

文章编号:1671-6833(2009)04-0069-04

# 超临界二氧化碳细管内流动与换热特性分析研究

张丽娜, 刘敏珊, 董其伍

(郑州大学 工学院热能工程研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 对超临界压力下二氧化碳在水平管内的对流换热进行了模拟研究, 分析了热流密度、壁面温度、质量流量以及压力等对二氧化碳对流换热的影响. 结果表明: 热流密度和壁面温度对换热系数的影响相对较小, 质量流量和压力的影响较为显著, 质量流量升高, 传热系数有明显提高, 压力越接近二氧化碳的临界压力, 传热系数在临界点附近的变化越明显, 峰值越高.

**关键词:** 超临界流体; 对流换热; 二氧化碳; 数值研究

**中图分类号:** TB 657

**文献标识码:** A

## 0 引言

氯氟烃类制冷工质对臭氧层有破坏作用并且产生温室效应, 使制冷与空调行业面临严重挑战. 二氧化碳由于其独特热物性有望成为本世纪理想的环保制冷剂之一. 超临界二氧化碳在细小管道中对流换热的研究正吸引着越来越多的关注. H. S. Chang 等<sup>[1]</sup>对二氧化碳在水平管内制冷过程的传热系数和压降进行了实验研究, 结果表明, 当温度接近临界温度时, 压力对传热系数影响很大. B. D. Chao 等<sup>[2]</sup>通过实验研究了质量流量和压力对超临界二氧化碳在管内冷却传热的影响. P. X. Jiang 等<sup>[3]</sup>通过实验和数值模拟研究了二氧化碳在超临界压力、低雷诺数下竖直细管内对流传热. 国内也有一些学者开展了超临界二氧化碳的传热特性研究<sup>[4-7]</sup>.

由于换热管为微细管, 且操作压力比较高, 一般在 10 MPa 左右, 这给实验研究带来一定困难. 通过数值模拟可以为将二氧化碳作为换热介质应用于换热系统提供大量数据, 并且可以大大缩短研究周期和经费. 笔者通过对水平管内超临界二氧化碳的对流换热进行模拟研究, 分析热流密度、壁面温度、质量流量及压力对超临界二氧化碳在细管道内局部对流换热的影响, 为设计高效、紧凑和安全的换热器提供依据.

## 1 物理模型及控制方程组

笔者使用商用 CFD 软件 FLUENT 计算, 模型

采用变物性. 物性输入采用 piecewise-linear. 湍流模型使用 RNG  $k-\varepsilon$  模型, 增强壁面函数法. 压力速度耦合采用 SIMPLIC 算法. 质量流率进口, 压力出口, 壁面边界分别考查定热流和定壁温两种条件. 模拟结构图如图 1 所示.

数值计算中假设水平管道的尺寸为: 长 2 m, 管内径为 4 mm. 二氧化碳进口温度为 300 K. 通过对网格密度与质量考核, 得到独立于计算结果的网格单元.

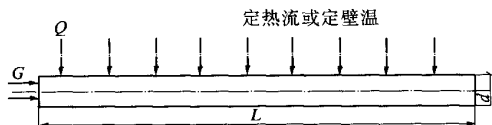


图 1 模拟结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated structure

流道内控制方程为:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{W}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - \nabla P + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{C_p} \nabla T \right) \quad (3)$$

式中:  $\rho, \mu, \lambda, C_p$  分别为流体的密度、黏度、热导率 and 比热容;  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\mathbf{v}, \mathbf{g}$  为无量纲速度矢

收稿日期: 2009-03-01; 修订日期: 2009-06-28

基金项目: 河南省杰出人才创新基金项目 (0621001600)

作者简介: 张丽娜 (1981-), 女, 河南周口人, 郑州大学博士研究生, 主要从事过程传热强化及其设备的研究与开发,

E-mail: lina810619@163.com.

量和重力矢量; $t$ 和 $T$ 分别为时间和温度.

本文  $\text{CO}_2$  传热系数计算采用 Gnielinski 关联式<sup>[8]</sup>:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re_b - 1000)Pr_b}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_b^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

$$f = [1.82\log_{10}(Re_b) - 1.64]^{-2} \quad (5)$$

式中: $f$ 为摩擦因子,下标  $b$  表示定性温度状态.定性温度  $T_b$  取横截面的质量平均温度.

