

改性聚丙烯与尼龙 66 的激光透射焊接工艺研究

蒋海荣 刘会霞 陈国纯 郭德辉 李 品 严 长 王 霄

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 针对聚丙烯与尼龙 66 应用广泛, 存在连接需求, 但两者极性差异大、相容性差而导致无法进行激光透射焊接这一问题, 通过在聚丙烯的侧链上接枝马来酸酐来改善聚丙烯与尼龙 66 之间的焊接性能。介绍了接枝改性聚丙烯的制备配方和工艺, 并测量了接枝改性聚丙烯的热学和力学性能。对接枝改性聚丙烯与尼龙 66 进行了激光透射焊接实验。实验发现: 接枝改性聚丙烯与尼龙 66 具有很好的焊接性能。基于中心组合实验设计, 利用响应面法建立了激光功率, 扫描速度和夹紧力与焊接强度之间的数学模型, 揭示了焊接工艺参数交互式影响规律, 并得到了最佳工艺参数。

关键词 激光技术; 激光透射焊接; 接枝改性聚丙烯; 尼龙 66; 响应面法; 工艺参数

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s216002

Study on the Process of Laser Transmission Welding between the Modified Polypropylene and Nylon 66

Jiang Hairong Liu Huixia Chen Guochun Guo Dehui Li Pin Yan Zhang Wang Xiao

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

Abstract Polypropylene and nylon 66 are used widely and have the connecting needs, but they can not be welded by laser transmission welding because of polar differences and poor compatibility. Given this situation, maleic anhydride is grafted to the side chains of polypropylene to improve the welding performance between polypropylene and nylon 66. The preparation formulation and process of the graft modified polypropylene are introduced, and the mechanical and thermal properties of the graft modified polypropylene are tested. The graft modified polypropylene and nylon 66 are welded by laser transmission welding, which shows that the graft modified polypropylene and nylon 66 have good welding performance. Based on central composite experimental design, through response surface methodology, the mathematical model between laser power, welding speed, fixture pressure and the joint strength are established. At the same time, the interactive influence of welding process is revealed and the optimal process parameters are obtained.

Key words laser technique; laser transmission welding; the graft modified polypropylene; nylon 66; response surface methodology; process parameters

OCIS codes 140.2020; 350.3390; 120.7000

1 引 言

激光透射焊接相比于传统的连接方法有着诸多的优点, 比如, 无接触, 易于控制, 焊接精度高, 焊接速度快, 热影响区域小等^[1-3], 已经成为研究的一大热点。异种聚合物焊接而成的产品广泛应用于微电子、生物医学、汽车零部件等领域^[4-5]。不同材料的优异性能可以通过异种材料的焊接而集于一体, 但是与同种材料之

收稿日期: 2015-01-27; **收到修改稿日期:** 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB460006)

作者简介: 蒋海荣(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: 15751010042@163.com

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

E-mail: lhx@ujs.cn(通信联系人)

间的焊接相比,异种材料的激光透射焊接更难。近年来,关于异种聚合物激光透射焊接的研究已经不少^[6-8]。目前研究的对象主要是:对有一定可焊性的异种聚合物进行激光透射焊接研究,而对原本可焊性差甚至不可焊的异种聚合物(大多因为极性差异太大,熔点差异太大等)如何改善其焊接性能使其变成可焊的研究很少涉及。聚丙烯(PP)和尼龙 66(PA66)作为常用塑料,用途广,用量大^[9]。聚丙烯是一种性能优异的聚烯烃材料,吸水性小、易加工且成本低^[10];尼龙 66 具有弹性好,抗冲击和抗拉强度高,耐磨和自润滑性优良,耐油性和化学稳定性好,加工流动性优良等优点^[11];如能把聚丙烯与尼龙 66 用激光焊接在一起,则能充分利用聚丙烯与尼龙 66 各自的优点,有很大的应用前景。但是,聚丙烯是一种非极性聚合物,而尼龙 66 是一种极性聚合物,两者极性差异很大,相容性极差,两者之间没有可焊性,所以到目前为止,还没有关于聚丙烯和尼龙 66 的焊接研究。鉴于此,本文探究通过在聚丙烯侧链上接枝马来酸酐来改善其与尼龙 66 的相容性,增加聚丙烯与尼龙 66 的亲合力,达到提高改性后的聚丙烯与尼龙 66 的焊接性能的目的,并采用响应面法建立激光透射焊接主要工艺参数即激光功率,扫描速度和夹紧力与焊接强度之间的数学模型,揭示焊接工艺参数的交互作用对焊接强度的影响,并找到了最佳工艺参数。

