

基于三维真实表面形貌的聚碳酸酯激光透射 焊接温度场模拟

姜宁, 王传洋

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 在三维真实表面形貌分析的基础上,对激光透射焊接过程进行了模拟分析。利用表面粗糙度测量仪对聚碳酸酯(PC)试件的表面粗糙度进行了测量,构建了表面粗糙轮廓的数学模型,并进行了实体建模,通过 ANSYS Fluent 软件对光滑表面以及真实粗糙表面进行了激光焊接模拟,分析了焊缝断口微观形貌。结果表明,粗糙 PC 表面的焊接强度要低于光滑表面的。

关键词 激光技术;透射焊接;表面粗糙度;分形原理;温度场;有限元法

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091401

Temperature Field Simulation of Laser Transmission Welding of Polycarbonate Based on Three-Dimensional Real Surface Topography

Jiang Ning, Wang Chuanyang

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

Abstract The laser transmission welding process is simulated based on the analysis of the real three-dimensional surface topography. The surface roughness of polycarbonate (PC) sample is measured by using a surface-roughness measuring instrument, the mathematical model of the surface roughness profile is built, and the solid modeling is done. The laser welding of smooth surfaces and real rough surfaces are simulated with the software of ANSYS Fluent, and the fracture morphology of the weld is analyzed. The results show that the welding strength of the rough PC surface is lower than that of the smooth surface.

Key words laser technique; laser transmission welding; surface roughness; fractal theory; temperature field; finite element method

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 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,具有焊速快、热影响区小、无残渣、键合强度高、焊缝变形小等优点,已被广泛应用于汽车工业、生物医疗设备制造以及中微型机械制造等领域。激光透射焊接的原理是使激光辐照透明试件,试件吸收激光并产生热量,热量在两种试件之间传递,塑料熔化,热熔融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较强的键合^[1]。

目前,国内外对激光透射焊接机理的研究主要集中在工艺和数值模拟研究方面。王霄等^[2-5]利用不同的算法对焊接工艺参数进行了优化,研究了不同焊接材料及吸收剂对焊接质量的影响。王传洋等^[6-9]研究了聚合物材料结构对激光强度分布的影响,并运用图像处理技术对不同材料中的碳黑吸光剂含量进行了分析。

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51475315)、上海市科技创新行动计划智能装备制造项目(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方面的研究。

E-mail: cywang@suda.edu.cn(通信联系人)

Chen 等^[10]研究了激光光束通过不同热塑性塑料时的能量衰减。Speka 等^[11]依据米氏散射理论和蒙特卡罗法,描述了激光束在半透明介质中的传播情况以及两种材料接触面上的激光能量分布情况。

综上所述,目前关于激光透射焊接的研究主要集中在两方面,一方面是材料的热特征、光学特征,包括焊接过程中的工艺参数、吸光剂的选择以及焊后焊缝形貌及键合强度等;另一方面是焊接过程的数值模拟,包括温度场、熔体流场以及应力场等对焊接质量影响的数值模拟,这些模拟均基于表面光整的理想情况。本文在此基础上,根据分形原理,对聚碳酸酯(PC)试件的真正三维轮廓进行了实体建模,并进行了焊接模拟,分析了温度场变化规律。

2 试验原理及设计

2.1 表面粗糙度的测量

采用表面粗糙度测量机(SE300,株式会社小坂研究所,日本)采集试件表面轮廓,触针扫描全长为12.50 mm,扫描分辨率为0.0064 μm ,在对表面轮廓测量的过程中,触针匀速前行并采集8000个数据点,相当于测量长度为0.0512 mm。不同表面粗糙度的PC试件如图1所示,试验的研究对象为具有粗糙表面及光滑表面的试件,现定义经800#砂纸打磨的表面为光滑表面,而经120#砂纸打磨的表面为粗糙表面。测量得到试件的表面轮廓曲线如图2所示,其中 m 为粗糙度。

