

考虑空间位形力作用的微米软颗粒溶液微圆管流动规律

朱维耀^{1)✉}, 王亚震¹⁾, 岳明¹⁾, 邓庆军²⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

2) 大庆油田第一采油厂, 大庆 163000

✉通信作者, E-mail: weiyao@sina.com

摘要 针对微米级软颗粒溶液在微小孔道流动不符合泊肃叶流动规律问题, 考虑受固体管壁影响软颗粒形变产生的空间位形力作用, 基于 Navier-Stokes 理论, 推导软颗粒溶液在圆管中的流速分布及流量表达式, 引入颗粒形变因子以表征空间位形力作用的影响; 建立考虑空间位形力作用的圆管流动数学模型. 由微尺度流动特征实验, 得到软颗粒溶液微圆管流动规律, 与泊肃叶流动对比, 结果显示当管径小于颗粒直径时, 相同压力梯度下考虑空间位形力作用的流速比泊肃叶流动拟合结果更接近于实验数据. 通过数值计算分析发现, 与泊肃叶流动下的速度分布和平均流量相比, 当微圆管尺寸减小时, 空间位形力作用随之增大, 其更大程度上影响流体在微圆管内的流动规律; 当颗粒呈非球形且最小投影面积相同时, 偏离球形颗粒程度越大, 空间位形力作用越大, 因此空间位形力作用在微小孔道流动中不可忽略.

关键词 微米管道; 微观力; 空间位形力; 数学模型; 速度分布

分类号 O357.3

Micro circular pipe flow in micron-sized soft particle solution considering the effect of spatial configuration force

ZHU Wei-yao^{1)✉}, WANG Ya-zhen¹⁾, YUE Ming¹⁾, DENG Qing-jun²⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) First Oil Production Plant, Daqing Oilfield, Daqing 163000, China

✉Corresponding author, E-mail: weiyao@sina.com

ABSTRACT With the development of liquid production and molecular synthesis technology, the application of soft particle solutions has become increasingly widespread. Soft particle solutions are also used in oil exploitation technology. The soft particles can be elastically deformed through the pores, and the whole process produces a resistance effect on flow. After breaking through the tunnel, the original shape is restored and continuously moved to the deep part of the oil layer. The soft particles do not only block the porous medium but also increase flow resistance. Moreover, they can generate deformation and break through the pores under a certain pressure to reach the depth of the reservoir. The microscopic forces mainly include Van der Waals force, electrostatic force, spatial configuration force, and surface tension. The effect of the spatial configuration force caused by the deformation of the soft particles affected by the tube wall action is considered to address the problem that micron-sized soft particle solutions in microtube deviate from the Poiseuille law. On the basis of Navier-Stokes theory, the flow velocity distribution and flow expression of the polymer solution in the tube were derived. A particle deformation factor was introduced to characterize the effect of the spatial configuration force. A mathematical model of microtube flow was established by considering the spatial configuration force. From the micro-scale flow characteristics experiment, the microtube flow in micron-sized soft particle solution was obtained. As evidenced by the results, when the tube diameter is smaller than the particle diameter, the flow velocity considering the spatial configuration force is closer to the experimental data than the Poi-

seuille flow under the same pressure gradient. Through the analysis of influencing factors, the spatial configuration force cannot be neglected in the microtube flow. Compared with the Poiseuille flow, the spatial configuration force increases and affects the microtube flow when the microtube size decreases. When the particles are non-spherical and the minimum projected area is the same, the greater the degree of deviation from the spherical particles and the greater the effect of the spatial configuration force.

KEY WORDS micro-size tubes; micro forces; spatial configuration force; mathematical models; velocity distribution

随着液体制作和分子合成技术的发展,软颗粒溶液的应用越来越广泛. 其中软颗粒溶液也用于石油开采驱油技术中^[1]. 因软颗粒成本低廉,分散性好,颗粒可以通过自身弹性变形穿过孔道,整个过程对流动产生阻力效应,并在突破孔道后恢复原来形状,再次向油层深部不断运移. 其既能封堵多孔介质使得流动阻力增加,又能够在一定压力下产生变形突破孔道,进而达到进入油藏深部对深部调驱^[2-4]. 大量实验证明,在微观尺度下,流体不再遵守经典流体力学的 Navier-Stokes 方程,实验结果偏离理论预测结果^[5-13],目前研究的微观力主要包括范德华力、静电力、空间位形力和表面张力等^[14-18].

目前,考虑空间位形力作用的软颗粒溶液微圆管流动模型较少,为此分析了微圆管内空间位形力的作用,研究空间位形力对流体在微圆管流动产生的影响,建立受固体管壁影响软颗粒形变产生的空间位形力作用下的速度和平均流量模型,通过微尺度流动特征实验对模型加以验证,并进行数值计算分析,以研究多孔介质微小孔道内流体的流动规律.

