

# 激光功率对 3/4H SUS301 和 SUS316 异种不锈钢激光点焊成形特征及组织性能的影响\*

董智龙, 彭丽雯, 侯军才, 张秋美, 张 会  
(陕西理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 汉中 723001)

**摘 要:** 采用准连续激光器对测力传感器的 3/4H SUS301 弹性体和 SUS316 支撑体进行异种不锈钢激光焊接, 探讨了激光功率对点焊接头成形特征和力学性能的影响。研究表明, 采用准连续激光模式, 在脉冲时间为 2 ms、激光功率为 180 W 至 270 W 范围内, 弹性体焊后的角变形量随着激光功率的增大而增大, 激光功率为 270 W 时弹性体焊后的角变形远低于传感器容许的变形量。当激光功率为 210 W 时, 在焊接界面处产生气孔缺陷, 焊接功率增大至 270 W 时, 在匙孔底部形成严重的气孔缺陷。焊缝内部以胞状晶方式生长, 从熔合区两侧向焊缝中心生长为粗大的柱状晶, 焊缝中心为等轴状的树枝晶, 随着激光功率的增大, 等轴晶区域的宽度减小。焊缝区承受较高的焊接热量使得焊缝区内形变组织发生不完全再结晶, 致使形变诱发马氏体相变被抑制,  $\alpha'$  马氏体含量降低。点焊接头的剪切力随着激光功率先增大后减小, 当激光功率为 250 W 时, 接头的剪切力达到最大值 0.49 kN, 远高于行业要求。

**关键词:** 激光焊接; 点焊; 晶粒形态; 气孔缺陷; 显微组织

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.005

## Effect of Laser Power on Laser Spot Welding Forming Characteristics and Microstructure Properties of 3/4H SUS301 and SUS316 Dissimilar Stainless Steel Laser Spot Welding Joints

DONG Zhilong, PENG Liwen, HOU Juncai, ZHANG Qiumei, ZHANG Hui

(School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

**Abstract:** Dissimilar metal laser welding was carried out between 3/4H SUS301 and SUS316 stainless steel which were acted as elastomer and support body of force measuring sensors by using quasi-continuous wave laser. The effect of laser power on the influence of forming characteristics and mechanical properties of the spot welded joint was investigated. It was shown that angle distortion was increased with an increase of laser power when a quasi-continuous laser was adopted of which the laser power was varied from 180~270 W with a regular pulse time of 2 ms. And the angle distortion was much lower than the allowable deformation of the force measuring sensor when the laser power of 270 W was applied. Porosity defects were detected on the interface of the spot weld under a lower laser power of 210 W and it was formed again in the bottom zone of the keyhole of the spot welded joint when a higher laser power of 270 W or above was used. For the grain shape of the sopt welded joint, cellular crystals grew from the both sides of fusion area to the weld center resulting in growing into columnar crystal. And equiaxed dendrites was formed in the center zone of the spot welded joint. The width of exquixed crystal region was decreased with an increase of laser power. Incomplete recrystallization occurred in the deformed structure due to its exposure to a higher temperature in the spot weld resulting in inducing an inhibition of the deformation induced martensitic transformation. Hereby,

\*基金项目: 陕西省科技厅攻关项目“传感器用 FeCrCoW 高电阻合金的开发应用”(项目编号 2024GX-YBXM-376); 陕西理工大学大创项目(项目编号 202310720141)。

the composition of  $\alpha'$  martensitic was decreased. Shear strength of the spot weld joint was increased and then was decreased with an increase of laser power. The maximum shear strength of the spot weld joint reached to 0.49 kN which was much higher than the industry standard when a laser power of 250 W was applied.

