

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.01.004

# 含油制冷剂 R600a 管内两相流动摩擦压降研究

邱金友<sup>1</sup>, 盛健<sup>2</sup>, 吴志鸿<sup>3</sup>

(1. 福建工程学院 建筑新能源与节能福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

3. 中建海峡建设发展有限公司 企业技术中心, 福建 福州 350015)

**摘要:** 基于文献含油制冷剂 R600a 两相流动摩擦压降实验数据, 采用文献中 6 种关联式模型对含油制冷剂 R600a 两相摩擦压降的实验数据进行预测判断。结果表明: 油影响因子模型 Schlager 关联式和 Eckel 关联式的预测值与实验值平均绝对偏差分别为 27.3% 和 24.4%; 混合物性的两相增强因子模型 Zurcher 关联式和 Hu 关联式的预测值与实验值的平均绝对偏差分别为 33.8% 和 34.0%, 上述关联式预测值普遍低于实验值。

**关键词:** R600a/油混合物; 两相流动; 摩擦压降; 关联式

中图分类号: TH12

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0017-06

## A study on two-phase frictional pressure drop for R600a/oil mixture in tube

QIU Jinyou<sup>1</sup>, SHENG Jian<sup>2</sup>, WU Zhihong<sup>3</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of New Energy and Energy-saving for Building, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. CSCEC Strait Construction and Development Co., Ltd, Fuzhou 350015, China)

**Abstract:** Based on the experimental data of the two-phase flow frictional pressure drop of R600a and oil mixture, six correlation models mentioned in the literature were used to make predictions about the experimental data of the two-phase frictional pressure drop of R600a and oil mixture. Results show that as for the factor model of the oil's impact, the average absolute deviation between the predicted value and the experimental value of the Schlager correlation model and that of the Eckel correlation model are 27.3% and 24.4% respectively. As for the two-phase enhancement factor model of the mixture's properties, the average absolute deviation between the predicted value and the experimental value of the Zurcher correlation model and that of the Hu correlation model are 33.8% and 34.0% respectively. The above predictive values made with the correlation models are generally lower than the experimental data.

**Keywords:** R600a/oil mixture; two-phase flow; frictional pressure drop; correlation model

氢氟烃类制冷剂 (Hydrofluorocarbons, HFCs) 由于其较高的温室效应潜值 (Global Warming Potential, GWP), 过度使用将加剧全球气候变暖<sup>[1-2]</sup>。目前, 国际上已经开始对 HFCs 类物质加以管控, 寻找长期可替代的环境友好型制冷剂已

经成为制冷行业一个紧迫的课题<sup>[3]</sup>。碳氢制冷剂 R600a 因其优越的环境友好性备受关注, 其作为小型冰箱制冷剂已经得到推广应用。作为天然工质, R600a 不仅臭氧层破坏潜能值为零, 且具有较小的温室效应潜能值。同时与 HFCs 类制冷工

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 福州市科技局市校企合作项目 (2018-G-40); 福建省教育厅中青年教育科研项目 (JAT170388)

第一作者简介: 邱金友 (1987-), 男, 福建永安人, 讲师, 博士, 研究方向: 制冷剂管内相变流动。

质 R134a 和 R22 相比, R600a 具有较高的液体热导率和汽化潜热值, 有利于制冷系统换热部件的传热和缩小压缩机尺寸<sup>[4-5]</sup>。在蒸汽压缩制冷系统中, 润滑油具有润滑、密封、冲洗以及避免制冷剂过热等作用, 但润滑油的存在也会对制冷系统带来一些负面影响, 如改变制冷剂的热物理性质; 增加制冷剂的流动阻力; 恶化制冷剂侧的传热效果等<sup>[6-7]</sup>。从而对管内的换热和流动状态产生不可忽视的影响<sup>[8]</sup>。因此, 润滑油对制冷剂在管内流动阻力特性的研究引起了许多学者的关注。

