doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.011

应用技术

混合制冷剂饱和流动沸腾传热关联式研究

何志强,方贤德,方玉祥,李晓欢,李　冲
（南京航空航天大学 飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室,南京 210016）

摘　要:为了准确预测混合制冷剂饱和流动沸腾换热系数,从 31 篇文章中,收集建立了一个含有 3 901 个数据点的传热数据库,包含共沸混合物 R507,R513A,近共沸混合物 R410A,R404A,以及非共沸混合物 R407C,R417A,R452A,R448A,R455A,R454C,R447A 等 11 个制冷剂。该数据库参数范围:管内径 D 为 0.5~21 mm;饱和压力 p 为 0.019~2.501 4 MPa,质量流率 G 为 50~1 109 kg/(m^2·s),热流密度 q 为 2.5~60 kW/m^2,干度 x 为 0.003 6~0.998,滑移温度 T_g 为 0.002~10.88 K。收集了 26 个纯制冷剂、16 个混合制冷剂传热系数关联式。将现有关联式预测值与试验数据进行比较,结果表明,预测效果最好的关联式平均绝对误差δ_{MAD}为 37.3%,平均相对误差 δ_{MRD} 为 −18.3%。基于对现有模型的分析,提出了一个新的传热系数关联式,其δ_{MAD}为 28.8%,δ_{MRD} 为 0.1%,预测效果较现有关联式有显著提高。

关键词:混合制冷剂;传热;关联式;流动沸腾
中图分类号:TB611;TK124　　**文献标志码:**A

A study of saturated flow boiling heat transfer correlations for mixed refrigerants

HE Zhiqiang, FANG Xiande, FANG Yuxiang, LI Xiaohuan, LI Chong
(Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, MIIT, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to accurately prediction of the saturated flow boiling heat transfer coefficients of mixed refrigerants, a heat transfer database containing 3 901 data points was collected from 31 papers, It contains the 11 refrigerants such as the azeotropic refrigerants R507, R513A, the near azeotropic refrigerants R410A, R404A, and the zeotrope refrigerants R407C, R417A, R452A, R448A, R455A, R454C, and R447A. The parameter range of the database covers hydraulic diameters of 0.5~21 mm, saturation pressure of 0.019~2.501 4 MPa, mass flow rate of 50~1 10 9 kg/(m^2·s), heat fluxes of 2.5~60 kW/m^2, qualities of 0.003 6~0.998, and temperature glide of 0.002~10.88 K. The correlations of heat transfer coefficients were collected for 26 pure refrigerants and 16 mixed refrigerants. The existing correlations predicted values were compared with the experimental data, the results showed that the best prediction correlation has a mean absolute error δ_{MAD} of 37.3% and a mean relative error δ_{MRD} of −18.3%. Based on the analysis of the existing models, a new heat transfer coefficient correlation was proposed which has δ_{MAD} = 28.8% and δ_{MAD} = 0.1%, and the prediction performance was significantly improved over the existing correlations.

Key words: mixed refrigerants; heat transfer; correlation; flow boiling

0　引言

氯氟烃(CFCs)和氢氯氟烃(HCFCs)制冷剂会损耗臭氧层并造成温室效应,已被禁止使用,推荐使用的替代工质包括混合制冷剂[1]。在适当条件下,混合制冷剂具有改善制冷循环性能系数 COP、提高有机朗肯循环(ORC)性能及中和组分不良物理性质等潜在优势[2-3]。

混合制冷剂是由 2 种或多种纯制冷剂组成,按照定压相变的热力学性质可分为共沸制冷剂、

收稿日期: 2024－06－06　**修回日期:** 2024－09－28
基金项目: 国家自然科学基金项目(52076107,51576099)

近共沸制冷剂和非共沸制冷剂。非共沸混合物沸腾时汽相和液相的组成成分发生变化，并伴随有一定的温度滑移 T_g（定压沸腾时露点温度与泡点温度之差）；共沸混合物定压相变过程中温度滑移为零；还有一些混合物温度滑移很小，成为近共沸混合物。

混合制冷剂流动沸腾传热过程中会受到多组分之间的相互影响，最关键的因素是温度滑移引起的传质阻力，传质阻力同时影响核态沸腾与对流沸腾。核态沸腾中，质量扩散带来的传质阻力会削弱核沸腾传热[4]；对流沸腾中，由于各组分的蒸发速率不同，挥发性组分更容易从界面蒸发，在到达界面前必须克服传质阻力，从而抑制传热过程[4]。另外，液相组成的变化引起泡点温度沿流动方向升高[5]，给液相和汽相增加了额外的显热传递，与纯制冷剂等温蒸发过程中的纯潜热传递过程相比，削弱了沸腾传热过程。

