

# 工程塑料粉末激光烧结三维温度场的理论和实验研究

王翔 崔瑞 杨浩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 粉末材料激光烧结的温度场对工艺参数优化和烧结成形物质量有着直接影响。从瞬时点热源三维传热出发,建立了高斯面热源激光扫描烧结过程的非稳态导热温度场的三维解析模型,利用理论和实验相结合,计算了随温度变化的尼龙粉末的有效导热系数,给出了热扩散率与激光烧结能量的关联表达式,通过温度场的模拟和实验结果的比较,验证了模型求解及参数拟合的有效性。

**关键词** 激光技术;快速原型;激光烧结;温度场;有效导热系数;热扩散率

**中图分类号** TN249; TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0103005

## Theoretical and Experimental Studies on Three-Dimensional Temperature Field of Selective Laser Sintering of Engineering Plastics Powder

Wang Xiang Cui Rui Yang Hao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrument, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** The temperature fields of powder laser sintering have a direct influence on optimization of process parameters and sintering quality. From three-dimensional heat transfer of point source, three-dimensional analytical model of non-steady-state temperature field for scanning laser sintering was established. With the moving Gauss area heat source, effective thermal conductivity of nylon powder with temperature changed was calculated. The expression of thermal diffusivity and laser energy was obtained. Finally, by simulation and theory of temperature field, validity of the model and parameter fitting was verified.

**Key words** laser technique; rapid prototyping; selective laser sintering; temperature field; effective thermal conductivity; thermal diffusivity

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

## 1 引言

快速原型(RP)技术作为一种真三维的先进制造技术<sup>[1]</sup>,不仅可以在计算机辅助技术支持下快速获得所需的三维结构,还可以利用其“生长原理”制造具有任意复杂度的构件,有效地提高了生产效率和制造柔性。随着该技术的发展,现阶段较为成熟的工艺方法主要有光固化成型法、叠层实体制造法、激光选区烧结(SLS)法、熔融沉积法等,其中典型工艺之一的激光选区烧结以其成型材料的多样性、工

程应用前景好等优点受到广泛的重视<sup>[2]</sup>。然而, SLS 烧结件普遍存在致密度低和精度差等缺陷<sup>[3]</sup>,国内外许多学者都试图通过对粉末材料激光烧结成型过程温度场变化规律的探讨<sup>[4,5]</sup>来优化工艺参数,进而改善烧结件的质量。

目前,激光选区烧结温度场的研究方法主要有数值法和解析法。数值法是利用计算机软件实现烧结热作用过程的模拟,但是由于激光作用的瞬时性和能量的高度集中性,伴随着多种效应<sup>[6]</sup>,其求解模

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-06-09

基金项目: 国家 863 计划(2006AA04Z311)资助课题。

作者简介: 王翔(1964—),男,博士,副教授,主要从事光快速成型技术、机电一体化技术、微型机械及微细制造技术等方面的研究。E-mail: wxyf@ustc.edu.cn

型的建立还存在不足。而解析法则是由能量作用的理论模型出发,通过其精确解的推导来获得激光烧结合过程温度场的变化规律。

因此,本文针对工业产品中广泛应用的工程塑料粉末的激光烧结合过程,建立具有孔隙特性的粉末材料激光热作用的三维非稳态温度场模型,通过对工程塑料粉末的热物性参数随温度变化的影响分析,结合实验研究来求解烧结合温度场,可以为进一步工艺优化提供基础。

## 2 粉末激光烧结合三维非稳态温度场的建立

在 SLS 中,当激光作用于材料表面时,其能量主要表现为粉末表面的反射、受热粉末的辐射和粉末的吸收<sup>[7]</sup>。对于工程塑料粉末来说,激光作用区域的粉末吸收热量后,温度会上升,当温度达到熔融温度时,粉末将发生熔融相变,如果能量过高将会进一步发生气化相变。激光烧结合过程中,粉体内各点的温度随时间不断变化,且变化的时序由表面向内部各个方向同时进行,孔隙结构的粉体内部存在气相,能量的传递方式不仅是热传导,还存在辐射与对流,同时材料的热物性参数也随瞬时温度变化而呈非线性变化。因此,工程塑料粉末激光烧结合导热过程数学模型的建立是相当困难的。

为了建立烧结合温度场的数学模型,通过对激光烧结合过程中主要影响因素的分析,可以对三维非稳态温度场求解问题作如下假定:

1) 当激光作用于较大深度的粉体表面进行自由深度烧结合时,导热现象只出现在表面附近的区域内,粉体内部始终存在保持初始温度不变的区域,因此可视粉体为半无限大物体。

2) 由于激光作用时间极短,扫描光斑较小(亚毫米量级),粉末材料孔隙率较大,尤其非金属材料常表现为很高的吸收率<sup>[8]</sup>,所以可以忽略粉体表面反射的能量和对外的辐射以及与粉体表面空气的对流。

3) 工程塑料粉末在激光扫描烧结合热作用中的相变潜热对烧结合区域的温度场影响很小<sup>[8]</sup>,可以忽略,故导热过程可视为无内热源的作用。

4) 为了便于建立激光作用过程的导热温度场模型,可假设粉体为各向同性的均质、常物性材料<sup>[9]</sup>。

### 2.1 半无限大物体的点热源导热温度场

设粉体表面为图 1 所示坐标系的  $xoy$  平面,激光照射的方向  $z$  向为自由深度的粉体内部,则具有半无限大物体特征的粉体初始温度可表示为常值  $T_0$ ,当  $t=0$  时刻,在其表面( $xoy$  平面)作用一个瞬时能量为  $Q$  的点热源,且点热源位于坐标原点  $o$  点时,可以利用均质、常物性材料的传热过程来描述三维导热温度场。

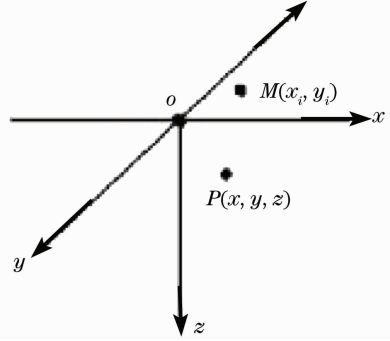


图 1 半无限大物体的点热源导热模型  
Fig. 1 Point source thermal model of the semi-infinite object

设粉体中任意点  $P(x, y, z)$  在时刻  $t$  的温升为  $\theta(x, y, z, t)$ ,  $\theta$  是  $T(x, y, z, t)$  与  $T_0$  的温度差。则位于坐标原点  $o$  的瞬时点热源的三维非稳态温度场的求解问题可以描述为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, (x, y \in \mathbb{R}, z > 0, t > 0) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为热扩散率。

由问题的假定条件知,忽略辐射与对流,即忽略热作用期间材料表面与外界的热交换,半无限大物体表面的边界可视为绝热条件,即有

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (2)$$

由于此问题满足纽曼法(乘积法)<sup>[10]</sup>,因此对于(1),(2)式的总体温度分布可表示成单个空间变量温升的乘积形式

$$\theta(x, y, z, t) = \theta(x, t)\theta(y, t)\theta(z, t), \quad (3)$$

对于半无限大物体,其中  $\theta(x, t)$ ,  $\theta(y, t)$  均为一维无限大区域的温升,其通解为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \theta(x, t) = \frac{c_1}{(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp[-x^2 / (4\alpha t)] \\ \theta(y, t) = \frac{c_2}{(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp[-y^2 / (4\alpha t)] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $c_1, c_2$  为待定系数。

对于沿  $z$  轴正向导热的一维半无限大区域,其温升  $\theta(z,t)$  的求解可表示为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (z > 0, t > 0) \quad (5)$$

对(5)式进行余弦傅里叶变换,令  $\theta(z,t)$  的余弦傅里叶变换为  $F_c(\omega,t)$ ,即  $f_c[\theta(z,t)] = F_c(\omega,t)$ ,结合(2)式,由(5)式可得

$$F_c(\omega,t) = c_3 \exp(-\alpha \omega^2 t), \quad (6)$$

式中  $c_3$  为待定系数。

对(6)式作余弦傅里叶逆变换,即有

$$\begin{aligned} \theta(z,t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} k_3 \exp(-\alpha \omega^2 t) \cos(\omega z) d\omega = \\ &= \frac{c_3}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-\alpha \omega^2 t) [\exp(j\omega z) + \exp(-j\omega z)] d\omega, \end{aligned} \quad (7)$$

对(7)式求解可得

$$\theta(z,t) = \frac{2c_3}{(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp[-z^2/(4\alpha t)]. \quad (8)$$

