

三层板激光搭接接头界面质量的影响因素分析

韩如冰¹, 曹兴华¹, 林皓¹, 王红波¹, 王春明²

1. 中车南京浦镇车辆有限公司 江苏南京 210031

2. 华中科技大学 湖北武汉 430000

摘要: 主要针对1.5mm厚三层X2CrNiN18-7不锈钢板激光搭接焊接过程中激光功率、焊接速度及离焦量对焊缝承载能力的影响进行研究。以激光功率、焊接速度和离焦量为三因素, 进行三因素三水平试验, 以焊缝可承受载荷、焊缝熔深、焊缝表面熔宽及焊缝搭接处熔宽为指标, 研究各工艺参数对焊接质量的影响程度。结果表明: 激光功率、焊接速度和离焦量对焊缝承受载荷能力的影响均比较大, 具体为激光功率>焊接速度>离焦量, 针对焊缝熔宽而言, 影响程度依次为: 离焦量>焊接速度>激光功率。

关键词: 激光焊接; 激光功率; 焊接速度; 离焦量; 承载能力

Analysis of influencing factors of interface quality of laser lap joints of three-layer boards

HAN Rubing¹, CAO Xinghua¹, LIN Hao¹, WANG Hongbo¹, WANG Chunming²

1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu, China

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei, China

Abstract: This paper focuses on the study of the effects of laser power, welding speed and defocusing amount on the weld bearing capacity during laser lap welding of 1.5mm thickness three-layer X2CrNiN18-7 stainless steel plate. Taking laser power, welding speed and defocusing amount as three factors, a three-factor three-level test was carried out to study the degree of influence of each process parameter on the welding quality, taking weld bearing load, weld depth of fusion, weld surface fusion width and fusion width of the weld lap joint as the indexes. The results show that laser power and welding speed, the amount of focus on the ability of the weld to withstand the load of the influence are relatively large, the specific laser power > welding speed > focus, for the weld melt width, the degree of influence in the following order: the amount of focus > welding speed > laser power.

Keywords: laser welding; laser power; welding speed; defocusing volume; load capacity

1 序言

近年来, 随着我国对轨道车辆需求量的进一步增加, 不锈钢车体在制造成本等方面的优势得到进一步重视, 目前我国多数生产制造企业均在使用不锈钢车体。在不锈钢车体焊接工艺方面, 多数企业通常采用熔化极气体保护焊(MIG或MAG)和电阻点焊。其中, 电阻点焊的方式会严重影响车体的美

观, 在车体表面造成严重变形; MAG焊这种方式也存在飞溅、过热等诸多缺陷。而作为高能束焊接的激光焊具有焊接熔深大、激光束能量密度高、焊接速度快等优点。同时, 激光光斑小, 产生宽而深的焊缝, 减小热影响区和晶粒粗大风险, 可提高接头质量; 且激光具有良好的可达性, 可实现其他焊接方式难以到达的焊接位置。因此, 将激光头安装在

机械臂上可实现自动化焊接,非常适合不锈钢列车车体制造。而三层板激光搭接焊接工艺和焊接质量对产品承载能力的影响尤为重要^[1-7]。

2 焊接试验

试验材料采用1.5mm 厚的X2CrNiN18-7不锈钢,试样规格为3500mm×150mm×1.5mm。焊丝为直径1.0mm的308LSi不锈钢焊丝。母材和焊丝化学成分见表1。

试验所采用的设备为IPG YRL-4000光纤激光器,最大功率4kW,激光光束经聚焦后焦长250mm、焦点直径0.3mm、激光波长1.07μm。在焊接试验开始前,对焊接部分进行打磨,去除氧化物,然后使用丙酮擦拭试样,清除表面的油污和杂质。在焊后获取金相组织时,采用的腐蚀液为:10%HF+20%HNO₃+70%H₂O。在焊接过程中,主要工艺参数包括离焦量、焊接速度和焊接功率,它们对焊缝形貌和性能具有重要影响。因此,这里主要通过调节以上焊接参数进行试验。

表1 材料的化学成分(质量成分) (%)

