

文章编号: 0253-2697(2009)01-0145-04

节流器内液-固两相流固体颗粒冲蚀数值模拟

李国美^{1,4} 王跃社¹ 孙虎² 亢力强³ 王燕令¹ 何仁洋⁴

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 陕西西安 710049; 2. 长庆石油勘探局井下技术作业处 陕西西安 710021;
3. 中国科学院力学研究所 北京 100080; 4. 中国特种设备检测研究院 北京 100013)

摘要: 建立了考虑颗粒碰撞的颗粒冲蚀计算模型,该数学模型包括:在 Eulerian 坐标系下求解连续相流场;在 Lagrangian 坐标系下运用离散颗粒硬球模型求解颗粒碰撞;应用半实验关联式求解颗粒冲蚀速率。对水力加砂压裂施工中节流器内液-固两相流的固体颗粒运动和冲蚀特性进行了数值模拟。计算结果表明,固体颗粒密集于节流器入口到出口的一段狭长区域内,冲蚀速率随流体速度呈指数性变化。颗粒直径越大,冲蚀速率也越大。节流器内冲蚀最严重的位置发生在距离节流器出口上边缘 10 mm 以内的局部区域。

关键词: 水力加砂压裂;节流器;固体颗粒运动;液-固两相流;冲蚀速率;数值模拟;计算模型

中图分类号: TE358.1

文献标识码: A

Numerical simulation on solid particle erosion of solid-liquid two-phase fluid in flow controller

LI Guomei^{1,4} WANG Yueshe¹ SUN Hu² KANG Liqiang³ WANG Yanling¹ HE Renyang⁴

(1. State Key Laboratory for Multiphase Flow of Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Department of Downhole Technique Services, Changqing Petroleum Exploration Bureau, Xi'an 710021, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
4. Institute of China Special Equipment Detection, Beijing 100013, China)

Abstract: A mathematic model of particle erosion under inter-particle collision was established. This mathematic model includes the flow field simulation of the continuous carrier fluid under Eulerian coordinate system, the inter-particle collision simulation using the discrete particle hard sphere model under Lagrangian coordinate system and the erosion rate calculation using semi-empirical formulations. The movement simulation of solid particle and the erosion characteristics of the solid-liquid two-phase fluid in flow controller under hydraulic sand fracturing operation showed that the particles were accumulated in a narrow region from inlet to outlet of the flow controller. The erosion rate was proportional to the inlet velocity with the exponential growth. The erosion rate increased with the increase of particle diameter. The most serious erosion in flow controller occurred on the upper region of the edge with 10 mm away from the outlet.

Key words: hydraulic sand fracturing; flow controller; solid particle movement; solid-liquid two-phase fluid; erosion rate; numerical simulation; mathematic model

固体颗粒的冲蚀破坏广泛地存在于石油、化工、机械等领域,是造成过流部件失效的重要原因之一^[1-3]。尤其在水力压裂施工中,作为支撑剂的固体颗粒在某种程度上加速了井筒系统和井下节流器的冲蚀破坏。基于计算流体力学(CFD)的冲蚀预测模型一般用于流动模拟、颗粒与流体的相互作用、颗粒-颗粒相互作用、颗粒-壁面相互作用以及冲蚀模拟^[4]。基于各种模拟过程所建立的冲蚀计算模型^[5-8]均忽略了颗粒运动对流体的影响以及颗粒之间的相互碰撞,是一种单向耦合算法,仅适用于颗粒相体积浓度较低的情形。

考虑颗粒-流体、颗粒-颗粒相互作用的双向和双向^[9]耦合算法,笔者建立了新的计算颗粒冲蚀速率数学模型,采用离散颗粒硬球模型描述颗粒-颗粒、颗粒-壁面间的碰撞过程,在获得颗粒运动信息的基础上应用半实验关联式计算冲蚀速率。该模型是一种双向耦合算法,适用于颗粒相浓度较高的情形。

1 颗粒冲蚀速率数学模型

该数学模型主要包含:在 Eulerian 坐标系下求解连续相的运动方程;在 Lagrangian 坐标系下应用离散

基金项目:国家自然科学基金委创新研究群体基金(5052160450323001)和国家自然科学基金重点项目(5053602)联合资助。

作者简介:李国美,男,1981年9月生,2005年毕业于中国石油大学(华东),现为西安交通大学在读硕士研究生,主要从事石油工程中的多相流动与传热研究。E-mail:mery_lee632@163.com

