

文章编号: 1001-3806(2016)05-0716-06

## 激光透射焊接尼龙66光学属性研究

刘伟, 孟冬冬, 范彩莲, 李品, 蔡野, 伍彦伟, 刘会霞\*

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了揭示激光与聚合物之间的相互作用机理,以尼龙66(PA66)为研究对象,采用刀刃法分析了半导体激光器的激光功率通量分布,采用紫外-可见-近红外分光光度计测量了PA66和质量分数为0.3的玻纤增强尼龙66(PA66GF30)的光学参量,分析了材料厚度及玻纤增强剂对PA66的透射率、反射率和吸收率的影响。通过非接触线扫描实验和数学模型研究了材料厚度及玻纤增强剂对PA66光散射的影响,确定了激光透过PA66和PA66GF30后的激光功率通量分布。结果表明,PA66的透射率随着厚度的增加而减小,反射率、吸收率随着厚度的增加而增大,光散射随着厚度的增加而增大;加入玻纤时,透射率明显减小,反射率稍有增大,吸收率和光散射均明显增大。此研究对确定不同厚度热塑性塑料的光散射参量以及数值模拟在激光透射焊接中的更广泛应用是有帮助的。

**关键词:** 激光光学;光学属性;激光透射焊接;光束功率通量;尼龙;光散射

**中图分类号:** TG456.7;TQ323.6 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.020

### Research of optical properties of nylon 66 in laser transmission welding

LIU Wei, MENG Dongdong, FAN Cailian, LI Pin, CAI Ye, WU Yanwei, LIU Huixia

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

**Abstract:** In order to reveal the interaction mechanism between laser and polymer, the beam profile of diode laser was analyzed by knife-edge method through using nylon 66 (PA66) as research object. The optical properties of PA66, glass fiber reinforced nylon 66 (PA66GF30) (mass fraction of 0.3) were measured by ultraviolet-visible-near-infrared spectrophotometer. The effects of thickness and glass fiber on transmittance, reflectance and absorbance were analyzed. The effects of thickness and glass fiber on light scattering of PA66 were studied by the combination of line scanning method and mathematical model. The laser power flux distribution at the weld interface after passing through PA66, PA66GF30 was determined. The experimental results indicate that the transmittance of PA66 decreases with thickness. The reflectance and absorbance increases with thickness and light scattering increases with thickness. When glass fiber is added, transmittance decreases heavily, the reflectance increases slightly and the absorbance and light scattering increase significantly. This study is helpful for determining the light scattering parameters of different thickness of thermoplastic plastics and has the more widely application of numerical simulation in laser transmission welding.

**Key words:** laser optics; optical property; laser transmission welding; beam profile; nylon; light scattering

## 引言

激光透射焊接在汽车、医学装置、电气和航空航天等领域应用广泛。对于半结晶聚合物的激光透射焊接而言,半结晶聚合物的结晶结构、聚合物中的常见增强剂如玻纤、碳纤等会明显改变透过上层材料后的光束功率通量分布<sup>[1-4]</sup>,进而影响热塑性塑料的激光透射焊接性能;除此之外,准确的激光透射焊接数值模拟,也

要求透过上层材料后的光束功率通量分布已知。因此,研究聚合物的光学属性,有助于更好地揭示激光与聚合物的相互作用机理,同时也可以为激光透射焊接数值模拟奠定基础。

尼龙具有较高的使用温度,兼具韧性、刚度和自润滑性等优良性能,在玻纤增强后具有更高的机械强度、韧性和更好的尺寸稳定性,广泛应用于汽车工业中<sup>[5-10]</sup>。本研究中选用尼龙66 (polyamide-66, PA66)、质量分数为0.3的玻纤增强尼龙66 (PA66GF30)为实验材料,首先采用刀刃法分析半导体激光器的光束特性,确定激光束的归一化功率通量分布;然后通过紫外-可见-近红外分光光度计测量不同厚度PA66和PA66GF30的透射率、反射率,确定材料的吸收率,分析材料厚度、玻纤增强剂对透射率、反射率和吸收率的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275219);江苏省高校自然科学基金面上基金资助项目(14KJB460006)

