

# 光组件激光焊接工艺研究与优化

闫飞<sup>1</sup> 张克非<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010

<sup>2</sup>西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010

**摘要** 利用 ANSYS 软件建立了光组件有限元简化模型,以高斯热源为热源模型,采用非线性瞬态分析完全法对焊缝的温度场分布进行数值模拟,获得在不同激光输出功率和激光光斑半径下焊斑大小和深度的变化规律。结果表明,周期较短的脉冲波形能够有效改善焊接质量;焊斑熔深和宽度随激光输出功率的增大而增大,随激光光斑半径的增大而减小;数值仿真效果与焊缝实际焊接效果基本吻合,验证了光组件有限元模型的适用性,为在不同激光焊接工艺条件下预测和提高光组件焊接质量提供了有效的实验依据。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 光组件; 温度场

**中图分类号** TN456.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.081403

## Study and Optimization of Laser Welding Technology for Optical Components

Yan Fei<sup>1</sup> Zhang Kefei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

<sup>2</sup>School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

**Abstract** With the simplified finite element model of optical components established by the software ANSYS, Gaussian heat as heat source model, and the nonlinear transient analysis, the weld temperature field distribution is numerically simulated. The variation laws of welding spot size and depth with laser beam radii and output powers are obtained accurately. The results show that the short-period pulse waveform can effectively improve the welding quality. The depth and width of welding spot increase with the increase of laser output power and decrease with the increase of laser beam radius. And the numerical simulation result is basically consistent with the actual situation, which verifies the applicability of the finite element model of optical components. The study provided an effective experimental basis for the prediction and improvement of welding quality of optical components in different laser welding processes.

**Key words** laser technique; laser welding; optical component; temperature field

**OCIS codes** 140.3460; 220.4610

## 1 引言

呈爆炸态势增长的带宽需求对光通信产品特别是光模块的性能提出了更高要求<sup>[1]</sup>,作为关键工艺之一的光组件激光焊接工艺,在焊接过程中会发生焊后偏移,进而引起焊接效果不理想、效率低下等问题。

光通信器件封装工艺中的连接固定方法主要有激光焊接、环氧树脂粘接和焊剂连接(锌、锌化铝等)。由于器件小、焊接强度高,光组件的部件插口与底座结合时主要采用激光焊接<sup>[2]</sup>。考虑到生产光组件行业的成

**收稿日期:** 2016-01-24; **收到修改稿日期:** 2016-03-16; **网络出版日期:** 2016-07-28

**基金项目:** 四川省教育厅科技项目(11ZA139)、四川省大学生创新创业训练计划(201510619044)、西南科技大学大学生创新基金(CX15-036)

**作者简介:** 闫飞(1993—),女,本科生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: 2296685456@qq.com

**导师简介:** 张克非(1968—),男,副教授,硕士生导师,主要从事计算机网络、光通信工程方面的研究。

E-mail: 66324479@qq.com

本、精力问题<sup>[3-4]</sup>,一般依据经验来设置激光焊接工艺中的激光参数,焊接效果不理想,且效率低下。

将激光焊接光组件工艺参数由经验决定的方式转变为理论与仿真相结合的方式是一个主流趋势<sup>[5]</sup>,本文针对目前最新的四光束焊接工艺,利用 ANSYS 软件建立光组件的简化模型,探究焊接温度场分布,总结焊后熔池及熔深变化规律,提出针对实际生产的优化参数,对我国光电产业的发展具有一定学术意义和实用价值。

## 2 脉冲激光焊理论分析

### 2.1 传热方式

有限元温度场热分析是根据能量守恒原则,通过求解每一个节点的热平衡方程并计算节点温度,从而得到整个温度场的分布。

热传导遵循以下公式<sup>[6]</sup>

$$q = -\frac{\partial T}{\partial n}k_{nm}, \quad (1)$$

式中  $q$  为热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $k_{nm}$ 为导热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ); $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿法向的温度梯度。