在对流动沸腾传热的研究中，建立能准确预测传热系数的通用模型一直是研究重点。过去几十年内，对于纯制冷剂饱和流动沸腾，人们提出了大量传热系数关联式[6-8]，然而，对于混合制冷剂，研究主要集中在流动沸腾传热试验及对纯制冷剂的代替和性能评价等方面[9-10]，虽然发展了一些混合制冷剂流动沸腾传热关系式，但是依据的数据源有限，获得的关联式局限性较大，使用范围有限。此外，利用大的数据库对这些关联式进行评价分析，以指导模型选用的研究很少[11]。

针对上述存在的问题，本文旨在建立预测精度较高的混合制冷剂饱和流动沸腾换热系数关系式。为此，从 31 篇公开发表的文献中收集数据，建立了一个包含 3 901 个数据点的混合制冷剂饱和流动沸腾换热系数数据库，包含 11 种已被命名的混合制冷剂。这些制冷剂的全部热物性都可以从 REFPROP 10.0 软件中直接得到，不需要加权与估计。在此基础上，分别对纯制冷剂、混合制冷剂关联式进行评价，并结合传热理论和对现有关联式的分析，提出一个预测精度较高的混合制冷剂饱和流动沸腾换热系数新关联式。

1 混合制冷剂饱和流动沸腾传热数据

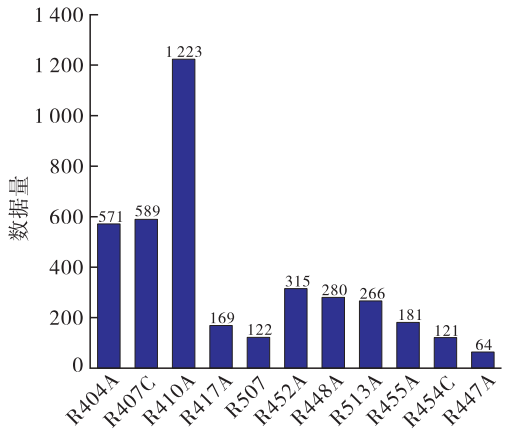
通过广泛的文献检索，从 31 篇国内外公开发表的文献中收集了 3 901 组混合制冷剂光滑管内饱和流动沸腾传热数据，每个数据点收集管材、饱和压力 P_{sat} 或饱和温度 T_{sat}、传热系数 h、热流密度 q、相对分子质量 M、质量流率 G、干度 x、管道长度 L、管道直径 D 以及放置方式等。涉及共沸混合物 R507，R513A，近共沸混合物 R410A，R404A，非共沸混合物 R407C，R417A，R452A，R448A，R455A，R454C，R447A 等 11 个制冷剂。数据库试验参数范围为：管内径 D= 0.5~21.0 mm；饱和压力 p=0.019 0~2.501 4 MPa，质量流率 G= 50~1 109 kg/（m^2 ·s），热流密度 q=2.5~60.0 kW/m^2，干度 x = 0.003 6~0.998。混合制冷剂与数据库的管道参数如表 1 所示。

表 1 混合制冷剂与数据库的管道参数

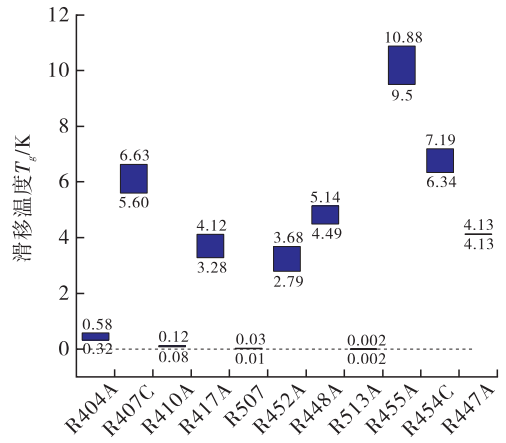
Tab.1 Mixed refrigerant and database pipeline parameters

