

文章编号:0253-4339(2020)02-0093-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.02.093

## 微肋管内流动冷凝压降关联式的研究

申道明<sup>1,2</sup> 刘亚萍<sup>1</sup> 桂超<sup>1</sup> 夏锦红<sup>1</sup> 薛松涛<sup>2,3</sup>

(1 新乡学院土木工程与建筑学院 新乡 453000; 2 同济大学结构工程与防灾研究所 上海 200092;  
3 东北工业大学建筑学科 仙台 982-8577)

**摘要** 本文进行了微肋管内 R134a 两相流动冷凝换热实验,分析了实验工况、微肋管结构参数对管内压降的影响,并使用关联式对管内压降进行了预测。实验结果显示:管内压降与质量速率、肋片螺旋角呈正相关,与冷凝温度、冷却水雷诺数  $Re$  呈负相关;Cavallini et al 关联式、Haraguchi et al 关联式、Pierre 关联式可实现对管内压降的高精度预测,预测平均误差均在 17% 以内,而 Goto et al 关联式高估了管内压降;参考 Goto et al 关联式拟合机理,基于微肋管内 R134a 压降实验数据,对气相/液相折算系数  $\Phi_v/\Phi_l$  与参数  $X_{tt}$  之间关系进行重新拟合,进而提出适用于预测管内压降的关联式,经验证:新关联式预测误差在  $\pm 30%$  以内,预测平均误差小于 10%。

**关键词** 微肋管;流动冷凝;压降;关联式

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1;TB657.5;TK124

文献标识码:A

## Research on Correlation of the Flow Condensation Pressure Drop inside the Micro-fin Tube

Shen Daoming<sup>1,2</sup> Liu Yaping<sup>1</sup> Gui Chao<sup>1</sup> Xia Jinhong<sup>1</sup> Xue Songtao<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang, 453000, China; 2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 3. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, 982-8577, Japan)

**Abstract** The two-phase flow-condensation heat transfer experiment of R134a inside the micro-fin tube was operated on the test bench, the influence of working conditions and micro-fin tube structural parameters on the pressure drop was studied, and its correlations were also used to predict the pressure drop inside the tube in this study. The experimental results show that the pressure drop is positively correlated with mass flux and fin helical angle; however, they are negatively correlated with condensation temperature and  $Re$  of cooling water. Correlations of Cavallini et al., Haraguchi et al., and Pierre have good predictive effects on the pressure drop with an average prediction error of less than 17%, while the correlation Goto et al. overestimates the pressure drop. Based on the pressure drop experimental data of R134a, the functional relationship between  $\Phi_v/\Phi_l$  and  $X_{tt}$  was fitted again and referred to the computing mechanism of Goto et al. for correlation. Then, a new correlation for predicting the pressure drop inside the tube is put forward, and statistic test shows that the prediction error of the new correlation is within  $\pm 30%$  and the average prediction error is less than 10%.

**Keywords** micro-fin tube; flow condensation; pressure drop; correlation

应用于制冷空调领域的微肋管因特有的壁面结构,在增强管内湍流度强化换热效果的同时,还通过拖拽等形式增加管内流体的流动阻力,造成额外的流动功耗<sup>[1]</sup>。为明确壁面结构对管内压降的恶化机制,很多学者进行了大量实验研究和理论分析。

吴晓敏等<sup>[2-3]</sup>通过管内 R22 流动冷凝换热实验

分析了微肋管结构参数、实验工况对管内换热及压降的影响;王学东等<sup>[4]</sup>基于实验数据,对压降关联式与管内压降的适配性进行了研究。而对于管内压降的理论研究,国外学者所做工作相对较多。M. Soliman 等<sup>[5-8]</sup>提出了光管内压降预测关联式,而 M. A. Kedzierski 等<sup>[9-10]</sup>在对管内两相流流动机制做出合理假设的同时,基于实验数据对关联式进行拟合,提出

新的微肋管压降预测关联式。

本文对质量速率、冷凝温度、冷却水雷诺数  $Re$ 、强化管结构参数等变量对管内压降的影响进行分析,使用分相模型、均相模型关联式对管内压降进行预测,并从理论模型拟合机理上对关联式预测精度进行分析,最后,基于实验数据,开发新型关联式,为高效冷凝换热器的研发提供实验支持和理论依据。