热传导控制方程为<sup>[7]</sup>

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q + H, \quad (2)$$

式中  $\rho$  为焊材的材料密度; $c$  为材料的比热容; $v$  为激光扫描速度; $T$  为温度; $t$  为时间; $\lambda$  为材料的传热系数; $Q$  为体热源热流密度; $H$  为相变潜热;以光组件底座与套环相接的环中心为坐标原点建立  $xyz$  坐标系, $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别代表光组件的横向、纵向及轴向。

光组件的焊接部位主要在基座与管壳之间,焊接部分经过熔化、冷却、再凝固等过程,焊接金属的状态发生变化,因此采用热传导方式<sup>[8]</sup>。

### 2.2 边界条件和初始条件

为使方程有唯一解,设置每个节点热平衡方程的边界条件和初始条件。试验采用物体边界温度条件函数已知的第一类边界条件<sup>[9]</sup>,表示为

$$T_w = f(x, y, t), \quad (3)$$

式中  $T_w$  为常温  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下的壁面温度(常数), $f(x, y, t)$  为已知温度函数。

### 2.3 热源模型

光组件的焊接中,脉冲激光器输出的最小聚焦光斑的位置与焊接表面重合。因此,输出激光功率密度在焦面上的分布可视为高斯分布。考虑热输入为体热源的生热方式,焊接区域高斯热源的功率密度分布为<sup>[10]</sup>

$$q(x, y) = \frac{aP}{\pi r^2} \exp \left[ -\frac{a(x^2 + y^2)}{r^2} \right], \quad (4)$$

式中  $a$  为热流的集中度系数, $P$  为激光被焊材有效吸收功率, $r$  为聚焦光斑半径。当  $a=1$  时,光斑半径范围内的能量占高斯热源总能量的  $63.2\%$ ;当  $a=2$  时,光斑半径范围内的能量占高斯热源总能量的  $86.4\%$ ;当  $a=3$  时,光斑半径范围内的能量占高斯热源总能量的  $95.02\%$ 。为尽可能与实际工艺参数近似, $a$  值设定为  $2$ 。

### 2.4 有限元非线性瞬态热分析理论

选用 304 奥氏体不锈钢作为光组件材料(材料参数如表 1 所示),随着温度的改变,材料参数呈非线性增长趋势,属于非线性材料。激光焊接产品产生的状态改变属于状态非线性变化,产生的热应力偏移属于几何非线性偏移,故采用非线性瞬态分析完全法进行研究<sup>[11]</sup>。瞬态分析一般将载荷-时间曲线中的每一个拐点作为一个载荷步,并在载荷步上定义载荷值、时间值及载荷步方式。

非线性瞬态热平衡方程为

$$CT' + KT = Q, \quad (5)$$

式中  $C$  为比热容矩阵,  $T'$  为温度对时间的导数,  $K$  为导热、对流、形状系数及辐射率组成的热传导矩阵,  $T$  为节点上温度的向量,  $Q$  为节点上包含热生成的热流率向量。

表 1 304 奥氏体不锈钢材料参数

Table 1 Parameters of 304 austenitic stainless steel

$T / ^\circ\text{C}$	$E / \text{Pa}$	$Y / \text{Pa}$	$G / \text{Pa}$	$\rho / (\text{g}/\text{m}^3)$	$\lambda / (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$c / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
20	$1.93 \times 10^{11}$	$1.20 \times 10^9$	$1.93 \times 10^{10}$	7924	16.3	502
500	$1.50 \times 10^{11}$	$9.30 \times 10^8$	$1.50 \times 10^{10}$	7634	22.5	578
1000	$7.00 \times 10^{10}$	$4.40 \times 10^8$	$7.00 \times 10^9$	7434	28.5	664
1500	$1.00 \times 10^{10}$	$7.00 \times 10^7$	$1.00 \times 10^9$	7108	33.5	770
2100	$1.00 \times 10^8$	$7.00 \times 10^6$	$1.00 \times 10^7$	6798	33.5	770

