

镀铝硅涂层汽车板激光清洗工艺

易鑫¹, 李翠¹, 余世文¹, 祁小勇², 叶兵²

(¹武汉华工激光工程有限责任公司,湖北武汉430223; ²激光先进制造技术湖北省重点实验室,湖北武汉430223)

摘要 为了探索激光清洗技术用于汽车板镀层材料焊前预处理的可行性及其工艺参数对焊缝质量的影响规律,为工业生产提供一定的参考,在镀Al-Si涂层试样件表面进行激光清洗预处理,并采用单激光自熔焊对接,通过对比激光清洗前后试样件的拉伸强度、焊缝表面形貌组织和杯突。研究表明,采用激光清洗可有效地清洗汽车板镀层,参数为激光功率 $P=50\text{ W}$,清洗速度 $S=1\sim 4\text{ m/min}$,清洗次数 $N=2$ 。激光清洗涂层保存 $20\sim 21\ \mu\text{m}$ 时自熔焊缝强度较高,可达母材强度的94%左右。激光清洗的生产效率较高,清洗速度可达4 min/件。

关键词 激光清洗技术; 焊前预处理工艺; 镀铝硅涂层汽车板; 激光清洗速度; 激光清洗次数; 焊缝质量
中图分类号: TG176 **文献标识码**: A **doi**: 10.14128/j.cnki.al.20193902.243

Process on Automobile Plates of Al-Si Coating by Laser Cleaning

Yi Xin¹, Li Cui¹, Yu Shiwen¹, Qi Xiaoyong², Ye Bing²

(¹Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China;

²Hubei Province Key laboratory of Laser Advanced Manufacturing Technology, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract To research the effects of the pre-welding laser cleaning technology applied to the automobile plates coated with Al-Si covering, the Al-Si coating is cleaned firstly. And then the automobile plates are butt welded. Comparing with the tensile tests' outcomes of welding the laser power $P=50\text{ W}$, scanning speed $S=1\sim 4\text{ m/min}$, scanning times $N=2$, which remains $20\sim 21\ \mu\text{m}$ coating thickness. Meanwhile, the tensile strength of the welding line can satisfy 94% of the base metal, and as fast (4 min per component) as the efficiency could.

Key words laser cleaning; pre-welding pretreatment process; Al-Si coating automobile plates; scanning speed; scanning times; weld quality

0 引言

激光清洗技术,即利用激光高能量、高亮度、方向性好、短脉冲等特点,破坏污染物与物体表面之间的作用力,使污染物发生微小爆裂而脱离基体表面,或使污染颗粒产生气化、碎裂、剥离等,达到清洗物品表面的目的。根据工作过程中是否使用辅助材料,激光清洗方法可分为干式激光清洗和湿式激光清洗等方法^[1]。湿式激光清洗工艺相对复杂,干式激光清洗^[2]的应用范围更广、适用性更强。与传统清洗方法(机械清洗法、化学清洗法、超声清洗等)相比,其具有清洗效果更好^[3]、控制精度更高、不污染环境^[4]、不引入其他杂质、应用范围更广、运行成本更低、清洗效率更高等优点。因此,激光清洗技术被

誉为是一种绿色环保型^[5]的清洗技术。

激光清洗在军用装备修理维护^[6]、微电子器件清洗^[7]、超光滑光学基片表面清洗、汽车轮胎模具清洗^[8]、浮油去除^[9]、古建筑和艺术品修复^[10]、文物保护^[11]、城墙清洗^[12]等方面的应用尤为突出。激光清洗材料主要包括金属^[13]、橡胶^[14]、玻璃、陶瓷^[15]、木料、石头、建筑水泥表面,以及去除核电站^[16]和微量分析用的残留等。将激光焊接技术应用于汽车零部件制造领域有着传统成形方法无可比拟的优势,但汽车板镀层^[17]在焊接过程中将引入镀层杂质元素,从而降低焊缝及零件的外观质量、强度韧性、稳定性、有效使用寿命等。罗雅等^[18]研究发现利用激光清洗进行焊前预处理可有效提高TC11钛合金的

收稿日期:2018-10-30

基金项目:高档数控装备及工艺在导弹大型整体舱段集成制造中的示范应用资助项目(项目编号:2015ZX04002202)

