

文章编号: 0258-7025(2008)11-1801-07

# 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟

刘会霞 邢安 张惠中 李品 向宝珍 王霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 使用 ANSYS 软件,建立了使用激光透射焊接技术焊接透明聚氯乙烯(PVC)的三维有限元热分析模型,利用 APDL 编程实现高斯型热源的动态加载,得到了温度场的分布;进一步分析了焊接速度、激光平均功率和光斑直径等工艺参数对焊接质量的影响,并计算出焊缝宽度。结果表明,随着焊接速度的增加,焊缝区域的最高温度逐渐降低,焊缝宽度逐渐减小;当激光平均功率增大时,焊缝区域的最高温度增高,焊缝宽度增大;而当光斑直径增大时,焊缝宽度增大,但焊缝处的最高温度有所下降。焊缝宽度计算值与实验测量值相比,二者比较吻合。

**关键词** 激光技术; 温度场; 激光透射焊接; 工艺参数

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1801

## Temperature Field Simulation on Laser Transmission Welding of Polyvinylchloride

Liu Huixia Xing An Zhang Huizhong Li Pin Xiang Baozhen Wang Xiao

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

**Abstract:** A three-dimensional (3-D) thermal model based on the finite element theory is implemented to simulate the temperature field on laser transmission welding of polyvinylchloride (PVC) by means of software ANSYS. With the ANSYS parametric design language APDL, a moving Gaussian distributed heat source is applied, and the distribution of the temperature field is gained. Effect of process parameters, including laser power, scanning welding and spot diameter, on the welding result is investigated, and the calculated melting width is obtained. The results show that with increasing of scanning speed, the maximum temperature and the melt width decrease; with increasing of laser average power, the maximum temperature and the melt width increase; with increasing of spot diameter, the maximum temperature decreases and the melt width increases. Very good agreement is achieved between the calculated value and the measured value.

**Key words** laser technique; temperature field; laser transmission welding; process parameter

### 1 引言

塑料激光透射焊接技术已发展成为重要的聚合物材料连接工艺之一,与其他传统连接方法相比有着许多独特的优势,例如热影响区域小、连接所受的力学载荷小、焊接工艺高度灵活、焊缝规则无飞边、工艺过程安全等<sup>[1,2]</sup>。随着热塑性材料的持续发展,以及激光焊接所需设备费用下降,此项技术拥有广阔的发展前景。

研究各工艺参数对焊接质量的影响,寻求最佳工艺参数是焊接研究工作中的重点<sup>[3]</sup>。通过实验的方法确定各参数对焊接质量的影响,优化工艺参数,

需要大量的焊接实验,实验过程冗繁,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,研究焊接工艺参数与焊接质量的关系。对于热塑性塑料激光透射焊接温度场的数值模拟,国外已有一些学者从事了这方面的工作。美国俄亥俄州立大学 D. Grewell 等<sup>[4]</sup>比较了 Rosenthal 的点热源解析模型和 W Eagar 等的高斯分布热源数值积分模型,结果表明在焊接 PC 和 PS 的实验中,激光光斑直径为 25  $\mu\text{m}$  时两种模型都能够准确地计算出焊缝尺寸。

德国帕特伯恩大学 H. Potente 等<sup>[5]</sup>于 1999 年

收稿日期:2008-09-16; 收到修改稿日期:2008-10-10

作者简介:刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工技术、数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn

在单面热脉冲焊接模型的基础上,提出了透射式焊接的解析模型,并通过实验确定了激光光束在穿过上层透射材料后的光源模式。在焊接 PA6 的实验中,当底层吸收率很大时,焊缝尺寸的计算值和测量值相符。如果底层材料吸收率较低,就需要引入修正系数来减小计算和测量的差值。2002 年 F. Becker 等<sup>[6]</sup>在进一步的研究中提出了一个有限元模型,这个模型考虑了导热系数、比热容、密度等材料属性随温度的非线性变化,结果表明在焊接 PP 实验中,焊缝尺寸计算值和测量值相符。在 2006 年,此模型又得到了进一步的完善<sup>[7]</sup>,在激光拼焊 PA6 的实验中成功地预测了焊缝位移。

