

文章编号:1671-6833(2014)02-0096-04

# 微细管内超临界 CO<sub>2</sub> 对流换热研究

杨凤叶, 刘敏珊, 刘彤, 刘遵超

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:**对超临界压力下二氧化碳在微细管内( $D=0.4\text{ mm}$ )的对流换热进行了模拟研究,分析了二氧化碳物性变化对浮升力和换热效率的影响,并拟合出考虑浮升力时,微细管内超临界二氧化碳对流换热关联式.结果表明:二氧化碳物性的变化对浮升力的影响较大,在临界点附近,二氧化碳物性的剧烈变化,引起浮升力出现较大的降幅,传热出现强化;回归的对流传热关联式,可以很好的预测微细管内超临界二氧化碳对流换热的性能.

**关键词:**超临界二氧化碳;对流换热;浮升力

**中图分类号:** TB657

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.022

## 0 引言

浮升力对处于亚临界状态的流体流动换热影响很小,但对于超临界流体的对流换热影响较大,尤其对于微细管径<sup>[1]</sup>在竖直方向的对流换热,由于超临界流体的特殊物性,浮升力对其的影响规律也比较复杂,所以研究微细管中浮升力对换热的影响是必不可少的<sup>[2]</sup>.吴刚等<sup>[3]</sup>对超临界压力水,在内径为 26 mm,倾角为 22°的倾斜管中的传热特性进行了实验研究,结果显示由于浮升力的作用,导致倾斜管顶部传热恶化.阳祥等<sup>[4]</sup>采用数值模拟方法对通道内换热进行了数值模拟,分析了浮升力对流体运动的影响,结果表明浮升力对流场和温度场有明显的影响,随 Gr 的增加影响更加明显.张昊等<sup>[5]</sup>针对超临界流体的特殊物性,对湍流模型中浮升力相关项进行了一系列修正,使计算结果更贴近于实验结果. Jackson 和 Hall<sup>[6-7]</sup>提出表征浮升力影响因素的无量纲准则数 Bo,他们认为在竖直换热管中,换热管壁面附近存在较大的密度梯度,边界层厚度发生变化,导致换热出现局部恶化.

综合国内外现有成果发现,有关超临界二氧化碳换热研究,主要通过实验手段获得浮升力和黏性力对换热的影响.由于实验条件的细微差别,影响程度和效果就差别较大,得出的对流换热关

联式通用性较差.也使得至今没有比较准确估计不同条件下考虑浮升力影响的对流换热计算关联式.笔者采用数值模拟的方法,对超临界二氧化碳在管径为 0.4 mm 时,分析考察超临界二氧化碳在竖直微细通道内,尤其是临界点处,浮升力对对流换热的影响,阐明其强化换热的机理,并拟合出超临界二氧化碳在微细通道内的对流换热关联式.

## 1 物理模型及边界条件

笔者模拟计算采用计算流体力学软件 FLUENT,热流体为二氧化碳,其所有的物性参数均通过软件 REFPROP8.0 获得,并采用 piecewise-linear 输入.管内、外流体采用逆流换热,由于二氧化碳壁面附近存在较大的温度梯度,所以在近壁面设置边界层,模拟计算采用增强壁面函数法, SIMPLIC 算法求解压力速度耦合,方程离散格式采用二阶迎风格式求解;冷、热流体的边界条件均采用质量流率进口,压力出口,固体壁面与流体耦合;冷却水外壁面与二氧化碳进、出口段均为绝热.模拟模型结构如图 1 所示.

模拟结构图具体参数如下:总管长 250 mm,为了消除进、出口效应影响,设置进、出口各 50 mm,冷却水段长 150 mm,二氧化碳进口压力  $P=8.5\text{ MPa}$ ,进口  $Re=10\ 000$ ,进口温度  $T=343.1$

收稿日期:2013-10-30;修订日期:2014-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51076145)

通信作者:杨凤叶(1983-),女,河南开封人,郑州大学博士研究生,主要从事过程装备换热及节能技术研究, E-mail:yangfengye101@126.com.

K,冷却水进口雷诺数  $Re = 4\ 000$ .

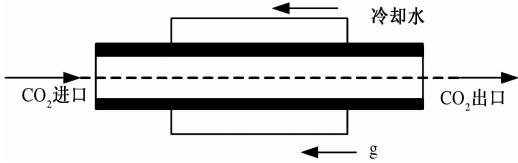


图 1 模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model structure

冷却条件下超临界二氧化碳局部换热系数  $h_z$  采用式(1)计算

$$h_z = \frac{q_z}{T_{b(z)} - T_{w(z)}}, \tag{1}$$

式中: $q_z$  为内壁面的热流密度,  $W/m^2$ ; 下标  $Z$  表示沿热流体流动方向所取截面的位置, mm; 下标  $b$  表示为流体温度  $T_b$  下的物性参数, 下标  $w$  表示壁面温度  $T_w$  的物性参数, 本研究定性温度取  $Z$  外的质量平均温度, K.