作者简介:易鑫(1991-),女,硕士,工艺工程师,主要从事激光清洗及焊接工作。E-mail:1525819028@qq.com

焊接质量。高雯雯等^[19]研究采用 532 nm 激光清洗 304 不锈钢板表面不产生损伤。目前对镀层汽车板材料采用激光清洗技术的研究或应用较少。故本实验主要研究干式激光清洗镀 Al-Si 涂层板的激光清洗速度和清洗层数对镀层板进行激光自熔焊焊缝的影响规律。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为 1.5 mm 厚镀 Al-Si 涂层板,试板尺寸为 50.0 mm×25.0 mm×1.5 mm,其化学成分见表 1。由表可知,镀 Al-Si 涂层主要含 Al、Fe、Si 元素,而钢裸板主要含 Fe 元素及少量 Mn 元素。

表 1 镀铝硅涂层板化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical composition of Al-Si coating steel plates (mass fraction%)

Base metal	Chemical composition/%						
	Al	Fe	Si	Co	Mn	Cr	Mo
Al-Si coating	65.970	27.250	5.890	0.458	0.294	0.100	0.026
Steel plate	—	98.050	0.251	—	1.250	0.214	—

1.2 实验设备及方法

1.2.1 实验设备

激光清洗设备主要由 50 W 手持式 IPG 型脉冲光纤激光器、RAYLASE 型激光清洗头和 SIEMENS SINUMERIK 808D 型三维数控机床三部分组成。光纤激光器可发射 1 064 nm 波长的脉冲波,光纤芯径为 50 μm,脉冲功率为 50 W,脉冲频率为 30 kHz。激光清洗设备实物,如图 1(a)和图 1(b)所示。在激光器操作界面可设置光斑扫描功率、频率和速度,及扫描图形、线间距和路径等。在数控机床操作界面可设置机床运动位移、调节光斑大小。

激光清洗原理示意图,如图 1(c)所示。其工作原理为激光器产生的短脉冲激光束由光纤传输进入激光清洗头内,经准直镜、扫描振镜和聚焦镜后,在铝合金表面形成点状聚焦光斑。由于扫描振镜的高速摆动,点状聚焦光斑将变为具有一定长度的线状光斑,并在机器人的控制下,以一定速度对铝合金表面进行激光烧蚀,从而去除表面氧化膜。

1.2.2 实验方法

激光清洗工艺参数,如表 2 所示。激光自熔焊

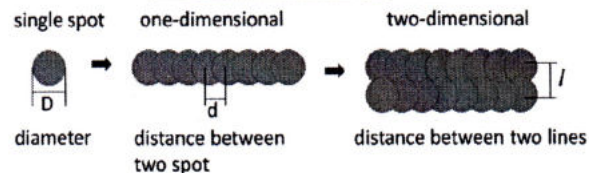


图 1 激光清洗设备及原理

(a)激光清洗设备 (b)激光清洗原理

Fig. 1 Laser cleaning equipments and principle

采用 4 kW 的 Rofin 光纤激光器,ABB IRB 4600 六轴机器人,IPG 激光头,200 μm 光纤,光斑直径 0.3 mm,Ar 气保护和单激光焊接方法,如表 3 所示。

表 2 激光清洗工艺参数

Tab. 2 Parameters of laser cleaning process

Procedure	Scanning speed / (m/min)	Scanning times	Procedure	Scanning speed / (m/min)	Scanning times
1	1	2	5	1	4
2	2	2	6	1	6
3	3	2	7	1	8
4	4	2	8	1	10

表 3 激光焊接工艺参数

Tab. 3 Parameters of laser welding process

Procedure	Laser power /W	Welding speed / (m/min)	Δf /mm	Gas-protecting / (L/min)
1	2 000	80	+5	20

1.2.3 实验检测方法

汽车板涂层化学元素检测采用美国 NITON 公司手持式金属分析仪 XL2-980, Dino-lite Digital Microscope 电子显微镜观察焊缝形貌, XJL-03 金相显微镜观察焊缝组织, WDW-200E 微机控制电子万能试验机对焊缝进行力学性能测试。