日本电气通信大学 K. Sato 等<sup>[8]</sup>则采用了有限差分法建立了激光透射式焊接的数学物理模型,但是模型只能计算焊接深度,不能得到焊接宽度的计算值。加拿大皇后大学 L. S. Mayboudi 等<sup>[9]</sup>先后提出了几种模型,在最新的研究中,首次使用红外热成像技术直接测量了焊接过程中的温度场,并与三维热模型进行了比较,二者结果基本一致。

本文将针对透明聚氯乙烯(PVC)的激光透射焊接建立一个三维热传导模型,使用有限元法求得焊接过程中温度场的分布,得到温度场达到准稳态的时间,分析焊接速度、激光平均功率和光斑直径等工艺参数对焊接质量的影响,并计算出几组工艺参数组合下的焊缝宽度。

## 2 热塑性塑料激光透射焊接

激光透射焊接的先决条件就是两被焊件一个能够透过激光而另一个零件吸收激光能量<sup>[1,10]</sup>,如图 1 所示。在焊接开始前,被焊零件相互接触,将激光光束聚焦于待焊接区域,激光束透过上层零件,然后在两零件接触面(即焊接区域)被另一个零件吸收,形成热作用区;热作用区(即两零件接触面)中的塑料

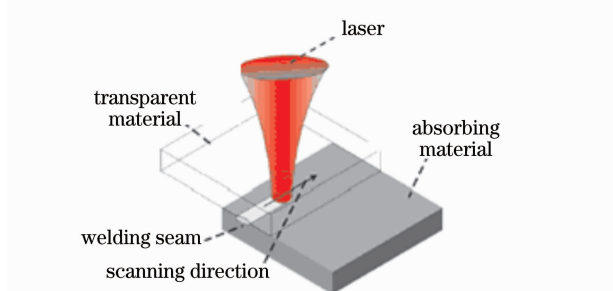


图 1 激光透射焊接基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding of thermoplastics

被熔化,热熔状态下的塑料大分子在焊接压力的作用下互相扩散,产生范德华力,在凝固的过程中已熔化的材料形成焊接接头,被焊件即被连接起来。

## 3 理论模型的建立

透射式焊接温度场的空间时间分布符合三维热传导微分方程

$$\rho(T)c(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{Q}, \quad (1)$$

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,  $\rho$  为材料密度,  $c$  为比热容,  $\lambda$  为热传导系数,  $\dot{Q}$  为内部热源强度。

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

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

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,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常量 $[5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ ,  $\epsilon$  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  $\lambda$  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 建立 ANSYS 模型

焊接材料为透明聚氯乙烯,焊接接头形式及尺寸如图 2 所示。样品的玻璃化温度在  $80 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$  内,  $170 \text{ }^\circ\text{C}$  以上呈熔融状态,其热物理性参数<sup>[11]</sup>如图 3 所示。

