

# R22、R410A 和 R290 在水平圆管内冷凝数值模拟

尚少文<sup>1</sup>,荣来誉<sup>1</sup>,朱晨<sup>2</sup>,钱浩<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 成都基准方中建筑设计有限公司杭州分公司,浙江 杭州 310000)

**摘要** 目的 模拟分析在不同质量流量、干度和管径等影响因素下,水平管内制冷剂的凝结换热和压降随影响因素的变化情况,确定压降和传热系数与质量流量、干度和管径之间关系。**方法** 对制冷剂 R22、R410A 和 R290 在水平圆管内的冷凝换热进行仿真模拟,选择 0.041 8 kg/s、0.084 kg/s、0.126 kg/s 质量流量,0.6、0.9 两种干度和 10 mm、8 mm、6 mm 不同管径的水平圆管,通过控制变量的方法,分析 3 种制冷剂在水平管内凝结换热的流动情况。**结果** 压降和传热系数与质量流量和干度成正比关系,即随其增大而增大;与管径成反比关系,即随其增大而减小。制冷剂 R290 和 R410A 可以用于替代 R22,并且 R290 和 R410A 的传热系数和压降都大于 R22。**结论** 在 3 种制冷剂中,R290 的换热效果和压降都要大于 R22 和 R410A,R22 的换热效果和压降与 R410A 的差距较小,其中 R22 的传热系数和压降都比 R410A 要稍小一些。

**关键词** 制冷剂;水平圆管;冷凝换热;数值模拟

中图分类号 TU831.3<sup>+</sup>7;TK124      文献标志码 A

## Numerical Simulation Study on Condensation of R22, R410A And R290 in Horizontal Circular Tube

SHANG Shaowen<sup>1</sup>, RONG Laiyu<sup>1</sup>, ZHU Chen<sup>2</sup>, QIAN Hao<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Chengdu Benchmarking Fangzhong Architectural Design Co. Ltd., Hangzhou Branch, Hangzhou, China, 310000)

**Abstract:** The change process of condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant in horizontal tube with influence factors of mass flow rate, dryness and pipe diameter was studied to determine the relationship between these influence factors. Mass flow rates of 0.041 8 kg/s, 0.084 kg/s, 0.126 kg/s, dryness of 0.6 and 0.9, and pipe diameters of 10mm, 8mm and 6mm were selected. The condensation heat transfer flow of three refrigerants of R22, R410A and R290

in a horizontal tube was simulated and analyzed by controlling variables. Results show that the pressure drop and heat transfer coefficient are proportional to the mass flow rate and dryness, however, inversely proportional to the pipe diameter. Among the three refrigerants, the heat transfer effect and pressure drop of R290 are greatest, R22 smallest, but the difference between R22 and R410A is small. So refrigerants R290 and R410A can be used to replace R22.

**Key words:** refrigerant; horizontal circular tube; condensation heat transfer; numerical simulation

制冷剂 R22 对环境的危害非常大,各国专家都试图寻找可以用来替代 R22 的制冷剂。在欧美等国家,以 R410A、R290 等制冷剂为实验对象,分析得出制冷剂 R410A 具有较好的传热性以及较小的压力损失,制冷剂 R290 具有良好的环境性能和热物性<sup>[1-2]</sup>。此外,实验对比水平螺纹管和水平强化湍流管与光滑管的冷凝换热特性和压降情况<sup>[3-4]</sup>。梁宾等<sup>[5]</sup>从多个方面对制冷剂 R410A、R290 和 R32 进行实验研究,其结果表明这些制冷剂适合做 R22 的替代制冷剂。肖航<sup>[6]</sup>实验研究了 R290、R1234ze 和 R22 压降和换热性能,结果表明压降及换热性能均与质量流率及干度成正比,与饱和温度成反比。张会勇等<sup>[7]</sup>实验研究制冷剂 R410A 和 R22 质量流速和干度的影响,结果表明在较高干度和较高质量流速时 R22 的压降大于 R410A。刘建等<sup>[8]</sup>以制冷剂 R410A 和 R22 为研究对象,对比实验测试和仿真模拟,结果表明通过 7.0 mm 强化管 R410A 比通过 9.52 mm 强化管 R22 所提高的蒸发冷凝换热热量高。邹思凯<sup>[9]</sup>实验研究了制冷剂 R290 在水平管内的不同影响因素下冷凝换热特性,实验表明制冷剂 R290 冷凝换热系数会受到质量流量、干度、热流密度、管径的影响。J. R. Thome 等<sup>[10]</sup>通过对两相流沸腾和冷凝的仿真模拟,得到了适用于环状流的统一模型。B. C. Nguyen 等<sup>[11]</sup>研究了 R32、CO<sub>2</sub> 和 R290 在微通道中的传热系数,对比分析了传热系数随质量流量和热流量的变化情况。此外,许多学者对其他制冷剂在各种换热器中的冷凝换热情况进行了大量的实验研究<sup>[13-22]</sup>。制冷剂冷凝换热的效果受很多种

