

## 振镜扫描激光焊接 QP1180 高强钢的组织 and 性能研究

林文虎<sup>1\*</sup>, 吴岳<sup>2</sup>, 李芳<sup>3</sup>, 华学明<sup>3</sup><sup>1</sup>上海科技大学创意与艺术学院智造系统工程中心, 上海 201210;<sup>2</sup>上海电机学院材料学院, 上海 201306;<sup>3</sup>上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

**摘要** 主要对比了 QP1180 高强钢在不同线扫描偏转角度下的激光焊接结果,对接头的焊缝成形、显微组织、拉伸性能和硬度进行了分析。研究表明:增加线扫描偏转角度会增加焊缝宽度,但会降低焊缝熔深;偏转角度为 45°的线扫描方式可以在保证熔深、不降低焊接速度的情况下,增大焊缝宽度,并有利于提高拼焊板间隙的适应性。由于热影响区的软化区是板条马氏体回火、碳化物分解和位错密度降低引起的,振镜线扫描激光焊接增加了焊缝宽度和软化区宽度,改变了拉伸变形的应力应变分布和断裂位置。

**关键词** 激光技术; 振镜扫描; 热效应; 高强钢; 显微组织

**中图分类号** TG456.7

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.2202015

## 1 引言

淬火配分(QP)钢作为第三代汽车先进高强钢,利用了残余奥氏体的相变诱导塑性(TRIP)效应和马氏体组织的强化效应。其中, QP1180 钢的抗拉强度高达 1200 MPa,断后伸长率为 15%。激光焊接具有热输入量低、热影响区窄和生产效率高等优点,常被应用于汽车生产制造中。李学军等<sup>[1]</sup>研究了 QP1180 高强钢激光焊接接头的组织和成形性能,发现热影响区的回火区为软化区,以回火马氏体组织为主,但接头的拉伸断裂发生在母材区,杯凸破坏则主要发生在软化区,杯凸变形能力仅为母材的 60%~70%。朱天才等<sup>[2]</sup>发现,随着热输入的增加,焊缝熔宽增加,软化区变宽,软化区的最低硬度减小,杯凸值减小。上述研究均提出了一种理论:变形过程中软化区受两侧相邻热影响区和母材的强化约束而得到强化,变形均匀地分布在试样平行段区域。

在汽车高强钢激光焊接接头的显微组织和力学性能方面,双相钢(DP steel)、淬火配分钢(QP steel)、马氏体钢(MS)、相变诱导塑性钢(TRIP steel)和复相钢(CP steel)激光焊接接头存在显著的差异, QP、DP 和 MS 高强钢激光焊接接头存在软化区,有的断裂在软化区,有的断裂在母材区,而 CP、TRIP 高强钢激光焊接接头不存在软化区,断裂位置全部在母材区。王金凤<sup>[3]</sup>对 DP1000 钢进行激光焊接后,发现热影响区存

在软化现象,接头断裂在软化区,除延伸率外,抗拉强度和屈服强度没有降低。邓彩艳等<sup>[4]</sup>发现, DP800 钢的激光焊出现与 DP1000 钢相似的结果。田飞等<sup>[5]</sup>发现, DP780 钢激光焊接接头的拉伸性能和变形行为的应变速率敏感性主要取决于 DP780 母材在不同应变速率下的变形行为及机制的改变,随着应变速率的增加, DP780 钢激光焊接接头的断裂位置由母材区逐渐转移至热影响区的软化区。Wang 等<sup>[6]</sup>利用冷金属过渡(CMT)焊接技术焊接 QP1180 软化区时发现,亚临界热影响区的残余奥氏体的体积分数较小,且回火马氏体分解析出粗大的碳化物颗粒。Guo 等<sup>[7-8]</sup>研究了 QP980 钢激光焊接接头及 QP980 与 DP980 钢的异种接头,发现 QP980 断裂在母材区, QP980 与 DP980 钢连接后断裂在 DP980 侧软化区。刘成杰等<sup>[9]</sup>研究了无镀层热成形钢的激光焊接,焊接前母材组织已转变为板条马氏体,当焊接后热影响区的热循环峰值温度低于奥氏体开始形成温度( $A_{c1}$ )时,出现回火马氏体及两相转变区的部分奥氏体化转变组织,该区域硬度较小,是接头的软化区,接头断裂在此处。魏世同等<sup>[10]</sup>发现, TRIP980 激光焊接接头的热影响区以硬化组织为主,不存在软化组织,无表面缺陷的接头断裂在母材区。杨蕾等<sup>[11]</sup>研究了 CP800 复相钢的激光焊接接头,认为贝氏体内的细小析出相在短暂焊接热循环内没有足够的时间析出,位错密度无明显改变,因此不存在软化区。

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 上海市科技创新行动扬帆计划(21YF1428800)、上海市晨光计划(21CG71)

通信作者: \*linwh@shanghaitech.edu.cn

近几年振镜扫描技术快速发展。在表面清洗领域,振镜扫描技术可以去除表面氧化膜<sup>[12]</sup>。在激光焊接领域,振镜扫描技术可以提高薄板的焊接效率<sup>[13]</sup>和对接间隙适应性,抑制裂纹形成,通过优化工艺参数还可以细化晶粒和减少气孔<sup>[14]</sup>。在异质材料的连接过程中,振镜扫描有助于焊缝选择性地形成金属间化合物<sup>[15]</sup>。梁晓梅等<sup>[16]</sup>研究了四种扫描方式对焊缝成形、焊接气孔和焊接变形的影响,发现“O”形焊缝表面平整且飞溅和焊缝气孔少,这得益于光斑扫描路径对液态金属的搅拌作用。此时,焊接速度为扫描速度的 1/5,光斑几乎在熔池内;扫描幅度和扫描频率分别表征了扫描的区域变化和快慢程度,它们会影响熔池面积及焊接过程中小孔和等离子体的稳定性,进而影响焊缝尺寸与气孔率。Hao 等<sup>[17]</sup>研究了扫描频率和扫描幅值对焊缝成形的影响:随着扫描频率的增加,焊缝形状依次发生“之”形、锯齿形、平滑直线、尖锐钉形、钝钉形、V 形、U 形的变化(振镜扫描速度的变化范围为 5~750 mm/s),焊缝横截面的熔深不一致;扫描幅值对焊缝形状的影响较弱,其主要影响焊缝熔深。除了上述参数,Mann 等<sup>[18]</sup>研究了光斑尺寸对焊缝成形的影响。Wu 等<sup>[19]</sup>对比了圆形扫描策略和直线扫描策略的差异,并通过三明治板观察了匙孔形态,研究了匙孔的稳定性。Chen 等<sup>[20]</sup>和 Liu 等<sup>[21]</sup>分别探讨了“∞”和正弦函数两种扫描轨迹在气孔抑制方面的作用。