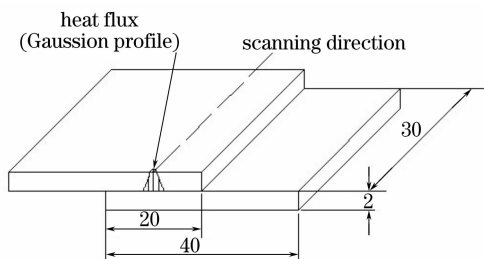


图 2 PVC 焊接试验焊接形式及样品尺寸

Fig. 2 Schematic of the welding form and the size of PVC sample

假设仅在接触面处产生热量,由于上下两层材料的对称性,热量将对称地传递到两被焊件中。为

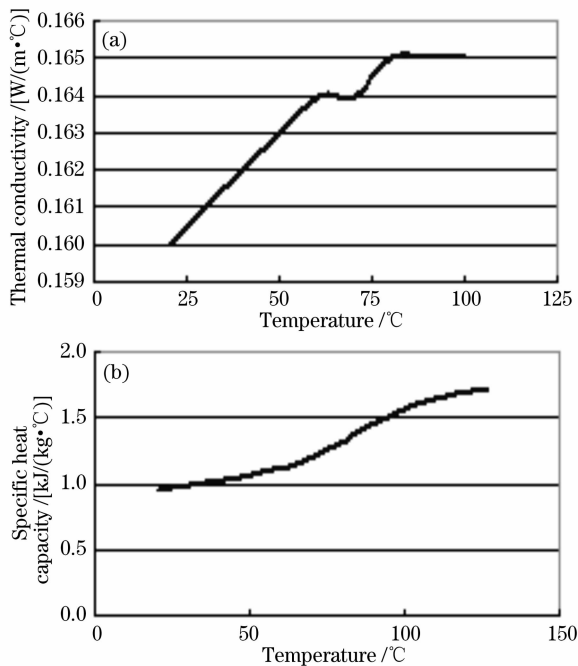


图 3 PVC 随温度变化的热传导系数和比热容

Fig. 3 Thermal conductivity and specific heat capacity of PVC depending on temperature

有效地减少计算时间,在模拟的过程中仅取两被焊件搭接部分的一半进行分析,模型尺寸为  $40\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$ 。在划分网格时为了提高计算精度,局部网格进行细化。

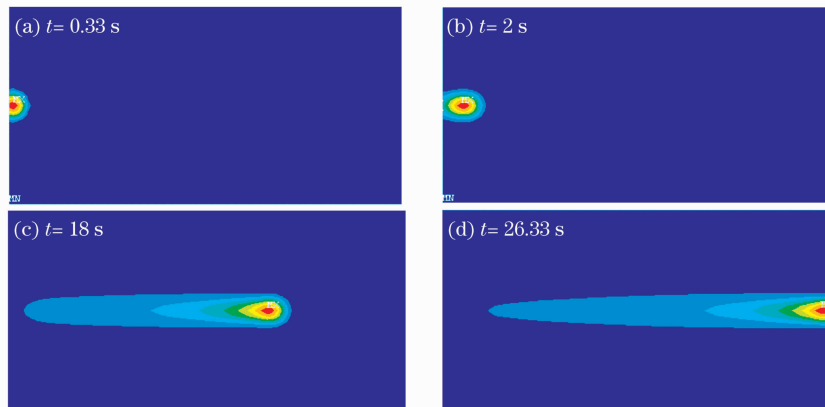


图 4 PVC 焊接接触面不同时刻的温度场

Fig. 4 Temperature contours in the interface at different time points

图 5 给出了 PVC 焊缝中心线上不同点温度随时间的变化曲线。可以看出在进入准稳态后,各点的变化过程基本相同,焊缝中心最高温度为  $359.371\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当热源移动到某点时,该点吸收大量激光能量,温度迅速上升,直到最大值,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。直接确定激

单元属性选取热分析单元 Solid70<sup>[12]</sup>,该单元为六面体八节点三维单元,只包含一个温度自由度。焊接热源的模拟使用高斯面热源模型,分布规律为<sup>[13]</sup>

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中  $\bar{r}$  为距离光斑中心的半径值, $r$  为激光光斑直径,该处的热流密度  $q$  降为最大热流密度的 5%, $Q$  为吸收的总能量。在软件 ANSYS 的热分析模块中,允许使用函数来控制高斯热源的形状,利用 APDL 语言的编程来实现移动热源的加载。初始温度设为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对流系数设为  $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,辐射率 0.92。

