

# 二氧化铀颗粒气力输送管道的 CFD-DEM 耦合模拟

周伍江<sup>1</sup>, 邓 健<sup>1</sup>, 雷洁珩<sup>2</sup>, 雷泽勇<sup>1</sup>, 杨文学<sup>1</sup>

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 针对某铀业公司二氧化铀颗粒物料负压气力输送作业中的管道堵料问题, 采用 CFD-DEM 耦合模拟与现场试验相结合的方法, 对气力输送过程进行了研究。通过分析颗粒输送流态、气相压力分布及系统压力降, 明确了堵塞机理; 通过现场试验与数值模拟结果的对比分析, 验证了模型的适用性。结果表明: 弯管曲率半径从 200 mm 增大至 500 mm, 弯径比从 2.50 增至 6.25, 气力输送局部压力损失大幅降低, 颗粒流动状态良好, 气相压强峰值降至 27.2 kPa, 系统总压力降显著降低, 动力设备运行正常。研究结果证实了 CFD-DEM 模型在该二氧化铀颗粒物料气力输送系统优化中的可靠性, 为二氧化铀颗粒高效、稳定输送提供了理论依据与工程参考。

**关键词:** 二氧化铀; 气力输送; 数值模拟; 颗粒动力学; 磨损预测

**中图分类号:** TL211; TH48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0116-09

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2025.10.06

中国核电发展为核燃料元件制造带来了新的机遇与挑战。铀转化是以精制二氧化铀( $\text{UO}_2$ )为原料制备核纯级六氟化铀( $\text{UF}_6$ )的化工过程, 是核燃料制造的必要环节<sup>[1]</sup>。在某铀业公司的铀转化生产前端投料环节中, 需将  $\text{UO}_2$  颗粒从一楼车间输送至三楼氢氟化设备进料口, 且该过程设备处于高温运行环境。目前, 此环节依赖人工操作, 存在投料效率低、安全风险高等问题, 且操作人员直接暴露于放射性粉尘与高温环境中, 已成为制约生产效能的瓶颈。为此, 需找到一种高效、安全的自动化投料方案。在粉粒物料输送过程中, 气力输送技术密闭性好、效率高<sup>[2]</sup>, 可满足核燃料生产的安全需求并提高其自动化程度<sup>[3]</sup>。但核燃料级  $\text{UO}_2$  的细粉含量高, 气力输送过程中易发生团聚、沉积等问题, 当流速低时, 高密度颗粒极易在管道沉积, 从而导致管道堵塞。

随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)的发展, 许多学者通过数值模拟来研究气力输送过程<sup>[4-7]</sup>。根据是否考虑颗粒之间的碰撞, 可将其分为拉格朗日粒子跟踪法(CFD-LPT)与计算流体力学-离散元耦合方法(CFD-DEM)<sup>[8-12]</sup>。通过 DEM 和 CFD 相结合的

数值方法, 预测宽工况条件下的气固流动特性, 是实现系统优化设计和控制的有效手段<sup>[13-14]</sup>。在气力输送过程中, 系统压力降是表征管道堵塞程度的关键指标。CFD-DEM 耦合模型能有效模拟管道结构、管道布局, 以及颗粒或气体质量流量等对压力降的影响<sup>[15-17]</sup>。

基于此, 笔者利用数值模拟方法, 采用 CFD-DEM 耦合模型, 对  $\text{UO}_2$  颗粒的气力输送过程进行两相流动特性研究, 结合现场试验, 旨在通过结构优化来降低系统压力降, 缓解管道堵塞, 实现物料的稳定高效输送。

## 1 CFD-DEM 耦合模拟两相控制方程

本研究采用 CFD-DEM 耦合方法分析物料输送过程中的颗粒分布状态、颗粒速度、气相速度及气相压力间的关系。其中, 连续气相流体由 CFD 进行求解, 通过求解流体的 Navier-Stokes 方程来描述流体的运动规律; 离散相二氧化铀颗粒由 DEM 进行求解, 通过追踪每个颗粒的运动轨迹来模拟颗粒间的相互作用及其与边界的接触力; 气固两相间的耦合作用, 通过气固相互作用力计算动量交换量来实现。

收稿日期: 2025-10-25; 修回日期: 2025-11-05

通信作者: 雷泽勇

### 1.1 气固两相流控制方程

基于考虑空隙率和源项的 Navier-Stokes 方程求解气相场,其中质量守恒方程和动量守恒方程可分别表示为<sup>[18]30</sup>

$$\frac{\partial (\epsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{sg,n}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\epsilon_g \rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g u_g) = \\ \nabla \cdot (\epsilon_g S_g) + \epsilon_g \rho_g g - I_{sg}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_g$ —气相空隙率; $\rho_g$ —气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $u_g$ —气体速度,m/s; $N_g$ —气相组分的数量; $R_{sg,n}$ —质量源项,kg/(m<sup>3</sup>·s);  $g$ —重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $I_{sg}$ —动量源项,N/m<sup>3</sup>;  $S_g$ —气相应力张量,Pa。

