

文章编号: 1001-3806(2003)01-0040-04

选区激光烧结成型中致密度的数值模拟与实验

赵保军¹ 施法中¹ 冯涛² 孙建民² 徐海然¹⁽¹⁾北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京,100083)⁽²⁾北京隆源自动成型系统有限公司,北京,100088)

摘要: 分析了红外激光与聚合物材料的相互作用过程,给出一个 SLS 烧结过程的模拟计算模型,采用数值方法对烧结致密化程度进行研究,结果与实验测量值吻合得很好,表明采用该方法可有效地预测烧结件的致密程度。

关键词: 快速成型;选择性激光烧结;数值模拟

中图分类号: TK12 **文献标识码:** A

Numerical simulations and experiments of the sintered densification in selective laser sintering

Zhao Baojun¹, Shi Fazhong¹, Feng Tao², Sun Jianmin², Xu Hairan¹⁽¹⁾ School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing, 100083)⁽²⁾ Beijing Longyuan Automatic Fabrication System Co., Ltd., Beijing, 100088)

Abstract: In the selective laser sintering (SLS) process, the low intensity and high porosity of the sintered part are still the key factors that restrict the industrial progress of the SLS technique. The interaction between the laser and the materials and the distribution of the three-dimension temperature field are important factors that affect the densification of the sintered part. They are also the essential basis for choosing the appropriate SLS process parameters. The interaction between the infrared laser and the polymer materials had been discussed in this paper. A numerical simulation model for SLS process is presented, which has been used to analyze the densification of the sintered part. The simulation results accord with those of the experiments. The results show that the SLS model can be used to estimate the densification of the sintered part effectively.

Key words: rapid prototyping; selective laser sintering (SLS); numerical simulations

引言

选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 技术是采用红外激光作为热源来烧结粉末材料成型的一种快速成型 (rapid prototyping, RP) 技术。在 SLS 工艺中,烧结件的低强度和高孔隙度仍是影响 SLS 技术工业化发展的制约因素。激光与材料的相互作用过程、成形过程温度场分布变化规律,是影响烧结件致密化程度的重要因素,也是确定 SLS 工艺参数的重要依据。

在此,分析了红外激光与聚合物材料的相互作用过程,以聚苯乙烯粉末材料为例,给出一个 SLS 烧结过程的模拟计算模型,采用数值方法对烧结致

密化程度进行研究,讨论了 SLS 工艺参数对烧结致密化程度的影响。

1 激光与聚合物材料的相互作用

聚苯乙烯是最早工业化的塑料之一,属于无定形聚合物,它的比热较低,加热流动和冷却固化速度快,熔体粘度适中,且流动性和热稳定性较好,有利于 SLS 烧结成形。聚苯乙烯无明显熔点,熔融温度的范围较宽,约在 95 开始软化,120 ~ 180 之间成为流体,300 以上开始分解,放出气体,到 380 以上就会剧烈分解。

如图 1 所示,当能量极高的激光照射在粉层表面时,激光能量被吸收并转换成热能,使照射斑点的局部区域迅速熔化。SLS 工艺过程的实质是:粉末物质在高温条件下通过不同的扩散途径使颗粒间接触界面扩大、气孔缩小、致密化程度提高,然后冷却凝固变成致密、坚硬的烧结体的过程。激光对聚合

作者简介:赵保军,男,1973 年出生。博士研究生。主要从事计算机辅助设计、快速成型技术的研究。

收稿日期:2001-07-19;收到修改稿日期:2001-10-15

物材料的作用导致 3 种结果:(1) 受热升温;(2) 软化或熔化;(3) 降解气化。而激光作用所达到的结果取决于:(1) 聚合物粉体的热物理性能;(2) 激光作用参数如功率密度和作用时间;(3) 工艺参数。但归根结底取决于成形温度场的形式。

