DOI: 10.3901/JME.2020.14.207

基于 FLOW-3D 的 10 μm 微孔滤膜堵塞机理数值模拟*

卢继霞¹ 卢文豪¹ 赵子赫² 赵修琪¹ 王珊¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电学院 北京 100083;

2. 国家知识产权局专利局专利审查协作江苏中心 苏州 215000)

摘要: 目前对微孔滤膜堵塞机理的研究主要是基于对滤膜堵塞试验数据分析所得的堵塞指数, 而从虚拟仿真角度使滤膜堵塞过程可视化则有利于人们对滤膜堵塞机理的深刻认识。以 10 μm 微孔滤膜为分析对象, 基于 FLOW-3D 对膜孔尺寸附近的颗粒相对于微孔滤膜的摆放位置及倾斜角度与膜孔堵塞的关系, 以及颗粒与膜孔间的架桥截留等进行了仿真分析。研究表明, 短径大于膜孔尺寸的颗粒一定会被膜孔截留, 短径小于膜孔尺寸的颗粒通常情况下均会通过膜孔, 除非该颗粒恰好位于膜孔上方、短径与膜孔尺寸相近且长径与膜孔平行。堵孔后的颗粒表面会承受较大的液体压力。小颗粒与大颗粒的组合会形成稳定的架桥, 架桥是长短径均小于膜孔尺寸颗粒的主要沉积形式。呈一定尺寸分布的颗粒在通过滤膜微孔时, 大颗粒拦截首先发生, 然后才是小颗粒之间的架桥, 这两个机理联合作用导致膜孔堵塞。实际污染样液对滤膜微孔的堵塞结果验证了仿真分析的正确性。仿真结果可为基于滤膜堵塞法的油液污染颗粒定量检测模型研究提供参考。

关键词: 油液污染; 堵塞机理; 微孔滤膜; 数值模拟

中图分类号: TH137

Simulation on the Fouling Mechanism of Micro-pore Filter Membrane in Size of 10 μm with FLOW-3D

LU Jixia¹ LU Wenhao¹ ZHAO Zihé² ZHAO Xiuqi¹ WANG Shan¹

(1. School of Mechanical, Electronic and Information Engineering,

China University of Mining and Technology, Beijing 100083;

2. Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of the Patent Office, Suzhou 215000)

Abstract: The mechanism of membrane pore fouling has mainly been determined by fouling index which is obtained by analyzing the filtrate flux data based on the filter classical fouling models so far. However, it is better to understand the filter fouling mechanism by visualizing the membrane plugging process with a simulation model. Taken a 10 μm micro-pore filter membrane as an example, the relationship between membrane fouling and the position and the inclination angle of particles with size close to membrane pore size relative to filter membrane are studied by using FLOW-3D software. Furthermore, the principles of the bridge interception of the particles by the membrane pores are also discussed. The results show that a single particle can be intercepted when its short diameter is larger than the pore size. Usually, a particle whose short diameter is smaller than the pore size will pass through the membrane only when it is located just above the membrane pore and its short diameter is close to the pore size, and meanwhile the direction of its long diameter is parallel to the membrane pore. The surface of a particle trapped in a pore suffers from a big dragging force. The combination of small particles and large particles can cause a stable bridge. Bridging interception is the main way for the deposition of particles that both the long and short diameters are smaller than the membrane pore size. When the particles with a certain size distribution pass through the microporous membrane, the interception of large particles occurs first, and then the bridging between small particles, and the combination of these two mechanisms leads to membrane pore plugging. The simulation model are validated through plugging

* 国家重点计划专项(2016YFC0600900)和国家自然科学基金(51375481)资助项目。20190804 收到初稿, 20200320 收到修改稿

test of actual polluted oil sample on micro-pore filter membrane. The simulation results can provide a reference for studying the quantitative detection model of contaminated oil samples based on filter fouling.