## 1 管内流动冷凝换热实验台

管内流动冷凝换热实验主要在单管管内换热实验台上运行,原理如图 1 所示。实验台主要由工质测试系统、冷却水系统、低温冷源系统、加热系统、控制测量系统等组成。实验运行时,在制冷剂泵的驱动下液相制冷剂由储液器流出,经质量流量计流向加热器,在加热器内通过调节加热器电压、电流改变加热器内对制冷剂的加热量,设定制冷剂在实验段进口处状态。制冷剂在实验段内与冷却水换热完成冷凝实验,可通过视镜观察实验段进出口处制冷剂状态。制冷剂在冷凝器内进一步过冷,进入储液器,进行下一循环。

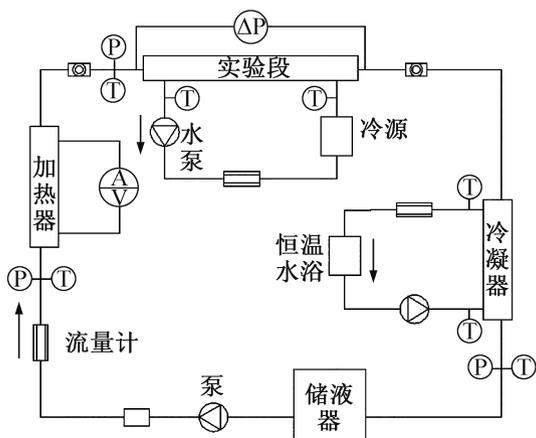


图 1 管内流动冷凝换热实验原理

Fig.1 Principle of the flow condensation heat transfer inside the tube

冷却水循环主要由水泵、恒温水浴、电加热器、电磁流量计等部件组成,通过调节冷却水温度、循环流量调节实验段换热量,实验中选用冷却水雷诺数  $Re$  表征冷却水换热特性。低温冷源系统对系统内制冷剂进行过冷处理,在冷凝器内带走系统内制冷剂的散热量,维持整个系统的热量平衡。实验段为一套管式换热器,制冷剂在管内流动,冷却水在环形管内流动,两者呈逆流,如图 2 所示。实验段内有效换热区域为 2.00 m,测试管选用内螺纹铜管,具体结构参数如表 1 所示。

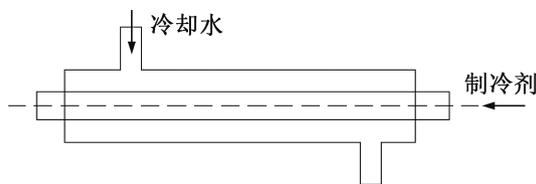


图 2 实验段换热原理

Fig.2 Principle of the heat transfer in the test section

表 1 内螺纹管结构参数

Tab.1 Structural parameters of internally ribbed tube

管型	1#	2#
螺旋角/(°)	18	28
肋高/mm	0.23	0.23
肋数	60	60
齿顶角/(°)	24.5	24.5
齿距/mm	0.4	0.4
槽宽/mm	0.2	0.2

实验选用 Pt100 铂电阻测量实验段制冷剂/冷却水温度,测量精度为 0.1 °C;量程为 0~3 500 kPa、精度为 0.1 级的德鲁克 GE5072 型压力变送器测量实验段冷凝压力;由 RHM03 传感器与 RHE14 变送器组成的 RHEONIKE 型质量流量计测量制冷剂流量,测量精度为 0.1 级;控制-显示一体型电磁流量计测量冷却水流量,测量精度为 0.5 级。实验段压降由压降变送器直接测量得到,因此,压差变送器的设备精度与压降的测量精度密切相关,选用 EJA110A 型高性能差压变送器对实验段压差进行直接测量,量程为 -100~100 kPa,测量精度为  $\pm 0.05\%$ 。

实验设定工况为:冷凝温度为 35、40 和 45 °C,测试水  $Re$  为 10 000 和 14 000,质量速率为 400~900  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,制冷剂在实验段进出口干度保持在 0.95~0.85、0.15~0.05。选用 R134a 为测试工质,实验工况下物性参数如表 2 所示。为排除热电偶信号线对冷却水的扰动,实验并未对换热管壁温进行测量。实验中,冷凝换热过程可视为恒热流换热。

## 2 理论计算

冷凝实验中,管内两相流干度、流速沿轴向方向逐渐降低。此外,实验段水平布置,根据管内两相流压降产生机理,管内两相流重力压降可忽略不计,即管内总压降主要包括摩擦压降、加速压降两部分<sup>[11]</sup>。其中,摩擦压降主要由管内气相流与管内壁之间摩擦压降、管内液膜与管内壁之间摩擦压降、管内气液界

