

# 自锁阀激光焊接工艺研究

刘泽敏, 王 磊, 谢 屹

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 研究了自锁阀激光焊接焦点位置与焊缝熔深之间的关系、焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系, 分析了随着激光功率增加, 不同焦点位置的焊接过程依次经历稳定热导焊, 热导焊、深熔焊交替进行的不稳定焊接和稳定深熔焊接三种模式, 进而研究了稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系, 得出了自锁阀在稳定焊接模式下的最佳焊接工艺规范参数。采用该激光焊接工艺规范焊接的常压和高压自锁阀焊缝外观质量、气密、液压以及焊缝氦质谱检漏试验结果全部满足设计要求。常压和高压自锁阀已经应用于嫦娥五号、探月工程、东风导弹武器系统、货运飞船、921-3 推进分系统、东方红三号等推进系统的液体火箭发动机之中。

**关键词:** 焦点位置; 焊接模式; 焊缝熔深; 焊缝质量

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0090-07

## Study on laser welding technology for latching valve

LIU Zemin, WANG Lei, XIE Yi

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** The relationship of focus point and weld penetration, and the relationship of welding velocity, laser power and weld penetration of laser welding technology for latching valve are studied. The third welding modes in welding process at different focus points are analyzed, in which, with the increase of laser power, stable thermal conductivity welding, unstable thermal conductivity welding and stable deep penetration welding are undergone in proper order. The relationship between technological parameter and weld penetration under stable welding mode was researched. The weld procedure specification parameters for the latching valve under stable welding mode were obtained. The test results of the valve weld appearance quality, airtight, hydraulic pressure and welded joint helium mass spectrum leak meet the design requirements. At present, the constant-pressure and high-pressure latch valves are used in the propellant system of liquid-propellant rocket engines of ChangE 5, lunar exploration engineering, Dongfeng missile weapon system, cargo spaceship, 921-3 propulsion subsystem, DongFangHong 3 propulsion system.

**Keywords:** focus position; welding mode; weld penetration; welding quality

收稿日期: 2016-02-18; 修回日期: 2016-03-13

基金项目: 国家 863 项目(2012AA702302)

作者简介: 刘泽敏 (1984—), 女, 硕士, 研究领域为激光焊接及材料热处理

0 引言

自锁阀广泛应用于探月工程货运飞船、运载火箭、导弹武器等动力控制系统,其主要功能是控制推进剂分系统上下游之间推进剂的通断以及实现主、备份贮箱之间推进剂的切换与供应等。自锁阀结构微小,焊缝熔深均匀性要求较高,自锁阀壳体与进、出口管嘴连接必须采用激光焊接

工艺。

1 自锁阀焊接设计要求

根据工作压力,自锁阀分为常压自锁阀和高压自锁阀。常压自锁阀和高压自锁阀壳体与进、出口管嘴之间采用激光焊接工艺实现连接,焊缝不允许有气孔、裂纹、咬边等缺陷,焊缝熔深、液压、气密、氦检等设计要求见表 1。

表 1 自锁阀焊接设计技术要求

Tab. 1 Welding technical specifications of latching valve

自锁阀	工作压力/MPa	焊缝熔深/mm	液压	气密	氦检
常压自锁阀	2~3	0.3~1	纯净水 3~7 MPa (表压),保压 5 min 不漏	2~5 MPa 氦气 (表压),保压	进口 2 MPa 检漏压 力,阀门外漏率 $\leq 1 \times 10^{-7}$ Pa·m <sup>3</sup> /s
	3~5	1~1.5		5 min 不漏	
高压自锁阀	30~50	1.8~2.8	纯净水 50 MPa, 保压 5 min 不漏	35 MPa 氦气 (表压),保压 5 min 不漏	进口 35 MPa 检漏压 力,阀门外漏率 $\leq 1 \times 10^{-7}$ Pa·m <sup>3</sup> /s

表 2 焊接接头材料化学成分<sup>[1-2]</sup>

Tab. 2 Chemical components of material of welded joint

合金名称	化学成分/(wt%)								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Fe
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤0.8	≤2	≤.015	≤.035	17.00~19.00	8.00~11.00	0.5~0.7	余
Cr17NiTi	≤0.05	0.3~0.7	0.3~0.7	≤.030	≤.030	17.00~18.50	0.3~0.7	0.3~1.1	余