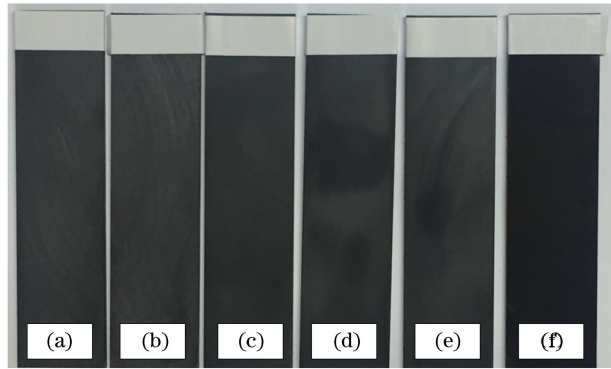


图1 不同型号砂纸打磨的粗糙表面。(a) 100#;(b) 120#;(c) 150#;(d) 800#;(e) 1000#;(f)原样

Fig. 1 Rough surfaces polished with different types of sandpaper.

(a) 100#;(b) 120#;(c) 150#;(d) 800#;(e) 1000#;(f) original sample

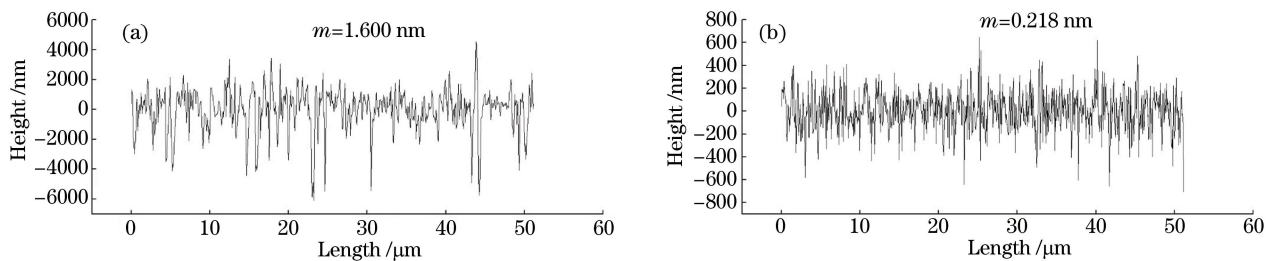


图2 打磨后试件表面轮廓测量曲线。(a) 120#;(b) 800#

Fig. 2 Surface profile measurement curves of samples after grinding. (a) 120#;(b) 800#

2.2 分形维数及建模

通过 Matlab 软件结合方盒技术方法,计算了试件的二维表面分形维数 D ,三维表面分形维数 $D_s = D + 1$ 。当表面粗糙度 m 为 0.218 μm 和 1.600 μm 时,对应的三维分形维数 D_s 分别为 2.5675 和 2.3572,维数为 D_s 的 W-M 分形曲面^[12]为

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

式中 x, y 分别为焊接试件的长度及宽度, C_n 为独立的且服从均值为 0、方差为 1 的正态分布的随机数; A_n, B_n 为独立的且均在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机数;分形曲面的维数 D_s 满足 $2 < D_s < 3$; λ 为大于 1 的常数,对

于粗糙表面, $\lambda = 1.5^{[13]}$; n 为自然序列数。结合(1)式和测量得到的不同分形维数的曲面图形, 随机生成图 3 所示的两种曲面。

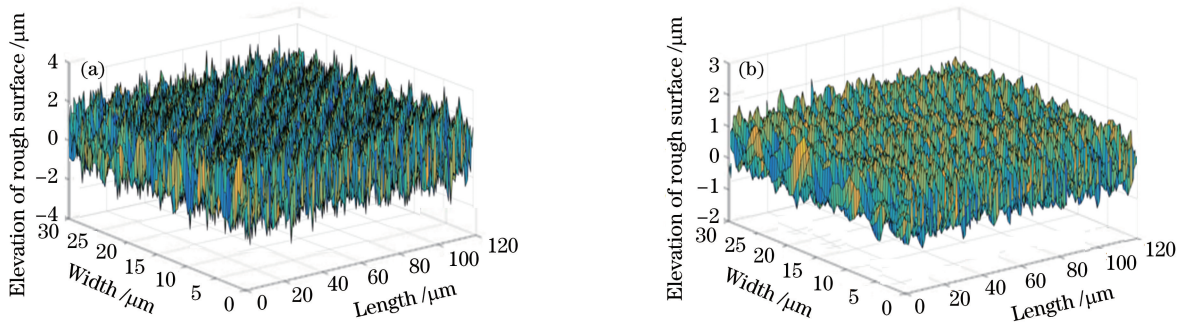


图 3 随机生成的分形曲面。(a) $m=0.218 \mu\text{m}$, $D_s=2.5675$; (b) $m=1.600 \mu\text{m}$, $D_s=2.3572$

