

# 环形激光束形成及高分子材料焊接性能的研究

徐国建<sup>1</sup> 田希玉<sup>1</sup> 杭争翔<sup>1</sup> 麻明章<sup>1</sup> 李宏利<sup>1</sup> 刘祥宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

<sup>2</sup>鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044

**摘要** 利用光纤激光研究了环形激光束的形成原理,并利用环形激光束实现了高分子材料的超高速焊接。试验结果表明,随着准直镜焦距的增加,环形激光束的外径不变,内径减小,环形激光束的光环宽度增加;随着第一枚圆锥透镜和第二枚圆锥透镜的间距 $L_{12}$ 增加,环形激光束的内径和外径同时增加,而环形激光束的光环宽度几乎不变;通过准直镜、第一枚圆锥透镜及第二枚圆锥透镜的同轴性调节,可获得能量密度分布均匀的环形激光束;利用外部直径为54 mm、内部直径为47 mm及宽度为3.5 mm的环形激光束,对厚度为(2+1) mm的高分子材料搭接接头实现了超高速焊接。当试验压力为100 N,激光输出功率为800 W,焊接时间为0.6 s时,高分子材料焊接接头拉伸剪切性能与母材相同,其拉伸剪切断口位于母材(TPV-弹性体)上。

**关键词** 材料; 光纤激光; 环形激光束; 高分子材料; 圆锥透镜; 搭接接头

中图分类号 TG 456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0906001

## Formation Principle of Ring Laser Beam and Research on Laser Welding of Polymer Materials

Xu Guojian<sup>1</sup> Tian Xiyu<sup>1</sup> Hang Zhengxiang<sup>1</sup> Ma Mingzhang<sup>1</sup> Li Hongli<sup>1</sup> Liu Xiangyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang,

Liaoning 110870, China

<sup>2</sup>Anshan Raycham Technology Co. Ltd., Anshan, Liaoning 114044, China

**Abstract** A ring beam optics is developed for a circular seam welding of the automotive using a fiber laser, and the polymer material with a circular seam are firmly welded in a super-short time. As the results, with increase of focal length of collimating lens, the outside diameter of the ring laser beam is hardly changed; the inside diameter of the ring laser beam decreases; the width of the ring laser beam is increased in the experiment. Distance ( $L_{12}$ ) between the first axi-cone lens and the second axi-cone lens increases, the outside diameter and inside diameter as the ring laser beam increases simultaneously, and the width of the ring laser beam is almost fixed. Moreover, it is confirmed that the intensity distribution of the ring beam becomes uniform by adjusting the coaxial performance of collimating lens, the first axi-cone lens and the second axi-cone lens. The ring laser beam has been outside diameter of 54 mm, inside diameter of 47 mm, and width of 3.5 mm, performing the high speed welding of lap joints in the (2+1) mm thickness of polymer material. When pressure is 100 N, laser power is 800 W and irradiation time is 0.6 s, the tensile-shear strength of the polymer material joint with laser welding is approaching to the base metal, whose fracture of the stretching pieces is appeared in the base metal (TPV-elastomer).

**Key words** materials; fiber laser; optical head of ring laser beam; polymer material; axi-cone lens; lap joints

**OCIS codes** 160.5470; 140.3390; 350.3850

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 辽宁省科技创新重大专项计划(201411004)

作者简介: 徐国建(1959—),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺及成套加工设备方面的研究。

E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

\*通信联系人。E-mail: 876502407@qq.com

## 1 引言

高分子材料是金属和玻璃的良好替代品,在工业领域中应用日趋广泛。如汽车业、电子产品、包装业及医疗器械等诸多产业中都离不开各种工程高分子材料<sup>[1]</sup>。由于采用激光透射焊接技术对热塑性高分子材料进行焊接具有许多优点<sup>[2-6]</sup>,如表面成型质量好,能形成精密、牢固和密封的焊缝,树脂降解少,产生的碎屑少,不会产生污染等,近年来,得到迅速发展和产业化。国外已经开始将塑料激光焊接应用于汽车、电子和医疗等行业,如日本丰田公司现已采用多关节机器人组合的光纤激光器进行批量生产PA6高分子材料进气歧管,取代了以往的螺栓连接方式,减小了进气歧管的体积和重量,提高了其生产效率;奔驰公司将激光焊接应用于制造汽车的电子开门器,提高了外形和焊接接头质量及生产效率。