**Key words:** laser welding; spot welding; grain shape; porosity defect; microstructure

## 0 前 言

1Cr17Ni7(SUS301)是一种亚稳定的奥氏体不锈钢,经过冷加工后能够诱导马氏体相变,从而显著增强材料的强度,硬化后的SUS301不锈钢不仅具有较高的强度和弹性极限,还具备良好的塑性<sup>[1-3]</sup>。0Cr17Ni12Mo2(SUS316)是一种奥氏体不锈钢,具有较高的强度和优异的耐腐蚀性能。电子手写笔测力传感器的弹性体和支撑体通过点焊的方式连接,要求焊接接头具有较高的强度,并且焊接变形小、无焊接缺陷<sup>[4-5]</sup>。电阻点焊过程中产生热量较大,且存在较大的变形,不适合弹性体与支撑体的点焊<sup>[6]</sup>。激光焊热输入较低,能够获得具有较小变形和较高剪切强度的接头,但激光焊容易产生气孔缺陷。采用脉冲方式进行激光焊接能够获得较低的平均功率,降低焊接热输入,减少焊接变形,通过调控焊接热量,可以获得较大的熔深和熔宽,消除气孔缺陷。

采用激光点焊可以进行3系奥氏体不锈钢的焊接。王丽娟等<sup>[7]</sup>进行了2 mm SUS301L-HT不锈钢激光点焊接头组织和力学性能研究,结果表明,采用激光点焊可以获得焊缝成形良好的接头,接头组织为粗大柱状晶,焊接热影响区的硬度最低,焊缝的硬度低于母材。304不锈钢激光点焊焊接工艺研究表明<sup>[8-9]</sup>,激光点焊持续时间、激光功率密度、间隙均对焊点的形态、尺寸和显微组织有显著的影响。

目前,对于3/4H SUS301和SUS316不锈钢的激光焊接缺乏相关报道。本研究采用准连续

激光器进行弹性体和支撑体的激光点焊,从而降低焊接接头的变形程度,增大熔深和熔宽,分析脉冲宽度一定的条件下,激光功率对接头形变、力学性能和组织的影响,为相关研究和应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究中测力传感器的弹性体采用3/4H SUS301(1Cr17Ni7),支撑体采用SUS316(0Cr17Ni12Mo2),测力传感器的结构如图1所示。支撑体的厚度为0.7 mm,弹性体的厚度为0.25 mm。采用准连续激光器(quasi-continuous wave, QCW)以脉冲方式进行激光焊接,脉宽统一设置为2 ms,研究不同激光功率对接头成形和力学性能的影响。激光功率分别采用180 W、210 W、240 W、250 W、270 W,得到试样1~试样5。材料的实测化学成分见表1。

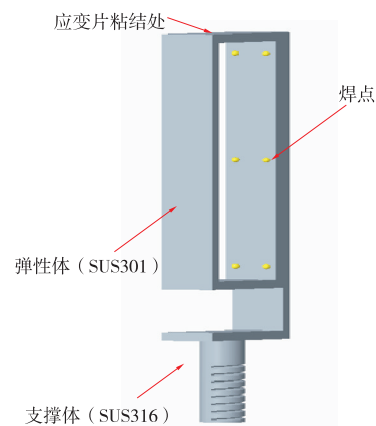


图1 测力传感器结构示意图

表1 试验材料化学成分

材料	化学成分/%							
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(S)	w(P)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)
3/4H SUS301	0.11	0.82	1.67	0.025	0.021	17.12	6.84	—
SUS316	0.06	0.87	1.74	0.027	0.027	16.87	12.41	2.62

## 1.2 试验方法

图1中弹性体和支撑体采用点焊方式连接, 焊接位置与应变片的粘结位置距离较小, 需进行精密焊接, 试样焊接后的变形采用三坐标测量仪检测试样的角变形量。

沿焊点的直径方向线切割试样。金相试样用砂纸逐级打磨, 并进行机械抛光、腐蚀后, 采用 OLYMPUS 金相显微镜观察。采用 DX-2500 型 X 射线衍射仪对焊点进行物相分析, 加速电压 40 kV, 电流 40 mA, 采用 Cu-K $\alpha$  辐射, 扫描速度 5°/min, 扫描角度 20°~90°。对测力传感器进行实物拉剪试验, 试件长度 25 mm, 宽度 5 mm, 支撑体螺纹长度 5 mm, 拉剪试验辅助夹具如图2所示。在试件贴应变片的位置精密打孔, 并将 M2 螺杆穿入孔内, 用螺母固定, 提供工件的刚性支撑。同时, 在支撑体处穿入一根高强螺杆并用螺母固定, 采用美特斯 (SANS) 电子万能试验机对试样进行拉剪测试。

