

## 微细通道内 R32、R1234ze(E) 及其混合工质 绝热摩擦压降的实验研究

刘 纳,董传点,袁秋阳,李雅宁,张晓暄,姬 昊,刘业毅

(青岛理工大学 环境与市政工程学院,青岛 266525)

**摘要:**通过实验研究了 R32、R1234ze(E)及其混合工质在微细通道内的绝热两相摩擦压降特性,探究了质量流速、干度、饱和温度以及混合工质质量比对微细通道内绝热流动两相摩擦压降的影响。研究表明:不论是单工质还是混合工质,绝热两相摩擦压降均随质量流速和干度的增加而增大,但在低干度区和高干度区增长比较缓慢;单工质和混合工质的绝热两相摩擦压降均随饱和温度的升高而下降;混合工质的绝热两相摩擦压降与 R32 相近。质量流速和干度对工质绝热两相摩擦压降变化影响显著,相对于质量流速和干度,饱和温度和混合工质质量比对绝热两相摩擦压降的变化影响较小。

**关键词:**微细通道;R32;R1234ze(E);混合工质;绝热流动;两相摩擦压降

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)06-0110-08

## Experimental study on the adiabatic frictional pressure drop of R32, R1234ze(E) and their mixed refrigerants in a minichannel

LIU Na, DONG Chuandian, YUAN Qiuyang, LI Yaning, ZHANG Xiaoxuan, JI Hao, LIU Yeyi  
(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** The adiabatic two-phase frictional pressure drop characteristics of R32, R1234ze(E) and their mixed refrigerants in a minichannel were investigated experimentally, and the influences of mass flux, vapor quality, saturation temperature and the mass ratio of the mixed refrigerants on the two-phase frictional pressure drop of the adiabatic flow in the minichannel were investigated. The findings indicate that the adiabatic two-phase friction pressure drop escalates with the rising of mass flux and vapor quality for both single and mixed refrigerants, but the escalation is slow in the low and high vapor quality regions; the adiabatic two-phase friction pressure drop for both single and mixed refrigerants diminishes as the saturation temperature rises. The adiabatic two-phase friction pressure drop of the mixed refrigerants closely resembles that of R32. The effect of mass flux and vapor quality on the change of adiabatic two-phase friction pressure drop of the refrigerants is significant, and the effect of saturation temperature and mixed refrigerants mass ratio on the change of adiabatic two-phase friction pressure drop is smaller compared with that of mass flux and va-

收稿日期:2024-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204039);山东省重点研发计划(2022CXPT051;2022RZB07055);山东省自然科学基金资助项目(ZR20220B046)

作者简介:刘 纳(1985—),女,山东济宁人。博士,副教授,主要从事微尺度传热传质和高效紧凑换热器等方面的研究。  
E-mail:liuna@qut.edu.cn

por quality.

**Key words:** minichannel; R32; R1234ze(E); mixed refrigerants; adiabatic flow; two-phase frictional pressure drop

目前单一制冷剂很难满足人们对制冷剂热力学、环保、物理化学性质、经济等多方面的要求<sup>[1-2]</sup>。非共沸制冷剂由于其温度滑移缩小了传热温差,使其制冷循环更接近理想制冷循环,制冷循环效率得以提高<sup>[3-4]</sup>。JAKOBS 等<sup>[5]</sup>通过研究发现非共沸混合物的温度滑移可以减少热交换器的火用损失,同时提高热泵系统的 COP(Coefficient of Performance, COP)。KOYAMA 等<sup>[6]</sup>为了提高 COP,采用汽化潜热大和 GWP(Global Warming Potential, GWP)低的 R32 进行混合,结果表明将 R32 作为第二组分添加到 R1234ze(E)中,可以改善 R1234ze(E)热泵系统的 COP。大量学者研究表明<sup>[7-10]</sup>,非共沸混合工质 R32/R1234ze(E)有效地结合了 R1234ze(E)的低 GWP、无毒、低可燃性和 R32 的高 COP 的优点,是最有希望替代 R410A 的工质之一,因此本文对非共沸混合工质 R32/R1234ze(E)进行实验研究。随着电子封装技术和微机械加工技术的迅速发展,许多新兴电子设备和机械元件越来越小型化和集成化<sup>[11]</sup>。尽管两相微细通道装置具有热效率高和热均匀性好的优点<sup>[12]</sup>,但它也有明显的缺点,特别是高压降<sup>[13-14]</sup>,因此工质在微细通道内的压降和换热特性研究同样重要。