Fig. 3 Randomly generated fractal surfaces. (a) $m=0.218 \mu\text{m}$, $D_s=2.5675$; (b) $m=1.600 \mu\text{m}$, $D_s=2.3572$

为了构建复杂曲面, 将由 Matlab 软件所得到的 ibl 文件导入 ProE 软件直接生成曲线, 然后通过边界混合生成曲面。图 4 所示为在 $m=1.600 \mu\text{m}$, $D_s=2.3572$ 条件下生成的曲面。

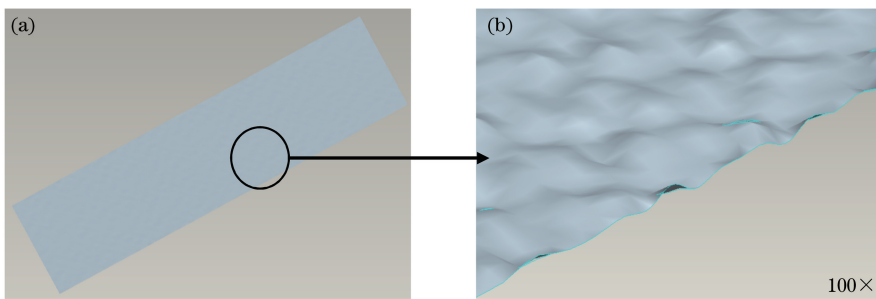


图 4 PC 试件模型。(a) 三维曲面; (b) 局部放大图

Fig. 4 PC sample models. (a) Three-dimensional surface; (b) partial enlarged view

2.3 透射焊接温度场的有限元模拟

以焊接试件端面边缘任取一点为原点, 以焊接方向(宽度方向)为 X 方向, Z 向为垂直于焊接表面方向, 即焊缝深方向。运用 ANSYS Fluent 软件进行透射焊接温度场的模拟, 体热源^[14-15]公式为

$$Q = (1 - R_a) K I_a \exp(-KZ), \quad (2)$$

$$K = 82000 \cdot C_{CB}, \quad (3)$$

$$I_a = \frac{P}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-r^2}{r_0^2}\right), \quad (4)$$

式中 Q 为热流密度, R_a 为 PC 试件表面反射率, Z 为焊接点 Z 方向坐标, K 为吸收系数, C_{CB} 为碳黑质量分数, P 为热输入功率, I_a 为试件表面的激光强度, r_0 为激光光束半径, r 为材料表面任一点的径向距离。

PC 试件热物理参数见表 1。利用紫外分光光度计(UV-2550, 岛津公司, 日本)测得 3 mm 厚高透 PC 板对 980 nm 激光的透射率为 89.3158%。图 5 所示为透射焊接试验所选用的激光器(WFD120, 深圳市大族激光科技有限公司, 中国), 其产生的激光波长为 980 nm。

表 1 PC 的热物理性能参数

Table 1 Thermal physical property parameters of PC

Material	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	Heat transfer coefficient / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)
PC	1200	1170	0.22

采用 HyperMesh 软件对焊接路径区域进行局部细化, 在试件中间划分模型的网格, 远离焊缝区域的两侧网格大小为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 焊缝区域网格大小为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 在二者之间设置过渡网格, 划分结果如图 6 所示。