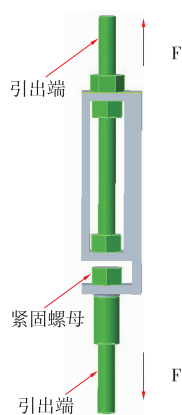


图2 拉剪试验辅助夹具示意图

## 2 试验结果及分析

### 2.1 激光功率对点焊接头变形量的影响

焊接后角变形会使得试样的形状和尺寸发生

变化, 较大的角变形会影响弹性体与其他元件的装配, 且影响测力传感器的粘贴强度, 进而影响传感器的可靠性。图3为不同激光功率下试样焊后角变形量的变化情况。从图3中可以看出, 随着激光功率的增大, 焊接角变形量增大, 当焊接功率达到 270 W 时, 焊接角变形量最大 (0.38°), 满足焊后变形量小于 0.5° 的要求。这主要是由于以脉冲方式进行激光焊接, 激光的平均功率显著降低, 进而降低了焊接热输入, 有效减小了焊接变形, 达到了精密焊接的要求。

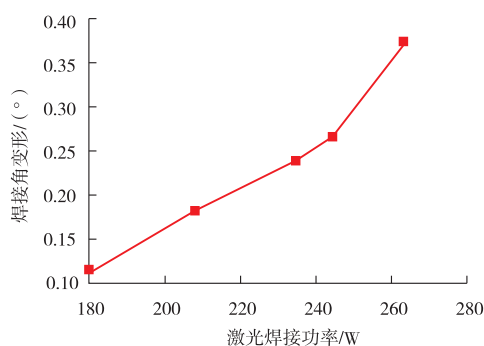
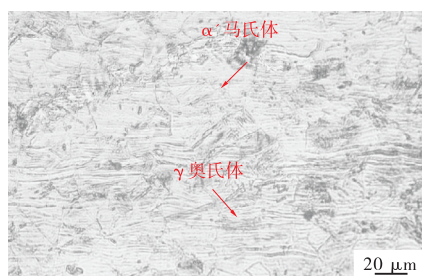


图3 不同激光功率对试样角变形的影响

图4为焊接后 3/4H SUS301 和 SUS316 母材的显微组织。从图4(a)中可以看出, 3/4H SUS301 母材金相组织发生了变形, 材料发生了明显的塑性流动, 表明试样经历了较大的塑性变形。3/4H SUS301 母材组织由变形的奥氏体( $\gamma$ 相)晶粒、低碳的  $\alpha'$  马氏体组成, 如图中的箭头所示。SUS301 不锈钢为不稳定的奥氏体不锈钢, 当 3/4H SUS301 不锈钢承受了较大塑性变形后, 奥氏体晶粒内部形成了相互交叉或平行的剪切带, 以这些剪切带的交叉点作为马氏体的形核质点, 发生了形变诱发马氏体相变, 形成了  $\alpha'$  马氏体, 进而提高了材料的硬度和强度。图4(b)为 SUS316 母材的金相组织, 可以看出, SUS316



(a) 3/4H SUS301



(b) SUS316

图4 焊接后 3/4H SUS301 和 SUS316 母材显微组织

不锈钢为细小变形奥氏体( $\gamma$ 相)组织,组织发生了不完全再结晶。SUS316不锈钢中的奥氏体较为稳定,在塑性变形过程中不能发生形变诱发马氏体相变,而仅仅能够通过加工硬化提高其强度和硬度。

