

数值模拟驱动的激光透射焊接 PET 与 304L 不锈钢的优化研究

陈浩 王霄 刘会霞 李品 黄创 赵振关 严长

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 生物医学领域中的生物植入体必须使用具有生物相容性的材料进行连接以适应人体内复杂的生物、物理和化学环境。激光透射焊接(LTW)是解决生物医用材料之间连接的一种新方法。由于利用实验方式获得生物医用材料的最佳焊接工艺参数时间长、成本高,因此提出一种数值模拟驱动实验设计、工艺参数建模与优化的方法,对激光透射焊接生物医用材料进行了系统的研究。首先利用有限元模型(FEM)对焊接过程中的温度场进行模拟,并用焊接实验对模拟结果进行验证;然后利用 FEM 的模拟结果进行实验设计,用人工神经网络(ANN)建立工艺参数和焊接结果之间的数学模型,并用 FEM 的模拟结果对此数学模型的预测结果进行验证;最后采用满意度函数(DF)与遗传算法(NSGA-II)相结合的方法,对工艺参数进行多目标优化,并对优化结果进行验证。结果表明:优化的预测结果、实验结果、模拟结果之间均取得了较好的一致性,此方法为有效指导生物医学领域中的焊接实验、提高焊接质量和降低生产成本开辟了新途径。

关键词 激光技术; 生物医用材料; 激光透射焊接; 数值模拟; 人工神经网络; 遗传算法; 工艺参数; 多目标优化
中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0403006

Numerical Simulation-Driven Optimization of Laser Transmission Welding Process Between PET and 304L Stainless Steel

Chen Hao Wang Xiao Liu Huixia Li Pin Huang Chuang
Zhao Zhenguan Yan Zhang

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

Abstract In the biomedical field, the implants need to be welded with biocompatible materials to adapt different environments in the human body. Laser transmission welding (LTW) is a new method which can be used to connect biomedical materials. However, using the experimental way to get the optimum process parameters of biomedical materials is a time-consuming and high cost project. A numerical simulation-driven experiment design modeling and optimization approach is presented. The LTW of biomedical materials is systematically investigated. Firstly, finite element modeling (FEM) is used to simulate the LTW process and the simulated results is confirmed with welding experiments. Then, an experiment design based on the FEM results is conducted and the artificial neural network (ANN) is used to establish the mathematical models between the process parameters and welding results. The predicted results of the ANN models are tested by FEM. Finally, desirability function (DF) integrated with developed non-dominating sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is used to carry out the multi-objective optimization of the process parameters. It demonstrates that the predicted results of the optimization are in good agreement with the simulated results and experimental results each other, so this approach provides a new way to guide the welding experiments, enhance the welding quality and reduce production cost in the biomedical sector.

Key words laser technique; biomedical materials; laser transmission welding; numerical simulation; artificial neural networks; genetic algorithm; process parameters; multi-objective optimization

OCIS codes 140.2020; 160.1435; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2013-08-05; 收到修改稿日期: 2013-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ 201105)

作者简介: 陈浩(1989—),男,硕士研究生,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: hchen1989@yahoo.cn

导师简介: 王霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工与数字化设计制造技术等方面研究。E-mail: wx@ujs.edu.cn

1 引言

激光透射焊接具有生物相容性的异种材料在生物医学植入体中具有有良好的应用前景^[1]。生物医学领域中的生物植入体必须使用具有生物相容性的材料进行连接以适应人体内复杂的生物、物理和化学环境^[2]。异种材料之间的连接,尤其是金属与聚合物之间,常用的方法有胶粘、铜焊和超声波焊接,但 these 方法均不适合生物植入体的局部连接,主要的缺陷是被连接材料的长期稳定性和生物相容性都很差。而激光透射连接技术凭借其准确、快速、柔性、热影响区小等特点,可以克服上述的工艺缺陷^[3-5]。

近年来,对激光透射焊接的研究主要集中在以实验为基础的工艺参数对焊接质量的影响以及工艺参数的建模与优化方面。Acherjee 等^[6]应用人工神经网络建立了热塑性材料丙烯酸的焊接强度、焊缝宽度和工艺参数之间的数学模型,并用实验对数学模型的可靠性进行了验证。Wang 等^[7]应用响应曲面法建立了聚碳酸酯的工艺参数与焊缝宽度、焊接强度之间的数学模型。采用了满意度函数与遗传算法相结合的方法对焊缝宽度、焊接强度和焊接成本进行了多目标优化。

