

手套箱内粉末倾倒产生气溶胶的分布特性研究

周艳玲, 骆志平, 毕远杰, 郭金森, 王欢

中国原子能科学研究院 辐射安全研究所, 北京 102413

摘要: **目的** 考察粒径、风速和倾倒速度对后处理厂粉末倾倒过程产生的气溶胶浓度分布的影响。**方法** 选择 CeO_2 粉末作为 PuO_2 替代材料, 用 FLUENT 软件对不同操作条件下 CeO_2 粉末倾倒过程进行数值计算, 再利用粒径谱仪对不同倾倒速度下的气溶胶浓度分布进行测量, 验证模拟结果准确性。**结果** 小粒径的颗粒更可能受周围气体的曳力影响而从主流区域脱离出来形成散射粉尘, 其扩散范围的半径也随着粒径的减小而扩大。通风速度在 1 m/s 以下可以减少操作过程粉尘的扬起, 在一定程度上降低箱室内粉尘颗粒的浓度。粉末倾倒过程, 以 2~3 s 将勺子逆时针旋转 100° 的速度倾倒粉末在托盘右侧产生的粉尘气溶胶较少。**结论** 在对粒径较小的粉末颗粒进行操作时, 不同位置气溶胶的监测应该引起更多的关注; 进风速度的变化使得手套箱内的流场变得复杂, 粉尘颗粒的体积分数与气流形成涡流的大小和涡流位置有关, 风速越大, 对粉末倾倒过程的影响越大; 实验结果与模拟结果基本相符, 较慢的倾倒速度在托盘附近处产生的气溶胶颗粒较少。

关键词: 放射性气溶胶; 气固两相流; 双流体模型; 气溶胶粒径谱仪; 手套箱

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)02-0148-06

Study on the distribution characteristics of aerosol produced by powder dumping in glove box

ZHOU Yanling, LUO Zhiping, BI Yuanjie, GUO Jinsen, WANG Huan

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China

Abstract: **Objective** To investigate the effects of particle size, wind speed and dumping velocity on aerosol concentration distribution during powder dumping in a reprocessing plant. **Methods** CeO_2 powder was selected as the substitute material of PuO_2 . FLUENT software was used to calculate the pouring process of CeO_2 powder under different operation conditions. Then the aerosol concentration distribution under different dumping speeds was measured by particle size spectrometer to verify the accuracy of simulation results. **Results** The particles with small particle size are more likely to be separated from the mainstream area by the drag force of the surrounding gas, and the radius of the diffusion range also increases with the decrease of the particle size. 2) When the ventilation speed is less than 1 m/s, the dust lifting can be reduced and the concentration of dust particles in the chamber can be reduced to a certain extent. 3) In the process of powder dumping, the spoon is rotated anticlockwise at a speed of 100° in 2~3 s, and less dust aerosol is produced on the right side of the tray. **Conclusion** When operating the powder particles with smaller particle size, more attention should be paid to the monitoring of aerosol at different positions; the change of air inlet velocity makes the flow field in glove box more complex, and the volume fraction of dust particles is related to the size and location of vortex formed by airflow. The greater the wind speed, the greater the impact on the powder dumping process. The experimental results are basically consistent with the simulation results, and the results show that the lower the dumping speed, the smaller the aerosol concentration near the tray.

Keywords: Radioactive Aerosol; Gas-solid Two-Phase Flow; Two Fluid Model; Aerosol Particle Size Spectrometer; Glove Box

Corresponding author: LUO Zhiping, E-mail: luozhiping00@163.com

乏燃料后处理是核燃料循环非常重要的一部分, 是实现核能可持续发展的重要途径。在后处理厂铀尾端对 PuO_2 粉末进行物料转移或称重等操作时, 涉及倾倒粉末这一过程, 该过程释放出来的放射性核素会附着在尘埃或水珠上进而形成 α 放射性气溶胶, 会对大气造成污染并危害人体的健康^[1-2]。粒径 < 10 μm

的 α 放射性气溶胶被操作人员吸入后易沉积并滞留在呼吸道、骨骼、肝脏等部位难以排出,引起长期的内照射损伤,同时也会增加心脏疾病、慢性阻塞性肺病、肺肿瘤等的发病率^[3]。在物料转移或称重时,活度浓度不太高的放射性物料其相关工艺经常在密封手套箱里开展,这种箱室是通过安装在箱室壁上的手套对箱室内物料或产品进行操作,其可靠的密封性可以保证手套箱内放射性气溶胶不会泄露到外部环境中,从而影响操作人员身体健康^[4]。然而,随着操作过程对手套的磨损、戳刺或辐射照射,手套箱内放射性气溶胶泄漏风险依然存在。因此,对 PuO_2 粉末倾倒过程产生的气溶胶在手套箱内分布特性的研究是具有实际意义的,不仅可以为放射性粉末倾倒操作提供参考,还能在手套箱发生泄漏事故时,利用相关的理论模型、经验公式结合放射性气溶胶扩散输运的测量结果,开展追溯性工作来评估事故的大小,协助找出事故发生的原因。

