

文章编号: 1000-582X(2001)06-0088-04

流动沸腾中 Chen 模型抑制因子的确定

周 杰¹, 辛明道²

(1. 重庆大学 城市与环境工程学院; 2. 重庆大学 工程热物理研究所, 重庆 400044)

摘 要:以核化理论为基础,在考虑沸腾表面微结构分布的影响下,确定了流动沸腾换热关系式中 Chen 模型抑制因子的表达式。并以 R134a 和 R22 为实验工质在 14mm 内径的水平光滑管内进行了流动沸腾换热实验,对获得的实验数据采用 Chen 模型建立流动沸腾换热关系式,抑制因子采用笔者得到的表达式,该换热关系式能很好地和实验数据吻合,表明笔者确定的抑制因子表达式能有效提高采用 Chen 模型建立的流动沸腾换热关系式的准确度。

关键词:流动沸腾;抑制因子;核化理论;微结构分布;换热关系式

中图分类号:TK 124

文献标识码:A

1966年,Chen提出流动沸腾换热是核态沸腾换热和强制对流换热共同作用的结果,这个物理模型被认为是流动沸腾换热中最成功的模型,在以后的许多学者的研究中被采用。

Chen的物理模型表示为换热系数的形式为:

$$h_p = h_{co} + h_{nb} = F h_l + S h_p \quad (1)$$

其中, $h_{co} = F h_l$ 为强制对流换热系数, h_l 为单相强制对流换热系数, F 为强化因子。

$h_{nb} = S h_p$ 为核沸腾换热系数, h_p 为池沸腾换热系数,而 S 为抑制因子。

对于强化因子 F ,被广泛采用方法是马丁内力提出的由 h_p/h_l 与马丁内力参数的倒数 $1/x_{tt}$ 相关得到。而抑制因子 S ,还没有被广泛接受的形式,迄今为止,Chen^[1],Gungor^[2],Jung^[3]等人,在自己的流动沸腾换热关系式中确定了抑制因子的表达式,但这些表达式几乎是根据作者的经验确定,其准确性还非常有限。所以,在Chen的物理模型中,突出的问题是如何准确地表述和确定 S ,这对提高按Chen的物理模型确定的流动沸腾换热关系式的准确性有着重要的作用。

笔者以核化理论为基础,在考虑沸腾表面微结构分布的影响下,确定了抑制因子的表达式并在光滑管换热关系式的建立中采用,由此也验证此表达式的合理性和准确性。

1 抑制因子的确定

在抑制因子表达式的确定中,以相同的热流密度为出发点,因为以热流密度表达的池沸腾换热关系式易于计算。因此,抑制因子是采用池沸腾换热系数关系式 h_p (与两相流动沸腾换热中的热流密度相同) 计算两相流动沸腾换热中的核沸腾换热系数时所乘的修正系数。那么,在相同的热流密度下,由于两相流动沸腾换热中的液体过热度比池沸腾时要低,从而使得一部分壁面凹腔在池沸腾中能成为汽化核心,但在两相流动沸腾换热中不能成为汽化核心,产生所谓两相流动沸腾中核沸腾的抑制。而核沸腾传热系数与活化核心数量成正比,因此,抑制因子用以下的关系式表示:

$$S = S_0^n \quad (2)$$

式中, S_0 为在相同的热流密度下,两相流动沸腾换热中核沸腾换热与池沸腾换热比较活化核心数量的降低份额,而 n 由实验数据确定的经验常数。

由 Laplace 方程和 Clausius-Clapeyron 方程可得到:

$$T_L - T_S = 2\sigma T_S / Rh_{fs}\rho_k \quad (3)$$

此关系式即为汽泡存在的临界半径与液体过热度的关系。

图 1 显示了汽泡存在的临界半径与液体过热度的关系,只有当壁面凹腔在汽泡存在的最小临界半径和

收稿日期: 2001-04-09

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助(G2000026305)

