

# 1Cr18Ni9Ti 脉冲激光焊接工艺研究

田英超<sup>1,2</sup>, 张祎玲<sup>2</sup>, 曹 明<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 介绍了采用 YAG 脉冲激光器焊接不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的工艺过程, 通过调整离焦量、焊点重叠率、峰值功率和脉冲宽度进行试件焊接, 并对焊缝熔深进行检测。试验结果表明: 离焦量对焊缝熔深影响较大, 负离焦量时可以获得较大的焊缝熔深; 峰值功率对焊缝熔深影响最大, 但峰值功率过大易出现焊接飞溅; 焊点重叠率与焊缝熔深有效性密切相关, 对产品密封性能影响大; 脉冲宽度对焊缝熔深影响较小, 对焊缝表面成形状态影响较大。针对推进系统中阀门壳体激光焊缝熔深要求, 优化了工艺参数。采用上述工艺规范焊接的阀门产品已经过飞行考核。

**关键词:** 峰值功率; 焊点重叠率; 脉冲宽度; 熔深

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 03-0073-04

## Research on pulsed laser welding technology of 1Cr18Ni9Ti

TIAN Ying-chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-ling<sup>2</sup>, CAO Ming<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** The technological process of Austenitic stainless steel (1Cr18Ni9Ti) welded with pulsed YAG laser is introduced. Lots of welding tests were carried out by repeatedly adjusting the parameters like defocusing amount, overlap rate of welding points, peak power and pulse width, and the weld penetration was measured. The result shows that the defocusing amount affects the weld penetration to a certain extent, a larger weld penetration can be obtained in the case of the negative defocusing amount; the peak power has the biggest impact on the weld penetration, but overlarge peak power is easy to cause the weld spatter; the overlap rate of welding points is closely related to the valid weld penetration, which exerts a enormous influence on the sealing property; however, the pulse width has less influence on the weld penetration, but affects the forming state of weld surface. According to the weld penetration requirement of laser welding of valve shell in propulsion system, the optimal process parameters were obtained and have been applied successfully.

**Keywords:** peak power; overlap rate of welding point; pulse width; weld penetration

收稿日期: 2014-01-22; 修回日期: 2014-04-09

作者简介: 田英超 (1977—), 男, 高级工程师, 研究领域为焊接技术

0 引言

奥氏体不锈钢具有优秀的耐蚀性、综合力学性能良好,广泛应用于航天航空、化工、石油等领域<sup>[1-2]</sup>。激光与传统光源相比,具有方向性好、高亮度、单色性强、相干性好等特点<sup>[3]</sup>,在航天航空、微电子、医疗及核工业领域应用广泛,其焊缝特点是焊缝宽度窄、焊接变形小、焊接速度快、能量控制好、受磁场影响小、焊缝表面光滑、工艺重复性好、能实现无接触精密焊接<sup>[4]</sup>,在焊接阀门壳体类产品方面有较大优势。

1 阀门壳体焊接的设计要求

某型号推进系统用阀门为单线圈常闭式阀门,该阀门壳体材料为 1Cr18Ni9Ti,由于阀门壳体焊缝熔深要求较小,并有很高的密封要求,因此采用激光热导焊方式焊接。阀门焊缝设计要求见表 1,壳体焊缝接头结构见图 1。

表 1 阀门壳体激光焊缝设计要求  
Tab. 1 Design requirements of laser welding joint for valve shell

检查项目	设计要求
理化分析	熔深要求: 0.4~0.6 mm
表面质量	焊缝表面无气孔、裂纹、咬边、凹坑、锯齿波等缺陷
气密检查	通入 2.0 MPa 的氮气,保压时间不少于 1 min,无气泡
氦质谱检漏	通入 2.0 MPa 氦气,泄漏率不大于 $1\times10^{-6}$ Pa·m <sup>3</sup> /s

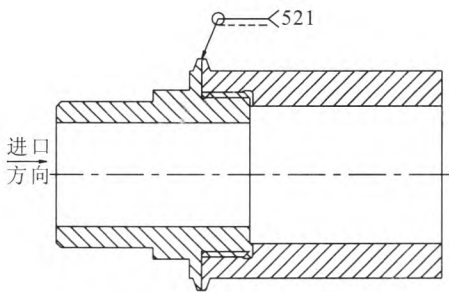


图 1 阀门产品局部简化示意图  
Fig. 1 Local simplified schematic diagram of valve

2 激光焊接设备与材料

激光焊接设备为 YAG 固体脉冲激光焊机,激光焊机主要技术参数见表 2。被焊材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,材料状态为 1 100 ℃左右固溶处理态,化学成分见表 3。