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d_e \quad (6)$$

式中: $d_e$ 为当量直径; $\lambda$ 为导热系数; $\alpha$ 为传热系数

该关系式使用范围为  $2\,300 < Re_b < 10^6$ ,  $0.5 < Pr_b < 2\,000$ .  $Re_b$  和  $Pr_b$  为定性温度  $T_b$  下的值.

## 2 结果分析与讨论

$\text{CO}_2$  在 8 MPa 下,临界点附近物性  $\rho$ 、 $C_p$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  的变化如图 2 所示,临界温度为 308.15 K.从图中可以看出,在临界点附近,物性变化非常剧烈,尤其是比热容  $C_p$  的变化最为显著.

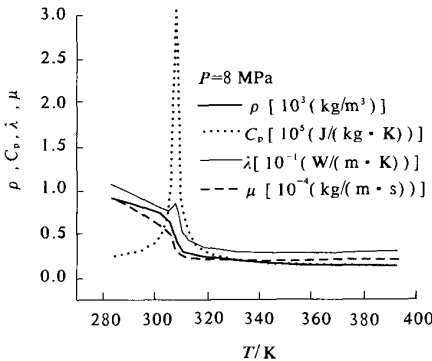


图 2 超临界二氧化碳物性的变化

Fig. 2 Thermophysical properties of supercritical carbon dioxide at 8 MPa

压力对比热容的影响如图 3 所示.从图 3 可知,不同压力下,压力超过临界压力越高,比热容峰值越小,在临界点之前,比热容突然升高,越过临界点,比热容随温升突然降低,之后,比热容变化非常小.随着压力的升高,峰值点对应的临界温度升高.

临界点附近热物性剧烈的变化,将导致传热系数也有明显不同,对于超临界二氧化碳的传热关联式大多基于管内单相强制对流换热关联式 Dittus - Boelter<sup>[9]</sup>,在此基础上考虑临界点附近变物性参数影响而进行修改获得.笔者首先通过模拟结果与 Dittus - Boelter 关系式计算结果进行对比,考查超临界流体与常规条件下单相流体对流

传热的差别.

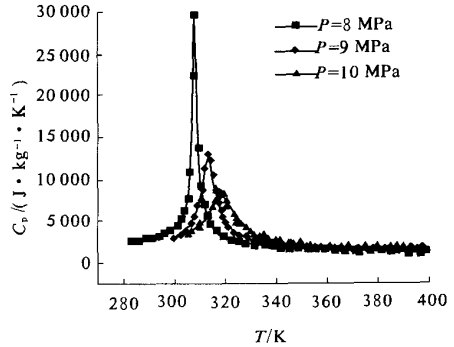


图 3 压力对比热容的影响

Fig. 3 Effect of pressure on the heat capacity

常规条件下单相流体 Dittus - Boelter 传热系数关系式:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$\alpha_0 = \left( \frac{0.028 \dot{m}^{0.8}}{d_e^{1.8}} \right) (\lambda^{0.6} \mu^{-0.4}) (C_p^{0.4}) \quad (8)$$

式中: $\dot{m}$ 为质量流量,kg/s.

该关系式应用范围为:

$$10^4 \leq Re_b \leq 1.2 \times 10^5, 0.7 \leq Pr_b \leq 120.$$

图 4 为 8 MPa 下,质量流率  $G = 191 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,热流密度为  $q_w = 35 \text{ kW}/\text{m}^2$  时的计算结果,考查利用 Gnielinski 关联式模拟得到的传热系数  $\alpha$  与经验关联式 Dittus - Boelter 的计算结果  $\alpha_0$  的比值随流体主体温度的变化.从图 4 中可以看出,传热系数比值在临界点附近达到最大值,且比值基本都大于 1,说明传热相对单相对流传热增强,从而说明超临界二氧化碳在水平管内传热优于单相对流换热.