## 2.2 激光功率对点焊接头横截面宏观形貌和晶粒形态的影响

图5所示为不同激光功率下3/4H SUS301和SUS316不锈钢点焊接头横截面宏观形貌。可以看出,不同激光功率下焊缝表面均出现了下塌,

当激光功率较低时(180 W),焊接热输入较低,未能将3/4H SUS301不锈钢熔透,并未能与SUS316不锈钢形成点焊接头;随着激光功率的增大,焊接热输入不断增大,熔深增加,进而使得3/4H SUS301被熔透,与SUS316不锈钢形成了点焊接头。当采用较高的激光功率时,3/4H SUS301与SUS316形成窄而深的焊缝,其原因在于激光的功率密度随着激光点焊功率的升高而升高,使得激光焊接从熔透焊转变为深孔焊,形成了窄而深的焊缝。

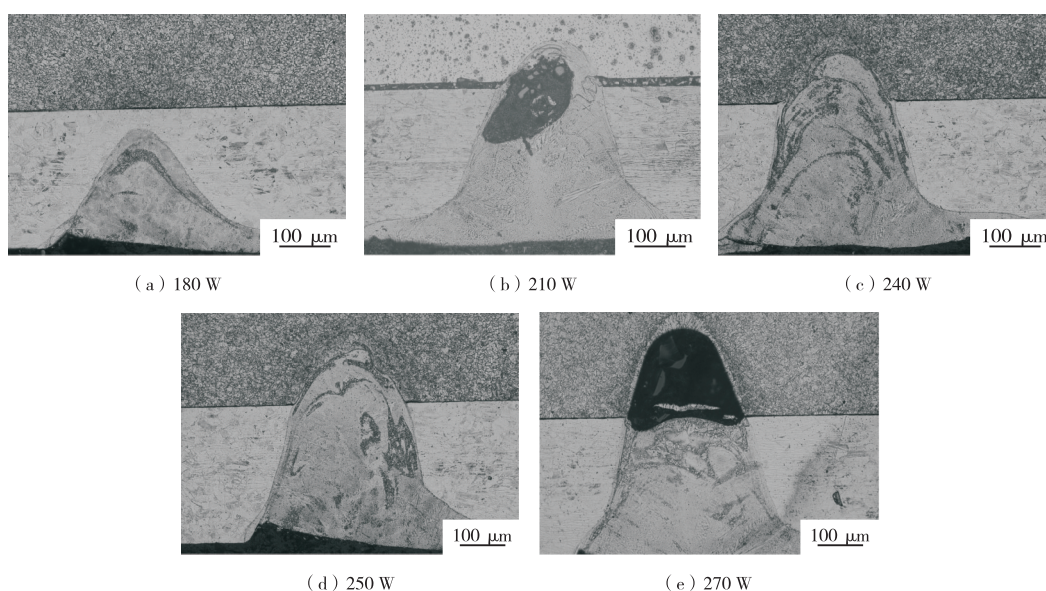


图5 不同激光功率下点焊接头横截面的宏观形貌

当激光功率为210 W时,在接头界面处产生了气孔缺陷,气孔位置出现在熔合面附近,这可能是由于激光功率较小时熔池的搅动不够剧烈,造成熔池中的气泡无法很快上浮所致;当激光功率为240 W和250 W时,获得无缺陷的点焊接头;当焊接功率增加至270 W时,熔深继续增加,点焊接头又产生了严重的气孔缺陷。

激光点焊的过程中形成匙孔,高能量密度的激光作用于匙孔前壁的某一局部位置,造成该位置的局部气化。匙孔前壁根部金属材料气化后膨胀的反冲力,致使匙孔后壁对应位置局部向内产生凹陷,周围的金属熔体在重力和表面张力双重作用下,向下方塌陷,造成匙孔根部瞬间失稳,根部周围的金属蒸汽以及保护气体被卷入熔池,形成气泡<sup>[10-11]</sup>。部分气泡能够在焊缝凝固前上浮而逸出,在焊缝凝固后未逸出的气泡则形成气

