

激光精密切割圆弧和直线粗糙度差异分析与消除

王大伟¹ 高席丰²

¹太原理工大学机械工程学院, 山西 太原 030024

²河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 采用Nd:YAG激光对0.5 mm厚的1060纯铝板进行圆弧和直线精密切割时,为消除圆弧和直线切口壁面的粗糙度差异问题,通过显微镜观察圆弧切缝壁面微观形貌,在此基础上建立圆弧简化的数学模型,导出了内、外圆弧壁面粗糙度公式。在相同切割参数下,重点分析切割半径对内、外圆弧和直线壁面粗糙度差异影响规律,结果表明,随切割半径增大,外圆弧壁面粗糙度增大,内圆弧壁面粗糙度减小;当切割半径 $R \leq 7$ mm时,内、外圆弧粗糙度差异明显;切割半径 $R > 7$ mm时,两者粗糙度差异忽略不计。最后,先后利用响应曲面法(RSM)中最小值优化和目标值优化,获得圆弧和直线对应的工艺参数,实际切割测量后粗糙度近似一致,直线和圆弧粗糙度差异消除,此方法证明可行有效。

关键词 激光技术; 激光切割; 响应曲面法; 圆弧粗糙度

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303005

Study on Kerf Roughness Differences between Line and Arc Analysis and Elimination of Laser Precision Cutting

Wang Dawei¹ Gao Xifeng²

¹College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

²School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract In this paper, arcs on the 0.5 mm pure thick aluminum (1060) sheet is cut precisely by Nd:YAG pulse laser, to eliminate roughness differences of laser cutting stencil, the microstructure of kerf results is obtained through microscope, which provides the basis to set up the simplified mathematical model. Formulas to estimate the kerf surface roughnesses of these arcs are presented, and the effect laws of radius size on the kerf surface roughnesses differences with the same cutting parameters are analyzed particularly. The results show that, with decreasing the radii of outside arc and inside arc, the kerf roughnesses are improved; when the radius $R \leq 7$ mm, the roughnesses of these two arcs are different significantly; when the radius $R > 7$ mm, the differences of these roughnesses almost disappear. At last, optimizing the kerf roughnesses of all shapes by response surface method (RSM) minimize optimization and target optimization respectively to obtain the cutting parameters, the roughnesses of all shapes cut by above cutting parameters are almost same, therefore this method eliminates the linear and circular roughness differences, which is feasible and effective.

Key words laser technique; laser cutting; response surface method; circular arc roughness

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3580; 200.1130

1 引 言

激光切割以其成本低、效率高、精度高等优点,广泛应用于仪表、电子等精密行业完成模板的加工,其

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-09-28

基金项目: 太原理工大学研究生科技创新基金

作者简介: 王大伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光精密加工方面的研究。E-mail: tylgwangdawei@163.com

导师简介: 梁义维(1970—),男,副教授,硕士生导师,主要从事机械设备智能控制与故障诊断和特种加工等方面的研究。

E-mail: liangyiwei@tyut.edu.cn

中切割切缝的粗糙度是切割质量重要评价指标之一。由于激光切割工艺参数的选取直接影响缝壁表面粗糙度^[1-2],因此很多学者进行了大量实验研究,揭示了切割速度、频率、功率密度、脉冲宽度、辅助气体对粗糙度影响的一般规律^[3-8],进而提出了优化和控制壁缝粗糙度的方法,其中图像处理法、响应曲面法、熵值检测的灰关联和田实验法已经被证明对获得优质切缝有效可行^[9-13]。但是,国内外学者仅以典型的直线切缝为研究对象^[3-8],忽视了圆弧切缝粗糙度规律的研究,且均以获得最小粗糙度为目的。切割实验证明,相同切割参数下圆弧与直线粗糙度之间存在差异。