文献[9-17]中对含油制冷剂压降特性进行了实验研究, 结果表明润滑油的存在使沿程摩擦压降增加。文献[9]对含油制冷剂 R22 和 R407C 的流动沸腾特性进行研究, 得到相比纯制冷剂流动压降增加了 20% 左右, 传热降低了 10% 左右。文献[10]对含油制冷剂 R134a 和 R410A 的两相流动摩擦压降进行研究, 表明在高干度区润滑油对两相摩擦的影响较大, 因为液相油溶度随干度的增大而增大。文献[11]在水平光管内对含油制冷剂 R410A 的两相流动特性进行研究, 表明润滑油的存在始终增大了两相流动压降。文献[12]综述了含油制冷剂两相流动特性, 揭示了含油制冷剂两相摩擦压降的增大主要是因为含油制冷剂液相粘度增大。文献[13]对 CO<sub>2</sub> 与 PAG 润滑油混合物的两相流动特性进行实验研究, 结果表明混合物的两相流动压降增大主要是因为管内壁形成一层油膜和含油 CO<sub>2</sub> 液相粘度增大。文献[14]对 R32 在 5 mm 和 7 mm 的水平光管内含润滑油流动沸腾换热进行研究, 结果显示压降随着干度的增大而增大, 压降随着质量流量的增大和润滑油含量的增大, 压降也在增大。文献[15]在泡沫金属管内研究含油率为 0~5% 的制冷剂流动沸腾的压降特性, 结果表明: 随含油率增加, 增大了流体的表明张力, 促进环状流的发展, 且部分油黏附于泡沫金属纤维表面, 导致压降的增大。对于天然工质 R600a, 文献[16]对其纯工质工况下进行了流动沸腾的压降特性研究, 实验表明随质量流率和干度的增大, 摩擦压降逐渐增大, 在不同的流型区域内摩擦压降的增速呈现不同的变化规律, 其中环状流区摩擦压降增速最快。文献[17]在内径为 8.7 mm 的水平光管内对纯 R600a 和含油 R600a 的两相流动沸腾特性进行实验研究, 实验在含油率 1.0%~2.5%, 质流密度 130~

380 kg/m<sup>2</sup>s, 热流密度 10~27 kW/m<sup>2</sup> 和饱和压力 0.5~0.6 kPa 工况下进行, 结果表明随着油质量分数和质流密度的增加, 两相摩擦压降在全干度范围内都增大。

本文针对文献[17]实验研究的结果, 采用文献中已有的 6 种含油制冷剂两相流动摩擦压降的关联式模型, 对含油制冷剂 R600a 两相流动摩擦压降的实验数据进行预测判断。探究已有关联式对含油制冷剂 R600a 两相流动摩擦压降的预测准确性。探寻预测精度高的关联式模型, 对优化天然制冷剂 R600a 蒸发器的设计具有重要意义。

## 1 关联式模型

文献研究表明油的存在一定程度上会增大制冷剂在流动沸腾过程的阻力损失。很多学者也对含油制冷剂的两相流动压降特性进行了理论关联式模型研究, 获得了预测精度较高的关联式模型。现有常用的含油制冷剂在光管内的压降模型主要可归纳为两种类型: 油影响因子模型和混合物性的两相增强因子模型。

### 1.1 油影响因子模型

油影响因子压降模型如文献[18-20]。油影响因子是油质量分数和质量流量的函数。采用油影响因子对制冷剂压降进行修正来反映油对制冷剂的压降影响。此方法是在纯制冷剂压降的基础上乘以油影响因子进行修正, 其计算表达形式为  $\Delta P_{r,o,frict} = \Delta P_{r,frict} \cdot EF$ 。Schlager et al.<sup>[18]</sup> 给出了两种形式的油影响因子模型, 一种是一阶多项式; 另一种是一阶指数形式, 模型中仅考虑了油质量分数的影响。该模型预测值与实验数据的偏差在  $\pm 15\%$  以内。Eckels et al.<sup>[19]</sup> 根据油的种类关联出多项式形式和指数形式的油影响因子模型, 并给出了其关联结果的相关性因子  $R^2$  值, 对于 369-SUS 润滑油多项式形式和指数形式的  $R^2$  值分别为 0.97 和 0.88; 对于 169-SUS 润滑油,  $R^2$  均为 0.96。Tichy et al.<sup>[20]</sup> 模型较简单, 没有考虑油的物性, 不能反映含油制冷剂的压降特性。

