

# 5 mm 水平强化管内 R410A/润滑油流动冷凝压降 实验研究

姜林林<sup>1</sup>, 吴清清<sup>2</sup>, 沈志华<sup>1</sup>

(1. 南通职业大学 电子信息工程学院, 江苏 南通 226500, 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**在质量流率  $200 \sim 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、干度  $0.1 \sim 0.9$ 、冷凝温度  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  及润滑油浓度  $0 \sim 5\%$  的工况范围内, 对 5 mm 水平强化管内 R410A/润滑油混合物流动冷凝压降特性进行了实验研究, 分析不同质量流率、干度和润滑油质量分数对冷凝压降特性的影响。实验结果表明: 摩擦压降随着质量流率和干度的增大而增大; 润滑油的存在对压降特性具有重要影响, 在中低干度区域摩擦压降和油影响因子随着润滑油浓度的增大而减小, 在高干度区域摩擦压降和油影响因子随着润滑油浓度的增大而增大。

**关键词:** R410A/润滑油; 水平强化管; 润滑油浓度; 摩擦压降

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.06.019

[引用本文格式] 姜林林, 吴清清, 沈志华. 5 mm 水平强化管内 R410A/润滑油流动冷凝压降实验研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 126-132. JIANG Lin-lin, WU Qing-qing, SHEN Zhi-hua. Experimental study on flow condensation pressure drop of R410A/lubricating oil in a 5 mm horizontally enhanced tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 126-132.

## Experimental Study on Flow Condensation Pressure Drop of R410A/Lubricating Oil in a 5mm Horizontally Enhanced Tube

JIANG Lin-lin<sup>1</sup>, WU Qing-qing<sup>2</sup>, SHEN Zhi-hua<sup>1</sup>

(1. School of Electric and Information Engineering Nantong Vocational University, Nantong, China, Post Code: 226500; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

**Abstract:** The experimental study on the flow condensation heat transfer of R410A/lubricating oil in a 5 mm horizontally enhanced tube was carried out to investigate the influences of various mass flow rate, vapor quality and lubricating oil concentration on the condensation pressure drop characteristics under the conditions of mass flow rate of  $200 - 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , vapor quality of  $0.1 - 0.9$ , condensation temperature of  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  and lubricating oil concentration of  $0 - 5\%$ . The experimental results show that the frictional pressure drop increases with the increase of mass flow rate and vapor quality; the presence of lubricating oil has an important influence on the pressure drop characteristics. In medium-low vapor quality area, the frictional pressure drop and lubricating oil influence factor decrease with increase of lubricating oil concentration. In high vapor quality area, the frictional pressure drop and oil influence factor increase with increase of lubricating oil concentration.

**Key words:** R410A/lubricating oil, horizontally enhanced tube, lubricating oil concentration, frictional pressure drop

## 引言

在传统蒸汽压缩式空调系统中,由于压缩机的使用使得系统循环时含有一定量的润滑油,其对冷凝器中压降特性有重要影响<sup>[1]</sup>。目前,国内外关于润滑油在冷凝过程中对压降特性影响的研究结论不太一致:润滑油的存在通常会增加压降,但在一些特定工况下,压降也会减小<sup>[2]</sup>。针对上述现象,一种解释认为润滑油的存在占据气相空泡份额,使得两相混合物密度增加,平均流速减小,导致压降减小<sup>[3]</sup>;另一种解释认为润滑油的存在会使混合物粘度在高干度工况下大大增加,增加了压降<sup>[4-5]</sup>。总体而言,不少文献对制冷剂/润滑油混合物在小管径(7 mm 以下)换热管内的流动冷凝压降特性进行了

研究,但是关于润滑油混入对冷凝器压降特性的影响的认识不太一致,对其定量测量的实验数据较少。针对上述现象,对制冷剂 R410A/润滑油在 5 mm 水平强化管内的流动冷凝压降进行实验研究,定性定量分析流动冷凝压降特性,并从机理上分析润滑油的存在对压降的影响规律,为换热器的设计研发提供理论依据和数据支持。