本文主要针对后处理厂超铀核素相关的氧化物粉末称量倾倒过程产生的气溶胶分布特性进行研究,由于放射性物质的操作和去污过程比较复杂,且容易产生放射性危害,选用与 PuO_2 在空间群、晶格类型、结构类型上完全一致,晶格常数和离子半径相近的 CeO_2 作为替代材料进行倾倒过程的模拟和实验验证。模拟采用 FLUENT 软件的欧拉双流体模型对手套箱内不同粒径大小、不同风速和不同倾倒速度 3 种情况下粉末倾倒过程产生的气溶胶浓度变化情况进行分析,并用 GRIMM 11-D 气溶胶粒径谱仪对不同倾倒速度下所得的气溶胶质量浓度进行测量,与模拟结果进行对比分析。

1 材料与方法

在氮气作为保护气的手套箱内进行 CeO_2 粉末倾倒操作,该过程产生的气溶胶分布情况可以用气固两相流的方法进行研究。基于计算流体力学(CFD)方法的 FLUENT 软件,是目前国内外最常用的研究气溶胶的软件之一,它可完成多种参考系下流场模拟、定常与非定常流动分析等^[5],广泛适用于复杂流场结构的可压缩和不可压缩流动^[6]。FLUENT 软件在气固两相流沉积扩散等行为研究上的计算模型主要有拉格朗日法和欧拉法,其中主要为基于拉格朗日法的离散相模型和基于欧拉法的双流体模型^[7]。两种模型的主要特点如表 1 所示。

表 1 拉格朗日离散相模型和欧拉双流体模型的主要特点^[8]

Table 1 Main characteristics of Lagrangian discrete phase model and Eulerian two fluid model

	视角	颗粒运动描述	计算量	颗粒运动	气固相体积比
离散相模型	微观	拉格朗日法	大	可以具体到每个颗粒	一般不超过 10%
双流体模型	宏观	欧拉法	小	只能描述集体运动规律	不受限制

考虑到倾倒的粉尘颗粒粒径非常小($< 10 \mu\text{m}$),在箱体内的分布可认为是连续分布的^[9],且欧拉双流体模型对于颗粒相体积分数占比的要求比较宽松,因此选用欧拉双流体模型。颗粒相的计算方法与流体相一样,使用同一的形式和求解方法,能用相同形式的流体力学守恒方程来描述,气固两相的连续性方程为^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q v_q) = 0 \quad (q = \text{gas, solid}) \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q^2) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \vec{R}_B + (\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift},q} + \vec{F}_{\text{wl},q} + \vec{F}_{\text{vm},q} + \vec{F}_{\text{td},q}) \quad (2)$$

式中 gas 表示气相, solid 表示固相, α 为体积分数, ρ 为密度, v 为速度, τ 为应力应变张量, P 为气体压强, R_B 为气固之间的曳力, g 为重力加速度, F_q 、 $F_{\text{lift},q}$ 、 $F_{\text{wl},q}$ 、 $F_{\text{vm},q}$ 、 $F_{\text{td},q}$ 分别为外部体积力、升力、壁面润滑力、虚拟质量力和湍流耗散力,其中重力和两相之间的曳力对流场影响最大,本文主要考虑这两种力的影响。

1.1 几何模型及网格划分 以结构净尺寸为 2000 mm(长) × 900 mm(宽) × 1100 mm(高)的实际手套箱尺寸为依据,建立二维简化计算模型如图 1 所示,其中 x 轴对应的是长, y 轴对应的是高(尺寸单位为 mm)。其中装满微米级 CeO_2 粉末的半球形小勺,以一定的角速度绕勺上表面中心处(1000, 150)沿逆时针向下倾倒,使颗粒落到天平托盘上,模拟粉末称量倒出过程产生的气溶胶在不同条件下的分布情况。