孔。在未完全熔透的情况下,匙孔极为不稳定,不能像完全熔透情况下的匙孔上部产生对流,造成根部产生的等离子体和金属蒸汽难于快速上浮,而滞留在匙孔根部。加之小孔的长径比较大,上浮的时间较长,而本研究中激光点焊接头的焊点较小,焊缝凝固速度快,不利于气泡上浮。

激光点焊匙孔的深度和径向尺寸均随着激光功率的增大而增大,这使得熔池凝固的时间增加,进而使得焊接过程中产生的气泡能够有充分的时间逸出,有利于消除气孔缺陷。但是随着激光功率的进一步加大,金属熔化量增大,金属熔体的反冲力增大,匙孔的稳定性变差,匙孔坍塌、湮灭的速度加快,形成更多的气泡,气孔聚集形成气孔缺陷。可见,当激光功率达到270 W时,激光功率过分增大使得焊接过程中的匙孔稳

定性变差, 小孔坍塌导致焊点产生了气孔缺陷。从图5中还可以得出, 激光功率为 240 W 和 250 W 时, 点焊接头的熔宽为分别为  $218\ \mu\text{m}$  和  $224\ \mu\text{m}$ 。点焊接头的熔宽决定了点焊接头的强度。随着激光功率的增加, 熔深和熔宽均增大。可见, 为了能够获得较好的力学性能, 应该获得较大的熔深和熔宽, 但激光功率过大, 则会产生气孔缺陷。

图6为不同激光功率下激光点焊接头横截面的晶粒形态。从图6中可以看出, 对于激光点焊接头, 无论激光功率高低, 在熔合区向焊缝内部以胞状晶方式生长, 形成粗大的柱状晶, 而在焊缝中心则形成细小的等轴状树枝晶。而对于 SUS301L 奥氏体不锈钢激光填丝焊接而言, 焊缝区则由垂直于熔合线生长的柱状晶从熔合区向中

心生长, 且柱状晶一直较为粗大, 具有明显的取向, 两侧的柱状晶在焊缝中心相遇<sup>[12]</sup>。这主要是由于, 激光点焊的冷却速度更快, 使得粗大柱状晶转变为细小等轴晶。当激光功率较低为 180 W 时, 焊接热输入较低, 晶粒未充分长大, 焊缝具有更宽的等轴晶区域。而随着激光功率的增大, 等轴晶区域的宽度显著减小, 如当激光功率为 250 W 和 270 W 时, 部分区域已经从两侧向中心以柱状晶晶粒方式生长, 在焊缝中心几乎相遇, 而在焊缝中心的中下部存在较小区域的等轴晶。这主要是因为, 随着激光功率的增大, 焊接热输入增大, 焊缝的冷却速度降低, 等轴晶具有较长的生长时间, 晶粒长大速度远高于晶粒形核速度, 导致其晶粒粗大。

