

文章编号: 0258-7025(2010)05-1391-07

医用聚对苯二甲酸乙二酯薄膜与薄钛板 激光透射连接有限元模拟

王 霄 李 品 刘会霞 宋新华 许贞凯

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 针对 0.1 mm 厚医用聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜与 0.1 mm 厚薄钛板之间的激光透射连接试验,利用商业化软件 ANSYS,使用 APDL 语言编程实现超高斯型热源的动态加载,建立了一个三维热传导模型,使用有限元法求得连接过程中温度场的分布,得到温度场达到准稳态的时间,分析加工速度和激光器功率等工艺参数对连接质量的影响,并计算出不同工艺参数下的连接宽度。通过对 PET 薄膜与薄钛板的激光透射连接试验接头宽度的测量值进行对比,两者趋势基本吻合,说明该有限元模型是可靠的。

关键词 激光透射连接;生物医学植入体;激光工艺参数;有限元;温度场

中图分类号 TG456. 7;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1391

Temperature Field Simulation on Laser Transmission Joining of PET Films and Titanium

Wang Xiao Li Pin Liu Huixia Song Xinhua Xu Zhenkai

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

Abstract 0.1-mm-thick PET films and 0.1-mm-thick titanium are joint using laser transmission joining technology. A 3D thermal model based on the finite element theory to simulate the temperature field on laser transmission joining of PET and titanium is established. With the ANSYS parametric design language (APDL) a moving super Gaussian distributed heat source is applied, and the distribution of the temperature field and the time to achieve quasi-steady-state temperature field are gained. Effect of process parameters, including laser power and scanning welding, on the joining result is investigated, and the calculated joint width is obtained. Experimental data for joint width is collected. Very good agreement is achieved between the calculated values and the measured values. It shows that the model is reliable.

Key words laser transmission joining; biomedical implant; laser parameters; finite element; temperature field

1 引 言

激光透射连接异种抗生物降解能力材料的连接(封装)工艺在生物医学植入体及其封装中具有良好的应用前景^[1]。生物医学植入体需使用具有抗生物降解能力的材料进行连接(封装)以适应人体内复杂的生物、物理和化学环境^[2,3]。具有抗生物降解能力的材料主要有金属(如钛及钛合金、不锈钢、金、银和镍等)^[4]、玻璃^[5]、陶瓷^[6]和聚合物^[7]等材料。因

此研究具有抗生物降解能力材料的同种或异种连接(封装)工艺具有良好的应用前景。

近年来,美国 Fraunhofer 激光技术中心(CLT)、德国亚琛 Fraunhofer 激光技术学会(ILT)、美国底特律韦恩大学 Golam Newaz 研究小组、美国蒙大纳大学 Ahsan Mian 研究小组采用这种连接工艺成功进行了聚酰亚胺与钛^[8],聚酰亚胺与具有钛涂层的玻璃^[9],聚偏氟乙烯与钛^[10],KaptonFN 与钛^[11]以及

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-02

作者简介: 王 霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工技术和数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: wx@ujs.edu.cn

TeflonFEP 与钛^[12]之间的连接。影响激光透射连接质量的工艺参数有很多,如加工速度、激光器功率和光斑直径等。通过试验的方法确定各工艺参数对连接质量的影响,进一步优化工艺参数,需要大量的试验,试验过程冗繁,增加了生产成本。采用数值模拟的方法模拟焊接过程中的温度场可以综合考虑各参数,研究主要工艺参数与连接质量的关系。

本文针对 0.1 mm 厚医用聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜与 0.1 mm 厚薄钛板之间的激光透射连接试验建立了一个三维热传导模型,使用有限元法求得连接过程中温度场的分布,得到温度场达到准稳态的时间,分析加工速度、激光器功率等工艺参数对连接质量的影响,并计算出不同工艺参数下的连接宽度。

