基于单模激光器的铝/钢异种金属薄板焊接工艺

朱江，葛金波，张生庭，潘锋彩
欣旺达动力科技股份有限公司　广东深圳　518107

摘要：以1060铝、SPCC镀镍钢为母材，基于铝上钢下焊接结构，研究了激光器类型、焊缝轨迹、螺旋点外径对铝/钢异种金属焊接性能的影响。结果表明：相对多模激光器、脉冲激光器，14μm单模激光器可以实现铝/钢之间的有效焊接，焊接热量集中、焊缝热影响区小，铝/钢界面结合良好。六螺旋点焊接轨迹可以实现铝/钢的有效深熔焊接（熔深＞0.25mm）。连续圆弧焊接轨迹的熔池凹陷严重，焊缝内部存在裂纹；六螺旋点轨迹获得的焊缝外观良好，熔深稳定，未见明显裂纹，且焊缝剪切力高于半圆弧轨迹焊接。随着螺旋点外径的增加，六螺旋点焊接轨迹得到的焊缝熔深增加，但力学性能先增加后降低。当螺旋点外径为3.0mm时，熔深为0.326mm，焊缝剪切力和剥离力达到相对最大值。综上可知，单模激光器下的多螺旋点焊接工艺可以实现铝/钢异种金属薄板的良好连接。

关键词：异种金属焊接；铝/钢薄板；激光焊接；单模激光器；焊接轨迹

Welding process of aluminum/steel dissimilar metal sheet based on single mode laser

ZHU Jiang, GE Jinbo, ZHANG Shengting, PAN Fengcai
Sunwoda Mobility Energy Technology Co., Ltd., Shenzhen 518107, Guangdong, China

Abstract: Using 1060 aluminum and SPCC nickel-plated steel as base materials, the effects of laser type, weld trajectory and outer diameter of spiral point on the welding performance of aluminum/steel dissimilar metals were studied based on the welding structure of aluminum on steel. The results show that compared with multi-mode laser and pulse laser, 14μm single-mode laser can realize effective welding between aluminum and steel, with concentrated welding heat, small weld heat affected zone and good bonding between aluminum and steel interface. The six-spot welding trajectory enables effective deep penetration welding of aluminum/steel (penetration > 0.25mm). The weld pool of the continuous arc welding trajectory is seriously depressed and there are cracks in the weld. The weld obtained by the six-spot trajectory has good appearance, stable penetration and no obvious cracks, and the shear force of the weld is higher than that of the arc welding trajectory. With the increase of outer diameter of spiral point, the weld penetration depth obtained by the six-spot trajectory increases, but the mechanical properties first increase and then decrease. When the outer diameter of spiral point is 3mm, the melting depth is 0.326mm, and the shear force and stripping force of the weld reach the maximum value. In summary, it can be seen that the multi-spot welding process under the single mode laser can realize the good connection of aluminum/steel dissimilar metal sheet.

Keywords: dissimilar metals welding; aluminum/steel sheet; laser welding; single mode laser; welding trajectory

1 序言

作为新能源汽车的主要动力源，动力电池的发展正向着主动安全、高倍率充放电、超长续航的方向迈进。圆柱电池能量密度高、体积利用率大、安全性好、制造成本低，是应用最广泛的动力电池之一。圆柱电池的生产涉及到铜、铝、钢等多种金属材料之间的焊接成形[1, 2]，其中铝/钢异种材料之间的焊接应用较为广泛。由于熔点、热导率、延展性等物化性质差异大，铝/钢在焊缝界面极易生成硬脆FeAl金属间化合物，严重影响焊接质量的稳定和电池的安全性能[3]。