除了振镜扫描对匙孔稳定性和气孔抑制的影响

外,Chen 等<sup>[22]</sup>发现“O”形扫描方式有利于改善航天用 DA06 超高强钢的组织 and 性能。另外,Yan 等<sup>[23]</sup>研究了振镜扫描对 316N 不锈钢接头温度场和残余应力分布的影响:随着扫描频率的增加,焊缝温度降低;随扫描幅度的增加,温度先减小后增大;扫描可以降低焊缝和热影响区的应力集中,说明扫描可以促进能量分布趋向均匀。在窄间隙激光填丝焊接钛合金的过程中,圆形摆动提升了焊缝成形质量,并控制了气孔问题<sup>[24]</sup>。环形光具有改善能量分布的作用,可用于解决镁合金激光焊成形差的问题<sup>[25]</sup>。本文在同等热输入的条件下,研究了振镜线扫描偏转角度对焊接接头组织和性能的影响,以期降低焊缝的硬度。

## 2 试验材料与方法

试验材料采用的是 1.2 mm 厚的 QP1180 高强钢薄板,其化学成分如表 1 所示。QP1180 高强钢的初始显微组织由马氏体(M)、铁素体(F)和残余奥氏体(RA)组成。焊接光源采用光纤激光器,激光输出功率为  $P=3$  kW,离焦量设定为 0,其最小光斑半径( $r_0$ )为 0.15 mm。激光线扫描的偏转角度定义为激光扫描方向与焊接方向的夹角,振镜扫描幅度( $A$ )范围为 1.5 mm,扫描频率( $f$ )为 25 Hz,扫描速度( $V_0$ )为 75 mm/s,扫描偏转角度分别为  $90^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $0^\circ$ ,如图 1 所示。焊接过程中未使用惰性保护气体,采用的是平板堆焊的方式,焊接速度  $V_w=50$  mm/s。

表 1 QP1180 钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of QP1180 steel

Composition	C	Si	Mn	P	S	Al
Mass fraction / %	0.1801	1.6550	2.6620	0.0074	0.0006	0.0323

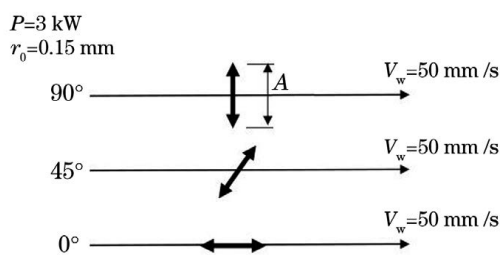


图 1 振镜扫描方式示意图

Fig. 1 Diagram of galvanometer scanning mode

垂直于焊缝对金相试样和拉伸试样进行取样。金相试样经镶嵌、研磨和抛光后,采用体积分数为 3% 的硝酸乙醇溶液腐蚀,然后使用光学显微镜和扫描电子显微镜观察其显微组织。电子背散射衍射(EBSD)测试电压为 20 kV,束流为 5 nA,步长为  $0.05 \mu\text{m}$ ,不同位置的观察区域尺寸为  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。采用硬度计测试显微硬度,加载载荷为 500 g,保持时间为 10 s,相邻测试硬度点的间距为  $150 \mu\text{m}$ 。室温拉伸试验采用万能拉伸机,搭配测量标距为 8 mm、最大变形量程为 50% 的应变引伸计,拉伸试样的平行段长度为 10 mm,

宽度为 2 mm,拉伸过程中应变速率为  $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,拉伸试验结果取多次测量结果的平均值。

## 3 试验结果

### 3.1 焊缝成形

图 2 显示了不同线扫描偏转角度下 QP1180 高强钢焊接接头焊缝的正面、背面和横截面。当线扫描偏转角度为  $45^\circ$  和  $0^\circ$  时,焊缝均完全熔透,背面焊道锈黄、严重氧化。当线扫描偏转角度为  $90^\circ$  时,焊缝呈断续熔透,说明横向扫描会减少熔透。按硬度的分布将焊接接头划分为焊缝区(FZ)、粗晶热影响区(CGHAZ)、细晶热影响区(FGHAZ)、临界热影响区(ICHAZ)、亚临界热影响区(SCHAZ)和母材区(BM),位置分别对应图 2(b)所示的 A~E 及 BM,其中亚临界热影响区的宽度较难直接从金相组织中测得。线扫描偏转角度对焊缝尺寸的影响如表 2 所示,其中  $W_{FZ}$  为上表面焊缝宽度, $D_0$  为临界热影响区间的距离, $W_{CG+FG}$  为上表面粗晶区和细晶区的宽度。在相同线扫描长度下,线扫描偏转角度越大,上