表 2 实验工况下 R134a 物性参数

Tab.2 Properties of R134a under the working conditions

参数	数值		
温度/℃	35	40	45
压力/MPa	0.887 0	1.016 6	1.159 9
液体密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 167.5	1 146.7	1 125.1
气体密度/(kg/m <sup>3</sup> )	43.42	50.09	57.66
液体黏度×10 <sup>-4</sup> /(Pa·s)	1.72	1.61	1.51
气体黏度/(Pa·s)	12.1	12.4	12.6

面摩擦压降 3 部分组成,由于摩擦压降组成成分较为复杂,无法用公式直接计算,因此可通过式(1)计算得到:

$$\Delta p_f = \Delta p_{exp} - \Delta p_{de} \quad (1)$$

$$\Delta p_{de} = \left[ \frac{G^2 x^2}{\rho_v \phi} + \frac{G^2 (1-x)^2}{\rho_l (1-\phi)^2} \right]_{x=x_{out}} - \left[ \frac{G^2 x^2}{\rho_v \phi} + \frac{G^2 (1-x)^2}{\rho_l (1-\phi)^2} \right]_{x=x_{in}} \quad (2)$$

L. P. M. Colombo 等<sup>[12]</sup>研究发现管内两相流压降中摩擦压降占比约为 90%,因此研究实验变量对管内总压降的影响时,可主要通过其对摩擦压降的影响进行分析。

关联式对摩擦压降进行计算时,诸多学者常用一些专门定义的系数乘以相对应的单相摩擦压降梯度,这些系数称为“折算系数”。压降关联式拟合机理主要分为两大类:分相模型和均相模型,其中,均相模型把管内两相流视为一种均匀混合介质,其物性参数是相应两相流物性参数的平均值<sup>[11]</sup>,即:

$$dp_f/dz = \rho_m^2 \lambda / (2D) \quad (3)$$

若以等质量速率工况下纯液相流动压降为计算基准,即:

$$(dp_f/dz)_{l_0} = (\lambda_{l_0} G^2 v) / (2D) \quad (4)$$

则全液相折算系数  $\Phi_{l_0}$  为:

$$\Phi_{l_0}^2 = (dp_f/dz) / (dp_f/dz)_{l_0} \quad (5)$$

分相模型假设<sup>[13]</sup>:1)气液两相之间无相互作用,气相压降与液相压降相等,且沿径向方向无静压差;2)液相所占管道体积和气相所占管道体积之和等于管道总体积。根据以上假设,各相压降彼此相等,即:

$$dp_f/dz = dp_{fl}/dz = dp_{fv}/dz \quad (6)$$

其中,液相单独流过同一管道流动摩擦压降为:

$$(dp_f/dz)_l = (\lambda_l / D) (G^2 (1-x)^2 v' / 2) \quad (7)$$

液相折算系数为  $\Phi_l$ :

$$\Phi_l^2 = 1 + C / X_u + 1 / X_u^2 \quad (8)$$

式中,参数  $C$  的取值与管内两相流流态、微肋管结构尺寸等参数密切相关。很多学者<sup>[14-15]</sup>基于实验数据对参数  $C$  的取值规则进行了定义,旨在提高关联式预测精度,扩大其适用范围。而对微肋管,肋片的存在对管内流体流动机制影响很大,因此在确定折算因子计算式时,需把肋片对管内流体流动机制的影响考虑在内。

### 3 实验变量对管内压降的影响

实验主要对实验工况、测试管结构参数对管内压降的影响进行分析,因实验设备的局限性,主要选择的实验变量有质量速率、冷凝温度、测试水雷诺数  $Re$ 、肋片螺旋角。

质量速率为 400~900 kg/(m<sup>2</sup>·s)、冷凝温度为 35、40 和 45 ℃,冷却水雷诺数  $Re$  为 10 000 和 14 000 的实验工况下,18°内螺纹管内 R134a 流动冷凝压降随实验工况的变化如图 3 所示。

