

文章编号: 0253-4339(2012)02-0042-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.02.042

竖直管道内冰浆流体流动特性的数值模拟

王继红¹ 张腾飞¹ 王树刚¹ 梁运涛²

(1 大连理工大学土木学院 大连 116024; 2 煤炭科学研究总院沈阳研究院 煤矿安全技术国家重点实验室 沈阳 110016)

摘要 为研究竖直管道内冰浆流体流动特性,采用基于颗粒动力学理论的两相流双流体模型,通过CFD模拟研究了竖直管道内冰浆流体的等温流动过程。结果表明,在竖直管道内冰浆湍流输送过程中,流速沿管道中心轴线处近似呈对称分布。当冰浆流速较低时,管道截面处冰粒子的速度分布梯度较小,浓度分布趋于均匀,而随着冰浆流速升高,冰粒子的流场及浓度场均呈现出一定的梯级分布:管道近壁面处冰粒子浓度较低,而管道中心处冰粒子浓度较高,并在略偏于管道中心轴线位置处冰粒子浓度达到峰值。竖直管道内冰浆流体的流向变化对速度分布影响较弱,但对冰粒子浓度分布会产生一定影响,进而使得冰浆流体的管道压降在不同流向时存在着一定差异。

关键词 工程热物理;冰浆;流动特性;数值模拟;竖直管道;双流体模型

中图分类号: TP391.9; TB61⁺1

文献标识码: A

Numerical Simulation of Ice Slurry Flow in a Vertical Pipe

Wang Jihong¹ Zhang Tengfei¹ Wang Shugang¹ Liang Yuntao²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coal Safety Technology, Shenyang Branch of China Coal Research Institute, Shenyang, 110016, China)

Abstract The two fluids Eulerian model based on the kinetic theory of granular flow has been applied to predict the ice slurry flow in a vertical pipe without considering ice melting process. It can be seen that the ice particle velocity profile is symmetrical along the central axis in the vertical pipe. When ice slurry moves at low speed, the velocity gradient becomes small, and the concentration profile approaches even in the pipe cross section. When the moving speed increases, the ice particle velocity and concentration stratify. The ice particle concentration is relatively small near the pipe wall, but larger close to the central axis with a concentration peak nearby. The flow direction imposes minimal effects to velocity profiles but makes a great impact on particle concentration distribution. In addition, there are meaningful differences in pressure drop when flowing with different directions.

Keywords Engineering thermophysics; Ice slurry; Flow characteristic; Numerical simulation; Vertical pipe; Two fluids model

随着低碳、高效、环保的用能理念在全球范围内推广,以新型相变材料代替传统的载冷介质已成为节能型空调系统设计方案的首选。冰浆作为一种能量密集型相变材料,具有良好的热物性、传输性及相变特性,在建筑空调、区域供冷及高温热害治理领域有很好的应用前景。目前关于冰浆流体流动特性的研究,特别是其阻力特性,已成为国内外学者的研究热点,所采用的研究方法多是开展实验测试,研究范围也主要集中于水平管道内冰浆流体的流动^[1-3],对于竖直管道内冰浆流体流动特性的研究尚不多见。Lee^[4]率先通过实验测出竖直管道内不同流向时冰浆流体阻力特性分布规律,并分析了冰粒子浓度变化对阻力特性的影响。随后,Stamatiou^[5-6]又研究了竖直方管内冰浆流体阻力特性,并以浓度采样的方式测试出沿管道横截面处冰粒子浓度分布。但遗憾的是,对于冰浆流体阻力特

性及冰粒子浓度分布并没能给出量化的计算方法。近年来,固液两相流计算流体力学(CFD)模拟技术给冰浆流体流动特性研究带来了新的契机^[7]。鉴于此,通过借助固液两相流CFD模拟方法,采用基于颗粒动力学理论的两相流双流体模型,研究了竖直管道内冰浆流体的等温流动过程。