已有大量学者<sup>[15-19]</sup>对 R32、R1234ze(E)在微细通道内的流动沸腾换热机理进行了研究。LI 等<sup>[19]</sup>对 R32 的流动沸腾换热以及压降特性进行研究,并与 R134a 进行对比,研究发现 R32 比 R134a 具有更高的流动沸腾换热系数和更低的绝热两相摩擦压降。BEDIAKOB 等<sup>[18]</sup>对 R1234ze(E)在高饱和温度下流动沸腾换热系数进行研究,研究表明:饱和温度对流动沸腾换热系数有显著影响,而质量速度对流动沸腾换热系数的影响不太明显。KONDOU 等<sup>[20]</sup>对混合工质 R32/R1234ze(E)流动沸腾换热系数进行研究,研究发现由于混合工质存在传质阻力,导致混合工质的流动沸腾换热系数小于单工质的流动沸腾换热系数。

综上所述,绝大部分学者都是针对其流动沸腾换热进行研究,对其压降的研究相对较少,对于非共沸制冷剂 R32/R1234ze(E)的压降研究更少。为了确保非共沸制冷剂 R32/R1234ze(E)在工程中的有效应用,对其在微细通道内两相压降特性及其机理进行研究是很有必要的。因此本文对 R32、R1234ze(E)及其混合工质的压降特性进行实验研究,研究结果对于进一步理解 R32、R1234ze(E)及其混合工质在微细通道内的两相摩擦压降特性具有重要意义,同时为系统的设计和改进提供理论指导。

## 1 实验系统及方法

### 1.1 实验系统

实验系统原理如图 1 所示。过冷状态的制冷剂从储液罐流经过滤器过滤掉杂质后再通过预冷器进行冷却,确保进入齿轮泵和流量计的制冷剂为液相,在磁力驱动齿轮泵的驱动下进入质量流量计测量流量,然后采用预热器通过调节加热功率将制冷剂加热到一定干度,气液两相的制冷剂流经绝热的微细通道实验段,测量得到不同实验工况时的绝热流动两相摩擦压降,在冷凝器内被冷却到过冷状态返回储液罐,完成整个循环。实验系统中所采用测试仪器的型号、量程和精度见表 1。

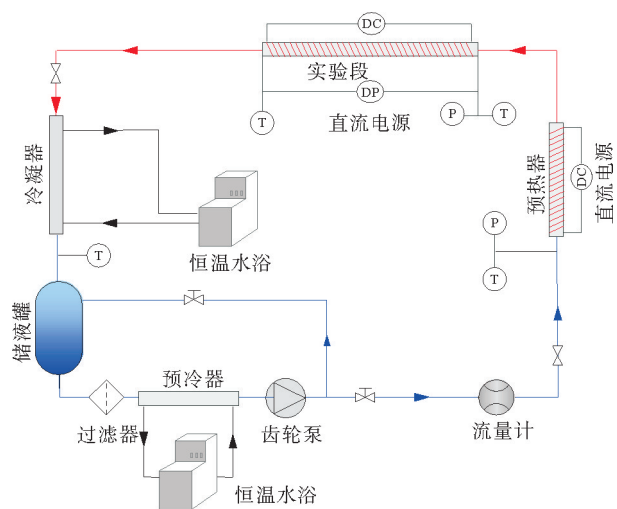


图 1 实验系统原理

P—压力传感器;T—温度传感器;DP—压差传感器;DC—直流电源

表1 测试仪器型号及性能参数

测试仪器	型号	量程	精度
流量计	DMF-1-1A	0~5 kg/h	±0.0375%
铂电阻温度传感器	Pt100	-200~650 °C	±0.1 °C
T型热电偶	铜-康铜	-200~350 °C	±0.5 °C
压力传感器	Trafag 8252.81.2515	0~4 MPa	±0.5%
压差变送器	ST700	0~100 kPa	±0.0375%
直流稳压电源	HSPY-100-05	0~100 V/0~5 A	±0.1V/±0.01A
预冷器恒温水浴	SDC-6	-5~100 °C	—
冷凝器恒温水浴	DC-1010	-10~100 °C	—
齿轮泵	3030-045-952277-5Z06	5~100 Hz	—
数据采集仪	Keysight DAQ970A	—	—

## 1.2 实验段

实验段结构参数见表2。制冷剂在实验段进出口的温度和压力分别用Pt100铂电阻温度传感器和压力传感器测量,在实验段进出口设置了一个高精度的压差变送器来测量实验段进出口的压差。

## 1.3 数据处理与不确定度分析

本文的实验数据通过在Excel中调用REFPROP中的子函数并编写公式进行处理。

实验段进口干度 $x_{in}$ 可由以下公式计算得出

$$x_{in} = \frac{Q_{pre} - m(h_{in} - h_{sub})}{mh_2} \quad (1)$$

式中: $Q_{pre}$ 为预热器的加热功率,kW; $h_{in}$ 为实验段进口处的比焓,kJ/kg; $h_{sub}$ 为预热器进口处的比焓,kJ/kg; $m$ 为制冷剂的质量流速,kg/s; $h_2$ 为制冷剂汽化潜热,kJ/kg。