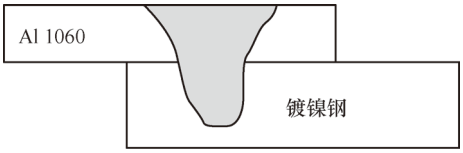
目前，铝/钢常用的焊接方法主要包括电弧熔钎焊、电阻点焊、搅拌摩擦焊和激光焊[4-6]。前3种焊接方法由于焊接热输入较大、热量集中度低，对铝/钢界面脆性相抑制的效果不明显，焊缝质量不稳定，且生产速度相对较低。激光焊具有能量密度高、热量集中、热影响区小、焊缝深宽比大、焊接应力与变形小等优点[1]，特别适用于铝/钢异种金属之间的焊接。为了实现铝/钢之间的良好过渡，常采用预置中间涂层[7-9]或过渡粉末[10, 11]（Ni、Cu、Zn、Mn等）的方式进行铝/钢焊接。王刚等[7]分别研究了Ni 箔、预置Si 粉的Ni 箔中间层对铝/钢异种金属激光焊接的影响。结果表明，Si 粉的添加增加了熔池的流动性，改变了铝/钢界面的物相组成、元素分布及微观组织形态；与只添加Ni箔作为中间层相比，添加Si/Ni复合中间层的焊接接头力学性能得到了明显提高。张丽娟等[11]研究了添加Mn、Zr粉末对镀锌钢/6016铝之间的激光搭接焊行为。结果表明，与没有添加粉末相比，添加Mn、Zr粉末提高了焊接接头的抗剪强度，其中添加Zr粉末的提高效果更加明显。优化激光焊接工艺是提高铝/钢焊接性的另一重要方法[12, 13]。崔丽等[12]采用光纤激光深熔焊的方法研究了焊接速度对钢/铝搭接接头焊缝成形、界面组织及力学性能的影响。结果表明，随着焊接速度的增加，钢/铝焊缝接头的成形性不断改善，且在焊接速度为3.0～3.3m/min 时，焊缝成形良好，接头的机械抗力值最高达137N/mm。王涛等[3]研究指出，铝/钢激光焊接技术的发展趋势是填料合金元素筛选、加强铝/钢激光焊接工艺优化、设计与开发柔性夹具、脆性金属间化合物的控制与界面结合机理等。但是，目前针对铝/钢异种金属之间的焊接研究，大多数是基于钢上、铝下的焊接结构，对于铝上、钢下焊接结构的研究鲜有报道。

本文针对动力电池铝/钢焊接应用场景，采用不同的激光器设备，基于铝上钢下焊接结构，研究了焊接工艺对铝/钢焊接焊缝成形、界面形态及力学性能的影响，实现了铝/钢之间的良好焊接，为异种金属激光焊接领域提供参考。

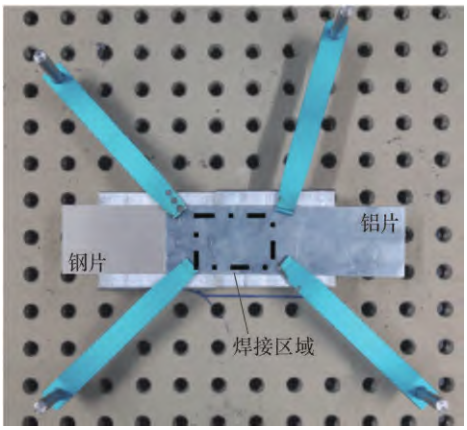
2 试验材料与设备

试验用材料分别为1060铝片（规格为120mm×35mm×0.4mm）、SPCC镀镍钢片（规格为120mm×35mm×0.6mm），采用铝上钢下的焊接结构，焊接形式为搭接穿透焊，焊前装夹方法如图1所示。

试验制样用设备主要为激光焊接设备，由深圳联赢激光股份有限公司生产的不同类型激光器、德国库卡（KUKA）机器人有限公司生产的六轴焊接机器人及勒斯姆勒激光技术（上海）有限公司生产的OCT焊接质量监测系统组成。



a）铝上钢下式焊接结构



b）焊前装夹示意

图1 铝/钢异种金属激光焊接示意

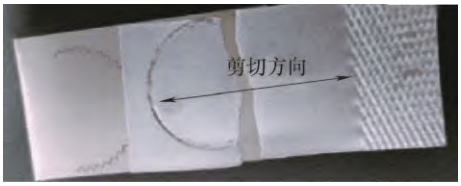
3 试验表征方法

半圆弧轨迹焊接参数为：焊接功率800W、扫描速度1300mm/s、离焦量0，激光螺旋式摆动，摆动

间距0.3mm、摆动半径0.8mm。

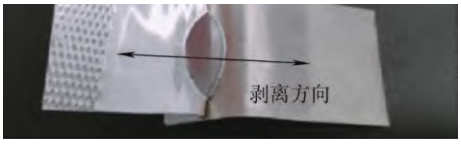
六螺旋点轨迹焊接参数为：激光功率1000W、扫描速度1300mm/s、离焦量0，螺旋点内径0.2mm、间距0.25mm、螺旋点外径2.0～3.5mm。