Key words: oil contamination; fouling mechanism; micro-pore filter membrane; numerical simulation

0 前言

随着液压技术在各工业部门的广泛应用, 液压设备出现故障和维修的工作量也越来越多。要想提高液压系统的工作可靠性和元件的使用寿命, 必须对其工作介质的污染度进行检测。传统的油液污染度检测方法为光电检测法, 然而, 当液压系统的工作介质为多相液体时, 如井下液压支架, 其工作介质为乳化液^[1], 传统的光电检测法因光学界面的干扰而无法准确测量出液体的颗粒污染度^[2]。滤膜堵塞法根据油液通过滤膜时颗粒对膜孔堵塞造成的流量或压力变化信息来检测油液中所含固体颗粒的污染度, 该检测方法不受油液中水分和气泡等的影响, 适用于对各类矿物油、乳化液和高水基溶液的固体颗粒污染度检测^[3]。图1为污染检测常用的10 μm微孔滤膜^[4], 其上分布有一定数量且均匀一致的10 μm方孔。

图1 微孔滤膜的显微结构

图2为不同污染浓度的油液在恒压(0.4 MPa)下通过微孔滤膜时流量 Q 的变化信息^[5]。其中不同污染浓度的油液由标准试验粉尘ACFTD(Air cleaner fine test dust)和洁净的10#航空液压油配制而成, 4种不同的污染浓度(2.3 mg/L, 4.5 mg/L, 9.0 mg/L 和 17.85 mg/L)分别对应的油液污染度等级为NAS 9级、NAS 10级、NAS 11级和NAS 12级。从图2可知油液通过滤膜的流量衰减情况与油液的污染度之间有一定的关系, 如何使这种关系定量化, 即将流量衰减曲线与油液中的固体颗粒尺寸分布建立联系, 则需要对油液中污染颗粒堵塞微孔的过程——滤膜堵塞机理有一个清晰的认识。滤膜堵塞机理的研究通常是借助于HERMIA的恒压堵塞定律^[6], 其可以用式(1)来说明

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left(\frac{dt}{dV} \right)^n \quad (1)$$

式中, t 为过滤时间, V 为液体通过滤膜的总体积, k 为与堵塞机理相关的常数, n 为堵塞指数。 n 值不同表示颗粒对膜孔的堵塞机理也不同: $n=2$ 时代表完全孔堵塞机理, 此机理假设颗粒直径大于膜孔直径, 每个颗粒都会导致膜孔的堵塞; $n=1.5$ 时为标准孔堵塞机理, 此时颗粒沉降在滤膜内部孔壁上, 导致孔体积的压缩; $n=1$ 时代表中间孔堵塞机理, 颗粒可以通过直接堵塞膜孔或者沉积在膜上的其他颗粒上来污染滤膜; 当 $n=0$ 时为滤饼过滤机理, 表示当前过滤过程中膜表面及孔壁已被颗粒占据, 后来颗粒会悉数堆叠在这些颗粒上。很多学者基于恒压堵塞定律对自己的物料系统进行研究, 以揭示微孔滤膜的堵塞机理^[7-10]。尽管如此, 物料系统仍然像一个“黑匣子”, 人们无法通过一个简单的堵塞指数值的描述来清晰地了解物料系统中颗粒如何完成对膜孔的堵塞, 因而有必要将该堵塞过程可视化。

图2 油液恒压下通过滤膜时的流量衰减曲线

随着计算机技术的快速发展, CFD 技术被广泛应用于流体运动仿真试验中^[11-12], 包括流体污染控制中使用的纤维介质对粉尘颗粒的捕获机理及捕获效率的仿真分析^[13-15]。由于所研究的微孔滤膜与其形成堵塞的颗粒体积接近, 因此其流体域划分而成的网格体积与颗粒体积大小接近, 这使得其仿真不能够通过一些常规的仿真方法实现, 如 CFD-DEM (计算流体力学-离散元素法)、CFD-DPM (计算流体力学-离散相模型), 这些仿真方法应用的限制是流体域网格体积必须远大于颗粒体积。而 FLOW-3D 是美国流体科学公司开发的高性能、多用途的 CFD 软件,