压力梯度计算公式为

$$-\frac{dp}{dz} = \left(-\frac{dp_f}{dz}\right) \quad (2)$$

式中: $p$ 为总压降,kPa; $z$ 为测试管段长度,m; $p_f$ 为摩擦压降,kPa; $(-dp_f/dz)$ 为单位测试管段的摩擦压降,kPa/m。

实验参数的不确定度如表3所示。

## 1.4 单相验证实验

为了确保实验系统的准确性,进行绝热流动两相摩擦压降实验之前,开展了液相R32在实验段内的单相流动验证实验。采用Filonenko关联式对实验结果进行预测,Filonenko关联式的计算式为

$$f = \frac{1}{(1.82 \log Re - 1.64)^2} \quad (3)$$

单相流动验证实验测量了 $Re$ 在4000~8500范围内随着单相摩擦因子 $f$ 的变化情况。实验结果如图2所示,实验摩擦因子与Filonenko关联式的预测值间的偏差在±10%之内,说明通过实验系统得到的摩擦压降数据是准确可信的。

## 2 实验结果与讨论

本文进行了R32、R1234ze(E)及其混合工质在不同工况下的绝热摩擦压降研究。探究了干度 $x$ (0~

表2 实验段结构参数

参数	数值
管内径/mm	1.54
管外径/mm	3.04
管总长/mm	330.00
壁厚/mm	0.75

表3 实验参数不确定度分析

实验参数	不确定度/%
预热器加热电流	0.90
预热器加热电压	0.95
预热器加热功率	1.31
温度	0.13
压力	4.40
实验段压差	8.50
实验段干度	4.95
实验段摩擦压降	8.50
实验段压力梯度	8.50

1)、质量流速  $G$  ( $200 \sim 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、饱和温度  $t_s$  ( $22 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 以及混合工质的质量配比 ( $m_{\text{R32}} : m_{\text{R1234ze(E)}}$ ) 分别为  $30 : 70$ 、 $50 : 50$ 、 $70 : 30$ ) 对微细通道绝热两相摩擦压降的影响,并分析其变化机理。

## 2.1 质量流速和干度的影响

图 3 给出了 R32、R1234ze(E) 及其混合工质在微细通道内的绝热两相摩擦压降在饱和温度为  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  时随着质量流速和干度的变化趋势。从图 3 可知,无论是单工质还是混合工质,随着质量流速的增加,工质的绝热两相摩擦压降均增加。在低质量流速时,流体的绝热两相摩擦压降随着干度的变化增加缓慢,而在高质量流速时,随着干度的增加,流体的两相绝热摩擦压降增加较快,说明质量流速的增大增强了干度对绝热摩擦压降的影响。随着干度的增加,单工质和混合工质的两相绝热摩擦压降均增加,在低干度和高干度时,随着干度的增加绝热摩擦压降增幅较小,而在中干度时,随着干度的增加,绝热摩擦压降增幅较大。从图 3(c) 可以看出,当干度为  $0.5$  时,质量流速从  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  增加到  $300$  和  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,混合工质 ( $30 : 70$ ) 绝热两相摩擦压降从  $15.26 \text{ kPa}/\text{m}$  增加到  $34.57$  和  $63.49 \text{ kPa}/\text{m}$ ,增幅分别为  $126.5\%$  和  $316.1\%$ ,说明质量流速的增加对绝热摩擦压降的影响是显著的。由图 3(d) 可知混合工质 ( $50 : 50$ )、质量流速为  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、干度从  $0.09$  增长到  $0.89$  时,管内摩擦压降从  $9.52 \text{ kPa}/\text{m}$  增长到  $101.33 \text{ kPa}/\text{m}$ ,增长了  $964.39\%$ ,说明干度对管内绝热两相摩擦压降的影响是显著的。

质量流速对绝热两相摩擦压降的影响机理:一方面质量流速越大,气相与液相之间的流动速度差越大,气液两相之间剪切力增大;另一方面,随着流速的增加,增强了管内流体的波动性,流体分子在通道壁面附近的相互碰撞频率增加,导致黏性阻力增大,因此随着质量流速的增加,工质的绝热两相摩擦压降均增加。

干度对绝热两相摩擦压降的影响机理:随着干度的增加,气相占比越高,气相速度越大,液相速度越小,气液相之间速度差增大,气液两相之间剪切力增大,因此单工质和混合工质的两相绝热摩擦压降均增加。在低干度区,两相流型以弹状流和泡状流为主,此时气液相间接触面很小,因此在低干度区,接近于液相的单相流动。随着干度的增加,流体流型逐渐以环状流为主,此时气液两相间接触面较大,气液相间速度差增大,气相对液相的冲刷越强,剪切力越大。随着干度进一步增加,流型逐渐以雾状流为主,此时管内充满着气相制冷剂,气相、液相接触较少,管内壁基本只与气相制冷剂接触,此时管内绝热摩擦压降接近气相制冷剂的绝热摩擦压降,因此在低干度和高干度时,随着干度的增加绝热摩擦压降增幅较小。

