

# 激光选区烧结(SLS)成型机的 粉末预热过程的实验研究

李湘生, 史玉升, 王从军, 黄树槐

(华中理工大学材料学院快速成型中心, 湖北武汉 430074)

**摘要:**在激光选区烧结(SLS)快速成型技术中,热能的传递和吸收是一个关键的过程,热能的有效利用和均匀分布是决定SLS成型技术成败的重要因素。粉末的预热是影响成型加工和成型精度的最重要因素之一,文中对成型机工作腔的一般预热方法的预热过程进行了分析,并在实验基础上获得了关于预热温度场的预热过程数学模型,该模型对于预热装置设计、SLS成型过程控制都具有重要的意义。

**关键词:**激光选区烧结(SLS); 热能; 预热; 数学模型

中图分类号: TK124; TB44 文献标识码: A

## 1 引言

快速成型技术是一个新型的制造技术,它利用计算机数据直接产生三维实体,为现代新产品设计、现代制造、医学、动力等各个领域提供了一种快速、先进的技术和工具。而SLS是最具有发展前途的一种快速成型技术。

在SLS成型过程中,热能的传递和吸收是这种加工技术的一个最关键的过程,只有清楚地了解该加工过程中热量的产生和传递,才能有效地提高热能的利用率,提高加工质量。预热是一个重要的过程,没有预热或预热不当,将会使成型时间增加,所成型件的性能低,零件精度差,甚至烧结过程完全不能进行。一般来说,预热温度在材料熔融温度以下 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,而且要求在新的一层粉末铺好后,尽快将温度升到设定温度。所以对其预热装置的预热过程进行研究,并建立预热动态过程的数学模型,对于提高加热精度、减少翘曲变形和减少加热时间具有重要的意义,同时为提高加热的均匀性和零件的加工精度也具有重要的意义。

## 2 HRPS 系统预热装置

一般来说,SLS成型机粉床的预热方式多采用

辐射预热,辐射预热可以与激光加工同时进行,而且易于控制。图1是华中理工大学快速成型中心研制的粉末烧结成型机HRPS-III的预热系统示意图,1~4是预热元件,5是粉末烧结工作腔,6是反射器,2b是正方形烧结腔的边长,2c是正方形布置的每个加热元件的长度,a是加热元件到所加热粉末平面的高度( $l, m, n$ )表示加热元件中心的空间坐标, $(x, y, 0)$ 表示粉末床平面的任意一点的坐标。其能量传递过程见图2。

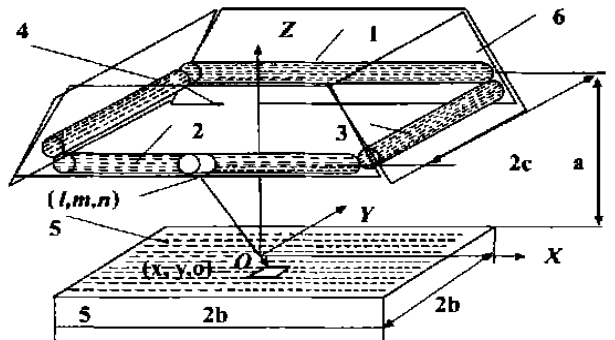


图1 SLS成型机(HRPS-III)加热装置示意图

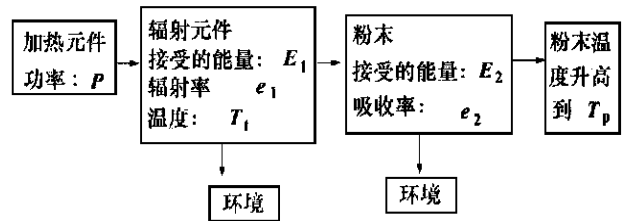


图2 SLS成型机预热系统的能量传递示意图

烧结过程要求预热温度达到熔融温度以下 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这也就要求粉末床温度的不均匀度必须控制在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而且为了提高加工效率还要求预热的时间尽量短,故如图1所示的预热系统能否达到这样的要求则是该成型机加工高精度制品的关键之一。