表 2 ML2350A 激光焊机主要技术参数  
Tab. 2 Main technical parameters of ML2350A laser welding machine

输出功率/W	激光波长/ μm	最大脉冲/ /Hz	脉冲宽度/ /ms
84	1.064	200	0.25~30

表 3 1Cr18Ni9Ti 中化学成分含量质量百分比  
Tab. 3 Quality percentage of chemical components in 1Cr18Ni9Ti

材料名称	1Cr18Ni9Ti						%
化学成分	Cr	Ni	Mn	Si	其他	Fe	
含量	17~19	8~11	≤2	≤0.8	≤0.5	余	

3 激光焊接机理

激光焊接的原理是:激光束轰击金属表面形成蒸汽,金属蒸汽可防止剩余能量被金属反射掉,材料在吸收激光能量后,经过一定过程转化为热能,这些热能使金属熔化,冷却后形成焊缝<sup>[5]</sup>。激光焊接有两种焊接模式:深熔焊(DPW)和热导焊(HCW)<sup>[6-8]</sup>。脉冲激光焊接主要工艺参数有:离焦量、焊点重叠率、峰值功率和脉冲宽度等。这些参数均与焊缝熔深有关,下面从理论方面逐一进行分析。

3.1 离焦量与熔深的关系

由公式 (1) 可知,作用于工件表面的激光功率密度除了与脉冲能量和脉冲宽度有关外,还受光斑直径的影响,而光斑直径与离焦量(工件表面与焦平面的相对位置)有关,当焦平面位于工作表面之上时为正离焦,反之为负离焦<sup>[9]</sup>。

$$P_d = 4E / \pi d^2 \tau$$

(1)

式中： $P_d$  为光斑的功率密度， $W/cm^2$ ； $E$  为脉冲能量， $J$ ； $d$  为光斑直径， $cm$ ； $\tau$  为脉冲宽度， $s$ 。

图 2 是离焦量与焊缝熔深之间的关系曲线图。由图 2 可见，当离焦量为  $-0.2$  时，熔深最大；离焦量为  $+0.2$  时，熔深最小。这是由于当最大功率密度位于金属内部时，激光局部加热的程度最强，从而可使更多的金属熔化和气化，使得激光能量更容易向工件深处传递；同时液态金属比固态金属更容易吸收激光能量。

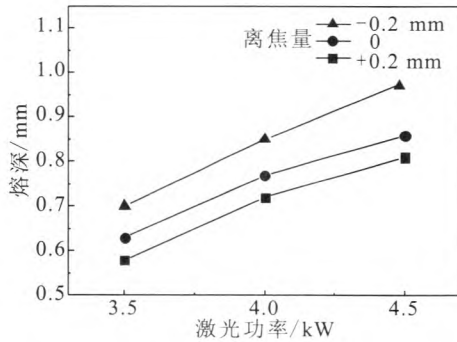


图 2 离焦量与焊缝熔深的关系曲线(5 ms)  
Fig. 2 Defocusing amount versus weld penetration (5 ms)

### 3.2 焊点重叠率与熔深的关系

阀门壳体激光焊机采用脉冲方式进行环缝焊接，在离焦量确定后，焊接速度与脉冲频率、焊点重合率满足公式(2)所示的关系<sup>[9]</sup>。

$$v = d \cdot f \cdot (1 - K) \quad (2)$$

式中： $v$  为焊接速度， $cm/s$ ； $d$  为焊点直径， $cm$ ； $f$  为脉冲频率， $Hz$ ； $K$  为焊点重叠率。

焊点重叠率是影响焊缝熔深均匀性的主要参数，焊点重叠率决定相邻两焊点中心的间距，焊点中间间距过大会导致焊缝在纵向上呈锯齿状，焊缝熔深不均匀；焊点中间间距过小，会降低接头性能和焊接生产效率。

图 3 是焊点重叠率与焊缝熔深之间关系曲线图，由图可知：随着焊点重叠率增大，单位时间输入的热量也随之增大，焊缝熔深更均匀，但进一步提高焊点重叠率并不能明显提高焊缝均匀性。

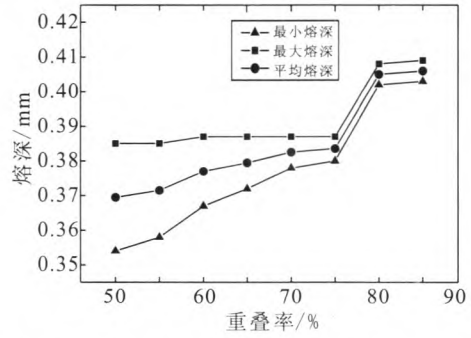


图 3 焊点重叠率与熔深关系曲线(3 kW, 5 ms, 4 Hz)  
Fig. 3 Overlap rate versus weld penetration (3 kW, 5 ms, 4 Hz)

