

DOI: 10.7511/jslx20221011002

# 荷电颗粒在旋转环形通道内分离性能研究

沈家鑫, 彭慧, 王彦入, 尹招琴\*, 包福兵

(中国计量大学浙江省流量计量技术研究重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:**为研究带电旋转环形通道内荷电颗粒的运动和沉积特性,本文使用计算流体力学两相流离散颗粒法对带电旋转环形通道内的荷电颗粒的运动过程进行了模拟。根据模拟结果分析了不同粒径、电压、入口雷诺数和通道长径比等参数对荷电颗粒运动和沉积的影响,研究了荷电颗粒在旋转通道内离心力与电场力之间的竞争关系,探索了离心力和电场力导致的荷电颗粒运动和沉积变化的规律。结果表明,单个不同粒径颗粒具有不同的颗粒逃逸电压区间,区间的大小随着颗粒粒径的增大而增大,且区间的宽度随着通道长径比的增大将会明显变小;多个颗粒的逃逸率曲线,不同粒径的颗粒将会有不同程度的交叉,随着长径比的增大,颗粒逃逸率曲线的高度与交叉会有明显的减小,而随着转速的增大,颗粒逃逸率曲线的交叉会有一定程度的减小,且高度不会有明显变化。

**关键词:**荷电颗粒;旋转流场;环形通道;分离性能;扩散荷电

中图分类号:O359

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0491-08

## 1 引言

气溶胶是固体和液体颗粒在气体中的稳定悬浮液<sup>[1]</sup>。随着不断的深入研究,发现气溶胶在生活与环境气候中起着至关重要的作用<sup>[2,3]</sup>,且越来越多的研究证明新型冠状病毒将会通过气溶胶传播<sup>[4]</sup>。但气溶胶由于其颗粒粒径小,通常在1 nm~1 μm,难以对其进行测量。

现有对颗粒进行测量的方法主要有空气动力学粒径测量法<sup>[5]</sup>、激光散射强度测量法<sup>[6]</sup>以及基于荷电颗粒的电迁移率测量法<sup>[7]</sup>。基于荷电颗粒的电迁移率测量法是根据荷电颗粒在电场作用下产生迁移运动,在颗粒带电量为一个电荷的前提下,颗粒通过一定长度的测量区,粒径越小,颗粒产生的迁移运动距离越大,改变电场大小从而达到筛分颗粒的效果。三种测量方法相比,空气动力学粒径测量法、激光散射强度测量法因理论的限制,其最低能测量的颗粒粒径为300 nm,而基于荷电颗粒的电迁移率测量法,可以精确测量到5 nm,并且在理论上颗粒粒径没有限制。

荷电颗粒因其在电场内独特的运动与沉积特

性,不仅在颗粒测量上有着不可取代的地位,而且广泛应用于很多工业领域,如静电除尘<sup>[8]</sup>、颗粒分选<sup>[9]</sup>、人工雨雪技术<sup>[10]</sup>和材料制造<sup>[11]</sup>等。无论是提高荷电颗粒测量的精度还是增加荷电颗粒的应用效率,都需要深入研究荷电颗粒的运动和沉积特性。关于荷电颗粒运动和沉积特性研究,Zebel<sup>[12]</sup>从理论上分析了均匀电场中流过圆柱状纤维的气溶胶颗粒沉积特性,定义了无量纲参数 $G$ 为带电颗粒的沉积决定性因素,且当 $G < 0$ 时,纤维周围将变成无尘空间。Shimada等<sup>[13]</sup>测量了存在电场的金属搅拌罐内颗粒浓度衰减,带电颗粒的沉积率随着电场的增加或颗粒粒径的减小而增加。Soltani等<sup>[14]</sup>对湍流通道内的玻尔兹曼电荷分布的气溶胶颗粒进行了数值模拟,发现颗粒沉积速度在20 nm~30 nm存在一个局部峰值,同样也得到了静电效应有利于小粒径颗粒沉积的结论。高梦翔等<sup>[15]</sup>对颗粒的荷电方式进行了实验,场致荷电为大颗粒主要的荷电方式,而扩散荷电为小颗粒的主要荷电方式,并且认为增加颗粒在荷电区的时间能够有效地让颗粒荷电量稳定。Lee等<sup>[16]</sup>使用DPM (Discrete particle model)加UDF (User-defined

收稿日期:2022-10-11;修改稿收到日期:2022-12-05.

基金项目:国家自然科学基金(11972335);浙江省基本科研业务费(2022YW101)资助项目.

作者简介:尹招琴\*(1976-)女,博士,教授(E-mail:yinzq@cjlu.edu.cn).

引用本文:沈家鑫,彭慧,王彦入,等.荷电颗粒在旋转环形通道内分离性能研究[J].计算力学学报,2024,41(3):491-498.

