

文章编号:1671-6833(2004)03-0014-04

旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟

魏新利, 张海红, 王定标, 孟祥睿

( 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 采用数值模拟的方法研究旋风分离器内的颗粒运动;对单相流场采用湍流各向异性的雷诺应力模型,对气、固两相流场采用相间耦合的随机轨道模型;通过描述颗粒的运动轨迹,揭示了颗粒在旋风分离器中运动的物理机制.结果表明:颗粒的运动轨迹比较复杂,且带有很大的随机性;尤其是小粒径颗粒,受气流湍动影响显著,即使是粒径、入射位置相同,其运动轨迹也各不相同,最终的位置也不同;小粒径颗粒更容易受二次涡流影响,从而降低分离器的效率;另外,还模拟出了上灰环、排气管短路流及排尘口返混等影响分离效率的几种现象,为进一步研究旋风分离器的分离机理理论及实验研究打下基础.

**关键词:** 旋风分离器; 数值模拟; 耦合; 轨迹

**中图分类号:** TQ 051.8      **文献标识码:** A

0 引言

旋风分离器是一种利用气固两相流体的旋转运动,使固体颗粒在离心力的作用下从气流中分离出来的设备,是工业上最常用的一种分离、除尘设备.由于旋风分离器的工作过程是一种极其复杂的三维强旋转湍流、两相分离运动,且涉及气固相互作用以及凝聚、破碎、吸附和静电等许多物理现象,致使理论研究遇到了许多在现代流体力学中尚未解决的难题.其应用历史虽然已有百余年了,但总的发展情况却是理论研究始终落后于实践<sup>[1]</sup>.

描述两相流运动的模型有多种,但目前,在对旋风分离器进行预测时,大多数研究者<sup>[2~4]</sup>采用的是随机轨道模型,在拉格朗日坐标系下用跟踪颗粒运动轨迹的方法来描述颗粒的运动.但这其中大都采用了非耦合的模型,没有考虑颗粒相对气相的影响,显然未能反映真实情况.为此,本文将采用 FLUENT 软件中的相间耦合的随机轨道模型对其进行数值模拟研究,为高效旋风分离器的结构设计提供理论依据,为进一步深入研究在复杂气固两相流动情况下的气固两相流动模型提供理论基础,同时为颗粒的随机轨道模型的发展提供参考.

1 数学模型及计算方法

1.1 两相流模型

本文所采用的相间耦合的随机轨道模型是颗粒轨道模型的一种,属离散介质模型,即只把流体当作连续介质,而把颗粒作为离散介质处理.该模型考虑了气相湍流对颗粒的作用,也考虑了颗粒运动对气相的影响,在拉格朗日坐标系下计算颗粒的随机轨迹及沿轨道的变化经历.此模型计算简单,当颗粒有较复杂的经历时,能较好地追踪颗粒的运动.随机轨道模型的基本假设<sup>[5]</sup>是:

- (1) 气相被看作为连续介质,而颗粒相被看作为与气体有滑移的、沿自身轨道运动的分散群;
- (2) 各组颗粒群沿其自身的轨道运动而互不干扰,认为颗粒群没有自身的湍流粘性、湍流扩散和湍流传热;
- (3) 颗粒群不是按当地尺寸分组,而是按初始尺寸分组.

1.2 运动方程和轨迹方程

固体颗粒在分离器中运动时非常复杂,所受外力包括:流体曳力(粘性阻力)、重力、浮力、压力梯度力、虚假质量力、Basset 力、Magnus 力、Saffman 升力等.在旋风分离器的气固两相流动中,由于颗粒粒径很小(微米量级)、浓度很稀,颗粒所受的流体曳力是最主要的,其次是重力,其它力在量级上

收稿日期:2004-04-10; 修订日期:2004-06-28

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(004031500)

(作者简介:魏新利,1956年生,河南省辉县人,郑州大学教授,博士,主要从事高效节能过程设备研究与开发. [www.cnki.net](http://www.cnki.net))

