

R290 在微细圆管内流动沸腾摩擦压降特性研究

姜林林, 蒋金周, 沈志华

(南通职业大学 电子信息工程学院, 江苏 南通 226500)

摘要:对制冷剂 R290 在微细圆管内流动沸腾摩擦压降梯度进行了定性的理论分析和定量的实验研究, 分析不同影响因素下其变化规律。实验工况: 质量流率 $50 \sim 1\,020 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度 $1 \sim 70 \text{ kW}/\text{m}^2$ 、管径 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 、饱和温度 $-10 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、干度 $0 \sim 1$ 。实验结果表明: 质量流率的增大和换热管径的减小, 都会造成摩擦压降梯度和增长幅度大幅增加; 热流密度值的变化不影响摩擦压降梯度, 但会影响摩擦压降达到最大值的时间; 摩擦压降梯度随着饱和温度和管径的减小而增大; 摩擦压降梯度在中低干度时快速增加, 在高干度时增速减小趋于平稳, 直至达到最大值后缓慢减小。

关键词:微细圆管; R290; 流动沸腾; 摩擦压降

中图分类号: TK172 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.014

[引用本文格式] 姜林林, 蒋金周, 沈志华. R290 在微细圆管内流动沸腾摩擦压降特性研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(12): 88-93. JIANG Lin-lin, JIANG Jin-zhou, SHEN Zhi-hua. Study on flow boiling frictional pressure drop characteristics of R290 in a microtube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 88-93.

Study on Flow Boiling Frictional Pressure Drop Characteristics of R290 in a Microtube

JIANG Lin-lin, JIANG Jin-zhou, SHEN Zhi-hua

(School of Electric and Information Engineering, Nantong Vocational University, Nantong, China, Post Code: 226500)

Abstract: The qualitative theoretical analysis and quantitative experimental research on flow boiling frictional pressure drop gradient of refrigerant R290 in a microtube were carried out, and the variation law under different influencing factors was analyzed. The experimental conditions include mass flow rate of 50 to 1 020 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, heat flux density of 1 to 70 kW/m^2 , pipe diameter of 1 to 3 mm, saturation temperature of -10 to $25 \text{ }^\circ\text{C}$, and dryness of 0 to 1. The research results show that the increase of mass flow rate and the decrease of heat transfer pipe diameter will result in the frictional pressure drop gradient and a significant increase of its growth rate; The change of heat flux density has no influence on the frictional pressure drop gradient, but impacts the time when the frictional pressure drop gradient reaches the maximum value; The frictional pressure drop gradient increases with the decrease of saturation temperature and pipe diameter; It is also found that the frictional pressure drop gradient increases rapidly at medium and low dryness, and the growth rate decreases and tends to be stable at high dryness, and then decreases slowly after reaching the maximum value.

Key words: microtube, R290, flow boiling, frictional pressure drop

收稿日期: 2021-01-19; 修订日期: 2021-03-06

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB470019); 南通市科技项目(JC2021061)

Fund-supported Project: General Project of Natural Science Research in Colleges and Universities of Jiangsu Province(20KJB470019); Science and Technology Project of Nantong(JC2021061)

作者简介: 姜林林(1990-), 男, 江苏南通人, 南通职业大学讲师。

符号说明

A —面积, m^2
 D —水力直径, m
 G —质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 g —重力加速度, m/s^2
 L —加热段长度, m
 h —焓, kJ/kg
 Q —热量, kW
 q_m —质量流量, kg/s
 q —热流密度, W/m^2
 x —干度
 α —空隙率
 ρ —密度, kg/m^3
 p —压力, kPa
 u —速度, m/s
 v —比容, m^3/kg
 σ —表面张力, N/cm
 Z —测点到测试段入口距离, m
下角标
 a —加速度
 F —摩擦压降
 pre —预热
 sul —过冷
 tp —两相
 v —气体
 l —液体
 lv —气液相对
 out —出口
 in —进口
 z —中间位置

引 言

基加利会议审议通过了氢氟烃制冷剂 (HFCs) 削减控制方案, 中国需在 2024 年冻结其生产量, 2029 年削减其消费量^[1]。但是中国经济的快速发展、城市化进程的不断推进、中南部对舒适性采暖的需求, 这些都促使制冷空调行业快速发展。因此, 中国在具体落实基加利修正案时面临着不小的挑战。在这样的背景下, 天然制冷剂受到普遍关注, 这其中 R290 化学性能稳定、传热特性优异, 但当充注量较大时易燃易爆, 安全性较低。而使用微细通道换热器时制冷剂充注量少, 很适合 R290 制冷系统的使用^[2], 但是对应的压降也会大幅增加。针对上述现象, 大量学者对此展开研究。姜林林等人^[3]研究认为, 热流密度的变化对摩擦压降梯度没有影响。汪胜等人^[4]研究认为, 摩擦压降梯度与质量流率成正比相关关系, 与饱和压力成负相关关系, 而与热流密度没有关系。HARIRCHAIAN T 等人^[5]和 CHOI K I

