

文章编号: CN23 - 1249 (2009) 06 - 0007 - 06

弯管分离器的数值模拟与设计优化

罗家松, 李 森, 魏小林

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 为了优化设计转炉烟道中弯管分离器结构, 利用计算流体力学软件 Fluent, 对弯管分离器中的气 - 固两相流进行了数值模拟。采用正交实验工况设计方法、级差分析法和方差分析法, 研究了弯管转折角、分离器进出口当量直径比、斯托克斯数等 5 个因素对于分离效率和压力损失系数的影响。研究表明: 5 个因素中, 斯托克斯数对分离效率有特别显著影响, 斯托克斯数越大, 分离效率越高。进出口当量直径比对压力损失系数有显著影响, 弯管转折角对压力损失系数有一定影响。进出口当量直径比越小, 弯管转折角越小, 压力损失系数就越小。在模拟结果的基础上, 得到了关于分离效率和压力损失系数计算公式。

关键词: 分离效率; 压力损失系数; 优化设计; 弯管分离器

中图分类号: TK223 **文献标识码:** A

Numerical Simulation and optimum design of elbow pipe separator

Luo Jiasong, Li Sen, Wei Xiaolin

(Mechanics of Chinese academy of science, Beijing 100190)

Abstract: In order to optimize the structure of elbow pipe separator in converter flue, gas - solid two - phase flow in the separator was simulated by CFD software Fluent Based on orthogonal experiment design, rank difference analysis and variance analysis, the influences of five variables such as elbow angle, equivalent diameter of inlet and outlet, Stokes number on the separation efficiency and pressure loss coefficient were investigated Simulated results indicated that: Stokes number has a significant impact on separation efficiency, the larger the Stokes number, the higher the separator efficiency. Ratio of equivalent diameter of inlet and outlet has a significant impact on pressure loss coefficient, and the elbow angle has a little impact on pressure loss coefficient, the smaller the ratio of equivalent diameter of inlet and outlet and the smaller the elbow angle, the smaller the pressure loss coefficient Based on simulated results, the calculation formulas of separation efficiency and pressure loss coefficient were drawn

Key words: separation efficiency; pressure loss coefficient; optimum design; elbow pipe separator

0 引 言

炼钢转炉炉气主要成分是温度较高的 CO 和

少量的 CO_2 、 O_2 、 N_2 , 其中含有大量的显热和化学热, 将其引入余热锅炉产生蒸汽, 是一种高效利用的手段。然而 CO 和空气的预混气具有易燃易爆

收稿日期: 2009 - 09 - 09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (No. 2006AA05Z253)

作者简介: 罗家松 (1984 -), 男, 彝族, 贵州兴义人, 中国科学院力学研究所研究生。

的特点,且转炉炉气含有大量高温固体颗粒(对未燃法炼钢,颗粒主要成分是 FeO,占 70%左右的份额,粒径集中于 2~40 μm),它们可能起到点火源的作用,引起爆炸。因此,在炉气进入锅炉之前对其进行两相流分离,不仅利于减少装备的磨损,而且起到了抑制爆炸的重要作用。

气固分离器有很多种不同的类型,结合实际应用中高温、较大流量、设备安装空间狭窄等背景,本文选择了弯管分离器作为研究的对象,它结构简单紧凑,耐高温,效率较高,压力损失较低,流通量大,没有较大空间的流动死角,不易于引起爆炸。

影响分离器的两个重要指标 分离效率和压力损失的因素很多,有气流转折角、入口速度、颗

粒粒径等。研究这类多因素的问题,前人已经有很多现成的方法。首先是找到相关的无量纲因素,分析出主次因素后选取主要因素,最终给出实验关联式。李森在研究波形板除雾器时^[1],使用了正交试验、级差分析、方差分析等方法讨论气液分离效率和压力损失,取得了成功,本文研究气固分离器,采用了类似的方法。