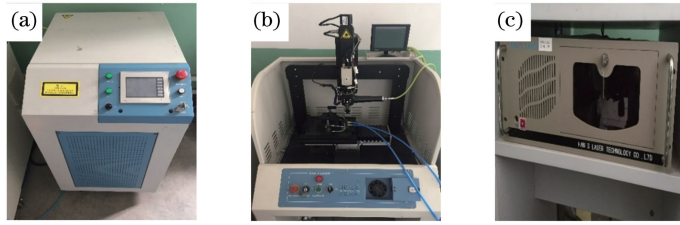


图5 激光焊接系统。(a)激光器;(b)工作台;(c)工控机

Fig. 5 Laser welding system. (a) Laser; (b) workbench; (c) industrial personal computer

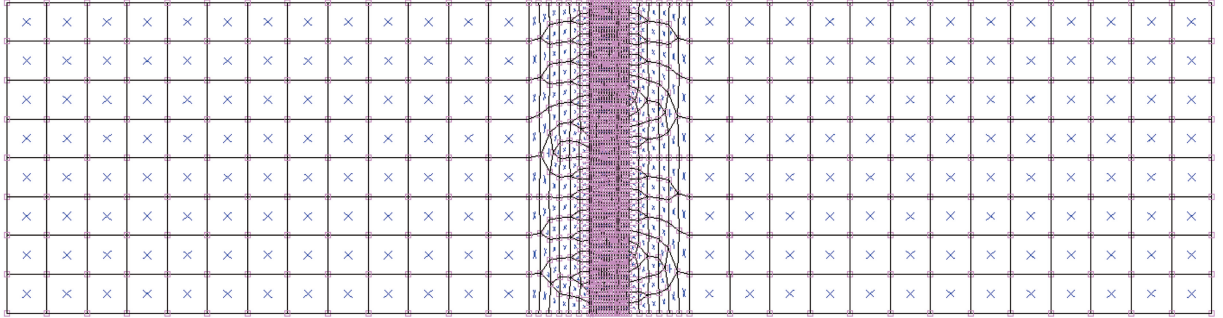


图6 PC试件网格划分

Fig. 6 Mesh division of PC sample

3 结果与讨论

焊接功率选定为 10 W , 焊接速度为 $5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 激光光斑直径为 2 mm , 时间步长为 0.06 s , 步数为 100 , 环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 平板表面反射率为 0.03 。根据(2)式施加加热载荷, 当 $t=2\text{ s}$ 时, 热源中心处 X 、 Z 方向的截面温度场如图7所示。

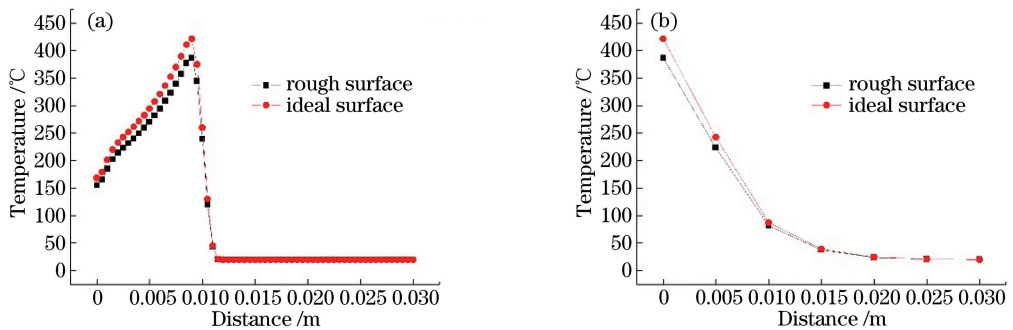


图7 截面温度场分布。(a) X方向;(b) Z方向

Fig. 7 Cross-sectional temperature field distributions. (a) X direction; (b) Z direction

由图7可知, 在模拟焊接光滑表面的过程中, 吸光试件熔融体的最高温度比粗糙表面的升高了 $34\text{ }^\circ\text{C}$, 且表面光滑的流动熔融体的整体温度要高于表面粗糙的。两者的焊缝宽度基本没有变化, 当设定熔化温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 粗糙表面焊缝深度比光滑表面的大了约 0.084 mm ; 在熔池深度方向, 光滑表面的温度梯度明显大于粗糙表面的。这是因为, 一方面材料表面凹凸不平会对激光产生多次反射, 增加了激光能量的耗散; 另一方面非金属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的时候, 表面对于激光的吸收率最大, 几乎全部吸收。但表面粗糙度的存在使得激光的入射角不可能全部为布儒斯特角, 故粗糙表面的激光吸收效率比光滑表面的会低一些, 即整体温度比光滑表面的偏低。