作者简介:刘伟(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光透射焊接数值模拟与实验研究。

\* 通讯联系人。E-mail:liuweiwei2964@163.com

收稿日期:2015-05-07;收到修改稿日期:2015-07-16

影响;最后将非接触线扫描实验和数学模型相结合来研究 PA66 和 PA66GF30 的光散射现象,确定 PA66 和 PA66GF30 的光散射系数及光散射标准差,揭示材料厚度及玻纤增强剂对材料光散射的影响,并确定激光束穿过上层材料后在焊接界面处的光束功率通量分布。

## 1 实验

### 1.1 实验材料和仪器设备

本实验中所用的材料均由母材颗粒注塑成型,上层材料为 PA66 (Zytel 101L NC010) 和 PA66GF30 (70G30HSL),下层材料为炭黑质量分数为 0.002 的 PA66 (Zytel 101L NC010)。实验材料尺寸如下:本色 PA66 为 20mm × 50mm × 2mm, 20mm × 50mm × 2.5mm;本色 PA66GF30 为 20mm × 50mm × 2mm;黑色 PA66 为 20mm × 50mm × 2.5mm。

实验中所用激光器为 DILAS Compact 130/400 型半导体连续激光器,最大输出功率 130W,输出波长为 980nm ± 10nm。主要测量仪器为 Gentec-EO 激光功率计、Cary 5000 紫外-可见-近红外分光光度计和基恩士超景深显微镜 VHX-1000C。

### 1.2 实验方法

光束分析主要是确定光束横截面方向的功率通量分布,常用的激光束分析方法有非电子测量法和电子测量法<sup>[11-13]</sup>。其中,电子测量法中的刀刃法操作简便、价格低廉,因此本研究选用刀刃法来进行分析。

刀刃法是在激光束下沿一个固定方向、按照一定的步距移动刀刃,记录激光束从被刀片全部挡住到完全显现过程中对应的激光功率,并通过计算得到激光束沿该方向的归一化功率通量分布(normalized power flux distribution, NPDF)<sup>[14]</sup>,其示意图如图 1 所示。作者假设激光束沿 x 方向和 y 方向分布相同,因此只测量激光束沿 y 方向的归一化功率通量分布;刀刃每次沿 y 方向移动 0.1 mm,依次记录每一步下的激光功

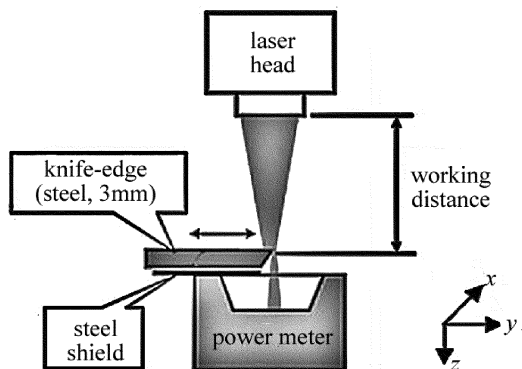


Fig. 1 Schematic of knife-edge method

率,用于计算对应位置的功率通量值。本文中测量工作距离 (working distance, WD)  $d = 117\text{mm}$  处的激光分布,其中工作距离定义为激光头镜头末端到工件上表面的距离。

采用美国 Varian 公司的 Cary 5000 紫外-可见-近红外分光光度计测量 3 种上层透光材料: 2mm PA66, 2.5mm PA66, 2mm PA66GF30 的透射率  $T$ 、反射率  $R$ 。其中,透射率定义为穿过材料后的激光功率与激光输入功率的比值,反射率定义为反射激光功率与激光输入功率的比值。基于透射率和反射率的测量数据,可得到吸收率  $A$ :

$$A = 1 - T - R \quad (1)$$

非接触式线扫描法用于测量激光束穿过上层材料后在焊接界面处的功率通量分布<sup>[15]</sup>,也为评价上层材料的光散射提供数据基础,原理如图 2 所示。激光束沿  $x$  方向扫描时,通过下式即可计算激光束穿过上层材料后  $y$  方向的归一化功率通量  $\Psi^*$ :