SHEN Jia-xin, PENG Hui, WANG Yan-ru, et al. Study on separation performance of charged particles in rotating annular channel [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 491-498.

functions)的模拟方法对平行流在平板上带电颗粒的沉积进行仿真,并与 Liu 等<sup>[17]</sup>的分析数据进行了验证,带电颗粒沉降速度会随着电场强度的大小而改变,亚微米颗粒的沉积速度受重力沉降的影响更大。Fedyaev 等<sup>[18]</sup>理论上得出了带电聚合物颗粒在移动表面上沉积的密度与颗粒粒径的二次方成正比的结论。Ho 等<sup>[19]</sup>对混合对流中垂直波浪板的荷电颗粒进行了数值仿真,随着粒径的减小,沉积速率更容易受到电泳的影响,且沉积速率、传热效率和表面摩擦系数等无量纲参数具有与波浪板相同的波动频率。王晓栋等<sup>[20]</sup>利用荷电颗粒的沉积特性,在传统的旋风分离器中加入了双极荷电技术,结果表明双极荷电技术可显著改善旋风分离器对细颗粒物的分离能力。关于荷电颗粒的研究,之前主要的研究沉积对象为平板,而在工业领域圆管等结构却十分常见,如基于荷电颗粒的电迁移率测量法的扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS)和气溶胶颗粒质量分析仪(APM)等仪器的测量部分皆为圆管结构。对荷电颗粒的充分研究是对荷电颗粒应用和测量的基础,随着荷电颗粒的应用越来越多,需要更加深入理解旋转流场中荷电颗粒运动和沉积特性的机理。

基于以上研究,本文采用计算流体力学离散颗粒法对荷电颗粒在旋转带电环形通道内的运动进行了数值模拟,分析不同粒径、电压、入口雷诺数、通道长径比和转速等参数对扩散荷电颗粒运动与沉积的影响,以探索荷电颗粒在旋转通道内的运动规律,为荷电颗粒筛分提供理论基础。

## 2 数值方法

### 2.1 计算方法

本文使用欧拉-拉格朗日法,该方法在连续相中求解 Navier-Stokes 方程,在离散相中利用 Lagrangian 法求解颗粒轨迹和运动状态。考虑计算的准确性以及效率,对仿真做出以下假设。假设流场为不可压缩流场;颗粒为球形,忽略颗粒之间的相互作用;由于颗粒在气流占比较低,故在计算中进行单向耦合,关注流体对颗粒的作用,忽略颗粒对流体的影响;入口处注入的多颗粒均匀分布,颗粒一旦与壁面接触将立即由壁面捕捉;气流流动不受电场的影响。

#### 2.1.1 气相控制方程

旋转环形通道内气体流动连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中  $\rho$  为气体密度,  $t$  为流过通道的时间,  $\mathbf{u}$  为速度矢量。

气体在旋转环形通道内流动动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中  $p$  为作用于流体微元上的压强,  $\mu$  为流体的运动粘度,  $\mathbf{f}$  为流体微元上受到的体积力。

#### 2.1.2 颗粒运动方程

在气固两相流中,固相颗粒的运动可以采用牛顿第二定律来进行描述,颗粒的运动平衡表达式为

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_E + F_B \quad (3)$$

式中  $u_p$  为颗粒运动速度,  $F_D$  为曳力,  $g$  为重力加速度,  $\rho_p$  为颗粒密度,  $F_E$  为颗粒受到的电场力,  $F_B$  为颗粒受到的布朗力。曳力为

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} (u - u_p) \quad (4)$$

式中  $C_c$  为 Cunningham 滑移校正因子,可计算为

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (5)$$

电场力为电场强度与颗粒所带电荷的乘积,具体公式如下

$$F_E = neV / [r \ln(r_2/r_1)] \quad (6)$$

式中  $n$  为颗粒带的电荷量,  $e$  为基本电荷,  $V$  为两电极之间的电压差,  $r = (r_1 + r_2)/2$  为两半径的平均,  $r_1$  和  $r_2$  分别为圆柱内外壁的半径。

能使颗粒带电方式有场致荷电和扩散荷电两种荷电方式。对于粒径小于 500 nm 的颗粒,扩散荷电具有更好的荷电效果,故本次仿真研究的颗粒荷电方式为扩散荷电,荷电公式如下

$$n = \frac{d_p k_b T}{2K_E e^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2k_b T} \right] \quad (7)$$

式中  $d_p$  为颗粒直径,  $\epsilon_0$  为空气的介电常数,  $K_E = 1/4\pi\epsilon_0$  为取决于单位系统的比例常数,  $T$  为流体的绝对温度,  $k_b$  为玻尔兹曼常数,  $\bar{c}_i$  为离子的热平均速度,  $N_i$  为离子浓度,  $t$  为持续时间。其中离子浓度是指颗粒扩散荷电室内离子数与空腔体积之比,  $N_i t$  通常取值为  $10^8$  ion.s/cm<sup>3</sup>。由以上公式可获得不同粒径颗粒带电荷量,5 nm 颗粒的电荷量为 0.107,10 nm 为 0.27,20 nm 为 0.656,40 nm 为 1.546,100 nm 为 4.65,200 nm 为 10.49。

