

基于中心复合设计法的激光透射连接 FRPA 材料实验研究

蒋 涛 刘会霞 李 品 严 长 薛国春 高阳阳 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光透射连接纤维增强尼龙(FRPA)材料在工业应用中具有良好的应用前景。基于旋转中心复合设计法的实验规划,采用半导体连续激光器对激光透射连接 FRPA 材料进行了实验,并对连接剪切强度和焊缝宽度进行测量。焊缝横截面显微观测表明,试样连接区域结合良好。通过实验数据处理,得到并分析了工艺参数对连接质量的影响。运用响应曲面法建立了工艺参数与连接剪切强度和焊缝宽度的关系模型。结果表明,激光透射连接工艺参数对连接质量具有决定性的影响;响应曲面所建立数学模型的预测结果与实验的实际结果取得了较好的一致性。这可为激光透射连接选取适当的工艺参数以提高加工效率提供有效的指导。

关键词 激光技术;激光透射连接技术;纤维增强尼龙;中心复合设计;工艺参数;连接质量

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s114017

Application of a Central Composite Design for Experimental Research on Laser Transmission Joining Process of FRPA

Jiang Tao Liu Huixia Li Pin Yan Zhang Xue Guochun Gao Yangyang Wang Xiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Laser transmission joining of fiber reinforced polyamides (FRPA) has potential application in industry. Based on a central composite rotatable design, comprehensive experiments of laser transmission joining of FRPA are carried out by a diode continuous laser source. The microscopic cross-section observation shows that the joining area is good. The effect of process parameters on the joint quality is analyzed by processing of the experimental data. Finally, mathematical models between the process parameters, the lap-shear strength and the joint width are determined by response surface methodology. The results show that the process parameters of laser transmission welding play a significant role in determining the joint quality; and the predicted data of the models are in good agreement with the experimental results. So this study could provide an effective instruction to choose the reasonable process parameters for enhancing the joining efficiency.

Key words laser technique; laser transmission joining technology; fiber reinforced polyamides; central composite design; process parameter; joining quality

OCIS codes 140.3510; 350.3390; 160.2290; 160.5470

1 引 言

纤维增强尼龙(FRPA)材料是一种重要的通用工程高分子材料,以其高强度、耐疲劳和耐蠕变等特

点,在航空航天、汽车、电动工具等行业得到了广泛的应用^[1]。但对于复杂塑料件的连接,采用传统的焊接方法难以保证质量^[2]。激光透射连接是一种新

收稿日期: 2013-01-01; **收到修改稿日期**: 2013-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201105)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 蒋 涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: taozji@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn(通信联系人)

兴的连接技术,具有无接触、速度快、精度高、柔性和热影响区域小等优点,得到了越来越广泛的关注^[3~6]。

近几年,Kagan 小组与 Bates 小组都对激光透射连接 FRPA 材料过程工艺参数进行了研究^[7~10]。Prabhakaran 等^[8]讨论了 30%玻纤增强尼龙 T 型连接过程工艺参数对剪切强度和材料融化变形的影响。Kagan 等^[10]研究了 FRPA 材料中不同颜色、填充剂含量和材料厚度以及不同工艺参数对激光透射连接剪切强度的影响。以上研究都集中于讨论了几个关键参数点对焊接质量的影响。而在全局范围内进行深入的工艺研究将有利于获得较好的焊接质量。本文采用了中心复合设计法对激光透射连接 FRPA 材料进行了全面的实验,得到并深入地分析了连接工艺参数对连接质量的影响。运用响应曲面法建立了工艺参数与连接剪切强度和焊缝宽度的二阶多项式模型。

2 实验方案

2.1 实验材料与设备

激光透射连接的待连接试样,一般要求上层材料能够透过激光光束,而下层材料能够吸收激光能量。实验采用白色半透明的 30%玻纤增强尼龙 66 作为上层材料,30%碳纤增强尼龙 66 作为下层材料,试样尺寸均为 40 mm×20 mm×2 mm。试样在连接前使用超声波清洗并干燥,以去除材料表面灰尘。

实验激光器采用 Dilas 公司 Compact130/140 型半导体连续激光器,输出波长为(980±10) nm。系统采用 DL.S20P 扫描振镜装置;通过振镜的快速移动,使连接能够高速稳定地进行,扫描振镜工作范围为 140 mm×140 mm,光斑直径为 2.8 mm。扫描振镜激光器系统原理如图 1 所示。