$$\Psi^* \left( \frac{w_k}{2} \right) = \frac{P_0 \Psi^* (0)}{P_k} \quad (2)$$

式中  $P_0$  是激光吸收材料上表面开始融化时的功率(临界功率),  $P_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 是激光功率,  $w_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 是设定激光功率下扫描线的宽度,  $\Psi^* (0)$  是激光束穿过上层材料后中心位置的功率通量,  $\Psi^* \left( \frac{w_k}{2} \right)$  是在给定激光功率  $P_k$  下激光束穿过上层材料后在融化区域边界的功率通量。计算出  $\Psi^* \left( \frac{w_k}{2} \right)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 后,即可知道激光束穿过上层材料后的归一化功率通量分布。

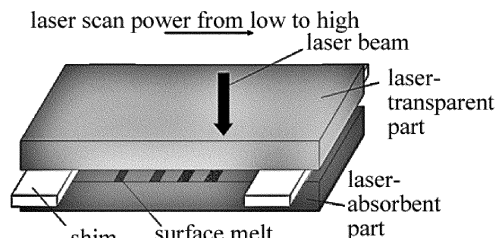


Fig. 2 Schematic of experimental principle

综合考虑上层材料的光学性能、激光器的最大功率和下层材料的物理化学特性,实验工艺参量如表 1

Table 1 Process parameters of line scanning experiments

the upper polymer	the lower polymer	power range/ W	laser scan speed/ (mm · s <sup>-1</sup> )	line energy range/ (J · mm <sup>-1</sup> )
2mm PA66	2.5mm PA66	12 ~ 43	25	0.48 ~ 1.72
2.5mm PA66	(mass fraction of carbon black of 0.002)	17 ~ 53	25	0.68 ~ 2.12
2mm PA66GF30		28 ~ 60	10	2.8 ~ 6

所示。

在每一组工艺参量下,非接触线扫描实验重复3次。实验结束后,用基恩士超景深显微镜 VHX-1000C 测量功率  $P_k (k=1,2,\dots,n)$  对应的下层材料上两条边界线的距离  $w_k (k=1,2,\dots,n)$ ,最后的熔宽  $w_k$  为3次测量数据的平均值。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 激光器光束分析

实验中所用半导体激光器在工作距离  $d=117\text{mm}$  时  $y$  方向的归一化光束功率通量分布曲线(用高斯函数拟合得到)如图3所示。

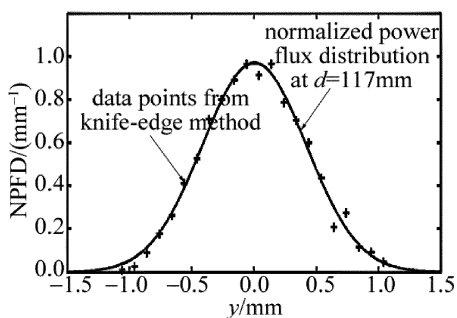


Fig. 3 Normalized power flux distribution along  $y$ -axis of the laser

### 2.2 材料的透射率、反射率和吸收率

上层材料在波长  $980\text{nm}$  下的透射率如表2所示。结果表明,PA66的透射率随着材料厚度的增加而减小,玻纤增强剂极大地降低了透射率;在波长为  $980\text{nm}$  时,材料厚度增加  $0.5\text{mm}$ ,PA66的透射率由  $32.12\%$  降为  $71.7\%$ ,在PA66中加入质量分数为  $0.3$  的玻纤时,透射率由  $82.12\%$  减小为  $35.46\%$ 。

Table 2 Transmittance

polymer	thickness/mm	transmittance/%
PA66	2	82.12
PA66	2.5	71.70
PA66GF30	2	35.46

上层材料在波长  $980\text{nm}$  下的反射率如表3所示。结果表明,PA66的反射率随着材料厚度的增加而增大,玻纤增强剂增大了反射率;在波长为  $980\text{nm}$  时,材料的厚度增加  $0.5\text{mm}$ ,PA66的反射率由  $7.33\%$  增加到  $16.22\%$ ,在PA66中加入质量分数为  $0.3$  的玻纤时,反射率由  $7.33\%$  增大为  $20.25\%$ 。

