

# 碳酸钙微粉高温悬浮态气固反应器动态测试系统

简森夫, 张 薇

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 根据碳酸钙微粉悬浮态气固反应试验台的试验要求, 研制了专用的气体分析系统, 采用了数字补偿的方法实现了反应器中物料反应过程的动态测试。实际使用表明, 测量系统的综合精度为 2%。这种方法可以应用到其他材料微粉的气固反应研究中。

**关键词:** 数字补偿; 动态测试; 悬浮态; 气固反应

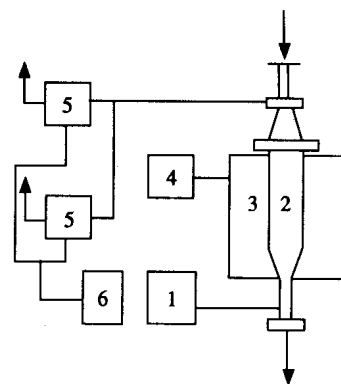
**中图分类号:** TQ 016.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671—7643(2002)04—0026—04

碳酸钙微粉高温气固悬浮态分解反应试验台可用于测试几十微米碳酸钙粉料在气固悬浮态反应过程中的分解进程。通常, 碳酸钙的分解进程可通过化学分析、热重等方法来测试。如热分析系统中, 热天平通过高温失重、差热分析通过温差测量来分析反应中的吸热(或放热)过程。但是, 这些常规的测试不能很好地反映现代工业中的高温悬浮态气固反应特性<sup>[1]</sup>。粉料悬浮态的气固反应由于在反应过程中粉料始终悬浮在气体中, 无法通过上述测量方式进行分析。

作者通过测量反应后出口的气体成分对悬浮态气固反应进行了动态测定。对于在高温气固反应器中悬浮进行的粉状物料的气固反应, 在反应器内部对反应过程直接进行检测很困难, 故检测点选在反应器出口之后。虽然可通过气体分析仪对反应过程进行检测, 但检测仪所测得的气体成分的变化已不是反应器中粉料反应的真实变化。因为反应器的容积大而气体流量小, 气体在反应器中既不是活塞流, 也不是全混流, 而是介于两者之间的一种流动。所以, 气体检测的结果不是实际反应的纯滞后, 而是被该反应器、流程和气体检测系统特有的组合滞后歪曲了的信号。在仔细地研究了系统的特性后, 用计算机对测量数据进行了动态补偿, 获得了较为可靠的测量结果。这种方法可以应用到其他材料微粉的气固反应研究中。

## 1 测试系统简介

作者研制的粉体物料的高温、悬浮态气固反应试验台流程如图 1<sup>[1]</sup>, 试验所用的气体经配气混合后进入预热器, 被加热到所需的高温, 粉体物料由反应器的顶部间歇式加入, 稳定地悬浮在热气流中进行反应, 与反应器出口相接的多组分气体分析仪可对反应进程进行在线检测, 其结果输送到计算机进行数据处理。在物料气固反应过程中, 气体组份发生变化, 气体分析仪对反应在线检测后, 将测得的气体组份变化送入计算机中进行动态补偿, 输出补偿后的反应曲线。反应器内设置多支热电偶以检测、控制反应器的温度, 从而保证反应器内温度的均匀性。



1. 气源; 2. 反应器; 3. 加热器;  
4. 温控器; 5. 气体分析仪; 6. 数据处理系统

图 1 试验装置简图

Fig. 1 Flow chart of test apparatus

\* 收稿日期: 2002-04-27

基金项目: 国家建材科学基金资助(96-A 13-01-01)

