

# 基于三维真实表面的激光透射焊接聚碳酸酯 工艺研究与数值模拟

姜宁, 王传洋

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 研究了激光透射焊接聚碳酸酯工艺,从断口形貌及材料吸光率两个方面探究了焊接质量与表面粗糙度的关系。基于 Weierstrass-Mandelbrot 函数与实测点数据,构建了三维真实表面模型,进行了单板焊接温度场的数值模拟。实验结果表明,随着试件表面粗糙度的增加,焊接质量下降。模拟结果表明,粗糙表面比光滑表面先到达最高温度,而光滑表面的最高温度高于粗糙表面的;随着焊接速率的增大,焊接温度整体减小,且具有不同粗糙度的表面的温度变化曲线逐渐重合。

**关键词** 激光技术; 激光透射焊接; 三维真实表面; 表面粗糙度; 分形; 温度场

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102003

## Research on Process and Numerical Simulation of Laser Transmission Welding of Polycarbonate Based on Three-Dimensional Real Surface

Jiang Ning, Wang Chuanyang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** The process of laser transmission welding of polycarbonate is studied. The relationship between welding quality and surface roughness is investigated from the perspectives of fracture morphology and material absorptivity. Based on the Weierstrass-Mandelbrot function and measured points data, the three-dimensional real surface model is built and the temperature field numerical simulation of single-board welding is carried out. Experimental results show that, with the increase of the specimen surface roughness, the welding quality deteriorates. Simulation results show that the rough surface reaches peak temperature faster than the smooth surface, while the peak temperature of the smooth surface is higher than that of the rough surface. With the increase of the welding rate, the welding temperature appears an overall decline, and the temperature variation curves of surfaces with different roughness overlap gradually.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; three-dimensional real surface; surface roughness; fractal; temperature field

**OCIS codes** 140.3460; 240.5770; 350.3390

## 1 引言

激光焊接作为一种无接触、节能环保的焊接方法,具有焊速高、热影响区小、无残渣、焊缝变形小等优点,已广泛应用于汽车工业、生物医疗装备制造以及微型机械制造等行业中,并展现出广阔的发展前景。激光透射焊接是焊接塑料的一种重要方法,激光(波长一般为 800~1050 nm)辐照透明试件,在上层试件与下层试件(添加一定量的吸光剂)的结合面处,激光被下层试件吸收并产生热量,使热集中区域的塑料融化,热熔融

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51475315)、上海市科技创新行动计划(15111102802)

作者简介: 姜宁(1990—),男,硕士研究生,主要从事高分子材料焊接方面的研究。E-mail: jiangn\_2014@126.com

导师简介: 王传洋(1972—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事先进制造技术理论及装备设计、高分子材料加工方法及关键技术等方面的研究。E-mail: cywang@suda.edu.cn(通信联系人)

状态下的塑料大分子在键合压力和热膨胀的作用下相互扩散和缠结,产生范德华力并形成强的键合<sup>[1]</sup>。

目前,国内外对激光透射焊接的研究主要集中在两方面:1)对理想表面(即完全接触)的焊接,研究内容包括激光的透过与吸收过程,激光能量吸收介质,焊接工艺参数对焊接质量的影响以及焊接的数值模拟<sup>[2-7]</sup>;2)对粗糙表面(设置间隙或者热阻)的焊接<sup>[8-9]</sup>。研究者们对激光与聚合物材料相互作用机制的研究,主要集中在激光对聚合物焊接后温度场的分析和模拟以及数理模型的建立。虽然这些模型满足了对温度场和焊接熔池的分析需要,但是在建模过程中,均将接触面定义为理想表面,未考虑接触面的真实三维形貌以及实际焊接试件的注塑变形引起的接触面空隙对温度场、应力场和应变场的影响。

本文对不同表面粗糙度的试件进行了光学特性测试与焊接拉伸实验,分析了焊缝断口形貌;基于 W-M (Weierstrass-Mandelbrot)函数与实测数据,构建了三维粗糙表面模型,对单板焊接模型的温度场进行了数值模拟。

## 2 实验研究

### 2.1 实验试件制备及焊接设备

透射焊接实验采用传统的搭接焊形式,试件材料为聚碳酸酯(PC),透光焊接试件尺寸包括 120 mm×30 mm×3 mm,120 mm×30 mm×2 mm 和 120 mm×30 mm×1 mm,吸光焊接试件尺寸均为 120 mm×30 mm×3 mm,透光与吸光 PC 试件的实物如图 1 所示。利用金相试样抛光机和砂纸,在 200 r/min 的加工条件下,对待加工试样表面进行打磨,获得不同粗糙度的焊接表面,6 种不同表面粗糙度的 PC 试件如图 2 所示。利用超声波清洗机对打磨后的试件进行清洗,以除去表面积蓄的碎屑等残留物。利用恒温鼓风干燥箱,在 100 °C 的环境下,对试件干燥 0.5 h,以保证水分完全蒸发。

