

临界热流密度流体模化广义准则数研究

陈常念¹, 韩吉田^{1,*}, 邵莉¹, 卢申卿², 陈斌²

(1. 山东大学 能源与动力工程学院 制冷与低温工程研究所, 山东 济南 250061;

2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要: 考虑到不同流道结构参数对流动沸腾临界热流密度(CHF)的影响, 提出一描述流道结构参数影响的广义影响因子 D_n , 基于相似理论和量纲分析理论导出了含有参数 n 的 13 个相似准则数, 并与 Ahmad 的推导结论进行了比较。对比结果显示, Ahmad 的推导结论是本文结论 $n=1$ 时的特殊情形, 也可认为本文定义了一新的能够集中反映复杂流道型式对 CHF 发生机理影响的等效特征尺寸 D_e 。

关键词: 临界热流密度; 流体模化; 相似理论; 量纲分析

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)05-0558-04

Extension of Fluid to Fluid Modeling Similarity Law for Critical Heat Flux

CHEN Chang-nian¹, HAN Ji-tian^{1,*}, SHAO Li¹, LU Shen-qing², CHEN Bin²

(1. *Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;*

2. *Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China*)

Abstract: A generalized factor D_n was introduced to the fluid to fluid modeling to take into account the effect of flow channel geometrical parameters on critical heat flux (CHF). Thirteen similarity dimensionless products were derived based on the dimensional analysis and similarity theory and compared with those derived by Ahmad. It is found that Ahmad's results are the special situation of the paper's when n is equal to 1, and a new equivalent characteristic size D_e was developed, which could reflect the effects of complex flow channels on the occurrence of CHF.

Key words: critical heat flux; fluid to fluid modeling; similarity theory; dimensional analysis

临界热流密度(CHF)是流动沸腾传热系统中一重要参数, 它对于沸腾换热系统的可靠

设计与安全经济运行具有至关重要的意义。但 CHF 现象极其复杂, 目前仍以实验研究为主。

收稿日期: 2009-04-26; 修回日期: 2009-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776055); 山东省自然科学基金资助项目(Y2007F10)

作者简介: 陈常念(1983—), 男, 山东莒县人, 博士研究生, 热能工程专业

* 通信作者: 韩吉田, 电话: 0531-88399060, E-mail: jthan@sdu.edu.cn

以超高温高压水为介质进行 CHF 研究对实验装置要求很高,所需的电加热功率也很高,加大了 CHF 实验研究的难度和实验费用。为了克服以水为工质的 CHF 实验装置要求高温高压条件的困难和降低实验研究的费用,发展了以制冷剂等低沸点、低潜热介质代替水进行 CHF 实验的流体模化技术,通过模化工质与水 CHF 间的关系达到以模化工质代替水进行 CHF 实验研究的目的。

CHF 的流体模化方法最早是由英国人 Barnett^[1]提出的,此后几十年中流体模化技术得到了很大发展^[2-5],其中最常用的是方程法和模化因子法。模化因子法中,Ahmad 的失真补偿法^[4]因较适于用制冷剂模化水流动沸腾的 CHF 而得到广泛应用,仍是当前模化工作的基础^[6]。在实际应用中,已有流体模化技术对圆管内沸腾的 CHF 模化预测结果有较高的精度^[7],而对于管束等复杂通道内 CHF 的预测尚不理想^[8]。

已有研究表明,流动沸腾流道型式的复杂性对流动参数有重要影响^[9-11]。本文提出一反映流道结构参数对 CHF 影响的广义影响因子 D_n ,从描述 CHF 的一般函数关系式出发导出含有参数 n 的 13 个相似准则数,并与 Ahmad 导出的无量纲参数进行比较。

1 相似准则数的导出

Ahmad 根据描述沸腾流动的一般函数关系式(式(1))推导出了 13 个无量纲准则数^[4]。

$$f(q_c, G, \Delta H, L, D, g, \lambda, \rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g, c_{p_l}, c_{p_g}, K_l, K_g, \sigma, \gamma, \beta) = 0 \quad (1)$$

式中: q_c 为临界热流密度, kW/m^2 ; G 为面积质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ΔH 为入口欠热焓, J/kg ;

L 为长度以及加热长度, m ; D 为水力直径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; λ 为汽化潜热, J/kg ; ρ 为密度, kg/m^3 ; μ 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; K 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; σ 为表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}$; γ 定义为 $\left| \frac{\partial(\rho_l/\rho_g)}{\partial p} \right|_{\text{saturation}}$, β 定义为 $\left| \frac{\partial \theta}{\partial p} \right|_{\text{saturation}}$; 下标 l 、 g 分别表示液相和气相。

Ahmad 导出的无量纲相似准则对于直圆管最为适用,但并非适于所有流道型式。为考虑不同流道结构参数对流动沸腾 CHF 的影响,本文引入一广义影响因子 D_n 来反映此影响:

$$D_n = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \quad (2)$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 为表征流道结构参数特征的 m 个因素。