流体	组成（质量比）	管内径 D/mm	管长度 L/m	放置方式	管材
R404A	M_{R125}:M_{R134a}:M_{R143a} = 0.44:0.04:0.52	6.0~12.7	0.2~10.0	水平	铜 / 不锈钢
R407C	M_{R32}:M_{R125}:M_{R134a} = 0.23:0.25:0.52	6.0~21.0	0.50~6.00	水平 / 竖直	铜 / 不锈钢
R410A	M_{R32}:M_{R125} = 0.5:0.5	0.5~21.0	0.15~8.00	水平 / 竖直	铜 / 不锈钢
R417A	M_{R125}:M_{R134a}:M_{Butane} = 0.466:0.500:0.034	6.0~8.2	3.00~6.00	水平	铜 / 不锈钢
R507	M_{R125}:M_{R143a} = 0.5:0.5	6.0~21.0	2.00~6.00	水平 / 竖直	铜 / 不锈钢
R452A	M_{R32}:M_{R125}:$M_{R1234yf}$ = 0.11:0.59:0.30	6.0	0.20	水平	不锈钢
R448A	M_{R32}:M_{R125}:$M_{R1234yf}$:M_{R134a}:$M_{R1234ze(E)}$= 0.26:0.26:0.20:0.21:0.07	6.0	0.20	水平	不锈钢
R513A	$M_{R1234yf}$:M_{R134a} = 0.56:0.44	3.5	0.25	水平	铜
R455A	M_{CO_2}:M_{R32}:$M_{R1234yf}$ = 0.030:0.215:0.755	6.0	0.20	水平	不锈钢
R454C	M_{R32}:$M_{R1234yf}$ = 0.215:0.785	6.0	0.20	水平	不锈钢
R447A	M_{R32}:M_{R125}:$M_{R1234ze(E)}$=0.680:0.035:0.285	10.6	2.00	水平	铜

图 1 所示混合制冷剂饱和流动沸腾数据分布，其中，各混合制冷剂的数据量分布如图 1（a）所示，混合制冷剂在数据库压力范围内的滑移温度如图 1（b）所示。



（a）制冷剂种类



（b）滑移温度

图 1 混合制冷剂饱和流动沸腾数据分布

Fig.1 Distribution of saturated flow boiling data for mixed refrigerants

2 纯制冷剂传热关联式的适用性分析

众多学者对纯制冷剂传热关联式进行了广泛研究，其中有一些已经具备不错的预测性能，可以供工程师和设计者使用，但是对于发展滞后的混合制冷剂而言，大多数关联式是基于纯制冷剂关联式的修正与改进，有必要先了解这些关联式对混合制冷剂数据库的预测情况。

用前述 3 901 组试验数据评价了文献[12–37]中 26 个纯制冷剂饱和流动沸腾传热关系式，表 2 列出了对总数据平均绝对误差δ_{MAD}小于 50% 的各关联式误差情况。平均相对误差δ_{MRD}用来判断关联式在整体上偏离数据库的情况。定义如下：

$$\delta_{MAD}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y(i)_{pred}-y(i)_{exp}}{y(i)_{exp}}\right| \tag{1}$$

$$\delta_{MRD}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{y(i)_{pred}-y(i)_{exp}}{y(i)_{exp}} \tag{2}$$

式中，$y(i)_{pred}$为点 i 的预测值；$y(i)_{exp}$为点 i 的试验值；N 为数据库中总数据点的数量。

表 2 纯制冷剂传热关联式预测误差

Tab.2 Prediction errors of heat transfer correlations for pure refrigerants %

文献	δ_{MAD}	δ_{MRD}
文献[35]	39.1	31.8
文献[17]	42.9	−9.4
文献[30]	43.7	−1.3
文献[21]	44.0	−1.6
文献[14]	45.0	20.2
文献[18]	45.2	13.3
文献[19]	46.3	17.3
文献[20]	47.8	18.5
文献[28]	48.8	14.8

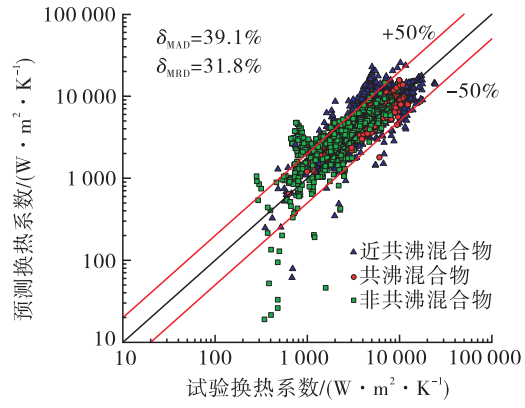
由表 2 可以看出，在 26 个关联式中，只有文献[35]模型δ_{MAD} < 40%，为 39.1%，有 8 个模型的δ_{MAD}在 40%~50%。在δ_{MAD} < 50% 的 9 个关系式中，大多数关系式的δ_{MRD}为正值，表明关系式高估了试验数据，这与混合制冷剂的传热退化导致传热系数降低的现象相符，可见针对纯制冷剂开发的模型不能适应混合制冷剂的需要。