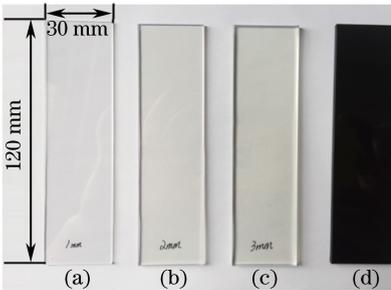


图 1 (a)~(c)透光与(d)吸光 PC 试件的实物图

Fig. 1 Photographs of (a)-(c) light-transmitting and (d) light-absorbing PC specimens

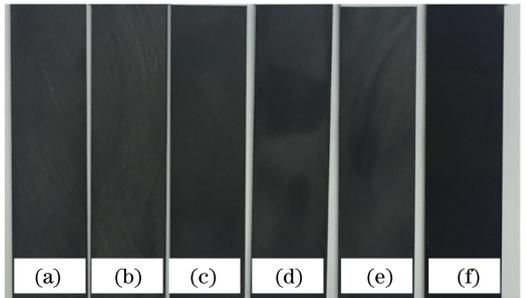


图 2 不同表面粗糙度的 PC 试件。

(a) 1号;(b) 2号;(c) 3号;(d) 4号;(e) 5号;(f) 6号

Fig. 2 PC specimens with different surface roughness. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5; (f) No.6

实验采用深圳大族激光科技有限公司生产的 WFD120 型激光焊接系统,系统主要由半导体激光器、光纤传输系统、准直聚焦系统、工作台,以及工控机等组成。

### 2.2 不同表面粗糙度对焊接强度的影响

当激光功率为 30 W、焊接速率为 15 mm/s、夹紧力为 0.4 MPa、透光试件厚度为 3 mm 时,激光焊接试件的拉断力与吸光试件表面粗糙度的关系如图 3 所示,可以看出,随着表面粗糙度的减小,拉断力逐渐增大。原因主要有以下三方面:1)表面越粗糙,焊接材料之间的间隙越大,这不利于热量传递,导致焊接强度的减小;2)表面越粗糙,激光的反射作用越强,在反射过程中,激光能量的耗散增加;3)非金属对激光的吸收率会随着激光入射角的变化而变化,当入射角为布儒斯特角时,激光的吸收率最大,能量几乎全部被吸收,但由于表面粗糙,凹凸不平的轮廓不可能使全部激光的入射角为布儒斯特角,故激光吸收效率会随着表面粗糙度的增加而减小。

图 4 所示为激光焊接试件的焊缝宽度与吸光试件表面粗糙度的关系,可以看出,随着表面粗糙度的减小,焊缝宽度逐渐增大。除了上文提及的三点原因,表面的凹凸不平也影响了熔融体的流动,进而导致焊缝宽度减小。

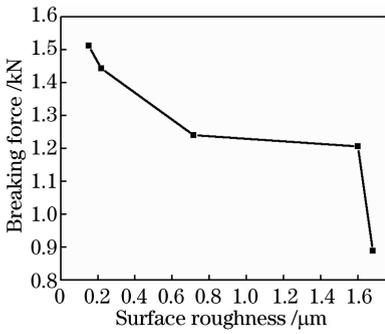


图3 激光焊接试件的拉断力与吸光试件表面粗糙度的关系

Fig. 3 Breaking force of laser welded specimen versus surface roughness of light-absorbing specimen

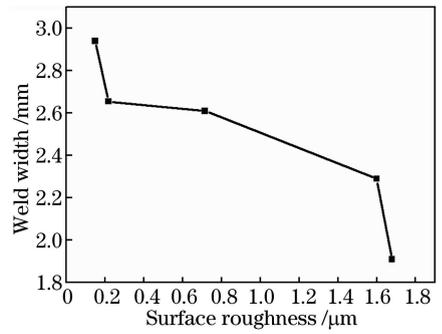


图4 激光焊接试件的焊缝宽度与吸光试件表面粗糙度的关系

Fig. 4 Weld width of laser welded specimen versus surface roughness of light-absorbing specimen