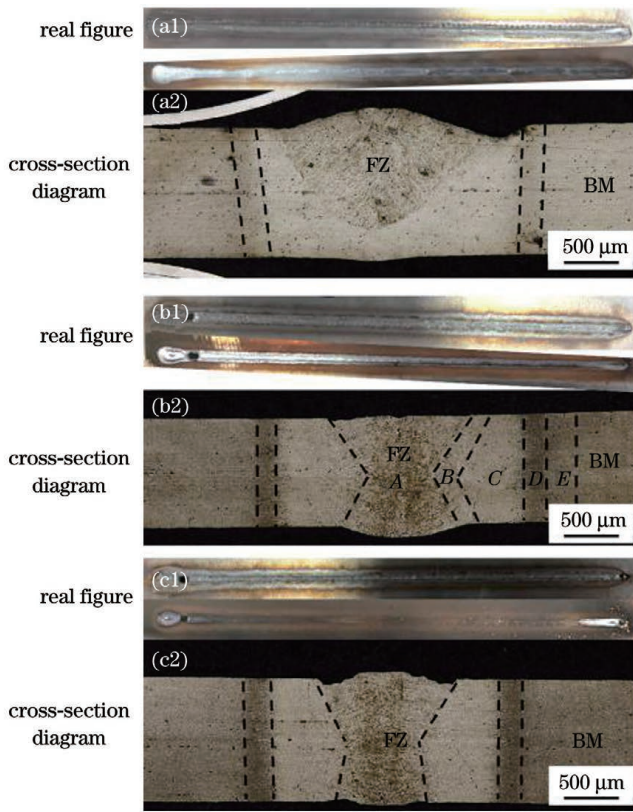


图 2 不同扫描偏转角度下 QP1180 高强钢焊接接头的焊缝成形。(a1)(a2) 90°; (b1)(b2) 45°; (c1)(c2) 0°  
 Fig. 2 Weld formations of QP1180 high-strength steel welded joints under different linear scanning rotation angles. (a1)(a2) 90°; (b1)(b2) 45°; (c1)(c2) 0°

表面焊缝宽度越大, 临界热影响区宽度基本相同。当偏转角度大于 45° 时, 横向扫描增大了焊缝的宽度

表 2 线扫描偏转角度对焊缝尺寸的影响

Table 2 Effect of linear scanning rotation angle on weld size

Linear scanning rotation angle / (°)	$W_{FZ} / \mu\text{m}$	$D_0 / \mu\text{m}$	$W_{CG+FG} / \mu\text{m}$
90	1788	2428	285
45	1716	2594	440
0	1394	2219	412

(>1.5 mm); 当偏转角度为 0° 时, 横向扫描的焊缝宽度 <1.5 mm, 大约是光斑直径的 4 倍。

### 3.2 显微组织

图 3 是 QP1180 高强钢激光焊接接头典型的显微组织形貌。焊缝组织为粗大的板条马氏体。靠近焊缝两侧的热影响区的各个区域经历不同的焊接热循环, 离焊缝越近, 峰值温度越高, 加热速度和冷却速度越快。当峰值温度超过奥氏体转变终了温度 ( $A_{c3}$ ) 时, 组织全部转为奥氏体, 且峰值温度越高, 加热过程中生成的奥氏体晶粒越大; 距离熔合线越近的区域, 冷却速度越快, 越容易形成等轴形态的板条马氏体。一般来说, 在温度超过 1100 °C 的区域, 奥氏体晶粒严重长大, 冷却后转变为板条马氏体, 该区域为粗晶热影响区; 在温度介于  $A_{c3} \sim 1100$  °C 的区域, 奥氏体晶粒长大的速度较慢, 当冷却速度较慢时, 奥氏体分解成铁素体和珠光体组织, 当冷却速度很快时, 奥氏体转变为马氏体组织, 该区域为细晶热影响区, 微观组织为均匀细小的组织。当峰值温度为  $A_{c1} \sim A_{c3}$  时, 部分组织转为奥氏体, 该区域为临界热影响区, 微观组织由板条马氏体、细小回火马氏体和铁素体组成。当峰值温度为

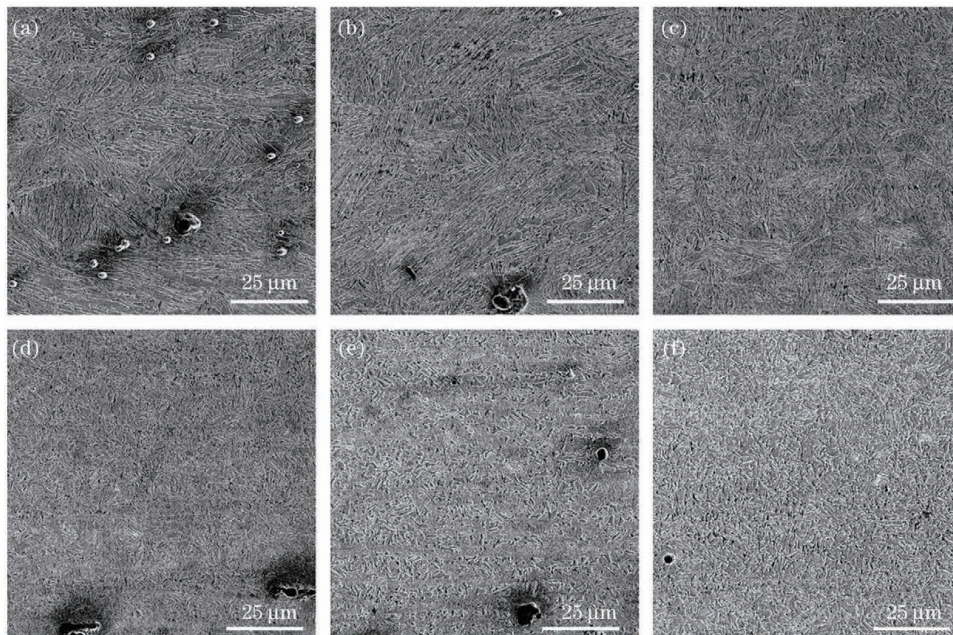


图 3 线扫描偏转角度为 45° 时 QP1180 高强钢焊接接头的显微组织。(a) FZ 中心; (b) FZ 边缘; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

Fig. 3 Microstructures of QP1180 high-strength steel welded joints when linear scanning rotation angle is 45°. (a) Middle of FZ; (b) edge of FZ; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

500 °C ~  $A_{c1}$  时, 该区域为亚临界热影响区, 母材内的马氏体相受回火作用, 分解析出碳化物, 位错密度降低, 但该区域基本保持母材的原始组织形貌, 相似的回火马氏体组织会出现在含板条马氏体相的 DP 双相钢、MS 马氏体钢和 QP 钢中。与焊缝越近, 回火作用越显著。