本文主要分析和讨论了切割半径对粗糙度差异影响的规律,通过切割不同图形对应不同切割参数的方法,以实现不同图形切缝粗糙度一致,基于对圆弧切割实验微观形貌分析与简化,建立了切割内、外圆弧的一般数学模型,通过计算和实验分析方法获得了粗糙度差异产生的一般规律,利用响应曲面法(RSM)对内、外圆弧和直线切缝粗糙度进行最小值优化,获得相应粗糙度的理论最小值,再设其中最大值为目标值获得相应内、外圆弧和直线的切割速度、切割频率、切割脉宽参数,相应参数切割实验结果近似一致,内、外圆弧和直线切缝粗糙度差异消除。

2 实验设备、材料与粗糙度测量方法

实验采用Nd:YAG固体脉冲激光器切割机床,波长 1060 nm,最大输出功率 500 W,频率 1~100 Hz(连续可调),脉冲宽度 0.1~10 ms(连续可调),滚珠丝杠传动的步进工作台,误差精度为±0.1 mm,采用 0.7 MPa 空气进行同轴辅助吹气,喷嘴直径为Φ1 mm。

切割试样选用 0.5 mm 厚的 1060 纯铝板,规格为 200 mm×100 mm,切割表面用酒精擦拭以去除杂物。

实验试件加工后,切缝表面用酒精棉球擦拭以去除加工过程中飞溅物,表面粗糙度采用 9J 光切显微镜进行测量,放大倍数为 120×,物镜选取 30×10.40,物镜组件距离为 2.5 mm。采用微观不平度十点高度表征粗糙度,测量切缝表面轮廓五个最高点和五个最低点高度,测量结果取算术平均数,记为 R_z :

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_i + \sum_{j=1}^5 y_j \right), \quad (1)$$

式中 y_i 和 y_j 分别表示波峰、波谷的值。

3 切缝粗糙度分析

3.1 影响圆弧粗糙度分析

在切割速度 3 mm/s、脉冲宽度 2 ms、激光频率 10 Hz、功率 300 W 下,对试件进行切割半径 $R=5$ mm 圆弧的切割,切割后用酒精棉球擦拭以去除加工过程中的飞溅物,通过光学显微镜放大 100 倍(100×)进行观察,如图 1 所示。通过分析简化建立激光器切割圆弧数学模型,其原理示意图如图 2 所示。由基本几何关系导出外圆弧、内圆弧相邻两脉冲与切割边缘的最大高度 h_1 、 h_2 的公式,此高度直接影响内、外圆弧粗糙度^[3,14]。

由简单的几何关系可以得出

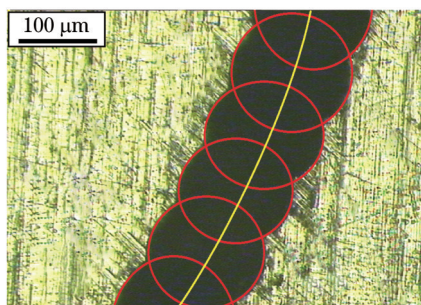


图 1 激光切割圆弧切缝微观图

Fig.1 Micrograph of cut kerf after processing in pulse model

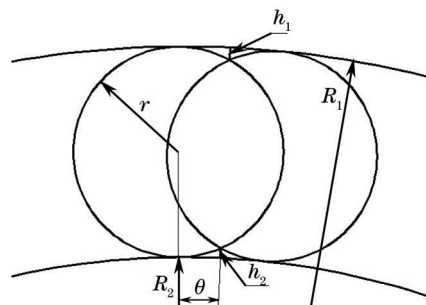


图 2 激光切割圆弧原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of circular kerf processing

$$\left(\frac{h_1}{r} \right)^2 - 2 \frac{h_1}{r} + 2 \left(\frac{R_1}{r} - \frac{h_1}{r} \right) \left(\frac{R_1}{r} - 1 \right) (1 - \cos \theta) = 0, \quad (2)$$

