不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊接头性能研究

杨智 赵永宏 伍文勇 岳双成

（广州汽车集团股份有限公司，广州 511434）

摘要：为研究镀锌钢板不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊接头性能，分别设置厚度为0.7 mm与2.5 mm的大料厚比镀锌板搭接组合和0.7 mm的3层镀锌薄板组合进行试验。每种搭接组合分别设置电阻点焊及螺旋轨迹直径分别为6 mm、8 mm的螺旋点焊3组试验。焊接完成后，从各焊接接头的外观、金相组织、抗剪切力学性能等方面进行分析，研究不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊焊点接头的差异性。试验表明，激光螺旋点焊的外观质量较差，不同螺旋轨迹直径的激光焊点接头外观质量差异性不大；但随着激光螺旋轨迹直径增大，焊点接头的抗剪切力与吸能效果有明显增强，可见，螺旋轨迹直径对焊点接头的力学性能有较大的影响。对比电阻点焊，激光螺旋点焊在塑性变形能力及吸能性能上更优秀。

关键词：激光螺旋点焊 螺旋轨迹直径 大料厚比搭接 电阻点焊 镀锌钢板

中图分类号：TG456.7 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250197

Investigation on Properties of Laser Spiral Spot Welded Joints with Different Spiral Trajectory Diameters

Yang Zhi, Zhao Yonghong, Wu Wenyong, Yue Shuangcheng

(The Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., GuangZhou 511434)

Abstract: To investigate the properties of laser spiral spot welded joints of galvanized steel sheets with different spiral trajectory diameters, experiments were carried out on two lap joint configurations: a 0.7 mm and 2.5 mm large thickness ratio lap joint of galvanized steel sheets, and a three-layer thin galvanized steel sheet assembly with a thickness of 0.7 mm. For each configuration, three groups of tests were designed, including resistance spot welding and laser spiral spot welding with spiral trajectory diameters of 6 mm and 8 mm, respectively. After welding, the welded joints were analyzed from the perspectives of macro-appearance, metallographic microstructure and shear mechanical properties, so as to study the differences of laser spiral spot welded joints under different spiral diameters. The results show that the surface quality of laser spiral spot welded joints is relatively poor, and there is no significant difference in the surface quality of laser spot welded joints with different spiral trajectory diameters. However, the shear resistance and energy absorption capacity of the welded joints are significantly enhanced with the increase of laser spiral trajectory diameter, which proves that the spiral trajectory diameter has a great influence on the mechanical properties of the welded joints. Compared with resistance spot welding, laser spiral spot welding is superior in plastic deformation capacity and energy absorption performance.

Key words: Laser spiral spot welding, Spiral trajectory diameter, Large thickness ratio lap joint, Resistance spot welding, Galvanized steel sheet

1 前言

新能源汽车对车身轻量化的需求促进了先进材料及连接技术的发展[1]。现阶段，最常用的车身连接技术是电阻点焊，该技术在生产效率、夹具设计方面存在明显不足，采用接触电极焊接，针对不同的连接区域，其结构设计和集合轮廓需与焊接夹具相配合，存在明显的可达性问

作者简介：杨智（1993—），男，学士学位，研究方向为车身试制及改制技术，车身连接工艺等。

参考文献引用格式：

杨智，赵永宏，伍文勇，等．不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊接头性能研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(3): 41-46.

YANG Z, ZHAO Y H, WU W Y, et al. Investigation on Properties of Laser Spiral Spot Welded Joints with Different Spiral Trajectory Diameters[J]. Automobile Technology & Material, 2026(3): 41-46.

题[2-3]。激光螺旋点焊技术是一种新型非接触式连接技术，具备焊接速度快、单面焊接、焊接变形小等优点，结合车身结构优化，可在车身轻量化方面发挥重要作用[1]。激光螺旋点焊的典型应用场景为车身前、后门洞。采用传统的点焊工艺焊接时，四门门洞止口边宽度通常为12~16 mm，采用激光螺旋点焊工艺后，其宽度可减至6~8 mm。

国内外学者在激光螺旋点焊方面开展了大量研究。张博[4]对低碳钢的激光螺旋点焊接头的抗剪性能进行了研究，结果表明，低碳钢激光螺旋点焊的抗剪性能完全可以达到工业应用对电阻点焊的要求，且激光焊接更具优势。任逸群[5]对镀锌钢板激光螺旋点焊工艺、组织和焊点性能进行了研究，并得到了镀锌钢板激光螺旋点焊可靠的工艺窗口。陈树君等[6]将电阻点焊与激光螺旋点焊2种工艺结合，应用于热冲压高强钢焊接，得到了可靠的热冲压高强钢焊接接头。

