

纳秒激光参数对316L不锈钢沟槽结构加工的影响

袁健, 何斌, 张俊飞, 陈国炎, 张锁荣

江苏理工学院 江苏常州 213001

摘要: 对纳秒激光加工316L不锈钢沟槽结构进行了系统研究, 以激光功率、重复频率、扫描速度及路径间隔为变量开展正交试验, 将沟槽侧壁锥度及加工深度作为正交试验结果的评价指标。结果表明: 激光功率是影响侧壁锥度最主要的因素, 扫描速度对深度影响最显著, 而重复频率对二者影响皆不显著。利用最佳参数: 激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率10kHz, 可成功加工出宽1mm, 平均深0.92mm, 侧壁平均锥度为78.56°的阵列微沟槽结构。

关键词: 纳秒激光; 316L不锈钢; 微结构; 侧壁锥度

The impact of nanosecond laser parameters on the machining of 316L stainless steel groove structures

YUAN Jian, HE Bin, ZHANG Junfei, CHEN Guoyan, ZHANG Suorong

Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu, China

Abstract: A systematic study was conducted on nanosecond laser machining of 316L stainless steel groove structures, utilizing variables such as laser power, repetition frequency, scanning speed, and path interval in an orthogonal experiment. The evaluation criteria for the experiment's outcomes were the taper of the groove sidewalls and the machining depth. The findings indicate that laser power is the primary factor affecting the sidewall taper, while scanning speed has the most significant impact on depth. The repetition frequency, however, showed negligible effects on both parameters. Using optimal settings of 16W laser power, 500mm/s scanning speed, 0.01mm path interval, and 10kHz repetition frequency, an array of micro-groove structures was successfully fabricated, featuring a width of 1mm, an average depth of 0.92mm, and an average sidewall taper of 78.56°.

Keywords: nanosecond laser; 316L stainless steel; microstructure; sidewall taper

1 序言

激光加工技术利用激光束的高能量密度, 通过热效应、光化学效应或光机械效应实现材料的加工。与传统加工方法相比, 激光加工具有加工精度高、不受材料力学性能影响、加工灵活等优势^[1-3]。不锈钢是一种具有耐腐蚀、耐高温的合金材料, 在

医疗器械、汽车工业及航空航天等领域广泛应用。目前, 国内外学者对激光加工不锈钢材料开展了大量研究。刘宇航等^[4]利用激光加工技术在316L医用不锈钢表面加工微织构, 通过正交试验法考察了激光功率、重复频率、扫描速度和扫描次数对沟槽宽度和深度的影响。试验结果得出最优激光加工参数

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB460012); 常州市应用基础研究计划(CJ20235044)。

第一作者: 袁健, 在读研究生, 研究方向为激光加工不锈钢表面微结构, E-mail: 250894104@qq.com。

通信作者: 张锁荣, 教授, 研究方向为激光微细加工技术, E-mail: zhangsr@jsut.edu.cn。

组合，以达到减小沟槽宽度、增大沟槽深度且表面无明显热损伤的目的。CHERRY等^[5]研究了激光能量密度对不锈钢零件微结构和物理性能的影响。在不锈钢表面激光加工小孔时，调整激光脉冲能量、脉冲宽度和脉冲频率等参数，可以提高激光打孔的质量和精度^[6-9]。李元成等^[10]主要研究了纳秒紫外激光加工参数对316L不锈钢表面微米级沟槽的影响，通过控制扫描间距、搭接个数和扫描次数可以实现微槽尺寸的精确控制。

在上述报道的研究中，主要利用激光加工不锈钢表面微小结构，加工深度仅几十微米。本文采用纳秒激光在不锈钢316L表面加工深度为毫米级的沟槽结构，重点研究加工参数对沟槽加工深度和侧壁锥度的影响规律。开展了不同参数下正交加工试验，用扫描电镜分析了沟槽的表面形貌，用共聚焦显微镜测量了截面轮廓尺寸。利用最佳参数，对阵列沟槽结构进行了有效加工。