采用微机控制电子万能试验机进行拉伸试验。使用的试验速度 3 mm/min,负荷分辨率为 0.01 N。

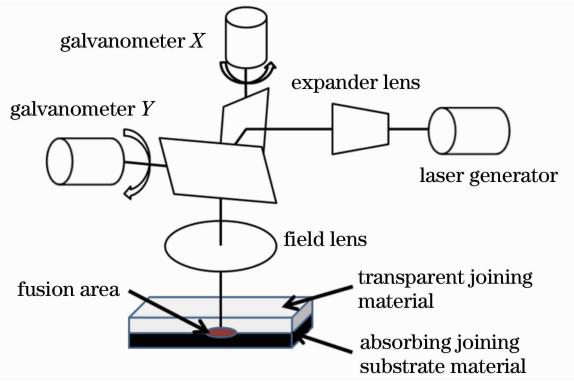


图 1 扫描振镜激光器系统原理图

Fig. 1 Schematic of galvanometer scanning laser source system

所有的样本采用分辨率为 0.001 mm 光学显微镜进行焊缝宽度的测量。焊接剪切强度表达式为

$$f = F/L, \quad (1)$$

式中 f 表示连接剪切强度, F 表示拉伸失效载荷, L 表示焊缝长度。

2.2 实验设计方法

中心复合设计(CCD)是用于拟合模型的最广的一类设计。具有灵活性和作为序贯实验设计的有用性等特点。一般而言,CCD 是由分辨率为 V 的分式析因设计以及 $2k$ 个坐标轴实验点或星号点、 n_c 个中心实验点组成。设计中必须指定两个参数:从设计中心到坐标轴实验点的距离 α 和中心点个数 n_c 。其中通过调整 α ,可以很好地满足不同要求的设计(如正交中心复合设计、旋转中心复合设计、二阶旋转中心复合设计)^[11]。

实验采用 3 因素 5 水平旋转中心复合设计法(CCRD)设计。确定的两个参数取值为: $\alpha = (n_F)^{1/4}$ (n_F 表示用在设计的析因部分中点的个数), $n_c = 6$ 。研究的工艺参数为:激光功率、扫描速度和夹紧力。实验以连接剪切强度和焊缝宽度来评价连接质量。通过单因素实验,确定了连接工艺参数范围如表 1 所示。表 2 所示为 CCRD 实验设计参数的设计矩阵和对应连接剪切强度和焊缝宽度的测量结果。

表 1 激光透射连接工艺参数取值范围

Table 1 Process parameter limits of laser transmission jointing technology

Parameters	Limits				
	-2	-1	0	+1	+2
Power W / W	11.8	19.22	26.65	34.08	41.5
Welding velocity S / (mm/s)	18	20	22	24	26
Clamp pressure P / MPa	0	0.1	0.2	0.3	0.4

表 2 CCRD 实验设计矩阵与对应测量结果

Table 2 Design matrix and corresponding measurement results of CCRD experiment

Run	Power /W	Welding velocity /(mm/s)	Clamp pressure /MPa	Lap-shear strength /(N/mm)	Joint width / μm
1	26.65	22	0	24.421	2607.78
2	19.22	24	0.1	33.488	2453.08
3	26.65	22	0.2	44.919	2915.53
4	19.22	20	0.3	48.647	2575.11
5	26.65	18	0.2	49.458	2909.8
6	26.65	26	0.2	46.100	2866.29
7	34.08	20	0.3	55.468	3241.17
8	26.65	22	0.2	46.242	2981.98
9	19.22	20	0.1	38.634	2731.04
10	34.08	24	0.3	45.395	3059.96
11	26.65	22	0.2	49.409	2888.00
12	26.65	22	0.2	51.976	2957.91
13	34.08	20	0.1	50.595	3101.23
14	26.65	22	0.2	52.680	2824.41
15	11.80	22	0.2	18.004	1503.84
16	26.65	22	0.2	41.201	3009.91
17	41.50	22	0.2	50.599	3644.00
18	34.08	24	0.1	41.562	3128.78
19	19.22	24	0.3	47.373	2328.77
20	26.65	22	0.4	52.736	2987.79

