文章编号:1671-6833(2010)05-0005-04

竖直细管中超临界二氧化碳传热数值研究

董其伍, 曹 侃, 刘敏珊, 张丽娜

(郑州大学 热能工程研究中心,河南 郑州 450002)

摘 要:采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对冷却条件下超临界二氧化碳竖直向上流过内径为0.4 mm的细圆管的对流换热进行了数值研究,分析了二氧化碳进口温度、质量流量、压力以及冷却水量等对二氧化碳对流换热的影响.研究表明,二氧化碳进口温度和冷却水量对于其换热过程的影响比较小;二氧化碳质量流量和压力的影响较为显著,质量流量越高,传热系数提高就越明显;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剧烈,峰值越大.

关键词:超临界二氧化碳;细圆管;冷却条件;数值研究

中图分类号:TB657 **文献标识码**:A

0 引言

众所周知,氟利昂等传统制冷剂是制造温室效应,破坏地球臭氧层的主要元凶.二氧化碳作为一种无毒、不燃、安全、经济、资源丰富的天然工质(ODP为零,GWP接近于零),将最有希望成为传统制冷剂的替代品,并逐步应用于空调、热泵等循环系统中.超临界压力下,变物性是超临界流体的主要特征之一,尤其在临界点附近,物性的变化相当剧烈.正是因为其优良的热力学特性和对环境的友好性,超临界二氧化碳对流换热的研究正受到越来越多的关注.Adebiyi G A等[1]通过实验研究了加热条件下内径为22.14 mm水平圆管中超临界二氧化碳对流换热情况,结果显示浮升力对圆周温度的变化有着显著影响,试验管上端传热增强,下端减弱.Jiang P X等[2]对超临界二氧化碳在多孔结构中对流换热进行了数值模拟和实验研究,结果表明对流换热系数随着颗粒直径的增大而增大.Chang H S等[3]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.国内外其他学者也对超临界二氧化碳的传热特性进行了研究[4-6].

由于冷却条件下局部热流密度测量的难度大,国内外对超临界流体的研究大部分集中在加热条件下超临界流体传热特性的研究,而对于冷却条件下超临界流体局部对流换热的实验研究以及数值模拟还比较少.笔者通过对冷却条件下0.4 mm的竖直微管中超临界二氧化碳的对流换热进行模拟研究,分析了二氧化碳进口温度、质量流量、进口压力以及冷却水流量对管内超临界二氧化碳对流换热的影响.

1 物理模型及控制方程组

物理模型为冷却条件下竖直圆管内超临界二氧化碳逆流换热模型,如图1所示.具体参数如下:圆管内径 $d_{in}=0.4$ mm,壁厚 $t=0.3$ mm,冷却水环形通道外径 $D=4$ mm,冷却段长度 $L=200$ mm,进、出口段长为 $L_{in}=L_{out}=20\ \text{mm}=50d_{in}$,管子采用不锈钢材料.

数值计算采用CFD软件FLUENT 6.3,计算过程中考虑了二氧化碳的变物性的影响,各温度和压力下二氧化碳的物性值均通过REFPROP 7.0计算得到,物性参数输入采用piecewise-linear方法.数值模拟采用的湍流模型为Realizable $k-\varepsilon$ 模型,压力速度耦合采用SIMPLEC算法,其它项采用二阶迎风格式.在壁面附近设置边界层,由于壁面处温度梯度比较大,易引起物性的变化,从而造成较大的密度梯度,因而壁面采用增强壁面函数处理.二氧化碳入口边界条件为质量进口,出口

收稿日期:2010-02-27;**修订日期**:2010-04-16

基金项目:河南省杰出人才创新基金项目(0621001600)

作者简介:董其伍(1941-),男,浙江鄞县人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事过程传热与节能方面的研究.E-mail: qwdong@zzu.edu.cn.

万方数据

采用压力出口,外部冷却水采用速度进口,出口仍为压力出口.固体壁面与流体均耦合.另外,为了保证数值计算的精度,并考察网格的无关性,得到独立于计算结果的网格单元总数6.72万.

