



## 激光摆动路径对钢/铝点焊接头组织与性能的影响

巴一 韩善果 杨永强 郑世达 师文庆

## Effect of the laser swing path on the microstructure and properties of steel/aluminum spot welded joints

Ba Yi, Han Shanguo, Yang Yongqiang, Zheng Shida, Shi Wenqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210799>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 退火温度及保温时间对激光沉积制造TA15钛合金微观组织和显微硬度的影响

Effect of annealing temperature and soaking time on microstructures and microhardness of laser deposition manufacturing TA15 titanium alloy

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806006 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806006>

#### 激光熔覆Fe<sub>0.5</sub>NiCoCrCuTi高熵合金涂层的微观结构及性能

Microstructure and properties of Fe<sub>0.5</sub>NiCoCrCuTi high entropy alloy coating prepared by laser cladding

红外与激光工程. 2019, 48(7): 742004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0742004>

#### 激光沉积修复ZL114A铝合金的显微组织及显微硬度研究

Microstructure and micro-hardness of laser deposition repair ZL114A aluminum alloy

红外与激光工程. 2017, 46(5): 506004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0506004>

#### 激光沉积修复某型飞机垂尾梁研究

Research on laser deposition repair aircraft vertical tail beam

红外与激光工程. 2017, 46(2): 206004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0206004>

#### 镀锌高强度钢激光焊接气孔形成机理

Formation mechanism of porosity during laser welding of galvanized steel

红外与激光工程. 2017, 46(S1): 1 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.S106001>

#### 铝合金T型接头双侧激光焊接气孔缺陷影响规律研究

Study on the influence rule of porosity defects for double-sided laser beam welding of aluminum alloy T-joint

红外与激光工程. 2018, 47(9): 906004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0906004>

## 激光摆动路径对钢/铝点焊接头组织与性能的影响

巴 一<sup>1,3</sup>, 韩善果<sup>1,2</sup>, 杨永强<sup>2</sup>, 郑世达<sup>1</sup>, 师文庆<sup>3</sup>

- (1. 广东省科学院中乌焊接研究所 广东省现代焊接技术重点实验室, 广东 广州 510650;
2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641;
3. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 钢、铝两种材料因为物理性能和化学成分上存在较大差异, 导致钢铝焊接成为难点。为了得到高质量的钢/铝接头, 采用 7 种激光扫描路径对 DP780 双相钢和 5083 铝合金两种金属进行搭接点焊试验。研究激光扫描路径对钢/铝接头宏观形貌、金相组织、显微硬度和剪切强度的影响。结果表明: 扫描路径的变化对接头的影响较大, 相比于常规焊接, 摆动焊接的接头具备更好的连接质量, 焊缝表面成形效果更好; 钢/铝接头主要由马氏体和铁素体组成, 使用激光摆动点焊的接头晶界明显, 在马氏体和铁素体交界处有少量的片状珠光体, 且焊缝各处的晶粒种类无较大差异, 因此焊缝各处力学性能相同, 减少受力后, 出现应力集中的现象; 摆动点焊钢/铝接头的力学性能得到提升, 钢侧接头的最大显微硬度可达 450 HV, 是常规的 1.06 倍, 剪切强度为 83 N/mm, 是常规焊接的 2.12 倍。

**关键词:** 激光摆动焊接; 焊缝成型; 金相组织; 显微硬度; 剪切强度

**中图分类号:** TG457 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210799

## Effect of the laser swing path on the microstructure and properties of steel/aluminum spot welded joints

Ba Yi<sup>1,3</sup>, Han Shanguo<sup>1,2</sup>, Yang Yongqiang<sup>2</sup>, Zheng Shida<sup>1</sup>, Shi Wenqing<sup>3</sup>

- (1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** The two materials, steel and aluminum, are difficult to weld because of the large differences in physical properties and chemical composition, resulting in steel and aluminum welding becoming difficult. To obtain high-quality steel/aluminum joints, seven laser scanning paths were used to perform lap joint spot welding experiments on two metals, DP780 duplex steel and 5083 aluminum alloy. The effects of the laser scanning path on the macroscopic morphology, metallographic organization, microhardness and shear strength of the steel/aluminum joint were studied. The results show that the change in scanning path has a greater impact on the joint compared to conventional welding. Swing welding joints have better joint quality and better weld surface formation. Steel/aluminum joints are mainly composed of martensite and ferrite. The use of laser swing spot welding joints with obvious grain boundaries, a small amount of lamellar pearlite at the junction of martensite and

收稿日期: 2021-10-29; 修订日期: 2021-12-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2020 YFE0205300); 国家自然科学基金 (62073089); 广东省普通高校重点领域专项 (2020 ZDZX2061); 广东省科学院项目 (2019 GDASYL-0501011, 2018 GDASCX-0803, 2020 GDASYL-20200302013)

作者简介: 巴一, 男, 博士生, 主要从事激光加工方面的研究。

导师简介: 韩善果, 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为激光复合焊接及切割、等离子复合焊接及切割、双丝 CMT 焊接及变形控制技术。

ferrite, and there is no significant difference in the grain types of the weld, so the mechanical properties of all parts of the weld are the same, reducing the stress concentration phenomenon after the force is applied. The mechanical properties of the swing spot welded steel/aluminum joint are enhanced, the maximum microhardness of the steel side joint can reach 450 HV, 1.06 times that of conventional, and the shear strength is 83 N/mm, 2.12 times that of conventional welding.

**Key words:** laser oscillation welding; weld forming; metallographic organization; microhardness; shear strength

## 0 引言

轻量化一直是制造行业研究的重点,钢/铝构件逐渐代替钢构件成为制造领域的主要材料之一。钢、铝两种材料物理成分和化学性能上差异较大,在焊接过程中,会产生 FeAl<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 等脆性金属间化合物,对接头的性能产生不利影响。当钢/铝接头的使用温度过高或过低时,会影响接头的脆性和强度,因此钢/铝异种接头的使用环境受到限制<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外众多学者主要通过搅拌摩擦焊接<sup>[4]</sup>、电弧焊接<sup>[5]</sup>、激光焊接<sup>[6]</sup>等方法实现钢/铝两种材料的连接,研究方向围绕着如何有效减少脆性金属间化合物和改善接头的力学性能展开。目前的方法主要有两种,分别是:添加辅助元素和优化焊接方法<sup>[7-8]</sup>。有学者指出,钢/铝接头中过多的金属间化合物主要与液态钢、铝两种金属的溶解度相关,界面反应的温度对化合物的生长有着显著影响<sup>[9]</sup>。