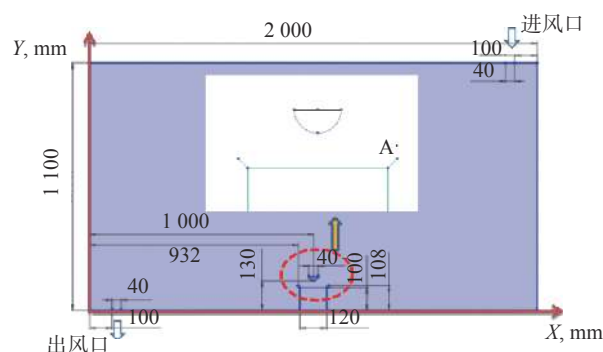


图 1 手套箱的二维几何模型

Figure 1 Two dimensional geometric model of glove box

本文利用滑移网格技术对二维手套箱几何模型进行网格划分,划分后的 3 个流体区域如图 2 所示。其中蓝色网格代表手套箱的流体域,红色网格代表滑移交界区的网格(其中红蓝网格相交处为分界面),绿色网格代表勺子内的流体域。网格密度对于模拟计算的精确性有着重要影响,为了保证计算结果可靠,同时降低网格划分的工作量提高计算效率,对网格进行无关性验证,结果如图 3 所示。当网格个数在 24819 时,监测点体积分数值与相邻网格密度下的数值偏差 < 5%,则可以认为该网格数量合适,进一步增加网格密度,对结果的准确度不再有明显的提高。本文选择该数量的网格对粉末倾倒过程不同条件下气溶胶的分布规律进行研究。

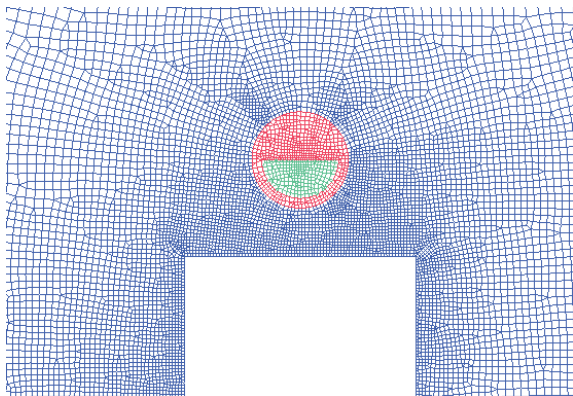


图 2 手套箱几何模型的网格划分
Figure 2 Mesh of glove box geometric model

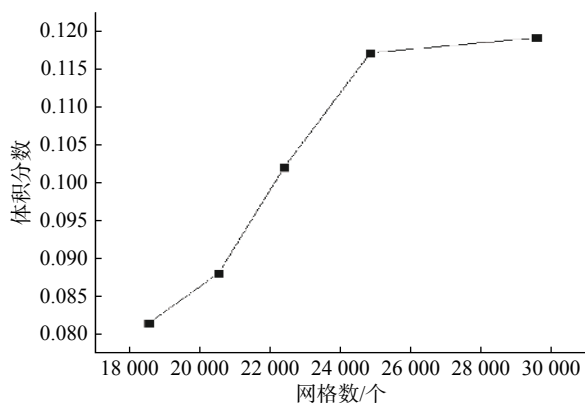


图 3 网格独立性验证
Figure 3 Grid independence verification

1.2 边界条件及参数的设置 手套箱内以氮气为工作介质,边界条件为速度入口和压力出口,勺子、托盘及箱体四周设为壁面条件,模拟不同条件下颗粒相在手套箱内的分布情况,详细参数设置如表 2 所示。

2 结果

2.1 粒径的影响 具有不同粒径的同种物料可能呈现不同的沉积扩散行为。本文分别选取 1、3、5、7、

表 2 计算参数

Table 2 The parameters of calculation

名称	参数设置	名称	参数设置
颗粒形状	球形	重力加速度	-9.81 m/s ²
颗粒材料	CeO ₂	手套箱长	2000 mm
颗粒密度	7215 kg/m ³	手套箱高	1100 mm
托盘高	100 mm	托盘底部直径	120 mm
工作气体	氮气	小勺离托盘高度	30 mm
小勺直径	40 mm	气体动力粘度	1.663×10 ⁻⁵ kg/(m·s)
气体密度	1.138 kg/m ³	托盘外沿直径	136 mm
粘性模型	层流	流场计算方法	SIMPLE
求解器设置	瞬态	时间步长	0.1 s

10 μm 粒径大小的颗粒为代表,在 1 s 将勺子倾倒 100°和不通风条件下模拟不同粒径大小的颗粒分布情况,开始倾倒后的第 8 s 颗粒相体积分云图如图 4 所示,不同粒径颗粒相的最大体积分如表 3 所示。