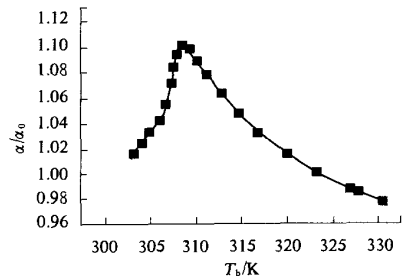


图 4 传热系数模拟值与经验值之比

Fig. 4 Ratio of heat transfer coefficient between simulation and empirical correlation

### 2.1 热流密度对换热管中对流换热的影响

图 5、6 分析考查质量流率  $G = 191 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,8 MPa 下不同热流密度时对流传热的变化.  $l/L$  为截面处轴向位置与整个管长的比值.从图 5

以看出,流体温度沿流动方向逐渐升高,在相同轴向位置处,高热流量的流体温度要高于低热流量的流体温度,流体温度达到临界温度较早.在达到临界温度后,较高热流量下,流体温升幅度比较大.从图6可以看出:传热系数沿管长流动出现峰值,峰值在较低热流量下有稍后延迟,且峰值相对较大热流密度时高.管内各部分传热系数均高于热流密度较高的情况.这主要是因为较高的热流密度下,管内流体主体温度升高的幅度比较大的缘故.

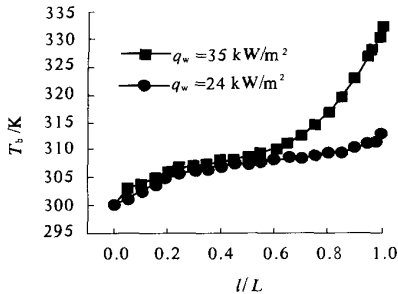


图5 流体温度随流动方向的变化  
Fig. 5 Fluid temperature variations along the flow direction

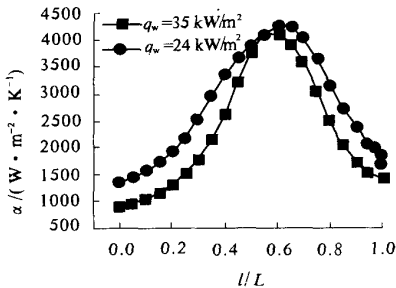


图6 传热系数随流动方向的变化曲线  
Fig. 6 Heat transfer coefficient variations along the flow direction

## 2.2 壁面温度对换热管中对流换热的影响

图7为质量流率  $G = 191 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 8 MPa下不同给定壁面温度条件下传热系数随流体主体温度的变化曲线.从图7可以看出:壁面温度升高,传热系数峰值降低并不明显,在临界点以前,壁面温度变化对传热系数的影响较小,当流体主体温度跨过临界点之后,壁面温度影响变得较为明显.较高壁面温度条件下,传热系数下降幅度较小,传热系数较高.

## 2.3 质量流量对换热管中对流换热的影响

图8为8 MPa下,不同质量流量对传热系数的影响.从图8可以看出:随着质量流量的升高,管内换热系数增大,不同流体温度下都有明显提

高,且在传热系数的峰值处提高最为明显.这是因为  $\text{CO}_2$  流量增加,管内雷诺数增大,而雷诺数又直接影响着黏性底层的厚度和湍流扩散率,使得黏性底层变薄,因此,温度边界层也变薄,温度梯度加大,有利于换热.

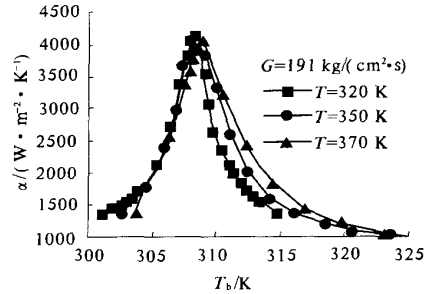


图7 壁面温度对传热系数的影响  
Fig. 7 Effect of wall temperature on heat transfer coefficient

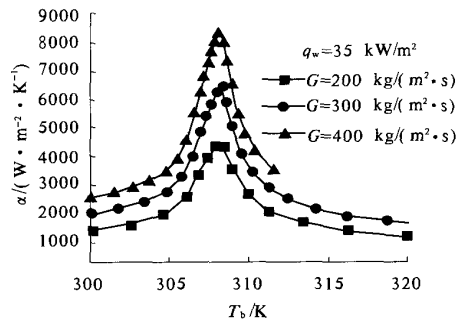


图8 质量流量对传热系数的影响  
Fig. 8 Effect of mass flux on heat transfer coefficient

## 2.4 压强对换热管中对流换热的影响

图9为不同压力下,传热系数随流体主体温度的变化.从图9可以看出:随着压力的升高,传热系数峰值减小.当压力从8 MPa升高到9 MPa时,最大值从4500  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  降到2500  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