2 试验方案和激光透射连接条件

试验使用 0.1 mm 厚医用 PET 薄膜和 0.1 mm 厚薄钛板,试样尺寸均为 30 mm × 10 mm × 0.1 mm。激光器采用 Dilas 公司 Copmact130/140 型半导体连续激光器,最大输出功率 130 W,输出波长(980 ± 10) nm,最小光斑直径 700 μm。激光透射连接的先决条件是两个被连接件一个能够透过激光而另一个能够吸收激光能量^[13~15],图 1 为激光透射连接基本原理示意图。连接的可行性取决于待连接零件材料的光学属性。本文采用的 PET 薄膜在半导体激光光波(980 ± 10) nm 范围内具有极高的透射率,而薄钛板则具有较低的热传导性和较高的激光吸收率。

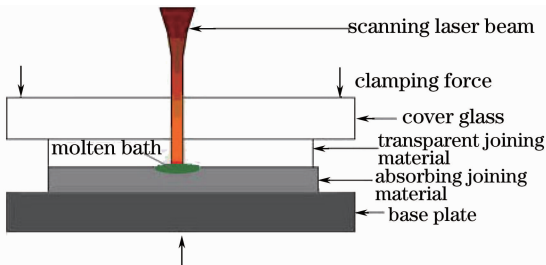


图 1 激光透射连接基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission joining

3 三维热传导模型的建立

激光透射连接温度场的空间时间分布符合三维热传导微分方程^[16]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

式中 x, y, z 为笛卡尔坐标系下的坐标值, T 为温度, t 为时间, ρ 为材料密度, c 为比热容, k_x, k_y, k_z 分别为 x, y 和 z 方向的热传导系数, Q 为单位体积内的生热率, v 为激光移动速度。

初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (x, y, z) \in D \quad (2)$$

边界条件为

$$K_n \frac{\partial T}{\partial x} - q + h(T - T_0) + \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) = 0, \quad (x, y, z) \in S, \quad t > 0 \quad (3)$$

式中 D 为模型范围, S 为模型边界, K_n 为边界 S 的法向热传导系数, h 为热对流系数, σ 为 Stefan-Boltzmann 常量 [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$], ϵ 为热辐射系数, T_0 为初始温度, q 为材料表面 S 法向热流密度。因为 c 和 k 等热物理性能随温度而改变以及热辐射条件,使温度场分析成为典型的非线性问题。

4 有限元模型的建立

假设仅在接触面处产生热量,热量将传递到上下两被连接件中。为有效地减少计算时间,在模拟过程中仅取两被连接件搭接部分的一半进行分析。图 2 为所建立的有限元模型及其放大图,依次包括上层 K9 玻璃夹持层, PET 薄膜和下层薄钛板, K9 玻璃夹持层。

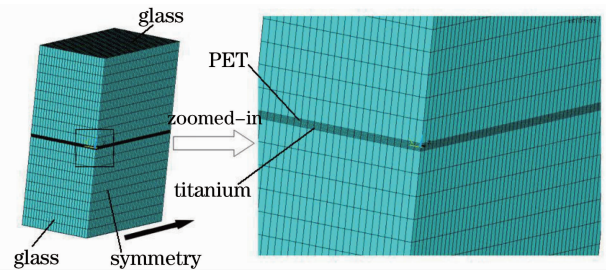


图 2 有限元模型及其放大图

Fig. 2 Finite element analysis (FEA) model along with a zoomed-in mesh view

选用 Solid70 单元作为热分析单元,该单元为六面体八节点三维单元,只包含一个温度自由度。进行激光透射连接温度场分析必须确定的物理性能参数有:导热系数、对流换热系数、密度以及比热容。在 ANSYS 中处理材料热物理性能随温度的变化的方法是,输入材料在典型温度值的热物理性能参数,建立相关参数表,对于那些未知温度处的参数通过插值法和外推法来确定。但是,考虑到现在所能查到的关于 PET 薄膜的热物性能参数非常少,近似地认为在整个接头温度区间内,它们的热物理性能参数不发生改