其他参数为：保护气流量8L/min，吹气方式为侧吹氮气。采用不同的激光器、焊接轨迹、螺旋点外径进行工艺优化试验。基于金相显微技术，将制备的焊接件焊缝接头沿纵截面切开，经抛光、腐蚀（$FeCl_3$+稀硝酸腐蚀液）后在金相显微镜下观察焊缝组织及铝/钢界面结合情况。采用5000N万能试验机（精度0.1N）测试焊件的力学性能（包括剪切力、剥离力），将上述试验用焊接材料（为非标件，供工艺优化参考）获得的焊缝直接进行拉力测试，测试方法如图2所示。



a）剪切力测试1

b）剪切力测试2



c）剥离力测试1

d）剥离力测试2

图2　焊缝力学性能测试方法

4　结果分析与讨论

4.1　激光器类型对铝/钢异种金属焊接成形的影响

激光器的光纤芯径、光斑尺寸、功率稳定性等决定了激光光束的质量，对异种金属特别是含铝的高反射率金属的焊接有着重要影响。本文研究了目前应用较多的多模激光器、脉冲激光器，以及最近发展起来的单模激光器（见图3）对铝/钢异种金属焊接的影响。

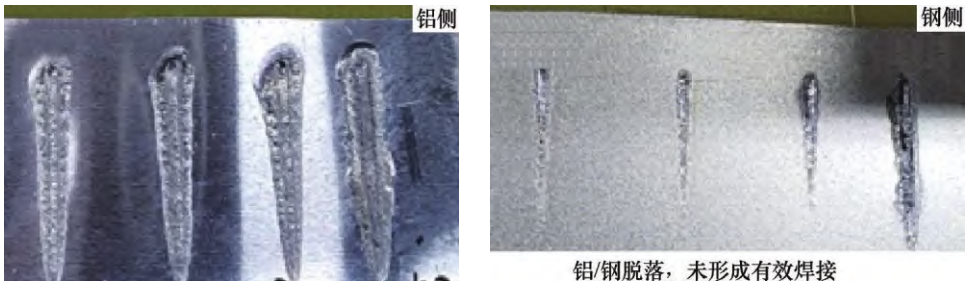
a）UW-S6000UM（100μm）型多模激光器

b）YNFL-500（150μm）型脉冲激光器

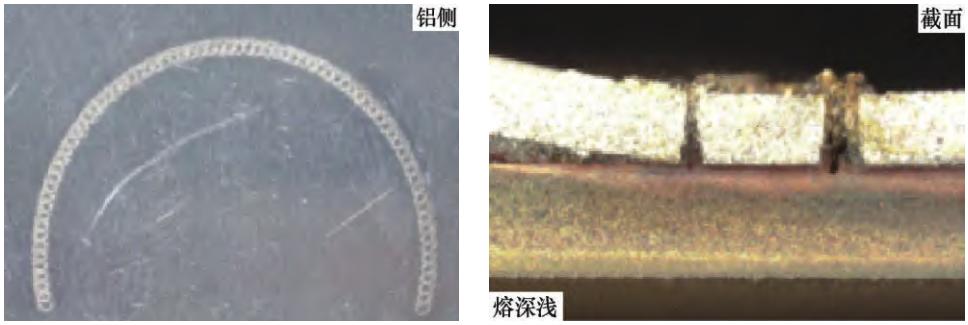
c）RFL-C2000（14μm）型单模激光器

图3　铝/钢异种金属焊接用激光器类型

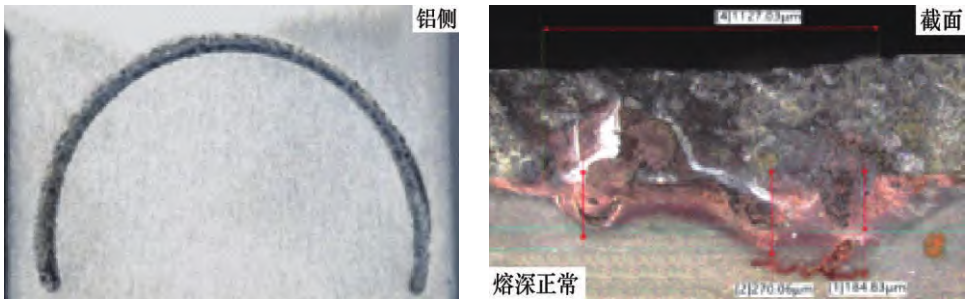