作者简介: 周杰, (1965-), 男, 籍贯, 重庆江津人, 重庆大学博士, 主要从事传热传质的研究。

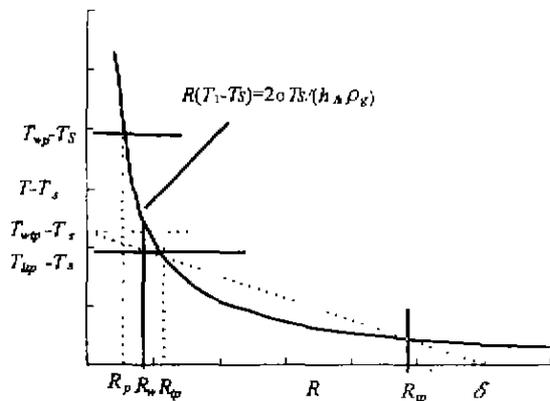


图1 汽泡存在的临界半径与液体过热度的关系

最大临界半径之间才能成为汽化核心。为此，需要确定最小临界半径和最大临界半径以及在壁面上的大于某一凹腔半径 R 的数量份额，并表示为 R 的函数 $f(R)$ ，这样，在两相流动沸腾中，大于其最小临界半径 R_m 的凹腔数量份额为 $f(R_m)$ ，而大于其最大临界半径 R_p' 的凹腔数量份额为 $f(R_p')$ ；在相应的池沸腾中大于其最小临界半径 R_p 的凹腔数量份额为 $f(R_p)$ ，而大于其最大临界半径 R_p' 的凹腔数量份额为 $f(R_p')$ 。

则 S_0 的表达式为：

$$S_0 = \frac{f(R_{wp}) - f(R'_{wp})}{f(R_p) - f(R'_p)} \quad (4)$$

1.1 汽泡存在的临界半径的确定

在某一饱和温度 T_s 下， $2\sigma T_s / (h_p \rho_g)$ 为一常数，令其为 A 。

在池沸腾中，可以近似用壁面过热度 ΔT_p 代替有效液体过热度 ΔT_b （即最小临界半径处的液体过热度）计算其汽泡存在的最小临界半径 R_p ，则 $R_p = A / \Delta T_p$ ，而 $q = h_p \Delta T_p$ ，所以有：

$$R_p = h_p A / q \quad (5)$$

而最大临界半径 R_p' 很大，一般表面不拥有如此大的凹腔^[6]。

而在两相流动沸腾中，液体热边界层的厚度比池沸腾时边界层的厚度要小得多，壁面过热度 and 有效液体过热度是有差别的，因此按壁面过热度 and 有效液体过热度计算的两相流动沸腾的汽泡最小临界半径也有差别，但作者通过计算发现壁面过热度不是太低时其差别仍然是较小的。因此，两相流动沸腾的汽泡存在的最小临界半径仍先按壁面过热度近似。

由 $R_w = A / \Delta T_w$ 和 $q = h_w \Delta T_w$ 从而有：

$$R_w = h_w A / q \approx R_p \quad (6)$$

而最大临界半径 R_p' 一般也比较大，其大于 R_p' 的壁面凹腔份额很少，也不予考虑。那么从 R_p 到 R_w 之

间分布的壁面凹腔在流动沸腾中不能成为汽化核心，也就是说在两相流动沸腾中被抑制了。而在 R_p' 和 R_w 之间被抑制的凹腔份额不考虑。

1.2 壁面凹腔大小与数量的分布函数的确定以及 S_0 和 S 的确定

现在关键的问题是如何确定壁面凹腔大小与数量的分布函数，关于壁面凹腔大小与数量的分布关系，有不少学者对其进行过研究，但即使是光滑表面，由于表面微结构的复杂性，也还没有一个统一的关系式。

Gaertner^[4] 在对文献^[5] 进行统计分析后，指出活化穴密度分布适合于 Poisson 分布，S. R. Yang 等人^[6] 对抛光表面进行测量也得出活化穴密度分布适合于 Poisson 分布。

综合以上的文献结果，现在壁面空穴数与空穴半径的分布趋向于按 Poisson 分布，所以笔者假定壁面的空穴数与空穴半径的分布按 Poisson 分布，并象文献^[6] 和^[7] 把壁面的空穴数 $P(R)$ 与空穴半径 R 的分布表示为 $P(R) = \lambda \exp(-\lambda R)$ 的形成，其中 λ 为壁面特性常数，而 R 的单位为微米。则大于某一凹腔半径的数量份额 $f(R)$ 为：

$$f(R) = \int_R^\infty \lambda \exp(-\lambda R) dR = \exp(-\lambda R)$$

所以：

$$S_0 = \frac{f(R_{wp}) - f(R'_{wp})}{f(R_p) - f(R'_p)} \approx \frac{f(R_{wp})}{f(R_p)} = \frac{\exp(-\lambda R_{wp} 10^6)}{\exp(-\lambda R_p 10^6)}$$