干度对绝热两相摩擦压降的影响机理:随着干度的增加,气相占比越高,气相速度越大,液相速度越小,气液相之间速度差增大,气液两相之间剪切力增大,因此单工质和混合工质的两相绝热摩擦压降均增加。在低干度区,两相流型以弹状流和泡状流为主,此时气液相间接触面很小,因此在低干度区,接近于液相的单相流动。随着干度的增加,流体流型逐渐以环状流为主,此时气液两相间接触面较大,气液相间速度差增大,气相对液相的冲刷越强,剪切力越大。随着干度进一步增加,流型逐渐以雾状流为主,此时管内充满着气相制冷剂,气相、液相接触较少,管内壁基本只与气相制冷剂接触,此时管内绝热摩擦压降接近气相制冷剂的绝热摩擦压降,因此在低干度和高干度时,随着干度的增加绝热摩擦压降增幅较小。

## 2.2 饱和温度的影响

图 4 给出质量流速  $G = 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时 R32、R1234ze(E) 及其混合工质在微细通道管内的绝热两相摩擦压降随着饱和温度  $t_s$  的变化趋势。从图中可以看出,随着饱和温度的升高,单工质和混合工质的绝热两相摩擦压降逐渐降低。随着干度的增加,饱和温度对摩擦压降的影响越来越显著。混合工质 ( $30 : 70$ ) 在干度为  $0.5$ 、质量流速为  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、饱和温度为  $22$ 、 $24$  和  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  时,绝热摩擦压降分别为  $15.80$ 、 $15.26$  和  $14.14 \text{ kPa}/\text{m}$ ,随着饱和温度的升高绝热摩擦压降分别降低了  $3.42\%$  和  $10.51\%$ ,说明饱和温度的升高对微细通道内流动沸腾绝热摩擦压降的影响并不显著。

饱和温度对绝热两相摩擦压降的影响机理:饱和温度主要通过影响流体的热物性来影响管内绝热摩擦压降,一方面随着饱和温度的升高流体的液相黏度减小,导致液膜与管壁之间的摩擦阻力减少;另一方面随着饱和温度的升高,气相密度增大导致气相制冷剂流动速度减小,液相密度减小导致液相制冷剂流速增大,气液两相速度差变小,剪切力减小,制冷剂的两相绝热摩擦压降主要来自气相制冷剂,由于气相制冷剂流动速度减小,气相制冷剂的绝热摩擦压降减小,因此随着饱和温度的升高绝热摩擦压降减小。图 4(d)