2 试验过程

2.1 试验材料与方法

试验采用尺寸为20mm×20mm×2mm的316L不锈钢，主要化学成分见表1。表面经抛光处理，并放入无水乙醇中进行超声波清洗后进行试验，每个工件可以进行多次试验。试验在带有光纤激光器的激光打标机（MDK-GX-20Z，中国苏州）上进行（见图1），激光波长为1064nm，脉冲宽度为100ns，束斑尺寸为0.05mm。在每个试验中，通过移动精密的X-Y平台确保加工区域位于扫描振镜的中心。

表1 316L不锈钢主要化学成分（质量分数）（%）

Cr	Ni	Mo	Mn
16.87	10.04	2.02	1.02

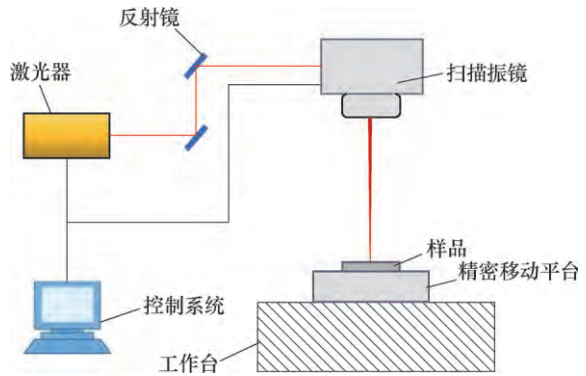


图1 纳秒激光加工示意

2.2 激光加工参数的正交试验优化

激光加工的可调参数为激光功率、重复频率、扫描速度及路径间隔。为提高正交试验的可信度与准确度，剔除了加工过程中导致单位能量密度过高和过低的参数，选择了表2中列出的4因素4水平进行正交试验。在每个试验中，尺寸为3mm×1mm的沟槽被加工1000次。

正交试验结束之后，将工件置于无水乙醇中进行超声波清洗，从侧面研磨加工过的沟槽，借助扫描电镜观察沟槽的横截面，并用共聚焦显微镜测量沟槽侧壁的角度来评估加工结果，以获得最佳加工参数。

表2 正交试验因素和水平

水平	扫描速度 / (mm/s)	激光功率 /W	重复频率 /kHz	路径间隔 /mm
1	500	4	10	0.01
2	1000	8	20	0.015
3	1500	12	30	0.02
4	2000	16	40	0.025

3 试验结果与分析

3.1 沟槽结构的形貌分析

正交试验加工沟槽的截面形貌如图2所示。从图2可发现，不同加工参数下沟槽的侧壁轮廓及深度有较大区别。当扫描速度为1500mm/s和2000mm/s时，如正交试验方案L2、L3、L6、L7、L14等，沟槽底部出现拱形的凸起，这是因为在速度较高时加工，填充轨迹每条线的起始位置与结束位置光斑更密集，而中间加工区域更均匀，因此会出现底部凸起的现象；当扫描速度为500mm/s和1000mm/s时，如正交试验方案L1、L4、L11、L16等，沟槽底面相对平整。在激光功率较高时，工件材料的熔化和蒸发显著增强，加工深度明显大于其他参数，截面呈现V字形结构，如正交试验方案L5、L8、L10；在激光功率较低时，加工的沟槽相对较浅。为了更加准确地评价各加工参数对加工结果的影响规律，利用共聚焦显微镜对正交试验所得沟槽的侧壁锥度和深度进行了测量，当沟槽底部为拱形凸起时，由于光斑分布均匀的部分在凸起处，因此将工件表面到沟槽底部最高点的高度差作为测量深度的标准，当沟槽底部为平底或凹陷时，则将工件表面到沟槽底部最低点作为测量深度标准，以排除沟槽底部凹凸不平时对测量结果的影响，结果见表3。