传统焊接方法中,采用激光头旋转或工作台旋转的方式,对环形焊缝沿周线旋转焊接。而关于环形焊缝的激光同步焊接方法,国内外还没有相关报导。总之,目前国内外研究主要集中在焊接工艺参数对焊接质量的影响,研究表明,激光的光强分布<sup>[7-10]</sup>、焊接速度<sup>[11-12]</sup>、透光焊接件的光学性能<sup>[13]</sup>及吸光剂<sup>[14]</sup>是影响结合质量的主要因素。

本文利用光纤激光研究了环形激光束的形成原理,设计出能产生环形激光束的激光焊接头,研究了不同激光功率和辐照时间对拉伸剪切强度的影响,确定了TPV-弹性体和PP-聚丙烯的最佳工艺参数,实现了高分子材料环形焊缝超高速同步焊接,提高了生产效率和焊接质量。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料及设备

内部(黄色)高分子材料(TPV-弹性体)为透射激光高分子材料,其外缘厚度为2 mm,内缘厚度为3 mm。外部(黑色)高分子材料(PP-聚丙烯)为吸收激光高分子材料,其外缘厚度为3 mm及内缘厚度为1 mm。其搭接部分厚度为(2+1) mm。

环形激光束试验系统示意图如图1所示,该试验系统由光纤激光器(2.0 kW)、环形激光焊接头、水冷机、光束测量仪及焊接工装夹具等组成。工装夹具部分由工作台、热塑性激光吸收材料、热塑性激光透射材料、高强螺栓和垫圈及激光透射压板组成。用光束测量仪测量了环形激光束的轮廓,并由JIS标准确定了激光束直径,即光束强度为最大光束强度的 $1/e^2$ 时对应的直径被定义为光束直径。

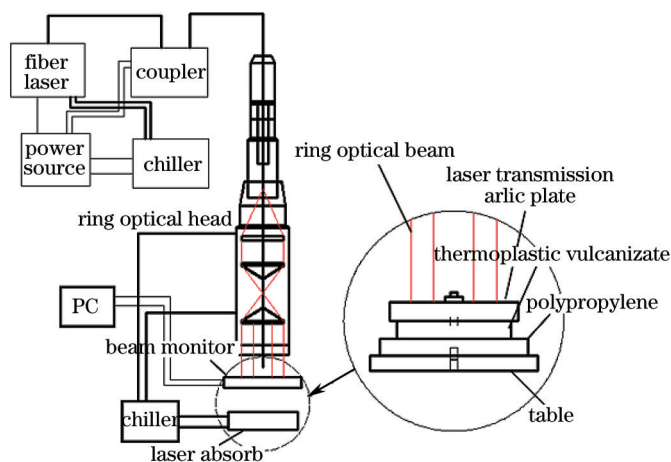


图1 环形激光束试验系统示意图

Fig.1 Schematic of ring laser beam experimental equipment

### 2.2 环形激光束形成原理

环形激光束的形成原理如图2所示。该原理图包括一枚准直镜,第一枚圆锥透镜、第二枚圆锥透镜,第一枚和第二枚圆锥透镜的顶角均为 $110^\circ$ ,直径均为50 mm。各符号的含义: $f$ 为准直镜的焦距(分别为 $f=60$  mm和 $f=80$  mm)、 $N_A$ 为激光束的数值孔径(0.11 rad), $D$ 为通过准直镜激光束的直径, $2R$ 为通过第二枚圆锥透镜激光束的外径, $2r$ 为通过第二枚圆锥透镜激光束的内径, $H_1$ 和 $H_2$ 为第一枚和第二枚圆锥透镜的厚度(均为

21 mm),  $L_{12}$  为第一枚圆锥透镜和第二枚圆锥透镜之间的距离,  $\theta_1$  为准直后的激光束经过第一枚圆锥透镜的入射角,  $\theta_2$  为经过第一枚圆锥透镜后的折射角, 光学镜片折射率均为 1.46, 空气的折射率为 1.00。

