

# 循环流化床锅炉高温旋风分离器性能的模化

王怀彬 鲍亦令 赵明泉 杨励丹 于洪斌

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 本文提出了循环流化床锅炉高温旋风分离器性能的实用模化方法。并针对具体对象的要求进行了模化试验,其结果为该循环流化床锅炉高温旋风分离器设计,提供了依据。

关键词 旋风分离器 模化

## 一、前言

与常规流化床锅炉相比,循环流化床锅炉除了床内流化速度高以外,主要区别是在悬浮段出口装有高温旋风分离器(工作温度为 $850\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>),用它把从炉膛中排出的飞灰及其可燃物分离出来,再使其返回流化床,从而实现循环流化燃烧。在整个燃烧过程中,分离器的性能不但直接影响着燃烧质量,而且还成为循环流化床锅炉研究的关键性技术问题之一。

由于高温旋风分离器的分离与捕集同时伴随着燃烧和质与热的交换,是一种极为复杂的过程,以致目前尚不能从理论上建立起完整的数学模型。因此采用模化方法来研究分离器的性能、为其结构设计提供依据,仍是一种有效的方法。

## 二、相似准则

根据气体与固体颗粒在分离器内流动与分离过程中的受力情况,可推导出以下几个主要的与颗粒分离过程有关的相似准则。

### 1. 斯托克斯准则 $St_k$

它表征颗粒在分离过程中推动和阻碍分离运动的两种作用力之比,即

$$St_k = \rho_k u^n \delta^{n+1} / c \rho^{1-n} l \mu^n$$

式中  $\rho_k$ 、 $\rho$ ——分别为颗粒及气体介质密度;  
 $\delta$ 、 $l$ ——分别为颗粒粒径及特征尺寸;  
 $u$ 、 $\mu$ ——分别为气体速度及动力粘度;  
 $c$ 、 $n$ ——分别为系数与指数。

### 2. 傅鲁德准则 $Fr$

它表征颗粒所受离心力和重力分离的作用力之比,即

$$Fr = u^2 / gl$$

式中  $g$ ——重力加速度。

收稿日期:1990-01-24

### 3. 载流运动的雷诺准则 $Re$

它表征载流运动状态,用以保证模型与实物的运动相似,即

$$Re = ul/\nu$$

式中  $\nu$ ——气体介质运动粘度。

### 4. 固体颗粒相对载流运动的雷诺准则 $Re_k$

它表征颗粒相对于载流的分离运动状态,用以保证模型与实际过程中,颗粒相对于载流的分离运动相似,即

$$Re_k = w\delta/\nu$$

式中  $w$ ——颗粒与载流间的相对运动速度,  $w = u - u_k$ ,  $u_k$ ——颗粒速度。

### 5. 速度比准则 $u_k/u$

它表征进口处颗粒被加速的状态,用以保证模型与实物的进口条件相似。

### 6. 密度比准则 $\rho_k/\rho$

它表征颗粒的离心力与其侧向力之比,用以保证模型与实物中两相介质绕流状态相似。

## 三、近似模化条件

如上所述,高温旋风分离器的模化条件应为:几何相似,六个相似准则在模型与实物中的数值保持相等。在模型试验中,要完全满足这些模化条件是不可能的。因此只能保留主要的模化条件,实现近似的模化。经验表明<sup>[2]</sup>,只要熟悉研究对象,掌握模化的技巧,合理设计模型,对于那些尚无足够理由决定舍弃,但又难以保留的准则采用局部旁证法,即进行单因素的试验来加以验证,不难实现近似模化。

下面对上述六个准则分别进行分析论证。

1.  $St_k$ : 许多文献<sup>[2~6,8]</sup>均证明,  $St_k$  是分离过程重要的相似准则,因此必须加以保证。

2.  $Fr$ : 由两相流的理论分析知道,在离心力场中,重力对分离的作用影响很小。文献<sup>[2,3,8]</sup>的试验结果也证明,  $Fr$  准则的改变几乎对分离效率没有影响。高浓度条件下  $Fr$  准则与分离效率  $\eta$  的单因素试验表明:  $Fr$  准则的改变,  $\eta$  并无明显的变化(如图1所示,其试验颗粒的配比是由粒级分布的相似曲线确定的,参见图3曲线2),这说明,  $Fr$  准则可以忽略。

