

文章编号:1671-6833(2005)04-0085-04

套管排气管型旋风分离器性能的数值模拟研究

张海红<sup>1</sup>, 魏新利<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450052; 2. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 利用 CFD 技术对新型套管排气管型旋风分离器的性能进行了研究. 在两相流的研究中采用了相间耦合的随机轨道模型. 研究结果表明: 该新型旋风分离器比普通型的流场的静压分布更有利于阻止灰斗内气流的返混; 可排出两种不同含尘量的净化气体, 内排气管排出的净化气体的含尘量较外排气管低、且随着内管直径的减小而降低, 内排气管的总压降比外排气管大、且随着内管直径的增大而逐渐降低; 通过改变内排气管的直径可以控制从内排气管排出气体的含尘量, 便于后续分级处理.

**关键词:** 旋风分离器; 套管排气管; 计算流体力学; 流场; 含尘量; 压降

**中图分类号:** TQ 051.8      **文献标识码:** A

0 引言

旋风分离器作为一种气、固分离装置广泛应用于化工、冶金、矿场及其它一些轻工业领域. 但一般情况下, 由于待处理含尘气体的含尘量较大、颗粒粒度分布范围较广, 往往需要进行多次逐级分离. 当含尘气体经普通旋风分离器处理时, 在排气管横截面的中心含尘量低、压强低, 在排气管内远离中心的外部区域含尘量高、压强高, 但经排出后, 气体只是含尘量、压强都被混合均匀的一种气体, 这使得含尘量及压强的分布没有被充分合理的利用.

作者参照文献[1]提出的 JK 型三产品旋流器, 将旋风分离器的排气管做成套管形式, 即在普通的单排气管中设置一内管, 可以分别从内管和套管间隙中排出含尘量和压强均不同的两种净化气体. 这样, 不仅可以充分利用排出气体的含尘量分布和能量分布, 而且还可以通过改变内管直径的大小来控制排出气体的含尘量和压降, 从而提高旋风分离器的分离效果, 节约能量, 并便于后续的分级处理, 具有广泛的用途. 我们利用 CFD 数值模拟技术, 对该套管排气管型旋风分离器的流场、排气含尘量和压降等进行了研究.

1 数学模型

目前, 在对旋风分离器的性能进行预测时, 多数研究者采用的是考虑湍流脉动的随机轨道模

型, 它是颗粒轨道模型的一种, 属离散介质模型, 即将流体当作连续介质, 将颗粒作为离散介质. 但这其中大都采用了非耦合的模型<sup>[3]</sup>, 没有考虑颗粒相对气相的影响, 显然未能反映真实情况. 而当颗粒粒径较小, 浓度很稀 (颗粒相入口浓度较低, 属稀相流动) 时, 气相流场的湍流脉动对颗粒运动有相当显著的影响, 颗粒相对气相也有一定的影响. 我们在拉格朗日坐标系下, 采用相间耦合的随机轨道模型对两相流场进行数值计算, 使模拟更接近于实际情况.

对于旋风分离器, 随机轨道模型中建立的瞬态颗粒动量方程如下:

$$\begin{cases} \frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}) \\ \frac{dv_p}{dt} = F_D(v - v_p) + g_y(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}) \\ \frac{dw_p}{dt} = F_D(w - w_p) + g_z(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u, u_p; v, v_p; w, w_p$  分别为  $x, y, z$  方向上气相流体和颗粒的瞬时速度;  $g_x, g_y, g_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的重力加速度;  $\rho, \rho_p$  分别是气相和颗粒的密度; 而

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}.$$

式中:  $d_p$  为颗粒直径;  $\mu$  为气体分子粘性系数;  $C_D$  为曳力系数,  $C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$ ;  $a_1, a_2$  和  $a_3$  是

收稿日期:2005-06-09; 修订日期:2005-09-28

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(004031500)

作者简介: 张海红(1979-), 女, 山东潍坊人, 河南工业大学助教, 硕士, 主要从事高效节能过程设备研究.

常数,据 Morsi 和 Alexander 的建议<sup>[3]</sup>,其值与处于不同雷诺数范围的颗粒球形度有关; $Re$  为颗粒相的雷诺数,  $Re \equiv \frac{\rho_p |u_p - u|}{\mu}$ ;

在一定的离散时间步长内逐步积分式(1),就可得到各处颗粒沿轨迹的速度值.