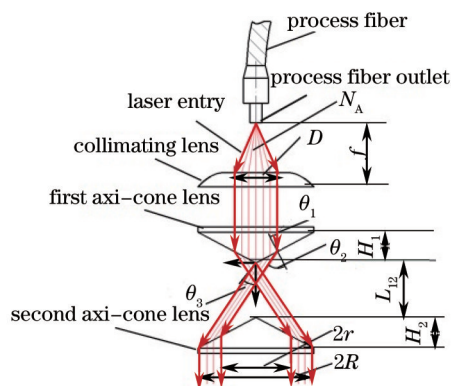


图2 环形激光束的形成原理

Fig.2 Formative principle of ring laser beam

光纤输出端发出的激光束照射到准直镜, 激光束到准直镜的距离为准直镜的焦距, 经过准直镜后, 激光束变为平行光束, 其直径为  $D$ ; 由于第一枚圆锥透镜和第二枚圆锥透镜的顶角均为  $110^\circ$ , 所以穿过准直透镜后的平行光束照射到第一枚圆锥透镜上, 然后折射到第二枚圆锥透镜上, 穿过第二枚圆锥透镜后, 将形成外径为  $2R$  和内径为  $2r$  的环形激光束, 环形激光束的光环宽度为  $R-r$ 。由原理图进一步可知, 随着准直镜焦距的增加, 激光束经过准直镜入射到第一枚圆锥透镜的直径  $D$  增加, 经过两枚顶角相对的圆锥透镜折射后, 导致环形激光束的内径减小, 而外径不变, 从而使环形激光束的光环宽度增加; 随着第一枚圆锥透镜和第二枚圆锥透镜之间距离  $L_{12}$  增加, 环形激光束的外径和内径同时增加, 而环形激光束的光环宽度几乎不变。另外, 由原理图可知, 准直镜、第一枚圆锥透镜及第二枚圆锥透镜的同轴性, 将直接影响到环形激光束强度分布的均匀性。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 环形激光束的特性

当准直镜的焦距  $f$  及第一枚圆锥透镜与第二枚圆锥透镜之间的距离  $L_{12}$  变化时, 环形激光束的分析结果如表 1、图 3 及图 4 所示。分析过程中, 激光输出功率 (300 W) 恒定不变。

光的折射定律如下式所示:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2, \quad (1)$$

式中  $\alpha_1$  为光线的入射角,  $\alpha_2$  为光线的折射角,  $n_1$  为入射光线一侧的折射率,  $n_2$  为折射光线一侧的折射率。

结合图 2, 由下面 4 个式子计算得出  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  及  $\theta_3$ 。

$$n = \frac{n_2}{n_1} = 1.46, \quad (2)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{110^\circ}{2} = 35^\circ, \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 \times n) = 56.869^\circ, \quad (4)$$

$$\theta_3 = \frac{180^\circ - (\theta_1/2) - \theta_2}{2} = 34.06^\circ. \quad (5)$$

然后, 根据正弦定理计算得出不同  $f$  及  $L_{12}$  下的环形激光束尺寸。

由表 1 和图 3 的实际测量值与理论计算值研究分析结果表明, 随着准直镜焦距的增加, 激光束的外径几乎没有变化, 而内径减小, 所以随着准直镜焦距的增加激光束的光环宽度也增加。由试验结果可知, 实际测量值与理论计算值基本吻合。

由表 1 和图 4 的实际测量值与理论计算值研究分析结果表明, 随着间距  $L_{12}$  的增加, 环形激光束的内径和外径同时增加, 而环形激光束的光环宽度几乎不变。由试验结果可知, 实际测量值与理论计算值基本吻合。

表 1 计算和测量所得激光束尺寸对比

Tab 1 Results of calculation and measurement for the ring laser beam profile

Collimate lens /mm	Laser power /W	$L_{12}$ /mm	$2R$ /mm		$2r$ /mm		Width of ring beam /mm	
			Calculation	Measurement	Calculation	Measurement	Calculation	Measurement
f60	300	25	27.9	27.8	14.7	15.2	6.6	6.3
		28	31.3	31.3	18.1	18.7	6.6	6.2
		31	34.6	33.8	21.4	21	6.6	6.4
f80	300	25	27.9	27.3	10.3	9.3	8.8	9
		28	31.3	30.1	13.7	11.1	8.8	9.5
		31	34.6	32.5	17	13.4	8.8	9.5