$T$ : temperature;  $E$ : elasticity modulus;  $Y$ : yield strength;  $G$ : shear modulus;  $\rho$ : density;  $\lambda$ : heat transfer coefficient;  $c$ : specific heat capacity

### 3 光组件有限元模型建立

采用 ANSYS 中的热结构耦合法<sup>[12]</sup>对光组件进行建模仿真, 选用 SOLID90(三维 20 节点热实体)作为瞬态热分析单元。根据光组件的结构, 为简化计算, 建立图 1 所示简化实体模型; 对模型进行网格划分, 划分效果如图 2 所示。

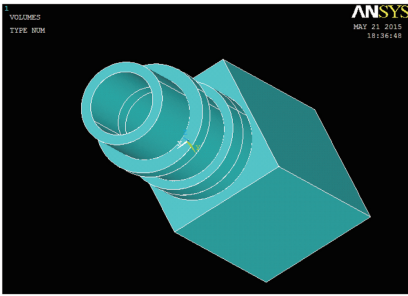


图 1 光组件简化模型

Fig. 1 Simplified model of optical components



图 2 结构网格划分图

Fig. 2 Discrete structure mesh map

## 4 影响焊接结果的因素分析

### 4.1 脉冲宽度和脉冲能量

使用脉冲激光焊接时, 脉冲能量决定了焊接区域的热量大小。不同的脉冲能量产生不同的焊点形状, 从而产生不同的焊接效果。脉冲宽度直接影响熔深的尺寸大小和焊接区域大小。脉冲激光焊接试验功率密度公式为

$$P_s = \frac{4E}{\pi r^2 t_p}, \quad (6)$$

式中  $P_s$  为激光功率密度,  $E$  为单脉冲能量,  $t_p$  为脉冲宽度。

不同的焊材在最佳脉冲宽度下熔深最大。熔深随着脉冲宽度的增加而增大, 但是脉冲宽度达到临界值后, 熔深开始下降。焊材的热物性对熔深有很大影响, 熔点低、导热性好的金属易获得较大的熔深。脉冲宽度和脉冲能量有一定关系, 且根据焊材性质和厚度的不同发生变化。

### 4.2 脉冲波形

某些激光器的脉冲波形可以进行设计, 一些独特的脉冲波形可提高耦合效率或降低焊道的粗糙度<sup>[13]</sup>, 且在一定程度上可降低光组件表面对激光能量的反射, 增强吸收, 也可用于提高焊缝的冷却速度。试验得出, 脉冲周期较短的激光可以保证热输入量较小, 减小工件的焊接变形。设计脉冲波形后, 焊接效果得到明显改善。图 3 所示为设计的波形图, 图 4 所示为设计前后焊接效果对比图。

在加工生产中, 铜、铝、金等材料对 1064 nm 波长激光表面反射率高, 导致加工过程中存在加工强度不

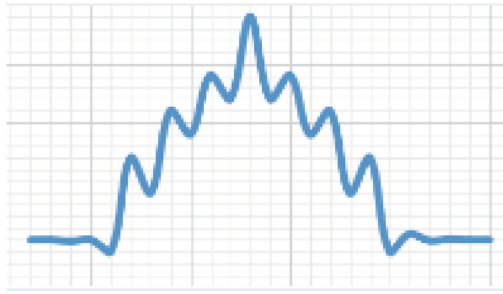


图3 激光焊机波形图

Fig. 3 Waveform of laser welding machine

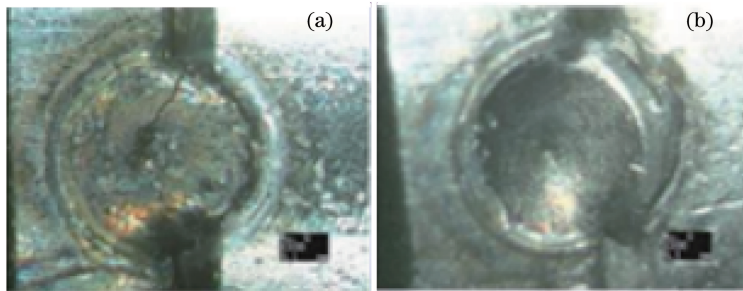


图4 脉冲波形设计前后焊接效果对比图。(a)设计前;(b)设计后

Fig. 4 Comparison of laser welding effects (a) before and (b) after designing pulse waveform