局部  $Nu$  数采用式(2)计算

$$Nu_z = \frac{h_z d_{in}}{\lambda_z}, \tag{2}$$

式中: $d_{in}$  为热流体换热管内径;  $\lambda_z$  为流体导热系数.

表征浮升力对换热影响程度的准则数  $Bo$ , 采用式(3)计算

$$Bo_z = Gr_z^* / (Re_z^{3.425} Pr_z^{0.8}), \tag{3}$$

其中:

$$Re_z = \frac{\rho u_z d_{in}}{\mu_z} = \frac{4m_z}{\pi d_{in} \mu_z}, \tag{4}$$

$$Gr_z^* = \frac{g \alpha d_{in}^4 q_z}{\lambda_z \nu_z^2}, \tag{5}$$

式中: $m_z$  为流体质量流量,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $\alpha$  为流体的体胀系数;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\mu_z$  为流体的动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $\nu_z$  为流体运动黏度,  $m^2/s$ .

2 模拟结果分析

二氧化碳在跨临界循环中, 临界点对流体物性有较大的影响, 这些特性是二氧化碳作为制冷工质区别于传统制冷工质的明显优势, 因此, 分析二氧化碳在临界点附近物性的变化特性是研究二氧化碳换热的基础.

在 8.5 MPa 下, 二氧化碳物性随温度的变化如图 2 所示. 从图中可以看出, 在等压过程中, 二氧化碳物性随温度的增加有较大幅度的改变, 特别是在临界点附近, 物性变化非常剧烈, 其中比热容的变化尤为明显. 在临界点之前, 比热容随温度

的升高而剧烈增加, 在临界点后, 比热容随温度的升高突然降低, 之后比热容变化趋于平衡.

由于在临界点处二氧化碳物性变化比较剧烈, 物性的变化在很大程度上影响了换热的性能, 所以要选择适合本模型模拟计算的湍流模型, 笔者选取几个具有代表性的湍流模型和文献[8]实验结果进行对比.

从图 3 中可以看出, 低雷诺数 L-B 模型与实验结果整体符合最好, 误差不超过 3%, 这是因为 L-B 模型考虑了湍流漩涡, 提高了湍流过渡过程的精度, 因此能够很好的反应出层流向湍流的过渡过程. 而使用低雷诺数 Y-S、AKN 模型及 RNG 模型也可以定性地表示出壁面温度上升的趋势, 但相比较低雷诺数 L-B 模型来说, 模拟结果与实验结果差别稍大, 对湍流过渡过程的贴合度稍差. 所以, 对于微细管径超临界二氧化碳对流换热模拟计算的湍流模型, 笔者选用低雷诺数 L-B 模型.

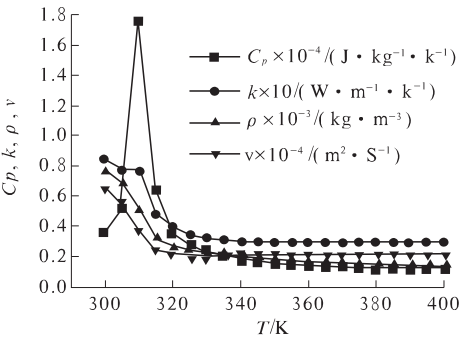


图 2 超临界二氧化碳在  $P = 8.5\text{ MPa}$  时物性变化

Fig. 2 Physical properties changes of CO<sub>2</sub> when  $P = 8.5\text{ MPa}$

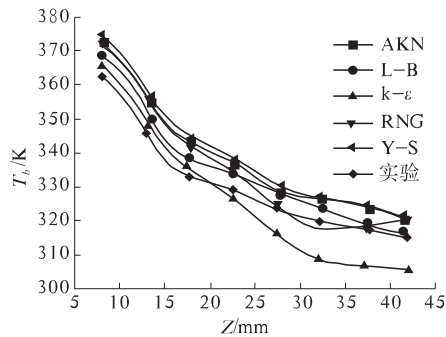


图 3 模拟结果与实验值对比

Fig. 3 Comparison between simulation and experimental data

2.1 二氧化碳局部对流换热分析

在二氧化碳进口压力  $P = 8.5\text{ MPa}$ , 进口  $Re = 10\ 000$ , 进口温度  $T = 343.1\text{ K}$ , 冷却水进口雷诺数  $Re = 4\ 000$  时, 对图 1 的模型结构进行模拟分析.

