

文章编号:1000-582x(1999)05-0129-06

·工程应用·

## 内热式流化床电炉升温特性的研究

尹友中

(四川省电力工业局计规处,成都 610061)

TG155.17

**摘 要:**对内热式流化床升温特性进行了试验研究和数值模拟。结果表明:内热式流化床热处理电炉具有升温快、升温热效率高的优点;升温功率对炉子的升温特性有较大影响,而流化风速的影响效果不明显;模型的预测结果与试验结果基本吻合。

**关键词:**流化床;电炉;升温特性

**中图分类号:** TG 155.1

内热式 热处理炉  
文献标识码:A

内热式流化床热处理电炉作为一种适应小批量、多品种、多用途、少氧化的金属热处理电炉,正越来越多地在中、小型热处理车间中得到推广应用。有关这种新型热处理电炉在热处理工艺方面的用途(如少氧化加热、渗碳、渗氮等),已有多篇文献论及<sup>[1-3]</sup>。但这种热处理炉的升温稳定性问题,至今未能完全解决,升温过程不仅是炉内高温部件及供电设备工作状态最为恶劣的时候,也是运行人员对炉子操作较频繁的时候,使升温过程就成为内热式流化床热处理电炉在运行中最容易出故障的时候。实践也表明:由于设计或运行不当的许多后果往往都在升温过程中表现出来。这是该新型热处理电炉目前推广应用范围还不够广的主要原因之一。为系统研究流化床热处理电炉的升温过程,笔者针对目前市场上常见的三种截面形状的内热式热处理电炉,进行了试验研究和模型计算。

### 1 试验研究概况

试验台本体结构及系统布置如图1所示,其中,流化床本体由炉膛、风室,多孔陶瓷布风板、加热电极等组成。炉膛横截面形状有圆形、椭圆形和三角形三种,其横截面积等效于一个 $\varphi 200\text{ mm}$ 的圆面积。

电极从炉衬上方伸入炉膛内。圆形和椭圆形炉膛采用两对加热电极。三角形炉膛布置三对加热电极。每对加热电极由一支位于炉衬壁面附近的柱状正电极和一个呈半圆弧形的负电极组成。

空气由一台空气压缩机提供,经流量计计量后送入等压风室。炉气与炉口进入的空气

· 收稿日期:1998-09-14

作者简介:尹友中(1962-),男,重庆永川人,硕士,工程师。现从事技术管理工作。

混合后, 流入旋风除尘器, 经引风机排出。除尘器分离下来的床料由“L”阀式返料器送回炉内。

试验中所用床料为石墨粒子, 粒径范围为  $0.076 \sim 0.45 \text{ mm}$ , 真密度  $2.500 \text{ kg/m}^3$ 。

从布风板以上  $50 \text{ mm}$  开始, 由下往上每隔  $100 \text{ mm}$  布置一个测温孔, 共有 6 个温度测孔, 用于测量炉内温度的垂直分布。

## 2 试验研究结果及讨论

### 2.1 流化床热处理炉的升温特性

图 2 所示分别是在圆形、椭圆形及三角形炉体条件下, 由试验所测得的热态升温曲线。从图中可见, 在三种炉体中, 只需  $60 \text{ min}$  左右, 内热式流化床热处理炉的炉温就可从室温升至  $900^\circ\text{C}$ ; 平均升温速度约为  $15 \sim 16^\circ\text{C/min}$ 。升温过程的平均耗电量只有  $10 \text{ kW}\cdot\text{h}$  左右。耗电量大约是普通热浴炉的  $15\%$ 。<sup>[4]</sup>

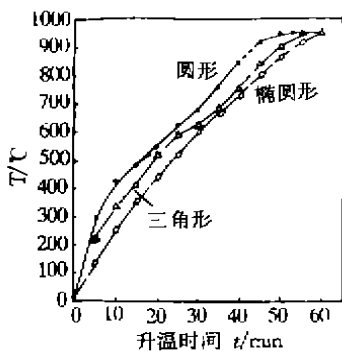
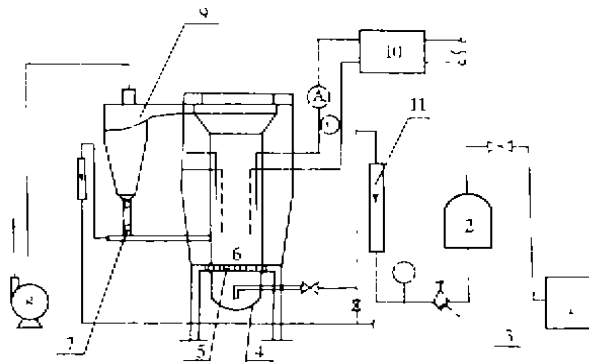