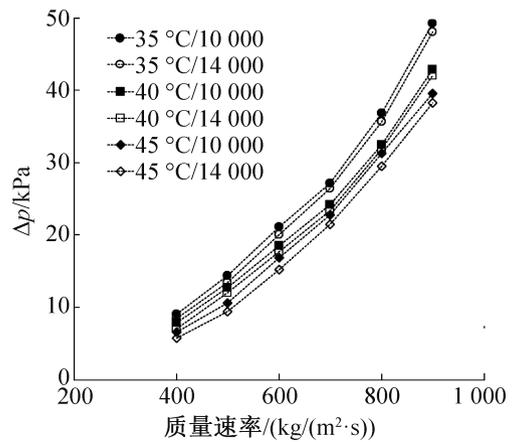


图 3 实验工况对管内压降的影响

Fig.3 The influence of the test conditions on the pressure drop inside the tube

由图 3 可知:1)管内压降随质量速率的增加而增大。质量速率每增加 100 kg/(m<sup>2</sup>·s),管内压降增加范围为 4.02~10.16 kPa,即随着质量速率的增加,压降的增加幅度越大。制冷剂在测试管进出口速度差随质量速率的增加而增大,即管内两相流加速压降随着质量速率的增加而增大;管内气液相速度差均随质量速率的增加而增大,而气液相密度的差异到气液相速度差的增加,两者分别导致管内液膜与内壁之间摩擦压降和气液界面之间摩擦压降的增大。

2)管内压降随冷凝温度的升高而减小。冷凝温度主要通过改变制冷剂物性来影响管内压降。由表 1 可知:当冷凝温度由 35 ℃升至 45 ℃时,管内液相 R134a 黏度由 1.72×10<sup>-4</sup>降至 1.51×10<sup>-4</sup>,导致管内液

膜与内壁之间摩擦压降随冷凝温度的升高而减小;此外,R134a 气相密度随温度的升高而增大,液相密度随温度的升高而减小,即管内加速压降随冷凝温度的升高而减小,均导致管内压降随着冷凝温度的升高而减小。

3)管内压降随测试水  $Re$  的增大而减小。环形管内测试水换热系数随着测试水  $Re$  的增大而增大,为满足管内换热要求,实验操作中,在增大测试水  $Re$  的同时降低换热温差,即管内液膜温度梯度减小,使管内液膜与内壁之间摩擦压降随着测试水  $Re$  的增大而减小。但管内压降受测试水  $Re$  的影响较小,测试水  $Re$  每增大 4 000,管内压降降低幅度约为 0.86 ~ 1.37 kPa,降低幅度约为 3.06%~9.8%。

质量速率为 400 ~ 900  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、冷凝温度为 35、40 和 45  $^{\circ}\text{C}$ 、冷却水雷诺数  $Re$  为 10 000 的实验工况下,内螺纹管内 R134a 流动冷凝压降随内螺纹螺旋角的变化如图 4 所示,由图可知:管内压降随着内螺纹螺旋角的增加而增大,增加幅度在 1.05 ~ 3.46 kPa 范围内,增加比重在 2.5%~7.5%以内,内螺纹肋片主要通过增加管内壁液膜与内壁之间摩擦压降来影响管内压降梯度,且液膜厚度高于肋片高度。液膜内冷凝液主要有两种流动形式,分别为高于肋片的轴向运行和低于肋高的周向运动,而管内液膜周向流速均随内螺纹螺旋角的增加而增大,即内螺纹螺旋角越大则内螺纹对管内流体流动功耗的阻碍效果越大。

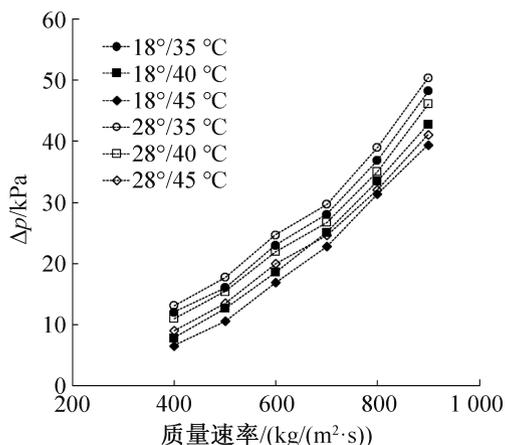


图 4 内螺纹螺旋角对管内压降的影响

Fig.4 The influence of the helical angle on the pressure drop inside the tube

## 4 关联式对管内压降的预测

### 4.1 关联式预测

实验选用 Cavallini et al 关联式<sup>[16]</sup>、Haraguchi et al 关联式<sup>[17]</sup>和 Goto et al 关联式<sup>[18]</sup>3 个分相模型关

联式和 Pierre 关联式<sup>[19]</sup>1 个均相模型关联式对管内压降特性进行预测,预测结果显示:

Cavallini et al 关联式充分考虑肋高、肋基直径、肋片螺旋角等微肋管结构对管内流体流动机制的影响,首先提出当量粗糙度的概念用于表征肋片对管内壁粗糙度的促进效果。虽然 Cavallini et al 关联式是基于内螺纹管的压降实验数据而改进的 Friedel 关联式,但 Cavallini et al 关联式明显高估了 94% 的管内压降,特别是对于 28 $^{\circ}$ 微肋管,即 Cavallini et al 关联式预测精度受肋片结构影响较大,其预测值与压降实验值之间误差范围为 -12.2%~39.37%,两者的平均误差为 12.71%,如图 5 所示。

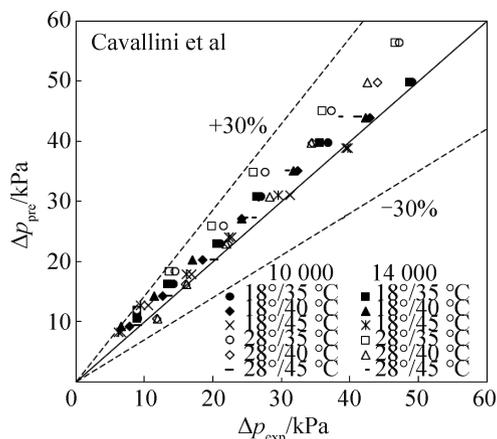


图 5 Cavallini et al 关联式对管内压降的预测

Fig.5 Prediction of the pressure drop inside the tube by the Cavallini et al correlation

Haraguchi et al 关联式对管内压降同样表现出较好的预测效果,且关联式预测效果受微肋管结构参数、实验工况等实验变量的影响较小,关联式预测值与压降实验值之间误差范围为 -32.41%~21.32%,两者的平均误差为 -1.92%,如图 6 所示。Haraguchi et al 关联式是基于微肋管内 R134a、R123、R22 流动冷凝压降实验数据拟合而出,微肋管结构参数与本实验测试管相似,且压降测试工质均为 R134a,可忽略制冷剂物性对关联式预测精度的干扰。

Goto et al 关联式是基于人字齿管内 R410A 的流动冷凝压降数据拟合的,根据微肋管内流体流动压降实验对比发现:人字齿管内流体流动压降大于微肋管内流体流动压降,Goto et al 关联式可实现对管内压降实现合理预测,其预测值大于压降实验值。Goto et al 关联式高估了管内压降,实验工况对关联式预测精度的影响较小,关联式预测值与压降实验值之间误差范围为 0.95%~81.17%,两者的平均误差为 42.64%,如图 7 所示。

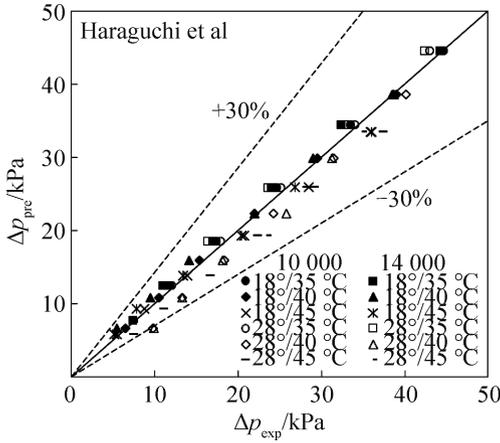


图 6 Haraguchi et al 关联式对管内压降的预测

Fig.6 Prediction of the pressure drop inside the tube by the Haraguchi et al correlation

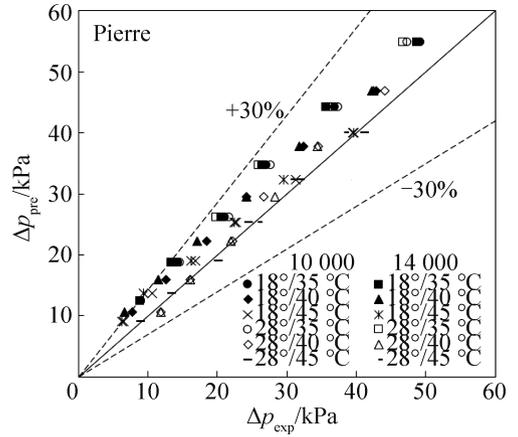


图 8 Pierre 关联式对管内压降的预测

Fig.8 Prediction of the pressure drop inside the tube by the Pierre correlation

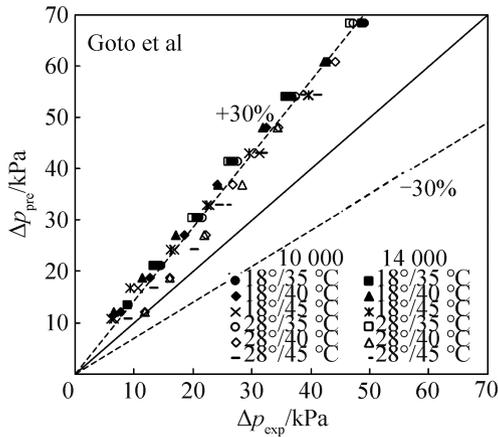


图 7 Goto et al 关联式对管内压降的预测

Fig.7 Prediction of the pressure drop inside the tube by the Goto et al correlation

