

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.08

TA1保温杯超薄板窄间距激光焊接工艺优化

王志杰¹, 琚震江², 赵洪¹, 施兴富¹, 吴林军¹, 王泽宇^{1,2*}

1. 浙江飞剑工贸有限公司, 浙江 金华 321300
2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要: 为实现超薄、窄间距TA1保温杯板材的精密连接,设计搭建了一种基于旋转定位系统的激光焊接装置,并进行了焊接试验,分析激光焊接功率及焊接速度等工艺参数对焊接接头组织、显微硬度、力学性能的影响规律。研究发现,激光功率和旋转定位台转速对焊接质量有显著影响。当激光功率过低(600 W)或旋转定位台转速过快(11~13 r/min)时,焊接热输入低,熔池流动性差,导致组织分布不均且熔深浅;而激光功率过高(1 200~1 350 W)或转速过慢(3~5 r/min)时,热输入过高,接头变形大、热影响区宽且易产生气孔缺陷。通过对不同工艺参数下的焊接接头进行体式显微分析、金相观察和拉脱力测试,发现当激光功率为1 050 W、旋转定位台转速为7 r/min时,接头成形良好,内胆和外壁对结构称,无气孔缺陷,且接头非标试样的平均拉脱力和最小拉脱力分别达到峰值1 415 N、1 343 N。试验结果证明,优化后的焊接工艺显著提升了纯钛焊接的精度和质量,可以为高纯钛保温杯的高效高品质制造提供理论依据和参考。

关键词: TA1纯钛; 旋转定位装置; 激光焊接; 工艺优化; 拉脱力

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0063-06

Optimized Design of Laser Welding Process for Ultra-Thin TA1 Thermal Insulation Cup with Narrow Gaps

WANG Zhijie¹, JU Zhenjiang², ZHAO Hong¹, SHI Xingfu¹, WU Linjun¹, WANG Zeyu^{1,2*}

1. Feijian Industry & Trade Co., Ltd., Jinhua 321300, China
2. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

Abstract: To achieve precise connections of ultra-thin, narrow-spaced TA1 thermal insulation cup plates, this study designed and built a laser welding device based on a rotary positioner system, and carried out welding experiments to analyze the effects of process parameters such as laser welding power and welding speed on the microstructure, microhardness, and mechanical properties of welded joints. Results indicate that laser power and rotary positioner speed significantly impact welding quality. At low laser power (600 W) or high rotary positioner speed (11~13 r/min), low welding heat input reduces molten pool fluidity, causing uneven microstructure distribution and shallow penetration. Conversely, high laser power (1 200~1 350 W) or low rotary positioner speed (3~5 r/min) increases heat input, leading to significant joint deformation, a wide heat-affected zone, and porosity defects. Comprehensive analysis of welded joints under different parameters via stereoscopic microscopy, metallographic examination, and pull-off force tests reveals optimal parameters: a laser power of 1 050 W and a rotary positioner speed of 7 r/min. Under these conditions, the joint forms well, with symmetrical inner and outer wall structures, no porosity defects, and peak average and minimum pull-off forces of 1 415 N and 1 343 N, respectively. The optimized process significantly enhances the accuracy and quality of titanium welding, offering a theoretical basis and reference for the efficient, high-quality manufacturing of pure titanium thermal insulation cups.

Keywords: TA1 pure titanium; rotary positioner; laser welding; process optimization; pull-out force

收稿日期: 2024-12-12 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB430008);江苏省科技计划项目(青年基金项目)(BK20230531);江苏省“双创博士”项目(JSSCBS20221233)

作者简介: 王志杰(1977—),男,高级工程师,主要从事机电制造研究。

通讯作者: 王泽宇(1990—),男,博士,讲师,主要从事新材料及异种材料连接研究。E-mail: zywang@ujs.edu.cn。

引用格式:王志杰,琚震江,赵洪,等. TA1 保温杯超薄板窄间距激光焊接工艺优化[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 63–68.

Citation: WANG Zhijie, JU Zhenjiang, ZHAO Hong, et al. Optimized Design of Laser Welding Process for Ultra-Thin TA1 Thermal Insulation Cup with Narrow Gaps[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 63–68.