因为 $\eta_1 = \frac{R_1}{r} \gg \frac{h_1}{r}$, 通过简单数学技巧可以导出内圆弧粗糙度公式:

$$h_1 \approx r \left[1 - \sqrt{1 - 2\eta_1(\eta_1 - 1)(1 - \cos \theta)} \right], \quad (3)$$

$$\theta = \frac{v}{2f(R-r)}. \quad (4)$$

同理, 由几何关系可得:

$$\left(\frac{h_2}{r}\right)^2 - 2\frac{h_2}{r} + 2\left(\frac{R_2}{r} + \frac{h_2}{r}\right)\left(\frac{R_2}{r} + 1\right)(1 - \cos \theta) = 0. \quad (5)$$

因为 $\eta_2 = \frac{R_2}{r} \gg \frac{h_2}{r}$, 通过简单数学技巧可以导出外圆弧粗糙度公式:

$$h_2 \approx r \left[1 - \sqrt{1 - 2\eta_2(\eta_2 + 1)(1 - \cos \theta)} \right], \quad (6)$$

$$\theta = \frac{v}{2f(R+r)}. \quad (7)$$

切割直线的公式为^[3]

$$h = r \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{2fr}\right)^2} \right], \quad (8)$$

式中 r 为切割最小单位圆孔的半径, R 为切割半径, v 为切割速度, f 为激光频率。

由式中参数可知, 圆弧、直线切割粗糙度相比, 除了共同受到 r, f, v 的影响外, 还受到切割半径 R 的影响。

3.2 圆弧切割与直线粗糙度差异分析

通过(3)式和(7)式, 切割半径 R 对内、外圆弧切割粗糙度的影响规律很难看出来。因此采用理论计算和实验的方法进行研究, 且与相同切割条件下直线粗糙度进行比较。

假定切割速度 $v=3$ mm/s, 激光频率 $f=50$ Hz, 切割最小单位圆孔半径 $r=0.1$ mm, 分别计算切割半径 R 为 3、5、7、9、11、13、15、17、19 mm 的理论值, 得到内、外圆弧粗糙度理论值 h_1, h_2 和直线粗糙度理论值 l 。在参数切割速度 $v=3$ mm/s, 激光频率 $f=50$ Hz, 脉宽为 2 ms, 功率为 300 W 的条件下, 对纯铝板进行实际切割圆弧实验, 通过测量得到实际切割内、外圆弧粗糙度值 h'_1, h'_2 和直线粗糙度 l' , 如图 3 所示。

实际切割差异为内、外圆弧粗糙度之差 $\Delta R_z = h'_1 - h'_2$, 如图 4 所示。

由图 3 和图 4 分析可以得出以下结论: 1) 在相同切割参数下, 随切割半径增大, 外圆弧壁面粗糙度增大, 内圆弧壁面粗糙度减小; 2) 在假定条件下实际切割后, 切割半径 $R \leq 7$ mm 时, 内、外圆弧与直线粗糙度差明显; 切割半径 $R > 7$ mm 时, 内、外圆弧与直线粗糙度近似相同, 可忽略不计。