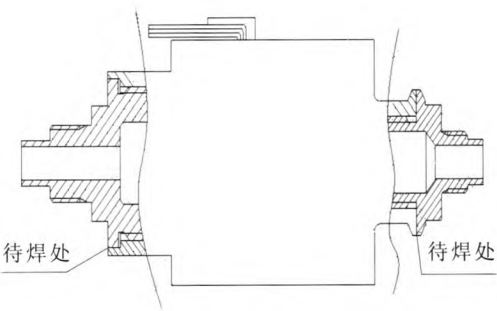


图 1 某型号自锁阀焊接结构图  
Fig. 1 Welding structure chart of a certain latching valve

自锁阀壳体与管嘴焊接结构属于轴向或端面锁底对接结构,其结构原理简图见图 1。管嘴材

料为不锈钢 1Cr18Ni9Ti,自锁阀壳体阀座材料为软磁合金 Cr17NiTi,其化学成分见表 2。两种材料化学成分接近,冶金性和焊接工艺性好。

2 激光焊接理论与分析

激光焊接属于高能束焊接,焊接热源集中,热影响区小,它是利用高能量密度激光束作为焊接热源,作用于工件表面,使材料发生重熔,形成良好表面质量焊接接头的焊接方法。激光具有高的能量密度,小的光斑直径。与传统焊接工艺相比,激光焊接工艺具有较高的焊接速度,小的焊接变形,大的深宽比和更优良的焊接质量,适合焊接精密组件。自锁阀壳体与进、出口管嘴连

接也采用激光焊接工艺。

影响激光焊接质量和焊缝熔深的因素有：光束特性、焊接接头形式、焊接工艺参数（焦点位置、激光功率、焊接速度等）、保护气体及流量、材料特性等。自锁阀壳体与进、出口管嘴焊接使用的激光焊接设备是德国 HL2006D+LASMA1054 型激光焊机。焊机光束质量  $25 \text{ mm} \cdot \text{rad}$ ，自锁阀壳体与进、出口管嘴焊接接头型式为锁底对接型式，保护气体为氩气。氩气流量为  $6 \sim 12 \text{ L/min}$ 。本文将着重研究焊接工艺参数，即焦点位置、激光功率、焊接速度对焊缝质量和焊缝熔深的影响因素，从而归纳出焦点位置、激光功率、焊接速度与焊缝质量和焊缝熔深之间的关系，进而得出自锁阀壳体与进、出口管嘴激光焊接最佳工艺规范。

## 2.1 焦点位置与焊缝熔深之间的关系

在激光焊接速度  $v=30 \text{ mm/s}$ ，激光功率  $P=300 \sim 1\,100 \text{ W}$ （激光功率增幅为  $100 \text{ W}$ ），激光焦点与工件平面间距  $Z=-2 \text{ mm}$ ， $Z=0$ ， $Z=2 \text{ mm}$  三种焦点模式下，由激光焊接材料为  $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}-\text{Cr}17\text{NiTi}$  标准试样的试验数据可以得出如图 2 所示的三种焦点位置上激光功率与焊缝熔深之间的关系曲线。

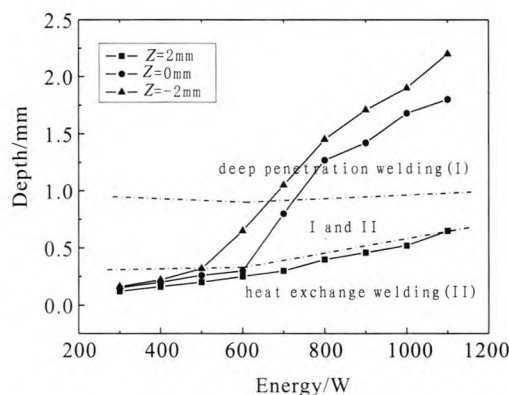


图 2 3 种焦点位置激光功率与焊缝熔深之间的关系  
Fig. 2 Relationship between laser power and weld penetration at three different focus points

由图 2 可知，在 3 种焦点位置上的激光焊接，焊缝熔深均随着激光功率的增大而增大；在相同的激光功率下，焊缝熔深随着激光焦距的减小而增大，即焊缝熔深依照离焦焊 ( $Z=2 \text{ mm}$ ) -