3 结果与讨论

图 2 为功率 11.8 W, 扫描速度 22 mm/s, 夹紧力大小 0.2 MPa 时, 连接试样宏观照片以及焊缝横截面照片。从图 2(a)可以看出, 激光透射连接纤维

增强尼龙材料连接表面质量良好, 焊缝细小, 均匀美观。图 2(b)中椭圆形圈出部分为融合区域, 可以看出连接区域充分融合, 几乎找不到任何的焊接缺陷。

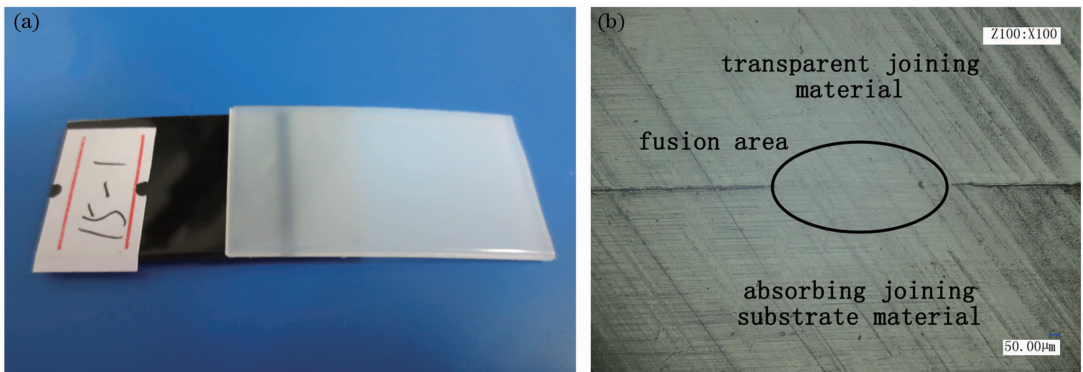


图 2 连接试样照片。(a)连接试样宏观照片;(b)连接试样焊缝横截面微观照片

Fig. 2 Photography of the joint specimen. (a) Joint specimen; (b) microscopic cross-section observation of the joint

3.1 工艺参数对连接剪切强度的影响

采用 Design-Expert V7.0 软件对表 2 中的实验数据进行了处理与分析, 得到了连接工艺参数对连接剪切强度的影响。图 3 为激光透射连接工艺参数对剪切强度的影响摄动图, 表示在实验设计的中心点附近连接工艺参数对剪切强度的影响趋势。从图中可以看出, 激光功率、扫描速度和夹紧力对剪切

强度大小有明显的影。当激光功率为 11.8 ~ 33.4 W 时, 连接剪切强度呈上升趋势; 这是因为随这功率的不断加, 输入能量增加, 连接区域材料充分融合, 使连接剪切强度达到最大值。当激光功率为 33.4 ~ 41.5 W 时, 连接剪切强度随之下降。这是因为功率较大, 下层材料发生部分分解与烧蚀, 导致连接剪切强度随之下降。同样, 当夹紧力大小为

0~0.34 MPa 时,连接剪切强度呈上升趋势。当夹紧力大小为 0.34~0.40 MPa 时,连接剪切强度呈下降趋势。这是因为夹紧力较小时,两种连接材料之间存在空隙,影响了热量的传递,同时也会因为空隙处存在空气无法逃逸,形成焊后气泡,导致剪切强度下降。而夹紧力太大时,会对连接界面上的熔融材料产生挤压,阻碍材料连接区域的融合。而扫描速度对连接剪切强度的影响是单调递减的,这是因为随着扫描速度的增加,连接区域单位面积是所吸收的能量减少。图 4 所示为当夹紧力是 0.2 MPa 时,激光功率与扫描速度对剪切强度的交互式影响。根据图中可以得出,功率为 26.65~41.50 W,扫描速度为 18~20 mm/s 的弧形区间内能够得到较好的剪切强度。