在研究纳米级小颗粒时,布朗力是不可以忽略的,

$$F_B = \xi_0 \sqrt{12\pi\mu d_p k_b T / (\Delta t)} \quad (8)$$

式中  $\Delta t$  为颗粒运动的时间,  $\xi_0$  为零均值独立于方差的高斯随机数。

### 2.2 边界条件设置

方程采用基于有限体积法的商业 Fluent 软件的层流模型进行求解,使用压力关联方程的半隐式方法算法并使用基于压力校正方法,而且采用二阶迎风差分格式来求解质量和动量方程的守恒。使用 Fluent 软件的离散相模型对粒子运动进行建模,采用牛顿第二定律对颗粒的运动进行仿真,通过外加 UDF 的方式添加颗粒受到的电场力,最终得到颗粒的轨迹、速度及位置等参数。

仿真模型结构为旋转的圆环通道,其外径  $D$  为 50 mm,内径  $d$  为 48 mm,轴长  $L$  为 100 mm,结构如图 1 所示。

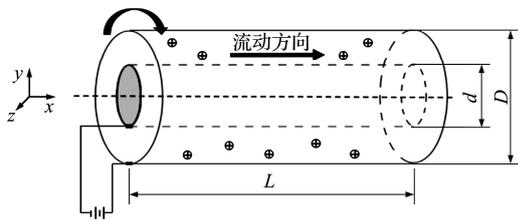


图 1 模型结构  
Fig.1 Model structure

设置的入口条件为速度入口,出口为大气,壁面为不可滑移且以  $X$  轴坐旋转运动的壁面,内外壁面之间形成一个由外壁面指向内壁面的电场,壁面旋转的速度为 20 rad/s。内部流体、颗粒以及壁面的温度均为 300 K,且为绝热。颗粒以单个或面的方式从入口处注入流体内,所带电荷为正电荷,颗粒密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>。单个颗粒释放时,释放位置为两壁面间的中间位置;从入口面释放多个颗粒时,释放的颗粒均匀分布在入口面,共 6400 个颗粒,并考虑了颗粒的布朗力的影响。由于布朗运动是一个随机过程,特定数量的注入粒子的预测沉积效率略有不同。对五次计算结果进行统计分析,误差为 0.028%,且 Sardari 等<sup>[21]</sup>也是用了 5 次结果平均。因此,本文对每种情况进行了 5 次模拟结果平均。

## 3 结果与分析

### 3.1 方法验证

逃逸率  $\eta$  定义为通道出口颗粒数与释放总颗粒数的比值。逃逸率的大小能够充分展现在通道内颗粒的沉积和逃逸情况。为了验证模型的正确性,对此次颗粒在流场中的仿真结果的逃逸率与 Gormley 和 Kennedy 方程<sup>[22]</sup>进行了比较,方程为  $P_{G\&K} = 0.91\exp(-7.54\alpha) + 0.0531\exp(-85.7\alpha)$  ( $\alpha \geq 0.005$ )  $P_{G\&K} = 1 - 2.96\alpha^{2/3} + 0.4\alpha$  ( $\alpha < 0.005$ ) (9)

式中  $\alpha$  为无量纲沉积参数

$$\alpha = [\pi D_B L (r_2 + r_1)] / [Q (r_2 - r_1)] \quad (10)$$

式中  $D_B$  为颗粒的布朗扩散系数,  $L$  为通道长度,  $Q$  为流量大小。

结果如图 2 所示,仿真的颗粒逃逸率与公式的预测逃逸率有较高的吻合度,最大的误差出现在最小的粒径 15 nm 上,这是由于布朗力产生的随机误差导致。

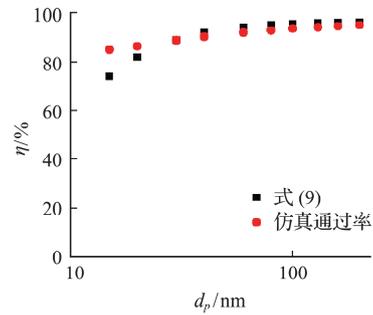


图 2 模型逃逸率验证  
Fig.2 Model escape rate verification

为了验证荷电颗粒受力模型的正确性,对不同粒径荷电纳米颗粒在二维矩形电场通道内的沉积率(即沉积率 = 1 -  $\eta$ )与 Sardari 等<sup>[21]</sup>的结果进行了比较,如图 3 所示。可以看出,在电场力主导的条件下,不同粒径的沉积结果有较好的吻合性,说明了静电模型的正确性。