颗粒硬球模型求解颗粒—流体、颗粒—颗粒、颗粒—壁面间的相互作用;运用半实验关联式计算冲蚀速率。

1.1 流体相控制方程

流体相的动力学用两相流动 Navier-Stokes 方程描述,考虑了流体体积分数和流体-颗粒相间阻力的影响。连续方程和动量守恒方程分别表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \alpha_f) + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \alpha_f \mathbf{u}_f) + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \boldsymbol{\tau}_f) + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} - \mathbf{f}_{dr} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_f = 1 - \sum_{i=1}^l V_i / V \\ \mathbf{f}_{dr} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^l \mathbf{F}_{dr,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ_f 为流体密度, kg/m³; \mathbf{u}_f 为流体速度, m/s; p 为流体相压力, Pa; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s²; $\boldsymbol{\tau}_f$ 为流体应力张量; α_f 为流体体积分数; \mathbf{f}_{dr} 为控制体平均的颗粒流体阻力, N; V 和 V_i 分别为计算控制体的体积和颗粒 i 在该控制体中的体积, m³; l 为控制体中的颗粒数。

流体相湍流方程采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。

1.2 离散颗粒硬球模型

采用离散颗粒硬球模型描述颗粒间的碰撞。硬球模型基于准二元的瞬时碰撞,不考虑颗粒碰撞的变形过程,具有较高的计算效率^[10]。

当两个颗粒碰撞时(图1),其平动速度和角速度表示为

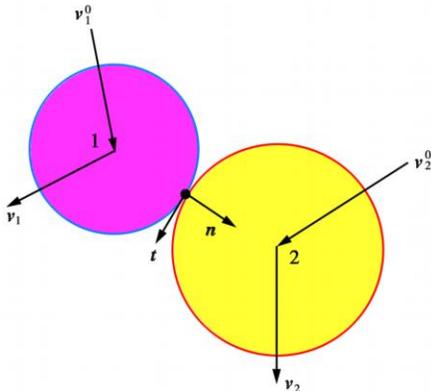


图1 两颗粒碰撞示意图

Fig. 1 Sketch map for collision of two particles

对于滑移碰撞,有

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \mathbf{v}_1^0 - (\mathbf{n} + \mu_s \mathbf{t})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0)(1+e) \frac{m_2}{m_1+m_2} \\ \mathbf{v}_2 &= \mathbf{v}_2^0 + (\mathbf{n} + \mu_s \mathbf{t})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0)(1+e) \frac{m_1}{m_1+m_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_1 &= \boldsymbol{\omega}_1^0 - \frac{5}{2R_1} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0) (\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \mu_s (1+e) \frac{m_1}{m_1+m_2} \\ \boldsymbol{\omega}_2 &= \boldsymbol{\omega}_2^0 - \frac{5}{2R_2} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0) (\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \mu_s (1+e) \frac{m_1}{m_1+m_2} \end{aligned}$$

对于无滑移碰撞,有

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \mathbf{v}_1^0 - [(1+e)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0) \mathbf{n} + \frac{2}{7} / G_{ct}^0 / t] \frac{m_2}{m_1+m_2} \\ \mathbf{v}_2 &= \mathbf{v}_2^0 + [(1+e)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{G}^0) \mathbf{n} + \frac{2}{7} / G_{ct}^0 / t] \frac{m_1}{m_1+m_2} \\ \boldsymbol{\omega}_1 &= \boldsymbol{\omega}_1^0 - \frac{5}{7R_1} / G_{ct}^0 / (\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \frac{m_2}{m_1+m_2} \\ \boldsymbol{\omega}_2 &= \boldsymbol{\omega}_2^0 - \frac{5}{7R_2} / G_{ct}^0 / (\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \frac{m_1}{m_1+m_2} \end{aligned}$$