Pierre 关联式是基于水平光管内 R12 的压降数据拟合而成的,因其计算式结构简单、预测精度高而得到广泛应用。在对微肋管内压降进行预测时选用微肋管水力直径代替光管内径,其两相摩擦系数  $f_{TP}$  计算式<sup>[20]</sup>为:

$$f_{TP} = 0.053 (K_f / Re)^{0.25} \quad (9)$$

Pierre 关联式高估了管内压降,且实验工况、微肋管结构参数对关联式预测精度影响很大,但关联式预测偏差较小,关联式预测值与压降实验值之间误差范围为 -10.81% ~ 60.09%,两者的平均误差为 16.98%,如图 8 所示。小于 17% 的平均预测误差。Cavallini et al 关联式、Haraguchi et al 关联式、Pierre 关联式较好的预测效果在证实关联式预测精度高的同时也证实了压降实验数据的高精确性,进而证实了实验台测试结果的可靠性。

## 5 新关联式的研究

由于管内两相流气液相流动较为明确、两相混合效果较差,因此在研究管内两相流压降关联式时选用分相模型作为理论依据,即假定管内两相流压降与管内单相压降之间存在倍率关系,分别定义为气相/液相折算系数  $\Phi_v / \Phi_l$ ,其中:

气相折算系数  $\Phi_v$ :

$$\Phi_v = \sqrt{(dp_l / dz) / (dp_v / dz)} = aX_{II}^m + bX_{II}^n + c \quad (10)$$

液相折算系数  $\Phi_l$ :

$$\Phi_l = \sqrt{(dp_l / dz) / (dp_l / dz)} = aX_{II}^m + bX_{II}^n + c \quad (11)$$

气相摩擦压降 ( $dp_v / dz$ ):

$$dp_v / dz = 2f_v G^2 x^2 / (\rho_v d) \quad (12)$$

液相摩擦压降 ( $dp_l / dz$ ):

$$dp_l / dz = 2f_l G^2 (1-x)^2 / (\rho_l d) \quad (13)$$

研究新关联式的指导思想为:参考 Goto et al 关联式拟合机理,假定气相/液相折算系数  $\Phi_v / \Phi_l$  仅是 Lockhart-Martinelli 参数  $X_{II}$  的函数,基于本文提供的内螺纹管内 R134a 两相流动冷凝压降实验数据,对  $\Phi_v / \Phi_l$  与参数  $X_{II}$  之间的关系进行拟合,并以管内两相流中液相/气相摩擦压降为计算基准,最终获得可高精度预测内螺纹管内压降的关联式。

新关联式的核心在于确定气相/液相折算系数  $\Phi_v / \Phi_l$  与参数  $X_{II}$  之间的关系,即明确系数  $a, b, c, m, n$  的取值,具体求解过程为:首选确定管内两相摩擦压降实验值与管内单相压降计算值之间的关系,即明确气相/液相折算系数  $\Phi_v / \Phi_l$  的取值,然后对实验工况下参数  $X_{II}$  的取值进行计算,最后对气相/液相折算

系数  $\Phi_v/\Phi_l$  和参数  $X_{ii}$  之间的关系进行拟合计算, 拟合计算使用迭代算法, 当偏离效果小于 10% 时说明计算公式有效, 最终获得计算式为:

新关联式气相折算系数  $\Phi_v$ :

$$\Phi_v^2 = 3.94X_{ii}^{-1.58} - 22.43X_{ii}^{-0.79} + 33.23 \quad (14)$$

新关联式液相折算系数  $\Phi_l$ :

$$\Phi_l^2 = 2.44X_{ii}^{-3.3} - 37.42X_{ii}^{-1.65} + 175.2 \quad (15)$$

为校核新关联式的预测效果, 分别使用式(14)、式(15)对内螺纹管内 R134a 两相冷凝压降特性进行预测, 预测结果如图 9 所示, 对于气相预测模型和液相预测模型, 新关联式计算值与压降实验值之间偏差受饱和温度、质量速率、内螺纹螺旋角等变量的影响较小, 计算值与实验值之间偏差均在  $\pm 30\%$  以内, 两者的平均误差分别为  $-8.79\%$  和  $-7.85\%$ 。较小的预测误差及新关联式计算值与实验值之间较好的吻合效果, 均可说明新关联式预测结果的可靠性。