在该研究体系中,输送管道是由水平管道、竖直管道、水平弯管和垂直弯管等所组成的综合气力输送管道,涉及大曲率、二次流等大幅度场干扰,选用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行湍流动能及耗散率计算,计算式可表示为<sup>[18]30</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\epsilon_g \rho_g k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g k) = \\ \nabla \cdot \left[ \epsilon_g \left( \mu_g + \frac{\mu_{gt}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \epsilon_g G_k - \epsilon_g \rho_g \epsilon, \quad (3) \\ \frac{\partial (\epsilon_g \rho_g \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g u_g \epsilon) = \\ \nabla \cdot \left[ \epsilon_g \left( \mu_g + \frac{\mu_{gt}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \epsilon_g \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \rho_g \epsilon), \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $k$ —湍流动能,m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;  $\mu_g$ —气体动力黏度,Pa·s;  $\mu_{gt}$ —湍流动力黏度,Pa·s;  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ —湍动普朗特数,其值分别为 1.0 和 1.3;  $G_k$ —湍流动能源项,kg/(m·s<sup>3</sup>);  $\epsilon$ —湍流耗散率,m<sup>2</sup>·s<sup>3</sup>;  $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ —模型常量,其值分别为 1.44 和 1.92;其余同前。

### 1.2 固相控制方程

固相颗粒的运动遵循牛顿第二定律,在本研究的气固两相流系统中,假定颗粒为球形,作用在颗粒上的力仅考虑颗粒自身所受重力、颗粒-颗粒/壁面接触碰撞力、气相场施加的曳力和压力梯度力等。系统中某一颗粒  $i$  的运动方程可表示为<sup>[18]33</sup>

$$\frac{d\mathbf{X}_p^i}{dt} = \mathbf{v}_p^i, \quad (5)$$

$$m_p^i \frac{d\mathbf{v}_p^i}{dt} = m_p^i g + F_{pre}^i + F_c^i + F_d^i, \quad (6)$$

$$I_p^i \frac{d\omega_p^i}{dt} = T_p^i, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}_p^i$ —颗粒位置矢量,m;  $\mathbf{v}_p^i$ —颗粒速度,m/s;  $m_p^i$ —颗粒质量,kg;  $F_{pre}^i$ —压力梯度力,N;  $F_c^i$ —颗粒碰撞力,N;  $F_d^i$ —流体对颗粒的曳力,N;  $I_p^i$ —转动惯量,kg/m<sup>2</sup>;  $\omega_p^i$ —角速度,rad/s;  $T_p^i$ —颗粒所受扭矩,N·m;其余同前。

接触力模型选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型。相互接触的颗粒  $i$  和  $j$  的法向与切向弹性系数、颗粒杨氏模量和泊松比的关系如下<sup>[18]35</sup>

$$k_n^{ij} = \frac{4}{3} E_{eff}^{ij} \sqrt{R_{eff}^{ij}} \sqrt{\delta_n^{ij}}, \quad (8)$$

$$k_t^{ij} = 8 G_{eff}^{ij} \sqrt{R_{eff}^{ij}} \sqrt{\delta_n^{ij}}, \quad (9)$$

$$R_{eff}^{ij} = \frac{R_p^i R_p^j}{R_p^i + R_p^j}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{E_{eff}^{ij}} = \frac{[1 - (\sigma_p^i)^2]}{E_p^i} + \frac{[1 - (\sigma_p^j)^2]}{E_p^j}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{G_{eff}^{ij}} = \frac{[2 - \sigma_p^i]}{G_p^i} + \frac{[2 - \sigma_p^j]}{G_p^j}, \quad (12)$$

$$G_p^i = \frac{E_p^i}{2(1 + G_p^i)}, G_p^j = \frac{E_p^j}{2(1 + G_p^j)}, \quad (13)$$

式中: $k_n^{ij}$ —法向刚度系数,N·m;  $k_t^{ij}$ —切向刚度系数,N·m;  $E_{eff}^{ij}$ —等效杨氏模量,Pa;  $G_{eff}^{ij}$ —等效剪切模量,Pa;  $R_{eff}^{ij}$ —等效半径,m;  $\delta_n^{ij}$ —法向重叠量,m;  $R_p$ —颗粒半径,m;  $\sigma_p$ —颗粒泊松比;  $E_p$ —颗粒杨氏模量,GPa;  $G_p$ —颗粒剪切模量,GPa;其余同前。

本研究使用 Gidaspow 曳力模型,其在 CFD-DEM 耦合模拟研究中的应用最为广泛,表示为<sup>[18]38</sup>

$$\begin{aligned} \beta_{Gidaspow} = \\ \begin{cases} 150 \frac{\mu_g (1 - \epsilon_g)^2}{\epsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_g) \rho_g}{d_p} |u_g - v_p|, & \epsilon_g \leq 0.8 \\ \frac{3}{4} C_{drag} \frac{\rho_g (1 - \epsilon_g) \epsilon_g^{-1.65}}{d_p} |u_g - v_p|, & \epsilon_g > 0.8 \end{cases}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} C_{drag} = \\ \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & 1 < Re_p < 1 \times 10^3 \\ 0.44, & Re_p \geq 1 \times 10^3 \end{cases}, \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\beta_{Gidaspow}$ —相间动量交换系数;  $d_p$ —颗粒直径,m;  $C_{drag}$ —曳力系数;  $Re_p$ —颗粒雷诺数;其余同前。

### 1.3 数值计算方法及流程

CFD-DEM 耦合方法先对流体域和离散颗粒系统进行初始化,再通过双向数据交换机制实现

相间耦合。在耦合过程中,DEM 模块负责计算颗粒间的接触力,并将局部空隙率及动量交换源项传递给 CFD 求解器;基于接收的信息,采用 CFD 模块求解修正后的多相流控制方程,并将流体曳力、压力梯度力等场变量反馈至 DEM 模块。