式中: μ_s 为摩擦因数; e 为颗粒恢复系数; \mathbf{n} 为从颗粒1中心指向接触点的单位矢量; m 为颗粒质量, kg; R 为颗粒半径, m; $\boldsymbol{\omega}$ 为颗粒运动速度, m/s; $\boldsymbol{\omega}$ 为颗粒运动的角速度, rad/s; \mathbf{G}_0 为碰撞前两颗粒接触点相对速度, G_{ct}^0 为碰撞前相对速度切向分量, m/s; \mathbf{t} 为接触点处的单位切向量, 上标0表示碰前量, 下标1,2分别表示颗粒1和颗粒2。

流体颗粒间的耦合作用也是通过单颗粒所受到的流体黏性阻力 \mathbf{F}_{dr} 体现的。采用 Di Felice 修正的流体阻力表达式计算单颗粒所受的流体黏性阻力, 即^[11]

$$\mathbf{F}_{dr} = \frac{C_{d0}}{8} d_p^2 \rho_f \mathbf{u}_f / |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \quad (4)$$

其中

$$= 3.7 - 0.65 \exp[-(1.5 - \lg Re_p)^2 / 2]$$

$$C_{d0} = \left[0.63 + \frac{4.8}{Re_p^{0.5}} \right]^2$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p|}{\mu_f}$$

式中: d_p 为颗粒直径, m; \mathbf{u}_f 为流体速度, m/s; \mathbf{u}_p 为颗粒速度, m/s; C_{d0} 为流体阻力系数; Re_p 为颗粒雷诺数。

颗粒运动方程可以表示为^[7]

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \mathbf{g} + \mathbf{F}_{dr} \quad (5)$$

式中: m_p 为颗粒质量, kg; \mathbf{u}_p 为颗粒速度, m/s。

1.3 预测颗粒冲蚀速率的半实验关联式

根据液-固两相流的动力学特性和节流器的材料特征,采用 Mengutruk 等人提出的计算模型^[12],得到冲蚀速率的表达式为

$$\begin{cases} E_v = 1.63 \times 10^{-6} (W_1 \cos \theta)^{2.5} \sin\left(\frac{1}{45.4}\right) + \\ \quad 4.68 \times 10^{-7} (W_1 \sin \theta)^{2.5} \quad (\theta < 22.79) \\ E_v = 1.63 \times 10^{-6} (W_1 \cos \theta)^{2.5} + \\ \quad 4.68 \times 10^{-7} (W_1 \sin \theta)^{2.5} \quad (\theta > 22.79) \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_v 为磨损率, mm³/g; W_1 为固体颗粒撞击壁面

的速度, m/s ; α 为固体颗粒冲击壁面的入射角, rad 。

2 计算条件

由于节流器结构的对称性,因此仅取对称轴左侧为计算区域(图 2)。垂直于 $x-y$ 坐标平面的两个计算平面取对称面边界条件。流体从上部入口流入,经下端的节流器出口流出,出口采取压力边界条件。计算区域与节流器的实际尺寸相同($100\text{ mm} \times 38\text{ mm}$)的二维矩形区域,入口半径为 24 mm ,出口直径为 18 mm 。

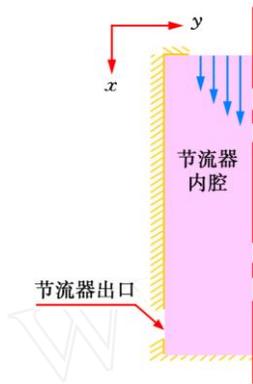


图 2 计算区域和坐标示意图

Fig. 2 Calculation region and coordinate system

连续相流体为水,密度为 1000 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.005 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,计算温度为室温。节流器内为湍流流动,初始入口截面上速度遵循 $1/7$ 幂率分布,湍流中心流速取为 5 m/s 。

颗粒直径为 0.4 mm ,密度为 2650 kg/m^3 ,摩擦因数为 0.4 ,恢复系数为 0.9 。计算区域随机布置 3000 个静止的初始颗粒,在突扩管入口($X=0$)截面,沿半径方向均匀布置 100 个颗粒,速度与颗粒所在位置处的流体流速相同。节流器材料为碳钢。

流体的计算时间步长为 $3.0 \times 10^{-5}\text{ s}$,颗粒的计算时间步长为 $2.0 \times 10^{-6}\text{ s}$,即在每一个流体运动的时间步长内,颗粒的轨迹计算进行 15 次迭代。