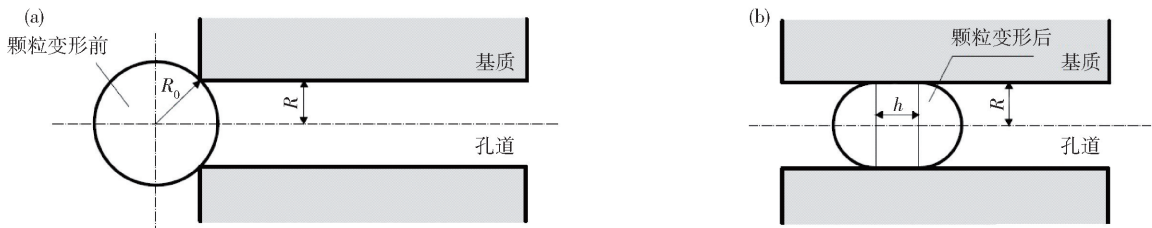


图1 球形颗粒通过圆柱形孔道示意图. (a)颗粒未进入孔道;(b)颗粒完全进入孔道

Fig. 1 Schematic diagram of spherical particles passing through a cylindrical tunnel: (a) outside the tunnel; (b) in the tunnel

积相同时,球形颗粒表面积最小,与球形差别愈大,颗粒的表面积也愈大^[20]. 因此当颗粒完全进入孔道内时颗粒变形最大.

原始颗粒体积 V_0 为:

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \quad (1)$$

颗粒完全进入孔道变形后,假设两端为两个半球^[21],则颗粒体积 V_1 为:

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi R^3 + \pi R^2 h \quad (2)$$

式中: R_0 为颗粒原始半径,m; R 为孔道半径,m; h 为颗粒变形后中间的圆柱段长度,m.

1 考虑空间位形力作用的微孔道软颗粒流动

多孔介质内流体流动时,孔道的特征尺寸较小,因此流体的流动受到管壁和流体间的微观力作用较大,当软颗粒通过微孔道运移时,空间位形力作用显著增强,因此不能被忽略.

软颗粒是具有三维的空间网状结构的分子内交联的聚合物分子团,其形态以球形为主,还包括有长圆柱、椭球等不规则形状. 在此分析了球形颗粒、圆柱(两端为半球)颗粒两种情况. 当颗粒直径大于孔道并通过时,颗粒依赖于孔道的圆柱形几何形状变形通过^[19]. 受固体管壁的作用,颗粒形变产生空间位形力. 由于空间位形力作用的影响,驱替压力部分起到驱替作用,另外一部分压力转化为改变颗粒形状的空间位形力,即一部分动能转化为空间位形能,使颗粒能够通过孔道.

1.1 球形颗粒通过圆柱形孔道形变

球形颗粒进入微小孔道过程(见图1),分为开始进入孔道和完全进入孔道. 当各种形状的颗粒体

假设颗粒变形前后体积不变,即

$$V_0 = V_1 \quad (3)$$

代入式(1)和(2)可得

$$h = \frac{4R_0^3}{3R^2} - \frac{4}{3}R \quad (4)$$

原始颗粒表面积 S_0 为:

$$S_0 = 4\pi R_0^2 \quad (5)$$

颗粒完全进入孔道变形后,颗粒表面积 S_1 为:

$$S_1 = 4\pi R^2 + 2\pi R h \quad (6)$$

代入式(4)得到

$$S_1 = 4\pi R^2 + 2\pi R \left(\frac{4R_0^3}{3R^2} - \frac{4}{3}R \right) \quad (7)$$

$$\text{即 } S_1 = \frac{8\pi R_0^3}{3R} + \frac{4}{3}\pi R^2 \quad (8)$$

假设颗粒变形前后体积不变, 表面积改变, 定义形变因子 D 表达式为:

$$D = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \quad (9)$$

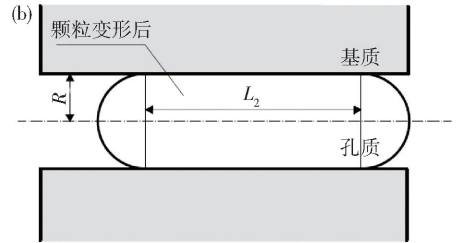
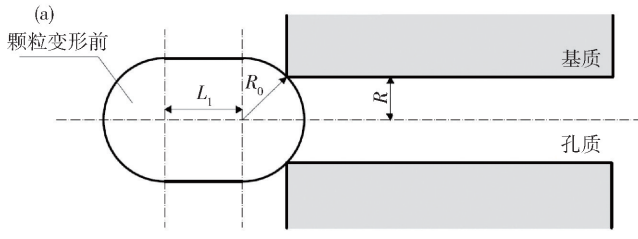


图 2 圆柱形颗粒通过圆柱形孔道示意图. (a) 颗粒未进入孔道; (b) 颗粒完全进入孔道

Fig. 2 Schematic diagram of cylindrical particles passing through a cylindrical bore; (a) outside the tunnel; (b) in the tunnel

原始颗粒体积 V_0 为:

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi R_1^3 - \pi R_1^2 L_1 \quad (11)$$

颗粒完全进入孔道变形后, 颗粒体积 V_1 为:

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R^3 - \pi R^2 L_2 \quad (12)$$

式中: R_0 为颗粒原始半径, m; R 为孔道半径, m; L_1 为颗粒原始柱身长度, m; L_2 为颗粒变形压缩后柱身长度, m.