表 3 不同粒径颗粒相的最大体积分

Table 3 Maximum volume fraction of particles with different sizes

粒径/μm	最大体积分
1	1.87×10 ⁻³
3	5.58×10 ⁻³
5	5.789×10 ⁻³
7	5.899×10 ⁻³
9	5.943×10 ⁻³

从图 4 和表 3 可以看出,同一时间内不同粒径的颗粒在倾倒过程所呈现的堆积状态不同,托盘上堆积的颗粒体积分随着粒径的增大而增加,粒径越大的颗粒在下落过程所需的悬浮速度也越大,相比于小颗粒,大颗粒受周围气体的曳力影响更小,向托盘内沉积的速度越大,会更快的沉降到托盘或壁面上。小颗粒则更容易和卷吸的气体混合成围绕着颗粒主流的粉尘边界层。图 5 是开始旋转勺子的第 8 s,5 种不同粒径的颗粒在高度 Y=126 mm 处体积分分布的模拟结果,X 取值范围为 980~1020 mm。

从图 5 中可以看出 1 μm 颗粒的体积分最大,为 3.2×10⁻³,3~7 μm 颗粒体积分相近,约为 8.82×10⁻⁴,10 μm 颗粒体积分越小,约为 7.2×10⁻⁴。随着粒径的增大,大颗粒在该范围内的体积分越来越小。其主要的原因是颗粒在下落过程,会将周围的气