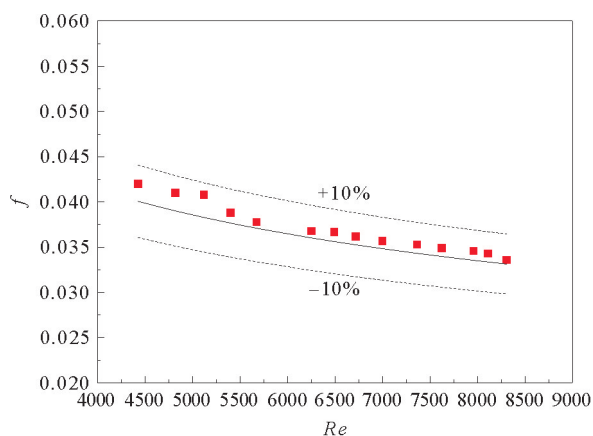


图 2 R32 单相流动实验结果  
■ 单相流动摩擦因子; — Filonenko 关联式预测值

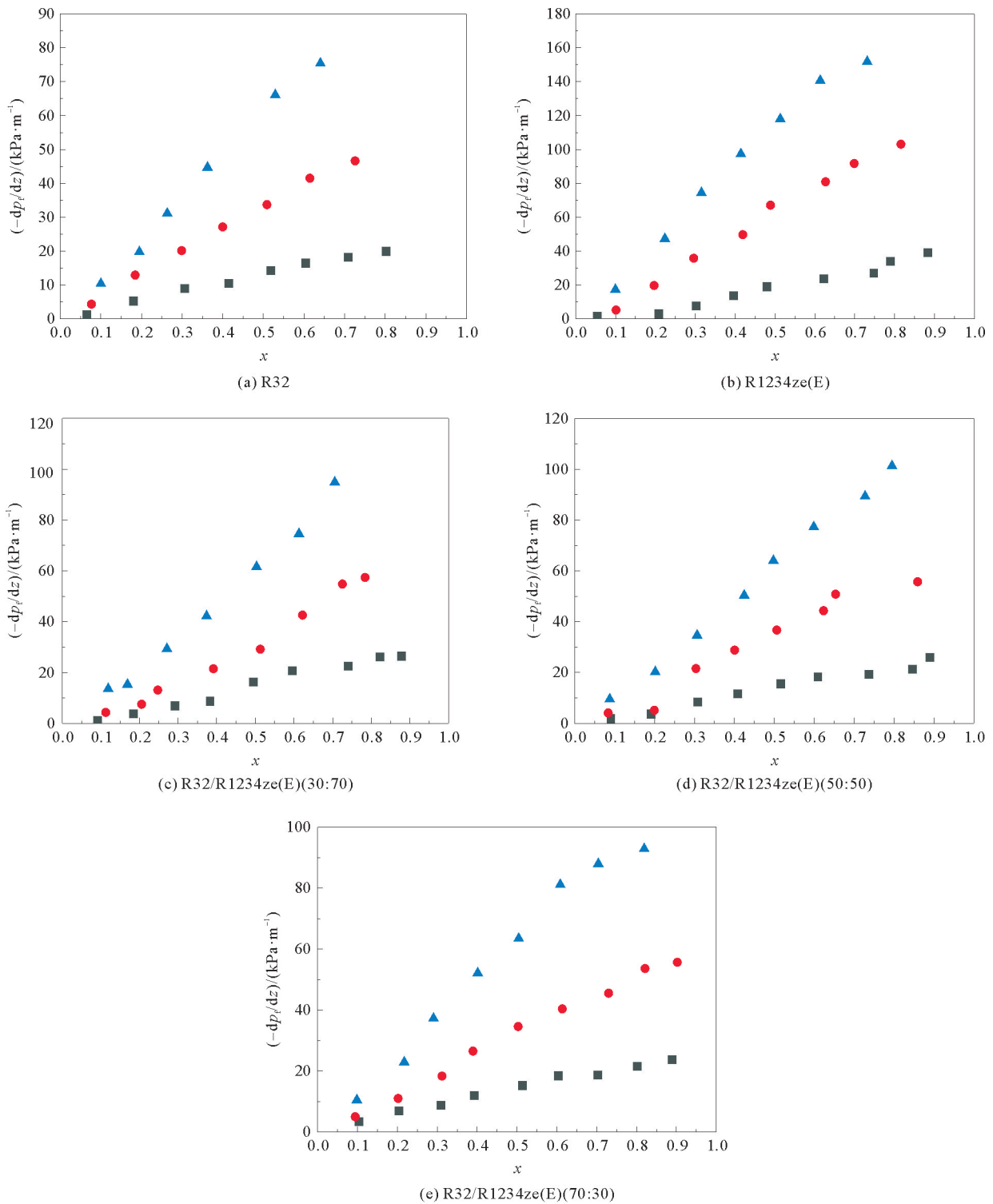


图3 质量流速和干度对R32、R1234ze(E)及其混合工质的绝热两相摩擦压降的影响  
 ■  $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; ●  $G=300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; ▲  $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

显示,混合工质(50:50)在干度为0.1时,饱和温度对绝热压降的影响并不符合上述规律,这是因为在低干度时,流体多为泡状流,此时气泡很不稳定,导致测量误差较大。饱和温度升高时,气相制冷剂黏度的减小幅度大于液相制冷剂黏度的减小幅度,由于干度的增加,气相制冷剂质量分数增加,液相制冷剂质量分数减小,因此随着干度的增加,绝热两相摩擦压降随着饱和温度的减小越来越显著。饱和温度主要靠影响流体热物性进而影响两相流的摩擦压降,而饱和温度对流体的物性影响较小,因此饱和温度的升高对微细