### 2.3 焊缝断口分析

断裂过程主要包括裂纹的产生、慢速扩展及快速扩展三个阶段。根据拉伸实验的载荷状态分析可知,试件的断裂模式为静载断裂,即材料在载荷单调增长的作用下发生形变,直至断裂。从断口的外形及断面的宏观特征可初步判断断裂的性质(脆性或韧性)、断裂源的位置以及断裂的扩展方向。当吸光试件的表面粗糙度为  $1.600 \mu\text{m}$ 、焊接功率为  $30 \text{ W}$ 、焊接速率为  $15 \text{ mm/s}$ 、夹紧力为  $0.5 \text{ MPa}$ 、透光试件的厚度为  $3 \text{ mm}$  时,拉伸实验所得的激光焊接试件断口形貌如图5所示。可以看出,从焊缝中心到边缘,气体孔洞由稀疏逐渐变得密集,这主要是因为当激光快速扫过时,高分子链降解,降解过程中产生的气体向焊缝两端扩散,使上下焊接材料之间产生间隙,这些分布不均匀的间隙使材料在拉伸过程中的应力场出现不平衡,诱导裂纹产生,造成了脆性断裂。

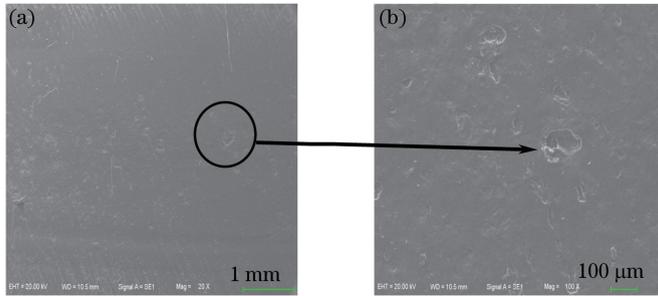


图5 当吸光试件表面粗糙度为  $1.600 \mu\text{m}$  时,激光焊接试件断口放大(a) 20倍和(b) 100倍的形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of laser welded specimen magnified by (a) 20 and (b) 100 times when light-absorbing specimen surface roughness is  $1.600 \mu\text{m}$

当吸光试件的表面粗糙度为  $0.218 \mu\text{m}$ 、焊接功率为  $30 \text{ W}$ 、焊接速率  $15 \text{ mm/s}$ 、夹紧力为  $0.5 \text{ MPa}$ 、透光试件的厚度为  $3 \text{ mm}$  时,拉伸实验所得的激光焊接试件断口形貌如图6所示,其中图6(b)、(c)分别为图6(a)中相应位置的放大图。从图6(b)中可以看出,断口区域存在较多的韧窝,因此该区域内材料表面热效应较低,熔融材料少;从图6(c)中可以看出,在焊缝的中间位置,热解产物粘附在透光材料表面,拉伸过程中产生了翘曲的形貌,断口伴随着明显的塑性变形的延性撕裂特征,故属于准解理裂纹。整体而言,此断口属于脆性与韧性混合型断口。

对比图5,6可知,较为粗糙的表面在激光照射的过程中,更利于降解过程中产生的气体向周边逸散,造成脆性断裂。而光滑表面之间材料的有效接触面积更大,更利于热量的传递,同时加强了分子链之间的交互作用,宏观则表现为焊接强度更大。

### 2.4 不同粗糙度的PC表面吸光率测定

在激光透射焊接过程中,当激光穿过透光试件到达焊接界面时,存在如下关系

$$R_T + A_T + T_T = 1, \quad (1)$$

式中  $A_T$  为吸收率,指材料内部吸收的能量与输入总能量的比值; $R_T$  为反射率,指界面反射的能量与输入总

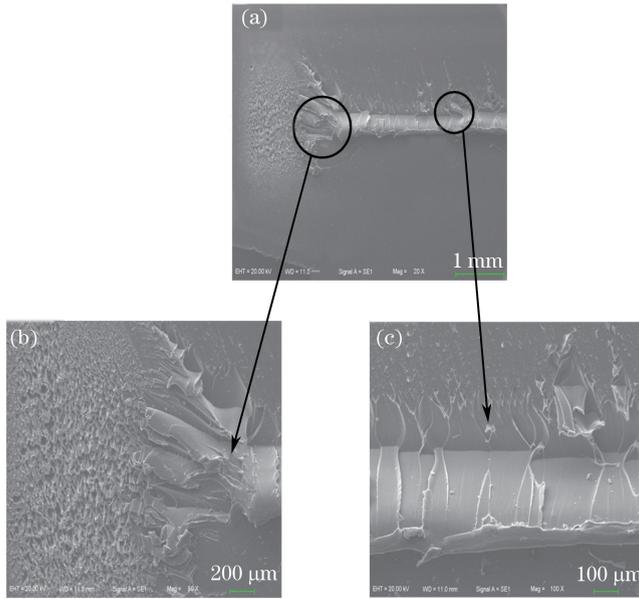


图 6 当吸光试件表面粗糙度为  $0.218 \mu\text{m}$  时,激光焊接试件断口放大(a) 20 倍,(b) 50 倍和(c) 100 倍的形貌  
 Fig. 6 Fracture morphologies of laser welded specimen magnified by (a) 20, (b) 50 and (c) 100 times when light-absorbing specimen surface roughness is  $0.218 \mu\text{m}$