### 1.2 混合物性的两相增强因子模型

这类模型考虑了润滑油的存在对混合物物性的影响, 从而影响压降特性。Zurcher et al.<sup>[21]</sup> 采用含油制冷剂的混合粘度代替原模型中的制冷剂粘度来反映润滑油的影响, 能够很好的预测 R407C 和油混合物在管内的压降特性, 模型中只

考虑粘度的影响且是基于内径为 10.92 mm 换热管内的压降数据开发的,此关联式对其他制冷剂-油混合物,在其他管径换热管内压降的预测性需要进一步进行验证。Wei et al.<sup>[22]</sup> 基于混合物物性开发了 R22/油混合物在管内的压降特性,能够很好的预测其实验数据。但该模型用来预测其他制冷剂-润滑油混合物的压降特性时,可能会引起很大的误差。Hu et al.<sup>[23]</sup> 基于混合物物性和流型 Martinelli 参数  $X_{tt}$ , 建立了含油制冷剂 R410A 在管内的压降特性,较好预测了 R410A/

油混合物管内两相流动摩擦压降实验数据。上述关联式模型具体表达形式见表 1,其 6 种模型获得的实验条件均是在管内径为 6~10 mm 范围内,且研究的工况为管内流动沸腾过程,其实验均采用氟氯烃类工质,而本文研究 R600a 属于氟氯烃中的 HC 制冷工质,其热物性与 6 种关联式所研究制冷剂相似。因此考察 6 种已有模型对含油制冷剂 R600a 两相流动摩擦压降的预测准确性,对探寻油制冷剂 R600a 预测精度高的关联式模型具有重要意义。

表 1 含油制冷剂管内两相流动摩擦压降关联式模型

Tab.1 Correlational models of the two-phase flow frictional pressure drop of the refrigerant-oil mixture inside the horizontal smooth tubes			
参考文献	工质	管径尺寸/mm I.D.	关联式模型
Schlager et al. <sup>[18]</sup>	R22/150-SUS	8.00	$EF = 1.01\exp(4.69 \omega_{no})$ or $EF = 1.01 + 5.43 \omega_{no}$
	R22/300-SUS	8.00	$EF = 1.03\exp(5.59 \omega_{no})$ or $EF = 1.02 + 6.68 \omega_{no}$
Eckels et al. <sup>[19]</sup>	R134a/169-SUS	8.00	$EF = 1.01 + 43.68 \omega_{no} + 24.01 \omega_{no} G/250 + 143.6 (\omega_{no} G/250)^2 - 341.8 \omega_{no}^2 (G/250)^2$
			$EF = \exp (37.54 \omega_{no} - 20.86 \omega_{no} G/250 + 296.2 \omega_{no}^2 G/250 - 460.4 (G/250)^2)$
	R134a/369-SUS	8.00	$EF = 1.01 + 26.94 \omega_{no} - 17.23 \omega_{no} G/250 + 81.67 (\omega_{no} G/250)^2$ $EF = \exp (24.41 \omega_{no} - 14.46 \omega_{no} G/250 + 92.97 (\omega_{no} G/250)^2 - 87.9 (G/250)^2)$
Tichy et al. <sup>[20]</sup>	R12/300SUS	9.58	$\Delta P_{frict} = \Delta P_{TPE} EF$
			$EF = 1 + 41.3 \omega_{no} + 479 \omega_{no}^2$ $\Delta P_{TPE}$ is the pressure drop computed using the Dukler II correlation
Zurcher et al. <sup>[21]</sup>	R407C/POE VG68	10.92	$(\phi_{Lo}^2)_{ref-oil} = (\phi_{Lo}^2)_{ref} [\mu_o/\mu_r]^{\omega_{local} (3.583\omega_{no}+0.0616)}$
Wei et al. <sup>[22]</sup>	R22/NM56	6.34	$\phi_{r,o,Lo}^2 = a_1 + a_2 \left[ 1 + a_3 \frac{[x(1-x)]^{n_1}}{G^{n_2}} + x^{n_3} \right] +$
			$a_4 \frac{\omega_{local} [x(1-x)]^{n_4}}{G^{n_5}}$
Hu et al. <sup>[23]</sup>	R410A/POE RB68EP	6.34	$\Delta P_{r,o,frict} = 2f G^2 x_{r,o}^2 L (1 + 3.52 X_{tt}^{0.46})^2 / (\rho_{r,v} d)$
			$X_{tt} = \left( \frac{1 - x_{test}}{x_{test}} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_{r,v}}{\rho_{r,o,L}} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_{r,o,L}}{\mu_{r,v}} \right)^{0.1}$