够、焊接表面不美观等问题;对于 304 不锈钢而言,急冷急热导致加工中出现热裂纹、冷裂纹等问题。针对上述问题,通过设置激光脉冲的能量波形来控制焊接过程中激光能量的变化,使加工的产品达到最佳焊接效果。

根据以上理论分析以及工厂光电产品特点,在激光焊机工作参数范围内,具体配置和参数如下:最大激光功率 25 W;反馈方式为能量负反馈;激光波长 1064 nm;单脉冲最大激光能量 25 J;脉冲宽度 0.5~10 ms;单位时间连续脉冲宽度 10 ms;脉冲频率 1~20 Hz;整机功率 1.6 kW。

## 5 激光焊接温度场有限元分析

### 5.1 激光输出功率对焊接质量的影响

不同功率的脉冲直接导致输入到焊件上的激光能量不同,焊接效果也不同。激光输出功率范围为 100~200 W,温度低于熔点时 304 奥氏体不锈钢的吸收率取 0.31,高于熔点时取 0.6,高于沸点时取 0.9,激光光斑直径为 0.25 mm,脉宽为 0.5 ms。以 20 W 的激光功率间隔模拟光组件的温度场分布,不同功率下的熔深、熔宽如表 2 所示。

表2 不同输出功率下的熔深和熔宽

Table 2 Depth and width of molten pool under different output powers

Laser power /W	Pool width /mm	Pool depth /mm	Maximum temperature /°C
100	0.43	0.31	1480
120	0.59	0.47	2132
140	0.72	0.58	2443
160	0.88	0.72	2771
180	1.12	0.87	2924
200	1.53	Breakdown	3021

从表 2 可以看出,随着功率的增大,激光在光组件上的焊斑增大,温度场的分布越来越广。当功率约为 100 W 时,组件刚达到熔点,不宜焊接。当功率为 160 W 时,焊斑的最高温度已经高于 304 奥氏体不锈钢沸点温度,此时金属与激光作用区域附近容易产生等离子场,影响产品的焊接效果。

此外,当熔宽和熔深较大时,器件焊接表面不美观,易产生裂缝。当熔宽和熔深太小时,又会影响器件焊接的效果。根据光组件的激光焊接要求,熔深在 0.3~0.7 mm 范围内、熔宽在 0.4~0.8 mm 范围内为合格,由表 2 可见,激光功率在 120~140 W 范围内时效果较好。

## 5.2 激光光斑尺寸对焊接质量的影响

实际光组件焊接中需要考虑成本问题。一般采用增大激光功率密度、减小输出功率的方式来降低成本,并通过观察熔池状况以及光纤功率等因素来检验焊接是否达标。将激光输出功率减小至 120 W,脉冲宽度减小至 0.2 ms,分析该参数下焊接效果最优时的光斑。由于减小了输出功率和脉冲宽度,若要达到合格的焊接效果,需要减小聚焦的光斑半径。

模拟 0.13 mm 和 0.25 mm 光斑半径下的温度场,发现对应的熔池最高温度分别为 3058 °C 和 987 °C,均不满足焊接要求,因此从 0.13 mm 光斑半径开始模拟,以 0.02 mm 的间隔增加,直至焊接结果不满足要求为止。

不同光斑半径下的熔宽、熔深如表 3 所示。

表 3 不同光斑半径下的熔池参数

Table 3 Pool parameters under different spot radii

Spot radius /mm	Pool width /mm	Pool depth /mm
0.15	0.78	0.64
0.17	0.52	0.48
0.19	0.43	0.38
0.21	0.35	0.17

