

# 基于CFD-DEM耦合模型的超细颗粒在微冲击射流中沉积过程研究

王彦入, 尹招琴\*, 包福兵, 沈家鑫  
中国计量大学浙江省流量测量技术重点实验室

## 摘要

超细颗粒在微冲击射流中的沉积在表面涂层设备和粒度测量仪器等多相流领域中应用广泛。探究不同的颗粒沉积形态是一个热门且棘手的课题, 对此学者们展开了一系列研究来揭示其形成机理。研究人员一般采用实验的方法或者计算流体力学离散颗粒模型(CFD-DPM)来预测颗粒在冲击射流中的运动, 这需要耗费较大的成本或者存在与实际情况有偏差的情况。

本文采用计算流体力学与离散单元法的耦合模型(CFD-DEM), 对微冲击射流的流动特征以及颗粒的沉积特性进行分析。在模拟中, 我们发现了两种类型的颗粒沉积物(“晕”沉积物和“环”沉积物), 并前人所得实验结果比对验证, 非常吻合。

结果表明, 颗粒的沉积形态由冲击流场结构和颗粒惯性共同决定。颗粒撞击固体表面后会出现颗粒反弹或颗粒不反弹两种运动状态, 而在沉积过程中有不同的能量变化过程, 导致颗粒形成两种类型的沉积物。随后, 本文总结了在不同流动雷诺数( $Re$ )和颗粒斯托克斯数( $Stk$ )下的颗粒沉积过程, 并得到了在不同 $Re$ 和 $Stk$ 下“晕”沉积物和“环”沉积物的分布图。进一步分析得知,  $Re$ 对冲击流场中涡的大小和涡的位置产生影响, 进而影响颗粒沉积物的分布大小。这些沉积物大多位于流体流速较低的区域。“环”沉积物位于涡量大的区域, 而“晕”沉积物位于涡量小的区域。此外, 本文还定量给出了在不同 $Re$ 和 $Stk$ 下颗粒沉积物的半径。

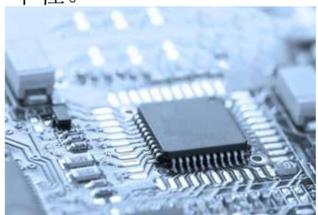


图 1. 半导体芯片

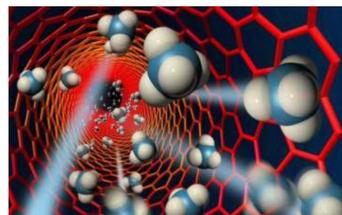


图 2. 半导体聚合物



图 3. 药用粉末吸入器

## 背景介绍

超细颗粒在微冲击射流中的沉积广泛存在于化学工程, 环境质量检测, 药用粉末吸入器和气溶胶粒径测量等多相流领域。在射流冲击流场中, 典型的装置主要由单个或多个喷嘴和喷嘴下方的冲击平板(收集板)所组成。其中, 喷嘴用于加速气溶胶的流动, 而冲击平板用于收集一定尺寸的颗粒。当载有颗粒相的气流通过喷嘴时, 由于冲击平板的拦截作用, 改变了气流原来的流动方向, 导致较大尺寸的粒子的运动轨迹会由于惯性大而与空气流线发生偏离, 最终撞击在冲击平板上被收集, 而较小的粒子会跟随气流继续运动。颗粒的沉积形态和颗粒的收集效率是分析超细颗粒在微冲击射流中沉积过程的关键特性。通常情况下, 多余的颗粒沉积会影响微机电系统的工作效率, 例如冷喷涂、真空蒸镀机和惯性冲击器。探究不同形状的颗粒沉积物的特性是一个热门且棘手的课题。

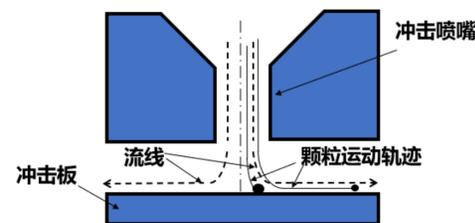


图 4. 惯性冲击器的示意图

## 理论方法

采用CFD方法来计算冲击射流流场的流动。流体相的质量守恒方程和动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$
$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g - S_{ai}$$

采用DEM模型来计算冲击射流流场中颗粒的运动。通过对每个颗粒进行受力分析来预测离散相的轨迹。由于考虑到了粒子旋转的情况, 因此计算了颗粒角速度的变化。根据牛顿第二定律求解每个颗粒的运动方程:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_c$$
$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = \sum (r_c \times F_c)$$