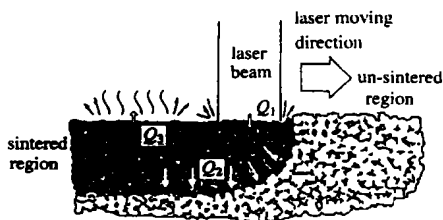


Fig. 1 Illustration of the heat transfer mechanisms in effect during laser sintering

粉末物质的烧结过程是表面能驱动的过程。文献[1]中给出了一个针对非晶态聚合物粉末的粘性烧结模型,该模型用粉末孔隙率的变化来表示烧结程度:

$$-\frac{d}{dt} = (\rho - \rho_{min}) A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, \$A\$ 是一个由材料决定的经验常量; \$E\$ 为烧结活化能; \$R\$ 为气体常数。

孔隙率 \$\rho\$ 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 \$\rho_p\$ 与实体密度 \$\rho_s\$ 的函数:

$$\rho = (\rho_p - \rho_s) / \rho_s \quad (2)$$

\$\rho_{min}\$ 是在一定的烧结条件下得到的极限孔隙率值。在最大烧结密度的测量实验中,测得 \$\rho_{min}\$ 的极限值约为 0。

2 数值计算

如图 2 所示,为激光烧结层断面的简化模型。

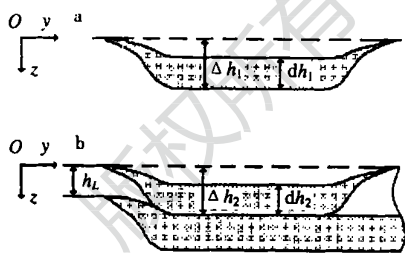


Fig. 2 Schematic for the cross-section of sintered layers
a - the first sintered layer b - the second sintered layer

其中,图 2a 为第 1 层烧结之后的情况。设 \$h_1\$ 为第 1 层的熔合深度,烧结之后收缩成厚度为 \$dh_1\$ 的熔合层,粉末表面下沉一个高度 \$l_1 = h_1 - dh_1\$。图 2b 为第 2 层烧结之后的情况。在未烧结区,新铺粉层的厚度为 \$h_L\$,在已烧结区,新铺粉层的厚度为 \$h_2 = h_L + l_1\$。烧结的结果是使得厚度为 \$h_2\$ 的粉层收缩成厚度为 \$dh_2\$ 的熔合层,粉末表面下沉一个

高度 \$l_2 = h_2 - dh_2\$。

如果重复烧结到第 \$i\$ 层,且达到一种稳定状态: \$h_i\$ 的大小不依赖于 \$i\$,且 \$dh_i = h_L\$。

假设由于重力作用,收缩效应只导致材料在 \$z\$ 方向上的移动,则由质量守恒定律,可得到第 \$i\$ 层的平均密度 \$\rho_a\$:

$$\rho_a \cdot dh_i = \rho_p \cdot h_i \quad (3a)$$

假设在第 \$i\$ 层内,密度随高度 \$z\$ 变化,由质量守恒定律可得^[2]:

$$d h_i = \frac{h_i}{\rho(z)} d \rho \quad (3b)$$

若 \$i > 1\$,则 \$h_i = h_L + (h_{i-1} - dh_{i-1})\$

因此,对于 \$i > 1\$ 的每一层,由方程 (3c) 可以得到 \$h_i\$。若有局部密度关系 \$\rho(z)\$,则由 (3b) 可以得到 \$dh_i\$。

根据粘性烧结定律,烧结过程中,局部粉床密度是烧结温度 \$T\$ 和时间 \$t\$ 的函数^[1]:

$$\frac{d}{dt} = (\rho_{max} - \rho) A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, \$\rho_{max}\$ 是在一定的烧结条件下得到的最大稳定密度值。