2 接枝改性聚丙烯材料

2.1 主要原料和仪器设备

聚丙烯:北京燕山石化总公司;

丙酮:莱阳市双双化工有限公司;

马来酸酐(MAH):天津市博迪化工有限公司;

引发剂(过氧化二异丙苯,DCP):沈阳市新西试剂厂;

高速混合机:SHR-25,张家港轻工机械厂有限公司;

同向平行双螺杆造粒机组:SHJ-35 型,广州华新科机械有限公司。

2.2 接枝改性聚丙烯的制备

将 MAH 与 DCP 按 4:0.3 的体积比例混合,然后用丙酮将其完全溶解。再将溶液倒入 100 份聚丙烯中,用高速混合机搅拌 5 min 使其充分混和。将混合物加入同向平行双螺杆造粒机组(SHJ-35),在熔融挤出的同时达到接枝目的。所采用的工艺参数如下:双螺杆挤出机的工艺温度设定为 I 区:160 °C、II 区:170 °C、III 区:185 °C、IV 区:190 °C、V 区:195 °C、VI 区:190 °C、VII 区:180 °C、VIII 区:175 °C、机头:170 °C;挤出机喂料转速为 10 r/min,双螺杆转速为 30 r/min。在拉伸力学实验中,发现接枝改性聚丙烯的强度极限比聚丙烯高点,伸长量略微低点,说明接枝改性使聚丙烯的塑性降低了。然后用动态热流式差示扫描量热仪分别测量它们的熔融峰,发现马来酸酐的改性使聚丙烯熔点略微有点下降,下降幅度为 1.3 °C。总的看来,接枝改性对聚丙烯热学力学性能有一定的影响,但是变化不大,与原聚丙烯性能差异不大。

3 接枝改性聚丙烯与尼龙 66 的激光透射焊接实验

3.1 试样准备与实验设备

将接枝改性聚丙烯和尼龙 66 份别制作成 50 mm×20 mm×1 mm 的试样。所有试样在激光透射焊接前要用超声波清洗机清洗,并放在干燥箱内干燥 12 h。激光器采用 Dilas 公司 Compact 130/140 型半导体连续激光器,最大输出功率为 130 W,输出波长为 980±10 nm,其最小光斑直径为 700~800 μm,激光器采用内置的风冷系统作为冷却系统,工作温度为 15 °C~25 °C。

3.2 接枝改性聚丙烯与尼龙 66 激光透射焊接实验

激光透射焊接的前提条件是包含一个透光层材料,能够透过激光光束;而另一层材料为吸收层材料,能够较好的吸收激光能量。而对于上下层相对激光均透明的塑料而言,可以选择 clearweld 吸收剂作为吸收层。本实验中,接枝改性聚丙烯作为上层材料,而尼龙 66 作为下层材料,在尼龙 66 上要焊接的区域涂上 clearweld 作为吸收层。实验采用搭接方式进行激光透射焊接,采用 K9 玻璃作为夹持层。其示意图如图 1 所示。