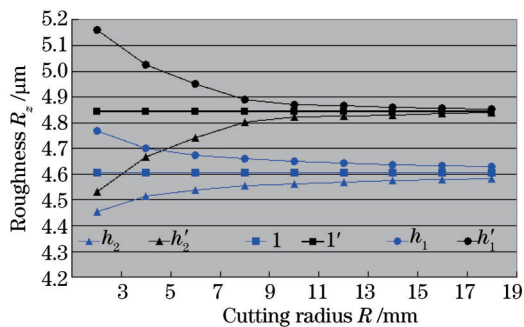


图 3 理论计算和实验测量结果

Fig.3 Results of theoretical calculation and experimental measurement

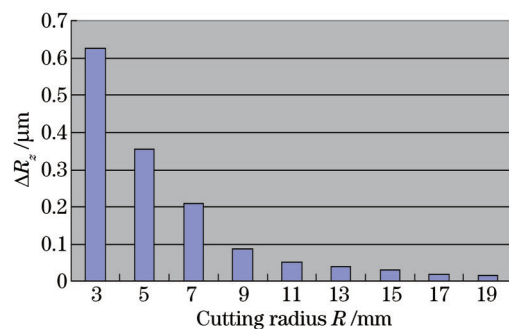


图 4 实验测量粗糙度之差

Fig.4 Difference between experimental measurement of roughnesses

4 响应曲面法对切割粗糙度优化

4.1 Deign-Expert 软件辅助实验设计

切割半径 $R \leq 7$ mm 时,内、外圆弧与直线切缝表面粗糙度存在差异。应用 Deign-Expert 软件对实验进行辅助设计^[15],采用 RSM 对切割半径 $R=5$ mm 的内、外圆弧以及直线进行优化。以激光切割速度、激光脉冲、激光频率为自变量,其变化范围分别为:1.5~4 mm/s、1~4 ms、15~35 Hz,切缝表面粗糙度 R_z 为响应变量,实验设计表与结果如图 5 所示,表中 inside-arc(h_1)、outside-arc(h_2)、line(l) 分别表示切割半径 $R=5$ mm 内、外圆弧以及直线的测量结果。

std	run	factor 1 A: speed /(mm/s)	factor 2 B: frequency /Hz	factor 3 C: pulse /ms	response 1 inside-arc(h_1) / μm	response 2 outside-arc(h_2) / μm	response 3 line (l) / μm
14	1	2.50	25.00	2.50	4.896	4.601	4.749
12	2	2.50	35.00	4.00	5.324	5.012	5.176
9	3	2.50	15.00	1.00	5.105	4.823	4.964
13	4	2.50	25.00	2.50	4.921	4.656	4.793
10	5	2.50	35.00	1.00	4.907	4.644	4.789
11	6	2.50	15.00	4.00	5.385	5.116	5.273
17	7	2.50	25.00	2.50	4.832	4.553	4.708
7	8	1.50	25.00	4.00	5.429	5.139	5.287
4	9	3.50	35.00	2.50	5.027	4.778	4.907
3	10	1.50	35.00	2.50	5.215	4.988	5.102
8	11	3.50	25.00	4.00	5.295	5.015	5.167
2	12	3.50	15.00	2.50	5.134	4.874	5.003
1	13	1.50	15.00	2.50	5.257	5.032	5.150
5	14	1.50	25.00	1.00	5.271	4.962	5.126
6	15	3.50	25.00	1.00	5.073	4.746	4.930
15	16	2.50	25.00	2.50	4.877	4.643	4.772
16	17	2.50	25.00	2.50	4.909	4.605	4.749

图 5 Deign-Expert 实验设计表与结果

Fig.5 Deign matrix by Deign-Expert software and measured responses

4.2 实验结果与讨论

设定因子显著性判据为 $P < 0.05$, 分别对图 5 中 inside-arc(h_1)、outside-arc(h_2)、line(l) 实验数据进行多元回归方差分析(ANOVA), 分别获得切割速度(A)、激光频率(B)、激光脉宽(C)的二次回归方程预测模型:

$$h_1 = +4.89 - 0.080A - 0.051B + 0.13C - 0.016AB + 0.016AC + 0.034BC + 0.18A^2 + 0.092B^2 + 0.20C^2$$

$$h_2 = +4.61 - 0.088A - 0.053B + 0.14C - 0.013AB + 0.023AC + 0.019BC + 0.19A^2 + 0.12B^2 + 0.17C^2$$

$$l = +4.75 - 0.082A - 0.052B + 0.14C - 0.012AB + 0.019AC + 0.020BC + 0.18A^2 + 0.10B^2 + 0.19C^2$$

该模型的拟合度、显著性和失拟程度分析, 如表 1 所示。

表 1 模型拟合性分析

Table 1 Model fitting analysis

Source	Value	Inside-arc (h_1)	Outside-arc (h_2)	Line (l)
Model	<i>F</i> value	24.62	31.35	27.30
	<i>P</i> -value	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	Significance	Significant	Significant	Significant
Lack of fit	<i>F</i> value	3.89	1.72	4.40
	<i>P</i> -value	0.1113	0.3008	0.0932
	Significance	No significant	No significant	No significant