另一方面,有学者采用数值模拟的方法对激光透射焊接过程进行了研究,主要集中在工艺参数对焊接质量以及温度场的影响方面,并且大多希望用模拟结果来指导后期的焊接实验。刘会霞等^[8]建立了聚氯乙烯材料的三维有限元热分析模型,分析了焊接速度、光斑直径和激光功率等工艺参数对焊接质量的影响,并与实验结果进行了对比。刘富荣等^[9]建立了一个三维的温度场模型,研究了激光透射焊接过程中温度场随时间的变化,模拟的结果与实验结果取得了较好的一致性,并进一步研究了工艺参数对温度场的影响。

从以上研究来看,通过焊接实验来指导实验设计,并进行工艺参数的建模与优化,此方法虽然对生产实践有直接的指导作用,但是焊接实验过程费时费力,成本较高。另一方面,人们希望利用数值模拟的方法,能够减少实验工作,节约时间和成本。但是之前进行的数值模拟研究,主要集中在工艺参数对焊接质量以及温度场的影响方面,并且大多希望用模拟结果来指导后期的焊接实验。而进一步在实验设计中引入数值模拟还未涉及,从而很难减少实验工作量。

提出了一种数值模拟驱动实验设计、工艺参数建模与优化的方法,对激光透射焊接进行了系统的

研究。选用具有生物相容性,在生物医学植入体中拥有良好应用前景的 0.1 mm 厚热塑性塑料 PET 薄膜和 0.65 mm 厚 304L 不锈钢板作为焊接材料。首先利用有限元模型(FEM)建立一个三维热传导模型,对焊接过程中的温度场进行模拟,并用焊接实验对模拟结果进行验证;然后应用 FEM 的模拟结果,运用人工神经网络(ANN)建立工艺参数(激光功率 P ,扫描速度 S ,离焦量 F)和焊接结果(接头处最高温度 T_{max} ,PET 薄膜上表面的最高温度 T_{top} ,焊缝宽度 W_w ,PET 薄膜的熔深 D_T)之间的数学模型,并用 FEM 的模拟结果对此数学模型的预测结果进行验证;最后将满意度函数(DF)和遗传算法(NSGA-II)相结合,对激光透射焊接的工艺参数进行多目标优化,从而获得 PET 薄膜与 304L 不锈钢的最佳焊接工艺参数,并将优化的预测结果、实验结果和模拟结果进行两两对比。

2 激光透射焊接过程数值模拟与实验验证

2.1 激光透射焊接条件和实验准备

激光透射焊接的一般条件就是要求上层材料能够透过激光,而下层材料能够较好地吸收激光能量。图 1 为激光透射焊接的基本原理示意图。焊接的可行性取决于待焊接材料的光学属性。本文采用的 PET 薄膜在半导体激光的光波(980 ± 10) nm 范围内具有极高的透射率,透射率高达 90% 左右,而 304L 不锈钢则具有较低的热传导性和较高的激光吸收率。

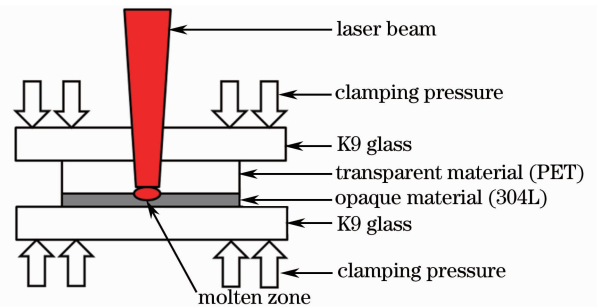


图 1 激光透射焊接的基本原理示意图

Fig. 1 Schematic of laser transmission welding process

实验所采用的激光器为 Dilas 公司 Copmact130/140 型半导体连续激光器,最大输出功率为 130 W,输出波长为(980 ± 10) nm,光纤的芯径 D 为 400 μm 。实验使用的试样在焊接前使用超声波清洗以除去 PET 薄膜和 304L 不锈钢板表面的灰尘与污垢,并放在干燥箱内干燥 10 h,以减少试样中的水分对焊接质量的影响。试样尺寸分别为

40 mm × 20 mm × 0.1 mm 和 40 mm × 20 mm × 0.65 mm, 具体尺寸如图 2 所示。在数值模拟中, 为

了节省计算时间, 选取焊接材料搭接部分的一半进行建模分析。

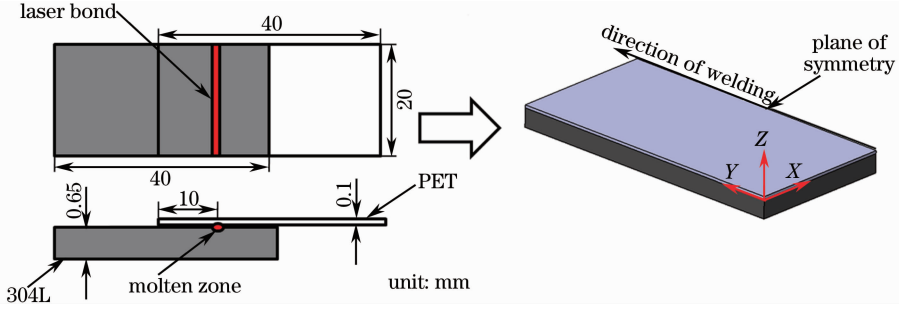


图 2 焊接样品的尺寸图与搭接部分一半的尺寸图

Fig. 2 Schematic of welding sample dimensions and one half of lapped portion

2.2 理论模型的建立

对于均匀连续介质而言, 在范围 D 内, 激光透射焊接温度场的空间与时间分布符合三维热传导微分方程^[10]