将(4)和(8)式代入(3)式,即可得(1),(2)式的通解

$$\begin{aligned} \theta(x,y,z,t) &= \frac{2c_1 c_2 c_3}{(4\pi\alpha t)^{3/2}} \times \\ &\exp[-(x^2 + y^2 + z^2)/(4\alpha t)], \end{aligned} \quad (9)$$

由能量守恒可得,点热源发出的能量等于半无限大物体中分布的能量,后者可利用球坐标三重积分计算

$$Q = c\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\varphi d\varphi \int_0^{\infty} \theta(r,t) r^2 dr, \quad (10)$$

式中  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $c$  是材料的比热容,  $\rho$  是材料密度。联立(9),(10)两式,由  $\alpha = \lambda/c\rho$ , 即可得

$$c_1 c_2 c_3 = Q/(c\rho) = Q\alpha/\lambda, \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为材料的有效导热系数。

将(11)式代入(9)式得到半无限大物体中坐标原点  $o$  处瞬时点热源形成的温度场表达式为

$$\begin{aligned} \theta(x,y,z,t) &= \frac{2Q}{(\lambda/\alpha)(4\pi\alpha t)^{3/2}} \times \\ &\exp[-(x^2 + y^2 + z^2)/(4\alpha t)]. \end{aligned} \quad (12)$$

当点热源作用于图 1 所示半无限大物体表面上的任意点  $M(x_i, y_i)$  处时,粉体中任意点  $P(x, y, z)$  的温度场表达式为

$$\begin{aligned} \theta(x,y,z,t) &= \frac{2Q}{(\lambda/\alpha)(4\pi\alpha t)^{3/2}} \times \\ &\exp\{-[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2]/(4\alpha t)\}. \end{aligned} \quad (13)$$

## 2.2 半无限大物体的移动面热源导热

在激光烧结过程中,具有高斯分布光强的光斑作用于粉体表面且以速度  $v$  沿  $x$  方向移动,即激光

烧结的热作用过程为一个移动面热源在粉体内引起三维热传导,可视为单个光斑在  $x$  方向连续作用形成的温度场。因此对于评价激光烧结温度场来说,可以将移动热源转化为面热源作用的问题来求解。

激光光斑的光强满足高斯分布<sup>[12]</sup>,即

$$I(x_i, y_i) = I_0 \exp\{-[2(x_i^2 + y_i^2)]/\omega^2\}. \quad (14)$$

式中  $I_0$  为光斑中心光强,  $\omega$  为光束束腰半径。

对于光斑以速度  $v$  匀速扫描烧结的过程,可视为一个固定位置面热源在一个等效作用时间<sup>[13]</sup>产生的瞬时能量对粉体表面的热作用,任意光斑内单位面积的能量为

$$e(x_i, y_i) = \iint_{\infty} I_0 \frac{2\omega}{v} \exp\left[-\frac{2(x_i^2 + y_i^2)}{\omega^2}\right] dx_i dy_i. \quad (15)$$

如图 1 所示,在具有高斯分布的面热源内任意点热源  $M(x_i, y_i)$  处取一微元,热微元在  $P(x, y, z)$  处产生的微温升可表示为

$$\begin{aligned} d\theta(x,y,z,t) &= \frac{2de(x_i, y_i)}{v(\lambda/\alpha)(4\pi\alpha t)^{3/2}} \times \\ &\exp\{-[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2]/(4\alpha t)\}, \end{aligned} \quad (16)$$

因此,面热源内各点在  $P(x, y, z)$  处产生的温升总和  $\theta$ ,即可通过对光斑区域内任意点  $M(x_i, y_i)$  产生的微温升积分得到

$$\begin{aligned} \theta(x,y,z,t) &= \frac{2e(x_i, y_i)}{(\lambda/\alpha)(4\pi\alpha t)^{3/2}} \times \\ &\exp\{-[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2]/(4\alpha t)\}. \end{aligned} \quad (17)$$

联立(15)式和(17)式求解,即可得移动高斯面热源在任意光斑位置处导热形成的三维温度场为

$$\begin{aligned} \theta(x,y,z,t) &= \frac{4I_0\omega}{v(\lambda/\alpha)(4\alpha t)^{3/2}} \frac{\pi}{\frac{2}{\omega^2} + \frac{1}{4\alpha t}} \times \\ &\exp\left(\frac{-z^2}{4\alpha t} - \frac{x^2 + y^2}{4\alpha t + \frac{2}{\omega^2}}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