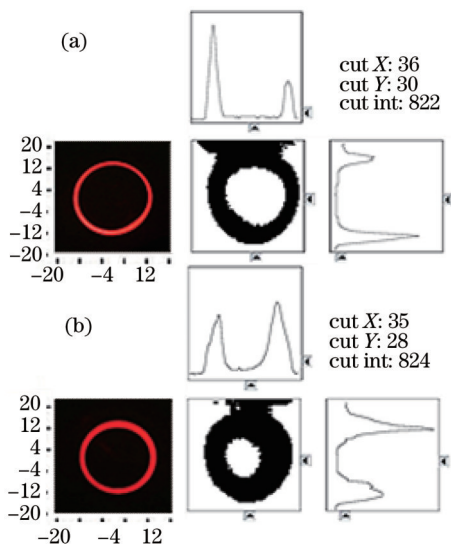


图 3 准直镜焦距对环形激光束的影响( $L_{12}=31$  mm)。

(a)  $f=60$  mm; (b)  $f=80$  mm

Fig.3 Effect of focal length as a collimate on ring laser beam profiles ( $L_{12}=31$  mm). (a)  $f=60$  mm; (b)  $f=80$  mm

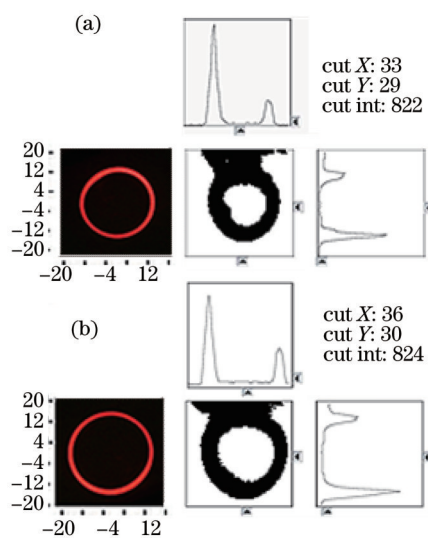


图 4  $L_{12}$ 对环形激光束的影响( $f=60$  mm)。

(a)  $L_{12}=25$  mm; (b)  $L_{12}=31$  mm

Fig.4 Effect of  $L_{12}$  on ring laser beam profiles ( $f=60$  mm).

(a)  $L_{12}=25$  mm; (b)  $L_{12}=31$  mm

### 3.2 环形激光束的强度分布

通过上述的分析可知,环形激光束的强度(能量密度)分布不均匀。造成这一现象的主要原因是由于准直镜、第一枚圆锥透镜及第二枚圆锥透镜的同轴性较差的缘故。通过上述三枚光学镜片的同轴性调节,可获得能量密度分布均匀的环形激光束,其结果如图 5 所示。

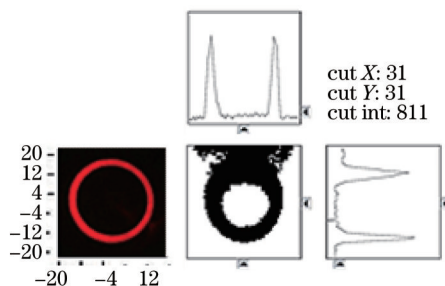


图 5 光学镜片同轴性对环形激光束能量密度分布的影响( $f=60$  mm,  $L_{12}=25$  mm)

Fig.5 Effect of optical lenses coaxiality on the ring laser beam energy density distribution ( $f=60$  mm,  $L_{12}=25$  mm)

### 3.3 高分子材料的超高速激光焊接

高分子材料的激光透射焊接原理,即在一定压力条件下,使透射激光高分子材料和吸收激光高分子材料形成搭接接头。激光束穿过透射激光高分子材料照射到吸收激光高分子材料被加热而熔化,同时由于热传导使与之相接触的透射激光熔化,并且随着照射时间的增加,熔化区逐渐增大,当达到所需的熔核尺寸



时,停止激光束的照射,在压力的继续维持下,在高分子材料的搭接接头的结合面形成了永久性连接。由于焊缝在搭接接头的结合面形成,所以高分子材料的激光焊接表面质量非常好。

将TPV-弹性体和PP-聚丙烯按照如图6所示的方式,形成搭接接头。焊接压力的施加是通过中间有圆孔(直径为6 mm)的透明有机透玻璃板(70 mm×70 mm×4 mm)实现。图6中两条圆线围成的区域为待焊接区域。

