

# 塔型飞灰浓缩器阻力特性的试验研究

李公博 (西安热工研究所)

温 龙 (西安交通大学)

**〔摘要〕** 在塔型飞灰浓缩器冷态模化试验的基础上,经过对该装置在各种运行工况和几何结构参数试验条件下其阻力变化规律的分析探讨,并对大量的试验数据进行了多元线性回归分析计算,给出了塔型飞灰浓缩器阻力计算的多元回归公式,为在工程实际中设计、评价和应用提供了技术依据。

**关键词** 塔型飞灰浓缩器 阻力特性 回归分析

**分类号** TK229.66 TK223.27

## 0 前言

在循环流化床锅炉机组容量向大型化方向发展的同时,其循环系统中飞灰分离部件——旋风分离器的外形尺寸和个数也在不断增加。使锅炉外廓尺寸急剧加大,旋风筒的支承、热膨胀的补偿等各个方面的问题也复杂化。而且旋风筒内部的耐火、保温内衬层使锅炉的热惯性增加,从而使锅炉启停时间延长,不利于锅炉负荷调节。另外,旋风筒直径的增大,其分离效率降低,使得分离器与循环倍率匹配的性能变差<sup>[2]</sup>。反之,若要限制旋风筒直径过分的增大,则旋风筒的数量就要增加,同样在布置上就更加困难和复杂。大尺寸必使钢材用量增加,也会使锅炉的安装、维护保养的费用增加,又使得锅炉整体的造价相应提高。芬兰奥斯龙公司认为,CFB锅炉电功率容量增大到 400 MW 级在经济上和结构布置上均有困难<sup>[3]</sup>。

总而言之,在 CFB 锅炉大型化的同时,现存旋风分离器究竟如何发展,已成为一个制约因素。作者在吸纳前人经验的同时,针对这一矛盾采用一种新的装置——塔型飞灰浓缩器,在解决上述问题方面取得了较为满意的试验结果。

## 1 试验过程及试验结果

### 1.1 试验过程

对于塔型飞灰浓缩器而言,对其阻力特性有影响的试验因素主要分为运行条件和浓缩器本身几何结构参数两方面。运行条件主要体现在浓缩器进口气速  $u$  对其阻力  $\Delta D$  的影响;几何结构参数包括:浓缩器叶片倾角  $\Gamma$ ,浓缩器叶片间距  $L$ ,浓缩器叶片宽度  $B$ ,浓缩器组装倾角  $U$  等(见图 1)。其与现存百叶窗式分离器不同之处在于沿径向四周均为这一形式叶片所组成。

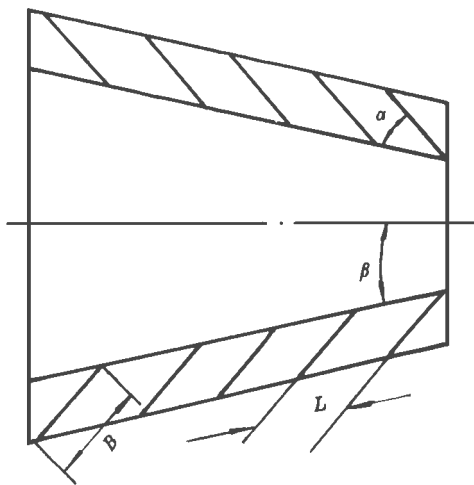


图 1 浓缩器几何结构参数

试验测量系统如图 2 所示,试验系统为负压运行系统。浓缩器的阻力损失按图示指的是浓缩器进出口

收稿日期 1995-05-09

本文联系人 李公博 男 46 工程师 710032 西安市兴庆路 80 号

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.>

之间的差压值。浓缩器入口风速的测量是采用经标定的毕托管 (校正系数  $d \approx 1$ ) 和倾斜式微压计 (精度 1 级), 浓缩器阻力采用 U 型管差压计测量。试验过程中, 除进口风速可以变化外, 浓缩器几何结构尺寸也可以根据试验要求进行一定范围内的变化。叶片倾角选取范围为  $T = 13^\circ \sim 34^\circ$ , 叶片间距  $L$  与叶片宽度  $B$  比值选取范围为  $L/B = 0.13 \sim 0.59$ , 叶片组装倾角  $U$  值参照文献 [4] 的试验结果, 选为定值, 取  $U$  为  $21^\circ$ 。