## 1 实验原理

### 1.1 实验装置

图 1 为实验系统原理图,实验系统主要由三部分组成,分别为 R410A 制冷循环系统、润滑油浓度调节循环系统及低温制冷机组。实验系统仪器仪表配置如表 1 所示,实验测试工况如表 2 所示。

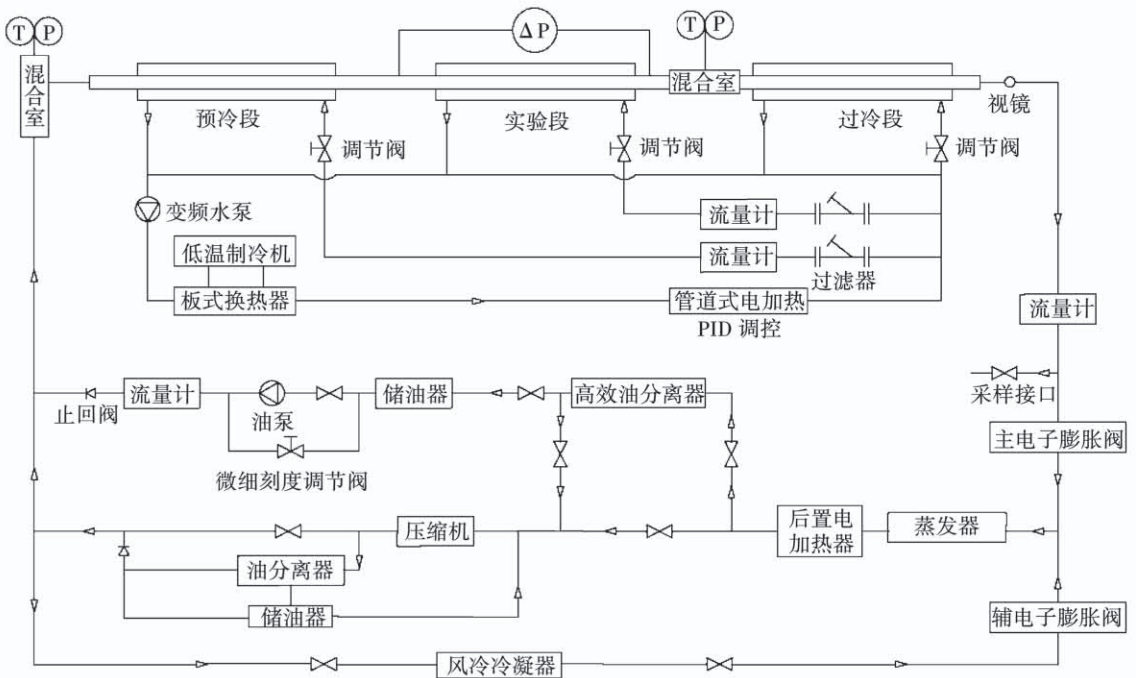


图 1 实验系统原理图

Fig.1 Schematic of test system

蒸发器中液态制冷剂 R410A 蒸发换热形成高干度蒸汽,夹杂着润滑油经后置电加热器加热进入高效油分离器中进行油气分离。分离后制冷剂蒸汽由变频压缩机吸入,排出的高压蒸汽经油分离器进行油气分离,分离出的润滑油进入储油器,依靠压差再回到压缩机中,而分离出来的高压蒸汽分为两路,一路直接进入风冷冷凝器中进行冷凝换热,另一路进入混合室中与润滑油充分混合后一起进入预冷器

中预冷。预冷器排出的 R410A/润滑油两相混合物进入实验段管侧,被壳侧冷却水进行冷凝换热,由实验段排出的低干度两相混合物进入过冷器中过冷,最终两路制冷剂分别经过主辅电子膨胀阀节流汇流后进入蒸发器进行蒸发换热,完成整个制冷循环。实验过程中制冷剂质量流率和冷凝压力通过调节压缩机频率和主辅电子膨胀阀开度进行控制以达到所要求的工况。