为了获得局部密度关系 \$\rho(z)\$,需要求解传热方程,建立烧结温度场,并对方程 (4) 进行数值积分。

选择性激光烧结成形温度场是三维瞬态温度场 \$T(t, x, y, z)\$,涉及到三维非线性热传导问题。激光烧结的三维非稳态传热的控制方程为^[3]:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (5a)$$

粉床上表面的激光加热边界条件^[1]:

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = q \quad (5b)$$

材料经激光束扫描后在空气中自然冷却,粉床上表面与周围环境存在对流和辐射换热,此类边界条件在传热学中称为第 II 类边界条件^[3]:

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = -(\rho_r + hc)(T - T_a) \quad z = 0 \quad (5c)$$

式中, \$K\$ 为粉床的局部传热系数,与粉床的局部温度和孔隙率有关; \$\rho\$ 为粉床的局部密度; \$q\$ 表示加热

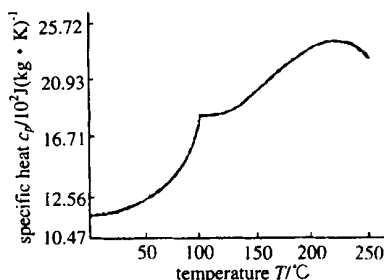


Fig. 3 Specific heat-temperature curve for polystyrene

热流密度; 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; c_p 为材料的定压比热容。

在 $t=0$ 时刻,粉床具有均匀的温度 T_0 。

对于聚苯乙烯材料,比热容随温度的变化关系如图 3 所示^[4]。它的较低的比热容,有利于 SLS 烧结成形。

2.1 粉床传热系数的计算

对于聚苯乙烯固体材料,它的导热系数为 $0.13 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而且随温度的变化比较平稳,在计算中可以按常数处理。而对于粉床的局部传热系数 K 的确定比较复杂,它不仅与局部温度有关,而且与固体的传热系数 K_s 、空气的传热系数 K_g 以及粉床的局部孔隙率 ϵ 有关。文献[5]中,Yagi-Kuni 提出了一个计算粉床传热系数的模型,分别考虑了低温和高温两种情况,因为高温时粉床中的辐射换热明显加强。

空气的传热系数 K_g :

$$K_g = 0.004372 + 7.384 \times 10^{-5} T \quad (6)$$

当 $T < 673 \text{ K}$ 时,

$$K = K_s(1 - \epsilon) / (1 + K_s / K_g) \quad (7a)$$

当 $T > 673 \text{ K}$ 时,

$$K = \frac{1}{1/K_s + \epsilon / (K_g + D_p h_{rs})} + D_p h_{rv} \quad (7b)$$

$$= 0.02 \times 10^{2(T - 0.3)}$$

式中, ϵ 为经验系数; D_p 表示粉末颗粒的平均直径; $h_{rs} (\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 为相邻颗粒表面之间的辐射传热系数, $h_{rv} (\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 为相邻空气之间的辐射传热系数,它们由下面的经验公式给出:

$$h_{rs} = 0.2277 \left(\frac{1 - \epsilon}{2 - \epsilon} \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \quad (8)$$

$$h_{rv} = \frac{0.2277}{1 + \frac{1 - \epsilon}{2(1 - \epsilon)}} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \quad (9)$$

式中, ϵ 为粉床的局部孔隙率; ϵ_r 为材料的发射率。

2.2 激光加热热流密度的计算

由于初始粉层的空隙率比较大,约为 0.6 ,所以它对于红外激光(波长为 $10.6 \mu\text{m}$)来说,可以看作是一种半透明的吸收介质。设聚苯乙烯材料对波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光的吸收率为 R ,则激光对粉床的加热热流密度分布 $q(x, y, z)$ 可以表示为激光光强 I 的函数:

$$q(x, y, z) = R \cdot I \quad (10)$$

设激光光斑截面上的光强分布 $I(r, z)$ 服从高斯状态分布,光斑中心处的光强为 I_0 ,则粉床表面光强

及其内部的透射光强分布可表示为:

$$I(r, z) = (1 - R_a) I_0 \cdot \exp \left[- \frac{2r^2}{2} - z \right] \quad (11)$$