焊接温度场随时间的变化曲线如图8所示, 在整个焊接过程中, 焊接温度整体在一个范围内循环变化, 粗糙表面温度变化范围为 $375\sim 390\text{ }^\circ\text{C}$, 光滑表面温度变化范围为 $409\sim 425\text{ }^\circ\text{C}$, 光滑表面比粗糙表面的整体温度高。

分别用 $100\#$, $120\#$, $150\#$ 的粗砂纸以及 $800\#$, $1000\#$ 的细砂纸打磨, 得到了具有不同表面粗糙度的

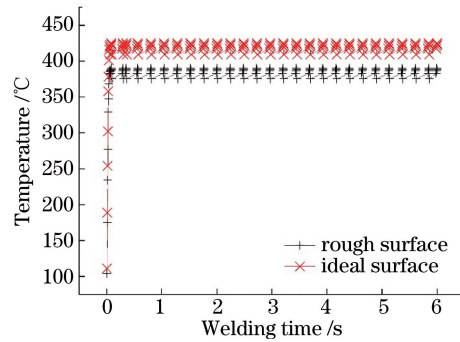


图 8 焊接温度场随时间变化曲线

Fig. 8 Welding temperature field versus time

PC 板,利用分光测色仪测定了不同粗糙表面对于波长为 980 nm 激光的反射率,结果见表 2。由此可以看出,随着 PC 板表面粗糙度的增加,PC 板表面对激光的反射率逐渐增大,吸收率逐渐减小,即 PC 板表面越光滑,表面对激光的吸收率越高,进而导致焊接强度增大。

表 2 不同表面粗糙度的 PC 反射率

Table 2 Reflectivity of PC with different surface roughnesses

Mesh number	Surface roughness / μm	Reflectivity /%	Surface morphology
100 #	1.652	7.60	
120 #	1.600	5.79	
150 #	0.715	5.64	
800 #	0.218	5.22	
1000 #	0.184	5.17	

选取 3 mm 厚的具有不同粗糙度的高透 PC 板进行了透射焊接及拉伸试验。为了突出表面粗糙度对焊接质量的影响,热影响区不宜太大,所选用的焊接线能量不宜太大,故在焊接试验中选用的焊接功率为 20 W,焊接速度为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,夹紧力为 0.5 MPa,结果见表 3。由此可知,随着 PC 板表面粗糙度的增加,焊接强度减小,焊缝的宽度以及深度也减小,进一步证实了模拟试验所提出的粗糙表面的反射造成激光能量损失的假设。

表 3 不同表面粗糙度的 PC 焊接强度

Table 3 Welding strength of PC with different surface roughnesses

Mesh number	Surface roughness / μm	Welding strength /kN	Welding width /mm	Welding depth / μm
100 #	1.652	0.890	1.910	17.79
120 #	1.600	1.206	2.290	33.02
150 #	0.715	1.240	2.610	40.56
800 #	0.218	1.443	2.655	48.58
1000 #	0.184	1.512	2.940	52.35

利用超景深三维显微系统[VHX-1000,基恩士(中国)有限公司,中国]得到了焊缝的三维形貌,如图 9 所示,可以看出,PC 板表面粗糙度越大,焊缝轮廓处形貌越光滑,表明这些区域的温度变化平稳,验证了在熔池深度方向,光滑表面的温度场温度梯度明显大于粗糙表面的假设。

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。根据焊接拉伸试验所承载荷的状态可知,试验中的断裂模式为静载断裂,即材料在拉伸下发生形变直至断裂;从断口的外形以及断面的宏观特征,可初步判断断裂的性质、断裂源的位置以及断裂的扩展方向。