表1 实验系统仪器仪表配置

Tab.1 Main instruments of experimental system

参数	仪器仪表	测量范围	精度等级
温度	探针式铂电阻	-50 ~ 100 °C	±0.1 °C
	贴片式铂电阻		±0.05 °C
压力	绝压压力传感器	0 ~ 3 MPa	±0.1%
压差	压差传感器	0 ~ 0.1 MPa	±0.1%
制冷剂流量	质量流量计	0 ~ 2 kg/min	±0.12%
油流量计	体积流量计	0 ~ 200 mL/min	±0.1%
水流量(预冷段)	体积流量计	100 ~ 1 000 L/h	±0.5%
水流量(实验段)	体积流量计	25 ~ 250 L/h	±0.5%

表2 实验测试工况

Tab.2 Experimental test condition

测试工况	测量范围
实验段	外径 = 5 mm 内螺纹管
冷凝温度/°C	40
干度	0.1 ~ 0.9
质量流率/kg · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup>	200/300/400
油浓度/%	0/1/3/5

润滑油浓度调节循环系统主要由高效油分离器、储油器、变频油泵、微细刻度调节手阀、润滑油流量计以及相应的连接管路组成。高效油分离器分离出来的润滑油流入储油罐中,经油泵加压流过润滑油流量计,测得其流量,然后在混合室与制冷剂充分混合后沿着 R410A 制冷循环系统支路回到高效油分离器,完成润滑油浓度调节循环。实验过程中润滑油浓度控制依靠变频油泵和微细刻度调节手阀精确调节。

低温制冷机组的主要功能是给预冷器、实验段和过冷器提供恒温冷媒水。冷媒水温度通过 PID 控制器精确调节管道式电加热器热量来维持稳定;通过调节预冷器水回路上阀门的开度,控制实验段入口制冷剂 R410A/润滑油混合物干度;调节实验段水回路阀门的开度,控制实验段制冷剂 R410A/润滑油混合物干度变化量;调节过冷段水回路上阀门的开度,使制冷剂 R410A/润滑油混合物过冷,以保证下游制冷剂流量计能够精确测得流量。

## 1.2 实验段

实验段布置如图 2 所示,实验段内管为内螺纹铜管,外径 5 mm、长 1 600 mm。在铜管中间位置外壁上、下、左、右 4 个方向布置有 4 线制贴片式铂

电阻,实时监测铜管外壁面温度,在铜管前后两端布置引压管,测试总压差。实验段外管为 PVC 管,外径 25 mm、内径 20 mm。在 PVC 管两端三通处各布置三个探针式铂电阻,测量进出水温度,铂电阻相互之间与管轴线成 120° 夹角。在 PVC 管外均匀包裹着保温材料聚乙烯泡沫塑料,外面再覆盖有玻璃棉,尽量避免实验段与外界环境进行热交换,减小实验误差。图 3 为内螺纹管结构示意图,表 3 为内螺纹管结构参数。

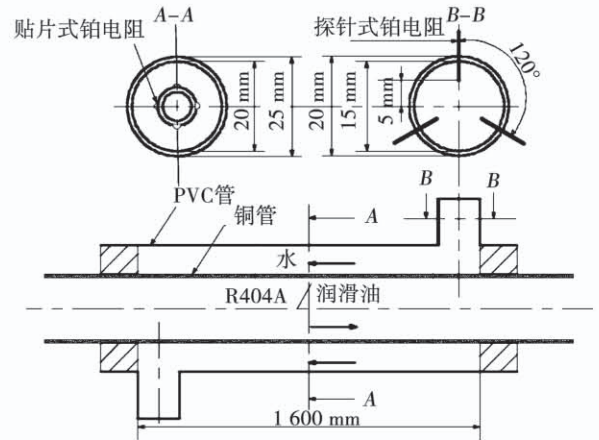


图2 实验段套管结构示意图

Fig.2 Schematic of casing tube of the test section

表3 内螺纹管结构参数

Tab.3 Dimensions of microfinned tube

结构参数	数值
外径 $D$ /mm	5
螺纹数	38
螺旋角 $\beta$ /(°)	18
齿顶角 $\alpha$ /(°)	40
底壁厚 $\delta_w$ /mm	0.2
齿高 $H_f$ /mm	0.14