Table 3 Reflectance

polymer	thickness/mm	reflectance/%
PA66	2	7.33
PA66	2.5	16.22
PA66GF30	2	20.25

上层材料在波长  $980\text{nm}$  下的吸收率如表4所示。

Table 4 Absorbance

polymer	thickness/mm	absorbance/%
PA66	2	10.55
PA66	2.5	12.08
PA66GF30	2	44.29

结果表明,PA66的吸收率随着材料厚度的增加而稍有增大,当加入玻纤增强剂时,材料的吸收率明显增大;在波长为  $980\text{nm}$  时,材料的厚度增加  $0.5\text{mm}$ ,PA66的吸收率由  $10.55\%$  增加到  $12.08\%$ ,在PA66中加入质量分数为  $0.3$  的玻纤时,吸收率由  $10.55\%$  增大为  $44.29\%$ 。

### 2.3 材料的光散射

2.3.1 非接触线扫描实验结果 当上层材料为  $2\text{mm}$  PA66,  $2.5\text{mm}$  PA66 和  $2\text{mm}$  PA66GF30 时,线扫描实验结果分别如图4和图5所示。从图4和图5可以看出,实验材料的临界功率分别为  $12\text{W}$ ,  $17\text{W}$  和  $28\text{W}$ ;随着激光功率的增加,下层材料上表面宽度从零开始逐渐增加。从图4可以看出,在任意给定激光功率下,上层材料为  $2\text{mm}$  PA66 时对应的熔宽较大,这是因为  $2\text{mm}$  PA66 的透射率较高,光散射性较弱,使得激光穿过上层材料后的光束功率通量值较大,进而使得熔宽较大。

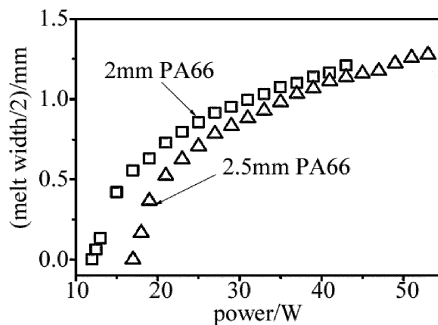


Fig. 4 Half of melt-width with the changing of laser power-PA66

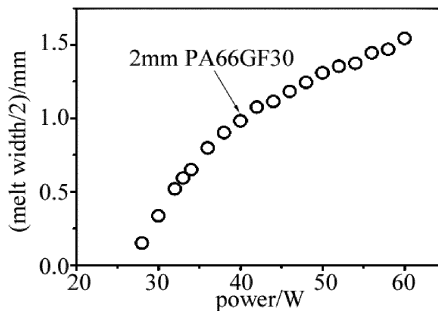


Fig. 5 Half of melt-width with the changing of laser power-PA66GF30

由于实验激光器最大功率的限制,对于  $2\text{mm}$  PA66GF30,扫描速率为  $10\text{mm/s}$ 。尽管扫描速率小,此时的临界功率仍为3种材料中的最大值,部分原因是加玻纤后PA66的透射率减小、吸收率增大,部分原因是玻纤增强剂增大了PA66的光散射,使激光束穿过

2mm PA66GF30 后的光束功率通量值大大减小。

通过非接触线扫描实验可以得出焊接界面处光束的横向能量密度分布,如图 6 所示。和激光器初始的归一化光束功率通量分布(见图 3)相比,穿过上层材料后的光束功率通量分布均变宽,且随着 PA66 厚度的增加、玻纤的加入,分布更宽。这主要是材料的光散射引起的:一方面,散射增加了光束的路线长度,引起上层材料吸收更多激光能量,使得到达下层材料上表面的激光能量减小;另一方面,散射使焊接界面处的激光束横截面面积变大。减少的激光能量和增大的光束横截面面积使得焊接界面处的功率通量减小、功率通量分布变宽。从非接触线扫描实验结果也可以看出,对于 PA66 而言,光散射随着厚度的增加和玻纤增强剂的加入而明显加剧。