材料型号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo
X2CrNiN18-7 (SUS301LN)	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.045	≤ 0.015	16.5 ~ 18.5	9.0 ~ 8.0	0.1 ~ 0.2	0.8 ~ 1.0
308LSi (G199LSi)	≤ 0.03	0.65 ~ 1.2	1.0 ~ 2.5	≤ 0.03	≤ 0.03	19 ~ 21	9.0 ~ 11.0	—	≤ 0.5

3 试验结果与分析

在三层板激光搭接焊试验中,在保持气体保护(纯氩99.99%)、装配间隙(0mm)和激光倾角(0°)不变的条件下,通过比较不同激光功率、焊接速度和离焦量的影响,评估接头的焊接质量。结果表明,在这些参数变化的情况下,基本上获得了良好的焊接效果,并发现了一些规律。以下着重分析激光功率、焊接速度及离焦量对焊接质量的影响。

3.1 功率对焊接质量的影响

试验设置激光功率为3250W、3500W、3750W、4000W。焊接速度为3.0m/min,离焦量为+4mm。不同激光功率下的焊缝横截面形貌如图1所示。当激光功率为3250W、3500W时,第三层板没有形成搭接焊缝;当激光功率为3750W、4000W时,形成了搭接焊缝,焊缝成形均匀,没有任何缺陷。

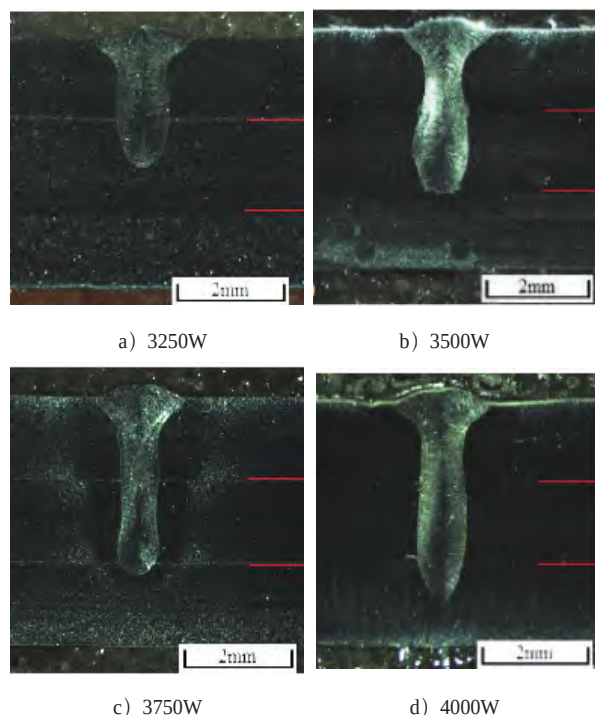
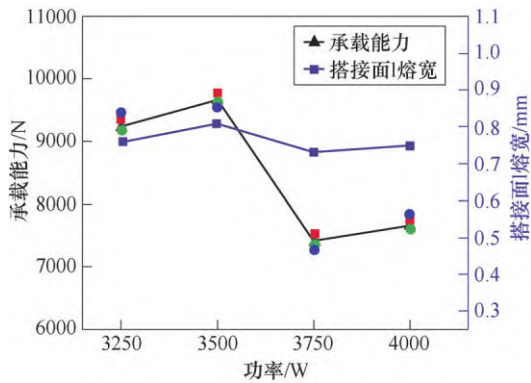