变。模型中使用的 PET 薄膜、薄钛板和 K9 玻璃的各项热物理性能参数如表 1 所示。

表 1 PET 薄膜、薄钛板和 K9 玻璃的热物理性能参数

Table 1 Thermal properties of the materials used in the FEA model

Material	Density / (kg/m ³)	Specific heat capacity / [J/(kg · K)]	Thermal conductivity / [W/(m · K)]
PET	1330	1100	0.35
Titanium	4510	530	17
Glass	2500	858	1.1

激光的热源模型使用超高斯面热源模型,分布规律为^[17]

$$q = \frac{Q}{\pi r^2}, \quad (4)$$

式中 r 为定义的光斑半径值,该处的热流密度为最大热流密度的 5%, Q 为吸收的总能量。利用 APDL 语言的编程来控制超高斯热源的形状,实现移动热源的加载。初始温度设为 20 °C,对流系数设为 10 W/(m² · °C),辐射率为 0.92。

5 结果及讨论

5.1 温度场的变化规律

图 3 是激光器功率为 5 W,加工速度为 100 mm/min,光斑直径为 0.9 mm 时 PET 薄膜和薄钛板接触面不同时刻的温度场。可以看出,激光移动轨迹后方有迟滞的温度场,前端的温度等值线比已连接区域的要细密。

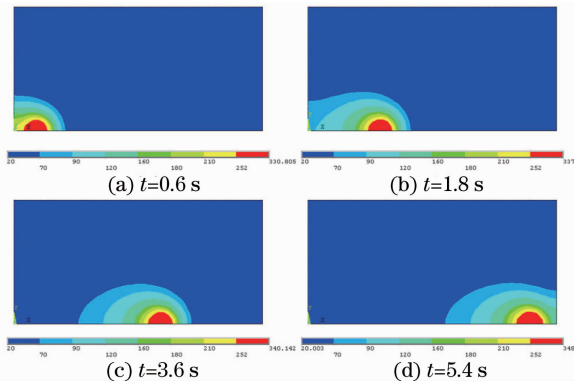


图 3 PET 薄膜和薄钛板接触面不同时刻的温度场
Fig. 3 Temperature contours in the interface at different time points

图 4 是激光器功率为 5 W,加工速度为 100 mm/min 时 PET 薄膜和薄钛板连接接头对称面不同时刻的温度场。可以看出,薄钛板吸收激光能量产生较高的温度,上层的 PET 薄膜具有明显的隔

热作用。此时 0.1 mm 厚的 PET 上表面还没有达到它的熔点 252 °C。

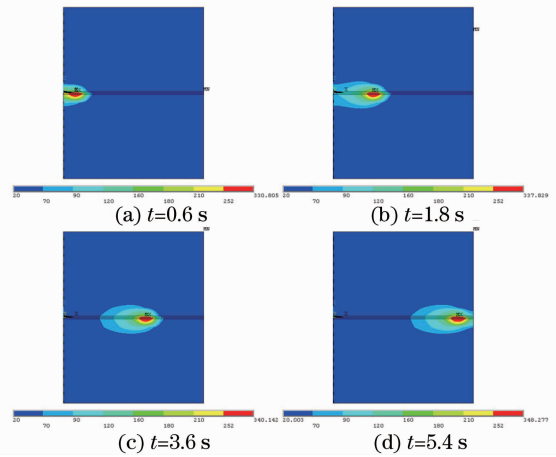


图 4 PET 薄膜和薄钛板连接接头对称面不同时刻的温度场
Fig. 4 Temperature contours in the symmetry plane at different time points

图 5 给出了 PET 薄膜和薄钛板接触面距边缘 6 mm 处,离连接接头中心线上不同距离 s 的点温度随时间的变化曲线。可以看出当热源移动到该点时,该点吸收大量激光能量,温度迅速上升,直到最大值 340.142 °C,当热源通过该点后,能量通过热传导传递到周边材料,温度下降,温度上升的速度比温度下降的速度快。当 $s=0.4$ mm 时温度的最大值仍高于 PET 薄膜的熔点 252 °C,模拟时取 252 °C 等温线所达到的宽度作为连接接头宽度的计算值。此时接头宽度为 0.936 mm。