激光焊接具备能量集中、利用率高、残余应力小等优点,被广泛应用在异种材料的焊接中<sup>[10-12]</sup>。激光摆动焊接作为一种新型的激光焊接技术,可以在焊接的同时利用激光光束扰动熔池,减少气孔,控制热源能场分布,细化晶粒<sup>[13-14]</sup>。相比于常规激光焊接,激光摆动焊接可以提升异种金属之间的溶解度,使接头具备更好的连接质量<sup>[15-16]</sup>。徐楷昕等<sup>[17]</sup>采用激光摆动填丝焊接 TC4 钛合金接头,对比了不同扫描路径下焊缝成型、焊缝气孔率、拉伸强度的区别,发现摆动焊接接头的质量均好于常规焊接。温鹏等<sup>[18]</sup>用激光摆动焊接 6A01-T5 铝合金,得到了表面成形均匀、内部无明显缺陷的焊缝。而且焊缝内的气孔率低于 1%,最大气孔直径仅为 50 μm,焊接接头的显微硬度和疲劳强度都得到大幅度提升。李军兆等<sup>[19]</sup>使用激

光摆动焊接 6061 铝合金和 316L 不锈钢,相比于常规焊接,接头的最大剪切强度可达 117.5 N/mm。陈靖雨等<sup>[20]</sup>通过激光摆动焊接 Q235 钢,研究发现,激光摆动焊接会使熔池变宽,熔池变宽会引起温度梯度降低,束流振荡对熔池后部的搅拌作用可以促进组织演化熔池,细化晶粒,显著提高焊接接头的显微硬度,提升抗拉强度。此外,焊缝形态缺陷的减少和等轴晶的增加也能提高接头的延性。伍强等<sup>[21]</sup>通过研究证实,通过激光焊接钢板,焊缝的使用性能得到大幅度提升。Kraetzsch 等<sup>[22]</sup>认为,增加摆动焊接的扫描宽度可以得到具有均匀混合熔体区的铝/铜接头,这是由于改进熔体流动和凝固行为所引起的。摆动焊接会使金属间化合物的平均尺寸略有增加,但最大尺寸、形成百分比数量会减少<sup>[23]</sup>。Kar 等<sup>[24]</sup>使用摆动焊接 AISI 316L 焊接接头,得到焊缝较窄的熔合区和均匀的显微组织。接头的拉伸强度、弯曲强度和力学性能得到大幅度提升。

文中以 5083 铝合金和 DP780 双相钢为研究对象,对异种金属进行点焊接和激光摆动点焊接,分析摆动点焊接对钢/铝接头的成型特点、金相组织、显微硬度的影响,实现钢、铝两种材料的高效连接,为钢/铝接头激光焊接的研究提供新的思路。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

采用 1 mm 厚度的 5083 铝合金和 1.2 mm 厚度的 DP780 双相不锈钢,它们的尺寸均为 20 mm×80 mm,主要的化学成分如表 1 所示。焊接前使用乙醇清洗钢板和铝板,去除表面杂质和油脂。然后使用钢刷对打磨铝板表面,去除表面的氧化层。

表 1 基材的主要化学成分 (质量分数/%)

Tab.1 Main chemical composition of the base material (mass fraction/%)

| Material | Mn   | Si    | Ti   | Mg  | C    | P     | S     | Zn   | Cr  | Al    | Fe   |
|----------|------|-------|------|-----|------|-------|-------|------|-----|-------|------|
| DP780    | 1.95 | 0.235 | -    | -   | 0.16 | 0.022 | 0.007 | -    | -   | 0.132 | Bal. |
| 5083     | 0.5  | 0.1   | 0.03 | 4.7 | -    | -     | -     | 0.03 | 0.1 | Bal.  | 0.3  |

1.2 试验方法

试验采用最大功率为 10 kW 的 Trumpf 10002 碟片激光器, 焊接头为 Trumpf PFO, 接头可以实现不同的激光扫描路径, 试验使用折线、螺旋线、曲线等 7 种扫描路径, 具体的路径示意图和编号如图 1(a) 所示。钢/铝接头的焊接示意图如图 1(b) 所示, 采用钢上铝下的搭接方式, 搭接距离为 20 mm, 保护气为氩气, 流速为 15 L/min。试验参数如表 2 所示, 主要研究激光扫描路径对焊接结果的影响。相比于常规

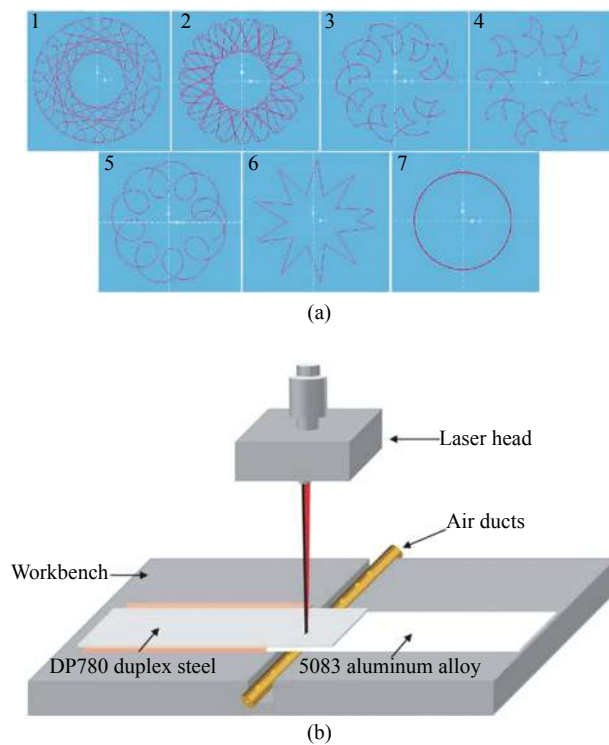


图 1 激光焊接示意图。(a) 扫描路径和编号示意图; (b) 钢/铝接头搭接示意图

Fig.1 Schematic of laser welding. (a) Schematic of scanning path and number; (b) Schematic of lap joint of steel/aluminum joint