图1 激光功率对焊缝截面形貌的影响

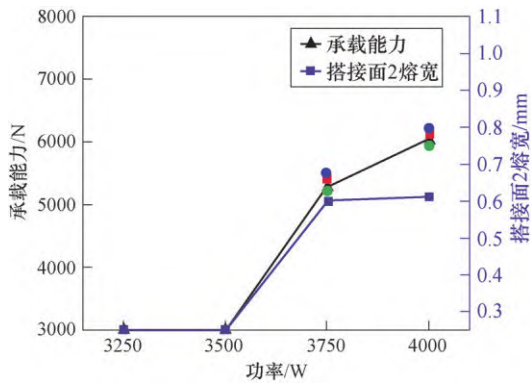
不同激光功率下的焊缝拉伸结果为三层板搭接焊缝分为上下两层焊缝,焊接的关键点在于第三层板的连接情况。搭接焊缝可承受载荷及焊缝搭接处熔宽随激光功率变化的曲线如图2所示。由图2可知,两条曲线的变化趋势呈现出一定的关联性。焊缝可承受载荷随激光功率的变化规律与焊缝搭接处熔宽随激光功率的变化规律大致相同。这是因为搭接焊缝在承受拉伸载荷时,在搭接面转化为剪切载荷,剪切面越宽,则焊缝承受载荷的能力越强。

搭接面1的承载能力随功率的增大有减小趋势,这是因为在不锈钢的激光焊接焊缝中,焊缝的下端存在一个轮廓线近似椭圆弧的区域(见图3),因此在焊缝下端有一个熔宽最大的位置,定义为WMAX位置,当搭接面在这个位置时,焊缝承受剪切载荷的面积越大,则焊缝承载能力越强。搭接面2的承载能力随功率的增大而增大。当功率设定<3500W时,第三层板没有形成焊缝;当功率设定为3750W时,第三层板形成焊缝,但熔深较浅;当功率设定为4000W时,第三层才形成可靠的焊缝,且焊缝的承载能力也相对较大。

激光功率对焊缝熔深、熔宽的影响曲线如图4所示。当激光功率增大时,焊缝热输入增大,焊缝熔深随功率的增加而增加。总体上来看,焊缝熔宽随



a) 搭接面1 (上搭接面)



b) 搭接面2 (下搭接面)

图2 激光功率对焊缝承载能力的影响

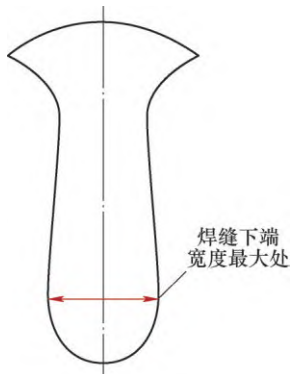


图3 焊缝横截面示意

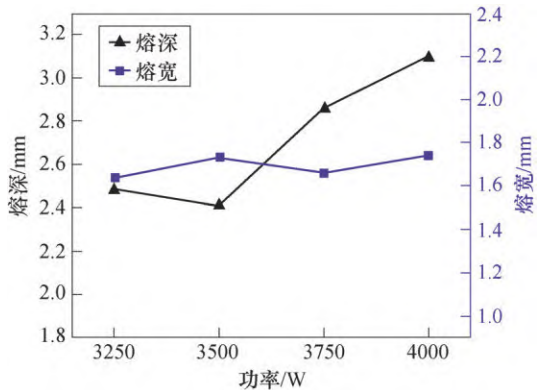


图4 激光功率对焊缝熔宽、熔深的影响

焊接功率变化规律不明显,功率的变化对其影响不大。不同激光功率下的焊缝承载能力及搭接处熔宽见表2。

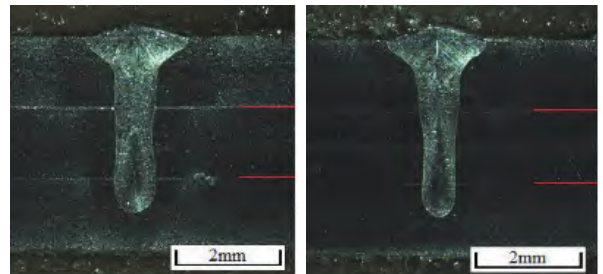
表2 不同激光功率下焊接试样承载能力及搭接处熔宽

激光功率 /W	承载能力/N		焊缝熔宽 /mm		焊缝熔深 /mm
	搭接面1	搭接面2	搭接面1	搭接面2	
3250	9260	0	0.76	0	2.49
2500	9668	0	0.81	0	2.41
3750	7403	5270	0.73	0.60	2.86
4000	7658	6037	0.75	0.60	3.10