从表 1 可以看出 3 个模型均拟合优度较高, 拟合效果较好, 失拟项不显著, 整体来说用导出的二元回归方程推测总体预测值是有效的。

4.3 圆弧与直线粗糙度差异消除

利用 Deign-Expert 软件提供的 RSM 最小值优化方法, 对 inside-arc(h_1)、outside-arc(h_2)、line(l) 进行优化, 以

获得三者理论最小值,结果如表2所示。

表2 响应最小优化结果

Table 2 Results of the response by minimize optimization

Response	Speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency /Hz	Pulse /ms	Prediction / μm	Confidence level
Inside-arc (h_1)	2.76	28.68	1.94	4.84187	0.95
Outside-arc (h_2)	2.77	27.71	1.83	4.56136	0.95
Line (l)	2.76	27.99	1.92	4.70958	0.95

在置信水平为0.95下,优化结果可知,圆弧、直线切缝粗糙度理论最小值存在差异。为了去除三者之间差异,响应优化方式选用设置目标值方法进行二次优化,把三者最小理论值中的最大值(4.842 μm)设为目标进行优化,在众多结果中选择系统推荐切割参数值,结果如表3所示。

表3 响应目标优化结果

Table 3 Result of the response by target optimization

Response	Speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency /Hz	Pulse /ms	Prediction / μm	Confidence level
Inside-arc (h_1)	2.75	28.55	1.91	4.842	0.95
Outside-arc (h_2)	3.26	24.96	3.55	4.842	0.95
Line (l)	2.44	20.13	2.80	4.842	0.95

利用表中切割参数在功率300 W条件下进行实际切割实验,验证此方法可行性。由于激光频率、激光脉宽调节精度无法到达0.01 Hz和0.01 ms,故取近似值分别为28.6、25.0、20.1 Hz;1.9、3.6、2.8 ms。实验结果表明,切割半径 $R=5\text{ mm}$ 的内、外圆弧以及直线的截面粗糙度近似一致,分别为4.843、4.851、4.839 μm 。实验结果微观图像(100 \times)如图6所示。

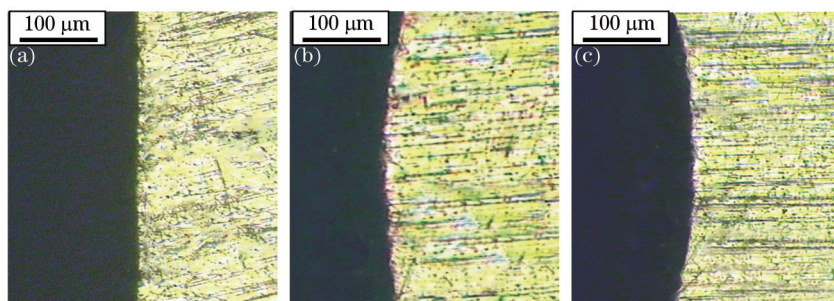


图6 近似相同的粗糙度。(a) 直线切缝; (b) 外圆弧切缝; (c) 内圆弧切缝

Fig.6 Result of roughness almost same. (a) Line kerf; (b) outside arc kerf; (c) inside arc kerf

通过改变激光切割参数,最终消除切缝切割尺寸引起粗糙度差异的影响,实现模板的工件粗糙度整体一致性,优化前后切缝粗糙度进行对比,如图7所示。此方法实验证明可行有效,为激光切割机参数的计算提供了可行的方法。

