

光组件激光焊接应力场工艺优化

叶涛¹, 邵龙¹, 张克非²

¹西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010;

²西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010

摘要 提出了一套系统的激光焊接工艺设计方法,运用 ANSYS 软件对单纤双向光组件(BOSA)建立了一种简化有限元仿真模型,采用间接焊接应力场的数值模拟方法,研究了单光束激光焊接下的最小偏移参数。结合优化后的参数分析了不同激光焊接机参数下焊后光功率的损失情况。结果表明,当单光束激光功率为 100 W、脉冲宽度为 0.2 ms、光斑半径约为 0.18 mm 时,光组件具有最小偏移,优化后光功率损失比降低了 7.1%。

关键词 激光技术; 激光焊接; 应力场; 光组件

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081407

Process Optimization of Laser Welding Stress Field for Optical Components

Ye Tao¹, Shao Long¹, Zhang Kefei²

¹School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

²School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract A systematic design method of the laser welding process is proposed. A simplified finite element simulation model for the single-fiber bidirectional optical subassembly (BOSA) is established by using the ANSYS software. The numerical simulation method of the indirect welding stress field is adopted to study the parameters which render the minimum offset under the single beam laser welding. By combining the optimized parameters, the optical power losses after welding are analyzed under different laser welding machine parameters. The results show that when the single beam laser power is 100 W, the pulse width is 0.2 ms, and the spot radius is about 0.18 mm, the optical assembly has the minimum offset and the optical power loss ratio after optimization is decreased by 7.1%.

Key words laser technique; laser welding; stress field; optical component

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.6810; 220.4610

1 引言

激光焊接技术具有焦点小、功率密度高、热影响区小等特点^[1],被广泛应用于光组件的封装工艺中。目前,工业上一般依靠大量试验所积累的数据和经验公式来制定激光焊接的工艺参数,一定程度上增加了企业的运作成本。

近年来,如何最大限度地控制焊接过程、提高焊接质量,成为了工程界关注的热点之一,而数值模拟是解决焊接质量不佳问题的首选技术^[2]。伍强等^[3]运用 ANSYS 软件对激光焊接的残余应力进行了数值模拟,并采用小孔法研究了高强度激光焊接接头的残余应力,分析了其变化规律。刘伟等^[4]通过建立数值模拟模

收稿日期: 2017-03-27; **收到修改稿日期:** 2017-04-10

基金项目: 四川省科技服务业示范项目(2016GFW0144)、西南科技大学创新基金(CX16-061)

作者简介: 叶涛(1993—),男,本科生,主要从事光通信工程方面的研究。E-mail: yt124@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: zhangkefeijike@163.com(通信联系人)

型,探究了焊接件的剪切和拉伸失效行为,预测了焊接件的拉伸变形情况。胡林西等^[5]运用 ANSYS 软件建立了激光对接焊非线性三维传导的有限元模型,模拟计算了 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板的温度场分布,并对熔池和实际焊缝的形状、尺寸进行了模拟。

激光焊接器由于质量、使用年限的问题,输出的光并不是很稳定,易造成焊后偏移,导致焊件质量不佳。针对上述问题,本文利用 ANSYS 软件对目前工业中常用的单纤双向光组件(BOSA)建立了一种有限元模型^[6],并对激光焊接应力场进行了数值模拟计算^[7-8],仿真分析了单光束、不同光斑半径下应力场的分布情况,探讨了单光束激光下最小偏移的工艺参数。分别基于传统参数和优化参数进行了试验研究,所得结论对提高焊接质量有一定的参考意义。

2 试验理论、材料设备及模型

激光焊接应力场适合采用间接焊接应力场的数值模拟方法^[9],即先计算温度场,在温度场计算吻合度较好的情况下,再进行应力场的计算分析,整个过程只考虑温度场对应力场的单向耦合作用^[10]。而光组件焊接的仿真是一个复杂的过程,包括热分析和结构分析两部分,需要采用热结构耦合法对整个过程进行详细分析。