1 数学模型

基于颗粒动力学理论的两相流双流体模型^[8],其详细的数学描述可表示如下。

1.1 基本控制方程

1.1.1 连续性方程

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

式中: $i=L/S$ —液体相/冰粒子相; α —流体的体积浓度, %; ρ —流体的密度, kg/m^3 ; ∇ —拉普

拉斯算子; u —流体的速度, m/s。

1.1.2 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i u_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \tau_i + \alpha_i \rho_i g + M_i \quad (2)$$

式中: p —静压力, Pa; τ —剪切应力, Pa; M —相间作用力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ 。在两相间动量传递建模时仅考虑拖曳力 M_{Di} 及湍流扩散力 M_{Ti} , 其计算式如式(3)和式(4)所示^[9-10]。

$$M_{Di} = K_{SL} (u_s - u_L) \quad (3)$$

$$M_{Ti} = K_{SL} \left(-\frac{\mu_{t,m}}{\rho_m \alpha_s \sigma_D} \nabla \alpha_L \right) \quad (4)$$

式中: K_{SL} —两相间动量传递系数, 具体关系式如式(5)和(6)所示^[8]; $\mu_{t,m}$ —湍流粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; σ_D —普朗特扩散系数。

当冰粒子的浓度 $\alpha_s < 0.2$ 时,

$$K_{SL} = \frac{18}{Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_L Re_s)^{0.687} \right] \times \frac{\alpha_s \rho_L |u_s - u_L|}{d_s} \alpha_L^{-2.65} \quad (5)$$

当冰粒子的浓度 $\alpha_s \geq 0.2$ 时,

$$K_{SL} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_L}{\alpha_L d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_L \alpha_s |u_s - u_L|}{d_s} \quad (6)$$

式中: d_s —冰粒子直径, m; Re_s —冰粒子雷诺数。

1.2 湍流方程

以求解雷诺平均的纳维-斯托克斯方程组(RANS)为基础, 将液体相和冰粒子相所构成的混合相为研究对象, 综合考虑液体相和冰粒子相的湍动作用对流动过程的影响。其 k 方程和 ε 方程分别如式(7)和(8)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m u_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m u_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (8)$$

式中: $C_{1\varepsilon}=1.44$; $C_{2\varepsilon}=1.92$; $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1.3$;

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla u_m + \nabla u_m^T) : u_m; \quad \rho_m = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i;$$

$$u_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i u_i; \quad \mu_{\mu m} = \rho_m C \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad C_\mu = 0.09.$$

1.3 粘度模型

两相流双流体模型是把颗粒群作为与液体相互渗透的拟连续介质, 为了求解动量方程组, 既要获得液体相的粘度物性, 还要建立冰粒子拟流体的粘度计算模型。因此拟采用由Gidaspow提出的颗粒动力学理论模型^[8]来描述冰粒子拟流体的粘度特性。同时为了增强数值计算的收敛性, 假设颗粒相温度场内的能量产生与耗散满足局部平衡^[9], 即: 在求解颗粒相温度场的各控制容积内, 不考虑颗粒相温度随时间的变化, 同时忽略对流及扩散作用对其分布影响, 得到颗粒动力学模型简化关系, 如式(9)所示。

$$(-p_s I + \tau_s) : \nabla u_s - \gamma_{\theta_s} + \phi_{LS} = 0 \quad (9)$$

式中: p_s —正应力, Pa; τ_s —剪切应力, Pa; γ_{θ_s} —单位体积能量碰撞耗散率, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; ϕ_{LS} —颗粒相速度脉动引起的相间能量交换, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ 。