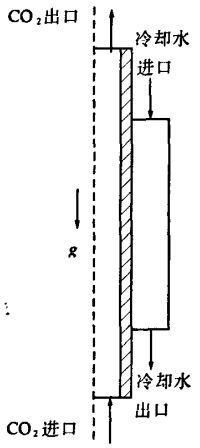

图1 模拟结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulated structure

由于对称性,流动为轴对称二维流动,并考虑到壁面导热,柱坐标下控制方程如下.

(1)管壁内的导热方程:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r})+\frac{1}{x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x})+\dot{\phi}=0 \tag{1}$$

(2)连续性方程:

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\rho rU)+\frac{\partial}{\partial r}(\rho rV)\right\}=0 \tag{2}$$

(3)U动量方程:

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\rho rU^2)+\frac{\partial}{\partial r}(\rho rVU)\right\}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g+\frac{1}{r}\left\{2\frac{\partial}{\partial x}\left[\eta\mu_e\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial r}\left[\eta\mu_e\left(\frac{\partial U}{\partial r}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right]\right\} \tag{3}$$

(4)V动量方程:

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\rho rUV)+\frac{\partial}{\partial r}(\rho rV^2)\right\}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\eta\mu_e\left(\frac{\partial U}{\partial r}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right]+2\frac{\partial}{\partial r}\left[\eta\mu_e\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)\right]\right\}-2\frac{\mu_e V}{r^2} \tag{4}$$

(5)能量方程:

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p rUT)+\frac{\partial}{\partial r}(\rho c_p rVT)\right\}=\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[rc_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_T}{\sigma_T}\right)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial r}\left[rc_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_T}{\sigma_T}\right)\frac{\partial T}{\partial r}\right]\right\} \tag{5}$$

式中:U和V分别代表轴向和径向速度矢量;$\mu_e=\mu+\mu_T$,$\mu_T=C_\mu f_\mu\rho k^2/\varepsilon$,$\mu_e$为有效黏度,$\mu_T$为湍流黏度;$f_\mu$为阻尼函数;$\sigma_T$为湍流普朗特数;$\dot{\phi}$为与热能生成有关的源项;$\rho,\mu,\lambda,c_p$分别为流体的密度、黏度、热导率和比热容;$Pr$为分子普朗特数.

冷却条件下超临界二氧化碳局部换热系数为

$$h=\frac{q}{T_b-T_w} \tag{6}$$

局部平均Nu_b数为

$$Nu_b=hd/\lambda_b \tag{7}$$

式中:下标b表示为定性温度T_b下的物性,且定性温度取横截面的质量平均温度.

2 结果分析与讨论

2.1 模拟结果与关系式的比较

由于超临界二氧化碳的换热比较复杂,到目前仍没有一个适用性较好的关联式,尤其在临界区域换热误差比较大.笔者根据文献选取了几个具有代表性的超临界二氧化碳对流换热计算关联式与数值模拟的结果进行比较,分别为:Gnielinski关联式[7]、Liao-Zhao关联式[8]和Dittus-Boelter关联式[9],如图2所示,用以考察细管内的超临界二氧化碳对流换热情况.其计算条件如下:二氧化碳进口压力$P=8.5$ MPa,进口质量流量为0.125 g/s,进口温度为343.1 K,冷却水进口的$Re=8\,000$.

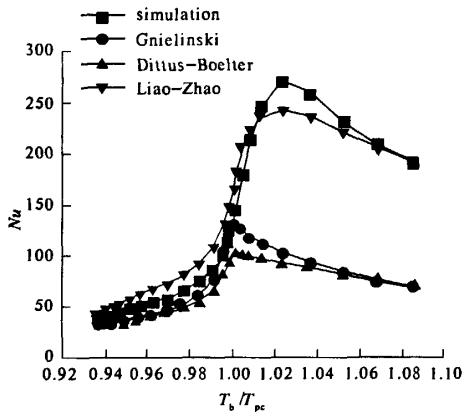

图2 模拟结果与经验公式的比较

Fig.2 The comparison of simulation results and empirical correlations

从图2可以看出,在流体主体温度T_b低于临界温度T_{pc}时,数值模拟结果与3种关联式的计算结果非常接近,这是因为Gnielinski关联式是基于大管径计算结果得到,而Dittus-Boelter关联式是单相流体传热关系式,说明距临界温度较远时,超临界二氧化碳物性的变化比较小,与经验关联