2.1 有限元应力场理论

在光组件焊接的过程中,高度集中的激光能量在极短的时间内作用在焊材上,焊接区域温度过高,导致焊材产生形变,从而引起一定的焊后应力和偏移。在焊接时,焊件上的温度与焊后应力和偏移有很大关系,因此,可利用温度场计算相对应的焊接应力场。根据弹塑性应力应变的本构关系、米塞斯屈服准则和塑性区符合的流变法则^[11],得到热弹塑性应力偏增量和应变偏增量的表达式分别为

$$dS_{ij} = 2G \left[d\epsilon_{ij} - \frac{3S_{ij}S_{kl}d\epsilon_{kl}}{2\sigma_e^2 [1 + H/(3G)]} + \frac{(\partial\sigma_y/\partial T)dT S_{ij}}{\sigma_e [1 + H/(3G)]} - \frac{d(1/G)HS_{ij}}{3 [1 + H/(3G)]} \right], \quad (1)$$

$$d\sigma_{kk} = 3K \left[\epsilon_{kk} - \sigma_{kk} d\left(\frac{1}{3K}\right) - 3d\epsilon^T \right], \quad (2)$$

结合(1)~(2)式可得到应力的变化

$$d\sigma_{ij} = 2G \left(d\epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \epsilon_{kk} \right) - \left\{ \frac{3GS_{kl}d\epsilon_{kl}}{\sigma_e^2 [1 + H/(3G)]} \right\} S_{ij} + \left[\frac{1}{1 + H/(3G)} - 1 \right] G d\left(\frac{1}{G}\right) S_{ij} + \left\{ \frac{(\partial\sigma_t/\partial T)dT}{\sigma_e [1 + H/(3G)]} \right\} S_{ij} - \delta_{ij} K \left[d\left(\frac{1}{3K}\right) \sigma_{kk} + 3d\epsilon^T \right], \quad (3)$$

式中角标 i, j 表示一个空间坐标系的坐标轴方向,角标 k, l 表示 ij 空间坐标系的坐标轴绕圆点 O 旋转一个角度得到的新空间坐标系的坐标轴方向, S 为应力偏量, e 为应变偏量, σ 为应力张量, σ_e 为有效应力, ϵ 为应变张量, δ_{ij} 为沿 ij 方向热梯度最大处的单元长度, σ_t 为总应力, ν 为泊松比, σ_y 为屈服应力, H 为塑性模量, T 为温度, $d\epsilon^T$ 为轴向热膨胀增量, K 为体积增量, G 为切变模量^[12]。然后计算形成单元等效节点载荷,求得节点位移后便可求出单元的节点应力。

2.2 热结构耦合分析法

有限元分析中温度场与应力场施加的载荷不同,分析的方式也不同,两者只有耦合在一起才能相互作用,分析方法称为热结构耦合分析。这种分析类型可以有效解决温度场对焊件结构中应力、变形和位移等物理量的影响问题。选用间接耦合分析法,先通过热分析得到焊件的温度场分布^[13],再将温度场结果作为载荷施加在应力分析中进行求解。

热结构耦合分析法的方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{M} 为结构质量矩阵; \mathbf{u} 为节点位移向量; $\dot{\mathbf{u}}$ 为节点位移向量对时间的一阶导数; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为节点位移向量对时间的二阶导数; \mathbf{C} 为结构阻尼矩阵; \mathbf{C}_t 为比热容矩阵; \mathbf{K} 为结构刚度矩阵; \mathbf{T} 为节点温度向量; $\dot{\mathbf{T}}$ 为节点温度向量对时间的一阶导数; $\ddot{\mathbf{T}}$ 为节点温度向量对时间的二阶导数; \mathbf{K}_t 为热传导矩阵,包含导热系数、对流系数、辐射率和形状系数; \mathbf{Q} 为节点热负载; \mathbf{F} 为力向量,包括施加在节点上的力和由于热应力而产生的力^[14]。

2.3 激光焊接机的工艺参数

在光组件的焊接过程中,激光焊接机的作用至关重要,决定了焊接熔池和器件焊后的质量^[15],工业中两种常用激光焊接机的参数见表1。为了更有针对性地验证本文模型,选取武汉楚天公司生产的JHM-4GX-200D型光纤激光器,其为钕铝石榴石(YAG)激光器,参数见表2。

表1 工业中常用激光焊接机的参数

Table 1 Parameters of laser welding machines commonly used in industry

Parameter	Value	
	YAG laser	CO ₂ laser
Beam wavelength / μm	1.06	10.6
Output power /kW	0.1-5	0.5-45
Beam propagation coefficient	<0.15	0.1-0.8
Electro-optical conversion efficiency /%	3-10	15-30

表2 设计采用的激光焊接机参数

Table 2 Parameters of laser welding machine used in design

Parameter	Beam wavelength / μm	Output power /W	Maximum energy of single pulse /J	Pulse frequency /Hz	Pulse width /ms	Operating current /A	Spot diameter /mm
Value	1.06	100-200	70	0-100	0.2-20	50-100	0.4-0.6

