

超薄不锈钢激光焊接工艺对接头力学性能的影响

于一强¹, 张宝贵¹, 杨琨¹, 唐一峰², 陈宗旭¹, 张雪芹¹

1. 凯勒(南京)新材料科技有限公司 江苏南京 211505

2. 南京中科神光科技有限公司 江苏南京 210038

摘要: 研究激光焊接工艺对厚度为0.15mm的SUS304不锈钢超薄板材焊接成形效果的影响规律, 选取激光功率为280~320W、焊接速度为4~5m/min的焊接工艺条件, 实施了搭接激光焊接试验。研究聚焦于分析以上工艺参数变化下焊缝成形的特性, 并对取得最佳成形效果的焊接接头进行了微观组织与力学性能的深入剖析。试验发现: 若激光功率过高, 则会导致过多热量累积, 引发焊缝烧穿现象; 相反, 若激光功率不足, 则会减弱熔透能力, 造成焊缝未充分熔合, 这两种情况均不利于焊接接头承载力的提升。试验结果表明: 在激光功率为320W、焊接速度为5m/min、摆动宽度为0.5mm的工艺条件下, 焊接接头的抗拉力最优。此外, 所有测试条件下接头的断裂均发生在热影响区, 而最优成形接头的抗拉力达到了1.67kN, 相当于母材抗拉力1.93kN的86.5%, 并且展现出韧性断裂特征。

关键词: 激光焊接; 超薄不锈钢; 焊接工艺; 抗拉力

Influence of ultra-thin stainless steel laser welding process on mechanical properties of joints

YU Yiqiang¹, ZHANG Baogui¹, YANG Kun¹, TANG Yifeng², CHEN Zongxu¹, ZHANG Xueqin¹

1. Koller (Nanjing) New Material Technology Co., Ltd., Nanjing 211505, Jiangsu, China

2. Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co., Ltd., Nanjing 210038, Jiangsu, China

Abstract: The influence of laser welding technology on the welding and forming effect of SUS304 stainless steel ultra-thin plate with a thickness of 0.15mm was studied, and the welding process conditions with laser power ranging from 280W to 320W and welding speed in the range of 4m/min to 5m/min were selected, and lap laser welding experiments were carried out. The research focused on the analysis of the characteristics of weld forming under the change of these process parameters, and conducted an in-depth analysis of the microstructure and mechanical properties of the welded joints with the best forming results. Experiments show that too high laser power will lead to excessive heat accumulation, resulting in weld burn-through. On the contrary, insufficient laser power will weaken the penetration capacity and cause the weld to not be fully fused, both of which are not conducive to the improvement of the bearing capacity of the welded joint. The experimental results show that the tensile shear strength of the welded joint is optimal under the process conditions of laser power of 320W, welding speed of 5m/min and swing width of 0.5mm. In addition, the fracture of the joint under all test conditions occurred in the heat-affected region, and the tensile load of the optimally formed joint reached 1.67kN, which is equivalent to 86.5% of the tensile load of 1.93kN of the base metal, and showed the characteristics of ductile fracture.

Keywords: laser welding; ultra-thin stainless steel; welding process; tensile resistance

1 序言

不锈钢材料具有卓越的耐蚀性、高温稳定性和良好的力学性能。其中,超薄规格的不锈钢板材因其独特优势,在汽车制造、航空航天、医疗及微电子等众多领域被广泛应用。针对新能源汽车制造中电池包体对耐高温及阻燃性能的严格要求,现有工艺通常采用0.8mm厚的碳素钢材料来增强电池包的阻燃效果。汽车自重每减少100kg,百公里油耗可节省燃油0.3~0.5L,可减少CO₂排放8~11g,因此汽车轻量化是降低能源消耗、减少碳排放的重要途径,车身减重后也会在一定程度上降低对汽车动力系统和汽车底盘的性能要求^[1-4]。因此,探索超薄不锈钢与玻璃纤维复合材料的一体化热压成形技术显得尤为重要,旨在维持电池包阻燃特性的基础上实现减重,以促进新能源汽车的轻量化生产。值得注意的是,受限于生产工艺,当前超薄不锈钢板材(厚度为0.1~0.2mm)的最大可用宽度仅为600mm,这在一定程度上制约了其在更大尺寸场景中的应用,故而开发适用于薄板材料焊接的技术成为了研究的焦点。