与之相比非常小,一般可以忽略不计.因而,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表示如下:

$$\frac{du_p}{dt}=F_D(u-u_p)+g_x\left(\frac{\rho_p-\rho}{\rho_p}\right) \tag{1}$$

$$\frac{dv_p}{dt}=F_D(v-v_p)+g_y\left(\frac{\rho_p-\rho}{\rho_p}\right) \tag{2}$$

$$\frac{dw_p}{dt}=F_D(w-w_p)+g_z\left(\frac{\rho_p-\rho}{\rho_p}\right) \tag{3}$$

其中,各个等式右边分别是单位质量颗粒在该方向上所受到的气体曳力和重力.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  $a_3$  是常数,据 Morsi 和 Alexander 的建议,其值与处于不同雷诺数范围的颗粒球形度有关; $Re$  为颗粒相对雷诺数, $Re=\frac{\rho_p|u_p-u|}{\mu}$ .

在一定的离散时间步长内逐步积分式(1)、(2)、(3),就可以得到每个点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:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt}=u_p \\ \frac{dy}{dt}=v_p \\ \frac{dz}{dt}=w_p \end{cases} \tag{4}$$

1.3 积分时间的确定

对颗粒的散布预测中使用了积分时间标尺的概念,它描述了沿颗粒轨迹的湍流运动的时间:

$$T=\int_0^\infty \frac{u_p'(t)u_p'(t+s)}{u_p'^2}ds.$$

积分时间是与颗粒的分散率成比例的,分散率越大,说明在流动上的湍流运动越强.而逐步积分运动方程和轨迹方程所使用的时间步长应取为颗粒与湍流涡团相互作用的时间,它取决于两个时间——湍流涡团的生存周期和颗粒穿过随机涡团的时间.湍流涡团的生存周期可被定义为常数, $\tau=2T_L$ ,或被当作一个随机变量, $\tau=-T_L\log(r)$ .式

中, $r$  为  $0\sim 1$  之间的一个随机数; $T_L$  为流体的拉格朗日积分时间,其值与计算气相流场所选用的湍流模型有关,对于本文所选用的雷诺应力模型有:

$$T_L\approx 0.30\frac{k}{\epsilon}.$$

颗粒穿过随机涡团的时间可被定义为

$$t_{cross}=-\ln\left[1-\left(\frac{L_e}{\tau|u-u_p|}\right)\right].$$

式中: $\tau$  是颗粒的松弛时间; $L_e$  是颗粒所穿过的湍流涡团的长度.

很显然,为了使轨迹的积分计算更加精确,方程积分所用的时间步长应取两者之间的较小者,因为这是实际上颗粒与湍流涡团的作用时间.

1.4 边界条件

本文计算中,气相选用常温下的空气,含尘气体的含尘量为  $9.5\text{g}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$ .作为计算模拟对象的颗粒群为通过  $45\text{ }\mu\text{m}$  的筛网筛孔的滑石粉,密度为  $2\text{ }750\text{kg}/\text{m}^3$ ,假设它的粒径分布满足 Rosin-Rammler 分布.模拟的计算颗粒直径取为每个粒径分布区的中间值,其分布区域作为该颗粒的比率含量.

求解颗粒的运动轨迹,还必须给定颗粒在各种边界处的处理方法:

- (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,颗粒的初始速度取为气体的入口速度,即认为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的原理,以此对颗粒的下一点位置和速度参数进行计算;
- (3) 颗粒运动到排出口边界时,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,被捕集排出,此时也停止对颗粒的追踪.

2 数值计算

本文计算模型为筒体直径为  $190\text{ mm}$  的 Stairmand 高效型旋风分离器.首先,在 GAMBIT 软件中进行前处理:由于分离器结构不规则,故采用区域离散化,分 5 块区域生成非结构化网格;且使得网格分布与计算域的几何形状相一致,能较好地捕捉边界特征,从而能够很好地给出边界信息.然后利用计算流体力学 CFD 软件中的商业软件

FLUENT 对其进行数值模拟. 由于旋风分离器内是强旋转湍流, 具有明显的各向异性, 故而采用 RSM 湍流模型. 另外, 相应的选取差分格式为 QUICK 格式, 压力插补格式为 PRESTO 格式. 以非交错网格的 SIMPLEC 算法为基础计算, 得到了较好的计算结果.