图 4 和图 5 分别是线扫描偏转角度为 45° 时 QP1180 高强钢焊接接头各区域的质量衬度(BC)图和

晶粒取向分布图, 观察区域尺寸为 50  $\mu\text{m}$  × 50  $\mu\text{m}$ 。由图 4(a)、(b) 可以看出, 板条马氏体尺寸粗大, 最大尺寸可达 40  $\mu\text{m}$ 。图 4(c)、(d) 分别显示了粗晶和细晶热影响区, 平均晶粒直径分别约为 25  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ 。而临界热影响区[图 4(e)]的部分区域中出现了一些衬度较低的马氏体相, 亚临界热影响区[图 4(f)]仍保持与母材相似的组织结构, 细小板条马氏体由于非常小, 质量衬度很低。由图 5 可以看出, 焊缝马氏体板条

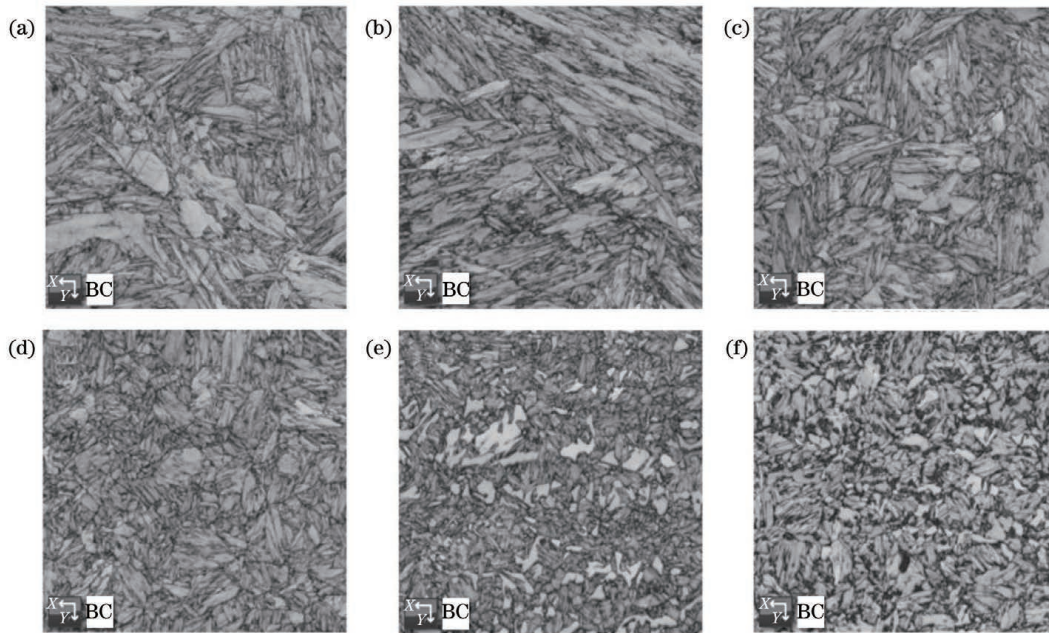


图 4 线扫描偏转角度为 45° 时 QP1180 高强钢焊接接头各区域的质量衬度图。(a) FZ 中心; (b) FZ 边缘; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

Fig. 4 Band contrast maps at different zones of QP1180 high-strength steel welded joints when linear scanning rotation angle is 45°. (a) Middle of FZ; (b) edge of FZ; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

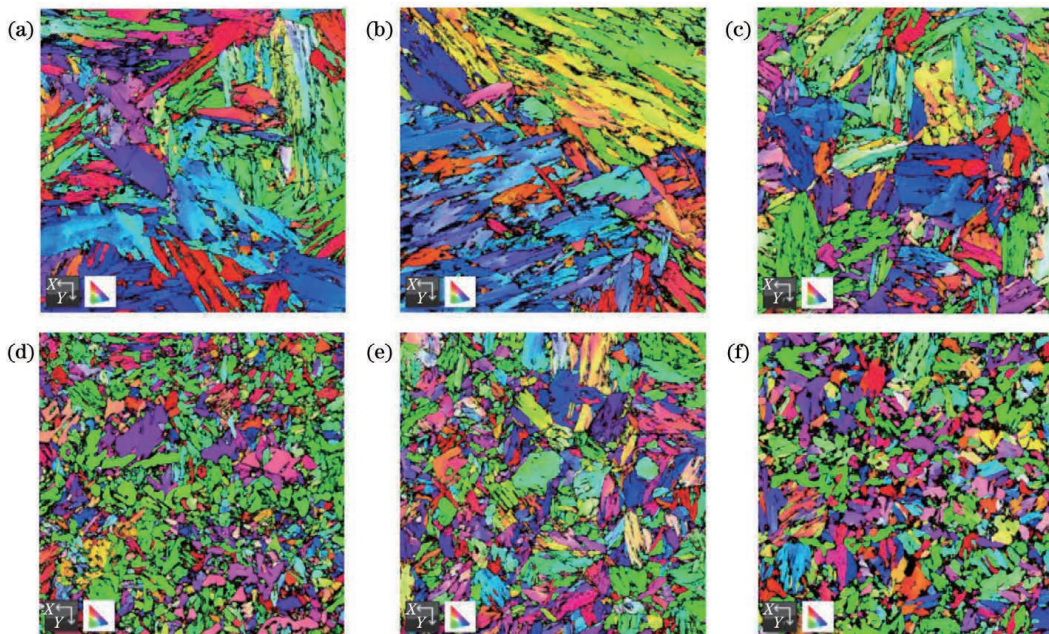


图 5 线扫描偏转角度为 45° 时 QP1180 高强钢焊接接头各区域的晶粒取向分布图。(a) FZ 中心; (b) FZ 边缘; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

Fig. 5 Grain orientation maps at different zones of QP1180 high-strength steel welded joints when linear scanning rotation angle is 45°. (a) Middle of FZ; (b) edge of FZ; (c) CGHAZ; (d) FGHAZ; (e) ICHAZ; (f) SCHAZ

束的取向复杂。由于板条马氏体的板条束与原奥氏体晶粒取向需要满足 Kurdjumov-Sachs 位向关系,原奥氏体晶粒越大,相同观察区域内出现的板条束取向越少,如图 5(a)所示。而热影响区细晶区的原奥氏体晶粒较小,板条束的长度和宽度也较小,取向分布较复杂,如图 5(d)所示。

