

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.002

冰浆水平直管非均匀输运特性研究

徐爱祥¹, 平仕昊¹, 徐 丹², 刘志强², 寇广孝¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 通过建立 CFD-PBM 耦合模型, 研究含冰率与流速对水平直管内冰浆的冰晶体积分数与粒径的分布规律, 着重分析了冰浆管内非均匀流动过程的输运特性。研究表明: 含冰率对冰晶体积分数及粒径演化有显著影响, 含冰率越高, 冰晶体积分数越大, 冰晶平均粒径越大; 而流速对冰晶体积分数分布的影响主要在于近壁面区, 流速增大主流区的冰晶体积分数几乎不变, 而近壁面处冰晶体积分数则有所下降; 随着流速的增加, 冰晶粒径增大, 但增加的速率逐渐下降。

关键词: 冰浆; CFD-PBM 耦合模型; 非均匀流动; 输运特性

中图分类号: TB61⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0006-06

Study on Non-Uniform Transport Properties of Ice Slurry Horizontal Straight Tubes

XU Aixiang¹, PING Shihao¹, XU Dan², LIU Zhiqiang², KOU Guangxiao¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A CFD-PBM (computational fluid dynamics-population balance model) coupling model has been established to study the effects of ice packing factor and flow velocity on the ice volume fraction (IVF) and particle size distribution (PSD) in horizontal straight tubes, followed by an analysis of the transport properties of heterogeneous flow in ice slurry pipes. The results show that the ice content has a significant effect on the ice volume fraction (IVF) and particle size distribution (PSD): the higher the ice content is, the bigger the ice volume fraction (IVF) will be, and the bigger the particle size distribution (PSD) will be as well. The main effect of the flow velocity on the IVF distribution mainly focuses on the regions near the wall of pipes. While the ice volume fraction (IVF) in the mainstream almost remains unchanged, the ice volume fraction (IVF) near the wall region decreases. With the increase of velocity, the size of ice crystals increases, while the increasing rate of ice crystals decreases.

Keywords: ice slurry; CFD-PBM coupling model; non-uniform flow; transport property

1 研究背景

冰浆是一种包含大量冰晶颗粒的固液两相流体, 具有较高的蓄冷密度和良好的流动与换热特性^[1]。由于冰浆固液两相特性, 其在输送过程呈现出典型的

非均匀特性。因此, 其流动过程比单相流体甚至常见的两相流体更为复杂^[2]。冰浆输送过程中冰晶与冰晶以及冰晶与载流体之间存在相互作用, 冰浆中大量的冰晶颗粒会发生成核、聚集、破碎、生长等动力学行为。由于上述动力学行为的共同作用, 从而促

收稿日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51641605), 湖南省教育厅科研基金资助项目(15C0407)

作者简介: 徐爱祥(1984-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为节能与储能领域的工程热物理问题, E-mail: axxu@hut.edu.cn

使冰晶粒径分布按一定规律演化。在冰浆流动与传热的计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型研究中, 冰晶颗粒被假设为所有冰晶具有相同粒径, 并不随着流动过程发生演变。实际上, 这一假设与实际的冰浆粒径特征相离较远。P. Pronk 等^[3]基于结晶动力学建立了冰浆颗粒数量、质量和能量守恒的动态模型, 着重研究了存储过程中冰晶粒径分布的演化过程及规律, 该模型是冰浆存储过程冰晶粒径演化较早的耦合模型, 但只考虑了 Ostwald 熟化的生长项。M. Arellano 等^[4]建立了一个 CFD-PBM (population balance model) 耦合模型, 研究表面刮削式换热器的冰结晶过程, 该模型考虑了能量方程及冰晶成核、生长、破碎现象, 认为过冷度是冰晶成核与生长的重要因素。本课题组^[5-6]运用数群平衡模型 (PBM), 较为系统地分析了冰浆存储过程中破碎和聚集对冰晶粒径及其演化的影响, 并尝试以 CFD-PBM 耦合的方法建模。结果发现, CFD 模型与 CFD-PBM 耦合模型存在明显的差异^[7]。本研究将进一步运用 CFD-PBM 耦合模型, 研究冰浆非均匀流动输运特性及规律。