3.2 速度对焊接质量的影响

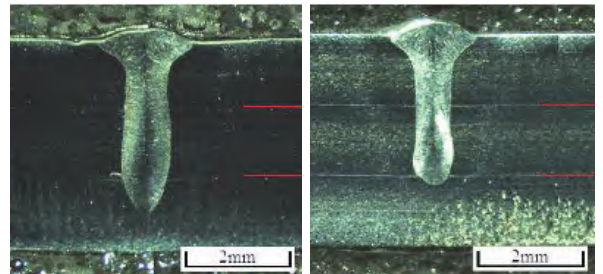
试验设置焊接速度为2.4m/min、2.7m/min、3.0m/min、3.3m/min、3.6m/min。激光功率4000W,离焦量+4mm。

不同焊接速度下的焊缝表面形貌如图5所示。由图5可知,在试验设定的焊接速度范围内,焊缝表面成形均较好。当焊接速度为2.4m/min时,搭接焊缝背面纹路比较深,焊缝背面的条纹随着焊接速度的增加而减小。在焊接速度达到3.3m/min时,搭接焊缝背面纹路消失,外观印痕减轻。当焊接速度为3.6m/min时,未能形成三层搭接焊缝。



a) 2.4m/min

b) 2.7m/min



c) 3.0m/min

d) 3.3m/min

图5 焊接速度对焊缝形貌的影响

焊接速度对焊缝承载能力和搭接处熔宽的影响如图6所示。由图6可知,两曲线表现出一定的相关性,具体数值见表3。焊接速度的改变会导致焊缝横截面形貌的改变,因而会使上层搭接面熔宽发生变

化,因而导致了搭接面1的承载能力随焊接速度的变化而变化,其变化规律如图6a所示。当焊接速度超过3.3m/min时,熔深减小到逐渐不能形成三层搭接焊缝。

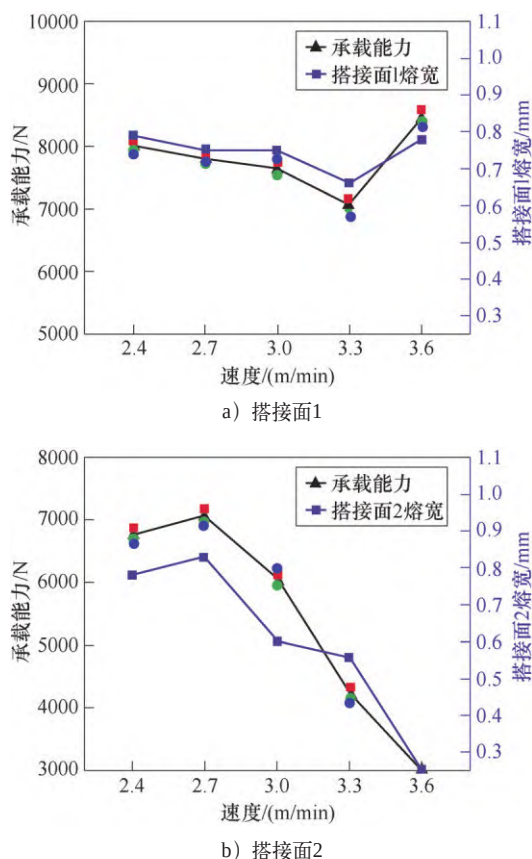


图6 焊接速度对焊缝承载能力和搭接处熔宽的影响

表3 不同激光功率下焊接试样可承受载荷及焊缝搭接处熔宽

焊接速度 /(m/min)	承受载荷/N		焊缝熔宽/mm	
	搭接面1	搭接面2	搭接面1	搭接面2
2.4	8015	6757	0.79	0.78
2.7	7808	7045	0.75	0.83
3.0	7658	6037	0.66	0.6
3.3	7043	4257	0.65	0.56
3.6	8458	0	0.78	0

焊接速度对焊缝熔深、熔宽的影响如图7所示。由图7可知,随着焊接速度的增加,热输入减小,焊缝熔深减小。焊缝熔宽随焊接速度的变化程度比熔深的变化小,总体趋势上,熔宽焊接速度的增加而减小。