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

式中 x, y, z 代表笛卡尔坐标系下坐标值, T 为温度 (K), t 为时间 (s), ρ 为材料密度 (kg/m^3), c 为比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], Q 为内部热源强度 (W/m^3), v 为激光移动的速度 (m/s)。

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

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_0) + \epsilon(T^4 - t_0^4) = 0 \quad (x, y, z) \in S \text{ and } t > 0, \quad (3)$$

式中 D 是模型范围, S 是模型边界, k_n 是边界 S 的法向热传导系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], h 是热对流系数

[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], ϵ 是热辐射系数, T_0 是初始温度 (K), q 是材料表面 S 法向的热流密度 (W/m^2)。因为 c 和 k 等热物性能随温度的变化而改变, 以及热辐射条件, 使温度场分析变成了典型的非线性问题。

2.3 有限元模型的建立

用 ANSYS12.0 对激光透射焊接过程中的温度场进行模拟, 由于焊接过程是一个加热不均匀的过程, 在接头处的温度梯度变化很大, 因而划分网格时一般不采用均匀的网格, 而是在接头处及其附近的区域用加密的网格划分, 在远离焊接的区域, 热源能量传递相对缓慢, 温度梯度分布变化较小, 这时可以采用相对稀疏的网格划分。图 3 为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, 304L 不锈钢板, 下层 K9 玻璃夹持层, 整个模型划分网格后的单元数为 68400 个。由于 PET 薄膜和 304L 不锈钢板的厚度相对较小, 为了能够准确反映激光透射焊接过程中温度场的分布规律, 必须考虑上下层 K9 玻璃对焊接温度场分布的影响。

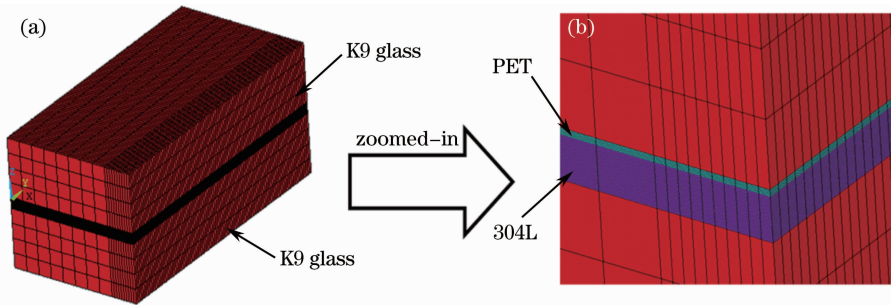


图 3 (a)有限元模型图及(b)其局部放大图

Fig. 3 (a) Finite element model and (b) a local zoomed in mesh view

选用 Solid70 单元作为热分析单元, 该单元为六面体 8 节点的三维单元, 且只包含一个温度自由度。由于现在所能查到的有关 PET 薄膜的热物理

性能参数非常少, 同时为了方便计算, 近似地认为它的热物性能参数在整个接头温度区间内不发生改变。模型中所使用的 PET 薄膜、304L 不锈钢板和

K9 玻璃的各项热物理性能参数如表 1 所示。

表 1 PET 薄膜、304L 不锈钢板和 K9 玻璃的热物理性能参数

Table 1 Thermal physical property parameters of the PET film, 304L stainless steel and K9 glass

Material	Density ρ / (kg/m ³)	Specific heat C / [J/(kg · K)]	Thermal conductivity K / [W/(m · K)]
PET	1330	1100	0.35
304L	8000	500	16.2
K9 glass	2500	858	1.1

热源选用符合半导体激光器热源模型、能量分布均匀的超高斯面热源模型,其分布规律如下^[11]

$$q(r) = \begin{cases} Q/(\pi r_b^2), & r \leq r_b \\ 0, & r > r_b \end{cases} \quad (4)$$

式中 r_b 是激光的光斑半径(m), Q 是材料吸收的总能量(J), 该处的热流密度为最大热流密度的 5%。在模拟过程中,将初始温度设为 27 °C, 对流换热系数设为 10 W/(m² · K), 辐射系数设为 0.92。

