宽影响较大。此外, 在焊接热输入相同的前提下, 激光焊接的硬度、强度、拉伸性能和耐腐蚀性均优于复合焊。

关键词: 高强 316L 不锈钢; 光纤激光焊接; 凝固模式; 金相分析; 力学性能

0 序言

激光焊接因其能量密度大、加热速度快、热影响区小、焊接应力和变形小等优点^[1], 被广泛应用于罐式集装箱用不锈钢的焊接^[2]。

力学性能是评价激光焊接接头性能好坏的重要指标之一^[3]。许多学者对激光焊接的接头力学性能进行了研究: 龚五堂等^[4]采用 1500 W 连续激光器对 2 mm 厚的 316 不锈钢板进行搭接焊试验, 结果表明对焊接接头强度影响最大的因素是熔深, 而对熔深影响最大的工艺参数是激光功率; 韩丽梅等^[5]研究了在 304 和 316 不锈钢的激光焊接中, 与 316 不锈钢相比, 304 不锈钢想要获得最大抗拉强度和最小接合宽度, 需要更高的能量。在此研究的基础上, 束斑尺寸是影响 304 和 316 不锈钢接头强度的最重要因素, 并且当光束偏移时, 接头抗拉强度和延伸率均明显下降; 张国栋等^[6]采用最大平均功率为 500 W 的脉冲激光焊机开展了 316 不锈钢焊

接试验, 分析了离焦量对焊缝组织和热裂纹的影响。研究表明, 在其他焊接参数不变的条件下, 离焦量增大时焊缝组织逐渐细化和致密, 焊缝熔深和熔宽均随离焦量的增大而减小, 但宽深比增大。

由于罐式集装箱结构件长期处于动载荷状况下工作, 且工况极其复杂, 因此对产品结构件的性能要求极高, 而产品结构的合理性直接影响着产品整体使用效能^[7], 所以研究其关键结构件的焊接工艺优化具有十分重要的意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

焊接试验采用的材料为厚度 4.4 mm 的高强 316L 不锈钢冷轧板, 试样尺寸为 100 mm×100 mm。其主要元素组成和力学性能^[8]见表 1、2。

表 1 高强 316L 不锈钢主要元素组成 (wt.%)

Table 1 Main elemental components of high strength 316L stainless steel (wt.%)

碳 C	氮 N	硅 Si	锰 Mn	磷 P	硫 S	镍 Ni	铬 Cr	钼 Mo
≤0.03	≤0.05	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.001	10.00-12.00	16.00-18.00	2.00-3.00

表 2 高强 316L 不锈钢的力学性能

Table 2 Physical properties of high-strength 316L stainless steel

抗拉强度 σ_b (Mpa)	屈服强度 σ_s (Mpa)	延伸率 δ (%)	密度 ρ (g/cm ³)	硬度(HV)
≥ 650	≥ 320	≥ 40	7.98	≤ 200

1.2 实验设备

本实验采用一套连续激光机，焊枪及激光器见图 1。该设备包括最大功率为 1500 W 的连续光纤激光机，进口激光焊枪，此外还有长度为 15 m、直径为 80 μm 的光纤、冷干机、空气压缩机、激光焊接气氛分布器系统、大功率电力稳压器、五轴联动系统和伺服运动控制系统等部分组成。

1.3 实验方法

将大小为 100×100×4.4 mm 的高强 316L 不锈钢小板通过对接方式焊接成型，施焊过程中选用 99.999% 的高纯 Ar 作为保护气，并且保持在 30 L/min 的流量值。为了防止不锈钢板材发生热变形^[9]，焊接时还需采用工装夹具固定焊接试样，高精度焊枪的结构如图 1 所示。

