

混合制冷剂在微肋管内流动沸腾的换热关系式

张小艳^{1,2}, 张兴群¹, 陈蕴光¹, 袁秀玲¹

(1:西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安科技大学能源学院, 710054, 西安)

摘要: 基于作者以前研究得到的三元非共沸混合制冷剂 R417A 在水平光滑管和 2 种不同几何参数的内螺纹管中流动沸腾换热的实验结果, 应用 R417A 在光滑管内的实验数据对 Kattan 模型进行修正, 并通过在修正-Kattan 模型中引入强化因子, 发展了一个混合制冷剂在微肋管内流动沸腾的换热关系式. 计算结果与实验结果比较表明: 该关系式能很好地预测混合制冷剂在不同的内螺纹管中流动沸腾时的换热系数, 当干度小于 80% 时, 预测偏差基本集中在 $\pm 30\%$ 的范围之内.

关键词: R417A; 沸腾; 微肋; 换热关系式

中图分类号: TK172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1279-05

Boiling Heat Transfer Correlations for Refrigerant Mixtures Flowing Inside Micro-Fin Tubes

Zhang Xiaoyan^{1,2}, Zhang Xingqun¹, Chen Yunguang¹, Yuan Xiuling¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the experimental results from the authors' previous study on ternary non-azeotropic refrigerant mixture R417A flowing and boiling in one smooth and two internally grooved horizontal tubes with different geometrical parameters, a boiling heat transfer correlations was developed for refrigerant mixtures flowing inside micro-fin tubes by applying the enhancement factor in the present modified-Kattan model, which was modified by the experimental data of R417A in a smooth tube. The comparison of the calculation and the experimental results indicates that the prediction by the present correlations is in good agreement with the experiment of refrigerant mixtures inside different micro-fin tubes with a standard deviation of $\pm 30\%$ for vapor qualities below 80%.

Keywords: R417A; boiling; micro-fin; heat transfer correlation

符 号 表

b	螺纹间距, mm	H_w	螺纹管底壁厚, mm	δ	液膜厚度, m
d	直径, mm	h	换热系数, $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	η_A	换热面积增加率
E_{mf}	微肋强化因子	n	螺纹数	λ	导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
E_{RB}	对流强化因子	Pr	普朗特数	θ_{dry}	干燥角
F_c	混合修正因子	Re	雷诺数		下标
G	质量流速, $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	α	螺纹顶角, ($^\circ$)	cv	对流蒸发
H_f	螺纹高度, mm	β	螺旋角, ($^\circ$)	l	液相

nb 核态沸腾
o 外侧

r 根部
t 顶部

tp 两相
v 气相

混合制冷剂在微肋管内换热机理的复杂性,使换热关系式的发展具有一定的难度,目前可用于计算混合制冷剂在微肋管内流动沸腾换热的关系式非常少.文献[1-3]基于文献[4]的思想,分别以不同的方式通过在光滑管关系式中引入强化因子,提出了制冷剂流动沸腾换热的微肋模型.文献[1]关系式中的强化因子主要反映了制冷剂的热物理性质、流动及沸腾特性,除了平均内径以外,没有包含微肋管的其他几何参数对换热的影响.在文献[2-3]的关系式中,肋高、肋数、肋片旋转角度、不同形式的内径等换热管几何参数,以及制冷剂质量流速等对换热的影响,均被归入了强化因子之中.这几个关系式都是基于纯质制冷剂而发展的,对于非共沸混合制冷剂,虽然通过核态沸腾抑制因子考虑了混合效应对换热的影响^[5],但仍然给出了过高的预测结果^[6].本文的主要目的就是发展能较好地预测非共沸混合制冷剂在微肋管内流动沸腾换热的计算关系式.