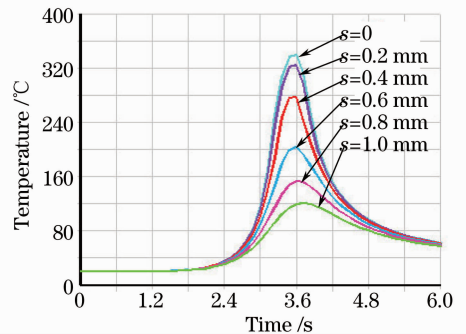


图 5 PET 薄膜和薄钛板接触面离连接接头中心线上不同距离点温度随时间的变化曲线
Fig. 5 Change curves of temperature at different points in center line of joint

5.2 激光器功率对温度场的影响

加工速度为 1.5 mm/s,光斑直径为 0.9 mm;激光器功率分别为 3.5,4,4.5,5,5.5 和 6 W 时,PET 薄膜和薄钛板接触面温度场的分布云图如

图 6,7 所示。可以看出随着激光器功率的增加连接区域最高温逐渐变大,温度大于 PET 薄膜熔点 252 °C 的区域逐渐增大,连接接头宽度不断变宽。

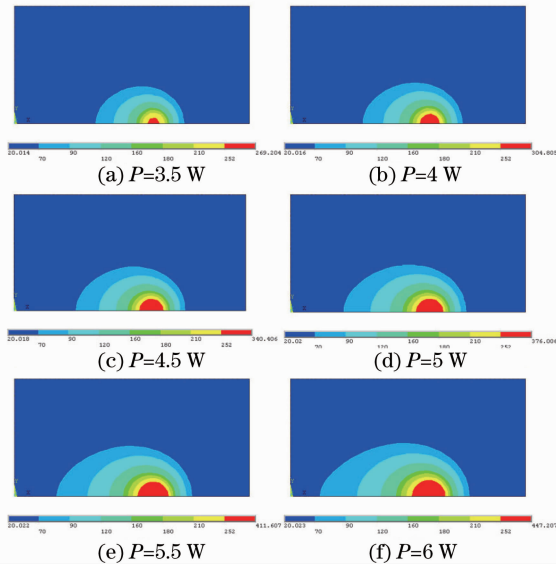


图 6 不同功率时 PET 薄膜和薄钛板接触面温度场的分布云图

Fig. 6 Temperature contours in the interface at different laser powers

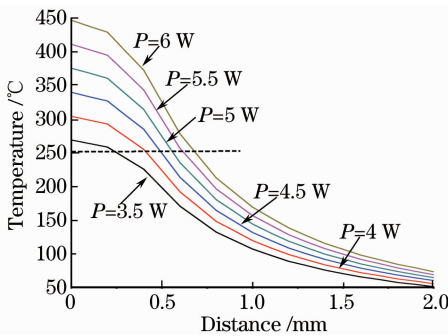


图 7 不同功率下接触面温度场的分布曲线

Fig. 7 Change curves of temperature in the interface at different laser powers

图 8 为不同激光器功率下 PET 薄膜和薄钛板对称面温度场的分布曲线;表 2 为不同激光器功率下最高温、接头宽度和 PET 上表面温度的计算值。可以看出,随着激光器功率的增加接头宽度不断变宽。激光功率太小,被连接件吸收热量不足,连接处温度会很低,不利于接头成形;激光功率太大,被连接件吸收热量过多,接头处温度会很高,也会产生局部过热。PET 上表面温度在激光器功率为 5.5 和 6 W 时已接近或大于 PET 熔点,发生了部分分解或烧蚀,熔融的 PET 粘贴在 K9 玻璃上,取出试样时 PET 表面已经发生破坏。

