

水平弯管内水合物浆的流动特性

江国业, 王晓娅

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为了掌握水平弯管内水合物浆的流动特性, 采用基于颗粒动力学理论的欧拉双流体模型进行建模研究, 其中 RNG $k-\varepsilon$ 模型用于模拟湍流运动, 液固两相间的曳力体现相间耦合作用。结果表明, 弯头处出现了明显的二次流现象, 且速度最大值分布在偏向内侧横截面上; 颗粒增大了管内水合物浆湍动能, 并使弯曲段的浆液湍动能分布更均匀, 弯管和水合物的存在对压能损失产生影响。在相同的水合物体积分数下, 浆液压力梯度随平均流速的增加而增大; 在相同的流速下, 浆液压力梯度随水合物体积分数的增加出现了缓慢增长区、过渡区和快速增长区。为了对堵塞风险进行有效预警, 除了考虑平均流速等因素, 还需要从水合物生长过程中微观特性变化的角度对压降分区和流变多样性进行探索。

关键词 90°弯管; 水合物浆; 流动特性; 湍动能; 压力梯度

中图分类号 TE28

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.009

Flow of hydrate slurry in a horizontal elbow pipe

JIANG Guoye, WANG Xiaoya

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract In order to study the flow characteristics of hydrate slurry, two-fluid Euler models based on the kinetic theory of the granular flow are established, in which the RNG $k-\varepsilon$ model is used to simulate the turbulence movement and the drag force is used to express the interaction between the liquid phase and the solid phase. It is shown that secondary flows can clearly seen to arise in the elbow, and the maximum velocity occurs close to the inner side of the cross section; the hydrate slurry's turbulence kinetic energy in the 90° elbow is enhanced and the kinetic energy distribution is homogenized because of the hydrate particles; the presence of the elbow pipe and hydrates has a remarkable effect on the pressure energy losses. It is also shown that the pressure gradient of the hydrate slurry increases with its average velocity rising at the same hydrate's volume fraction, and that the pressure gradient of the hydrate slurry sees a slowly-growing zone, a transient zone and a rapidly-growing zone in turns with hydrate's volume fraction rising at the same velocity. The pressure gradient zoning and rheology diversity as well as the hydrate volume fraction have to be investigated from the point of microcosmic characteristics changes in hydrate's growth to early predict the pipeline plug risk.

Keywords 90° elbow pipe; hydrate slurry; flow characteristics; turbulent kinetic energy; pressure gradient

天然气水合物是天然气在开采、加工和运输过程中在一定温度压力条件下与液态水形成的冰雪状混合物。水合物生成量增加时, 水合物颗粒发生聚集行为, 严重时堵塞管道和设备, 给管道安全运行带来巨大隐患^[1]。弯管作为集输管道和石油设备的常见构件之一, 对浆液流动特性有显著影响, 浆液在流经弯管时流动方向发生急剧变化, 会引起管内速度、湍动能以及压降等方面的变化。目前, 对水合物浆液流动的研究大体有实物实验和 CFD 模拟两类方法。王武昌

等^[2]研究了液固两相浆液流在不同流速和体积分数下的压降变化, 给出了压降估算式。Anthony 等^[3]研究了不同流速和不同体积分数下 CO₂ 水合物浆液的流变行为, 并给出了流变模型。李玉星等^[4]研究了水合物浆液稳定性的影响因素, 给出了水合物浆液稳定性的代表评价参数。但实验研究无法得到管道内浆液速度、湍动能等参数的详细分布。

基于 CFD 的数值模拟方法能够描述水合物浆液流体与固体颗粒间的相互作用以及颗粒和流体各自分布规律等。

收稿日期: 2014-07-14; 修回日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51206179); 中央高校基本科研业务费专项 (3122014D029)

作者简介: 江国业, 副教授, 研究方向为油气管道流动保障和管网优化, 电子信箱: guoyejiang@foxmail.com

引用格式: 江国业, 王晓娅. 水平弯管内水合物浆的流动特性[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 64-68.