0 引言

在保温杯生产中,为了保证产品质量的前提下节约资源,以纯钛 TA1 制作的保温杯内胆设计为超薄壁结构(一般约为 0.5 mm)^[1],其内胆外壁高质量无缝焊接极为关键。传统金属保温杯的焊接工艺多为氩弧焊,其热输入量大,对于薄壁金属焊接难以精确定位,在焊后容易出现咬边、焊破、错位和焊缝不平等问题^[2-3]。其较低的生产效率也难以适应自动化、半自动化生产的发展趋势。相比之下,以高能量密度的激光束作为焊接热源的激光焊接有着加工精度高、热影响区小、变形小以及在焊缝宽度小的同时也能保证良好的深宽比等优点^[4-7]。

但是,工业纯钛在熔融状态下活性较高,易与空气中的氧、氢、氮等元素发生反应^[8-9],在焊缝表面产生气孔、氧化等焊接缺陷危害产品质量^[10]。此外,由于焊接接口为超薄壁窄间距焊接,焊缝以及热影响区塑性显著降低,使钛变脆,从而导致焊接质量下降。因此,优化纯钛激光焊接工艺参数以调控接头组织性能成为目前研究的重点。然而,目前针对超薄、窄间距 TA1 板材的激光焊接研究相对较少,且在售激光焊接设备及氩气保护系统难以适配保温杯焊接过程中的旋转定位,所以对焊接组件、机架进行定制设计及优化是迫切需要解决的问题。

在此背景下,本研究设计搭建了一套基于旋转定位系统的激光焊接装置,以实现保温杯超薄内胆/外壁 TA1 板材的精密激光焊接,在此基础上,分析激光焊接功率及焊接速度对焊接接头组织、显微硬度、力学性能及日常使用性能的影响规律,完成焊接工艺优化,揭示 TA1 焊接接头的界面演化行为及焊接机制,为高纯钛保温杯的高效高品质制造提供了理论依据和参考。

1 试验材料与方法

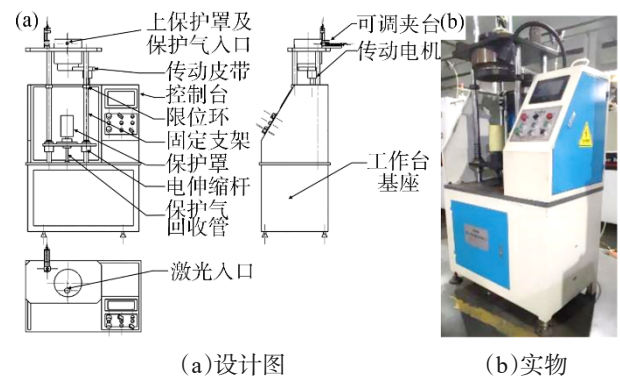
试验所用材料为轧制退火态 TA1 板材,其化学

成分如表 1 所示。采用激光焊接方法对窄间距薄壁 TA1 板材进行连接,焊接所用激光器为苏州迅镭激光科技有限公司生产的 QL-CW1500 型光纤激光焊接机,焊接功率为 600~1 350 W,焊接速度(旋转定位机构转速)为 3~13 r/min,保护气为纯度 99.999% 的 Ar 气。由于本文的焊接对象为窄间距超薄 TA1 板材,厚度仅为 0.5 mm,杯口直径为 40~51 mm。针对杯体薄壁尺寸细小,对焊接精度要求高的难题,本文设计了一种旋转定位组件,其结构设计图如图 1a 所示,系统内组件已在图中标注(包含旋转定位支架、传动组件、保护气、激光通道,激光器出光头固定支架,操作系统面板等部分)。旋转定位焊接工作台实物如图 1b 所示。使用金相显微镜观察试样截面焊缝、母材及热影响区的组织分布。通过对比不同工艺参数下的体式照片、金相组织照片及拉脱力,分析其对焊接接头连接质量的影响规律。

表 1 TA1 板材的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the TA1 lamina (wt. %)