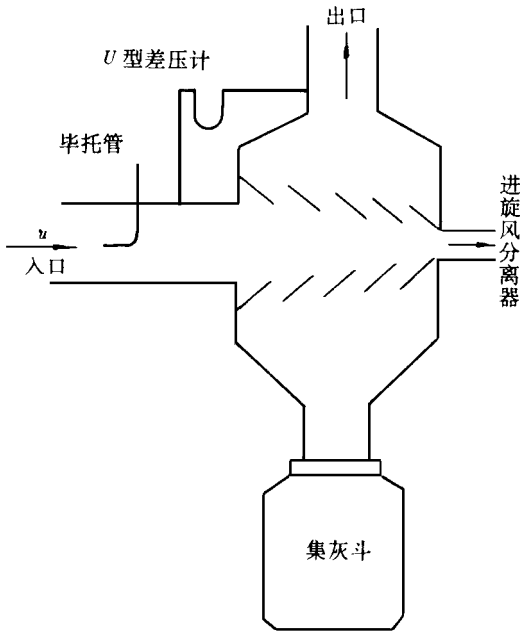


图 2 试验测量系统

为了做到试验结果能对工程实际有指导意义。在做送灰试验之前, 根据相似理论进行试验模型的设计和制作。试验系统第二自模化区域的确定是通过送空气情况下测算所得知, 该试验模型第二临界雷诺数约为  $Re = 3.5 \times 10^4$ , 据此所有的试验结果均是在大于这一临界雷诺数值的条件下得到的。

## 1.2 试验结果

通过试验其结果如下:

### 1.2.1 $u$ 对 $\Delta D$ 的影响

$u$  和  $\Delta D$  的关系曲线见图 3 由图可见, 进口风速的变化对浓缩器阻力的影响较为显著。这是因为浓缩器阻力损失与其进口风速不是一次方的正比关系。在图示试验条件保持不变时, 进口风速由  $6 \text{ m/s}$  增至  $15 \text{ m/s}$ , 浓缩器阻力增加  $380 \text{ Pa}$  左右。也就是说, 当风速增加  $60\%$  左右时, 阻力损失相应地增加

$76\%$ 。因此, 在选取进口风速时, 既要考虑到浓缩效率, 又要兼顾到阻力损失。

### 1.2.2 $L/B$ 对 $\Delta D$ 的影响

$L/B$  对  $\Delta D$  的关系如图 4 所示。由图中曲线可以清楚地看出, 随着  $L/B$  比值的增大, 浓缩器阻力呈下降趋势, 此规律亦与国外关于百叶窗式分离器的试验结果相类似<sup>[5]</sup>。因为,  $L/B$  比值的增大表明叶片间距增大, 气流绕过叶片流出的通道面积增加所致。当浓缩器进口风速为  $5 \text{ m/s}$ , 阻力系数为  $2.15$  ( $L/B = 0.2$ ) 时, 相应的  $\Delta D = 28 \text{ Pa}$  当风速为  $5 \text{ m/s}$   $L/B = 0.4$  时, 阻力系数等于  $2.1$ ,  $\Delta D = 26 \text{ Pa}$  由此可知, 在阻力损失增加幅度不大的情况下, 适当减小  $L/B$  值, 对提高该装置的浓缩效率是有利的。