能量的比值;  $T_T$  为透射率,指最终到达交界面的能量与总能量的比值。

不含炭黑的 PC 试件对激光的吸收率近乎为 0,而对于吸光试件,其透过率近乎为 0。利用测色仪对吸光件表面的反射率进行了测定,计算得出当厚度为  $3 \text{ mm}$ 、炭黑质量分数为  $0.1\%$  时,经砂纸打磨后的 PC 试件(图 2 中试件 1,2,3,4,5)表面的吸光率分别为  $92.4\%$ ,  $94.21\%$ ,  $94.36\%$ ,  $94.78\%$  和  $94.83\%$ 。炭黑质量分数为  $0.1\%$  的 PC 试件对应的理论吸收系数为  $8.2 \text{ mm}^{-1}$ <sup>[2]</sup>,吸光率为  $94.8\%$ ,对比可知,计算结果可靠。图 7 所示为吸光试件的吸光率随表面粗糙度的变化,可以看出,随着表面粗糙度的增加,吸光率逐渐减小,当表面粗糙度达到  $1.600 \mu\text{m}$  左右时,表面反射能量所占的比重明显增大,导致吸光率有较为明显的减小。此过程表明,在焊接过程中,吸光试件对激光能量的吸收也随着粗糙度的增大而减小,即光滑表面的焊接温度要高于粗糙表面的,焊接强度也较大。

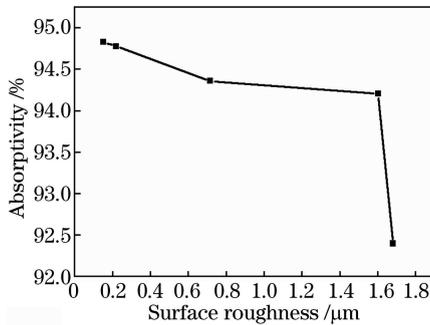


图 7 吸光试件的吸光率随表面粗糙度的变化

Fig. 7 Absorptivity of light-absorbing specimen versus surface roughness

### 3 单板焊接模型的温度场数值模拟

#### 3.1 三维粗糙表面建模

采用表面粗糙度测量机采集样件表面轮廓数据,其触针扫描全长度为  $12.50 \text{ mm}$ ,扫描分辨率为  $0.0064 \mu\text{m}$ 。在对表面轮廓测量的过程中,触针匀速前行,采集  $8000$  个点的数据,即测量长度为  $0.0512 \text{ mm}$ 。最终获得图 2 中 1~6 号试件的表面轮廓曲线,如图 8 所示,其中  $R_a$  为对应试件的表面粗糙度。