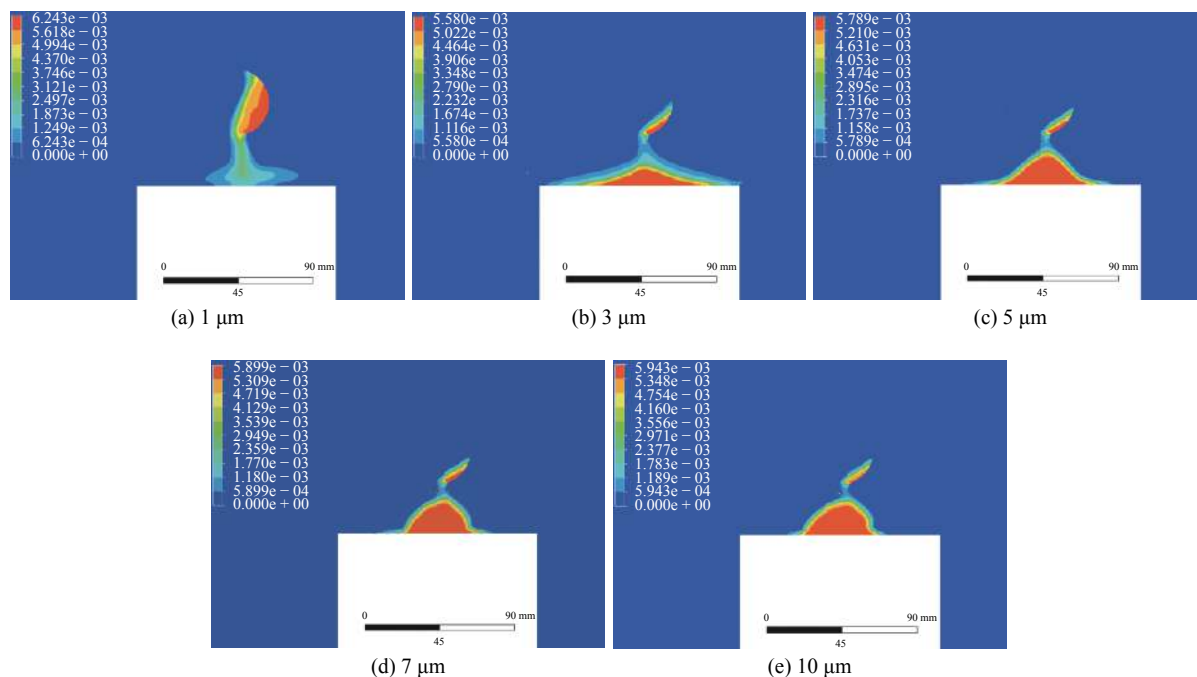


图 4 不同粒径大小的颗粒相的体积分数云图

Figure 4 Volume fraction cloud chart of particles with different sizes

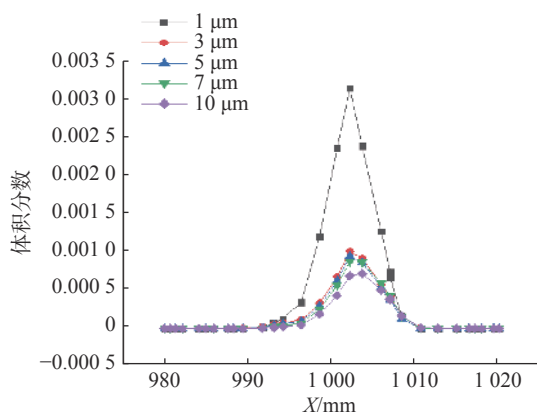


图 5 不同粒径的颗粒在同一高度处的体积分数

Figure 5 Volume fraction of particles with different sizes at the same height

体卷吸进颗粒流区域,当颗粒与气体之间的曳力大于微粒之间的摩擦力时,小粒径的颗粒会有更大可能从主流区域脱离出来形成散射粉尘,受周围气体的曳力影响较大也使其具备了更强的扩散能力,相比于小粒径颗粒,大粒径颗粒更容易沉积在托盘上。

2.2 进风速度的影响 为了解手套箱内不同通风速度对倾倒粉末过程产生气溶胶的分布影响,本文选取了 0, 0.5, 1, 2, 4 m/s 5 种进风速度,观察以 1 s 旋转 100° 的速度倾倒同一粒径的粉末时颗粒相体积分数的影响。图 6 以 0、1 和 4 m/s 为例展示了粉末开始倾倒后的第 30 秒时刻不同风速下箱体内氮气的速度流线图。

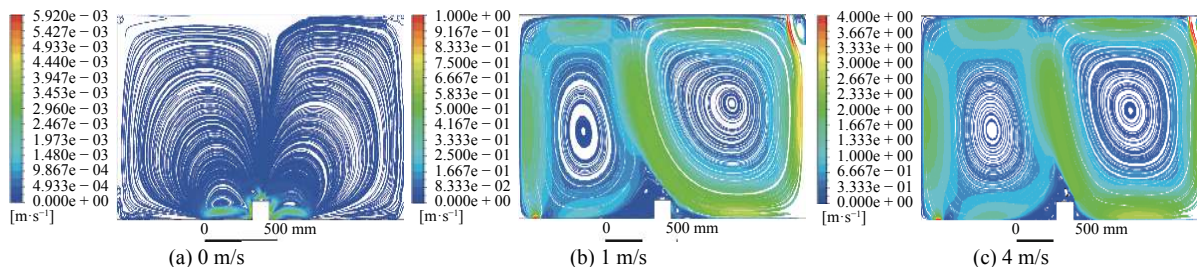


图 6 不同进风速度下的气体速度流线

Figure 6 Streamline of gas velocity at different air inlet speeds

从图 6 中可以看出,通风时,在气体自然循环和回流作用下箱体内形成了 2 个较为对称的大旋涡,不同进风速度下箱体内的气体速度流线整体分布比较类似,其形状和大小与进风速度有关。箱体内不同风速下竖直方向粉尘颗粒的分布如图 7 所示。

从图 7(a)和图 7(c)中可以看出,同一方向上颗粒体积分数随着速度的增加而增大,其中 0.5 和 1 m/s 风速引起的颗粒体积分数与无风情况 0 m/s 时体积分数相比有少量增加,整体接近于 0。2 和 4 m/s 速度下的颗粒体积分数相比无风情况有明显增加,图 7(a)