把(5)和(6)代入上式整理得：

$$S_0 = \exp[-\lambda A 10^6 h_w / q] \exp[\lambda A 10^6 (1 - S) h_p / q]$$

对 $\exp[-\lambda A 10^6 (1 - S) h_p / q]$ 这一项，因 h_p / q 一般是很小的数值，而 $\lambda A 10^6$ 是 1 的数量级，所以对于 S 较大时，这一项近似为 1。而当 S 较小即两相流动沸腾中核沸腾的抑制较严重，考虑在两相流动沸腾中用壁面过热度代替有效的液体过热度计算的最小临界半径的差别增加，所以，对这一项也近似取 1。

$$\therefore S_0 = \exp(-\lambda A 10^6 h_w / q)$$

$$\therefore S = \exp(-n \lambda A h_w 10^6 / q)$$

令 $k = n \lambda$ ，最后得到抑制因子的表达式为：

$$S = \exp(-k A h_w 10^6 / q) \quad (7)$$

此表达式中， k 包含了表面微结构等影响因素，由实验数据确定。

2 讨论

1) A 反应的是物性的影响， A 越大，流动沸腾抑制

越严重,而 A 由饱和温度决定,饱和温度越高, A 越小,反之越大,而在流动沸腾中,饱和温度越高,一般换热系数越高,这也被众多实验证实,这与流动沸腾抑制减轻应有密切的关系,而饱和温度越低,则相反。

2) h_w 为强制对流换热系数,其值越大,则液体过热度越低,沸腾抑制会加剧,这也是为什么流动沸腾会发生抑制的原因。

3) 热流密度 q 越大,则流动沸腾中核沸腾换热越强,这也被实验所证实,这与核沸腾抑制减轻有关。

4) k 包含了表面微结构等的影响因素。如,壁面平均凹腔半径较大,则表面特性常数 λ 值较小,从而导致 k 值减小,因此,沸腾抑制会减轻;反之,则相反。

3 抑制因子的准确性验证

为了验证抑制因子的表达式的准确性,笔者以实验工质 R134a 和 R22 在 14mm 内径的水平光滑管进行了流动沸腾换热实验,其实验装置同文献^[6]相同,对得到的环状流区实验数值,采用 Chen 的叠加模型,建立了环状流区水平光滑管内的流动沸腾换热关系式。

$$h_w = F h_l + S h_p \quad (8)$$

式中, $h_l = 0.023 [Re(1-x)]^{0.8} Pr^{0.4} \lambda_l / D$

$$F = 1 + 2X_n^{-0.88}$$

$$h_p = 55(P/P_c)^{0.12} (-\log_{10}(P/P_c))^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.6}$$

$$S = \exp(-4.9Ah_w 10^6/q)$$

关系式(8)的计算值与实验值比较,最大偏差在 $\pm 13\%$ 以内,表明该关系式具有较高的准确性。这与抑制因子的表达式有较高的准确性有关。

图 2 是关系式(8)的计算值同其他作者的关系式的计算值的比较,对流项 h_w 的计算值也表示在图 2 中。工质为 R134a,质量流速为 $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,饱和温度为 5°C ,热流密度为 20 kw/m^2 。

在选择的一些关系式中,Katten 关系式^[9]和 Watelet 关系式^[10]采用的是渐进模型,而 Jung 关系式和 Gungor 关系式采用的是叠加模型。从图 2 显示,笔者的关系式的计算值介于采用渐进模型的 Katten 关系式和 Watelet 关系式的计算值之间,图 2 也显示核沸腾没有出现被完全抑制的情况,核沸腾换热对流动沸腾换热系数的影响是较大的,但笔者的关系式的计算值更接近于笔者实验值。因此,笔者所确定的抑制因子对提高按 Chen 模型确定的流动沸腾换热关系式的准确性有着重要的作用。