各类研究主要集中在不同材料的激光焊接性能，对于激光螺旋点焊的螺旋轨迹直径（螺旋轨迹直径是指激光的扫描外径）的研究较少，本文研究了不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊焊接接头的性能，并与电阻点焊进行对比，探究激光螺旋点焊替代电阻点焊的可能性。

2 试验方法

2.1 试验材料

本文的试验工况为：0.7 mm与2.5 mm大料厚比镀锌板工况，3层0.7 mm镀锌薄板工况。各焊接工况分别设置电阻点焊及6 mm、8 mm螺旋轨迹直径的螺旋点焊3组对比工况，通过对比各焊接工况焊点的表面特征、金相组织及力学性能等，探究不同螺旋轨迹直径下激光螺旋点焊接头性能的差异，同时与电阻点焊进行对比。各工况编号及材料详细情况如表1所示。

表1 工况编号及材料详情

序号	材料1		材料2		材料3		备注
	牌号	厚度/mm	牌号	厚度/mm	牌号	厚度/mm	
2T-1	GC53D+ZF	0.7	SAPH590+ZF	2.5			电阻点焊
2T-2	GC53D+ZF	0.7	SAPH590+ZF	2.5			6 mm螺旋轨迹直径
2T-3	GC53D+ZF	0.7	SAPH590+ZF	2.5			8 mm螺旋轨迹直径
3T-1	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	电阻点焊
3T-2	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	6 mm螺旋轨迹直径
3T-3	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	GC53D+ZF	0.7	8 mm螺旋轨迹直径

试验使用的材料牌号分别为GC53D+ZF、SAPH590+ZF，2种材料的参数信息如表2所示。

表2 材料参数

材料牌号	元素质量分数/%			力学性能/MPa	
	C	Mn	Al	屈服强度	抗拉强度
GC53D+ZF	≤0.08	≤0.4	≥0.2	120~210	≥270
SAPH590+ZF	≤018	≤2	≥0.01	640~790	≥590

2.2 焊接接头设计

各工况的焊接试片均采取搭接接头设计。任逸群等研究表明，激光螺旋点焊对板材之间的间隙较为敏感，在板间间隙为0.2~0.3 mm时能够获得良好的焊接接头，板材之间没有间隙时，焊接效果反而不太理想，因此，在设计焊接接头时，需依据焊接设备设计适当的边距搭接量、搭接间隙等条件。在焊接前，对板材表面进行打磨清洁。试验所采用的接头形式如图1所示。其中，2T-1至2T-3工况各板材之间间隙设为0 mm，3T-1至3T-3工况各板材之间间隙设为0.2 mm。

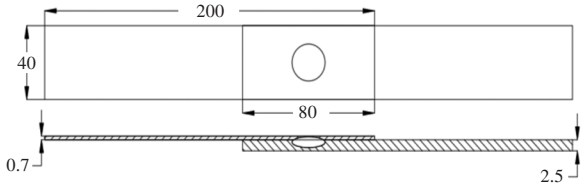


图1 焊接试片接头示意

2.3 试验设备

试验所采用的的激光焊接设备为松下5 kW的YL-F40AA2半导体激光发生器和WSLDU00011ZZ的2D远程激光焊接头。电阻点焊焊接设备为小

原工频点焊机,型号为PTB-ST21系列。

2.4 焊接参数

激光螺旋点焊的焊接轨迹对焊接效果有重要影响。试验采用间距相等的阿基米德螺旋线,激光束由内向外沿预设的螺旋线焊接,最终形成预设直径的焊点,其焊接轨迹如图2所示。

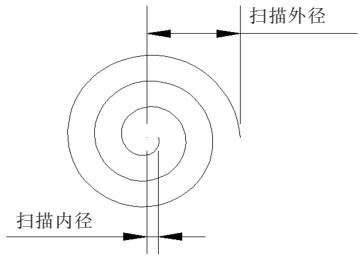


图2　激光轨迹示意(扫描外径即螺旋轨迹直径)

激光螺旋点焊的主要焊接参数有激光功率、焊接速度、光斑直径、焦距螺旋间距、扫描内径、扫描外径(即螺旋轨迹直径)。电阻点焊的焊接参数主要有焊接电流、焊接压力、焊接时间。通过试验选取合适的焊接参数,最终确认焊接工况的焊接参数如表3、表4所示。

表3　电阻点焊焊接参数

编号	间隙/mm	焊接电流/kA	焊接压力/kN	焊接时间/ms	电极头端面直径/mm
2T-1	0	8.5	3.5	460	6.4
3T-1	0.2	9.0	2.6	300	6.4