在给定初始及边界条件下, 将方程(9)与其它方程进行耦合求解, 即可获得颗粒温度分布, 进而计算出冰粒子拟流体的粘度 μ_s , 如式(10)所示。其中动能粘度 $\mu_{s,skin}$ 、碰撞粘度 $\mu_{s,col}$ 及摩擦粘度 $\mu_{s,fr}$ 的详细数学描述参见文献[8]。

$$\mu_s = \{\mu_{s,skin} + \mu_{s,col}, \mu_{s,fr}\} \quad (10)$$

为求解上述微分方程组, 首先沿着计算网格单元对各微分方程进行积分, 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。

2 模型验证

基于颗粒动力学理论两相流双流体模型, 在数学建模过程中不可避免地引入一系列假设, 导致数值模型与实际情况间存在着一定偏差。与此同时, 受冰浆流体自身特点及现有测量技术所限, 目前对于冰浆流体流动过程中冰粒子浓度分布的测定还存在着诸多困难, 相关实验数据尚不完备。因此, 首先选取了一个典型的水沙两相流湍流输送系统^[11]来验证计算模型, 其中水沙两相流输送系统的管道直径 $D=0.103\text{m}$, 管长 $L=10\text{m}$, 混合相平均输送速度 $u_m=3\text{m/s}$, 各相基本物理参数如表1所示。借助商业软件FLUENT(软件版本: 6.3.26)对上述方程进行求解, 边界条件的设置在管道入口处设为质量流率入口, 出口处为压力出口, 管道近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, 其中在管道横截面处网格数量为353, 沿管道轴向的网格数量为2000。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} 。

表1 水沙两相流体的基本物理参数
Tab.1 Basic physical properties for sand slurry

流体相	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$d_s/\mu\text{m}$	$\alpha/\%$	$\mu/(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$
颗粒相	2650	90	19	—
液体相	997	—	81	8.94×10^{-4}

图1给出了水平管道内水沙两相在流动过程中颗粒相流场及浓度场分布。如图1所示, 沿管道截面竖直径向方向, 颗粒相速度近似呈对称分布, 而浓度场则由于固液两相间存在的密度差异使其呈现出一定的梯级分布, 在管道底部浓度较高, 顶部浓度较低。由图1中的对比结果不难发现, 模拟值与实验值间吻合较好。从而说明了这里所采用的固液两相流CFD模拟方法在冰浆流体流动特性研究中的可行性与可靠性。

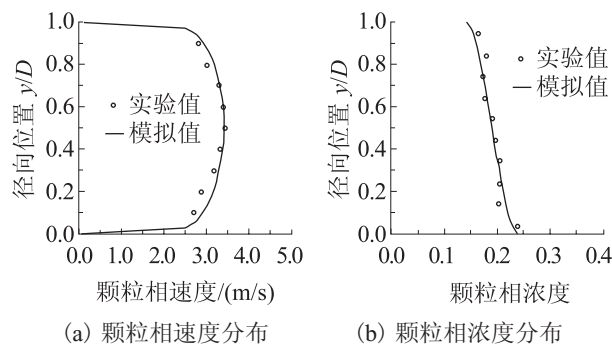


图1 水平管道沿管道截面竖直径向方向上颗粒相流场及浓度场分布

Fig.1 Particle velocity and concentration profile in horizontal pipe

3 计算算例及结果分析

3.1 算例概况

以文献[4]所描述的竖直管道内冰浆流体等温流动过程为研究对象, 管道直径 $D=0.024\text{m}$, $L=5\text{m}$ 。平均输送速度 $u_m=0.95\sim 2.25\text{m/s}$, 载流体是6.5%乙二醇溶液。基本物理参数见表2。

表2 冰浆流体的基本物理参数
Tab.2 Basic physical properties for ice slurry

流体相	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$d_s/\mu\text{m}$	$\alpha/\%$	$\mu/(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$
冰粒子相	917	270	10/20	—
液体相	1008	—	90/80	2.4×10^{-3}

在竖直管道内冰浆流体等温流动数值计算过程中, 其边界条件类型、管道壁面处理及流动区域内网格形式与前文水沙两相流验证算例类似。网格数量在管道横截面处为113, 沿管道轴向为1500, 经检验符合网格独立性要求。