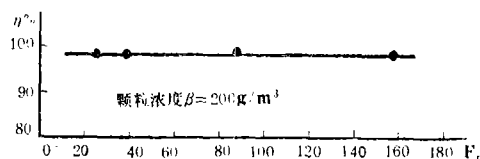


图1  $Fr-\eta$  单因素试验曲线

3.  $Re$ : 在湍流状态下,随着  $Re$  准则增大到某一临界值,流态及速度分布便与  $Re$  准则

无关，此时流动处于第二自模化区。本模型试验证明，当  $Re = (9.5 \sim 35) \times 10^4$  时，其流动就处于第二自模化区。根据文献<sup>[3]</sup>，实物也处于第二自模化区。因此， $Re$  准则自然可以不予考虑。

4.  $Re_k$ ：研究证明：当  $Re_k < 1$  和  $Re_k > 2 \times 10^5$  时，颗粒相对于载流的分离运动处于自模化状态。在其它区域，由表1<sup>[7]</sup>的研究结果看出，保证模型和实物中的  $Re_k$  准则处于同一区间，可使  $St_k$  准则中的  $c$  与  $n$  在模型和实物中一样。

表 1

$Re_k$	<1	1~500	50~70	700~ $2 \times 10^5$	$> 2 \times 10^5$
$c$	24	23.4	7.8	0.48	0.18
$n$	1	0.725	0.425	0	0

5.  $u_k/u$ ：可近似认为实际分离器入口处的气固两相介质速度相同，设计模型时，只要考虑颗粒到达模型入口前具有足够的加速段，即可保证  $u_k/u$  相似。据文献<sup>[2]</sup>的结果推算，本模型加速段为 1500~2000 mm 已满足要求。

6.  $\rho_k/\rho$ ：对分离过程而言，侧向力相对于离心力是很小的。用相同粒度分布的细灰和石英沙 ( $\rho_k/\rho = 1938.6, 2140.5$ ) 在相同条件下的试验结果证明， $\rho_k/\rho$  几乎对  $\eta$  无影响。但为使颗粒形状、表面粗糙度等无法测量的参数基本相似，本模型与实物选用同种颗粒介质。

以上相似准则是假定颗粒浓度  $\beta$  很小的条件下导出的。而此时浓度  $\beta$  较大，且变化范围较宽。单因素的试验证明： $\beta = 1 \sim 40 \text{ g/m}^3$  空气时， $\eta$  呈逐渐增高的趋势； $\beta = 40 \sim 2000 \text{ g/m}^3$  空气时， $\eta$  几乎为定值； $\beta = 2000 \sim 5000 \text{ g/m}^3$  空气时， $\eta$  有逐渐下降的趋势（见图 5 曲线 1）。

综上分析，高温旋风分离器近似模化条件归结为：几何相似； $St_k$  等于不变量；模型与实物的  $Re_k$  准则处于同一区间， $\beta$  值彼此相等。

### 四、模 型 设 计

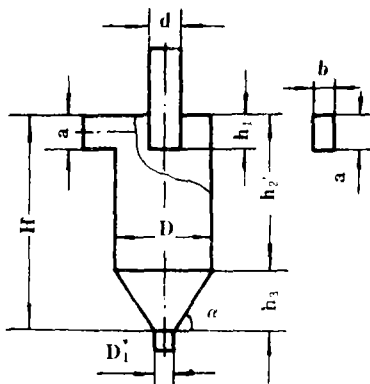


图 2 模型结构图

实物循环流化床锅炉高温旋风分离器进口及结构、性能给定参数为：流量  $Q_j = 16000 \text{ m}^3/\text{h}$ ；温度  $t_j = 850^\circ\text{C}$ ；浓度  $\beta = 50 \sim 120 \text{ g/m}^3$ ；颗粒密度  $\rho_k = 2400 \text{ kg/m}^3$ ；颗粒粒度分布参见图 3 曲线 1。分离器直径  $D > 1350 \text{ mm}$ ；总高度  $H > 4000 \text{ mm}$ ；阻力损失  $\Delta P > 392 \text{ Pa}$ ；综合效率  $\eta < 97\%$ 。