本研究采用 Fluent 2023R1 和 EDEM 2022 对气固两相流进行数据交互,实现双向耦合仿真。在仿真过程中,需分别为 Fluent 和 EDEM 设置时间步长。在实际模拟中,固体颗粒数量多、颗粒的运动状态复杂、颗粒受力情况多变,其数值变化较大。为了确保计算精度,设置的固相时间步长一般小于气相时间步长<sup>[19]</sup>。在本模拟中,设置 EDEM 的时间步长为  $1.86 \times 10^{-6}$  s,设置 Fluent 中的时间步长为 EDEM 时间步长的 30 倍,即为  $5.58 \times 10^{-5}$  s,从而兼顾计算速度与数值收敛性。CFD-DEM 耦合模拟流程见图 1。

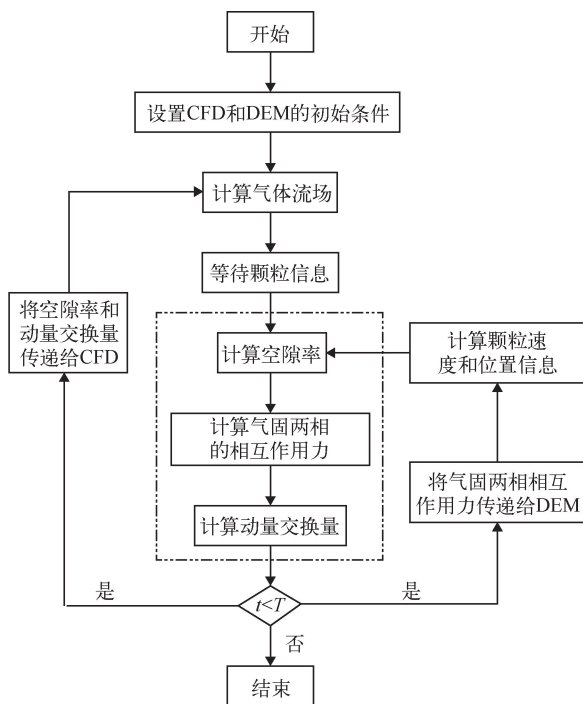


图 1 CFD-DEM 耦合模拟流程图

Fig. 1 CFD-DEM coupled simulation flowchart

## 2 气力输送管道仿真模型

### 2.1 输送管道网格划分

输送管道外径为 89 mm,壁厚为 4.5 mm,均为国标钢管。在 ANSYS 的 SpaceClaim 模块中建立输送管道几何模型。该管路主要由 3 段 2 000 mm 水平管道(ab、ef 和 gh 段)、2 段 500 mm 水平管道(ij 和

lm 段)、1 段 5 000 mm 水平管道(hk 段)、1 段 10 000 mm 垂直管道(cd 段)以及 5 段曲率半径均为 200 mm 的弯管(bc、de、fg、hi 和 kl 段)组成,a—c 段位于车间一楼,d—m 段位于车间三楼,见图 2。将该模型导入网格划分软件进行非结构化网格划分,见图 3~图 4。选取平均网格尺寸为 8.5、9.0、9.5 mm,对应网格数量分别为 169.751 2 万个、149.161 2 万个、128.166 3 万个。当  $u_g = 15$  m/s,质量流量( $G_s$ )为 1 kg/s, $d_p = 1$  mm 时,不同网格尺寸进口和 1 号出口之间的压差见表 1。以平均网格尺寸 8.5 mm 为基准,其他两种模型的压降依次增大了 1.23% 和 1.67%。考虑计算精度和效率,选取平均网格尺寸为 9.0 mm(网格数量为 149.161 2 万)进行计算<sup>[20-21]</sup>。

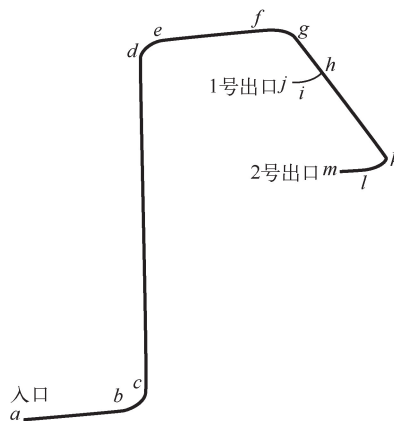


图 2 输送管路三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of conveying pipeline

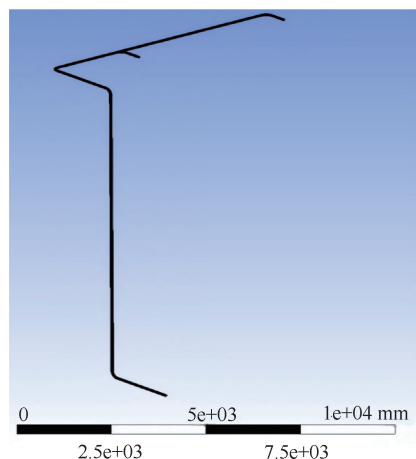


图 3 输送管路网格划分

Fig. 3 Mesh partitioning for pipeline sections

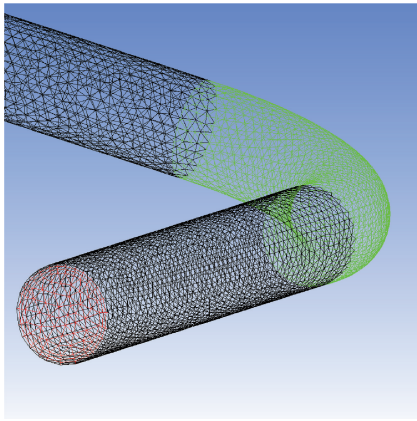
图 4 输送管路  $ab-bc$  段网格划分Fig. 4 Non-structured mesh partitioning for pipeline sections  $ab-bc$ 