当焊接速度较低时,激光的功率密度较高,穿透能力增强,导致能量主要聚集在中下板甚至下板上,因此搭接面2熔宽小于搭接面1熔宽。随着焊接速度的增加,功率密度减小,能量集中位置向上移

动,因此当有效焊接速度在2.4~3.3m/min内,搭接面2熔宽先增大后减小,而搭接面1熔宽则持续减小。

焊接速度对焊缝熔宽的影响非常重要,随着焊接速度的增加,焊缝熔宽呈明显下降趋势。但焊接速度为2.7~3.0m/min时,焊接速度的明显增加导致熔宽减小。当焊接速度达到3.0~3.3m/min时,熔宽的变化趋于缓慢。过小的熔宽不利于填充金属熔化以填补板件间的间隙。因此,选择3.0~3.3m/min的焊接速度最为适宜,可获得较大的熔宽。

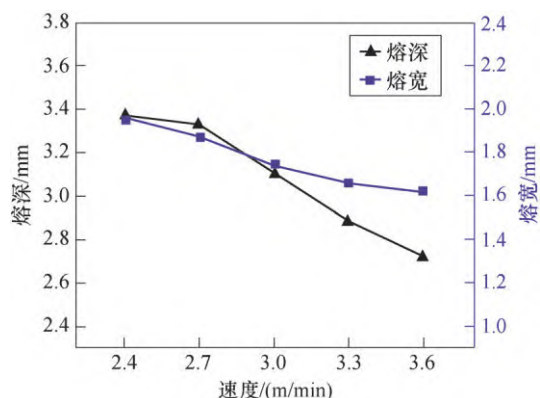


图7 焊接速度对焊缝熔深、熔宽的影响

3.3 离焦量对焊接质量的影响

试验设置离焦量为-4mm、-2mm、0mm、+2mm、+4mm,激光功率为4000W,焊接速度为3.0m/min。在设定的不同离焦量下焊缝表面成形均良好,且均形成了搭接焊缝,在离焦量为+4mm时,焊缝表面不仅成形稳定,而且没有出现任何飞溅缺陷。

离焦量对焊缝承载能力及焊缝搭接面熔宽的影响如图8所示。由图8可知,不同离焦量下的焊缝承载能力及搭接处熔宽见表4。整体上来看,当激光为负离焦时,搭接面2承载能力较低,而零离焦和正离焦时焊缝的承载能力要比负离焦时大一些。这是因为在焊缝正离焦时,有利于焊缝在搭接处得到更大的熔宽,进而提高焊缝的承载能力。下层搭接面的承载能力呈现出类似的规律。

离焦量对焊缝熔深、熔宽的影响如图9所示。由图9可知,焊缝熔深呈现出随离焦量的绝对值增大而减小的趋势,熔深在光斑离焦时相对较小,而零离焦时熔深相对较大。焊缝熔宽的变化呈现出与熔深的变化相反的趋势,当离焦量绝对值较小时,焊缝熔宽较小。