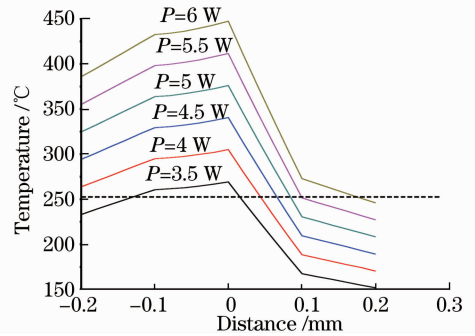


图 8 不同功率下对称面温度场的分布曲线

Fig. 8 Change curves of temperature in the symmetry plane at different laser powers

表 2 不同激光器功率下接头最高温、接头宽度和 PET 上表面温度的计算值

Table 2 Maximum temperature, joint width and temperature of PET at different laser powers

Laser power /W	Maximum temperature /°C	Joint width /mm	Temperature of PET /°C
3.5	269.204	0.484	167.358
4.0	305.805	0.822	188.409
4.5	340.406	0.984	209.461
5.0	376.006	1.116	230.512
5.5	411.607	1.232	251.563
6.0	447.207	1.360	272.614

5.3 加工速度对温度场的影响

激光器功率为 5 W,光斑直径为 0.9 mm;加工速度分别为 15, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 250 和 300 mm/min 时,PET 薄膜和薄钛板接触面的温度场分布如图 9,10 所示。可以看出随着加工速度的增加连接区域最高温逐渐变小,温度大于 PET 薄膜熔点的区域逐渐变小,连接接头宽度不断变窄。

图 11 为不同加工速度下 PET 薄膜和薄钛板对称面温度场的分布曲线;表 3 为不同加工速度下接头最高温,接头宽度,PET 上表面和 Ti 下表面温度的计算值。可以看出随着加工速度的增加接头宽度不断变窄。加工速度太小时,连接件处吸收热量过多,接头处温度会很高,产生局部过热;加工速度太大时连接件吸收热量不足,连接处温度会很低,不利于接头成形。PET 上表面温度在加工速度为 15 和 30 mm/min 时已大于 PET 熔点,发生了部分分解或烧蚀,熔融的 PET 粘贴在 K9 玻璃上,取出试样时,PET 表面已经发生破坏。

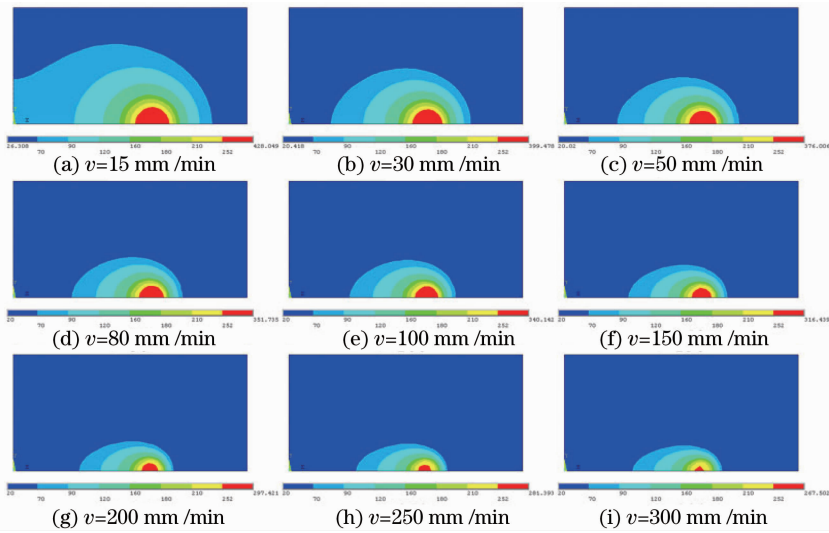


图 9 不同加工速度下 PET 薄膜和薄钛板接触面温度场的分布云图

Fig. 9 Temperature contours in the interface at different scanning speeds

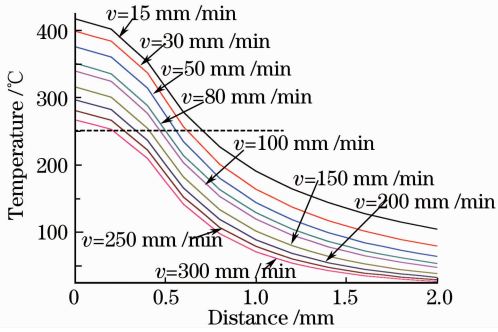


图 10 不同加工速度下接触面温度场的分布曲线

Fig. 10 Change curves of temperature in the interface at different scanning speeds