利用方盒计数法计算得到二维轮廓的分形维数  $D$ 。在此基础上,分析了各向同性表面的三维结构,三

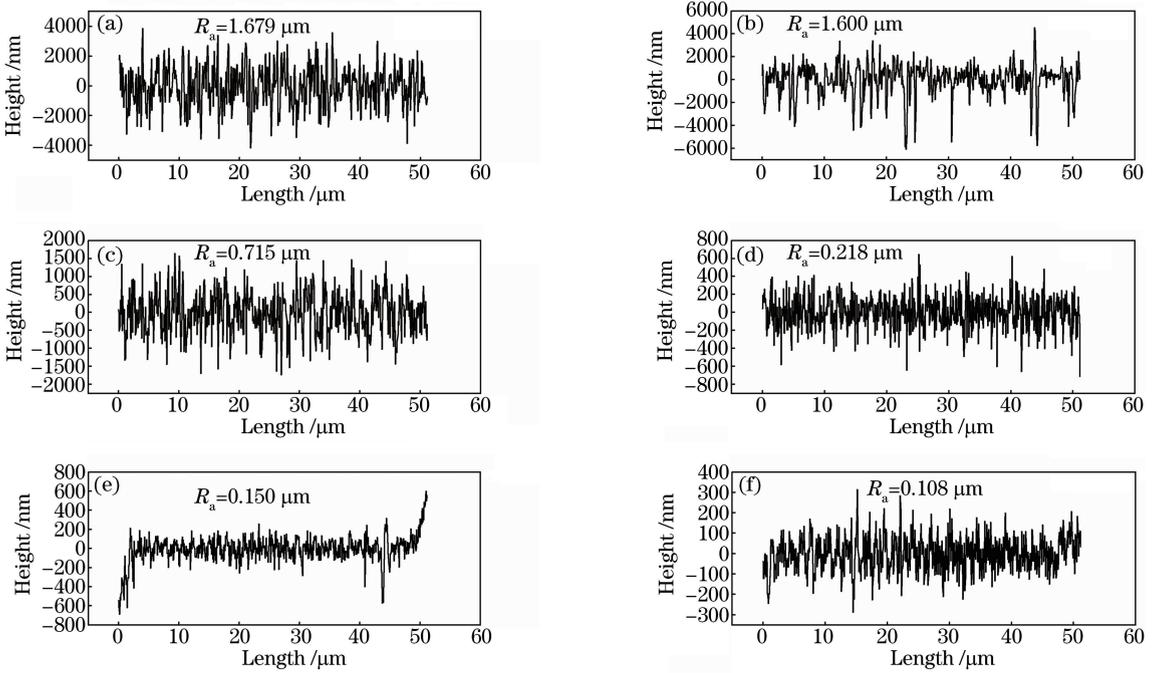


图 8 图 2 中 6 个吸光试件的表面轮廓曲线。(a) 1 号;(b) 2 号;(c) 3 号;(d) 4 号;(e) 5 号;(f) 6 号

Fig. 8 Surface profile curves of 6 light-absorbing specimens in Fig. 2.

(a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5; (f) No.6

维表面的分形维数  $D_s = D + 1$ 。维数为  $D_s$  的 W-M 分型曲面<sup>[10]</sup>为

$$z(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \lambda^{-(3-D_s)n} \sin[\lambda^n (x \cos B_n + y \sin B_n) + A_n], \quad (2)$$

式中  $x, y, z$  为点在三维空间中的坐标值;  $C_n$  为独立的服从正态分布的随机数, 其均值为 0, 方差为 1;  $A_n, B_n$  为独立的随机数, 在  $[0, 2\pi]$  区间上服从均匀分布;  $D_s$  为分形曲面的维数, 且  $2 < D_s < 3$ ;  $\lambda$  为大于 1 的常数, 对于粗糙表面,  $\lambda = 1.5$ ;  $n$  为自然数。此函数为随机分形曲面的计算机生成提供了一种简单、便捷的方法。利用 W-M 函数生成的两种粗糙表面如图 9 所示。利用 Pro/Engineer 软件进行边界混合, 生成曲面, 图 10 所示为  $R_a = 1.600 \mu\text{m}, D_s = 2.3572$  的仿真三维曲面。

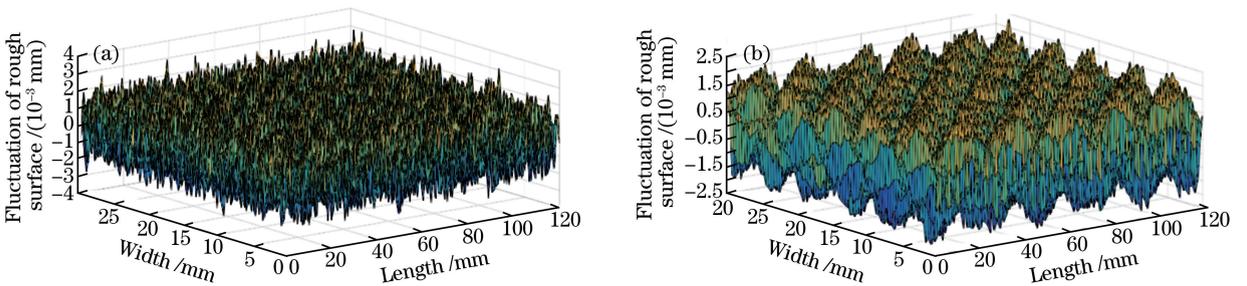


图 9 利用 W-M 函数生成的两种粗糙表面模型。(a)  $R_a = 1.600 \mu\text{m}$ ; (b)  $R_a = 0.218 \mu\text{m}$

Fig. 9 Two rough surface models generated by W-M function. (a)  $R_a = 1.600 \mu\text{m}$ ; (b)  $R_a = 0.218 \mu\text{m}$

### 3.2 透射焊接温度场的有限元模拟

PC 的熔点设定为  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 。PC 的比热容随温度变化为

$$c = \begin{cases} 1019 + 3.48T, & T \leq 138 \text{ }^\circ\text{C} \\ -2955 + 32.3T, & 138 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 147, \\ 1538 + 1.77T, & T > 147 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $c$  为 PC 的比热容,  $T$  为聚合物温度。PC 的热导率随温度变化的情况见表 1。