表4　激光螺旋点焊焊接参数

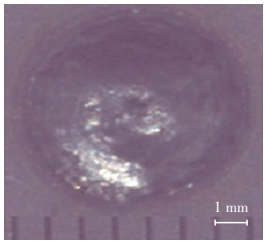
编号	间隙/mm	光斑直径/mm	焦距/mm	激光输出功率/kW	焊接速度/m·min^{-1}	扫描内径R_0/mm	扫描外径R/mm	螺旋间距/mm
2T-2	0	0.54	460	4.2	5	0	3	0.6
2T-3	0	0.54	460	4.2	5	0	4	0.6
3T-2	0.2	0.54	460	3	4	0.5	3	0.9
3T-3	0.2	0.54	460	3	4	0.5	4	0.9

3 试验结果与分析

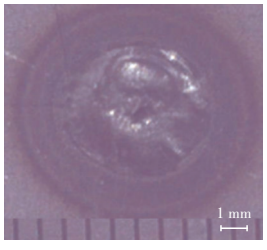
3.1 焊点成型

当激光照射在焊接试片表面时,激光借助高度集中的能量,首先使上层金属开始熔化,形成熔池,并开始出现匙孔,随着激光轨迹逐渐向外扩散,熔池不断扩散,并继续熔化下一层金属;当受热产生的金属蒸气与液态金属的重力、表面张力平衡后,中间形成匙孔,并停止扩散深入。激光停止照射后,熔池内的液态金属冷却,形成焊点。

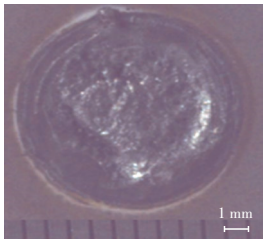
各焊点的表面状态如图3所示。从焊点表面状态来看,焊接大料厚比的两层板工况时,螺旋轨迹直径对外观有影响。由图3可知:2T-2表面较为粗糙,焊点表面塌陷明显,焊接过程形成的匙孔清晰可见,同时伴有较为严重的烧蚀[7];2T-3工况的焊点表面平整,焊点凹坑较浅,外观状态明显好于2T-2工况。焊接三层薄板工况时,螺旋轨迹直径对外观质量的影响不大,3T-2与3T-3工况焊点表面均出现明显激光运行轨迹,表面较为粗糙,塌陷迹象较为明显,外观状态较差。



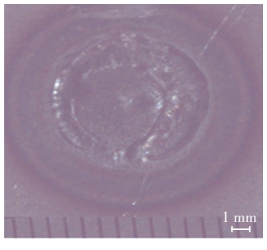
(a)2T-2正面



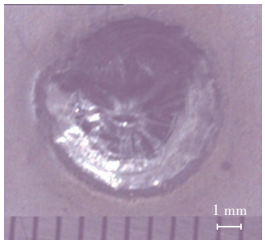
(b)2T-2反面



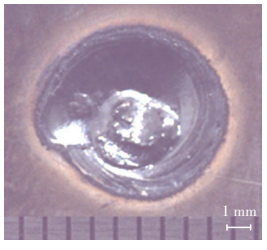
(c)2T-3正面



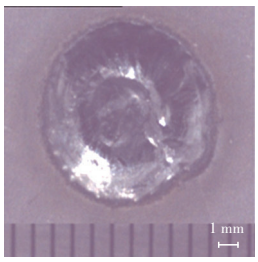
(d)2T-3反面



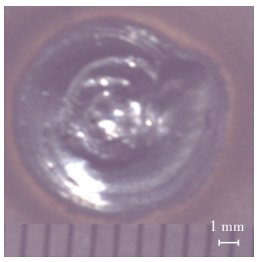
(e)3T-2正面



(f)3T-2反面



(g)3T-3正面



(h)3T-3反面

图3 各工况焊点表面状态

焊核直径是焊接接头的重要评价指标,各焊点的焊核直径如表5所示。

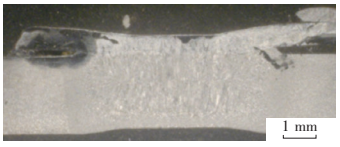
表5 各工况焊点直径

编号	最小直径要求/mm	实测直径/mm
2T-1	4.3	4.3
2T-2	4.3	6.1
2T-3	4.3	9.1
3T-1	4.3	5.4
3T-2	4.3	7.0
3T-3	4.3	8.1