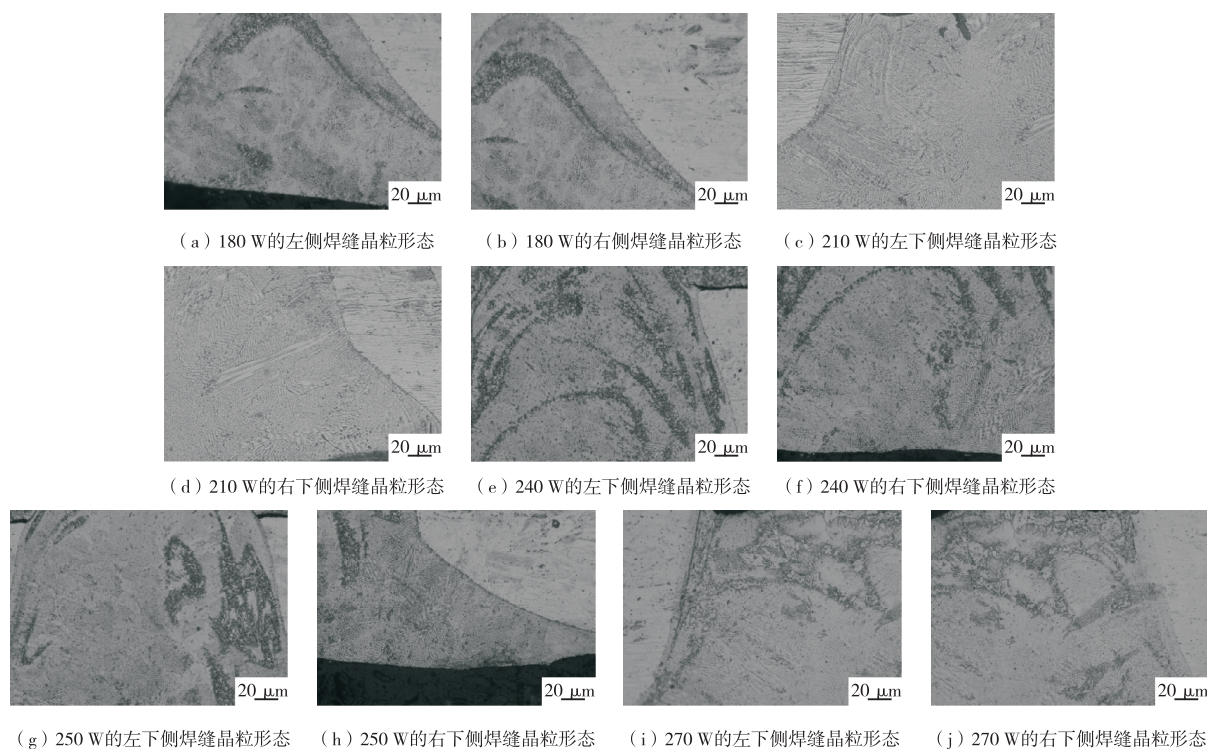


图6 不同激光功率对焊缝晶粒形态的影响

根据金属材料焊缝的凝固学原理, 晶体形态主要由熔池中的过冷度  $G$ 、溶质浓度  $C_0$  与结晶速率  $R$  决定, 如图7所示<sup>[13]</sup>。3/4H SUS301 和 SUS316 异种不锈钢激光点焊焊缝晶粒形态呈现出两侧为粗大的胞状晶生长, 形成柱状晶, 而焊缝中心出现了细小的等轴状树枝晶的特征。这主要是因为, 在焊缝靠近熔合线的区域, 以半熔化的母材作为异质形核的核心, 在熔合区边缘具有较大的温度

梯度  $G$ , 结晶速度较小, 导致其成分过冷区较小, 这使得晶粒以胞状生长且垂直熔合线向焊缝内部生长, 生长方向与热流密度方向相反, 晶粒较为粗大为柱状晶。随着凝固界面远离熔合区边界向焊缝中心推进时, 结晶速度  $R$  逐渐增大, 而温度梯度  $G$  减小, 焊缝中心区最后凝固, 合金元素在焊缝中心区域产生偏析导致溶质浓度  $C_0$  增大, 造成该区域的成分过冷度增大, 树枝晶生长