图 2 示出了纯制冷剂预测排名前二模型的误差图，三角标记（蓝色）表示的是 1 794 组近共沸制冷剂，圆形标记（红色）表示的是 388 组共沸制冷剂，方形标记（绿色）表示的是 1 719 组非共沸制冷剂，从图中可以看出：

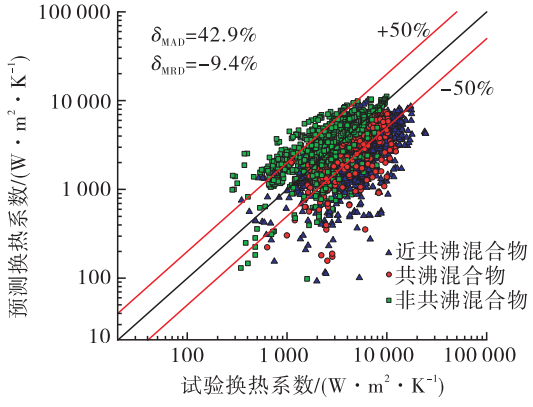
（1）2 个关联式都对共沸制冷剂的预测精度最好，在误差图中均处于近共沸制冷剂和非共沸制冷剂之间；

（2）文献[35]模型对 3 种类型的混合物预测相对比较均匀，共沸制冷剂几乎全部落在 50% 误差范围内；

（3）文献[17]模型观察到了 3 种类型混合物较为明显的分层现象，对非共沸混合物预测值偏大。



（a）文献［35］



（b）文献［17］

图 2　纯制冷剂关联式预测排名前二误差图

Fig.2　Error distributions of top two correlations for pure refrigerants

3　混合制冷剂传热关联式适应性分析

为了尽可能地方便预测和实际应用，选择可以根据制冷剂热物性和一些无量纲参数直接计算出结果的显式模型，忽略要判断混合物组分中挥发能力强弱和某些参数难以获得的关联式。收集了满足条件的 16 个混合制冷剂饱和流动沸腾传热关联式。这些关联式可以分为两类，一类为直接回归拟合类型（6 个），其余 10 个为修正类型，修正类型又包括 3 种修正。

3.1　直接回归拟合

直接回归拟合关系式是由研究者根据试验数据进行多元回归分析直接得到，相关研究包括文献［11，38–41］。

文献［11］中引入了一个新的无量纲数 T^*，定义如下：

$$T^* = T_g / T_{\mathrm{sat}} \tag{3}$$

式中，T_g 为滑移温度，K；T_{sat} 为饱和温度，K。

T^* 反映温度滑移和饱和温度在气泡成核过程对传热带来的显著影响；温度滑移增大，对核沸腾的抑制较大，饱和温度升高，有助于活性成核。ZHANG 等［11］以 T^* 为判据分区，用量纲分析和多重回归方法，分别提出了两个分段式混合制冷剂传热关联式。

3.2　修正类型

3.2.1　*Ma* 修正

Marangoni 效应在非共沸混合物的沸腾传热中起着重要作用［9］，FUJITA 等［42］提出的 *Ma* 可以解释混合物相变中由于各组分沸点不同导致的温度滑动所引起的浓度效应，DANG 等［9］使用试验数据，通过 *Ma* 修正 LI 等［30］模型，并且通过回归分析得到一个新的修正模型。*Ma* 的定义如下：

$$Ma = \frac{\Delta\sigma}{\rho_l \nu_l^2}\left[\frac{\sigma}{g\left(\rho_l - \rho_v\right)}\right] Pr_l \tag{4}$$

式中，$\Delta\sigma$ 为泡点与露点之间的表面张力之差；ρ_l，ρ_v 为液体和气体密度，kg/m³；ν_l 为液体运动黏度，m²/s；σ 为流体的表面张力，N/m；g 为重力加速度，m/s²；Pr_l 为液体普朗特数，$Pr_l = c_{pl}\mu_l / \lambda_l$；$c_{pl}$ 为液体定压比热，J/（kg·K）；μ_l 为液体动力黏度，kg/（s·m）；λ_l 为液体导热系数，W/（m·K）。

3.2.2　F_c 修正

THOME 等［43］建议对核沸腾贡献使用混合物校正因子 F_c 来反映混合物质量扩散效应，该混合校正因子通过模拟普通管内核池沸腾传质阻力得到，一般来说，在叠加和渐进模型中修正 h_{nb} 项，在增强模型和核态沸腾模型中修正 *Bo* 数。校正因子 F_c 定义为：

$$F_c = \left\{1 + \left(\frac{h_{nb}}{q}\right) T_g \left[1 - \exp\left(\frac{-Bq}{\rho_l h_{lg} \beta_l}\right)\right]\right\}^{-1} \tag{5}$$