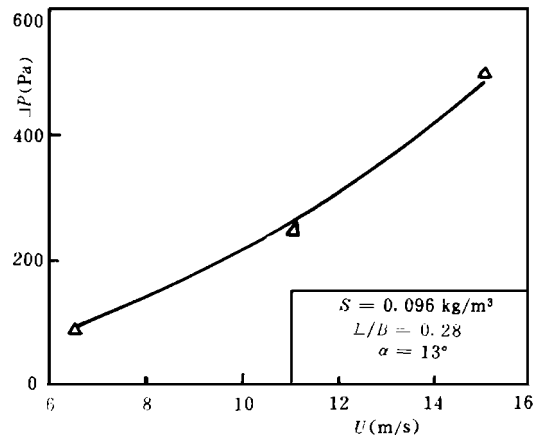


图 3  $u$  对  $\Delta P$  的关系曲线

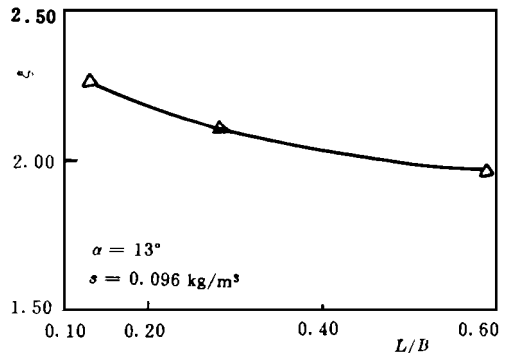


图 4  $L/B$  对  $\Delta D$  的关系曲线

### 1.2.3 $T$ 对 $\Delta D$ 的影响

$T$  的变化对  $\Delta D$  的关系曲线见图 5 由图可知, 浓缩器阻力随着叶片倾角的增加而减小, 这也如同  $L/B$

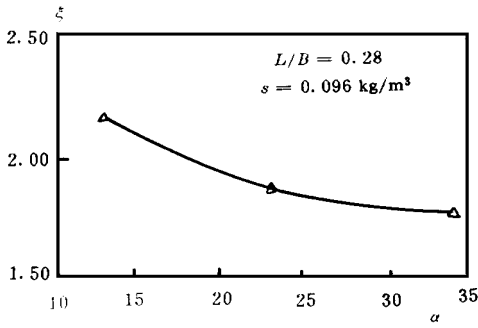


图 5  $\xi$ 的变化对 $\Delta D$ 的关系曲线

对  $\Delta D$ 影响相一致的,倾角变大,气流绕流叶片的流通截面增大,相应的气流流动阻力减小。

对于上述诸多试验因素按照正交试验设计理论,选用  $L_9(3^4)$  正交表来编排试验工况,并通过方差分析得知:浓缩器进口气速  $u$ ,叶片间距与叶片宽度比  $L/B$  以及叶片倾角  $\alpha$  对浓缩器阻力  $\Delta D$  的影响较为显著,对这一试验结果又进行了重复验证工作,两者完全一致。

## 2 回归分析

在正交试验及方差分析的基础上,对  $\Delta D$  有显著性影响的试验因素又进行了多元线性回归数值计算<sup>[6]</sup>,最后得到浓缩器阻力与各主要试验因素之间的多元回归计算公式如下:

$$\Delta D_1 = a \frac{d_g \cdot u^2}{2}$$

式中:  $d_g$ —— 气体密度,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$u$ —— 浓缩器进口气速,  $[\text{m}/\text{s}]$

$a$ —— 阻力系数,

$$a = 1.211 \left( \frac{\alpha}{90} \right)^{-0.212} \cdot (L/B)^{-0.112}$$

因为这一回归计算式是对塔型飞灰浓缩器而言,所以,该公式适用范围如下:

- (1) 浓缩器进口气速  $u = 5 \sim 15 \text{ m/s}$ ;
- (2) 叶片倾角  $\alpha = 13^\circ \sim 34^\circ$ ;
- (3) 叶片间距与叶片宽度比

$$L/B = 0.13 \sim 0.59$$

上述回归公式显著性检验如下:

残差平方和  $Q_c$

$$Q_c = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0.0222$$

回归平方和  $Q_h$

$$Q_h = \sum_{i=1}^m (\hat{Y} - Y)^2 = 0.0956$$

总离差平方和  $Q_t$

$$Q_t = Q_c + Q_h = 0.1178$$

相关系数  $r$

$$r = \sqrt{Q_h / Q_t} = 0.90$$

多元线性回归计算程序如下:

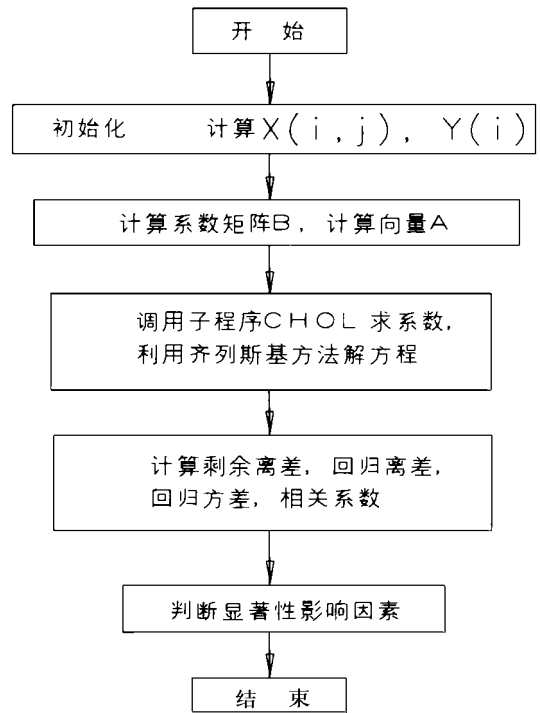


图 6 计算框图

## 3 结论

(1) 塔型飞灰浓缩器结构简单,阻力较低。在飞灰浓度  $S$  从  $0.12 \sim 0.15 \text{ kg}/\text{m}^3$  (相应的循环倍率为  $2.1 \sim 14.6$ ) 范围内和常用的烟气速度 ( $u = 5 \sim 15 \text{ m/s}$ ) 条件下,其阻力  $\Delta D$  只是在  $80 \sim 480 \text{ Pa}$  范围内,故可以广泛地应用于各种场合的锅炉。

(2) 通过方差分析可以表明,浓缩器进口气速  $u$ ,叶片间距与叶片宽度比  $L/B$  以及叶片倾角  $\alpha$  对浓缩器阻力  $\Delta D$  影响较为显著。

(3) 阻力回归计算公式对浓缩器而言是重要的技术性能衡量指标之一,可为在工程实际中的评价、

计算提供技术依据。

### 参 考 文 献

- 1 Pierre Lucat, et al. Combustion of coal-washing plant residues and high sulfur coals in utility-type CFB boilers. Proceedings of the 2nd Intern. Symposium on Coal Combustion, Beijing: China Machine press, 1991
- 2 徐通模等. 锅炉燃烧设备. 西安交通大学出版社, 1990
- 3 林昭奎, 王敦恩, 沈进如等. 欧洲循环流化床技术发展的现状. 动力工程, 1992, 12(5)
- 4 胡荫平, 肖永刚, 辛国华等. 立式百叶窗集尘效果的冷态模化试验研究. 动力工程, 1992, 12(1)
- 5 Zenz F A. and Other D F. Fluidization and fluid particle systems. New York: Reinhold Publishing Co., 1960
- 6 林君. 数值计算方法. 学苑出版社, 1993

## 市场动态

## 燃气轮发电机组的价格

"Gas Turbine World 1996 Handbook"报导了燃气轮发电机组的价格, 该价格是指基本燃气轮发电机组成套设备平均的设备价格, 是以 1996 年美元计算的工厂交货价格, 包括下列设备的购置费用: 单燃料燃气轮机, 气冷式发电机, 橇和罩壳, 进、排气管和排气消音器, 标准的控制装置和起动系统, 普通的燃烧系统。

取决于电厂设备的范围、地理区域、现场具体要求, 价格会有很大的变化。

1996 年部分燃气轮发电机组的价格

型 号	ISO 基本负荷 功率 (kW)	LHV 效率 (%)	预算价格 (\$)	单 价 (\$ /kW)
501KB5	3 860	27.9	1 700 000	440
Centaur 50	4 350	28.8	1 810 000	416
Taurus 60	5 000	30.3	1 990 000	398
Mars 90	9 290	31.7	3 900 000	420
LM1600PA	13 750	35.5	6 640 000	483
GT35	1 690	32.0	6 750 000	399
LM2500PE	22 800	36.8	9 120 000	400
FT8	25 470	38.1	9 200 000	361
LM2500+	27 040	38.1	9 870 000	365
LM2500PH(回注蒸汽)	28 050	41.0	9 960 000	355
LM5000PC	34 450	37.2	12 950 000	376
PG6551B	39 160	31.8	10 500 000	268
LM6000PA	40 500	39.7	12 160 000	300
LM5000PD(回注蒸汽)	51 620	43.8	14 650 000	284
FT8 Twin	51 300	38.4	16 000 000	312
V64.3A	70 000	36.8	19 600 000	280
GT11N	83 800	33.0	17 600 000	210
V84.2	109 000	33.7	20 100 000	184
V94.2	159 000	34.5	28 600 000	180
GT13E2	165 100	35.7	34 300 000	208
GT24	166 000	37.9	34 100 000	205
510F	167 000	36.1	30 700 000	184
V84.3A	170 000	38.0	34 000 000	200
501G	235 200	39.1	43 500 000	185
V94.3A	240 000	38.0	45 600 000	190
GT26	241 000	38.2	47 700 000	198