## 物理模型

为了关注流场的流动特性和颗粒的运动特性在轴向和径向上的变化, 设计了一个带有圆形喷嘴的三维模型。其几何模型示意图如图5所示。采用O-Block方法进行六面体结构化网格划分, 并在冲击射流区域进行相应的加密处理。其中,  $W$ 是圆形喷嘴的直径,  $T$ 是喷嘴喉部的长度,  $S$ 是从喷嘴出口到冲击平板的距离,  $D$ 是冲击平板的直径。在本文中, 将模型的参数设置为 $W=1.4\text{mm}$ 、 $S=3\text{mm}$ 、 $T=3\text{mm}$ 和 $D=7\text{mm}$ 。

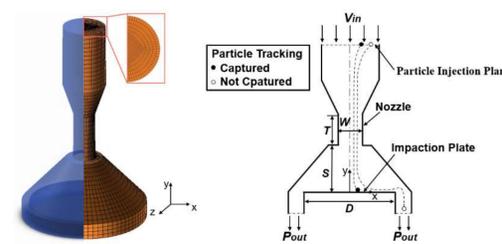


图 5. 模型图

## 结论

本文考虑了颗粒与颗粒的相互作用、流体与颗粒的相互作用和颗粒与平板的相互作用, 使用CFD-DEM方法对微冲击射流的流动特征以及颗粒的沉积特性进行分析。

(1)颗粒的沉积形态由冲击流场结构和颗粒惯性共同决定。颗粒撞击固体表面后会出现颗粒反弹或颗粒不反弹两种运动状态, 而在沉积过程中有不同的能量变化过程, 导致颗粒形成两种类型的沉积物。

(2)本文总结了在不同流动雷诺数和斯托克斯数下的颗粒沉积过程, 并得到了在不同流动雷诺数和斯托克斯数下“晕”沉积物和“环”沉积物的分布图。

(3)流动雷诺数对冲击流场中涡的大小和涡的位置产生影响, 进而影响颗粒沉积物的分布大小。这些沉积物大多位于流体流速较低的区域。“环”沉积物和“晕”沉积物中的主沉积部分位于涡量大的区域, 而“晕”沉积物中的晕沉积部分位于涡量小的区域。此外, 本文还定量给出了在不同流动雷诺数和斯托克斯数下颗粒沉积物的半径。

## 结果分析

在冲击平板上观察到两种形态的沉积物, 分别为“晕”和“环”沉积。其中, “晕”沉积物由两部分组成, 一部分是环状沉积, 也叫主沉积; 另一部分是环绕在主沉积周围的晕沉积。

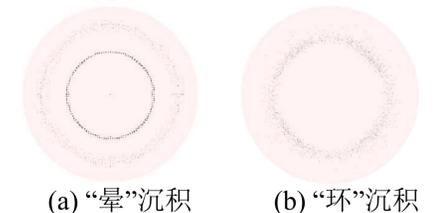


图 6. 冲击板上两种形态的颗粒沉积物

由于滞止区的减速以及颗粒和平板碰撞时的能量损失, 导致“晕”沉积物中有两部分沉积。具有较小斯托克斯数的颗粒由于惯性小表现出较强的气流跟随性, 最终形成了“环”沉积物。

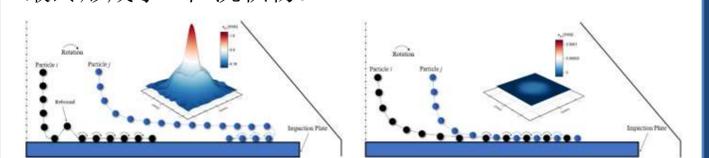


图 7. 冲击板上方的颗粒轨迹示意图

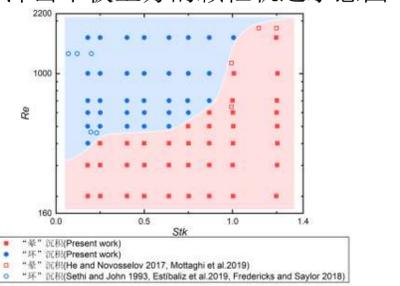


图 8. “晕”沉积和“环”沉积的分区图

## 联系方式

通讯作者: 尹招琴  
邮箱: yinzq@cjlu.edu.cn