2.4 模拟结果与讨论

图 4 是激光功率为 23.5 W, 扫描速度为 120 mm/min, 离焦量为 +5 mm (光斑直径为 1.4 mm) 时 PET 薄膜和 304L 不锈钢板接触面上的温度场分布云图。从图 4 可以发现, 焊接接头获得的最高温度为 350.035 °C, 但此温度并不在焊接最前沿, 而是在焊缝中心处或者稍微偏后位置, 这主要是由热传递的效果和热源的特点造成的。同时也可以发现, 激光移动轨迹的后方有迟滞的温度场, 在热源前端的等温线较密集, 温度梯度比较大, 而在热源后部的等温线较稀疏, 温度梯度比较小。

图 5 为焊接件 X-Z 面的温度场分布云图。从图 5 可以发现, 304L 不锈钢板吸收激光能量产生很

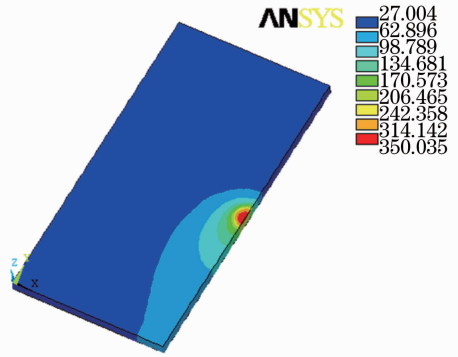


图 4 $t=5$ s 时 PET 薄膜和 304L 不锈钢板接触面温度场分布云图

Fig. 4 Temperature contours at the weld interface of PET film and 304L stainless steel with $t=5$ s

高的温度, 由于 PET 薄膜的熔点 T_f 是 252 °C, 而 304L 不锈钢板的熔点温度是 1450 °C, 显然, 在此焊接过程中, 不锈钢板没有熔化, PET 薄膜与 304L 不锈钢板通过焊接接头界面的化学键进行焊接^[4]。由于 PET 薄膜的熔点为 252 °C, 因此假设当温度高于 252 °C 时, 两焊接件之间形成焊缝, 同时 PET 薄膜也开始熔化, 形成熔深, 通过图中 PET 薄膜温度高于 252 °C 的红色区域可以得到理论焊缝宽度 W_w 和理论 PET 薄膜的熔深 D_T 。

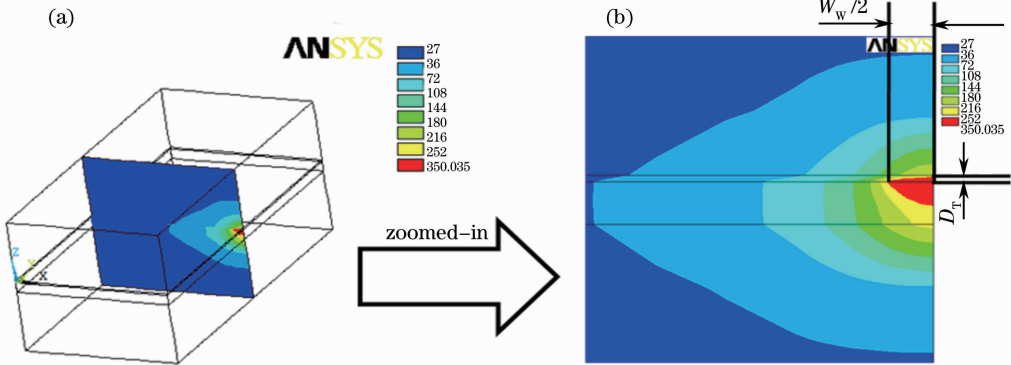


图 5 $t=5$ s 时 PET 薄膜和 304L 不锈钢板 X-Z 面的 (a) 温度场分布云图及 (b) 其局部放大图

Fig. 5 (a) Temperature contours and (b) a local zoomed in view at X-Z plane of the PET film and 304L stainless with $t=5$ s