图4所示为采用不同类型激光器得到的铝/钢异种金属焊接结果。由图4可知，常用的多模激光器无法实现铝/钢之间的穿透焊接，铝侧焊接热影响区较大，但钢侧未获得有效熔深；脉冲激光器由于平均热输入小、存在脉冲间隔，因此获得的铝/钢焊缝熔深很浅（＜0.1mm），焊缝强度很低；新型14μm单模激光器实现了铝/钢焊缝良好的焊接成形，钢侧有效熔深约0.23mm。由铝侧焊缝外观可看到，多模激光器获得的焊缝宽度不均匀，熔池铝液蒸发严重，焊缝产生明显凹陷；脉冲激光器由于脉冲效应，所以焊缝螺旋轨迹清晰可见，焊缝宽度均匀，焊接热输入低，未引起熔池凹陷产生；单模激光器光束质量好、焊接热影响区小，因此焊缝外观良好、宽度均匀一致，但较大的热输入导致了轻微的熔池凹陷发生。



a）多模激光器



b）脉冲激光器



c）单模激光器

图4　不同类型激光器下的铝/钢异种金属焊接效果

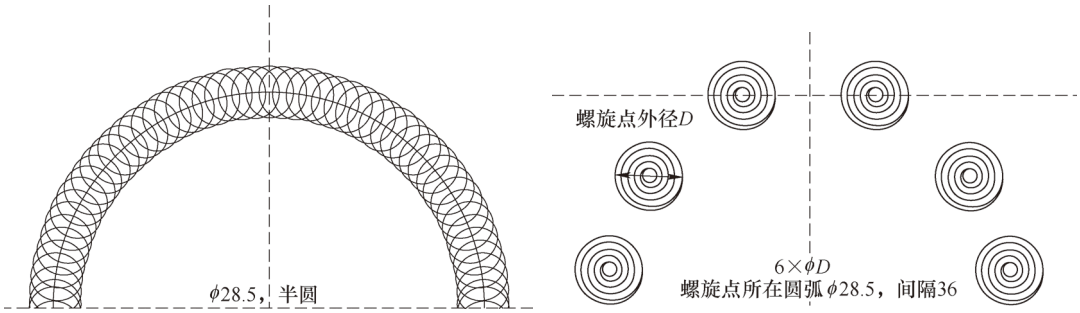
以上结果表明，连续单模激光器功率密度大、抗反射能力强、热影响区小，是铝/钢异种金属薄板材料穿透焊接的良好选择。

4.2　焊接轨迹对铝/钢异种金属焊缝成形和力学性能的影响

半圆弧轨迹得到的焊缝熔池存在凹陷现象，且熔深不稳定。因此，研究对比了焊接轨迹对单模激光器焊接铝/钢异种金属的影响。图5所示为两种不同的铝/钢焊接轨迹设计，此处螺旋点外径D取3mm。

图6、图7所示为不同焊接轨迹下铝/钢焊缝的宏观形貌及金相组织。由图6、图7可知，两种不同轨迹下的焊缝外观及金相组织差异较明显。半圆弧轨迹的焊缝外观及截面金相均可看到明显的熔池凹陷，且钢侧熔深不均匀。