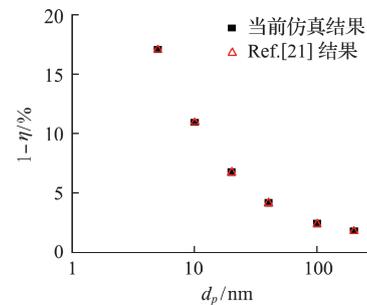


图 3 结果验证  
Fig.3 Result verification

### 3.2 单荷电颗粒在旋转流场中的运动规律

为了研究旋转速度、入口雷诺数和电场强度对颗粒轨迹的影响,计算了在不同条件下同一释放位置颗粒的轨迹,对颗粒的速度和被捕捉位置等物理量进行了进一步的分析。

入口雷诺数的定义为

$$Re_x = \rho u_{in} d_h / \mu \quad (11)$$

式中  $u_{in}$  为入口速度,  $d_h$  为轴向通流流道的当量直径。

颗粒的运动结果是曳力、离心力、静电力和布朗力共同的结果,颗粒会受到曳力的影响而不断做螺旋运动,同时受静电力和离心力的竞争作用而产

生偏移,由于颗粒粒径小,布朗力将会使颗粒运动具有随机性。图4为不同流动雷诺数时,100 nm颗粒在不同转速下的沉积位置,可以看出,随着转速的不断增大,颗粒在轴向移动的距离越短,这是在旋转流场中颗粒受到离心力的影响导致的。而颗粒运动过程的旋转周期却随着转速的增大而增大。在入口雷诺数为13.7的条件下,转速为10 rad/s~30 rad/s的颗粒均沉积在了壁面,且转速越大,沉积位置离入口越近;而在入口雷诺数为41.1时,只有转速为30 rad/s的颗粒能够沉积在壁面。不同的入口流速下,同一转速颗粒的沉积位置将会随着入口流速的减小而更加贴近入口。可见增大颗粒受到的离心力与减小轴向曳力均会使颗粒更易沉积,故对于利用颗粒离心力而产生颗粒筛分的仪器,如气溶胶颗粒质量仪等,可以通过降低入口速度,提高转速而让颗粒有更好的筛分。

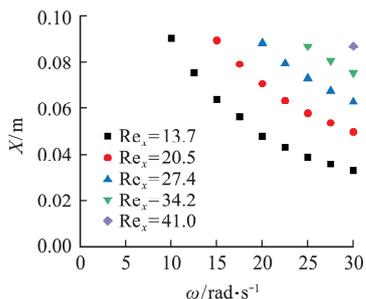


图4 不同入口雷诺数下颗粒的沉积位置  
Fig. 4 Deposition position of particles at different inlet Reynolds numbers

图5为在转速为20 rad/s和入口雷诺数为13.7,单个100 nm荷电颗粒不同电压下的颗粒沉

积位置,图5的颗粒沉积位置反映了颗粒受到的离心力和静电力之间的竞争关系。当电压小于42 V时,颗粒在运动的过程中,颗粒受到的静电力在竞争关系中处于劣势,导致颗粒向外壁面迁移,将会由外壁面捕捉;当电压大于89 V时,在运动过程中,颗粒受到的静电力在竞争关系中处于优势,导致颗粒向内壁迁移,颗粒会由内壁面捕捉。而电压在42 V~89 V时,颗粒能够从出口逃逸出。颗粒可逃逸的电压是一个区间,这是因为颗粒在旋转运动过程中静电力与离心力两者竞争处于平衡状态,或某一方力只有微小的优势,只会导致颗粒向壁面略微的靠近,但移动的距离并没有超过颗粒初始位置与壁面的距离,所以并没有被捕捉。

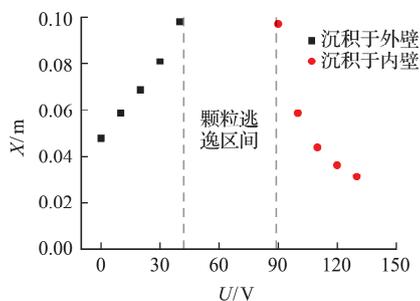


图5 不同电压下颗粒的沉积位置  
Fig. 5 Deposition position of particles under different voltages

在转速为20 rad/s、入口雷诺数为13.7的工况下,对 $d_p=5$  nm,10 nm,20 nm,40 nm和200 nm颗粒的逃逸区间进行了仿真,仿真结果如图6所示。得到5 nm颗粒逃逸区间电压为1.8 V~3.7 V,10 nm为3.7 V~7.9 V,20 nm为9.3 V~19.9 V,40 nm为