其采用有限差分法对离散的 Navie-Stoke 方程进行数值运算求解, 具有独特的 FAVOR(Fractional area volume obstacle representation 部分区域体积障碍表示) 网格处理技术, 可在结构化的网格内部定义独立复杂的几何体, 能够充分利用简单的矩形网格表示任意复杂的几何形状, 计算区域网格划分简单, 网格尺寸大小调试方便, 计算精度也可以通过网格的局部细化而调整, 因此可以描述复杂的流场运动模式^[16-17]。本文拟以 10 μm 微孔滤膜为分析对象, 采用 CFD-RBD(计算流体力学-刚体动力学)研究方法^[18-19], 选用 CFD 软件——FLOW-3D, 应用集成在软件中的 GMO 模型(通用移动物体模型)来实现流体与颗粒及滤膜之间的运动仿真^[20]。本文将重点对尺寸大小在膜孔尺寸附近的颗粒相对于微孔滤膜的摆放位置及倾斜角度与膜孔堵塞的关系、以及颗粒之间形成架桥截留的条件等进行探讨, 一方面可以将颗粒对微孔滤膜的堵塞机理可视化, 另一方面也希望借助该机理的研究为油液污染度定量检测模型的建立提供参考。

1 主要控制方程

1.1 流体质量连续性方程

通用的质量连续性方程如下式所示

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2)$$

式中, V_F 为流体体积分数; ρ 为流体密度; R 为软件坐标系统参数; R_{DIF} 为紊流扩散项; R_{SOR} 为质量源系数; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 方向、 y 方向和 z 方向的流体面积分数; u 、 v 、 w 为分别是坐标方向(x , y , z)或(r , θ , z)的速度分量; ξ 为坐标系数, 在笛卡儿坐标系统下 ξ 取 0; 在圆柱坐标系统下 ξ 取 1。

1.2 流体动量方程

流体的三个坐标方向速度分量相对应的 N-S 方程如下

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \sigma u_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} R \frac{\partial v}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \sigma v_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \sigma w_s) \quad (5)$$

式中, G_x 、 G_y 、 G_z 为流体加速度; f_x 、 f_y 、 f_z 为黏性加速度; b_x 、 b_y 、 b_z 为通过多孔介质的流体损失; 式(3)~(5)中的最后一项代表几何物体的射流, 其中 σ 为克罗内克符号, $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ 为速度源项, 当 GMO 模型激活时该项取值不为 0, $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ 是与流体本身源项有关的流体表面速度, 软件可自行对其计算。

1.3 颗粒运动方程

颗粒在运动过程中受到的合力与合力矩表达式如下

$$F = m \frac{dV_G}{dt} \quad (6)$$

$$T_G = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (J \cdot \omega) \quad (7)$$

式中, F 是颗粒所受的总合力, 包括重力、液体力(包括压力与切应力)以及固体壁面及颗粒与颗粒间的作用力等; m 是颗粒的质量; V_G 是质心的移动速度; T_G 是关于质心的总合力矩; ω 是质心的旋转角速度; J 是体坐标系下的质量惯性矩, 如式(8)所示

$$J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, J_{11} 、 J_{22} 、 J_{33} 为惯性矩, 其余为惯量乘积, 表达式分别如下

$$J_{11} = \int (y'^2 + z'^2) dm \quad (9)$$

$$J_{22} = \int (x'^2 + z'^2) dm \quad (10)$$

$$J_{33} = \int (x'^2 + y'^2) dm \quad (11)$$

$$J_{12} = J_{21} = -\int x'y' dm \quad (12)$$

$$J_{13} = J_{31} = -\int x'z' dm \quad (13)$$

$$J_{23} = J_{32} = -\int y'z' dm \quad (14)$$

式中, x' 、 y' 和 z' 是颗粒的体坐标。

2 物理建模及数值模拟

2.1 物理建模及网格划分

由图 1 可知实际的微孔滤膜表面分布有非常多

的尺寸均匀一致的微孔, 为了便于仿真, 取含有 4 个 $10\ \mu\text{m}$ 膜孔的局部流场作为研究对象, 三维建模后, 在 FLOW-3D 中对模型进行网格划分, 划分后的物理模型如图 3 所示, 其网格数目为 78 万个。

