

基于 Rohsenow 关联式的池沸腾 HTC 预测修正模型

陆存豪*, 刘 炜, 张泽远, 陈 建
(扬州大学机械工程学院, 江苏扬州 225100)

摘要:针对去离子水池沸腾传热系数 (HTC) 预测, 当前理论研究主要是基于 Rohsenow 关联式, 采用固定数值的方式对关联式中的经验参数进行优化。本文基于 Rohsenow 关联式, 通过拟合法建立关联式中两个经验参数与过热度的联系, 进而搭建了池沸腾 HTC 预测修正模型。与 3 组去离子水铜表面池沸腾实验结果对比, 修正模型对 HTC 的预测平均误差为 17.79%、5.35%、18.14%, 优于 Rohsenow 关联式模型和 Li 关联式模型。研究工作可以为 HTC 的预测提供一定的理论帮助。

关键词:池沸腾; 传热系数 (HTC); 热流密度; Rohsenow 关联式; 预测模型

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0222-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.040

Rohsenow correlation formula for prediction correction model of pool boiling heat transfer coefficient

LU Cun-hao*, LIU Wei, ZHANG Ze-yuan, CHEN Jian

(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: In view of predicting the boiling heat transfer coefficient (HTC) at a deionized water pool, current theoretical research is mainly based on Rohsenow correlation formula, and the empirical parameters in the correlation formula are optimized through using a fixed numerical method. Based on Rohsenow correlation formula, the relationships between the two empirical parameters and the superheat in the correlation formula are established through the fitting method, and then a modified model is constructed for predicting HTC of pool boiling. Compared with the boiling experimental results from three groups of deionized water copper surface pools, the average prediction errors of the modified model for HTC are 17.79%, 5.35% and 18.14%, which are better than those of Rohsenow correlation model and Li correlation model. This research work can provide some theoretical help for HTC prediction.

Key words: pool boiling; heat transfer coefficient; heat flux; Rohsenow correlation; prediction model

池沸腾冷却技术具有换热效率高、均温性能好和工质用量少等优势, 广泛应用于化工、生产制造、航空航天、集成电路等领域^[1-4]。传热系数 (Heat Transfer Coefficient, HTC) 是池沸腾重要的热力学限制参数之一, 直接影响池沸腾的传热性能。由于沸腾过程涉及到相变、传热、流体等多个物理场, 不少学者通过实验的方式获取池沸腾 HTC 的预测模型, 为加快池沸腾的应用提供理论基础。

Stephan 等^[6]通过实验研究不同工质在不同工况下的池沸腾曲线, 建立制冷剂、碳氢化合物以及其他流体池沸腾 HTC 预测关联式。Jung 等^[7]通过实验测量 5 种制冷剂在水平光滑管上的池沸腾 HTC, 通过回归分析方法提出一种可靠的 HTC 预测关联式。Rao 等^[8]实验发现混合物的传热系数低于单一冷却液或二元混合物, 考虑表面和液体相互作用参数和表面粗糙度的影响, 提出了池沸腾 HTC 预测模型。Walunj 等^[9]实验研究了粗糙铜表面的瞬态池

沸腾传热特性, 并根据表面粗糙度和指数加热时间常数建立了池沸腾 HTC 的关联式。Rohsenow 关联式^[5]是应用最多的池沸腾 HTC 预测模型之一, Li 等^[10]在其基础上引入综合表面特征参数, 包含接触角、表面粗糙度和加热表面材料影响参数的综合效应, 建立池沸腾 HTC 预测模型。

本文研究发现, Rohsenow 关联式中的经验参数对 HTC 预测结果有较大的影响, 虽然多位学者优化经验参数的数值, 但模型的预测精度并不高。本文采用拟合法, 对 Rohsenow 关联式中的 2 个经验参数进行研究, 搭建经验参数与过热度的关联, 进而建立修正模型, 并对预测结果与实验结果、当前模型进行对比。