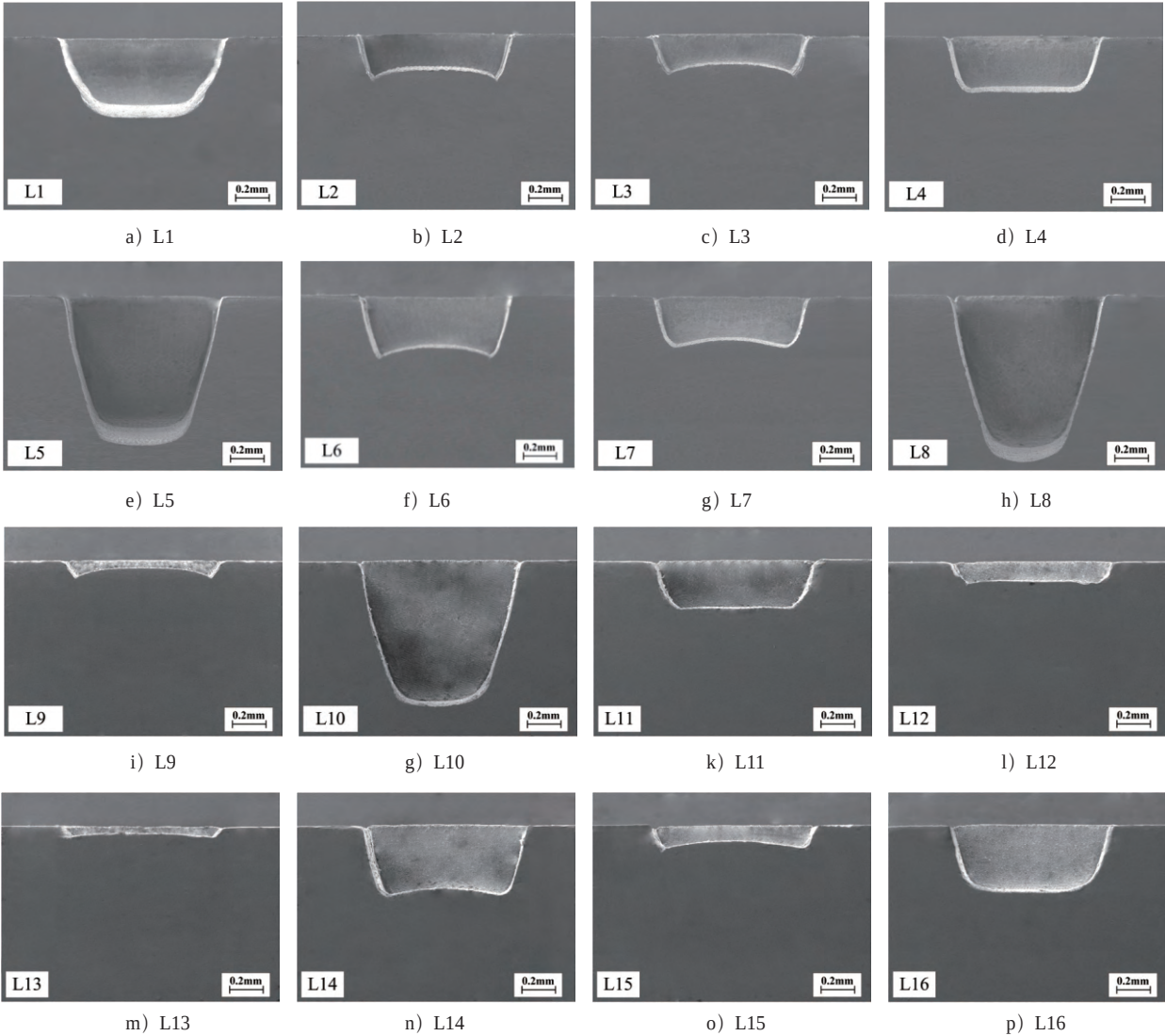


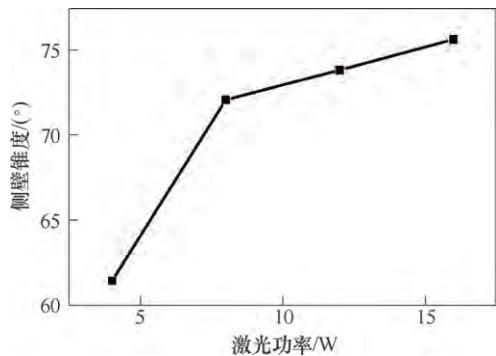
图2 正交试验沟槽截面形貌结果

表3 正交试验结果

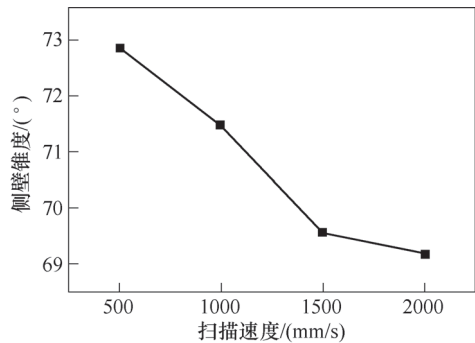
试验序号	扫描速度/ (mm/s)	激光功率/W	重复频率/kHz	路径间隔/mm	侧壁锥度/ (°)	深度/ μm
L1	500.00	4.00	10.00	0.010	66.45	555.00
L2	1500.00	12.00	10.00	0.020	75.63	232.00
L3	2000.00	16.00	10.00	0.025	69.78	167.00
L4	1000.00	8.00	10.00	0.015	76.10	341.00
L5	1000.00	16.00	30.00	0.010	80.20	968.00
L6	2000.00	12.00	20.00	0.010	76.78	350.00
L7	1500.00	8.00	40.00	0.010	74.96	258.00
L8	500.00	16.00	40.00	0.0200	77.25	1079.00
