

水平管道内冰浆流动阻力特性预测模型及比较

梁运涛¹, 王树刚², 张腾飞², 王继红²

(1. 煤炭科学研究总院沈阳研究院 煤炭安全技术国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 大连理工大学 土木学院, 大连 116024)

摘要:为研究水平管道内冰浆流体流动阻力特性,采用两相流混合模型,对不同工况下浆体所表现出的牛顿与非牛顿流变特性给予分段考虑,通过计算流体力学(CFD)模拟方法再现了水平管道内冰浆流体等温流动过程。研究表明,当浆体输送速度较高时,Thomas方程可很好地刻画出混合相流体的粘度特性。随着浆体速度降低,利用Bingham流变模型来刻画低速工况下混合相流体的流变特性可获得更为理想的效果。通过对比数值模型及现行实验关系式阻力模型发现,数值计算模型因能综合考虑管道压降的多种影响因素,模型的精度与通用性可得到较好的平衡。文中所验证的4组工况中,数值模型的预测值与实验值间的相对误差均可控制在 $\pm 15\%$ 内。

关键词:冰浆;管道;阻力特性;模型比较;CFD

中图分类号:O359 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0152-04

Numerical Modeling of Ice Slurry Flow Pressure Drop in Horizontal Pipes

LIANG Yuntao¹, WANG Shugang², ZHANG Tengfei², WANG Jihong²

(1. Shenyang Branch of China Coal Research Institute, State Key Laboratory of Coal Safety Technology,

Shenyang 110016, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China)

Abstract: To predict pressure drop of ice slurry flow in horizontal pipes, a mixture CFD model was applied to simulate the two-phase flow without considering ice melting. Based on the specific flow features, the Newtonian and non-Newtonian rheological expressions were employed respectively. It is found that in high speed the Thomas viscosity equation behaves well in representing the mixture fluid viscosity; whereas in low speed the Bingham model is more suitable for describing the mixture fluid rheology. Compared with the published pressure drop correlations, the current numerical model can involve with various factors and has a good balance between precision and suitability. The results of numerical model are in excellent agreement with the experimental data and the relative errors are limited to $\pm 15\%$.

Key words: ice slurry; pipe; pressure drop; model comparison; CFD

区域供冷在城市用电结构优化中扮演重要角色^[1]。冰浆流体作为蓄冷介质,因具有良好的热物性、传输性及相变特性正日益受到人们广泛关注。作为冰浆介质工程推广的基础性研究,冰浆流体阻

力特性成为当前各国学者的研究热点。目前所采用的研究方法多以实验测试为基础,结合描述冰浆流体的Bingham、Herschel-Bulkley、Powder Law和Casson等非牛顿流变特性^[2-5],建立冰浆流体管道压降预测

收稿日期:2011-04-15

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2008AA062103)

作者简介:梁运涛(1974-),男,高级工程师,博士,主要从事煤矿安全理论与技术研究,(E-mail)liangyuntao@vip.sina.com。

模型。此类模型虽然能够在一定范围内较为便捷地预测出冰浆流体阻力特性,但适用条件苛刻,难以同时兼顾输送管径、管速、冰粒子的浓度、粒径、载流体的种类及添加剂的浓度等多因素对阻力特性的影响。近年来,固液两相流计算流体力学(CFD)模拟技术为研究冰浆流体阻力特性带来了新的契机。笔者以冰粒子与载流体所构成的固液混合物为研究对象,采用无相变过程的两相流混合模型,运用CFD模拟为工具,对不同工况下浆体所表现出的牛顿与非牛顿流变特性给予分段考虑,将CFD模拟结果与既有文献实验数据及其它模型预测结果进行对比分析。

1 数学模型

基于无相变过程的两相流混合模型^[6-9],描述其流动特性的数学模型可表示如下。

1.1 连续性方程

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

式中: ρ_m 为混合相流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \vec{u}_m 为混合相流体的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\vec{\nabla}$ 为拉普拉斯算子。

1.2 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{u}_m) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_m + \rho_m \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i \vec{u}_{Di} \vec{u}_{Di} \right) \quad (2)$$