1 当前模型

1.1 Rohsenow 关联式

1952 年 Rohsenow^[5]提出一种核态池沸腾 HTC

预测关联式,该关联式基于加热表面直接向液体传热以及气泡在沸腾表面每个活化核心上单独成核上升,这一过程不存在气泡融合的假设。考虑了气泡的形成和脱离对流体搅动的影响,认为沸腾气泡主要是由于液体和蒸汽之间存在密度差,并产生了一个向上的浮力,驱动气泡从加热表面脱离。同时考虑了液体的动力黏度和比热容,以及加热表面的温度和接触角对沸腾的影响,得到如式(1)的模型:

$$(c_{pl}\Delta T)/h_{fg} =$$

$$C_{sf} \{ [q/(\mu_l h_{fg})] \sqrt{\sigma_l/[g(\rho_l - \rho_g)]} \}^m Pr^n \quad (1)$$

其中, c_{pl} 为液体比热容、 ΔT 为过热度、 h_{fg} 为汽化潜热、 q 为热流密度、 μ_l 为液体动力黏度、 σ_l 为液体表面张力、 g 为重力加速度、 ρ_l 为液体密度、 ρ_g 为汽体密度、 Pr 为液体普朗特数、 C_{sf} 、 m 、 n 为经验参数,对于去离子水,取 $C_{sf}=0.013$ 、 $m=0.33$ 、 $n=1$ 。

由此可得热流密度的预测关系式:

$$q = [(c_{pl}\Delta T)/(h_{fg}PrC_{sf})]^{3.03} \mu_l h_{fg} \sqrt{[g(\rho_l - \rho_g)]/\sigma_l} \quad (2)$$

则可以计算传热系数:

$$h = q/\Delta T \quad (3)$$

其中, h 为传热系数。

1.2 Li 关联式

2014年Li等^[10]考虑到固-液接触角的影响,认为池沸腾总热流密度等于气泡生长所需热流密度加上未受气泡脱离影响自然对流的热流密度,并引入包含接触角、表面粗糙度和加热表面材料影响参数综合效应的表面特性参数 C_s 对池沸腾 HTC 进行预测,其预测模型如式(4):

$$(c_{pl}\Delta T)/h_{fg} =$$

$$0.013C_s^{-0.33} \{ [q/(\mu_l h_{fg})] \sqrt{\sigma_l/[g(\rho_l - \rho_g)]} \}^{0.33} Pr \quad (4)$$

可以发现,Li 关联式是对 Rohsenow 关联式中经验参数 C_{sf} 进行修正。进一步,可将式(4)转化为关于热流密度的关系式:

$$q = 518\ 503C_s [k_l^{3.03}/(h_{fg}\mu_l)^{2.03}] \sqrt{[g(\rho_l - \rho_v)]/\sigma_l} \Delta T^{3.03} \quad (5)$$

其中, k_l 为液体导热系数、 C_s 为受热面综合效应参数,对于去离子水, C_s 取 1.044。

2 修正模型

通过观察式(1),发现在给定压力条件下,等式左边是关于自变量过热度 ΔT 的分式,等式右边是关于因变量热流密度 q 的分式,即式(1)表示的是池沸腾过程中过热度 ΔT 和热流密度 q 之间的指数关系。进一步分析发现,经验参数 C_{sf} 和 n 改变的是

指数系数,而经验参数 m 改变的是指数次数。对于去离子水, n 取 1,因此研究暂不考虑 n 取值。

基于 Rohsenow 关联式,考虑过热度 ΔT 的变化对经验参数 C_{sf} 和 n 取值影响,通过拟合法,提出其修正模型 $C_{sf(mod)}$ 和 $m_{(mod)}$,分别表示如下:

$$C_{sf(mod)} = (1 - 1/10e^{\Delta T/12}) C_{sf} \quad (6)$$

$$m_{(mod)} = m/(1 - 1/5e^{\Delta T/12}) \quad (7)$$

由此得到去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 修正模型:

$$(c_{pl}\Delta T)/h_{fg} =$$

$$C_{sf(mod)} \{ [q/(\mu_l h_{fg})] \sqrt{\sigma_l/[g(\rho_l - \rho_g)]} \}^{m_{(mod)}} Pr \quad (8)$$

根据式(6)~式(8)得到热流密度如式(9),其中 C_{sf} 取 0.013、 m 取 0.33:

$$q = \{ (c_{pl}\Delta T)/[C_{sf}(1 - 1/10e^{\Delta T/12})h_{fg}Pr] \}^{(1-1/5e^{\Delta T/12})/m} \times \mu_l h_{fg} \sqrt{[g(\rho_l - \rho_g)]/\sigma_l} \quad (9)$$