式中，h_{nb} 为传热系数，其值取文献［16］中 Cooper 经典核沸腾模型结果；q 为热流密度，W/m²；B 为标度因子，假设为 1.0，即传递到气泡界面的热量全部转化为潜热；β_l 为液相传质速率，m/s；假设 β_l=0.000 3 m/s，研究表明，该值对混合流动沸腾具有最佳的预测性能［44］；h_{lg} 为汽化潜热，J/kg。

3.2.3　*Y* 因子修正

为了考虑额外热阻，BELL 等［45］在 F_c 修正的基础上，提出了一个依赖于纯流体传热相关性的新修正方法。该方法考虑了传质阻力，根据向气相提供的显热增加热阻，将其温度从泡点温度提高到露点温度。常见的修正公式一般有 2 种形式，

分别为：

$$h_{tp}=\left(\frac{1}{F_c h_f}+\frac{Y}{h_g}\right)^{-1} \text{ 或 } h_{tp}=F_c h_{nb}+\left(\frac{1}{h_l}+\frac{Y}{h_g}\right)^{-1} \tag{6}$$

式中，h_{tp} 为两项流的换热系数；h_f 为用纯制冷剂关联式计算的传热系数；h_k 为单项流换热系数，k 为液体 l 或气体 g，h_k=0.023$Re_k^{0.8}Pr_k^{0.4}$；Y 为修正因子，定义如下：

$$Y=xc_{pv}T_g/\Delta h \tag{7}$$

式中，x 为干度；c_{pv} 为气体定压比热，J/(kg·K)；Δh 为等压焓变。

对混合物流动沸腾关系式进行评价，结果如表3、表4所示。从表中可见：

（1）混合物传热关联式在此数据库下并没有显著提高预测精度，与纯流体关联式的预测性能区别不明显；

（2）使用 T^* 判据考虑到了滑移温度和饱和温度的影响，也使用了核态沸腾项修正，其中基于物理的相关性 δ_{MAD}=37.3%，是预测精度最高的关联式，但是仍不能满足工程需要；

（3）3种修正方法都能不同程度地提高预测精度，这表明采用修正纯制冷剂关联式预测混合制冷剂传热系数的方法可行。

表3 直接拟合类型混合制冷剂关联式误差

Tab.3 Prediction errors of heat transfer correlations for mixed refrigerants with directly fitted

文献	δ_{MAD}	δ_{MRD}
文献[38]	45.8	−35.7
文献[39]	54.4	39.0
文献[40]	89.5	70.7
文献[41]	165.0	689.7
文献[11]模型1	37.3	−18.3
文献[11]模型2	48.2	−34.5

表4 修正类型混合制冷剂关联式误差

Tab.4 Prediction errors of heat transfer correlations for mixed refrigerants with correction type

类型	作者	原纯流体模型/修正	δ_{MAD}	δ_{MRD}
Ma	文献[9]	文献[30]/*Ma*	45.3/**44.3**	−6.9/**−18.6**
F_c	文献[46]	文献[23]/F_c	57.6/**39.5**	38.8/**5.5**
	文献[11]	文献[14]/F_c	45.0/**42.8**	20.2/**10.4**
	文献[47]	文献[15]/F_c	65.9/**53.1**	55.3/**39.3**
	文献[10]	文献[37]/F_c	54.2/**53.1**	8.3/**1.4**
Y	文献[46]	文献[33]/Y	57.2/**39.2**	35.2/**0.1**
	文献[46]	文献[28]/Y	48.8/**40.9**	14.8/**−14.9**
	文献[11]	文献[14]/Y	45.0/**42.1**	20.2/**−21.5**
	文献[46]	文献[15]/Y	65.9/**48.2**	55.3/**31.3**
	文献[48]	文献[12]/Y	248.2/**106.8**	240.3/**91.4**

注：粗体为修正后的结果。

4 新模型的开发与验证

通过上述研究发现，现有的关联式预测精度并不理想，通过对现有模型的适应性分析，采用如下思路建立新的关联式。

（1）混合制冷剂传热关系式修正方法比较依赖于原纯制冷剂模型，对于误差分布比较均匀的模型修正效果欠佳，所以新模型仍选择根据数据库直接多元回归拟合方法。

（2）分析对总数据库预测精度较高模型的公式形式，结合传热理论和无量纲数的使用频率，总结归纳出可能会对传热系数产生较大影响的无量纲参数作为公式基础。

（3）在此基础上，通过增加与去除其他使用频率略低的无量纲数，得到几种无量纲数的排列组合。

（4）采用最小二乘法对每一种组合进行回归分析，对基本公式形式进行尝试与修正，使预测值逼近试验值，重复此步骤直至 δ_{MAD} 尽量小且 δ_{MRD} 在零附近为止，得到关联式的系数。