图 6(a) 为焊接件 X-Y 面上不同点随温度变化的曲线图, 其中黑色点划线为 PET 薄膜熔点温度线, 可以得出理论焊缝宽度的一半 ($W_w/2$) 为

0.66 mm。图 6(b) 为焊接件 Y-Z 面上不同点随温度变化的曲线图, 同样也能得出 PET 薄膜的理论熔深 (D_T) 为 0.067 mm。

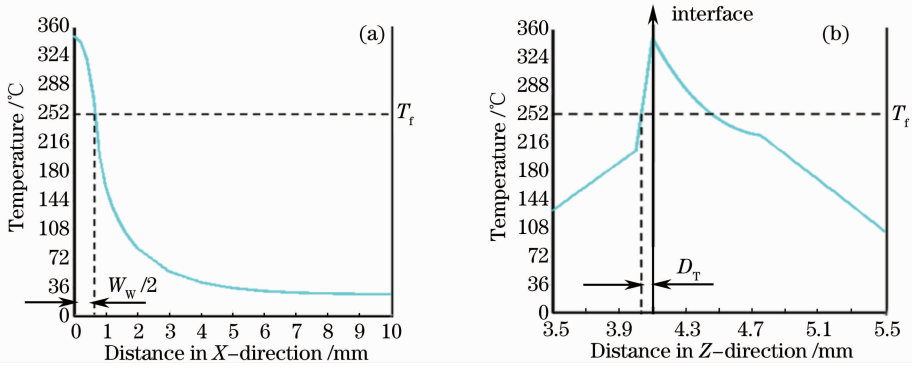


图 6 $t=5\text{ s}$ 时 PET 薄膜和 304L 不锈钢板(a)X-Y 面上和(b)Y-Z 面上不同点随温度变化的曲线图

Fig. 6 Curve of temperature at (a) X-Y plane and (b) Y-Z plane of PET film and 304L stainless steel with $t=5\text{ s}$

图 7 为 PET 薄膜上层的温度场分布云图。从图中可以看出, PET 薄膜具有明显的隔热作用, 此时 PET 薄膜上层温度并没有达到它的熔点 $252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相反地, 若其上层温度高于 $252\text{ }^{\circ}\text{C}$, PET 薄膜可能会发生部分分解或烧蚀, 熔融的 PET 薄膜将粘贴在

K9 玻璃上, 取出试样时 PET 薄膜的上层表面会发生破坏。因此, 为了取得良好的焊接质量, PET 薄膜的上层温度必须小于 $252\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时, 由于 PET 薄膜的热分解温度为 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$, 焊接接触面上的温度必须大于 $252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且小于 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

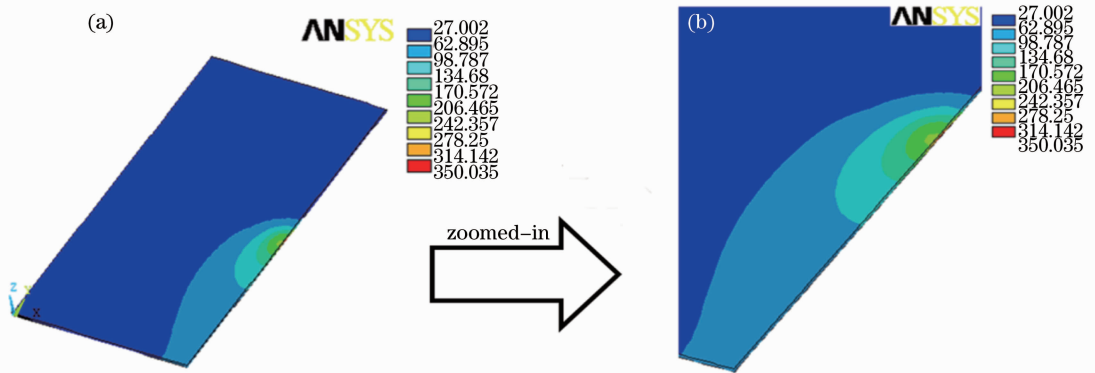


图 7 $t=5\text{ s}$ 时 PET 薄膜(a)上表面温度场分布云图及(b)其局部放大图

Fig. 7 (a) Temperature contours at top surface and (b) a local zoomed in view of the PET film with $t=5\text{ s}$

2.5 模拟结果与实验结果的对比

由于受到实验条件的限制, PET 薄膜的熔深是将焊接试样剥离之后进行观测的, 使用基恩士电子显微镜观察焊接之后的微观形貌, 图 8 为激光透射焊接 PET 薄膜和 304L 不锈钢板实验的宏观和微观形貌。从图 8 可以看出, 实验样品成形美观, 表面无破损, 无明显缺陷, 焊接接头均匀平滑, 在焊接区

域伴随少量的气泡产生, 并且剥离之后的 PET 薄膜的熔池向外凸出。图 9 为不同工艺参数下焊缝宽度与 PET 薄膜的熔深的实验值 (W_{we}, D_{Te}) 与模拟值 (W_{ws}, D_{Ts}) 的对比, 从图 9 可以看出, 模拟结果和实验结果具有较好的一致性, 说明了该有限元模型是可靠的。



图 8 (a) 实验试样宏观形貌; (b) 焊缝微观形貌; (c) 熔池微观形貌

Fig. 8 (a) Macroscopic of welding sample; (b) microstructure of welding sample; (c) microstructure of molten pool