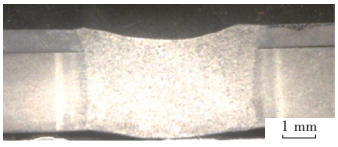
激光螺旋点焊的螺旋轨迹直径设置为6 mm、8 mm,但其光斑覆盖面积略大于设计直径,因此激光螺旋点焊焊点直径通常偏大;常规电阻焊的电极帽端面直径通常为6~6.4 mm,由于其尺寸的限制,焊接薄板时,电阻点焊的焊核直径通常不会超过6 mm。在2层板试验工况中,2T-2工况、2T-3工况焊点的实测直径分别为6.1 mm,9.1 mm,均超过所要求的最小直径以及电阻点焊直径(4.3 mm);2T-3工况的焊核直径达到9.1 mm,是由于焊接时间长、熔池扩散导致,但其表面状态良好。在3层薄板试验工况中,3T-2工况、3T-3工况的焊点实际直径分别为7.0 mm、8.1 mm,均满足最小直径要求。对比电阻点焊,激光螺旋点焊工艺的焊核直径可以通过调节螺旋轨迹直径来调节,依据实际需求进行调整,具有明显的优势。

3.2 金相分析

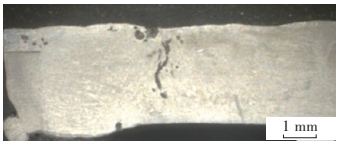
如图4所示为各工况焊点金相全貌。在2T-2工况中,焊点存在明显的凹陷,这是由于激光焊接时,熔池内的液态金属由于重力作用向下掉落所致,其最大凹陷深度为0.4 mm;2T-3工况焊点表面平整,几乎没有凹陷,但是中间出现明显的气孔。这是由于镀锌板中的锌金属受热变成锌蒸气,在焊接过程中,锌蒸气无法有效排出,而在内部形成气孔。3T-2与3T-3试片表面均出现明显的凹陷,其最大凹陷均为深度0.5 mm,中间未发现明显的气孔。



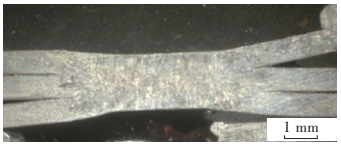
(a)2T-1



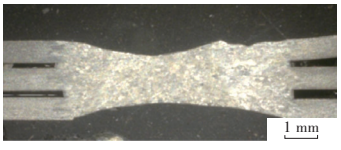
b)2T-2



(c)2T-3



(d)3T-1



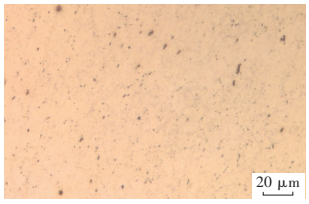
(e)3T-2



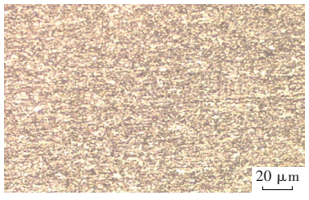
(f)3T-3

图4 各工况焊点金相全貌

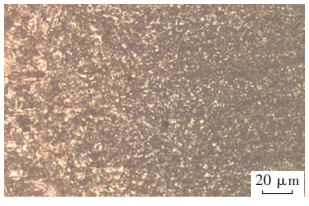
如图5所示为2层板工况焊点的金相组织图。母材1为GC53D+ZF,其显微组织为铁素体与少量珠光体。母材2为SAPH590+ZF,其显微组织为铁素体和细小分散的珠光体。可以看出,经过激光焊接后,两层板工况中,母材2的热影响区在热循环的作用下珠光体分解,铁素体组织晶粒明显长大。焊缝中心在激光的搅动下,出现了大量的粗大的等轴晶。焊缝组织为粗大的先共析铁素体和魏氏体组织。



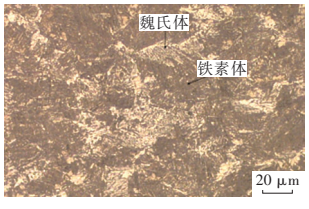
(a)母材1



(b)母材2



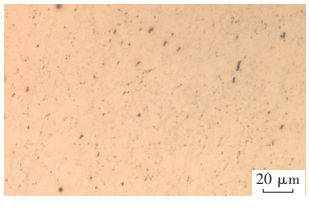
(c)焊缝与母材2交界区



(d)焊缝

图5　2层板试验工况焊点金相组织

如图6所示为3层板工况焊点的金相组织,3层板工况焊缝组织均为粗大的铁素体和弥散分布的碳化物颗粒。焊点中心出现了大量尺寸较小的铁素体,而在焊核两侧,靠近钣金外表面一侧是粗大的铁素体组织。