对轨迹本身的计算可通过同时积分下式得到:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u_p \\ \frac{dy}{dt} = v_p \\ \frac{dz}{dt} = w_p \end{cases} \quad (2)$$

在逐步积分运动方程和轨迹方程时所使用的的时间步长取为颗粒与湍流涡团相互作用的时间,即湍流涡团的生存周期和颗粒穿过随机涡团的时间二者之中的较小者<sup>[4]</sup>.

2 数值计算

套管排气管型旋风分离器的套管的内管直径、外管直径、内管插入深度、外管插入深度等都是影响旋风分离器性能的因素.在本文中,主要研究了内、外排气管为平齐插入式(插入深度一致)的旋风分离器的性能,同时研究了不同内管直径对性能的影响.所采用的具有套管排气管结构的旋风分离器是在筒体直径为  $\Phi 190\text{ mm}$  的 Sair-mand 高效型直切入口的旋风分离器基础上在排气管内再加载一内管构成的,内管壁厚设为  $1\text{ mm}$ ,结构简图如图 1 所示.



图 1 套管排气管型旋风分离器

Fig. 1 The cyclone sparator with th mtle exhaust duct

对旋风分离器单相流场的计算采用文献[5]中确定的计算方法;首先用 GAMBIT 软件做前处

理,采用分区组合法将计算域划分生成与几何特征吻合良好的高质量网格;然后导入 CFD 软件的 FLUENT 6.0 平台中,采用湍流各向异性的 RSM 模型及 QUICK 差分格式、PRESTO 压力插补格式进行数值求解,基本算法是采用非交错网格的 SIMPLEC 算法.在计算得到良好的单相流场基础上,再对气、固两相流场采用上述相间耦合的随机轨道模型进行计算.

计算中,气相选用常温下的空气,固相颗粒群选用可通过  $45\text{ }\mu\text{m}$  的筛网筛孔的滑石粉<sup>[4]</sup>,密度为  $2\text{ }750\text{ kg/m}^3$ ,气体的含尘量为  $9.5\text{ g/nm}^3$ .颗粒在各类边界处的处理方法如下:

(1) 进口处,将颗粒群按初始尺寸分组,使不同的颗粒从入口截面上均匀分布的射入分离器,颗粒的初始速度与气体的入口速度相同,即假设颗粒在进入分离器时已具有良好的跟随性,与气相间不存在相对速度滑移;

(2) 颗粒运动到壁面时,认为颗粒服从镜面反射原理,以此对颗粒的下一位置和速度参数进行计算;

(3) 颗粒运动到排出口边界时,假设从出口逃逸,此时停止对颗粒的追踪;

(4) 当颗粒运动到灰斗最底端边界时,假设被捕集排出,此时也停止对颗粒的追踪.

3 结果与讨论

3.1 单相流场分析

图 2、3 是当进口气速为  $7.5\text{ m/s}$  时,套管内筒直径为  $\Phi 64\text{ mm}$  的套管排气管型旋风分离器与普通型旋风分离器气相流场在轴截面上的切向速度云图和静压云图.

由图 2 可见,套管排气管型与普通型旋风分离器内的切向速度分布基本上相同,都表现出了较好的轴对称性,由轴心向外先是迅速增大,而后逐渐减小,这种组合涡(Rankine 涡)结构对分离是十分有利的.两者之间的不同主要在于:在套管排气管结构中,由于增加了气体接触壁面,使得摩擦损失增大,套管内的切向速度较普通的单排气管内的切向速度有所减小,降低了排出气体的能量.

由图 3 可见,套管排气管型与普通型旋风分离器内静压分布的不同之处主要在于:普通型旋风分离器的静压最低区域是在气芯的下部,即排尘口附近,由于最低静压低于外界大气压,在逆向压力梯度差的作用下易造成灰斗内气流的返混,将使得落入灰斗的颗粒又被卷扬进入分离器内,以致影响了正常排尘;而套管排气管型旋风分离

器的静压最低区域是在分离空间的上部, 远离排尘口, 从而较好的改善了这一现象. 另一方面, 套管型内的最低静压较普通型内的要高(由图例显示数据可知), 故总的效果是使得套管型内的逆向压力梯度差有所降低, 从而降低了灰斗内气流返混的可能性. 因而, 该新型旋风分离器可有效改善灰斗气流返混这一现象, 有利于颗粒顺利的被捕集排出.