等人^[6]研究认为, 摩擦压降梯度与质量流率和热流密度成正相关关系, 与水力半径和饱和温度成负相关关系。对比分析上述 3 位学者的研究成果可知, 梯度随摩擦压降热流密度的变化规律研究结论不一致。本文将对 R290 在微细通道内摩擦压降特性进行定性和定量研究, 分析其变化规律。

1 实验原理

1.1 实验装置介绍

如图 1 所示, 柱塞计量泵把储液器中液态 R290 泵出, 在下游设置的套管式水冷过冷器中进行换热, 使其过冷度达到 5 ℃ 以上, 由科式流量计精确测得其流量, 通过精准控制柱塞计量泵的转速来调节 R290 液体流量。在实验段上游设置套管式水暖预热器, 且采用封闭式水循环系统, 水温由温控器控制, 通过精确调节水流量来控制实验段 R290 入口干度。由实验段末端排出的 R290 两相流进入到下游水冷冷凝器中进行冷凝换热, 冷凝下来的液体再回流到储液器中。表 1 和表 2 分别为实验测试工况和设备型号汇总。

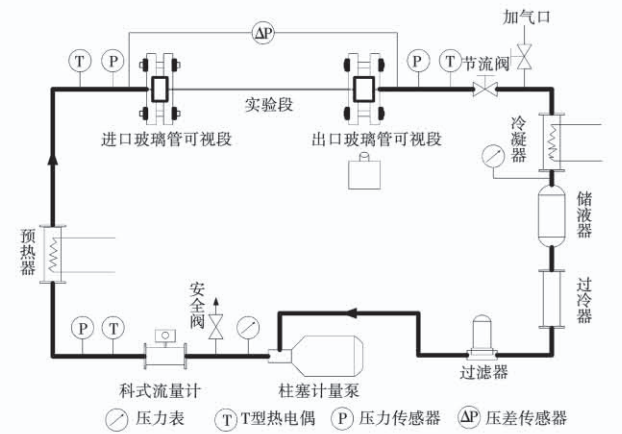


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

表 1 实验测试工况表

Tab. 1 Experimental measurement condition list

参 数	范 围
饱和温度/℃	- 10 ~ 25
质量流率/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	50 ~ 1 020
管径/mm	1 ~ 3
热流密度/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	1 ~ 70
测试干度	0 ~ 1

表 2 主要设备配置表

Tab.2 Configuration of main equipment

设 备	型 号	测量范围	精度等级
柱塞计量泵	JYZR75/16	1.25 L/min	/
质量流量计	MFM3081F-1.5E	1.5 kg/min	±0.1%
压力传感器	PTX5000	0~3 MPa	±0.04%
温度传感器	Probe Pt100	-50~100 ℃	±0.3
	SMD Pt100	-50~100 ℃	±0.3
数据采集仪	34970A	60 个通道	±0.004%
电功率计	WT330	0~600 V, 0~20 A	±0.2%

1.2 实验段设计

图 2 所示为光滑的不锈钢圆管实验段,在实验段中间部位 1 000 mm 位置上紧密均匀的缠绕有电阻丝,通过精准调节加载在电阻丝两端的输入电流可以无极调节实验段的加热量,用电功率计 WT330 直接测量加载在电阻丝上的直流电功率,此直流电功率即为实验段的电加热量。实验段外壁面温度采用贴片式铂电阻测量,呈 90°紧密均匀布置在实验段的外表面,实验段两端设置引压管接入精密压差传感器中测量总压降。

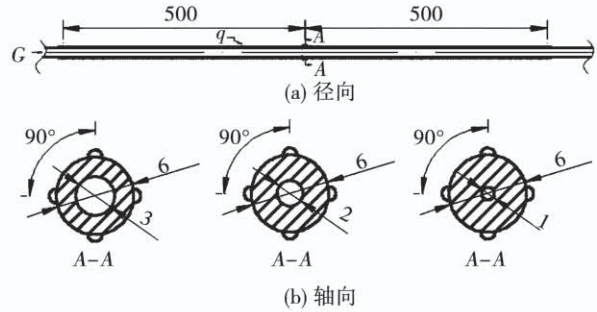


图 2 实验段贴片式铂电阻轴向和径向分布图 (mm)