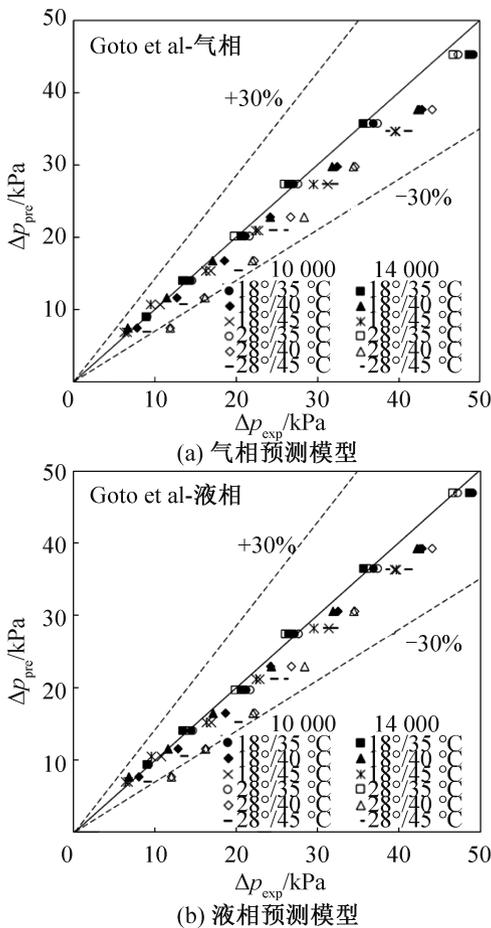


图 9 新开发预测模型对管内压降的预测  
Fig.9 Prediction of the new developed prediction model on the pressure drop

由于新关联式拟合实验数据来自内螺纹管内环状流型下两相流动冷凝换热实验, 因此, 实验规定新关联式仅适用于内螺纹管内环状流型下两相流

动冷凝压降的预测, 且两相流干度值等变量对新型关联式预测精度的影响还需进一步实验研究。

## 6 结论

在质量速率为  $400 \sim 900 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、冷凝温度为  $35, 40$  和  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却水雷诺数  $Re$  为  $10\,000$  和  $14\,000$  的实验工况下, 运行微肋管内 R134a 两相流动冷凝换热实验, 对实验变量对管内压降进行实验分析的同时, 对压降预测关联式的预测精度进行验证, 并基于实验数据研究新关联式, 主要结论如下:

1) 选用均相模型、分相模型对管内压降进行预测时发现: Cavallini et al 关联式预测精度受肋片结构影响较大, 但关联式预测精度仍较高, 其预测值与压降实验值之间平均误差为  $12.71\%$ ; Haraguchi et al 关联式对管内压降预测精度最高, 关联式预测平均误差为  $-1.92\%$ ; Pierre 关联式高估了管内压降, 关联式预测平均误差为  $16.98\%$ ; 基于人字齿管内压降拟合的 Goto et al 可实现对管内压降的合理预测, 即关联式高估了管内压降, 关联式预测误差跨度较大, 预测平均误差为  $42.64\%$ 。

2) 参考 Goto et al 关联式拟合机理: 分气相/液相折算系数  $\Phi_v/\Phi_l$  仅是参数  $X_{ii}$  的函数, 基于管内 R134a 两相流动冷凝压降实验数据, 对  $\Phi_v/\Phi_l$  与参数  $X_{ii}$  之间关系进行重新拟合, 拟合出的关联式可实现对管内压降的精确预测, 关联式预测误差范围在  $\pm 30\%$  以内, 预测平均误差小于  $10\%$ 。