根据流体力学和传热学的理论,流动沸腾所涉及的 5 个基本量纲是质量、长度、时间、温度和热量,分别用 M, L, T, θ, H 表示,由于 D_n 是反映流道结构特性的参数,它的量纲仅与长度的量纲有关,设其因次为 L^n 。

基于以上假设,描述流动沸腾 CHF 的一般函数关系式可表示为:

$$f(q_c, G, \Delta H, L^n, D_n, g, \lambda, \rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g, c_{p_l}, c_{p_g}, K_l, K_g, \sigma, \gamma, \beta) = 0 \quad (3)$$

从上述函数关系式中可直接发现 6 个无量纲数组合,即 $\Delta H/\lambda, L^n/D_n, \rho_g/\rho_l, \mu_g/\mu_l, c_{p_g}/c_{p_l}, K_g/K_l$ 。其他无量纲准则数可写成如下幂指数形式:

$$\pi_i = q_c^{\alpha_1} G^{\alpha_2} D_n^{\alpha_3} g^{\alpha_4} \lambda^{\alpha_5} \rho_l^{\alpha_6} \mu_l^{\alpha_7} c_{p_l}^{\alpha_8} \cdot K_l^{\alpha_9} \sigma^{\alpha_{10}} \gamma^{\alpha_{11}} \beta^{\alpha_{12}} \quad (4)$$

因此,可得到如下的无量纲矩阵形式:

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
	q_c	G	D_n	g	λ	ρ_l	μ_l	c_{p_l}	K_l	σ	γ	β
M	0	1	0	0	-1	1	1	-1	0	1	-1	-1
L	-2	-2	n	1	0	-3	-1	0	-1	0	1	1
T	-1	-1	0	-2	0	0	-1	0	-1	-2	2	2
θ	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	1
H	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0

(5)

根据矩阵求相似准则的方法^[12],可得到 7 个新的无量纲数,结合前面推导出的 6 个无量纲数整理成表 1 所列的含有参数 n 的 13 个无量纲准则数。

表 1 本次推导结果与文献[4]结果对比
Table 1 Comparison of paper's results with reference [4] results

序号	准则数名称	文献[4]结果	本次推导结果
1	沸腾数	$\pi_1 = q_c/G\lambda$	$\pi_1 = q_c/G\lambda$
2	雷诺数	$\pi_2 = GD/\mu_l$	$\pi_2 = GD_n/\mu_l(\sigma\gamma)^{n-1}$
3	韦伯-雷诺数	$\pi_3 = \mu_l^2/\sigma D\rho_l$	$\pi_3 = \mu_l^2(\sigma\gamma)^{n-1}/\sigma D_n\rho_l$
4	液汽粘性比	$\pi_4 = \mu_l/\mu_g$	$\pi_4 = \mu_l/\mu_g$
5	过冷度数	$\pi_5 = \Delta H/\lambda$	$\pi_5 = \Delta H/\lambda$
6	液汽密度比	$\pi_6 = \rho_l/\rho_g$	$\pi_6 = \rho_l/\rho_g$
7	长径比	$\pi_7 = L/D$	$\pi_7 = L^n/D_n$
8	傅鲁德-雷诺数	$\pi_8 = gD^3\rho_l^2/\mu_l^2$	$\pi_8 = gD_n^3\rho_l^2/\mu_l^2(\sigma^3\gamma^3)^{n-1}$
9	液相普朗特数	$\pi_9 = \mu_l c_{p_l}/K_l$	$\pi_9 = \mu_l c_{p_l}/K_l$
10	汽相普朗特数	$\pi_{10} = \mu_g c_{p_g}/K_g$	$\pi_{10} = \mu_g c_{p_g}/K_g$
11	液汽热导率比	$\pi_{11} = K_l/K_g$	$\pi_{11} = K_l/K_g$
12	Barnett 数	$\pi_{12} = \gamma^{1/2}\mu_l/D\rho_l^{1/2}$	$\pi_{12} = \gamma^{1/2}\mu_l(\sigma\gamma)^{n-1}/D_n\rho_l^{1/2}$
13	饱和温度数	$\pi_{13} = c_{p_l}\beta/\lambda\gamma$	$\pi_{13} = c_{p_l}\beta/\lambda\gamma$

2 分析与讨论

D_n 是一表征流道结构参数对 CHF 影响的广义影响因子,式(2)是其一般表达式,不同的流道型式下 D_n 有不同的具体表达式。由表 1 可知,当 $n = 1$,即当广义影响因子 D_n 的因次为 L 时,本文导出的结果与文献[4] 的结果一致,此时 D_n 的表达式为:

$$D_n = D_1 = D \tag{6}$$

它等效为流道的当量直径 D 。当 n 取不同的值时, D_n 便可反映不同流道结构参数对 CHF 的影响。在实际应用中,对于复杂流道,可建立 D_n 与流道结构参数的具体函数关系来反映这种影响。例如,对于螺旋管式换热器,由于螺旋二次流的存在,螺旋管内流动沸腾的 CHF 特性因受管内径 D_i 、螺旋径 D_c 、受热长度 L 和螺旋节距 P_t 等结构特征参数的影响而与直管有所不同,可建立如下形式的 D_n 关系式:

$$D_n = f(D_i, D_c, L, P_t) = L^x + \left(\frac{D_i}{D_c} \cdot P_t\right)^x \tag{7}$$