影响因素的影响,笔者分析了各影响因素对水平管内的凝结换热和压降情况的影响。

## 1 建立模型

近壁区的流体流动情况和中心气核部分的流动情况都对换热效果有影响,所以笔者建立的湍流模型仿真模拟选用 SSTk- $\omega$  模型,多相流模型选择 VOF 模型,VOF 模型已经广泛应用于两相流流动过程的模拟,在该模型中计算单元中,各相的体积分数总和为 1,即气相和液相的体积分数总和为 1。笔者针对水平圆管冷凝换热中气液界面的传热传质问题采用了 Lee 模型。Lee 模型假设了气液界面的温度为饱和温度,设置相变因子为 1000,水平圆管冷凝换热中气液界面的传热传质表达式为

$$S_m = \begin{cases} r\alpha_l\rho_l \frac{T - T_{\text{Sat}}}{T_{\text{Sat}}}, & T \geq T_{\text{Sat}}; \\ r\alpha_v\rho_v \frac{T - T_{\text{Sat}}}{T_{\text{Sat}}}, & T \leq T_{\text{Sat}}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_m$  为质量守恒方程中的相变质量源项; $r$  为相变因子; $\alpha_l$ 、 $\alpha_g$  分别是液相和气相的体积分数; $T$  为气、液相温度,K; $T_{\text{sat}}$  为饱和温度,K; $\rho_l$  为液相密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_v$  为汽相密度,kg/m<sup>3</sup>。

## 2 结果分析

模拟采用 AnsysWorkbench 软件,建立了长为 1 m,内径为 10 mm 的水平圆管几何模型,制冷剂工质的物性由 REFPROP 软件确定。数值仿真模拟采用的是 Fluent 软件,经过后期处理,运用 Origin 软件绘制得到散点图。

2.1 质量流量影响

由于制冷剂质量流量发生变化对水平圆管冷凝换热中气液界面的换热和压降有影响,所以对质量流量进行研究。在其他条件不变的情况下,在 0.041 8 kg/s,0.084 kg/s,0.126 kg/s 不同的质量流量情况下进行数值模拟,得到 3 种制冷剂在不同质量流量下的压降和传热系数情况。图 1 为 3 种制冷剂在不同质量流量下压降的变化情况。

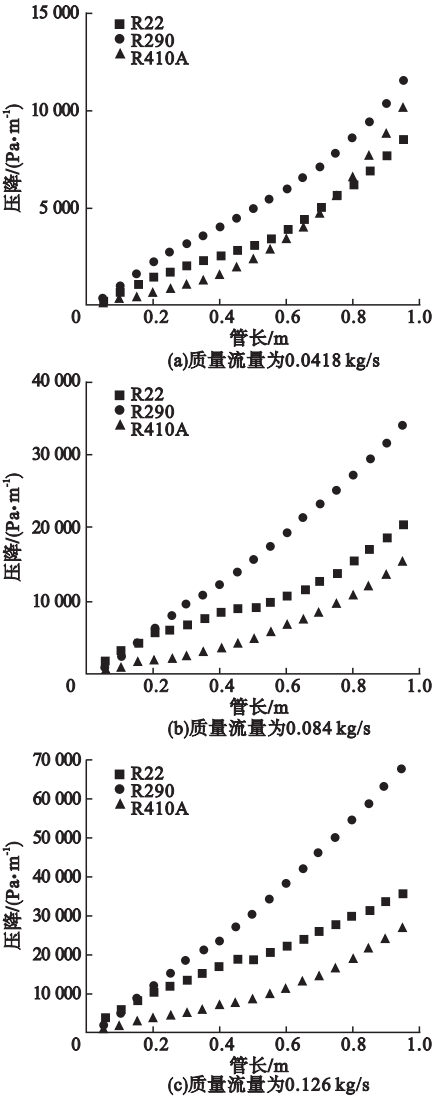


图 1 制冷剂在 3 种质量流量下的压降

Fig. 1 Pressure drop of refrigerant at three mass flows

在控制其他变量相同的条件下,当质量流量增大时,制冷剂的管内压降会随之增大,这是由于流体的流速随着质量流量的增大而

增大。同时可以看出 3 种制冷剂随着质量流量增大,压差也随之增大,这是由于 3 种制冷剂的物性有所不同,R22、R410A 和 R290 的气相和液相密度有所差异,导致在相同质量流量条件下流动速率有所不同,R290 大约是 R22 的两倍,而压降受流动速率影响很大,所以在压降方面 R290 要远大于其他两种制冷剂。