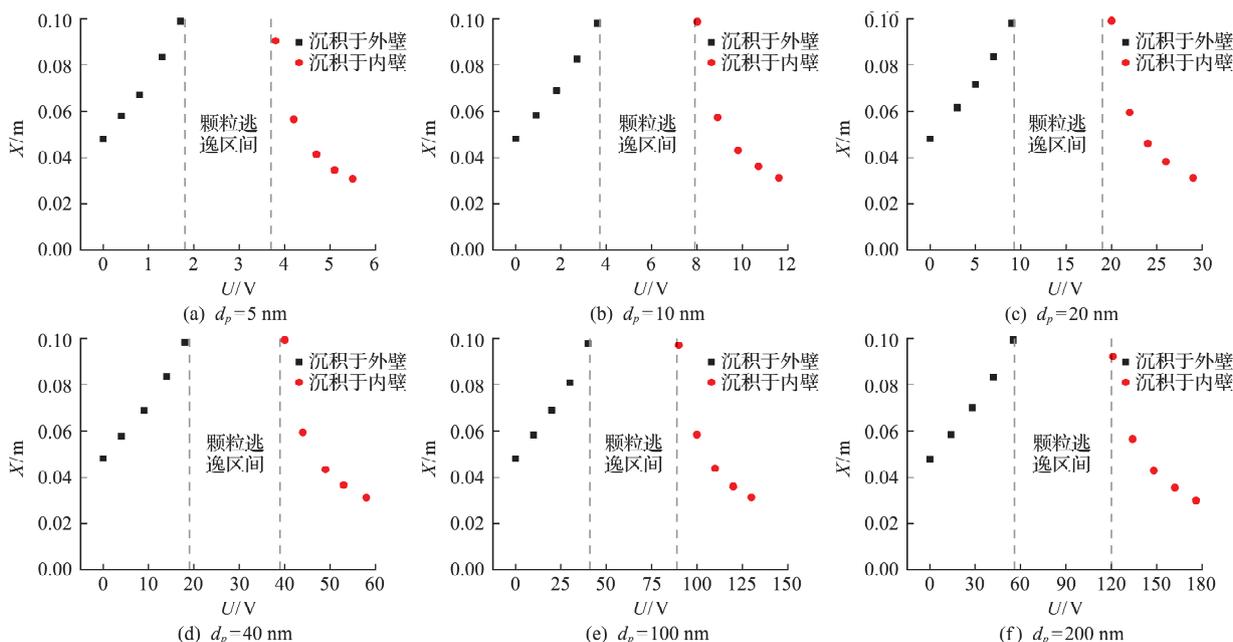


图6 同流速下不同粒径颗粒的沉积位置  
Fig. 6 Deposition position of particles with different sizes at the same flow velocity

19 V~39 V, 100 nm 为 42 V~89 V, 200 nm 为 55 V~121V。结果表明,随着颗粒的粒径增大,颗粒逃逸区间的电压也随之不断增大。这是由于在大颗粒做旋转运动过程中产生的离心力将会更大,在相同的电压下,大颗粒将会更容易产生向外壁移动的趋势,故需要更大的电压去平衡离心力带来的影响,而让颗粒产生更少的径向偏移。

为了研究流场模型对颗粒运动的影响,定义流场的轴长  $L$  与上流场外壁的直径  $D$  的比值为长径比。同样对长径比为 3/1 和 4/1(即长度为 150 mm 和 200 mm)进行了计算,得到当  $L/D=3$  时,5 nm 颗粒逃逸区间电压为 2.7 V~3.7 V, 10 nm 为 5.5 V~7.9 V, 20 nm 为 13.8 V~19.9 V, 40 nm 为 28 V~39 V, 100 nm 为 62 V~89 V, 200 nm 为 83 V~121 V; 当  $L/D=4$  时,5 nm 颗粒逃逸区间电压为 3.2 V~3.7 V, 10nm 为 6.7 V~7.9 V, 20nm 为 16.7 V~19.9 V, 40 nm 为 34 V~39 V, 100 nm 为 75 V~89 V, 200 nm 为 101 V~121 V。结果表明,随着长径比的增加,不同粒径颗粒的逃逸区间具有不同程度上的缩小。导致该现象的原因主要有,一是随着长径比的增加,在相同的入口雷诺数条件下,颗粒具有更长的时间在环形通道停留,更容易因为未平衡的径向合力和布朗力产生更多的径向位移而由壁面捕捉;二是因为随着长径比的增加,通道内的表面积也随之增加,在颗粒布朗力的随机影响下,颗粒具有了更多碰撞壁面的可能性,导致沉积颗粒的数量增加。

### 3.3 多荷电颗粒在旋转流场中的逃逸率

逃逸率定义为逃逸颗粒数与释放总颗粒数的比值,即

$$\eta = N_{\text{escape}} / N_{\text{total}} \times 100\% \quad (12)$$

逃逸率的大小能够直观地表现在旋转流场与电场两场作用下的颗粒分级情况和分级性能。

图 7 为在不同入口雷诺数、流场转速为 20 rad/s 和不同  $L/D$  条件下,100 nm 荷电颗粒在不同电压下的颗粒逃逸率。由结果得知,数据在电压 0 V~160 V 的区间内成三角形,最大的峰值在 60 V~80 V 区间内。随着入口流速的不断增加,同一电压下的颗粒逃逸率也随之不断增加,且在取样区间两端尤为明显。这说明在旋转流场中,颗粒由于曳力跟随气流一起流动,增加入口流速则会缩短通过旋转流场的时间,导致颗粒运动过程中受到相同静电力和离心力的径向偏移量减小,而在峰值区间随着入口雷诺数的增大,并没有像区间两端明显的变化,是因为颗粒受到的离心力与静电力贴近平衡状