Fig.2 Axial and radial distribution diagrams of SMD platinum resistance in experimental section (mm)

1.3 数据处理

目前,还没有直接测量干度的实验设备^[7]。通过设置在过冷器上的温度和压力传感器测得过冷状态下制冷剂焓值,通过设置在预热器进出口两端的温度传感器测得水温变化,通过水管路上的流量计测得水流量,通过热功率计 WT330 测得实验段加热量。利用热量平衡的原理计算出 R290 对应的焓值变化量,最后采用线性内插法计算出干度:

$$x_{in} = \frac{h_{pre} - h_l}{h_v - h_l} \tag{1}$$

$$h_{pre} = \frac{Q_{pre}}{q_m} + h_{sul} \tag{2}$$

$$x_z = \frac{h_z - h_l}{h_l - h_v} \tag{3}$$

$$h_z = h_{pre} + \frac{q\pi DL}{2q_m} \tag{4}$$

$$h_{out} = h_{pre} + \frac{q\pi DL}{q_m} \tag{5}$$

$$x_{out} = \frac{h_{out} - h_l}{h_v - h_l} \tag{6}$$

实验时微细圆管水平安装在系统中,所以重力压降可忽略不计。由于实验段有热量的加入,气液两相密度相差较大,管内工质整体流动速度必然增加,所以在换热过程中一定存在加速度压降。根据动量方程写出加速度压降表达式,并对其进行积分,最终获得加速度压降计算式:

$$\left(\frac{dp_a}{dZ}\right) = G^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{in} \right\} \tag{7}$$

FANG^[8]对空隙率 α 经典计算关联式(8)预测精度进行了对比研究,结果显示 THOME & HAJAL E^[9] 计算关联式预测精度最高,且适用性强,根据出口干度和间隙率可求得加速度压降,再代入式(9)中可得摩擦压降值。

$$\alpha = \frac{x}{\rho_v} \left[(1 + 0.12(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} \right) + \frac{1.18(1-x) [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0.25}}{G\rho_l^{0.5}} \right]^{-1} \tag{8}$$

$$\left(\frac{dp_F}{dZ}\right)_{ip} = \left(\frac{dp}{dZ}\right) - \left(\frac{dp_a}{dZ}\right) \tag{9}$$

1.4 误差分析

利用 VB 语言编写的数据采集系统内嵌了工况稳定判据,当判定工况稳定后便开始自动存储数据,数据采集周期为 10 s,采集时间为 3 min。根据所选仪器仪表精度等级,对干度和摩擦压降误差范围进行计算。通过计算得出摩擦压降误差范围为 2.7%~9.3%,干度误差范围为 1.2%~6.5%。

2 实验结果与分析

2.1 质量流率对摩擦压降梯度的影响

图 3 为 1 mm 管内饱和温度 0 ℃、热流密度 59.14 kW/m²、不同质量流率工况下摩擦压降梯度变化曲线图。结果显示,在同一管径下,质量流率增大时,摩擦压降梯度快速增大,且在干度较大工况下,摩擦压降梯度增大的幅度也会越大。因为质量流率的增大必然引起管内流体整体速度的提升,导致流体与管内壁面之间的摩擦作用增强。在质量流率和干度均较大时,微细圆管内容易形成并长时间保持为环状流,此时管内壁面与液体薄膜的接触面积和气液分界面接触面积均较大,所以摩擦压降梯度较大^[10]。

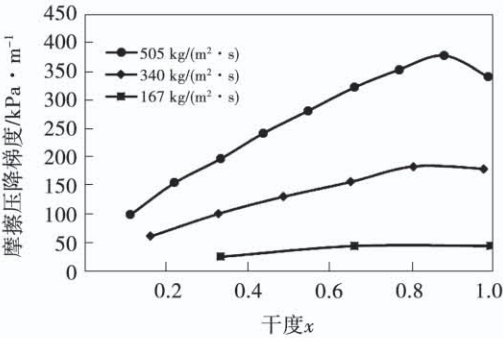


图 3 摩擦压降梯度随质量流率变化曲线图
Fig.3 Variation curves of frictional pressure drop gradient with mass flow rate