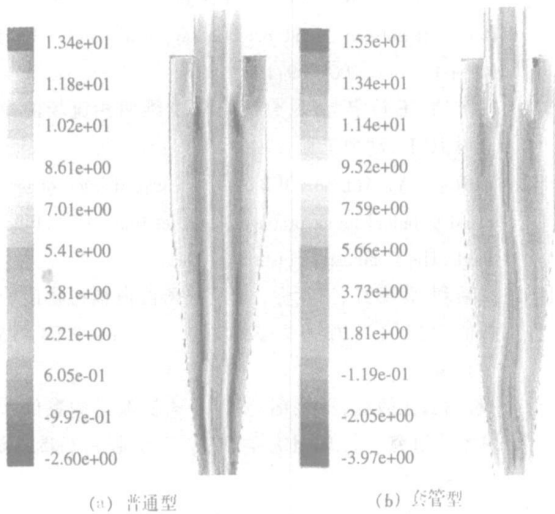


图2 切向速度分布云图

Fig. 2 The distribution of tangential velocity

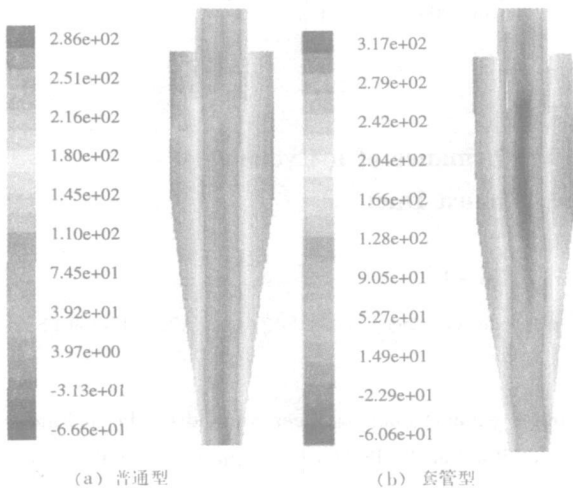


图3 静压分布云图

Fig. 3 The distribution of static pressure

3.2 内管直径对性能的影响分析

为了考察内管直径对该旋风分离器性能的影响, 本文计算了当进口气速为  $7.5\text{ m/s}$ , 内管直径分别为  $\Phi 10$ 、 $\Phi 24$ 、 $\Phi 38$ 、 $\Phi 48$ 、 $\Phi 57$ 、 $\Phi 64$ 、 $\Phi 70$ 、 $\Phi 80$  和  $\Phi 90\text{ mm}$  (外管直径均为  $\Phi 95\text{ mm}$ ) 时的套管排气管型旋风分离器的两相流场. 另为了对比, 还计算了排气管直径为  $95\text{ mm}$  的普通 (单排气管) 旋风

分离器的两相流场. 旋风分离器的性能主要指气、固分离效率和进口、排气口之间的总压降<sup>[9]</sup>, 本文将通过排出气体的含尘量来间接反应分离的效率 (处理的进气体含尘量不变).

图4所示是在外排气管直径保持不变的情况下, 内、外排气管 (指环隙套管内, 以下同) 的总压降随内排气管直径的变化曲线, 以及单管旋风分离器在同等工况下的压降值 (为了便于比较, 我们用一点划线表示). 由图可见: 在所考察范围内, 内排气管的压降大于单管排气管的压降, 而外排气管的压降小于单管排气管的压降; 随着内管直径的增大, 内、外排气管的压降都逐渐降低. 这是由于在旋风分离器内部, 靠近轴中心区域的压强较小, 远离轴中心区域的压强较大, 而进口压强是一定的, 所以内排气管的总压降较大, 外排气管的总压降较小 (这也可以由单排气管旋风分离器的压强分布分析得到).

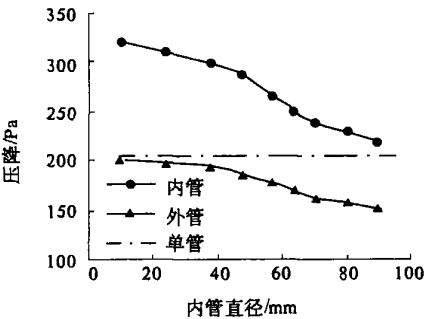


图4 内管直径与压降关系曲线

Fig. 4 The relation curves of the inner diameter and pressure drop

图5所示的是在外排气管直径保持不变的情况下, 从各排气管排出气体的含尘量 (取出口截面上的面积加权平均值) 随内管直径的变化曲线. 可以看出: 内排气管的含尘量小于单管旋风分离器排出气体的含尘量, 而外排气管的含尘量大于单管旋风分离器排出气体的含尘量; 且随着内管直径的增大, 内、外管的平均含尘量都逐步增大. 由此可以认为, 随着半径的增大, 颗粒的分布密度是逐渐增大的, 这说明含尘气体在从排气管中旋转排出时, 颗粒在离心力的作用下仍被甩向外部. 假如在离开排气管之前颗粒能碰壁, 则重新进入分离空间进行分离, 这对提高分离效果是有好处的.