$C_{sf(mod)}/C_{sf}$ 与过热度 ΔT 关系曲线见图 1, $m_{(mod)}/m$ 与过热度 ΔT 关系曲线见图 2。

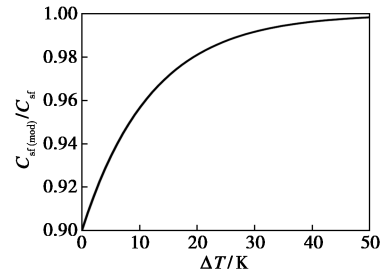


图 1 $C_{sf(mod)}/C_{sf}$ 与过热度 ΔT 关系曲线

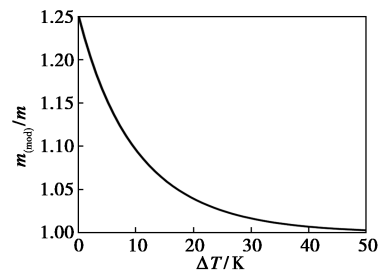


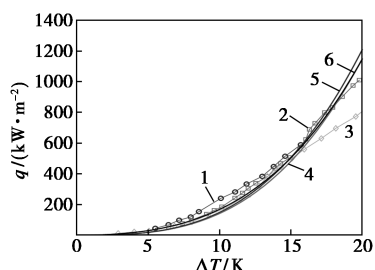
图 2 $m_{(mod)}/m$ 与过热度 ΔT 关系曲线

图 1 和图 2 分别表示 $C_{sf(mod)}$ 和 $m_{(mod)}$ 相比于未修正的 C_{sf} 和 m ,随过热度 ΔT 的变化而变化的趋势。根据图 1 可以看出,在过热度较低的情况下, $C_{sf(mod)}$ 与 C_{sf} 的比值小于 1,随着过热度的升高,二者比值逐渐趋近于 1;图 2 所反映的信息恰恰相反,在过热度较低的情况下, $m_{(mod)}$ 与 m 的比值大于 1,随着过热度的升高,二者比值逐渐趋近于 1。

3 实验验证

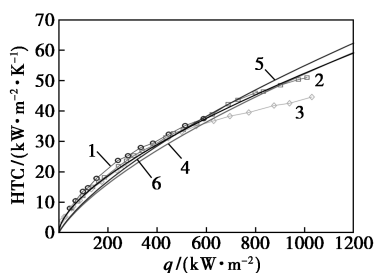
选取文献[11-13]中去离子水在纯铜表面池沸

腾实验数据对修正模型预测结果准确性进行验证,同时结合 Rohsenow 预测模型以及 Li 预测模型的预测结果进行对比分析。3 种模型对于去离子水在纯铜表面池沸腾热流密度预测结果与实验数据如图 3 所示,对于 HTC 预测结果与实验数据如图 4 所示。



1—文献[11]实验数据;2—文献[12]实验数据;
3—文献[13]实验数据;4—Rohsenow 关联式预测结果;
5—Li 关联式预测结果;6—修正模型预测结果

图 3 去离子水在纯铜表面池沸腾热流密度预测值与实验值



1—文献[11]实验数据;2—文献[12]实验数据;
3—文献[13]实验数据;4—Rohsenow 关联式预测结果;
5—Li 关联式预测结果;6—修正模型预测结果

图 4 去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 预测值与实验值

根据图 3 显示的实验结果来看,随着过热度的升高,3 组实验数据曲线均呈现上升趋势,与经典沸腾换热曲线^[14]相符合。然而 Asghar 等^[11]的实验数据曲线位于 Kwark 等^[12]和 Wu 等^[13]实验数据曲线上方,Kwark 等^[12]和 Wu 等^[13]实验数据曲线在过热度小于 15 K 的情况下基本保持一致,当过热度大于 15 K,Wu 等^[13]实验数据曲线上升趋势变缓,位于 Kwark 等^[12]实验数据曲线的下侧。图 4 中的实验数据曲线具有相同情况。