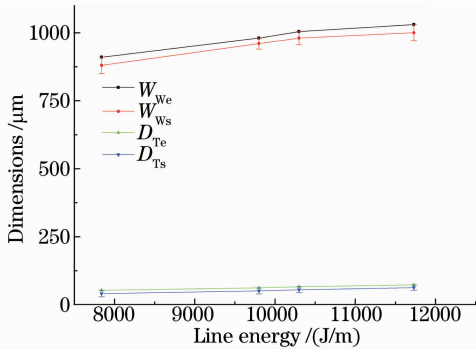


图 9 焊缝宽度与 PET 薄膜熔深的实验值和模拟值对比

Fig. 9 Comparison of measured W_{we} , D_{Te} and simulated W_{ws} , D_{Ts}

3 模拟驱动的实验设计和 ANN 建模

3.1 模拟驱动的实验设计

模拟驱动的实验设计采用三因素三水平中心复合设计(CCD)进行规划。选择激光功率 P 、扫描速度 S 和离焦量 F 作为独立的输入变量,接头处最高温度 T_{max} ,PET 薄膜上表面的最高温度 T_{top} ,焊缝宽度 W_w 以及 PET 薄膜熔深 D_T 作为输出变量。在单因素模拟的基础上确定各因素的工艺参数范围。表 2 给出了模拟驱动的实验设计的水平和参数范围。其中,离焦量为 +0 mm 对应的光斑直径为 0.74 mm,离焦量为 +2.5 mm 对应的光斑直径为 1.05 mm,离焦量为 +5 mm 对应的光斑直径为 1.4 mm。表 3 给出了模拟驱动的实验设计矩阵和对应的模拟结果。

表 2 模拟驱动的实验设计的水平和参数范围

Table 2 Simulation-driven experiment design levels and parameter ranges

Parameters	Notations	Limits		
		-1	0	+1
Laser power/ W	P	16.6	19.8	23
Scanning speed / (mm/min)	S	90	120	150
Stand-off-distance /mm	F	+0	+2.50	+5.00

表 3 模拟驱动的实验设计矩阵和对应的模拟结果

Table 3 Simulation-driven design of experimental matrix and corresponding simulation results

No.	P/W	$S/(mm/min)$	F/mm	$T_{max}/^{\circ}C$	$T_{top}/^{\circ}C$	W_w/mm	D_T/mm
1	16.6	90	+5.00	285.321	182.621	0.99	0.035
2	16.6	150	+5.00	244.918	—	—	—
3	23.0	90	+0.00	582.352	254.233	1.11	—
4	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
5	23.0	150	+0.00	521.134	185.451	0.86	0.081
6	16.6	120	+2.50	320.529	173.983	0.88	0.052
7	16.6	90	+0.00	434.913	193.906	0.77	0.075
8	23.0	120	+2.50	426.624	227.109	1.16	0.081
9	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
10	19.8	120	+5.00	300.779	179.145	1.06	0.035
11	19.8	90	+2.50	396.245	227.083	1.12	0.082
12	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
13	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
14	16.6	150	+0.00	389.948	143.384	0.67	0.051
15	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
16	19.8	120	+0.00	474.606	187.364	0.79	0.078
17	19.8	120	+2.50	377.113	202.317	1.06	0.072
18	19.8	150	+2.50	362.898	181.461	0.98	0.062
19	23.0	150	+5.00	323.684	179.033	1.21	0.053
20	23.0	90	+5.00	378.691	238.842	1.52	0.076

3.2 基于 ANN 的数学模型的建立

以 Matlab7.0 为平台,在 ANN 中采用广泛使用的有监督学习算法的误差反向传播的神经网络(BP-ANN)来建立预测模型,并使用绝对平均预测

误差(AME)来评价 BP-ANN 建模的准确性,其表达式如下

$$\epsilon_{AME} = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^P \left(\frac{|y_{i,e} - y_{i,p}|}{y_{i,e}} \times 100 \right), \quad (5)$$

式中 P 表示实验的组数, $y_{i,e}$ 表示实验的数据, $y_{i,p}$ 表示与实验的数据相对应的预测值, i 表示 $0 \sim P$ 的变量。

取表 3 的前 17 组数据来训练 BP-ANN, 建立工艺参数与焊接结果之间的数学模型, 使用后 3 组数据来验证该模型的可靠性。研究发现, 当中间层单元数为 1、2 时, ANN 未达到训练精度, 训练误差较大, 因而被舍弃。随着中间层神经元数量的增加, ANN 的训练误差不断地变小; 当中间层单元数在 6~8 之间时, ANN 的训练误差变化很小, 当中间层单元数为 7 时, ANN 的可重复性比较好, 因此 4 次网络的拓扑结构均可以选为 3-7-4。中间层的传递