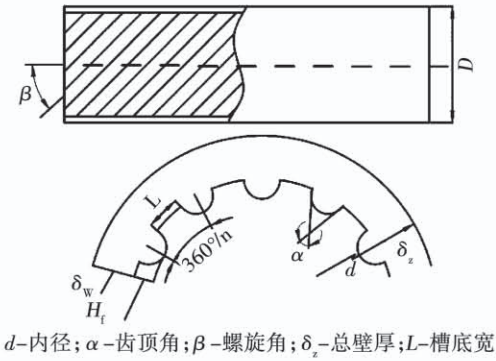


图3 内螺紋管结构

Fig. 3 Structure of microfined tube

## 2 实验数据处理

### 2.1 干度计算

在混合室中 R410A/润滑油混合物为过热状态, R410A 焓值由测得的温度、压力直接求得, 润滑油焓值由供应商提供的参数计算获得, R410A/润滑油混合物焓值计算式为:

$$h_{\text{mix,cha}} = h_{\text{r,cha}}(1 - w_{\text{no}}) + h_{\text{oil,cha}} w_{\text{no}} \quad (1)$$

$$w_{\text{no}} = \frac{m_{\text{oil}}}{m_{\text{r}} + m_{\text{oil}}} \quad (2)$$

式中:  $h_{\text{mix,cha}}$ —混合室中 R410A/润滑油混合物的焓值, kJ/kg;  $h_{\text{r,cha}}$ —混合室中制冷剂的焓值, kJ/kg;  $h_{\text{oil,cha}}$ —混合室中润滑油的焓值, kJ/kg;  $w_{\text{no}}$ —制冷剂中润滑油质量分数, 即名义润滑油浓度;  $m_{\text{oil}}$ —润滑油质量流量, kg/s;  $m_{\text{r}}$ —制冷剂质量流量, kg/s。

假设预冷器与外界没有热交换, 根据能量平衡方程计算出实验段入口 R410A/润滑油混合物焓值:

$$h_{\text{mix,in}} = h_{\text{mix,cha}} + \frac{Q_{\text{pre}}}{m_{\text{oil}} + m_{\text{r}}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{pre}} = m_{\text{w,pre}} c_{\text{p,w}} (T_{\text{w,out,pre}} - T_{\text{w,in,pre}}) \quad (4)$$

式中:  $h_{\text{mix,in}}$ —实验段入口 R410A/润滑油混合物焓值, kJ/kg;  $Q_{\text{pre}}$ —预冷器中换热量, kW;  $m_{\text{w,pre}}$ —预冷器在冷却水质量流量, kg/s;  $c_{\text{p,w}}$ —水的定压比容, kJ/(kg·K);  $T_{\text{w,in,pre}}$ 、 $T_{\text{w,out,pre}}$ —预冷器在冷却水进出口温度, K。

假设 R410A/润滑油混合物在流动冷凝过程中, 润滑油只存在于液相中<sup>[6]</sup>, 则 R410A/润滑油混合物焓值由三部分组成: 润滑油焓值、气相制冷剂焓值和液相制冷剂焓值<sup>[7]</sup>, 实验段入口焓值可以表

示为:

$$h_{\text{mix,in}} = h_{\text{oil,in}} w_{\text{no}} + x_{\text{in}} h_{\text{r,V,in}} + (1 - w_{\text{no}} - x_{\text{in}}) h_{\text{r,L,in}} \quad (5)$$

式中:  $h_{\text{oil,in}}$ —实验段入口润滑油的焓值;  $x_{\text{in}}$ —实验段入口 R410A/润滑油混合物干度;  $h_{\text{r,V,in}}$ —实验段入口气相制冷剂的焓值;  $h_{\text{r,L,in}}$ —实验段入口液相制冷剂的焓值。

由式(3)计算出  $h_{\text{mix,in}}$  代入式(5)中求得  $x_{\text{in}}$ , 实验段中间位置和出口干度由能量平衡方程分别求得:

$$x_{\text{mid}} = \frac{Q_{\text{c}}}{2 m_{\text{r}} h_{\text{r,LV}}} + x_{\text{in}} \quad (6)$$

$$x_{\text{out}} = \frac{Q_{\text{c}}}{m_{\text{r}} h_{\text{r,LV}}} + x_{\text{in}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{c}} = m_{\text{w,c}} c_{\text{p,w}} (T_{\text{w,out,c}} - T_{\text{w,in,c}}) \quad (8)$$