由图4可以看出,二氧化碳温度与内管壁面温度沿热流体流动的方向均降低,传热系数先增加后减小,最后趋于稳定.在 $z = -35$  mm附近,传热系数达到最大值,热流体温度降低幅度稍有减小,壁面温度降低幅度稍有增加.这是因为,此时热流体温度在临界温度附近,由于热流体定压比热容的突增,使得温度下降变慢,同时变物性导致的浮升力对流体的扰流增加,使得换热增强,传热系数达到最大值.临界温度点后,导热系数急剧减小,使热流体与内壁面之间的换热减弱,致使热流体温度降低幅度减小.

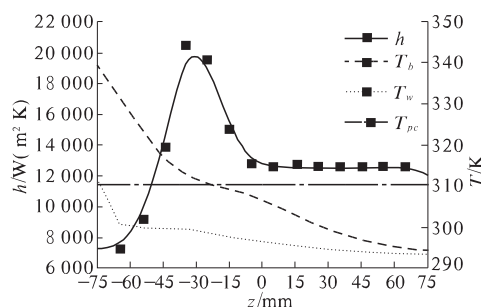


图4 局部换热系数与流体温度分布图

Fig.4 Profiles of temperature and local heat transfer coefficient

由图5可见,热流体的动力黏度沿着换热方向递增; $Bo$ 数先减小后增加再减小,湍动能沿换热方向逐渐减小;在 $z = -35$  mm临界点附近,换热系数达到最大,动力黏度出现大幅度增加, $Bo$ 数此时出现较大幅度的减小,湍动能急剧较小.这是因为在临界点附近,二氧化碳温度突降,使得其密度和黏度上升,导致湍动强度变弱,湍流热扩散率降低,传热强化,随着换热逐渐进行,浮升力的影响逐渐增强,此时近壁区湍流生成减小或停止,传热出现湍流“层流化”现象.换热后段,浮升力逐渐的减弱至处于稳定,在靠近壁面区域产生反方向的剪切应力,促使流动又重新出现湍流,传热效率得到恢复.沿着二氧化碳流动的方向, $Bo$ 的数值均在 $6 \times 10^{-7}$ 之下,根据Jackson和Hall提出的 $Bo$ 数的对换热影响范围的定义,可知在此模型及边界条件下,浮升力对换热的影响可忽略.

## 2.2 换热关联式

超临界二氧化碳在微通道中的传热,因管径和二氧化碳物性本身,难以得到一个普遍适用的公式用以计算各种情况下的换热能力.因此,笔者分别考察换热管水力直径 $d$ 为0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm时,竖直向上和向下流动的对流换热情况,综合以上对 $d = 0.4$  mm的对流换热分析,回

归出超临界二氧化碳在微细管内,考虑浮升力的影响时,在竖直换热管中的换热关联式.在换热器工程设计中,常常使用因次分析法将影响因素无因次化,归纳成几个准数,以减少变量数,再用试验或数值模拟的方法确定这些准数在不同参数组合下的相互关系,从而得出经验性准数关联式.

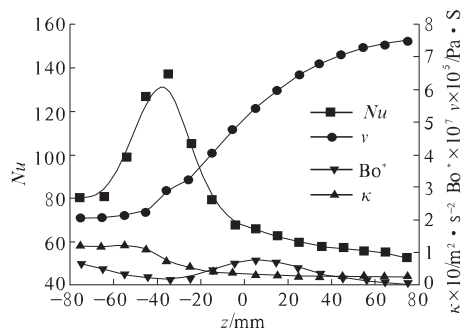


图5  $P = 8.5$  MPa时 $CO_2$ 换热特性分布图

Fig.5 The distribution of  $CO_2$  heat transfer characteristics when  $P = 8.5$  MPa

对于竖直方向流动,浮力的影响参数为 $Bo$ 数.由于Liao和Zhao的关联式中既考察了物性变化的影响,又考察了浮力的影响,所以笔者采用Liao和Zhao的关联式结构形式进行回归,各参数间为其关联式中采用的幂指数的形式,采用多元线性回归的方法,拟合出超临界二氧化碳在微通道中的传热关联式.

竖直向上流动:

$$Nu'_b = 0.29195 Re_b^{0.97} Pr_b^{0.52} Bo^{0.27585} \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.45615} \left( \frac{\overline{C_p}}{C_{p,b}} \right)^{0.08901} \quad (6)$$

竖直向下流动:

$$Nu''_b = 0.27231 Re_b^{0.97} Pr_b^{0.52} Bo^{0.43211} \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.43238} \left( \frac{\overline{C_p}}{C_{p,b}} \right)^{0.08714} \quad (7)$$

上述关联式有效范围: $0.05 \leq d \leq 0.1$  mm,  $7.5 \leq P \leq 12$  MPa,  $290 \leq T_b \leq 380$  K,  $0 \leq T_b - T_w \leq 308$  K,  $0.0001 \leq \dot{m} \leq 0.001$  kg/s.