假设颗粒变形前后体积不变, 可得

$$L_2 = \frac{\frac{4}{3}(R_1^3 - r^3) + R_1^2 L_1}{r^2} \quad (13)$$

原始颗粒表面积 S_0 为:

$$S_0 = 4\pi R_1^2 + 2\pi R_1 L_1 \quad (14)$$

颗粒完全进入孔道变形后, 代入式(13)得到颗粒表面积 S_1 为:

$$S_1 = 4\pi R^2 + 2\pi \frac{\frac{4}{3}(R_1^3 - R^3) + R_1^2 L_1}{R} \quad (15)$$

根据式(14)和式(15), 得

$$D = \frac{\frac{2}{3}R^2 + \frac{4R_1^3}{3R} + \frac{R_1^2 L_1}{R} - 2R_1^2 - R_1 L_1}{2R_1^2 + R_1 L_1} \quad (16)$$

将颗粒弹性变形力作为颗粒变形的函数. 颗粒弹性变形力在这里表示为 T , 写作:

$$T = eED \quad (17)$$

式中: e 是颗粒表面厚度, E 是表观杨氏模量值, D 是颗粒形变因子.

因此, 颗粒弹性变形力 T 是颗粒厚度孔径, 颗粒形态和纳米力学性质的函数. 实现刚好足以使 N

将式(5)和式(8)代入式(9), 得

$$D = \frac{2R_0}{3R} + \frac{R^2}{3R_0^2} - 1 \quad (10)$$

1.2 圆柱形(两端为半球)颗粒通过圆柱形孔道形变

圆柱形颗粒求解方法原理与球形颗粒相同, 其通过圆柱形孔道示意图如图 2.

个颗粒穿透半径为 R 的孔的变形(记为 p_D) 所需的力即空间位形力与颗粒弹性变形力 T 有关.

$$p_D = 2\pi RNT \quad (18)$$

其中, 颗粒数目可以根据已知的溶液浓度计算, 或者通过扫描电镜观察统计出实际数目.

当颗粒在通过小于其直径 0.2 倍的孔道时, 认为粒子已经达到变形极限仍不能通过孔道, 在这里不考虑颗粒破碎通过的情况. 根据上述公式, 可以得到孔道半径和颗粒半径的比与形变因子的关系, 如图 3 所示.

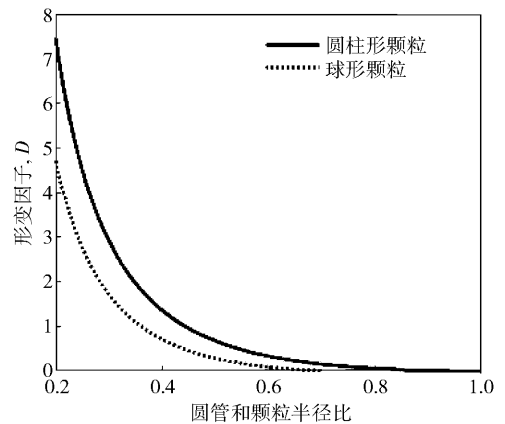


图 3 不同形状颗粒和不同管径比的形变因子分布

Fig. 3 Distribution of deformation factors of particles with different shape particles and tube diameter ratios

从图 3 中可以看出, 当颗粒最小投影面积相同时, 偏离球形颗粒程度越大, 形变因子 D 越大. 当圆管和颗粒半径比增大时, 形变因子降低; 随着比值增大至接近 1, 形变因子趋近于 0; 从图中可以确定, 当比值在 0.8 倍时, 颗粒形变已经较小, 即圆管和颗粒半径比为 0.8 倍以上时, 可以忽略颗粒位形的影响.