2 实验结果分析及讨论

2.1 激光清洗速度对焊缝的影响

激光清洗涂层后的化学成分, 如图 2(a) 所示。由图可知, 取激光清洗次数 $N=2$, 则激光清洗区域 Al 元素含量随清洗速度 S 呈正相关关系增大至 1 m/min, 此后增长速率缓慢。而涂层 Si 元素含量的波动幅度较小, 最大波动幅度为 3.506%。分析原因, 涂层中主要含 Al 元素 ($w(\text{Al})=65\%$, $w(\text{Si})=5\%$), Al 元素较 Si 元素活泼, 易于与 O 原子发生反应, 当清洗速度 $S \leq 1$ m/min 时反应时间较充分, 故清洗速度 S 越小, Al 元素含量越少。

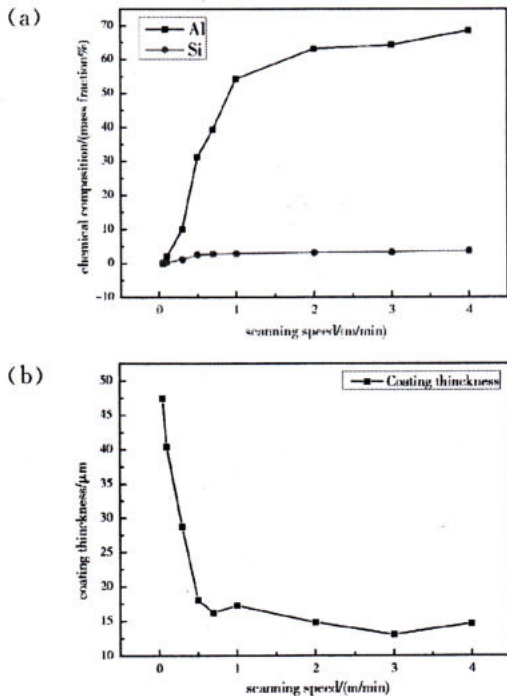


图 2 激光清洗涂层参数

(a) 涂层化学成分 (b) 涂层厚度

Fig. 2 Parameters of laser cleaning coating

通过显微镜测量激光清洗涂层深度, 如图 2(b) 所示。由图可知, 当 $N=2$ 时, 激光清洗涂层厚度随清洗速度 S 呈负相关关系急剧下降至 0.7 m/min, 此后缓慢减小。分析原因, 清洗速度 $S \leq 0.7$ m/min 时, 燃烧反应时间较充分, 故清洗速度 S 越小, 激光清洗去掉涂层厚度越大; 清洗速度 $S > 0.7$ m/min 时, 反应时间缩短, 故涂层厚度减小缓慢。

激光清洗后焊缝效果如表 4 所示。由表可知, 当 $N=2$, 激光清洗速度 S 从 4 m/min 降低到 1 m/min 时, 激光清洗的线间距逐渐减小, 焊缝上表面的浮渣减少。分析原因, 清洗速度越小时, 激光清洗反应时间越长, 故涂层燃烧量增多, 故进入焊缝的涂层杂质减少, 故焊缝上表面浮渣逐渐减少。

表 4 激光自熔焊焊缝

Tab. 4 Laser welding line











Scanning speed / (m/min)	Scanning times	Weld surface formation
1	2	
2	2	
3	2	
4	2	

拉伸试样件的抗拉强度参数和接头组织, 如表 5 所示, 拉伸试样件的尺寸为 150.0 mm \times 12.3 mm \times 1.5 mm。可知, 当 $N=2$ 时, 焊缝的抗拉强度随激光清洗速度 S 的增大而略减小, 波动幅度为 5.42 MPa; 经激光清洗后 Al-Si 涂层板的对接接头的拉伸强度略低于母材强度, 其中 $N=2, S=2$ m/min 时试样件的抗拉强度最高, 可达到母材强度的 94.59%; 当 $N=2$ 时, 拉伸试样件均呈 45° 拉裂且均断裂在母材。分析原因, 焊缝强度高于基材强度。

由表 5 可知, 对接接头呈漏斗形, 且均已焊透。 $N=2, S=2 \sim 3$ m/min 及母材接头, 焊缝正面微下凹, 背面均微凸; $N=2, S=1$ m/min 及 4 m/min 接头正面微平, 背面均微凸。分析原因, 可能是焊接间隙导致熔池微下塌。故较优激光清洗参数为 $S=1 \sim 4$ m/min。