## 5 结果及讨论

### 5.1 温度场的变化规律

焊接参数为:焊接速度  $1.5\text{ mm/s}$ ,激光器平均功率  $90\text{ W}$ ,激光器频率  $10\text{ Hz}$ ,光斑直径  $3\text{ mm}$ ,得到其不同时刻的温度场如图 4 所示。可以看出,熔池中最高温度稍滞后于激光光斑中心。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焊接区域的要细密。这是因为:虽然光斑中心的功率密度最大,位于此点处的材料吸收激光能量最多,但是位于光斑中心稍后处的材料吸收激光的能量仍大于其向低温处热传导损失的能量,温度将继续升高。

光焊接过程中的温度场非常困难<sup>[14]</sup>,一般可以通过比较焊缝的宽度来间接地确定其温度场的分布。聚氯乙烯玻璃化温度在  $80\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  内,在焊接的过程中温度超过  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  时形成焊缝,模拟时取  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  等温线所达到的宽度作为焊缝宽度的计算值<sup>[3,4]</sup>,此时焊缝宽度为  $2.80\text{ mm}$ 。

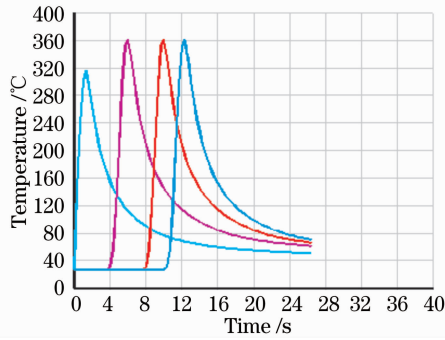


图 5 PVC 焊缝中心线上不同点温度随时间变化曲线  
Fig. 5 Change curve of temperature at different points in center line of weld seam with time

### 5.2 焊接速度对温度场的影响

焊接参数为:激光平均功率 90 W,光斑直径 3 mm,激光器频率 10 Hz。焊接速度分别为 1.5 mm/s, 2.5 mm/s, 3.5 mm/s, 4.5 mm/s, 5.5 mm/s, 计算结果如图 6 和表 1 所示。可以看出随着焊接速度的增大,等温线越来越稀疏,焊缝区域的最高温度逐渐降低,从 359.371 °C 下降到 177.674 °C,焊缝宽度相应减小,从 2.80 mm 减小到 2.24 mm。焊接速度决定了材料表面受激光辐射作用时间的长短,当焊接速度较低时,被焊件受激光辐射时间较长,所吸收激光能量较多,焊缝处温度相对较高;焊接速度太快,被焊件吸收热量不足,温升相对很低。