Ti	Fe	C	N	O	H
余量	0.035	0.011	0.002	0.039	0.001



(a) 设计图

(b) 实物

图 1 旋转定位焊接设备

Fig. 1 Rotary positioner system

由于保温杯杯口焊接接头尺寸不规则,无可参考的强度测试标准,故本文对其进行拉脱力测试。具体采用 DDL100 微机控制电子万能试验机测试,拉伸速度为 2 cm/min。本次试样力学性能测试位置为保温杯口焊缝,制备了拉脱力测试试样,如图 2 所示。需要指出,由于产品批次的不同,本文在研究

不同激光功率及不同旋转定位系统转速对接头组织及性能影响时,先后采用A、B组两组试件。A组试样杯口位置宽度10 mm,长度50 mm;B组宽度8 mm,长度40 mm,在母材段进行弯折以便电子万能试验机夹持。设置拉伸速度为2 mm/min。记录各组试样最大拉脱力/标准差以及最小拉脱力,以衡量不同参数的焊接质量和生产稳定性。



(a)第一批次试样



(b)第二批次试样

图2 保温杯杯口焊接接头拉脱力测试非标试样形貌

Fig. 2 The appearance of non-standard test samples for the pull-off force test of the welding joint at the mouth of the thermal insulation cup

2 试验结果及讨论

2.1 激光功率对焊接接头组织及性能的影响

当旋转定位系统转速为9 r/min时,不同激光功率焊接接头(A组试样)剖面在经过砂纸打磨、粗抛光后,对焊缝截面形貌进行体式显微分析,照片如图3所示。当激光功率为600 W时,接头两侧有凸起变形,存在内胆外壁间隙处熔合不均现象,推断这是由于装配时出现内胆外壁待焊区域未紧密贴合及焊接热输入不够共同导致的,这可能导致杯口焊缝整体偏差较大。激光功率为750 W时,接头表面光滑、内胆外壁熔合均匀。但有试样焊缝出现明显偏差使得熔池朝一侧塌落,这可能是装配时激光定位微小偏差并且热输入不够使得熔池内部流动性差导致的。激光功率900 W时,接头由于内胆外壁的装配落差使得该组试样熔深较浅。激光功率为1 050 W时,接头内胆外壁对称度高,一定程度体现出熔池流动性好,组织也分布均匀。激光功率为1 200 W时,接头有少量气孔出现,但热输入过大使

得具有轻微装配落差的焊缝出现坍塌倾向,同时在内胆和外壁间隙出现粘连。这是由于焊接热输入较大熔池冷却较慢,散热不均导致的。激光功率为1 350 W时,接头下方内胆外壁间隙处有明显不连续粘连区域。结合钛的热导率较差这一特性可知,这是由于焊接热输入过大而材料不能及时散热导致的。基于上述分析,可见随着激光功率增加时,接头熔合效果逐渐趋于均匀稳定,但过高的激光功率下也会导致熔池不能及时散热而出现坍塌倾向及内胆外壁间隙出现不规则粘连现象。值得注意的是低功率焊接时,装配偏差对焊接成形效果影响显著,而较高功率下该影响被降低,推测是熔池流动性提升的结果。