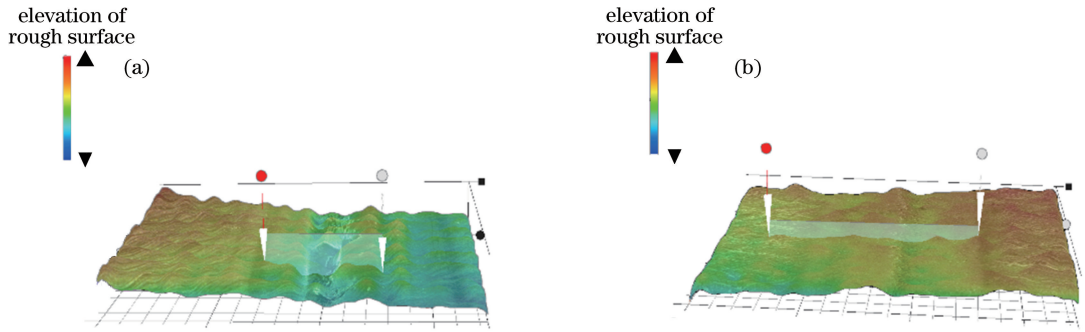


图 9 不同表面粗糙度试件的焊缝三维形貌图。(a) $m=0.184 \mu\text{m}$; (b) $m=1.652 \mu\text{m}$

Fig. 9 Three-dimensional weld morphologies of samples with different surface roughnesses. (a) $m=0.184 \mu\text{m}$; (b) $m=1.652 \mu\text{m}$

在焊接功率为 30 W、焊接速度为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、夹紧力为 0.5 MPa 的情况下,对表面粗糙度 $m=1.600 \mu\text{m}$ 的 3 mm 厚 PC 板进行拉伸试验,所得的断口形貌如图 10 所示,可以观察到,焊缝中心到边缘的气体孔洞分布由疏变密。激光快速扫过时,高分子链在降解过程中产生的气体向焊缝两端扩散,上下焊接材料之间产生间隙,这些分布不均的间隙使得拉伸过程中材料的应力分布不均衡,诱导裂纹产生,造成了脆性断裂。

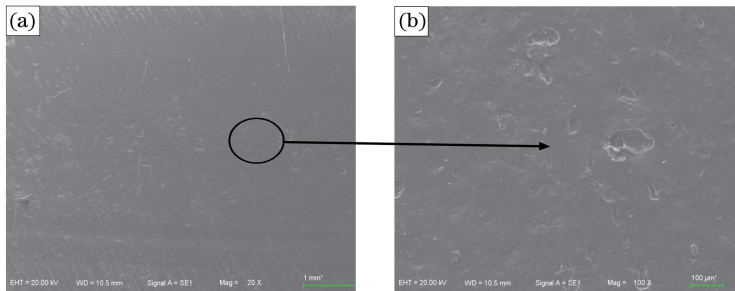


图 10 当 $m=1.600 \mu\text{m}$ 时,试件焊缝表面的断口形貌。(a)放大 20 倍;(b)放大 100 倍

Fig. 10 Fracture morphologies of sample weld surface when $m=1.600 \mu\text{m}$.

(a) Amplification by 20 times; (b) amplification by 100 times

在相同焊接工艺参数条件下,对表面粗糙度 $m=0.218 \mu\text{m}$ 的 3 mm 厚的 PC 板进行拉伸试验,所得的断口形貌如图 11(a)所示。如图 11(b)所示,断口区域存在较多韧窝,该区域内熔融材料少。如图 11(c)所示,在焊缝中间位置,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,断口表现出伴随明显塑性