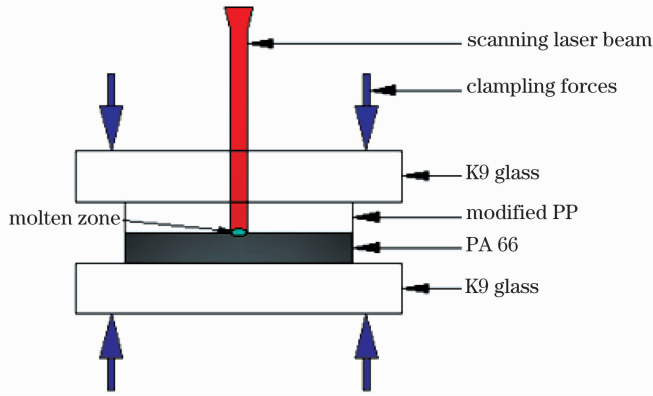


图 1 激光透射焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding

实验发现接枝改性聚丙烯与尼龙 66 能很好地焊接在一起,当激光器功率为 40 W,加工速度为 600 mm/min,夹紧力为 0.3 MPa 时,焊接件如图 2 所示,焊接件很好,样品美观,表面无破损,焊缝均匀平滑,无明显缺陷,且拉伸强度比较高,达到 3.5 MPa。说明对聚丙烯的改性能降低聚丙烯与尼龙 66 的界面张力,提高聚丙烯与尼龙 66 的相容性和两者界面的黏合力,使两者更容易相互扩散,从而大幅度提高聚丙烯与尼龙 66 的焊接性能,同时接枝改性聚丙烯上的马来酸酐与尼龙 66 有很高的反应活性,在焊接的过程中,可能会发生相应的化学反应。

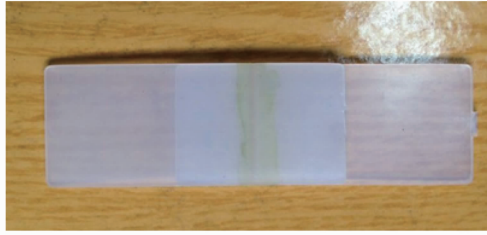


图 2 接枝改性聚丙烯与尼龙 66 焊接件

Fig. 2 Welding between the graft modified polypropylene and nylon 66

4 接枝改性聚丙烯与尼龙 66 的激光透射焊接工艺研究

激光透射焊接质量的评价方法主要有:1)焊接强度;2)焊缝宽度;3)焊缝的美观度等。本文以焊接强度来评价焊接质量。

4.1 拉伸实验

拉伸实验是在实验样品(接枝改性聚丙烯与尼龙 66 的焊接件)两端加载拉力,(拉伸速度为 2 mm/min,工作环境为室温),最后使样品断裂,通过测得的试样极限应力的的大小来衡量材料的焊接强度,拉伸的示意图如图 3 所示。

极限应力的计算公式^[12]为

$$\sigma = F / (D \times L), \quad (1)$$

式中 σ 是焊接强度(MPa), F 是使得连接件失效的最大拉力(N), D 是焊缝宽度(mm), L 是焊缝长度(mm)。

实验采用 UTM4140 型微机控制电子万能实验机进行拉伸实验,采用基恩士 VHX-1000 型超景深电子显微镜进行焊缝宽度的测量。

4.2 实验设计与焊接工艺数学模型的建立

本实验采用 3 因素 5 水平中心组合设计(CCD)。实验研究的主要工艺参数为:激光功率、扫描速度和夹紧力。实验工艺参数和实验设计水平如表 1 所示。

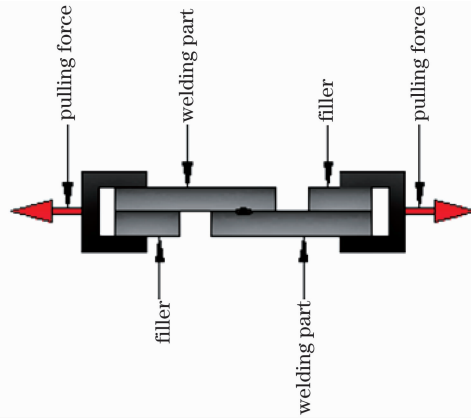


图 3 拉伸示意图

Fig. 3 Tensile schematic diagram

表 1 实验工艺参数和设计水平

Table 1 Process parameters and their limits of the experiment

Parameters	Units	Notations	Limits				
			-2	-1	0	1	2
Laser power	W	A	20	30	40	50	60
Welding speed	mm/s	B	8	9	10	11	12
Fixture pressure	MPa	C	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2