L9	2000.00	4.00	40.00	0.0150	61.15	65.00
L10	500.00	12.00	30.00	0.0150	79.24	1026.00
L11	1000.00	12.00	40.00	0.0250	63.64	323.00
L12	1000.00	4.00	20.00	0.0200	65.80	141.00
L13	1500.00	4.00	30.00	0.0250	52.20	56.00
L14	1500.00	16.00	20.00	0.0150	75.32	447.00
L15	2000.00	8.00	30.00	0.0200	68.97	108.00
L16	500.00	8.00	20.00	0.0250	68.25	478.00

根据表3所得的数据,通过计算每个水平的平均值,绘制了不同参数下沟槽侧壁锥度和加工深度分布效应曲线,分别如图3、图4所示。当激光功率增大时,沟槽侧壁锥度与深度均呈上升趋势;当扫描

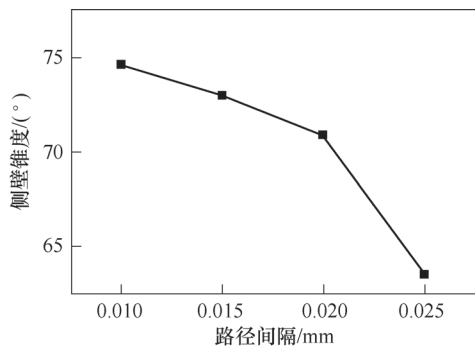
速度和路径间隔增大时,侧壁锥度与深度都呈下降趋势;当重复频率增大时,侧壁锥度随重复频率的增大而减小,而深度随重复频率的增大呈先增大后减小的趋势。