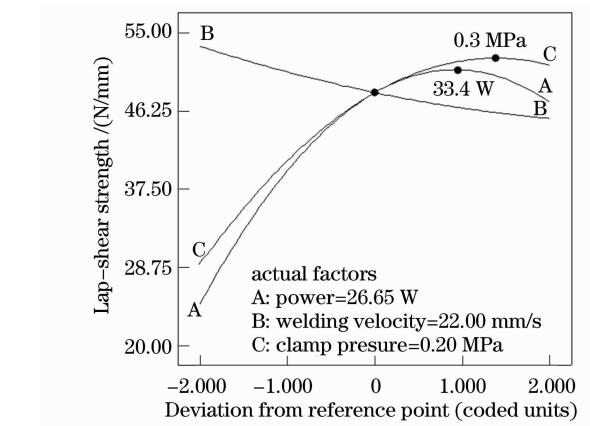
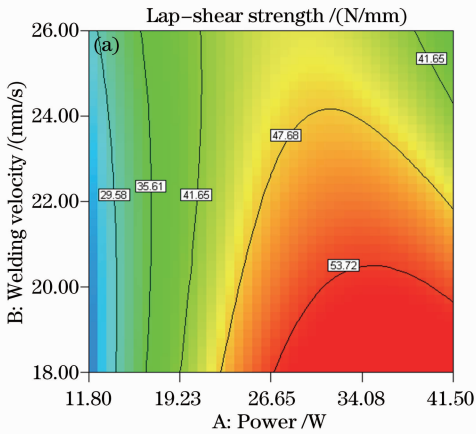


图 3 激光透射连接工艺参数对剪切强度的影响扰动图
Fig. 3 Perturbation plot showing the effect of parameters of laser transmission jointing technology on the lap-shear strength

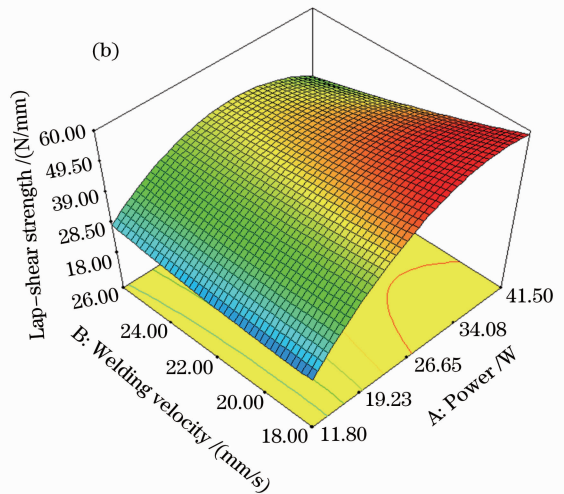


图 4 激光功率与扫描速度对连接剪切强度的交互式影响(夹紧力 0.2 MPa)。(a)二维等高线图;(b)三维响应曲面图
Fig. 4 Interaction effect of laser power and welding velocity on the lap-shear strength (clamp pressure 0.2 MPa).
(a) 2D contour plot; (b) 3D response surface plot

3.2 工艺参数对焊缝宽度的影响

采用 Design-Expert V7.0 软件对表 2 中的实验数据进行处理与分析,得到了工艺参数对焊缝宽度的影响。图 5 为激光透射连接工艺参数对焊缝宽度的影响扰动图,表示在实验设计的中心点附近连接工艺参数对焊缝宽度的变化趋势。从图中可以看出,相对于扫描速度和夹紧力,激光功率对连接焊缝宽度具有较大的影响。并且焊缝宽度随功率增大而变宽;当功率为 37.8 W 时,焊缝宽度达到最大。这是因为随着输入能量的增加,形成较大的热影响区域。而当功率太大使下层材料发生部分分解与烧蚀时,便会影响连接界面的热传递,导致焊缝宽度略微下降。图 6 表示激光功率与扫描速度对焊缝宽度的交互式影响。由图可知,当激光功率为 11.8~

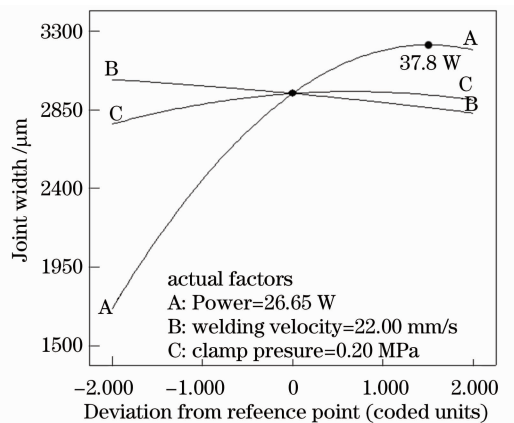


图 5 激光透射连接工艺参数对焊缝宽度的影响扰动图
Fig. 5 Perturbation plot showing the effect parameters of laser transmission jointing technology on the joint width