2 微圆管流动数学模型

2.1 假设条件

假定流体在微圆管内(水平)定常流动,忽略重力作用(见图4)。图4中管轴即为 x 轴,由 r 表示轴

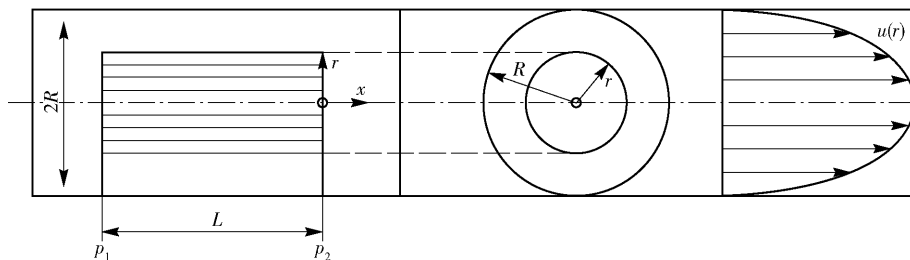


图4 水平放置的微圆管流体流动示意图

Fig. 4 Scheme of fluid in the horizontal placement of microtube

2.2 运动方程

柱坐标系下 N-S 方程为

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (19)$$

式中: u_θ 为轴向分速度; f_x 为轴向上的惯性力; ρ 为微圆管内溶液密度。

溶液在管内为定常流动,轴向与径向的速度分量都为0,速度 $u(r)$ 仅依赖于 r ,得到

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0, \frac{\partial u_x}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \rho f_x = 0 \quad (20)$$

其边界条件为

$$r = R, u = 0; r = 0, du/dr = 0 \quad (21)$$

结合式(17)~(21),可推导得到微圆管内流体速度 u 为

$$u = \frac{1}{4\mu} (r^2 - R^2) \left(\frac{dp}{dx} - \frac{2\pi R N e E D}{l} \right) \quad (22)$$

式中: l 为孔道长度,m。

由式(22)积分可求出通过微圆管的平均流量 Q ,即

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \frac{2\pi R N e E D}{l} \right) \quad (23)$$

若不考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用时,即 $D = 0$,代入式(23),则式(23)退化到泊肃叶定律的形式,即

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (24)$$

3 特征实验对模型的验证

由微尺度流动特征实验,可以获得实验流速和压力梯度的关系^[23]。本实验采用的流动载体为石

心向外延伸的径向坐标,轴向与径向的速度分量都为0。设微圆管半径为 R ,平行管轴方向的速度分量为 $u(r)$,沿轴向上的压力梯度为常数,微圆管长度为 L ,入口压力为 p_1 ,出口压力为 p_2 ,考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用^[22]。

英毛细管(Fused Silica Capillary Tubing)。该微圆管的外壁包覆涂层材料为标准聚酰亚胺材料,因此微圆管具有良好的韧性及强度,能够保证实验顺利完成。

扫描电镜观测到的溶液中颗粒如图5所示,呈单分散圆球状,粒径较为均一,各种不同样品的干球粒径基本在200 nm至1.2 μm ;选用粒径1.2 μm 的干球,经水化膨胀实验后,观察到颗粒粒径为3~16 μm 。

实验中的微圆管长度为1 cm。以颗粒水化膨胀后的最大值16 μm 作为颗粒直径。根据实验数据和已知参数绘制图6,图中给出了微圆管管径10 μm 和15 μm 的实验流速、泊肃叶流动和考虑空间位形力的流动与压力梯度的关系曲线。

从图6(a)中可以看出,当管径15 μm 时,与颗粒最大直径16 μm 相差不大,考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用的流动与泊肃叶流动相差不大;当管径10 μm 时,实验流速明显低于泊肃叶流动速度,而考虑空间位形力作用时的流动与泊肃叶流动规律有明显不同,更接近于真实实验数