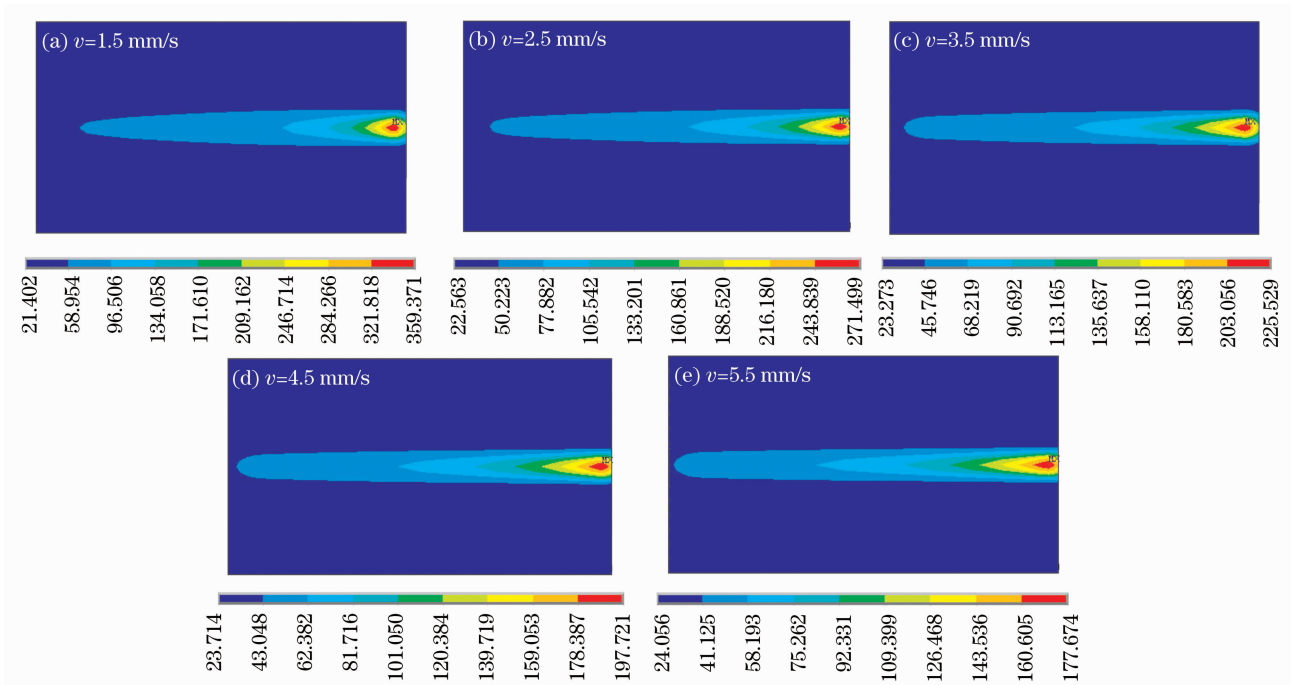


图 6 不同焊接速度下的温度场

Fig. 6 Temperature contour at different scanning speed

表 1 不同焊接速度下焊缝处的最高温度及宽度

Table 1 Maximum temperature and melt width at different scanning speed

Scanning speed / (mm/s)	Maximum temperature / °C	Melt width / mm
1.5	359.371	2.80
2.5	271.499	2.66
3.5	225.529	2.56
4.5	197.721	2.40
5.5	177.674	2.24

表 2 不同激光平均功率下焊缝处的最高温度及宽度

Table 2 Maximum temperature and melt width at different laser power

Laser average power / W	Maximum temperature / °C	Melt width / mm
50	174.310	2.93
60	198.923	3.04
70	223.423	3.24
80	248.199	3.45
90	273.188	3.52

### 5.3 激光平均功率对温度场的影响

焊接参数为:焊接速度 1.5 mm/s;光斑直径 4 mm,激光器频率 10 Hz,激光平均功率分别为 50 W, 60 W, 70 W, 80 W, 90 W, 计算结果如图 7 和表 2 所示。

可以看出随着激光平均功率的增加焊缝区域的最高温度逐渐增加,从 174.31 °C 增加至 273.188 °C,焊缝宽度从 2.93 mm 增加到 3.52 mm。激光平均功率不影响激光功率密度分布的形状,但决定了各点功率密度的大小。激光功率较小时,功率密度很小,