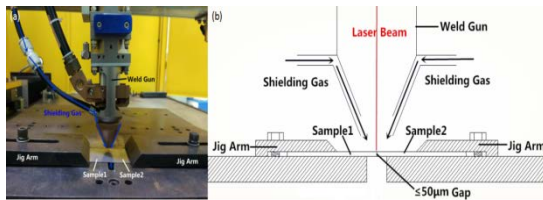


图 1 高精度焊枪: (a)外观图, (b)结构图

Figure 1 High precision welding torch: (a) appearance drawing, (b) structure drawing

研究高强 316L 不锈钢板材激光对接焊接头的凝固机理和组织构成，以及焊接速度、激光功率和离焦量三种焊接工艺参数，分别

对焊缝宏观形貌，焊缝轮廓形貌参数，焊缝拉伸性能有何影响规律。设定的焊接工艺参数范围如下：激光功率区间是 900–1500 W，焊接速率区间是 0.5–2.0 m/min，离焦量区间是 -2–2 mm。

参照国标 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》的具体要求对试样进行拉伸性能测试^[10]，具体的试样尺寸如图 2 所示。拉伸性能试验采用 SUNS UTM 4000 拉伸试验机进行测试，在室温下进行，最大试验力设定为 20 kN，标距是 50 mm，并以 1 mm/min 的速率对试样进行拉伸，每种焊接参数下都重复三次试验。当试样被拉断后，再使用扫描电子显微镜拍摄试样的断口，观察断口的形貌特征，分析试样的断裂原因。

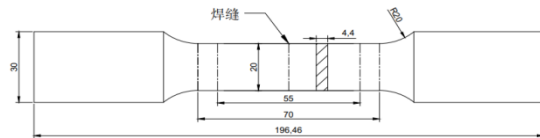


图 2 拉伸试样尺寸

Figure 2 The size chart of tensile specimen

2 实验结果与分析

2.1 焊接接头组织凝固模式分析

高强 316L 不锈钢属于奥氏体型不锈钢^[11]。如表 3 所示，奥氏体不锈钢焊缝金属凝固方式主要分为四种方式：A 型、A-F 型、F-A 型以及 F 型^[12]。

表 3 奥氏体不锈钢凝固方式、反应类型和室温下组织

Table 3 Austenitic stainless steel solidification mode, reaction type and room temperature structure		
凝固方式	反应类型	室温下组织
A 型	$L-L+A-A$	奥氏体
A-F 型	$L-L+A-L+A+(A+F)_{共晶}-A+F_{共晶}$	奥氏体+铁素体（处于胞晶或枝晶边界）
F-A 型	$L-L+F-L+F+(A+F)_{共晶/包晶}-F+A$	奥氏体+蠕虫状铁素体
F 型	$L-L+F-F-F+A$	奥氏体（处于铁素体晶粒边界）或针状铁素体

在四种不同凝固模式下，焊缝组织中铁素体形态如图 3 所示。从图中可以看出，当不锈钢中的铬镍比值较大时，凝固初生相为铁素体，而在铁素体的晶粒边界，奥氏体会通过固态相变的生成，并且不断朝铁素体内部长大，铁素体逐渐变为针状。当铬镍比值中等时，初生相为铁素体，在铁素体的枝晶和胞晶之间，会有奥氏体形核并长大，压缩铁素体的生长空间，铁素体向蠕虫状变化。当铬镍比值较小时，初生相为奥氏体，在奥氏体的枝晶和胞晶之间，会有铁素体形核并长大，最终以枝晶间铁素体分布在焊缝中^[13]。综上所述，A 模式下焊缝中没有铁素体存在；A-F 模式下的铁素体存在于胞状树枝晶的交叉处；F-A 模式下的铁素体存在于树枝晶的中心；F 模式下的铁素体则为针状。