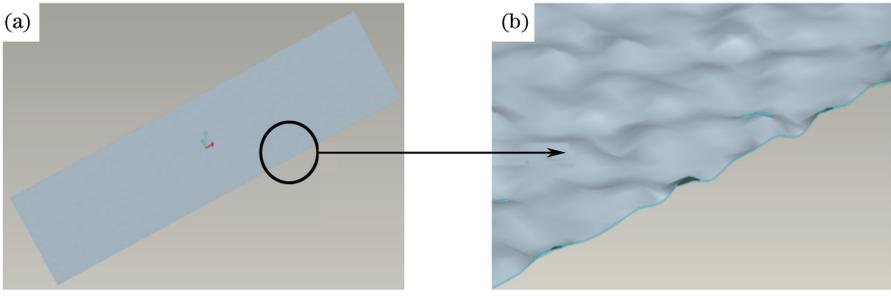


图 10 当  $R_s=1.600 \mu\text{m}$ 、 $D_s=2.3572$  时, (a) 仿真三维曲面及 (b) 其局部 100 倍放大  
Fig. 10 (a) Simulated three-dimensional surface and (b) its local amplification of 100 times  
when  $R_s=1.600 \mu\text{m}$  and  $D_s=2.3572$

表 1 PC 的热导率随温度变化

Table 1 Thermal conductivity of PC versus temperature

Temperature / °C	24	44	64	83	103	>145
Thermal conductivity / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.217	0.224	0.231	0.230	0.237	0.173

PC 的热膨胀系数  $a$  与温度  $T$  的关系为

$$a = \begin{cases} 93 \times 10^{-6}, & T \leq 145 \text{ } ^\circ\text{C} \\ [0.011346 + 250 \times 10^{-6} \times (T - 145)] / (T - 23), & T > 145 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

PC 的密度  $\rho$  为

$$\rho = \frac{\rho_{\text{ref}}}{1 + 3a'(T - T_{\text{ref}})}, \quad (5)$$

式中  $T_{\text{ref}}$  为参考温度,  $\rho_{\text{ref}}$  为参考温度对应的 PC 密度,  $a'$  为关于温度与参考温度的 PC 热膨胀系数。

为了更加真实地模拟实际热源, 采用了应用广泛的组合热源作为焊接热源模型<sup>[11]</sup>。通过观察实际焊缝形貌发现, 熔池深宽比较小, 故采用具有高斯分布的面热源与高斯旋转体热源的组合。通过 Fortran 编程语言对不同名称的区域施加相应的热源模型。面热源热流分布为

$$q_s(x_1, y_1) = \frac{bQ_s}{\pi r_s^2} \exp\left[-\frac{b(x_1^2 + y_1^2)}{r_s^2}\right], \quad (6)$$

式中  $b$  为热流集中系数;  $Q_s$  为面热源功率;  $r_s$  为面热源有效作用半径;  $x_1, y_1$  为面热源中的点坐标。体热源分布为

$$q_v(x_2, y_2) = \frac{6Q_v(H - \beta h)}{\pi r_v^2 H^2 (2 - \beta)} \exp\left[-\frac{3(x_2^2 + y_2^2)}{r_v^2}\right], \quad (7)$$

式中  $Q_v$  为体热源功率;  $\beta$  为衰减系数;  $r_v$  为体热源有效作用半径;  $H$  为体热源作用深度;  $x_2, y_2$  为体热源中的点坐标。激光热源的总功率  $Q$  满足

$$Q \cdot \eta = Q_s + Q_v, \quad (8)$$

式中  $\eta$  为热源有效平均吸收系数。具有高斯分布的面热源与高斯旋转体热源的组合如图 11 所示。

### 3.3 结果与讨论

当以 5 mm/s 的速率扫描表面粗糙度为 1.600  $\mu\text{m}$  和 0.218  $\mu\text{m}$  两种试件模型时, 以热源中心节点(焊接过程的第 25 步, 总步数为 50)为研究对象, 得到不同激光功率( $P$ )下, 该节点的温度随时间变化曲线, 如图 12 所示。可以看出, 当热源扫过节点时, 温度迅速上升, 随着热源逐渐远离, 温度也从最大值缓慢减小, 在此过程中, 节点吸收的能量以热传导的方式传递到周边; 在温度迅速上升阶段, 较粗糙表面的温升略早于较光滑表面的, 随着热源的不断靠近, 粗糙表面先达到了最高温度, 之后粗糙与光滑表面的温度以相对稳定的差值逐渐减小, 而且随着激光功率的增大, 该差值不断增大。