表 1 网格无关性

Table 1 Mesh independence

| 平均网格尺寸/mm | 网格数量/万个   | 进出口压降/kPa | 误差/% |
|-----------|-----------|-----------|------|
| 8.5       | 169.751 2 | 15.452    |      |
| 9.0       | 149.161 2 | 15.642    | 1.23 |
| 9.5       | 128.266 3 | 15.710    | 1.67 |

## 2.2 边界条件

边界条件设置:1)流体入口设置为速度入口;2)出口设置为自由出流;3)管壁面采用无滑移边界条件;4)考虑其在空气中易氧化,将流体相设置为氮气;5)颗粒相设置为二氧化铀颗粒,密度采用其理论密度,颗粒泊松比、杨氏模量等参数采用已有研究数据<sup>[22]</sup>。边界条件参数见表 2。

表 2 边界条件具体参数

Table 2 Specific parameters of boundary conditions

| 状态        | 参数                                | 数值                     |
|-----------|-----------------------------------|------------------------|
| 流体相<br>参数 | 密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )     | 1.138                  |
|           | 黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) | $1.663 \times 10^{-5}$ |
|           | 入口速度/( $\text{m}/\text{s}$ )      | 20                     |
| 颗粒相<br>参数 | 理论密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )   | $10.96 \times 10^3$    |
|           | 质量流量/( $\text{kg}/\text{s}$ )     | 1.92                   |
|           | 颗粒直径/mm                           | 1.2                    |
|           | 颗粒剪切模量/GPa                        | 82                     |
|           | 颗粒杨氏模量/GPa                        | 230                    |
|           | 颗粒泊松比                             | 0.308                  |
|           | 颗粒-颗粒间恢复系数;<br>静摩擦系数;滚动摩擦系数       | 0.70;0.45;0.01         |
|           | 颗粒-壁面间恢复系数;<br>静摩擦系数;滚动摩擦系数       | 0.50;0.40;0.01         |
|           | 颗粒入口速度/( $\text{m}/\text{s}$ )    | 0                      |

## 2.3 原管道数值模拟

### 2.3.1 输送流态分析

管道模型共有 1 个入口和 2 个出口,1 号出口和 2 号出口分别对应真空输送系统中的 1 号料仓(常用料仓)和 2 号料仓(备用料仓)。本模拟只针对 1 号料仓,2 号料仓为关闭状态。

颗粒速度图见图 5,其中浅色区域为无物料经过的管道。可以看出,物料颗粒从水平段入口进入管道。由于物料的回流以及后续物料的持续输送,导致大量颗粒在  $bc$  段弯管至竖直管区域发生积聚,颗粒输送速度迅速降低,从而导致输送管道堵塞。

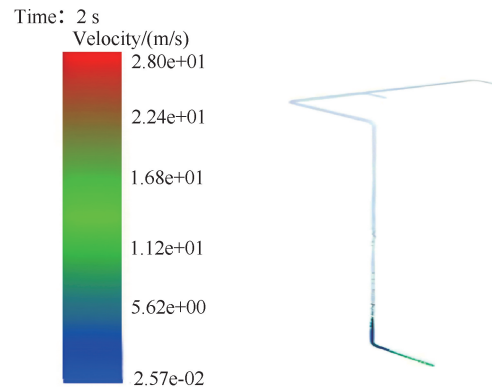
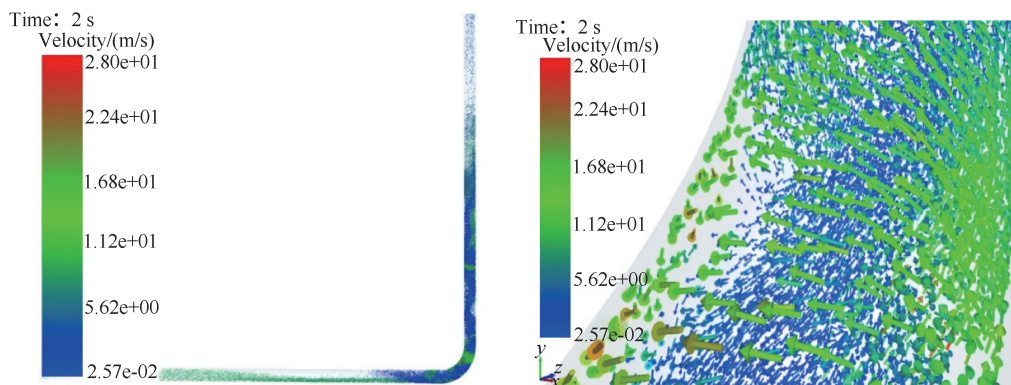