### 3.3 硬度分布

图 6 是 QP1180 高强度钢焊接接头的硬度分布。不同区域的微观组织分布具有较大的不均匀性,因此硬度分布也有差异。可以看出,母材区的平均硬度约为 400 HV,焊缝区的平均硬度为 480 HV。硬度低于母材硬度的区域称为软化区,软化区的最低硬度约为

340 HV,只有母材的 85%;软化区内与熔合线的距离越大,硬度越大;软化区的宽度接近 1 mm。硬度高于母材硬度的热影响区称为硬化区,硬化区的硬度高达 510 HV,硬化区的宽度为几百微米,与位置有关,硬化区主要位于粗晶和细晶热影响区。线扫描偏转角度为 90°、45°和 0°时的焊缝平均硬度分别为(482±6)HV、(471±5)HV 和(472±7)HV。从硬度分布曲线来看,偏转角度没有改变硬度分布,线扫描偏转角度对 ICHAZ 和 SCHAZ 的宽度(软化区)的影响很小,软化区宽度和软化区最低硬度几乎没有发生变化。与文献[1]测量得到的 QP1180 高强度钢激光焊接接头的硬度分布相似,振镜扫描激光焊接接头的软化区宽度较宽。

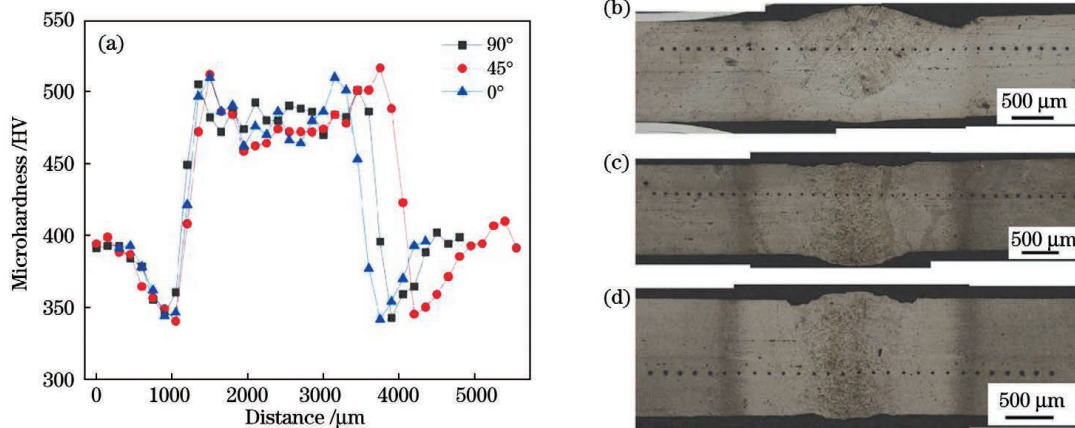


图 6 QP1180 高强度钢焊接接头的硬度分布。(a)硬度分布曲线;线扫描偏转角度分别为(b) 90°, (c) 45°, (d) 0°时的硬度测试点位置

Fig. 6 Microhardness distributions of QP1180 high-strength steel welded joints. (a) Microhardness distribution curves; positions of hardness test points when linear scanning rotation angle is (b) 90°, (c) 45°, (d) 0°, respectively

### 3.4 拉伸性能和断口形貌

图 7 显示了不同线扫描偏转角度下 QP1180 高强度钢激光焊接接头拉伸过程中的应力-应变曲线。表 3 总结了焊接接头的力学性能,偏转角度为 45°时试样有最高的平均抗拉强度 1271 MPa,延伸率为 12.9%;偏转角度为 0°时试样的抗拉强度为 1245 MPa,延伸率为 13.5%;偏转角度为 90°时试样的抗拉强度为

1094 MPa,延伸率为 10%,即熔透焊缝的抗拉强度和延伸率分别是母材的 100%和 87%。结合均匀延伸率可知:偏转角度为 90°时试样的均匀变形较少,加工硬度较低;偏转角度为 45°和 0°时试样的均匀变形较多,加工硬度较高。

图 8 显示了不同线扫描偏转角度下拉伸试样的断口形貌,所有试样的断裂位置均在引伸计范围内,与焊

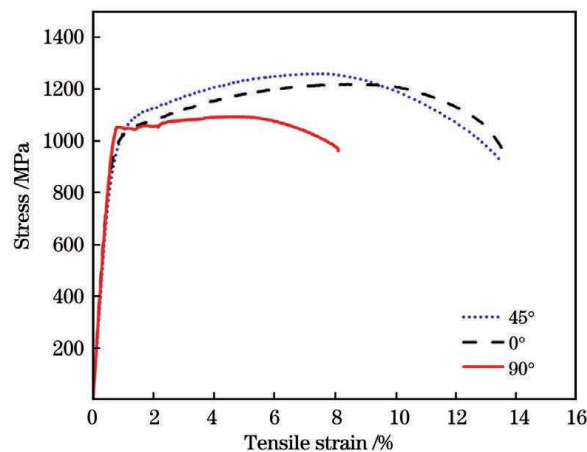


图 7 不同线扫描偏转角度下 QP1180 高强度钢激光焊接接头的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of QP1180 high-strength steel welded joints under different linear scanning rotation angles

表 3 QP1180 高强钢焊接接头的力学性能  
Table 3 Mechanical properties of QP1180 high-strength steel welded joint

Linear scanning rotation angle / (°)	Yielding strength / MPa	Tensile strength / MPa	Uniform elongation / %	Total elongation / %
90	1020 ± 33	1094 ± 0.7	5.7 ± 1.0	10.0 ± 1.9
45	1004 ± 51	1271 ± 34	7.0 ± 0.2	12.9 ± 0.4
0	1019 ± 27	1245 ± 22	8.2 ± 0.2	13.5 ± 0.1
Welded joint in Ref. [1]	1021	1196	-	14.5