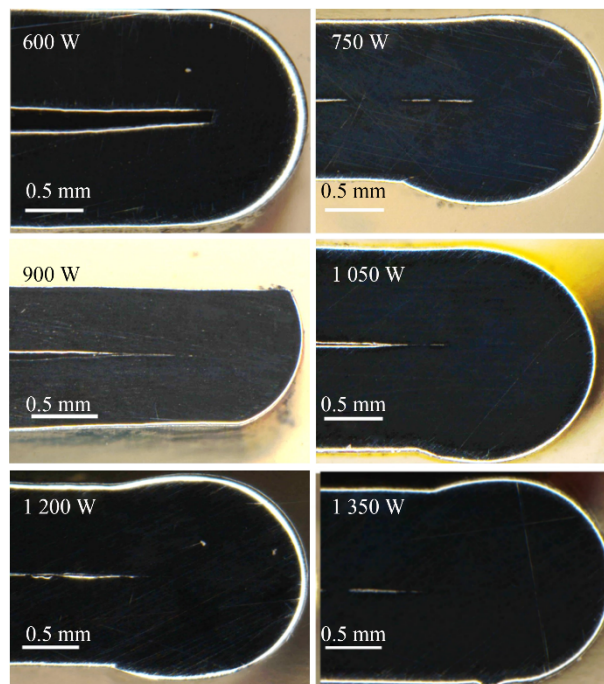


图3 不同激光功率焊接接头成形照片

Fig. 3 Photos of weld joint formation at different laser power levels

对上述试样继续进行精细抛光,随后进行金相腐蚀。腐蚀采用擦蚀,用酒精清洗表面水渍并用冷风吹干。在金相显微镜下对焊缝进行金相组织观察,如图4所示。激光功率为600 W时,接头焊缝显微组织存在 β 相分布,但仍以交错的针状 α 相为主。激光功率为750 W时,内胆外壁间隙处有少量粘连,粘连处金相为有 β 相夹杂的针状 α 相及片状 α 相,靠近熔合区则以针状 α 相为主,焊缝区域以锯齿状 α 相为主,夹杂少量 β 相。激光功率为900 W时,接头显

微组织以片状 α 相、锯齿状 α 相为主,但晶粒较为粗大。激光功率为1 050 W时,针状 α 相只是在散热较困难的内胆外壁间隙处有少量存在,总体上看接头组织分布较均匀。激光功率为1 200 W时,接头焊缝主要为不规则片状 α 相和锯齿状 α 相。激光功率为1 350 W时,接头焊缝内分布着尺寸较大的锯齿状 α 相。结合各试样金相组织分布情况可知,焊缝处金相组织基本为不规则片状 α 相和锯齿状 α 相,区别在于低功率下有 β 相组织析出;接头深处有针状 α 相分布,且随着激光功率梯度的增加逐渐减少。

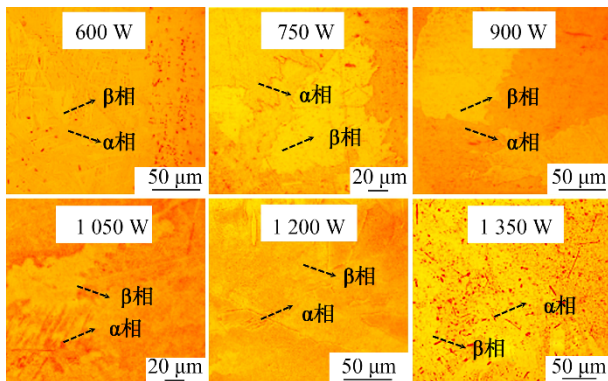


图4 不同激光功率焊接接头金相组织照片

Fig. 4 Metallographic structure photos of welded joints at different laser power levels

对A组试样进行拉脱力测试,各焊件的拉脱力平均值/标准差以及最小拉脱力如图5所示。激光功率为600 W时,焊件拉脱力平均值仅213.34 N。随着激光功率的提升,接头拉脱力逐渐提高,当激光功率达到1 050 W时,接头平均拉脱力为566.08 N达到最大值,同时其最小拉脱力也达515.8 N,明显高于其他激光功率焊接接头的最小拉脱力。

2.2 焊接速度对焊接接头组织及性能的影响

对B组焊缝截面形貌进行体式显微镜观测,照片如图6所示。当旋转定位系统转速为3 r/min时接头内有较大气孔缺陷,焊缝整体有较大变形和塌陷倾向。这是转速过慢而使得熔池吸收了较多热量且不能及时散热所致。当旋转定位系统转速为5 r/min时接头变形和塌陷倾向明显减小,整体成形较好,但在间隙处母材有焊接热输入过大产生的一定不规则黏合。当旋转定位系统转速为7 r/min时焊缝整体过度也较为平滑,没有发现宏观缺陷。不规则粘合区域在间隙处出现,但明显相比前面参数下有