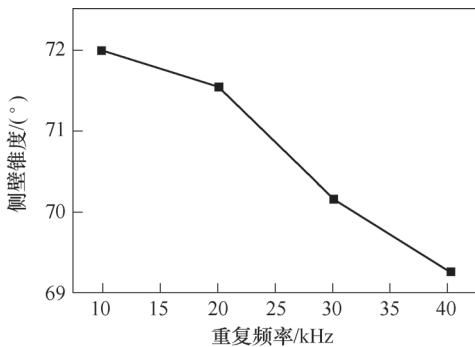
a) 激光功率



b) 扫描速度

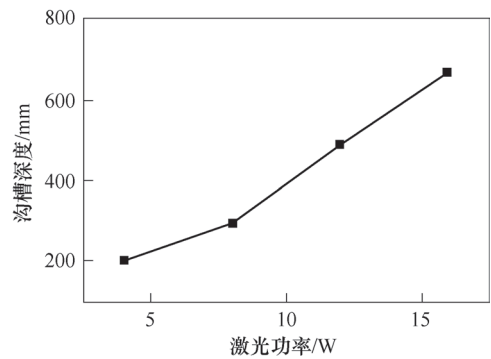


c) 路径间隔

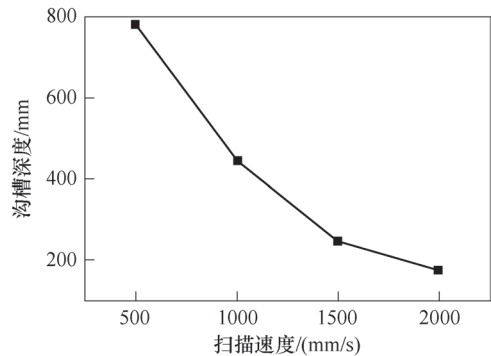


d) 重复频率

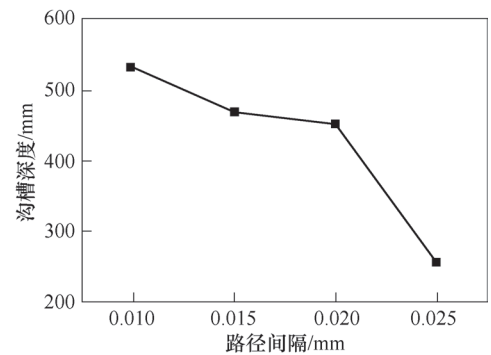
图3 不同参数加工的沟槽侧壁锥度分布



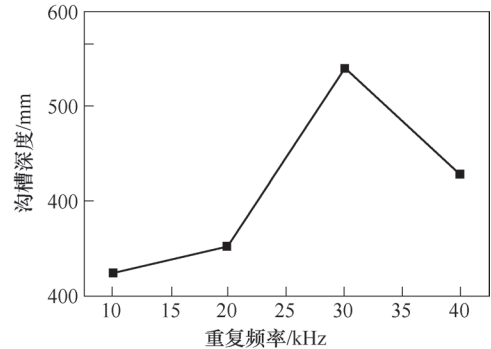
a) 激光功率



b) 扫描速度



c) 路径间隔



d) 重复频率

图4 不同参数加工的沟槽深度分布

3.2 方差分析

侧壁锥度方差分析见表4。由表4可知，当以侧壁锥度为评价指标时，激光功率是影响侧壁锥度最主要的因素，各参数对侧壁锥度显著性顺序为激光功率>路径间隔>扫描速度>重复频率。分析图3与表4各项数据得出加工侧壁锥度最优参数组合：激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率10kHz。

当以深度为评价指标时，扫描速度对深度影响最显著，各参数对深度显著性顺序为扫描速度>激光功率>路径间隔>重复频率。深度方差分析见表5。由图4与表5得出加工深度最优参数组合：激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率30kHz。

表4 侧壁锥度方差分析

参数	自由度	均方	F	显著性
激光功率	3	163.31	15.597	0.025
扫描速度	3	11.53	1.102	0.469
路径间隔	3	98.73	9.430	0.049
重复频率	3	6.35	0.607	0.654
误差	3	10.47	—	—

表5 深度方差分析

参数	自由度	均方	F	显著性
激光功率	3	167598.91	22.329	0.015
扫描速度	3	298542.75	39.775	0.006
路径间隔	3	56980.75	7.592	0.065
重复频率	3	37038.41	4.935	0.111
误差	3	7505.75	—	—