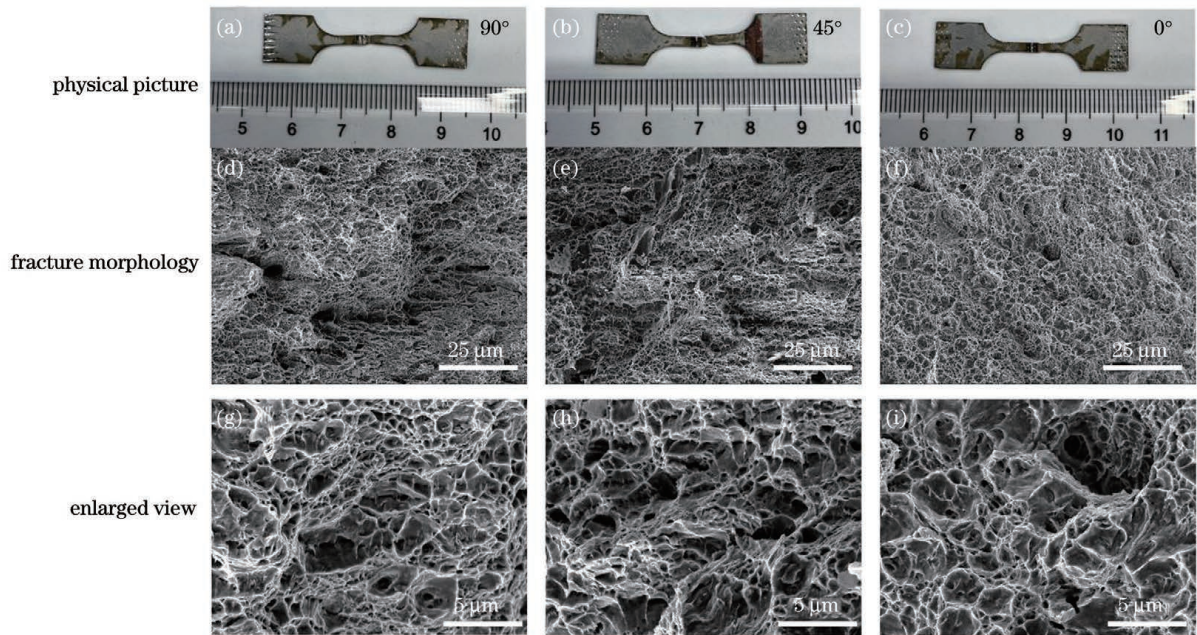


图 8 不同线扫描偏转角度下 QP1180 高强钢激光焊接接头拉伸的断口形貌。(a)(d)(g) 90°; (b)(e)(h) 45°; (c)(f)(i) 0°  
Fig. 8 Tensile fracture morphologies of QP1180 high-strength steel welded joints under different linear scanning rotation angles.  
(a)(d)(g) 90°; (b)(e)(h) 45°; (c)(f)(i) 0°

缝边缘的距离为 1~2 mm, 断裂发生在软化区, 与文献[2]中低速焊接下的高热输入情况相同, 均归因于低焊接速度下的软化区变宽。断口形貌以韧性断裂为主, 有大量韧窝, 韧窝大小不均匀, 直径为 0.5~5.0 μm。

#### 4 讨 论

本试验中振镜激光扫描的偏转角度分别为 90°、45° 和 0°, 整段焊缝具有相同的热输入量, 只是能量的空间分布发生了变化。由于振镜的扫描速度与扫描幅值和扫描频率有关, 存在激光扫描重叠的焊缝区域。激光光斑相对板材的实际运动速度(V)是振镜扫描速度 V<sub>0</sub> 和焊接平台移动速度 V<sub>w</sub> 的矢量和:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_w + \mathbf{V}_0, \quad (1)$$

$$V = \sqrt{V_w^2 + V_0^2 - 2V_w V_0 \cos(\pi - \theta)}, \quad (2)$$

式中: θ 为 V<sub>w</sub> 和 V<sub>0</sub> 的夹角。由于振镜扫描速度的方向是每隔二分之一周期改变一次, 焊接平台的移动速度方向是恒定的。当线扫描偏转角度为 90° 时, 平台实际移动速度大小为 90.1 mm/s, 速度恒定。当线扫描偏转角度为 45° 时, 夹角 θ = 45° (或 135°) 对应的平

台实际移动速度为 115.9 mm/s (或 53.1 mm/s)。当线扫描偏转角度为 0° 时, 夹角 θ = 0° (或 180°) 对应的平台实际移动速度为 125 mm/s (或 25 mm/s)。在固定的激光功率条件下, 当实际运动速度超过临界值时, 焊缝未熔透; 当存在偏转角度时, 运动方向与扫描方向同向且较低的相对速度有利于焊缝穿透; 只有最小实际速度超过临界值, 才能实现焊缝完全熔透。与此同时, 当偏转角度增大时, 能量还可以通过横向扫描向焊缝两侧传递, 导致焊缝和热影响区宽度增加。因此, 对于固定激光功率、焊接速度、扫描幅度、扫描频率和材料, 存在一个线扫描偏转角度, 使焊缝处于临界熔透状态。当偏转角度为 0° 时, 存在沿焊缝方向的纵向扫描, 可促进熔池的重熔和再结晶及已凝固焊缝的回火。这部分激光扫描重叠的焊缝区域满足

$$w = 2(w_o + w_{no}) = A + e, \quad (3)$$

$$\delta = 2w_o / w, \quad (4)$$

$$l = l_o + l_{no}, \quad (5)$$

式中: w 为焊缝实际宽度; l 为焊缝实际长度; w<sub>o</sub> 和 w<sub>no</sub> 分别为横向和纵向单次往复扫描的重叠焊缝宽度; l<sub>o</sub> 和 l<sub>no</sub> 分别是横向和纵向单次往复扫描的重叠

焊缝长度;  $e$  为未重叠区域面积;  $\delta$  为重叠率。光斑实际移动速度存在周期性变化( $f=25$  Hz), 一个扫描往返的总时间为 $\Delta t=40$  ms, 即每隔 20 ms 改变一次扫描方向。其中, 当偏转角为  $0^\circ$  时, 光斑实际移动速度为 125 mm/s 和 25 mm/s, 在空间上可以认为每隔 20 ms, 光斑向前移动 0.5 mm, 然后向后退 2.5 mm, 重叠长度为 2 mm; 但由于后退速度快, 熔池较浅, 存在激光从匙孔模式向热导焊模式的转变<sup>[16]</sup>。考虑到本试验中激光光斑直径为 0.3 mm, 激光功率为 3 kW, 实际最小速度为 25 mm/s, 形成了椭圆形熔池, 熔池长度应该接近 0.4 mm, 因此, 往返激光光斑会超出熔池的范围。这不仅升高了熔池尾部的温度, 导致熔池的冷却和凝固延迟, 还引起已凝固焊缝的表面重熔。随着扫描偏转角度的增加, 沿焊缝方向的重熔减少, 可能出现光斑完全在熔池范围内往返移动的情况。当激光功率升高时, 熔池宽度和深度增大, 在最大扫描速度下可获得完全熔透的焊缝, 此时振镜扫描可以实现整个焊缝的重熔。