为评价工程塑料粉末材料的烧结温度场,可用烧结物轮廓尺寸作为评价对象。由于激光光斑尺寸较小,且粉末结构的材料在能量的横向热影响作用下,粘连形成的烧结物的最大线宽不清晰,较难精确测量,所以本研究采用较易测量的烧结物最大烧结深度  $z_{\max}$  为评价对象。设粉末熔融温度为  $T_c$ ,当  $x=y=0$  时,

$$z_{\max} = \left\{ (4\alpha t) \ln \left[ \frac{\pi}{2/\omega^2 + 1/(4\alpha t)} \frac{4\alpha I_0 \omega}{v\lambda T_c (4\pi\alpha t)^{3/2}} \right] \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

### 3 激光烧结粉末热物性参数的确定

2节所得到的基于点热源的三维非稳态温度场方程是建立在均质、常物性材料传热过程的条件下。而工程塑料粉末材料是由固、气两相构成的非均质材料,其传热过程非常复杂,为了求解其在激光烧结过程中的温度场,可以用“有效导热系数”来表征热传导过程<sup>[14]</sup>,从而将其作为均质材料进行求解。对于随温度变化的非常值的热物性参数(有效导热系数 $\lambda$ 和热扩散率 $\alpha$ ),在一定的激光烧结工艺条件下,粉末烧结熔融区的温度变化范围是一定的,可以根据烧结过程的温度来计算主要热物性参数,从而将其转变为一定工艺条件下的常热物性参数,利用三维非稳态温度场模型来进行激光烧结的模拟。

#### 3.1 有效导热系数的确定

在激光烧结的非稳态导热过程中,虽然决定温度分布的关键热物性参数为热扩散率 $\alpha$ ,但是随温度变化的导热系数 $\lambda$ 对导热能力和热扩散率也存在直接影响。而温度变化较大、热作用过程极其迅速的粉末激光烧结来说,导热系数随温度变化的影响也较大。对于工程塑料粉末这种非连续均质材料来说,导热能力与其结构(固相或气相)、材质、密度以及温度等因素有关。针对非连续介质导热,Yagi等<sup>[15]</sup>提出了一种粉体材料有效导热系数模型,经实验研究表明能有效地反映粉末材料的导热能力,其计算表达式为

$$\begin{cases} \lambda = \frac{(1-\epsilon)\lambda_s}{1+\varphi\cdot\lambda_s\cdot\lambda_g^{-1}}, T \leq 400\text{ }^\circ\text{C} \\ \lambda = \frac{1-\epsilon}{\lambda_s^{-1}+\varphi\cdot(\lambda_g+\varphi\lambda_{rs})^{-1}} + \epsilon D_p \lambda_{rv}, T > 400\text{ }^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (20)$$

式中 $T$ 为粉末平均温度; $\lambda_g$ 为空气的导热系数; $\lambda_s$ 为固体材料的导热系数; $\epsilon$ 为粉末材料的孔隙率; $\varphi$ 为经验系数, $\varphi=0.02\times 10^2(\epsilon^{-0.03})$ ;  $D_p$ 为粉末颗粒平均直径; $\lambda_{rs}$ 为颗粒间辐射换热系数; $\lambda_{rv}$ 为颗粒间空气的辐射换热系数。

$\lambda_{rs}$ 的计算公式为

$$\lambda_{rs} = 0.2277 \left( \frac{\epsilon_R}{2-\epsilon_R} \right) \left( \frac{T}{100} \right)^3, \quad (21)$$

$\lambda_{rv}$ 的计算公式为

$$\lambda_{rv} = \frac{0.2277}{1 + \frac{\epsilon}{2(1-\epsilon)} \frac{1-\epsilon_R}{\epsilon_R}} \left( \frac{T}{100} \right)^3, \quad (22)$$