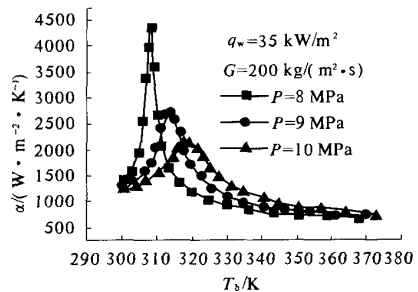


图9 压强对传热系数的影响  
Fig. 9 Effect of pressure on heat transfer coefficient

当压力为10 MPa时;传热系数最大值降到

2 000 W/(m<sup>2</sup> · K). 变化趋势与不同压力下比热容随温度的变化趋势一致, 说明比热容对换热系数的影响非常显著.

### 3 结论

(1) 在固定热流密度进行加热情况下, 管内流体主体温度沿管长逐渐升高, 且热流密度较高时, 升高幅度较大. 热流密度较低时, 管内相同部位处的换热系数明显高于热流密度较高的情况. 换热系数在管内出现峰值, 且随着热流密度的降低, 峰值出现部位有所延迟.

(2) 在固定壁温进行加热情况下, 在管内流体达到临界温度以前, 壁温对传热系数的影响较小. 跨过临界温度以后, 壁面温度对传热系数影响较为显著, 较高壁面温度下, 传热系数较高, 传热系数降低幅度减小.

(3) 比较了不同质量流量对传热系数的影响, 质量流量越高, 随流体主体温度的升高, 传热系数均增大, 同时峰值有明显升高. 说明增加质量流量是提高换热系数的有效途径之一.

(4) 不同压力条件下, 换热系数峰值有明显不同, 较低压力下, 峰值明显高于压力较高的情况. 随着压力升高, 峰值对应的主流温度升高. 跨过临界点后, 较高的压力下, 传热系数降低幅度较小, 对应流体主体温度下的传热系数高于压力较低时的传热系数.

### 参考文献:

[1] CHANG H S, SEUNG J P. An experimental study on

heat transfer and pressure drop characteristics of carbon dioxide during gas cooling process in a horizontal tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29:539-546.

[2] CHAO B D, EI J H. In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. Part I: Experimental measurement[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27:736-747.

[3] JIANG P X, ZHANG Y, Xu Y J, et al. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO<sub>2</sub> at supercritical pressures in a vertical tube at low Reynolds numbers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47:998-1011.

[4] 杨亮, 丁国良, 黄冬平. 超临界二氧化碳流动和换热实验研究[J]. 制冷学报, 2003, (2):51-56.

[5] 董彬, 吕静. 超临界二氧化碳水平管内换热的实验研究[J]. 流体机械, 2006, 36(5):57-61.

[6] 魏东, 马一太. 二氧化碳超临界流体管内对流换热研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1):85-87.

[7] 张宇, 姜培学. 竖直圆管中超临界压力 CO<sub>2</sub> 对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2):280-282.

[8] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[J]. Int Chem Engng, 1976, 16(2):359-68.

[9] HE S, KIM W S, JACKSON J D. A computational study of convective heat transfer to carbon dioxide at a pressure just above the critical value[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28:1662-1675.

## Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics of Supercritical CO<sub>2</sub> in Circular Tube

ZHANG Li-na, LIU Min-shan, DONG Qi-wu

(Thermal Energy Engineering Research Centre, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Convection heat transfer of CO<sub>2</sub> at supercritical pressures in horizontal circular tube is studied numerically. The effect of heat flux, temperature of the wall, mass flux, and pressure on the heat transfer coefficient is investigated. The simulated data indicates that heat flux and temperature of the wall affect slightly the convection heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub>, and mass flux and pressure affect it significantly. With the increase of mass flux, heat transfer coefficient is improved distinctly. The operation pressure is closer to the critical pressure, the change of heat transfer coefficient near critical line is clearer, and the peak value is higher.

**Key words:** supercritical fluid; convection heat transfer; carbon dioxide; numerical study