由表 3 可知,熔池宽度和深度都随激光光斑半径的增大而减小,当激光光斑半径为 0.21 mm 时,熔池宽度为 0.35 mm,熔池深度仅为 0.17 mm,光组件焊接效果不明显,组件之间易发生脱离,考虑到实际存在的误差,当光斑半径在 0.15~0.19 mm 范围内时,才能满足工业上对熔池的要求。

## 6 模拟焊接与实际焊接效果对比

设定激光输出功率为 120 W,脉冲宽度为 0.2 ms,激光光斑半径为 0.15 mm,得到的光组件熔池温度场分布如图 5 所示。从图 5 可看出,熔池温度最高为 2685 °C,大部分区域的温度集中在 1500 °C 左右。实际的光组件焊斑分布均匀,利用光功率计可间接测出损失光功率百分比为 25.9%,光信号损失率较低,焊接效果良好。图 6 所示为激光焊点仿真与试验对比图,可以看出模拟结果与实验结果比较吻合,验证了优化参数方案的可行性,也说明数值模拟具有一定的可靠性。

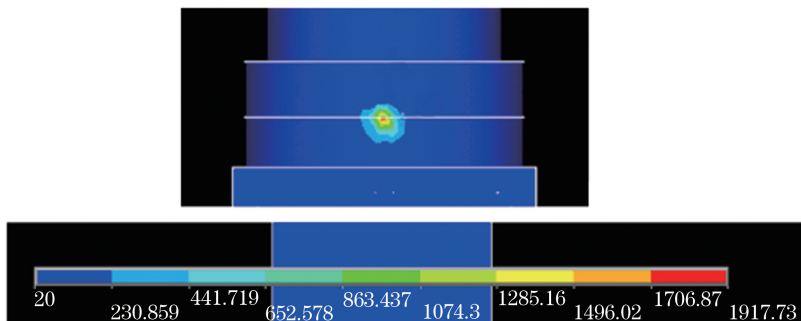


图 5 光组件熔池温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution of optical component pool

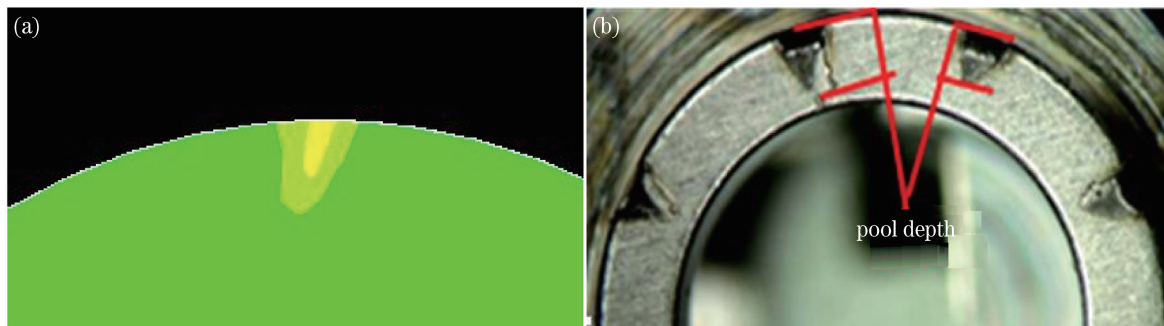


图 6 焊缝(a)仿真图与(b)实际焊接效果图对比

Fig. 6 Comparison of (a) simulated and (b) actual welding effects

## 7 结 论

根据实际光组件,利用 ANSYS 软件建立简化的光组件有限元模型,理论分析脉冲宽度与脉冲能量等因素对焊接质量的影响,并通过设计脉冲波形改善焊接质量,进一步模拟激光功率和激光光斑大小等因素对焊接质量的影响。结果表明,焊斑熔深和宽度随着激光输出功率的增大而增大,当激光光斑半径为 0.25 mm、脉宽为 0.5 ms、激光输出功率为 120~140 W 时,焊接效果较好。考虑到激光焊接的成本问题,当激光输出功率为 120 W、脉冲宽度为 0.2 ms 时,焊斑熔深和宽度都随激光光斑半径的增大而减小,激光光斑半径为 0.15~0.19 mm 时才能满足工业上对熔池的要求。在实际焊接中,调整输出激光的各个参数,焊缝实际焊接效果与数值仿真效果基本吻合,证实了光组件有限元模型的合理性。