在相同的时间内被焊接件吸收的激光能量很小,焊缝处温度很低;激光平均功率较大,被焊件吸收热量较多,焊缝处温度很高。

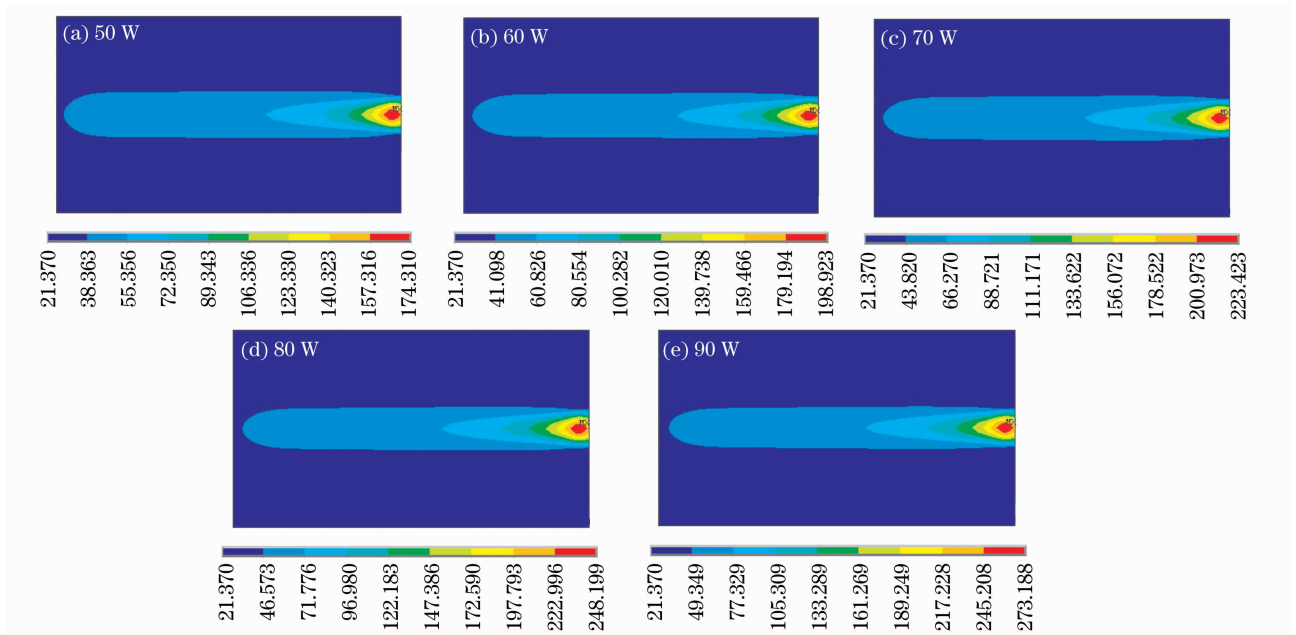


图 7 不同激光平均功率下的温度场

Fig. 7 Temperature contour at different laser power

### 5.4 光斑直径对温度场的影响

焊接参数为:焊接速度 1.5 mm/s,激光平均功率 90 W,激光器频率 10 Hz。光斑直径分别为 2 mm,3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm,计算结果如图 8 和表 3 所示。可以看出随着光斑直径的增加,等温线的形状在长度和宽度方向上明显变大,焊缝宽度

也相应增加,从 2.53 mm 增加至 3.69 mm,而焊缝区域的最高温度却逐渐降低,从最高的 518.164 °C 降低到 183.465 °C。随着光斑直径的增大,激光束的热作用区域也增大,所以焊缝宽度相应增大。但是由于激光平均功率不变,增大光斑直径就减小了激光功率密度,因此焊缝处的最高温度有所下降。