图 2 为 3 种制冷剂在 3 种质量流量下传热系数的变化情况。

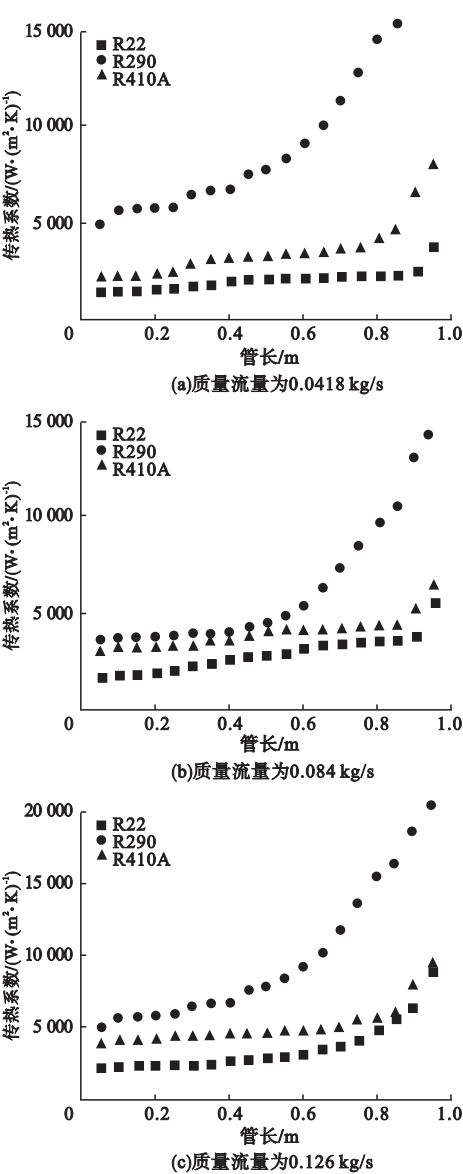


图 2 制冷剂在 3 种质量流量下的传热系数

Fig. 2 Heat transfer coefficient of refrigerant at three mass flows

当其他变量相同时,传热系数随着质量流量的增大而增大。这是由于当质量流量增大时,积聚在水平圆管底部的液膜厚度变小,这就使传热过程的换热热阻减小从而导致传热系数的增大。同时也可以看出 R290 的换热效果最好,R410A 和 R22 的曲线较近说明在换热效果方面差距比较小,并且 R410A 略好一些。

图 3 为不同质量流量的制冷剂 R22 在水平管中距离进口 0.65 m 横截面处的气液体积分布情况。

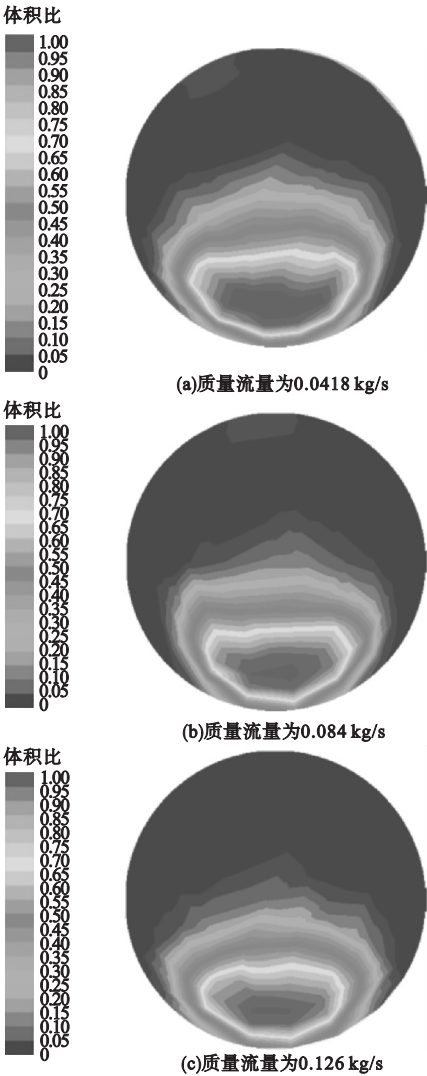


图 3 制冷剂在 3 种质量流量下的气液体积分布云图

Fig. 3 Gas-liquid volume distribution cloud map of refrigerant under three mass flows