2.2 颗粒属性及边界条件设置

实际系统中的颗粒形状多样, 大小不一, 此处将颗粒用两个具有公共底面的圆锥体组成的圆锥组合体表示, 其截面为具有长径和短径两个形状因素的菱形, 且长短径比参考标准试验粉尘 ACFTD 设定为 $1.5:1$, 密度设为 $2\ 700\ \text{kg/m}^3$ 。由于在微孔滤膜附近颗粒对膜孔的堵塞会对流场产生影响, 所以将颗粒的运动形式设为与流场耦合运动。颗粒为刚体, 其运动可以分解为 3 个平移和 3 个旋转共 6 个速度分量, 因此设颗粒的自由度为 6。通过前期对 $0.4\ \text{MPa}$ 操作压力下 $10\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜的流场仿真分析, 发现膜孔上方 $50\ \mu\text{m}$ 处(颗粒释放处)的平均流速为 $0.8\ \text{m/s}$, 故将颗粒的初始速度设为 $0.8\ \text{m/s}$, 初始运动方向垂直于膜孔表面。颗粒的模型见图 4。

图 3 网格划分后膜孔物理模型

图 4 颗粒模型

边界条件设置为进口压力 $0.4\ \text{MPa}$, 出口压力 $0\ \text{MPa}$, 其他方向设为对称面, 膜孔丝径设为壁面边界。

2.3 数值模拟分析

2.3.1 膜孔堵塞效应分析

首先对有无颗粒堵塞膜孔时, 膜孔附近流场的速度及压力变化情况进行仿真。仿真结果见图 5。

(a) 压力分布云图

(b) 速度分布云图

图 5 堵塞引起的流场变化对比

由图 5 可见前方左侧膜孔内未发生颗粒堵塞, 右侧膜孔内发生了颗粒堵孔。比较这两个孔的压力分布图 5a 可以发现, 无颗粒堵塞时, 压力在膜孔处逐渐衰减, 而有颗粒堵孔时, 颗粒下游的压力仍逐渐变化, 但其上游压力会增大到最大值, 即在堵孔颗粒的上表面会受到较大的压力。比较这两个膜孔的速度分布图 5b 知, 未堵塞的膜孔内流速较大, 在

截面尺寸最小处达到最大值, 而膜孔堵塞后流速降为 0, 流体不再通过堵塞的膜孔。

2.3.2 颗粒及长短径方向相对于滤膜的位置与膜孔堵塞的关系

颗粒相对于滤膜膜孔的初始位置分为三种, 即在同一释放高度上, 颗粒位于丝径交叉处上方(图 6 标记 1 处)、颗粒位于丝径上方(图 6 标记 2 处)和颗粒位于膜孔上方(图 6 标记 3 处)3 种情况。将颗粒短径尺寸设为与膜孔尺寸相同, 即 $10\ \mu\text{m}$, 长径尺寸设置为短径的 1.5 倍, 即 $15\ \mu\text{m}$ 。摆放时, 选择了颗粒长径垂直于滤膜表面和颗粒长径平行于滤膜表面两种情况。各种情况下的颗粒运动情况见图 7~12。

图 6 颗粒摆放位置示意图

(1) 颗粒位于丝径交叉处(标记 1)。此位置下当颗粒长径垂直于滤膜表面放置时, 颗粒的运动过程如图 7 所示, 图 7a~7c 描述了不同仿真时刻时颗粒的运动情况, 图 7a 描述了颗粒释放时的位置和方向; 图 7b 表示当颗粒运动到膜表面与丝径交叉处接触后会改变运动方向, 向膜孔处运动; 图 7c 表示颗粒在 $0.24\ \text{ms}$ 后通过了滤膜微孔。

(a) $t=0$

(b) $t=0.15\ \text{ms}$

(c) $t=0.24\ \text{ms}$

图 7 标记 1 处(垂直放置)颗粒运动过程

图 8 为颗粒长径平行于滤膜表面放置时的运动过程, 颗粒的运动情况与垂直放置时相似, 颗粒最终在 $0.3\ \text{ms}$ 之后通过膜孔。

(a) $t=0$

(b) $t=0.064\ \text{ms}$

(c) $t=0.2\ \text{ms}$

图 8 标记 1 处(平行放置)颗粒运动过程

(2) 颗粒位于丝径上方(标记 2)。图 9 为长径垂直于滤膜表面放置时颗粒的运动过程, 同样, 图 9a 描述了颗粒释放时的位置和方向; 图 9b 表示当颗粒运动到膜表面与丝径接触后改变了运动方向, 向膜孔处运动; 图 9c 表示颗粒在 0.082 ms 后通过了滤膜微孔。图 10 为颗粒长径平行于滤膜表面放置时颗粒的运动过程, 颗粒在 0.079 ms 后完全通过滤膜微孔。