2 油影响因子模型

在已有的制冷剂-油混合物两相流动摩擦压降关联式中, Schlager 关联式、Eckels 关联式和 Tichy 关联式为油影响因子模型。图 1、图 2 和图

3 分别给出了上述 3 种关联式所得出的预测值与文献[17]中 R600a-油混合物在管内两相流动摩擦压降实验值之间的对比。

由图 1 和图 2 可得, Schlager 关联式和 Eckel 关联式得出的压降预测值与 R600a-油混合物在

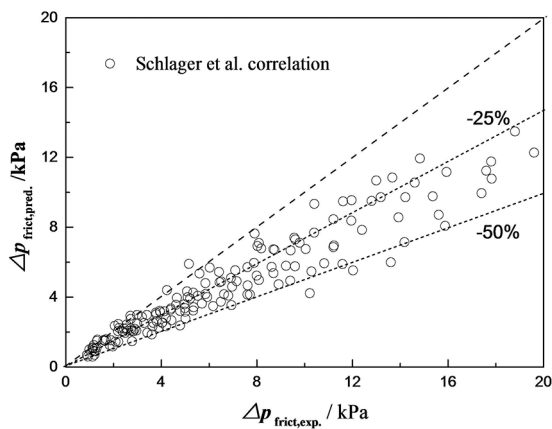


图 1 Schlager 关联式预测值与实验值对比

Fig.1 Predicted frictional pressure drop of the Schlager correlation model compared with experimental values

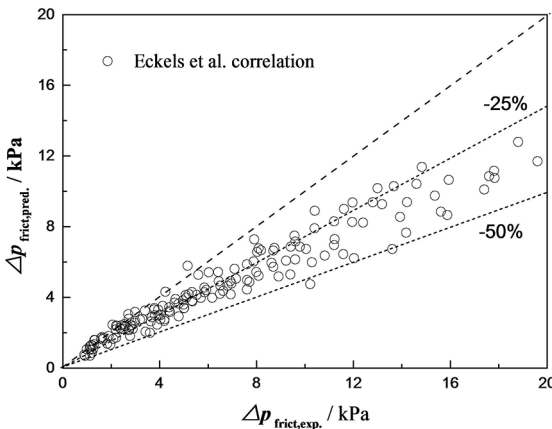


图 2 Eckels 关联式预测值与实验值对比

Fig.2 Predicted frictional pressure drop of the Eckels correlation model compared with experimental values

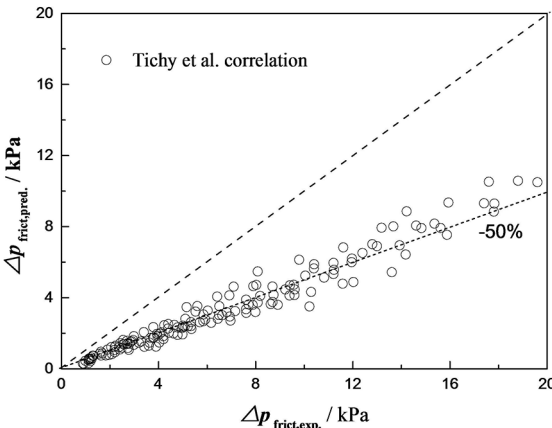


图 3 Tichy 关联式预测值与实验值对比

Fig.3 Predicted frictional pressure drop of the Tichy correlation model compared with experimental values