本实验通过软件 Design-Expert 对实验结果进行分析,建立了工艺参数与焊接强度之间的二阶多项式数学模型,其表达式如下:

$$\sigma = 3.30 + 0.21A + 0.032B - 0.057C + 0.2AB + 0.11AC + 0.023BC - 0.24A^2 - 0.13B^2 - 0.12C^2. \quad (2)$$

方差分析(ANOVA)的目的是为了检查焊接过程中,工艺参数对质量特性是否有显著影响和实验中的各个因素对实验结果的影响程度。通过方差分析,发现响应曲面法建立的数学模型是充分有效的,并可得出,激光功率和扫描速度对焊接强度的交互式影响最大,激光功率和夹紧力对焊接强度的交互式影响次之,扫描速度和夹紧力对焊接强度的交互式影响最小。

4.3 各因素对结果的影响

图 4 显示了在中心点处激光功率、扫描速度和夹紧力对焊接强度影响的变化趋势。从图中可以看出,随着激光功率,扫描速度和压紧力的增加,焊接强度都是先增大后减少。

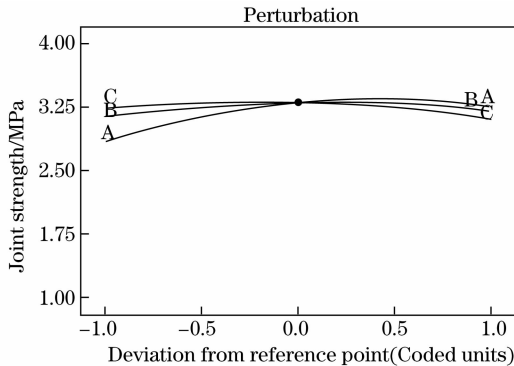


图 4 工艺参数对焊接强度的影响趋势

Fig. 4 Perturbation plot for the effect of process parameters on the joint strength

图 5 显示了激光功率和扫描速度对焊接强度的交互式影响趋势。在激光功率为 20~40 W 和扫描速度为 8~10 mm/s 时,随着激光功率和扫描速度的增加,焊接强度增大;在激光功率为 40~60 W 和扫描速度为 10~12 mm/s 时,随着激光功率和扫描速度的增加,焊接强度越来越小;因为激光功率小的时候,激光能量

输入不足,连接材料不能很好的熔化扩散,从而导致焊接强度不高,随着激光功率的增大,熔化扩散越来越充分,焊接强度也越来越高;当激光功率超过 40 W 时,过高的能量会使尼龙 66 发生烧蚀,材料融合的部分质量越来越差,从而导致焊接强度下降;当扫描速度小于 10 mm/s 时,因为扫描速度很小,激光能量很大,烧蚀现象严重,焊接强度不高,随着扫描速度的增大,激光能量减少,烧蚀现象得到改善,焊接强度也越来越大,但是当扫描速度大于 10 mm/s 时,随着扫描速度的增加,激光能量持续减少,材料又不能很好的熔化扩散,焊接强度越来越差,两者的交互式作用对焊接强度的影响结果如图 5 所示。