式中 $\epsilon_R$ 为材料发射率。

为了有效地评价粉末激光烧结的三维非稳态温度场,实验选用的工程塑料粉末为尼龙粉末材料(PA6),且在室温下进行自由深度烧结。根据实验可知,能得到较好烧结线形的激光功率为8~20 W,扫描速度为10~50 mm/s,对应工艺参数下的激光瞬时作用过程的粉末熔融区的平均温度均大于400 $^\circ\text{C}$ 。图2为红外热像仪测量所得的粉末熔融区的三帧红外图像及其温度变化图,对应的激光功率为15.5 W和扫描速度为30 mm/s,图中右上角为激光扫描烧结的截屏图像,三帧截屏图像的扫描光斑(左端的圆形光亮区)的温度分布如图2中的曲线1,2和3所示,由图可知烧结熔融区的最高温度接近1500 $^\circ\text{C}$ 。因此根据一系列实验可知,有效导热系数可利用(20)式来计算。

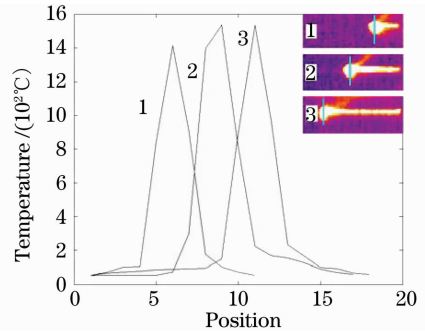


图2 粉末熔融区的温度分布曲线

Fig. 2 Temperature distribution curve of powder melting zone

同时根据实验研究可知,尼龙粉末的松实程度对烧结线形有较大影响,实验研究中,利用压实度 $k$ (即未压实与压实情况下的粉末体积比)来表征粉末松实程度参数,其优化值为 $k=1.1594$ ,故粉末的孔隙率<sup>[16]</sup>为

$$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} = \frac{\rho_s - k\rho_0}{\rho_s}, \quad (23)$$

式中 $\rho_s$ 为固体材料的密度; $\rho$ 为粉末材料的密度; $\rho_0$ 为无压实状态下粉末材料的密度。

实验用材料粒度为80~120目(0.12~0.18 mm)的尼龙粉末(PA6),其固体尼龙材料密度<sup>[17]</sup> $\rho_s=1130\text{ kg/m}^3$ ,无压实状态下的粉末密度经实验测得 $\rho_0=578.9\text{ kg/m}^3$ ,因此由(23)式计算可得孔隙率 $\epsilon=0.406$ 。同时可取粉末颗粒平均直径为0.15 mm,其发射率为<sup>[17]</sup>0.95,固体导热系数<sup>[17]</sup> $\lambda_s=0.4\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,计算可得有效导热系数 $\lambda=0.24\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

#### 3.2 热扩散率的确定

热扩散率是决定非稳态导热中温度场分布的重

要参数,反映非稳态导热时热量扩散或温度变化的能力。目前,热扩散率虽然可以通过瞬态法等实验测量来得到,但大多是通过特殊位置处温度及时间准确测量来实现的<sup>[18]</sup>,测试方法影响因素较多,要准确测量难度大。

非稳态激光烧结的热扩散率与烧结能量有着重要的联系,因此可以通过实验得到其与烧结能量的关系,确定其关联表达式,从而获得不同工况下热扩散率的值。

由(15)式可得,对于以速度  $v$  扫描烧结过程中对应任一光斑作用区的等效烧结能量  $E$  为

$$E = \frac{2Pw}{v}, \quad (24)$$

式中  $P$  为激光功率。

因此通过对粉末的自由深度烧结实验,并利用(19)式来实现与实验参数的关联拟合,进而得到粉末激光烧结能量与热扩散率的关系。

实验采用自搭建的选择性激光烧结装置,热源为  $\text{CO}_2$  激光器,扫描光束焦点与粉末上平面重合,光斑直径为  $100 \mu\text{m}$ ,烧结材料粒度为  $80\sim 120$  目的尼龙粉末,粉末初始温度为室温,激光功率  $P$  分别为  $15.5, 13.6$  和  $11.1\text{W}$ ,扫描速度  $v$  分别为  $36, 30$  和  $24 \text{ mm/s}$ 。

由多次烧结实验测量得到的平均最大烧结深度,由(19)式求得的对热扩散率  $\alpha$  值如表 1 所示。

表 1 实验烧结深度及  $\alpha$  的反求值

Table 1 Depth of experimental sintered piece and anti-evaluation of  $\alpha$

Power/W	Scan velocity / (mm/s)	$Z_{\text{max}}/\text{mm}$	$\alpha /$ ( $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )
15.5	30	0.924	1.543
15.5	24	1.03	1.577
15.5	18	1.23	1.776
13.6	30	0.9	1.508
13.6	24	1.0	1.533
13.6	18	1.16	1.615
11.1	30	0.88	1.519
11.1	24	0.975	1.536
11.1	18	1.12	1.588