1 分离器结构与模型选取

为了利于分离,所有的初步设计的弯管分离器的灰斗均正对着入口的气流,几个典型的弯管分离器如图 1 所示(其中 α 为气流转折角, l₁/l₂ 为进出口当量直径比)。

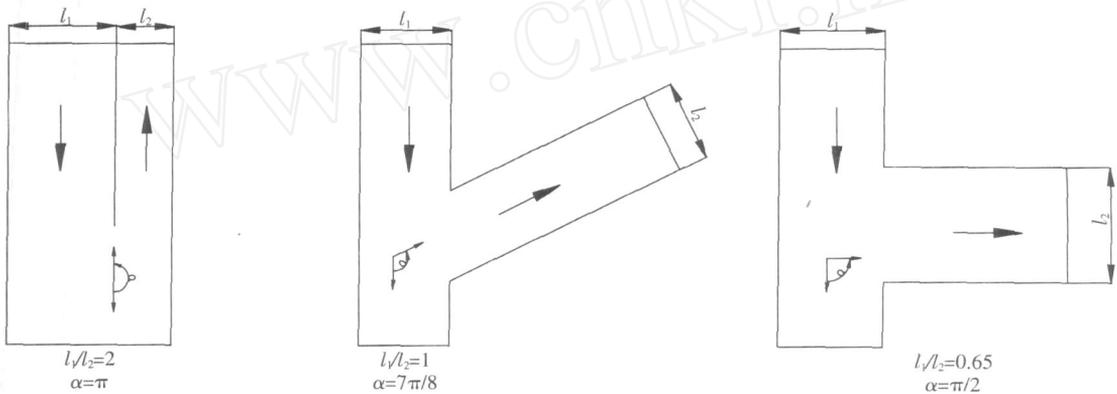


图 1 几种待选择的典型分离器类型

综合考虑前人的研究成果^[2],本文认为分离效率可以表述为

$$= f\left(\frac{l_1}{b}, \frac{V_0 l_1}{\mu}, \frac{V_0}{l_1 g}, \frac{V_0 (p - g) X_p^2}{18\mu l_1}\right) \quad (2.1)$$

压力损失可以表述为:

$$= g\left(\frac{l_1}{b}, \frac{V_0 l_1}{\mu}, \frac{V_0}{l_1 g}, \frac{V_0 (p - g) X_p^2}{18\mu l_1}\right) \quad (2.2)$$

其中, V₀ 是转折前主流流体的速度,本文中研究的弯管分离器,因为进口管的直径不变,所以就是进口速度。雷诺 (Reynolds) 数 $Re = \frac{V_0 l_1}{\mu}$ 是流体质点的惯性力同流体质点的粘性力的比值;

傅鲁德 (Froude) 数 $Fr = \frac{V_0}{l_1 g}$ 表征颗粒的惯性力同颗粒的重力之比; 斯托克斯 (Stokes) 数 $Fr = \frac{V_0 (p - g) X_p^2}{18\mu l_1}$ 是颗粒的惯性力同粘性力的比值,也就是系统的代表性长度 l₁ 同在斯托克斯曳力假设条件下以初始速度 V₀ 喷进静止气体内的颗粒的停止距离之比。

为了研究这些因素的具体影响,采用了软件 gambit2.2.30 和 fluent6.3.26 进行模拟。关于模型的选取(包括连续相模型和离散相模型),前人已经做了很多的探索。严建华、李晓东^[3]等在计算 U 型及鳍片管束气固惯性分离器也采用了 k-ε 两方程模型和随机轨道模型,计算结果和实验结果符合得很好。因此,本文连续相采用 k-ε 两方程模型,离散相采用随机轨道模型,计算中进行相间耦合。

离散项边界条件设定是另一个重要的问题,壁面可设定为完全弹性边界条件,但和实际情况相差较大。前人为了更真实地模拟颗粒的碰撞情况,研究了多种因素,给出了很多离散项壁面边界条件。Tabakoff^[4]推荐了一种准弹性壁面边界条件,恢复系数只和入射角相关:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_{n2}}{V_{n1}} = 1.0 - 0.4159 \alpha_1 - 0.4994 \alpha_1^2 + 0.292 \alpha_1^3 \\ \frac{V_{t2}}{V_{t1}} = 1.0 - 2.12 \alpha_1 + 3.0775 \alpha_1^2 - 1.1 \alpha_1^3 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