2.2 热流密度对摩擦压降的影响

图 4 为 3 mm 管内饱和温度为 5 ℃、质量流率为 100 kg/(m²·s)、不同热流密度工况下摩擦压降梯度变化曲线图。结果显示,热流密度值的变化对摩擦压降梯度没有影响。因为在相同工况下,热流密度变化对工质的物性、管内平均流速、空隙率以及流态都没有影响,所以摩擦压降梯度不变。但是热流密度会影响摩擦压降梯度达到最大值的时间。这是因为当热流密度增大时,管内液相工质更快向气相工质转化,气相工质挤压管底部沉积的液相工质向管内两侧延伸。当两侧液体薄膜在管顶部结合时,此时流态为环状流即中心为高速气流,四周为液体薄膜,液体薄膜与管内壁面和气液两相分界面接触面积都达到最大,所以摩擦作用增强,摩擦压降梯

度提前达到最大值^[11-12]。

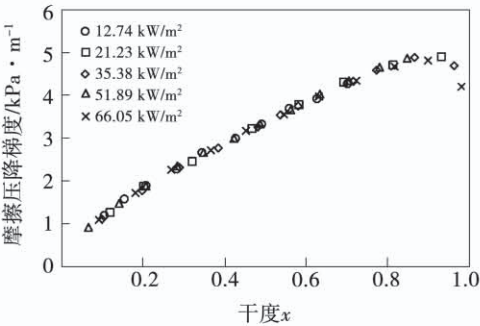


图 4 摩擦压降梯度随热流密度变化曲线图
Fig.4 Variation curves of frictional pressure drop gradient with heat flux density

2.3 管径对摩擦压降梯度的影响

图 5 为饱和温度 10 ℃、热流密度 40.94 kW/m²、质量流率 560 kg/(m²·s),不同管径工况下摩擦压降梯度变化曲线图。实验结果显示,换热管径越小,摩擦压降梯度越大,且增大的幅度也会增大。2 和 3 mm 管径摩擦压降值变化差别较小,当管径减小到 1 mm 时,微细通道内摩擦压降梯度增加较多,不同管径之间摩擦压降梯度增长幅度不同,且随着干度增大,增长幅度也明显增大^[13]。

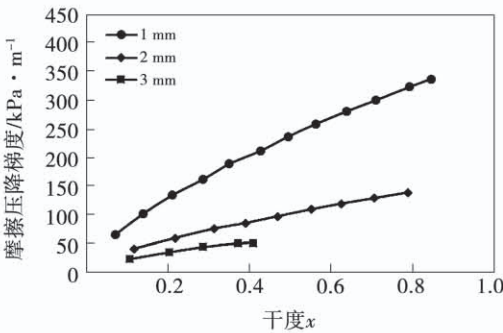


图 5 摩擦压降梯度随管径变化曲线图
Fig.5 Variation curves of frictional pressure drop gradient with pipe diameter

2.4 饱和温度变化对摩擦压降梯度的影响

图 6 为 3 mm 管内热流密度 35.38 kW/m²、质量流率 184 kg/(m²·s),不同饱和温度工况下摩擦压降梯度变化曲线图。实验结果显示,饱和温度越高,摩擦压降梯度越小。因为随着饱和温度增大表面张力减小,削弱了气液分界面上剪切力的作用,使得气液两相分界面上摩擦作用减弱;饱和温度增大还

会使得液体粘度降低,导致管内壁面液体薄膜变薄且稳定性降低,造成液体薄膜与内壁面之间的摩擦作用减弱,摩擦压降梯度减小。

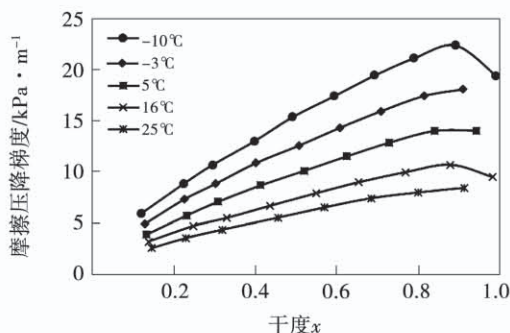


图6 摩擦压降梯度随饱和温度变化曲线图

Fig. 6 Variation curves of frictional pressure drop gradient with saturation temperature

2.5 干度对摩擦压降梯度的影响

上述实验结果表明,摩擦压降梯度在中低干度区域随着干度的增加而较快增加,而在高干度区域增速变小趋于零,当摩擦压降梯度达到最大值后逐渐减小。因为在换热初始阶段,管内流态以分层流或波动流为主,随着换热持续进行,干度逐渐增加,但是流态却立即转变为弹状流,管内壁面液体薄层内不断有大量气泡生成,在其扰动作用下摩擦压降梯度快速增加。此外,气相工质逐渐增多,对管内壁面附着的液体薄膜形成的挤压作用不断增强,也促使摩擦压降梯度快速增加。在较高干度区域,流态为稳定的环状流,加热壁面生成的气泡扰动作用逐渐减小,摩擦压降梯度增幅减小趋于平稳,最终达到最大值。当环状流末端区域开始出现局部干涸时,摩擦压降梯度开始逐渐减小,当流态向雾状流过渡时,气相变成了连续相,且速度较快,液体以滴状形式弥散在气相工质中流动,此时摩擦压降梯度会进一步减小。