工业生产上进行BOSA封装时,首先固定半导体激光器(LD)和底座的位置,当耦合达到光功率最大时,进行激光焊接。焊接后LD与光组件底座将会产生偏移,导致光功率发生改变,因此,可根据焊接后光功率的大小间接定量地分析焊后偏移的影响,进一步判断产品是否符合工业要求。

2.4 结构材料选取

奥氏体不锈钢适用于点焊和密封激光焊接^[16],故工业上常选取304奥氏体不锈钢作为光组件的材料,其各性能具体参数见表3。

表3 304奥氏体不锈钢材料参数^[17]

Table 3 Parameters of 304 austenitic stainless steel materials^[17]

Parameter	Value				
	20 °C	500 °C	1000 °C	1500 °C	2100 °C
Modulus of elasticity /(10^8 Pa)	1930	1500	700	100	1
Yield strength /(10^6 Pa)	1200	930	440	70	7
Shear modulus /(10^7 Pa)	1930	1500	700	100	1
Material density /($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	7924	7634	7434	7108	6798
Heat transfer coefficient /($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	16.3	22.5	28.5	33.5	33.5
Specific heat /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	502	578	664	770	770
Poisson ratio	0.29				
Linear expansivity	1.78×10^{-5}				
Melting point /°C	1330				
Boiling point /°C	2000				

2.5 数值模拟模型

采用ANSYS软件对光组件建立仿真模型,根据光组件的实际结构建立简化模型,如图1(a)所示,结构网格划分如图1(b)所示。再将温度场模型的数据^[13]恢复到ANSYS数据库中,并从数据库中清除实体模型上的载荷和载荷步选项,选用SOLID45单元(8节点三维结构分析单元)将热模型单元转换为结构模型单元。运用静力分析对基座上的所有节点施加各个方向的位移约束,对焊接面上的点施加X轴和Z轴方向上的约束。

3 应力场变化情况分析讨论

激光焊接时产生的焊后位移可分为X、Y、Z向偏移。Y向偏移与其他两个方向偏移的趋势大致相同,

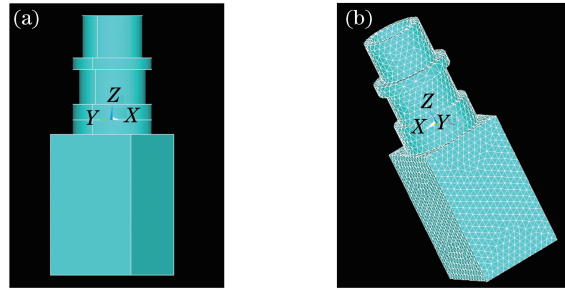


图 1 仿真模型。(a)光组件简化模型;(b)结构网格划分

Fig. 1 Simulation models. (a) Simplified model of optical components; (b) mesh partition of structure

即 Y 向偏移增大,另外两个方向的偏移也增大,但 Y 向作为激光入射的方向,其造成的偏移最大。因此,为简化分析对象,只对 Y 向的焊接偏移作具体分析。图 2 所示为不同参数下的 Y 向应力偏移,由此得出不同光斑半径下 Y 向的焊接偏移量。不同参数下 Y 向的最大偏移见表 4。