函数设为 logsig, 输出层的传递函数设为 purelin, 训练算法选择 trainbr。

3.3 预测结果与模拟结果的对比

表 4 给出了 BP-ANN 数学模型的预测结果和模拟结果的对比。从表 4 可以发现, 3 组对比数据中, 最大的绝对平均预测误差为 6.45%, 最小的绝对平均预测误差为 0.55%, 可见, BP-ANN 数学模型预测结果和模拟结果有较好的一致性, 说明了该 BP-ANN 数学模型是比较准确的。另外, 4 个 BP-ANN 数学模型的决定性系数 R^2 分别为 0.998, 0.983, 0.981, 0.995, 均接近于 1, 也说明了 BP-ANN 模型的可靠性。

表 4 预测结果和模拟结果对比

Table 4 Comparison of predicted results and simulated results

NO.	P/W	$S/(mm/min)$	F/mm		$T_{max}/^{\circ}C$	$T_{top}/^{\circ}C$	W_w/mm	D_T/mm
1	19.8	150	+2.50	Simulated	362.898	181.461	0.98	0.062
				Predicted	360.897	184.594	0.97	0.058
				ϵ_{AME}	0.55%	1.73%	1.02%	6.45%
2	23.0	150	+5.00	Simulated	323.684	179.033	1.21	0.053
				Predicted	319.165	177.254	1.20	0.056
				ϵ_{AME}	1.40%	0.99%	0.83%	5.67%
3	23.0	90	+5.00	Simulated	378.691	238.842	1.52	0.076
				Predicted	375.865	234.369	1.51	0.077
				ϵ_{AME}	0.75%	1.87%	0.66%	1.32%

4 多目标优化

在前面训练好的 BP-ANN 数学模型的基础上, 把满意度函数(DF)和遗传算法(NSGA-II)相结合, 并运用 Matlab 软件中的遗传算法工具箱来进行焊接工艺参数的多目标优化。

4.1 满意度函数的建立

由前文可知, 为了获得良好的焊接质量, 防止熔融的 PET 薄膜将粘贴在 K9 玻璃上, PET 薄膜的上

层温度必须小于 $252^{\circ}C$, 同时, 由于 PET 薄膜的热分解温度为 $380^{\circ}C$, 因此接头处的温度必须控制在 $252^{\circ}C \sim 380^{\circ}C$ 之间。进行多目标优化时, 选择接头处最高温度 T_{max} 与 PET 薄膜上表面的最高温度 T_{top} 为优化目标, 在保证获得良好焊接质量的前提下, 设置 T_{max} 的范围为 $315^{\circ}C \sim 380^{\circ}C$, 设置 T_{top} 的范围为 $0^{\circ}C \sim 252^{\circ}C$ 。表 5 给出了所选取的满意度函数的优化准则。

表 5 满意度函数优化准则

Table 5 Optimization guidelines by desirability function approach

Response	y_i	L	U	w_i	Criteria
$T_{max}/^{\circ}C$	y_1	315	380	1	in range
$T_{top}/^{\circ}C$	y_2	0	252	1	in range

表中, i 表示第 i 个响应期望, y_1 表示接头处的最高温度, y_2 表示 PET 薄膜上表面的最高温度, L 表示第 i 个响应期望的最小值, U 表示第 i 个响应期

望的最大值, w_i 表示响应的权重值。

总体优化的满意度函数 D 表达式为

$$D = (d_1 \times d_2)^{1/2}, \quad d_1 = \begin{cases} 0, & \text{otherwise} \\ 1, & 315^{\circ}C \leq y_1 \leq 380^{\circ}C \end{cases}, \quad d_2 = \begin{cases} 0, & \text{otherwise} \\ 1, & 0^{\circ}C \leq y_2 \leq 252^{\circ}C \end{cases} \quad (6)$$

选择满意度函数 D 作为遗传算法的适应度函数,对各个个体的优劣和度进行评价^[12]。在 Matlab 中,将编码方式设置为浮点式,初始种群的数量设置为 200,终止函数设置为 maxGenTerm,最大的迭代次数设置为 200 次,选择函数设置为 normGeomSelect,并将其参数设置为 0.08,交叉函数设置为 heuristicXover,将其参数设置为 2、3,变