式中:  $x_{\text{mid}}$ 、 $x_{\text{out}}$ —实验段中间位置和出口位置干度;  $h_{\text{r,LV}}$ —该工况下制冷剂气化潜热, kJ/kg;  $Q_{\text{c}}$ —实验段冷凝水换热量, kW;  $m_{\text{w,c}}$ —实验段中冷却水质量流量, kg/s;  $T_{\text{w,in,c}}$ 、 $T_{\text{w,out,c}}$ —实验段中冷却水进出口温度, K。

### 2.2 摩擦压降计算

R410A/润滑油混合物在实验段流动的冷凝总压降  $\Delta p_t$  由三部分组成, 分别为摩擦压降  $\Delta p_f$ 、加速度压降  $\Delta p_a$  和重力压降  $\Delta p_g$ 。对于水平管两相流动冷凝换热而言, 重力压降可忽略为零, 实验中由于有外界热流密度的施加, 气液两相流动过程中存在相变, 导致流体动能的变化, 所以加速度压降必然产生<sup>[8]</sup>。因此摩擦压降可表示为:

$$\Delta p_f = \Delta p_t - \Delta p_a \quad (9)$$

$$\Delta p_a = G^2 \left\{ \left[ \frac{(1-x)^2}{\rho_{\text{mix,L}}(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_{\text{r,V}}}_{\text{out}} \right] - \left[ \frac{(1-x)^2}{\rho_{\text{mix,L}}(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_{\text{r,V}}}_{\text{out}} \right] \right\} \quad (10)$$

$$G = \frac{m_{\text{r}} + m_{\text{oil}}}{\pi r_{\text{w,i}}^2} \quad (11)$$

式中:  $G$ —质量流率, kg/(m<sup>2</sup>·s);  $\rho_{\text{mix,L}}$ —R410A/润滑油混合物液相密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{r,L}}$ —制冷剂液相密度, kg/m<sup>3</sup>;  $r_{\text{w,i}}$ —实验段内径半径, m。  $\alpha$ —空隙率, 根据相关文献研究<sup>[9]</sup>选择 Thome & El Hajal<sup>[10]</sup>提出的空隙率关联式, 该关联式在 Rouhani & Axelson<sup>[11]</sup>提出的漂移流模型基础上进行了更新, 在较大实验条件跨度下仍具有较高的精确度和适用性,

且参数少、易于计算,如式(12)所示。

$$\alpha = \frac{x}{\rho_{r,v}} \left[ (1 + 0.12(1 - x)) \left( \frac{x}{\rho_{r,v}} + \frac{1 - x}{\rho_{mix,L}} \right) + \frac{1.18(1 - x) \left[ g \sigma_{mix} (\rho_{mix,L} - \rho_{r,v}) \right]^{0.25}}{G \rho_{mix,L}^{0.5}} \right]^{-1} \quad (12)$$

式中:  $\rho_{r,v}$ —制冷剂气相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$ —重力加速度,取  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $\sigma_{mix}$ —R410A/润滑油混合物表面张力,  $\text{N}/\text{cm}$ 。

式中 R410A/润滑油混合物液相密度和表面张力计算式<sup>[12]</sup>为:

$$\rho_{mix,L} = \left( \frac{w_{lo}}{\rho_{oil}} + \frac{1 - w_{lo}}{\rho_{r,L}} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\sigma_{mix} = \sigma_r + (\sigma_{oil} - \sigma_r) w_{lo}^{0.51} \quad (14)$$

$$w_{lo} = \frac{w_{no}}{1 - x} \quad (15)$$

式中:  $w_{lo}$ —液相中油质量分数,即当地润滑油浓度;  $\rho_{oil}$ —润滑油密度;  $\rho_{r,L}$ —制冷剂液相密度;  $\sigma_r$ —制冷剂表面张力;  $\sigma_{oil}$ —润滑油表面张力。