图2 三种炉型的热态升温曲线



1——空压机; 2——稳压罐; 3——减压阀;  
4——等压风室; 5——布风板; 6——炉膛;  
7——回料阀; 8——引风机; 9——除尘器;  
10——调压器; 11——流量计

图1 试验台本体结构及系统布置图

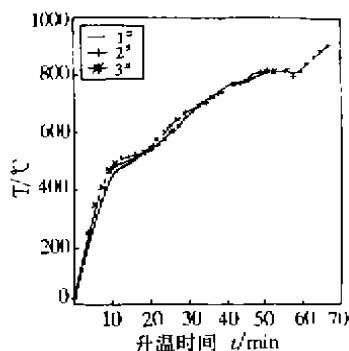


图3 升温时床内各点温度的变化特性

### 2.2 升温过程中炉内的温度分布

在升温试验中, 沿炉膛高度各温度测点所测温度值示于图3中。由图3可见, 在升温过程中, 各测点温度值的上升趋势是一致的; 试验还发现, 炉内水平方向的温度分布在升温过程中也是非常均匀的。

## 3 升温过程理论模型及计算

### 3.1 微分方程的建立及求解

由于升温过程不涉及工件加热过程, 加之石墨粒子燃烧产生的热量对升温的贡献较小, 床料损耗也不多, 因此将升温过程近似看成一维稳态加热过程, 将燃烧、扬折等子过程对升温过程的贡献用一些简单的代数式表示, 使模型得以简化<sup>[5]</sup>, 从而得出如下平衡关系:

$$mC_s \frac{dT}{dt} = S \quad (1)$$

初始条件为:  $t = 0, T = T_1$

式中  $T$ ——炉内温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_1$ ——环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t$ ——升温时间, s;

$C_s$ ——石墨粒子比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; 与温度有关;

$S$ ——外热源功率, kW;

$m$ ——床内石墨粒子质量, kg.

下面, 根据升温过程的实际情况, 对(1)式中各项作进一步的分析:

1) 升温过程的床料质量  $m$ :

根据试验情况, 升温过程中, 床内石墨粒子质量的变化关系可表示为:

$$m = m_0(1 - 0.05 t/3600)$$

其中,  $t$  为升温时间, s;  $m_0$  为  $t = 0$  时的床料质量, kg.

2) 外热源功率  $S$ :

外热源由以下七部分组成:

① 由加热电极产生的热量  $S_1$ . 假定采用等功率加热,  $S_1$  为定值.

② 炉气散热  $S_2$ . 计算式为:  $S_2 = A \times U_f \times C_v \times T$  (kW)

其中,  $A$  为布风板面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_v$  为炉气标准体积比热容,  $\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;  $U_f$  为流化风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

流化风速随炉温  $T$  而变, 其变化关系可用下式来描述:

$$U_f = 19.4 \times U_{f0} / (0.036 T + 18.5)$$

③ 炉口向外的辐射散热  $S_3$ :

$S_3$  随炉温而变, 可表示为:

$$S_3 = C_0 \times F \times \varphi \times \epsilon \times ((T + 273)^4 - (T_1 + 273)^4)$$

式中  $C_0$ ——黑体的辐射系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ; 取  $5.7 \times 10^{-11}$ ;

$F$ ——炉口面积,  $\text{m}^2$ , 本模型在计算中将其取为炉膛截面积;

$\varphi$ ——遮隔系数, 取 0.45;

$\epsilon$ ——石墨粒子的辐射率, 取 0.95;

$T_1$ ——室温, 取  $20^{\circ}\text{C}$ .

④ 石墨粒子燃烧放热  $S_4$ :



根据流化风量、炉气中  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  比例, 即可计算单位时间内的燃烧放热  $S_4$  (kW).

⑤ 漏电损失  $S_5$

根据多次升温试验时的测量结果, 假定  $S_5 = 0.065 S_1$ .