对比发现在控制其他变量相同的条件下,沿蒸汽在水平圆管内的流动方向,高温蒸汽不断地与低温管壁换热进行热量交换,被冷却降温,最终相变成液体。由连续性方程可知,高温蒸汽的流速会不断下降,同时由于冷凝的液体不断增多,在重力的作用下会在水平圆管的底部沉积,液膜厚度增加。在其他条件不变时,随制冷剂质量流量的增大,水平圆管底部的液膜厚度由于剪切力的作用会不断缩小,由液膜产生的热阻会随之减小,换热效果提升。同时水平圆管内的压降会随之增大,这是由于制冷剂质量流量的增大会导致流速增大,压降增大。

2.2 干度影响

笔者在干度为 0.6 和 0.9 的情况下进行了数值模拟并进行对比分析。图 4 为 3 种制冷剂在不同干度下压降的变化情况。

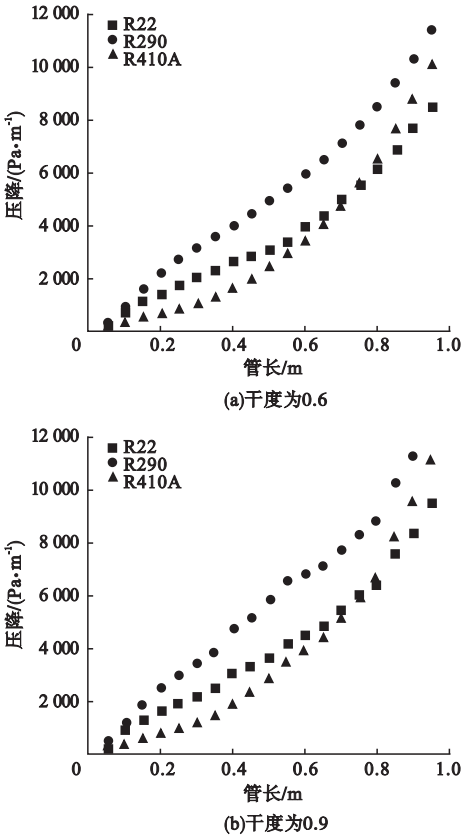


图 4 制冷剂在两种干度下的压降

Fig. 4 Effect of dryness on pressure drop

在控制其他变量相同的条件下,管内压降随着干度的增大而增大,这是由于随着工质密度的减小,由流量连续性方程可知会导致工质的流速变大,湍流作用也会变得更大,气液之间的相互作用随之增强,最终导致压降增大。并且可以看出3种制冷剂的压降由高到低为R29、R22、R410A。

图5为3种制冷剂在2种干度下传热系数的变化情况。在控制其他变量相同的条件下,传热过程的传热系数随干度的增大而增大,这是由于干度增大后,表面张力对工质的作用增大,从而导致传热系数减小。同时可以看出R290的传热系数最大,R22在换热方面与R410A比较相近,R22传热系数略低。

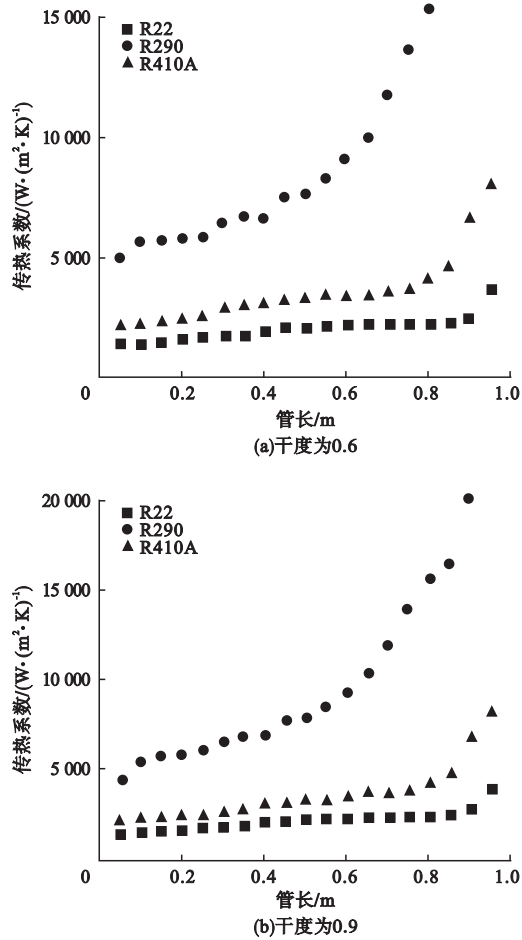


图5 制冷剂在两种干度下的传热系数  
Fig.5 Effect of dryness on heat transfer coefficient

图6为不同干度的制冷剂R22在水平管中距离进口0.65 m横截面处的气液体积分布情况。从图中可以看出,干度为0.9时的液膜厚度要远小于干度为0.6时的液膜厚度,原因是因为制冷剂表面张力会随干度的增大而增强,表面张力越强液体的体积越小,液膜越薄,而换热热阻会随之减小,换热效果提升。同时管内的压降也会随着干度的增加而增大,由于制冷剂的密度会随干度的增加而减小,根据连续性方程可知,制冷剂的流速会随密度的减小而增大,流速增大扰动能力增强,压降增大。