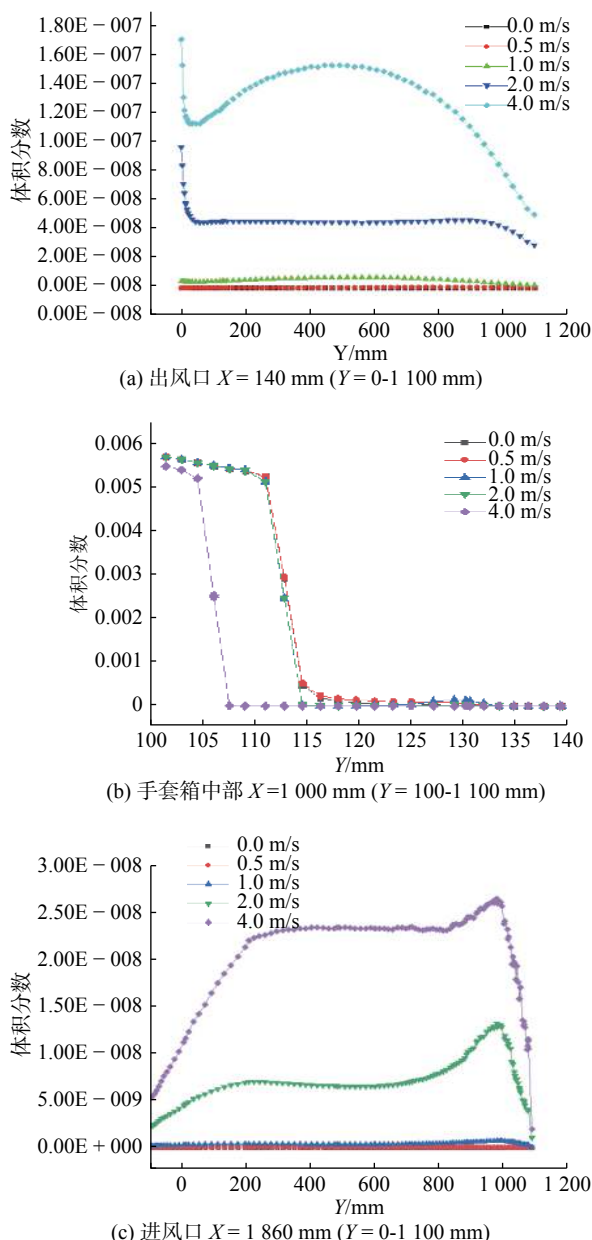


图 7 箱体内竖直方向粉尘颗粒的分布

Figure 7 Vertical distribution of dust particles in the box

在 Y 值较小处体积分数大, 主要原因是出风口右端点 ($X = 140$, $Y = 0$) 处有受穿过勺子和托盘气流影响的颗粒沉积。图 7(c) 在 Y 值较小处体积分数小的主要原因是该位置是进风口流入气体的主流运动方向, 风速越大, 沉积在底部壁面的粉尘颗粒会受电力作用被输运到其他位置。图 7(a) 中, 4 m/s 速度下的体积分数从 $Y = 20 \text{ mm}$ 处开始, 体积分数逐渐增加后又降低的主要原因是 $X = 140 \text{ mm}$, $Y = 520 \text{ mm}$ 处于夹带颗粒的主流运动方向, 该点更高或更低的位置则多数位于主流外侧, 颗粒浓度较低, 这也是除 0 m/s 以外的 4 种速度在靠近箱体顶端位置处颗粒体积分数都呈下降趋势的原因。

从图 7(b) 可以看出, 在手套箱中部 $X = 1000 \text{ mm}$

($Y = 100 \sim 1100 \text{ mm}$) 范围内, 2 m/s 风速下的体积分数有少量降低, 4 m/s 风速下的体积分数有明显降低。可以发现随着风速的增加, 托盘上收集到的粉体厚度变薄了, 前 4 种风速下托盘上粉体堆积的厚度约为 13 mm ($Y = 113 \text{ mm}$), 而 4 m/s 风速下托盘上粉体堆积的厚度为 6 mm ($Y = 106 \text{ mm}$)。产生这一现象的主要原因是风速越大时, 气流在勺子和托盘附近除了向左上方运动外, 还会有更多的气流从勺子下方穿过, 在曳力的作用下, 卷吸带走了一部分托盘上的粉尘颗粒。

整体来看, 在垂直方向不同位置处粉尘体积分数与涡流的形状和大小有关, 而涡流的形状和大小又主要取决于进风速度的大小。风速越大, 越易将扩散在托盘附近的气溶胶按流动趋势夹带到箱室的其他位置处。如果在粉末倾倒过程中考虑通风降低箱体内气溶胶浓度, 应尽可能保持较小的进风速度, 如 $\leq 1 \text{ m/s}$ 的速度。本文实验所用手套箱的进风量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$, 考虑过滤器的尺寸大小后换算进风速度为 0.414 m/s , 符合模拟的要求。

2.3 倾倒速度的影响 手套箱内粉末倾倒过程因操作者的习惯不同, 倾倒速度存在较大的差异。本文根据常见的几种操作速度, 以 1、2、3 s 的时间分别将装有相同粒径大小 CeO_2 粉末的勺子倾倒 100° , 模拟无风情况不同倾倒速度产生的气溶胶在箱室内的分布情况。在托盘右侧边沿上取一点 A (1068, 126), 该点位置如图 1 所示, 此处不同倾倒速度下粉尘气溶胶质量浓度随时间的变化情况如图 8(a) 所示。同时为验证模拟的准确性, 在手套箱内进行 CeO_2 粉末倾倒实验。箱体泄漏率 $\leq 2 \times 10^{-5} \text{ vol/h}$, 箱中水氧含量处于 1 ppm 以下, 系统工作温度为常温, 工作压力值在 $-3 \text{ mbar} \sim -1 \text{ mbar}$ 。利用基于光散射原理的 GRIMM 11-D 气溶胶粒径谱仪系统对 A 位置处不同倾倒速度下产生的气溶胶进行测量, 结果如图 8(b) 所示。