表 2 试验参数

Tab.2 Test parameters

| Laser No. | Input power/energy<br>W<br>Q/W | Amount of defocus/<br>mm | Scan path | Wobble breadth/<br>mm | Wobble cycle/<br>mm | Wobble frequency/<br>Hz |    |
|-----------|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|---------------------|-------------------------|----|
| 1         | 1650                           | 750.47                   | -1.5      | 1                     | 1.2                 | 1                       | 20 |
| 2         | 1650                           | 750.47                   | -1.5      | 2                     | 1.2                 | 1                       | 20 |
| 3         | 1550                           | 706.91                   | -1.5      | 3                     | 1.2                 | 0.925                   | 20 |
| 4         | 1550                           | 706.91                   | -1.5      | 4                     | 1.2                 | 0.925                   | 20 |
| 5         | 1550                           | 706.91                   | -1.5      | 5                     | 1.2                 | 0.925                   | 20 |
| 6         | 1550                           | 686.84                   | -1.5      | 6                     | 1.2                 | 0.925                   | 20 |
| 7         | 1350                           | 599.89                   | -1.5      | 7                     | 0                   | 0                       | 0  |

的焊接模式, 当采用摆动激光焊接时, 激光功率需稍微增大, 以保证焊缝的有效连接。

焊接结束后, 沿焊缝垂直方向切割金相试样, 进行微观结构的观察。使用 600#、1000#、1500#、2000# 的砂纸对接头横截面抛光打磨, 然后使用 0.5 μm 的金刚石抛光液将接头截面抛光至镜面。用 Keller 试剂 (1% HF, 1.5% HCl, 2.5% HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O solution) 腐蚀接头的晶界。用数字化金相显微镜 (Ario Image.M2 m) 和平面测量显微镜 (苏州汇光 VH1202) 观察接头的微观结构。通过扫描电子显微镜 (FEI Company QuantaTM250) 观察钢/铝接头形貌, 并使用自带的能谱仪对接头各处元素的分布情况进行分析。使用显微维氏硬度计 (Buehler VH1202) 测量焊缝的显微硬度, 测量标准选用 ASTM E384, 测量时加载力为 500 g, 保压时间为 10 s。拉伸试验使用电子万能拉伸试验机 (上海捷沪 CMT4202), 拉伸试样规格为 20 mm×140 mm, 试验时, 分别在两侧的母材处加入 1.2 mm 和 1 mm 厚度的垫板, 保证拉伸力与接头界面平行。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观形貌

图 2 为不同焊接模式下钢/铝接头的宏观形貌, 可以看出, 焊缝表面的形貌可以通过激光摆动的方式来改变。使用 4、6 两种扫描路径焊接时, 光斑对板材的作用面积改变, 导致激光能量密度集中, 钢、铝两块板材均熔穿, 焊缝表面呈暗灰色, 两种路径焊接的焊缝均具有较粗糙的表面, 焊缝顶部和根部出现了明显的凹凸, 存在一些不平滑的过渡; 当采用其他扫描路径焊接时, 激光与板材的接触面积发生改变, 此时母材表面受热均匀, 焊缝无熔穿。在摆动焊接时, 摆动图形的变化对点焊接头的影响较大, 相对而言, 1#、2#、3#、5#、7# 焊接接头的成型效果更好, 其顶部和底

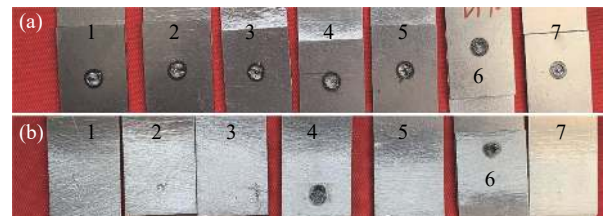


图 2 不同点焊接头的焊缝形貌。(a) 接头的正面; (b) 接头的背面

Fig.2 Shape of the weld seam with different spot welded joints. (a) Front side of the joint; (b) Back side of the joint

部没有任何不平滑的过渡。

使用不同焊接模式的钢/铝接头截面形貌如图 3 所示,图中 BM、HAZ、WZ 分别表示母材、焊缝热影响区和焊缝。7 组试验结果均为全熔透焊缝,焊缝形貌随着扫描路径的变化而改变。当采用 4、6 两种扫描路径焊接钢/铝接头时,作用在工件表面的光斑能量对焊接熔池的热输入量和材料表面的能量密度比例大。背面焊接痕迹明显,接头顶端出现下榻和贯穿整个接头的裂纹。在钢铝两侧分别施加较大的拉伸力或者在顶端施加较大的压力时,容易引发焊接失效,此时焊接接头的力学性能较差。当采用 2、3、5、

7 扫描路径焊接时,激光功率作用在材料表面与内部的密度降低,此时焊接接头的背面有少量斑痕。其中 2#接头有裂纹,但尺寸小,对力学性能的影响不大。3#、5#接头无裂纹,但有塌陷。7#接头因无摆动焊接,致使底部产生大量气孔,是匙孔内的气体排放不及时所导致<sup>[25]</sup>。当采用 1#扫描路径时,光斑作用在工件表面的能量降低,激光汇聚于匙孔内部,小孔四周被钢、铝液体包裹。在孔壁表面张力和孔腔内连续产生的蒸汽压力的作用下,液态金属能够保持平衡的流动,焊接匙孔稳定延伸,获得稳定且成型较好的焊缝,焊缝表面成型较好,接头无明显缺陷。