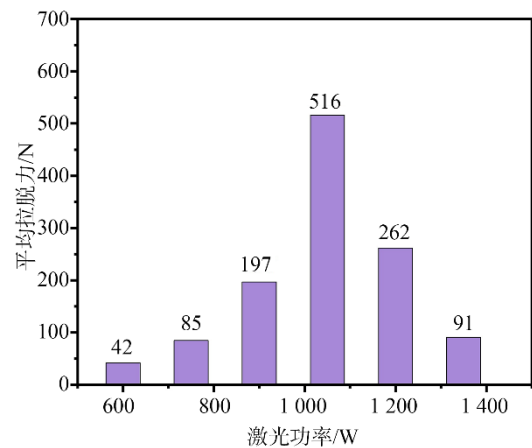
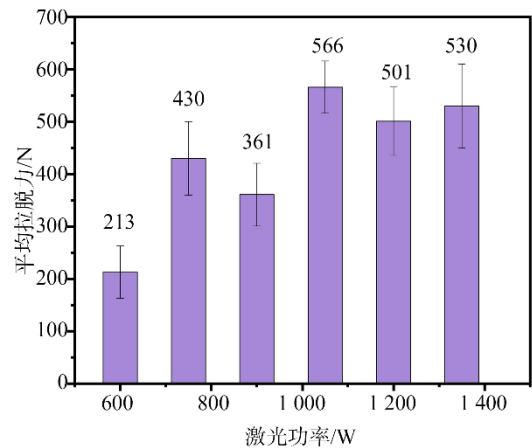


图5 不同激光功率焊接接头的平均及最小拉脱力

Fig. 5 Average and minimum pull-out forces of welded joints at different laser power levels

所减少。当旋转定位系统转速为9 r/min时,焊缝表面两侧和母材连接平滑,表面和内部没有宏观缺陷,但熔深较浅,激光热输入明显因为旋转定位系统转速较为以及钛杯壁的快速散热而不能及时到达更深范围。当旋转定位系统转速为11 r/min时接头进一步降低,并且熔合区与母材表面过渡明显有母材端凸起,这是因为热输入不足未能使待焊区域彻底融化。当旋转定位系统转速为13 r/min时接头熔深更浅,熔合区与母材的连接过渡差。基于上述分析,当焊接速度较低时,接头焊缝易产生气孔,整体变形较大;随着焊接速度逐渐提高,接头成形较好;当转速过快时接头成形变差,熔深明显降低,推测这是由于转速过快,熔池冷却过快导致的。

对上述B组试样的焊缝区域进行金相观察,照片如图7所示。当旋转定位系统转速为3 r/min时接头气孔缺陷非常显眼,焊缝区域金相组织为条状及

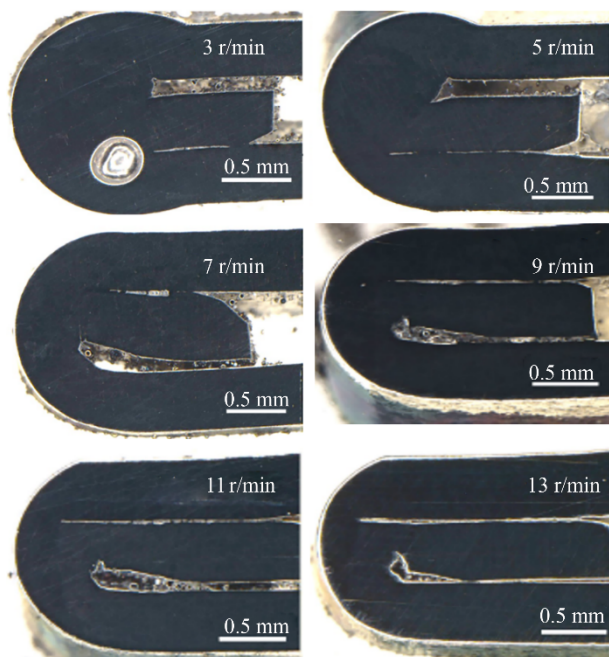


图6 不同旋转定位系统转速焊接接头成形照片

Fig. 6 Photos of welding joint formation at different rotational speeds of the positioning system