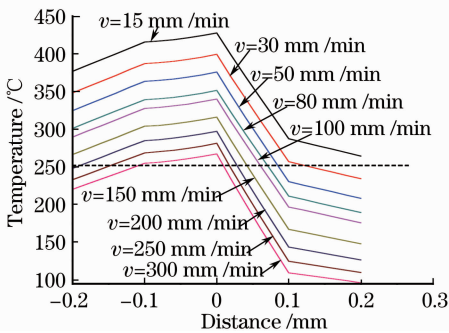


图 11 不同加工速度下对称面温度场的分布曲线

Fig. 11 Change curves of temperature in the symmetry plane at different scanning speeds

6 试验结果与模拟结果

6.1 接头形貌

激光器功率为 5 W,加工速度为 100 mm/min 时,所得的样品宏观视图如图 12 所示。从图 12 可以看出,样品成形美观,表面无破损,连接接头均匀平

滑,无明显缺陷,实现了 PET 薄膜与薄钛板之间的激光透射连接。

表 3 不同加工速度下接头最高温、接头宽度和 PET 上表面温度的计算值

Table 3 Maximum temperature, joint width and temperature of PET at different scanning speeds

Scanning speed / (mm/min)	Maximum temperature / °C	Joint width / mm	PET Temperature / °C
15	428.047	1.436	287.628
30	399.478	1.236	257.054
50	376.006	1.116	230.512
80	351.735	0.998	211.339
100	340.142	0.936	196.966
150	316.439	0.816	167.095
200	297.421	0.670	143.535
250	281.383	0.532	124.663
300	267.502	0.416	109.418

图 13 所示为加工速度为 50 mm/min,激光器功率分别为 3.5,4,4.5,5,5.5 和 6W 时,连接接头的典型形貌。从图 13 中可以看出随着激光器功率的增加,被连接件吸收的热量不断增加,连接接头宽度不断变宽。当激光器功率为 3.5 和 4 W 时,连接接头未能充分作用,接头周围未出现明显的热影响区;当激光器功率为 4.5 和 5 W 时,连接效果最佳,接头成形良好,未出现明显缺陷,形成了完整的热影响区;当激光器功率为 5.5 和 6 W 时,连接接头出现部分分解和烧蚀,在功率为 6 W 时,因热输入量过大,试样已与夹持的 K9 玻璃发生了作用而连接在一起,分离出试样后,试样表面已出现了破坏。