1 实验数据来源

为了研究制冷剂 R417A 在水平管内的流动沸腾换热性能,采用一个蒸汽压缩式制冷系统作为实验装置,蒸发换热实验段由 3 个水平逆流套管型换热器并联组成.由于内螺纹管是应用最为广泛的一种微肋管,所以套管型换热器的内管采用外径为 9.52 mm 的一根光滑管 I 和 2 根不同几何尺寸的内螺纹管 II、III(详见图 1、表 1),有关实验装置的详细介绍参见文献[7].实验研究的制冷剂质量流速范围为 $176 \sim 344 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,热流密度为 $11 \sim 32 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,干度为 $0.2 \sim 1.0$,蒸发温度为 $0 \sim 5.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,应用所得到的实验数据发展混合制冷剂在水平微肋管内流动沸腾换热计算的实验关联式.

2 新换热关系式的发展

制冷剂在微肋管内的流动沸腾换热关系式一般

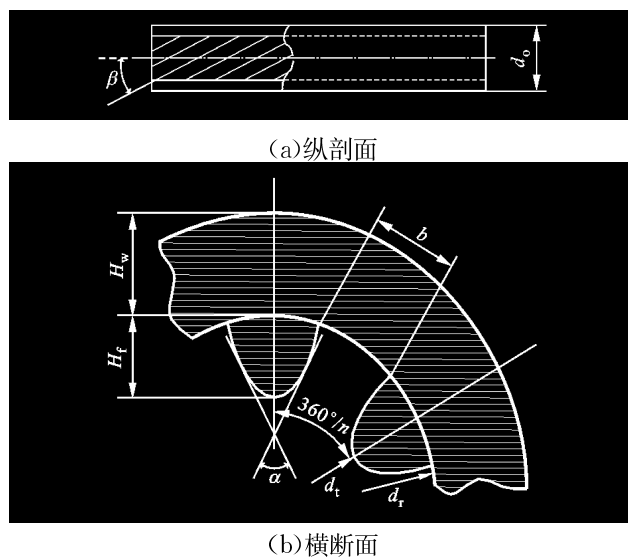


图1 内螺纹管的几何参数图

是在光滑管关系式的基础上,考虑微肋参数、由微肋及其所产生的附加效应等对换热的影响而引入相应的强化因子,因此光滑管关系式的分析与选择以及强化因子的确定是关键.

2.1 修正-Kattan 关系式

在制冷剂在光滑管内流动沸腾换热的计算关系式中,Kattan 关系式^[8]是惟一的一个考虑了流动区域对换热产生影响的关系式,并且基于制冷剂所发生的物性变化,能表示出制冷剂在整个蒸发过程中换热系数的局部变化,可用下式表示

$$\frac{2\pi h_{tp} - \theta_{dry} h_v}{(2\pi - \theta_{dry})} = (h_{nb}^3 + h_{cv}^3)^{1/3} \quad (1)$$

式中: h_{nb} 由 Cooper 关系式计算; h_v 由 Dittus-Boelter 关系式计算; θ_{dry} 根据不同流动区域采用不同的计算方法^[8]; h_{cv} 为液态对流蒸发换热系数,由下式计算^[8]

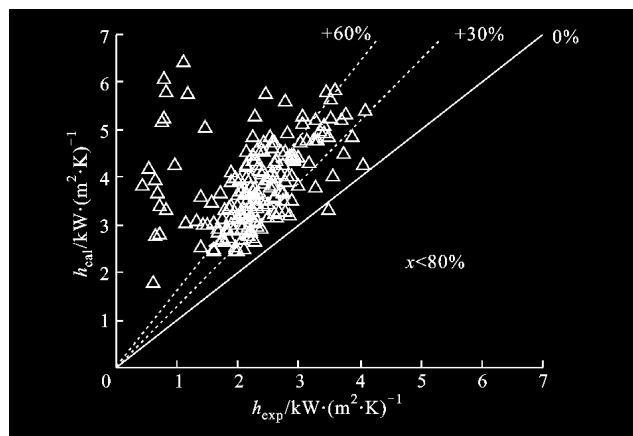
$$h_{cv} = C Re_l^m Pr_l^{0.4} \frac{\lambda_l}{\delta} \quad (2)$$