张慧君等^[5]利用Fluent软件对90°弯管内油煤浆进行了数值模拟,分别得到了煤粒子和油的速度场分布规律。王继红等^[6]采用基于颗粒动力学理论的双流体模型,利用CFD软件研究了竖直管道内冰浆流体的流动特性,得到了竖直管道内冰浆的速度和浓度分布规律,并且研究了浆液流动方向对速度和浓度分布的影响。但需要指出的是,管输水合物浆输送过程中,压降变化是一个重要参数,很少有研究对浆液压降变化与颗粒体积分数、浆液流动速度间的关系给出详细的描述。

本文在两相欧拉模型和颗粒动力学理论的基础上,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,运用CFD数值模拟方法对90°水平弯管内浆液速度、流场分布以及压降的变化规律进行研究。

1 几何模型建立

选取DN42,弯径比 $R/D=3$ 的90°水平弯管进行浆液流动特性研究,其几何尺寸如图1所示。为便于研究分析,将弯管分成上游直管段、弯曲管段、下游直管段3个部分。上下游直管段长度均为3000 mm,弯径 $R=126$ mm, θ 为极角,且定义弯曲段的主流入口截面处 $\theta=0^\circ$,弯曲段出口界面处 $\theta=90^\circ$ 。坐标原点为弯管曲率半径的中心。

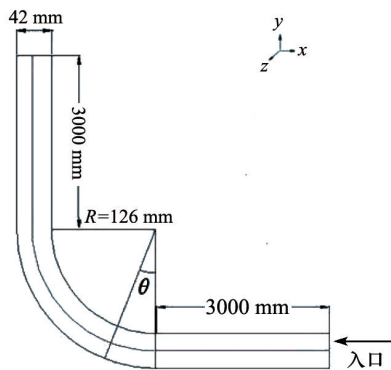


图1 弯管结构示意图

Fig. 1 Structure of the elbow

2 数学模型建立

基于颗粒动力学理论的欧拉双流体模型^[7,8],假设相间无质量和热量传递,基本控制方程包括连续性方程、动量方程和湍动能方程。

2.1 连续性方程

$$\frac{\partial(\varphi_m \rho_m)}{\partial t} + \nabla(\varphi_m \rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \quad (1)$$

其中约束条件为

$$\sum_{n=1}^2 \varphi_n(x, y, z) = 1.0 \quad (2)$$

式中, φ 为体积分数; ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为速度, m/s ; n 为相数;下标 m 代表水相或水合物颗粒相。

2.2 动量方程

液相动量方程

$$\nabla(\varphi_l \rho_l \mathbf{u}_l) = -\varphi_l \nabla p + \nabla \tau_l + \varphi_l \rho_l \mathbf{g} + k_{ls}(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_l) \quad (3)$$

$$\tau_l = \varphi_l \mu_l (\nabla \mathbf{u}_l + (\nabla \mathbf{u}_l)^T) \quad (4)$$

固相动量方程

$$\nabla(\varphi_s \rho_s \mathbf{u}_s) = -\varphi_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \tau_s + \varphi_s \rho_s \mathbf{g} + k_{ls}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (5)$$

$$\tau_s = \varphi_s \mu_s (\nabla \mathbf{u}_s + (\nabla \mathbf{u}_s)^T) + \varphi_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \mathbf{u}_s \quad (6)$$

式中, p 为压力, Pa ; τ_s 为水合物颗粒相剪切应力, N/m^2 ; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 ; k_{ls} 为液固传递系数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; μ_s 为水合物颗粒相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.3 湍流基本方程

采用RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟湍流运动^[8],与标准的 $k-\varepsilon$ 模型相比,RNG $k-\varepsilon$ 模型修正了湍动黏度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况;在 ε 方程中增加了一项,因而反映了主流的时均应变率,从而使得RNG $k-\varepsilon$ 模型中各相不仅与流动情况有关,而且还是空间坐标的函数。这就使RNG $k-\varepsilon$ 模型可以更好地处理高应变率和流线弯曲程度较大的流动。其表达式^[9]为

$$\frac{\partial(\varphi \rho_m k)}{\partial t} + \nabla(\varphi \rho_m \mathbf{u}_m k) = \nabla \left(\frac{\varphi(\mu_l + \mu_s) \nabla k}{\sigma_k} \right) + \varphi k (G - \rho_m \varepsilon) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\varphi \rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\varphi \rho_m \mathbf{u}_m \varepsilon) = \nabla \left(\frac{\varphi(\mu_l + \mu_s) \nabla \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + \varphi \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho_m \varepsilon) \quad (8)$$