态,虽颗粒的轴向速度随着入口流速的增大而增大,但径向的偏移由颗粒的离心力与静电力决定,处于平衡状态的颗粒不受轴向速度的影响,会随着气流而逃逸出。

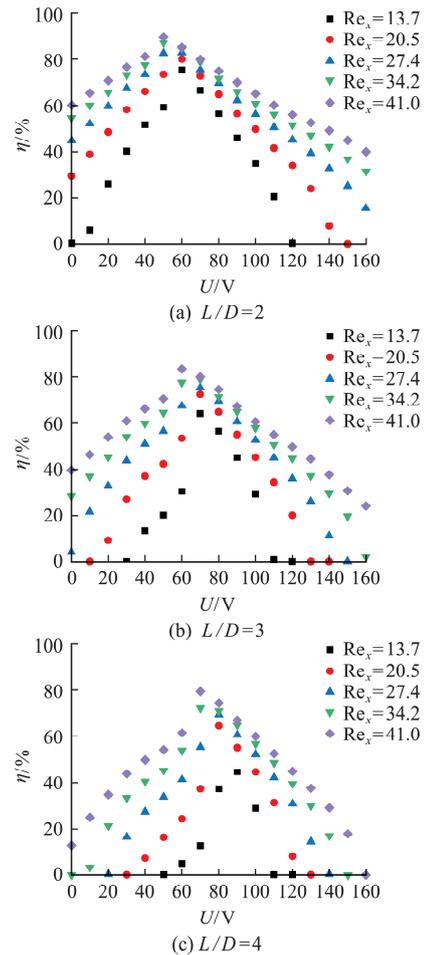


图 7 不同电压和入口雷诺数下颗粒逃逸率  
Fig. 7 Particle escape rate under different voltage and inlet Reynolds number

通过不同长径比下的颗粒逃逸率对比,发现随着长径比的增加,颗粒总体的逃逸率将会不断减小,且颗粒逃逸率随电压的变化量也不断增大。颗粒逃逸率减小是由于颗粒在通道内的停留时间变长和通道面积变大这两个原因,而在大长径比的通道内,电压带来的颗粒逃逸率的变化更大,说明大长径比的通道通过电压筛分颗粒更加敏感。

图 8 为在流场转速为 20 rad/s、入口雷诺数为 13.7 的条件下,粒径为 5 nm, 10 nm, 20 nm, 40 nm, 100 nm 和 200 nm 的荷电颗粒在不同电压下的逃逸率,并对结果进行了  $\beta$  样线拟合。结果表明,大粒径颗粒获得较大的逃逸率往往需要更大的电压。各个粒径颗粒的逃逸率存在不同程度的交叉,这说明在同一电压下,在旋转流场颗粒分级中,出口得到的颗粒往往不是完全单一粒径的颗粒。尤其是

在粒径较小的情况,颗粒逃逸率的交叉更为密切,这是由于小颗粒的跟随性相较于大颗粒更好,难于利用离心力与静电力对小颗粒进行分级,且小颗粒受到的布朗力影响更大,对粒径分级带来了更大的误差。无论是哪种长径比,小纳米颗粒的逃逸率曲线相较于大颗粒具有更大的宽度,这是由于小颗粒受到布朗力的影响更大而产生更多的偏移可能性,这也说明小颗粒在筛分过程中具有更大的困难性。而增大长径比,颗粒逃逸率曲线在高度和宽度上有了明显的减小,说明增大长径比可以使通道筛分颗粒具有更高的分辨率,但是也会使更多的颗粒因为布朗力等原因而损失在通道内。故在筛分过程中做好分辨率与逃逸率的取舍,选择合适的长径比尤为重要。

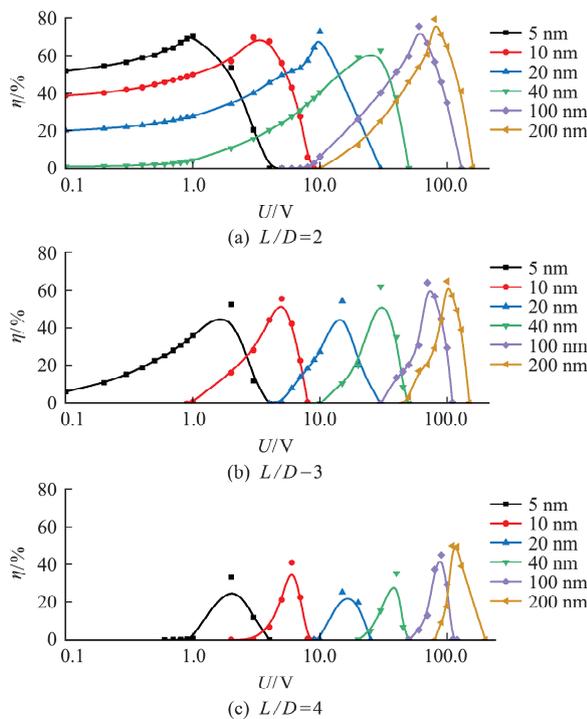


图8 不同电压下不同粒径颗粒逃逸率

Fig. 8 Escape rate of particles with different diameters under different voltages

图9为流场转速为10 rad/s,20 rad/s和30 rad/s,入口雷诺数为13.7条件下,100 nm 电荷颗粒在不同电压下的逃逸率,并对结果进行了 $\beta$ 样线拟合。结果表明,颗粒由于曳力而随着气流做不同转速的旋转运动,逃逸率曲线有明显的宽度减小与右移变化,而且发现这三条拟合曲线中30 rad/s条件下的拟合曲线在宽度上更小,故提高转速往往会提高颗粒分级的分辨率。