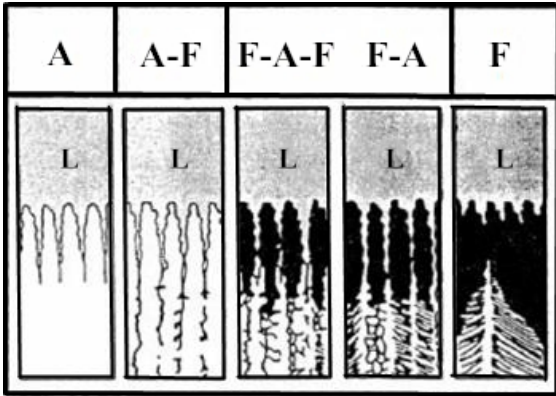


图 3 不同凝固方式下的铁素体形态
Figure 3 Ferrite morphology under different solidification modes

在激光功率为 1350 W，焊接速度为 0.8 m/min，离焦量为 0 mm 的焊接工艺参数条件下，得到高强 316L 不锈钢激光焊接接头，在完成制样后使用金相显微镜对其各个区域进行观察拍照，所得金相照片如图 4 所示。从图上可以看出，焊接接头的金相照片主要

由焊缝区、热影响区、焊缝中心和母材组成。图 4(a)为焊缝区域的组织，为典型钉子状深熔焊，熔合线非常清晰。柱状晶垂直于熔合线，并向焊缝中心平行生长。还能看到部分等轴晶存在于焊缝中心。图 4(b)为焊接热影响区（HAZ）组织，从图上可以看出，焊接热影响区组织与母材组织明显不同，该区域内的奥氏体并没有显著长大。这和激光焊接冷却速度快有关，奥氏体因为缺乏足够的时间，不能进行回复与再结晶^[14]，所以晶粒的尺寸与母材中差异不大。图 4(c)为焊缝中心组织，从图中可以清晰地看到奥氏体和蠕虫状铁素体。因为 316L 不锈钢中铬镍比值较大，会在焊缝间形成铁素体，室温组织为黑色蠕虫状铁素体+奥氏体，根据其铁素体的形态可知，其凝固模式也为 F-A 模式。图 4(d)为焊缝柱状晶区组织，该区域内为柱状铁素体+奥氏体，在奥氏体树枝晶的中心存在黑色柱状晶铁素体，而且铁素体自由分布其中。综上所述，高强 316L 奥氏体不锈钢光纤激光焊接接头的凝固过程为 F-A 模式，反应类型为 $L-L+F-L+F+(A+F)_{共晶/包晶}-F+A$ ，室温下的组织为奥氏体+蠕虫状铁素体。

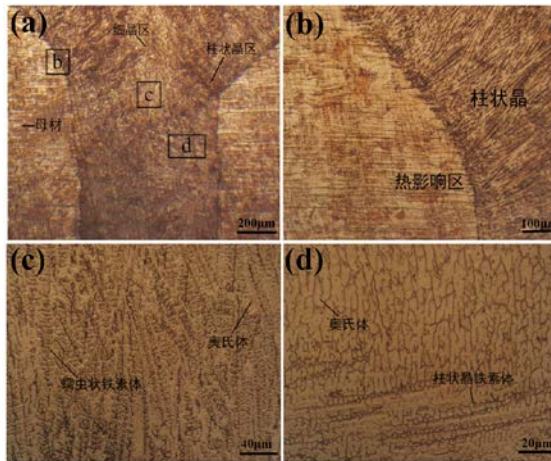


图 4 高强 316L 不锈钢激光焊缝金相照片：(a)焊缝轮廓，(b)焊接热影响区，(c)焊缝中心组织，(d)柱状晶组织

Figure 4 Metallographic photo of high strength 316L stainless steel laser weld: (a) weld contour, (b) welding heat affected zone, (c) weld center organization, (d) columnar crystals