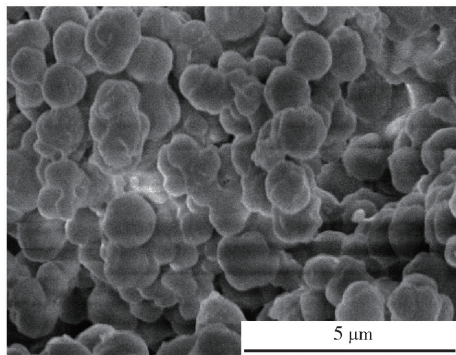


图5 颗粒扫描电镜图

Fig. 5 Scanning electron micrograph of particles

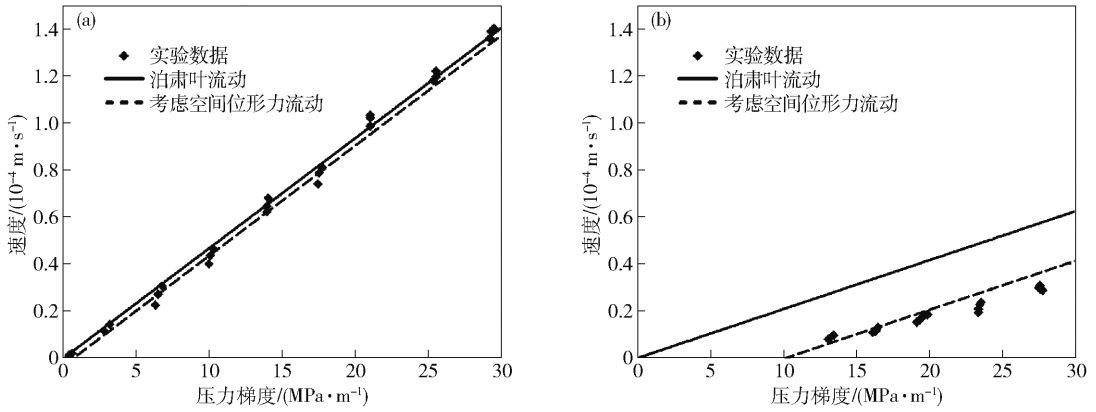


图 6 泊肃叶流动、考虑空间位形力流动和实验流速与压力梯度的关系。(a) 15 μm ; (b) 10 μm

Fig. 6 Relationship between Poiseuille flow, considering spatial configuration force flow, experimental flow velocity and pressure gradient: (a) 15 μm ; (b) 10 μm

据. 与不同管径比下的形变因子分布曲线分析结果一致, 当圆管半径小于颗粒 0.8 倍时, 速度偏差较大, 此时不能忽略受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用的影响. 通过微尺度流动特征实验, 验证了空间位形力作用对溶液流动速度的影响.

4 软颗粒溶液微圆管流动特征数值计算分析

4.1 不同管径下速度分布

根据推导得出的微圆管流体速度分布模型, 当流体黏度 $\mu = 0.003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 压力梯度 $\frac{dp}{dx} = 5 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$, 孔道长度 $l = 0.05 \text{ m}$, 颗粒数目 $N = 200$, 颗粒表面厚度 $e = 5 \mu\text{m}$, 表观杨氏模量值 $E = 100 \text{ GPa}$, 球形颗粒半径 $R_0 = 25 \mu\text{m}$, 圆柱形颗粒两半球半径 $R_0 = 25 \mu\text{m}$, 中间圆柱段的高度 $L_1 = 80 \mu\text{m}$ 时, 其中颗粒变形因子 D 根据随管径变化而改变, 计算流体在不同颗粒形状的空间位形力作用下的速度及泊肃叶流动速度, 设圆管半径分别为 5、10、15 和 20 μm , 即颗粒半径的 0.2、0.4、0.6 和 0.8 倍. 数值计算结果见图 7.

图 7 显示, 当微圆管半径在 5 ~ 20 μm 时, 考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用, 微圆管内流体的速度分布明显低于泊肃叶流动, 当管径越小时, 偏离泊肃叶流动速度的程度就越大; 实际颗粒形状与球形颗粒相差越大, 偏离泊肃叶流动速度的程度就越大, 当微圆管半径在 5 μm 时, 球形颗粒圆管中心速度为泊肃叶流动的 0.62 倍, 而圆柱形颗粒为泊肃叶流动的 0.58 倍; 随着管径增大, 空间位形力作用的影响逐渐降低, 流体速度接近于泊肃叶流动, 当圆管半径达到颗粒 0.8 倍时, 偏离程度已经很小. 因此圆管半径小于颗粒 0.8 倍时, 偏离程度较大, 不能忽略受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用的影响.

4.2 不同管径下平均流量

根据推导得出的微圆管流体平均流量模型, 当流体黏度 $\mu = 0.003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 压力梯度 $\frac{dp}{dx} = 5 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$, 孔道长度 $l = 0.05 \text{ m}$, 颗粒数目 $N = 200$, 颗粒表面厚度 $e = 5 \mu\text{m}$, 表观杨氏模量值 $E = 100 \text{ GPa}$, 球形颗粒半径 $R_0 = 25 \mu\text{m}$, 圆柱形颗粒两半球半径 $R_0 = 25 \mu\text{m}$, 中间圆柱段的高度 $L_1 = 80 \mu\text{m}$ 时, 其中颗粒变形因子 D 根据随管径变化而改变, 计算流体在不同颗粒形状的空间位形力作用下的平均流量与泊肃叶流动平均流量, 设圆管半径分别为 1 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15 和 15 ~ 20 μm , 数值计算结果如图 8 所示.

图 8 显示, 当圆管半径在 1 ~ 5 μm 时, 考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用, 微圆管内流体的平均流量低于泊肃叶流动, 当管径越小时, 偏离泊肃叶流动的平均流量程度就越大, 实际颗粒形状与球形颗粒相差越小, 偏离泊肃叶流动的平均流量程度也就越大. 从图 8 (a) 中可以看出圆管半径在 5 μm 以下时, 流量很小, 可以确定在圆管半径是颗粒半径 0.2 倍以下时, 颗粒几乎不再流动, 此时可以认为通道被颗粒堵塞, 或者不能流动. 随着管径的增大, 空间位形力作用的影响逐渐减小, 流体平均流量越接近于泊肃叶流动, 当圆管半径达颗粒 0.8 倍时, 偏离程度已经较小, 当圆管半径达 15 ~ 20 μm 时, 偏离很小几乎没有. 当圆管半径达颗粒 0.8 倍时, 偏差较大, 不能忽略空间位形力作用的影响.