表 5 激光拉伸工艺及接头

Tab. 5 Tensile test and joint of laser welding

Scanning speed / (m/min)	Scanning times	Tensile strength / MPa	Tensile test sample	Micro joint
1	2	497.34		
2	2	498.59		
3	2	494.04		
4	2	493.17		
0	0	527.10		

2.2 激光清洗次数对焊缝的影响

激光清洗涂层后的化学成分,如图 3(a)所示。可图可知,当 $S=1\text{ m/min}$, $N \leq 8$ 时,激光清洗区域 Al 元素含量随 N 的增加呈负相关关系减小;当 $S=1\text{ m/min}$, $N > 8$ 时,Al 元素含量随 N 的增加而缓慢减小;而涂层 Si 元素波动幅度较小,最大波动幅度为 2.6%。参考文献[20]和文献[21],分析原因,由于 Al 原子比 Si 原子活泼,易于 O 原子发生反应;涂层表面主要含 Al 元素 ($w(\text{Al}) = 65\%$, $w(\text{Si}) = 5\%$),故 Al 元素含量急剧下降。

通过显微镜测量激光清洗涂层深度,如图 3(b)所示。可图可知,当 $S=1\text{ m/min}$ 时,激光清洗去除涂层厚度随 N 的增多而呈正相关关系增大。

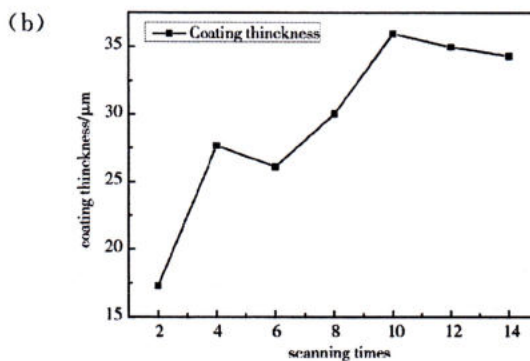
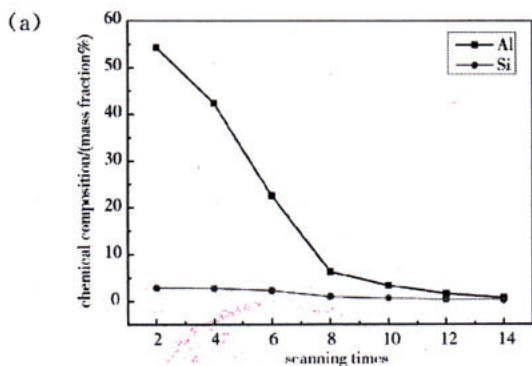







图 3 激光清洗涂层参数
(a)涂层化学成分 (b)涂层厚度
Fig. 3 Parameters of laser cleaning coating

激光清洗效果,如表 6 所示。可表可知,当 $S=1\text{ m/min}$, $N=2$ 时,焊缝表面浮渣较少;当 $S=1\text{ m/min}$, $N > 2$ 时, N 越大,焊缝平整度越好,但不断有析出物析出。分析原因,综合图 3 分析可得, $N > 2$ 时涂层中 Al 元素不断减少,故浮渣减少。而 Si 元素含量变化较小,故析出物为含 Si 化合物。

拉伸试样件的抗拉强度参数如表 7 所示,拉伸试样件的尺寸为 $150.0\text{ mm} \times 12.3\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 。可知,当 $S=1\text{ m/min}$ 时,焊缝的抗拉强度随 N 的增大而呈负相关关系减小,波动幅度为 33.93 MPa,其中,当 $S=1\text{ m/min}$, $N=2$ 时,焊缝的抗拉强度最

表 6 激光自熔焊焊缝
Tab. 6 Laser welding line

Scanning speed / (m/min)	Scanning times	Weld surface formation
1	2	
1	4	
1	6	
1	8	
1	10	

高,为母材的 94.44%,且拉伸试验呈 45°断裂于母材(其余拉伸试样件均断裂于清洗台阶处)。分析原








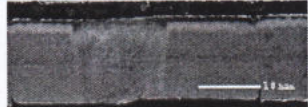
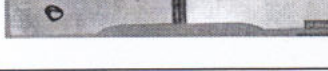
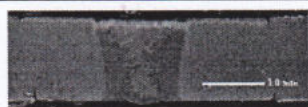
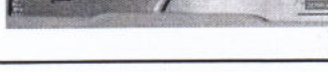