式中, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$,表示考察点距离光斑中心的距离; z 为深度; r_0 为光斑的特征半径; R_a 为粉层表面的反射率,它与入射角、材料折射率有关,一般假设粉末颗粒为圆球形状,则粉末层表面的反射率约为 0.04 。

为消光系数,由于粉床的几何结构的复杂性,难于用准确的公式计算消光系数,但对于不透明的材料, $1/l$ 的数量级大小与粉末颗粒的尺寸的数量级大小相当,这是因为粉层内光强的衰减主要来源于粉末颗粒对光的阻滞^[6]。

光斑中心处光强 I_0 与激光输出功率、光斑特征半径的关系:

$$I_0 = 2P/l^2 \quad (12)$$

3 实验测量

在三维瞬态非线性温度场的数值计算过程中,有些参数如粉床的初始密度(即铺粉密度)、最大烧结密度等需要根据情况进行实际的测量。同时,为了验证粉床局部传热系数的计算模型,对传热系数也进行了测量。实验所用的激光快速成形设备为北京隆源自动成形系统有限公司的 AFS-320MZ 型成形机。

3.1 铺粉密度的测量

铺粉密度即烧结过程的初始密度 ρ_0 ,它的大小与铺粉参数有关。铺粉参数包括铺粉小车的运动速度、滚轮转速、料缸和成形缸活塞的升降步长。AFS-320MZ 型成形机的铺粉过程如图 4 所示。

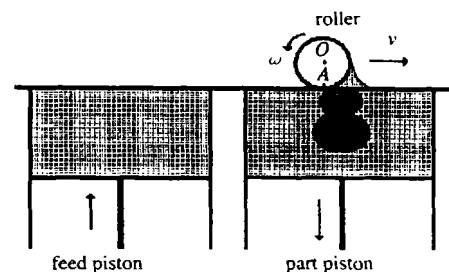


Fig. 4 Schematic for paving powder process of AFS-320MZ machine
铺粉过程中,假设滚筒与粉层的接触点为 A ,则滚筒上 A 点处的线速度方向与滚筒中心的运动方向相同。这样的设计可以避免滚筒挤压下面的已成形部分,但是按照这种方式铺出的粉层的密度一般比较小,因此,计算中所用的粉层密度需要实测值。

为了测定铺粉密度,设计了如下的实验:在成形缸的 5 个位置处同时烧结成形 5 个大小相同的圆桶

形容器,其内直径为 30mm,内部深度为 50mm,如图 5 所示。烧结完成之后,取出桶内未烧结的粉末,利用简单的质量-体积的方法得到铺粉密度的估计值。经测定,这样获得的铺粉密度值在 $417\text{kg}/\text{m}^3 \sim 422\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,略小于粉末的标定密度($450\text{kg}/\text{m}^3$)。

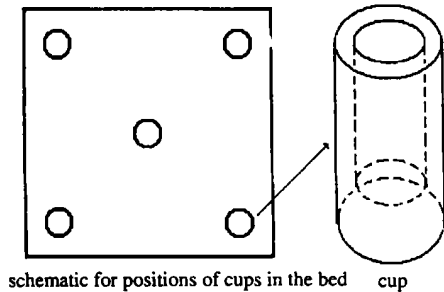


Fig. 5 Measurement of powder bed density

3.2 最大烧结密度的测量

最大烧结密度 ρ_{\max} 是在一定烧结条件下得到的极限密度值。对聚苯乙烯材料的最大烧结密度进行实测试验。试件尺寸为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。烧结参数设置:激光功率 $P = 30\text{W}$,扫描间距 $S = 0.1\text{mm}$,层厚 $h = 0.15\text{mm}$,扫描速度 $v_b = 0.875\text{m}/\text{s}$,初始温度 $T_0 = 369\text{K}$ 。经测定,试件的密度在 $1035\text{kg}/\text{m}^3 \sim 1065\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,与聚苯乙烯固体材料的密度相当,达到完全密实状态。这说明,最大烧结密度 ρ_{\max} 取为材料的固体密度是可接受的。