3 结 论

对制冷剂 R290 在微细圆管内流动沸腾摩擦压降特性进行了理论分析和实验研究,结论如下:

(1) 质量流率的增大对摩擦压降值有极大的提升作用,且随着干度越大,提升作用更加明显;热流密度的变化不会对摩擦压降梯度值造成影响,但会

影响摩擦压降达到最大值的时间。

(2) 管径越小,摩擦压降梯度和增幅都明显增大;随着饱和温度的上升,摩擦压降梯度变小;摩擦压降梯度在中低干度区域较快增长,在高干度区域增长减缓趋于平稳直至达到最大值,随后逐渐减小。

参考文献:

- [1] 史琳,安青松. 基加利修正案生效后替代制冷剂的选择与对策思考[J]. 制冷与空调, 2019, 19(9): 50-58.
SHI Lin, AN Qing-song. Low GWP refrigerants options and countermeasures discussion after the entry into force of Kigali amendment [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(9): 50-58.
- [2] NGUYEN B, CHIEN, PHAM Q, et al. Boiling heat transfer of R32 CO₂ and R290 inside horizontal mini-channel [C]//Proceeding of the 8th International Conference on Applied Energy, Beijing, China, 2016.
- [3] 姜林林,柳建华,张良,等. 水平微细管内 CO₂ 流动沸腾压降特性[J]. 化工学报, 2017, 68(12): 4576-4584.
JIANG Lin-lin, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, et al. Flow boiling pressure drop characteristics of CO₂ in horizontal micro tube [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(12): 4576-4584.
- [4] 汪胜, 公茂琼, 陈高飞, 等. 水平管内丙烷两相流动摩擦压降实验研究[J]. 工程热物理论, 2013, 34(11): 2155-2158.
WANG Sheng, GONG Mao-qiong, CHEN Gao-fei, et al. Two-phase frictional pressure drop for propane in a horizontal tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 2155-2158.
- [5] HARIRCHIAN T, GARIMELLA S V. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15): 3724-3735.
- [6] CHOI K I, PAMITRAN A S, OH J T, et al. Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth mini-channels [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 837-845.
- [7] AGOSTINI B, THOME J R. Comparison of an extended database for flow boiling heat transfer coefficient in multi-microchannel elements with the three-zone models [C]// ECI Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Castelveccchio Pascoli, Italy, 2005: 25-30.
- [8] FANG X D. Review of correlations of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(8): 2017-2039.

[9]

THOME J R, EI H. Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes[C]//Proceeding of the First International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Kruger Park, South Africa, 2002; 182 – 188.

[10]

WANG S, GONG M Q, CHEN G F, et al. Two-phase heat transfer and pressure drop of propane during saturated flow boiling inside a horizontal tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 41: 200 – 209.

[11]

JIANG L L, LIU J H, ZHANG L, et al. Characteristics of heat transfer for CO₂ flow boiling at low temperature in mini-channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 2120 – 2129.

[12]

陆至羚, 柳建华, 张 良, 等. 微细通道内 CO₂ 沸腾换热与干涸特性[J]. 化工进展, 2015, 34(8): 2961 – 2966.
LU Zhi-ling, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, et al. Heat transfer and dry-out characteristics of CO₂ in mini-channel [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34 (8): 2961 – 2966.

[13]

SAISORN S, WONGWISES S. The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in circular micro-channels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(4): 454 – 462.

(刘 颖 编辑)

(上接第 74 页)

[22]

LIU J J, LIU Z C, LIU W. 3D numerical study on shell side heat transfer and flow characteristics of rod-baffle heat exchangers with spirally corrugated tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 89(3): 34 – 42.

[23]

AHN S W. Experimental studies on heat transfer in the annuli with corrugated inner tubes [J]. KSME International Journal, 2003, 17(8): 1226 – 1233.

[24]

邓 凯, 吴俐俊, 程惠尔, 等. 结构参数对高炉铸钢冷却壁温度及热应力分布的影响[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(4): 53 – 58.
DENG Kai, WU Li-jun, CHENG Hui-er, et al. Influence of structure parameters on steady highest temperature and thermal stress of BF cooling stove[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25 (4): 53 – 58.

(刘 颖 编辑)