图 9 标记 2 处(垂直放置)颗粒运动过程

图 10 标记 2 处(平行放置)颗粒运动过程

(3) 颗粒位于膜孔上方(标记 3)。图 11 为颗粒长径垂直于滤膜表面放置时颗粒的运动过程, 颗粒在 0.042 ms 后完全通过滤膜微孔。

图 11 标记 3 处(垂直放置)颗粒运动过程

图 12 为颗粒长径平行于滤膜表面放置时颗粒的运动过程, 图 12b 表示颗粒在 0.026 ms 时被滤膜

图 12 标记 3 处(平行放置)颗粒运动过程

截留。由图 12c 所示俯视图可以更清楚地看到颗粒被膜孔机械截留的情况。

由图 7~12 可见, 短径与膜孔一致的单个颗粒无论是位于丝径交叉处上方还是丝径上方, 颗粒初始位置无论是长径平行于滤膜表面还是垂直于滤膜表面, 颗粒在液体中均承受重力、液压力、惯性力等力的作用而下落(因颗粒形状设置为对称, 所以在液体中水平方向受力平衡, 下落方向为垂直于膜表面), 在接触到下方的圆柱形滤膜丝径后, 会受到来自膜表面作用力, 原来的力平衡破坏, 颗粒会偏转, 最终会在合力作用下向膜孔处运动并通过膜孔。当颗粒以长径垂直于滤膜的方向放置在膜孔上方时, 颗粒垂直下落, 因短径尺寸和膜孔一致, 所以颗粒在膜孔处会有短暂停留, 但由于此时颗粒上表面会承受较大的压力, 也会受到周围由于液体流动产生的切应力, 因此颗粒最终会在液体力作用下通过膜孔。而当颗粒以长径平行于滤膜的方向放置在膜孔上方时, 由于长径大于膜孔径, 所以下落至膜孔处时颗粒会直接被膜孔拦截, 即发生机械截留。在相同释放高度时不同位置的颗粒通过滤膜微孔的时间也不相同, 丝径交叉处上方的颗粒通过膜孔用时最长, 位于丝径上方的颗粒用时次之, 而膜孔上方的颗粒通过膜孔用时最短。

2.3.3 不同尺寸颗粒的截留效应

为进一步了解不同尺寸大小的颗粒对膜孔堵塞的情况, 选取了 4 种尺寸的颗粒各 1 个, 其长-短径分别为 20-12, 15-10, 12-8, 10-6。将这 4 个颗粒分别放置在 4 个膜孔上方, 按照颗粒长径与滤膜表面夹角 45° 、颗粒长径平行于滤膜表面两种放置情况进行仿真分析。

(1) 长径与滤膜表面夹角为 45° 时。图 13a~13d 为 4 个颗粒长径均倾斜于滤膜表面 45° 情况下的运动过程。图 13a 描述了 4 个颗粒释放时的位置和方向; 图 13b 表示颗粒运动到了膜孔附近; 图 13c 表示颗粒正在通过滤膜微孔。由图 13d 知有 3 个颗粒通过了膜孔, 而长短径为 20-12 的颗粒被滤膜膜孔机械截留。长短径为 15-10 的颗粒虽然长径大于膜孔尺寸, 但其短径与膜孔尺寸一致, 和前述仿真结

图 13 不同尺寸颗粒运动过程

果一样,颗粒在膜孔处短暂停留后通过了膜孔。

(2) 长径平行于滤膜表面放置。图 14 为长径平行于滤膜表面放置时 4 个颗粒的运动过程。同样,图 14a 描述了 4 个颗粒释放时的位置和方向;图 14b 表示颗粒运动到了膜孔附近;图 14c 表示长短径为 12-8 及 10-6 的两个颗粒通过了膜孔,长短径为 15-10 和 20-12 的 2 个颗粒发生了机械截留,沉积在了膜孔内。在仿真中还发现,12-8 的颗粒在膜孔处发生了短暂停留,但由于其短径小于膜孔尺寸,最终在液体力的作用通过了滤膜微孔。

