

# 成品油管道特性对杂质沉积规律的影响

姜德文（北京中航油工程建设有限公司，北京 100012）

**摘要：**固体杂质会通过施工不善、管道腐蚀、防腐层脱落等方式进入成品油管道中，虽然在油品储存、转输的各个环节中设置了多道过滤设备滤除了大部分固体杂质，但是一部分固体杂质，如砂粒、管道腐蚀产物、内防腐层脱落物可能聚集于管道或设备的死角中，加剧管道的内腐蚀，缩短管道使用寿命。本文通过 CFD-DEM 耦合模拟了固体杂质在水平-弯头-竖直管道处的沉积现象，了解了固体杂质在弯头处的沉积规律，针对管道设计提出了相应的建议。

**关键词：**CFD-DEM 耦合法；数值模拟；临界流速；成品油管道

目前，对颗粒-流体系统的数值模拟研究，主要方法有 CFD 离散相模型法和 CFD-DEM 耦合法。CFD-DEM 耦合法求解的基本思路是：通过 CFD 技术求解流场，使用 DEM 方法计算颗粒的运动、受力状况，二者以一定的计算模型进行质量、动量和能量等的传递，实现耦合，相应的计算模型充分考虑了颗粒与颗粒或者颗粒与壁面之间的相互作用，更准确的描述颗粒的运动状况及其对流场作用。

离散元法最早由 Peter Cundall 于 1971 年提出<sup>[1]</sup>，该方法适用于研究在准静态或动力条件下的节理系统或块体集合的力学问题。1992 年 Tsuji<sup>[2]</sup>将离散元法与 CFD 方法结合，率先对工程应用问题进行了 CFD-DEM 耦合。随着离散元素法的发展演变，越来越多地用于各种颗粒系统与流体、机械结构及电磁场耦合模拟仿真<sup>[3]</sup>。目前，离散元法已经从散体力学研究拓展至涉及颗粒操作及处理的工业过程和工业产品的设计分析与研发领域。

颗粒系统仿真软件 EDEM 作为首款可与 CFD 耦合的商用 DEM 软件，利用其强大的建模功能、动态模拟和分析后处理功能<sup>[4]</sup>，可以解决固液流动、流态化、气力输送、旋风分离等工程实际问题。为了解成品油管道特性对固体颗粒杂质沉积规律的影响，本文采用数值模拟的方法进行了相关研究。

## 1 数值模型及物性参数设置

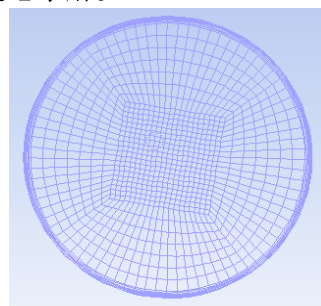
### 1.1 数值模型

本研究建立水平-弯头-竖直的管道模型（流体方向为自左向右）。采用古钱币法和 Cooper 法划分结构化网格如图 1 所示。弯头选择长半径弯头。

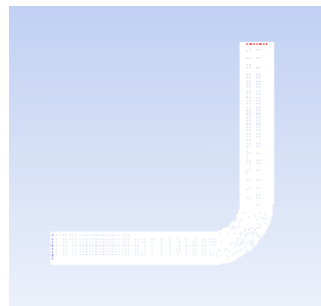
### 1.2 物性参数设置

边界条件入口选择速度入口，出口选择压力出口，管壁选择无滑移壁面。颗粒沉积发生在靠近壁面的位

置，为准确模拟选择 RNG k- $\epsilon$  模型配合增强型壁面函数进行非稳态求解。



(a) 管道入口网格划分



(b) 水平-弯头-竖直管道网格划分

图 1 管道模型网格划分

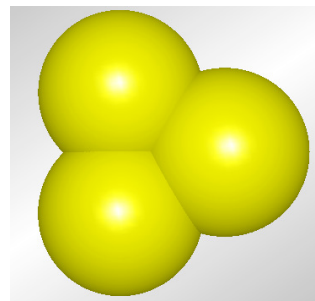


图 2 三颗粒模型

假设管道始终处于恒温状态，管输介质为柴油，柴油密度  $860\text{kg/m}^3$ ，粘度  $3\text{MPa}\cdot\text{s}$ 。

为简化计算，本文所有模拟采用的固体杂质颗粒均为为三颗粒砂粒模型，为正三角形构型，如图 2 所

示, 三角形边长为  $a$ , 子颗粒半径  $r=0.3\text{mm}$ ,  $a:r=1.414$ , 当量直径为  $416\mu\text{m}$ 。

颗粒的当量直径  $d_n$  可用式 (1) 计算:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1)$$

在 EDEM 中颗粒-颗粒和颗粒-管道之间的相互作用设置为 Hertz-Mindlin 无滑动模型, 选择欧拉模型与 Fluent 进行耦合, 阻力模型选择 Di Felice 阻力模型。