因此, 本文引入数群平衡模型, 构建冰浆非均匀流动 CFD-PBM 耦合模型, 进而研究冰浆不同含冰率与流速条件下, 水平直管内冰浆流动过程中的冰晶体积分数 (ice volume fraction, IVF) 和冰晶粒径分布 (particle size distribution, PSD) 及演化规律, 从而定量描述冰浆非均匀流动过程的输运特性及其规律, 以期为冰浆的高效制备、输运及其应用提供一定的理论参考。

2 数学建模

2.1 CFD 模型

CFD 模型的守恒方程由质量守恒方程和动量守恒方程组成。

1) 质量守恒方程

两相的质量守恒方程^[8]可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = 0, \quad (1)$$

式中: α 为体积分数; $\mathbf{v}$ 为局部速度; ρ 为密度; t 为时间; i 为变动性下标, 当 $i=1$ 时表示液相, 当 $i=s$ 时表示固相; ∇ 为哈密顿算子。

2) 动量守恒方程

每一相的动量守恒方程通过 Navier-Stokes 方程来表述, 方程的右边是相间的动量改变项。考虑冰浆自身特性, 忽略升力和虚拟质量力的影响, 可得液相与固相的动量守恒方程^[9]。液相动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_l + \alpha_l \rho_l g + K_{sl}(\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_l), \quad (2)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_l = \alpha_l \mu_l \left(\nabla \cdot \mathbf{v}_l + (\nabla \cdot \mathbf{v}_l)^T \right) - \frac{2}{3} \alpha_l \mu_l (\nabla \cdot \mathbf{v}_l) \bar{\bar{I}}. \quad (3)$$

固相动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s g + K_{ls}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s), \quad (4)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s \left(\nabla \cdot \mathbf{v}_s + (\nabla \cdot \mathbf{v}_s)^T \right) + \alpha_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}_s) \bar{\bar{I}}. \quad (5)$$

式 (2) ~ (5) 中: $\mathbf{v}_l$ 、 $\mathbf{v}_s$ 分别为液相与固相的运动黏度; g 为重力加速度; $\bar{\bar{\tau}}_l$ 、 $\bar{\bar{\tau}}_s$ 分别为液相与固相的压力应变张量; $\bar{\bar{I}}$ 为单位张量; K_{sl} 、 K_{ls} 为相间动量交换系数; ∇p 为两相共享的压力; ξ_s 为固相体积黏度; μ_l 、 μ_s 分别为液相与固相的动力黏度。

2.2 数群平衡模型

2.2.1 数群平衡方程

数群平衡模型是利用数群平衡方程 (population balance equation, PBE) 描述体系中的离散颗粒的尺寸分布及演化规律, PBE 是一个基于长度数量、密度函数的数群平衡方程^[10], 可表示为

$$\frac{\partial n(L; \mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} n(L; \mathbf{x}, t)] + \frac{\partial [G(L) n(L; \mathbf{x}, t)]}{\partial L} = B_{ag}(L; \mathbf{x}, t) - D_{ag}(L; \mathbf{x}, t) + B_{br}(L; \mathbf{x}, t) - D_{br}(L; \mathbf{x}, t). \quad (6)$$

式中: $n(L; \mathbf{x}, t)$ 为以颗粒尺寸 L 作为内坐标的颗粒数量密度函数, 其中 $\mathbf{x}$ 是内坐标; $\mathbf{u}$ 为颗粒的速度矢量; $G(L)$ 为颗粒生长速率; $B_{ag}(L; \mathbf{x}, t)$, $D_{ag}(L; \mathbf{x}, t)$ 分别为在聚集作用下颗粒增加与减少的速率; $B_{br}(L; \mathbf{x}, t)$, $D_{br}(L; \mathbf{x}, t)$ 分别为在破碎作用下颗粒增加与减少的速率。

2.2.2 聚集模型

综合考虑冰浆流体颗粒的布朗运动和流体湍动能耗散的影响, 冰浆流动的湍流模型^[11]可表示为

$$\beta(L, \lambda) = \frac{2k_B T}{3\mu} \frac{(L + \lambda)^2}{L\lambda} + \frac{4}{3} \left(\frac{3\pi}{10} \right)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2} (L + \lambda)^3, \quad (7)$$