近年来,激光焊作为一种现代焊接方法发展迅速,与传统的熔化焊方法相比,激光焊具有能量密度集中、焊缝深宽比大、热影响区小、焊后变形和残余应力小等优点,特别适用于薄板的焊接。根据激光器工作方式的不同,激光焊可分为连续焊和脉冲焊,其中脉冲激光焊既可以形成类似于点焊的焊点,又可以形成连续的焊缝。脉冲激光焊时的光斑直径非常小,甚至达微米级,每个激光脉冲发射时会在金属材料上形成一个焊点^[5]。

鉴于材料厚度的限制导致焊接难度陡增,超薄不锈钢材料的焊接逐渐成为研究热点。陈玉华等^[6]对0.2mm厚321不锈钢脉冲激光焊的焊缝成形进行了研究。结果显示,微型脉冲激光对接焊易在焊缝处烧穿,收弧处形成深弧坑,而适当减小脉冲频率和脉冲宽度可改善焊缝成形。当脉冲功率百分比为12%时(脉冲激光器平均功率80W),脉冲频率在较宽范围内变化均能获得成形良好、无缺陷的焊接接头。吴晓红^[7]采用波长1.06μm的Nd:YAG脉冲激光器对厚度为0.08mm的超薄不锈钢片进行激光密封焊接,通过调节脉冲激光频率、脉宽、焊接速度及

离焦量等工艺参数,成功地对超薄不锈钢片进行了脉冲激光焊接。脉冲频率与焊接速度之比必须满足3:1的关系,才能得到较好的焊斑重叠率,进而得到较好的焊缝密封性。陈银银^[8]采用IPG公司的准连续激光器YLR-150/1500-QCW-AM,对厚度0.05mm厚度的316不锈钢进行搭接焊接,当焊接夹具压合不好焊缝间有间隙时,容易产生虚焊、焊穿等现象。

激光焊接作为一种精密的连接技术,在超薄工件焊接领域表现出较高适用性。然而,激光焊接工艺过程中因为影响因素繁多,不易实现薄板焊接质量的持续稳定,超薄板激光焊接时对工艺提出了极高要求,尤其是针对超薄板材的对接焊接,材料本身的轻微表面汽化即可能引发焊点孔洞甚至穿透缺陷^[9,10]。因此,精准选取工艺参数成为超薄板材激光焊接技术的核心要素。本研究依托平均功率为2000W的连续激光设备,针对0.15mm厚的304不锈钢板材实施搭接焊工艺探索,并通过正交优化法对工艺参数进行了系统优化,以期获得最优参数组合,同时深入分析了这些参数对焊接接头力学性能的影响。

2 试验条件及方法

2.1 试验条件

所采用的304不锈钢片尺寸规格设定为200mm×100mm×0.15mm。在进行焊接试验前,首先用丙酮对试板的表面及搭接边缘进行擦拭,旨在清除氧化皮和污物。激光焊接系统配置的平均输出功率为2000W,选用连续激光光源,并配备直径为20μm的光纤传输。在焊接过程中,采用具有摆动功能的激光焊接头设计,该焊接头能够灵活调控多项关键参数,涵盖了激光输出功率、焊接速率、焦点距离、占空比及频率设置等。通过特制的工装夹具,两片待焊样品被精准搭接并固定于激光焊接平台上实施焊接操作。保护气体氩气的流量被恒定设置为20~25L/min,以确保焊接过程的稳定与质量。鉴于超薄不锈钢板材激光焊接的特殊性,未采取填丝措施,可能导致焊缝区域相较于基材出现一定程度的变薄现象。鉴于此,焊接接头承载负荷的能力成为关注焦点。因此,在工艺参数优化阶段,选取了焊接接头最大承受抗拉力作为核心评价指标,而非传统的抗拉强度值。

依据正交试验设计的方案实施焊接试验后，利用线切割技术，将各试验参数的焊接试样制作3件拉伸测试样件。这些样件随后在万能材料试验机进行剪切拉伸测试，测定其承受的最大抗拉力。针对每种焊接试样，取3件拉伸测试样件，取拉伸剪切力平均值作为该试验条件下焊接接头的抗拉力指标。