通过以上方法获得的新管内混合制冷剂流动沸腾传热预测模型如下：

$$Nu=\begin{cases}90.92p_r^{0.01}Pr_l^{0.12}Bo^{0.48}Re_{lo}^{0.56} & \ln\left(\dfrac{\mu_{lf}}{\mu_{lw}}\right)<0.05\\ 2.27p_r^{-0.22}Pr_l^{0.35}Bo^{0.65}Re_{lo}^{0.96} & \ln\left(\dfrac{\mu_{lf}}{\mu_{lw}}\right)\geqslant 0.05\end{cases} \tag{8}$$

式中，Nu 为努塞尔数，$Nu=D/(\lambda_l h_{lp})$；D 为通道当量直径，m；p_r 为饱和压力与临界压力之比；Bo 为沸腾数，$Bo=q/(Gh_{lg})$；Re_{lo} 为全液相雷诺数，$Re_{lo}=GD/\mu_l$；G 为质量流速，kg/(m^2·s)；下标 f，w 分别为以流体和壁面温度计算。

新关联式的 δ_{MAD}=28.8%，δ_{MRD}=0.1%，而现存最好的关联式的 δ_{MAD}=37.3%，δ_{MRD}=−18.3%，由此可见，新关联式预测精度有显著提高。而且，新公式形式大幅简化，更方便使用。其适用范围为数据库参数范围。新关联式预测误差如图 3 所示，从图中可以看出，相比于现有的关联式，新关联式误差点比较集中，分布比较均匀。

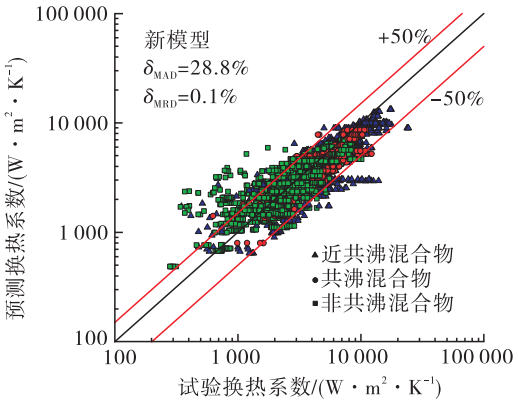


图 3　新关联式预测误差

Fig.3　Error distributions for new correlation

为了进一步验证新关联式的普适性，从文献[49–50]中搜集到 65 组 R452B(R32:R125:R1234yf=0.67:0.07:0.26)和 53 组 R450A(R134a:R1234ze(E)=0.42:0.58)组成验证数据库，此数据库与开发新关联式的数据库之间没有重复数据，并且没有相同的工质流体，使用验证数据对上述各关联式进行评价分析，新关联式的预测精度最好，δ_{MAD}=17.5%，δ_{MRD}=−12.0%，文献[35]次之，δ_{MAD}=18.2%，δ_{MRD}=9.2%，新关联式仍表现出较高的预测精度。

5　结论

(1)从 31 篇国内外公开发表的文章中，收集建立了包括 3 901 组数据的混合制冷剂管内饱和流动沸腾传热数据库，涉及共沸混合物 R507，R513A，近共沸混合物 R410A，R404A，以及非共沸混合物 R407C，R417A，R452A，R448A，R455A，R454C，R447A，共 11 个制冷剂。参数范围：管内径 D=0.5~21 mm；饱和压力 p=0.019~2.501 4 MPa，质量流率 G=50~1 109 kg/(m^2·s)，热流密度 q=2.5~60 kW/m^2，干度 x=0.003 6~0.998，滑移温度 T_g=0.002~10.88 K。

(2)基于所建立的数据库，评价分析了 26 个纯制冷剂饱和流动沸腾传热关联式。其中，有 9 个模型的 δ_{MAD} < 50%，文献[35]模型的预测性能最好，δ_{MAD}=39.1%，δ_{MRD}=31.8%，文献[17]次之，δ_{MAD}=42.9%，δ_{MRD}=−9.4%。

(3)基于所建立的数据库，评价分析了 16 个混合制冷剂饱和流动沸腾传热系数关联式，包括直接拟合型 6 个，修正型 10 个。结果表明：所有的修正均有改进效果，但是效果不明显；预测效果最好的是文献[11]中的模型 1，δ_{MAD}=37.3%，δ_{MRD}=−18.3%。

(4)提出了一个新的混合制冷剂饱和流动沸腾传热系数关联式，其 δ_{MAD}=28.8%，δ_{MRD}=0.1%，较现有的最好模型预测精度大幅提高。新关联式的适用范围为数据库参数范围。经过验证，新关联式仍表现出较高的预测精度，而且，新关联式的形式大幅度简化，方便使用。

参考文献：

[1] HEATH E A.Amendment to the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer(Kigali amendment)[J].International Legal Materials,2017,56(1):193 – 205.