图 8 中, 1 s 倾倒 100° 时, 模拟结果和实验结果对应的最大质量浓度分别是 211 和 54.8 mg/m^3 ; 2 s 倾倒 100° 时分别是 88 和 18.7 mg/m^3 , 3 s 倾倒 100° 时分别是 80 和 26 mg/m^3 。对实验和模拟结果进行对比分析可以看出, 3 种不同倾倒速度下气溶胶质量浓度在数值上大约相差 4 倍, 分析原因可能来自于 2 个方面, 一个是模拟过程将勺子内的颗粒都设置成了固定的 $3 \mu\text{m}$ 大小, 而实际操作过程用到的粉末其粒径很难做成绝对的单分散状态, 在估算 $3 \mu\text{m}$ 粒径的气溶胶颗粒在所用粉末中的质量占比时会有误差存在; 另

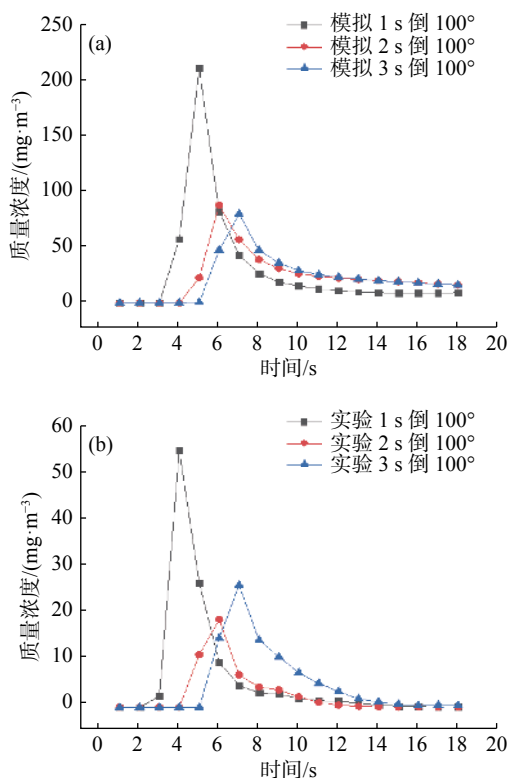


图 8 模拟 (a) 与实验 (b) 结果对比

Figure 8 Comparison of simulation (a) and experiment (b) results

一个是模拟过程采用的模型是由经验公式计算而来的,对于具体工况下的模拟也会存在一定的偏差。

此外,模拟和实验的结果在反映 A 点(图 1)处质量浓度随时间的分布趋势则基本一致,倾倒动作发生时粉末不会因为勺子的翻转而立即下落,其主要原因是颗粒与颗粒之间具有一定的粘度,当勺子倾倒一定角度后,勺子内颗粒之间的摩擦力不足以抵消该方向上重力的分量时颗粒才会脱离勺子下落到托盘上。从开始旋转勺子到最终质量浓度下降到一定数值时趋于平稳,所持续的时间在 15 s 左右。在实际的粉末称量过程中,从倾倒动作开始进行至倒完粉末进行下一项操作之间可以参考间隔时间为 15 s 左右,从而防止操作行为对粉尘颗粒形成扰动,增加箱内其他位置处气溶胶的浓度。

3 讨论

本文通过对手套箱内倾倒粉末产生气溶胶这一过程进行数值模拟和实验验证,得出以下结论。

小粒径的颗粒有更大可能受周围气体的曳力影响而从主流区域脱离出来形成散射粉尘,其扩散范围的半径也随着粒径的减小而扩大。在对粒径较小(如 1 μm)的粉末颗粒进行操作时,不同位置处气溶胶的监测应该引起更多的关注。

进风速度的变化使得手套箱内的流场变得复杂,粉尘颗粒的体积分数与气流形成涡流的大小和涡流位置有关,风速越大,对粉末倾倒过程的影响越大。通过手套箱内不同通风速度的对比,发现风速在 1 m/s 以下的范围比较合适,既可以满足不过多的引起粉末操作过程粉尘颗粒的扬起,又能在一定程度上降低整个箱室内粉尘颗粒的浓度。