因,当 $S=1$ m/min 时, N 越大,激光清洗区域的燃烧次数越多,涂层燃烧量越多,导致激光清洗台阶高度越大,故焊缝强度下降。综合图 3 分析可得, N 越大时, Al 元素含量减少,而 Al 元素可提高焊缝的抗拉强度^[22],故焊缝的抗拉强度下降。

焊缝接头组织如表 7 所示。由表可知,对接接头均已焊透,且呈漏斗形;焊缝接头正面均微平,背面均微凸。分析原因,焊接间隙较小。

为提高焊接生产线效率,选取比较焊缝成形较好且拉伸强度较高的 $S=3$ m/min, $N=2$ 和 $S=1$ m/min, $N=4$ 的试样件,及母材进行杯突实验,如图 4 所示。由图可知,图 4(a)试样件从焊缝中心处开始出现裂纹,且裂纹垂直于焊缝方向扩散;图 4(b)试样件从清洗台阶处开始出现裂纹,随后在焊缝中心处也开始出现裂纹,且两条裂纹延台阶方向和垂直于焊缝方向扩散;图 4(c)镀层母材从一侧出现裂纹,且裂纹呈环形扩散。分析原因,图 4(a)中焊缝剪切强度略低于母材,图 4(b)中激光清洗台阶处抗拉强度较低、且焊缝剪切强度略低于母材。故较优激光清洗参数为 $S=1\sim 4$ m/min, $N=2$ 。

表 7 激光拉伸工艺及接头

Tab. 7 Tensile test and welding joint of laser welding process

Scanning speed / (m/min)	Scanning times	Tensile strength /MPa	Tensile test sample	Micro joint
1	2	497.34		
1	4	495.93		
1	6	475.23		
1	8	473.77		
1	10	463.41		
0	0	527.10		

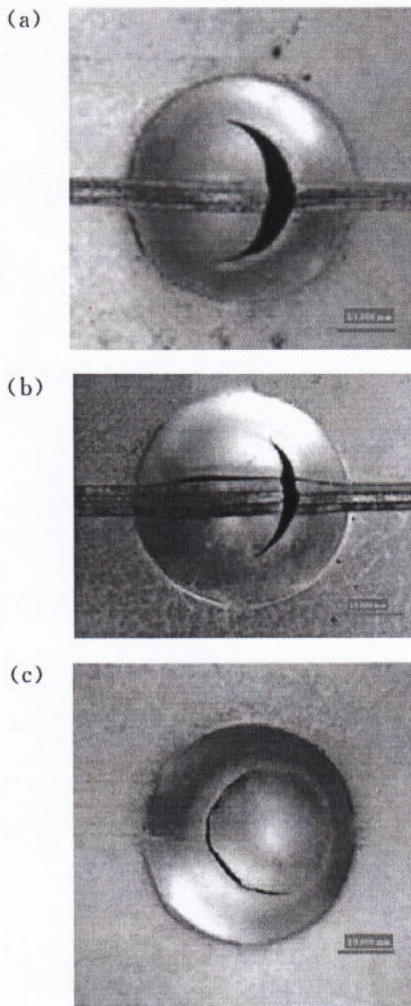


图4 杯突实验

(a) $S=3\text{ m/min}$, $N=2$ (b) $S=1\text{ m/min}$, $N=2$ (c) 母材

Fig. 4 Cracking position of welding line

2.3 激光清洗涂层的显微组织

通过显微镜测量不锈钢板镀层厚度,如图5所示。由图可知,镀层厚度为 $33\sim 34\ \mu\text{m}$,镀层板的晶间化合物厚度为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 。