根据表 1 所求  $\alpha$  值,可绘出烧结能量  $E$  与热扩散率  $\alpha$  的关系曲线,从而确定其关联式。关联式的确定方法通常根据曲线变化趋势进行拟合,若分别采用高斯、有理分式和多项式来进行拟合计算,拟合曲线与原曲线的方差采用高期法时为  $0.01011$ ,有

理分式时为  $0.001678$ ,多项式时为  $0.002219$ 。可知有理分式较好地逼近原数据曲线,拟合效果见图 3。由图可知热扩散率在一定烧结能量范围内,随着烧结能量的增大呈上升趋势,且在较大能量时,其变化较大。

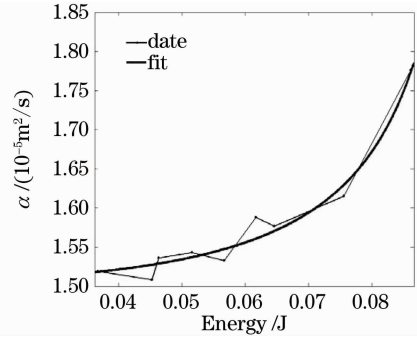


图 3  $E-\alpha$  拟合曲线

Fig. 3  $E-\alpha$  fitting curve

烧结能量  $E$  与热扩散率  $\alpha$  的有理分式拟合所得关联式为

$$\alpha = \frac{1.912E^3 + 6.681E^2 - 17.72E + 1.794}{E^2 - 11.84E + 1.193} \times 10^{-5}. \quad (25)$$

因此对于粉末激光烧结温度场的求解,可根据不同工况下烧结能量的大小来计算其热扩散率值,进而求解其温度场和烧结成形物的大小。

#### 4 粉末激光烧结温度场的计算与实验

根据温度场表达式(18)和(19)式以及随温度变化的热扩散率与烧结能量关联(25)式可计算烧结成形物的大小。实验装置和材料如 3 节所述,现选取激光烧结的能量参数分别为激光功率为  $8.8 \text{ W}$ ,速度分别为  $12 \text{ mm/s}$  和  $18 \text{ mm/s}$ ;功率为  $14.4 \text{ W}$ ,速度为  $18 \text{ mm/s}$  和  $24 \text{ mm/s}$ ;功率为  $17.1 \text{ W}$ ,速度分别为  $24 \text{ mm/s}$ ,  $30 \text{ mm/s}$ 。其对应的实验烧结线形及其截面形状如图 4 所示,其中图 4 右上插图为绕烧结线截面形状最大烧结深度的测量均值及对应的模拟计算和实验结果的误差如表 2 所示。由表中结果可知,随着烧结能量的增大,粉体材料的热扩散率也随之增大,最大烧结深度也增大,理论模拟计算值与实验值的误差均在  $10\%$  以内。因此,烧结温度场方程和评价粉体材料随温度变化的热物性参数的方法能较好地反映激光烧结的三维非稳态导热过程,并能利用其进行烧结成形物的尺度计算,进而实现工艺参数的优化。

表 2 最大烧结深度的模拟和实验结果

Table 2 Depth of calculated and measured results of sintered piece

Laser power /W	Scan velocity / (mm/s)	$\alpha / (10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	Calculated $Z_{\text{max}}/\text{mm}$	Measured $Z_{\text{max}}/\text{mm}$	Fraction error /%
8.8	12	1.613	1.293	1.322	2.2
8.8	18	1.533	1.07	0.994	7.6
14.4	18	1.675	1.2	1.170	2.6
14.4	24	1.555	1.0	1.007	0.7
17.1	24	1.600	1.049	1.078	2.7
17.1	30	1.548	0.936	1.004	6.8