式中: $i=1$ 和 2 分别为液体相和冰粒子相; p 为静压力,Pa; $\vec{\tau}_m$ 为剪切应力,Pa; α_L 和 α_s 分别为液体相和冰粒子相的体积浓度,%; \vec{u}_{Di} 为拖曳速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3 冰粒子相浓度方程

基于无相变过程的冰粒子相浓度方程,如式(3)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_m) = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_{Ds}) \quad (3)$$

1.4 湍流方程

以求解雷诺平均的纳维尔-斯托克斯方程(RANS)为基础,描述混合相流体湍动的 $k-\epsilon$ 方程,如式(4)和(5)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}_m k) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}_m \epsilon) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \vec{\nabla} \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (5)$$

式中: $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\epsilon = 1.3$; $C_\mu = 0.09$; $\rho_m = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i$; $\vec{u}_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i \vec{u}_i$; $\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; $G_{k,m} = \mu_{t,m} (\vec{\nabla} \vec{u}_m + \vec{\nabla} \vec{u}_m^T) : \vec{u}_m$ 。

1.5 封闭条件

1.5.1 拖曳速度模型 多相流中,拖曳速度 \vec{u}_{Di} 表示 i 相与混合相间速度差。据此定义可得冰粒子相与液体相的拖曳速度,如式(6)和(7)所示^[6]。

$$\vec{u}_{Ds} = \vec{u}_s - \vec{u}_m = \vec{u}_{LS} - \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_i \rho_i}{\rho_m} \vec{u}_{Li} \quad (6)$$

$$\vec{u}_{DL} = \vec{u}_L - \vec{u}_m = -\vec{u}_{LS} - \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_i \rho_i}{\rho_m} \vec{u}_{Si} \quad (7)$$

式中: \vec{u}_{LS} 为液固两相间的滑移速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,其具体计算关系如式(8)和(9)所示^[6]。

$$\vec{u}_{LS} = \vec{u}_L - \vec{u}_s = \frac{(\rho_m - \rho_s) d_s^2}{18 \mu_L f_{\text{drag}}} \left(\vec{g} - \frac{\partial \vec{u}_m}{\partial t} \right) -$$

$$\frac{\mu_{t,m}}{\alpha_s \sigma_D} \vec{\nabla} \alpha_L \quad (8)$$

$$f_{\text{drag}} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_s^{0.687}, & Re_s \leq 1000 \\ 0.0183 Re_s, & Re_s > 1000 \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_s 为冰粒子直径,m; Re_s 为冰粒子雷诺数; $\mu_{t,m}$ 为湍流粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; σ_D 为普朗特扩散系数; f_{drag} 为拖曳系数。

1.5.2 粘度模型 水平管道内冰浆流体的输送过程中,当浆体输送速度较高时,冰粒子沿管道截面近似呈均匀分布,此时 Thomas 方程^[10]可很好地表示混合相流体的粘度特性,如式(10)所示。

$$\mu_m = \mu_L [1 + 2.5 \alpha_s + 10.05 \alpha_s^2 + 0.00273 \exp(16.6 \alpha_s)] \quad (10)$$

式中: μ_m 为混合相流体粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; μ_L 为液体相粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

随着浆体速度降低,冰粒子沿管道截面梯级分布,混合相流体非牛顿特性逐渐显现。本研究发现,若系统在低速运行时致使管道顶部冰粒子的浓度 $\alpha_s \geq 30\%$,此时 Bingham 流变模型^[2]可以很好地描述出低速工况下冰浆流体的流变特性,如式(11)所示。

$$\mu_m = \mu_p + \frac{\tau_p}{\gamma_m} \quad (11)$$

式中: μ_p 为混合相流体塑性粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; τ_p 为混合相流体屈服应力,Pa; γ_m 为混合相流体速度变形率, s^{-1} 。其中, μ_p 与 τ_p 取值见文献[11]。