图 14 不同尺寸颗粒运动过程

以上仿真试验表明,单个颗粒的沉积与否不仅取决于短径也取决于长径。若颗粒的短径大于膜孔径,则颗粒一定被截留,若短径小于膜孔径,则看长径是否大于膜孔径,同时还要考虑颗粒长径方向与膜孔之间的相互位置关系。一般来说,短径小于膜孔尺寸的颗粒无论其长径大小如何,通常情况下都会通过膜孔,除非该颗粒恰好位于膜孔上方、短径接近于膜孔尺寸且长径方向平行于膜孔。

2.3.4 颗粒之间的架桥截留

(1) 小颗粒与小颗粒的架桥。选取 4 个长短径均为 10-6 的颗粒分为两组,每组 2 个颗粒,一组按长径垂直于膜表面放置,另一组按长径平行于膜表面放置,每组的初始位置分别位于两个不同的膜孔上方。如图 15a,左侧孔上方 2 个颗粒长径垂直于膜表面,右侧孔上方 2 个颗粒长径平行于膜表面。图 15b 表示颗粒运行至膜孔处时,两组颗粒在相应膜孔处都有架桥截留状态出现。不过这种架桥很不稳定,由图 15c 可以看出在液体拖曳力的作用下这种小颗粒之间的架桥截留状态很容易被破坏,颗粒最终会通过膜孔。

(2) 小颗粒与大颗粒之间的架桥。将 1 个长短径为 15-10 的大颗粒和 1 个长短径为 10-6 的小颗

图 15 小颗粒间的架桥

粒作为一组,以长径垂直于膜表面的方向放置于左前膜孔上方,仿真运动过程见图 16。由图 16a 和图 16b 可知大颗粒由于所受的垂直向下的力大,会先到达膜孔位置并被膜孔短暂截留,图 16c 表示随后到来的小颗粒会嵌入大颗粒与膜孔之间的间隙,形成稳定的架桥截留。图 16d 为仿真结果的俯视图,可以看到大小两颗粒在左前膜孔形成了稳定的架桥截留。

图 16 颗粒运动过程

实际的液样中大小颗粒按一定尺寸分布存在,颗粒相对于滤膜位置的不同、颗粒性质及大小的不同等均会导致颗粒到达膜孔处的时间不同。某个膜孔一旦有大颗粒被截留,就很容易与后续到达的小颗粒一起形成稳定的架桥,导致膜孔逐渐堵塞,最终颗粒在膜表面堆积形成滤饼。

3 基于实际颗粒分布的膜孔堵塞机理仿真分析

3.1 基于实际样液颗粒分布的仿真区域颗粒分布设置

前述研究仅为了探究颗粒的截留机理,颗粒数及尺寸的设置并不符合实际系统中的颗粒尺寸分布规律。滤膜堵塞法的污染度检测对象为实际系统油液,因此有必要了解颗粒符合实际系统的尺寸分布时滤膜的堵塞机理。

表 1 为取自实际液压系统的油液经颗粒计数器(HIRC-ROYCO 4100)和激光传感器(HRLD 150)测

表 1 颗粒尺寸分布表

尺寸段/ μm	实际颗粒数/(个/ cm^3)	仿真颗粒数/(个/ cm^3)
>3	4 058	8.3
>5	2 825	5.8
>8	1 969	4.0
>10	1 366	2.8
>11	1 136	2.3
>12	944	1.9
>15	537	1.1
>16	443	0.9

得的颗粒尺寸分布数据及考虑实际滤膜通流面积与仿真区域通流面积之比后折算的仿真用颗粒尺寸分布数据。因为长短径在膜孔尺寸附近的颗粒对堵塞机理的探究最为显著, 因此表中仅列出了膜孔尺寸附近尺寸段颗粒的数据。

分析表中数据可知, 8 μm 以下的颗粒为小于膜孔尺寸的颗粒, 共有 4 个, 此处仿真时均用长短径为 8-5 的颗粒代替; 8 μm 以上的颗粒也共有 4 个, 这部分颗粒对堵塞起关键作用, 需要对这些 4 个仿真颗粒的大小进行设置。由表中数据知 8~15 μm 的仿真颗粒有 3 个, 考虑到颗粒的大小并不相同, 因此分别用长短径为 12-8 的颗粒 1 个、15-10 的颗粒 1 个及 16-11 的颗粒 1 个来进行仿真。表中大于 15 μm 的 1 个仿真颗粒也仍用 1 个长短径为 16-11 代替。因此, 仿真使用的颗粒粒径及个数如表 2 所示。