实焦焊 ( $Z=0$ ) - 入焦焊 ( $Z=-2 \text{ mm}$ ) 的顺序而增大。这是由于激光照射并作用到被焊工件表面上之后，一部分激光被工件表面反射，一部分激光进入被焊工件内部被被焊工件吸收，还有一部分激光透过被焊工件所致。公式 (1) 详细描述了该物理化学过程。

$$E_0 = E_r + E_a + E_t \quad (1)$$

式中： $E_0$  为照射并作用到被焊工件表面的总激光能量； $E_r$  为被焊工件表面反射的激光能量； $E_a$  为被焊工件吸收的激光能量； $E_t$  为透过被焊工件的激光能量。

工件在未焊透的情况下， $E_t=0$ ，即  $E_0 = E_r + E_a$ 。在入焦焊 ( $z=-2 \text{ mm}$ ) 的情况下，激光焦点位置在被焊工件内部，从而增加了被焊工件对激光能量的吸收程度， $E_a$  增大，随之焊缝熔池形貌增大，焊缝熔深增大；反之，在离焦焊 ( $z=2 \text{ mm}$ ) 的情况下，激光焦点位置在被焊工件表面位置以上，被焊工件对激光能量吸收的程度随之减弱， $E_a$  减小，且激光焊接能量密度亦随之减小，因而焊缝熔池形貌减小，焊缝熔深减小。

## 2.2 焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系

在实焦焊 ( $Z=0 \text{ mm}$ )，激光功率  $P=400 \sim 1\,800 \text{ W}$ （激光功率增幅为  $100 \text{ W}$ ）的条件下，激光焊接速度  $v=10 \text{ mm/s}$ ， $v=20 \text{ mm/s}$ ， $v=30 \text{ mm/s}$ ， $v=40 \text{ mm/s}$ ， $v=50 \text{ mm/s}$ ，由激光焊接材料为  $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}-\text{Cr}17\text{NiTi}$  标准试样的试验数据可以得出如图 3 所示的激光功率与焊缝熔深之间的关系曲线。

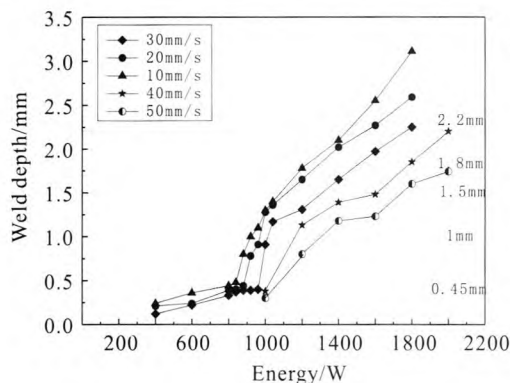


图 3 激光功率与焊缝熔深之间的关系  
Fig. 3 Relationship between laser power and weld penetration

由图 3 可知, 焊缝熔深随着激光功率的增大和焊接速度的减小而增大, 这是由于, 增大激光功率和减小焊接速度, 均可提高焊接过程线能量的输入量, 由此增大了焊缝熔深。

在不同焊接速度下, 随着激光功率的增大, 焊接过程会经历稳定热导焊、热导焊和深熔焊交替进行的不稳定焊接和稳定深熔焊接 3 个阶段。激光功率阈值决定焊接模式, 激光功率处于  $P_{C2}$  (不稳定焊结束时的激光功率) 和  $P_{C1}$  (不稳定焊开始时的激光功率) 之间时, 焊接过程处于不稳定的状态, 焊接模式会在深熔焊和热导焊两种模式之间跳变, 焊缝熔深会在大小两极之间变化。焊接过程中, 辐射照度为  $I$  的激光束直接照射到熔池表面, 被焊工件吸收到的辐射照度大于被焊工件加热到汽化温度所需吸收的辐射照度, 即  $AI$  (被焊工件吸收到的激光能量)  $> I_v$  (未产生匙孔效应的最大临界能量)。此时, 被焊工件表面熔化、汽化并形成小孔, 该模式为深熔焊接模式。被焊工件表面小孔形成的同时被融化的金属发生汽化, 金属气体电离产生等离子体, 入射激光被等离子体云吸收, 使被焊工件表面的激光辐射照度衰减为  $I(1-AI) < I_v$ , 此时, 被焊工件表面金属汽化和电离化过程终止, 随即跳变为热导焊接模式。金属等离子体云消失后, 熔池表面的激光辐射照度陡然增加, 随即又恢复为  $AI > I_v$  的模式, 此时, 新一轮的金属汽化开始, 匙孔效应发生, 小孔随即产生, 焊接过程随即跳变为深熔焊接模式。在深熔焊接和热导焊模接式下, 焊接过程和焊缝成形均不稳定<sup>[2]</sup>。在实际焊接过程中, 应避免热导焊接和深熔焊接交替发生的不稳定焊接模式。在稳定热导焊接和稳定深熔焊接的焊接参数规范内, 焊接过程稳定, 焊缝成形均匀。