### 2.3 不确定度分析

数据采集系统对数据的采集都是基于稳定工况进行的,并采用多次测量取平均值的方法减少随机误差。但是由于仪器仪表本身精度等级使得实验研究中一切测量参数均存在不确定度,像干度、空隙率等基于直接测量参数的二次计算量也具有不确定度,虽然总压降与压差传感器不确定度一致,但是由于加速度压降、干度以及空隙率的引入,摩擦压降测量精度降低。为了对实验结果分析获得较高概率的置信区间评定,依据技术规范《JJF1059 - 1999 测量不确定度评定与表示》对测量数据进行不确定度评定。基于表1实验仪器选型,按照不确定度计算公式可得摩擦压降不确定度范围为 2.7% ~ 9.3%,干度不确定度范围为 3.1% ~ 7.4%,空隙率不确定度范围为 1.8% ~ 7.4%。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 质量流率对摩擦压降的影响

如图4和图5所示,在质量流率 200 ~ 400  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  范围内对流动冷凝摩擦压降进行了实验研究。实验结果表明,在相同干度下,随着质量流率的增大,摩擦压降显著增大。分析原因:随着质量流率的增大,实验段管内平均流速增加,雷诺数增加,所以总的摩擦压降增加。在不同干度下,质量流率对摩擦压降的影响不同,随着干度的增加,质量流

率对摩擦压降的提升更为明显。这是因为随着干度和质量流率增加,管内流型容易形成中心具有高速气流的环状流并保持较长时间,且随着中心气流增多,对附着在内壁上薄液层的挤压作用增强<sup>[13]</sup>,液膜与内壁面之间的摩擦增加,导致摩擦压降增加较快。

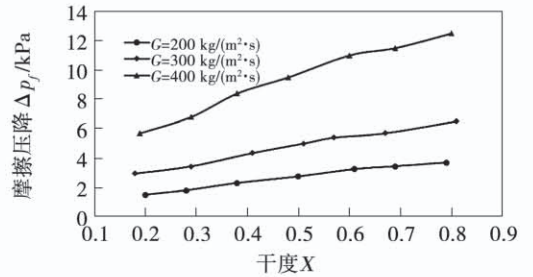


图4 冷凝温度 40 °C、润滑油浓度 0、不同质量流率时管内实测冷凝摩擦压降

Fig. 4 Experimental condensation pressure drop at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with lubricating oil concentration  $w_{no} = 0\%$  at different mass flow rate

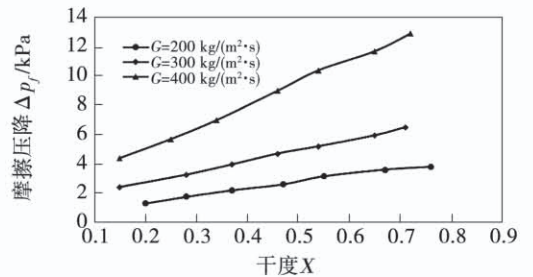


图5 冷凝温度 40 °C、润滑油浓度 3%、不同质量流率时管内实测冷凝摩擦压降

Fig. 5 Experimental condensation pressure drop at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with lubricating oil concentration  $w_{no} = 3\%$  at different mass flow rate

### 3.2 干度对摩擦压降的影响

如图4、图5所示,无论系统中是否含有润滑油,在同样质量流率工况下,随着干度的增大,摩擦压降均增大,这与管内流型转变有很大的关系。在高干度区域,管内平均流速较快,较易形成并保持较长时间的环状流,薄液膜与管内壁面接触面积、薄液膜和中心气流接触面积均达到最大,且中心气流对薄液膜的挤压作用增强,所以总的摩擦压降较大。而在低干度区域,管内沉积在底部的液相成分增多,平均流速降低,管内多为波状流或间歇流,管内壁面上部部分与气体直接接触,气液相分界面也减小,

所以总的摩擦压降减小。

### 3.3 润滑油平均浓度对摩擦压降的影响

图6为R410A/润滑油在质量流率为 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,摩擦压降随润滑油平均浓度变化的趋势图。实验结果表明:在中低干度区域,润滑油的存在会降低R410A/润滑油混合物摩擦压降,而在高干度区域,R410A/润滑油混合物的摩擦压降大于纯制冷剂R410A。分析原因:在中低干度区域,润滑油的存在会降低管内气体占据份额,使混合物整体密度上升,管内平均流速降低,摩擦压降减小。此外,较大的润滑油粘性也会抑制管内流型从波状流向间歇流转变,减小液相与内壁面的接触面积,从而导致摩擦压降降低<sup>[14]</sup>;而在高干度区域,润滑油在液相中占比较大,使得R410A/润滑油混合物粘度较大,较厚的油膜减小了流通面积,使混合物整体平均速度增加,从而导致摩擦压降增加。此外,选用互溶性较好的酯类油RB68EP会使环状流更早地形成并保持较长时间,摩擦压降增加<sup>[15]</sup>。