作者简介: 简森夫(1954-), 男, 广东人, 副教授, 主要从事测试技术研究。

## 2 系统动态特性的数字补偿

本文的碳酸钙高温气固反应主要是热解反应, 其气体反应产物是  $\text{CO}_2$ , 由于反应器的大容积和气流的小流量造成了反应器出口的气体反应产物  $\text{CO}_2$  的浓度变化与反应器中粉料气固反应产物的浓度之间不是简单的纯滞后, 而是由反应器、流程和气体检测系统特有的滞后综合而成的组合滞后。若我们将这种综合滞后效应等效为一个环节, 并认为该环节是不随时间而变, 则可用某种数学模型来描述这个环节。获得这种模型的方法很多, 可以从气体流动、换热和电热模拟理论得到反应器、测量系统中各环节的数学模型然后湊迭加起来, 也可以用经验模型来代替, 还可采用系统辨识等方法获得。根据化学工程理论和自动控制理论, 这种小流量大容积的反应器可等效成互相作用的多容模型<sup>[2]</sup>, 而管道及其它流程单元可等效为另一个多容结构和纯延迟线, 检测系统则可用二阶以上的线性微分方程来描述。具体结构参数需要通过实验和理论计算确定。实际确定模型的工作是相当复杂的, 因此往往采用简化模型。如德国的 D. Kupper 采用的是双容模型<sup>[3]</sup>, 即用二阶微分线性方程描述的模型。显然这里的多容结构组合仅用双容结构来代替, 必然要产生一定的误差。作者采取了另外的方式。

这里使用的测量系统, 无论它由多少环节组成, 总可将其抽象为由一个非线性环节加上一个比例环节构成, 如图 2。

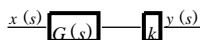


图 2 测试系统的构成

Fig. 2 General measurement system

图 2 中,  $x(s)$  和  $y(s)$  分别为系统的输入和输出的拉氏变换, 即对应我们反应器中碳酸钙反应放出的  $\text{CO}_2$  瞬时浓度  $C(t)$  和系统检测到的  $\text{CO}_2$  浓度  $C'(t)$ ,  $G(s)$  为系统非线性环节的传递函数,  $k$  为系统线性环节的比例常数,  $s$  为拉氏算子。由图 2 可得:

$$y(s) = k \cdot G(s) \cdot x(s) \quad (1)$$

测量系统测得的是  $y(t)$ , 而我们需要得到的是  $x(t)$ 。为了获得实际  $x(t)$ , 可以给系统加上一个补偿环节  $G^{-1}(s) = L^{-1}y(s)$ ,  $y(s)$  通过这个环节转换成  $x(s)$ , 然后通过反拉氏变换得到  $x(t)$ 。这样, 系统由

于反应器、流程和测量的其它环节造成的滞后效应得到了补偿。补偿环节的传递函数  $G^{-1}(s)$  可从上式得到:

$$x(s) = 1/G(s) \cdot y(s)/k = G^{-1}(s) \cdot y(s)/k \quad (2)$$

而

$$x(t) = L^{-1}(x(s)) \quad (3)$$

由此构成的系统见图 3。

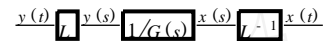


图 3 带补偿的测试系统

Fig. 3 System with the compensation

只要测量系统是一个时不变系统, 则系统的传递函数不变, 就可通过许多方法获得传递函数。作者采取的方法是向系统输入阶跃函数  $U(t)$ , 即瞬间通入一定流量的  $\text{CO}_2$  气体, 同时测定系统的响应  $Z(t)$ , 通过拉氏变换后用式 (1) 来求出系统的传递函数。由于实际应用中数据是离散的, 通常采用 Fourier 变换代替拉氏变换。我们直接使用离散的 Fourier 函数形式的传递函数, 不管系统的模型形式, 避免了模型辨识的困难。我们的反应器系统在阶跃输入函数  $U(t)$  (即瞬间将反应器内的  $\text{CO}_2$  含量由 19.4% 提高到 28.2%) 下的实测响应见图 4。