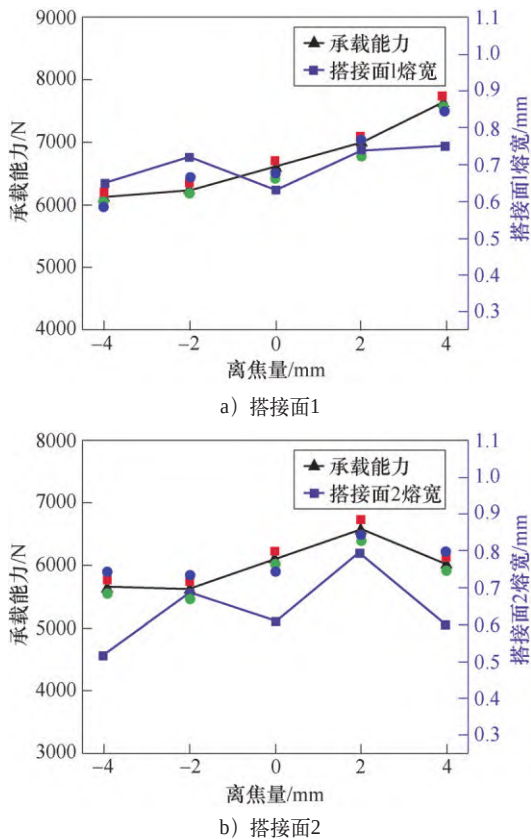


图8 离焦量对焊缝承载能力及焊缝搭接面熔宽的影响

表4 不同离焦量下焊接试样的承载能力及搭接面熔宽

离焦量 /mm	承载能力/N		熔宽/mm	
	搭接面1	搭接面2	搭接面1	搭接面2
-4	6123	5668	0.65	0.52
-2	6245	5360	0.72	0.69
0	6603	6042	0.63	0.61
+2	6980	6592	0.74	0.80
+4	7658	6037	0.65	0.60

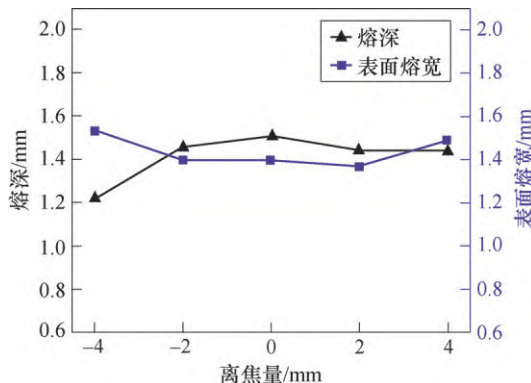


图9 离焦量对焊缝熔深、熔宽的影响

4 结束语

1) 通过调整工艺参数,在焊接速度为3.0~3.3m/min、焊接功率为3750~4000W时,成功实现了三层板的激光搭接焊接。在这个范围内获得了表

面形貌良好、内部无明显缺陷的焊缝。

2) 搭接面焊缝熔宽与焊接速度的关系呈现出一定的规律性。随着焊接速度(焊接速度在2.4~3.3m/min之间)增大,功率密度减小,能量集中位置向上移动,导致搭接面2熔宽先增大后减小,而搭接面1熔宽则持续减小。

3) 在现有研究成果的基础上对焊接速度、熔宽、结合层宽度和焊接功率对焊缝熔深的影响规律作了进一步研究,发现焊接功率对焊缝熔深的影响更为显著,而焊接速度则更显著地影响焊缝熔宽和结合层宽度。

4) 焊缝熔深随激光功率的增加而增加,激光功率对焊缝表面熔宽的影响比较小。焊缝承载能力随激光功率的变化规律与搭接面熔宽随激光功率的变化规律大致相同。

5) 随着焊接速度的增加,焊缝熔深和熔宽减小。焊接速度的改变造成焊缝承载能力的剧烈变化是由于焊缝截面形貌的改变决定的。

6) 激光功率和焊接速度对焊缝抗拉强度的影响远比离焦量大,因此在后面的试验中,着重考查激光功率和焊接速度对焊接质量的影响。正离焦有利于提高搭接焊缝承载能力,且成形较好。

7) 三层板焊接时对焊缝熔宽而言,三因素影响程度依次为:离焦量>焊接速度>激光功率。

参考文献:

- [1] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 汪健坤, 李强, 黄磊, 等. 激光焊接技术最新研究进展及应用现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 4-10.
- [3] 李力钧. 现代激光加工及其装备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [4] 曾凡. 吉帕级高强钢激光焊接接头组织及性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(10): 31-35.
- [5] 梁雪平, 苏世怀. 汽车拼板的激光焊接[J]. 钢铁钎焊, 1996, 17(4): 63-69.
- [6] XIONG J G, HU L J, LIU J H, et al. Study on laser welding of zinc coated steel and the effects of zinc vaporization[J]. Laser Technology, 1998, 22(1): 26-29.
- [7] 熊建钢, 胡伦骥, 刘建华, 等. 镀锌板激光焊接工艺及锌行为研究[J]. 激光技术, 1998(1): 27-30.

MW 20240525