

选区激光烧结瞬态温度场模拟与测试方法研究*

邢键^{1,2}, 孙晓刚², 高益庆³

(1 哈尔滨工程大学 光信息科学与技术系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

(3 南昌航空大学 光电信息中心, 南昌 330063)

摘 要:采用有限元方法,考虑实际的边界条件和热物性参量的变化,对 Al₂O₃ 覆膜陶瓷粉末的选区激光烧结过程瞬态三维温度场进行动态模拟.通过比色测温法对红外热成像系统的发射系数进行修正后,对选区激光烧结过程瞬态温度场进行测试.数值模拟和实测结果显示,两者吻合较好.

关键词:选区激光烧结;有限元;瞬态温度;动态模拟;红外热成像

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)06-1327-4

0 引言

选区激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)是一种基于离散材料堆积成型并能进行先进产品研究与开发的新型激光快速成型技术^[1,2].在 SLS 工艺中,成型温度场的分布变化规律,是影响烧结件质量的重要因素,也是确定 SLS 工艺参量的重要依据.文献[3]对覆膜材料的 SLS 温度场采用有限元算法进行模拟,但都假设热物性参量不随温度变化,并且建立的是二维模型,不能很好地模拟多层烧结的实际过程.文献[4]利用手持式红外点测温仪及预埋热电偶的方法,对覆膜陶瓷粉末的 SLS 过程的温度场进行了在线测量.由于该测温系统仍属于点测温范围,受测试距离、响应时间等因素影响较大,同时采用热电偶测温方法属于接触测温,有着诸多弊端,难以满足 SLS 整个烧结过程温度场的实时检测.

本文对具有代表性的 Al₂O₃ 覆膜陶瓷粉末的烧结过程进行了分析,建立三维非线性热传导数值传热模型.通过对材料的热物性参量进行实际测试,从而完善模型的边界条件.不同于纯粹的数值模拟求解温度场的方法,而是在实验测量结果的基础上结合数值计算来模拟实际烧结过程,并充分考虑热物性参量随温度变化,实现了对烧结过程中点、线及层间温度的实时仿真.同时,采用红外热成像非接触方法对瞬态烧结温度进行了测试,对模拟与测试结果进行了比较和分析.

1 SLS 瞬态烧结温度场的数值模拟

本文采用 HRPS-III A 型选区激光烧结快速成型机.该设备激光器的最大输出功率为 50 W,根据该指标,被烧结的对象主要为熔点不太高的高分子材料.为了更好的对实际烧结过程进行模拟,同时验证本文提出的实测系统的合理性,本文以 95% 的聚苯乙烯与 5% 的 Al₂O₃ 覆膜陶瓷粉末为研究对象,充分考虑的热物性参量在实际烧结过程不断变化的边界条件,建立了 SLS 瞬态温度场的三维数学模型.

1.1 温度场模型的建立

SLS 瞬态温度场的热物性参量随着温度的变化而变化,所以,SLS 瞬态烧结温度 $T(t, x, y, z)$ 涉及到三维非线性热传导问题,其热传导方程可表示为^[5-7]

$$\frac{\rho c_p}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中 ρ 为粉床的平均密度; c_p 为材料的定压比热容; K 为粉床的局部有效导热系数.

1.2 激光加热的边界条件

由于该成型设备的成型空间为 400 mm × 400 mm × 450 mm,激光扫描的角范围比较小,所以在粉床的表面,可认为同一功率下的激光对粉层表面的热加载是随位置不同的定常热流加载.由于这种热加载属于红外热流的热辐射式加载,同时粉床的初始空隙率 ϵ 比较大(见式(8)),约为 0.6,所以它对于 CO₂ 激光(波长为 10.6 μ m)来说,可以看作是一种半透明的吸收介质,其吸收率为 $\alpha_R = 0.88$,则激光对粉床的加热热流密度分布 $q(x, y)$ 可以表示为

$$q(x, y) = \alpha_R \cdot q_0 \quad (2)$$

*教育部博士点基金(20070217011)资助

Tel:0451-82519754 Email: xingniat@sina.com

收稿日期:2008-03-12

$$q_0 = P/\pi r^2 \quad (3)$$

式中, P 为激光的输出功率; r 为激光束半径.

1.3 激光束作用区域外的热边界条件

SLS 烧结过程中, 在激光的照射下, 粉床上表面吸收激光能量并转换成热能, 然后进行由表及里、由高温向低温的扩散. 同时, 粉床上表面与周围环境之间还存在对流和辐射换热. 因此, 在粉床上表面同时存在激光加热、辐射和对流散热热流, 其换热边界条件可综合表示为^[8]

$$-K(\partial T/\partial z) = \alpha_R q_0 - (h_c + \alpha_r)(T - T_a) \quad (4)$$

α_r 为表面辐射换热系数, h_c 为表面对流换热系数, T_a 为环境温度.