另外, 图5所示的内管直径与内管气体含尘量的关系曲线具有明确的物理意义和工程实用价值. 由内管直径与内管净化气体含尘量的一一对应关系, 我们可以通过改变内排气管的直径来控制从内排气管所排出气体的含尘量. 这样, 当采用

一般方法改善分离效果不理想时,就可以采用本文提出的套管排气管结构,将从内排气管排出气体的含尘量控制在许可范围之内;而对于从外排气管排出的气体,则可以有针对性的进行下一步分离以使得最终达到分离要求.

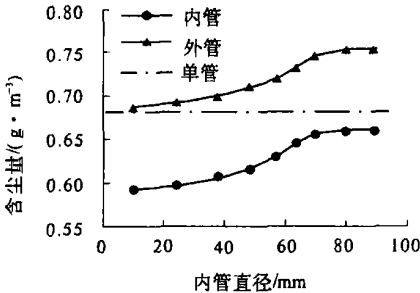


图 5 内管直径与含尘量关系曲线

Fig.5 The relation curves of the inner diameter and dust content

4 结论

(1) 套管排气管型旋风分离器的流场分布与普通型旋风分离器的基本上相似,但是在套管附近的速度分布不尽相同,且该新型旋风分离器的静压分布有效的改善了灰斗内气流返混这一现象,有利于颗粒顺利的被捕集排出.

(2) 套管排气管型旋风分离器的内排气管排出的净化气体的含尘量较外排气管低,且随着内管直径的减小而逐渐减小;内排气管的总压降比

外排气管大,且随着内管直径的增大而逐渐降低.

(3) 采用该旋风分离器可得到两种不同含尘量的净化气体,便于后续分级处理;且可以通过改变内排气管的直径来控制从内排气管排出气体的含尘量,使之在许可范围之内,有一定的工程应用价值.

参考文献:

[ 1 ] OBENG D P , MORRELL S . The JK three - product cyclone - performance and potential applications [ J ] . Int J Miner Process , 2003 , 69 : 129 ~ 142 .  
[ 2 ] 林 玮 , 王乃宁 . 旋风分离器内三维两相流场的数值模拟 [ J ] . 动力工程 , 1999 , 19 ( 1 ) : 72 ~ 76 .  
[ 3 ] MORSE S A , ALEXANDER A J . An investigation of pre - mixed turbulent flame propagation in jet flames [ C ] . Rutherford : The Combustion Institute , 1994 .  
[ 4 ] 魏新利 , 张海红 , 王定标 . 旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟 [ J ] . 郑州大学学报 ( 工学版 ) , 2004 , 25 ( 3 ) : 14 ~ 17 .  
[ 5 ] 魏新利 , 张海红 , 王定标 . 旋风分离器流场的数值计算方法研究 [ J ] . 郑州大学学报 ( 工学版 ) , 2005 , 26 ( 1 ) : 57 ~ 60 .  
[ 6 ] QIMBURJ , CHUAHT G , FAKHRU A , et al . The Influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop : a CFD study [ J ] . Chemical Engineering and Processing , 2005 , 44 : 7 ~ 12 .

The Numerical Simulation for the Performance of a Cyclone Separator with Thimble Exhaust Duct

ZHANG Hai - hong <sup>1</sup> , WEI Xin - li <sup>2</sup> ,

( 1 . School of Mechanical and Electrical Engineering , Henan University of Technology , Zhengzhou 450052 , China ; 2 . School of Chemical Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China )

**Abstract :** The performance of a new cyclone separator with thimble exhaust duct has been studied by the technique of Computational Fluid Dynamics . We adopt the coupling Discrete Random Walk Model for the study of the two - phase flow field . The results indicate : the distribution of static pressure of the new cyclone separator is beneficial to preventing the gas returning from the dust collector than of the ordinary . Two kinds of gas with different dust contents can be ejected from the new cyclone separator , the dust content of the gas in inner duct is lower than in the outer and both are reduced when the diameter of inner duct is reduced . The total pressure of the gas in inner duct is larger than in the outer duct , and they are reduced when the diameter of inner duct is augmented . we may control the dust content of the gas in inner duct by changing diameter of the inner duct so that the purified gas is convenient for the latter classified disposal , which is worthy of engineering application .

**Key words :** cyclone separator ; thimble exhaust duct ; CFD ; flow field ; dust content ; pressure drop