## 3 粉床温度场测试

由于每一层粉末的厚度较小 (一般不超过 0.5 mm), 所以接触法温度测量无法反映实际铺粉层的温度变化过程, 这里采用红外测温仪。同时粉床的面积较大, 如果要测出所有点的温度, 工作量将很大。笔者通过初步的分析发现温度场有如图 3 的分布特征, 所以在测量温度时只选取如图 4 所示的典型点作测量点, 这样选取的测量点基本能反映温度场的分布情况。

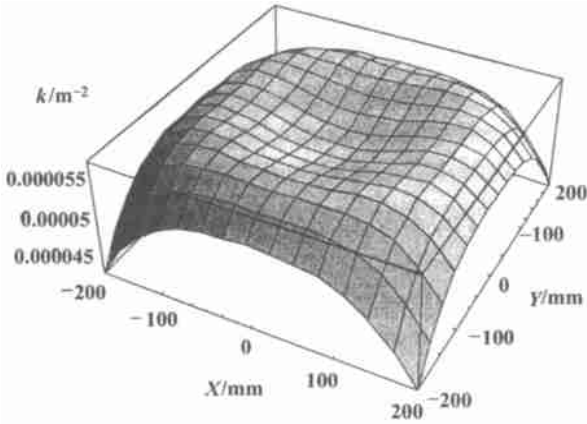


图 3 温度分布示意图

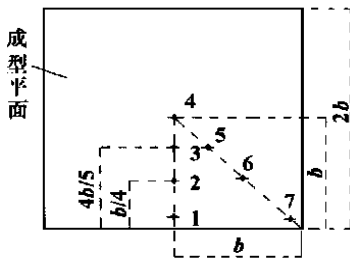


图 4 温度测量点分布图

图中:  $k$  表示温度不均匀性系数,  $T - T_0 = 2k \cdot e_1 \cdot e_2 \sigma \cdot (T_1^4 - T_p^4) \frac{ad_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}$ , 此式中  $\sigma$  为辐射的波尔兹曼常数,  $\alpha$  为热扩散系数,  $\lambda$  为热

传导系数。  $d_0$  为加热管的外径。

### 4 结果及其分析

所测各点的温度 - 时间曲线见图 5。图 6 和图 7 是经过处理的拟合曲线。这三图中的标号 1 ~ 7 或系列 1 ~ 系列 7 对应于图 4 中的各点。图 6 和图 7 的处理方法是这样的, 先将图 5 的测量数据去掉初始点的测量值, 再经过多项式拟合 (图 6 是三次多项式拟合, 图 7 是二次多项式拟合), 第一次拟合的多项式假设为:

$$f_1 t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (1)$$

再进行归一化处理, 即统一起始点温度处理, 如

果测量的起始点温度为  $T_0$ , 令  $f(t) = T_0$  以求得对应于  $T_0$  的  $t(0)$ , 令

$$f(t) = f_i(t + t(0)) \quad (2)$$

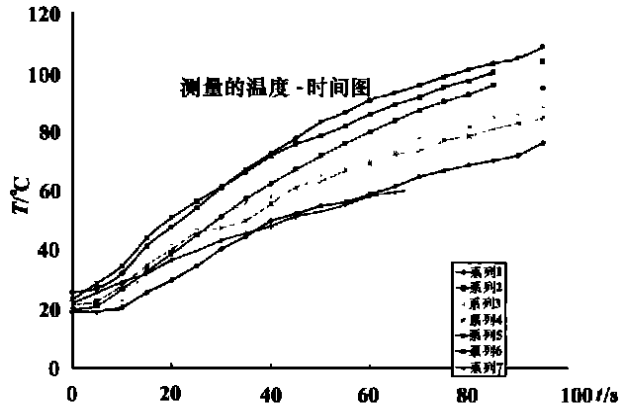


图 5 实测的各点温度随时间的变化曲线

图 6 和图 7 就是这样处理后的曲线, 其结果与测量结果误差很小 (见图 8), 而且没有丢掉加热的过程信息。式 (3) ~ (9) 是对应于图 7 的拟合后各点升温的曲线方程。