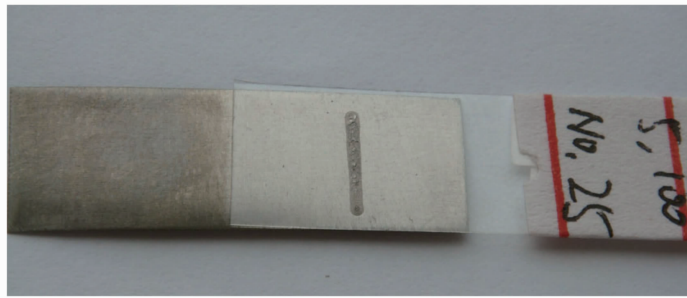


图 12 样品宏观图片

Fig. 12 Joint sample

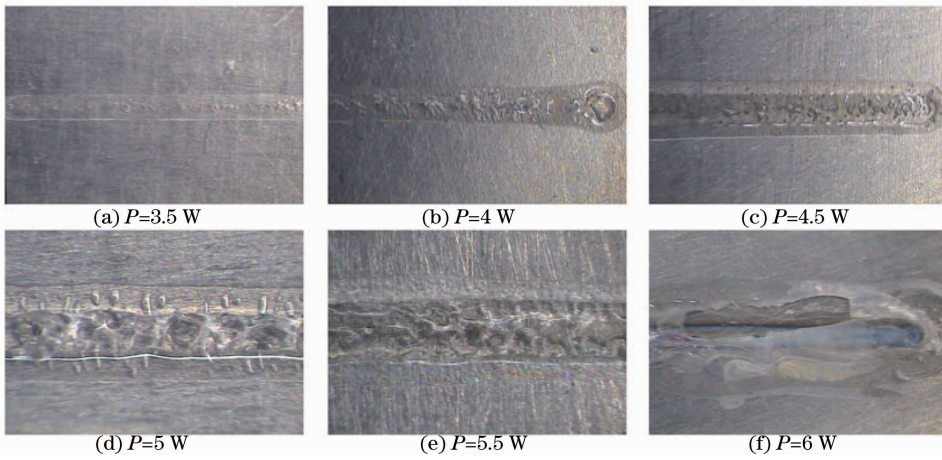


图 13 连接接头的典型形貌

Fig. 13 Representative joint morphologies

6.2 试验结果与模拟结果对比

图 14, 15 分别为激光器功率变化以及加工速度变化对接头宽度影响试验值与计算值的对比, 可以看出当功率变化时接头宽度计算值要比试验值略大; 而当加工速度在 30~150 mm/min 时所得的接头宽度试验结果与模拟结果之间差异不大, 能够有效地反映出加工速度变化对接头宽度的影响。但计算结果和试验结果两者趋势基本吻合, 说明该有限元模型是可靠的。

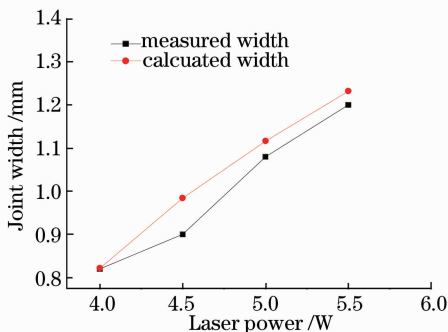


图 14 功率变化对接头宽度的试验值与计算值

Fig. 14 Comparison of measured width and calculated width at different laser powers

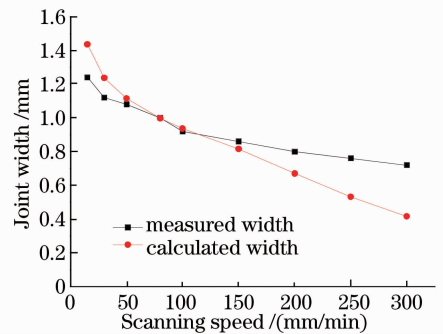


图 15 加工速度对接头宽度的试验值与计算值

Fig. 15 Comparison of measured width and calculated width at different scanning speeds

7 结 论

利用商业化软件 ANSYS, 使用 APDL 语言编程实现超高斯型热源的动态加载, 得到了激光透射连接三维温度场的分布, 并计算出相应的接头宽度。通过对 PET 薄膜与薄钛板的激光透射连接试验接头宽度的测量值进行对比, 两者趋势基本吻合, 说明该有限元模型是可靠的。

对温度场的变化规律进行了讨论, 发现激光移

动轨迹后方有迟滞的温度场,前端的温度等值线比已连接区域的要细密。在进入准稳定状态后,各点的变化过程基本相同。1)随着激光器功率的增加连接区域最高温逐渐变大,温度大于 PET 薄膜熔点的区域逐渐增大,连接接头宽度不断变宽;2)激光器功率较大,连接处温度已接近或大于 PET 熔点时,发生了部分分解或烧蚀,试样表面已经发生破坏;3)随着加工速度的增加连接区域最高温逐渐变小,温度大于 PET 薄膜熔点的区域逐渐变小,连接接头宽度不断变窄;4)加工速度较小,连接处温度已大于 PET 熔点,发生了部分分解或烧蚀,试样表面已经发生破坏。