通过对 3 组实验数据的实验条件进行分析,发现 Kwark 等^[12]和 Wu 等^[13]沸腾表面尺寸一致,并小于 Asghar 等^[11]沸腾表面尺寸,沸腾表面的面积越大,其边界对于沸腾效果的影响越小,Asghar 等^[11]的实验数据曲线位于最上方。至于 Kwark 等^[12]和 Wu 等^[13]实验数据在过热度大于 15 K 后出现较大

差距,主要由于沸腾表面微结构的不同导致。根据气泡成核条件^[15],过热度越大,气泡成核所需要的微坑直径越小,因此,即使沸腾表面的粗糙度相同,由于加工方式不同,其微结构存在较大差异,对沸腾气泡成核与生长的影响也难以控制。

根据 3 种预测模型预测曲线与实验数据曲线的比较可以看出,虽然 Rohsenow 关联式和 Li 关联式预测结果曲线与实验数据曲线吻合度较高,但在过热度低于 15 K 情况下,修正模型的预测结果曲线与实验数据曲线更加贴合。特别是对于 Asghar 等^[11]实验结果的预测,修正模型预测结果明显优于其他 2 种预测模型预测结果。图 3 和图 4 所反映的结果相一致。

为了进一步定量对比 Li 预测模型、Rohsenow 预测模型以及修正模型对去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 预测结果与各组实验数据之间的误差,采用插值法填补与实验数据对应的有关数据,并计算每组实验数据与各个模型预测结果之间平均误差,结果如表 1 所示。

表 1 池沸腾 HTC 预测值平均误差 %

实验数据	Li 关联式	Rohsenow 关联式	修正模型
文献[11]	27.84	31.43	17.79
文献[12]	11.13	13.72	5.35
文献[13]	26.71	26.80	18.14

根据表 1 中的结果显示,修正模型对于去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 预测结果与 3 组实验数据之间的误差优于 Rohsenow 关联式预测结果和 Li 关联式预测结果。而 Li 关联式预测结果与 3 组实验数据之间的误差优于 Rohsenow 关联式预测结果。Li 关联式和修正模型均是对 Rohsenow 关联式中经验参数进行修正,不同的是,Li 关联式引入受热面综合效应参数 C_s ,仅对式(1)中经验参数 C_{sf} 进行修正,而修正模型考虑到过热度 ΔT 的变化对预测结果的影响,将过热度 ΔT 引入经验参数 C_{sf} 和 m 中,对其综合修正为关于过热度 ΔT 的函数。

可以看出,修正模型是对 Rohsenow 关联式的延伸与发展,对于提高去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 的预测具有一定意义。然而在高过热度情况下,实验数据出现与预测模型预测结果差距较大的情况。通过对 Rohsenow 关联式的分析发现,其模型中仅含有过热度 ΔT 这一变量,在高过热度情况下,沸腾表面微结构对于池沸腾 HTC 的影响作用加大,大量气泡产生导致气泡间的合并、挤压等现象,以及

气泡成核位点的增加,在其预测模型中均未体现,因此,基于 Rohsenow 关联式的优化模型,难以克服其原理性的局限。

4 结论

基于 Rohsenow 关联式,采用拟合法建立了经验参数与过热度的关联,提出去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 修正模型。分别采用修正模型、Rohsenow 预测模型以及 Li 预测模型对去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 进行预测,并与 Asghar 等^[11]、Kwark 等^[12]、Wu 等^[13]实验数据进行比较,修正模型的预测结果与实验数据之间平均误差分别为 17.79%、5.35%、18.14%,预测精度较 Rohsenow 关联式和 Li 关联式有所提高。

分析不同去离子水在纯铜表面池沸腾实验数据,在高过热度情况下实验结果差异较大的主要原因:

(1) 沸腾表面尺寸不同,引起边界换热差异。

(2) 大过热度情况下,气泡成核所需要微坑直径变小,沸腾表面微结构影响作用增大。

此外,从数学角度分析 3 种预测模型差异,针对高过热度情况下,实验数据与预测结果误差较大问题进行讨论,探究 Rohsenow 关联式局限性。总体来讲,修正模型一定程度上提高了 Rohsenow 关联式对去离子水在纯铜表面池沸腾 HTC 预测精度,但其对沸腾表面微结构影响的作用并未得到显示,需要对此作进一步研究。