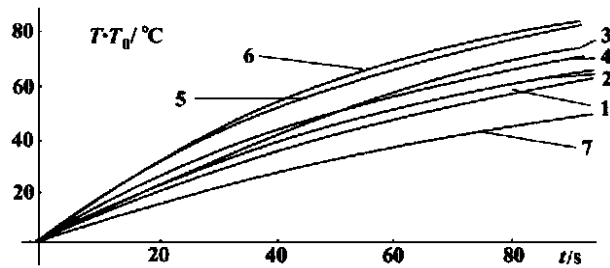


图 6 经过处理的各点温度随时间的变化曲线

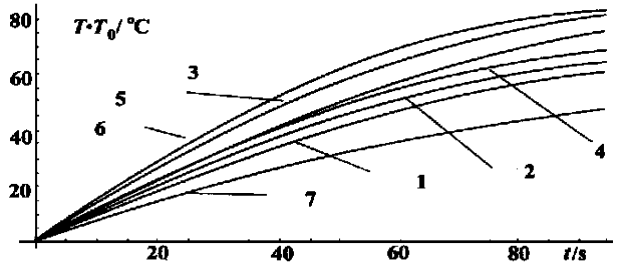


图 7 经过拟合和归一化处理后温度随时间的变化曲线

$$T - T_0 = 1.01617 t - 0.00399528 t^2 \quad (3)$$

$$T - T_0 = 1.2088 t - 0.00435149 t^2 \quad (4)$$

$$T - T_0 = 1.25581 t - 0.00568753 t^2 \quad (5)$$

$$T - T_0 = 1.11107 t - 0.00457143 t^2 \quad (6)$$

$$T - T_0 = 1.46143 t - 0.0064921 t^2 \quad (7)$$

$$T - T_0 = 1.61457 t - 0.00779832 t^2 \quad (8)$$

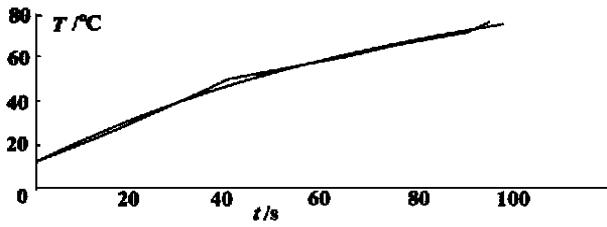


图8 拟合与实测的温度时间曲线的比较

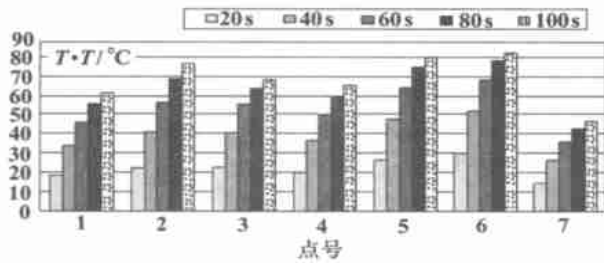


图9 各点的温度变化比较

所以升温速度是一个更关键的参数,特别是较高温度(100 °C左右)时的升温速度更具有实际意义,图10表示了各点的升温速度。

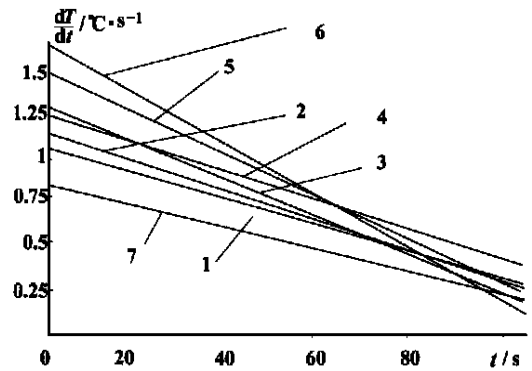


图10 各点的升温速度

各点的温度不均匀性主要是受两个方面因素的影响,一个是辐射热流密度,对于如图1所示的加热装置,辐射流密度本身存在不均匀性,其分布情况与上述实际测量的温度分布有些类似。另一个是散热的不均匀性,靠近边缘散热最快,而靠近中心散热较慢。为了提高预热温度的均匀性,也可以从这两个方面综合考虑。一般来说,靠近边缘的散热要比中心的散热要快,这样在设计加热元件的安装位置时,就可预先将其安装在靠近边缘的位置。