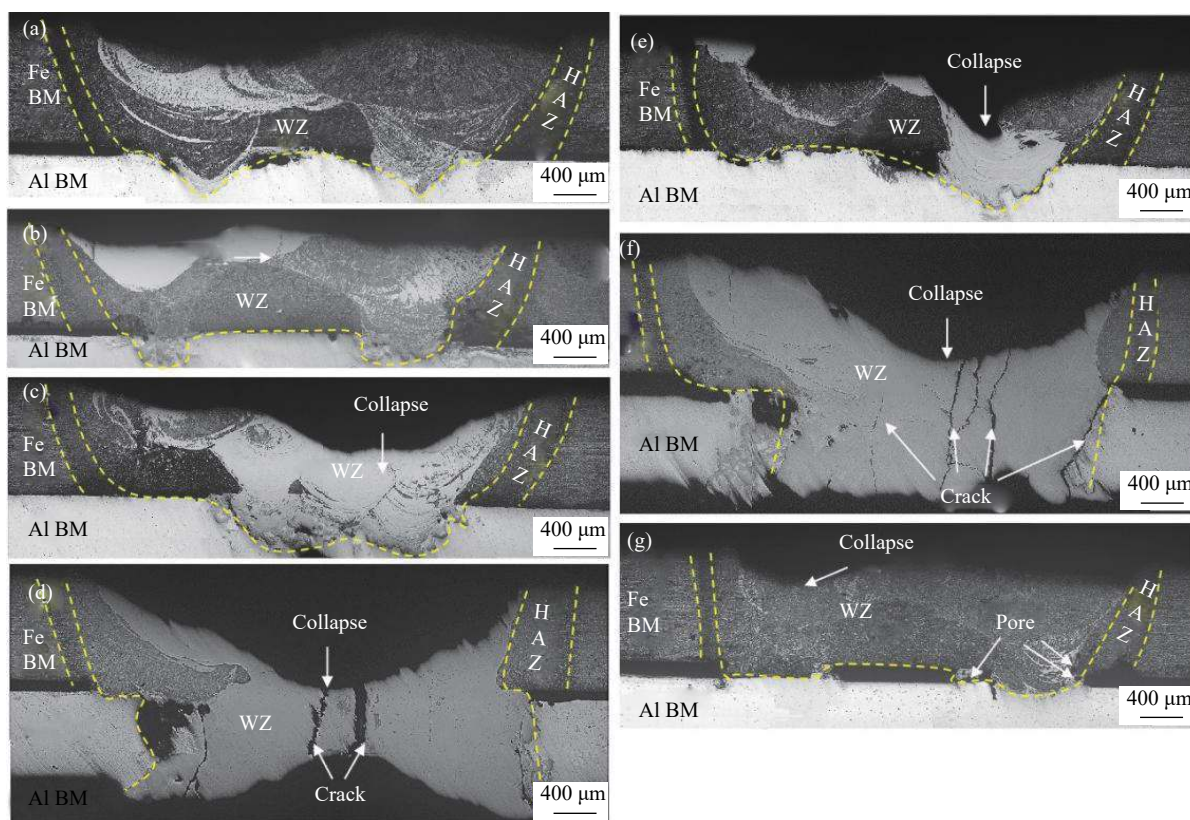


图 3 焊接接头的截面。(a)-(g) 1#~7#焊接接头截面

Fig.3 Cross-section of welded joint. (a)-(g) Cross-section of welded joint 1#-7#

在 7 种扫描路径中,焊接接头均产生不同程度的缺陷,如塌陷、裂纹、气孔等,其主要原因是因为,在焊接过程中,锌、镁等元素的烧蚀,容易引发匙孔坍塌、金属上溢的问题。正如 Fei Y 所报道的<sup>[1]</sup>。在焊接接头的根部会产生气孔,这是由于镀锌钢表面的锌层蒸发所导致的。气孔的产生对接头的性能有不利影响,但是锌的存在是必不可少的,锌可以保证熔融铝在钢表面的湿润性。因少量的焊接缺陷对实际的

需求影响不大,所以在文中除 4#、6#两个接头外,其他焊接接头的缺陷是可以忽略不计。

参考文献 [21] 表明,摆动焊接时,激光束对熔池的接触面积增加,当液态金属蒸发时,光束作用在金属蒸汽内的反冲压力增大,在反冲压力横向和纵向分力的作用下,金属液体沿着匙孔张开的方向移动。此时,匙孔开孔直径变大,液态金属不易坍塌,因此,因匙孔不稳定产生的工艺性气孔得到抑制。激光摆动

焊接时,激光光束一直在搅拌熔池,可以缓解热应力集中,有助于焊接过程中产生的气泡排出,减少飞溅、气孔等缺陷<sup>[26]</sup>。

由于激光束扫描路径的改变,使点焊接头的大小也发生变化。使用不同焊接模式的钢/铝接头尺寸如图 4 所示。使用 1~6 号扫描路径焊接的过程中,激光一直处于摆动状态,激光对母材的接触面积增加,能量降低。摆动焊接时,焊缝的深宽比小于常规焊接的焊缝。由此可知,当焊接速度、激光功率等参数一定时,激光摆动方式的变化会改变工件表面光斑能量密度的变化,从而影响焊接的稳定性与焊缝成形,激光扫描路径在一定程度上决定焊缝的深宽比。

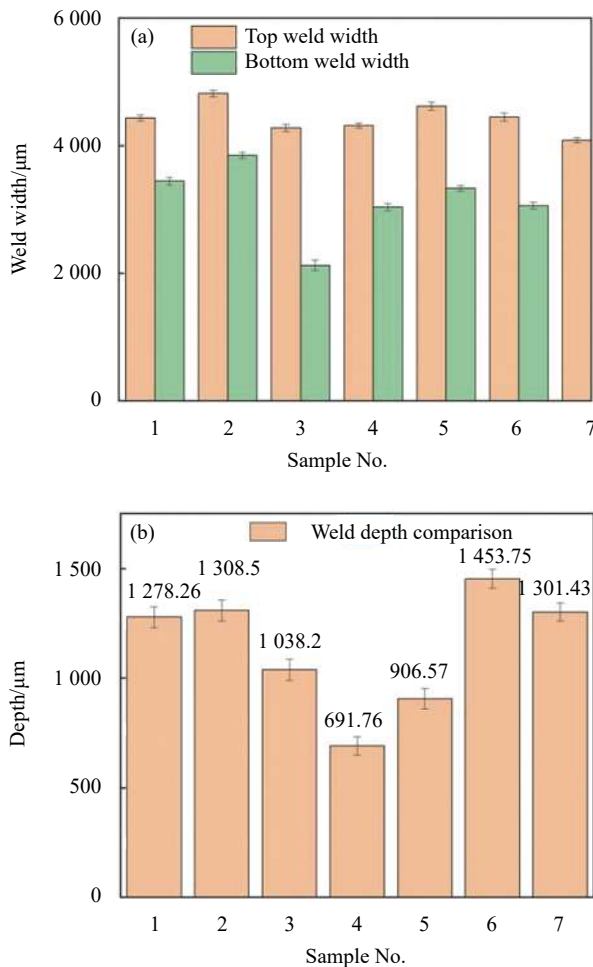


图 4 焊接接头的截面。(a) 焊缝熔宽;(b) 焊缝熔深

Fig.4 Cross section of welded joint. (a) Weld fusion width; (b) Weld fusion depth

## 2.2 微观组织

钢/铝焊接接头主要由熔合线、热影响区、焊缝 3 部分组成。因为 7 种焊接接头热影响区的金相组织

相同,均由回火铁素体和块状铁素体组成,晶粒尺寸由小到大逐渐过渡到焊缝区,所以仅比较 7 种焊接接头的熔合线、焊缝顶端、焊缝底端 3 区域金相组织的区别,分析不同扫描路径对焊接接头金相组织的影响。