5 结论

针对低渗透油藏流动性差、含水上升等问题, 软颗粒体积小, 可以进入低渗透微小通道, 改变流动阻力. 通过理论研究分析可以对软颗粒的形状、粒径、变形能力加以设计, 优化制作工艺, 提高其调驱

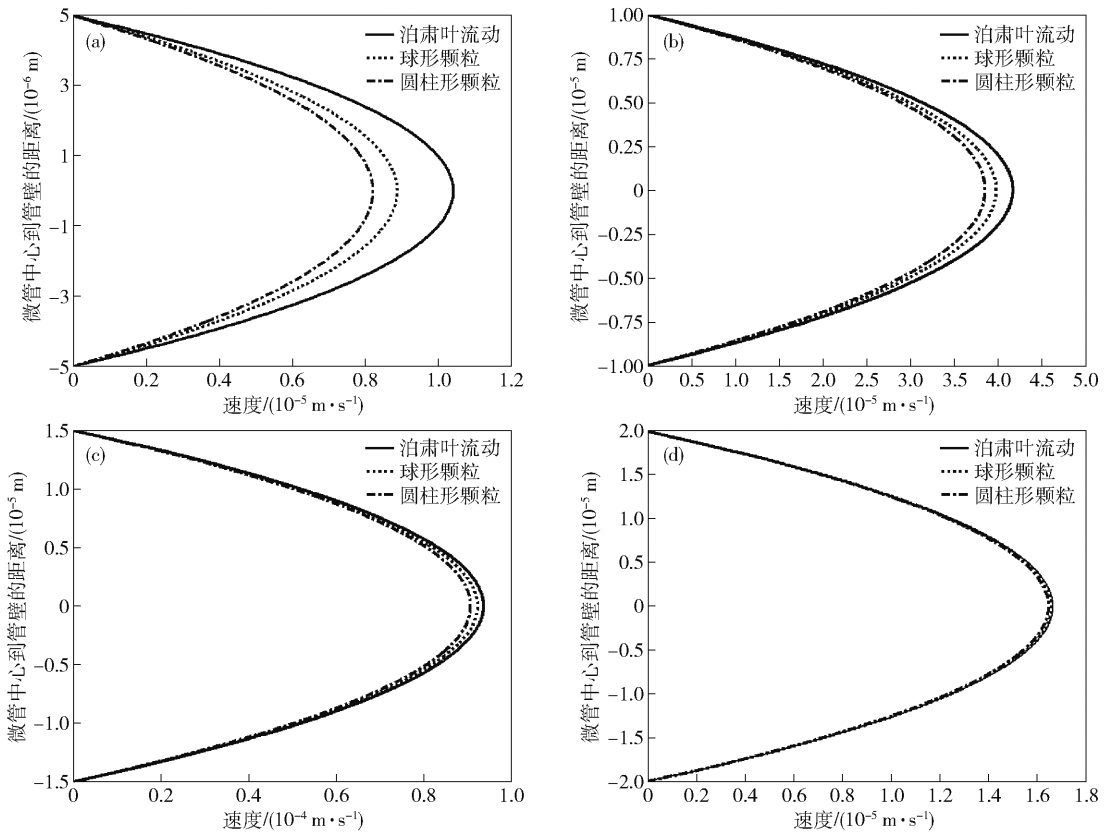


图7 空间位力作用下不同圆管半径的速度分布。(a) 5 μm; (b) 10 μm; (c) 15 μm; (d) 20 μm

Fig. 7 Velocity distribution under different diameters considering spatial configuration force; (a) 5 μm; (b) 10 μm; (c) 15 μm; (d) 20 μm