3.2 数值结果分析

图2给出 $\alpha_s=0.20$ 、 $u_m=2.25/0.95\text{m/s}$ 在不同浆体输送流向时, 位于充分发展段内沿管道横截面处冰粒子的速度分布。由图2可知, 在竖直管道内冰浆流体的湍流输送过程中, 沿管道中心轴线, 速度呈对称分布。随着浆体输送速度降低, 在管道截面处冰粒子速度分布梯度减小。对比图2(a)、(c)和(b)、(d)可见, 当输送速度相同时, 不同输送流向对于冰粒子速度分布影响并不明显。

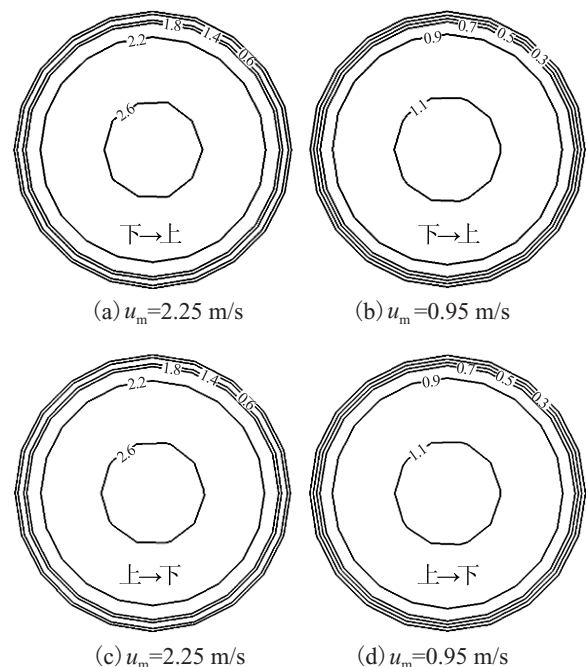


图2 不同流向下充分发展段内冰粒子速度分布

Fig.2 Particle velocity profile for different flow direction in vertical pipe

图3给出上述各工况时所对应的冰粒子浓度分布。当浆体输送速度较高时, 冰粒子沿管道截面呈梯级分布, 在靠近管道壁面处冰粒子的浓度较低, 在管道中心部位冰粒子浓度升高, 在偏于管道中心轴线位置处冰粒子出现浓度峰值。随着浆体平均输送速度降低, 冰粒子沿管道截面呈均匀分布。对比图3(a)、(c)易知, 流向会对冰粒子的浓度分布产生一定的影响, 当浆体在竖直管道内自上而下流动时, 沿管道截面冰粒子的浓度梯度小于冰粒子自下而上流动时的浓度梯度。

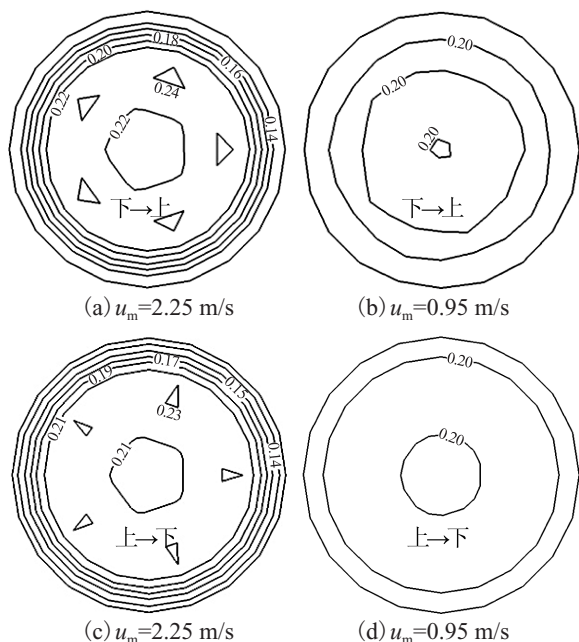
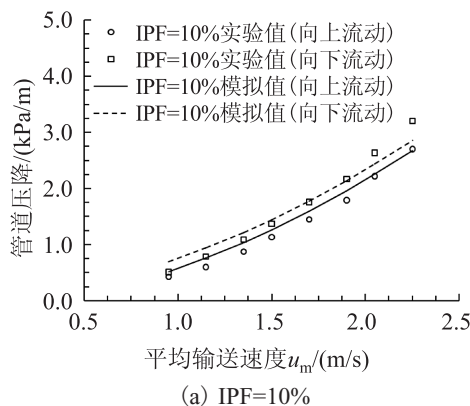