图 5 颗粒速度图

Fig. 5 Particle velocity profile

通过对颗粒速度分布的进一步分析可知:最高速度区在管道中心处,该处流体流动较顺畅,流动阻力较小;中间速度区分布在管道中间,该区域流体流速相对稳定;在管道近壁区及弯管内侧,颗粒速度最低。这是因为流体和  $\text{UO}_2$  颗粒经过急弯处时,流动方向剧烈改变,在惯性和离心力的作用下,流体在弯管内侧壁面发生流动分离,产生较强的涡流,大幅消耗流体的动能,从而导致颗粒之间相互碰撞,阻碍颗粒向输送方向运动。同时,颗粒与壁面高速撞击导致颗粒垂直于壁面速度急剧降低,颗粒需从气流中重新加速,增大了气力运输的能量损失。在低速区,颗粒更易受重力、相互碰撞力和摩擦力等影响。

通过图 6(右图为  $bc$  段弯管中部颗粒瞬时速度放大图)分析可知,大量颗粒通过弯管后,其运动方向由水平急剧转为竖直,并呈现出螺旋式上升的运动轨迹。在弯管区域可观察到明显的涡流现象,颗粒容易在中心区域聚集,引发堵塞并加剧管道磨损。

图6  $ac$  段颗粒局部速度图Fig. 6 Section  $ac$  local particle velocity profile

### 2.3.2 气相压力分析

气相压力云图见图7。分析可知,管路内气相压力呈现出分区分布特征, $ac$ 段水平管段属于压力分布均匀的区域;颗粒在经过弯管后,气相压力发生明显变化。同一气相压力区域内,各处压

力基本保持一致。由于颗粒在弯管处发生频繁碰撞且运动方向急剧变化,该部位成为气相压力最高区域,最大值达379.2 kPa,显著超过动力设备的最大工作压强(35 kPa)。

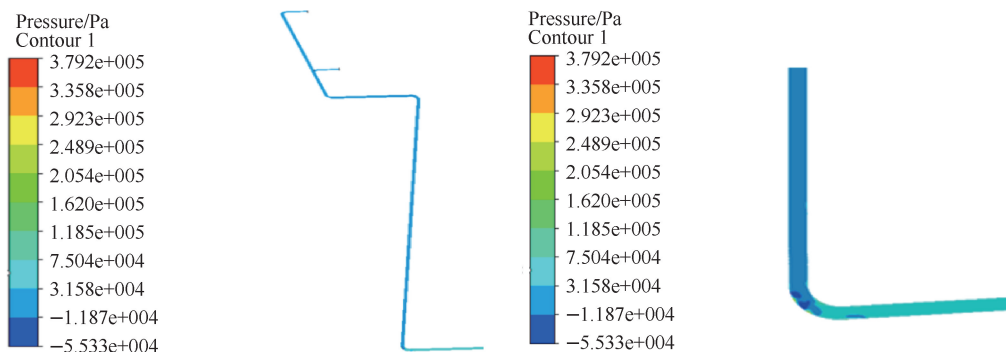


图7 气相压力云图

Fig. 7 Gas phase pressure contour

## 2.4 优化后管道数值模拟

### 2.4.1 管道设计优化方案

数值模拟结果表明,原设计管道(弯管曲率半径为200 mm)发生堵塞的根源在于:当颗粒流经 $bc$ 段弯管时,流场紊乱,形成的涡流区域消耗了流体与颗粒的动能;颗粒与壁面的高速、大角度碰撞也增大了能量损失。基于此,选择增大弯管曲率半径来改善弯管处的流动状态,从而减少涡流强度和颗粒与弯管壁的碰撞程度。通过仅更换弯管而非扩大整管直径,实现了经济性与空间占用的优化。

根据优化前计算结果,结合现场实际条件和

工程经验,最终选取曲率半径( $R$ )为500 mm,此时弯径比( $R/d$ )=6.25。依据仿真分析及压力损失计算结果,将管道所有弯管曲率半径改为500 mm。同样,对优化后管路模型进行网格划分并做无关性验证,模型网格数量共有158.037 2万个。

### 2.4.2 优化后输送流态分析

优化后颗粒速度图见图8。由图8(a)分析可得,对管道设计优化后,物料走势顺畅,没有发生物料堵塞的现象。气力输送管道压力损失降低,颗粒在管道内的流速显著增加。颗粒在气力的作用下顺利达到三楼料仓出口处,在惯性作用下,少

数颗粒流向2号料仓出口处。

由图8(b)分析可得,物料颗粒自入口进入水平输送管道后,呈良好悬浮流状态。在该阶段,颗粒-颗粒、颗粒-管壁之间的碰撞减少,摩擦阻力和能量损耗也随之降低。颗粒分布均匀分散,流动顺畅,并保持较高的运动速度。随后,物料颗粒进入90°弯管段,在离心力的作用下,大量颗粒向弯管外侧壁面聚集,形成相对密集的绳索状流动结构——“颗粒绳”;在此状态下,颗粒间相互作用和碰撞频率显著增加,与管壁的碰撞也更集中,易导致弯管外侧局部严重磨损。最后,物料颗粒在气力作用下通过弯管并转向进入竖直管段。颗粒沿管壁运动了一小段距离,随后逐渐向管道中心区域扩散,最终回归悬浮流状态,受重力作用颗粒速度随着管道的升高而逐渐降低。