异函数设置为 multiNonUnifMutationnon,将其参数设置为 6、100、3。

4.2 优化结果的验证

通过满意度函数的遗传算法计算,最终得到一系列满足优化准则的优化结果。为了验证优化结果,从中随机选取 3 组数据进行验证,如表 6 所示。

表 6 验证优化结果

Table 6 Verification tests for optimal results

NO.	P/W	$S/(mm/min)$	F/mm	$T_{max}/^{\circ}C$	$T_{top}/^{\circ}C$	W_w/mm	D_T/mm					
1	17.14	121.6	+2.19	Simulated	343.5	187.4	0.95	0.056				
				Predicted	342.8	195.0	0.94	0.055				
				Error	0.20%	4.06%	1.05%	1.79%				
				Simulated	343.5	187.4	0.95	0.056				
				Actual		0.92	0.061					
				Error		3.16%	8.93%					
				Predicted	342.8	195.0	0.94	0.055				
				Actual		0.92	0.061					
				Error		2.13%	10.9%					
				Simulated	330.1	195.5	0.97	0.057				
				Predicted	333.1	205.1	1.04	0.056				
				Error	0.91%	5.32%	6.73%	1.75%				
2	17.64	93.6	+3.22	Simulated	330.1	195.5	0.97	0.057				
				Actual		0.95	0.060					
				Error		2.06%	5.26%					
				Predicted	333.1	205.1	1.04	0.056				
				Actual		0.95	0.060					
				Error		8.65%	7.14%					
				Simulated	360.4	187.5	0.99	0.058				
				Predicted	363.8	188.3	0.97	0.059				
				Error	0.94%	0.43%	2.02%	1.72%				
				3	19.60	132.8	+2.55	Simulated	360.4	187.5	0.99	0.058
								Actual		0.96	0.064	
								Error		3.03%	10.34%	
Predicted	363.8	188.3	0.97					0.059				
Actual		0.96	0.064									
Error		1.03%	8.47%									

从表 6 可以看出,优化的预测结果、实验结果、模拟结果两两之间均取得了较好的一致性,其中 PET 薄膜的熔深的实验值与模拟值、预测值之间的误差相对较大,这可能是由于剥离焊接材料后测量 PET 薄膜的熔深存在误差造成的,但总体来说,该优化模型是可行的。同时,也说明运用数值模拟驱动实验设计、工艺参数建模与优化的方法是进行多目标优化的一种有效方法。

5 结 论

以往工艺参数建模与优化都是基于焊接实验展开的,本文提出了一种数值模拟驱动实验设计、工艺参数建模与优化的方法,对激光透射焊接进行了系统的研究。首先建立有限元模型,模拟得到激光透射焊接过程中温度场的分布数据;其次基于 FEM 的结果,建立工艺参数和焊接结果之间的数学模型;最后采用满意度函数和遗传算法相结合的方法,对工艺参数进行多目标优化,从而得到焊接的最佳工

艺参数。通过以上研究,可以得到以下结论:

1) 激光透射焊接成功焊接了具有生物相容性的 PET 薄膜与 304L 不锈钢材料,焊接样品成形美观且焊缝均匀。

2) 运用 ANSYS 软件模拟焊接过程中温度场的分布特征,并与焊接实验结果进行对比,发现两者趋势基本吻合,说明该有限元模型是可靠的。

3) 利用 ANN 建立工艺参数和焊接结果之间的数学模型,模型预测结果能较好地与模拟结果相吻合,说明该数学模型是比较准确的。

4) 采用满意度函数和遗传算法相结合的方法,对工艺参数进行多目标优化,优化的实验结果、预测结果和模拟结果两两间均取得了较好的一致性,说明运用数值模拟驱动实验设计、工艺参数建模与优化的方法是进行多目标优化是一种有效方法,能够为有效指导生物医学领域中的焊接实验、提高焊接质量和降低生产成本开辟新途径。

参 考 文 献

- 1 Wang Lisha, Luo Yanhong. CRTERQ' topics of interest in 2008: medical implant research [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复*, 2007, 11(48): 9771-9776.
- 2 H J Herfurth, R Witte, S Heinemann. Microjoining of dissimilar materials for life science applications[J]. *SPIE*, 2003, 5063: 292-296.
- 3 Wang Xiao, Li Pin, Liu Huixia, *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission joining of PET films and titanium [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1391-1397.
王霄, 李品, 刘会霞, 等. 医用聚对苯二甲酸薄膜与薄钛板激光透射连接有限元模拟[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1391-

- 1397.
- 4 Wang Xiao, Song Xinhua, Jiang Minfeng, *et al.*. Modeling and optimization of laser transmission joining process between PET and 316 L stainless steel using response surface methodology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(3): 656-663.
- 5 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.
- 6 B Acherjee, S Mondal, B Tuduc, *et al.*. Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(2): 2548-2555.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Liu Furong, Li Xiaoyu, Zhang Qiang, *et al.*. Simulation on the temperature field of the laser transmission welding of the double transparent polymers[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(6): 460-464.
刘富荣, 李晓宇, 张强, 等. 双透明材料激光透射焊接温度场的数值模拟[J]. *应用激光*, 2011, 31(6): 460-464.
- 10 T Mahmood, A Mian, M R Amin, *et al.*. Finite element modeling of transmission laser microjoining process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1-3): 37-44.
- 11 A Mian, T Mahmood, J 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.
- 12 K Deb. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*[M]. Singapore: Wiley Ltd, 2003.

栏目编辑: 宋梅梅