图3 不同流向下充分发展段内冰粒子浓度分布
Fig.3 Particle concentration profile for different flow direction in vertical pipe

图4给出了不同流向、不同输送速度及不同冰粒子浓度时冰浆流体管道压降的模拟值与实验值对比。CFD模拟结果与实验值间体现出较好的一致性，其相对误差均可控制在 $\pm 20\%$ 内。在竖直接管内，冰浆流体的管道压降随着浆体输送速度及冰粒子浓度升高而增大。如图4(a)所示，当冰粒子浓度较低时，流向变化对管道压降影响并不明显。这是因为当颗粒相浓度较低时，冰粒子沿管道截面分布均匀，速度变化相对平缓，此时流向对冰浆流体流动产生的影响较弱。随着冰粒子浓度的升高及输送速度的增大，冰粒子沿管道截面分布的不均匀性加剧，同时浆体的流向变化亦会影响到冰粒子的浓度分布，进而导致管道壁面处的剪切应力发生变化。所以，在冰粒子浓度较高、浆体输送速度较大时，流向变化会使冰浆流体的管道压降间存在着一定偏差(见图4(b))。



(a) IPF=10%

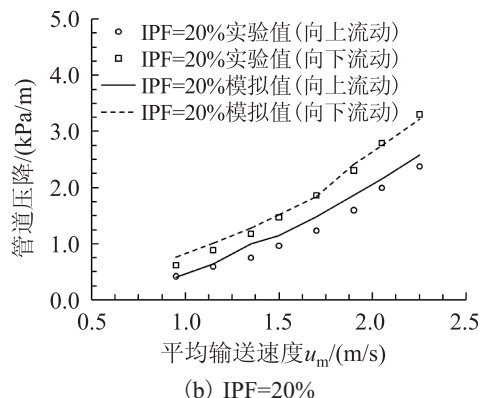


图4 不同工况时冰浆流体管道压降模拟值与实验值对比
Fig.4 Comparison of numerical predictions of pressure drop with experimental results in different operating condition

4 结论

采用基于颗粒动力学理论的两相流双流体模型，借助于CFD模拟方法，研究了竖直接管内冰浆流体的等温流动过程。主要结论如下：

- 1) 在竖直接管内冰浆流体的湍流输送过程中，沿管道中心轴线，速度呈对称分布。随着浆体输送速度的降低，在管道横截面处的速度分布梯度也随之降低。
- 2) 当浆体输送速度较低时，冰粒子沿管道截面呈均匀分布。随着输送速度的升高，冰粒子沿管道截面呈现出一定的梯级分布。在管道壁面处冰粒子浓度较低，在管道中心部位冰粒子浓度升高，在略偏于管道中心轴线位置处冰粒子出现浓度峰值。
- 3) 在竖直接管内冰浆流体流动过程中，流向变化对速度分布的影响较弱，但对冰粒子浓度分布会产生一定影响，使得在不同流向时冰浆流体的管道压降间存在一定差异。