当激光功率相同时, 通过对比不同表面粗糙度试件模型的温度变化可知, 粗糙表面的温度低于光滑表面的, 这与之前的实验结果相符。但在温度上升阶段, 光滑表面相对于粗糙表面有一定的滞后, 主要原因如下: 对于不透明材料, 表面粗糙是造成漫反射的主要原因, 在不同部位, 激光的入射角不同, 反射方向也不同, 如

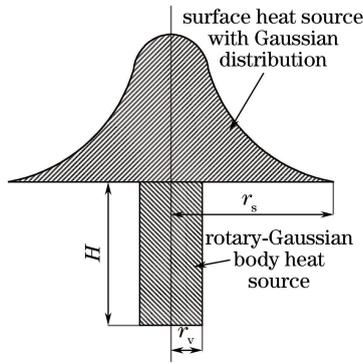


图 11 具有高斯分布的面热源与高斯旋转体热源的组合

Fig. 11 Combination of Gaussian surface heat source and rotary-Gaussian body heat source

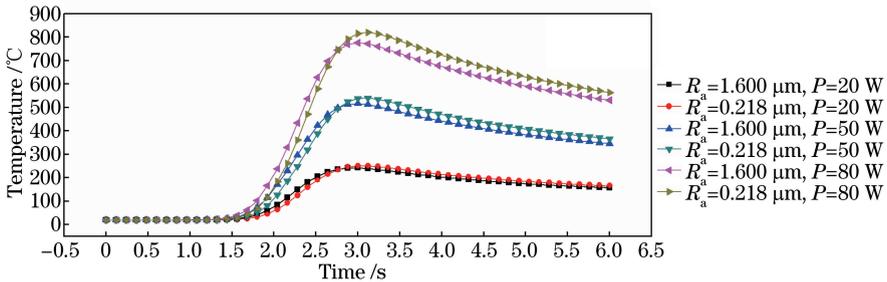


图 12 不同表面粗糙度试件中心节点温度随时间变化

Fig. 12 Central node temperatures of specimens with different surface roughness versus time

图 13 所示。随着表面粗糙度的增加,镜面反射占据的能量分数逐渐减小,如图 14 所示。当激光未接触节点时,粗糙表面的漫反射光对节点的加温效果更明显,而当激光逐渐靠近节点时,导致温升的漫反射作用逐渐被激光直接作用代替,因此,出现了图 12 所示的交替升温现象。

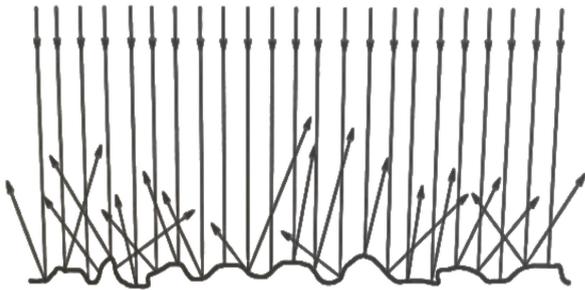


图 13 粗糙表面的激光反射

Fig. 13 Laser reflection from rough surfaces

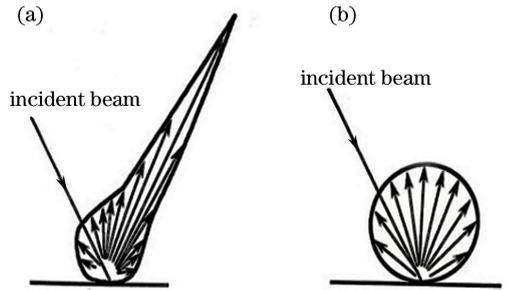


图 14 表面粗糙度不同时反射光能量分布示意图。

(a) 低表面粗糙度; (b) 高表面粗糙度

Fig. 14 Reflected light energy distributions for different surface roughness. (a) Low surface roughness; (b) high surface roughness

当时间为 1.2 s,焊接功率为 20 W,焊接速度分别为 5,10,15,20 mm/s 时,随着焊接速率的增大,最高温度下降。在焊接功率为 20 W、焊接速率为 5 mm/s 的情况下,最高温度大于其熔点(220 °C),有较窄的焊缝;当焊接速率达到 10 mm/s 时,已无明显的熔融痕迹产生。当激光功率为 20 W 时,在不同的焊接速率( $V$ )下,具有不同表面粗糙度的试件的焊缝处温度随时间的变化如图 15 所示。可以看出,随着焊接速率的增大,焊接过程的整体温度下降,且相同粗糙度的表面温度变化曲线的间距越来越小;同时,随着焊接速率的增大,在温升过程中,具有不同粗糙度的表面的温度变化曲线逐渐重合,没有交替现象发生,这是因为随着焊接速率的增加,激光能量产生升温效果的时间间隔减小,这进一步印证了之前的假设。