根据图8(c)和图8(d)分析可得,物料颗粒自管道 $ac$ 段输送至 $dm$ 段后,首先流经垂直弯管,在离心力作用下,大量颗粒向弯管外壁面聚集,再次形成“颗粒绳”现象。经过垂直弯管后,颗粒速度已显著降低,在重力作用下发生沉降,并沿着水平管下壁面向前运动。随后,颗粒通过水平弯管改变流向,向出口段输送。在惯性作用下,部分颗粒流向2号出口,其余颗粒则流向1号出口。

与小曲率半径弯管相比,流体携带颗粒物料流经大曲率半径弯管时流线变化更加平缓,减轻了因涡流产生的能量消耗,并且颗粒与壁面的碰撞角度更小,物料的切向速度得以保持,有足够的动能和气流曳力来抵抗阻力,能够维持稳定的悬浮状态,从而避免了沉积和堵塞。

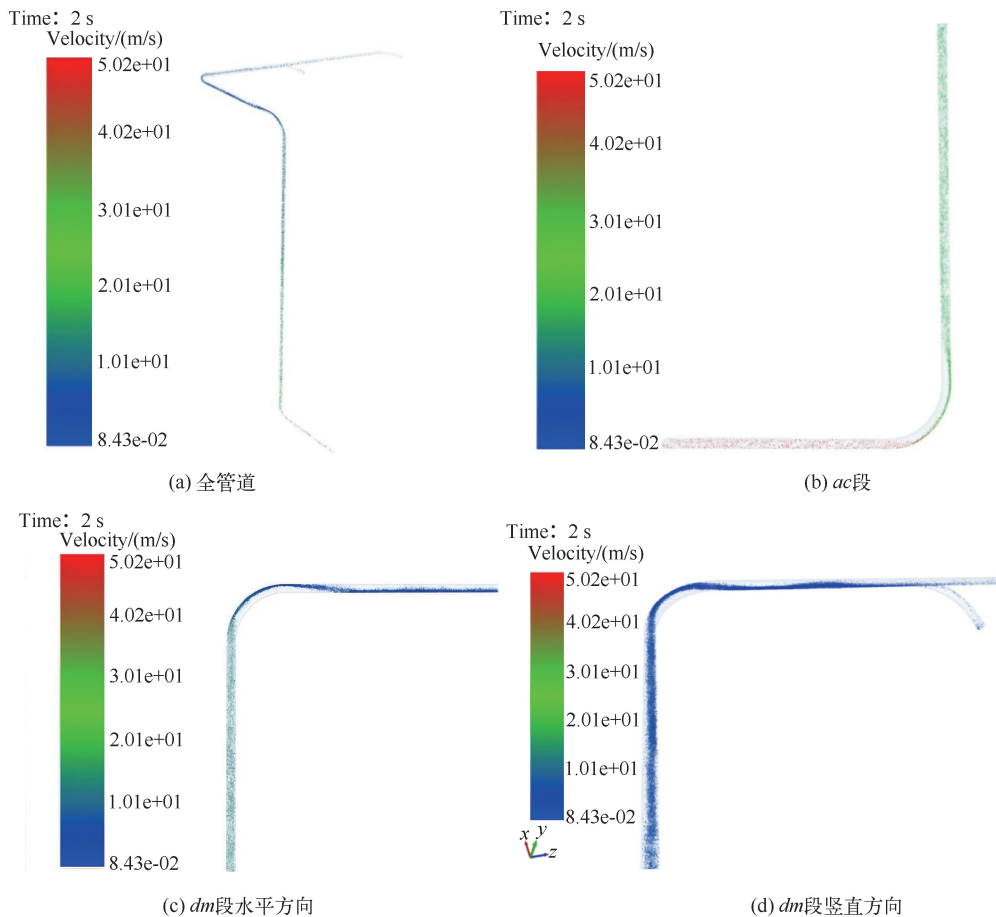


图8 优化后颗粒速度图

Fig. 8 Optimized particle velocity diagram

#### 2.4.3 优化后气相压力分析

由优化后不同时刻管道轴线方向的气相压力

图(图9)分析可知,在不同时刻,气相压力分布自入口—弯管—出口方向呈先增大后减小的趋势,

最大值均位于  $bc$  段弯管附近,分别为 27.2、25.3、24.3 和 26.1 kPa,最小值位于出口处,且均未超

过动力设备的最大工作压力 (35 kPa),从而验证了管道设计优化方案的可行性。

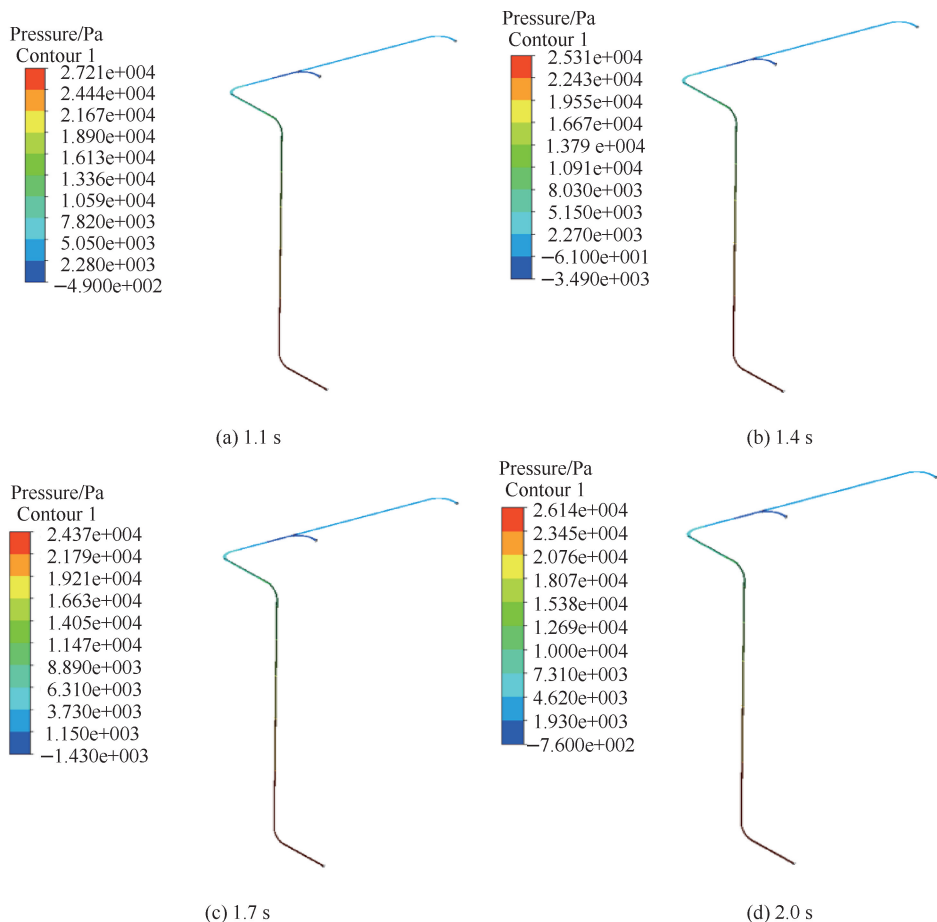


图 9 优化后不同时刻气相压力图

Fig. 9 Gas phase pressure contours at different time instants (post-optimization)

### 3 现场试验

基于上述 CFD-DEM 耦合数值模拟结果,得到的扩大弯管曲率半径可降低系统压力降,从而解决生产中出现的堵料问题。所输送的二氧化铀颗粒具有的放射性、高密度和易团聚等性质,对输送装置的稳定性和安全性要求较高。为此,通过现场试验对模拟结果进行验证,检验输送系统在真实工业环境中的稳定性和高效性。

试验现场的真空输送系统和自动化控制设备可实现物料的气力运输及控制。其中自动变频系统负责控制物料输送流量,动力设备负责产生负压,为物料输送提供动力。动力设备的正常工作压强小于 35 kPa,当其工作压强达到或超过 35 kPa 时,会触发过载保护、自动断电并泄压。