此时 D_n 的因次为 L^x ,即 $n = x$, x 值由实验确定。

另一方面,通过表 1 中本次推导结果与文

献[4]结果的对比,也可认为本文定义了一个新的特征尺寸:

$$D_e = \frac{D_n}{(\sigma\gamma)^{n-1}} \tag{8}$$

由因次分析可知, D_e 的因次为 L ,是等效于当量直径的特征尺寸参数。它包含了流道基本特征参数和流体物性参数,包含该特征尺寸的无量纲准则数则能集中反映复杂流道型式对 CHF 发生机理的影响。不难看出,当 $n \neq 1$ 时,特征尺寸 D_e 便会引入 $\sigma\gamma$ 组合,结合两类经典的 CHF 发生机理,即偏离泡核沸腾(DNB)和液膜干涸(Dry-out)理论分析可知,表面张力 σ 的作用会阻止液膜干涸撕裂从而影响到临界现象的发生,而组合参数 γ 则反映了液气两相相对密度比的变化能否维持 Tayler 稳定或发生 Helmholtz 失稳而导致临界现象的发生。可见,在较复杂的流道内,特征尺寸已不只是个别几何结构参数或几个几何结构参数的简单组合。

3 结论

本文提出了一个表征流道结构参数对 CHF 影响的广义影响因子 D_n ,导出了含有参

数 n 的 13 个无量纲准则数,并与 Ahmad 的推导结果进行了对比,可得出如下结论。

1) 可认为 Ahmad 导出的 13 个无量纲准则数是本文 $n=1$ 时的特殊情形;对于不同的复杂流道, n 应取不同的值以建立 D_n 与流道结构参数的具体函数关系式。

2) 也可认为本文定义了一个新的包含流道基本特征参数和流体物性参数的等效特征尺寸 D_e ,它能够集中反映复杂流道型式对 CHF 发生机理的影响。

参考文献:

- [1] BARNETT P G. The scaling of forced convection boiling heat transfer, AEEW-R134 [R]. United Kingdom: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1963.
- [2] STEVENS G F, KIRBY G J. A quantitative comparison between burnout data for water at 1 000 psia and Froen-12 at 155 psia, AEEW-R327 [R]. United Kingdom: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1964.
- [3] GROENEVELD D C. Similarity of water and freon dryout data for uniformly heated tubes [C] // ASME Fluid and Heat Transfer Meeting, ASME-Paper No. 70-HT-27. Detroit, Michigan: ASME, 1970.
- [4] AHMAD S Y. Fluid to fluid modeling of critical heat flux: A compensated distortion model[J]. International Journal of Heat and Transfer, 1973 (16): 641-662.
- [5] LU Zhongqi, SHI Deqiang, ZHANG Zhenjie. Modeling studies on critical heat flux of convective boiling [M] // Two-Phase Flow and Heat Transfer. USA: USA Hemisphere Publ. Corp., 1988: 207-214.
- [6] 陈炳德,陈军. 氟利昂-水临界热流密度模化及模化转换因子[C]//全国反应堆热工流体会议论文集. 北京:原子能出版社,1999:53-58.
- [7] 陈军,杨燕华,廖建如,等. 圆管临界热流密度的

流体模化[J]. 核动力工程, 2003, 24(4): 354-358.

CHEN Jun, YANG Yanhua, LIAO Jianru, et al. Fluid to fluid modeling of CHF in round tube [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(4): 354-358(in Chinese).

- [8] 陈军,吴小航,孙奇. 棒束临界热流密度流体模化研究[J]. 核科学与工程, 2002, 22(4): 309-313.

CHEN Jun, WU Xiaohang, SUN Qi. Researches in the flow modeling of critical heat flux in bundle[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22(4): 309-313(in Chinese).

- [9] 辛明道,周杰,张昱,等. R134a 在水平三维内微肋管内的沸腾换热[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 95-97.

XIN Mingdao, ZHOU Jie, ZHANG Gang, et al. R134a boiling in the horizontal tubes with three-dimensional inner microfin[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(1): 95-97(in Chinese).

- [10] 杨晓强,苏光辉,苟军利,等. 环形窄缝通道内干涸型临界热流密度的理论研究[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(1): 61-65.

YANG Xiaoqiang, SU Guanghui, GOU Junli, et al. Theoretical investigation on critical heat flux of annular flow in narrow annular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(1): 61-65(in Chinese).

- [11] 韩吉田, YU B, KANG H J, 等. R-134a 在三种不同放置方式螺旋管内凝结换热的实验研究[J]. 制冷学报, 2004(2): 1-6.

HAN Jitian, YU B, KANG H J, et al. Experimental investigation of condensation heat transfer of R-134a in a helical pipe at three different orientations[J]. Journal of Refrigeration, 2004(2): 1-6(in Chinese).

- [12] 孙振东. 因次分析原理[M]. 北京:人民铁道出版社, 1979.