式中, k 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍动能耗散率, m^2/s^3 ; μ_l 为紊流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G 为湍动能耗散项, $G = \mu_l (\nabla \mathbf{u}_l + (\nabla \mathbf{u}_l)^T) \nabla \mathbf{u}_l$; σ_k 和 σ_ε 为 k 方程和 ε 方程的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = \frac{k^2}{[(C_1 - C_2) \sqrt{C_\mu}]}$; $C_1 = 1.42$, $C_2 = 1.68$

2.4 相间耦合

水合物浆液流动有别于单一的原油流动,当固体载荷比较高时,不仅要考虑流体对颗粒的影响,还要考虑颗粒对流体的影响,也就是要考虑两相间的相互作用,因此模拟中相间耦合作用是不能忽略的^[10]。相间双向耦合是指流体通过推动和涡漩影响粒子运动的同时,粒子反过来通过消耗平均动量和涡漩来影响流体。CFD模拟中液固相间的耦合作用是通过相间动量交换来实现的,其主要部分就是液固两相间的曳力作用。CFD模拟中采用Wen-Yu曳力模型^[11],曳力的计算式为

$$F_D = k_{ls} |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_l| \quad (9)$$

当 $\alpha_l > 0.8$ 时

$$k_{ls} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varphi_s \alpha_l \rho_l |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_l|}{d_s} \varphi_l^{-2.65} \quad (10)$$

$$Re_s = \frac{\varphi_l \rho_l d_s |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_l|}{\mu_l} \quad (11)$$

$Re_s \leq 1000$ 时

$$C_D = \frac{24}{Re_s} (1 + 0.15 Re_s^{0.687}) \quad (12)$$

$Re_s > 1000$ 时

$$C_D = 0.44 \quad (13)$$

当 $\alpha_1 \leq 0.8$ 时

$$k_{1s} = 150 \frac{\varphi_s(1-\varphi_1)\mu_1}{\varphi_1 d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_1 \varphi_s |u_s - u_1|}{d_s} \quad (14)$$

式中, F_D 为作用在每个微单元体上的曳力, N ; C_D 为曳力系数; Re_s 为水合物颗粒雷诺数; d_s 为水合物颗粒平均粒径, m 。

3 模拟结果与分析

3.1 数值方法

假设气相被完全消耗, 此时水合物颗粒已经完全生成, 模拟过程中不存在水合物颗粒的分解和再生过程, 并且流动为紊流、等温、液固两相间无质量交换。

模拟以水作为连续相介质, 密度为 1000 kg/m^3 , 黏度 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。水合物颗粒作为离散相, 密度为 956.1 kg/m^3 。入口条件设置为速度入口, 选取湍流强度和水利直径作为入口湍流参数值, 出口条件设置为压力出口, 动量方程采用一阶迎风离散格式, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 格式, 壁面采用无滑移边界条件。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式只适用于离开固体壁面边界一定距离的区域, 因此对近壁区的湍流采用标准壁面函数法进行处理。网格采用的是六面体结构化网格, 非稳态数值计算精度满足前后两次迭代值相对误差小于 10^{-3} 。

在模拟前首先要检验模型网格的划分是否合理, 能否满足 Fluent 的模拟要求。采用不同网格数目对出口速度、压力、体积分数等参数分布进行对比, 当几组不同网格数目对应的参数分布基本一致时, 认为网格数变化对模拟结果无影响, 网格数量符合独立性要求。模拟时取最小网格数以节省计算机资源。