### 3.3 峰值功率与熔深的关系

峰值功率是激光焊接的关键参数，峰值功率与焊缝熔深的关系曲线见图 4。由图可见，焊缝熔深随峰值功率升高而增加，而且上升趋势明显。峰值功率较低时，工件表面温度达到沸点需要历经数毫秒，在表面气化之前，焊缝处的金属温度降到熔点以下，热能才能有效地传递到金属内部，容易得到成形良好的焊缝，但焊缝熔深较浅；峰值功率较高时，激光使表层金属立即被加热至沸点，产生大量金属蒸气，来不及散失，且此时工件表面凹凸不平，影响工件对激光能量的吸收，在焊缝内部可形成孔穴，且容易引起飞溅。

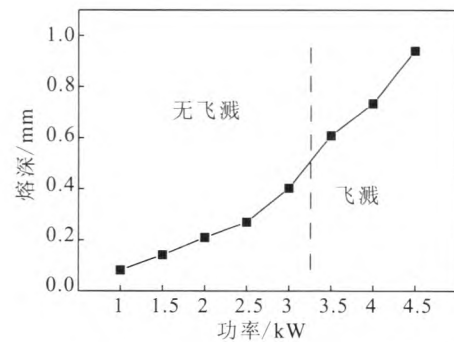


图 4 峰值功率与熔深关系曲线(5 ms, 4 Hz)

Fig. 4 Peak power versus weld penetration (5 ms, 4 Hz)

### 3.4 脉冲宽度与熔深的关系

图 5 是脉冲宽度与焊缝熔深之间的关系曲线图。由图可见，随着脉冲宽度增加，熔深不断增大。由于不锈钢材料液态比固态更易吸收激光能

量, 脉冲时间很短或者功率太小时, 金属在下一个脉冲达到之前已经变成固态, 因此焊缝熔深较小; 而脉冲时间很长或者峰值功率很大时, 表层熔化金属停留时间较长, 吸收激光能量的能力得到提高, 熔深增加趋势也更加明显, 因此峰值功率越大, 熔深随脉冲宽度增加而增大。

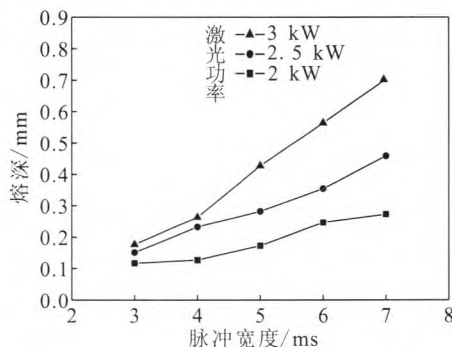


图 5 脉冲宽度与熔深的关系曲线(4 Hz)

Fig. 5 Pulse width versus weld penetration (4 Hz)

## 4 阀门壳体激光焊接工艺及产品试验结果

由以上分析可知, 激光焊接离焦量对焊缝熔深影响较大, 负离焦量可以有效增加焊缝熔深, 因此离焦量定为 $-0.2\text{ mm}$ 。

焊点重叠率与焊缝熔深有效性有关, 重叠率过小, 焊缝熔深波动大, 有效熔深小, 严重时可能导致阀门外漏; 重叠率过大, 焊缝金属蒸汽挥发严重, 可能导致焊缝性能下降<sup>[10]</sup>, 焊缝熔深一致性并不能显著提高, 且焊接效率较低。综合以上各种因素分析, 选择最佳焊点重叠率为 75%, 根据公式(2), 可计算出焊接速度为  $48\text{ mm/min}$ 。

峰值功率对焊缝熔深的影响较为明显, 随着峰值功率的增加焊缝熔深迅速增加, 但峰值功率达到  $3.5\text{ kW}$ , 焊接过程中会出现金属飞溅, 在焊缝内部可形成孔穴, 从而影响焊缝气密性, 所以峰值功率一般选择不大于  $3.5\text{ kW}$ 。

脉冲宽度对焊缝熔深影响相对峰值功率小, 脉冲时间长, 可以保证焊缝表面光滑, 脉冲时间过长, 将会提高单点输出能量值, 降低了脉冲频率, 从而影响了焊接效率, 因此一般选择脉冲宽

度不超过  $6\text{ ms}$ 。由此可得, 阀门壳体激光焊接最佳工艺参数如下。

- 1) 离焦量:  $-0.2\text{ mm}$ ;
- 2) 脉冲频率:  $f=4\text{ Hz}$ ;
- 3) 峰值功率:  $P=3\text{ kW}$ ;
- 4) 脉冲宽度:  $\tau=5\sim 6\text{ ms}$ ;
- 5) 焊接速度:  $v=48\text{ mm/min}$ 。