2.2 工艺参数对焊缝形貌及力学性能的影响

2.2.1 激光功率的影响

激光焊接速度不变为 0.8 m/min，离焦量不变为 0 mm 的条件下，对 4.4 mm 厚高强 316L 不锈钢在 900-1500 W 的光纤激光功

率范围内进行激光对接焊试验，得到激光功率变化对焊缝的熔深、熔宽、束腰高和束腰宽的影响如图 5 所示。可以明显地看到，随着激光功率的升高，焊缝的熔深显著增加，但熔宽、束腰高和束腰宽的增大幅度小于熔深。

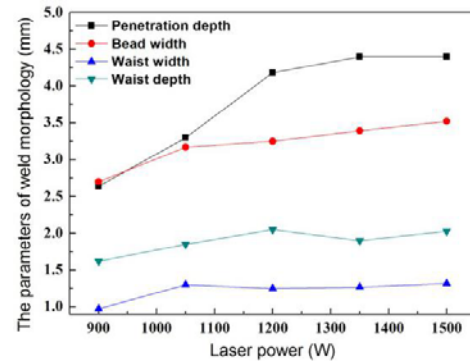


图 5 激光功率对焊缝轮廓形貌参数的影响

Figure 5 Influence of laser power on weld profile parameters

通过表 4 可以看出，在 1200 W、1350 W 和 1500 W 三种不同的激光功率下，试样的拉伸性能差异不大，因为它们都是断裂在母材处；而在 900 W 和 1050 W 的激光功率下，这三种性能参数值都比较低。因为功率较低时，焊缝里会存在气孔^[15]，较大程度降低了焊接接头的拉伸性能。

表 4 不同激光功率下焊接接头拉伸试验数据

Table 4 Welded joint tensile test data in different laser power

激光功率 P /W	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	断裂位置
900	289.7±5.6	454.3±8.5	13.9±0.8	焊缝
1050	300.2±5.0	553.0±6.2	12.6±0.5	焊缝
1200	314.0±1.6	659.1±4.4	33.3±1.5	母材
1350	324.6±5.4	657.9±6.8	38.9±1.5	母材
1500	318.5±1.6	663.2±5.1	40.1±0.9	母材

图 6 是 900 W 时拉伸试样断口的形貌图，从中可以看到，试样的焊缝中都有比较密集的气孔。气孔的存在不仅使拉伸试样横截面积减小，还会在气孔周围区域产生应力集中^[16]，使力学性能大幅度降低。焊缝中气孔的

产生是因为激光功率低，所以单位面积热输入低，造成深宽比变大，气泡因为无法从熔池中逸出，最后待焊缝凝固成型后便产生了大量的气孔，降低了焊接接头的拉伸性能。

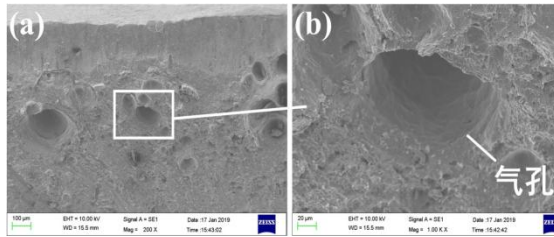


图 6 激光功率为 900W 时拉伸试样断口形貌图: (a) 低倍断口形貌,(b)高倍断口形貌

Figure 6 Fracture profile of tensile specimen when laser power is 900W: (a) low-fold fracture morphology, (b) high -fold fracture morphology