根据各点的加热曲线的多项式拟合结果,可以用如下模型描述短时间内的加热过程:

$$T - T_0 = k_1 t + k_2 t^2 \tag{17}$$

式中  $k_1, k_2$  是系数,可以根据实验确定,它们主要与加热功率、加热元件的布置和安装、散热条件有关。

### 5 结论

通过以上的分析,SLS快速成型机加热系统加热过程的几点规律如下:

(1) SLS快速成型机的预热过程是一个极其复杂的过程,它涉及到加热元件的功率、布置和安装,还涉及到散热条件。一般来说,加热元件的功率、布置和安装将会影响能量密度的大小及其分布,散热条件和能量密度的变化将会影响升温速度和温度的均匀性。

(2) SLS快速成型机的预热过程可以用一个简单的二次多项式模型描述,该模型说明升温速度在开始阶段较高,随着被加热的物体温度的升高,加热速度逐步下降,得到一个相对平衡的状态。

$$T - T_0 = 0.805\ 152\ t - 0.003\ 322\ 68\ t^2 \tag{9}$$

$$T - T_0 = 1.168\ 6\ t - 0.007\ 076\ 7\ t^2 + 0.000\ 020\ 54\ t^3 \tag{10}$$

$$T - T_0 = 1.144\ 5\ t - 0.001\ 422\ 4\ t^2 - 0.000\ 019\ 67\ t^3 \tag{11}$$

$$T - T_0 = 1.615\ 4\ t - 0.013\ 312\ t^2 + 0.000\ 051\ 2\ t^3 \tag{12}$$

$$T - T_0 = 1.257\ 2\ t - 0.007\ 462\ t^2 + 0.000\ 019\ 27\ t^3 \tag{13}$$

$$T - T_0 = 1.795\ 18\ t - 0.014\ 48\ t^2 + 0.000\ 053\ 77\ t^3 \tag{14}$$

$$T - T_0 = 1.796\ 8\ t - 0.010\ 379\ t^2 + 0.000\ 017\ 21\ t^3 \tag{15}$$

$$T - T_0 = 0.849\ 06\ t - 0.004\ 619\ 9\ t^2 + 0.000\ 012\ 354\ 3\ t^3 \tag{16}$$

从以上的分析图和拟合公式看,辐射加热方法的升温过程在升温到150 °C之前用一种二次多项式模型表示即相当准确。从这些模型可以看出:开始升温速度快,随着温度的不断升高,升温速率不断降低,最后达到一个比较稳定的温度,说明加热的热流与被加热元件的散热在某环境条件下达到了平衡。同时靠近加热边缘的点升温速度要比中心区域小,而方形区域的四个角升温速度最低,在方形区域对角线的四分之一点附近的加热速度最快(如点5和点6)。由于SLS成型机粉末材料在铺粉前已经预热到一定的温度,铺粉后的温度升高绝对值不是很大,

## 汽轮机调节系统中摩擦与间隙的定位方法研究

戴义平<sup>1</sup>, 宋晓炜<sup>1</sup>, 邓仁刚<sup>1</sup>, 谢诞梅<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049; 2. 武汉大学 动力系, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 摩擦与间隙的存在将使系统发生极限环振荡, 极限环频率和幅值的变化可以作为故障诊断的特征。根据系统中信号传递的衰减特性, 各个环节中极限环的频谱特性会发生变化。因此, 本文采用频谱分析的方法, 根据可观测信号的高阶幅值谱与基波幅值谱两者的比值关系, 实现摩擦与间隙的定位诊断, 仿真试验证明了其可行性。