通道内流动沸腾绝热摩擦压降的影响并不显著。

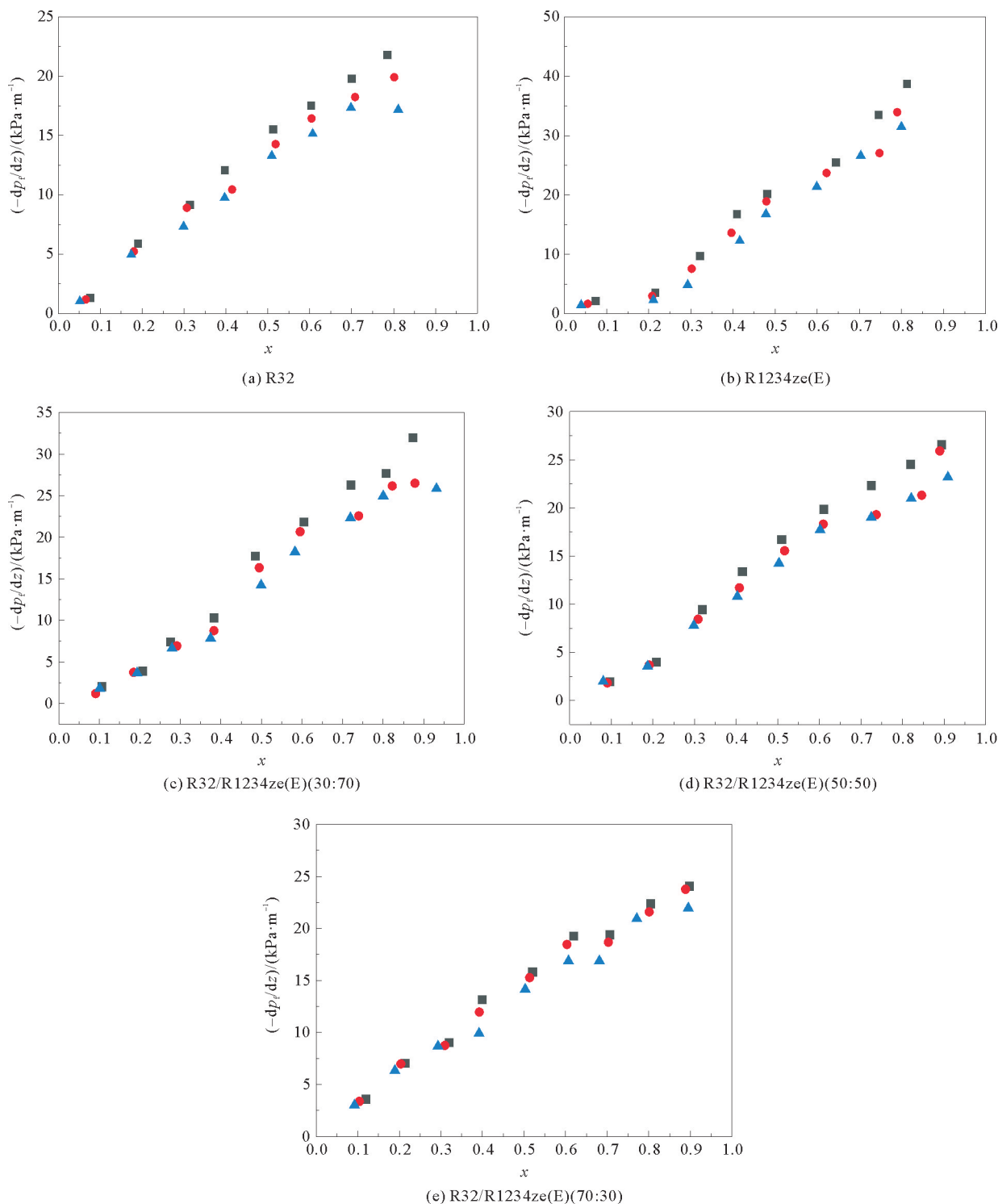


图 4 饱和温度对R32、R1234ze(E)及其混合工质的绝热两相摩擦压降的影响  
 ■  $t_s=22\text{ }^\circ\text{C}$ ; ●  $t_s=24\text{ }^\circ\text{C}$ ; ▲  $t_s=26\text{ }^\circ\text{C}$

### 2.3 混合工质组分的影响

图 5 给出饱和温度为  $24\text{ }^\circ\text{C}$ 、质量流速分别为  $200, 300, 400\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, R32/R1234ze(E) 混合工质的绝热两相摩擦压降随着组分配比的变化趋势。从图中可以看出 R1234ze(E) 在微细通道内的绝热摩擦压降明显大于 R32 的, 在低干度时, 不同组分绝热摩擦压降出现交叉, 对于非共沸混合工质, 可以看出 3

种不同组分的混合工质摩擦压降基本一致,从图 5(b)和图 5(c)可以看出混合工质绝热摩擦压降与 R32 的相近。根据图 5 (a)可知,在干度为 0.3、饱和温度为 24 °C、质量流速为 200 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,混合工质中 R1234ze(E)组分配比从 30%增加到 50%时,绝热摩擦压降分别为 8.75、8.44 kPa/m,绝热摩擦压降降低了 3.5%。