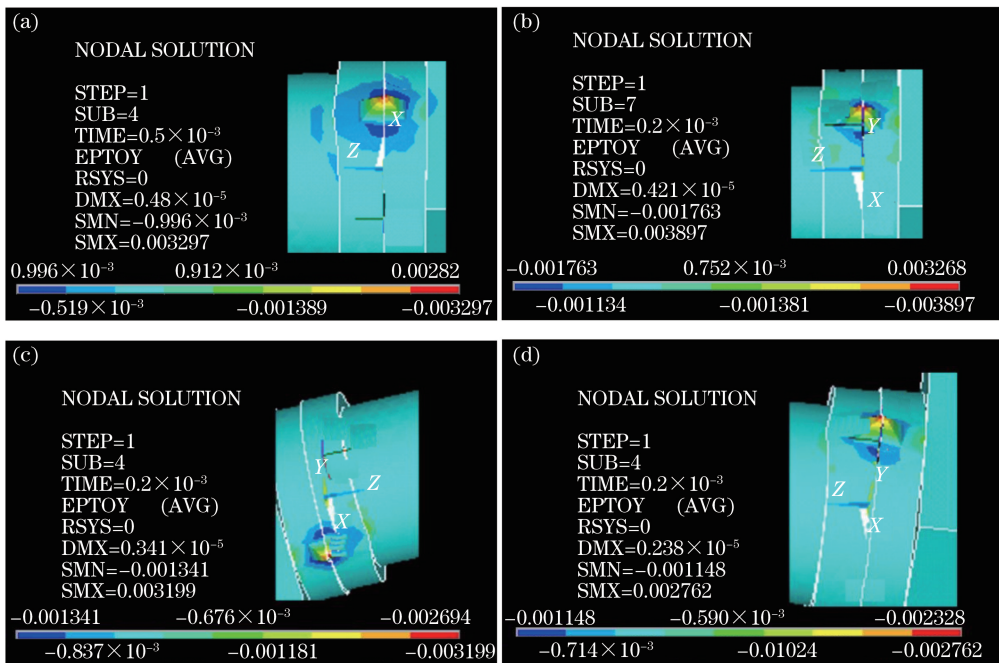


图 2 不同光斑半径下的 Y 向应力偏移。(a) 0.13 mm;(b) 0.15 mm;(c) 0.17 mm;(d) 0.19 mm

Fig. 2 Y-direction stress offsets under different spot radii. (a) 0.13 mm; (b) 0.15 mm; (c) 0.17 mm; (d) 0.19 mm

表 4 不同光斑半径下 Y 向最大偏移

Table 4 Maximum offsets in Y direction under different spot radii

Spot radius /mm	0.13	0.15	0.17	0.19
Maximum offset in Y direction / μm	4.8	4.21	3.41	2.38

表 4 中的仿真数据表明,随着光斑半径的增大,焊后偏移减小,但考虑到光斑半径为 0.19 mm 时,其熔池状况已达到工业要求的临界值^[13]。综上所述,功率取 100 W、脉冲宽度取 0.2 ms、光斑半径约 0.18 mm 时,焊接效果最佳。

4 试验对比

将数值模拟所得到的最优参数与传统参数分别作为激光器的参数值,对 304 奥氏体不锈钢材料制成的 BOSA 进行焊接试验,并对比分析不同参数下的光功率损失比,以验证模型的适用性。首先,根据 JHM-4GX-200D 型光纤激光器的传统参数对 BOSA 进行了 8 组焊接试验,分别测取焊接前后光组件的光功率大

小,获得的光功率变化数据见表 5。

由表 5 可知,光组件在焊接过程中光功率损失严重。当焊接后功率低于光组件焊接光功率的工艺要求时,必须通过激光锤补焊、镊子导正等方式校正光功率。若无法校正时,将会形成废品,造成材料的浪费,增加企业生产成本。

表 5 传统参数下焊接前后功率对比

Table 5 Comparison of powers before and after welding under traditional parameters

BOSA optical power before welding / μW	BOSA optical power after welding / μW	Loss of optical power / μW	Loss ratio of optical power /%
900	564	336	37.3
720	544	176	24.4
696	550	146	20.9
728	540	188	25.9
736	514	222	30.2
876	594	282	32.2
680	576	104	15.3
708	520	188	25.9
Average loss ratio of optical power /%		26.5	

其次,将数值模拟所得的优化数据作为激光焊接机的参数对 BOSA 进行焊接试验,得到的实验数据见表 6。通过对比分析表 5 和表 6 发现,优化参数下焊后光功率损失比远低于传统参数下的,平均光功率损失比从 26.5% 降至 19.4%。这说明工艺优化在 BOSA 制作过程中对提升器件焊接质量具有一定的实用价值。

表 6 优化参数下焊接前后功率对比

Table 6 Comparison of powers before and after welding under optimized parameters

BOSA optical power before welding / μW	BOSA optical power after welding / μW	Loss of optical power / μW	Loss ratio of optical power /%
900	696	204	22.7
720	588	132	18.3
696	556	140	20.1
728	603	125	17.2
736	598	138	18.8
876	674	202	23.1
680	556	124	18.2
708	588	120	16.9
Average loss ratio of optical power /%		19.4	

5 结 论

针对实际工业问题,利用 ANSYS 软件对 304 奥氏体不锈钢 BOSA 进行了焊接应力场的数值模拟,分析了焊后应力场的变化情况。将传统参数与优化参数下的光功率损失比进行了试验对比,结果表明,当激光焊接机功率为 100 W、脉冲宽度为 0.2 ms、光斑半径约为 0.18 mm 时,焊接效果最佳;优化参数下焊后平均光功率损失比从 26.5% 降至 19.4%,有效降低了 BOSA 的成本及废品率。

参 考 文 献

- [1] Yao Yansheng, Wang Yuanyuan, Li Xiuyu. Review on laser hybrid welding technology[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(9): 16-20, 24.
姚燕生, 王园园, 李修宇. 激光复合焊接技术综述[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 16-20, 24.
- [2] Wang Zhonghui, Li Dongxue. Development status of welding numerical simulation technology[J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(6): 28-31.
王中辉, 李冬雪. 焊接数值模拟技术的发展现状[J]. 焊管, 2010, 33(6): 28-31.
- [3] Wu Qiang, Xu Lanying, Yang Yongqiang, et al. Study on laser welding residual stress of high strength steel[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0603007.