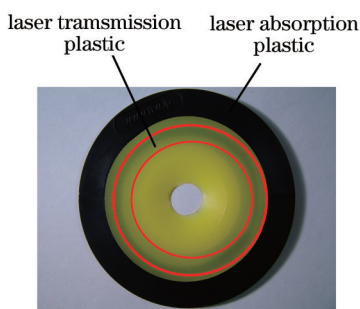


图6 环形焊缝高分子材料搭接接头的外观形貌

Fig.6 Appearance of polymer materials lap joints with a ring form

当焊接压力为 100 N、准直镜焦距为 60 mm、环形激光束的外径为 54 mm、环形激光束的内径为 47 mm 时,激光输出功率和照射时间对焊接质量影响的横断面金相照片如图7所示。由图7可知,当热输入量过低(激光输出功率400 W及激光照射时间0.4 s)时,由于热输入量不足,使得PP-聚丙烯没有充分熔化,热量不能充分传递给TPV-弹性体,两种材料只是通过范德华分子间力结合在一起,所以环形焊缝高分子材料搭接接头结合面积小并且结合不良,如图7(a)所示;当热输入量过高(激光输出功率1200 W及激光照射时间0.4 s)时,在照片中可以看到黑色孔洞,这是由于热输入量过高,导致环形焊缝搭接接头的高分子材料发生裂解,产生气体造成的,如图7(c)所示;当热输入量适当(激光输出功率800 W及激光照射时间0.4 s)时,环形焊缝高分子材料搭接接头结合良好,没有焊接缺陷存在,如图7(b)所示。

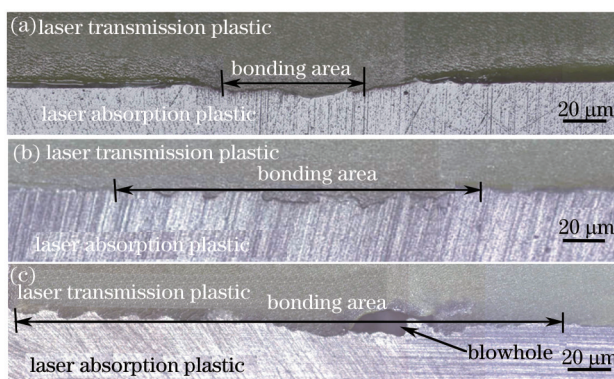


图7 激光输出功率和照射时间对焊接质量影响。(a)热输入量过低(400 W, 0.4 s); (b)热输入量适当(800 W, 0.4 s); (c)热输入量过高(1200 W, 0.4 s)

Fig.7 Effect of laser power and irradiation times on bonding property. (a) Low heat input (400 W, 0.4 s); (b) optimal heat input (800 W, 0.4 s); (c) high-heat input (1200 W, 0.4 s)

当焊接压力为 100 N;激光输出功率为 400~1400 W,激光照射时间为 0.08~0.6 s;准直镜焦距为 60 mm、环形激光束的外径为 54 mm、内径为 47 mm 时,对TPV-弹性体和PP-聚丙烯进行多组激光焊接试验,并将不同焊接工艺下的试验样件沿垂直于环形焊缝方向切割成 10 mm×30 mm 小块,进行拉伸剪切试验。激光输出功率和照射时间对环形焊缝高分子材料搭接接头的拉伸剪切强度如图8所示。由图可知,当激光输出功率为 800 W,激光照射时间为 0.6 s 时,其拉伸剪切强度达到最大值(断裂位置位于TPV-弹性体的母材上,2.4 MPa);当激光输出功率为 1000 W,激光照射时间为 0.08 s 时,其拉伸剪切强度较小(1.0 MPa),断裂位置位于搭接接头的结合面上。

在最大拉伸剪切强度时环形焊缝高分子材料搭接接头的横断面如图9所示。由图可知,两种高分子材料很好地熔合在一起,熔合线处产生了高低不平的现象。这也是由于两种高分子材料在适合温度下被激