参考文献

- [1] 国乐心,李超杰,李红海.氧化石墨烯表面的气泡动力学及传热实验[J].现代化工,2023,43(S2):173-176.
- [2] 洪思慧,高志杰,党超颖.气泡拉长诱导的汽液分离池沸腾强化研究[J].工程热物理学报,2023,44(8):2233-2239.
- [3] 王海,林宏,王晨,等.高压静电场强化多孔介质表面沸腾传热特性研究[J].化工学报,2023,74(7):2869-2879.
- [4] 刘炜,陆存豪,徐晶,等.电池模组冷却用池沸腾传热技术研究进展[J].电池,2023,53(3):338-341.
- [5] Rohsenow W M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids[J].Trans ASME,1952,74,969-975.
- [6] Stephan K,Abdelsalam M.Heat transfer correlations for natural convection boiling[J].Int J Heat Mass Tran,1980,23(1):73-87.
- [7] Jung D,Lee H,Bae D,et al.Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants [J]. Int J Refrig, 2004, 27(4):409-414.
- [8] Rao G V,Balakrishnan A R.Heat transfer in nucleate pool boiling of multi-component mixtures [J].Exp Therm Fluid Sci,2004,29(1):87-103.
- [9] Walunj A,Sathyabhama A.Experimental investigation on transient pool boiling heat transfer from rough surface and heat transfer correlations[J].Int J Heat Tech,2019,37(2):545-554.
- [10] Li Y Y,Chen Y J,Liu Z H.A uniform correlation for predicting pool boiling heat transfer on plane surface with surface characteristics effect[J].Int J Heat Mass Tran,2014,77:809-817.
- [11] Asghar N,Ali A,Masoud A.Experimental study of the optimum size of silica nanoparticles on the pool boiling heat transfer coefficient of silicon oxide/deionized water nanofluid[J].Powder Technol,2019,345:728-738.
- [12] Kwark S M,Moreno G,Kumar R,et al.Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water [J].Int J Heat Mass Tran,2010,53(21/22):4579-4587.
- [13] Wu W,Bostanci H,Chow L C,et al.Nucleate boiling heat transfer enhancement for water and FC-72 on titanium oxide and silicon oxide surfaces [J].Int J Heat Mass Tran,2010,53(9/10):1773-1777.
- [14] Nukiyama S.The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure [J].Int J Heat Mass Transf,1966,9(12):1419-1433.
- [15] 何雯,赵陈儒,薄涵亮.汽泡活化核心密度预测模型分析[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(12):1837-1842. ■
- [14] Kanbara S, Ehata T, Shimizu S. Preparation of fluorocyclopropylamines as inter-mediate for a bact-ericide: JP07048338 [P]. 1995-02-21.
- [15] Kimura Y, Atarashi S, Kawakami K, et al. (Fluorocyclopropyl) quinolones. 2. Synthesis and stereochemical structure-activity relationships of chiral 7-(7-amino-5-azaspiro[2.4]heptan-5-yl)-1-(2-fluorocyclopropyl) quinolone antibacterial agents [J]. Journal of Medicinal Chemistry, 1994, 37(20):3342-3352.
- [16] Oppolzer W, Tamura O, Deerberg J. Asymmetric synthesis of α -amino acids and α -N-hydroxyamino acids from N-acylbormane-10, 2-sultams; 1-chloro-1-nitrosocyclohexane as a practical [NH] e-
quivalent [J]. Helvetica Chimica Acta, 1992, 75(6):14-15.
- [17] Oppolzer W, Tamura O, Cardinaux F. Enantioselective synthesis of α -N-alkylamino acids via sultam-directed 'Enolate' hydroxyamination [J]. Helvetica Chimica Acta, 1993, 76(1):13.
- [18] Tamura O, Hashimoto M, Kobayashi Y, et al. Synthesis and optical resolution of dl-cis-2-fluorocyclopropylamine, the key component of the new generation of quinolonecarboxylic acid DU-6859 [J]. Tetrahedron Lett, 1992, 33:3483-3486.
- [19] Tamura O, Hashimoto M, Kobayashi Y, et al. Asymmetric synthesis of (1R,2S)-2-fluorocyclopropylamine, the key intermediate of the new generation of quinolonecarboxylic acid DU-6859 [J]. Tetrahedron, 1992, 33:3487-3490. ■

(上接第 221 页)