1.4 初始条件

在 $t=0$ 时刻, 粉床具有均匀的温度分布, 即与预热温度相同.

$$T(0, x, y) = T_0 \quad (5)$$

1.5 物性参数的计算

根据式(1)所需要的热物性参量有 ρ 、 c_p 和 K . 这里 ρ 是粉床的平均密度

$$\rho_s = \varphi \rho_0 + (1 - \varphi) \rho \quad (6)$$

$$d/D = 1 - (1 - \varphi)^{1/3} \quad (7)$$

式中, ρ_s 为腹膜陶瓷的固体密度; ρ_0 为腹膜陶瓷颗粒的密度(铺粉密度); φ 为粉床的体积系数; d 为铺粉厚度; D 为颗粒直径.

对于粉末局部有效导热系数 K 的确定比较复杂, 它不仅与局部温度有关, 而且与固体导热系数 K_s 、空气的导热系数 K_g 以及粉床的孔隙率 ϵ 有关. 孔隙率 ϵ 表示粉末中孔隙体积所占份额的相对大小. 它可以表示成粉末密度 ρ_0 与固体密度 ρ_s 的函数

$$\epsilon = (\rho_s - \rho_0) / \rho_s \quad (8)$$

空气的导热系数 K_g

$$K_g = 0.004372 + 7.384 \times 10^{-5} T \quad (9)$$

当 $T \leq 673$ K 时

$$K = K_s(1 - \epsilon) / (1 + \Psi K_s / K_g) \quad (10)$$

$$\Psi = 0.02 \times 10^{2(\epsilon - 0.3)} \quad (11)$$

材料的定压比热容 c_p 可以查相关手册.

1.6 热物性参数的实验测量

利用简单的质量-体积方法得到铺粉密度的平均值. 经测定, 这样获得的铺粉密度值为 0.598 g/cm^3 . 烧结一个立方体测量其成型的固体密度 ρ_s 为 1.436 g/cm^3 .

1.7 温度场的计算

利用有限元分析软件 ANSYS, 可以模拟多种介质的相互作用, 其主要特点是可以实现多参量在不同温度下的输入, 这就充分考虑了材料热物性参量随温度的变化的实际情况. 模型采用八节点的六

面体单元, 以光斑直径、扫描间距、层厚作为六面体单元的边长尺寸, 即单元尺寸 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$. 网格划分后的有限元模型如图 1(a). 层间温度场的模拟结果见图 2 和图 3. 由于实际烧结时扫描速度较快, 所以设计长方体模型, 尺寸是 $72 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ (四层). 数值模拟过程中所用到的参量如表 1.