在综合有关文献的基础上，模型设计为结构简单的切向进口  $D$  型分离器，如图 2 所示。几何相似比为 1:5。图中各部几何尺寸以毫米计，其中  $a = 132$ ； $b = 66$ ； $h_1 = 132$ ； $h_2 = 600 \sim 264$ ； $h_3 = 180$ ； $D_1 = 52$ ；

$D = 260$ ;  $d = 105.3$ ;  $H = h_2 + h_3 = (600 \sim 264) + 180$ ;  $\alpha = 60^\circ$ 。

为使模型的性能可调,设计的模型筒身和排气管高度均可自由调节,在模型的入口侧还考虑了备用的二次风结构。

## 五、模化计算

根据模化条件,由  $St_k$  等于不变量求得模型分离器固相介质的代表粒径  $\delta_m$  为:

$$\delta_m = \delta_s \left[ \frac{(\mu_s/\mu_m)^n (\rho_s/\rho_m)^{1-n} (l_s/l_m)}{(\rho_{ks}/\rho_{km})(u_s/u_m)^n} \right]^{-\left(\frac{1}{1+n}\right)} \quad (1)$$

式中,脚标  $m$  代表模型,  $S$  代表实物,其余各符号的意义如前所述。

根据实物分离器给定的粒级分布曲线,计算求得  $n = 0.725$ 。实物分离器入口气速  $u_s = 20.5$  m/s,取模型  $u_m = 10$  m/s。 $\rho_{ks}/\rho_{km} = 1$ 。模型与实物气相介质的密度和动力粘度分别为: $\rho_m = 1.238$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_s = 0.32$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu_m = 17.8 \times 10^{-6}$  Pa·S,  $\mu_s = 43.56 \times 10^{-6}$  Pa·S。将这些参数值代入式(1),计算求得:

$$\delta_m = \delta_s / 2.2 \quad (2)$$

式中  $\delta_s$  是实物分离器颗粒粒级分布的代表粒径,用中位径表示。由图3曲线1求得  $\delta_s = 132 \mu\text{m}$ 。将其代入式(2)得,  $\delta_m = 60 \mu\text{m}$ 。此处  $\delta_m$  也是中位径。根据  $\delta_m$  就可以作出与  $\delta_s$  相似的模型粒级分布曲线,如图3曲线2所示。

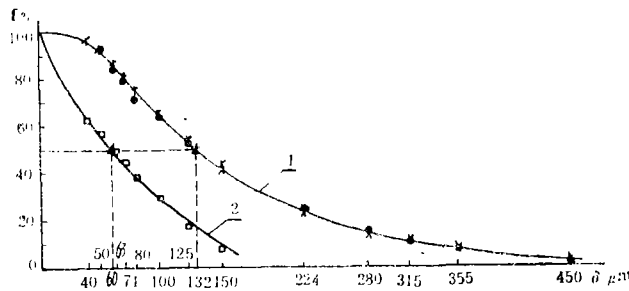


图3 实物与模型颗粒粒级分布曲线  
曲线1、2分别为实物与模型颗粒累积重量分布曲线

## 六、模型试验及其结果

### 1. 试验装置及方法

图4为模型试验台装置系统,它主要由进风及排气管道、风量调节装置、给料装置、模型分离器、颗粒回收装置和风机等组成。用皮托管接微压计使微压计来测量流速及阻力损失。所采用的固相介质为沸腾炉飞灰(见图3)。