为了研究转速对不同颗粒分级的影响,图10给出了不同转速下不同粒径颗粒的逃逸率与电压之间的关系,表明了不同转速下对于不同粒径颗粒

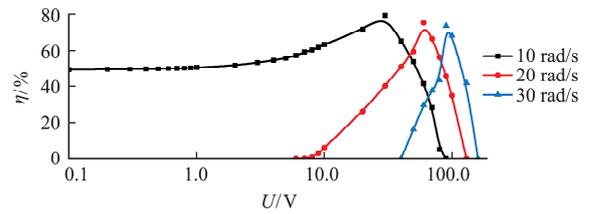


图9 不同旋转速度下颗粒逃逸率

Fig. 9 Escape rate of particles at different rotational speeds

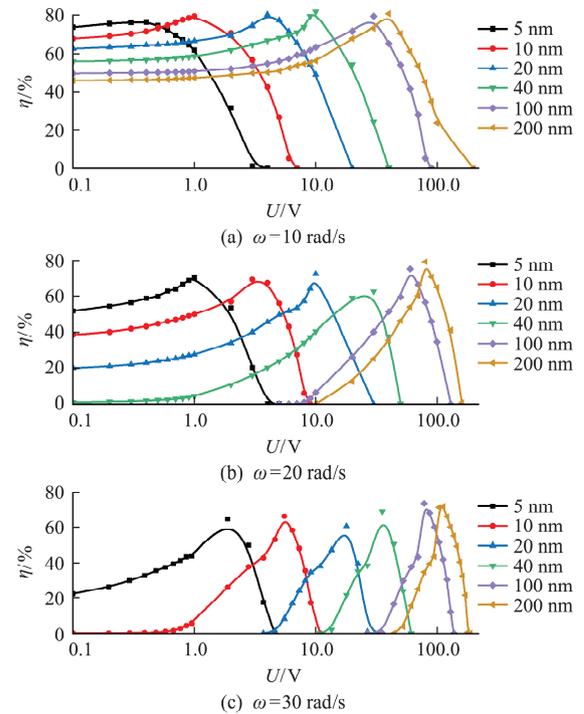


图10 不同转速下不同粒径颗粒逃逸率

Fig. 10 Escape rate of particles with different diameters at different rotating speeds

逃逸率的影响,随着转速的增加,各个粒径颗粒的分级电压都有增加,这也是由于转速增加导致平衡电压增加导致的。但是随着转速的增大,各个粒径在同个电压下的交错越来越少,这说明增大转速一定程度上可以让颗粒分级的效果更好,而且可以发现增大转速相较于增大长径比带来的逃逸率峰值的影响更小。这是由于增大长径比的原因是颗粒在通道内的停留时间变长和通道面积变大,平衡的颗粒由于布朗力的作用也会沉积于壁面导致颗粒的损失,而增加转速,处于静电力与离心力平衡的颗粒,从轴向看,径向的入口雷诺数是一致的,导致径向的曳力是不变的,故通过通道的时间是相同的,而且通道面积也没有改变,所以布朗力带来的影响并没有增加。但是转速不能为了分级效果的增加而无限制增加,需考虑在实际需要中分级精度的需要,用于带动通道旋转等设备的工作上限以及平衡电压增大带来的影响。

## 4 结 论

本文采用计算流体力学两相离散颗粒方法对带电旋转环形通道内的荷电颗粒运动进行了仿真模拟,分析了粒径、电压、入口雷诺数和通道长径比等参数对荷电颗粒运动的影响规律。主要结论如下。

(1) 单个不同粒径颗粒具有不同的颗粒逃逸电压区间,区间的大小随着颗粒粒径的增大而增大,且区间的宽度随着通道长径比的增大将会明显变小。

(2) 多个颗粒的逃逸率随电压的变化大致成三角形,逃逸率最高点由于离心力与静电力处于平衡状态受到长径比与入口雷诺数的变化小,而逃逸率两端会因为长径比的增大和入口雷诺数的减小而明显减小。

(3) 多个颗粒的逃逸率曲线,不同粒径的颗粒将会有不同程度的交叉,且颗粒越小逃逸率曲线的交叉因为布朗力的影响而交叉得更密切,随着长径比的增大,颗粒逃逸率曲线的高度与宽度会有明显缩短和减小,这说明将会拥有更好的分辨率,但也会有更多的颗粒损失。

(4) 增大转速带来的颗粒逃逸曲线的影响相较于增大长径比,不仅能够使颗粒具有更好的分辨率,且不会影响处于静电力与离心力平衡位置的颗粒的逃逸率。但是由于装置上限和分级精度等原因,需要选择合适的分级转速而不是一味地提高转速。