3 计算结果与分析

3.1 模型验证

采用传统的 SIMPLIC 方法求解连续相的控制方程,动量方程的对流项采用 QUICK 格式进行离散,扩散项采用二阶中心差分格式离散。采用显式时间积分求解颗粒的运动方程。

为了验证模型的正确性,计算了变截面比为 0.5 的缩小通道中固体颗粒的冲蚀速率。颗粒的体积流量为 $1\text{ cm}^3/\text{s}$,颗粒直径为 0.4 mm ,连续相为水。不同来

流速度下冲蚀速率的计算结果及其拟合曲线如图 3 所示,与文献[7]的结果对比可以看出,两种模型的计算结果吻合良好。

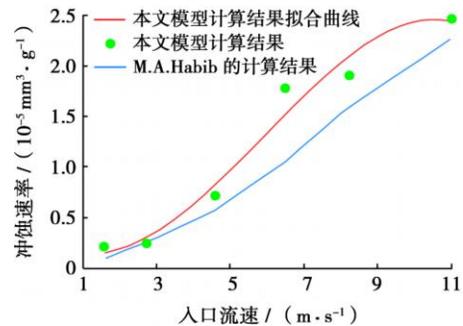


图 3 计算结果对比

Fig. 3 Comparison of the calculated erosion rate

3.2 颗粒空间分布特征

固体颗粒在流体的携带作用下向前运动,并与其他颗粒和壁面不断地发生碰撞。颗粒在发生碰撞的过程中损失了部分能量,又不断从来流和其他颗粒中获得能量,从而发展到一个平衡稳定状态。由于连续相流体的携带作用,从节流器入口到出口的一段狭长区域内颗粒密集,而在节流器入口的突扩断面和对称轴附近颗粒分布稀疏。一方面验证了离散颗粒硬球模型能够反映颗粒的空间分布的不均匀动态变化特征;另一方面也说明虽然颗粒受相间作用力、重力、加速度力的作用,但影响颗粒运动的主要因素仍是颗粒与流体间的相互作用力^[7]。

在颗粒运动过程中,颗粒速度最大的位置也发生在入口和出口之间的狭长区域内,而与壁面碰撞最为剧烈(碰撞次数较多、碰撞速度大)的区域在节流器出口的上、下附近的位置。部分颗粒速度不同程度地偏离连续相流动方向,表明颗粒碰撞对液-固两相流运动有重要的影响。

3.3 流动速度和颗粒直径对冲蚀的影响

颗粒与节流器内腔碰撞最剧烈的壁面为节流器出口所在的垂直立面(图 2 中沿 x 轴的壁面)。图 4 给出了不同颗粒直径条件下,壁面冲蚀速率随流体流速变化的双对数曲线。从图中可以看出,流体入口流速及颗粒直径越大,冲蚀速率也随之增大,即冲蚀速率随流体入口流速呈指数关系变化,颗粒对壁面的破坏作用就越强^[1,4,6-8]。线性拟合的结果表明,速度指数 m 约为 4.61 ,略高于文献[1]中给出的 4.26 ,这可能是由于考虑了湍流条件下颗粒间的碰撞作用造成的。

3.4 节流器内发生最大冲蚀的位置

定义局部冲蚀速率,即将壁面分为若干小区间,分

别统计每个区间颗粒与壁面的碰撞速度和碰撞角度。再利用式(6)计算出不同区间的冲蚀速率,即可确定节流器内壁面最容易被冲蚀的位置。

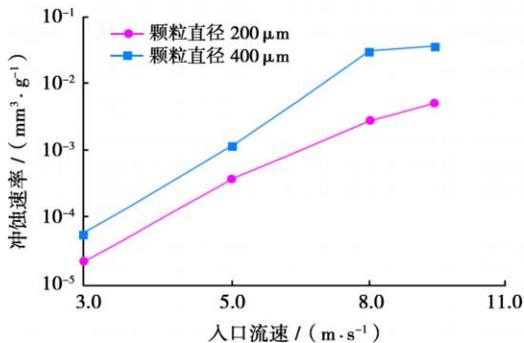


图4 不同流体入口流速下颗粒的冲蚀速率

Fig. 4 Erosion rate of particals under different inlet velocities

图5显示颗粒直径为0.4 mm、流体入口流速不同时壁面的局部冲蚀速率。从图5中可以看出,节流器内冲蚀速率最大的位置发生在节流器出口上、下附近的位置,特别是距节流器出口上边缘10 mm以内的局部区域。不同颗粒直径和不同颗粒体积分数下的计算结果也表明,节流器内最容易被冲蚀的位置发生在距节流器出口上边缘10 mm以内的区域。