- 伍 强, 徐兰英, 杨永强, 等. 高强钢激光焊接残余应力的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0603007.
- [4] Liu Wei, Liu Huixia, Meng Dongdong, *et al.* Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts during tensile process[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0602003.
刘 伟, 刘会霞, 孟冬冬, 等. 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602003.
- [5] Hu Linxi, Zhou Dianwu, Jia Xiao, *et al.* Numerical simulation and laser butt welding of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy sheets[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0702002.
胡林西, 周惦武, 贾 骁, 等. Zr-Sn-Nb-Fe 钎合金薄板激光对接焊及数值模拟[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702002.
- [6] Qin Lu, Luo Yu. Cost estimation of welding structure based on finite element model[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(15): 208-211.
秦 路, 罗 宇. 基于有限元模型的焊接结构成本计算方法[J]. 热加工工艺, 2016, 45(15): 208-211.
- [7] Shanmugam N S, Buvanashakaran G, Sankatanarayanamy K, *et al.* Some studies on temperature profiles in AISI 304 stainless steel sheet during laser beam welding using FE simulation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(1): 78-94.
- [8] Chu Qingchen, He Xiuli, Yu Gang, *et al.* Numerical simulation and analysis on temperature field for laser welded stainless steel lap joint[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3180-3186.
褚庆臣, 何秀丽, 虞 钢, 等. 不锈钢激光搭接焊接头温度场数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3180-3186.
- [9] Zhang Liyan, Dong Wanpeng. Research progress of stress field numerical of laser welding [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(13): 8-10.
张立艳, 董万鹏. 激光焊接应力场数值模拟的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(13): 8-10.
- [10] Jiang Xiuye. Research on thermal-stress numerical simulation of laser welding for SU S430 ferritic stainless steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
蒋秀晔. SUS430 铁素体不锈钢激光焊接热应力场数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] Sun Dongji, Lin Jianping, Liu Ruitong, *et al.* Research on constitutive relations of planar stress state of pieces-welded plate based on elastoplastic formation theory[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(2):12-16.
孙东继, 林建平, 刘瑞同, 等. 基于弹塑性形变理论的拼焊板平面应力状态本构关系研究[J]. 机械设计, 2009, 26(2): 12-16.
- [12] Zhang Aicheng. Research on laser diode packaging using laser welding [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2007.
张爱成. 激光二极管焊封装研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2007.
- [13] Yan Fei, Zhang Kefei. Study and optimization of laser welding technology for optical components[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081403.
闫 飞, 张克非. 光组件激光焊接工艺研究与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081403.
- [14] Wu Yulie, Chun Jing, Li Shengyi. Finite element analysis and experimental observation on post-weld-shift in laser welding technique for opto-electronic devices[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(9): 1046-1051.
吴宇列, 淳 静, 李圣怡. 光电器件激光焊接封装焊后位移的有限元分析和实验观测[J]. 光电子·激光, 2007, 18(9): 1046-1051.
- [15] Liu Xiyang, Sun Fenglian, Wang Xuyou, *et al.* Arc characteristics and welding pool morphology of Nd:YAG laser+CMT arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 81-84, 117.
刘西洋, 孙凤莲, 王旭友, 等. Nd:YAG 激光+CMT 复合热电源电弧形态和熔池形貌[J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 81-84, 117.
- [16] Chen Junke, Shi Yan, Liu Jia, *et al.* A study of austenitic stainless steel laser welding process[J]. Applied Laser, 2015, 35(3): 335-338.
陈俊科, 石 岩, 刘 佳, 等. 奥氏体不锈钢激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 335-338.
- [17] Zeng Xiangcheng, Huang Jianwen, Zhang Qingmao. Thermal field simulation in laser welding process[J]. Applied Laser, 2008, 28(3): 190-195.
曾祥呈, 黄健文, 张庆茂. 激光焊接过程温度场的模拟[J]. 应用激光, 2008, 28(3): 190-195.