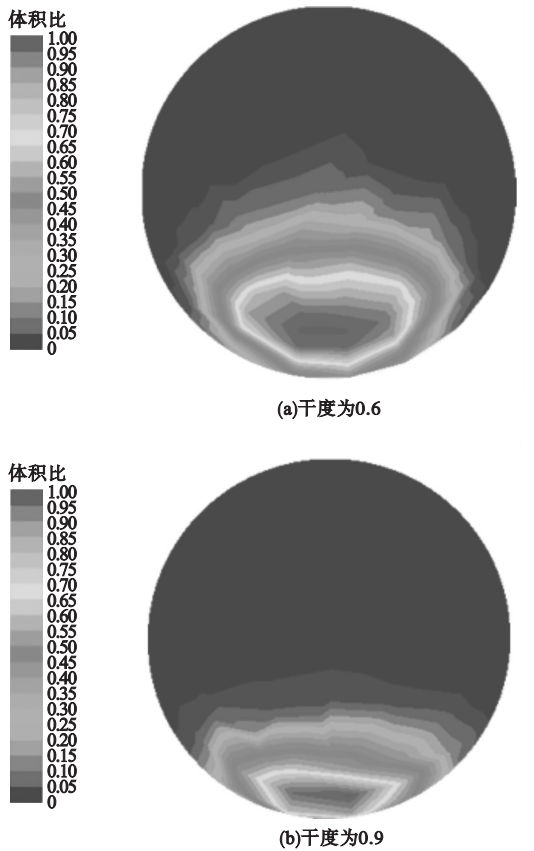


图6 制冷剂在两种干度下的气液体积分布云图  
Fig.6 Gas-liquid volume distribution cloud map of refrigerant at two degrees of dryness