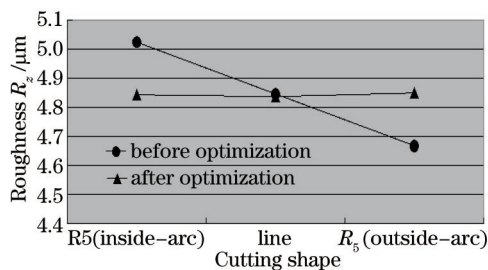


图7 优化前后粗糙度对比

Fig.7 Roughnesses comparison before and after optimization

5 结 论

通过实验分析,建立了激光切割圆弧的典型模型,加深对圆弧切缝粗糙度影响的理解,基于RSM的优

化,最终实现切缝粗糙度近似一致的目的。

1) 推导出主要影响内、外圆弧切缝粗糙度的公式,与直线公式相比,切割内、外圆弧的粗糙度不仅与切割频率、切割速度、切割单位圆孔最小半径有关,还与切割半径有关。

2) 通过理论计算和实验验证,随切割半径减小,外圆弧壁面粗糙度减小,内圆弧壁面粗糙度增大;在给出相同假定切割参数下,切割半径 $R \leq 7$ mm 时,内、外圆弧与直线切割截面粗糙度存在差异明显; $R > 7$ mm 时,粗糙度差异可以忽略不计。

3) 利用 RSM 中设置粗糙度目标值方法,按响应目标优化结果的参数进行切割,获得的切割半径 $R=5$ mm 的内、外圆弧以及直线的切缝粗糙度近似一致,粗糙度差异消除,此方法可行有效。

参考文献

- 1 Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan, *et al.*. Review of surface quality study on laser sheets cutting[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 270-274.
鄢 铨, 李力钧, 李 娟, 等. 激光切割板材表面质量研究综述[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 270-274.
- 2 Meng Hongyun, Guan Banggui, Liao Jianhong, *et al.*. Study of fiber laser cutting techniques on key board for mobile[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2007, 18(7): 835-837.
蒙红云, 官邦贵, 廖健宏, 等. 手机按键面板光纤激光切割工艺研究[J]. 光电子激光, 2007, 18(7): 835-837.
- 3 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Kerf roughness and quality control of laser precision cutting[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(2): 176-180.
李祥友, 曾晓雁. 激光精密切割不锈钢模板割缝质量控制[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 176-180.
- 4 A Riveiro, F Quintero, F Lusquinós, *et al.*. Effect of processing parameters on laser cutting of aluminium-copper alloys using off-axial supersonic nozzles[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(12): 5393-5397.
- 5 A Riveiro, F Quintero, F Lusquinós, *et al.*. The role of the assist gas nature in laser cutting of aluminium[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 548-554.
- 6 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
陈 聪, 高 明, 顾云泽, 等. 纤维激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 063004.
- 7 Teng Jie, Wang Binxiu. Technical study on laser cutting technology of industrial pure aluminum[J]. Advanced Laser Technology, 2009, (8): 24-26.
滕 杰, 王斌修. 激光切割工业纯铝的工艺研究[J]. 先进激光加工技术, 2009, (8): 24-26.
- 8 Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040601.
徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm 碳钢板的激光切割性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040601.
- 9 Xu Jie. Study on Optimization of Laser Cutting Parameters with Response Surface Methodology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012, 2.
徐 洁. 基于响应曲面法的激光切割工艺参数的优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 2.
- 10 Amit Sharma, Vinod Yadava. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile[J]. Opt & Laser Technol, 2012, 44(1): 159-168.
- 11 Wang Yanfei, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Study on laser cutting quality of aluminum alloy sheet based on image processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103002.
王彦飞, 王续跃, 徐文骥, 等. 基于图像处理的铝合金薄板激光切割质量研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103002.
- 12 Arindam Ghosal, Alakesh Manna. Response surface method based optimization of ytterbium fiber laser parameter during machining of Al/Al₂O₃-MMC[J]. Opt & Laser Technol, 2013, 46: 67-76.
- 13 Raghavendra Rao, Vinod Yadava. Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement[J]. Opt & Laser Technol, 2009, 41(8): 922-930.
- 14 K Abdel Ghany, M Newishy. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG Laser[J]. Mater Process Technol, 2005, 168(3): 438-447.
- 15 Xu Xianghong, He Mingzhu. Experimental Design and Design-Expert, SPSS Application[M]. Beijing: Science Press, 2010. 124-137.
徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 124-137.

栏目编辑: 张 雁