表1 实验管的几何参数数据表

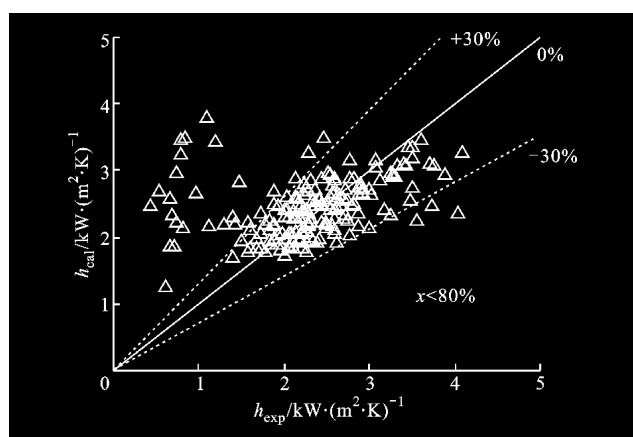
实验管	d_o/mm	d_r/mm	d_l/mm	H_w/mm	H_f/mm	b/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	n	η_λ
I	9.520			0.660						
II	9.505	8.785	8.461	0.360	0.162	0.173	56.1	20.3	65	1.475
III	9.504	8.778	8.462	0.363	0.158	0.099	90.0	22.6	65	1.320

其中常系数 C 和雷诺数指数 m 可由实验数据拟合得到. Kattan 等人^[8]应用制冷剂 R134a、R123、R402A、R404A 和 R502 的实验数据得到的结果为 $m = 0.69$, $C = 0.0133$, 对非共沸混合制冷剂 R417A, Kattan 关系式给出了过高的预测结果. Boissieux 等人^[9]应用制冷剂 R407C、R417A 的实验结果对这 2 个参数进行了重新定义,得到了较好的预测结果,但其应用的热流密度范围与本实验的工况范围相差较大.因此,在本研究中,应用 R417A 在光滑管 I 中的实验数据对这 2 个参数重新进行拟合,得到了修正-Kattan 模型,拟合结果为 $m = 0.5134$, $C = 0.030298$.

图 2 选用的是干度 x 小于 80% 的换热系数数据. 图 2 表明:与 Kattan 模型相比,修正-Kattan 模型给出了比较好的预测结果,当干度小于 80% 时,预测偏差基本都集中在 $\pm 30\%$ 的范围内.



(a) Kattan 关系式



(b) 修正-Kattan 关系式

图 2 R417A 在光滑管 I 中换热系数计算值与实验结果的比较

2.2 Thome 强化因子

在 Thome^[3]提出的制冷剂在微肋管内的流动

沸腾换热关系式中,肋高、肋数、肋片旋转角度、肋根径等参数均被归入了强化因子之中,因此能够反映出不同结构尺寸和几何参数的微肋管对换热的影响. Thome 关系式^[3]为

$$h_{tp} = E_{mf} [h_{nb}^3 + (E_{RB} h_{cv})^3]^{1/3} \quad (3)$$

强化因子采用下式进行计算

$$E_{mf} = 1.89 \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^2 - 3.7 \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + 3.02 \quad (4)$$

$$E_{RB} = \left\{ 1 + \left[2.64 Re_l^{0.036} \cdot \left(\frac{H_l}{d_r} \right)^{0.212} \left(\frac{p}{d_r} \right)^{-0.21} \left(\frac{\beta}{90^\circ} \right)^{0.29} Pr_l^{-0.024} \right]^7 \right\}^{1/7} \quad (5)$$

$$p = (\pi d_r / n) / \tan \beta$$

G_{ref} 作为参考质量流速引入到强化因子的归一化表达式中,其取值为实验研究中质量流速的最大值.