某阀门组件壳体激光焊接工艺流程见图 6。

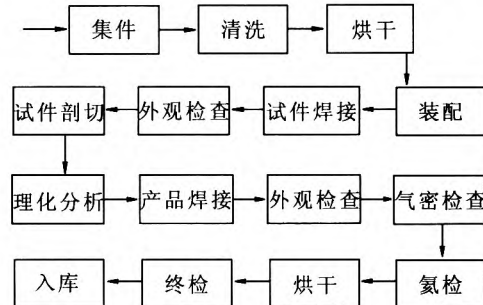


图 6 某型号阀门激光焊工艺流程图

Fig. 6 Process flow of laser welding for a valve

采用最佳工艺规范焊接的阀门, 其试验结果见表 4。

表 4 阀门产品试验结果

Tab. 4 Test results of the valve

检查项目	设计要求	产品实际检查情况	结论
熔深要求	0.4~0.6 mm	0.45~0.58 mm	符合
表面质量	焊缝表面无气孔、裂纹、咬边、凹坑、锯齿波等缺陷	焊缝表面无气孔、裂纹、咬边、凹坑、锯齿波等缺陷	符合
气密检查	通入 2.0 MPa 的氮气, 保压时间不少于 1 min, 无气泡	通入 5.0 MPa 的氮气, 保压时间不少于 5 min, 无气泡	优于
质谱检漏	通入 2.0 MPa 氦气, 漏率不大于 $1\times 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	通入 2.0 MPa 氦气, 漏率不大于 $5\times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	优于

由表 4 可见, 阀门所有检查项目均满足设计要求。

(下转第 90 页)

- 建议[J]. 环境导报, 1997 (5):17-19.
- [2] 刘兵, 孙超, 杨益新, 等. 固体火箭发动机地面试验的噪声测试分析[J]. 电声技术, 2008 (9): 69-71.
- [3] 张福祥. 火箭燃气射流动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004.
- [4] 杨本洛. 湍流及理论流体力学的理性重构[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [5] 王跃科, 叶湘滨. 现代动态测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 邵宗安. 现代声学噪声测量技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [7] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2002.
- [9] 张绍栋, 孙家麒. 声级计的原理和应用[M]. 北京: 北京计量出版社, 1986.
- [10] 周帆, 姜毅, 张学文, 等. 火箭发动机射流复杂噪声测量数据时频分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012 (3): 147-151.
- [11] 李林, 胡春波, 邓哲, 等. 喷管尺寸对火箭发动机喷流噪声影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2013 (6): 345-349.
- [12] 彭小波, 李佳明, 胡春波. 固体火箭发动机喷流噪声测量及声场分析[J]. 实验流体力学, 2013 (1): 52-55.

(编辑: 张永秀)

(上接第 76 页)

## 5 结论

1) 熔深  $0.5 \pm 0.1$  mm 的阀门壳体激光焊接, 优选工艺参数为离焦量  $-0.2$  mm,  $f=4$  Hz,  $P=3$  kW,  $\tau=5 \sim 6$  ms,  $v=48$  mm/min。

2) 采用最佳的激光焊接工艺规范, 焊接的阀门产品已多次经过飞行考核, 该项工艺技术满足类似结构不锈钢组件产品的焊接要求。

### 参考文献:

- [1] 严彪. 不锈钢手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 王丽凤, 孙凤莲, 张宏. 1Cr18Ni9Ti 激光焊接工艺[J]. 机械工程师, 2004 (12): 46-47.
- [3] 刘金合, 张勇. 激光焊接的安全与防护[C]// 第十一次全国焊接会议论文集. 上海: 中国焊接学会, 2005: 580-582.
- [4] 龙辉, 高翔, 李力钧. 激光焊接 3Cr13 不锈钢的试验研究[J]. 湖南大学学报, 2002, 21(3): 31-32.
- [5] 李亚江, 王娟, 刘鹏. 特种焊接技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 陈武柱, 张旭东, 任家烈, 等. 激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究[J]. 中国激光, 1996, 23 (7): 657-661.
- [7] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 熊丽娟, 都东, 何云峰, 等. 小尺寸不锈钢片脉冲激光焊接的参数分析[J]. 应用激光, 2003, 23(1): 22-23.
- [9] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册焊接方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] YURIOKA N. TMCP steels and their welding[J]. Welding in the World, 1997, 43 (2): 2-17.

(编辑: 陈红霞)