采用CFD方法求解上述微分方程组,首先沿着CFD网格单元对各微分方程实施积分,然后基于散度定理离散得到相应离散方程,最后应用SIMPLE

算法耦合连续性与动量方程。方程求解的边界条件类型在管道入口为质量流率入口,出口为压力出口。湍流流动时壁面处应用标准壁面函数。流动计算区域采用六面体网格单元,平均尺寸为1.7 mm。通过对所获得的数值计算结果进行网格独立性检验,网格数量符合独立性要求。数值计算精度满足前后两次迭代值相对误差小于 10^{-6} 。

2 算例验证与对比分析

2.1 算例概况

以文献[12]所报道的实验结果为参考,利用前文所介绍的两相流 CFD 模拟方法研究水平管道内冰浆流体等温流动过程。其中浆体输送管径 $D=0.016\text{ m}$,管长 $L=6\text{ m}$,输送平均速度 $u_m=0.22\sim 2.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液体相为质量浓度 $C_A=10.6\%$ 的乙醇溶液。各相基本物理参数如表 1 所示。

表 1 流体的基本物理参数

流体相	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$d_s/\mu\text{m}$	$\alpha_s/\%$	$\alpha_L/\%$	$\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$
冰粒子相	917	100	11.3~31.5	—	—
液体相	986	—	—	88.7~68.5	5.032×10^{-3}

2.2 数值结果分析

图 1 给出了不同浓度下水平管道内冰浆流体管道压降与平均输送速度间变化关系。总体上浆体的管道压降与平均输送速度间呈单调递增关系,但在低速流动区域内(本例中,输送速度小于 $0.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),压降随输送速度的递变速率略有降低。由图 1(a)可知,当采用 Thomas 粘度方程时,CFD 模拟结果与实验值整体上体现出较好的一致性,但随着浆体速度的降低,CFD 预测值明显低于实验测试结果,在某些低速工况点处最大偏差可达 48.9%。这是因为随着浆体速度降低,管道顶部冰粒子浓度升高,此时冰浆流体逐渐表现出非牛顿流体特性。在所验证的 4 组工况中,当浆体输送速度低于 $0.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、管道顶部冰粒子浓度高于 30% 时,冰粒子沿管道截面分布不均匀性加剧,粒子间相互作用增强,此时 Thomas 粘度方程的高阶项不足以反映冰粒子间相互作用,以及由此造成的混合相流体粘度特性的变化。但是,借助于 Bingham 流变模型,则可较为理想地刻画出低速工况下水平管道内冰浆流体的非牛顿特性。基于 Bingham 流变特性并采用两相流无滑移混合模型,对图 1(a)中虚线内工况点进行修正处理。由图 1(b)可知,在修正后

低速工况点处,CFD 模拟获得了与实验测试非常一致的结果,最大偏差不足 15%。

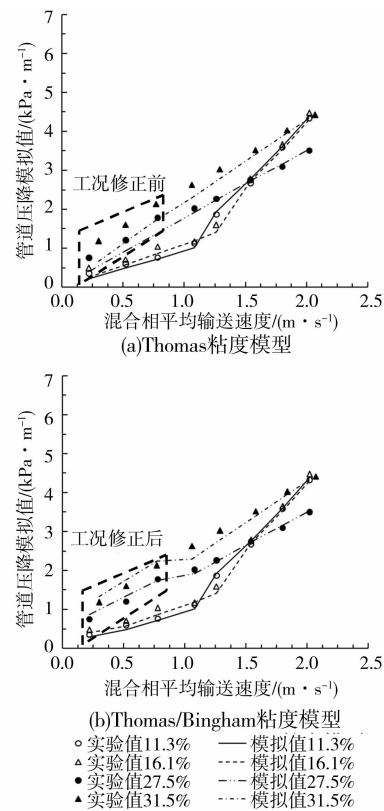


图 1 水平管道内不同冰浆浓度下冰浆流体的管道压降

2.3 预测模型对比

冰浆流体管道压降受多因素制约,而现行的基于宏观实验现象所建立起的阻力特性预测模型往往难以很好地平衡模型的精度与通用性间关系。这是因为此类模型多是借助于冰浆流体非牛顿流变特性,再结合单相流体的 Darcy 阻力关系建立的。在建模过程中,由于实验条件所限,难以综合考虑多类影响因素。以图 1 中所描述的各工况点为例,分别选取文献[13]、[14]及[15]所建立的 3 类具有代表性的管道压降预测模型进行计算,其详细的数学描述如表 2 所示。