## 参 考 文 献

- Zhang Li, Xia Zhenzhong, Qin Yan, *et al.* Temperature compensation technology for 10 Gbit/s SFP+ short-range optical modules[J]. Study on Optical Communications, 2015(1): 31-34.  
张莉,夏振中,秦艳,等. 10 Gbit/s SFP+短距离光模块的温度补偿技术[J]. 光通信研究, 2015(1): 31-34.
- Yan H G, Zhao Q, Chen P, *et al.* Microstructures and mechanical properties of laser welded wrought fine-grained ZK60 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 389-396.
- Zheng Weifeng. A design of bidirectional optical components stick cost reduction[J]. Electronics World, 2013(8): 132.  
郑伟峰. 一种低成本双向光组件贴的设计[J]. 电子世界, 2013(8): 132.
- Zhang Deling, Mi Quanlin, Wang Hongya. Plastic packaging coaxial optical component: CN203606535[P]. 2014-05-14.  
张德玲,米全林,王红亚. 塑料封装同轴光组件: CN203595837U[P]. 2014-05-14.
- Zhang Kun. Invar36 alloy laser welding Ansys simulation[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(11): 31.  
张坤. Invar36 合金激光焊接 Ansys 仿真[J]. 山东工业技术, 2014(11): 31.
- Yuan Xunfeng, Ke Changzhen, Chen Wuyan, *et al.* Temperature field simulation in welding process of stainless steel plate[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2015(1): 9-11.  
袁训锋,柯昌珍,陈武彦,等. 不锈钢平板焊接过程的温度场模拟[J]. 中国铸造装备与技术, 2015(1): 9-11.
- Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng. Thermal analysis of rectangular Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by laser diode side pumped[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 176-180.  
史彭,李隆,甘安生. 激光二极管侧抽运长方形 Nd:YVO<sub>4</sub>激光晶体热分析[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 176-180.
- Sun Zhilong, Cai Zhixiang, Yang Wei. Laser cutting and scribing of 96% alumina ceramic substrate and parameter optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101404.  
孙智龙,蔡志祥,杨伟. 96%氧化铝陶瓷基板的激光切割划片及工艺优化[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101404.
- Wang Xiaobo, Xu Xiaojun, Lu Qisheng. Dynamic temperature profiles in heat capacity laser rods[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4): 589-592.  
汪晓波,许晓军,陆启生. 固体棒状热容激光器的热分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 589-592.

- 10 Gao Duorui, Fu Qiang, Zhao Zhao. Optimal selection of receiving optical power in laser communication system in atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050601.  
高铎瑞, 付强, 赵昭. 湍流大气中激光通信系统接收光功率的优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050601.
- 11 Kang Yahua, Bai Baodong, Guo Yuancheng. Application of field-circuit coupling method of 3D transient finite element analysis for large power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 219-224.  
康雅华, 白保东, 郭源成. 场路耦合方法在大型电力变压器三维瞬态有限元分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 219-224.
- 12 Zhao Jie, Li Feng, Liu Moujun. Thermal & structure coupling field analysis of fixed tube-sheet heat exchanger based on ANSYS[J]. New Technology & New Process, 2012(7): 37-40.  
赵杰, 李峰, 刘谋军. 基于 ANSYS 的固定管板式换热器热结构耦合场分析[J]. 新技术新工艺, 2012(7): 37-40.
- 13 Liang Yanmei. Research on the influence of parameters on welding quality in laser welding[J]. Value Engineering, 2015(30): 137-139.  
梁艳梅. 激光焊接中各参数对焊接质量影响的研究[J]. 价值工程, 2015(30): 137-139.