2.2 正交试验方法

正交试验设计作为一种卓越的试验方法，其核心优势体现在以较少的试验次数实现最优组合的识别，并能借助数理统计手段区分影响因素的主次及交互作用，进而实现对试验条件的精密调控，减小误差并指引后续试验的方向选择^[1]。

基于初步预试验数据分析，影响激光焊接头抗拉力的关键参数确定为焊接速度、激光功率及摆动宽度等变量，其中摆动激光焊接头的参数设定为摆动速率700mm/s、焦点位于零位、激光器频率5000Hz及占空比100%。为进一步探究，选取3个关键参数各自设定3种不同水平实施正交试验，因素设计见表1。试验具体安排采用了L9（3³）型三因素三水平正交试验方法，完整的正交试验设计方案见表2。

表1 正交试验因素设计

因素	A	B	C
	焊接速度 / (m/min)	激光功率 /W	摆动宽度 /mm
1	4	280	0.4
2	4.5	300	0.5
3	5	320	0.6

表2 正交试验设计方案

序号	试验方案	A	B	C
		焊接速度 / (m/min)	激光功率 /W	摆动宽度 /mm
1	A ₁ B ₁ C ₁	4	280	0.4
2	A ₁ B ₂ C ₂	4	300	0.5
3	A ₁ B ₃ C ₃	4	320	0.6
4	A ₂ B ₁ C ₂	4.5	280	0.5
5	A ₂ B ₂ C ₃	4.5	300	0.6
6	A ₂ B ₃ C ₁	4.5	320	0.4
7	A ₃ B ₁ C ₃	5	280	0.6
8	A ₃ B ₂ C ₁	5	300	0.4
9	A ₃ B ₃ C ₂	5	320	0.5

3 试验结果及分析

3.1 金相分析

在激光焊接工序之后，采用垂直于焊缝方向的线切割技术来获取接头试样，旨在为接头的金相观测制备样本。随后，对样本进行了系统化的处理流程：编号、粗磨、细磨及抛光。处理完毕，利用配比为HCl：HNO₃=3：1的王水溶液对抛光样本实施腐蚀处理，直至样本表面呈现暗灰色，这一过程大致持续1min。腐蚀工序结束后，通过冲洗并吹干样本，借助金相显微镜对经处理的不锈钢激光焊接接头进行微观组织观察与分析。

9组试样的金相组织如图1所示。由图1可知，当激光功率达到280W时，焊接速度与摆动宽度均呈现上升趋势，而熔深与熔宽的变化则相对较小。特别在焊接速度为4m/min的条件下，随着激光功率和摆动宽度的逐渐增加，熔深与熔宽也相应增长。在此情况下，当激光功率设定为320W、摆动宽度为0.6mm时，可成功实现下层板的完全穿透；相比之下，其余样本并未达到穿透状态。

3.2 正交试验结果

表3呈现了各试验编号焊接接头的抗拉力及其极差分析详情。其中，符号K₁、K₂、K₃分别代表因

表3 试验结果及极差分析

序号	A	B	C	接头抗拉力 /kN
	焊接速度 / (m/min)	激光功率 /W	摆动宽度 /mm	
1	4	280	0.4	1.48
2	4	300	0.5	1.65
3	4	320	0.6	1.66
4	4.5	280	0.5	1.19
5	4.5	300	0.6	1.65
6	4.5	320	0.4	1.65
7	5	280	0.6	0.77
8	5	300	0.4	1.65
9	5	320	0.5	1.67
接头抗拉力均值与极差/kN				
	A	B	C	
K ₁	1.59	1.15	1.59	—
K ₂	1.50	1.65	1.65	—
K ₃	1.36	1.66	1.36	—
R	0.23	0.41	0.19	—