在进行第一桶物料 (约 500 kg) 投放的试验中,输送管道发生了物料堵塞,且动力设备的压强持续升高,短时间内达到 43.4 kPa,导致真空输送系统触发过载保护而停机。

现场试验从开始到结束的 9 个时间点,真空输送系统相关参数的变化见图 10,其中手动变频风机频率固定为 3 Hz,动力设备压强随着自动变频系统的频率升高而升高,即物料输送量增大时,所需动力设备提供的动力越大。当自动变频风机频率增大到 31.3 Hz 时,动力设备的压强达到 37.9 kPa,超过其最大工作压力 (35 kPa),触发过载保护,从而自动泄压。

为验证二氧化铀气力输送装置管道优化设计方案,进行了优化后现场试验。将气力输送管路所有曲率半径为 200 mm 的 90°弯管更换成曲率

半径为 500 mm 的 90°弯管,以增大弯径比。优化后,管道在气力输送过程中未发生物料堵塞或泄露情况,试验过程中动力设备的压强均值为 25.23 kPa,与数值模拟结果具有较高的一致性,并始终处于安全工作压强内。

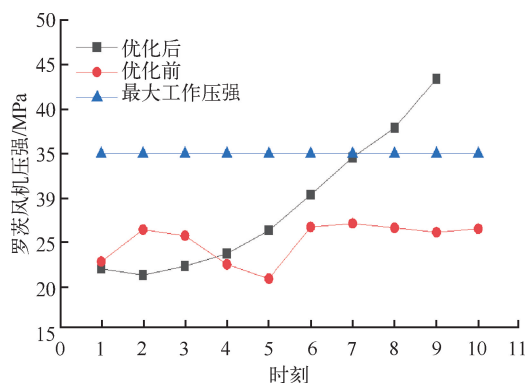


图 10 真空输送系统数据

Fig. 10 Vacuum conveying system data

## 4 结论

基于 CFD-DEM 方法建立二氧化铈颗粒气力输送过程的数值模拟,以解决运输过程中出现的管道堵料问题,得到以下主要结论:

1) 原设计弯管曲率半径(200 mm)太小,弯管处气相压力峰值达 379.2 kPa,远超动力设备最大工作压强(35 kPa),造成颗粒在竖直段堆积进而引发堵塞。将弯管曲率半径增大至 500 mm 后,物料流动顺畅,无堵塞现象,气相压力始终稳定在 27.2 kPa 以下,满足系统运行要求。

2) 弯管曲率半径优化前后的现场试验结果与模拟结果具有较高的一致性,气力输送系统 CFD-DEM 数值模型可靠。当弯管曲率半径为 200 mm 时,投料作业时管道发生堵塞,风机超压停机;当弯管曲率半径为 500 mm 时,输送过程无堵料、无泄漏,动力设备的工作压强始终处于安全范围内。

3) 本研究的不足之处:研究中使用了恒定的壁面摩擦系数;但在实际中,颗粒对弯管(尤其是外侧)的长期冲击会导致磨损,改变壁面粗糙度,进而影响颗粒流动和系统压力降。

## 参考文献:

[1] 郑建国. 铈转化生产线危险有害因素分析及其防护

措施研究[D]. 衡阳:南华大学,2013.