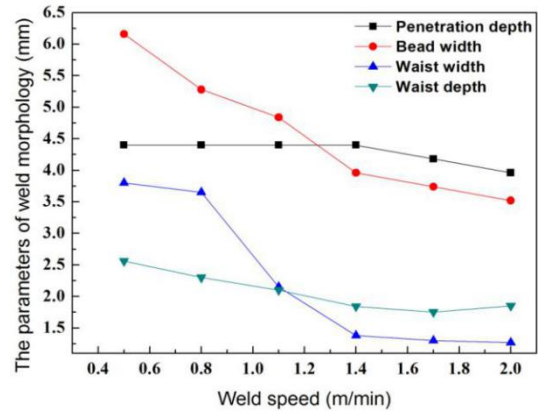


图 7 焊接速度对焊缝轮廓形貌参数的影响

Figure 7 Influence of weld speeds on weld profile parameters

2.2.2 焊接速度的影响

激光功率不变为 1350 W，离焦量不变为 0 mm 的条件下，对 4.4 mm 厚高强 316L 不锈钢在 0.5-2.0 m/min 的激光焊接速度范围内进行激光对接焊试验。焊缝的熔深、熔宽、束腰高和束腰宽随着焊接速度的变化程度如图 7 所示。焊缝的熔宽和束腰宽会随着焊接速度的提高而发生明显减小，而熔深和束腰高也都有不同程度的减小，但熔深和束腰高的减小幅度小于熔宽和束腰宽的减小幅度。这是因为焊接速度变快，对于工件表面上某个区域而言，焊枪在该区域内接触的时间变短，材料不能有效地吸收激光能量，焊接热输入就会降低。

通过表 5 可以得知，在 1.1-2 m/min 的焊接速度区间内，试样的拉伸性能差异不大，试样屈服强度、抗拉强度和延伸率的数值都比较接近，因为它们都是断裂在母材处。而在 0.8 m/min 的速度下，试样的屈服强度、抗拉强度和延伸率三种性能参数值远低于其他的试样，并且该速度下的拉伸试样断裂在焊缝处。观察该拉伸试样的高倍断口形貌，会发现焊缝里有气孔存在，这会严重降低焊接接头的拉伸性能。

表 5 不同焊接速度下焊接接头拉伸试验数据

Table 5 Welded joint tensile test data in different welding speeds

焊接速度 v / m/min	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	断裂位置
0.5	290.7±5.9	655.7±5.5	41.7±1.5	母材
0.8	269.7±4.5	591.3±5.7	11.1±0.9	焊缝
1.1	292.3±4.0	656.7±7.5	66.7±1.5	母材
1.4	306.3±3.1	656.0±5.0	58.3±1.3	母材
1.7	305.0±4.7	651.0±6.7	41.8±1.1	母材
2.0	310.0±6.3	649.0±7.2	38.9±1.5	母材

图 8 是 0.8 m/min 时拉伸试样断口的形貌图，从中可以看到，因为焊接速度较慢的缘故，该试样的焊缝中有比较密集的气孔。激光焊接时若焊接速度过慢，保护气体可能

会进入熔池，气体因为无法从熔池中逸出，最后便滞留在焊缝中变成了气孔^[17]；若焊接速度过快，单位面积热输入变小，并且高强 316L 不锈钢材料的导热性好，焊缝凝固比

较快，气泡因为无法逸出，最后待焊缝凝固成型后便产生了大量的气孔，降低了焊接接头的拉伸性能。

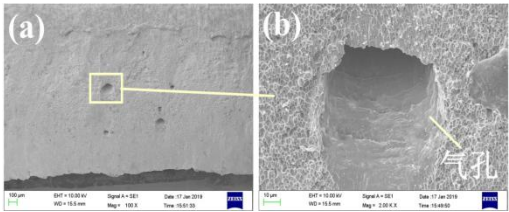


图 8 焊接速度为 0.8 m/min 时拉伸试样断口形貌图：
(a)低倍断口形貌,(b)高倍断口形貌
Figure 8 Fracture profile of tensile specimen when weld speed is 0.8 m/min: (a) low-fold fracture morphology, (b) high-fold fracture morphology

2.2.3 离焦量的影响

在激光功率为 1350 W，焊接速度为 0.8 m/min 的条件下，对 4.4 mm 厚高强 316L 不锈钢在-2-2 mm 的离焦量范围内进行激光对接焊试验，所得到离焦量变化对焊缝的熔深、熔宽、束腰高和束腰宽的影响如图 9 所示。可以明显地看到，随着离焦量的变大，焊缝的熔深明显减小，并且负离焦下的熔深更大。