⑥ 循环石墨粒子的附加吸热  $S_6$

试验发现,  $S_6$  可表示为:

$$S_6 = 0.1 m \times (C_s T - C_{s2} T_2) / 3600 =$$

$$0.1 m_0 (1 - 0.05 t/3600) \times (C_s T - C_s T_2)/3600 \quad (\text{kW})$$

式中  $T_2$  是回料粒子的温度,  $C_s$  是石墨粒子在温度  $T_2$  下的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

⑦ 炉体吸热及通过炉体向外的散热  $S_r$ :

这部分热量按总入炉热量的 10% 予以考虑, 即:

$$S_r = 0.1(S_1 + S_2) \quad (\text{kW})$$

将  $m$  及  $S$  的表达式代入式(1), 得到微分方程式(2):

$$\begin{aligned} m_0(1 - 0.05 t/3600) C_s \frac{dT}{dt} = & S_1 - S_2 - A \times [19.4 \times U_0 / (0.036 \times T + 18.5)] \times \\ & C_v \times T - C_0 \times F \times \varphi \times \epsilon \times \\ & [(T + 273)^4 - (T_1 + 273)^4] + \\ & S_r - 0.1 m_0(1 - 0.05 t/3600) \times \\ & (C_s T - C_s T_{20}/3600 - S_r) \end{aligned} \quad (2)$$

初始条件为:  $t = 0, T = T_1$ 。

求解过程中采用向前差分, 并用一元二次三点插值方法查取各比热值和炉气成份。

在模型计算中, 参照 10 kW 内热式流化床热处理电炉试验台升温试验的情况规定了一组标准的输入数据。见表 1。

表 1 升温模型计算的输入数据

量符 / 单位	$v_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$s_1 / \text{kW}$	$f_h / \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	$m_0 / \text{kg}$	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T / ^\circ\text{C}$	$A / \text{m}^2$
数值	0.1	10	20	18	20	970	0.0314

### 3.2 计算结果及讨论

#### 3.2.1 炉子的升温特性

图 4 给出了根据表 1 中的数据由模型计算出的炉温与升温时间的关系曲线。作为比较, 图中还给出了在相同条件下, 由试验得到的, 分别采用圆形、椭圆形及三角形炉衬时的升温曲线。由图 4 可见, 模型所揭示的炉温——升温时间的关系, 在定性上与三种炉衬的试验结果完全一致。在炉温为  $500 \sim 650^\circ\text{C}$  范围内, 由于受调压器最大工作电流的限制, 试验中很难维持额定的加热功率, 使试验结果与模型计算之间存在差异。

#### 3.2.2 升温热效率与炉温的关系

图 5 是由升温模型计算得到的升温热效率  $\eta$  与炉温  $T$  的关系曲线。随炉温升高, 升温热效率下降。但在炉温为  $500 \sim 700^\circ\text{C}$  时, 升温热效率几乎不变, 这是由于石墨粒子燃烧发热造成的。计算表明: 在整个升温过程中, 平均升温热效率为 72.89%, 远高于普通盐浴炉的升温热效率。计算表明, 按表 1 输入已知数据时, 整个升温期间石墨粒子由于燃烧共产生了 828 kJ 热量, 约占电极总加热热量的 24.93%; 石墨粒子的烧损量为 350 g, 约占床内石墨粒子重量的 2% 左右。

#### 3.2.3 加热功率对升温过程的影响

图 6 是加热功率分别为 12、10、8 和 6 kW 时, 由升温模型计算出的升温特性曲线。由图可见, 随加热功率降低, 升温所需时间大大延长; 当加热功率  $S_1$  从 6 kW 上升到 12 kW 时, 升温时间则从 90 min 下降至 40 min, 同时, 平均升温热效率也由 49.10% 上升到 78.84%。这说明