[2] CHEN J Y,YU J L.Performance of a new refrigeration cycle using refrigerant mixture R32/R134a for residential air-conditioner applications[J].Energy and Buildings,2008,40(11):2022 – 2027.

[3] LIU Q,DUAN Y Y,YANG Z.Effect of condensation temperature glide on the performance of organic Rankine cycles with zeotropic mixture working fluids[J].Applied Energy,2014,115:394 – 404.

[4] YANG Z Q,CHEN G F,ZHAO Y X,et al. Experimental study on flow boiling heat transfer of a new azeotropic mixture of R1234ze(E)/R600a in a horizontal tube[J].International Journal of Refrigeration,2018,93:224 – 235.

[5] SHAH M M. A method for predicting heat transfer during boiling of mixtures in plain tubes[J].Applied Thermal Engineering,2015,89:812 – 821.

[6] FANG X D. A new correlation of flow boiling heat transfer coefficients based on R134a data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,66:279 – 283.

[7] FANG X D,ZHOU Z R,WANG H.Heat transfer

correlation for saturated flow boiling of water[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 76: 147 – 156.

[8] FANG X D, ZHUANG F, CHEN C, et al. Saturated flow boiling heat transfer: Review and assessment of prediction methods[J]. Heat and Mass Transfer, 2019, 55(1): 197 – 222.

[9] DANG C, JIA L, XU M C, et al. Experimental study on flow boiling characteristics of pure refrigerant (R134a) and zeotropic mixture (R407C) in a rectangular micro-channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 351 – 361.

[10] MASTRULLO R, MAURO A W, VISCITO L. Flow boiling of R452A: Heat transfer data, dry-out characteristics and a correlation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 105: 247 – 260.

[11] ZHANG J, MONDEJAR M E, HAGLIND F. General heat transfer correlations for flow boiling of zeotropic mixtures in horizontal plain tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 824 – 839.

[12] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1966, 5(3): 322 – 329.

[13] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlation for flow boiling heat transfer in mini-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(26): 5749 – 5763.

[14] GUNGOR K E, WINTERTON R H S. Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparisons of correlations with data[J]. Chemical Engineering Research & Design, 1987, 65(2): 148 – 156.

[15] GUNGOR K E, WINTERTON R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29(3): 351 – 358.

[16] COOPER M G. Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling–A wide-ranging examination using reduced properties[J]. Advances in Heat Transfer, 1984, 16: 157 – 239.

[17] BERTSCH S S, GROLL E A, GARIMELLA S V. A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 52(7/8): 2110 – 2118.

[18] KANDLIKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(1): 219 –228.

[19] KANDLIKAR S G, BALASUBRAMANIAN P. An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels[J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(3): 86 – 93.

[20] SHAH M M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study[J]. ASHRAE Transactions, 1982, 88: 185 – 196.

[21] LAZAREK G M, BLACK S H. Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R–113[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(7): 945 – 960.

[22] KEW P A, CORNWELL K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels[J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(8/10): 705 – 715.

[23] SUN L C, MISHIMA K. An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(23–24): 5323 – 5329.

[24] TRAN T N, WAMBSGANSS M W, FRANCE D M. Small circular-and rectangular-channel boiling with two refrigerants[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(3): 485 – 498.

[25] YU W, FRANCE D M, WAMBSGANSS M W, et al. Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(6): 927 – 941.

[26] WARRIER G R, DHIR V K, MOMODA L A. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(1): 53 – 64.

[27] KAEW-ON J, SAKAMATAPAN K, WONGWISES S. Flow boiling heat transfer of R134a in the multiport minichannel heat exchangers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(2): 364 – 374.

[28] LIU Z, WINTERTON R H S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(11): 2759 – 2766.

[29] KENNING D B R, COOPER M G. Saturated flow boiling of water in vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(3): 445 – 458.

[30] LI W, WU Z. A general criterion for evaporative heat transfer in micro/mini-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 53(9): 1967 – 1976.

[31] HAMDAR M, ZOUGHAIB A, CLODIC D. Flow boiling

heat transfer and pressure drop of pure HFC-152a in a horizontal mini-channel[J].International Journal of Refrigeration,2009,33(3):566 - 577.