砂粒及管道物性参数如表 1 所示, 砂粒-砂粒及砂粒-管道相互作用参数如表 2 所示。

表 1 砂粒及管道物性参数

|    | 泊松比  | 密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 剪切模量 / GPa |
|----|------|------------------------------------------|------------|
| 砂粒 | 0.25 | 2650                                     | 5          |
| 管道 | 0.30 | 7800                                     | 70         |

表 2 砂粒-砂粒及砂粒-管道相互作用参数

| 相互作用  | 恢复系数 | 静摩擦系数 | 滚动摩擦系数 |
|-------|------|-------|--------|
| 砂粒-砂粒 | 0.5  | 0.154 | 0.1    |
| 砂粒-管道 | 0.3  | 0.154 | 0.1    |

## 2 管道特性对沉积规律的影响

本文建立几种不同管径和曲率半径的管道模型, 研究管径、弯头曲率半径和颗粒-管壁静摩擦系数对颗粒沉积规律的影响。

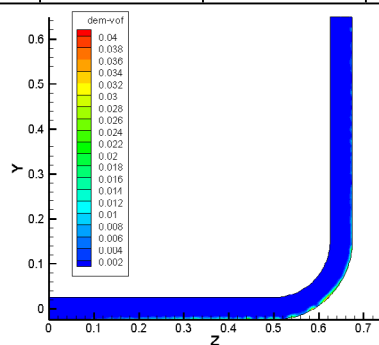
### 2.1 管道直径的影响

建立管径 50mm, 100mm, 150mm, 曲率半径为 150mm 的水平-弯头-竖直管道模型。三种管道曲率半径相同, 管径越小, 弯头内侧管壁半径越大, 外侧管壁半径越小。

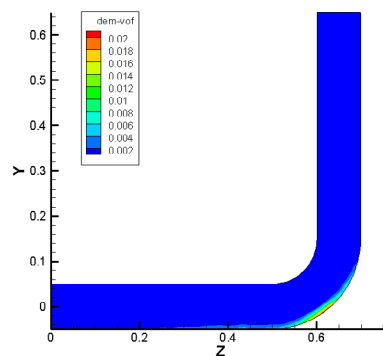
每次模拟的液相流速间隔设置为  $0.05\text{m/s}$ 。模拟得到各个管径的形成移动颗粒层的临界流速  $V_1$  和发生稳定沉积的临界流速  $V_2$  如表 3 所示; 作出不同管径下, 发生稳定沉积时管道纵向轴截面上的颗粒分布情况如图 4 所示。

表 3 各个管径的两种临界流速

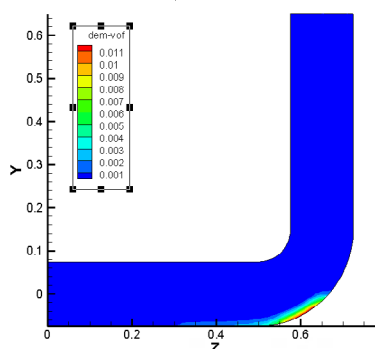
| 管径 mm            | 50   | 100  | 150  |
|------------------|------|------|------|
| $V_1/\text{m/s}$ | 0.85 | 0.75 | 0.65 |
| $V_2/\text{m/s}$ | 0.60 | 0.53 | 0.45 |



(a) 管径 50mm



(b) 管径 100mm

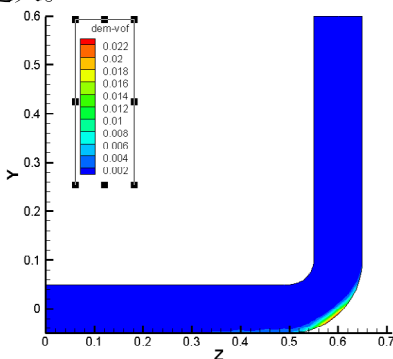


(c) 管径 150mm

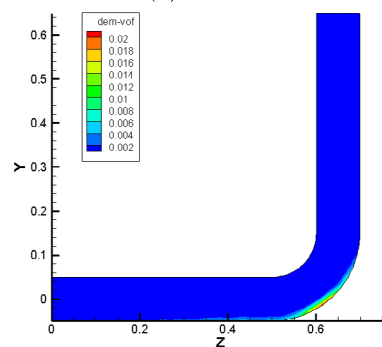
图 3 不同管径颗粒分布情况

### 2.2 弯头曲率半径的影响

建立管径 100mm, 曲率半径 100mm, 150mm, 200mm 的水平-弯头-竖直管道模型。三种管道管径相同, 曲率半径越大, 弯头内侧管壁半径越大, 外侧管壁半径越大。