式中: $\beta(L, \lambda)$ 为冰晶颗粒的聚集速率系数; k_B 为 Boltzman 常数; T 为冰浆的绝对温度; μ 为冰浆中载流体的动力黏度; L 、 λ 均为冰晶粒子的尺寸; ν 为载流体的运动黏度; ε 为湍流耗损率。

2.2.3 破碎模型

冰浆流动过程中, 其湍动能较小, 所以其颗粒破碎模型^[12]为

$$a(L) = \frac{1}{\sqrt{15}} \left(\frac{\varepsilon}{v} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{\tau_f}{\mu(\varepsilon/v)^{1/2}} \right], \quad (8)$$

式中: $a(L)$ 为冰晶颗粒的破碎速率系数; τ_f 为冰晶颗粒的融化温度。

冰晶颗粒破碎概率函数与颗粒特性和破碎机理有关, 机理假设不同, 概率函数的数学表达式亦不同。本文选用具有代表性的抛物线分布 (parabolic distribution) 函数, 其表达式为

$$p(L|\lambda) = \frac{3CL^2}{\lambda^3} + \left(1 - \frac{C}{2} \right) \left\{ 72 \frac{L^8}{\lambda^9} - 72 \frac{L^5}{\lambda^6} + 18 \frac{L^2}{\lambda^3} \right\}. \quad (9)$$

式中 C 为形状因子, 假设冰晶颗粒为球形, 则形状因子 $C=1$, 冰晶颗粒分布呈凹抛物线形。

2.3 CFD 模型与 PBM 模型的耦合

2.1 和 2.2 节中分别建立了冰浆流动的 CFD 模型与 PBM 模型, 二者耦合的具体方式如下: 由 CFD 模型计算冰浆的流动速度和固相体积分, 进而求解冰晶颗粒生长、聚集和破碎等动力学过程, 然后代入数群平衡方程计算, 修正冰晶的粒径分布; 由于相间作用力与粒径之间关联较大, 因此使相间作用力修正粒径分布; 将修正后的粒径和曳力代入 CFD 模型中, 计算流场和固相体积分。

3 模型设置及验证

3.1 物理模型

本文的物理模型是一根直径为 0.024 m、长度为 5 m 的水平直管, 一端为冰浆的速度入口, 另一端为压力出口。为了提高计算精度, 管道近壁面采取网格加密。载流体是质量分数为 6.5% 的乙二醇水溶液, 其密度为 1 008 kg/m³, 动力黏度为 0.002 4 Pa·s。冰晶密度为 917 kg/m³, 平均粒径为 125 μm, 粒径分布按对数正态分布函数规律设置。

3.2 模型设置与边界条件

工况设置及其边界条件如表 1 所示, 模型分别设定含冰率 (ice packing factor, IPF) 和冰浆流速。压力出口端均设置为一个大气压。壁面边界条件设定: 载流体为无滑移边界条件, 冰晶颗粒为自由滑移边界条件。

表 1 工况设置及其边界条件

Table 1 Working condition setting and its boundary condition

工况设置	入口边界条件	
	冰浆含冰率/%	冰浆流速/(m·s ⁻¹)
Case 1	10	1.08
Case 2	20	1.08
Case 3	20	1.96
Case 4	20	2.84
Case 5	30	1.08

3.3 模型求解

本研究采用颗粒流体力学理论来求解固体相的剪切力、固体压力和固体黏度, 并认为液相与固相的动量交换是通过相间相互作用力实现的。相间作用力主要包括曳力和湍流耗散力, 其中曳力为主要因素。因此采用 Gidaspow drag 模型来描述冰浆流动中相间作用力。冰浆中的冰晶与水的密度比接近 1, 所以选择混合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来求解输运方程。鉴于积分矩方法能大幅度节省计算时间, 本研究采用积分矩方法求解 PBM 各个方程的低阶矩, 进而获得冰晶颗粒的分布。

3.4 模型验证

为了验证所建立的 CFD-PBM 耦合模型的合理性, 搭建了冰浆水平管内流动的压降测试平台 (如图 1 所示), 其主要的设备包括: 蓄冰槽、泵、流量计、差压器和温度计 (PT100) 等。本实验是测试在绝热条件下的冰浆管内流动, 因此实验系统需要做好绝热保温。