为了验证回归关联式的正确性,将模拟值与关联式计算值进行比较,见图6和图7.

从图中可以看出,回归的竖直流动时的换热关联式均具有较高的精度.回归关联式所预测的努塞耳数90%的数据,误差在 $\pm 15\%$ 以内.回归关联式预测值与模拟值的相对误差均在工程允许的范围之内,因此,预测关联式满足工程应用的要求.

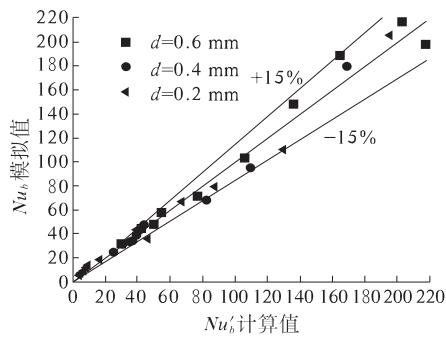


图 6 模拟数据  $Nu'_b$  与关联式计算数据比较

Fig.6 Comparison of simulation  $Nu'_b$  and correlation

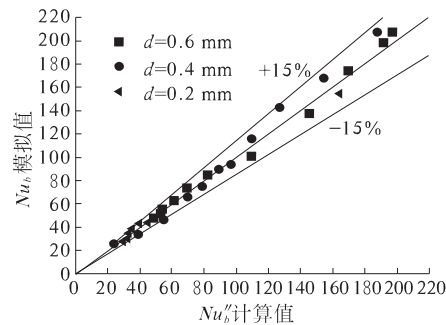


图 7 模拟数据  $Nu''_b$  与关联式计算数据比较

Fig.7 Comparison of simulation  $Nu''_b$  and correlation

3 结论

通过对超临界二氧化碳在微通道内局部对流换热特性进行研究,分析了二氧化碳物性变化对浮升力以及换热的影响。

- (1) 浮升力与换热强度的变化是一致的。
- (2) 超临界二氧化碳在临界点附近,物性变化非常剧烈,物性的急剧变化,引起浮升力出现较大的降幅,传热强化。

(3) 回归的超临界二氧化碳在微细竖直管内的换热关联式具有较高的精度,可较好的预测微细管内超临界二氧化碳的对流换热性能。

参考文献:

- [1] KANDLIKAR S, GRANDA W. Evolution of micro-channel flow passages thermohydraulic performance and fabrication technology [J]. Heat Transfer Eng, 2003,24(1):3-17.
- [2] 吕静. 二氧化碳跨临界循环及换热特性的研究 [D]. 天津: 天津大学环境科学与工程学院, 2005.
- [3] 吴刚, 毕勤成, 王汉, 等. 超临界压力水在倾斜上升管内传热的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011,45(5):6-11.
- [4] 阳祥, 李增耀, 陶文铨. 轴向旋转通道内浮升力对湍流影响的直接模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2010,44(9):11-15.
- [5] 张昊, 谢正瑞, 杨燕华. 强浮升力作用下超临界流体对流换热的湍流模型研究 [J]. 核动力工程, 2011, 32(1):63-68.
- [6] JACKSON J D, EVANS-LUTTERODT K O J. Impairment of turbulent forced convection heat transfer to supercritical pressure CO<sub>2</sub> caused by buoyancy forces Report N. E. 2. University of Manchester, 1968.
- [7] LIAO. S M, ZHAO T S. An experimental investigation of convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in miniature tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002,45(25):5025-5034.
- [8] 姜培学, 刘波, 罗峰, 等. 竖直微圆管内超临界 CO<sub>2</sub> 对流换热研究 [C]. 中国工程热物理学会, 广东东莞, 2012.

Research of Convection Heat Transfer of CO<sub>2</sub> at Supercritical Pressures in Microtubes

YANG Feng-Ye, LIU Min-Shan, LIU Tong, LIU Zun-chao

(Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Convection heat transfer of supercritical pressure CO<sub>2</sub> in microtubes ( $D=0.4$  mm) were investigated, the changes of physical property of supercritical CO<sub>2</sub> and the impact of buoyancy on the heat transfer were analyzed, and convection correlations of supercritical CO<sub>2</sub> in microtubes were fitted when considering buoyancy. The results showed that the impact of physical properties of carbon dioxide on the buoyancy was big, and the physical property of CO<sub>2</sub> changes very violently at the critical point, which caused larger decline of buoyancy, heat transfer was strengthened. It was also concluded that the heat transfer correlations of the supercritical CO<sub>2</sub> were achieved, which can be used to predict heat transfer performance of supercritical CO<sub>2</sub> in microtubes.

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>, convection transfer, buoyancy