组分对绝热两相摩擦压降的影响机理:在相同的实验工况下,R1234ze(E)的液体黏度比 R32 高 76%,导致 R1234ze(E)的流动摩擦阻力更大,另一个原因是由于 R1234ze(E)的液相密度比 R32 高 16%,气相密度比 R32 低 82%,R1234ze(E)的密度差更大,进而导致 R1234ze(E)的两相之间速度差更大,进而增大了流动阻力,因此 R1234ze(E)在微细通道内的绝热摩擦压降大于 R32 的。在低干度时,流体处于泡状流或者弹状流前期,气泡很不稳定,导致测量误差大,因此在低干度时不同组分绝热摩擦压降出现交叉。随着 R1234ze(E)的增加,液相黏度增加而气相黏度减小,导致液相流体与壁面之间摩擦力增大,气相流体与壁面摩擦力减小,同时气液相密度差增大,从而导致气液相速度差增大,气液相摩擦阻力增大。由于混合工质存在附加传质阻力,导致混合工质气液界面剪切力减小,从而降低了混合工质摩擦阻力。随着 R1234ze(E)质量比的增加,气相流体和传质阻力降低的摩擦阻力与液相流体和气液相速度差增加的摩擦阻力相抵消,因此混合工质摩擦压降接近 R32 的。HUANG 等<sup>[21]</sup>对非共沸制冷剂 R134a/R245fa 的研究中得出了与本文同样的结论,由于不同组分的混合工质的热物性差距不大,因此其不同组分的混合工质绝热摩擦压降类似。

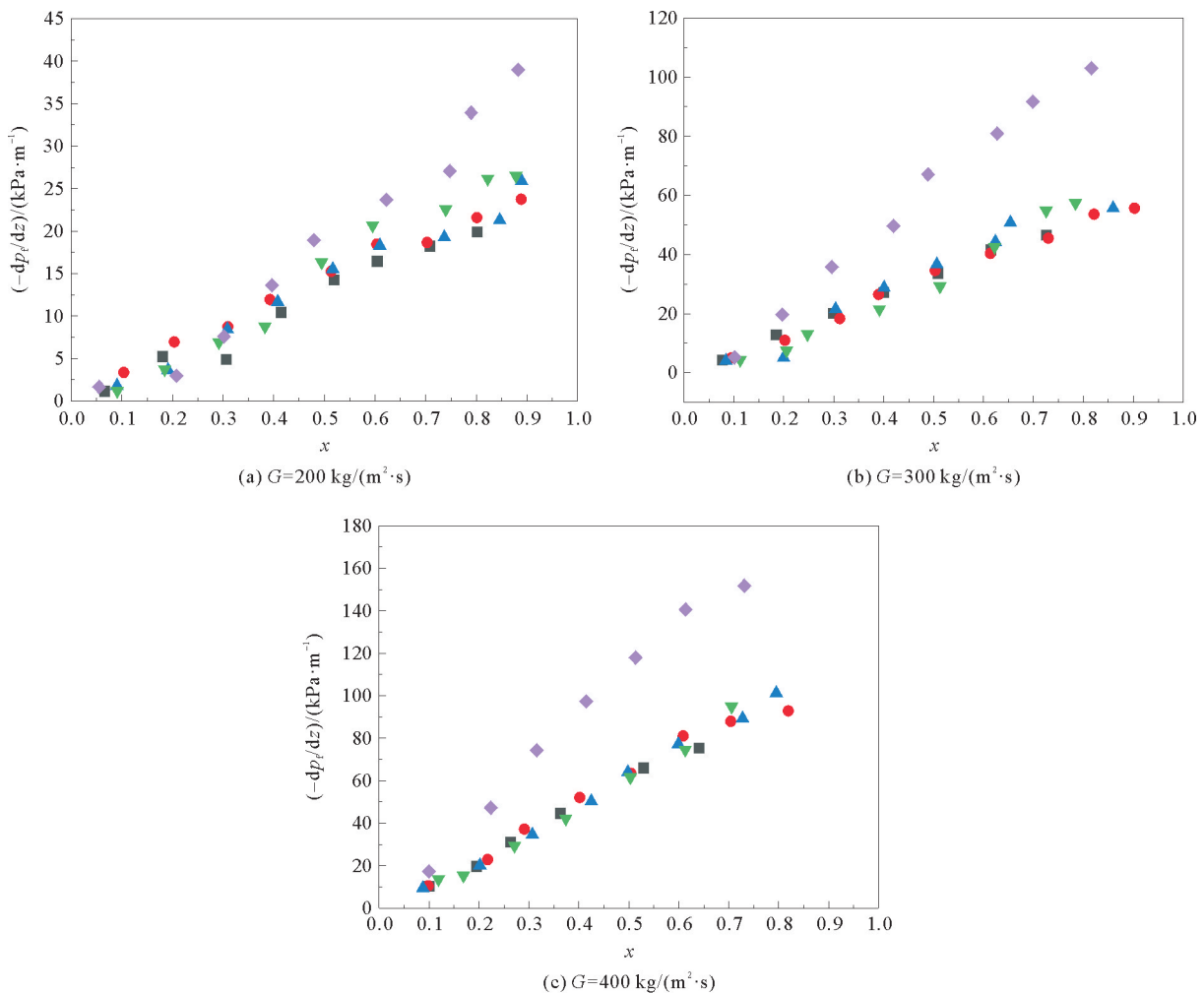


图 5 组分配比对 R32/R1234ze(E) 混合工质绝热两相摩擦压降的影响

■ R32; ● R32/R1234ze(E)70:30; ▲ R32/R1234ze(E)50:50; ▼ R32/R1234ze(E)30:70; ◆ R1234ze(E)