图 5 为不同钢/铝接头熔合线区域的金相组织。其中 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>号接头的金相组织相似,熔合线处由大量的马氏体和铁素体组成。在焊缝底端为铁素体,其中 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>号接头的底端有少量片状珠光体。2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>号接头熔合线处主要由铁素体和马氏体两种成分组成,焊缝底端整体由铁素体组成,热影响区为低碳马氏体<sup>[27-28]</sup>。其中 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>号接头的热影响区晶粒呈等轴晶,且依附于熔合线边界靠近焊缝一侧生长。4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>号接头热影响区的晶粒方向各异,这种杂乱分布的晶粒可提高焊接接头的力学性能,因为施加在焊接接头处的力会均匀地分散在针晶粒内部,使晶粒内部与晶界附近应变力减少,减缓应力集中的现象,使材料表面受力均匀<sup>[29]</sup>。

图 6 为不同焊接接头顶端的金相组织。1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>接头由大量的铁素体和少量的马氏体组成。2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>接头顶端均由铁素体组成。7<sup>#</sup>接头整体由大量马氏体和较少的带状铁素体组成。造成接头顶部组织不同的主要原因是,激光摆动的方式不同,改变了材料表面所承受的能量,间接改变了熔池温度,控制了晶粒生长的能量,因此,不同的扫描路径所得到的金相组织不同。

图 7 为不同焊接接头底端的金相组织。3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>接头底端由铁素体组成,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>接头的底端由铁素体和马氏体组成,7<sup>#</sup>接头的底端由马氏体组成。激光摆动焊接和未摆动焊接的晶粒形貌不同。常规焊接时,随着熔覆深度的增加,激光能量逐渐降低,焊缝底端提供晶粒成长的能量有限。激光摆动焊接使晶粒的生长受到干扰,激光摆动焊接使熔池各处温度统一,焊缝各处都有足够的能量支撑晶粒成长。

图 8 为 5<sup>#</sup>和 7<sup>#</sup>接头钢铝连接处的微观组织,通过图片可以观察到,摆动焊接产生的金属间化合物为网状,而常规焊接产生的化合物为针状。使用能谱仪对金属间化合物各处的元素分布情况进行检测,结果如表 3 所示。可以发现,激光摆动焊接时,激光搅拌熔池使熔池内的金属混合均匀,这与 Sierra G 等人的研究相符合,激光束可有效地搅拌熔池,控制钢、铝

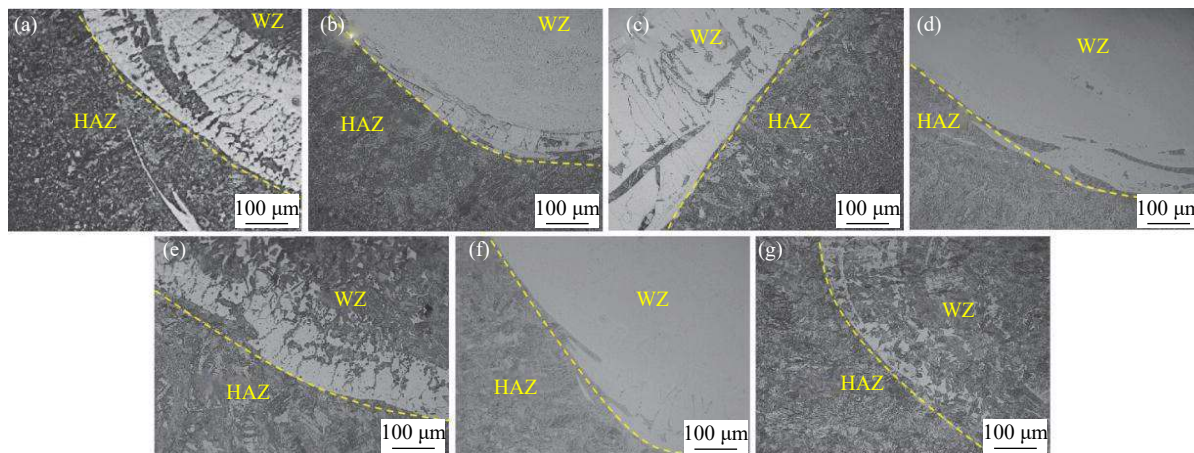


图 5 不同焊接接头熔合线区域。(a)~(g) 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 焊接接头金相组织

Fig.5 Different welded joints fusion line area. (a)-(g) Metallographic organization of 1<sup>#</sup>-7<sup>#</sup> welded joint

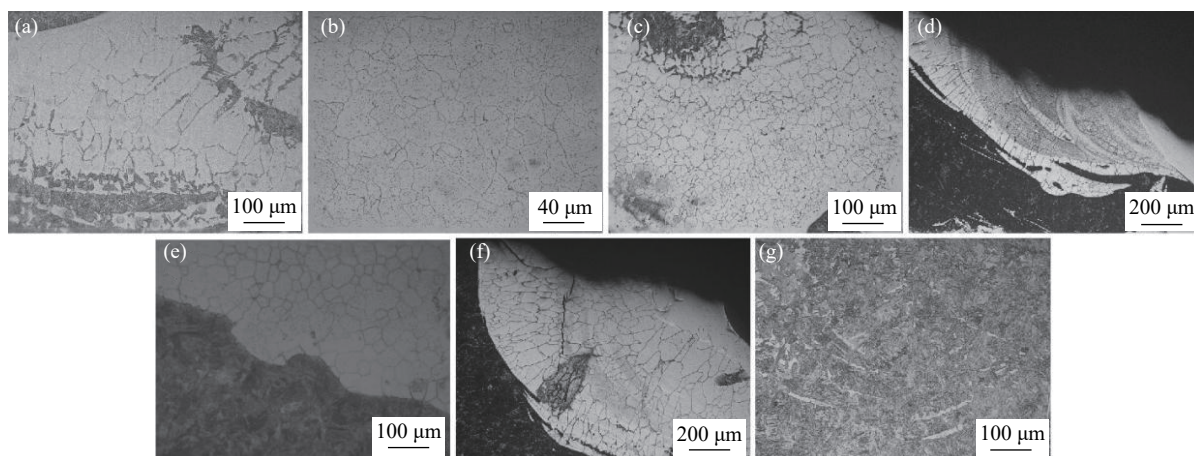


图 6 不同焊接接头顶端焊缝处。(a)~(g) 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 焊接接头金相组织

Fig.6 Different welded joints at the top of the weld. (a)-(g) Metallographic organisation of 1<sup>#</sup>-7<sup>#</sup> welded joint