万方数据

式计算结果接近,可以证明该数值模拟的正确性.另外,从图中还可以看出 Liao - Zhao 关联式与数值模拟结果非常接近,说明此时细管内流体受浮力影响比较小;又因为该关联式是基于微细管道实验得到的,且考虑浮升力影响,其模拟结果与其变化趋势非常一致.但由于 Liao - Zhao 关联式是基于水平管实验所得,而笔者研究为竖直向上流动,故该关联式与数值模拟结果相比,过低地预测了传热系数(其中最大误差发生在临界温度附近,误差约为 31.2%),这说明对于竖直向上流动,浮力对换热有一定的辅助作用.

2.2　二氧化碳进口温度对管中对流换热的影响

图 3 为二氧化碳在压力为 8.5 MPa,进口质量流量为 0.125 g/s,冷却水 Re = 8 000 时,不同进口温度下对流换热系数 h 随管长的变化曲线.

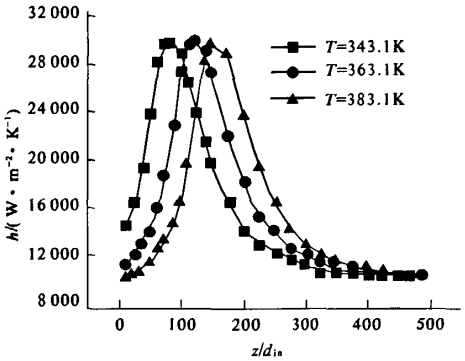

图 3　不同进口温度下局部对流换热系数比较

Fig. 3　The comparison of local heat transfer coefficient for different inlet temperatures

从图 3 可以看出,在管子进口段部分,进口温度较低的局部换热系数 h 较大,且到达峰值的位置比较靠前,而随着流体流动,三者之间传热系数差别逐渐减小,当 z/d_{in} = 450 左右时(其中 z 代表沿轴向长度,d_{in}代表圆管内径,单位均为 mm),传热系数已无明显差异.这是因为二氧化碳在压力为 8.5 MPa 时的临界温度为 310.5 K,而进口温度越大,管道内流体达到临界温度的时间越长,因此其换热系数到达峰值的位置就越滞后.除此之外,当流体进口温度较高时,超临界二氧化碳处在类气状态,其 c_p 和 λ 值低于进口温度较低的流体,综合起来就大大降低其局部换热系数,这也是在管道前半段进口温度较高的流体换热系数低于进口温度较低的流体的换热系数的主要原因.而随着管道内流体接近热平衡状态,由于此时壁温与流体温度非常接近,因此在流动下游,三者之间换热系数差异变小.

2.3　二氧化碳进口压力对管中对流换热的影响

图 4 为二氧化碳进口温度为 343.1 K,质量流量为 0.125 g/s 时,冷却水 Re = 8 000 时,不同压力下局部传热系数 h 随流体主体温度的变化曲线.

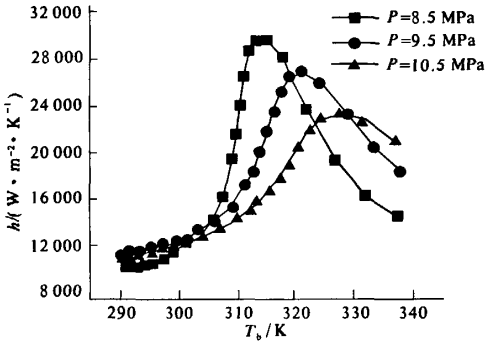

图 4　不同压力下局部对流换热系数比较

Fig. 4　The comparison of local heat transfer coefficient for different inlet pressures

从图 4 可以看出,传热系数在流体主体温度较高时(即冷却进口段)差异显著,当流体温度到达各自准临界温度时,换热系数达到峰值.并且从图中可以看出,随着压力的升高,传热系数峰值减小.当压力从 8.5 MPa 升高到 9.5 MPa 时,最大值从 29 787 W/(m^2 · K)降到 26 871 W/(m^2 · K);当压力升为 10.5 MPa 时,传热系数最大值降到 23 299 W/(m^2 · K).这主要是因为压力越大,超临界二氧化碳物性变化越趋于缓慢.