### 3 计算结果及分析

对旋风分离器性能的研究必须包含对大量各种粒径颗粒的运动轨迹的跟踪. 通过模拟颗粒在分离器内的运动轨迹, 可以直观的显示分离器的工作过程, 揭示分离器内气、固分离的机理.

本文仅考察了 3 种粒径的颗粒—— $1.5 \mu\text{m}$ 、 $3.95 \mu\text{m}$  和  $8.2 \mu\text{m}$ , 考察的颗粒入射位置有 3 个——入口端面的左上角、中间及右下角, 如图所示. 图 1、图 2 和图 3 分别表示不同粒径、不同入射位置的颗粒的运动轨迹. 其中图 1(a)~(d) 及图 2、图 3(a) 和(b) 表示不同粒径颗粒由入口面左上角入射; 图 1(e)~(g) 及图 2、图 3(c) 和(d) 表示不同粒径颗粒由入口面中间入射; 图 1(h)~(j) 及图 2、图 3(e) 和(f) 表示不同粒径颗粒由入口面右下角入射.

整体来看, 颗粒的运动状况非常复杂, 且带有很大的随机性. 因为颗粒在旋风分离器内除受气流曳力外, 还受到颗粒与颗粒、颗粒与器壁间的碰撞弹跳以及凝聚、破碎、吸附和静电等的影响.

首先来分析相同粒径、不同入射位置的颗粒的运动情况. 由图 1、图 2 和图 3 可见, 粒径相同, 入射位置不同, 其运动轨迹是不同的; 即使粒径相同, 入射位置也相同, 其运动轨迹也可能各不相同, 最终的位置也不同. 同样的小粒径颗粒, 由相同位置入射, 其运动轨迹可能有很多种情况, 如图 1 中(a)~(d) 所给出的 4 种轨迹彼此差别就很大. 而同样的较大粒径的颗粒, 由相同位置入射, 其运动轨迹差别不大, 如图 3(a) 与(b)、(c) 与(d)、(e) 与(f). 分析其原因, 可能是小颗粒受湍流脉动的影响较显著, 随机性很强, 而大颗粒受影响较小.

对于由不同位置入射的小粒径颗粒, 由图 1 可见: 进入分离器后, 图 1(a)、(e)、(h) 所示的颗粒直接被带入排气管; 图 1(f) 所示的颗粒虽未碰壁, 但受强湍流气流影响, 经过一段复杂运动后, 也被带入排气管; 而图 1(j) 所示的颗粒则沿分离器壁面直接回转而下; 图 1(c)、(i) 所示的颗粒碰壁弹跳一次后, 将轨迹半径突然减小认为是发生

一次碰壁弹跳, 便被气流带入排气管; 而图 1(b) 所示的颗粒碰壁后, 经过复杂运动又贴壁回转而下; 图 1(d) 所示的颗粒一直在上顶盖处运动, 可能形成死循环; 而图 1(g) 所示的颗粒多次与壁面发生碰撞弹跳, 最终还是在强湍流脉动气流中被随机带入排气管. 实际上, 图 1(g) 所示的颗粒是已经被分离下来的颗粒, 它在被锥体下行气流带到灰斗的过程中, 又被灰斗返气的上行气流夹带返混回来了, 形成排尘口返混, 这类夹带返混物被称为“二次尘源”. 二次尘源中的颗粒从排尘口向上运动的过程中, 又受到离心力作用而向外运动, 部分较大的颗粒可被二次分离出来, 而部分较小的颗粒则被带入排气管逃逸. 由此看来, 相同粒径的颗粒, 有的被捕集分离, 有的却被气流带出排气管. 这些都说明, 在实际旋风分离器内, 不可能截然地分出一种临界粒径  $d_{100}$ , 大于它的全可以被捕集, 小于它的全可以被排出, 所以, 这给分离理论的建立带来了很大困难.

总体来看, 从入口面左上角入射的颗粒容易在上顶盖附近徘徊做圆周运动, 其中大部分最终将会被气流带走, 进入分离空间, 有极少量却始终停留在此, 每一刻都大量的颗粒聚集在此, 即形成了所谓的“上灰环”. 从入口面中间位置入射的颗粒较易形成“短路流”, 即一进入分离器筒体就被气流带入排气管, 小粒径颗粒尤为明显, 这严重影响分离效率. 从入口面下部入射的颗粒一般都有较好的分离过程. 由本文的数值计算结果看, 上灰环、排气管短路流及排尘口返混都是影响旋风分离器分离效率的不利因素. 因而, 在旋风分离器的进一步研究中, 应该着重从这几个方面入手, 防止或尽量减弱这些不利现象的发生, 提高分离效率.