参考文献

- [1] Kitanovski A. The fluid dynamics of ice slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 37-50.
- [2] Monteiro A C S, Bansal P K. Pressure drop characteristics and rheological modeling of ice slurry flow in pipes [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1523-1532.
- [3] 何国庚, 王忠衡. 冰浆流体流动与换热研究综述[J]. 制冷学报, 2005, 26(4): 1-5. (He Guogeng, Wang Zhongheng. Review of Study on Flow and Heat Transfer of Ice Slurry[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 1-5.)
- [4] Lee D W, Yoon C I, Yoon E S, et al. Experimental study on flow and pressure drop of ice slurry for various pipes[C]//Fifth Workshop on Ice-Slurries of

- the International Institute of Refrigeration. Stockholm (Sweden), 2002.
- [5] Stamatiou E, Kawaji M. Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part I: Local distribution measurements in adiabatic flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(17): 3527-3543.
- [6] Stamatiou E, Kawaji M. Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part II: Forced convective melting heat transfer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(17): 3544-3559.
- [7] 刘诚, 沈永明, 唐军. 水平方管内固液两相流运动特性数值模拟[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 767-773. (Liu Cheng, Shen Yongming, Tang Jun. Numerical simulation of liquid-particle two-phase flow in horizontal rectangular pipes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 767-773.)
- [8] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [9] Ekambara K, Sanders R S, Nandakumar K, et al. Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS-CFX [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(17): 8159-8171.
- [10] Burns A D, Frank T, Hamill I, et al. The favre averaged drag model for turbulent dispersion in eulerian multi-phase

flows [C]//5th International Conference on Multiphase Flow. Yokohama (Japan), 2004: 1-8.

- [11] Gillies R G, Shook, C A, et al. Modelling Heterogeneous Slurry Flows at High Velocities [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2004, 82(5): 1060-1065.

通讯作者简介

王树刚, 男(1963-), 教授/博士生导师, 大连市凌工路2号, 大连理工大学综合实验4号楼433室, 116024, (0411)84706407, E-mail: sgwangln@yahoo.com.cn。研究方向: 热泵制冷设备与系统, 室内空气质量及人工环境安全保障。现进行的研究项目有: 国家高技术研究发展计划(863计划)—深井热害评价与冰浆降温技术及装备。

About the corresponding author

Wang Shugang (1963-), male, Ph.D./Professor, doctoral supervisor, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 2#, Linggonglu Street, Dalian, China, 116024, (0411)84706407, E-mail:sgwangln@yahoo.com.cn. Research fields: heat pump/refrigeration equipment and its system, the study of indoor air quality, human environment and safety support technology. The author takes on project supported by the National High-Tech R&D Program of China (863 Program): Research and development of mine heat harm evaluation and ice slurry refrigeration equipment and technology.

(上接第41页)

- model development and validation [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24(7): 692-701.
- [5] Ge YT, Cropper RT. Simulation and performance evaluation of finned-tube CO₂ gas coolers for refrigeration systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5): 957-965.
- [6] Pitla SS, Groll EA. New correlation to predict the heat transfer coefficient during in-tube cooling of turbulent supercritical CO₂ [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(7): 887-895.
- [7] 吴业正, 韩宝琦. 制冷原理及设备[M]. 西安交通大学出版社, 2004, 第2版: 228-229.

通讯作者简介

王智忠, 男(1964-), 高级工程师, 能动学院, 西安市

咸宁西路28号, 西安交通大学, 710049, 029-82667828, E-mail: wzz@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: 跨临界CO₂制冷系统研究, 涡旋压缩机研究。现在进行的研究项目有: 广东省产学研项目(2007B090400079)跨临界CO₂制冷系统应用研究等。

About the corresponding author

Wang Zhizhong (1964-), male, senior engineer, School of Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 28#, Xianning West Road, Xi'an, China, 710049, 029-82667828, E-mail: wzz@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: Application research for transcritical CO₂ refrigeration system, Research for scroll compressor. The author takes on project supported by the Program of Guangdong province (No.2007B090400079): application research for transcritical CO₂ refrigeration system.