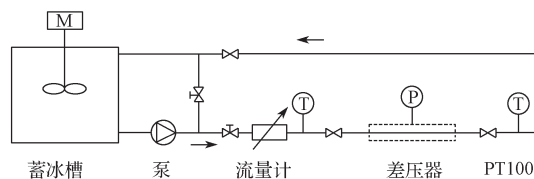


图 1 冰浆压力测试实验平台

Fig. 1 Experimental platform for pressure tests of ice slurry

本实验产生的冰浆样品如图 2 所示。经过测量得知, 冰浆中冰晶粒径大小为 1 mm 左右, 冰浆的含冰率为 5%。

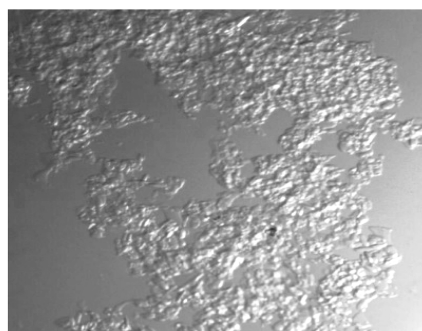


图 2 冰浆样品图片

Fig. 2 Sample photos of ice crystals

实验主要测试了在不同雷诺数 (Re) 条件下, 冰浆流动过程中的压降结果, 并与 CFD-PBM 耦合模型计算的结果作比较, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, CFD-PBM 耦合模型计算的结果与实验结果变化趋势一致, 且两者的最大相对误差为 10.32%, 这说明所建立的模型可以用于模拟冰浆流动特性的研究。

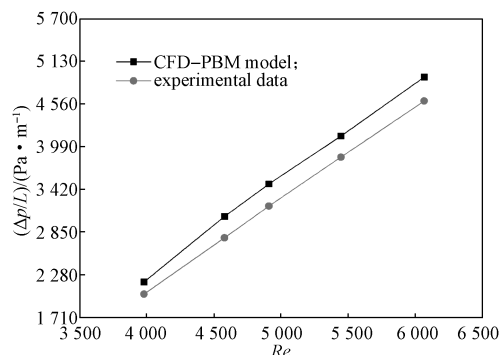


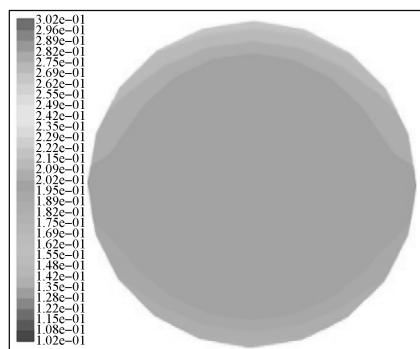
图3 不同 Re 条件下流动压降的实验结果与模型计算结果对比

Fig. 3 Comparison of flow pressure drop between the experimental result and model calculation result

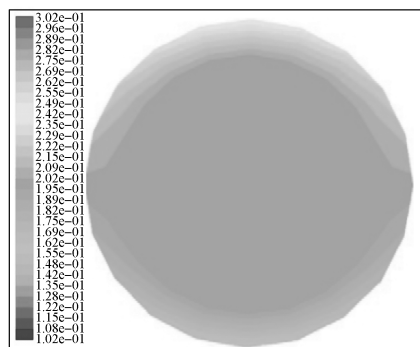
4 结果与分析

4.1 不同速度和含冰率条件下冰晶的体积分数分布

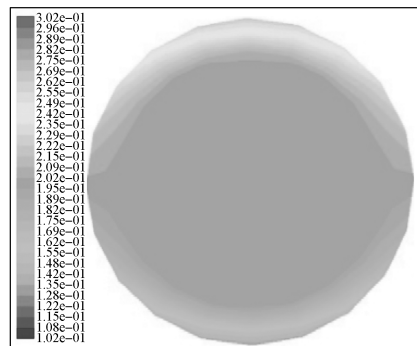
图4为工况 case2 条件下沿流动方向 (z 向) 的4个横截面处冰浆中冰晶体积分数的分布云图。由图4可知, 冰晶由于与载流体的密度差异, 在浮升力的作用下不断上升, 集中于管道的上壁面, 从而使上壁面区域冰晶体积分数较大, 而下壁面区域冰晶体积分数较小。管道中间区域为流体的主流区, 冰晶颗粒受湍流扰动作用较大, 所以冰晶体积分数分布较为均匀。对比图4的分图可以发现, 随着 z 值的增大, 管道上壁面的冰晶体积分数增大, 而下壁面的冰晶体积分数减小。