### 3 结论

本文开展了 R32、R1234ze(E)及其混合工质在水平微细通道内的绝热两相摩擦压降实验研究,深入探究了干度、质量流速、饱和温度以及混合工质的质量对比对微细通道绝热两相摩擦压降的影响,得出了以下结论:

1) 单工质和混合工质的绝热两相摩擦压降均随质量流速的增加而增加,这是因为随着质量流速的增加,导致气液两相之间剪切力增大,同时增强了管内流体的波动性。

2) 单工质和混合工质的绝热两相摩擦压降随着干度的变化趋势大致相同,随着干度的增加,两相摩擦压降增加,这是因为随着干度的增加,气液相之间速度差增大,气液两相之间剪切力增大。在低干度和高干度时,两相摩擦压降增长速度较慢,而在中干度区增长较快,这是由于不同干度下流型不同导致。

3) 单工质和混合工质的绝热两相摩擦压降随着饱和温度的变化趋势大致相同,随着饱和温度的升高,两相摩擦压降降低。相对于干度和质量流速,饱和温度对绝热两相摩擦压降的影响并不显著,这是因为饱和温度对流体的热物性影响较小。

4) 在高质量流速时,混合工质的绝热两相摩擦压降基本与 R32 相同,这是因为随着混合工质 R1234ze(E)质量比的增加,气相流体和传质阻力降低的摩擦阻力与液相流体和气液相速度差增加的摩擦阻力相抵消。由于 R1234ze(E)的液体黏度大,因此单工质 R1234ze(E)在微细通道内的绝热摩擦压降明显大于单工质 R32 的绝热摩擦压降。相对于干度和质量流速,混合工质的组分对绝热两相摩擦压降的影响并不显著。

#### 参考文献(References):

- [1] MODI A, HAGLIND F. A review of recent research on the use of zeotropic mixtures in power generation systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 603-626.
- [2] SUN D H, WANG C, LIU Z K, et al. Experimental and simulation study on R134a/RE170/R152a mixture as R134a replacement in a moderately-high temperature heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121643.
- [3] CHEN Q, YAN G, YU J L. Experimental research on the concentration distribution characteristics of dual-temperature refrigeration system using R290/R600a based on separation condensation[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 131: 244-253.
- [4] YAN G, HU H, YU J L. Performance evaluation on an internal auto-cascade refrigeration cycle with mixture refrigerant R290/R600a[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 994-1000.
- [5] JAKOBS R, KRUSE H. The use of non-azeotropic refrigerant mixtures in heat pumps for energy saving[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1979, 2(1): 29-32.
- [6] KOYAMA S, TAKATA N, FUKUDA S. Drop-in experiments on heat pump cycle using HFO-1234ze(E) and its mixtures with HFC-32[C]//The 23rd IIR International Congress of Refrigeration. Prague: Chalmers Publication Library, 2010: 2514.
- [7] LIU J Y, LIU Y, LIU C, et al. Experimental and theoretical study on thermal stability of mixture R1234ze(E)/R32 in organic rankine cycle[J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(4): 1595-1613.
- [8] DENG X X, LIU Y, LIU C. Evaporation behaviors of R32/R1234ze(E) mixtures on a copper surface using molecular dynamics simulations[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 138: 106400.
- [9] DAI Y D, LI J Y, LIAO Y, et al. Research on the thermodynamic properties of binary mixtures containing R1234ze(E) based on Helmholtz model[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2023, 573: 113874.
- [10] ZUO C, WANG B L, SHI W X, et al. Numerical research on R32/R1234ze(E) air source heat pump under variable mass concentration[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 82: 1-10.
- [11] SHEN Y T, PAN Y H, CHEN H, et al. Experimental study of embedded manifold staggered pin-fin microchannel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 226: 125488.
- [12] CHEN X Y, HOU Y, CHEN S T, et al. Characteristics of frictional pressure drop of two-phase nitrogen flow in horizontal smooth mini channels in diabatic/adiabatic conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162(C): 114312.
- [13] KIM S M, KIM J, MUDAWAR I. Flow condensation in parallel micro-channels Part 1: Experimental results and assessment of pressure drop correlations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(4): 971-983.

(下转第 144 页)