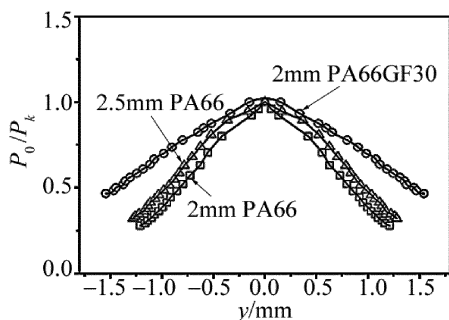


Fig. 6 Weld line transverse energy density distribution at the weld interface

2.3.2 模型拟合得到光散射参量 将激光束离轴为直接光和散射光的半经验数学模型可以用于精确估算激光束穿过上层材料后的归一化功率通量分布<sup>[16-18]</sup>。和图 6 相比,由该模型得出的光束功率通量分布更完整连续和准确。在非接触线扫描实验基础上,通过编写 MATLAB 程序得到上层材料的光散射参量值,数学模型如下所示:

$$\Psi^*(y) = (1 - \delta) \Psi(y) + \sum \delta \Psi(y_i) W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y - y_i)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

式中,  $y_i$  是第  $i$  个点光束中心的纵坐标值;  $\Psi(y)$  和  $\Psi(y_i)$  是原始激光束在纵坐标  $y$  和  $y_i$  的功率通量;  $W_i$  是每一个点光束的宽度,  $W_i = 0.1\text{mm}$ ;  $\delta$  是散射系数;  $\sigma$  是散射标准差。

评价 PA66 和 PA66GF30 的光散射,就必须确定散射系数  $\delta$  和散射标准差  $\sigma$ 。在(3)式中令  $y = \frac{w_k}{2}$ ,再综合(2)式可得:

$$\frac{P_k}{P_0} \frac{1}{\Psi^*(0)} \left\{ (1 - \delta) \Psi\left(\frac{w_k}{2}\right) + \sum \delta \Psi(y_i) W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(w_k/2 - y_i)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} = 1 \quad (4)$$

MATLAB 中,(3)式可表达为下面的隐式方程:

$$f\left[\delta, \sigma, \frac{1}{\Psi^*(0)}\right] = g\left[P_0, P_k, \frac{w_k}{2}, y_i, \Psi(y_i), \Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)\right] \quad (5)$$

在(5)式中,  $P_0, P_k, \frac{w_k}{2}, y_i, \Psi(y_i)$  和  $\Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)$  可以通过实验测量获得,从刀刃法的实验数据结果可知  $\Psi(y_i)$ ,  $\Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)$  的值,从非接触式线扫描实验结果可知  $P_0, P_k$  和  $\frac{w_k}{2}$  的值,  $y_i$  为点光束的纵坐标值。通过编写 MATLAB 程序,可拟合得到  $\frac{1}{\Psi^*(0)}, \delta, \sigma$  的值。

具体程序算法如下所示:(1)将数据值  $P_0, P_k, \frac{w_k}{2}$ ,

$y_i, \Psi(y_i)$  和  $\Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)$  按顺序输入到 Excel 表格中,将该 Excel 表格存放在 MATLAB 的 work 文件夹中;(2)导入 Excel 表格数据,并将数据值赋给矩阵 data 1;(3)确定扫描次数  $k$  和分离的点光束总数  $i$ ;(4)对任意扫描

线  $k$  下的所有点光束计算出  $\frac{-\left(\frac{w_k}{2} - y_i\right)^2}{2}$ ,并将数据结果按顺序存入 data 1 中;(5)预设置大量连续的

$\Psi^*(0), \delta, \sigma$  值,在其任意值下对于每一条扫描线  $k$ 、每一个点光束  $i$  计算出  $\delta W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$  及

$\exp\left[-\frac{(w_k/2 - y_i)^2}{2\sigma^2}\right]$ ,由于  $\Psi(y_i)$  和  $\Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)$  已知,因而可以

计算出  $\sum \delta \Psi(y_i) W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(w_k/2 - y_i)^2}{2\sigma^2}\right]$  和  $(1 -$

$\delta) \Psi\left(\frac{w_k}{2}\right)$ ;(6)以上两部分都计算出来后,即可得出:

$\frac{1}{\Psi^*(0)} \left\{ (1 - \delta) \Psi\left(\frac{w_k}{2}\right) + \sum \delta \Psi(y_i) W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(w_k/2 - y_i)^2}{2\sigma^2}\right] \right\}$ ;(7)计算线扫描实验测量的功率比

