

# 高温高固气比条件下 旋风预热器总分离效率的研究

杨沛浩<sup>1,2</sup>, 陈延信<sup>1,2</sup>, 徐德龙<sup>1,2</sup>, 范海宏<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学粉体工程研究所, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:**在温度高达 840℃, 固气比高达 2.54 的条件下, 对旋风预热器总分离效率进行了实验, 研究了温度、固气比和风速对旋风预热器总分离效率的影响, 根据实验数据回归分析, 得到了回归方程, 填补了高温高固气比条件下旋风预热器总分离效率研究的空白。

**关键词:**旋风预热器; 总分离效率; 温度; 风速; 固气比

**中图分类号:** TQ170.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2011)01-0053-05

旋风预热器自 1885 年 O. M. Morse 申请发明专利以来, 因其结构简单、造价低、维护管理方便、分离效率高、固体颗粒负载适应性强、可在高温下使用等特点, 广泛地应用于石油、化工、冶金、煤炭、电力、医药和水泥等行业。近年来, 随着水泥工业生产工艺的不断发展, 在新型干法水泥悬浮预热预分解技术中, 广泛采用旋风筒作为水泥生料粉的预热装置—旋风预热器。对旋风预热器总分离效率研究的报告文献很多<sup>[1-12]</sup>, 要么是高温低固气比, 要么是常温高固气比, 在既是高温又是高固气比的条件下的研究还未有报道。在高温高固气比的条件下, 旋风预热器的总分离效率有什么变化呢? 作者对此做了研究。

## 1 实 验

### 1.1 实验流程及其装置

实验<sup>[13]</sup>物料采用陕西泾阳声威水泥厂水泥生料粉, 中位粒径为 16.77 μm, 水分含量 0.9%。旋风预热器结构见图 1, 尺寸见表 1, 实验流程及其装置见图 2 所示。实验模型用不锈钢材 1Cr18Ni9Ti 制作而成, 热风炉内浇注耐火材料, 换热管和旋风预热器外敷 100 mm 厚矿棉保温层, 燃料为液化天然气。

表 1 旋风预热器结构尺寸表

Tab. 1 Structure size of the cyclone preheater

名称	筒体直径	内筒直径	内筒插入深度	涡体高度	直筒高度	锥体高度	总高度	偏心距	涡体半径	涡体半径	涡体半径	进风口宽	进风口高	蜗壳角度	锥体角度
符号	$D_0/D_0$	$D_c/D_0$	$S/D_0$	$h_1/D_0$	$h_2/D_0$	$h_3/D_0$	$H/D_0$	$e/D_0$	$R_1/D_0$	$R_2/D_0$	$R_3/D_0$	$a/D_0$	$b/D_0$	$\alpha$	$\beta$
比值	1	0.482	0.580	0.596	1.051	1.255	2.898	0.063	0.502	0.561	0.651	0.353	0.596	55°	19°

### 1.2 实验测试内容

如图 2 所示, 试验系统各测试点通过热电偶、差压变送器、压力变送器输出信号(1~5V 标准电压信号), 送入采集卡转换成数字信号, 采集系统按给定的要求采集各通道信号, 并传输到微机通过 Labview 软件实时显示和储存, 储存的数据可调用分析。

收稿日期: 2010-06-09 修改稿日期: 2010-12-27

基金项目: 陕西省重大科技创新项目资助(2010ZKC0117, 2010ZKC0507)

作者简介: 杨沛浩(1970-), 男, 陕西户县人, 硕士, 工程师, 主要从事材料工程领域设备性能的研究和制造。

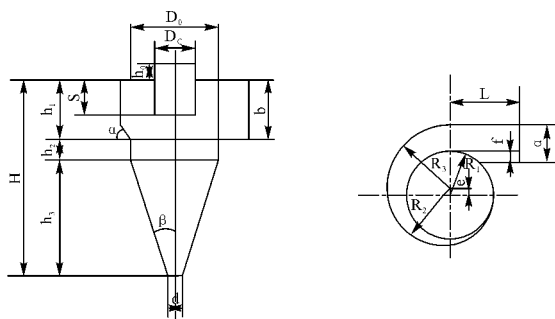


图 1 旋风预热器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the cyclone preheater