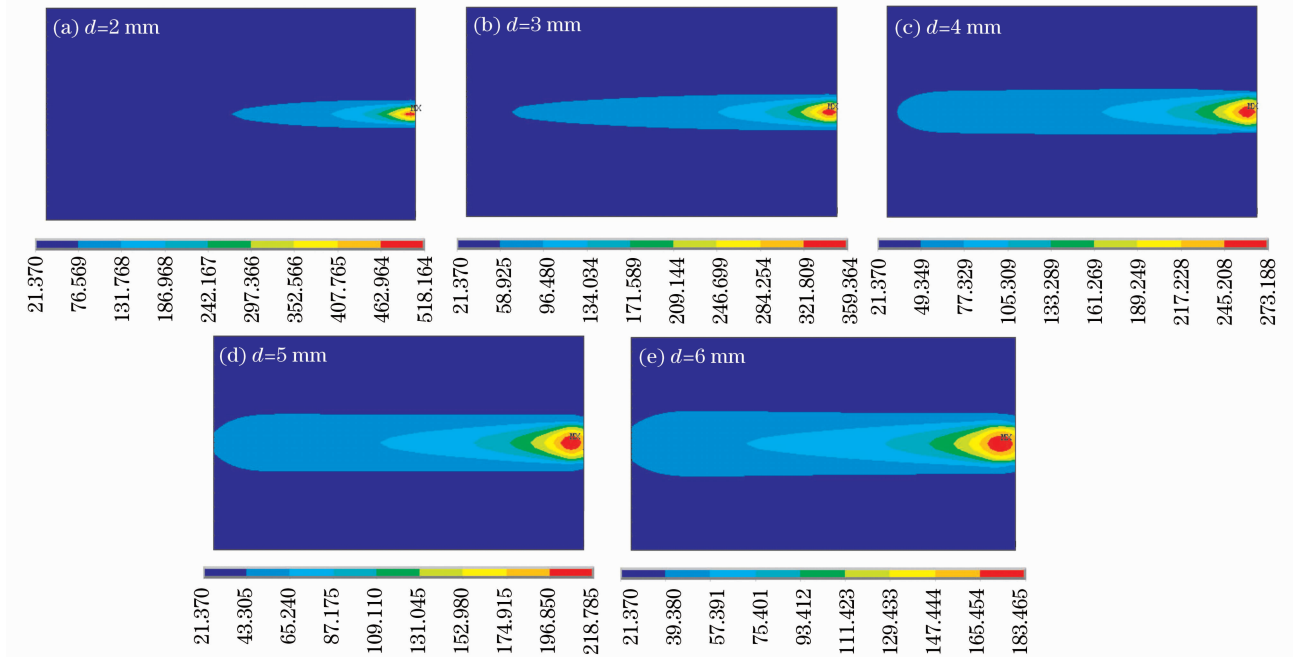


图 8 不同光斑直径下的温度场

Fig. 8 Temperature contour at different laser spot diameters

表3 不同光斑直径下焊缝处的最高温度及宽度  
Table 3 Maximum temperature and melt width at different laser spot diameters

Spot diameter /mm	Maximum temperature /°C	Melt width /mm
2	518.164	2.53
3	359.364	2.93
4	273.188	3.52
5	218.785	3.68
6	183.465	3.69

### 5.5 模拟结果与实验结果对比

为了使激光能量被底层材料吸收,可以在底层材料中渗入吸收颗粒(一般为碳黑),或者在接触面处增加吸收剂涂层。实验中使用由 Gentex 公司提供的 Clearweld® 吸收剂,此种吸收剂在可见光波长范围内能够透射光波,但吸收红外光波,特别是对 1064 nm 波长有很高的吸收率<sup>[1]</sup>。实验所用激光器为 LD802M 型 Nd:YAG 激光器,波长 1064 nm,最大平均输出功率 200 W。使用 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 分光光度计(仪器透射率测量精度±0.08%)对样品进行了透射率测试,在波长 1064 nm 处的透射率为 89.63%,适合于激光透射焊接。焊接样品如图 9 所示。焊接后通过剥离实验,得到焊缝宽度的测量值。在 5 组工艺参数下,比较了焊缝宽度的测量值和计算值,工艺参数见表 4,结果如图 10 所示。



图9 焊接后的 PVC 样品  
Fig. 9 Melted sample of PVC

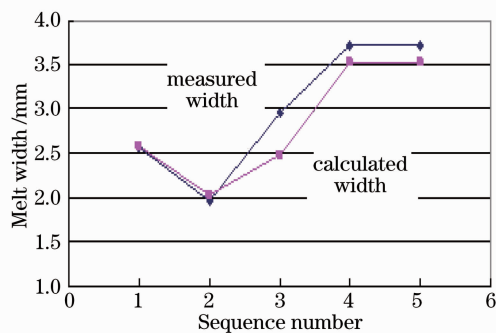


图10 焊缝宽度的模拟值与实验值比较  
Fig. 10 Comparison of measured width and calculated width

可以看出实验结果都略高于模拟结果,最主要的原因是模拟中没有考虑熔池的流动对热传导的影响,导致模拟热影响区比实际小些。但总体来讲模拟结果和实验结果比较吻合,说明该有限元模型是可靠的。