[32] JUNG D S,MCLINDEN M,RADERMACHER R,et al. A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,1989,32(9):1751 - 1764.

[33] WATTELET J P,CHATO J C,SOUZA A L, Evaporative characteristics of R-12,R-134a,and a mixture at low mass fluxes[J].ASHRAE Transaction, 1994:603 - 615.

[34] SAITOH S,DAIGUJI H,HIHARA E.Correlation for boiling heat transfer of R-134a in horizontal tubes including effect of tube diameter[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(25/26): 5215 - 5225.

[35] FANG X D.A new correlation of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013, 64:802 - 807.

[36] MAHMOUD M M,KARAYIANNIS T G.Heat transfer correlation for flow boiling in small to micro tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013, 66:553 - 574.

[37] KIM S M,MUDAWAR I.Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels-Part II.Two-phase heat transfer coefficient[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,64:1239 - 1256.

[38] MISHRA M P,VARMA H K,SHARMA C P.Heat transfer coefficients in forced convection evaporation of refrigerants mixtures[J].Letters in Heat and Mass Transfer,1981,8(2):127 - 136.

[39] BIVENS D B,YOKOZEKI A.Heat transfer coefficients and transport properties for alternative refrigerants [C]//International Refrigeration and Air Conditioning Conference,Indiana:Purdue University,1994:299 - 304.

[40] CHOI T Y,KIM Y J,KIM M S,et al.Evaporation heat transfer of R-32,R-134a,R-32/134a,and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2000, 43(19):3651 - 3660.

[41] GUO C,WANG J,DU X Z,et al.Experimental flow boiling characteristics of R134a/R245fa mixture inside smooth horizontal tube[J].Applied Thermal Engineering,2016,103:901 - 908.

[42] FUJITA Y,BAI Q.Critical heat flux of binary mixtures in pool boiling and its correlation in terms of Marangoni number[J].International Journal of Refrigeration, 1997,20(8):616 - 622.

[43] THOME J R,SHAKIR S.A new correlation for nucleate pool boiling of aqueous mixtures[J].Heat Transfer Pittsburgh,1987:46 - 51.

[44] THOME J R. Prediction of in-tube boiling of mixtures in vertical thermosyphon reboilers[C]//Dept.of Mechanical Engineering,Michigan State Univ.,East Lansing,MI 48824,1986.

[45] BELL K J,GHALY M A.An approximate generalized design method for multicomponent/partial condenser [C]//AIChE Symp.Ser.1973,69(131):72 - 79.

[46] BERTO A,AZZOLIN M,BORTOLIN S,et al. Measurements and modelling of R455A and R452B flow boiling heat transfer inside channels[J]. International Journal of Refrigeration,2020,120: 271 - 284.

[47] MAURO A W,NAPOLI G,PELELLA F,et al.Flow boiling heat transfer and pressure drop data of non-azeotropic mixture R455A in a horizontal 6.0 mm stainless-steel tube[J].International Journal of Refrigeration,2020,119:195 - 205.

[48] AZZOLIN M,BORTOLIN S,DEL COL D.Predicting methods for flow boiling heat transfer of a non-azeotropic mixture inside a single microchannel[J]. Heat Transfer Engineering,2016,37(13/14):1136 - 1147.

[49] BERTO A,AZZOLIN M,BORTOLIN S,et al. Measurements and modelling of R455A and R452B flow boiling heat transfer inside channels[J].International Journal of Refrigeration,2020,120:271 -284.

[50] MASTRULLO R,MAURO A W,PASSARELLI A F, et al.Experimental data for flow boiling of R450A in a horizontal tube[J].Journal of Physics:Conference Series,2024,2685(1):012063.

作者简介：何志强（1998），男，硕士研究生，研究方向为制冷与低温工程、两相流传热、飞行器环境控制，E - mail:zhqiang_he@163.com。

通信作者：方贤德（1954），男，二级教授，研究方向为两相流传热、飞行器环境控制与制冷技术、暖通空调与可再生能源利用技术，通信地址：210016 江苏省南京市秦淮区御道街 29 号南京航空航天大学行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室，E - mail:xd_fang@nuaa.edu.cn。

本文引用格式：
何志强，方贤德，方玉祥，等 . 混合制冷剂饱和流动沸腾传热关联式研究[J]. 流体机械，2025，53(2)：86 - 93.
HE Z Q,FANG X D,FANG Y X,et al.A study of saturated flow boiling heat transfer correlations for mixed refrigerants[J].Fluid Machinery,2025, 53(2):86 - 93.