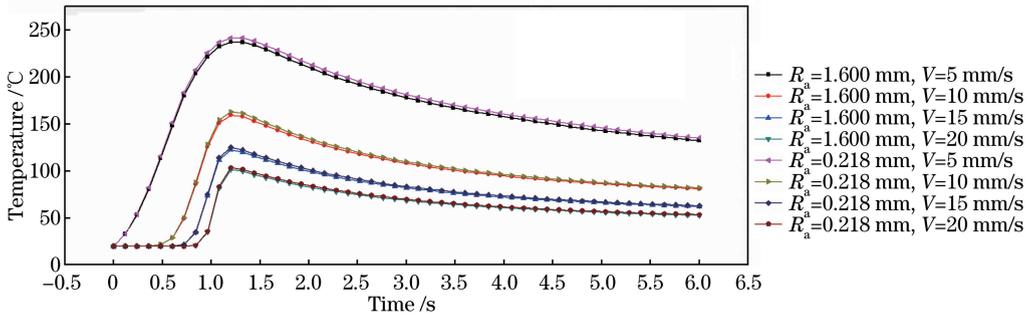


图 15 不同表面粗糙度的试件焊缝处温度随时间的变化

Fig. 15 Weld temperature of specimens with different surface roughness versus time

## 4 结 论

通过对不同表面粗糙度的 PC 试件进行光学特性测试、焊接拉伸实验以及焊缝断口形貌分析,研究了粗糙 PC 表面对激光能量吸收的影响,发现随着粗糙度的增加,焊接质量下降。测定了 6 种不同表面粗糙度试件的二维轮廓曲线,发现分形维数随着表面粗糙度的增大而减小。对单板焊接模型的温度场进行了研究,发现在温度迅速上升阶段,粗糙表面较光滑表面先达到最高温度,而光滑表面的最高温度高于粗糙表面的;之后粗糙与光滑表面的温度以相对稳定的差值逐渐减小,而且随着激光功率的增大,该差值不断增大。随着焊接速率的增大,焊接过程的整体温度减小,且相同表面的温度变化曲线的间距越来越小;同时,随着焊接速率的增加,温升过程中的不同粗糙度表面的温度变化曲线逐渐重合。

## 参 考 文 献

- [1] Jidosha T K K. Laser beam welding of plastic plates: JP85213304[P]. 1985-2-6.
- [2] Chen M. Gap bridging in laser transmission welding of thermoplastics[D]. Ontario: Queen's University, 2009: 9-13.
- [3] 王传洋, 郝云, 沈璇璇, 等. 工艺参数对激光透射焊接聚碳酸酯影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 57-60.
- [4] Jiang Hairong, Liu Huixia, Chen Guochun, *et al.* Study on the process of laser transmission welding between the modified polypropylene and nylon 66[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s216002.  
蒋海荣, 刘会霞, 陈国纯, 等. 改性聚丙烯与尼龙 66 的激光透射焊接工艺研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s216002.
- [5] Wu Yanwei, Liu Huixia, Li Pin, *et al.* Experimental study of laser transmission welding between polycarbonate and polyphenylene oxide[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503010.  
伍彦伟, 刘会霞, 李品, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯和聚苯醚实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503010.
- [6] Wang Chuanyang, Shen Xuanxuan. Techniques and performance research on laser transmission welding of polypropylene plastics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021403.  
王传洋, 沈璇璇. 聚丙烯激光透射焊接工艺及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021403.
- [7] Liu Wei, Liu Huixia, Meng Dongdong, *et al.* Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts during tensile process[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0602003.  
刘伟, 刘会霞, 孟冬冬, 等. 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602003.
- [8] Eagar T W, Tsai N S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources[J]. Welding Journal, 1983, 63(12): 346-355.
- [9] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [10] Majumdar A, Tien C L. Fractal characterization and simulation of rough surfaces[J]. Wear, 1990, 136(2): 313-327.
- [11] Gu Jingchen, Tong Lige, Li Lei, *et al.* Selection criteria of heat source model on the welding numerical simulation[J]. Materials Review, 2014, 28(1): 143-146.  
谷京晨, 童莉葛, 黎磊, 等. 焊接数值模拟中热源的选用原则[J]. 材料导报, 2014, 28(1): 143-146.