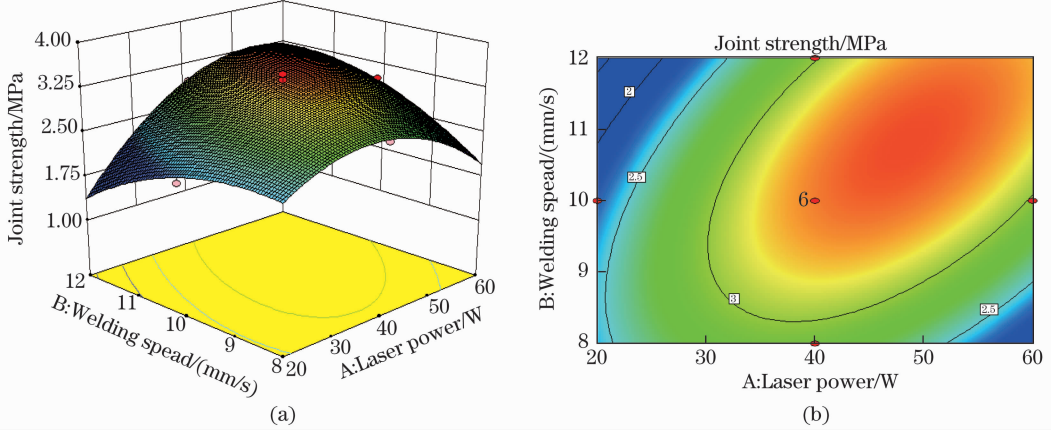


图 5 激光功率和扫描速度对焊接强度的交互式影响:(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 5 Effect of laser power and welding speed on the joint strength. (a) Response surface plot; (b) contours plot

图 6 显示了激光功率和夹紧力对焊接强度的交互式影响趋势。当激光功率为 20~40 W 和夹紧力为 0.04~0.12 MPa 时,随着激光功率和夹紧力的增加,焊接强度增大;当激光功率为 40~60 W 和夹紧力为 0.12~0.2 MPa 时,随着激光功率和夹紧力的增加,焊接强度越来越小;当激光功率小于 40 W 时,随着激光功率的增大,材料的熔化扩散越来越充分,焊接强度越来越高;当超过 40 W 时,随着激光功率的增大,过大的能量导致尼龙 66 烧蚀的现象越来越严重,从而导致焊接强度下降;当夹紧力小于 0.12 MPa 时,较小的夹紧力不能使两连接的工件很好的接触,熔融的材料不能很好的扩散,焊接强度低,随着夹紧力的增大,这种情况得到好转,焊接强度越来越高,当夹紧力超过 0.12 MPa 时,过大的夹紧力会阻止熔融材料的流动,焊接强度会越来越低,两者的交互式作用对焊接强度的影响结果如图 6 所示。

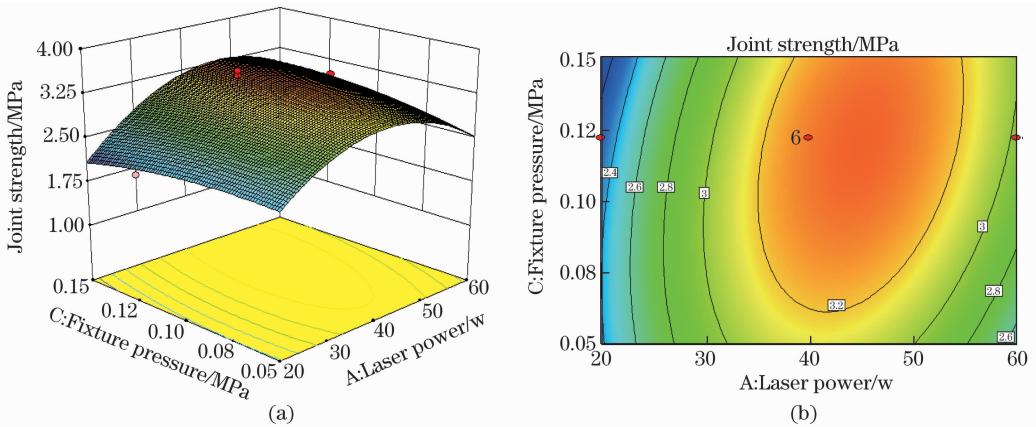


图 6 激光功率和压紧力对焊接强度的交互式影响:(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 6 Effect of laser power and fixture pressure on the joint strength. (a) Response surface plot; (b) contours plot