式中:

V_{n1} 、 V_{n2} :颗粒碰撞前、后的法向速度

V_{t1} 、 V_{t2} :颗粒碰撞前、后的切向速度

α_1 :颗粒碰壁前速度方向和壁面切向之间的夹角

α_2 :颗粒碰壁后速度方向和壁面切向之间的夹角

根据 V_{n2} 和 V_{t2} 就可以求出颗粒碰壁后弹出的角度:

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{V_{n2}}{V_{t2}}\right) \quad (2.4)$$

它方便易行,较能符合实际的情况,本文采用这个边界条件。灰斗处采用 trap 边界条件。

其余的设置如下:

在 gambit 中采用 Tgrid 格式划分网格,网格

尺寸为 0.015,网格总数为在 1 万到 7 万之间(不同的分离器有所不同)。fluent6.3.26 中的求解器为稳态、显式,以压力为基础,梯度选项基于 Green - Gauss 单元;采用 SIMPLE 算法进行计算,动量,湍动能和湍流耗散率都采用一阶迎风格式,压力采用标准格式。

2 数值模拟和分析优化

为了分析这些因素的具体影响,本文采用正交实验的方法对各个因素进行模拟。因为有 5 个因素,连带误差,共 6 个因素,所以采用了 $L_{25}(5^6)$ 的正交表,于是每个因素各取 5 个水平。选取了工业中常见的角度值、尺寸值、速度值、密度值、颗粒粒径值,使得到的各个无量纲参数取值具有了代表性的意义。如:在 5 个 Fr 数取值、5 个 Re 数取值均由入口速度 V_0 分别取值为 25、20、15、10、5 m/s,入口当量直径 $l_1 = 0.1$ m 得到;计算斯托克斯数时,颗粒直径 X_p 分别取值为 150、100、50、10、1 μ m,颗粒密度 $\rho_p = 2800$ kg/m³,气相密度 $\rho_g = 1.225$ kg/m³,入口当量直径 $l_1 = 0.1$ m。

每个因素(它们都是无量纲数)的各个水平取值和编号具体如下:

模拟中 fluent 相关的参数和实验验证的参数保持一致,得到具体的实验数据如下图所示,其中各无量纲数取值采用编号代替,具体值查询表 1。

表 1 各因素各水平的取值

水平号 NO. of levels	l_1/l_2	Fr	Re	Stk
0	2	637.755	171.146.75	48.878
1	7/8	408.163	136.917.4	13.034
2	3/4	229.592	102.688.1	3.259
3	5/8	102.041	68.458.7	0.130.34
4	1/2	25.510	34.229.35	0.001.303.4

对正交实验结果进行级差分析和方差分析。级差分析用各列因素的平均极差的大小,确定各因素对试验指标影响的主次顺序,方差分析更进一步,它最终计算到的是自由度为 (4, 4) 的统计值 F_j ,它和相应的 F 分布进行对照,可以得到各个因素影响的显著性水平,通常认为^[11]: $F > F_{1-\alpha_01}$ 时,因素的影响特别显著; $F_{1-\alpha_01} > F >$

$F_{1-\alpha_05}$ 时,因素的影响显著; $F_{1-\alpha_05} > F > F_{1-\alpha_01}$ 时,因素有一定影响; $F < F_{1-\alpha_01}$ 时,因素影响不大,查 F 分布表,得到: $F_{1-\alpha_01}(4, 4) = 15.977$, $F_{1-\alpha_05}(4, 4) = 6.3882$, $F_{1-\alpha_01}(4, 4) = 4.10725$ 。