## 5 结 论

采用振镜扫描技术实现了高强薄板的激光焊, 接头焊缝区和热影响区硬化区形成了板条马氏体。原母材复相组织中的马氏体经历回火处理后, 马氏体内的位错密度降低, 形成了热影响区的软化区。当振镜线扫描的偏转角度增大时, 焊缝的宽度增加, 但熔深减小。在固定激光功率和焊接速度的条件下, 当偏转角为  $45^\circ$  时, 在焊缝熔深得到保证的同时, 焊缝宽度增大。因此, 可以充分利用振镜线扫描焊接的传热特点, 提升拼焊板间隙的适应性。由于激光扫描的作用, 热影响区的软化区宽度增加, 试样拉伸变形时的应变集中出现在软化区, 不再分摊到整个试样平行段。与单点激光低速焊接下的高热输入相比, 振镜扫描焊接具有熔池搅拌和回火热处理的作用, 有利于改善高强钢的组织。

## 参 考 文 献

- [1] 李学军, 黄坚, 潘华, 等. QP1180 高强钢薄板激光焊接接头的组织与成形性能[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302006.  
Li X J, Huang J, Pan H, et al. Microstructure and formability of laser welding joint of QP1180 high-strength steel sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302006.
- [2] 朱天才, 王晓南, 陈文刚, 等. 热输入对 QP1180 钢激光焊接接头组织性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 051406.  
Zhu T C, Wang X N, Chen W G, et al. Effect of heat inputs on microstructure and properties of QP1180 steel laser welded joints[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 051406.
- [3] 王金凤. DP1000 双相钢激光焊接 HAZ 软化及接头性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
Wang J F. Research on softening and properties of DP1000 steel laser welded joints[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [4] 邓彩艳, 刘策, 刘秀国, 等. DP800 双相钢激光焊接接头软化区力学性能和组织分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(3): 311-317.  
Deng C Y, Liu C, Liu X G, et al. Mechanical properties and microstructure in the softened zone of the DP800 steel joint by laser welding[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(3): 311-317.
- [5] 田飞, 蔺宏涛, 江海涛. 高强度钢 QP980 激光焊接头的微观组织与力学性能[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 447-453.  
Tian F, Lin H T, Jiang H T. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of high strength steel QP980[J]. Materials Reports, 2021, 35(S1): 447-453.
- [6] Wang X R, Wu Y, Pan H, et al. Microstructure and softening of advanced high-strength steel QP1180 lap joints welded with CMT[J]. Materials Letters, 2021, 287: 129282.
- [7] Guo W, Wan Z D, Peng P, et al. Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded QP980 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 229-238.
- [8] Xue J L, Peng P, Guo W, et al. HAZ characterization and mechanical properties of QP980-DP980 laser welded joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 80.
- [9] 刘成杰, 潘华. 无镀层 1500 MPa 级热成形钢的激光拼焊性能[J]. 上海金属, 2019, 41(6): 40-45.  
Liu C J, Pan H. Laser weldability of uncoated tailored blanks of 1500 MPa grade hot-formed steel[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(6): 40-45.
- [10] 魏世同, 陆善平, 姜海昌. TRIP980 钢板激光焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(8): 31-34, 5.  
Wei S T, Lu S P, Jiang H C. Study on laser welding technology of TRIP980 steel plate[J]. Welding Technology, 2019, 48(8): 31-34, 5.
- [11] 杨蕾, 王晓南, 环鹏程, 等. 热输入对 CP800 复相钢激光焊接接头组织性能的影响[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 562-569.  
Yang L, Wang X N, Huan P C, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of CP800 complex phase steel laser welded joints[J]. Applied Laser, 2018, 38(4): 562-569.
- [12] 王蔚, 沈杰, 刘伟军, 等. 脉冲激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面氧化层的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802004.  
Wang W, Shen J, Liu W J, et al. Effect of scanning speed of galvanometer on surface oxide layer of TA15 titanium alloy in pulsed laser cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802004.
- [13] 杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. AISI304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102006.  
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.
- [14] 刘源, 冯爱新, 罗敬文, 等. 振镜扫描式激光叠焊镀锌钢板工艺研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 577-583.  
Liu Y, Feng A X, Luo J W, et al. The study of laser lap welding galvanized steel using galvanometer scanning[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 577-583.
- [15] 吴希, 张培磊, 唐满, 等. 铜-铝异种箔片纳秒激光扫描点焊成形及组织特征[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402006.  
Wu X, Zhang P L, Tang M, et al. Formation and microstructure characteristics in spot welding of dissimilar Cu-Al foil by nanosecond laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402006.
- [16] 梁晓梅, 黄瑞生, 刘金湘, 等. 核电用 304 不锈钢扫描激光微连接工艺研究[J]. 电焊机, 2020, 50(7): 53-58, 149.  
Liang X M, Huang R S, Liu J X, et al. Research on scanning laser-connection technology of 304 stainless steel for nuclear power[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(7): 53-58, 149.
- [17] Hao K D, Li G, Gao M, et al. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 77-83.
- [18] Mann V, Hofmann K, Schaumberger K, et al. Influence of oscillation frequency and focal diameter on weld pool geometry and temperature field in laser beam welding of high strength