图 7 显示了扫描速度和夹紧力对焊接强度的交互式影响趋势。当扫描速度为 8~10 mm/s 和夹紧力为 0.04~0.12 MPa 时,随着扫描速度和夹紧力的增加,连接强度增大;当扫描速度为 10~12 mm/s 和夹紧力为 0.12~0.2 MPa 时,随着扫描速度和夹紧力的增加,焊接强度越来越低;当扫描速度小于 10 mm/s 时,随着扫描速度的增大,激光能量减少,过高能量导致的烧蚀现象得到改善,焊接强度越来越大,但是当扫描速度

大于 10 mm/s 时,随着扫描速度的增加,激光能量越来越小,材料不能很好的熔化,焊接强度越来越差;当夹紧力小于 0.12 MPa 时,随着夹紧力的增大,过小夹紧力导致两连接工件不能很好的接触的情况得到好转,焊接强度越来越好,但是当夹紧力超过 0.12 MPa 时,过大的夹紧力会阻止熔融材料的流动,随着夹紧力越来越大,熔融的材料越不能很好的扩散融合,焊接强度也变低,两者的交互式作用对焊接强度的影响结果如图 7 所示。

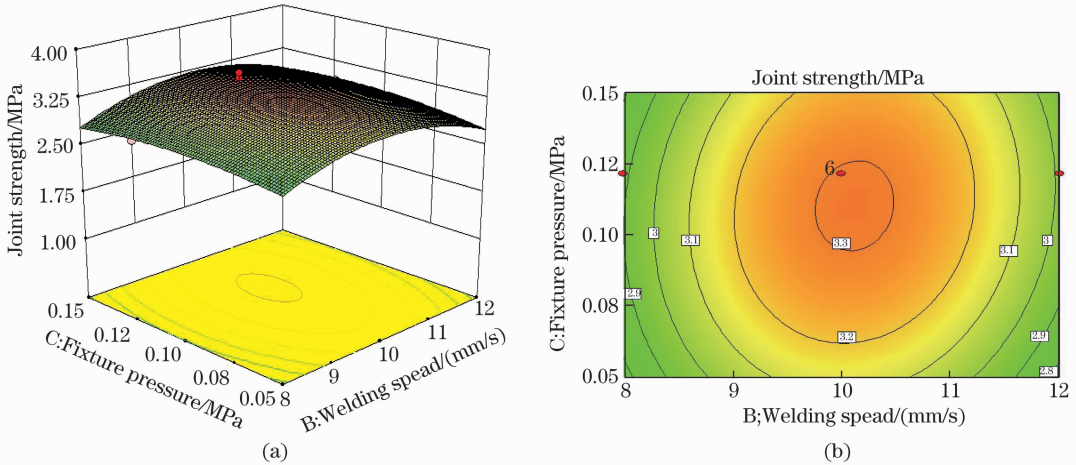


图 7 扫描速度和夹紧力对焊接强度的交互式影响:(a)响应曲面;(b)等高线图

Fig. 7 Effect of welding speed and fixture pressure on the joint strength. (a) Response surface plot; (b) contours plot

4.4 工艺参数优化

在工业应用中,激光功率越小,能量消耗越少,成本越低;焊接速度越高,效率也越高,成本越低,综合考虑焊接成本,生产效率和焊接质量,选用的优化准则为:较小的激光功率,较高的焊接速度和较高的焊接强度,根据这个准则并基于工艺参数数学模型得出最佳工艺参数为激光功率 38.29 W,扫描速度 11.43 mm/s,夹紧力 0.11 MPa,其焊接强度达到 3.09 MPa。

5 结 论

研究了通过在聚丙烯的侧链上接枝上具有极强反应活性且为极性的马来酸酐来改善聚丙烯与尼龙 66 的激光透射焊接性能,并研究了激光功率,扫描速度和夹紧力对焊接强度的影响。可以得出以下结论:

- 1) 通过在聚丙烯侧链上接枝上具有极强反应活性且为极性的马来酸酐,发现接枝改性聚丙烯与尼龙 66 能很好的焊接在一起,且焊接强度比较高;
- 2) 在激光透射焊接接枝改性聚丙烯与尼龙 66 时,其焊接强度随着激光功率、扫描速度、夹紧力的增加都是先增大后减少。激光功率和扫描速度对焊接强度的交互式影响最大,激光功率和夹紧力对焊接强度的交互式影响次之,扫描速度和夹紧力对焊接强度的交互式影响最小;
- 3) 综合考虑焊接成本,生产效率和焊接质量,最终优化的最佳工艺参数:激光功率为 38.29 W,扫描速度为 11.43 mm/s,夹紧力为 0.11 MPa,所得到的焊接强度为 3.09 MPa。

参 考 文 献

- 1 Chen Hao, Wang Xiao, Liu Huixia, *et al.*. Numerical simulation-driven optimization of laser transmission welding process between PET and 304L stainless steel [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403006.
陈浩,王霄,刘会霞,等.数值模拟驱动的激光透射焊接 PET 与 304L 不锈钢的优化研究[J].中国激光,2014,41(4):0403006.
- 2 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.
- 3 Zhang Cheng, Wang Xiao, Wang Kai, *et al.*. Optimization of weld strength for laser transmission welding of thermoplastic based on response surface methodology and genetic algorithm-artificial neural network [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103006.
张成,王霄,王凯,等.基于响应曲面和遗传算法-人工神经网络的热塑性塑料激光透射连接强度的优化[J].中国激光,2011,38

- (11): 1103006.
- 4 Bauer I, Russek U A, Herfurth H J, *et al.*. Laser micro-joining of dissimilar and biocompatible materials[C]. SPIE, 2004, 5339: 454—464.
- 5 Witte R, Herfurth H J, Bauer I, *et al.*. Microjoining of dissimilar materials for optoelectronic and biomedical applications[C]. SPIE, 2003, 4979: 226—233.
- 6 Wang Jianchao, Zhang Xuanjun, Zhang Wei, *et al.*. Process research and numerical simulation analysis of laser welding of plastics [J]. Applied Laser, 2014, 34(3): 233—237.
王健超,张瑄珺,张 伟,等. 激光塑料焊接工艺研究与数值模拟分析[J]. 应用激光,2014,34(3):233—237.
- 7 Pang Zhenhua, Zhang Wei, Ren Hao, *et al.*. Applications of laser technology on the welding of dissimilar plastics [J]. Electrical Engineering Technology, 2014, 43(4): 96—100.
庞振华,张 卫,任 豪,等. 激光技术在异种塑料材料焊接中的应用[J]. 机电工程技术,2014,43(4):96—100.
- 8 Liu Zhen, Wang Yaomin, Wang Yingwei, *et al.*. Study on tensile shear strength testing of plastic plaques jointed by laser transmission welding [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3): 241—245.
刘 臻,王耀民,王瑛玮,等. 激光透射塑料焊接剪切强度测量方法分析研究[J]. 激光与红外,2014,44(3):241—245.
- 9 Zhang Shengyu. Application of plastics welding in automobile industry [J]. Plastic, 2004, 33(6): 89—94.
张胜玉. 塑料焊接在汽车工业上的应用[J]. 塑料,2004,33(6):89—94.
- 10 Yang Mingshan. Plastic Modification Technology, Formula and Application[M]. Chemical Industry Press,2013.
杨明山. 塑料改性工艺、配方与应用[M]. 化学工业出版社,2013.
- 11 Zhao R G, Luo W B, Xiao H M, *et al.*. Water-absorptivity and mechanical behaviors of PTFE/PA6 and PTFE/PA66 blends [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): s498—s503.
- 12 Sultana T, Newaz G, Georgiev G L, *et al.*. A study of titanium thin films in transmission laser micro-joining of titanium-coated glass to polyimide[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(10): 2632—2636.

栏目编辑: 张浩佳