由于重复频率对两者皆不显著，而加工深度可以通过改变加工次数来优化，故选用提高侧壁锥度的最优工艺参数组合。综上所述，激光加工316L不锈钢材料的最佳工艺参数组合为：激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率10kHz。

3.3 最佳参数加工不同宽度

为了验证最佳参数的有效性，使用最佳参数加工了宽度0.5~1mm的不同沟槽，加工次数均为300次。不同宽度沟槽截面如图5所示，不同宽度的沟槽加工深度基本相同，约0.61mm，侧壁锥度均分布在77.78° ~ 79.12° 。

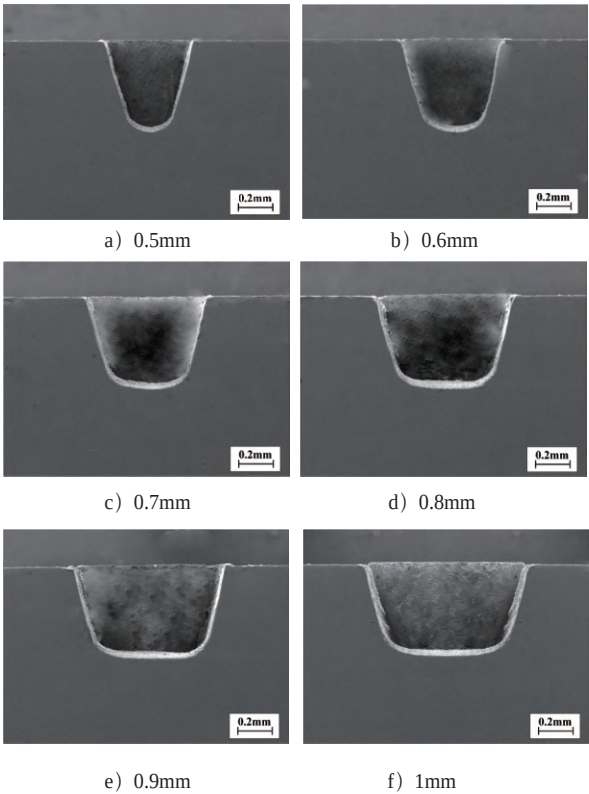


图5 纳秒激光在316L不锈钢表面加工不同宽度微槽

3.4 典型结构加工

为了进一步确定试验参数的加工能力，以最佳参数加工15mm×1mm的阵列沟槽结构，加工次数为500次。如图6所示，阵列沟槽结构轮廓清晰且

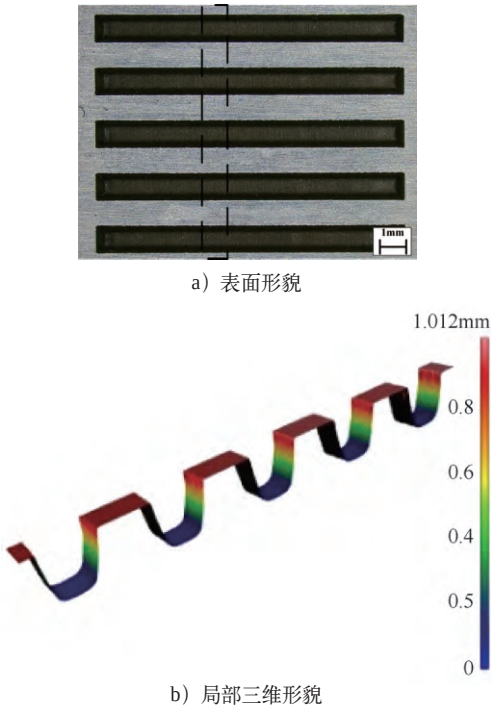


图6 纳秒激光在316L不锈钢表面加工出阵列微槽结构

一致，平均深度约为0.92mm，侧壁的平均锥度为78.56°，加工阵列与正交试验单个凹槽的加工结果一致。

4 结束语

本文采用光纤纳秒激光对316L不锈钢材料进行加工，通过正交试验分析各参数对沟槽侧壁锥度和加工深度的影响规律，以优化后的参数加工了不同宽度和阵列沟槽结构，具体结论总结如下。