内径为 8.7 mm 光管内两相流动压降实验值较为吻合,总体上 95% 的预测数据点与实验值的偏差分别为  $-45\% \sim +5\%$  和  $-40\% \sim +5\%$ 。Schlager 关联式和 Eckel 关联式得出的压降预测值与实验值的平均绝对偏差分别为 27.3% 和 24.4%。但总体上 Schlager 关联式和 Eckel 关联式的预测值低于实验值,其偏离程度在高干度区愈加明显。由图 3 可得,Tichy 关联式得出的压降预测值与 R600a-油混合物在内径为 8.7 mm 光管内两相流动压降实验值的偏差较大,总体上 95% 的预测数据点与实验值的偏差落在  $-70\% \sim -25\%$  之间,预测值明显低于实验值,平均绝对偏差为 50.5%。表 2 归纳总结在不同油质量分数条件下,关联式模型的预测值与实验值的绝对平均偏差,由表 2 可得 Schlager 关联式和 Eckel 关联式得出的压降预测值与实验值的平均绝对偏差随油质量分数的增加而增大,随油质量分数  $\omega_{no}$  从 1.0% 增加到 2.5%,其偏差值分别从 17.7% 和 17.5% 增加到 37.9% 和 32.3%。得到 Schlager 关联式和 Eckel 关联式的预测精度随油质量分数  $\omega_{no}$  的增加而下降。由表 2 同时可以得到 Tichy 关联式的预测值与实验值的平均绝对偏差随油质量分数的变化而几乎保持不变,说明虽然 Tichy 关联式预测精度偏差较大,但其总体油质量分数范围内预测准确性相对较好。

### 3 混合物性增强因子模型

在已有的制冷剂-油混合物两相流动摩擦压降关联式中,Zurcher 关联式、Wei 关联式和 Hu 关联式为混合物性的两相增强因子模型。图 4-图 6 分别给出了上述 3 种关联式所得出的预测值与文献[17]中 R600a-油混合物在管内两相流动摩擦压降实验值之间的对比。

由图 1-图 3 比较可得,Zurcher 关联式和 Hu 关联式的压降预测值与 R600a-油混合物在内径为 8.7 mm 光管内两相流动压降实验值较为吻合。总体上 95% 的预测数据点与实验值的偏差分别为  $-45\% \sim +5\%$  和  $-50\% \sim +5\%$ 。Zurcher 关联式和 Hu 关联式的压降预测值与实验值的平均绝对偏差分别为 33.8% 和 34.0%,但总体上其预测值明显低于实验值。由图 3 可得,Wei 关联式的压降预测精度较差,其预测值明显大于实验值,总体上预测值大于实验值 163.8%,部分低干度区预测值



大于实验值 200%。由表 2 可得 Zurcher 关联式和 Hu 关联式的压降预测值与实验值的平均绝对偏差随油质量分数的增加而增大,随油质量分数  $\omega_{no}$  从 1% 增加到 2.5%, 其偏差值分别从 20.6% 和 20.2% 增加到 46.0% 和 47.3%。表明 Zurcher 关联式和 Hu 关联式的预测精度随油质量分数  $\omega_{no}$  的增加而下降。以上分析说明, 油质量分数对关联式的预测精度有较大的影响, 在含油制冷剂两相流动摩擦压降关联式模型开发和优化过程中需要着重考虑油质量分数对制冷剂物性的影响。上述几种关联式是针对特定的含油制冷剂开发的模型, 其模型精度受至于制冷剂和油混合物的种类和其自身的物性。

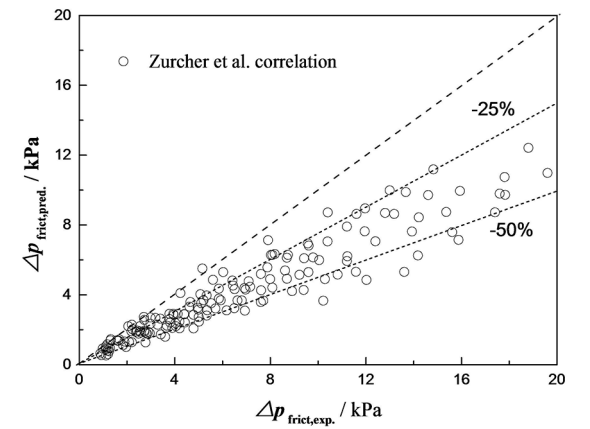


图 4 Zurcher 关联式预测值与实验值对比

Fig.4 Predicted frictional pressure drop of the Zurcher correlation model compared with experimental values