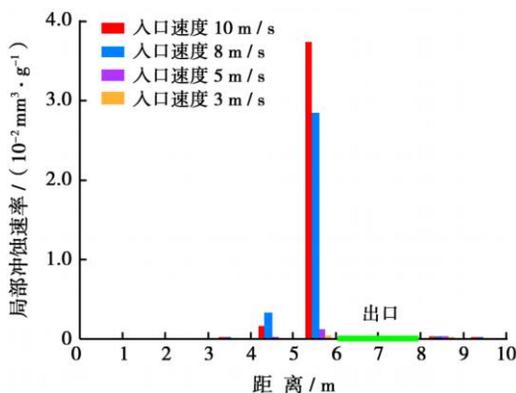


图5 不同流体入口流速下壁面不同位置的局部冲蚀速率

Fig. 5 Local erosion rate on the surface of wall under different inlet velocities

4 结论

(1) 离散颗粒硬球模型可以真实地模拟节流器内固体颗粒运动的动态变化过程以及颗粒的非均匀分布特性,在单颗粒层次上提供颗粒的速度、碰撞角度、碰撞位置等运动信息,为进一步计算固体颗粒的冲蚀速率提供可能。

(2) 在节流器入口到出口的一段狭长区域内,颗粒密集且颗粒速度较大。液-固两相流中影响固体颗

粒运动的主要作用力是颗粒与流体间的相互作用力,而颗粒-颗粒的碰撞也具有重要的影响。

(3) 入口流速越大,冲蚀速率越大;颗粒直径越大,冲蚀速率随之增大。冲蚀速率随入口流速呈指数关系变化,该速度指数约为4.61。

(4) 节流器内腔冲蚀速率最大的位置发生在距节流器出口上边缘10 mm以内的区域。

参考文献

- [1] Humphrey J A C. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1990, 11(3): 170-195.
- [2] 王治中,邓金根,孙福街,等. 井筒砂粒运移规律室内模拟实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 130-132, 138. Wang Zhizhong, Deng Jingen, Sun Fujie, et al. Experimental study on sand grain migration in wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 130-132, 138.
- [3] 田红,邓金根,孟艳山,等. 渤海稠油油藏出砂规律室内模拟实验研究[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 85-87, 92. Tian Hong, Deng Jingen, Meng Yanshan, et al. Laboratory simulation on sand production of heavy oil reservoir in Bohai area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 85-87, 92.
- [4] Zhang Yongli. Application and improvement of computational fluid dynamics (CFD) in solid particle erosion modeling[D]. Oklahoma: The University of Tulsa, 2006.
- [5] Nestic S, Postlethwaite J. Relationship between the structure of disturbed flow and erosion-corrosion [J]. Corrosion, 1990, 46(11): 874-880.
- [6] McLaury B S, Wang J, Shirazi S A, et al. Solid particle erosion in long radius elbows and straight pipes[R]. SPE 38842, 1997.
- [7] Habib M A, Badr H M, Ber Mansour R, et al. Numerical calculations of erosion in an abrupt pipe contraction of different contraction ratios[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 46(1): 19-35.
- [8] Chen Xianghui, McLaury B S, Shirazi S A. Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow[J]. Wear, 2006, 261(7/8): 715-729.
- [9] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows[J]. Applied Scientific Research, 1994, 52(4): 309-329.
- [10] Crowe C T, Sommerfeld M, Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 112-165.
- [11] Di Felice R. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(1): 153-159.
- [12] 林建忠. 流-固两相拟序涡流及稳定性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 125-172. Lin Jianzhong. Fluid-solid two-phase coherent vortex flow and hydrodynamic stability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 125-172.

(收稿日期 2008-01-26 改回日期 2008-05-06 编辑 仇学艳)