### 2.3 管径影响

对管径的仿真模拟选择了6 mm、8 mm和10 mm的管径进行对比。图7为3种制冷剂在不同管径下压降的变化情况。

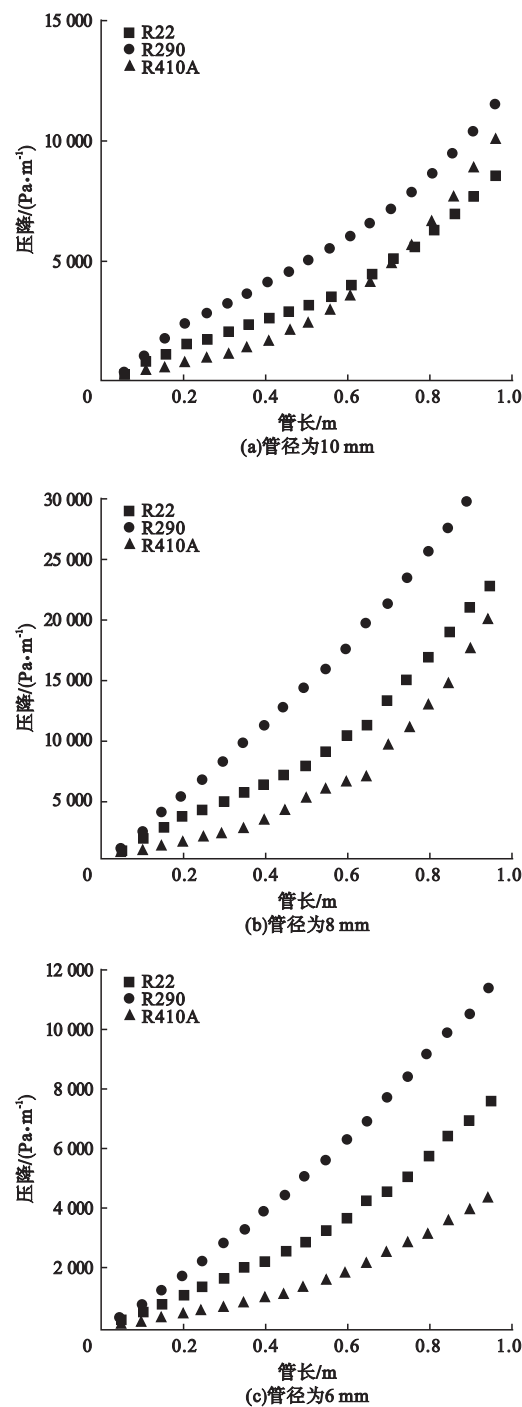


图 7 制冷剂在 3 种管径下的压降

**Fig. 7** Effect of pipe diameters on pressure drop

在控制其他变量相同的条件下,压降随管径的增大而减小,这是由当管径变大时,流体流速减小,重力的作用相对增强,表面张力和剪切力的作用相对减小,从而导致压降的减小。同时可以看出制冷剂 R290 的压降是最大的,制冷剂 R410A 与 R22 的在压降方面

相差较小,R410A 压降稍低。

图 8 为 3 种制冷剂在 3 种管径下传热系数的变化情况。在控制其他变量相同的条件下,传热系数随管径的减小而增大,这是由于在相同的质量流量条件下,随着管径的不断缩小,水平圆管内的制冷剂流速会不断增大,增大的流速会增强剪切力、表面张力和扰动能力的作用,圆管底部的液膜厚度会随之减小,由其产生的热阻会减小,换热效果提升。

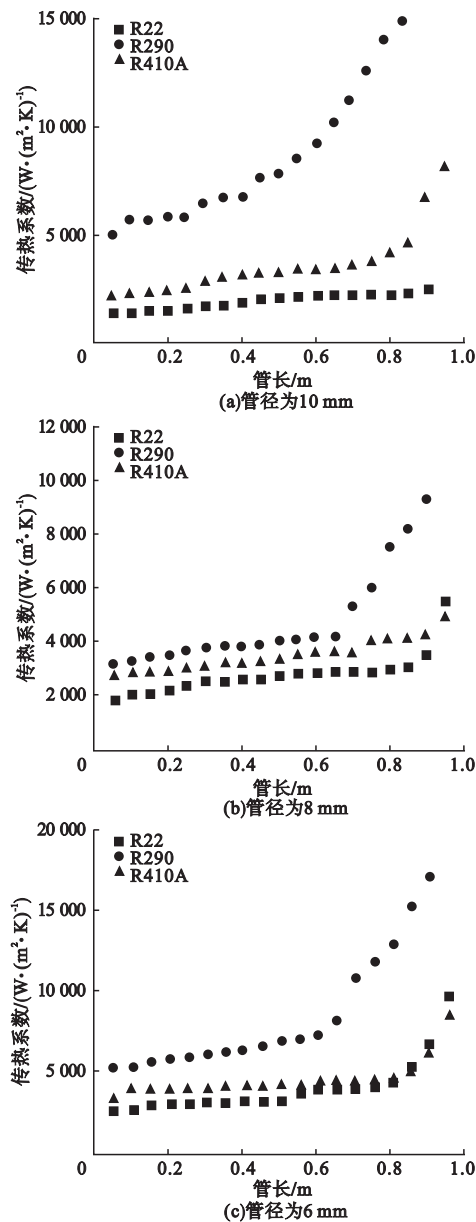


图 8 制冷剂在 3 种管径下的传热系数

**Fig. 8** Heat transfer coefficient of refrigerant with three pipe diameters



图 9 为制冷剂 R22 在不同管径的水平管中距离进口 0.65 m 横截面处的气液体积分布情况。制冷剂气液界面处的剪切力、表面张力、重力等作用力会随水平圆管管径的变化而改变,从而影响换热效果和压降大小。水平圆管内压降在管径为 6 mm 最大,其次为 8 mm,最小为 10 mm,这是由于在相同的质量流量条件下,制冷剂的流速会随水平圆管管径的减小而增大,增大的流速会增强剪切力、表面张力和扰动能力的作用,剪切力、表面张力作用增大会使环状流状态的区域增加,从而水平圆管底部的液膜厚度消减,热阻减小,同时扰动能了会增强换热,最终增强了换热效果。

3 结 论

(1)在控制其他变量相同的条件下,质量流量的增大会导致水平圆管内制冷剂流速增大、液膜变薄,换热效果增强,但压降会随之增大。

(2)在控制其他变量相同的条件下,随着干度的增大,水平圆管内的压降和换热过程的换热系数也会增大,但管内的压降和换热效果随干度变化相对较小。

(3)在控制其他变量相同的条件下,水平圆管管径的减小会增强制冷剂汽液界面剪切力、表面张力和扰动能力的作用,从而提升换热效果,但管内压降会随之增大。

(4)3 种制冷剂中 R290 的换热效果最好,同时压降也最大,R22 与 R410A 的换热效果和压降的差距较小,其中 R22 的传热系数和压降都比 R410A 要稍小一些。

参考文献

[ 1 ] QUANG V P, KWANG I C, JONG T O. Condensation heat transfer characteristics and pressure drops of R410A, R22, R32, and R290 in a multiport rectangular channel[J]. Science and technology for the built environment, 2019, 25( 10 ): 1325 - 1336.