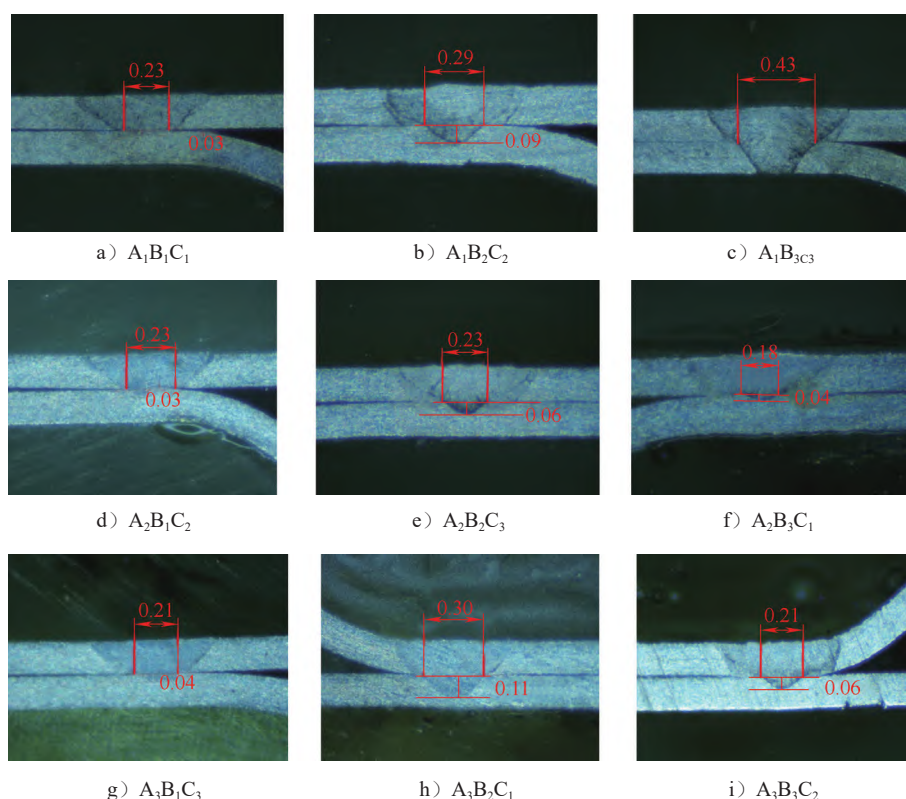


图1 试样的金相组织

素A、B、C在第一、第二、第三水平下的抗拉力均值，而 R 表示极差。由表3的数据解析得出，因素B、A、C对接头强度的影响力依次增强，具体表现为激光功率的调整最为关键，其次为焊接速度，摆动宽度影响最小，最优的工艺条件组合为 $A_3B_3C_1$ （具体设置为焊接速度5m/min、激光功率320W、摆动宽度0.5mm），此条件下可实现剪切力的最大化，确认为最优的工艺参数配置。在激光功率稳定于280W时，观测到抗拉力随着焊接速度的上升而逐渐下降的趋势。然而，当激光功率分别设定为300W、320W并维持恒定时，虽然焊接速度有所增加，但抗拉力的变化则相对微弱，抗拉力数值稳定在1.65kN左右，并且材料的拉伸断裂位置位于母材的热影响区，此区域晶粒结构的变动成为了影响抗拉强度的一个重要因素。

3.3 各因素对焊接接头抗拉力的影响

依据GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》的规定，通过对线切割技术的应用，来制备搭接形式的焊接接头拉伸（剪切）试件。针对每组不同的工艺参数设定，确保制作3件拉伸样件以供剪切拉伸测试，搭接接头拉伸（剪切）试样如图2所示。在测试环节，采用万能材料试验机

进行焊接接头的拉伸（剪切）测试，试验设定加载速率为1mm/min，加载力为10kN。最终，试验结果由3次拉伸（剪切）测试的数据平均值确定^[12]。

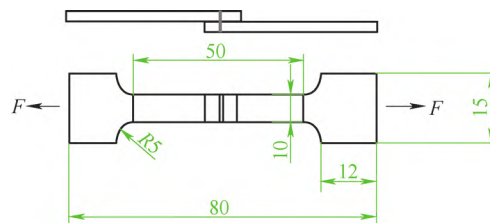


图2 搭接接头拉伸（剪切）试样

为实现直观分析的目的，采取因素的水平数量作为横轴，而各水平下焊接接头的抗拉力平均值则构成纵轴，焊接接头的抗拉力与因素水平的关系如图3所示。从图3可清晰地看出，不同因素水平的变化对试验测量指标产生的效应存在差异性。具体而言，随着激光功率3个设定水平的递增，焊接接头的抗拉力呈现持续上升趋势；相反，当焊接速度逐渐增大时，抗拉力随之减弱，这是由于焊接过程中高速度导致热输入量减少，进而影响到焊接熔池的形成，抗拉力随之降低。摆动宽度的增加，起初抗拉力随其水平提升而有所增高，但随后出现下降趋势。在这3项因素中，激光功率水平的调整对焊接接