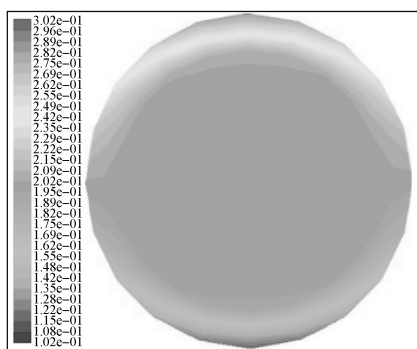
a) $z=1$ m



b) $z=2$ m



c) $z=3$ m

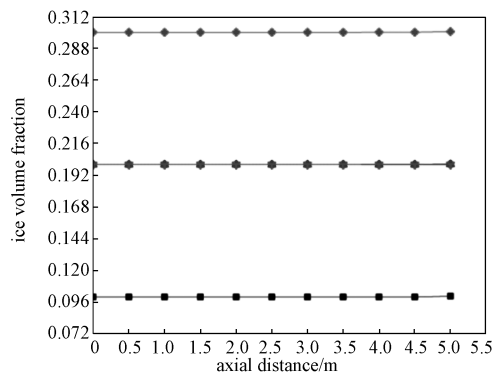


d) $z=4$ m

图4 z 向不同位置横截面的冰晶体积分数分布云图

Fig. 4 IVF contours of ice crystals with different sections in z axis

图5给出了冰浆含冰率和流速对于冰晶体积分数的影响规律。由图5a可知, 冰晶体积分数变化与冰浆入口时的含冰率呈十分显著的正相关关系, 冰晶体积分数随着含冰率的增加而增加。由图5b可知, 冰浆入口速度不同对近壁面处的冰晶体积分数分布影响明显, 入口速度越大, 载流体对冰晶的扰动越大, 所以近壁面处的冰晶体积分数越小; 相反地, 入口速度越小, 载流体对冰晶的扰动越小, 所以近壁面处的冰晶体积分数越大。



a) z 轴方向

— 含水率为10%, 流速为1.08 m/s;
— 含水率为20%, 流速为1.08 m/s;
— 含水率为20%, 流速为1.96 m/s;
— 含水率为20%, 流速为2.84 m/s;
— 含水率为30%, 流速为1.08 m/s

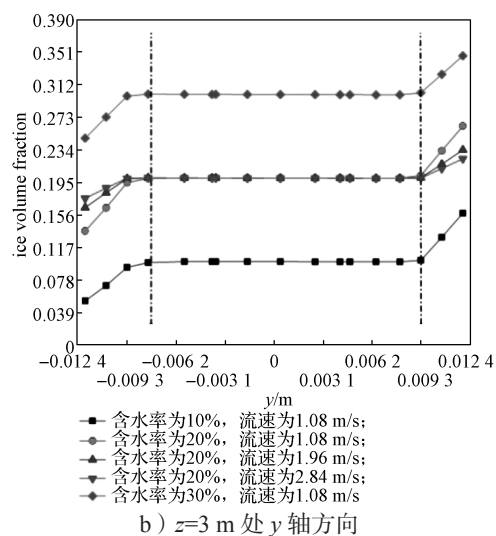


图5 不同工况下冰晶体积分数分布

Fig. 5 IVF of ice crystals under different working conditions

4.2 不同速度和含冰率条件下冰晶粒径分布

图6为工况 case2 条件下流动方向不同位置横截面处冰晶粒径分布云图。由图6可知，管道中心位置的冰晶平均粒径较小，近壁面处的冰晶平均粒径较大，并且近壁面处的冰晶平均粒径变化梯度较显著。对比4个云图可以发现，在冰浆的流动过程中，冰晶粒径逐渐增大，这说明冰浆的流动过程，集聚动力学行为占主导地位，从而促进冰晶聚集，冰晶粒径逐渐增大。