[ 2 ] MUHAMMAD E P, BERKAH T K, MUHAMMAD T S. Experimental study on the performance of a R-22 freezer retrofitted with R-290[J]. Materials today: proceedings, 2019, 13: 160 - 164.

[ 3 ] 李庆普,陶乐仁,吴生礼,等. 水平内螺纹管内 R410A 流动凝换热实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39( 6 ): 37 - 45.

( LI Qingpu, TAO Leren, WU Shengli, et al. Experimental study on flow condensation heat transfer of R410A inside horizontal internal ribbed tube[J]. Journal of refrigeration, 2018, 39( 6 ): 37 - 45. )

[ 4 ] 郭瑞恒,张爱凤,何燕,等. 水平强化涟漪纹管的管内冷凝换热实验研究[J]. 青岛科技大学学报( 自然科学版 ), 2018, 39( 6 ): 92 - 98.

( GUO Ruiheng, ZHANG Aifeng, HE Yan, et al. Experimental investigation on condensation heat transfer characteristics of horizontal enhanced EHT tubes[J]. Journal of Qingdao university of science and technology( natural science edition ), 2018, 39( 6 ): 92 - 98. )

[ 5 ] 梁宾,张明杰,付裕. R22 替代工质 R32/ R290/ R410A 性能的理论 and 实验研究[J]. 电

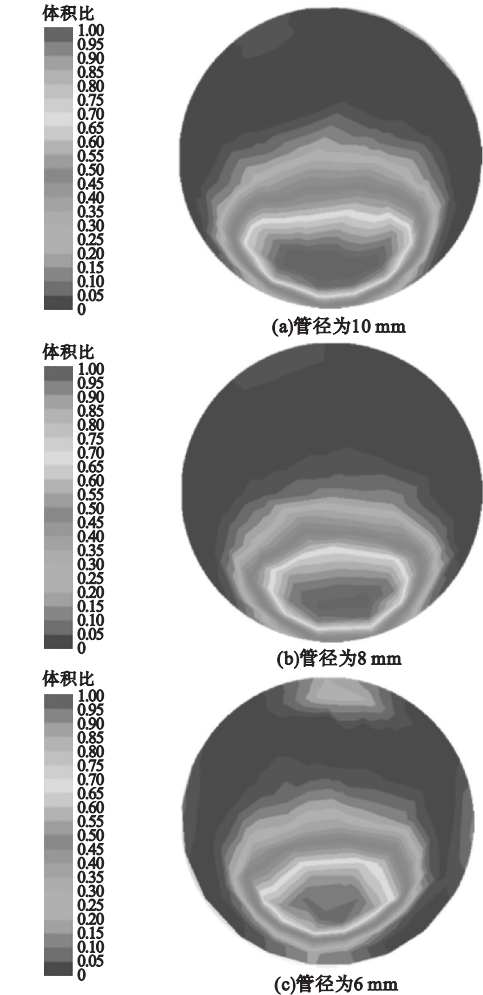


图 9 制冷剂在 3 种管径下的气液体积分布云图

Fig. 9 Gas-liquid volume distribution cloud map of refrigerant with three pipe diameters