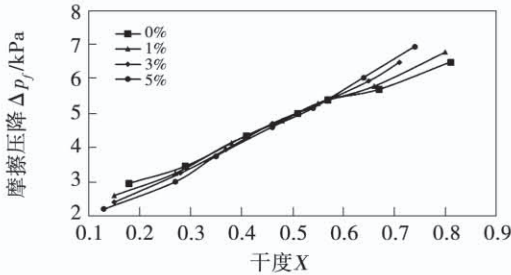


图6 冷凝温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、质量流率 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、不同润滑油浓度时管内实测冷凝摩擦压降

Fig. 6 Experimental condensation pressure drop at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with mass flow rate  $G = 300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at different lubricating oil concentration

为了定量评价润滑油对摩擦压降的影响,定义油影响因子PF为R410A/润滑油与纯制冷剂R410A流动冷凝摩擦压降之比,如图7~图9所示为油影响因子PF随干度变化趋势图。

通过数据分析可知:在中低干度区域时,油影响因子随着平均润滑油浓度增大而减小,而在高干度区域,油影响因子随着平均油浓度增大而增大。分析原因:在中低干度区域,润滑油的存在降低了气体占据份额,两相混合物平均密度增大,平均流速减小,导致摩擦压降减小;而在高干度区域,润滑油在液相制冷剂中占据份额较多,使得附着在内壁面薄

液层粘度、表面张力均增大,故摩擦压降随之增大。

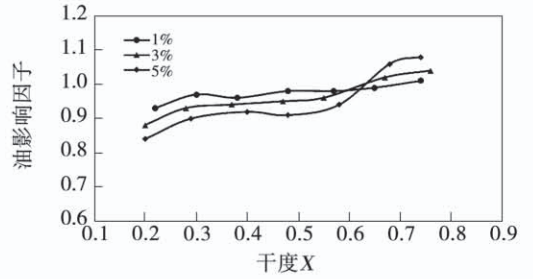


图7 冷凝温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、质量流率 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、不同润滑油浓度时油影响因子PF

Fig. 7 Oil influence factor at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with mass flow rate  $G = 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at different lubricating oil concentration

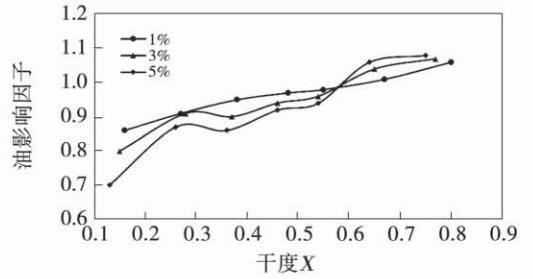


图8 冷凝温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、质量流率 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、不同润滑油浓度时油影响因子PF

Fig. 8 Oil influence factor at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with mass flow rate  $G = 300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at different lubricating oil concentration

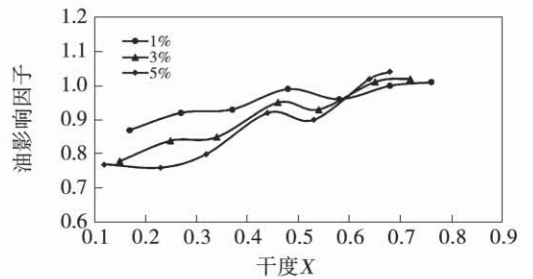


图9 冷凝温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、质量流率 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、不同润滑油浓度时油影响因子PF

Fig. 9 Oil influence factor at  $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  with mass flow rate  $G = 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at different lubricating oil concentration