Thermal Power Station. Acoust analysis is performed in comparison with a cyclone-furnace. **Key words** low-  
 ver stepped cycle, circulating fluidized bed, cost analysis

煤的太阳能干馏的可行性及干馏炉的设计探讨 = **The Feasibility of Destructive Distillation by the Use of So-  
 lar Energy and the Design Study of a Furnace of Destructive distillation** [刊, 中] / Wang Zhuliang ( Jiangsu Uni-  
 versity of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -19-  
 22

The author has proved that it is feasible to use solar energy as a high-temperature heat source for a destruct-  
 ive distillation furnace. Through a heat transfer analysis and comprehensive review the merits of a new type  
 of solar energy-based destructive distillation furnace are demonstrated with some issues to be solved during  
 practical applications also pinpointed. **Key words** solar energy, destruction distillation furnace, destructive  
 distillation

高温吸收式热泵的生态学准则优化 = **The Optimization of Ecological Criteria for High-temperature Absorp-  
 tion Heat pumps** [刊, 中] / Chen Tianze, Yan Zijun (Shamen University) // Journal of Engineering for Ther-  
 mal Energy & Power. -1997, 12(1). -23- 25

With an objective being the ecological criteria which enables the cycle heat supply rate and heat supply rate  
 dissipation attain an optimum compromise the paper presents the study results of the optimization of a high-  
 temperature absorption heat pump. Some new performance parameters of the heat pump are derived and sev-  
 eral interesting aspects of the issue discussed. The conclusions obtained can serve as a new theoretical guide  
 for the optimized design and the selection of optimum operating condition of the high-temperature triple heat  
 source heat pumps and heat engines. **Key words** finite time thermodynamics, high-temperature absorption  
 heat pump, ecological criteria, performance optimization

塔型飞灰浓缩器阻力特性的试验研究 = **An Experimental Study of the Resistance Characteristics of a Tower-  
 type Fly ash Concentrator** [刊, 中] / Li Gongbo (Xi'an Thermotechnical Research Institute), Wen Long (Xi'  
 an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -26- 29

On the basis of the cold-state Model Test of a tower-type fly ash concentrator and an exploratory analysis of  
 the resistance variation relationship under various operating regimes and geometric parameter test conditions  
 as well as a multidimensional linear regression analytical calculation of a vast amount of test data, given in  
 this paper is a multidimensional regression formula for calculating the resistance of the tower-type fly ash  
 concentrator, thereby providing a technical basis for its design, evaluation and application in engineering  
 practice. **Key words** tower-type fly ash concentrator, resistance, characteristics, regression analysis

130 t/h 锅炉结渣及稳燃问题的研究 = **The Study and solution of a Slagging and Stable Combustion Problem  
 for a 130 t/h Boiler** [刊, 中] / Chen Gang, Qiu Jihua, Li Fojin, et al. (Central China University of Science &  
 Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -30- 32

The underlying causes leading to slagging and poor combustion stability of a 130 t/h boiler are analysed. Af-  
 ter a redesign and modification of its burners with the adoption of pulverized coal burners incorporating a  
 combustion stabilization cavity very good results have been attained. The combustion efficiency is enhanced  
 by 6% and the boiler can maintain a stable combustion when operating at 60% load without using oil. **Key  
 words** boiler, slagging, combustion stability, pulverized coal combustion, burner with a combustion stabi-  
 lization cavity

燃用固体燃料电厂环境负压吸尘系统的选择与设计 = **The Selection and Design of a Negative-Pressure Dust  
 Collecting System for a Solid Fuel-Fired Power Plant Environment** [刊, 中] / Liu tai, Hao Chunhai (Northeast