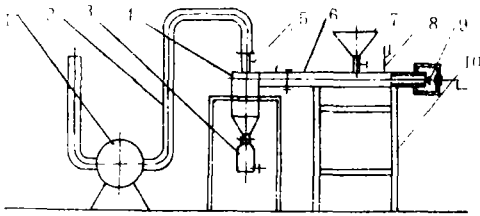


图 4 模型试验台系统图

1. 引风机 2. 排气管道 3. 颗粒回收装置
4. 模型分离器 5. 静压测点 6. 进气管道
7. 给料装置 8. 测速管 9,10 风量调节装置及支架

试验过程为：先将入口迅速调到指定值，再按图 3 曲线 2 颗粒分布曲线配好的物料放入加料装置，调好给料浓度后进行试验。工况完毕停风机取下颗粒回收罐并在天秤上称重。

### 2. 试验结果

模型试验是在 4 种模型高度下进行的，每个高度重复试验 4 次，其结果列于表 2。可见，在高度  $H_1 \sim H_4$  范围内，其平均效率均满足实物分离器设计要求，可在 3900~2220mm 内任选。实物分离器的阻力损失可由下式计算求出，即

$$\Delta P_s = \rho_s / \rho_m (u_s / u_m)^2 \Delta p_m = 1.09 \Delta p_m \quad (3)$$

将表 2 中  $H_1 \sim H_4$  高度下的平均阻力损失代入式 (3) 计算，得实物分离器的阻力损失约为 286.7~363.5 Pa，这也满足设计要求。浓度变化对阻力及效率的影响，如图 5 所示。

表 2

模型高度 $H$ (mm)	平均效率 $\eta$ (%)	平均阻力 $\Delta P$ (Pa)	浓度 $\beta$ (g/m <sup>3</sup> )
$H_1 = 780$	$\eta_1 = 97.95$	$\Delta p_1 = 259$	$\beta = 100$
	$\eta_2 = 98.75$	$\Delta p_2 = 267$	
	$\eta_3 = 98.25$	$\Delta p_3 = 267$	
	$\eta_4 = 98.25$	$\Delta p_4 = 259$	
	$\eta = 98.30$	$\Delta p = 263$	
$H_2 = 680$	$\eta_1 = 98.20$	$\Delta p_1 = 275$	$\beta = 100$
	$\eta_2 = 98.75$	$\Delta p_2 = 275$	
	$\eta_3 = 98.75$	$\Delta p_3 = 283$	
	$\eta_4 = 98.30$	$\Delta p_4 = 283$	
	$\eta = 98.50$	$\Delta p = 279$	
$H_3 = 580$	$\eta_1 = 98.20$	$\Delta p_1 = 298$	$\beta = 100$
	$\eta_2 = 98.75$	$\Delta p_2 = 306$	
	$\eta_3 = 98.75$	$\Delta p_3 = 306$	
	$\eta_4 = 98.25$	$\Delta p_4 = 298$	
	$\eta = 98.50$	$\Delta p = 302$	
$H_4 = 444$	$\eta_1 = 98.25$	$\Delta p_1 = 330$	$\beta = 100$
	$\eta_2 = 98.50$	$\Delta p_2 = 330$	
	$\eta_3 = 98.20$	$\Delta p_3 = 337$	
	$\eta_4 = 98.25$	$\Delta p_4 = 337$	
	$\eta = 98.30$	$\Delta p = 333.5$	

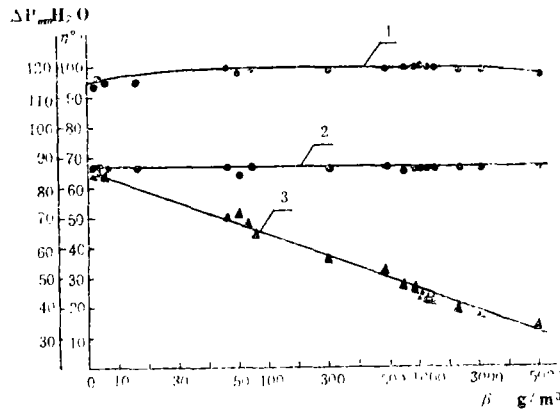


图5 阻力、分离效率随浓度的变化关系曲线  
曲线1为分离效率；曲线2、3分别为纯空气和气固双相介质阻力，  
试验风速 $u = 15\text{m/s}$

由图5可见， $\beta$ 很低时，其阻力损失与单相（气体）介质的阻力接近； $\beta$ 增加，阻力损失随之减少。 $\beta$ 很高或很低， $\eta$ 值均下降。