- steels[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 470-474.
- [19] Wu Q, Xiao R S, Zou J L, et al. Weld formation mechanism during fiber laser welding of aluminum alloys with focus rotation and vertical oscillation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 149-154.
- [20] Chen G Y, Wang B, Mao S, et al. Research on the “∞”-shaped laser scanning welding process for aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 32-41.
- [21] Liu T T, Mu Z Y, Hu R Z, et al. Sinusoidal oscillating laser welding of 7075 aluminum alloy: hydrodynamics, porosity formation and optimization [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 346-358.
- [22] Chen C, Zhou H P, Wang C J, et al. Laser welding of ultra-high strength steel with different oscillating modes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 761-769.
- [23] Yan S H, Meng Z, Chen B, et al. Prediction of temperature field and residual stress of oscillation laser welding of 316LN stainless steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107493.
- [24] 徐楷昕, 雷振, 黄瑞生, 等. 摆动工艺对钛合金窄间隙激光填丝焊缝成形及气孔率的影响 [J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602111.
- Xu K X, Lei Z, 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.
- [25] 张明军, 吴乐峰, 毛聪, 等. AZ31B 镁合金可调环形光纤激光焊接试验研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2202002.
- Zhang M J, Wu L F, Mao C, et al. Experimental research on laser welding of AZ31B magnesium alloy using adjustable ring-mode fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2202002.

## Microstructure and Mechanical Properties of QP1180 High-Strength Steel Welded Joints Using Oscillation Scanning

Lin Wenhui<sup>1\*</sup>, Wu Yue<sup>2</sup>, Li Fang<sup>3</sup>, Hua Xueming<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Center for Adaptive System Engineering, School of Creativity and Art, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

<sup>2</sup> School of Materials Science, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

<sup>3</sup> Shanghai Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

### Abstract

**Objective** Quench-partitioning (QP) steels are extensively employed to reduce automobile weight for its ultra-high-strength and ductility. As an example, QP1180 steels have the total elongation of 15% and the strength of more than 1200 MPa. They are often welded employing laser beam to achieve a low heat input, narrow heat-affected zone, and high production efficiency. Generally, the QP steel laser-welded joints are tensile fractured at the region of the base metal, but the testers fail at the softening zone. The extreme narrow softening zone contains tempered martensite, which is restricted and strengthened by the neighboring hard heat-affected zone and base metals. Thus, the deformation is evenly distributed along the gage length. However, the fracture position varies according to compositions, tensile strain rates, and various welding parameters. For other advanced high-strength steels, the softening zone are not always fracture positions. QP980, DP1000, and MS1500 sheets of steel have softened zone, but CP800 and TRIP980 steels have no softening. Most of failures occur at the weakest point. Recently, the oscillation scanning technique is coupled with the laser welding process for the advantages of high efficiency, low gap requirement, low crack and porosity, and fine grains. We hope to examine the effects of this scanning technique on the microstructure and mechanical properties of QP1180 steel welded joints.

**Methods** QP1180 steel sheets with the 1.2 mm thickness are welded at the laser power of 3 kW, travel speed of 3 m/min, and zero defocusing distance with various scanning strategies. There are three linear scanning rotation angles of 90°, 45°, and 0°. The weld surfaces are compared and the weld cross-sections after etching are observed and measured employing an optical microscope and scanning electron microscope. Using electron back scattered detection, the microstructure and grain information are characterized. The microhardness and tensile properties are also measured under the three linear scanning rotation angles. Finally, the fracture surfaces are characterized to explain the deformation and fracture mechanism.

**Results and Discussions** The weld formations of QP1180 high-strength steel welded joints under different linear scanning rotation angles demonstrate various weld penetrations, fusion zone widths, the distances between two intercritical heat impacted zone, and widths of coarse grain heat affected zone (CGHAZ) and fine grain heat affected zone (FGHAZ). Only the samples under the linear scanning rotation angles of 45° and 0° obtain full penetration at the same total heat input. The samples under the linear scanning rotation angle of 45° achieve the widest heat impacted zone and the similar fusion zone width with that of the sample under the linear scanning rotation angle of 90°. The sample



microstructure under the linear scanning rotation angle of  $45^\circ$  reveals the phase compositions that are identical to those of the normal laser welds: the dendritic grain lath martensite in the fusion zone, coarse grain lath martensite in CGHAZ, fine grain lath martensite in FGHAZ, mixed phases of lath martensite and original base metal in intercritical heat affected zone (ICHAZ), and the tempered martensite in subcritical heat affected zone (SCHAZ). The grain orientation map and band contrast map reveal the difference between lath martensite and ferrite in morphology and gray scale. The hardness result reveals that there are slightly higher hardness in FGHAZ and lower hardness in SCHAZ than that of the base metal. The hardness distribution is unaffected by various rotation angles, but the average hardness in fusion zones is respectively  $(482 \pm 6)$ HV,  $(471 \pm 5)$ HV, and  $(472 \pm 7)$ HV under linear scanning rotation angles of  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $0^\circ$ . The full penetration welds under linear scanning rotation angles of  $45^\circ$  and  $0^\circ$  demonstrate ultimate tensile strength of 1271 MPa and 1245 MPa, respectively. The sample's tensile failure position is the same as the previous investigation result: the fracture occurs in the softening zone. It may be explained by the widening of softening zone. The variation of rotation angle during linear scanning laser welding can change the maximum and minimum absolute speeds of the moving heat source and the energy transfer direction, and it finally leads to the difference in energy distribution. The overlap ratio in remelting plays a role in enlarging the fusion zone and heat-affected zone. A large rotation angle can increase the transportation heat in the horizontal direction. The linear scanning with various rotation angles then results in various weld formation and mechanical properties.

**Conclusions** In this research, three linear scanning strategies with various rotation angles are employed in laser welding of QP1180 steel. Through the rapid and space-limited scanning, the weld formation significantly changes and is adaptive to a large gap. A large rotation angle results in a small weld depth and a large fusion zone/heat affected zone. Here, the rotation angle of  $45^\circ$  is appropriate for large weld width and weld penetration. The microstructure and tensile properties of QP1180 high-strength steel welded joints using oscillation scanning are not significantly altered compared with those of normal QP1180 high-strength steel welded joints, while the failure position moves to the softening zone in QP1180 steel, which normally occurs with a high heat input. The deformation and fracture mechanisms of QP1180 steel welded joints are altered by the scanning strategy.

**Key words** laser technique; oscillation scanning; thermal effect; high-strength steel; microstructure