头抗拉力影响最为显著,其次为焊接速度,而摆动宽度水平的变化所带来的影响则相对微弱。这一结果表明,在针对0.15mm薄不锈钢片实施的激光叠加焊接工艺中,激光功率成为决定接头抗拉力的主导因素。为判定搭接激光焊接抗拉力与母材抗拉力的大小,对比进行母材拉伸试验,母材拉伸试样与搭接焊接拉伸试样规格相同,母材拉伸断裂的最大抗拉力为1.93kN。搭接接头最大抗拉力为1.67kN,是母材拉伸最大抗拉力的86.5%,大于母材抗拉力的80%。

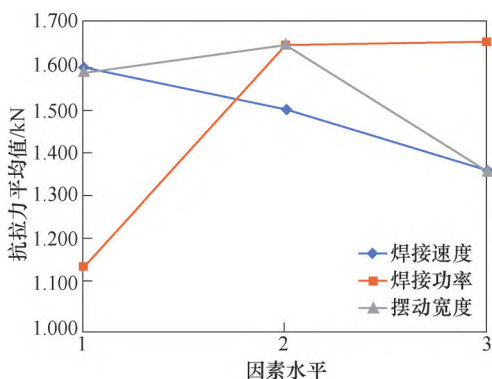


图3 焊接接头的平均抗拉力与因素水平的关系

4 结束语

1) 在对厚度为0.15mm的304不锈钢片实施搭接焊接时,经过试验验证,最为理想的工艺参数配置包括:焊接速度设定为5m/min、激光功率调整至320W,且焊接过程中采取摆动策略,摆动幅度维持在0.5mm。在此条件下,所得焊接接头展现出最高的抗拉力。

2) 通过应用最优工艺参数所制备的激光搭接焊接试样,其抗拉力达到了母材抗拉力的86.5%,近乎逼近母材本身水平。

3) 当激光焊接过程中焊接功率过高时,会造成热量累积,进而引发焊缝烧穿现象;当功率较低时,激光的穿透能力减弱,可能导致焊缝未能充分熔合,甚至与下层板未形成有效连接,这两种情况均会对焊接接头的力学性能产生不利影响,降低其承受载荷能力。

参考文献:

[1] 胡大武, 张桂源, 曹鹏程, 等. 新能源汽车电池包关键连接技术[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (8): 10-13.

[2] 司福建, 时红海, 吴中旺, 等. 电池包箱体的轻量化与连接技术[J]. 汽车工艺师, 2019 (Z1): 34-38.

[3] 刘美娜. 新能源汽车电池包下壳体焊接工艺分析[J]. 汽车工艺与材料, 2018 (12): 37-39.

[4] 胡家乐, 周超群, 王巧玉, 等. 汽车用轻量化材料的研究进展[J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2024, 34 (1): 25-33.

[5] 罗小敏, 任江伟. 脉冲激光焊在薄板中的应用研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (15): 6-9.

[6] 陈玉华, 柯黎明, 徐世龙, 等. 超薄不锈钢片的微激光焊接工艺研究[J]. 材料工程, 2008 (11): 28-31.

[7] 吴晓红. 超薄不锈钢片激光密封性焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2014, 43 (5): 41-43.

[8] 陈银银. 厚度为0.05mm的316不锈钢激光焊接工艺[J]. 精密成形工程, 2021, 13 (5): 187-192.

[9] 王文先, 张亚楠, 崔泽琴, 等. 双面超薄不锈钢复合板激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38 (5): 91-96.

[10] 刘勇, 李刚卿, 王生希, 等. 不锈钢薄板搭接激光软钎焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2023, 44 (4): 45-49.

[11] 伍鹏宇, 唐福农, 裴劲. 正交试验设计方法在工艺方案设计中的应用[J]. 兵工自动化, 2024, 43 (4): 17-20.

[12] 叶庆丰. 超薄奥氏体不锈钢板的激光焊接研究及数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

MW 20241110