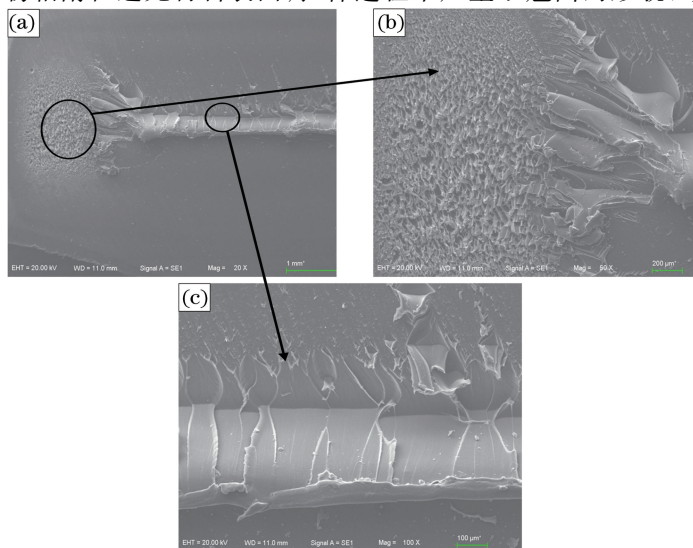


图 11 当 $m=0.218 \mu\text{m}$ 时,试件焊缝表面的断口形貌。(a)放大 20 倍;(b)放大 100 倍;(c)放大 100 倍

Fig. 11 Fracture morphologies of sample weld surface when $m=0.218 \mu\text{m}$.

(a) Amplification by 20 times; (b) amplification by 100 times; (c) amplification by 100 times

变形的延性撕裂特征,属于准解理裂纹,此断口属于脆性与韧性混合型断口。

对比两组不同表面质量的拉伸断口微观形貌可知,在激光照射过程中,粗糙表面有利于减少气体向周边逸散,造成脆性断裂;具有光滑表面的材料的有效接触面积较大,有利于热量传递和分子链之间的交互作用,宏观表现为焊接强度高于粗糙表面的。

4 结 论

通过实体建模的方法得到了 PC 试件的三维粗糙表面形貌。通过分析光滑表面与粗糙表面的温度场可知,凹凸不平的粗糙表面会对激光产生多次反射,使得能量耗散增加;粗糙表面使得激光吸收率比光滑表面的低,整体温度偏低,焊接质量降低,并通过拉伸试验验证了这一结论。粗糙表面试件的焊缝边缘轮廓曲线相对平滑。通过断口分析可知,当 $m = 1.600 \mu\text{m}$ 时,粗糙表面的断口属于脆性断口,而当 $m = 0.218 \mu\text{m}$ 时,粗糙表面断口属于脆性与韧性混合型断口。通过断口的微观形貌可知,在相同焊接条件下,光滑表面吸收的能量更多,焊接强度更高。

参 考 文 献

- [1] Toyota Jidosha K K. Laser beam welding of plastic plates: JP85213304[P]. 1985-09-02.
- [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] 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.
- [4] Liu Huixia, Zhang Huizhong, Ding Guomin, *et al.* Research on laser transmission welding HDPE[J]. Journal of Materials Engineering, 2008(11): 13-18.
刘会霞, 张惠中, 丁国民, 等. HDPE 激光透射焊接工艺的研究[J]. 材料工程, 2008(11): 13-18.
- [5] 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.
- [6] Wang C Y, Bates P J, Zak G. Optical properties characterization of thermoplastics used in laser transmission welding: Scattering and absorbance[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97/98/99/100/101: 3836-3841.
- [7] Wang C Y, Bates P J, Aghamirian M, *et al.* Quantitative morphological analysis of carbon black in polymers used in laser transmission welding[J]. Welding in the World, 2007, 51(3/4): 85-90.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Chen M L, Zak G, Bates P J. Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(1): 43-47.
- [11] Speka M, Mattei S, Pilloz M, *et al.* The infrared thermography control of the laser welding of amorphous polymers[J]. NDT & E International, 2008, 41(3): 178-183.
- [12] Majumdar A, Tien C L. Fractal characterization and simulation of rough surfaces[J]. Wear, 1990, 136(2): 313-327.
- [13] Li Chenggui, Dong Shen. Counting methods of fractal dimension for 3D surface topography[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(4): 36-40.
李成贵, 董 申. 三维表面形貌的分形维数计算方法[J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(4): 36-40.
- [14] Lu Jiahao, Zhang Jie. Research on laser transmission profile welding technology based on FEA computer simulation[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(11): 33-39.
鲁家皓, 张 捷. 基于 FEA 计算机模拟的激光透射轮廓焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 33-39.
- [15] Chen M. Gap bridging in laser transmission welding of thermoplastics[D]. Ontario: Queen's University, 2009.