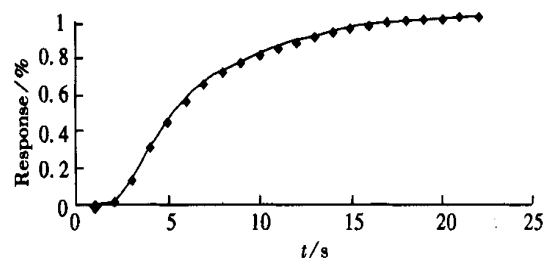


图 4 阶跃输入实测响应

Fig. 4 Response on step-input

通过上述方法获得传递函数后即可按理论上用式 (2) 求出  $x(t)$ 。实际测量中按上述方法从  $y(t)$  求出  $x(t)$  是一个典型的逆过程, 具有相当的不稳定性。由于实测  $y(t)$  带有一定的随机误差, 这个逆过程会将误差显著的放大, 使得测量结果不稳定。因此在数据处理中加入了相应的滤波等处理环节, 已得到了良好的处理结果。在反应器碳酸钙分解实验时, 由出口测得  $\text{CO}_2$  浓度  $C(t)$ , 通过 Fourier 变换得到  $y(w)$ , 再用事先测定的  $G(w)$  按相应的数字处理过程, 就可得到反应器中  $\text{CO}_2$  浓度的瞬时变化  $C$

(t) (图5)。

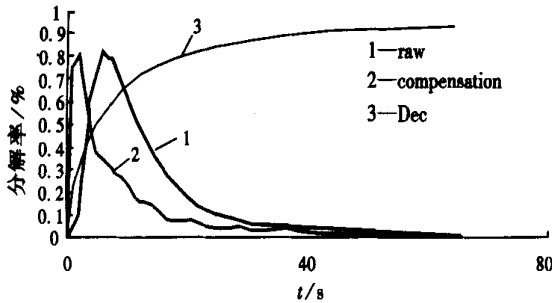


图5 60 μm 碳酸钙分解反应实测曲线和数字补偿结果 (分解率曲线)

Fig.5 Measuring 60 μm calcium carbonate , compensation and decomposition

由于反应器的供气系统是恒流供气, 而碳酸钙分解反应要放出气体, 根据反应与供气的平衡关系, 在 dt 期间可得:

$$V_r \cdot C_0 + V_m(t) = [V_r + V_m(t)] \cdot C(t)$$

式中:

$V_r$ —dt 期间气源供应的气量;

$V_m(t)$ —dt 期间分解放出的气量;

$C_0$ —气源供气的  $CO_2$  浓度;

系统的分解率为

$$\Phi(t) = V_m(t) / V_0 = V_r(C(t) - C_0) / [1 - C(t)] / V_0$$

式中:

$V_0$ —反应器中物料含有的碳酸钙全部分解放出  $CO_2$  的总量。

图5为碳酸钙分解反应的实测曲线和用上述数值补偿方法得到的真实分解率曲线。

按上述方法得到的累积分解率在反应器中取样验证, 其误差一般在4%以内。考虑到反应台实际气体流量控制误差为2%, 按系统误差计算测量系统的误差在2%以内。

### 3 试验及应用

在此微粉物料高温、悬浮态气固反应试验台上, 我们分别进行了中等反应速度水泥生料分解动力学<sup>[4]</sup>、较高反应速度含硫铜精矿氧化焙烧动力学<sup>[5]</sup>和多组份反应的煤粉燃烧动力学的研究<sup>[6]</sup>, 其结果如下。

#### 3.1 水泥生料分解动力学的研究

$CaCO_3$ 是水泥生料中的主要成分,  $CaCO_3$ 的分

解是水泥煅烧过程中重要的气固反应, 其分解吸热量要占水泥生产热耗的一半以上。随着窑外分解技术的兴起, 水泥生料分解动力学的研究成为水泥工业所关注的重要问题。为了深入探讨水泥生料分解动力学的规律, 合理地进行其流态化反应器——分解炉的设计和操作系统, 许多学者曾做了大量的研究工作, 由于条件所限, 与生产工况相比尚有差距。为此, 作者选用几家水泥生产厂的原料, 在试验台上模拟分解炉实际工况进行了反应动力学试验研究(图6), 得到了一些新的结论。实验表明, 组分相同, 产地不同的物料, 其分解表现很不相同, 必须对每一种物料进行分解动力学的研究。