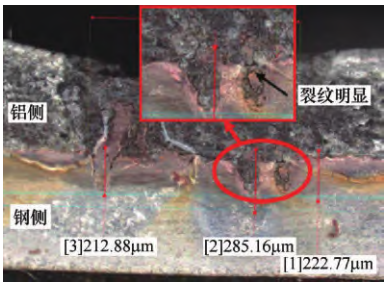
由图6b可知，由于铝/钢界面的焊缝组织凝固不充分，有效熔池内产生了较多焊接裂纹；由图6c可见，焊缝铝侧存在较明显的凹陷，且铝/钢界面结合较差，增加了钢/铝金属间化合物层（IMC）的厚度，恶化焊缝强度。六螺旋点轨迹获得的焊缝外观良好，金相下熔深均匀一致，未见明显裂纹。结合图7b、c可知，焊缝熔池形状一致性好，熔深稳定；焊缝铝/钢界面清晰可见，界面处金属间化合物层的厚度相比下明显降低。结果表明，在六螺旋点轨迹下，铝/钢金属获得了良好的焊接结合。



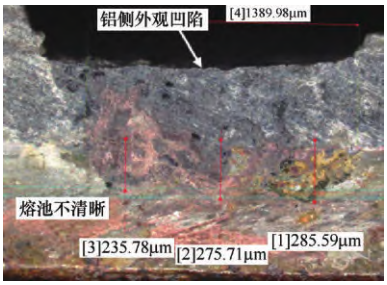
a）半圆弧轨迹　　b）六螺旋点轨迹

图5　铝/钢异种金属焊接轨迹设计

a）铝侧焊缝外观



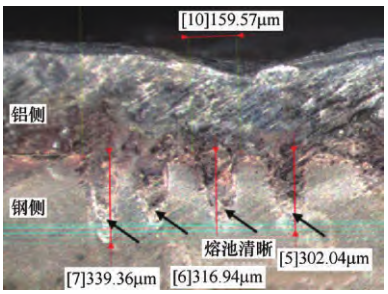
b）焊缝纵截面形貌一



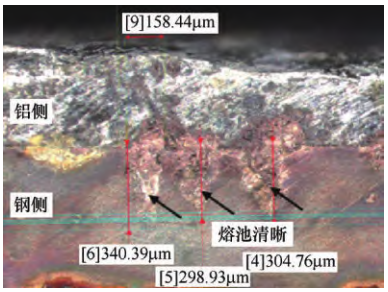
c）焊缝纵截面形貌二

图6　半圆弧轨迹下铝/钢焊缝外观及纵截面形貌

a）铝侧焊缝外观



b）焊缝纵截面形貌一



c）焊缝纵截面形貌二

图7　六螺旋点轨迹下铝/钢焊缝外观及纵截面形貌

不同焊接轨迹下铝/钢焊缝的有效熔深与力学性能见表1。由表1可知，在其他焊接工艺相同的前提下，六螺旋点焊接轨迹可以获得更大的焊接熔深（均值0.312mm），同时表现出了略高于半圆弧焊接轨迹的焊缝力学性能（剪切力均值764N）。相比之下，六螺旋点焊接轨迹的热输入适中，焊缝热影

表1　不同焊接轨迹下铝/钢焊缝的有效熔深与力学性能

焊接轨迹	熔深/mm	剪切力/N	剥离力/N
半圆弧	0.241	704	138
六螺旋点	0.312	764	213

响区小，焊接过程中的熔融铝液蒸发量低，焊接更加稳定。较少的焊接裂纹和较薄的金属间化合物层使其具有更优的焊接质量[14]。

4.3 螺旋点外径对铝/钢异种金属焊缝组织和力学性能的影响

上述结果表明，六螺旋点的焊接轨迹获得的铝/钢焊缝具有较好的熔深。为了进一步分析螺旋点轨迹对铝/钢焊接的影响，研究了螺旋点外径*D*对铝/钢焊缝组织及力学性能的影响。