2.3 修正-Kattan 关系式的 Thome 强化

根据以上分析,假设光滑管与低肋管具有类似的流型转变边界,对新关系式的发展提出如下思想:将能反映微肋参数影响的 Thome 强化因子引入到修正-Kattan 关系式中,并对 E_{mf} 的表达式应用 R417A 在内螺纹管 II、III 中的实验数据重新拟合,得到可用于混合制冷剂在微肋管内流动沸腾换热的实验关联式,具体如下

$$\frac{2\pi h_{tp} - \theta_{dry} h_v}{2\pi - \theta_{dry}} = E_{mf} (h_{nb}^3 + (E_{RB} h_{cv})^3)^{1/3} \quad (6)$$

上式也可表示为如下形式

$$E_{mf} = \frac{(2\pi h_{tp} - \theta_{dry} h_v) / (2\pi - \theta_{dry})}{(h_{nb}^3 + (E_{RB} h_{cv})^3)^{1/3}} \quad (7)$$

根据 Thome 关系式^[3], E_{mf} 与制冷剂的质量流速 G 之间的关系可用下式来表示

$$E_{mf} = a \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^2 + b \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + c \quad (8)$$

式中: E_{mf} 和 G/G_{ref} 可应用 R417A 在内螺纹管 II、III 中的实验数据,通过公式(7)计算得到,计算结果及它们之间的关系如图 3 所示.

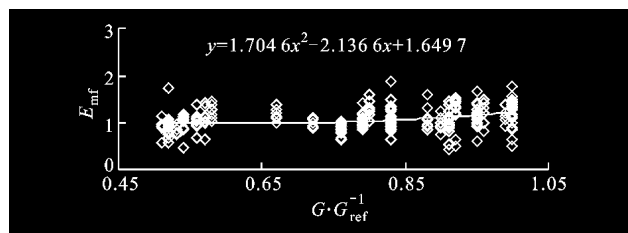


图 3 公式(8)中的参数 a 、 b 和 c 的关系

根据图 3 所示的拟合结果得到如下关系式

$$E_{mf} = 1.7046 \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^2 - 2.1366 \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + 1.6497 \quad (9)$$

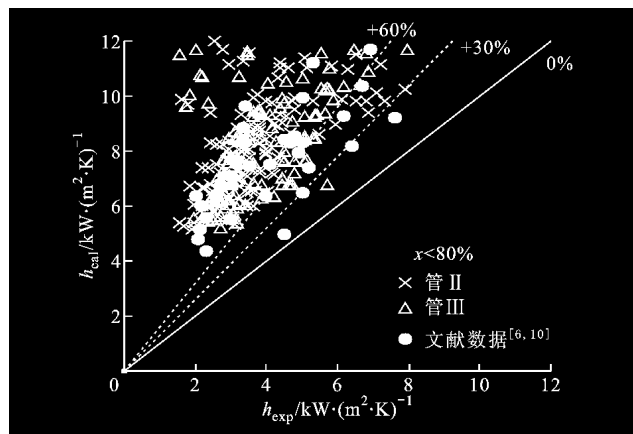
对于非共沸混合制冷剂,应考虑混合效应对核态沸腾换热的影响,这一影响可用 Thome 和 Shakir^[5] 建议的核态沸腾抑制因子 F_c 来表示,最终得到的可用于非共沸混合制冷剂在微肋管内流动沸腾换热计算的实验关联式如下

$$h_{tp} = \frac{E_{mf}((F_c h_{nb})^3 + (E_{RB} h_{cv})^3)^{1/3} (2\pi - \theta_{dry}) + \theta_{dry} h_v}{2\pi} \quad (10)$$