$\frac{P_0}{P_k}$ 与数据计算功率比  $\frac{1}{\Psi^*(0)} \left\{ (1 - \delta) \Psi\left(\frac{w_k}{2}\right) + \sum \delta \Psi(y_i) \times$

$W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(w_k/2 - y_i)^2}{2\sigma^2}\right] \right\}$  的差的平方和  $S$ ,取使  $S$  最小的  $\Psi^*(0), \delta, \sigma$  值为最后确定值。

程序拟合出的光散射参量如表 5 所示,3 种材料的光散射系数分别为 0.65, 0.72 和 0.91,表明 PA66 的光散射系数随着材料厚度的增加而增大,玻纤增强

Table 5 Scattering parameters

the upper polymer	$\sigma$	$\delta$	$\frac{1}{\Psi^*(0)}$	$D^2$
2mm PA66	0.93	0.65	1.6578	0.99
2.5mm PA66	1.098	0.72	1.8248	0.998
2mm PA66GF30	1.26	0.91	2.23	0.9977

剂的加入明显增大了 PA66 的光散射系数。式中,  $D^2$  表示拟合系数。

### 2.4 激光穿过 PA66 和 PA66GF30 后的光束分析

基于光束分析及光散射研究, (4) 式中各个参量均已求出, 因而可通过 (4) 式得到激光束穿过 PA66, PA66GF30 后在焊接界面处的归一化功率通量分布  $\Psi^*(y)$ , 初始激光束归一化功率通量分布  $\Psi(y)$  与穿过 3 种上层材料后的光束功率通量分布  $\Psi^*(y)$  的对比图分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

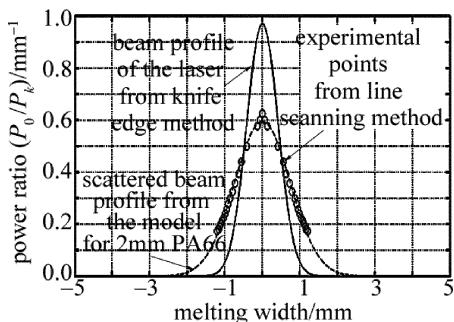


Fig. 7 Normalized power flux distribution along  $y$ -direction after the laser passes through 2mm PA66

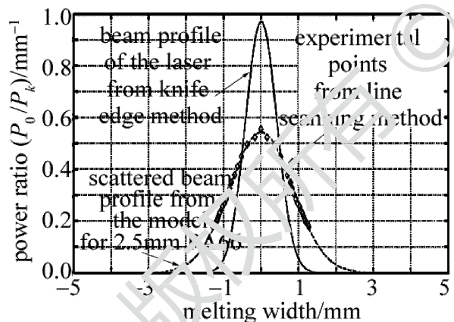


Fig. 8 Normalized power flux distribution along  $y$ -direction after the laser passes through 2.5mm PA66

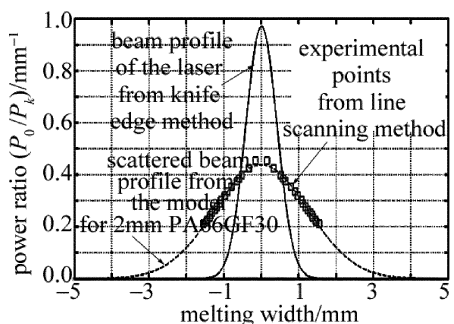


Fig. 9 Normalized power flux distribution along  $y$ -direction after the laser passes through 2mm PA66GF30

激光穿过结晶型聚合物、玻纤增强型聚合物后光

束功率通量值变小、分布曲线变宽, 透射光束的光斑直径变大。对于不同厚度的 PA66 而言, 随着厚度的增加, 激光束散射现象愈明显; 对于相同厚度的 PA66 和 PA66GF30, 玻纤增强剂极大地增强了光散射, 使光束功率通量分布曲线变宽。