3.2 数值结果分析

3.2.1 数值模拟有效性验证

管道浆液输送时压力梯度变化是衡量管道安全的重要运行参数^[12], 因此本文对浆液在整个弯管内的压降进行研究。为了验证数值模拟结果的可靠性, 图2对水合物颗粒体积分数 $\alpha_s = 0.375$ 时浆液输送压力梯度计算值与文献[13]实

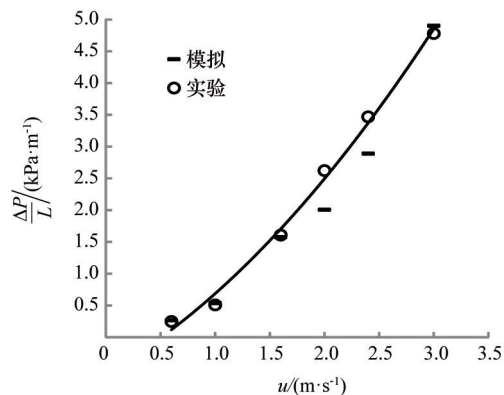


图2 压力梯度的数值模拟与实验结果对比

Fig. 2 Comparison of pressure gradient between numerical predictions and experiments

验值进行了对比, 其中本文所选取的固相体积浓度为 0.375 , 液相介质为水, 管径 42 mm 均与文献[13]实验相对应。模拟结果表明浆液在不同流速下, 管内压降随流速的增大而增大, 所得规律与实验结果基本吻合。这说明采用以颗粒动力学为基础的 Euler-Euler 模型研究管道内浆液流动特性是有效和可信的。

3.2.2 颗粒对浆液流场分布的影响

对水合物体积分数为 0.2 、流速 1.4 m/s 下的管内流动进行模拟, 得到弯曲段入口截面 ($\theta=0^\circ$) 和出口截面 ($\theta=90^\circ$) 处的速度分布。图3左图为速度分布云图, 图形的右侧为弯曲段内凹侧, 右图为速度矢量图。

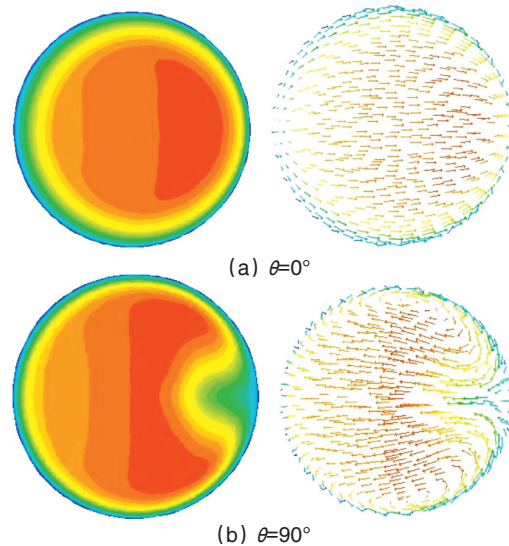


图3 横截面速度分布和速度矢量图

Fig. 3 Velocity distribution and velocity vector on the cross section

由图3可知, 弯曲段的速度呈凹凸的椭圆型分布; 管道横截面上的速度最大值位于横截面中心偏向弯管内凹侧的位置, 由此处向弯管外凸侧速度依次减小; 浆液在弯管段受离心力作用, 向弯管外凸侧流动, 弯管外凸侧的浆液遂向内凹侧补充因离心流动留下的真空, 呈现出清晰的二次流现象^[14,15], 此规律与单相流体在弯管内的流动相似^[16]。

对初始速度均为 1.4 m/s 的管内单相流体和水合物颗粒体积分数为 0.2 的浆液流场湍动能分布进行对比。在紊流场中, 由于壁面对浆液的附着作用, 管壁附近的湍流脉动剧烈。近管壁以外的区域, 湍动能在水合物生成与否的情况下差异较大。无水合物生成时, 上游直管段的浆液湍动能呈单一均匀的楔状分布; 弯曲段湍动能呈大小不等的椭圆状分布; 越靠近管道中心处湍动能值越大; 而流经下游直管段时, 湍动能再次减小且分布均匀, 如图4(a)所示。当管内有水合物存在时, 弯曲管段的湍动能变化明显, 直管段区域变化较小; 与无水合物生成的情况相比, 整体湍动能增加, 且分布较为均匀, 如图4(b)所示。