### 符号说明

- $p_f$ ——摩擦压降, kPa
- $\Delta p_{exp}$ ——实验段内流体总压降, kPa
- $\Delta p_{dc}$ ——管内流体加速压降, kPa
- $G$ ——制冷剂质量流量, kg/s
- $\rho_v, \rho_l$ ——制冷剂气相、液相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $\phi$ ——两相流空隙率
- $x$ ——实验段两相流干度, 无量纲
- $\rho_m$ ——两相流平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $j$ ——两相流平均流速, m/s
- $D$ ——为流动通道等量尺寸, m
- $\lambda$ ——摩擦阻力系数
- $v$ ——流体液相比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$
- $v'$ ——液相比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$
- $f$ ——摩擦压降
- $f_l$ ——两相流液相摩擦压降
- $f_v$ ——两相流气相摩擦压降
- $f_{TV}$ ——两相摩擦系数
- $K_f$ ——两相流两相数, 用于表征两相流流体的换热效果
- $Re$ ——雷诺数

$X_{tt}$ ——Lockhart-Martinelli 参数

$\Phi_{l_0}$ ——全液相折算系数

$\Phi_v$ ——气相折算系数

$\Phi_l$ ——液相折算系数

下标

$l_0$ ——纯液相流动

$l$ ——液相

$v$ ——气相

### 参考文献

[1] 任凡. R410A-润滑油混合物在 5 mm 水平强化管内流动冷凝换热和压降特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009. (REN Fan. Heat transfer and pressure drop characteristics of R410A-oil mixture flow condensation inside 5 mm horizontal enhanced tube[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.)

[2] 吴晓敏, 李辉, 龚鹏, 等. 水平微肋管内蒸发及冷凝换热性能研究[J]. 工程热物理论, 2006, 27(3):460-462. (WU Xiaomin, LI Hui, GONG Peng, et al. Evaporation and condensation heat transfer in horizontal micro-fin tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3):460-462.)

[3] 吴晓敏, 王晓亮, 王维城. 水平新型微肋管内流动冷凝换热及流阻特性[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(4):326-329. (WU Xiaomin, WANG Xiaoliang, WANG Weicheng. Flow condensation heat transfer and pressure drop in horizontal micro-fin tubes[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(4):326-329.)

[4] 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.)

[5] SOLIMAN M, SCHUSTER J R, BERESON P J. A general heat transfer correlation for annular flow condensation[J]. Journal of Heat Transfer, 1968, 90(2):267-276.)

[6] CHISHOLM D, LAIRD A D K. Two-phase flow in rough tubes[J]. Trans. ASME, 1958, 80(2):276-286.

[7] FRIEDEL L. Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow[C]//European Two-Phase Flow Group Meeting. Italy, 1979.

[8] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlations of two phase frictional pressure drop and void fraction in minichannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53:453-465.

[9] KEDZIERSKI M A, GONCALVES J M. Horizontal convective condensation of alternative refrigerants within a micro-fin tube[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1999, 6(2):161-178.

[10] MIYARA A, NONAKA K, TANIGUCHI M. Condensation heat transfer and flow pattern inside a herringbone-type micro-fin tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 23(2):141-152.

[11] YUN R, HEO J H, KIM Y. Evaporative heat transfer and pressure drop of R410A in microchannels[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(1):92-100.

[12] COLOMBO L P M, LUCCHINI A, MUZZIO A. Flow patterns, heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation of R134A in microfin tubes[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35:2150-2165.

[13] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2009. (YAN Changqi. Gas-liquid two-phase flow [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009.)

[14] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(4):703-712.

[15] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in minichannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1):453-465.

[16] CAVALLINI A, COL D D, DORETTI L, et al. Pressure drop during condensation and vaporization of refrigerants inside enhanced tubes[J]. Heat and Technology, 1997, 15(1):3-10.

[17] LI Guanqiu, WU Zan, LI Wei, et al. Experimental investigation of condensation in micro-fin tubes of different geometries[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 37(2):19-28.

[18] GOTO M, INOUE N, YONEMOTO R. Condensation heat transfer of R410A inside internally grooved horizontal tubes [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(4):410-416.

[19] PIERRE B. Flow resistance with boiling refrigerants-part II [J]. Ashrae Journal, 1964, 6(9):58-65.

[20] CHOI J Y, KEDZIERSKI M A, DOMANSKI P A. Generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation in smooth and micro-fin tubes [C]//Proceedings of the International Institute of Refrigeration. Paderborn, 2001.

### 通信作者简介

申道明,男,博士,副教授,新乡学院土木工程与建筑学院, 0373-3682475, E-mail: shendaoming@163.com。研究方向:冻土温度场、轨道振动与噪声方面研究。

### About the corresponding author

Shen Daoming, male, Ph. D., associate professor, School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, +86 373-3682475, E-mail: shendaoming@163.com. Research fields: study on temperature field of frozen soil, track vibration and noise.