**关键词:** 汽轮机; 调节系统; 定位诊断; 频谱分析

中图分类号: TK263.7 文献标识码: A

## 1 引言

系统中存在摩擦与间隙时, 在扰动作用之下将出现极限环振荡, 其振荡的频率和幅值不随扰动量的大小而变化; 当摩擦与间隙增大时, 极限环的幅值增大而频率不变, 因此, 极限环的频率和幅值可以作为摩擦与间隙的特征参数, 用于系统的状态监测与故障诊断<sup>[1]</sup>。在文献[1]中已经指出, 当摩擦与间隙位于调节装置的内回路和反馈回路时, 极限环的频率将有别于故障存在于前向回路时的频率。因此, 可以利用系统时域信号的极限环频率, 确定故障是位于前向回路, 还是内回路或反馈回路。但仅通过极限环的频率还不能确定摩擦与间隙位于回路的哪一个具体的环节。本文利用汽轮机及其调

节系统具有很好的低通滤波特性的特点, 提出了通过频谱分析, 由可观测信号的高阶幅值谱与基波幅值谱之间的衰减关系, 实现摩擦与间隙的定位诊断的方法, 并通过仿真试验对其可行性进行了分析。

## 2 摩擦与间隙的位置及定位的机理

在文献[1]中给出了调节装置的传递函数方框图, 如图 1 所示, 位置 A、B 和 C 代表了摩擦与间隙位于前向回路、内回路和反馈回路的典型情况。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 是前向回路位置的变化, B<sub>1</sub> 是内回路位置的变化。从系统稳定性的角度来看, 摩擦与间隙位于 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 等效于 A 处的作用, 位于 B<sub>1</sub> 等效于 B 处的作

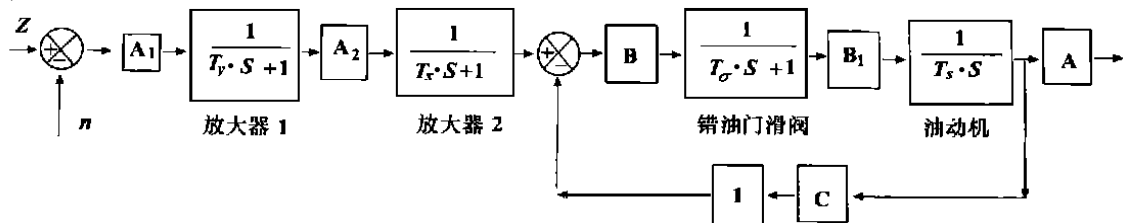


图 1 调节装置的传递函数方框图

用。但是, 当系统发生极限环振荡后, 要实现摩擦与间隙的定位与诊断, 必须准确判断故障发生的具体部位, 即故障发生在前向回路中 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 或 A 的具体位置以及内回路 B、B<sub>1</sub> 或反馈回路 C 的位置。

在引言中已经指出, 通过极限环的频率与幅值及其变化还不能完全实现摩擦与间隙的准确定位。另一方面, 汽轮机及其调节装置具有很好的低通滤

收稿日期: 2000-05-15; 修订日期: 2000-07-17

作者简介: 戴义平(1961-), 男, 湖北天门人, 西安交通大学副教授, 博士。

(3) SLS 快速成型机的预热温度场的均匀性也是受两方面的因素的影响, 一个是热流密度的均匀性; 另一个是散热条件的均匀性。

参考文献:

- [1] JAY EASWAN. Rapid prototyping with the selective laser sintering and polyform processes[A]. Chartoff R P and Lightman A J Fifth International Conference on Rapid Prototyping[C], Dearborn, USA: SME, 1996. 103-107.