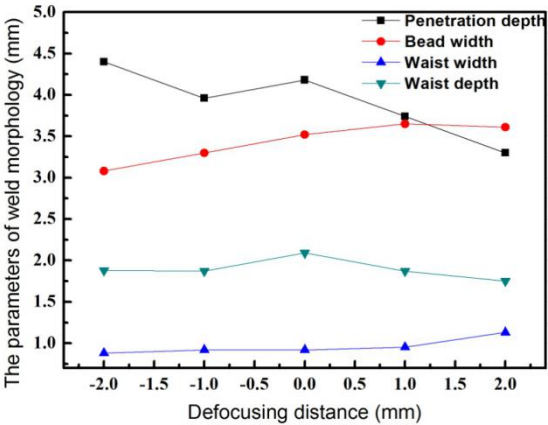


图 9 离焦量对焊缝轮廓形貌参数的影响
Figure 9 Influence of defocusing distances on weld profile parameters

通过表 6 中数据的可以得知，在-2-1 mm 的离焦量区间内，试样的拉伸性能差异不大，试样屈服强度、抗拉强度和延伸率的数值都比较接近，因为它们都是断裂在母材处。而在+2 mm 的离焦量下的拉伸试样断裂在焊缝处。观察该拉伸试样的高倍断口形貌，会发现焊缝里有气孔存在，导致焊接接头拉伸性能的大幅降低。

表 6 不同离焦量下焊接接头拉伸试验数据

Table 6 Welded joint tensile test data in different defocusing distances

离焦量 D /mm	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	断裂位置
-2	294.3±3.2	656.0±3.6	37.3±1.2	母材
-1	293.0±1.7	648.3±4.7	48.0±2.0	母材
0	301.7±2.1	655.0±3.0	43.7±1.5	母材
+1	301.0±2.9	652.7±4.5	45.3±1.2	母材
+2	315.3±4.7	554.7±3.5	15.3±0.5	焊缝

图 10 是离焦量为+2 mm 时拉伸试样断口形貌图。图上有少许气孔，这是因为离焦量发生改变，焊枪离板材的距离不同，照射到工件上的光斑尺寸也就不同^[18]，导致各个离焦量时的激光能量密度不一样。与此同时，离焦量不同，吹到焊缝的保护气流量也就不

同。该焊接工艺参数下，焊枪离板材距离最近，导致吹到接头处的氩气流过大，使保护作用大打折扣，容易产生气孔。

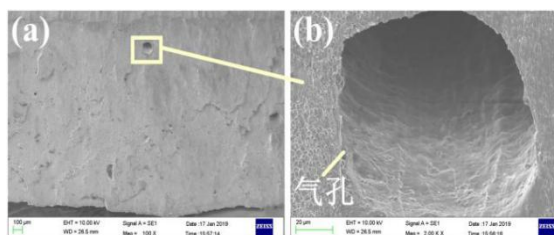


图 10 离焦量为+2mm 时拉伸试样断口形貌图: (a) 低倍断口形貌,(b)高倍断口形貌

Figure 10 Fracture profile of tensile specimen when defocusing distance is +2 mm: (a) low-fold fracture morphology, (b) high -fold fracture morphology

2.3 激光焊接与等离子-钨极惰性气体复合焊接对比

图 11 为光纤激光焊和等离子-钨极惰性气体复合焊焊缝组织对比图。由此可知, 两种焊接方法所得焊缝的微观结构存在差异。激光焊接的晶粒普遍细小致密, 而等离子-钨极惰性气体复合焊的组织相对粗大。