### 2.3 稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系

在稳定焊接模式, 设置焦点位置  $Z=-2$  mm,  $Z=-1$  mm,  $Z=0$ ,  $Z=1$  mm,  $Z=2$  mm, 焊接速度  $V=10\sim50$  mm/s, 激光功率  $P=400\sim1\ 800$  W (激光功率增幅为 200 W) 的条件下, 由激光焊接材料为 1Cr18Ni9Ti- Cr17NiTi 标准试样的试验数据可以得出如图 4 所示的焊缝熔深与工艺参数之间的

关系曲线。

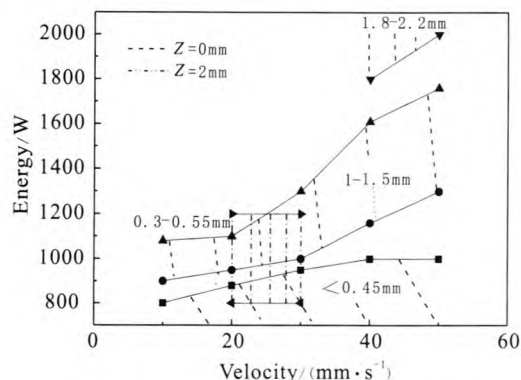


图 4 焊缝熔深与工艺参数之间的关系

Fig. 4 Relationship between technical parameter and weld penetration

## 3 自锁阀激光焊接工艺

### 3.1 焊接设备与焊接工艺流程

自锁阀激光焊接采用德国通快 (TRUMPF) 公司制造的连续激光焊机完成, 焊机采用 YAG 灯泵浦固体激光器。Nd:YAG 激光器发射的激光波长  $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$ , 最大平均输出功率 2 000 W, 激光功率稳定性  $\psi=\pm 1\%$ , 光束质量:  $25\ \text{mm}\cdot\text{rad}$ , 光纤直径  $\Phi=600\ \mu\text{m}$ , 工作距离  $L=150\ \text{mm}$ , 激光功率可在 200~2 000 W 之间无级调节。自锁阀激光焊接工艺流程框图见图 5。

### 3.2 焊接工艺规范

自锁阀进出口管嘴与壳体组件对接焊接, 待焊处属回转轴心夹持。焊接过程为: 首先, 装配待焊零件, 确保待焊零件错边量  $\delta\leq 0.05\ \text{mm}$ , 焊接间隙  $\varepsilon\leq 0.05\ \text{mm}$ 。然后, 将待焊零件夹持于三爪卡盘内, 调整同轴度, 使待焊处轴向跳动量  $\Delta\leq \Phi 0.1\ \text{mm}$ 。最后, 摆放旁吹保护气体-氩气, 实现焊接过程全位置惰性气体保护焊接。根据焦点位置与焊缝熔深之间的关系以及焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系可得出焊接工艺参数与焊接模式和焊缝熔池气孔出现概率之间的影响关系表, 见表 3。

根据稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系曲线和表 3 可得出常压和高压自锁阀焊接工艺规范, 见表 4。按照表 4 焊接工艺规范焊