随着干度的增大,油影响因子增大。这是因为在中低干度区域,管内流型以波状流、间歇流为主;在高干度区域,管内流型以环状流为主<sup>[16]</sup>。随着干

度的增加,润滑油在液相中占比越来越大,液相混合物平均粘度、平均表面张力均越来越大,对流型的影响也越来越大,所以油影响因子随着干度的增大而大。

## 4 结 论

对 R410A/润滑油混合物在 5 mm 水平强化管内冷凝压降特性进行了实验研究,分析质量流率、干度以及平均润滑油浓度对摩擦压降的影响,得出结论:

(1) 对于纯制冷剂 R410A 和 R410A/润滑油混合物,摩擦压降随着质量流率和干度的增大而增大,且随着干度的增大,质量流率对摩擦压降提升作用更为明显。

(2) 润滑油的存在对摩擦压降特性具有重要影响。在中低干度区域,润滑油的存在会降低摩擦压降,对应的油影响因子随着平均润滑油浓度增大而减小;在高干度区域,油的存在会增加摩擦压降值,对应的油影响因子随着平均润滑油浓度增大而增大。

## 参考文献:

[1] 任 凡,丁国良,黄翔超,等. R410A - 油混合物在 5mm 螺纹强化管内流动冷凝摩擦压降实验研究[J]. 化工学报,2008,59(2): 76 - 81.  
REN Fan, DING Guo-liang, HUANG Xiang-chao, et al. Experimental research of frictional performance of R410A-oil mixture flow condensation inside a 5mm internally spiral grooved enhanced tube [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(2): 76 - 81.

[2] LIU N, LI J M. Experimental study on condensation heat transfer of R32, R152a and R22 in horizontal mini-channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2015 90(11): 763 - 773.

[3] HOSSAIN M A, ONAKA Y, MIYARA A. Experimental study on condensation heat transfer and pressure drop in horizontal smooth tube for R1234ze(E), R32, and R410A [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 927 - 938.

[4] ZHANG H Y, LI J M, LIU N, et al. Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes [J]. International Journal of heat and mass transfer, 2012, 55(13/14): 3522 - 3532.

[5] BOHDAL T, CHARUN H, SIKORA M. Comparative investigations of the condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe mini-channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9/10): 1963 - 1974.

[6] THOME J R. Comprehensive thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricating oil mixture [J]. International Journal of HVAC & Research, 1995, 1(2): 110 - 126.

[7] KEDZIERSKI M A. The effect of lubricant concentration, miscibility, and viscosity on R134a pool boiling [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(4): 348 - 366.

[8] 姜林林,柳建华,张 良,等. 水平微细管内 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> in horizontal micro tube [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(12): 4576 - 4584.

[9] 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.

[10] 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.

[11] ROUHANI S Z, AXELSSON E. Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13(2): 383 - 393.

[12] 魏文建,丁国良,胡海涛,等. R410A 制冷剂和 POE VG68 润滑油混合物热物性模型 [J]. 制冷学报,2007,28(1): 37 - 44.  
WEI Wen-jian, DING Guo-liang, HU Hai-tao, et al. Models of thermodynamic and transport properties of POE VG68 and R410A/POE VG68 mixture [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(1): 37 - 44.

[13] JIANG L L, LIU J H, ZHANG L, et al. Characteristics of heat transfer for CO<sub>2</sub> flow boiling at low temperature in mini-channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 2120 - 2129.

[14] SHEN B, ECKHARD A G. A critical review of the influence of lubricants on the heat transfer and pressure drop of refrigerants-Part II Lubricant influence on condensation and pressure drop [J]. HVAC & Research, 2005, 11(4): 511 - 526.

[15] 胡海涛,黄翔超,丁国良,等. 润滑油对小管径强化管内 R410A 流动冷凝压降特性的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(4): 515 - 519.  
HU Hai-tao, HUANG Xiang-chao, DING Guo-liang, et al. The influence of oil on pressure drop of R410A flow condensation in small diameter microfin tube [J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2012, 46(4): 515 - 519.

[16] JIANG L L, LIU J H, ZHANG L, et al. A research on the dryout characteristics of CO<sub>2</sub>'s flow boiling heat transfer process in mini-channels [J]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale du Froid, 2017, 83: 131 - 142.