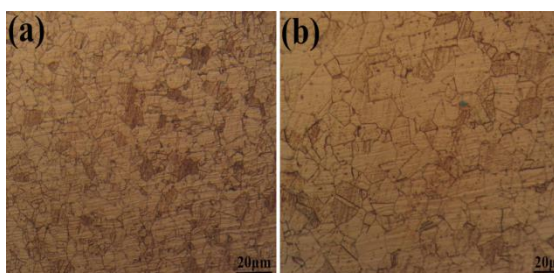


图 11 光纤激光焊和等离子-钨极惰性气体复合焊焊缝组织对比图: (a) LBW,(b) PAW-TIG

Figure 11 Comparison of fiber laser welding and plasma-tungsten inert gas hybrid welding microstructure: (a) LBW, (b) PAW-TIG

图 12 为两者焊缝平均硬度对比图。在相同的热输入条件下, 激光焊的焊缝平均显微硬度要高于等离子-钨极惰性气体复合焊的焊缝平均显微硬度。此外还能发现, 两者焊缝的硬度均明显高于高强 316L 不锈钢母材的硬度, 这是因为两种焊接工艺所得焊接接头的显微组织均为奥氏体+铁素体, 而母材的显微组织只有奥氏体。因为铁素体是一种脆性相, 它的存在会大幅度提升接头的硬度^[19]。图 13 为两种焊接方法的拉伸性能对

比图。在相同的热输入条件下, 激光焊接接头的屈服强度和抗拉强度均高于等离子-钨极惰性气体复合焊接接头的屈服强度和抗拉强度, 但两者的延伸率相差不大且断裂位置均为母材, 说明两者的焊接接头拉伸性能均优于高强 316L 不锈钢母材。

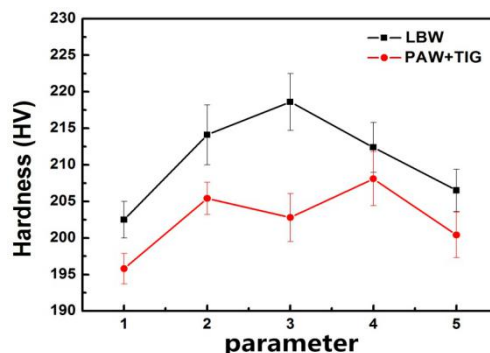


图 12 两种焊接方法的焊缝平均显微硬度对比图

Figure 12 Comparison of average microhardness of welds between two welding methods

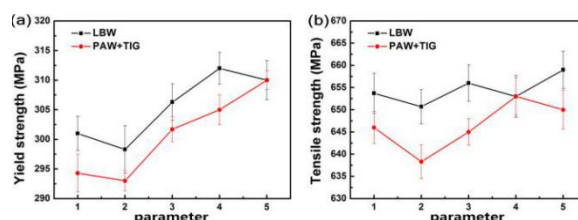


图 13 两种焊接方法的拉伸性能对比图

Figure 13 Comparison of tensile properties of two welding methods

对比两种焊接接头的极化曲线, 能够得知: 复合焊接头的自腐蚀电位低于激光焊接接头, 所以复合焊接头的腐蚀倾向明显大于激光焊接接头。复合焊接头的自腐蚀电流大于激光焊接接头, 所以复合焊接头的腐蚀速率也远快于激光焊接接头。综上所述, 激光焊接接头的耐腐蚀性能明显要优于等离子-钨极惰性气体复合焊接头。