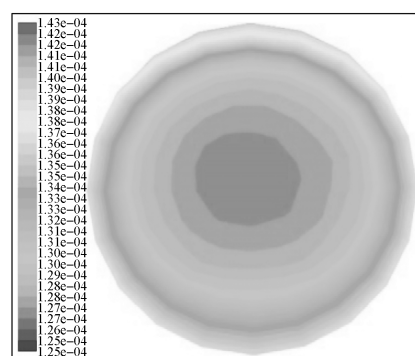
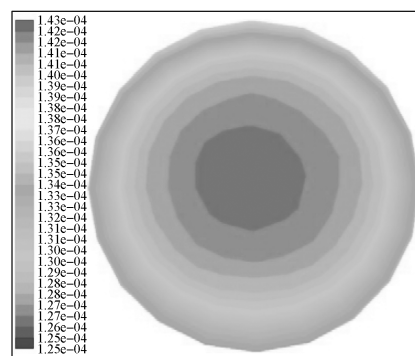
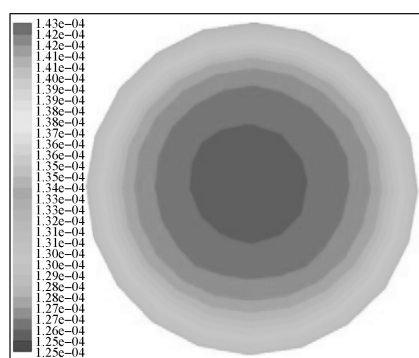
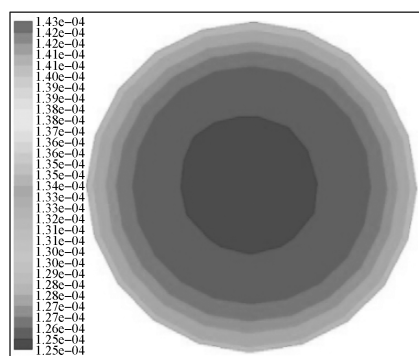
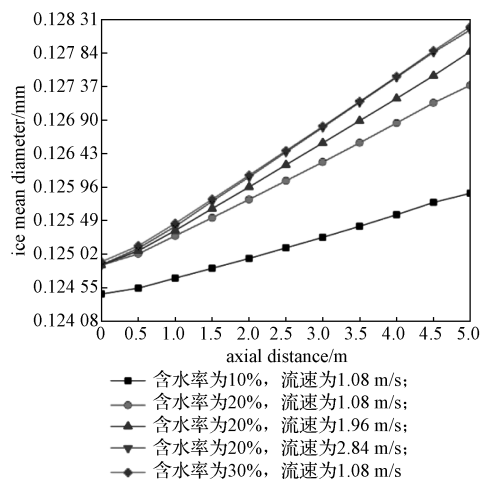
图6 z 向不同位置横截面的冰晶粒径分布云图Fig. 6 PSD contours of ice crystals with different sections in z axis

图7为冰浆入口时含冰率和流速对管内冰晶粒径分布的影响规律。由图7可知，冰晶平均粒径的变化与冰浆入口时的速度和含冰率呈正相关关系，冰晶平均粒径随着冰浆入口时的速度和含冰率的增加而增加。这是因为速度越大和含冰率越大均增加了冰晶颗粒之间的碰撞机会，从而促进集聚和破碎作用。此外，流速和含冰率对于冰晶粒径演化的影响程度及其规律较为相近，也就是随着进一步提高速度或者含冰率，冰晶粒径的变化程度比之前减少。



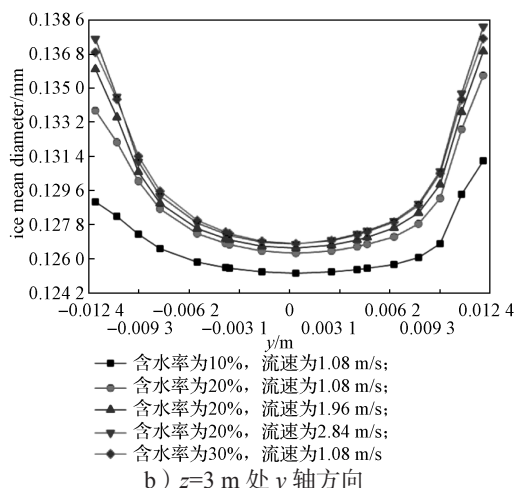


图7 不同工况下冰晶平均粒径分布

Fig. 7 Ice crystal average particle size distribution (PSD) of ice crystals under different working conditions