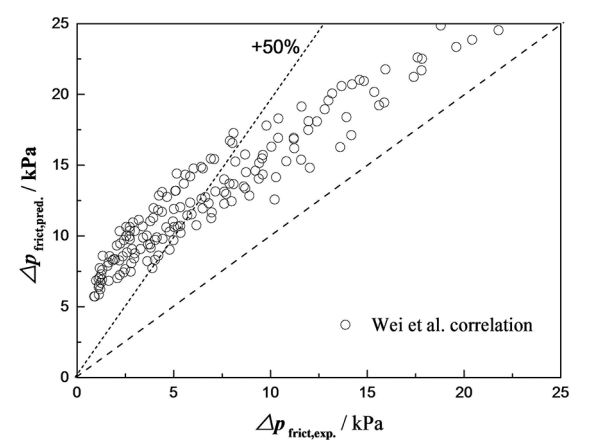


图 5 Wei 关联式预测值与实验值对比

Fig.5 Predicted frictional pressure drop of the Wei correlation model compared with experimental values

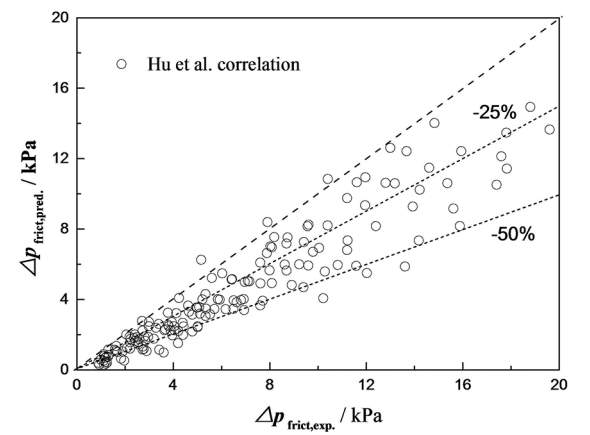


图 6 Hu 关联式预测值与实验值对比

Fig.6 Predicted frictional pressure drop of the Hu correlation model compared with experimental values

表 2 关联式预测值与实验值绝对平均偏差						
Tab.2 Absolute average deviations between predicted and experimental frictional pressure drops						
油质量分数	绝对平均偏差 (MARD) / %					
$\omega_{no} / \%$	文献 [18]	文献 [19]	文献 [20]	文献 [21]	文献 [22]	文献 [23]
1.0	17.7	17.5	51.6	20.6	201.0	20.2
1.5	22.4	20.5	50.2	29.4	171.0	28.8
2.0	31.4	27.4	50.3	39.1	149.5	39.5
2.5	37.9	32.3	49.7	46.0	133.9	47.3

注:  $MARD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta P(i)_{frict,pred} - \Delta P(i)_{frict,exp}}{\Delta P(i)_{frict,exp}} \right| \times 100\%$

## 4 结论

本文采用文献中已有的 6 种含油制冷剂两相

流动摩擦压降的关联式模型, 对含油制冷剂 R600a 两相流动摩擦压降的实验数据进行预测判断。探究已有关联式对含油制冷剂 R600a 两相

流动摩擦压降的预测准确性。得到以下结论:

1) Schlager 关联式和 Eckel 关联式得出的压降预测值与实验值的平均绝对偏差分别为 27.3% 和 24.4%。但总体上 Schlager 关联式和 Eckel 关联式的预测值低于实验值,其偏离程度在高干度区愈加明显。对于产品开发和工程设计, Schlager 关联式和 Eckel 关联式的预测精度可以接受,可应用于 R600a 制冷系统蒸发器的优化设计。Tichy 关联式的预测值与实验值的偏差较大,总体上 95% 的预测数据点与实验值的偏差落在 -70% ~ -25% 之间。