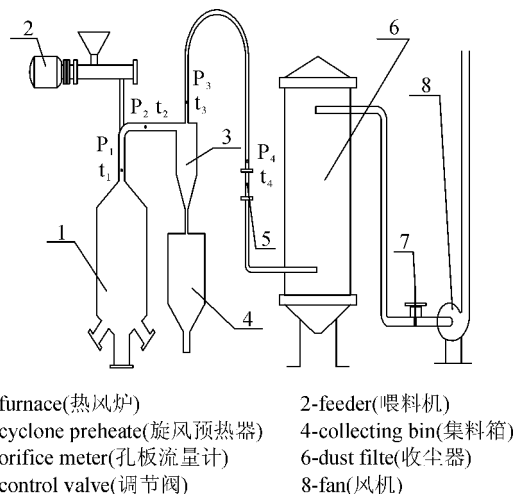


图 2 旋风预热器总分离效率实验流程及其装置示意图

Fig. 2 The experimental progress and equipments of the overall efficiency of cyclone preheater

实验预设旋风预热器入出口平均温度分别为 15℃(常温)、200℃、400℃、600℃、800℃,旋风预热器入口风速分别为 14 m/s、16 m/s、18 m/s、20 m/s、22 m/s、24 m/s,旋风预热器入口固气比分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5,合计 150 个实验点。

调试系统稳定运行在预设的温度、风速、固气比时,集料箱收集到的生料质量和对应喂料机加入旋风预热器中的生料总质量之比,即为总分离效率:  $\eta_{\text{总}} = S_o / S_i \times 100\%$

式中  $S_o$ —旋风预热器捕集到的粉体颗粒质量;  $S_i$ —进入旋风预热器的粉体颗粒质量。

## 2 实验结果及其分析

### 2.1 旋风预热器总分离效率在不同风速下随温度和固气比的变化

根据不同风速下的实验数据做三维框线图,见图 3~图 8。由图 3~图 8 分析可以看出:旋风预热器总分离效率随着风速的提高而提高,但当风速大于 22 m/s 时,总分离效率的提高幅度趋于平缓,甚至开始减小。例如当温度  $t=400^\circ\text{C}$ ,固气比  $Z=1.5$  时,风速从 14 m/s 提高到 22 m/s 时,总分离效率从 92.14% 提高到 97.16%,当风速为 24 m/s 时,总分离效率为 96.57%。旋风预热器总分离效率随着固气比的增大而增大,例如当风速  $U=18$  m/s,温度  $t=600^\circ\text{C}$  时,固气比从 0.5 增大到 2.5 时,总分离效率从 92.47% 提高到 95.45%。旋风预热器总分离效率随温度的升高而降低,例如当风速  $U=14$  m/s,固气比  $Z=0.5$  时,温度从 15℃ 升高到 800℃ 时,总分离效率从 91.27% 下降到 87.44%。

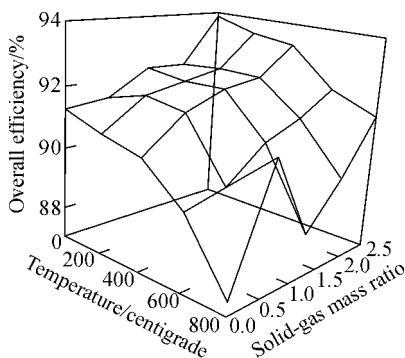


图 3 风速 14 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 3 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 14 m/s

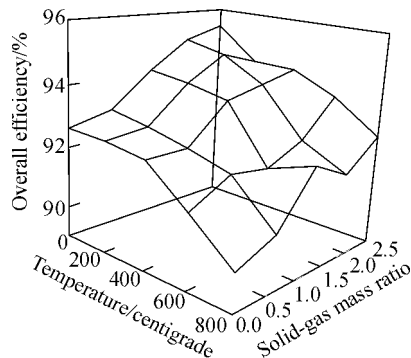


图 4 风速 16 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 4 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 16 m/s