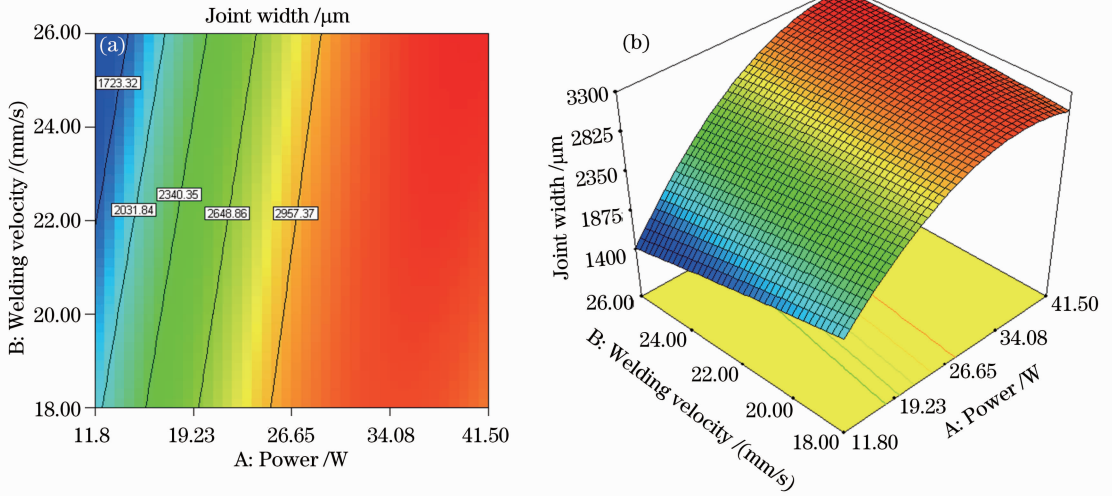


图 6 激光功率与扫描速度对焊缝宽度的交互式影响(夹紧力 0.2 MPa)。(a)二维等高线图；(b)三维响应曲面图
 Fig. 6 Interaction effect of laser power and welding velocity on the joint width (clamp pressure 0.2 MPa). (a) 2D contour plot; (b) 3D response surface plot

14.5 W,扫描速度为 22~26 mm/s 的三角形区域中,能够得到较细小的焊缝宽度。

4 数学模型与验证

响应曲面法是数学方法和统计方法结合的产

物,用于对感兴趣的响应受多个变量影响的问题进行建模和分析,以优化这个响应^[11]。采用 Design-ExpertV7.0 软件分别建立了连接强度与焊缝宽度的响应曲面二阶多项式数学模型。连接剪切强度实际参数的二阶多项式数学模型可以表达为

$$S_{LS} = -42.364 + 6.559 \times W - 1.674 \times S + 165.502 \times P - 0.107 \times W \times S - 2.557 \times W \times P + 1.77 \times S \times P - 0.0559 \times W^2 + 0.0718 \times S^2 - 201.293 \times P^2. \quad (2)$$

焊缝宽度实际参数的二阶多项式数学模型可以表达为

$$W_{jw} = 1557.414 + 88.063 \times W - 40.905 \times S + 2266.027 \times P + 3.12 \times W \times S + 59.153 \times W \times P - 110.704 \times S \times P - 2.228 \times W^2 - S^2 - 2656.64 \times P^2, \quad (3)$$