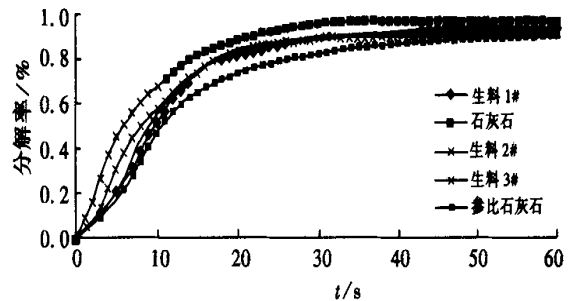


图6 生料分解特性曲线(900 °C,  $P_{CO_2} = 2 \times 10^4$  Pa)

Fig.6 The decomposition percentage of raw material

#### 3.2 煤粉中温燃烧反应动力学实验研究

在工业悬浮态反应器中煤粉大多处于中温燃烧区(800~1200 °C), 这个范围的煤粉燃烧处于动力控制与扩散控制之间, 其反应比较复杂, 与煤的组份和结构有关。煤粉燃烧产物复杂, 对气体分析系统要求不同。作者对多种煤粉作了燃烧动力学测试研究<sup>[6]</sup>, 对企业煤粉燃烧系统燃料选择和系统热工制度优化起了良好的指导作用。图7为一种70~90 μm 煤粉燃烬度曲线。

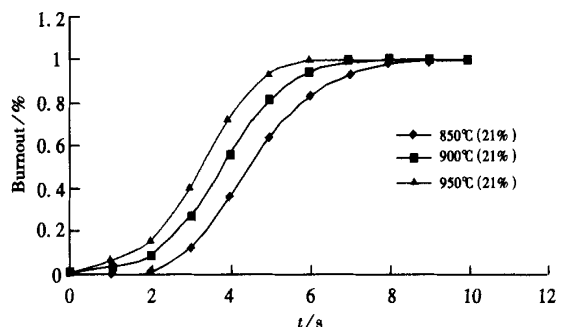


图7 煤粉燃烬度曲线

Fig.7 Combustion rate curve

## 4 结 论

根据微粉高温悬浮态气固反应试验台动态测试实验的特殊要求, 并采用直接 Fourier 函数形式传递函数的方式对系统的滞后进行了数字补偿, 避免了模型形式辨识的困难, 并解决了该系统逆过程求解的稳定性。用这种数字补偿的方法解决了反应器中物料反应过程的测量。实际使用表明, 测量系统的综合精度为 2%, 可以将此方法推广到类似微粉的悬浮态反应测量中。

## 参考文献

- [1] 张 薇, 简森夫. 高温悬浮态气固反应试验台的开发与应用[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 1995(1): 19-23.
- [2] 潘立登编. 化工对象动态特性测试方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.
- [3] Kupper D. Entsauerungsvrhalten von Zement-Rohstoffgemischen[D]. Dissertation TU Clusthal, 1984. 29-35.
- [4] 李安平, 张 薇, 简森夫, 胡道和. 水泥生料在模拟分解炉内分解动力学研究[J]. 硅酸盐学报, 1995, 23(2): 175-182.
- [5] 张 薇, 简森夫. 高温悬浮态气固反应试验台的开发及含硫铜精矿氧化焙烧动力学研究[J]. 硫酸工业, 1995, (4): 22-24.
- [6] 张 薇, 简森夫. 煤粉燃烧动力学参数的试验[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 2001, 23(2): 3: 20-22.

## Dynamic measuring system of suspension reaction of calcium carbonate powder in high temperature

JIAN Miao-fu, ZHANG Wei

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** A special gas analyzing system for dynamic measuring of suspension decomposition of calcium carbonate was developed, in which digital compensation is used to carry out the dynamic measurement of the reaction processes of suspended powder material in a reactor, in order to meet the needs of the set of high temperature powder suspension reaction. The results indicate that the system has reached 2% precision and could be used in gas-solid reactions for other materials.

**Key words:** digital compensation; dynamic measurement; suspension; reaction between gas and solid