图 2 给出了各类预测模型的预测结果与实验对比。由图 2 中(a)、(b)及(c)不难发现,文献[13]所介绍的压降预测模型虽能较好地预测出大部分工况点的压降值,但在个别工况点处模型预测精度并不稳定,预测效果的阶跃性及随机性较大。而文献[14]和[15]所建立的预测模型仅在高速、低浓度工况下体现出较好的预测效果,当浆体浓度升高、输送速度降低时,模型预测值与实验值间产生较大偏差,从而大大削弱了预测模型的实用价值。图 2(d)为所采用的 CFD 模型预测结果,由对比可知,模拟值

与实验值间的相对误差可控制在±15%内,模拟结果与实验测试结果吻合良好。

表 2 冰浆流体管道压降预测模型数学描述

代表文献	管道阻力系数 f_m 数学表述	模型特点
[13]	层流: $\frac{1}{Re_m} = \frac{f_m}{16} - \frac{He}{6Re_m^2} + \frac{He^4}{3f_m^3 Re_m^8}$ 湍流: $\frac{1}{f_m^{0.5}} = 4\lg(Re_m f_m^{0.5}) - 0.4$	将冰浆流体等效为均质宾汉流体,通过确定宾汉流体雷诺数 Re_m 和 Hedstrom 数 (He) 来分段计算管道阻力系数。
[14]	$f_m = f_L + b_1 \alpha_S^{b_2} f_L^{b_3} C_A^{b_4} \left(\frac{u_m^2}{d_s g \left \frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right } \right)^{b_5}$	基于液体相的管道阻力分布规律,考虑冰粒子浓度、粒径及载流体种类对浆体阻力产生的附加影响。 $b_1 \sim b_5$ 由实验测试确定。
[15]	$f_m = \frac{\alpha}{Re_m^\beta}$	基于单相流体管道阻力系数分布规律所建立起的阻力特性预测模型。 α 和 β 由实验测试确定。