其中参数范围为:11.8 W ≤ W ≤ 41.5 W, 18 mm/s ≤ S ≤ 26 mm/s, 0 ≤ P ≤ 0.4 MPa。

图 7(a)和(b)分别显示了剪切强度模型和焊缝宽度模型的预测结果与实验结果的对比。从图中可

以看出,预测值与实验实测值具有良好的一致性。证明所建立数学模型能够准确地反应连接工艺参数与连接质量之间的内在联系。

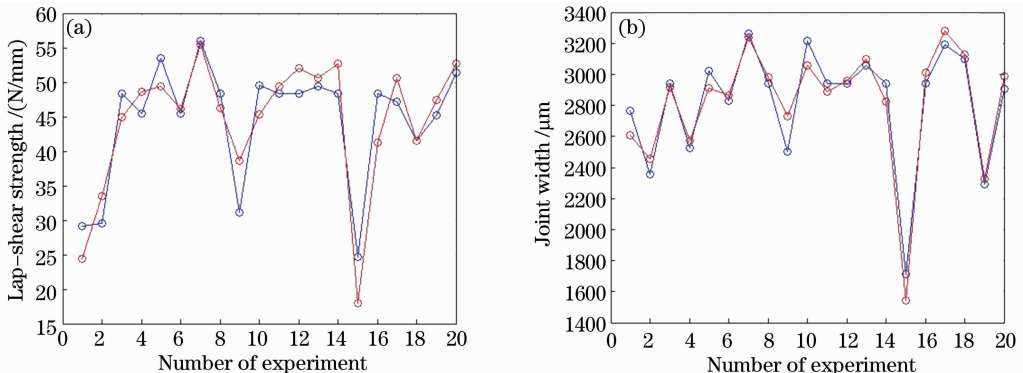


图 7 实验结果与模型预测结果的对比。(a)连接剪切强度；(b)焊缝宽度

Fig. 7 Comparison of experimental data and the predicted data. (a) Lap-shear strength; (b) joint width

5 结 论

1) 采用激光透射连接方法可以实现纤维增强尼龙材料的连接。连接剪切强度较好,并且表面质量良好,焊缝均匀美观,无明显缺陷;

2) 采用中心复合实验设计方法,能够准确有效地得到激光透射连接工艺参数对连接质量的影响,包括单因素的影响和交互式影响等;

3) 运用响应曲面方法建立了激光透射连接工艺参数与连接质量之间的二阶多项式数学模型。较好地反映了连接工艺参数对连接剪切强度和焊缝宽度影响的内在规律。

参 考 文 献

- 1 I. B. Page. Polyamides As Engineering Thermoplastic Materials [M]. UK: Rapra Technology Limited, 2000. 11~15
- 2 S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures; recent developments and trends [J]. *Polymer Engineering Science*, 2009, **49**(8): 1461~1476
- 3 F. G. Bachmann, U. A. Russek. Laser welding of polymers using high power diode lasers [C]. Sans Jose: Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)-The International Society for Optical Engineering, 2002, **4637**: 505~518
- 4 Xiao Wang, Pin Li, Zhenkai Xu *et al.*. Laser transmission joint between PET and titanium for biomedical application [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2010, **210**(13): 1767~1771
- 5 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guoming *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastic [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471
王 霄, 张惠中, 丁国明 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471
- 6 Wang Xiao, Zhang Cheng, Wang Kai *et al.*. Multi-objective optimization of laser transmission welding of polycarbonate process based on genetic algorithm-response surface methodology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0603003
王 霄, 张 成, 王 凯 等. 基于遗传算法-响应曲面方法的激光透射焊接聚碳酸酯工艺的多目标优化[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0603003
- 7 R. Prabhakaran. Laser Transmission Welding of Nylon 6 [D]. Canada: Queen's University, 2004
- 8 R. Prabhakaran, M. Kontopoulou, G. Zak *et al.*. Contour laser-laser transmission welding of glass reinforced nylon 6 [J]. *J. Thermoplastic Composite Materials*, 2006, **19**(4): 427~439
- 9 A. Kritskiy, G. Zak, P. J. Bates. Laser transmission welding of nylon tubes and plates [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2010, **132**(5): 051002
- 10 V. A. Kagan, G. P. Pinho. Laser transmission welding of semicrystalline thermoplastics-part II: analysis of mechanical performance of welded nylon [J]. *J. Reinforced Plastics and Composites*, 2004, **23**(1): 95~107
- 11 D. C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments [M]. Fu Juesheng, Zhang Jian, Wang Zhenyu *et al.* Transl.. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2009. 347~398
蒙哥马利. 实验设计与分析[M]. 傅珏生, 张 健, 王振羽 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2009. 347~398

栏目编辑: 韩 峰