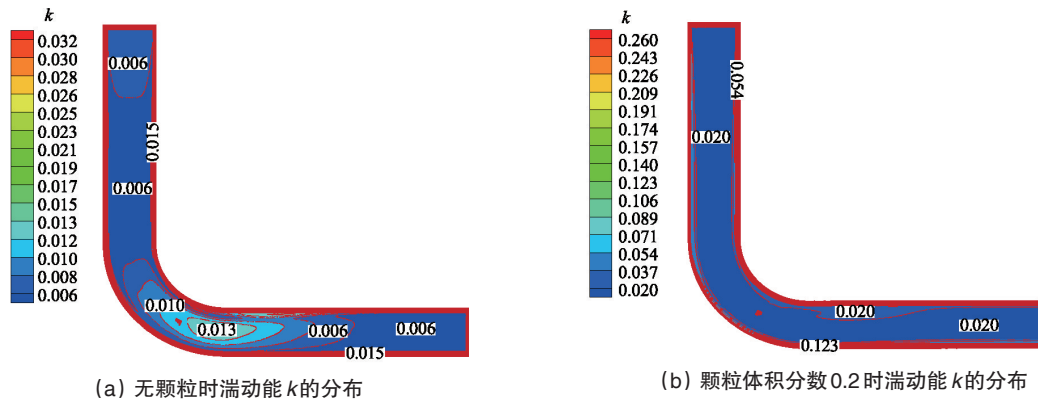


图4 湍动能分布

Fig. 4 Distribution of turbulent kinetic energy

弯曲段有无水合物时湍动能显著变化的原因可以归结为弯曲段二次流的发生。弯曲段速度分布相对于直管段而言,最大值轻微左移,同时二次流产生后改变了主流方向的平均速度,使得径向运动强度增加,促进了流场各部分的动量和能量交换,使弯曲段能量损耗增大。浆液在紊流状态下输送,流场中水合物颗粒与流体频繁碰撞,管道内颗粒与流体混合度较高,颗粒悬浮于液相流体中运动。涡旋从主流获得的能量增多,主流方向的能量一部分消耗在浆液紊流产生的脉动上,在本例数据条件下管道内浆液输送所需的能量增加。这表明颗粒的存在会增大流体的湍动能,与文献[13]结论一致。水合物和二次流改变了流速分布,增大了压能损失。

3.2.3 浆液压力梯度与平均流速关系

要确保浆液经济安全地输送,首要的是研究平均流速和压力梯度之间的关系,得到浆液在管道中的流动特性。为此对3组不同体积分数水合物分别在不同流速下的流动状况进行了模拟,结果如图5所示。

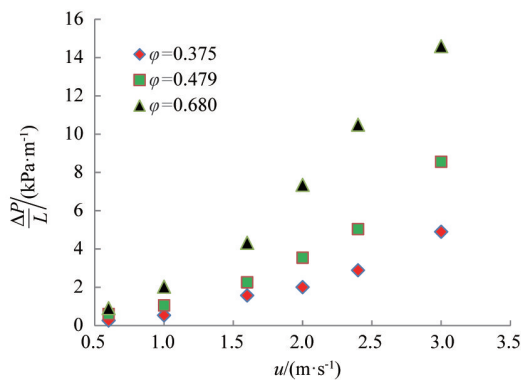


图5 浆液压力梯度与平均流速的关系

Fig. 5 Pressure gradient as a function of mean velocity of the hydrate slurry

在相同水合物体积分数下,水合物浆压力梯度均随流速的增大而增加;在同一流速下,水合物浆的压力梯度也随水合物体积分数的增大而增加,并且增加的幅度呈递增趋势。

在流速和体积分数同时增大时,水合物浆的压力梯度大幅度增加。对于管输水合物浆而言,流速的增大、固体颗粒体积分数的增加会对水合物浆产生持续剪切作用,大大加剧了颗粒碰撞、破碎与聚集的概率,导致颗粒间、颗粒与流体间的能量损失增大,压力梯度随之增加^[2]。显然,流速变化和颗粒的存在对浆液流动的影响不容忽视。