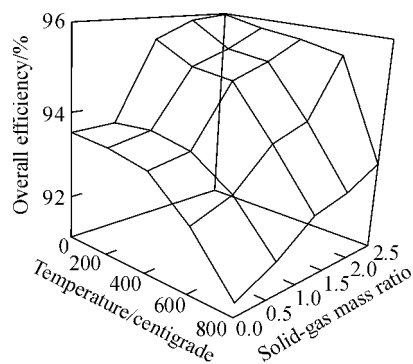


图 5 风速 18 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 5 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 18 m/s

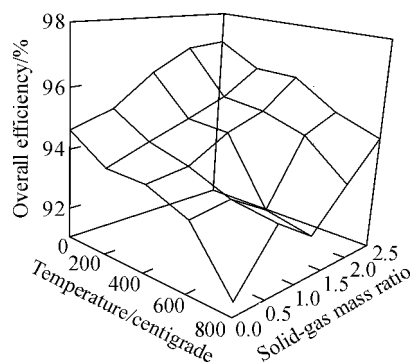


图 6 风速 20 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 6 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 20 m/s

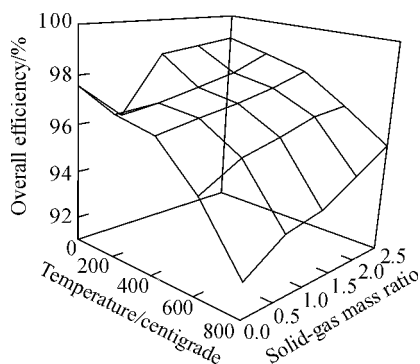


图 7 风速 22 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 7 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 22 m/s

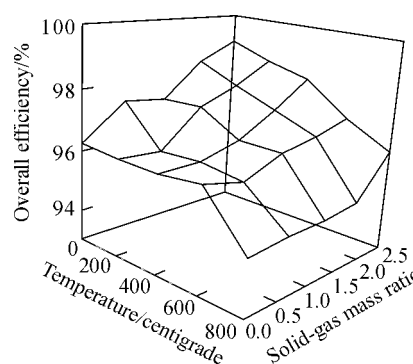


图 8 风速 24 m/s 时总分离效率随温度和固气比的变化

Fig. 8 Variation of the overall efficiency with temperature and solid-gas mass ratio with gas velocity at 24 m/s

2.2 总分离效率回归分析

由旋风预热器流场分析可知,影响旋风预热器总分离效率的因素有<sup>[14]</sup>:粉体颗粒的真密度、粉体颗粒的直径、气流的密度、气流的黏度、内筒直径、内筒中气流的流速、外筒体直径、外筒体中气流的轴向流速、旋风预热器高度、重力加速度、旋风预热器入口尺寸等,通过量纲分析整理,确定无量纲准数,建立了数学模型如下:

$$\eta_{\text{总}} = 1 - \exp(-aSt^bRe^cFr^dZ^e) \tag{1}$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为待求系数; $St$  为 Stokes 准数,  $St = \frac{d_p^2 \rho_p v_i}{18 \mu_g D_0}$ ;  $Re$  为 Reynolds 准数,  $Re = \frac{\rho_g D_h^2 v_i}{\mu_g D_c}$ ;  $Fr$  为 Froude 准数,  $Fr = \frac{g H D_0^4}{v_i^2 D_h^4}$ ;  $Z$  为入口固气比. 其中  $d_p$  为生料颗粒平均粒径(m);  $\rho_p$  为生料颗粒密度(kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_g$  为气流密度(kg/m<sup>3</sup>);  $D_h$  为旋风预热器入口水力直径(m);  $\mu_g$  为气流黏度(Pa·s);  $D_0$  为旋风预热器筒体直径(m);  $D_c$  为内筒直径(m);  $H$  为旋风预热器总高度(m);  $v_i$  为旋风预热器入口风速(m/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>).