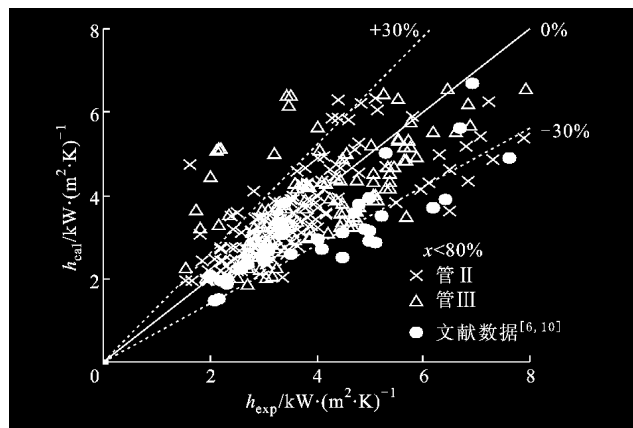
式中: E_{mf} 应用公式(9)计算; E_{RB} 应用公式(5)计算. 该实验关联式的应用范围如下: 制冷剂质量流速为 $176 \sim 344 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 热流密度为 $11 \sim 32 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 干度为 $0.2 \sim 0.8$, 蒸发温度为 $0 \sim 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

3 实验结果与换热关系式计算值的比较

图4表明: 对于非共沸混合制冷剂 R417A 在内螺纹管 II 和 III 中的流动沸腾换热, Thome 关系式^[3] 给出了过高的预测结果, 基本超过了实验值的



(a) Thome 关系式



(b) 新换热关系式

图4 R417A 在内螺纹管 II 和 III 中换热系数计算值与实验结果的比较

60%以上, 而新发展的换热关系式能很好地预测 R417A 在不同的内螺纹管中流动沸腾时的换热系数, 当干度小于 80% 时, 计算偏差基本都集中在 $\pm 30\%$ 的范围之内. 另外, 图4还选取了文献[6, 10] 中的实验数据与关系式的预测值进行了比较, 对于文献数据, 新发展的换热关系式也比 Thome 关系式有着更好的预测结果.

4 结 论

基于 R417A 在光滑管和 2 种不同几何参数的内螺纹管 II 和 III 中流动沸腾换热的实验结果, 本文发展了一个预测非共沸混合制冷剂在微肋管中流动沸腾换热的经验关系式, 当干度小于 80% 时, 新发展的关系式对 R417A 换热系数的预测偏差基本都集中在 $\pm 30\%$ 的范围之内.

参考文献:

- [1] Koyama S, Yu J, Momoki S, et al. Forced convective flow boiling heat transfer of pure refrigerants inside a horizontal microfin tube[C]//Proceedings of the Convective Flow Boiling Conference. London: Taylor and Francis, 1995:137-142.
- [2] Cavallini A, Del Col D, Doretti L, et al. Refrigerant vaporization inside enhanced tubes: a heat transfer model [J]. International Journal of Heat and Technology, 1999, 17(2):29-36.
- [3] Thome J R, Kattan N, Favrat D. Evaporation in microfin tubes: a generalized prediction model[C]//Proceedings of the Convective Flow and Pool Boiling Conference. Philadelphia: Taylor and Francis, 1999:239-244.
- [4] Chen J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Industrial and Engineering Chemistry, Process Design and Development, 1966, 5(3): 322-329.
- [5] Thome J R, Shakir S. A new correlation for nucleate boiling of aqueous mixtures [J]. AIChE Symp Ser, 1987, 83(257):46-51.
- [6] Wellsandt S, Vamling L. Evaporation of R407C and R410A in a horizontal herringbone microfin tube: heat transfer and pressure drop [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6): 901-911.
- [7] 张小艳, 袁秀玲, 田怀璋. R417A 在水平光滑管和内螺纹管中的流动沸腾换热 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1):18-22.

Zhang Xiaoyan, Yuan Xiuling, Tian Huaizhang. Evaporation heat transfer of R417A flowing inside horizon-

- tal smooth and internally grooved tubes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 18-22.
- [8] Kattan N, Thome J R, Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes, part 3: development of a new heat transfer model based on flow pattern [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120(2): 156-164.
- [9] Boissieux X, Heikal M R, Johns R A. Two-phase heat transfer coefficients of three HFC refrigerants inside a horizontal smooth tube, part I: evaporation [J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23 (4): 269-283.
- [10] Kuo Chenghu, Wang Chichuan. Horizontal flow boiling of R22 and R407C in a 9.52mm micro-fin tube [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(8/9): 719-732.

(编辑 王焕雪)