3.2.4 浆液压力梯度与水合物体积分数关系

管道中水合物体积分数较小时,相同流速时颗粒体积分数变化对浆液压力梯度影响不明显。本文模拟中取水合物颗粒体积分数从0.35开始增加,得到压力梯度与水合物体积分数之间的关系。图6给出了关于浆液流动的压力梯度与水合物体积分数间相关性的更多信息。

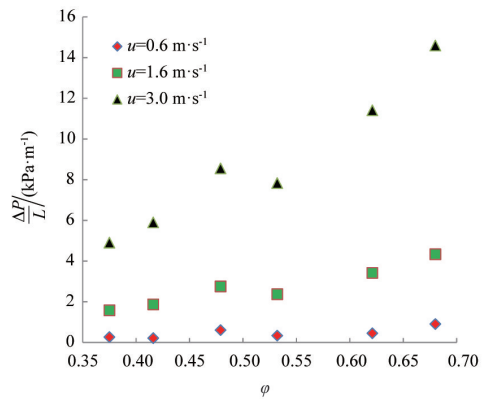


图6 压力梯度与水合物体积分数的关系

Fig. 6 Pressure gradient as a function of volume concentration of hydrate

由图6可知,流速一定时水合物浆压降变化与体积分数间不是单调线性关系,而是呈现分段特性。在体积分数相对较小时,浆液压力梯度随水合物体积分数的增大而增加,但增加的幅度并不大,称为压降缓慢增长区。在 $\varphi=0.475$ 附近,压力梯度停止增长。随后,压力梯度逐渐下降,直至 $\varphi=0.550$ 附近触底反弹。 φ 在0.475至0.550之间的部分称为压降过渡区。接着,压力梯度迅速增大,称为压降快速增长区。文献

[13]认为压力梯度随水合物体积分数变化呈分区特性,这与本文的规律一致。

从图6还可看出,水合物体积分数一定的浆液在管道中流动,浆液的平均流速是流动特性的主要影响因素。随着浆液平均流速的增大,浆液压降增大和转折的幅度依次增加,尤其是管道中水合物体积分数达到0.55以上且浆液流速较大时,流动的压降随水合物体积分数增加而急剧上升。已有研究认为,这个过渡区对应着水合物浆由浆状向泥状转变的过程^[13,17],浆液流动变为泥状流后,随着颗粒体积分数的进一步增加,颗粒与颗粒间的聚集和固化的几率增大,浆液以泥状形态流动。实际输送中水合物含量偏高且仍不断有水合物生成时,流动性能急剧下降,堵塞风险加剧,应及时采取措施确保安全输送。

油中有水合物生成后,流体流变性可能是剪切稠化^[18]或剪切稀化^[19],水合物悬浮液流变呈现多样性。单从本文中水合物体积分数一个因素来说,在不同阶段压降曲线已呈现不同特性,体积分数变化或可作为流变多样性的原因之一。

4 结论

通过数值模拟方法对管道中水合物浆的流动进行了模拟研究,并将模拟结果与文献实验结果进行对比,验证了模拟结果的可靠性。依此对压力梯度与速度场、平均流速和水合物体积分数的关系进行了研究。

1) 水平弯管弯曲段出现类似于单相流体流动的二次流现象,速度最大值分布在偏向内侧的横截面上。二次流和颗粒的存在都加剧了颗粒与流体间的混合,增大了浆液湍动能,促进了弯曲段湍动能分布趋于均匀。

2) 浆液平均流速和水合物体积分数对浆液压力梯度的增加起推动作用,而且这2个量较大时,数值越大,压力梯度的增量越大。不同流速下,水合物浆压力梯度随水合物体积分数的变化分为缓慢增长区、过渡区和快速增长区。

3) 单纯以体积分数作为管道安全指标,不足以对堵塞风险进行有效预警,还需综合考虑平均流速等因素。比如从水合物生长过程中微观特性变化的角度,揭示颗粒对湍动能的影响,以及压降分区和流变多样性的根本原因。

参考文献(References)

[1] 朱福安, 范举忠, 刘义斌. 建南气田天然气水合物的危害与防治[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(6): 500-502.
Zhu Fuan, Fan Juzhong, Liu Yibin. Jiannan oilfield natural gas exploitation bureau[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2007, 36(6): 500-502.