表 2 仿真颗粒设置

颗粒(长径-短径)/ μm	仿真颗粒数/个
16-11	2
15-10	1
12-8	1
8-5	4

3.2 仿真过程分析

颗粒在不同仿真时间时的运动情况如图 17a~17d 所示。图 17a 可以看到不同尺寸的颗粒被释放; 图 17b 可以看到运动较快的大颗粒已到达膜孔处; 图 17c 中大颗粒已发生了机械截留; 图 17d 膜孔堵塞结束。

图 17 颗粒运动过程

分析图 17 颗粒的运动仿真, 发现最终 2 个 16-11 的颗粒和 1 个 15-10 的颗粒因机械截留直接沉积在滤膜膜孔上, 1 个 12-8 的颗粒和 1 个 8-5 的颗粒因架桥机理沉积在已沉积的颗粒与膜孔形成的间隙内, 其余 3 个小颗粒均通过了膜孔, 未在膜孔内形成堵塞。仿真中还发现, 当某膜孔被堵塞时, 因膜孔处流速的变化, 本来处于膜孔之上的颗粒可能因此会改变运动方向, 从未堵塞的膜孔处通过滤膜。

图 18a 是最终沉积状态的仿真域俯视图, 从该图可以看出流体中呈一定尺寸分布的颗粒在通过滤膜微孔时, 拦截和架桥机理均在发生作用, 由这些机理导致膜孔孔隙逐渐减小直至被堵塞, 也就是堵塞指数值为 1.5 的情况。最终滤饼在膜表面生成, 即堵塞指数变为 0 值。由于仿真时间的限制, 本文主要是对颗粒堵孔过程进行仿真, 并未涉及对最终滤饼形成的仿真。图 18b 是表 1 所示的实际样液通过滤膜后, 实际颗粒对滤膜膜孔堵塞情况的显微观察, 可以看出每个堵塞的膜孔处都有大颗粒的机械截留以及较小颗粒的架桥沉积发生, 从而导致膜孔逐渐被堵塞, 最终会形成滤饼。所以由仿真揭示的颗粒对膜孔的堵塞机理与实际情况基本相符。

(a) 数值模拟最终沉积结果

(b) 污染滤膜表面电镜观察

图 18 颗粒沉积比较

4 结论

利用 CFD-RBD 方法模拟了颗粒对微孔滤膜的堵塞机理, 探讨了影响机械截留和架桥截留的因素, 得到以下结论。

(1) 与堵塞指数对膜孔堵塞机理的描述相比, 基于 FLOW-3D 的流场仿真分析方法可以很直观地展现颗粒对滤膜微孔的堵塞过程及机理。

(2) 小颗粒与小颗粒之间形成的架桥很容易被破坏, 因此每个膜孔的堵塞都是从大颗粒的直接拦截机理开始, 然后才是大颗粒与小颗粒之间形成的架桥, 最终导致膜孔堵塞, 表面形成滤饼。