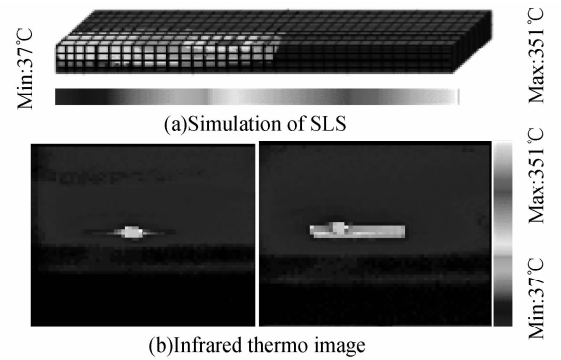


图 1 SLS 的烧结过程瞬态温度场模拟及红外热像
Fig. 1 Transient temperature simulation of SLS

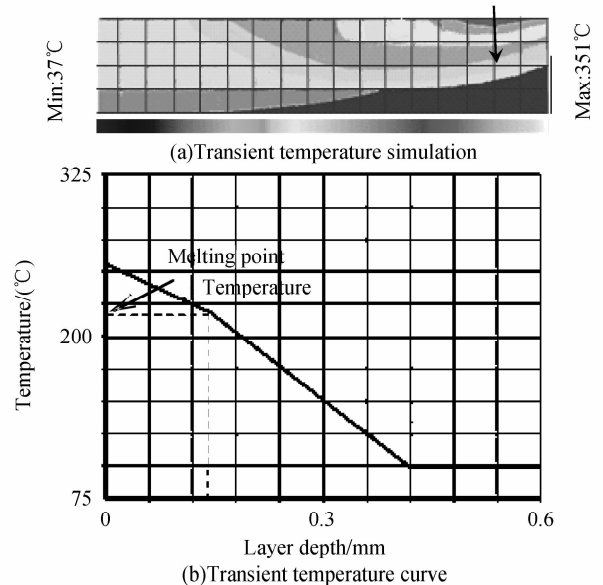


图 2 层间瞬态温度场模拟及其曲线
Fig. 2 Transient temperature simulation and curve of layers

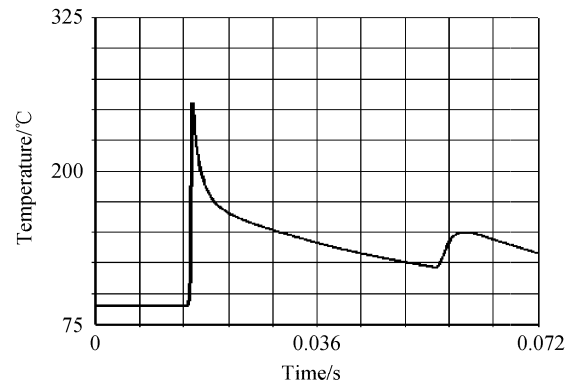


图 3 烧结过程距左边界 31 mm 处温度的曲线
Fig. 3 31 mm Point to left boundary temperature curve

表 1 材料的参量

φ	D	T_0	r	ψ	ϵ
10.27	0.125 μm	90 $^{\circ}\text{C}$	0.1 mm	0.077	0.594

1.8 温度场的测试

由于利用红外热像仪测温时需要输入被测材料的发射系数,而烧结过程中粉末材料的发射系数受到温度、表面状态等参量的影响难以确定,利用比色测温法受发射系数影响较小^[9-10]的特点,采用 Raytek 公司的 MR1S 型双色点测温仪对 SLS 瞬态成型温度进行测量,在同一烧结参量下,用双色测温仪测量一次后,用红外热像仪测试,同时在热像仪中反复输入发射系数,直到与双色测温仪测量的温度一致时,这样就可以确定 SLS 过程粉末材料的发射系数.利用调试后的红外热像仪获得 SLS 过程的表面温度分布,如图 1(b).

2 数值模拟结果与实际测试结果

图 2 为层间温度场模拟及其温度曲线.由数值模拟结果与实际测试结果比较得出如下结论:

1)由图 1 比较可以看出,建立的模型实现了烧结过程三维瞬态温度场的动态仿真.

2)图 2(b)中路径见图 2 箭头方向,烧结参量为扫描速度 2 m/s,输出功率为 15 W,通过图 3 可见,在层间温度场分布呈羽状后掠分布,有别于静止时的圆形光斑.在图 1(b)的烧结参量下,烧结深度大于 0.15 mm 能保证层间结合,而表面温度最高处为 255 $^{\circ}\text{C}$ 小于碳化温度.

3)在点温模拟分布曲线方面如图 3,其中烧结参量为:扫描速度 2 m/s;输出功率为 15 W,在烧结前存在材料的预热过程,所以温度恒定,激光扫描到该点时,温度迅速升高,达到熔化状态,而后温度逐渐降低,当激光光束折返回来又经过该点附近时,仍然对该点产生了热影响,所以又出现了二次峰值.

4)在线温模拟分布曲线方面,图 4 是在扫描开始后 0.015 8 s 时刻的线温分布曲线,其中烧结参量

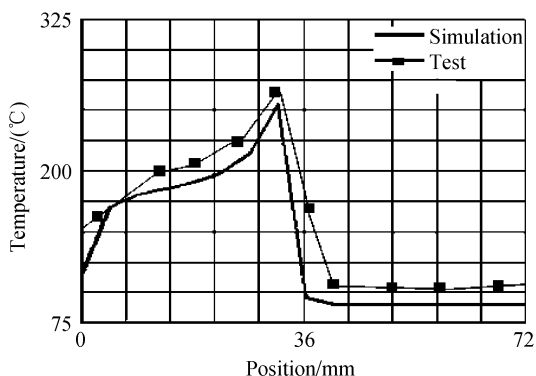


图 4 烧结过程 0.015 8 s 时刻扫描线温度的曲线
Fig. 4 Line temperature curve at 0.015 8 s

为:扫描速度 2 m/s;输出功率为 15 W.在激光扫描线上对于已经扫描过的区域,由于激光光束热影响区的存在,使线上的温度高于预热温度,线上的点位置越接近烧结点温度越高,激光光束前端待扫描的点仍为预热温度,所以温度曲线迅速降低.

5)模拟结果显示实验用的腹膜陶瓷粉末烧结温度远小于 Al_2O_3 的熔点(大于 1 500 $^{\circ}\text{C}$),而与聚苯乙烯材料的熔点相当,这与实际覆膜陶瓷粉末的烧结机理一致.

6)由于 SLS 过程激光束扫描速度比较快而成型空间又较小,普通热像仪的响应时间不能满足瞬态测试的要求,实验利用 IR-982 型红外热像仪(场频 40 Hz,响应波长 3~5 μm)实现线温度的测试,与模拟线温度场图 4 进行比较.结果显示扫描速度为 2 m/s、激光输出功率为 15 W 时,模拟的结果为 255 $^{\circ}\text{C}$,而实测结果为 261 $^{\circ}\text{C}$.理论值与实测值吻合得较好,最大相对误差在 5% 以内,说明模型较好地实现了 SLS 过程瞬态温度场的仿真.