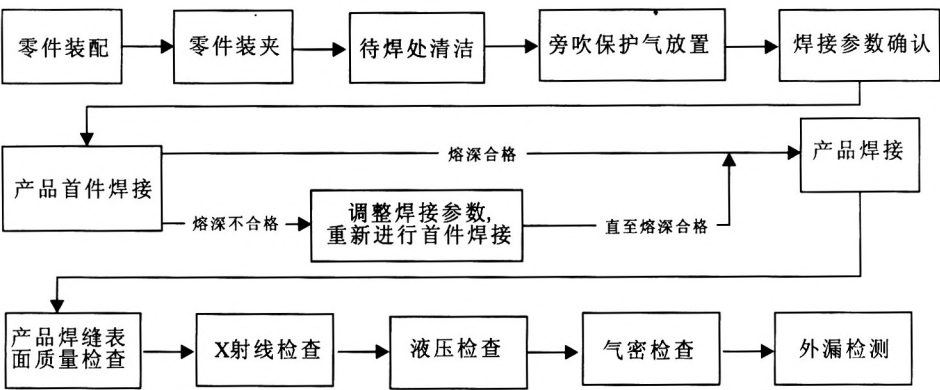


图 5 自锁阀激光焊接工艺流程框图

Fig. 5 Technological process for laser weld for latching valve

表 3 工艺参数与焊接模式和焊缝熔池气孔出现概率的影响表

Tab. 3 Influence of technological parameters and welding mode on probability to cause holes of molten pool in welding line

激光功率/W	焊接速度/(mm/s)							
	实焦焊					离焦焊		入焦焊
	10	20	30	40	50	20	30	30
400	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
600	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
800	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	0
1 000	◇	◇	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	●
1 200	●	●	0	◇	◇	Δ	Δ	●
1 400	●	●	●	0	◇	◇	◇	●
1 600	●	●	●	0	0	0	0	●
1 800	●	●	●	0	0	0	0	●
2 000	●	●	●	0	0	0	0	●

(注：Δ 表示稳定热导焊接模式；◇ 表示不稳定焊接模式；0 表示稳定深熔焊焊接模式；● 表示熔池出现气孔)

表 4 常压和高压自锁阀焊接工艺规范

Tab. 4 Welding process specifications of constant-pressure and high-pressure latching valve

自锁阀	焊缝熔深 设计要求/mm	焊接工艺规范		
		焦点位置/mm	激光功率/W	焊接速度/(mm/s)
常压自锁阀	0.3~0.7	Z=2	800~1 200	20~30
	1~1.5	Z=0	1 000~1 200	20~30
高压自锁阀	1.8~2.6	Z=0	1 800~2 000	40~50

接自锁阀，焊缝表面呈银白色，焊缝表面无裂纹和咬边等缺陷；X 射线无损探伤表明：焊缝内部无气孔、无夹杂。焊缝表面和内部质量满足设计技术要求。

4 自锁阀试验与验证

自锁阀测试试验流程框图见图 6。为验证焊接质量, 对自锁阀进行了焊缝外观检查、液压试验、气密试验和焊缝氨质谱检漏试验, 试验结果见表 5。

由表 5 可见, 采用表 4 常压和高压自锁阀焊接工艺规范焊接的常压和高压自锁阀焊缝外观质量、液压试验、气密试验和焊缝氨质谱检漏试验结果全部满足设计要求, 由此证明: 自锁阀激光

焊接理论分析、焦点位置与焊缝熔深之间的关系以及焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系分析与研究是正确的, 稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系以及由此得出的自锁阀激光焊接工艺规范是合理和有效的。采用该焊接规范焊接的自锁阀已经应用于嫦娥五号、探月工程、东风导弹武器系统、货运飞船、921-3 推进分系统、东方红三号等推进系统的液体火箭发动机之中。