[2] 王武昌, 李玉星, 樊栓狮, 等. HCFC-141b 水合物浆流动特性实验[J]. 低温工程, 2010, 176(4): 13-17.
Wang Wuchang, Li Yuxing, Fan Shuanshi, et al. Study on flow behaviors of HCFC-141b hydrate slurry[J]. Cryogenics, 2010, 176(4): 13-17.

[3] Anthony D, Laurence F, Sandrine M, et al. Rheological study of CO₂ hydrate slurry in a dynamic loop applied to secondary refrigeration[J].

Chemical Engineering Science, 2008, 63: 3551-3559.

[4] 李玉星, 朱超, 王武昌, 等. 天然气水合物浆液稳定性影响因素的正交实验[J]. 油气储运, 2011, 30(9): 685-689.
Li Yuxing, Zhu Chao, Wang Wuchang, et al. Orthogonal-experimental research on stability effecting factors of hydrate slurry[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(9): 685-689.

[5] 张慧君, 付林, 高炳军. 油煤浆输送管路弯管部位液固两相流流场的数值模拟与磨损预测[J]. 河北工业大学学报, 2011, 39(6): 66-71.
Zhang Huijun, Fu Lin, Gao Bingjun. Numerical simulation of liquid-solid flows in elbows of coal-oil slurry transporting pipeline and its wear prediction[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 39(6): 66-71.

[6] 王继红, 张腾飞, 王树刚, 等. 竖直管道内冰浆流体流动特性的数值模拟[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 42-46.
Wang Jihong, Zhang Tengfei, Wang Shugang, et al. Numerical simulation of ice slurry flow in a vertical pipe[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(2): 42-46.

[7] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions[M]. New York: Academic Press, 1994.

[8] Yakhot V, Orzag S A. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-11.

[9] Adapco C D. STAR-CD methodology (Version 4.02)[M]. London: [S. I.] 2006.

[10] Marinhas S, Delahaye, A, Fournaison L. Solid fraction modelling for CO₂ and CO₂-THF hydrate slurries used as secondary refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30: 758-766.

[11] Crowe C, Sommerfeld M, Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles[M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 1998.

[12] 江国业, 李玉星, 王武昌. 油气藏流体水合物浆输送技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(6): 1300-1303.
Jiang Guoye, Li Yuxing, Wang Wuchang. State of the art on transportation technology of reservoir fluid hydrate slurry[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(6): 1300-1303.

[13] Wang W C, Fan S S, Liang D Q, et al. Experimental study on flow characters of CH₃CCl₂F hydrate slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31: 371-378.

[14] 王继红, 王树刚, 张腾飞, 等. 水平90°弯管内冰浆流体流动特性的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(4): 582-586.
Wang Jihong, Wang Shugang, Zhang Tengfei, et al. Numerical simulation of ice slurry flow in a horizontal 90° elbow pipe[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(4): 582-586.

[15] Hambric S A, Boger D A, Fahnline J B, et al. Structure- and fluid-borne acoustic power sources induced by turbulent flow in 90° piping elbows[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(1): 121-147.

[16] Parthasarathy R N, Faeth G M J. Turbulent dispersion of particles in self-generated homogeneous turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 220: 485-537.

[17] Balakin B V, Pedersen H, Kilinc Z, et al. Turbulent flow of freon R11 hydrate slurry[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70: 177-182.

[18] Hald K, Nuland S. Hydrate slurry rheology in the petroleum industry [J]. Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, 2007, 15: 1-7.

[19] Sinquin A, Palermo T, Peysson Y. Rheological characterization of hydrate suspensions in oil dominated system[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2004, 59(1): 41-57. (责任编辑 赵业玲)