2.4　二氧化碳质量流量对管中对流换热的影响

图 5 为 8.5 MPa 下不同二氧化碳质量流量对局部传热系数的影响.从图 5 可以看出,局部换热系数随着质量流量增加在不同流体温度下均有增加,而在准临界温度附近增加最为明显.这主要是因为随着二氧化碳质量流量的增大,管内 Re 数增大,而 Re 数增加则导致了黏性底层的变薄和近壁区湍动能的增加.综合这些因素的影响可以看出,局部对流换热系数随二氧化碳质量流量的增加而增大,并且当流体温度达到准临界温度时,对流换热系数随二氧化碳质量流量的增加就越显著.

2.5　冷却水量对管中对流换热的影响

图 6 为冷却条件下,二氧化碳进口压力为 8.5 MPa,进口温度为 343.1 K,进口质量流量为 0.125 g/s,不同冷却水量对局部换热系数的影响.从图 6 可以看出,在二氧化碳流体主体温度达到临界温度之前,冷却水量对传热的影响相对较

万方数据

小.随着冷却水量的增加(即 Re 的增加),在跨过临界温度以后,冷却水量的变化对传热系数的影响变大,水量较大的传热系数相对较高.

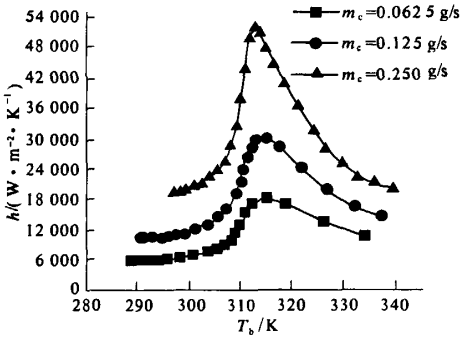

图5 不同质量流量下局部对流换热系数比较

Fig.5 The comparison of local heat transfer coefficient for different mass flow rates

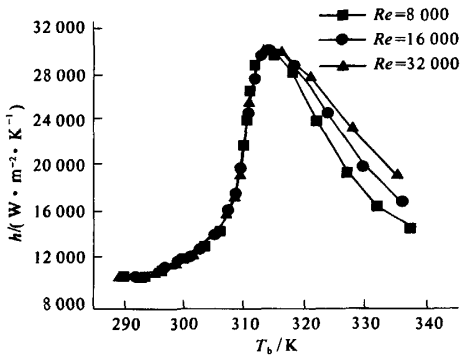

图6 不同冷却水量下局部对流换热系数比较

Fig.6 The comparison of local heat transfer coefficient for different cooling water mass flow rates

3 结论

(1) 不同的二氧化碳进口温度下,换热系数峰值无明显变化.进口温度较低时,冷却进口端换热系数较高,且达到峰值的位置较靠前.但是随着进口温度的升高换热系数峰值下降并不明显,这说明二氧化碳进口温度对于较大雷诺数微细管道中超临界流体换热过程影响比较小.

(2) 比较了质量流量对换热系数的影响.质量流量越高,在不同主体温度下传热系数均有提高,同时峰值也有明显升高,这说明增加质量流量是提高换热系数的有效途径之一.

(3) 比较了压力对换热系数的影响.不同压力下换热系数的峰值不同,且峰值对应的主体温度也不同.压力越接近临界压力,换热系数峰值越大,峰值对应流体主体温度越小,说明进口压力对对流换热过程影响较大.

(4) 比较了冷却水量对换热系数的影响.冷却水量增加,传热系数增加并不明显,且峰值只是稍有提高,说明冷却水量对传热系数的影响比较小.

参考文献:

[1] ADEBIYI G A, HALL W B. Experimental investigation of heat transfer to supercritical pressure carbon dioxide in a horizontal pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(7):715-720.