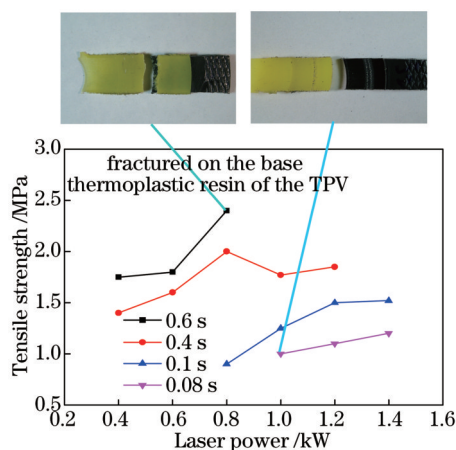


图8 激光输出功率和照射时间对拉伸剪切强度的影响

Fig.8 Effect of laser power and irradiation times on tensile-shear strength

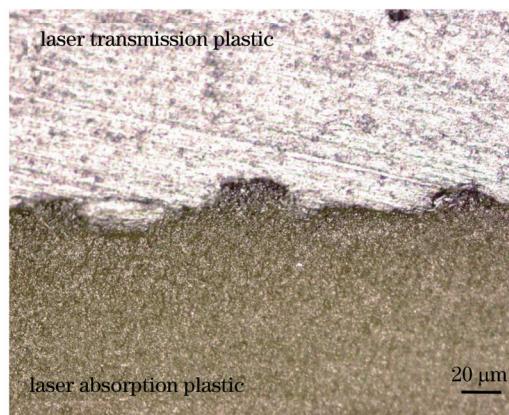


图9 高分子材料搭接接头的微观横断面

Fig.9 Micro-photograph section of polymer materials for lap joints

励,在焊接压力的作用下,导致两种高分子材料分子发生相互扩散,形成了化学键,紧密接合在一起。

## 4 结 论

1) 利用光纤激光和光学整形系统,形成了环形激光束。随着准直镜焦距的增加,环形激光束的外径不变,而内径减小,从而使环形激光束的光环宽度增加;随着第一枚圆锥透镜和第二枚圆锥透镜之间距离  $L_{12}$  增加,环形激光束的外径和内径同时增加,而环形激光束的光环宽度几乎不变。另外,通过准直镜、第一枚圆锥透镜及第二枚圆锥透镜的同轴性调节,可改善环形激光束强度分布的不均匀性。

2) 当焊接压力为 100 N,准直镜焦距为 60 mm、环形激光束的外径为 54 mm 及环形激光束的内径为 47 mm,激光输出功率为 800 W,激光照射时间为 0.6 s 时,对厚度为 1~2 mm 的高分子材料(TPV-弹性体+PP-聚丙烯)环形焊缝搭接接头进行了超高速同步焊接,其搭接接头的拉伸剪切强度达 2.4 MPa,且拉伸剪切断口位于 TPV-弹性体的母材上。

## 参 考 文 献

- 1 Acherjee B, Misra D, Bose D, *et al.*. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(8): 956-967.
- 2 Chen Yanbin. Modern Laser Welding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 64-65.  
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 64-65.
- 3 Kagan V A, Pinho G P. Laser transmission welding of semicrystalline thermoplastic-Part II: Analysis of mechanical performance of welded nylon[J]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 2004, 23(1): 95-107.
- 4 Haberstroh E, Lutzeler R. Influence of carbon black pigmentation on the laser beam welding of plastics micro parts[J]. Journal of Polymer Engineering, 2001, 21(2-3): 119-130.
- 5 Anon J. Additives aid laser welding[J]. Plastic, Additives and Compounding, 2005, 7(1): 34-35.
- 6 Wang Hailing, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou, *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(5): 463-466.  
王海林, 黄维玲, 周卓尤, 等. 8 mm 厚不锈钢板的 Nd:YAG 激光焊接[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 463-466.
- 7 Wei Hong, Wang Chuanyang. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103003.  
韦 宏, 王传洋. 聚碳酸酯激光透射焊接工艺及性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103003.
- 8 Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.*. Research on the properties of through-transmission laser welding of polycarbonate [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703001.  
张 卫, 张庆茂, 郭 亮, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703001.
- 9 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guoming, *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 466-471.

- 王 霄, 张惠中, 丁国民, 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 466-471.
- 10 Kritskiy A. Laser welding of nylon tubes to plates using conical mirrors[C]. ANTEC, 2009: 1289-1294.
- 11 Ussing T, Petersen L V, Nielsen C B, *et al.*. Micro laser welding of polymer microstructure using low power laser diodes[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2007, 33(1-2): 198-205.
- 12 Wang X, Zhang C, Wang K, *et al.*. Multi-objective optimization of laser transmission joining of thermoplastics[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(8): 2393-2402.
- 13 Geriger M, Frick T, Schmidt M. Optical properties of plastics and their role for the modelling of the laser transmission welding process [J]. Production Engineering, 2009, 3(1): 49-55.
- 14 This N I R. Additives aid laser welding[J]. Plastics, Additives, Compounding, 2005, 7(1): 34-35.

栏目编辑: 张浩佳