1) 正交试验表明，激光加工316L不锈钢侧壁锥度的最佳工艺参数组合为激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率10kHz。

2) 正交试验中的4种因素对沟槽侧壁锥度与深度的影响具有很大的差异性，激光功率是影响侧壁锥度最主要的因素，扫描速度对深度影响最显著，而重复频率对二者影响皆不显著。

3) 利用最优工艺参数成功加工15mm×1mm的阵列沟槽，平均槽深为0.92mm，侧壁的平均锥度为78.56°。

参考文献：

- [1] 肖蒲庐，陈观华，陈宇，等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究[J]. 中国激光，2023，50（16）：175-185.
- [2] 杨栋，刘圣祥，王一鑫，等. 不同工艺参数对铝合金激光深熔焊质量的影响[J]. 锻造与冲压，2020（6）：30-34.

- [3] 朱春霞，邱渤杰. 选区激光熔化316L扫描特征参数对表面形貌影响[J]. 焊接学报，2023，44（3）：114-121.
- [4] 刘宇航，李岩，李林，等. 316L不锈钢表面微织构激光加工工艺参数[J]. 烟台大学学报：自然科学与工程版，2021，34（3）：266-271，288.
- [5] CHERRY J A, DAVIES H M, MEHMOOD S, et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76: 869-879.
- [6] 王英，李玉华，王新林，等. 飞秒激光加工不锈钢微型悬臂梁的工艺研究[J]. 激光技术，2010，34（3）：347-350.
- [7] 高立. 不锈钢管小群孔激光加工技术[J]. 潍坊学院学报，2007，7（6）：40-42.
- [8] 傅炳炎，欧阳八生，刘卫东，等. 0.12mm不锈钢薄板光纤激光回转法打孔工艺优化分析[J]. 光学技术，2016（2）：126-129.
- [9] 黎雪琴，林卿，赵国鑫，等. 毫秒脉冲激光倒置打孔数值模拟[J]. 现代制造技术与装备，2023，59（6）：58-60.
- [10] 李元成，张晓兵，毛忠，等. 紫外纳秒激光加工316L不锈钢微槽尺寸和形貌控制研究[J]. 应用激光，2019，39（6）：994-1001.

MW 20240118

（上接第60页）

头各区域冲击吸收能量值均在最低允许值45J以上，在组织缺陷易出现的熔合区附近，并没有出现因热影响区组织粗大而造成冲击吸收能量明显下降的现象，表明该工艺合理，在-20℃低温下有较强的抵抗外力冲击的能力，该焊接工艺的焊接接头具有良好的低温韧性。

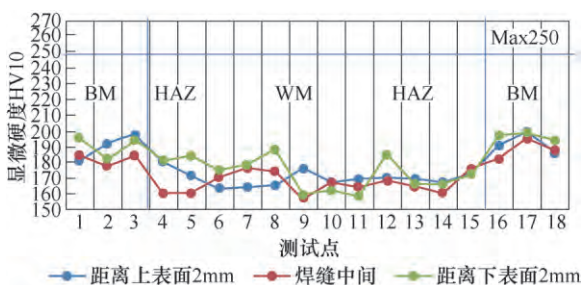


图4 焊接接头硬度分布 (SP-509)

5 结束语

1) 采用FCAW-G全自动焊设备，成功开发适用于X65钢海管焊接的全自动焊接工艺，焊接过程稳定、高效，可操作性强，获得了优良的焊接接头。

2) 力学性能试验结果均满足DNV OS F101：2017标准要求，形成了PQR文件，表明本文所开发的焊接工艺是成功的。

参考文献：

- [1] 孙有辉. 海底管道铺设全自动焊技术开发[J]. 电焊机，2014，44（3）：14-17.
- [2] DNV挪威船级社. 海底管线系统：DNV OS F101：2017[S]. 挪威：DNV挪威船级社，2017.

MW 20240209