[2] JIANG P X, SHI R F, ZHAO C R, et al. Experimental and numerical study of convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in vertical porous tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 6283-6293.

[3] 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.

[4] YOON S H, KIM J H, KIM M S. Heat transfer and pressure drop characteristics during in tube gas cooling process of carbon dioxide in the supercritical region [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 26: 857-864.

[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] 张丽娜,刘敏珊,董其伍.超临界二氧化碳管内流动与换热特性分析研究[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(4):69-72.

[7] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. International Chemical Engineering, 1976, 16 (2): 359-368.

[8] LIAO S M, ZHAO T S. Measurements of heat transfer coefficients from supercritical carbon dioxide flowing in horizontal mini/micro channels [J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(6):413-420.

[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.

(下转第17页)

万方数据

$Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ system[J]. Powder Technology,2004,145:10-19.

[10] 许名灿.高岭土微球上原位晶化纳米沸石分子筛 Y 的研究[D].大连:大连化学物理研究所,2000.

[11] BRECK D W. Zeolite Molecular Sieves[M]. New York: Wiley,1974:113.

[12] 尹晓燕,初乃波,赵庆宇,等.L 沸石合成及其影响因素的研究[J].硅酸盐通报,2008,27(4):791-795.

In-suit Synthesis of Zeolite K-Na L on Kaolin - microspheres

CHEN Yi - liang[1], FAN Hong - chao[1], ZHANG Zhong - dong[2], GUO Shi - ling[1], NAN Hui - fang[1]

(1. School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Lanzhou Petrochemical Corporation, Lanzhou 730060, China)

Abstract: In the study, zeolite K-Na L is in-suit synthesized through hydrothermal crystallization methods on kaolin microspheres used as the silica source and aluminium source. This paper studied the effects of different influential factors, such as the molar ratio of $n(K_2O):n(Na_2O)$, alkalinity, Al_2O_3, SiO_2 and H_2O on the synthesis of zeolite K-Na L by univariate analysis experiment. The crystal phase of the as-prepared zeolites samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electronic microscopy (SEM). It's found that the relative crystallinty of zeolite K-Na L can reach to the highest when the molar ratio of $n(K_2O):n(Na_2O)$ is 7:3; the base mole ration of the synthesis gel (maitain the molar ration of $n(K_2O)/n(Na_2O)=7:3$) is $n(K_2O+Na_2O):n(Al_2O_3):n(SiO_2):n(H_2O)=4.2:1.0:15:210$. It is concluded that the relative crystallinity of zeolite K-Na L increases with the increasing of alkalinity ($3.3<x_1<4.8$) and the increaseing ratio of the relative crystallinity gradually decreases ($x_1>4.2$); the relative crystallinity first goes up and then down with the increasing of the molar of Al_2O_3 and the relative crystallinity reaches to the highest when x_2 equals to 1.4; the property of the silica souces has a great influence on the synthesis of zeolite K-Na L, and the zeolite K-Na L can only be synthesized when the x_3 is in the region of $9<x_3<18$; the relative crystallinity decreased with increasing of the molar of H_2O and when x_4 is greater than 310 zeolite K-Na L can not be synthesized.

Key words: mete-kaolin; zeolite K-Na L; hydrotherml crystallization

(上接第 8 页)

Numerical Study of Convection Heat Transfer of Supercritical CO_2 in a Vertical Mini - tube

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

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

Abstract: Convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures during cooling in vertical circular mini - tube with inner diameter of 0.4 mm was studied numerically using Realizable turbulent model. The effects of pressure, cooling water mass flux, CO_2 mass flow rate and CO_2 inlet temperature on the heat transfer coefficient were investigated. The simulated results indicate that cooling water mass flow rate and CO_2 inlet temperature have little influence on convection heat transfer of supercritical CO_2, but CO_2 inlet mass flow rate and inlet pressure affect significantly. With the increasing of CO_2 mass flow rate, coefficient of heat transfer improves dramatically. The inlet pressure is closer to the critical pressure, the change of coefficient of heat transfer near critical point is more drastically, and the peak value is higher.

Key words: supercritical carbon dioxide; mini - tube; cooling condition; numerical study

万方数据