## 七、结 论

1. 循环流化床锅炉高温旋风分离器的模化条件为：几何相似； $st_k$ 等于不变量；模型与实物的 $Re_k$ 准则处于同一区间， $\beta$ 值彼此相等。
2. 进行循环流化床锅炉高温旋风分离器模型试验研究时，固体颗粒的配比，应由粒级分布的相似曲线确定。其颗粒材料的种类，最好与物实相同，这有利于保证颗粒形状、表面粗糙度等无法测量的参数相似，以提高精度。
3. 采用切向进口D型分离器作为循环流化床锅炉的高温旋风分离器，结构简单，阻力损失较小，且在一定的粒级分布条件下，分离效率较高。

## 参 考 文 献

- [1] 苗长信、刘志超. YG35/39—M3型循环流化床锅炉调试分析. 热能动力工程, 1990, (1)
- [2] 李之光、王怀彬等. 某些两相流体动力过程模化可靠性的旁证法. 动力工程, 1985, (6)
- [3] 李之光. 相似与模化. 国防工业出版社, 1982
- [4] 西安交通大学锅炉教研室. 煤粉分配试验中的模化问题. 科研报告, 76—025, 西安交通大学教改部
- [5] Кутагеладзе С. С. Моделирование Теплоэнергетического оборудования. Изд. Энергия, 1966
- [6] 余钦贵等. 离心式粗粉分离器的模型试验. 哈锅技术, 1978, (1)
- [7] Эверев Ни. Теплоэнергетика, 1957, (7)
- [8] 水利电力部热工研究所等. 旋风炉及其灰渣综合利用. 水利电力出版社, 1979

(渠源沂 编辑)

# Analogy Simulation of the Properties of a Circulating Fluidized-bed Boiler High-Temperature Cyclone Separator

Wang Huaibin, Bao Yiling, Zhao Mingquan, Yang Lidan, Yu Hongbin

(Harbin Institute of Technology)

## Abstract

This paper proposes a practical analogy method for simulating the properties of high-temperature cyclone separator of a circulating fluidized-bed boiler, and on the basis of specific requirements model tests were conducted. The test results can provide a reliable basis for the design of high-temperature cyclone separators of circulating fluidized-bed boilers.

**Key words:** cyclone separator, analogy

## 新产品、新技术信息

### № R89-11 ST-11 电弧刨割条

在电弧高温下能产生喷射气流,按规定的操作法能吹去熔化金属。该产品具的刨割钢、生铁、不锈钢、硬质合金和铜合金等多种金属,还具有对金属穿孔的功能。在使用时不需要专门设备,只需普通手弧焊机(直流或交流)就能清除缺陷,操作简便,节省电能,不含有毒气体,是一种补充碳弧气刨不足的新材料。ST-11 电弧刨割条在1988年通过部级鉴定,产品性能已达到国外先进国家同类产品的水平。

ST-11 电弧刨割条主要适用于焊工自检返修,短浅缺陷的清除和焊缝反面清根等方面,现已应用于化工、船舶、机械、电力、建筑安装等行业。

### №R89-10 JS-2 型累积计时器

于1989年4月10日安装调试出首台样机。4月22日在重庆召开的中船总公司机动工作会议上作了现场表演,得到各界一致赞扬。会上,重庆五州电冰箱厂等单位要求小批量生产,相继多家厂家纷纷订货,JS-2 型累积计时器采用CMOS 集成电路,电子、电磁六位数字显示。显示直观、性能稳定,抗干扰能力强、工作可靠,使用寿命长、体积小(外形尺寸:70×47×106 mm)、可直接安装在设备配电板上,具有在失电时能保留原有计时的特点,是同类产品的佼佼者,可用来确定设备大修周期、设备保养周期,考核设备使用寿命、劳动生产率、检测电力发配系统的用电情况及实验过程累积计时等。服务方式、技术转让、产品销售。

(如需以上技术和产品请与编辑部联系)