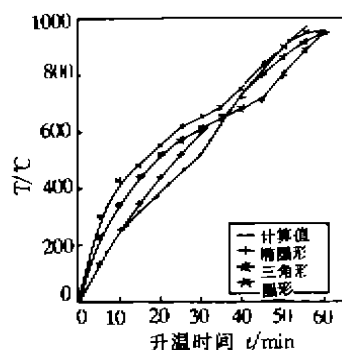
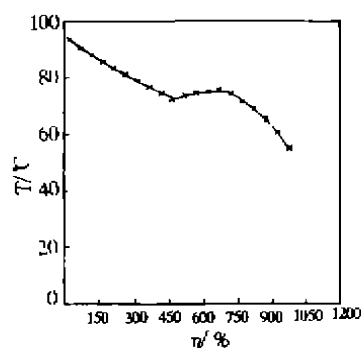
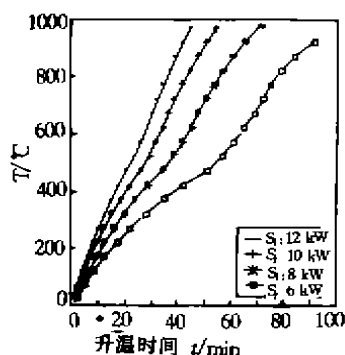
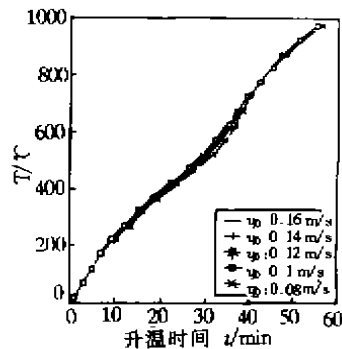


图4 模型预报的升温特性

图5 升温热效率  $\eta$  与炉温  $T$  的关系

加热功率对升温速度以及升温平均热效率有相当大的影响,这与试验结果是一致的。

图6 加热功率  $S_h$  对升温过程的影响图7 流化风速  $U_b$  对升温过程的影响

### 3.2.4 流化风速对升温过程的影响

图7是单独改变流化风速  $U_b$  (实际上是改变运行过程中的流化数) 时,根据升温模型计算出的升温时间、平均升温热效率与流化风速的关系,清楚地说明流化风速不仅对升温速度没有明显影响,而且对平均升温热效率也影响不大。这与升温试验观察到的结果是吻合的。其主要原因是:在高温下,内热式流化床热处理电炉内是一个床料全部由燃料(石墨粒子)组成的流化床。燃料(石墨粒子)的燃烧发热量完全由流化风量控制。当流化风量增大时,在炉气带走的热量  $S_g$  增大的同时,石墨粒子的燃烧放热  $S_r$  也相应增大。

## 4 结 论

1) 试验表明,流化床热处理炉具有升温迅速、炉内温度均匀的优良特性。在50~60 min左右,炉温即可由室温升至950°C。

2) 本文提出了一个内热式流化床热处理电炉升温模型。通过试验结果与模型计算结果对照表明,该模型能够合理地定性估计内热式流化床热处理电炉的升温特性曲线、升温热效率。

3) 模型计算表明,在文中给出的输入条件下,内热式流化床热处理电炉升温时的热效

率可达 72.89%, 远高于普通盐浴炉的升温热效率。

4) 计算表明, 电加热功率对总升温时间和平均升温热效率有较大影响; 而内热式流化床热处理电炉的升温时间及升温过程的平均热效率与升温时的流化风速关系不大。

### 参 考 文 献

- [1] ANTHONY G. Fennel, Fluidized Bed Heat Treatments Utilizing controlled Atmospheres[J]. Industrial Heating, 1985, 110(11): 24~25.
- [2] DAVID W Y. Combined Heat Treatment and Protective Coating in Fluidized Bed Furnace Extends Wear and Corrosion Resistance of Parts[J]. Industrial Heating, 1989, 104(3): 12~14.
- [3] 乔健. 流态化热处理的进展[J]. 金属热处理, 1988, (5): 58.
- [4] 张培寅. 流动粒子电炉概论. 北京: 铁道出版社, 1979.
- [5] MENG-TECK, STAFFIN KENNETH H, SATALA CHRISTOCHER J. Gas-Fired Fluidized Bed Furnace Development-Scoping Study[R], PB87-213138/AS.

## The Investigation on Temperature Rise Properties in a Inner-heated Fluidized Bed Electric Furnace

YIN You-zhong

(Sichuan Electric Power Industry Bureau, Chengdu 610061, China)

**ABSTRACT:** The experimental study and numerical simulation on the temperature rise in a internal heated fluidized bed electric furnace are made. The results show: the internal heated fluidized bed electric furnace's temperature rise is quicker and thermal efficiency is higher. The temperature rise properties are influenced greatly by temperature rise power, and less by fluidizing velocity of air. Forecasting results of the model are quite agreeable with the results of the experiment.

**KEYWORDS:** fluidized bed; electric furnace; temperature rise property

(责任编辑 李胜春)