## 参考文献(References):

- [1] Colbeck I, Lazaridis M. *Aerosol Science* [M]. USA: Wiley Online Library, 2014.
- [2] Darquenne C. Aerosol deposition in health and disease [J]. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 2012, **25**(3): 140-147.
- [3] Bellouin N, Quaas J, Gryspeerdt E, et al. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change [J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, **58**(1): e2019RG000660.
- [4] 丁 婷, 张 亚, 陈晓乐, 等. 新冠肺炎病人吸入药物肺内定向投递的数值模拟研究 [J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(5): 539-544. (DING Ting, ZHANG Ya, CHEN Xiao-le, et al. Numerical simulations of the targeted delivery of the inhalable drug in pulmonary airway of a COVID-19 patient [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(5): 539-544. (In Chinese))
- [5] Anderson E L, Turnham P, Griffin J R, et al. Consideration of the aerosol transmission for COVID-19 and public health [J]. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 2020, **40**(5): 902-907.
- [6] Ma Z H, Merkus H G, de Smet J G A E, et al. New developments in particle characterization by laser diffraction: Size and shape [J]. *Powder Technology*, 2000, **111**(1-2): 66-78.
- [7] Sioutas C. Evaluation of the measurement performance of the scanning mobility particle sizer and aerodynamic particle sizer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1999, **30**(1): 84-92.
- [8] Zhou W N, Jiang R B, Sun Y F, et al. Study on multiphysical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes [J]. *Powder Technology*, 2021, **381**: 412-420.
- [9] Felsing S, Kochleus C, Buchinger S, et al. A new approach in separating microplastics from environmental samples based on their electrostatic behavior [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 20-28.
- [10] Yang Z, Wu Q, Zhang M, et al. Distributed control system for catalysing the formation of artificial rainfall and snow using charged particles [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **474**(5): 052108.
- [11] 程宏旻, Weinhart T. 关于采用粗粒化提高颗粒材料多尺度模拟守恒特性的研究 [J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(3): 373-380. (CHENG Hong-yang, Weinhart T. On the conservation properties of CG-enriched concurrent coupling methods for multi-scale modeling of granular materials [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(3): 373-380. (In Chinese))
- [12] Zebel G. Deposition of aerosol flowing past a cylindrical fiber in a uniform electric field [J]. *Journal of Colloid Science*, 1965, **20**(6): 522-543.
- [13] Shimada M, Okuyama K, Kousaka Y, et al. Enhancement of Brownian and turbulent diffusive deposition of charged aerosol particles in the presence of an electric field [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1989, **128**(1): 157-168.
- [14] Soltani M, Ahmadi G, Ounis H, et al. Direct simulation of charged particle deposition in a turbulent flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, **24**(1): 77-92.
- [15] 高梦翔, 姚 鑫, 朱 勇, 等. 双区静电除尘器的数值模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3698-3703. (GAO Meng-xiang, YAO Xin, ZHU Yong, et al. Numerical simulation study of two-stage electrostatic precipitator [J]. *China Environmental Science*, 2018,

- 38(10):3698-3703. (in Chinese))
- [16] Lee H, Yook S J, Lee K S. Deposition of charged particles on a flat plate in parallel flow in the presence of an electric field [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2014, **27**(2):287-293.
- [17] Liu B Y H. Deposition of charged and uncharged aerosol particles on semiconductor wafers [A]. Proceeding of 33<sup>rd</sup> Annual Technical Meeting of the IES [C]. 1987.
- [18] Fedyaev V L, Khaliulin V I. Mathematical modeling of deposition process of charged polymeric particles on moving surface [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, **1328**(1):012090.
- [19] Ho P Y, Chen C K, Huang K H. Combined effects of thermophoresis and electrophoresis on particle deposition in mixed convection flow onto a vertical wavy plate [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, **101**:116-121.
- [20] 王晓栋, 边腾飞, 黄 华, 等. 基于双极荷电技术的旋风分离器分离性能强化研究 [J]. 高校化学工程学报, 2022, **36**(3):336-345. (WANG Xiao-dong, BIAN Teng-fei, HUANG Hua, et al. Study on enhancing of separation performance of bipolar charging technology-based cyclone separators [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese University*, 2022, **36**(3):336-345. (in Chinese))
- [21] Sardari P T, Rahimzadeh H, Ahmadi G, et al. Nanoparticle deposition in the presence of electric field [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **126**:169-179.
- [22] Hinds. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* [M]. Wiley, 1982.

## Study on separation performance of charged particles in rotating annular channel

SHEN Jia-xin, PENG Hui, WANG Yan-ru, YIN Zhao-qin\*, BAO Fu-bing

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Flow Measurement Technology,

China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study the motion and deposition characteristics of charged particles in the charged rotating annular channel, the computational fluid dynamics with two-phase flow discrete particle method was used to simulate the motion of the charged particles in the charged rotating annular channel. According to the simulation results, the effects of different particle size, voltage, inlet Reynolds number and channel parameters on the movement and deposition of charged particles have been analyzed. The competitive relationship between the centrifugal force and the electric field force of the charged particles in the rotating channel has been studied, and the motion and deposition of the charged particles caused by the centrifugal force and the electric field force were explored. The results show that a single particle with different particle sizes has different escape voltage intervals. The size of the interval increases with the increase of particle size, and the width of the interval decreases significantly with the increase of aspect ratio. For the escape rate curves of multiple particles, particles with different diameters will have different degrees of intersection. With the increase of the aspect ratio, the height and cross of the escape rate curves of particles will decrease significantly, while with the increase of the rotational speed, the intersection of the escape rate curves of particles will decrease to a certain extent, and the height will not change significantly.

**Key words:** charged particles; rotating flow field; annular channel; separation performance; diffusion charging