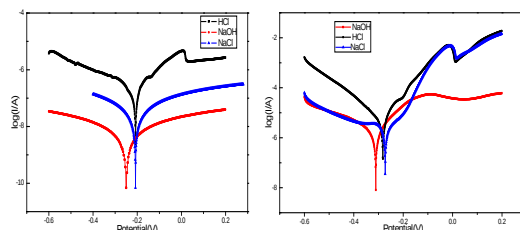


图 14 两种焊接接头在各自溶液中的极化曲线

Figure 14 Polarization curve of welded joints in their respective solutions

3 结 论

在激光功率为 1350 W, 焊接速度为 0.8 m/min, 离焦量为 0 mm 的工艺参数下, 高强 316L 不锈钢焊缝的凝固过程为 F-A 模式, 焊缝处的硬度要高于母材部分。母材的拉伸试样在断裂前发生了明显的塑性变形, 拉伸断口呈 45° 剪切断裂, 断裂机理为微孔聚集断裂, 断裂模式为韧性断裂。激光功率和离焦量对熔深影响较大, 而焊接速度对熔宽、束腰高和束腰宽影响较大。在焊接热输入相同的条件下, 激光焊接的硬度、强度、拉伸性能以及耐腐蚀性均要优于等离子-钨极惰性气体复合焊。

参 考 文 献:

- [1] 李亚江, 李嘉宁. 激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 2012.
- [2] 巩水利. 先进激光加工技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.
- [3] 田文腾. 304 奥氏体不锈钢薄板光纤激光焊接试验及数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文, 2016.
- [4] 龚五堂, 雷黎明. 0.2 mm 不锈钢外件激光精密焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2018(4): 597-600.
- [5] 韩丽梅. 中厚板 304 不锈钢激光-MIG 复合焊工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [6] 张国栋, 郑剑平, 赵俊, 等. 316 不锈钢激光焊接中离焦量对热裂纹的影响[J]. 原子能科学技术, 2018(2): 210-214.
- [7] Mohammad Soltani. Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 112-121.
- [8] 冷晓春, 罗守一, 李延葆, 等. 304 不锈钢光纤激光焊接模式的影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2018(11402): 1-6.
- [9] 张瑄琨, 孙小兵, 潘涌, 等. 304 不锈钢薄板外件激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2016(3): 321-325.
- [10] 陶汪, 陈彦宾, 李俐群, 等. 316L 不锈钢激光点焊工艺研究[J]. 应用激光, 2005, 25(4): 233-236.
- [11] 龚宏伟, 冷晓春. 316L 不锈钢大功率光纤激光焊成形研究[J]. 光学仪器, 2014, 36(3): 243-246.
- [12] 钟诚, 惠虎. 预拉伸对奥氏体不锈钢焊接残余应力影响的研究[J]. 热加工工艺, 2015(23): 190-193.
- [13] C.W. Lin, M.H. Tsai, C.W. Tsai, J.W. Yeh, S.K. Chen, Microstructure and aging behaviour of Al5Cr32Fe35Ni22Ti6 high entropy alloy, Materials Science and Technology. 31(10) (2015) 1165-1170.
- [14] 王金凤, 陈银银. 不锈钢薄板激光焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(1): 116-118.

- [15] M.H. Tsai, J.W. Yeh, High-entropy alloys: a critical review, Materials Research Letters. 2 (3) (2014) 107-123.
- [16] C.Y. Cheng, J.W. Yeh, High-entropy BNbTaTiZr thin film with excellent thermal stability of amorphous structure and its electrical properties, Materials Letters. 185 (2016) 456-459.
- [17] 付政, 陶晔, 张捷, 等. 不锈钢板光纤激光焊接工艺参数优化[J]. 焊接技术, 2015(12): 48-51.
- [18] 张彦杰. 坡口形式对 SUS304 奥氏体不锈钢对接接头残余应力和变形的影响[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2015.
- [19] Z. Cai, J. Guo, X. Cui, Z. Liu, W. Zheng, Y. Li, L. Wang, Synthesis and microstructure characterization of Ni-Cr-Co-Ti-V-Al high entropy alloy coating on Ti-6Al-4V substrate by laser surface alloying, Materials Characterization. 120 (2016) 229-233.

作者简介: 浦轲, 男, 1994 年出生, 硕士研究生; Email: 837859910@qq.com.

通讯作者: 樊宇, 男, 1983 年出生, 副教授; 主要从事激光焊接方面的研究工作, 发表论文 30 余篇; Email: fanyu@cumt.edu.cn.

仅供交流



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统