另外, 分析相同入射位置、不同粒径颗粒的运动情况. 对比图 1~3 中同样入射位置(左上角、中间或右下角)不同粒径颗粒的运动情况可见: 从同样位置入射, 图 1 中的小颗粒旋转的螺距较小, 它离开(被捕集或逃逸)分离器的时间(路程)较长; 而图 3 中的大颗粒旋转的螺距较大, 很快便贴壁回转而下, 进入灰斗被收集. 其原因可能是, 对于大颗粒来讲, 其所受的离心力较大, 而且重力的作用逐渐突出, 因此大颗粒进入分离器后, 随气流旋转运动的圈数要远少于小颗粒, 大颗粒较早就在筒体壁段碰壁了, 较快的落入分离器下部而被分离; 而对于小颗粒来讲, 所受到的离心力较小, 由于径向气流的向心作用, 容易在排气管出口段被短路而较快地逃逸分离器. 除此之外, 由于小颗粒

对气流的跟随性较好,有相当大一部分颗粒跟随气流在分离器内作旋转运动,直至最后才被气流带出分离器而被分离,或最终落入底部被收集.另一方面,小颗粒碰壁被反弹后,容易混入分离空

间,重复进行分离过程,因而就使得分离过程加长了.由此可见,虽然收缩锥体有利于收集颗粒,但由于使得小颗粒容易碰壁被反弹再次混入分离空间,因而对颗粒捕集也有不利的一面.

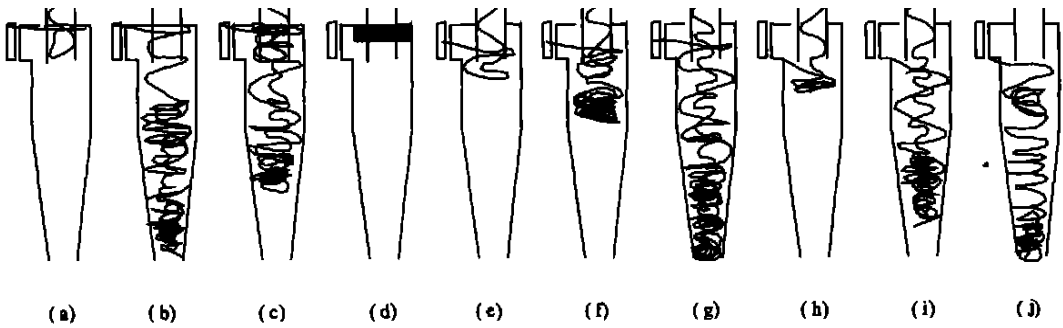


图 1 1.5 μm 直径颗粒轨迹线  
Fig.1 The tracks of 1.5 μm partides

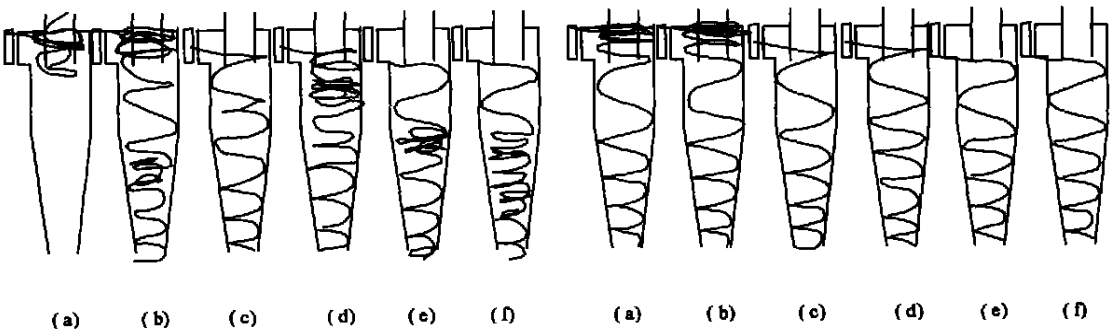


图 2 3.95 μm 直径颗粒轨迹线  
Fig.2 The tracks of 3.95 μm partides

4 结论

本文采用相间耦合的随机轨道模型在拉格朗日坐标下对旋风分离器内颗粒的运动行为进行了模拟研究,该研究有助于对旋风分离器分离机理的认识,为旋风分离器的进一步理论与实验研究提供了依据.主要得到了以下结论:

- (1) 本文采用的数值算法计算简单,当颗粒有较复杂的经历时,能较好的追踪颗粒的运动并预报出了不同粒径和不同入射位置的颗粒的运动轨迹.
- (2) 颗粒的运动轨迹比较复杂,且带有很大的随机性.尤其是小颗粒,受气流湍动影响显著,即使是粒径相同,入射位置也相同,其运动轨迹也可能各不相同,最终的位置也不同;且小粒径颗粒更容易受二次涡流影响,从而降低分离器的分离

效率.

- (3) 旋风分离器内存在上灰环、排气管短路流及排尘口返混等现象,这些都使得颗粒不能被正常分离,是降低分离器分离效率的重要因素.

参考文献:

[ 1 ] 刘子鸿,肖 波,杨家宽.旋风分离器两相流研究综述 [J]. 中国粉体技术,2003,9( 3 ):41~44.  
[ 2 ] 杨卫宏,萧泽强. 双级旋风分离器特性的计算机预报 [J]. 中南工业大学学报,1999, 30( 5 ):493~496.  
[ 3 ] 王小伟.旋风分离器内三维流场的数值模拟及性能计算 [D]. 北京:石油大学,2000.  
[ 4 ] 吴飞雪. 蜗壳式旋风分离器内颗粒浓度场的粒子成像测量方法及分析 [D]. 北京:石油大学,1998.  
[ 5 ] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟 [M]. 北京:清华大学出版社,1991.

( 下转第 59 页)

线性分布[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25

(2): 36~38.

Active Earth Pressure Acting on Retaining Walls with Layered Backfills

LIU Zhong-yu<sup>1</sup>, MA De-sui<sup>2</sup>, HE Sheng-dong<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Topfond Pharmaceutical Co Ltd., Zhumadian 463003, China; 3. Henan Traffic Highway Engineering Bureau, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract** : The rupture line is assumed as a broken line through the heel , and the method of level layer analysis is introduced to calculate the earth pressure acting on the retaining walls with layered backfills . The nonlinear distributions of active earth pressure on retaining walls with rough backs can be explained by using the method . The calculated results show that , for the movement mode of translation , the resultant forces calculated by using the method are approximately equal to those calculated by using Coulomb Theory , while the overturning moments of force and the heights of acting point of the resultant by using the former are higher , which means that the ability of the walls to resist overturning is overestimated by using Coulomb theory for the movement mode of translation . In addition , the analysis on the wall with two layered backfills shows that the filling project with a soft upper layer and a stiff lower layer is better than that with a stiff upper layer and a soft lower layer .

**Key words** : layered backfills ; retaining wall ; active earth pressure ; acting point of the resultant force

( 上接第 17 页)

Numerical Simulation of the Particles' Track in a Cyclone Separator

WEI Xin-li, ZHANG Hai-hong, WANG Ding-biao, MENG Xiang-trui

(College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** : The movement of particles in a cyclone separator has been studied by numerical simulation . We adopt the Reynolds stress model for the single phase and the coupling discrete random walk model for the two phase . The physical mechanism for the movement of particles in a cyclone separator is revealed by describing the particles' tracks . The results show that the particles' movement is more complex and random . The small particles are easily influenced by turbulence , and their tracks and finally positions are different even if their diameters and first positions are the same . The small particles are more easily influenced by the second vortex so that they reduce the separating efficiency . We have also predicted the phenomena affecting the separation efficiency — the up ash loop , the short circuit of exhaust duct and the return confusion of eject dust duct . All this makes for a better understanding of the separation mechanism of cyclone separator , and forms the basis for the further theory and experiment study on the cyclone separator .

**Key words** : cyclone separator ; numerical simulation ; coupling ; track