对式(1)进行变换,化为线性方程,如下:

$$\begin{aligned} 1 - \eta_{\text{总}} &= \exp(-aSt^bRe^cFr^dZ^e) \\ \ln(1 - \eta_{\text{总}}) &= -aSt^bRe^cFr^dZ^e \end{aligned}$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\eta_{\text{总}}}\right)\right] = \ln a + b\ln(St) + c\ln(Re) + d\ln(Fr) + e\ln(Z)$$

$$\text{令 } Y = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\eta_{\text{总}}}\right)\right], A = \ln a, X_1 = \ln(St), X_2 = \ln(Re), X_3 = \ln(Fr), X_4 = \ln(Z)$$

$$\text{则 } Y = A + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_4$$

设  $Y$  在第  $k$  次实验中的观测值

$$Y_k \sim N(A + bX_{1k} + cX_{2k} + dX_{3k} + eX_{4k}, \sigma^2) \quad k = 1, 2, \dots, 150$$

$$\text{则离差平方和 } S = \sum_{k=1}^{150} (Y_k - A - bX_{1k} - cX_{2k} - dX_{3k} - eX_{4k})^2.$$

分别求  $S$  对  $A, b, c, d, e$  的偏导数, 并让他们等于零, 整理得方程组:

$$\begin{aligned} 150A + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}\right)b + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}\right)c + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{3k}\right)d + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{4k}\right)e &= \sum_{k=1}^{150} Y_k \\ \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}\right)A + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}^2\right)b + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{2k}\right)c + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{3k}\right)d + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{4k}\right)e &= \sum_{k=1}^{150} Y_k X_{1k} \\ \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}\right)A + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{2k}\right)b + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}^2\right)c + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}X_{3k}\right)d + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}X_{4k}\right)e &= \sum_{k=1}^{150} Y_k X_{2k} \\ \left(\sum_{k=1}^{150} X_{3k}\right)A + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{3k}\right)b + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}X_{3k}\right)c + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{3k}^2\right)d + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{3k}X_{4k}\right)e &= \sum_{k=1}^{150} Y_k X_{3k} \\ \left(\sum_{k=1}^{150} X_{4k}\right)A + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{1k}X_{4k}\right)b + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{2k}X_{4k}\right)c + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{3k}X_{4k}\right)d + \left(\sum_{k=1}^{150} X_{4k}^2\right)e &= \sum_{k=1}^{150} Y_k X_{4k} \end{aligned}$$

根据实验数据解此方程组得:  $a = 2.759, b = 0.335, c = -0.055, d = -0.195, e = 0.093$ .

故回归方程为:  $\eta_{\text{总}} = 1 - \exp(-2.759St^{0.335}Re^{-0.055}Fr^{-0.195}Z^{0.093})$ , 复相关系数  $R = 0.925$ .

### 3 结 论

(1) 旋风预热器总分离效率随着入口风速的提高而提高, 但当风速大于 22 m/s 时, 由于湍流强度增加, 导致物料返混程度增加, 使总分离效率的提高幅度趋于平缓, 甚至开始减小. 旋风预热器总分离效率随着固气比的增大而增大, 旋风预热器总分离效率随温度的升高而降低.

(2) 通过量纲分析, 确定了无量纲准数, 建立了数学模型, 把实验数据经过回归计算得到了回归方程:  $\eta_{\text{总}} = 1 - \exp(-2.759St^{0.335}Re^{-0.055}Fr^{-0.195}Z^{0.093})$ , 复相关系数  $R = 0.925$ .