参 考 文 献

- 1 Wang Lisha, Luo Yanhong. CRTER's topics of interest in 2008: medical implant research [J]. *J. Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2007, **11**(48): 9771~9776
王莉莎, 罗艳红. 2008 年 CRTER 重点组稿内容之一: 医学植入体研究[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2007, **11**(48): 9771~9776
- 2 Tonfiz Uddin Mahmood. Laser microjoining of dissimilar materials[D]. Wayne State University Dissertation, 2008
- 3 H. J. Herfurth, R. Witte, S. Heinemann. Microjoining of dissimilar materials for life science applications[C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 292~296
- 4 Wang Ming, Song Xiping. Study actuality of corrosion, mechanical compatibility and biocompatibility of titanium alloys for medical application[J]. *Titanium Industry Progress*, 2008, **25**(2): 13~18
王 明, 宋西平. 医用钛合金腐蚀、力学相容性和生物相容性研究现状[J]. *钛工业进展*, 2008, **25**(2): 13~18
- 5 Zhao Di, Huang Wenchan. Advance in research on bioactive glass composites for bone repair[J]. *Function Materials*, 2008, **39**(3): 353~357
赵 荻, 黄文岳. 骨修复用生物玻璃复合材料研究进展[J]. *功能材料*, 2008, **39**(3): 353~357
- 6 Jiao Yongfeng, Zhao Lei. The development and current status of bioceramics[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2008, **41**(2): 7~12
焦永峰, 赵 磊. 生物陶瓷材料的研究进展[J]. *江苏陶瓷*, 2008, **41**(2): 7~12
- 7 Zhang Jun, Hu Xingbin, Li Xiong. Application of biomedical polymer materials in medicine[J]. *Chinese Hospital Architecture & Equipment*, 2008, (1): 30~35
章 俊, 胡兴斌, 李 雄. 生物医用高分子材料在医疗中的应用[J]. *中国医院建筑与装备*, 2008, (1): 30~35
- 8 A. Mian, G. Newaz, L. Vendra *et al.*. Laser bonded microjoints between titanium and polyimide for applications in medical implants[J]. *Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, **16**(3): 229~237
- 9 G. G. Daniel, S. Taslema, A. Mian *et al.*. Laser fabrication and characterization of sub-millimeter joints between polyimide and Ti-coated borosilicate glass[J]. *Materials Science*, 2005, **40**(21): 5641~5647
- 10 S. Taslema, L. Grigor, A. Greg *et al.*. XPS analysis of laser transmission micro-joint between poly (vinylidene fluoride) and titanium[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **255**(5): 2569~2573
- 11 L. Grigor, S. Taslema, J. Ronald *et al.*. XPS study of laser fabricated titanium/KaptonFN interfaces[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(22): 7173~7177
- 12 L. Grigor, J. Ronald, F. Erik *et al.*. Chemical bond formation during laser bonding of Teflon FEP and titanium[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(15): 7078~7083
- 13 Liu Huixia, Li Pin, Xing An *et al.*. Laser transmission welding of thermoplastic polyurethane films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 156~160
刘会霞, 李 品, 邢 安等. 热塑性聚氨酯弹性体(TPU)薄膜激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 156~160
- 14 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *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
- 15 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807
刘会霞, 邢 安, 张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1801~1807
- 16 T. Mahmood, A. Main, M. R. Amin *et al.*. Finite element modeling of transmission laser microjoining [J]. *Materials Processing Technology*, 2007, **186**(1-3): 37~44
- 17 A. Main, T. Mahmood, G. Auner *et al.*. Effects of laser parameters on the mechanical response of laser irradiated micro-joints [J]. *Materials Research Society*, 2006, **926**(4): 90~95