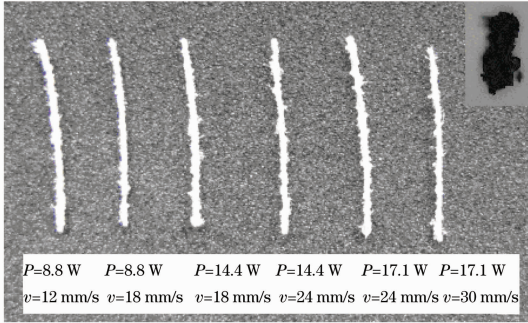


图 4 烧结件及截面显微镜图

Fig. 4 Sintered pieces and end-microscope diagram

## 5 结 论

从解析模型的角度出发,基于瞬时点热源三维非稳态导热理论探讨了激光烧结三维非稳态温度场的求解方法。根据工程塑料粉末的激光烧结特征,对具有孔隙特性的粉末材料随温度变化的有效导热系数和热扩散率进行了理论与实验相结合的探讨,给出了热扩散率与烧结能量的关联式,并通过温度场的模拟计算和实验研究,表明了模型计算与实验的一致性。为激光烧结三维非稳态温度场的简化求解提供了一种有效的方法,也为激光烧结工艺的进一步优化提供可能。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Yongnian, Li Shengjie, Zhang Renji *et al.*. Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends [J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2009, **14**(s1): 1~12
- 2 Li Fenglan, Zhao Yimin. Fabricating a prosthetic ear by means of selective laser sintering and wax powder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2712~2716  
李凤兰, 赵钰民. 选择性激光烧结法烧结复合蜡粉制作耳膜假体[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2712~2716
- 3 Fan Chunhua, Dong Lihua, Huang Kaixu. Analysis of densification rate of Fe-C mixtrue powder forming with laser sintering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 137~141  
范春华, 董丽华, 黄开旭. Fe-C混合粉末激光烧结成型致密度分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 137~141
- 4 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient

temperature field of 3D moving laser molten pool[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532  
席明哲, 虞 钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1527~1532

- 5 L. Dong, A. Makradi, S. Ahzi *et al.*. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(2): 700~706
- 6 Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 442~446  
陈 静, 谭 华, 杨海欧等. 激光快速成型过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 442~446
- 7 J. C. Nelson , S. Xue, J. W. Barlow *et al.*. Model of the selective laser sintering of bisphenol-A polycarbonate [J] . *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1993, **32**(10): 2305~2317
- 8 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting[M]. Beijing: Science Press, 2002  
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 9 Yang Xichen, Li Li, Zhang Ye. Numerical simulation of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3114~3120  
杨洗陈, 栗 丽, 张 烨. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3114~3120
- 10 Lin Ruitai. Heat Conduction Theory and Methods[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1992  
林瑞泰. 热传导理论与方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992
- 11 Hou Zhenbing, He Shaojie, Li Shuxian. Heat Conduction in Solid [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984  
侯镇冰, 何绍杰, 李恕先. 固体热传导[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- 12 Wei Zaifu, Cha Hongkui, Wang Runwen. Physical analysis of the laser-induced temperature field[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 355~359  
魏在福, 查鸿逵, 王润文. 激光加热温度场物理分析[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4): 355~359
- 13 Li Junchang, Li Xingyi, Fan Zebin *et al.*. Studies of the processing time and the temperature field of laser quenching on material surface[C]. *SPIE*, 1998, **3550**: 190-4
- 14 Xu Chengting, Shen Yifu, Gu Dongdong *et al.*. Progress in temperature field research into selective laser sintering process [J]. *Foundry*, 2004, **53**(7): 511~515  
胥橙庭, 沈以赴, 顾冬冬等. 选择性激光烧结成形温度场的研究进展[J]. *铸造*, 2004, **53**(7): 511~515
- 15 S. Yagi, D. Kunni. Studies on efective thermal conductivities in packed beds[J]. *A I c h E J*, 1957, **3**: 83~95
- 16 Lu Yuanjing, Wang Xiang, Nie Shizhen *et al.*. Experimental research on influence of compactness in SLS of PA6 powder

- material[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2009, (10): 49~52
- 路远景, 王 翔, 聂时振 等. 尼龙粉末激光烧结的压实度影响实验研究[J]. *现代制造工程*, 2009, (10): 49~52
- 17 Ma Zhigeng, Ren Lingbai. *Manual of Modern Engineering Materials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005
- 马之庚, 任陵柏. *现代工程材料手册*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- 18 Li Hechang, Fang Cuihao. Thermal properties measurement system with transient method[J]. *Measurement Technique*, 2004, (4): 16~18
- 黎和昌, 方萃浩. 瞬态法材料热物性参数测量系统[J]. *计量技术*, 2004, (4): 16~18