片状 α 相,参杂部分针状 α 相。当旋转定位系统转速为5 r/min时接头焊缝以不规则片状 α 相及锯齿状 α 相为主,针状 α 相主要分布在间隙两侧。当旋转定位系统转速为7 r/min时焊缝以不规则片状 α 相为主且尺寸较为均匀,针状 α 相在间隙两侧有少量分布且没有发现气孔缺陷。当旋转定位系统转速为9 r/min时可以明显看到焊缝以针状 α 相为主,而针状组织的大量分布一定程度说明该接头韧性较差。当旋转定位系统转速为11 r/min时焊缝组织以针状 α 相夹杂不规则片状 α 相为主。当旋转定位系统转速为13 r/min时焊缝组织均以片状相为主夹杂少量初始 β 相,组织分布较均匀。但内胆外壁间隙显著增加,这是由于转速过快而导致热输入不足,仅有金属表面发生熔化且晶粒粗大。结合各试样金相组织分布情况可知,焊缝处金相组织基本为不规则片状 α 相和锯齿状 α 相,区别在于低转速下有 β 相组织析出。值得注意的是接头下端有针状 α 相分布,随着转速增加先减少,后在转速为9 r/min时在焊缝区均较为显著。

对B组试样进行拉脱力测试,各焊件的拉脱力平均值/标准差以及最小拉脱力数据如图8所示。当转速较低时,拉脱力从670 N降至247 N,随着焊

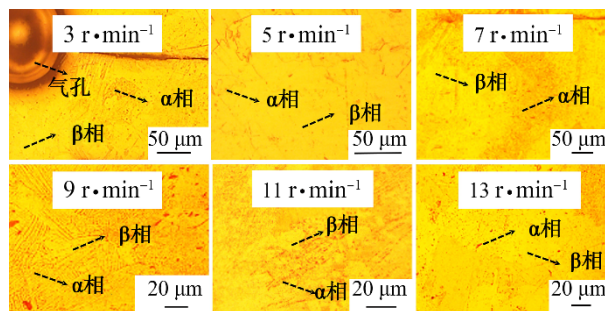


图7 不同旋转定位系统转速焊接接头金相组织照片

Fig. 7 Metallographic structure photos of welded joints with different rotational speeds of the positioning system

接速度提高到7 r/min,试样平均拉脱力为1 415.45 N达到最高;继续增加转速后,接头平均拉脱力及最小拉脱力呈现断崖式下降。

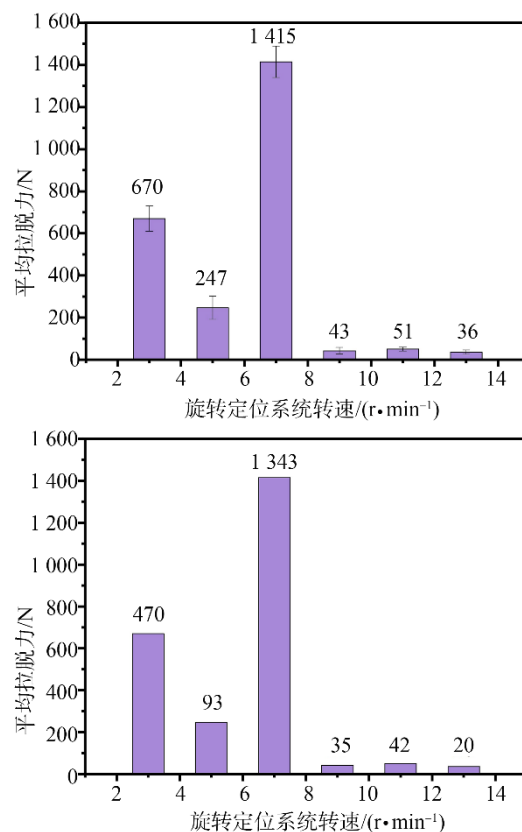


图8 不同旋转定位系统转速焊接接头的平均、最小拉脱力

Fig. 8 Average and minimum pull-out forces of welded joints with different rotational speeds of the positioning system