3.3 传热系数的测量

采用 GRD-2 型快速热导仪对聚苯乙烯粉末的传热系数进行测量。测得在温度 $T = 93^\circ\text{C}$ 、密度 $\rho = 487\text{kg}/\text{m}^3$ 时的传热系数为 $0.0488\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。根据 Yagi-Kuni 的计算模型得到的粉床传热系数为 0.0484 。计算结果与实验测量值相吻合,因此,采用 Yagi-Kuni 的计算模型是合理的。

4 模拟计算与实验结果分析

对传热方程(5)的求解采用三维有限差分的方法。图 6 所示为在不同烧结条件下得到的烧结件平均密度的计算值和实验值的比较。其中,试件尺寸为 $25.4\text{mm} \times 25.4\text{mm} \times 10.0\text{mm}$ 。烧结参数设置:激光功率 $P = 20\text{W}$,层厚 $h = 0.5\text{mm}$,扫描速度 $v_b = 2.189\text{m}/\text{s}$,初始温度 $T_0 = 365\text{K}$,环境温度 $T_a = 323\text{K}$,初始密度 $\rho_0 = 420\text{kg}/\text{m}^3$ 。

可以看出,计算结果与实验值是相吻合的。计算结果略高于实验值,而且随着扫描间距的减小,计算结果与实验值的误差有增大的趋势。导致这种结果的原因,一方面是由于扫描间距的减小导致激光输入能量密度的增加,局部烧结温度过高,当烧结温度高于 380°C 后,聚苯乙烯材料的分解加剧,放出大量的气体,这部分的质量损失导致了烧结件实际密度的下降;另一方面,材料分解放出气体带走一部分热量,使得实际的局部烧结温度下降,低于计算得到的烧结温度,最终引起烧结件实际密度的下降。

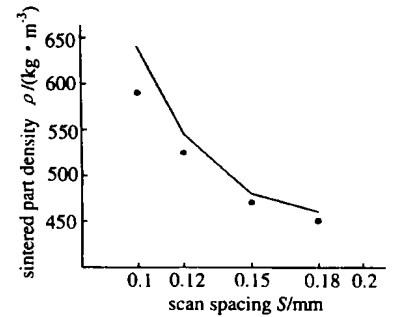


Fig. 6 Comparison between calculated and measured density of sintered parts
- measured density
— calculated density

5 总结

激光与材料的相互作用过程、成形过程温度场分布变化规律,是影响烧结件致密化程度的重要因素,也是确定 SLS 工艺参数的重要依据。

分析了红外激光与聚合物材料的相互作用过程,以聚苯乙烯粉末材料为例,给出一个 SLS 烧结过程的模拟计算模型,采用数值方法对烧结致密化程度进行研究,结果与实验测量值吻合很好,表明采用该方法可以有效地预测烧结件的致密化程度。

参考文献

- [1] Nelson J C, Xue S, Barlow J W *et al.* Ind Engng Chem Res, 1993, 32(10): 2305 ~ 2317.
- [2] Childs T H C, Berzins M, Ryder G R *et al.* Proc Instn Mech Engrs, 1999, B213: 333 ~ 349.
- [3] 王补宣著. 工程传热传质学(上册). 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 杨国文编著. 塑料材料——结构、性能、加工工艺特性. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [5] Yagi S, Kuni K. American Institute of Chemical Engineers Journal, 1957, 3(3): 373 ~ 381.
- [6] Sun M M, Beaman J J. A three dimensional model for selective laser sintering. Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. The University of Texas at Austin, Austin, 1991: 102 ~ 109.