- 器,2013(增刊1):688-697.  
(LIANG Bin, ZHANG Mingjie, FU Yu. Theoretical and experimental study on the performance of R22 substitute refrigerant R32/R290/R410A [J]. Electric appliance, 2013 (S1):688-697.)
- [6] 肖航. R290 和 R1234ze 在水平微通道内流动凝结换热的实验研究[D]. 北京:清华大学,2015.  
(XIAO Hang. Experimental research on flow condensation heat transfer of R290 and R1234ze in horizontal microchannel [D]. Beijing:Tsinghua University,2015.)
- [7] 张会勇,李俊明,王补宣. 水平微圆管内 R22 和 R410A 凝结压降的实验研究[J]. 制冷学报,2007(3):1-5.  
(ZHANG Huiyong, LI Junming, WANG Buxuan. Experimental investigation on pressure drop of R22 and R410a during condensing process in microtubes [J]. Journal of refrigeration,2007(3):1-5.)
- [8] 刘建,丁国良. 以 R410A 为工质的空调换热器性能仿真与实验[J]. 上海交通大学学报,2006(2):262-266.  
(LIU Jian, DING Guoliang. Simulation and experimental study on the characteristics of residential heat exchanger with R410A [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2006 (2):262-266.)
- [9] 邹思凯. R290 在小管径水平管内凝结换热的实验研究[D]. 南昌:南昌大学,2017.  
(ZOU Sikai. Experimental study on condensation heat transfer of R290 in small tube [D]. Nanchang:Nanchang University,2017.)
- [10] THOME J R, CIONCOLINI A. Unified modeling suite for two-phase flow, convective boiling, and condensation in macro-and microchannels[J]. Heat transfer engineering, 2016,37(13/14):1148-1157.
- [11] NGUYEN B C, PHAM Q V, KWANG I C, et al. Boiling heat transfer of R32, CO<sub>2</sub> and R290 inside horizontal minichannel[J]. Energy procedia,2017,105:4822-4827.
- [12] 王鑫,陶乐仁,王栋,等. 水平单管内换热实验研究[J]. 能源研究与信息,2016,32(3):158-163.  
(WANG Xin, TAO Leren, WANG Dong, et al. Experimental study on the heat transfer in single horizontal tube [J]. Energy research and information,2016,32(3):158-163.)
- [13] 杨英英. R32 和 R1234ze 在水平细管道内的冷凝换热特性研究[D]. 天津:天津大学,2014.  
(YANG Yingying. Condensation heat transfer characteristics of R32 and R1234ze in a horizontal small tube [D]. Tianjin: Tianjin University,2014.)
- [14] 刘猛洪. 微通道内 R152a 的流动冷凝换热特性的实验研究[J]. 能源工程,2019(1):13-17.  
(LIU Menghong. Experimental study on heat transfer characteristics during flow condensing for R152a in the microchannel [J]. Energy engineering,2019(1):13-17.)
- [15] 马腾飞. 动力型热管仿真模型的建立及实验验证[D]. 青岛:青岛大学,2018.  
(MA Tengfei. Establishment and experimental verification of dynamic heat pipe simulation model[D]. Qingdao:Qingdao University,2018.)
- [16] 谭娟. R1234ze 与 R134a 在低肋管外膜状凝结换热实验研究[D]. 郑州:中原工学院,2018.  
(TAN Juan. Experimental study of R1234ze and R134a on film condensation heat transfer outside the low ribbed tube [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology,2018.)
- [17] 王学东,柳建华,宋吉,等. R404A 小管径冷凝换热与压降关联式的适配性[J]. 制冷学报,2017,38(2):22-28.  
(WANG Xuedong, LIU Jianhua, SONG Ji, et al. Suitability of R404A condensation heat transfer and pressure drop correlations for small diameter tube [J]. Journal of refrigeration, 2017,38(2):22-28.)
- [18] 吴生礼,陶乐仁,李庆普,等. R134a 在水平螺纹管内的冷凝换热特性研究[J]. 轻工机械,2017,35(5):1-5.  
(WU Shengli, TAO Leren, LI Qingpu, et al. Study on condensation heat transfer characteristics of R134a in horizontal threaded tubes [J]. Light industry machinery, 2017,35 (5):1-5.)
- [19] 王欢,李敏霞,杨英英,等. 水平光滑细管内 R32 的冷凝换热特性[J]. 太阳能学报,2015,36(11):2597-2604.  
(WANG Huan, LI Minxia, YANG Yingying, et al. Condensation heat transfer characteristics of R32 in a horizontal mini-channel [J]. Acta energiae solaris sinica, 2015,36 (11):2597-2604.)
- [20] 李敏霞,杨英英,顾昊翔,等. 水平光滑细管内 R1234ze 冷凝换热特性实验研究[J]. 制冷学报,2014,35(4):58-66.  
(LI Minxia, YANG Yingying, GU Haoxiang, et al. Heat transfer characteristics for condensation of R1234ze in a horizontal small tube [J]. Journal of refrigeration,2014,35(4):58-66.)
- [21] 刘纳,李俊明. R32 在水平微细圆管内凝结换热的数值模拟[J]. 化工学报,2014,65(11):4246-4253.  
(LIU Na, LI Junming. Numerical simulation of R32 condensation heat transfer in horizontal circular microchannel [J]. Ciesc journal, 2014,65(11):4246-4253.)
- [22] 邵杰. 动力型热管内 R134a 流动凝结特性实验研究与数值模拟[D]. 青岛:青岛大学,2017.  
(SHAO Jie. Experimental study and numerical simulation of R134a flow condensation characteristics in dynamic heat pipe [D]. Qingdao:Qingdao University,2017.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)