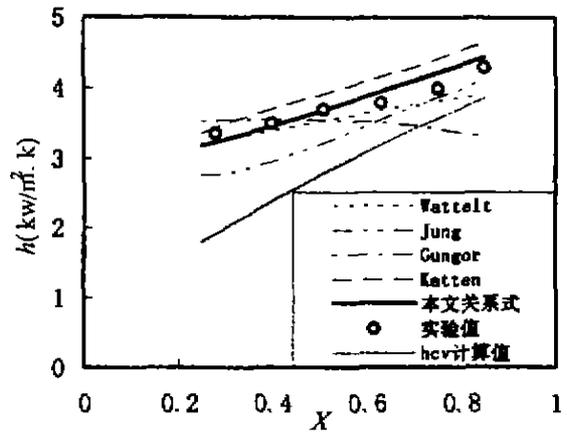


图 2 关系式(8)同其他作者的关系式的比较

4 结 论

1) 笔者确定的抑制因子的表达式能有效提高采用 Chen 模型建立的流动沸腾换热关系式的准确度。

2) 笔者确定的抑制因子的表达式有明确的物理意义,该表达式显示饱和温度越高、热流密度越大、两相流动沸腾中对流换热系数越小以及壁面平均凹腔半径越大,则核沸腾抑制会减轻。反之,核沸腾抑制会加剧。

主要符号表

h	换热系数, $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$		
h_{fg}	汽化潜热, J/kg		
Pr	Prandtl 数		
Re	Reynolds 数, $Re = GD/\mu$		
x	干度		
X_n	Lockhart-Martinelli 参数,		
$X_n = (\frac{1-x}{x})^{0.9} (\frac{\rho_v}{\rho_l})^{0.5} (\frac{\mu_l}{\mu_v})^{0.1}$			
δ	层流底层厚度, $\delta = \lambda_l/h_w$		
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$		
μ	动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$		
ρ	密度, Kg/m^3		
σ	表面张力, N/m		
ΔT	温差, $^\circ\text{C}$		
下标			
l	液相	p	池沸腾
s	饱和	tp	两相流
w	壁面		

参考文献

[1] CHEN J C Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow[C]. Industrial and Engineering Chemistry,

- Process Design and Development, 1966, 5(3):322-329
- [2] GUNGOR K E, WINTERFON R H S. A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1986, 29(3):351-358.
- [3] JUNG D S, RADERMACHAR R. Prediction of Heat Transfer Coefficients of Various Refrigerants during Evaporation [J], ASHRAE Trans., 1991, 97, (2):48-53.
- [4] GAERTNER R F. Distributions of active sites in nucleate boiling of liquids[C]. Chem. Engng Prog. Symp. Ser. 59, 1963, 52-61.
- [5] GAERTNER R F, WESTWATER J W. Population of active sites in nucleate boiling heat transfer [C]. Chem. Engng Prog. Symp. Ser. 56, 1960, 39-48.
- [6] YANG S R., KIM R H. A mathematical model of the pool boiling nucleation site density in terms of the surface characteristics[J]. Int. J. Heat Mass Transfer. 1988, 31(6): 1127-1135.
- [7] ZHOU J, CHEN Q H, XIN M D, et al. Boiling in a horizontal three dimensional microfin tube for R134a. Multiphase Flow and Heat Transfer Proc. of the Fourth International Symposium[C]. Xi'an, Jiaotong University Press, 1999, 318-325.
- [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. J. of Heat Transfer, 1998, 120():148-155.
- [9] WATTELET J P. A correlation for forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants in a horizontal smooth tube[J]. Int. J. Heat Transfer, 1993, 36(13):3351-3360.

Determination of The Suppression Factor of Chen's Model in Flow Boiling

ZHOU Jie¹, XIN Ming-dao²

(1. Institute of city and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In present paper, the suppression factor of Chen's model is determined, based on the force and heat balance on a vapour bubble and Clausius - Clapeyron equation, the active nucleate cavity size of flow boiling surface and its disperse characteristic. Furthermore, the correlation is attained using Chen's model and the present suppression factor from the experimental data of R134a and R22 for a smooth tube. The correlation agrees well with the experimental data. It demonstrates the present suppression factor is able to promote the accurate which predicts the heat transfer coefficient of flow boiling in Chen's model.

Key words: flow boiling, suppression factor, nucleate theory, cavity disperse characteristic, heat transfer correlation

(责任编辑 刘道芬)

·下期论文摘要预告·

成品板材出库搬运规划

廖小云, 刘延龄, 王义亮

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 成品板材出库搬运规划是板材库房管理的一个重要难题。对该问题建立了数学模型, 并给出了一个基于启发式的规划算法。结合某钢铁公司薄板分厂现行库房管理系统, 用 PowerBuilder 7.0 开发了一个实用的成品板材出库搬运规划系统, 效果非常满意。

关键词: 库房管理; 出库搬运规划; 薄钢板