的方式逐渐占主导地位,使得该区域产生了等轴状的树枝晶。

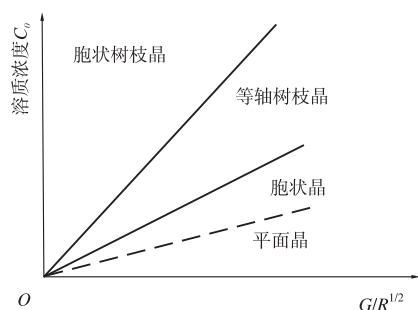


图7 晶体形态与凝固条件的关系

### 2.3 物相分析

图8为激光功率为240 W时3/4H SUS301和SUS316不锈钢母材以及点焊接头的XRD图谱。从图8中可以看出,3/4H SUS301不锈钢母材基体由 $\gamma$ 相和 $\alpha'$ 马氏体相组成,SUS316母材则为单相 $\gamma$ 相组成,这与前文的金相组织一致。同时,还发现当激光功率为240 W时激光点焊的焊缝中也由 $\gamma$ 相和 $\alpha'$ 马氏体相组成。 $\alpha'$ 马氏体具有较高的硬度,焊缝中残留 $\alpha'$ 马氏体使得点焊焊缝的强度较高。文研究采用准连续激光器,在脉冲触发电流下以脉冲模式产生激光进行激光点焊,显著提高脉冲峰值,有效降低了焊接平均功率,使得焊接热输入显著降低。可见,采用准连续模式进行激光点焊,冷却速度较连续激光焊接模式的冷却速度快,因而母材中的形变组织来不及回复再结晶,成为马氏体的形核核心,使得焊缝残留了较多 $\alpha'$ 马氏体。

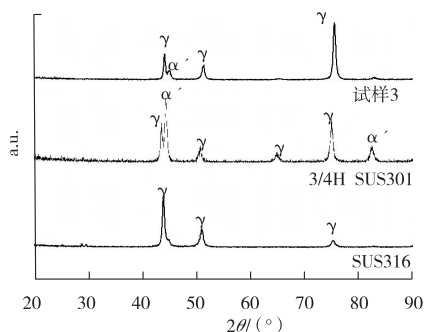


图8 激光功率为240 W时不锈钢母材和激光点焊接头的XRD图谱

### 2.4 拉剪强度

图9所示为不同激光功率下3/4H SUS301和SUS316点焊接头的剪切力。通过图9中可以看

出,点焊接头的剪切力随着激光功率的增大先增大后减小。这主要是因为随着激光功率的增大,焊接热输入增大,点焊接头的熔深和熔宽增大,进而使得点焊接头的承载能力增大。当激光功率为250 W时,点焊接头的剪切力达到最大,为0.49 kN;当激光功率增大至270 W时,接头产生了严重的气孔缺陷,使得接头的有效承载面积降低,使得接头的承载能力下降。同时,激光功率的增大使得焊缝的晶粒尺寸变大,进而降低了接头的承载能力。可见,激光功率过大显著降低接头的力学性能。一般来说,触控笔点焊接头的剪切力要求不小于0.3 kN。本研究无缺陷的激光点焊接头的剪切力显著高于行业标准,获得了焊接质量良好的点焊接头。

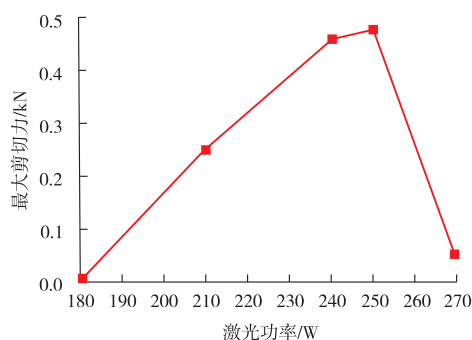


图9 不同激光功率下试样的剪切力

## 3 结 论

(1) 点焊接头的角变形量随着激光功率的增大而增大,激光功率为270 W时弹性体的变形量达到最大为 $0.38^\circ$ ,低于行业变形容许量 $0.5^\circ$ 的要求。

(2) 3/4H SUS301和SUS316不锈钢点焊接头横截面呈现出深孔焊特征的钉子状,且点焊接头表面存在明显的下塌,接头的熔深和熔宽随着激光功率的增大而增大,在脉冲宽度2 ms不变的情况下,当激光功率较低时(180 W),焊接热量不足,不能形成点焊接头;当激光功率大于等于180 W时能够形成激光点焊接头,但在激光功率为210 W与270 W时,在接头界面处形成气孔缺陷。

(3) 对于3/4H SUS301和SUS316不锈钢接头,当激光功率较低时(180 W),点焊接头形

成较宽的等轴晶区域,随着激光功率的增大,等轴晶区域的宽度减小,接头焊缝两侧向中心以柱状晶晶粒方式生长,在焊缝中心相遇,而仅仅在焊缝中心的中下部存在较小区域的等轴晶。激光焊接产生的较高的焊接热量使得焊缝区的 $\alpha'$ 形变马氏体含量降低。