3 结论

本文建立了 SLS 瞬态烧结温度场的数学模型,该模型融合了材料的热物性参量随温度变化的实际特性,实现 SLS 过程瞬态温度场的点、线及层温的动态仿真.通过与设计了降低发射系数影响的红外热像仪的测试结果进行比较,结果显示该模型的模拟结果与实测值吻合较好,最大相对误差在 5% 以内,从而为合理的选择烧结参量和后续的热物性参量的计算及烧结件的力学性能分析打下了坚实的基础.

参考文献

- [1] XU Cheng-ting, SHEN Yi-fu, GU Dong-dong, *et al.* Progress in temperature field research into selective laser sintering process [J]. *Foundry*, 2004, **53**(7): 511-514.
胥橙庭, 沈以赴, 顾冬冬, 等. 选区激光烧结成型温度场的研究进展[J]. *铸造*, 2004, **53**(7): 511-514.
- [2] LUO Shu-hua, XIAO Zhi-yu, WEN Li-ping. Research progression in powder rapid consolidation technology [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2007, **12**(3): 129-133.
罗术华, 肖志瑜, 温利平. 粉末快速固结技术的研究进展[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2007, **12**(3): 129-133.
- [3] BAI Pei-kang, CHENG Jun, LIU Bin, *et al.* Numerical simulation of temperature field during selective laser sintering of polymer-coated molybdenum powder [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, **16**(B02): 603-607.
- [4] LIANG Hong-yu, ZHU Shou-ming. Test of sintering temperature of laser line scanning of tectorial ceramic [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **14**(2): 126-130.

- 梁红玉,朱守明.覆膜陶瓷粉末激光扫描烧结温度测试[J].测试技术学报,2004,14(2):126-130.
- [5] KOLOSSOV S, BOILLAT E, GLARDON R, *et al.* 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(2): 117-123.
- [6] ZHANG Xiao-long, SHEN Jin-hua, CAI De-fang, *et al.* Study of temperature distribution and deformation of the end-face in end-Pumped DPL[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2): 197-191.
张小龙,沈金华,蔡德芳,等.端面抽运激光晶体热形变及温度场分布研究[J].光子学报,2007,36(2):197-191.
- [7] LI Long, SHI Peng, CHEN Hao-wei, *et al.* Temperature modeling of intracavity doubling frequency nonlinear crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(10): 1441-1444.
- [8] ZHAO Bao-jun, SHI Fa-zhong, FENG Tao, *et al.* Studies on numerical simulations of temperature field in selective laser sintering of polystyrene powders[J]. *Laser Journal*, 2002, 23(2): 66-69.
- 赵保军,施法中,冯涛,等.选择性激光烧结聚苯乙烯粉末成形温度场的数值模拟研究[J].激光杂志,2002,23(2):66-69.
- [9] CHEN Juan, YANG Xi-chen, LEI Jian-bo. Application of digital image processing to measurement system of temperature field in molten pool for laser remanufacturing [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(4): 220-222.
陈娟,杨洗陈,雷剑波.数字图像处理在激光再造熔池温度场检测中的应用[J].应用激光,2006,26(4):220-222.
- [10] SHI De-heng, SUN Jin-feng, ZHU Zun-lue, *et al.* Optimization of a passive single-wavelength real-time temperature measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 61-66.
施德恒,孙金锋,朱遵略,等.一种被动式单波长实时测温系统的优化设计[J].光子学报,2008,37(1):61-66.

Simulation and Test of Transient Temperature of Selective Laser Sintering

XING Jian^{1,2}, SUN Xiao-gang², GAO Yi-qing³

(1 Department of Optic Information Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2 Department of Automation Measurement & Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(3 Center of Optic-electronic Information Process, Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330063, China)

Received date: 2008-03-12

Abstract: 3D transient temperature field of the selective laser sintering of Al_2O_3 tectorial ceramic powder was calculated real-timely according to finite element method based on the practical boundary condition and thermo physical parameters variation. The transient temperature was also tested using infrared thermo camera which its emission coefficient was corrected according to double-wavelength temperature measurement method. The result shows that the simulation agrees well with test result.

Key words: Selective laser sintering; Finite element method; Transient temperature; Dynamic simulation; Infrared thermo image



XING Jian was born in 1979. As an instructor, he works at School of Science, Harbin Engineering University and is studying for the Ph. D. degree at Harbin Institute of Technology. His research interests focus on selective laser sintering rapid prototype, optical information processing and tomography diagnosis for plasma.