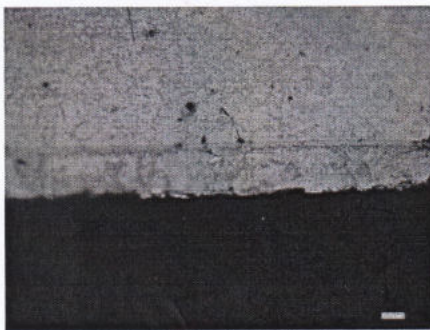


图5 涂层厚度

Fig. 5 Thickness of the Al-Si coating

3 结论

(1) 镀 Al-Si 涂层的厚度为 $33\sim 34\ \mu\text{m}$; 其中, Al 元素含量高达 65% 以上, Si 元素含量达 5% 以上。

(2) 激光清洗最优参数为激光功率 $P=50\text{ W}$, 清洗速度 $S=1\sim 4\text{ m/min}$, 清洗次数 $N=2$, 且其焊缝的抗拉强度较好, 可达母材的 94% 以上。

(3) 激光清洗技术应用于汽车涂层板的激光焊前预处理, 可使焊缝成型良好、焊缝质量优良、焊接接头强度高。

参考文献

- [1] 张鑫, 陈玉华. 各类型激光器在激光清洗技术应用中发展现状及展望[J]. 热加工工艺, 2016, 45(8): 37-40.
- [2] 苏春洲, 栾晓雨, 王海军, 等. 激光清洗技术的初步研究和应用[J]. 科技资讯, 2013(26): 3-6.
- [3] HEIDELMANN G. Lasers clean up[J]. Industrial Laser Solutions, 2009(2): 9-12.
- [4] PRANDONI S, SALVADEO P, CASTELLI P, et al. Industrial laser cleaning[J]. Industrial Laser Solutions, 2002(11): 21-23.
- [5] BUCHTER E. A green way to clean-laser cleaning[J]. Laser Technik Journal, 2012(5): 36-38.
- [6] 侯素霞, 罗积军, 徐军, 等. 军用装备的激光清洗技术应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, (z1): 625-628.
- [7] 赵志明. 激光清洗技术在微电子领域的应用[J]. 洗净技术, 2004(8): 29-34.
- [8] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1050-1054.
- [9] 叶亚云, 袁晓东, 向霞, 等. 用激光清洗金膜表面硅油污染物[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 968-972.
- [10] 齐扬, 周伟强, 陈静, 等. 激光清洗云冈石窟文物表面污染物的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 32-38.
- [11] BELLI R, MIOTELLO A, MOSANER P, et al. Laser cleaning of ancient textiles[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1-4): 369-372.
- [12] 朱玉峰, 谭荣清. 激光清洗应用于清除城市涂鸦[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 840-844.
- [13] LI XIAO GUANG, HUANG TINGTING, CHONG ANGWEI, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 340-344.
- [14] KONG D J, FENG A X, ZHANG Y K, et al. Experiment study on CO_2 laser cleaning rubber sulfuring mould[C]// Ico20: Lasers & Laser Technologies, In-

ternational Society for Optics and Photonics, 2006.

- [15] BARBERIO M, BARONE P, STRANGES F, et al. Effect of laser ablation cleaning process on ceramic artifacts[J]. Journal of Physical Science and Application, 2013, 3(4): 224-228.
- [16] ALEXANDROVA A, IGOREVICH B O, GUBSKIY K, et al. Laser cleaning of mirror surface for optical diagnostic systems of the international thermonuclear experimental reactor[J]. Journal of Physical Science and Application, 2013, 3(1): 1-8.
- [17] 李国勇. 耐热钢热浸镀 Al-Si 合金的工艺及组织研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 139-140.
- [18] 罗雅, 王璇, 赵慧峰, 等. 焊前激光清洗预处理对 TC11 钛合金焊接性能的影响[J]. 表面工程与再制造, 2017, 17(2): 26-28.
- [19] 高雯雯, 郭亮, 许佩吟. 532 nm 激光工艺参数对 304 不锈钢表面清洗的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(2): 199-204.
- [20] 倪加明, 管雅娟, 胡明华, 等. 激光清洗阳极氧化膜对铝合金焊缝性能的影响分析[J]. 电焊机, 2017, 47(7): 102-105.
- [21] 董世运, 宋超群, 闫世兴, 等. 激光清洗预处理对 7A52 铝合金激光焊缝成形质量的影响[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(4): 100-105.
- [22] 卢杰. 焊材中 Al、Cu 元素对 X80 管线钢焊接接头组织与性能的影响[D]. 南充: 西南石油大学, 2015.