(4) 3/4H SUS301 和 SUS316 点焊接头的拉剪强度随着激光功率的增大先增大后减小,当激光功率为 250 W 时,点焊接头的拉剪力达到最大,为 0.49 kN,远高于带书写触感电子手写笔压力传感器行业的力学性能要求。但是,激光功率过大会显著降低接头的拉剪强度。

### 参考文献:

- [1] 卜哲涵. 车用 301L 不锈钢腐蚀和力学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
  - [2] 孙朝, 许世涛, 雷文, 等. SUS301L 不锈钢激光焊研究现状[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 1-7.
  - [3] 李佶, 黎向锋, 陈冠宇, 等. 不同厚度 3/4 硬 301 型不锈钢带材双轴柔性滚弯成形性能研究[J]. 现代制造工程, 2017(2): 87-92.
  - [4] 严亚子. 多绳摩擦提升钢丝绳张力在线监测系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
  - [5] 张新董. 以疲劳性能为主导的测力传感器结构设计与实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
  - [6] 许文宣, 李一峰, 孟繁星. 浅谈测力传感器设计的应力集中原则[J]. 中国新技术新产品, 2009, 31(11): 80-80.
  - [7] 王丽娟, 牛瑞利. 不锈钢激光点焊接头组织和力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(10): 120-125.
  - [8] 陶汪, 陈彦宾, 李俐群, 等. 304 不锈钢激光点焊工艺研究[J]. 应用激光, 2005, 25(4): 233-236.
  - [9] 简弃非, 曹颂阳, 赵晶, 等. 不锈钢薄板激光点焊工艺对金相组织的影响分析[J]. 江西师范大学学报(自然版), 2018, 42(4): 336-341.
  - [10] 韩潇潇. 铝合金负压激光焊熔深增强机制与气孔缺陷抑制机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
  - [11] 黄立进. 铝合金激光焊及激光-GMAW 复合焊气孔形成机理与抑制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
  - [12] 吴世彪. SUS301L 奥氏体不锈钢激光填丝焊工艺与接头性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
  - [13] LIPPOLD J C, KOTECKI D C, 陈剑虹. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 作者简介: 董智龙 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为测力传感器设计及其连接技术。
- 通讯作者: 侯军才 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色微连接与电子封装浆料和连接技术方面的研究工作。
- 收稿日期: 2024-04-11  
编辑: 任永峰
- 
- (上接第 32 页)
- [11] FALLAHI A, JAFARPUR K, NAMI M R. Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment[J]. Scientia Iranica, 2011, 18(3): 398-406.
  - [12] GANNON L, LIU Y, PEGG N, et al. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates[J]. Marine Structures, 2010, 23(3): 385-404.
  - [13] GUIRAO J, RODRÍGUEZ E, BAYÓN A, et al. Determination through the distortions analysis of the best welding sequence in longitudinal welds VATS electron beam welding FE simulation[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(5): 766-779.
  - [14] GUIRAO J, RODRÍGUEZ E, BAYÓN A, et al. A study of the influence of electron beam welding sequences on the ITER vacuum vessel prototype VATS [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(12): 2805-2811.
  - [15] MANURUNG Y H P, LIDAM R N, RAHIM M R, et al. Welding distortion analysis of multipass joint combination with different sequences using 3D FEM and experiment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2013, 111/112: 89-98.
  - [16] FU G M, LOURENÇO M I, DUAN M L, et al. Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures[J]. Marine Structures, 2016, 46: 30-55.
  - [17] DENG D A, MURAKAWA H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt - welded joint [J]. Computational Materials Science, 2008, 43(2): 353-365.
- 作者简介: 崔虎威 (1986—), 男, 湖北洪湖人, 博士, 副教授, 主要从事船体及其它钢结构焊接仿真及极限强度研究。
- 收稿日期: 2023-11-23  
修改返回日期: 2024-03-06  
编辑: 任永峰