由模拟数据得到分离效率的级差数据和方差数据,以及相应的结论如表 3 所示。

表 2 模拟数据

正交编号 Orthogonal code	l_1 / l_2	Fr	Re	Stk	e 误差 error	(%)分离效率 Separation efficiency	压力损失系数 Pressure loss coefficient
1	0	0	0	0	0	100	14.010
2	0	1	2	3	4	0.690	9.434
3	0	2	4	1	3	2.276	2.731
4	0	3	1	4	2	75.172	1.255
5	0	4	3	2	1	100	1.003
6	1	0	4	3	2	80.000	14.096
7	1	1	1	1	1	0.983	6.675
8	1	2	3	4	0	100	2.550
9	1	3	0	2	4	0.172	1.401
10	1	4	2	0	3	0.345	1.099
11	2	0	3	1	4	0.690	13.592
12	2	1	0	4	3	2.241	6.659
13	2	2	2	2	0	37.931	2.451
14	2	3	4	0	1	100	1.240
15	2	4	1	3	0	100	1.114
16	3	0	2	4	1	94.828	10.875
17	3	1	4	2	0	90.344	5.556
18	3	2	1	0	4	1.379	1.829
19	3	3	3	3	3	2.414	1.134
20	3	4	0	1	2	23.966	0.974
21	4	0	1	2	3	2.931	9.394
22	4	1	3	0	2	49.138	3.874
23	4	2	0	3	1	87.586	1.361
24	4	3	2	1	0	91.379	0.908
25	4	4	4	4	4	0.862	0.956

表 3 分离效率的级差和方差分析

因素 factors	级差 D_1 differential D_1	影响程度序号 The impact of the serial number	方差 F_1 variance F_1	与 F(4,4)分布关系 Comparisons with F (4,4) distribution	影响程度 Influencing level
	19.5276	5	0.4873	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
l_1 / l_2	27.0103	3	1.0730	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
Fr	18.8035	6	0.4899	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
Re	30.5621	2	1.5044	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
Stk	95.5862	1	17.6235	$F > F_{1-0.1}(4,4)$	特别显著
e (误差 error)	26.5621	4	-	-	-

由级差分析可知,对于分离效率而言,影响因素由大到小排列依次为: Stk 、 Re 、 l_1 / l_2 、 Fr 。由方差分析知道,只有 Stk 对于分离效率的影响特别显著,其余因素的影响都不大,说明在弯管分离器构型大致确定、一定气动参数范围内(对应入

口速度为 5 ~ 25 m/s)的前提下分离效率只与颗粒的密度,粒径入口速度关联较大,而与具体的几何结构关联不太大。同理可得到压力损失系数的级差数据和方差数据,以及相应的结论如表 4 所示。

表 4 压力损失系数的级差和方差分析

因素 factors	级差 D_1 differential D_1	影响程度序号 The impact of the serial number	方差 F_1 variance F_1	与 F(4,4)分布关系 Comparisons with F(4,4) distribution	影响程度 Influencing level
	2.3877	2	5.5716	$F_{1-0.05}(4,4) > F > F_{1-0.1}(4,4)$	有一定影响
l_1/l_2	11.3642	1	144.9872	$F_{1-0.01}(4,4)$	影响显著
Fr	0.9026	6	0.9566	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
Re	1.4668	3	1.9650	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
Stk	1.2390	4	1.6149	$F < F_{1-0.1}(4,4)$	影响不大
e(误差 error)	1.0439	5	-	-	-

对于压力损失系数而言具有显著影响的因素是进口出口当量直径比,转角也有一定程度的影响。压力损失系数的表达式为 ($\xi = \frac{P_{total}}{0.5 \rho V_0^2}$),也就是说它已经剔除的进口速度的影响,纯粹是一个和几何因素相关的因素,这和数值计算的数据是吻合的。

将正交实验数据组合起来,横坐标取为各个因素的取值,纵坐标取为各个因素取值对应的分离效率或压力损失系数的平均值,可以得出直观的各个因素对于分离效率或压力损失系数的影响。分离效率与 5 个因素关系的曲线图如图 2 所示:

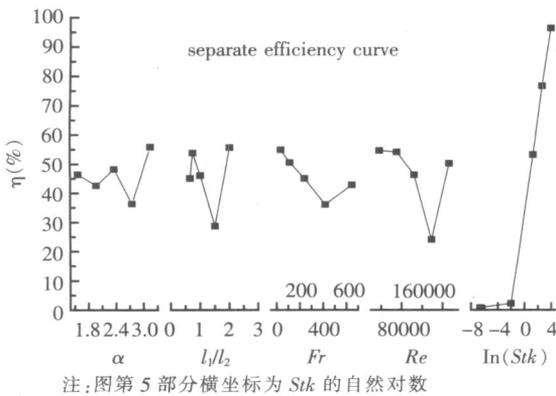


图 2 分离效率与 5 个因素关系的曲线图

压力损失系数与 5 个因素关系的曲线图如图 3 所示:

由图可以看出来,对于分离效率而言,只有斯托克斯数的影响是增函数,它越大分离效率越高,其余各因素都具有一定的波动性,出现最大效率的点依次是 $\alpha = 3.14159$, $l_1/l_2 = 2$, $Fr = 25.51$, $Re = 34299.35$, $Stk = 48.88$ 。对于压力损失系数而言,转角、进出口当量直径比的影响是增函数,它

们越大压力损失系数就越高,其余各因素都具有一定的波动性,出现最小压力损失系数的自变量取值依次是 $\alpha = 1.570795$, $l_1/l_2 = 0.65$, $Fr = 408.16$, $Re = 102688.1$, $Stk = 0.13034$ 。

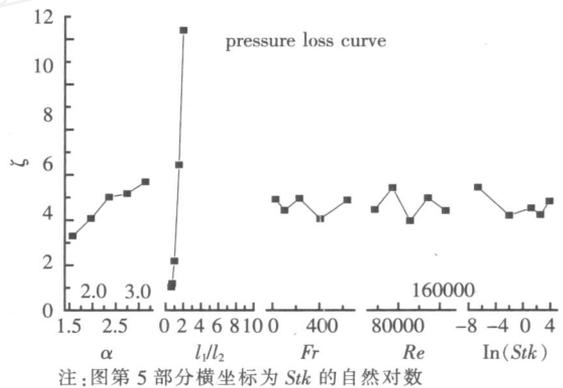


图 3 压力损失系数与 5 个因素关系的曲线

通过方差分析,明确了各个因素影响的大小,就可以剔除影响不大的因素,仅对影响较大因素进行回归拟合,从而对设计校核类似的分离器起到一定的指导作用。

通过对模拟数据发现,当斯托克斯数低于某个数值时,分离效率很小且不再发生明显变化,这和颗粒运动的随机性有关,这时可以认为分离器失去了分离的能力。当斯托克斯数高于某个数值时,分离效率达到了 100%,可以认定,斯托克斯数更高分离效率仍然是 100%,所以对分离效率 (%) - 斯托克斯数进行拟合应该限于中间的这一段。得到的拟合公式为:

$$\xi = \begin{cases} 0 & Stk < 0.13 \\ 15.958 \ln(Stk) + 34.784 & 0.13 < Stk < 55.55 \\ 100 & Stk > 55.55 \end{cases} \quad (3.1)$$

线性拟合 $-\ln(Stk)$, $R^2 = 0.9997$ 最大相对误差为 1.22%。

对压力损失系数 - 转角、进出口宽度进行拟合, 得到拟合公式为:

$$\frac{P_{total}}{0.5 \rho_g V_0^2} = 13581^{0.6925} (l_1/l_2)^{2.2799} \quad (3.2)$$

拟合公式得到的曲面和模拟值点的情况如图 4 所示:

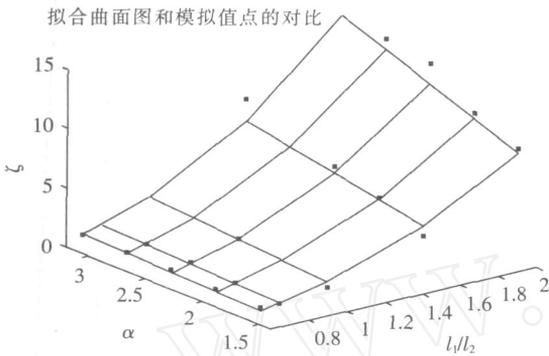


图 4 拟合曲面和模拟值点 (*) 的对比

2.3 优化设计

上述理论分析得到的结论, 就可以对该类分离器的设计、运用进行指导。

因为分离效率和压力损失系数的显著影响因素并不重叠, 两者的耦合度很低, 所以, 可以从各自的角度进行选择。

减少压力损失的努力主要体现在几何构型设计中, 一方面要关注转折角和进出口管的粗细。在不影响布局的情况下采用直角弯管 ($\alpha = 90^\circ$), 尽量采用小的进口管和大的出口管, 当然, 进出口大小相同 ($l_1 = l_2$), 压力损失也不大, 却可以带来和多的设计制造上的方便, 所以一般可以采用同等粗细的管子。另一方面, 数值试验中, 在转角的地方没有平滑的过渡, 选取正交表中的 203 143 (第 11 组实验数据), 进行平滑过渡, 压力损失系数由 13.592 变为 10.802, 减少了近 20% (分离效率变化不大), 可见在转角处平滑过渡处理有利于大大地减少压力的损失。

提高分离效率, 主要在斯托克斯数上下功夫。在气体的粘性, 颗粒的粒径分布、密度等一定的情况下, 由斯托克斯数的定义式 $Stk = \frac{V_0 (\rho_p - \rho_g) X_p^2}{18\mu l_1}$ 知, 进口速度 V_0 越大, 进口当量

直径越小, 斯托克斯数就越大, 分离效率就越高。

3 结 论

本文对弯管分离器中的气 - 固两相流进行了数值模拟。采用正交实验工况设计方法, 级差分析法和方差分析法, 研究了弯管转折角、分离器进出口当量直径比、斯托克斯数等 5 个因素对于分离效率和压力损失系数的影响, 得到如下重要结论。

(1) 对前文所述弯管分离器而言, 其分离效率主要以斯托克斯数相关, 斯托克斯数越大, 分离效率越高; 而压力损失系数主要以进出口当量直径比和转折角相关, 进出口当量直径比越小, 转折角越小, 压力损失系数就越小。Fr 数的影响, 无论针对分离效率还是压力损失系数都是最小的, 说明在这类分离器中可以不考虑颗粒受重力的影响。

(2) 斯托克斯数在小于 0.1 时该类分离器计算分离效率很低, 且随着斯托克斯数的进一步减少而计算分离效率变化并不大, 所以认为在斯托克斯数小于 0.1 此类分离器即丧失了分离作用; 当 $Stk > 59.55$ 时认为分离效率达到 100%。当斯托克斯数在 2.59 附近时分离效率达到 50%。

(3) 分离效率和压力损失系数没有共同的主要影响因素, 耦合度不高。优化设计中, 为减少压力损失, 应该尽量采用小的转折角和小的进出口当量直径比, 进出口管上部的结合处 (对转角而言是中间上挡板的末端) 应平滑过渡; 为提高分离效率, 可减小进口当量直径, 提高进口速度。

参考文献

[1] 李 森. 湿法脱硫系统中波形板除雾器除雾性能试验 [D]. 西安交通大学. 西安: 西安交通大学, 2004 年.

[2] 岑可法, 倪明江, 严建华等. 气固分离理论及技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999: 24 - 26, 222 - 224.

[3] 严建华, 李晓东等. 循环流化床惯性分离器内气固两相流动的数值模拟 [J]. 动力工程, 1996 年, 16 卷: 25 - 30.

[4] Tabakoff W, Hamed A. Aerodynamic Effect on Erosion in Turbomachinery [J]. JSME and ASME, paper, 1977, (70): 392 - 401.