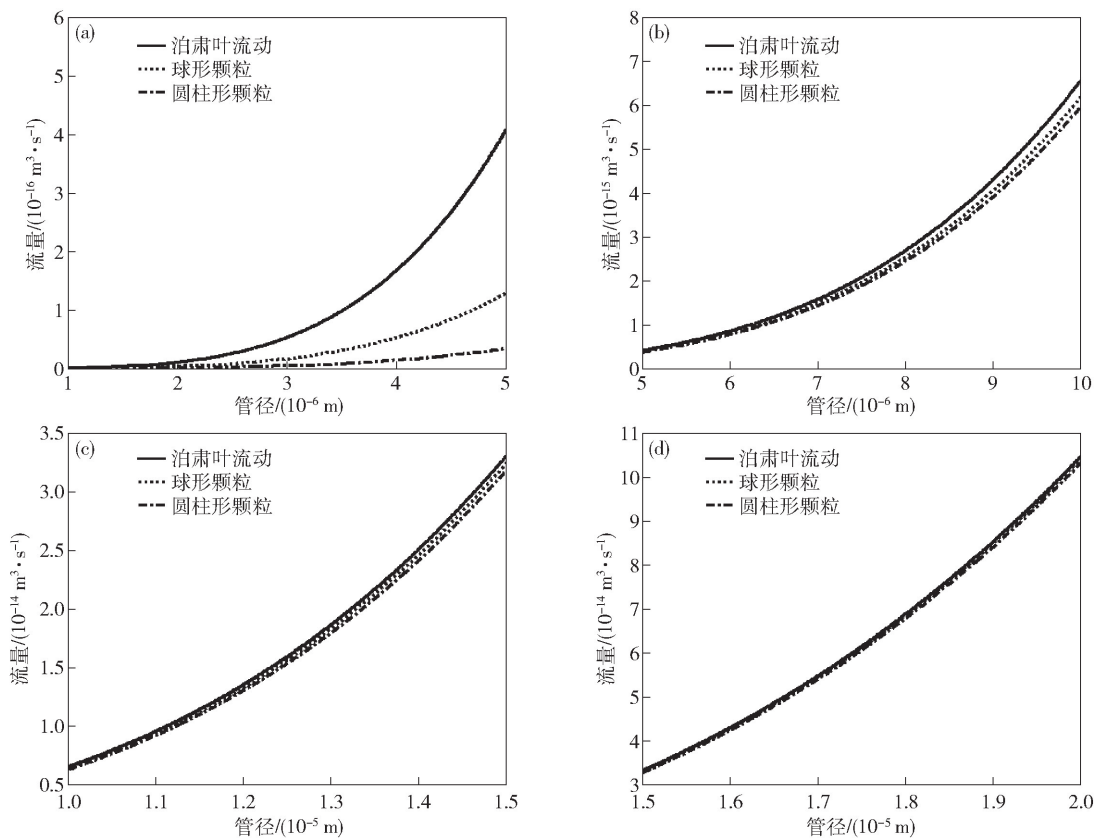


图8 空间位力作用下不同圆管半径的平均流量变化曲线。(a) 1 ~ 5 μm; (b) 5 ~ 10 μm; (c) 10 ~ 15 μm; (d) 15 ~ 20 μm

Fig. 8 Average flow curve under different diameters considering spatial configuration force; (a) 1 ~ 5 μm; (b) 5 ~ 10 μm; (c) 10 ~ 15 μm; (d) 15 ~ 20 μm

能力,最终提高采收率,为软颗粒溶液设计制作、应用推广奠定理论基础. 本文通过理论分析、实验研究得出以下结论:

(1)微米级软颗粒溶液在微小孔道流动中不再遵守经典流体力学的 Navier-Stokes 方程,为此重新建立了考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用的微圆管流动的数学模型,推导得到微米级软颗粒溶液在微圆管内的速度分布和平均流量模型. 此模型考虑了软颗粒空间位形力的影响,更加符合驱油过程中微孔道中的流动. 从空间位形力角度,考虑到了颗粒大小形状和孔径大小的因素对流速和平均流量的影响,与实验结果相一致.

(2)从实验结果中能够看出,当管径和颗粒直径相近时,空间位形力作用较小,相同压力梯度下泊肃叶流动和考虑空间位形力作用时流速接近;当管径小于颗粒直径 0.8 倍时,空间位形力作用明显,相同压力梯度下的流速比泊肃叶流动的速度更接近于实验数据,验证了空间位形力作用对溶液流动速度有影响,在微小孔道流动中不可忽略.

(3)由数值计算分析得出,考虑受固体管壁影响颗粒变形产生的空间位形力作用时,与泊肃叶流动下的流体速度和平均流量相比,半径越小,偏离泊肃叶流动程度就越大,当圆管半径小于颗粒半径 0.8 倍时,偏离程度很大;随着圆管半径增大,空间位形力作用的影响逐渐小,逐渐接近泊肃叶流动,圆管半径达颗粒 0.8 倍以上时,偏离程度降低,空间位形力作用降低.

(4)当颗粒呈非球形且最小投影面积相同时,颗粒实际形状与球形颗粒相差越大,偏离泊肃叶流动速度的程度就越大,空间位形力作用也越明显. 一般颗粒形状大多为球形或接近球形的椭球形、圆柱形,可根据不同形状,计算出不同形变因子,以便于更明确的表征微米级软颗粒溶液的流动规律.