2) Zurcher 关联式和 Hu 关联式的压降预测值与实验值的平均绝对偏差分别为 33.8% 和 34.0%,但总体上其预测值普遍低于实验值。Wei 关联式的压降预测精度较差,其预测值明显大于实验值,总体上预测值大于实验值 163.8%。

3) Schlager 关联式、Eckel 关联式、Zurcher 关联式和 Hu 关联式的压降预测值与实验值的平均绝对偏差随油质量分数增加而增大,其预测精度随油质量分数的增加而下降。在含油制冷剂两相流动摩擦压降关联式模型开发和优化过程中需要着重考虑油质量分数对制冷剂物性的影响。

## 参考文献:

- [1] MOTA-BABILONI A, NAVARRO-ESBRÍ J, ÁNGELBARRAGÁN, et al. Drop-in energy performance evaluation of R1234yf and R1234ze (E) in a vapor compression system as R134a replacements[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 259-265.
- [2] MCLINDEN M O, KAZAKOV A F, BROWN J S, et al. A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38(1): 80-92.
- [3] MOHANRAJ M, MURALEEDHARAN C, JAYARAJ S. A review on recent developments in new refrigerant mixtures for vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump units[J]. International Journal of Energy Research, 2011, 35(8): 647-669.
- [4] PRAPAINOP R, SUEN K O. Effects of refrigerant properties on refrigerant performance comparison: a review[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012, 2(4): 486-493.
- [5] KUMAR K S, RAJAGOPAL K. Computational and experimental investigation of low ODP and low GWP HCFC-123 and HC-290 refrigerant mixture alternate to CFC-12[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(12): 3053-3062.
- [6] 李敏霞, 陈雪龙, 李颖玲, 等. 润滑油对 2 种水平管降膜蒸发传热特性的影响[J]. 化学工程, 2017, 45(7): 32-37.
- [7] 王学东, 柳建华, 宋吉, 等. 油浓度对小管径水平内螺纹管内 R404A 冷凝换热影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(10): 29-33.
- [8] SHEN B, GROLL E. Review article: acritical review of the influence of lubricants on the heat transfer and pressure drop of refrigerantsâ part II: lubricant influence on condensation and pressure drop[J]. Hvac & R Research, 2005, 11(4): 511-526.
- [9] CHO K, TAE S J. Evaporation heat transfer for R-22 and R-407C refrigerant-oil mixture in a microfin tube with a U-bend [J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23: 219-231.
- [10] CHEN I Y, WU Y S, CHANG Y J, et al. Two-phase frictional pressure drop of R-134a and R-410A refrigerant-oil mixtures in straight tubes and U-type wavy tubes[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2007, 31(4): 291-299.
- [11] HU H T, DING G L, WEIK J, et al. Measurement and correlation of frictional pressure drop of R-410A/Oil mixture flow boiling in a 7 mm straight smooth tube[J]. Hvac & R Research, 2008, 14(5): 763-781.
- [12] FILHO E P B, CHENG L, THOME J R. Flow boiling characteristics and flow pattern visualization of refrigerant/lubricant oil mixtures[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 185-202.
- [13] DANG C, HARAGUCHI N, YAMADA T, et al. Effect of lubricating oil on flow boiling heat transfer of carbon dioxide[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 136-144.
- [14] 李炅, 张秀平, 贾磊, 等. 润滑油对 R32 在水平光管内流动沸腾换热特性及压降的影响[J]. 流体机械, 2016, 44(3): 65-69.
- [15] 胡海涛, 朱禹, 彭浩, 等. 泡沫金属管内含油制冷剂流动沸腾的压降特性[J]. 化工学报, 2014, 65(S2): 95-100.
- [16] 杨志强, 公茂琼, 陈高飞, 等. R600a 水平管内两相流型转换及摩擦压降特性[J]. 科学通报, 2018, 63(1): 98-107.