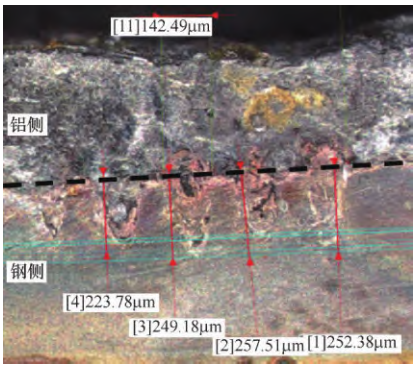
图8所示为不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的金相组织。由图8可知，随着螺旋点外径的增加，焊缝熔池尺寸增加、熔池深宽比增大，表明焊接区域面积的加大有利于加强匙孔效应，带来钢侧更大的熔深。由图8a可知，当螺旋点外径较小时，铝/钢焊缝熔深浅、熔池形态不稳定；由图8b、c表明，当螺旋点外径为2.5～3.0mm时，铝/钢具有良好的界面结合，界面平整清晰、元素扩散适中、熔深均匀稳定；由图8d表明，当螺旋点外径达到3.5mm后，由于热输入的增加，熔融态下Al、Fe等元素交互扩散加剧，相互之间的化学反应程度增加，导致铝/钢界面不平整、熔池形态不规则，焊缝质量下降。

不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的熔池尺寸见表2。由表2可知，随着螺旋点外径的增加，焊缝熔深增加，单点熔宽的变化不明显，与图8所示规律一致。

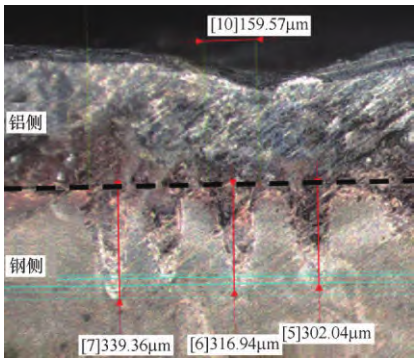
表2　不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的熔池平均尺寸（mm）

螺旋点外径	2	2.5	3	3.5
熔深	0.245	0.319	0.326	0.335
熔宽	0.142	0.159	0.143	0.144

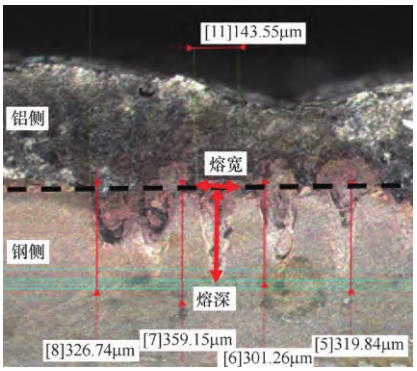
图9所示为不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的力学性能。由图9可看到，随着螺旋点外径的增大，铝/钢焊缝的剪切力和剥离力均呈先增加后降低的特点。当螺旋点外径为3.0mm时，剪切力和剥离力达到最大值，分别为882N、273N；螺旋点外径超过3.0mm后，焊缝力学性能下降。结合图8、图9结果分析可知，螺旋点外径较小时，由于熔深浅且不均匀，导致焊缝拉力较低；随着螺旋点外径的增大，钢侧有效熔深增加，焊缝拉力提高；当螺旋点外径达到3.5mm后，焊接区面积加大、焊接热输入增加明显，使得焊缝铝/钢界面层厚度增加、熔池形态遭到破坏、焊缝脆性提高，导致焊缝拉力降低。



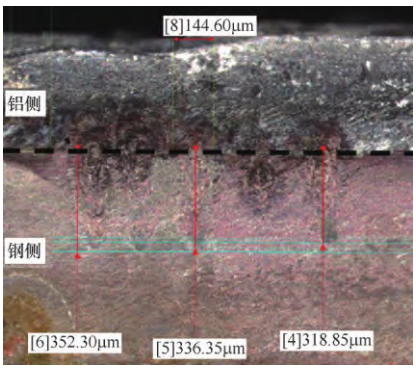
a）*D*＝2mm



b）*D*＝2.5mm



c）*D*＝3mm



d）*D*＝3.5mm

图8　不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的金相组织

上述研究结果表明，对于铝/钢异种金属薄板的激光穿透焊接，选用六螺旋点焊接轨迹、螺旋点外径为3.0mm，可以较好地控制焊接热输入，从而实现铝/钢界面的良好结合，获得熔池尺寸与力学性能均优异的焊缝接头。