(a) 100mm



(b) 150mm

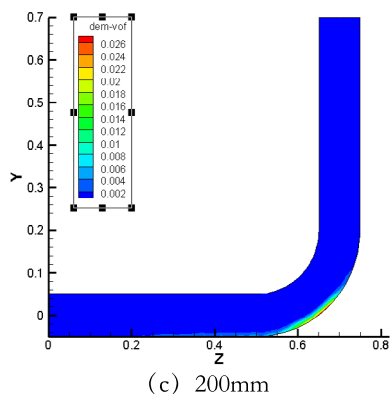


图 4 不同曲率半径颗粒分布情况

模拟得到各个曲率半径形成移动颗粒层的临界流速  $V_1$  和发生稳定沉积的临界流速  $V_2$  如表 4 所示。

表 4 各个曲率半径的两种临界流速

| 曲率半径 mm   | 100  | 150  | 200  |
|-----------|------|------|------|
| $V_1$ m/s | 0.80 | 0.75 | 0.70 |
| $V_2$ m/s | 0.60 | 0.53 | 0.45 |

作出不同曲率半径下, 发生稳定沉积时管道纵向轴截面上的颗粒分布情况如图 5 所示。

由表 4 可以得出: 弯头的曲率半径越大, 临界流速越小; 由图 5 可以得出: 曲率半径越大, 发生稳定沉积时颗粒层的覆盖面越大, 但颗粒体积分数的最大值基本相同。这是因为曲率半径越大, 弯头处的局部阻力越小, 液相流动也更平稳, 当三种曲率半径的管道流速相同时, 曲率半径越小的弯头外侧管壁附近流速越小, 颗粒越容易在此处发生沉积; 大曲率半径的弯头, 颗粒沉积层更容易在弯头底部平铺, 覆盖更大的面积。

### 2.3 颗粒-管壁静摩擦系数的影响

颗粒与管道之间的静摩擦系数与颗粒和管道的材料、管道内涂层、管壁粗糙度等因素有关。设置静摩擦系数取值范围为 0.104~0.304, 取值间隔为 0.05。模拟得到各个颗粒-管壁静摩擦系数下形成移动颗粒层的临界流速  $V_1$  和发生稳定沉积的临界流速  $V_2$  如表 5 所示。

表 5 不同静摩擦系数的两种临界流速

| 静摩擦系数     | 0.104 | 0.154 | 0.204 | 0.254 | 0.304 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_1$ m/s | 0.65  | 0.75  | 0.95  | 1.05  | 1.10  |
| $V_2$ m/s | 0.40  | 0.53  | 0.65  | 0.70  | 0.70  |

由表 5 可以得出: 在静摩擦系数取值范围内, 静摩擦系数越大, 从悬浮流转变成为移动床流的临界流速  $V_1$  越大; 静摩擦系数在 0.104~0.254 范围内时, 静摩擦系数越大, 形成稳定沉积层的临界流速越大; 静摩擦系数在 0.254~0.304 范围内时, 形成稳定沉积层

的临界流速  $V_2$  保持不变。

分析原因为: 从悬浮流转变为移动床流时, 颗粒开始与管壁摩擦, 此时颗粒在管道底部同时有滑动和滚动两种形式, 摩擦系数越大, 颗粒与管壁接触后能量损失越大, 颗粒越容易停留在管道底部, 因而临界流速  $V_1$  越大; 从移动床流转变为稳定的沉积层时, 摩擦系数较小时, 在移动床中颗粒发生滚动和滑动, 当摩擦系数增大到一定值后, 颗粒滑动所受阻力增大, 若颗粒速度还未降为 0, 颗粒更易于发生滚动, 继续增大静摩擦系数也不会改变颗粒更易于滚动的趋势, 使移动床整体受到的摩擦力基本保持不变, 因而临界流速随着静摩擦系数增大先增大后保持不变。

### 3 结论

根据本文的数值模拟结果, 得出在特定情况下水平-弯头-竖直管道中固体杂质沉积规律如下:

①管道直径越小, 临界流速越大; 弯头曲率半径越小, 临界流速越大; 静摩擦系数越大, 形成移动床流的临界流速  $V_1$  越大; 静摩擦系数存在一个临界值, 当小于此值时, 静摩擦系数越大, 形成固定床流的临界流速  $V_2$  越大, 超过此值后  $V_2$  保持不变;

②颗粒在直管段较难发生沉积, 沉积多发生在管道弯头或者弯管处, 采用清管器清管时, 要注意选择合适的清管设备防止在此处发生卡堵。

建议在进行管道设计时:

①管道走向改变时尽量避免使用小曲率半径的弯头或者弯管, 可有效减小形成移动床和固定床流的临界流速, 使得管道正常工况下不会出现移动或者固定的颗粒沉积层;

②可以使用表面光滑的材料制造管道或者在管壁涂敷内涂层, 减小颗粒与管壁之间的摩擦系数, 减小形成移动床流和固定床流的临界流速。

### 参考文献:

- [1] Cundall P.A.The Measurement and Analysis of Acceleration on Rock Slopes[D].London,Imperial College of Science and Technology,1971.
- [2] Tsuji Y,Kawaguchi T,Tanaka T.Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed[J]. Powder Technology,1993,77(1):79-87.
- [3] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社,2010.
- [4] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社.