表4 比较焊缝宽度的测量值和计算值的工艺参数  
Table 4 Process parameter compared between measured width and calculated width

Sequence number	Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Laser frequency /Hz	Laser diameter /mm
1	50	2.5	6	3
2	60	2.5	10	2
3	70	5.5	8	4
4	80	3.5	6	6
5	90	2.5	6	4

## 6 结 论

利用商业化软件 ANSYS,使用 APDL 语言编程实现高斯型热源的动态加载,得到了激光透射焊接的温度场分布,并计算出焊缝宽度。与 PVC 焊接实验焊缝宽度的测量值相比,实验结果略大于模拟结果,二者趋势比较吻合,说明有限元模型是可靠的。

对温度场的变化规律进行了讨论,发现熔池中最高温度不在激光光斑中心,而是稍微滞后于激光光斑中心。在进入准稳定状态后,各点的变化过程基本相同。焊接速度、激光平均功率和光斑直径都是影响温度场分布的重要因素。在其他各参数相同的情况下,随着焊接速度的增加,被焊件吸收能量减少,焊缝区域的最高温度逐渐降低,焊缝宽度逐渐减小。当激光平均功率增大时,被焊件吸收能量增加,焊缝区域的最高温度增高,焊缝宽度增大。而当光斑直径增大时,激光束的热作用区域增大,激光光束功率密度减小,焊缝宽度增大,焊缝处的最高温度有所下降。

## 参 考 文 献

- 1 P. A. Hilton, I. A. Jones, Y. Kennish. Transmission laser welding of plastics[C]. *SPIE*, 2002, **4831**: 44~52
- 2 Bachmann F. G., Russek U. A.. Laser welding of polymers using high power diode lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 505~518
- 3 Qiang Hongliang, Cheng Zhaogu, Luo Jiangtao *et al.*. Influencing factors on topography of weld in deep penetration laser welding[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1289~1295  
强宏亮,程兆谷,雒江涛等. 激光深熔焊焊缝表面形状的影响因素[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1289~1295
- 4 D. Grewell, A. Benata. Modeling heat flow for a moving heat source to describe scan micro-laser welding [C]. *ANTEC*, 2003,

- 1: 1045~1050
- 5 H. Potente, J. Korte, F. Becker. Laser transmission welding of thermoplastics; analysis of the heating phase[J]. *Reinf. Plast. Compos.*, 1999, **18**(10): 914~920
- 6 F. Becker, H. Potente. A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, **42**(2): 365~374
- 7 H. Potente, G. Fiegler, H. Haferkamp. An approach to model the melt displacement and temperature profiles during the laser through-transmission welding of thermoplastics[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, **46**(11): 1565~1575
- 8 K. Sato, Y. Kruosaki, T. Satio. Laser welding of plastics transparent to near-infrared radiation[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 528~536
- 9 L. S Mayboudi, A. M. Birk, G. Zak. Laser transmission welding of a lap-joint: Thermal imaging observations and three-dimensional finite element modeling[J]. *J. Heat Transfer*, 2007, **129**(9): 1177~1186
- 10 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
- 11 James Donald Van de Ven. Laser Transmission Welding of Thermoplastics[D]. Minnesota University Doctor Dissertation, 2006. 109~113
- 12 ANSYS, Inc. ANSYS® 10 Manual[M]. SAS, IP Inc., 2005
- 13 T. Mahmood, A. Mian, M. R. Amin. Finite element modeling of transmission laser microjoining process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2007, **186**(1): 37~44
- 14 Peiquan Xu, Xinhua Tang, Ri Na *et al.*. Study on welded seam recognition using circular laser vision sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 328~331