以 2~3 s 将勺子旋转 100°的速度倾倒粉末在托盘右侧产生的粉尘气溶胶较少,且不同倾倒速度下粉尘颗粒体积分数在开始倾倒的第 15 s 时数值上降低了一个量级,之后随时间缓慢降低,为避免使产生的粉尘颗粒受气流扰动而四处扩散,在托盘附近区域建议在粉末倒出 15 s 以后再进行其他操作。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 周艳玲负责试验设计、数据收集和处理分析、模拟计算、文章的写作等工作;骆志平负责文章思路的构建、试验和模拟计算资源的统筹及文章的修改等工作;毕远杰负责试验平台搭建、试验指导及文章修改等工作;郭金森负责协助试验操作及文章修改等工作;王欢负责模拟计算指导及文章修改等工作

参考文献

- [1] 孔玉侠,崔力萌,王欢,等.北京市大气气溶胶总 α 、总 β 放射性测量与分析[J].中国辐射卫生,2019,28(5):513-516. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.011.
Kong YX, Cui LM, Wang H, et al. Measurement and analysis of gross alpha and beta radioactivity of atmospheric aerosols in Beijing[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28(5): 513-516. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.011.
- [2] 赵艳芳,楚彩芳,张钦富,等.浅析核电站职业病危害因素种类与来源[J].中国辐射卫生,2016,25(3):372-375. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.03.041.
Zhao YF, Chu CF, Zhang QF, et al. Types and sources of occupational hazards in nuclear power plant[J]. Chin J Radiol Health, 2016, 25(3): 372-375. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.03.041.
- [3] 高红武.室内空气中可吸入颗粒物的监测与研究[J].云南冶金,2006,35(3):75-77,96. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0308.2006.03.020.
Gao HW. Monitoring and studying the inhalable particulate matter in indoor air[J]. Yunnan Metall, 2006, 35(3): 75-77, 96. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0308.2006.03.020.

- [13] 能力验证结果的统计处理和能力评价指南. CNAS—GL02: 2014[S]. 中国合格评定国家认可委员会, 2014. .
Guidance on statistic treatment of proficiency testing results and performance evaluation. CNAS—GL02: 2014[S]. China National Accreditation Service for Conformity Assessment, 2014.
- [14] 王欣欣, 于美香, 王桂花. 山东省2018年 γ 辐射剂量率测量比对结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (3) : 303-306. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.03.023.
- Wang XX, Yu MX, Wang GH. Analysis of comparison results of γ -radiation dose rate measurement in Shandong Province in 2018[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28 (3) : 303-306. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.03.023.
- (收稿日期:2020-08-24)

(上接第 153 页)

- [4] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1108—2001 密封箱室设计原则[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
National Defense Science, Technology and Industry Commission. EJ/T 1108-2001 Design principles for containment enclosures[S]. Beijing: Standard Press of China, 2001.
- [5] 叶涛. FLUENT软件在粉体颗粒混合领域中的应用[J]. 中国粉体技术, 2009, 15 (3) : 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2009.03.020.
Ye T. Application of FLUENT code in powder mixing field[J]. China Powder Sci Technol, 2009, 15 (3) : 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2009.03.020.
- [6] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通CFD工程仿真与案例实战[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 5-8.
Li PF, Xu MY, Wang FF. Proficient proficiency in CFD engineering simulation and case practice[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017: 5-8.
- [7] Kuang SB, Qi Z, Yu AB, et al. CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones[J]. Miner Eng, 2014, 62: 43-54. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.012.
- [8] 娄春景. 基于CFD的缓冲罐粉料逸出研究[J]. 中国海洋平台, 2016, 31 (6) : 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2016.06.011.
Lou CJ. Research of particle escaping of bulk cement surge tank based on CFD[J]. China Offshore Platf, 2016, 31 (6) : 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2016.06.011.
- [9] 王杰, 叶长青, 孟祥玮. 沙尘试验箱内部流场的数值仿真与分析[J]. 检验检疫学刊, 2016, 26 (6) : 21-24. DOI: CNKI:SUN:XDSJ.0.2016-06-006.
Wang J, Ye CQ, Meng XW. The stimulation and analysis of the gas-solid two-phase flow in dust and sand test chamber[J]. J Insp Quar, 2016, 26 (6) : 21-24. DOI: CNKI:SUN:XDSJ.0.2016-06-006.
- [10] 毛娅, 陈家乐, 陈作炳, 等. 采用拉格朗日法与欧拉法模拟旋风筒内气固两相流的对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (2) : 459-465. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.02.008.
Mao Y, Chen JL, Chen ZB, et al. Comparative study on cyclone gas-solid two-phase flow using Lagrange method and Euler method[J]. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36 (2) : 459-465. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.02.008.
- (收稿日期:2020-10-01)

欢迎订阅! 欢迎投稿!

《中国辐射卫生》

网站: www.zgfsws.com

邮箱: redi@chinajournal.net.cn