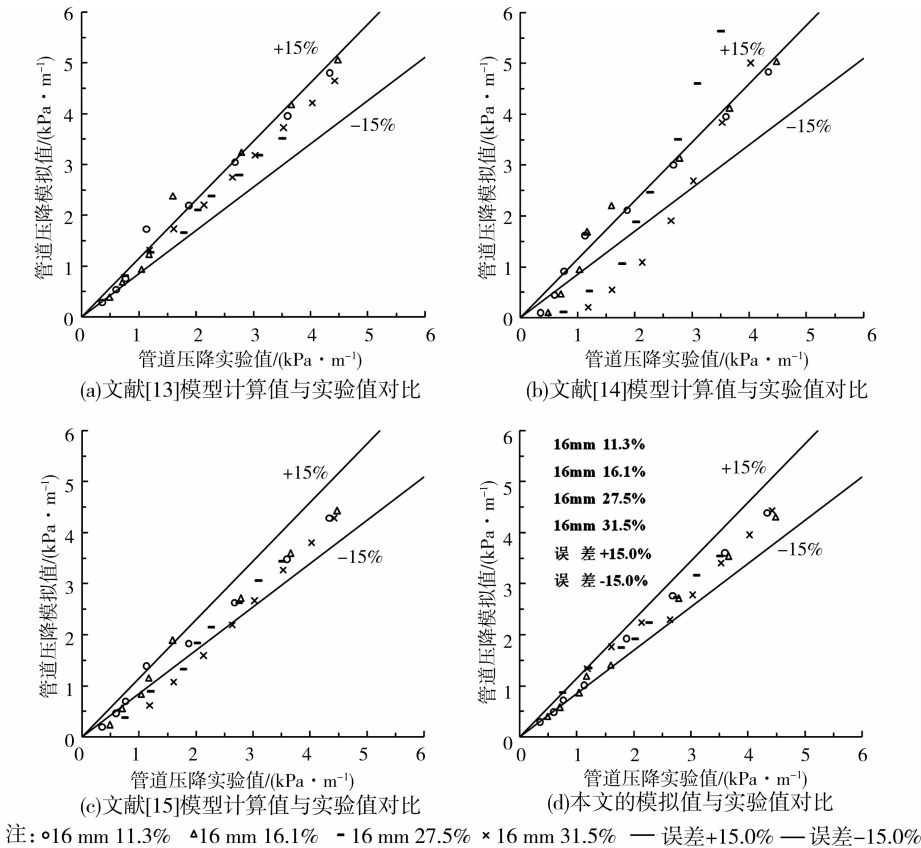


图 2 水平管道内冰浆流体管道压降预测模型的预测值与实验值对比

3 结 论

采用两相流混合模型,对不同工况下浆体所呈现的牛顿与非牛顿流变特性给予分段考虑,通过 CFD 模拟方法研究了水平管道内冰浆流体的等温流动,结论如下。

1)在水平管道内冰浆流体输送过程中,当浆体速度较高时,冰粒子沿管道截面近似呈均匀分布,此时 Thomas 方程可很好地描述混合相流体的粘度特性。随着浆体速度降低,管道顶部冰粒子浓度升高,

冰浆流体逐渐表现出非牛顿流体特性,此时利用 Bingham 流体模型来描述低速工况下混合相流体的流变特性所获得的效果较为理想。

2)同基于冰浆流体非牛顿流变特性管道压降预测模型相比,笔者所采用的数值计算模型因全面考虑到浆体输送管径、管速、冰粒子的浓度、粒径、载流体的种类及添加剂的浓度等多因素影响,模型的精度与通用性可得到较好平衡。在所验证的 4 组工况中,采用的数值模型的预测值与实验值之间的相对误差均控制在±15%以内。

参考文献:

- [1] 魏琪. 等热流圆管内冰浆流体传热特性的解析研究[J]. 苏州大学学报, 2006, 26(3): 1-3.
WEI Qi. Analytical study on heat transfer of ice slurry in a circular tube with constant heat flux [J]. Journal of Soochow University: Engineering Science, 2006, 26(3): 1-3.
- [2] Grozdek M, Khodabandeh R, Lundqvist P. Experimental investigation of ice slurry flow pressure drop in horizontal tubes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 357-370.
- [3] Illan F, Viedma A. Experimental study on pressure drop and heat transfer in pipelines for brine based ice slurry Part II: dimensional analysis and rheological model [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 1024-1031.
- [4] Ayel V, Lottin O, Peerhossaini H. Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries: a review of the state of the art [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 95-107.
- [5] Kitanovski A, Vuarnoz D, Caesar D A, et al. The fluid dynamics of ice slurry [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 37-50.
- [6] Ling J, Skudarnov P V, Lin C X, et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 389-398.
- [7] Lin C X, Ebadian M A. A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe [J]. Computers & Fluids, 2008, 37(8): 965-974.
- [8] Skudarnov P V, Lin C X, Ebadian M A. Double-species slurry flow in a horizontal pipeline [J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 125-132.
- [9] 张宏兵, 陈露露, 谢荣华. 水平圆管固液两相稳态流动特性数值模拟[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1162-1168.
ZHANG Hongbing, CHEN Lulu, XIE Ronghua. Numerical simulation of solid-liquid two-phase steady flow in horizontal pipe [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(5): 1162-1168.
- [10] Thomas D G. Transport characteristics of suspension [J]. Journal of Colloid Science, 1965, 20(3): 267-277.
- [11] Beata N Z, Zelasko J. Generalized non-Newtonian flow of ice-slurry [J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(10): 895-904.
- [12] Beata N Z, Wojciech Z. Momentum transfer of ice slurry flows in tubes, experimental investigations [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(3): 418-428.
- [13] Tomita Y. On the fundamental of non-Newtonian flow [J]. Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers, 1959, 2(7): 469-474.
- [14] Kauffeld M, Kawaji M, Egolf P W. Handbook on ice slurries-fundamentals and engineering [M]. France: International Institute of Refrigeration, 2005.
- [15] 刘永红. 冰浆流动特性和传热性能的研究[D]. 上海: 同济大学, 1997.

(编辑 薛婧媛)