[2] 盛庆娇. 气力输送系统在聚烯烃装置中的应用[J]. 炼油与化工, 2023, 34(3): 52-54.

SHENG Qingjiao. Application of pneumatic conveying system in polyolefin unit[J]. Refining and Chemical Industry, 2023, 34(3): 52-54.

[3] 侯艳君, 王庆辉, 周甲伟, 等. 基于 CFD-DEM 的气力输送变径管中颗粒流动特性分析[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 6-10.

HOU Yanjun, WANG Qinghui, ZHOU Jiawei, et al. Flow characteristics analysis of particles in pneumatic conveying with tapered pipeline based on CFD-DEM[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6): 6-10.

[4] KIECKHEFEN P, PIETSCH S, DOSTA M, et al. Possibilities and limits of computational fluid dynamics-discrete element method simulations in process engineering: A review of recent advancement sand future trends[J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2020, 11: 397-422.

[5] SHI Q, SAKAI M. Recent progress on the discrete element method simulations for powder transport systems: A review[J]. Advanced Powder Technology: The International Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 2022, 33(8).

[6] 王昱, 刘佳豪, 罗毅智, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的膨化颗粒饲料气力输送机理数值分析[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 180-189.

WANG Yu, LIU Jiahao, LUO Yizhi, et al. Numerical analysis of pneumatic performance of expanded pellet feed based on CFD-DEM coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 180-189.

[7] 尚义礼. 基于 CFD-DEM 的燃煤电站生物质粉料气力输送关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.

[8] KUAN B, YANG W, SCHWARZ M P. Dilute gas-solid two-phase flows in a curved 90 duct bend: CFD simulation with experimental validation[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(7): 2068-2088.

[9] YILMAZ A, LEVY E K. Formation and dispersion of ropes in pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2001, 114(1/3): 168-185.

[10] MANJULA E V P J, ARIYARATNE W K H, RATNAYAKE C, et al. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport[J].

- Powder Technology, 2017, 305:782-793.
- [11] ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23):5728-5770.
- [12] ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(13):3378-3396.
- [13] KLINZING G E. A review of pneumatic conveying status, advances and projections[J]. Powder Technology, 2018, 333:78-90.
- [14] KUANG S B, ZHOU M M, YU A B. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review [J]. Powder Technology, 2020, 365:186-207.
- [15] 王庆辉. 气力输送系统关键设备性能的研究与优化[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2024.
- [16] JIA W G, YAN J L. Pressure drop characteristics and minimum pressure drop velocity for pneumatic conveying of polyacrylamide in a horizontal pipe with bends at both ends [J]. Powder Technology: An International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems, 2020, 372(1):192-203.
- [17] 叶诗雨. 聚乙烯装置气力输送系统的布置与管道设计[J]. 化学工程与装备, 2025(3):100-103.
- YE Shiyu. Layout and Piping design of pneumatic conveying system in polyethylene unit [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2025(3):100-103.
- [18] 练国庆. 流化床中稠密气固反应流的 CFD-DEM 数值模拟研究[D]. 南京:东南大学, 2024.
- [19] RINOSHIKA A, SUZUKI M. An experimental study of energy-saving pneumatic conveying system in a horizontal pipeline with dune model [J]. Powder Technology, 2009, 198(1):49-55.
- [20] 张琳荔. 粮食散料密相气力输送流动特性及稳定性控制[D]. 郑州:郑州轻工业大学, 2019.
- [21] 星宗耀. 基于 CFD-DEM 耦合的弯管内磨损特性研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2023.
- [22] 简单. 铀和二氧化铀状态方程与弹性模量计算 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2020.

## CFD-DEM Coupled Simulation of Pneumatic Conveying Pipelines for Uranium Dioxide Particles

ZHOU Wujiang<sup>1</sup>, DENG Jian<sup>1</sup>, LEI Jieheng<sup>2</sup>, LEI Zeyong<sup>1</sup>, YANG Wenxue<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** To address pipeline blockage issues in the negative-pressure pneumatic conveying of uranium dioxide at a uranium company, this study employed a combined approach of CFD-DEM coupled simulation and field experiments. By examining particle flow patterns, gas-phase pressure distribution, and system pressure drop, the underlying mechanism of pipeline blockage was elucidated. The validity of the simulation model was confirmed through comparative analysis of field measurements and numerical results. The findings demonstrate that increasing the elbow curvature radius from 200 mm to 500 mm and the bend diameter ratio from 2.50 to 6.25 significantly reduced local pressure losses during conveying. As a result, particle flow stability improved, with the peak gas-phase pressure dropping to 27.2 kPa and the overall system pressure drop decreasing markedly, thereby restoring normal operation of the power equipment. This study verifies the reliability of the CFD-DEM model for optimizing the pneumatic conveying system of uranium dioxide particles, offering both theoretical support and practical guidance for achieving efficient and stable transport.

**Key words:** uranium dioxide; pneumatic conveying; numerical simulation; particle dynamics; wear prediction