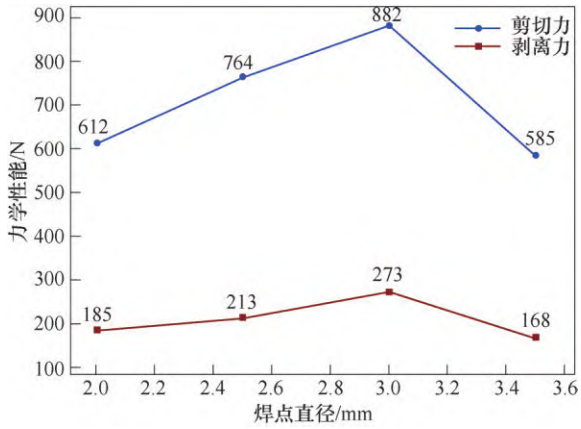


图9　不同螺旋点外径下铝/钢焊缝的力学性能

5　结束语

1）相比多模激光器、脉冲激光器，光束质量好、光斑直径小、热量集中的14μm单模激光器可以实现铝上钢下式的铝/钢焊接，获得的焊缝热影响区窄，铝/钢界面结合良好。

2）相对半圆弧焊接轨迹，六螺旋点焊接轨迹可以实现铝/钢的有效深熔焊接。半圆弧焊接轨迹熔池凹陷严重，内部存在裂纹。六螺旋点轨迹获得的焊缝外观良好，焊缝熔深均匀，未见明显裂纹，焊缝剪切力高于半圆弧轨迹焊接。较少的焊接裂纹和较薄的金属间化合物层厚度有利于获得更优的焊接质量。

3）随着螺旋点外径的增加，六螺旋点焊接轨迹得到的焊缝熔池深宽比增加，有效熔深增大，但焊缝力学性能呈先增加后降低的特点。当螺旋点外径为3mm时，铝/钢焊缝的有效熔深为0.326mm，焊缝剪切力和剥离力相对最大。

参考文献：

[1] 邹琼琼，龚红英，黄继龙，等. 激光焊接技术的研究现状及发展[J]. 热加工工艺，2016，45（21）：20-23.

[2] 杨彪，刘福运，檀财旺，等. 动力电池激光焊接技术的应用现状与展望[J]. 焊接，2022（9）：1-9.

[3] 王涛，周惦武，张屹，等. 钢-铝激光焊接的关键技术与未来趋势展望[J]. 材料导报，2011，25（23）：106-109.

[4] 秦国梁，武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状[J]. 机械工程学报，2016，52（24）：24-35.

[5] 张贵锋，王鑫炜，王宗科. 轻量化铝/钢与铝/铜焊接新方法——搅拌摩擦钎焊与搅拌摩擦点钎焊[J]. 金属加工（热加工），2022（2）：1-7.

[6] 李岩，胡志力，于海洋，等. 铝与钢异种材料连接技术及其研究进展[J]. 材料导报，2020，34（13）：13167-13174.

[7] 王刚，曹雪龙，檀财旺，等. Ni/Si中间层对铝/钢激光焊接头组织与性能的影响[J]. 焊接学报，2020，41（4）：84-89，101-102.

[8] NARSIM D，DUTTA K，SHARIFF S M，et al. Mechanical and microstructural characterization of laser weld-brazed AA6082-galvanized steel joint[J]. Journal of Materials Processing Technology，2019，263：21-32.

[9] 彭利，周惦武，吴平，等. 镀锌钢-6016铝合金异种金属加入中间夹层铅的激光焊接[J]. 焊接学报，2011，32（12）：81-84，117.

[10] YU S R，SHI Y，WANG Z Y，et al. Effects of powder on microstructure，tensile，and corrosion behavior of aluminum-steel joints[J]. Journal of Laser Applications，2018，30（3）：032006.

[11] 张丽娟，周惦武，刘金水，等. 钢/铝异种金属添加粉末的激光焊接[J]. 中国有色金属学报，2013，23（12）：3401-3409.

[12] 崔丽，钱伟，潘峰，等. 焊接速度对钢/铝异种金属激光深熔焊接头特性的影响[J]. 北京工业大学学报，2018，44（10）：1347-1352.

[13] 巴一，韩善果，师文庆，等. 激光摆动焊接的功率对钢/铝焊接接头的影响[J]. 激光技术，2022，46（2）：193-198.

[14] YUCE C，KARPAT F，YAVUZ N. Investigations on the microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar galvanized steel–aluminum joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2019，104（5-8）：2693-2704.

MW 20241015