参 考 文 献

[1] Wang D L, Xiao J H. Application of deep-profile control and displacement technology of crosslinked polymer micro-ball system. *Petrol Geol Recovery Effic*, 2008, 15(2): 86
(王代流, 肖建洪. 交联聚合物微球深部调驱技术及其在应用. 油气地质与采收率, 2008, 15(2): 86)

[2] Wu W X, Song X, Fu Y, et al. Priority selection of weak gel flooding formula on heterogeneous reservoir. *Adv Mater Res*, 2014, 1073-1076: 2248

[3] Zhao G, Dai C L, You Q. Characteristics and displacement mechanisms of the dispersed particle gel soft heterogeneous compound flooding system. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45(3): 481

[4] Zhang L, Zhang G C, Ge J J, et al. pH-sensitive polymer in-depth profile control in mid-low permeability reservoirs. *Spec Oil Gas Reservoirs*, 2016, 23(1): 135
(张磊, 张贵才, 葛际江, 等. 中低渗油藏 pH 敏感聚合物深部调驱技术. 特种油气藏, 2016, 23(1): 135)

[5] Liu Z M, Pang Y. Effect of the size and pressure on the modified viscosity of water in microchannels. *Acta Mech Sin*, 2015, 31(1): 45

[6] Dai B M, Li M X, Ma Y T. Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels. *Appl Therm Eng*, 2014, 67(1-2): 283

[7] Li Q, Angeli P. Experimental and numerical hydrodynamic studies of ionic liquid-aqueous plug flow in small channels. *Chem Eng J*, 2017, 328: 717

[8] Nissan A, Wang Q L, Wallach R. Kinetics of gravity-driven slug flow in partially wettable capillaries of varying cross section. *Water Resour Res*, 2016, 52(11): 8472

[9] Wang Y Y, Xu J B, Yang C. Fluid inhomogeneity within nanoslits and deviation from Hagen-Poiseuille flow. *AIChE J*, 2017, 63(2): 834

[10] Chefranov S G, Chefranov A G. Solution to the paradox of the linear stability of the Hagen-Poiseuille flow and the viscous dissipative mechanism of the emergence of turbulence in a boundary layer. *J Exp Theor Phys*, 2014, 119(2): 331

[11] Metzger B, Rahli O, Yin X L. Heat transfer across sheared suspensions: role of the shear-induced diffusion. *J Fluid Mech*, 2013, 724: 527

[12] Chen X D, Xue C D, Zhang L, et al. Inertial migration of deformable droplets in a microchannel. *Phys Fluids*, 2014, 26(11): 112003

[13] Lecampion B, Garagash D I. Confined flow of suspensions modelled by a frictional rheology. *J Fluid Mech*, 2014, 759: 197

[14] Xiao Q H. *The Reservoir Evaluation and Porous Flow Mechanism for Typical Tight Oilfields* [Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015
(肖前华. 典型致密油区储层评价及渗流机理研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015)

[15] Sun Y H, Long Y Q, Song F Q, et al. Evaluation on plugging performance of aqueous dispersion system of nano/micron-sized polymer particles in low permeability reservoir. *Petrol Geol Recovery Effic*, 2016, 23(4): 88
(孙业恒, 龙运前, 宋付权, 等. 低渗透油藏纳微米聚合物颗粒分散体系封堵性能评价. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 88)

[16] Ge Y F, Zhang Q, Liu Z T. Synthesis and aggregation behavior of gemini surfactants with piperidinium structure. *J Wuhan Inst Technol*, 2017, 39(3): 231
(葛一凡, 张旗, 刘治田. 哌啶季铵盐双子表面活性剂的合成及聚集行为. 武汉工程大学学报, 2017, 39(3): 231)

[17] Chen Q L. *Investigations on Liquid Flow, Heat Transfer Characteristics in Microscale and Its Applications* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
(陈巧丽. 微尺度下液体流动、传热特性及其应用研究[学位论文])

- 论文]. 杭州: 浙江大学, 2016)
- [18] Wang F J. *The Study on Micro-scale Percolation Mechanism in Tight Gas Reservoir* [Dissertation]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017
(王凤娇. 致密气藏微尺度渗流机理研究[学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2017)
- [19] Gaveau A, Coetsier C, Roques C, et al. Bacteria transfer by deformation through microfiltration membrane. *J Membr Sci*, 2017, 523: 446
- [20] Liang D. *Synthesis, Characterization and Application of Spherical Heteroatomic Mesoporous Materials* [Dissertation]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010
(梁栋. 球形杂原子介孔分子筛的制备、表征及应用[学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2010)
- [21] Suchecka T, Piątkiewicz W, Sosnowski T R. Is the cell retention by MF membrane absolutely safe—a hypothetical model for cell deformation in a membrane pore. *J Membr Sci*, 2005, 250(1-2): 135
- [22] Wang X F, Zhu W Y, Deng Q J, et al. Micro circular pipe flow mathematical model considering the effect of Van der Waals force. *J Northeast Petrol Univ*, 2013, 37(5): 85
(王小锋, 朱维耀, 邓庆军, 等. 考虑固液范德华力作用的微圆管流动数学模型. 东北石油大学学报, 2013, 37(5): 85)
- [23] Zhu W Y, Zhu X Y, Cao M J, et al. Flow mechanism of nanomicro-polymer in microtubes. *Sci Technol Rev*, 2016, 34(24): 101
(朱维耀, 朱晓阳, 曹孟菁, 等. 微圆管中纳微米聚物流动规律. 科技导报, 2016, 34(24): 101)