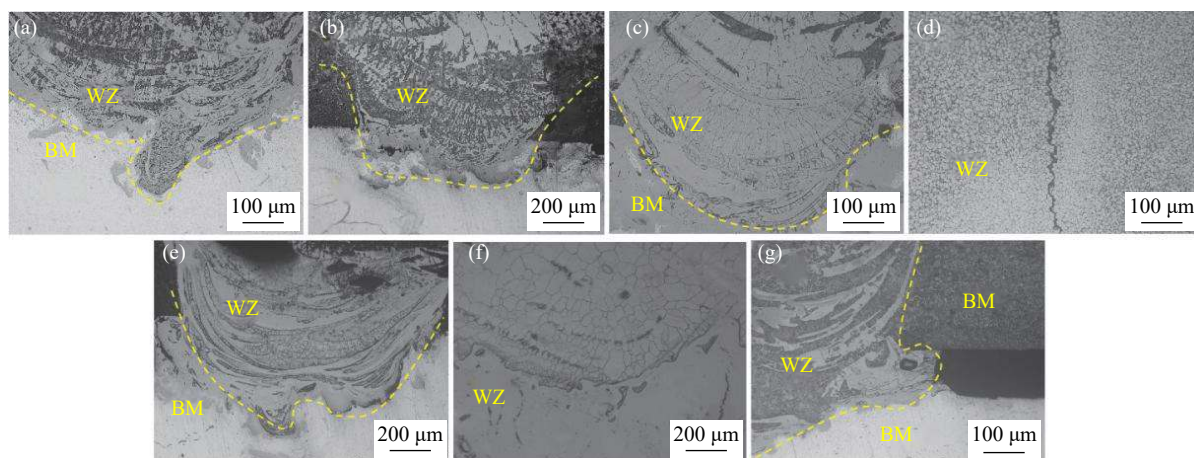


图 7 不同焊接接头底端。(a)~(g) 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 焊接接头金相组织

Fig.7 Different welded joints bottom. (a)-(g) Metallographic organisation of 1<sup>#</sup>-7<sup>#</sup> welded joint

两种金属元素的分布,减少脆性化合物 FeAl<sub>3</sub> 等物质的产生<sup>[20]</sup>。通过测量发现,5<sup>#</sup>接头 IMCS 层的厚度为

12.33 μm, 7<sup>#</sup>接头 IMCS 层的厚度为 16.645 μm。在目前的研究中,IMCS 层过厚不利于接头的力学性能的

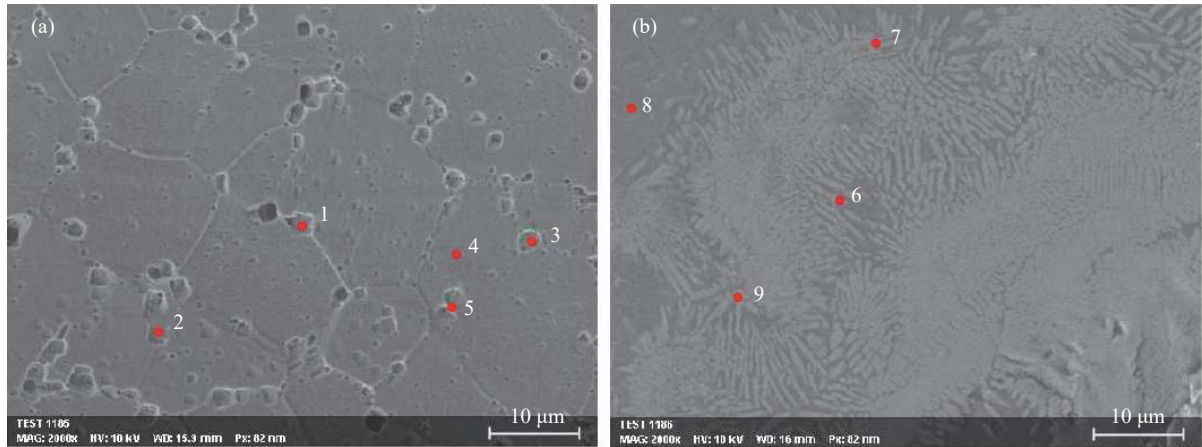


图 8 焊接接头的显微组织。(a) 5#焊接接头的显微组织;(b) 7#焊接接头的显微组织

Fig.8 Microstructure of different welded joints. (a) Microstructure of 5<sup>#</sup> welded joint; (b) Microstructure of 7<sup>#</sup> welded joint

表 3 图 8 中标记点的 EDS 结果

Tab.3 EDS results of in Fig.8

| Position | Atomic fraction |       |        |        | Possible phases   |
|----------|-----------------|-------|--------|--------|-------------------|
|          | C-K             | Mg-K  | Al-K   | Fe-L   |                   |
| 1        | 0               | 0     | 39.55% | 60.45  | FeAl              |
| 2        | 9.18%           | 0     | 36.13% | 54.70% | FeAl              |
| 3        | 0               | 0     | 43.37% | 56.63% | FeAl              |
| 4        | 0               | 5.97% | 33.04% | 60.98% | FeAl              |
| 5        | 0               | 4.72% | 32.34% | 62.94% | FeAl              |
| 6        | 0               | 0     | 77.28% | 22.72% | FeAl <sub>3</sub> |
| 7        | 0               | 0     | 77.25% | 22.75% | FeAl <sub>3</sub> |
| 8        | 0               | 4.96% | 95.04% | 0      | α-Al              |
| 9        | 0               | 0     | 78.97% | 21.03% | FeAl <sub>3</sub> |

体现,因此,摆动焊接的接头具备更好的力学性能<sup>[30]</sup>。

图 9 为 5#和 7#接头的微观组织,通过观察可以看出,摆动路径焊接的接头晶界过渡明显,两者在焊缝区域都产生了白色网状的第二相。结合表 3 的试验结果可知,晶间白色网状析出相主要由 (60±5) at.% Al 和 (40±5) at.% Fe 组成,由 Al-Fe 二元合金相图可确定熔核区晶间网状相为 FeAl 组织。值得一提的是,无摆动和摆动两种焊接方式都会产生 FeAl,但是无摆动焊接产生的 FeAl 更多在焊缝和热影响区交界处,而摆动焊接则集中在焊缝的底端和顶部。对比图 9 (b) 和 9 (e) 可以看到摆动焊接时接头中的晶粒更细,这