### 3 结论

(1) 对于 PA66 而言, 透射率随着材料厚度的增加而减小, 加入玻纤增强剂使得材料的透射率减小更加明显; 反射率随着材料厚度的增加而增大, 玻纤增强剂进一步增大了反射率; 吸收率随着材料厚度的增加而缓慢增大, 玻纤增强型 PA66 的吸收率较高。

(2) 通过非接触线扫描实验和数学模型相结合, 确定了 3 种材料的光散射参量; PA66 的光散射系数随着材料厚度的增加而增大, 玻纤增强剂进一步增强了光散射; 玻纤增强型 PA66 的光散射极大, 散射系数高达 0.91。

(3) 实验中所用半导体激光器的光束功率通量分布近似为高斯分布; 确定了激光透过 2mm PA66, 2.5mm PA66 和 2mm PA66GF30 后在焊接界面的功率通量分布。

### 参考文献

- [1] KAGAN V A, BRAY R G, KUHN W P. Laser transmission welding of semi-crystalline thermoplastics—Part I: optical characterization of nylon based plastics [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(12):1101-1122.
- [2] GREWELL D, ROONEY P, KAGAN V A. Relationship between optical properties and optimized processing parameters for through-transmission laser welding of thermoplastics [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(3):239-247.
- [3] JIANG T. The experimental study and numerical simulation of laser transmission welded fiber reinforced nylon [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013:15-19 (in Chinese).
- [4] YANG K, WANG X, ZHANG H Zh, et al. Influence of additive on welding quality of laser transmission welding plastics [J]. Laser Technology, 2009, 33(3):246-248 (in Chinese).
- [5] WANG Y H. The development of polyamide engineering plastics [J]. Engineering Plastics Application, 1993, 21(2):52-56 (in Chinese).
- [6] HAN X M. The development situation at home and abroad, application of automotive nylon [J]. Technology Innovation and Application, 2012(24):78 (in Chinese).
- [7] REN N F, LUO Y, XU M L, et al. Effect of laser energy density on the dimension of nylon12/HDPE product [J]. Laser Technology, 2010, 34(4):561-564 (in Chinese).
- [8] PAGE I B. Polyamides as engineering thermoplastic materials [M]. London, UK: Rapra Technology Limited, 2000:24-28.
- [9] KOHAN M I. Nylon plastics handbook [M]. New York, USA: Hanser/Gardner Publications, 1995:16-19.
- [10] SAHYOUN J, BOUNOR-LEGARÉ V, FERRY L, et al. Influence of organophosphorous silica precursor on the thermal and fire behaviour of a PA66/PA6 copolymer [J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 115(24):117-128.

- [11] GREEN L. Pitfalls of beam profiling[J]. SPIE Newsroom,2002,2(3):48-51.
- [12] ZHANG J, HUANG L, WANG D S, *et al.* Study on characteristics of output beam of combined optical diode lasers[J]. Laser Technology, 2007, 31(3):228-231 (in Chinese).
- [13] WANG C Y, BATES P J, ZAK G. Optical properties characterization of thermoplastics used in laser transmission welding: transmittance and reflectance[C]//Proceeding of ANTEC'2010. New York, USA: ANTEC,2010:1278-1282.
- [14] MAYBOUDI L S, CHEN M, ZAK G. Characterization of beam profile for high-power diode lasers with application to laser welding of polymers[C]//Proceeding of ANTEC'2006. New York, USA: ANTEC,2006:2274-2276.
- [15] ZAK G, MAYBOUDI L S, CHEN M, *et al.* Weld line transverse energy density distribution measurement in laser transmission welding of thermoplastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1):24-31.
- [16] CHEN M, ZAK G, BATES P J. Description of transmitted energy during laser transmission welding of polymers [J]. Weld World, 2013, 57(2):171-178.
- [17] LINGESH B V, RUDRESH B M, RAVIKUMAR B N. Effect of short glass fibers on mechanical properties of polyamide66 and polypropylene (PA66/PP) thermoplastic blend composites[J]. Procedia Materials Science, 2014, 5(7):1231-1240.
- [18] SILVA L, TOGNANA S, SALGUEIRO W. Study of the water absorption and its influence on the Young's modulus in a commercial polyamide[J]. Polym Test,2013,32(1):158-164.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©