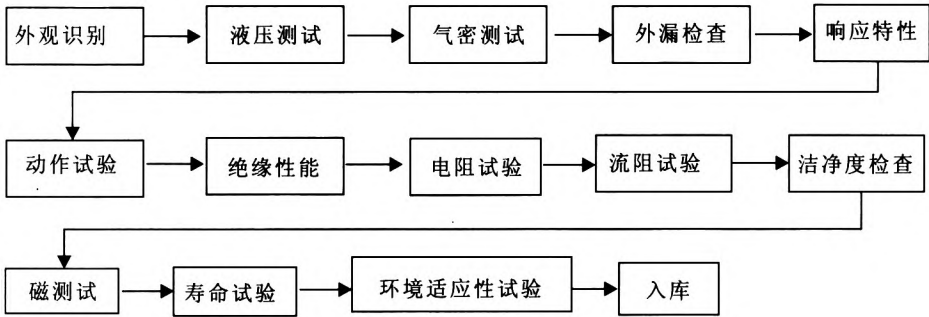


图 6 自锁阀测试试验流程框图  
Fig. 6 Flow chart for test of latching valve

表 5 自锁阀试验结果  
Tab. 5 Test results of latching valve

自锁阀	试验项目	设计要求	试验结果	备注
常压自锁阀	外观检查	焊缝表面光滑、无咬边、无气孔、无裂纹	焊缝表面光滑、无咬边、无气孔、无裂纹	合格
	液压试验	纯净水 3~7 MPa, 保压 5 min 不漏	纯净水 4.5 MPa, 保压 5 min 不泄露	合格
	气密试验	2~5 MPa 氦气 (表压), 保压 5 min 不漏	2 MPa 氦气 (表压), 保压 5 min 不漏	合格
	氨质谱检漏试验	进口 2 MPa 检漏压力, 阀门外漏率 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	进口 2 MPa 检漏压力, 阀门外漏率为 $7 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	合格
高压自锁阀	外观检查	焊缝表面光滑、无咬边、无气孔、无裂纹	焊缝表面光滑、无咬边、无气孔、无裂纹	合格
	液压试验	纯净水 50 MPa, 保压 5 min 不漏	纯净水 50 MPa, 保压 5 min 不泄露	合格
	气密试验	35 MPa 氦气 (表压), 保压 5 min 不漏	35 MPa 氦气 (表压), 保压 5 min 不漏	合格
	氨质谱检漏试验	进口 35 MPa 检漏压力, 阀门外漏率 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	进口 35 MPa 检漏压力, 阀门外漏率为 $5 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	合格

## 5 结论

研究了自锁阀激光焊接理论, 焦点位置 (即实焦、离焦和入焦三种聚焦方式) 与焊缝熔深之间的关系, 焊接速度和激光功率与焊缝熔深之间的关系, 在此基础上研究了随着激光功率增加, 不同焦点位置的焊接过程依次经历稳定热导焊, 热导焊、深熔焊交替进行的不稳定焊接和稳定深熔焊接三种模式, 进而研究了稳定焊接模式下工艺参数与焊缝熔深之间的关系, 由此得出了自锁阀在稳定焊接模式下的最佳焊接工艺规范参数, 采用该激光焊接工艺规范焊接的常压和高压自锁阀焊缝外观质量、气密、液压以及焊缝氦质谱检漏试验结果全部满足设计要求。常压和高压自锁阀已经应用于嫦娥五号、探月工程、东风导弹武器系统、货运飞船、921-3 推进分系统、东方红三号等推进系统的液体火箭发动机之中。

### 参考文献:

- [1] 北京北冶功能材料有限公司. Cr17NiTi 抗蚀软磁合金热锻棒材技术协议: BYG06JX353-2015[S]. 北京: 北京北冶功能材料有限公司, 2015: 3.
- [2] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 陈武柱. 激光焊接及切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 吴毅雄, 殷树言. 焊选手册: 材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 刘泽敏, 宋凡. 激光焊工艺参数对焊缝熔深及质量的影响[R]. 上海: 上海空间推进研究所工艺研究室工艺技术总结报告, 2014.
- [6] 秦国梁, 林尚扬. 激光焊接体能量及其对激光深熔焊缝熔深的影响[J]. 焊接学报, 2006(27): 74-76.
- [7] 徐国建, 王虹. 工艺参数对不锈钢薄板激光叠焊成形性能的影响[J]. 电焊报, 2010, 40(11): 11-14.
- [8] 卢飞, 何建萍. 不锈钢焊缝组织细化的研究现状[J]. 焊接技术, 2014, 43(11): 27-31.

(编辑: 王建喜)

(上接第 78 页)

### 参考文献:

- [1] 李家伟. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 刘贵民. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 黄立德. 液体火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [4] 《美国无损检测手册》译审委员会. 美国无损检测手册 [M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 1999.
- [5] 余拱信. 激光全息技术及其工业应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

- [6] 邱元武. 激光技术和应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [7] 厄尔夫 R K. 全息摄影无损检测[M]. 王致新 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 王任达. 全息和散斑检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 魏超. 液体火箭发动机焊接技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2016.
- [10] 王仲生. 无损检测诊断和现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

(编辑: 王建喜)