(3) 仿真分析所揭示的颗粒堵孔顺序及堵塞机

理, 可以为基于滤膜堵塞法的油液颗粒污染度定量分析模型的研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] 宋单阳, 宋建成, 田慕琴, 等. 煤矿综采工作面液压支架电液控制技术的发展及应用[J]. 太原理工大学学报, 2018, 49(2): 240-251.
SONG Danyang, SONG Jiancheng, TIAN Muqin, et al. Development and application of electro-hydraulic control technology for hydraulic support in coal mine[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018, 49(2): 240-251.
- [2] International Organization for Standardization. Hydraulic fluid power: Monitoring the level of particulate contamination of the fluid-Part 3: Use of the filter blockage technique[S/OL]. [2008-04-16]. <http://www.spc.org.cn>.
- [3] 卢继霞, 夏连海, 丁思变, 等. 污染度检测传感器分类及检测特点分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(7): 99-102.
LU Jixia, XIA Lianhai, DING Sibian, et al. Classification of contamination level testing sensors and their testing characteristics[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(7): 99-102.
- [4] 卢继霞, 丁慧, 方亮, 等. 化学镀镍方法制备金属微孔滤膜[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 171-176.
LU Jixia, DING Hui, FANG Liang, et al. Method to make metal micro-pore filter membrane through electro less nickel-plating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 171-176.
- [5] LU Jixa, JIA Ruiqing. A new model to determine the particle size distribution of solid contaminants in a fluid based on micro-sieve silting principle[J]. Powder Technology, 2016, 294: 403-410.
- [6] HERMIA J. Constant pressure blocking filtration laws: Application to power-law non-Newtonian fluids[J]. Trans. Inst. Chem., 1982, 60: 183-187.
- [7] KAWAKATSU T, NAKAO S, KIMURA S. Effects of size and compressibility of suspended particles and surface pore size of membrane on flux in crossflow filtration[J]. J. Membrane Sci., 1993, 81: 173.
- [8] WANG F, VOLODYMYR V T. Pore blocking mechanisms during early stages of membrane fouling by colloids[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 328: 464-469.
- [9] HWANG K, LIAO C Y. Effects of membrane morphology and operating conditions on microfiltration particle fouling[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012, 43: 46-52.
- [10] WARKIANI M E, WICAKSANA F, FANE A G, et al. Investigation of membrane fouling at the microscale using isopore filters[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2015, 19(2): 307-315.
- [11] 郭宽良. 高等传热和流动问题的数值计算[M]. 南京: 江苏大学出版社, 2012.
GUO Kuanliang. Advanced numerical heat transfer and fluid flow[M]. Nanjing: Jiangsu University Press, 2012.
- [12] 胡坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
HU Kun, LI Zhenbei. Detailed explanation of ANSYS ICEM CFD engineering examples[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2014.
- [13] 钱付平, 王海刚. 随机排列纤维过滤器颗粒捕集特性的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 120-126.
QIAN Fuping, WANG Haigang. Numerical analysis on particle capture characteristics of fibrous filters with random structure[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 120-126.
- [14] 付海明, 徐芳芳, 李艳艳. 纤维过滤介质渗透率及压力损失数值模拟[J]. 华侨大学学报, 2012, 33(5): 535-542.
FU Haiming, XU Fangfang, LI Yanyan. Numerical simulation on permeability and pressure drop of fibrous filtration media[J]. Journal of Huaqiao University, 2012, 33(5): 535-542.
- [15] 王亮, 付海明, 朱辉, 等. 基于 DPM 法单纤维捕集效率的 CFD 模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(1): 49-51, 48.
WANG Liang, FU Haiming, ZHU Hui, et al. Simulation of collection efficiency on single fiber surface based on DPM[J]. Building Energy & Environment, 2015, 34(1): 49-51, 48.
- [16] GROENEVELD J, TEKLEMARIAM E. Hydraulic applications of Flow-3D proceedings[J]. Annual Conference: Canadian Society for Civil Engineering, 1999, 2: 69-78.
- [17] 王新民, 张得明, 张钦礼, 等. 基于 FLOW-3D 软件的深井膏体管道自流输送性能[J]. 中南大学学报, 2011, 42(7): 2102-2108.
WANG Xinmin, ZHANG Deming, ZHANG Qinli, et al. Pipeline self-flowing transportation property of paste based on FLOW-3D software in deep mine[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(7): 2102-2108.
- [18] COSTELLO M, SAHU J. Using computational fluid

- dynamics-rigid body dynamic (CFD-RBD) results to generate aerodynamic models for projectile flight simulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part G): Journal of Aerospace Engineering, 2007, 222 (7): 1067-1079.
- [19] COSTELLO M, GATTO S, SAHUAIAA J. Using CFD/RBD results to generate aerodynamic models for projectile flight simulation[J]. Atmospheric Flight Mechanics Conference & Exhibit, 2013, 157(6): 906-906.
- [20] CHO JN, SONG H, HWANG KN, et al. Experiment assessment of suspended sediment concentration changed by solitary wave[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2017, 25(6): 649-655.
-
- 作者简介: 卢继霞, 女, 1971 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为液压系统污染控制。
E-mail: lujx1971@126.com