(孙显辉 编辑)

空气与  $O_2 + CO_2$  气氛下钙基脱硫剂固硫规律的实验研究 = **Calcium-based Desulfuration Agent under the Gaseous Condition of Air and  $O_2/CO_2$**  [刊, 汉] / ZHOU Ying-biao, ZHENG Ying, ZHANG Li-zhi, et al (National Key Lab of Coal Combustion under the Central China University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy Power. — 2001, 16(4). — 409 ~ 411

An experimental investigation was conducted of the mechanism of  $SO_2$  emissions and  $CaCO_3$  desulfuration during the burning of Heshan bituminous coal under the gaseous condition of air and  $O_2/CO_2$ . The results of the experimental investigation indicate: 1.  $CaO$  in coal ash plays a significant role in effecting desulfuration; 2. The presence of  $CO_2$  can markedly contribute to the desulfuration process; 3. Under the condition of a constant ratio of temperature and  $Ca/S$  it is essential to optimize the content of  $CO_2$ . These findings provide an underlying basis for the comprehensive treatment of pollutant emissions under the circulating combustion mode of  $O_2/CO_2$ . **Key words:**  $CO_2$ , calcium-based desulfuration agent, desulfuration

激光选区烧结(SIS)成型机的粉末预热过程的实验研究 = **An Experimental Study of the Powder Preheating Process for a SLS (Selective Laser Sintering) Forming Machine** [刊, 汉] / LI Xiang-sheng, SHI Yu-sheng, WANG Zong-jun, Huang Shu-huai (Rapid Forming Technology Center of Materials College under the Central University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 412 ~ 414

In the rapid forming technology of selective laser sintering (SLS) the transfer and absorption of heat energy represents a key process. The effective use and uniform distribution of heat energy constitute a major factor in ensuring the success of the SLS forming technology. The preheating of powder has been considered as one of the most important factors having a decisive influence on the forming process and forming precision. An analysis is given of the preheating process of a general preheating method in the working cavity of a forming machine. On the basis of experiments obtained was a mathematical model depicting the preheating process of a preheating temperature field. The model plays a crucial role in the design of a preheating device and the control of SLS forming process. **Key words:** selective laser sintering, thermal energy, preheating, mathematical model

汽轮机调节系统中摩擦与间隙的定位方法研究 = **A Study of the Method for Locating the Friction and Clearance in a Steam Turbine Governing System** [刊, 汉] / DAI Yi-ping, SONG Xiao-wei, DENG Ren-gang, et al (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 415 ~ 417

The presence of friction and clearance in a steam turbine governing system can cause a limiting ring oscillation of the system. The variation of the limiting ring frequency and amplitude may serve as the characteristics of fault diagnosis. The frequency spectrum features of the limiting ring in various links will change, depending on the damping characteristics of signal transfer in the system. In view of this, by using the method of frequency spectrum analysis, the authors have attained a locating diagnosis of the friction and clearance, based on the ratio of high-order amplitude spectrum and basic wave amplitude of measurable signals. The feasibility of the above-mentioned method has been verified by a simulation test. **Key words:** steam turbine, governing system locating diagnosis, frequency spectrum analysis

采用扩展温度振荡法测量超临界  $CO_2$  管内对流换热特性 = **The Measurement of Convection Heat Transfer Characteristics in a Supercritical Carbon-Dioxide Gas Tube by the Use of an Extended Temperature Oscillation Method** [刊, 汉] / ZHANG Hou-lei, XUAN Yi-min (Power Engineering Department, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094), Wilfried Roetzel (University of the Federal Armed Forces at Hamburg, Germany, Post Code: 22043) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 418 ~ 420

Presented is an extended temperature oscillation model for the measurement of in-tube convection heat-transfer factor during the variation of fluid temperature in a small duct. The recommended method can be employed to measure the local convection heat-transfer factor of flows in various kinds of smooth-surface duct. An actual measurement was conducted of the supercritical  $CO_2$  convection heat-transfer factor in a round stainless steel tube of 2 mm inner diameter under typical pressure and temperature conditions. **Key words:** supercritical carbon dioxide, convection heat transfer, temperature os-