3 结论

(1)当激光功率在600~900 W以下时,钛杯内胆外壁接头熔池易发生整体偏移且熔深小,接头组

织普遍较为粗大且有脆性针状 α 相分布,力学性能较差;当激光功率达到1 050 W时,钛杯接头成形较好,组织均匀性、接头强度明显提高;但激光功率高于1 050 W时钛杯接头熔池有明显坍塌倾向,组织较为粗大且有 β 相析出,焊缝力学性能差,断面不平整,韧性断裂特征不明显。随着激光功率的提高,焊缝力学性能有明显提升,在达到70%最大激光功率时力学性能最佳,平均拉脱力为566 N,最小拉脱力为515 N,断面平整且断面有明显韧性断裂特征。这是因为焊接热输入应和熔池冷却速度达到一个动态平衡。

(2)焊接速度对接头质量的影响大于激光功率。在转速为3~5 r/min时,热输入较高,熔池易产生气孔,接头软化现象显著。转速为9~13 r/min时则因转速快,熔池凝固快而熔深显著降低,同时接头内出现大量针状脆性 α 相使接头质量下降严重,接头焊缝母材硬度差异较大,拉脱力极低,仅20~50 N。当旋转定位台的转速为7 r/min时接头晶粒大小及分布均匀,无脆性相;拉脱力也显示出其优异的力学性能。最终确定了最佳焊接参数为激光功率1 050 W,旋转定位台转速7 r/min。

参考文献:

- [1] 王海洋,谢晨,陈刚,等. TA1 纯钛微型杯件软模微拉深成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(07): 40-47.
WANG H Y, XIE C, CHEN G, et al. Micro Drawing Forming Technology of TA1 Micro Cup Parts with Flexible Die [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(07): 40-47.
- [2] 邱贺方,侯笑晗,郭晓辉,等. 电弧增材制造薄壁件形状控制研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(06): 197-210.
QIU H F, HOU X H, GUO X H, et al. Progress in Shape Control of Thin-walled Parts for Wire and Arc Additive Manufacturing [J]. Materials Reports, 2024, 38(06): 197-210.
- [3] Kumar B, Kebede D, Bag S. Microstructure evolution in thin sheet laser welding of titanium alloy[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2018, 11: 203-229.
- [4] Khan M S, Soleimani M, Midawi A R H, et al. A review on heat affected zone softening of dual-phase steels during laser welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 102: 663-684.
- [5] 马寅,马国龙,王尉,等. 装配间隙对铝合金激光-电弧复合焊接接头成形及气孔的影响研究[J]. 电焊机, 2024, 54(10): 61-69.
MA Y, MA G L, WANG W, et al. Study on the Effect of Assembly Gap on the Formation and Porosity of Laser-Arc Hybrid Welded Joints in Aluminum Alloys [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(10): 61-69.
- [6] 聂宇,冯巧波,王春亮,等. 316L 不锈钢薄板激光焊接接头微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(24): 80-84.
NIE Y, FENG Q B, WANG C L, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joints of 316L Stainless Steel Sheet [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(24): 80-84.
- [7] 马寅,韩晓辉,李刚卿,等. TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接接头组织性能[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 93-97.
MA Y, HAN X H, LI G Q, et al. Microstructure and Properties of Laser-MIG Hybrid Welded TC4 Titanium Alloy Joints [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 93-97.
- [8] 周凯,杨灿,杨焕,等. 激光工艺参数对钛合金表面着色稳定性的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(08): 154-162.
ZHOU K, YANG C, YANG H, et al. Influence of Laser Process Parameters on Coloring Stability of Titanium Alloy Surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(08): 154-162.
- [9] 魏玉顺,马青军,武鹏博,等. TC4 钛合金激光焊接技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 55-66.
WEI Y S, MA Q J, WU P B, et al. Research Progress in Laser Welding Technology of TC4 Titanium Alloy [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 55-66.
- [10] Deshmukh P S, Katiyar A, Sahu A, et al. Wire arc additive manufacturing of commercially pure titanium biomedical alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52(1): 369-379.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>