(a)母材

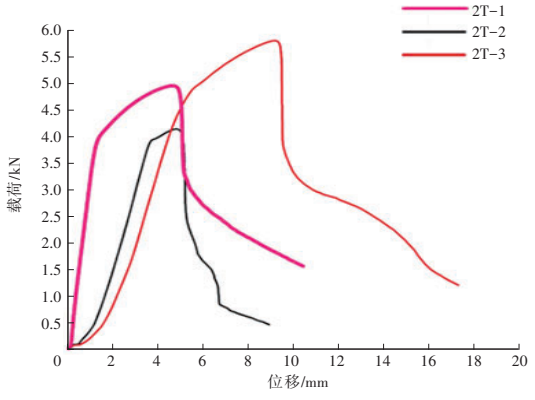


(b)母材与焊缝交界区

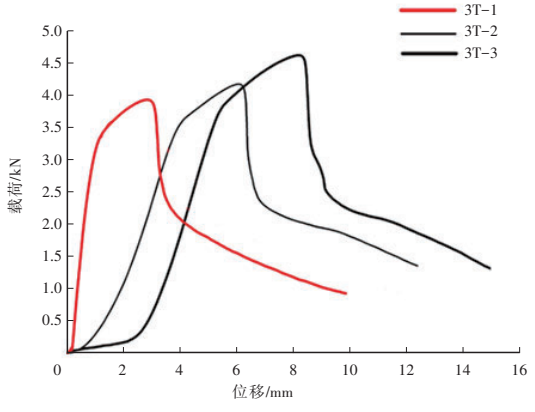
图6　3层板试验工况焊点金相组织

3.3　力学性能分析

对各焊接工况进行了准静态抗拉剪切试验,用于分析各工况的剪切力学特性。设置设备的加载速度为10 mm/min。各工况的位移-载荷曲线如图7所示。



(a)2层板工况



(b)3层板工况

图7　各工况抗拉剪试样位移-载荷曲线

在2层板焊接试验中,电阻点焊2T-1工况的最大抗剪切力为4 967 N,略高于激光螺旋点焊2T-2工况(4 145 N),2T-3工况的最大抗剪切力最大,为5 812 N。在3层板试验中,激光螺旋点焊工况的最大抗剪切力均大于电阻点焊工况,其中,3T-3工况的最大抗剪切力最大,为4 638 N,由此可见,激光螺旋点焊焊点的抗剪切性能与电阻点焊相当,增大激光螺旋点焊的螺旋轨迹直径,能够显著提升焊点的抗剪切性能。

由图7可知,激光螺旋点焊焊点达到最大抗剪切力时的位移明显比电阻点焊的位移更大;在3层板试验中,3T-2与3T-3工况达到最大抗剪切力时的位移分别为6.06 mm、8.18 mm,明显大于3T-1工况。可见激光螺旋点焊在发生塑性变形的能力与

吸收拉伸能量均优于电阻点焊。

各工况拉伸撕裂情况如图8所示，激光螺旋点焊接头均为母材撕裂，焊点呈现出撕裂型断裂，该撕裂形式吸能效果最好。



(a)2T-2



(b)2T-3



(c)3T-2



(d)3T-3

图8 各工况拉伸撕裂试样

4 结论

a. 激光螺旋点焊通常伴有烧蚀、塌陷等表面缺陷，对比电阻点焊，其表面质量较差；激光螺旋点焊的螺旋轨迹直径对焊点外观质量影响不明显。

b. 螺旋轨迹直径为6 mm时，激光螺旋点焊焊点的抗剪切性能与电阻点焊相当，当螺旋轨迹直径增大至8 mm时，其抗剪切性能显著增强。

c. 激光螺旋点焊焊点达到最大抗剪切力时，所发生的位移比电阻点焊大，其塑性变形能力与吸能性能均优于电阻点焊，且随着螺旋轨迹直径的增加，其效果更加明显。

参考文献

[1] 张伟. 第三代高强钢激光点焊接头形成机理及断裂行为研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.

[2] DENG S, WANG H P, LU F, et al. Investigation of Spatter Occurrence in Remote Laser Spiral Welding of Zinc-Coated Steels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer Transfer, 2019, 140: 269-280.

[3] 汤贵庭. 镁/钢异种金属电阻点焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 225-228.

[4] 张博. 低碳钢激光点焊工艺特性与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[5] 任逸群. 镀锌钢板激光螺旋点焊工艺与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[6] 陈树军, 王超, 郝素锋, 等. 热冲压高强钢+激光组合点焊工艺[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 6-8.

[7] 周斌, 陈捷狮, 张扬, 等. 激光螺旋点焊和电阻焊DC06镀锌钢接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(6): 41-49.

AT&M