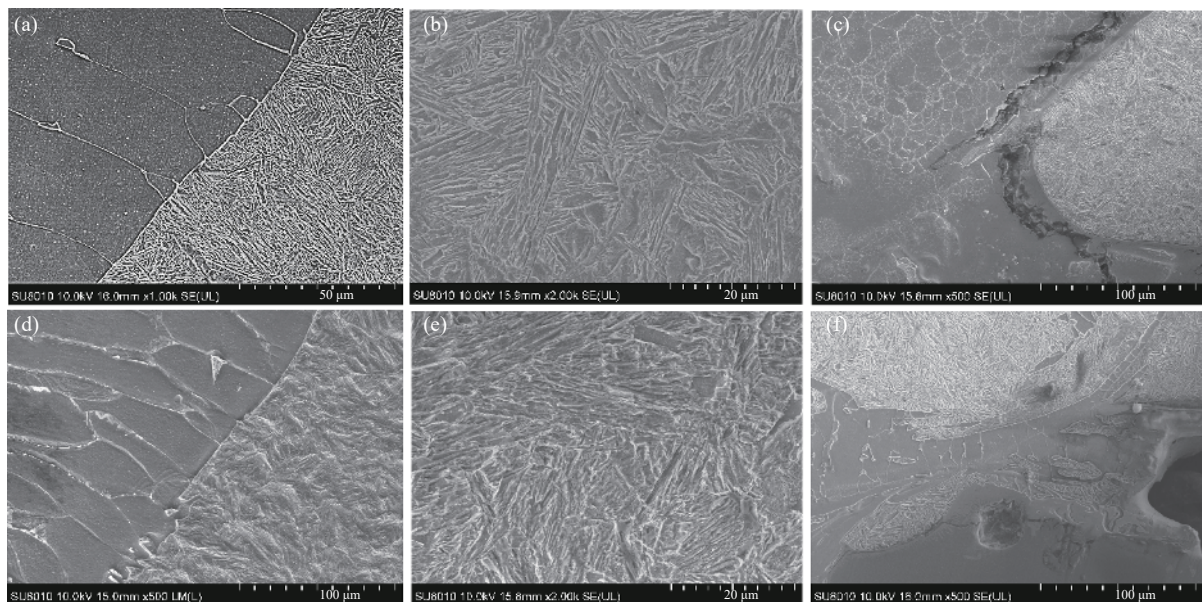


图 9 5#、7#焊接接头的显微组织。(a),(d) 接头界面组织;(b),(e) 焊缝的晶粒组织;(c),(f) 接头的底端连接处

Fig.9 Microstructure of 5<sup>#</sup> and 7<sup>#</sup> welded joints. (a), (d) Joint interface structure; (b), (e) Grain structure of the weld; (c), (f) Bottom joint of the joint



与前文中金相组织的分析结果是一致的。接头内晶粒细化,会使其具备更好的力学性能。根据参考文献 [17-20] 的结论进行分析可知,摆动焊接时激光束搅拌熔池,利于接头中的晶粒细化。

### 2.3 显微硬度

图 10 为不同焊接参数下钢侧焊接接头的显微硬度载荷变化图。从图中可以看出:5<sup>#</sup>钢侧接头的最大显微硬度最高是 450 HV,常规焊接钢侧接头的最大显微硬度是 424 HV。

通过图 10 可以看出,摆动焊接钢/铝接头的最大显微硬度得到了提升。然而,摆动焊接焊缝区显微硬度的平均值低于常规焊接的显微硬度。摆动焊接时,激光扫描材料表面,随着激光扫描时间的加长,激光在板材上的热累积增多,接头内能量较多,有足够的能量支撑焊缝内的晶粒生长,因此晶粒尺寸较大,导致焊缝内铁素体含量远高于马氏体,摆动焊接的接头焊缝区显微硬度的平均值略低。从图 6 可以看出,常规焊接接头焊缝内马氏体的含量较高,铁素体含量低,微观组织晶粒呈现不规则状态分散,这种分散方式利于受力后力的分散,施加在表面的力会均匀地分散在材料表面,防止应力集中。无论是摆动焊接还是常规焊接,焊缝的热影响区都是显微硬度的最高值。

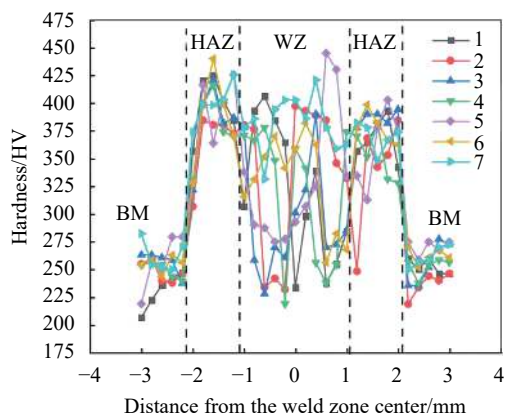


图 10 不同扫描路径下钢侧焊接接头的显微硬度

Fig.10 Microhardness of welded joints on the steel side under different scanning paths

### 2.4 剪切强度

图 11 为不同工艺参数下得到的钢/铝焊接接头的拉伸载荷变化图,可以发现:相比于常规焊接,摆动焊接的接头性能得到提升,最大的剪切强度为 83 N/mm,

采用常规焊接时,钢/铝接头的剪切强度为 39 N/mm。摆动焊接时,激光扫描材料表面增大,焊缝单位受到的能量降低,增加了钢/铝接头的连接区域,焊缝熔深较浅,钢/铝结合面较差,当摆动幅度增大时,钢/铝结合面宽度增大,有效的承载面积增加,且接头的熔深降低,减少了焊缝中脆性金属间化合物的产生,施加的力可以更好地分散出去,有助提高焊缝的剪切强度<sup>[31]</sup>。常规焊接时,接头的熔深增大,这意味着钢铝反应增强,因此焊缝中脆性金属间化合物的含量增加,大量的脆性金属间化合物会影响焊缝的力学性能,在钢铝连接处将更容易发生断裂。另外,焊缝熔深的降低减少了焊缝中脆性金属间化合物的含量,这种机械连接和冶金连接的综合作用有利于提高焊接接头的剪切强度。

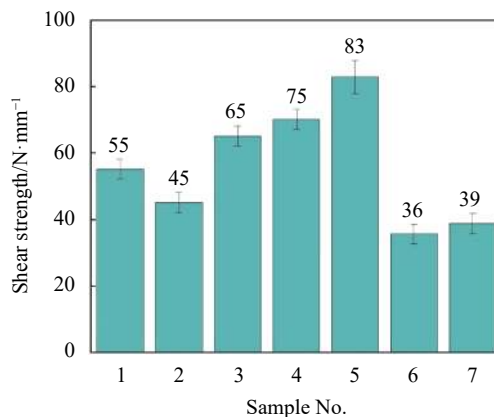


图 11 不同扫描路径下钢/铝接头的剪切强度

Fig.11 Shear strength of steel/aluminum joints with different scan paths

## 3 结束语

采用 7 种扫描路径激光点焊 5083 铝合金和 DP780 双相钢,对比研究了扫描路径和摆动步进对点焊接头的焊缝成形、微观组织及显微硬度的影响,结果表明:

(1) 激光摆动焊接可以增加焊缝的熔宽,减少熔深,抑制接头的气孔、裂纹、下榻等焊接缺陷。从 7 种激光扫描的焊接结果可以明显地看出,5<sup>#</sup>摆动方式对钢铝焊接接头具更好的适应性。其余的扫描路径相比较于 5<sup>#</sup>摆动方式适应性差,但是接头的力学性能均好于常规焊接。

(2) 常规焊接时,钢、铝两种材料的融合性较差,两种材料的结合区晶界不明显,而摆动焊接可以促进

两种材料的融合,抑制金属间化合物的产生,并且增大接头的连接面积,有利接头性能的提高。因摆动焊接时,熔池冷却速度较快,所以接头处形成较多的网状铁素体。铁素体的硬度不高,但具有良好的塑性与韧性,力学性能较好。

(3) 采用激光摆动焊接得到的钢侧接头最大显微硬度为 450 HV,是常规激光点焊接头的 1.06 倍,接头显微硬度最高的地方位于焊缝的热影响区。摆动点焊接头的最大剪切强度为 83 N/mm,是常规焊接接头的 2.12 倍。

### 参考文献:

- [1] Fei Y, Xiang F, Lin C, et al. Microstructure evolution and phase transition at the interface of steel/Al dissimilar alloys during Nd: YAG laser welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 193-201.
- [2] Zhang H T, He P, Kong Q W, et al. Research status and development of on welding for dissimilar materials aluminium and steel [J]. *Welding & Joining*, 2006(12): 7-12. (in Chinese)
- [3] Wu S H, Chen S J, Niu J T, et al. Research on spot welding between aluminum and steel dissimilar metal for automobile body [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(11): 17-20. (in Chinese)
- [4] Yu H Y, Hu Z L. Investigation of interfacial microstructure and mechanical properties for DP590 steel/7075 aluminum dissimilar materials friction stir lap welding joints [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6): 65-72. (in Chinese)
- [5] Huang P F, Lu Z Y, Gao W N, et al. Low energy welding technology in bonding steel with aluminum [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 295-299. (in Chinese)
- [6] Zhou D W, Li N N, Liu Y L, et al. Microstructure and mechanical properties of dual phase steel/Aluminum alloy laser welding with adhesive layer addition [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(9): 2381-2388. (in Chinese)
- [7] Wang T, Zhou D W, Peng Y, et al. Steel-to-Aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0303009. (in Chinese)
- [8] Jia S H, Jia J P, Jiao J K, et al. Experimental and numerical studies on laser stir welding of carbon fiber reinforced thermal polymers/aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702006. (in Chinese)
- [9] Wang X H, Gu X Y, Sun D Q. Research on interface characteristic of laser welding joints of steel/aluminum dissimilar materials [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 26-33. (in Chinese)
- [10] Sun Z, Ion J C. Laser welding of dissimilar metal combinations [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(17): 4205-4214.
- [11] Zhang G D, Cheng G H, Zhang W. Progress in ultrafast laser space-selective welding [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1209-1223. (in Chinese)
- [12] Huang Z Y, Wang C S, He S, et al. Improvement of the ultrasonic testing accuracy of laser welding fusion width [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 652-660. (in Chinese)
- [13] Bao G, Peng Y, Chen W Z, et al. Study on laser welding of ultra-fine grained steel with weaving beam [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 203-205, 208. (in Chinese)
- [14] Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser-micro-welding of AISI304 stainless-steel foil [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102006. (in Chinese)
- [15] Yu Z H, Yan H G, Guan Z G, et al. Effects of laser welding parameters on weld appearance and cracking tendency of high strength magnesium alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6): 1479-1488. (in Chinese)
- [16] Cui Li, Wei Zhushi, Ma Biao, et al. Microstructure inhomogeneity of dissimilar steel/Al butt joints produced by laser offset welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50(8): 561-572.
- [17] Xu K X, Zhen L, Huang R S, et al. Effects of oscillation parameters on weld formation and porosity of titanium alloy narrow-gap laser wire filling welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602111. (in Chinese)
- [18] Wen P, Li Z X, Zhang S, et al. Investigation on porosity, microstructures and performances of 6A01-T5 aluminum alloy joint by oscillating fiber laser-CMT hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0802003. (in Chinese)
- [19] Li J Z, Liu Y B, Sun Q J, et al. Effects of laser beam wobble on weld formation characteristics, microstructure, and strength of aluminum alloy/steel joints [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0402010. (in Chinese)
- [20] Chen J Y, Wang X N, Lv F, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of low carbon steels welded by laser beam oscillating welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302006. (in Chinese)
- [21] Wu Q, Chen G Y, Gong J K, et al. Corrosion property of laser welded joint of high-strength galvanized sheet [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 384-387. (in Chinese)
- [22] Kraetzsch M, Standfuss J, Klotzbach A, et al. Laser beam

- welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(Part A): 142-149.
- [23] Dinda S K, Kar J, Jana S. Effect of beam oscillation on porosity and intermetallics of electron beam welded DP600-steel to Al 5754-alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 265: 191-200.
- [24] Kar J, Roy SK, Roy G G. Effect of beam oscillation on electron beam welding of copper with AISI-304 stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 174-185.
- [25] Huang L, Chen X Z, Chen X, et al. Formation mechanism of porosity during laser welding of galvanized steel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106001. (in Chinese)
- [26] Wang L Z, Zhao J B, Tan J, et al. Visual measurement of welding deformation of high strength steel sheet at high temperature [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 283-295. (in Chinese)
- [27] Huo J H, Li D C. Metallographic Map of Metallic Materials[M]. 6th ed. Beijing: China Machina Press, 2015: 603-934. (in Chinese)
- [28] Wu D J, Yin B, Zhou Q J, et al. Nd: YAG laser welding of Yin steel sheet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 557-562. (in Chinese)
- [29] Pan J C. Effect of magnetic field on the weld temperature field and flow behavior of molten pool in Al/steel CMT welding process [D]. Changsha: Hunan University, 2018: 52-64. (in Chinese)
- [30] Ghassemi A H, Maa R, Bhat S P, et al. Deformation response of ferrite and martensite in a dual-phase steel [J]. *Acta Materialia*, 2014, 62: 197-211.
- [31] Guo W, Kong D J, Ye C D, et al. Effect of laser heat treatment on tensile properties of 1Cr5Mo heat-resistant steel welded joints [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1145-1149. (in Chinese)