### 参考文献 References

- [1] 罗晓兰, 陈建义, 杜美华, 等. 入口含尘浓度对旋风分离器效率影响规律的研究[J]. 石油化工设备技术, 1999, 20(2): 8-10.  
LUO Xiao-lan, CHEN Jian-yi, DU Mei-hua, et al. Research for the influence law of entrance dust bearing concentration on the cyclone efficiency[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1999, 20(2): 8-10.
- [2] FASSANI F L, LEONARDO G J. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency[J]. Powder Technology, 2000, 107: 60-65.
- [3] 薛 勇. 流体固气比对预热器旋风筒性能的影响[J]. 水泥, 1991(9): 10-15.  
XUE Yong. Influences of the Solid-Gas Ratio of Fluid to the Performances of Preheater Cyclones[J]. Cement, 1991(9): 10-15.
- [4] 黄文熙, 薛 勇, 蒋友新. 非结构因素对旋风预热器主要性能参数的影响[J]. 水泥, 1992(3): 1-6.  
HUANG Wen-xi, XUE Yong, JIANG You-xin. Influences of non-structural factors to the main operation parameters of cyclone preheaters[J]. Cement, 1992(3): 1-6.
- [5] 李文琦, 陈建义. 旋风分离器高温性能试验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 91-105.  
LI Wen-qi, CHEN Jian-yi. Experimental research of cyclone performance at high temperature [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 91-105.
- [6] 许世森, 许晋源, 许传凯. 温度和压力对旋风分离器高温除尘性能影响的研究[J]. 动力工程, 1997, 17(2): 52-58.

- XU Shi-sun, XU Jin-yuan, XU Chuankai. Study of the influence of temperature and pressure on high temperature dust separation properties of cyclone separators[J]. Power engineering, 1997, 17(2):52-58.
- [7] 陆 雷, 吴国芳, 孙利民, 等. 高温高效低阻旋风筒的热态模型试验[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(8):1022-1025.  
LU Lei, WU Guo-fang, SUN Li-min. Hot model test of high temperature, high efficiency and low resistance cyclone separators[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(8):1022-1025.
- [8] 钱付平, 章名耀. 温度对旋风分离器分离性能影响的数值研究[J]. 动力工程, 2006, 26(2):253-257.  
QIAN Fu-ping, ZHANG Min-yao. Numerical study of the influence of temperature on separation performance of cyclone separators[J]. Power engineering, 2006, 26(2):253-257.
- [9] 舒 帆. 旋风除尘器除尘效率的影响因素分析[J]. 水泥技术, 2009(2):89-91.  
SHU Fan. Factors influencing dust removal efficiency of cyclone filter[J]. Cement Technology, 2009(2):89-91.
- [10] 许世森. 细微尘粒的预团聚对旋风分离器高温除尘性能影响的实验研究[J]. 动力工程, 1999, 19(4):309-313.  
XU Shi-sun. Experimental research on the performance of cyclone at high temperature improved by agglomerating micro particles[J]. Power engineering. 1999, 19(4):309-313.
- [11] DERKSEN J J, SUNDARESAN S, VANDENAKKER H E A. Simulation of mass loading effects in gas-solid cyclone separators[J]. Powder Technology, 2006, 163:59-68.
- [12] 嵇 鹰, 徐德龙. 旋风预热器粗糙内壁对其性能的影响试验[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2009, 41(5):730-734.  
JI Ying, XU De-long. Test of the effect of the wall roughness on the performance of a cyclone preheater[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(5):730-734.
- [13] 杨沛浩. 高温高固气比条件下旋风预热器性能的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.  
YANG Pei-hao. An investigation into cyclone preheater performance in condition of high temperature and high solid-gas mass ratio[D]. Xi'an: XAUAT, 2010.
- [14] WELTY J R, WICKS C E, WILSON R E. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer[M]. Singapore: John Wiley and Sons, 4th Edition, 2001.

## Investigation into the overall efficiency of cyclone preheater in condition of high temperature and high solid-gas mass ratio

YANG Pei-hao<sup>1,2</sup>

(Institute of Powder Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;  
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** As temperature going up to 840℃ and solid-gas mass ratio to 2.54, the author has measured the overall efficiency of cyclone preheater, discussed the influences of temperature, gas velocity and solid-gas mass ratio to the overall efficiency, and obtained regression equation according to experimental data analysis and filled the gap in the investigation into overall efficiency of cyclone preheater in condition of high temperature and high solid-gas mass ratio.

**Key words:** cyclone preheater; overall efficiency; temperature; gas velocity; solid-gas mass ratio