综上所述, CFD-PBM 耦合模型凸显了模拟冰晶颗粒演化过程的优势。

5 结论

本文建立了冰浆输送过程的 CFD-PBM 耦合模型, 研究了不同的含冰率、流动速度对于冰浆流动过程的影响, 得到了水平直管内冰浆的冰晶体积分数和粒径分布的规律, 进而分析了冰浆在管内非均匀流动过程的输运特性, 可得如下结论:

1) 入口冰浆的含冰率对管内冰晶体积分数的影响十分显著, 入口含冰率越高, 各位置处的冰晶体积分数均越大; 而流动速度对于冰晶体积分数分布的影响主要存在于近壁面区, 表现为随着流动速度的增大, 主流区的冰晶体积分数几乎不变, 而近壁面的冰晶体积分数均有所下降。

2) 冰晶粒径演化由冰晶动力学过程决定, 而冰晶动力学过程又受流动速度与含冰率的影响, 所以流动速度与含冰率对于冰晶粒径演化具有非常明显的影响, 表现为随着速度和含冰率的增加, 冰晶粒径也增大, 但增加的速率逐渐下降。

参考文献:

- [1] YOUSSEF Z, DELAHAYE A, LI H, et al. State of the Art on Phase Change Material Slurries[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65(1): 120-132.
- [2] KUMANO H, HIRATA T, HAGIWARA Y, et al. Effects of Storage on Flow and Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(1): 122-129.
- [3] PRONK P, FERREIRA C A I, WITKAMP G J.

A Dynamic Model of Ostwald Ripening in Ice Suspensions[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1/2): e1355-e1361.

- [4] ARELLANO M, BENKHELIFA H, ALVAREZ G, et al. Coupling Population Balance and Residence Time Distribution for the Ice Crystallization Modeling in a Scraped Surface Heat Exchanger[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 102(10): 502-513.
- [5] 徐爱祥, 刘志强, 赵腾磊, 等. 冰浆存储过程中冰晶粒径动力学演化影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3138-3144.
XU Aixiang, LIU Zhiqiang, ZHAO Tenglei, et al. Factors Influencing Dynamics Evolution of Ice Crystals During Ice Slurry Storage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(8): 3138-3144.
- [6] 赵腾磊, 刘志强, 徐爱祥, 基于改进有限容积法的数群平衡方程数值方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1321-1328.
ZHAO Tenglei, LIU Zhiqiang, XU Aixiang, et al. Numerical Solution of Population Balance Equation Based on Improved Finite Volume Method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1321-1328.
- [7] XU D, LIU Z, CAI L L, et al. A CFD-PBM Approach for Modeling Ice Slurry Flow in Horizontal Pipes[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 176(11): 546-559.
- [8] WANG J H, WANG S G, ZHANG T F, et al. Numerical Investigation of Ice Slurry Isothermal Flow in Various Pipes[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 70-80.
- [9] NAYAK B B, CHATTERJEE D, MULLICK A N, Numerical Prediction of Flow and Heat Transfer Characteristics of Water-Fly Ash Slurry in a 180° Return Pipe Bend[J]. International Journal Thermal Sciences, 2017, 113, 100-115.
- [10] CHE Y, TIAN Z, LIU Z, et al. A CFD-PBM Model Considering Ethylene Polymerization for the Flow Behaviors and Particle Size Distribution of Polyethylene in a Pilot-Plant Fluidized Bed Reactor[J]. Powder Technology, 2015, 286(12): 107-123.
- [11] MARCHISIO D L, VIGIL R D, FOX R O. Implementation of the Quadrature Method of Moments in CFD Codes for Aggregation-Breakage Problems[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(15): 3337-3351.
- [12] CHÉGNIMONHAN V, JOSSET C, PEERHOSSAINI H. Ice Slurry Crystallization Based on Kinetic Phase-Change Modeling[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1559-1568.

(责任编辑: 邓光辉)