

窄间隙矩形通道沸腾传热强化判定准则研究

黄 军^{1,2}, 王秋旺¹, 黄彦平², 白博峰¹

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:为了研究以水为介质的窄间隙矩形通道内发生临界热流密度 (CHF) 时的传热强化, 构建了一个判定准则。根据窄间隙矩形通道的流道结构特点, 参考圆管环状流 CHF 预测解析模型, 得到了可以预测通道间隙厚度不小于 0.5 mm 的窄间隙矩形通道内发生沸腾二相流环状流时的 CHF 解析模型。根据汽液二相介质的特点, 推导出了在沸腾二相流系统中发生 CHF 时的传热强化判定准则, 通过分析计算表明这个判定准则是合理的。这个判定准则适用于高 Re 数下窄间隙矩形通道内强迫流动时发生 CHF 的传热强化判定。

关键词:判定准则; CHF; 解析模型; 窄间隙矩形通道

中图分类号: TK 124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9954 (2007) 11-0013-04

Research of determinant law of boiling heat transfer enhancement in rectangular narrow channel

HUANG Jun^{1,2}, WANG Qiu-wang¹, HUANG Yan-ping², BAI Bo-feng¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

Abstract: A determinant law was built to study the heat transfer enhancement in rectangular narrow channel with water when the Critical Heat Flux (CHF) was happening. According to the flow passage characteristic of rectangular narrow channel and the annular flow predicted analytical model of CHF in round tube, the annular flow CHF analytical model in rectangular narrow channel was established. This model can be used in prediction of the CHF of boiling two-phase flow annular flow in rectangular narrow channel in which the gap length is not less than 0.5 mm. According to the characteristics of two-phase flow, the new determinant law of CHF in boiling two-phase flow system was derived. The analysis and calculation show that this determinant law is appropriate, and can be applied to the determination of the heat transfer enhancement in rectangular narrow channel with high Reynolds number when CHF is happening under forced flow.

Key words: determinant law; CHF; analytical model; rectangular narrow channel

经过一个多世纪发展, 传热强化技术多种多样: 从强化位置上, 分为管内和管外; 从外力作用上, 分为主动和被动; 从有无相变分为有相变和无相变; 从相态上分为单相和多相等。在评价传热强化效果时, 一般最关心的就是传热系数和阻力系数, 要尽力争取在较小的阻力系数基础上获得尽可能大的传热

系数。在以往的研究^[1-4]中, 一般都采用无量纲传热因子 j 和阻力系数 f 的比值来进行判定。但是这 2 个无量纲参数都是针对单相气体或液体来定义的, 并不适用于汽液二相介质, 尤其是沸腾二相流系统中发生临界热流密度 (CHF) 时的传热强化判定。在公开文献中还未见到过对汽液二相中发生 CHF

基金项目: 2005 年度国家自然科学基金资助项目 (50576089); 2006 年度空泡物理和自然循环国家级重点实验室基金资助项目 (9140C7101030602)

作者简介: 黄军 (1978—), 男, 博士生, 助理研究员, 现从事反应堆热工水力及二相流动与传热研究工作, 电话: (028) 85908162 (O), E-mail: hjun333@163.com; 王秋旺 (1969—), 男, 博士, 教授, 现从事传热强化研究; 黄彦平 (1968—), 男, 博士, 研究员, 现从事核反应堆热工水力与安全实验与理论研究工作。

时的传热强化判定准则的报道,因此有必要对此开展研究。

1 窄间隙矩形通道内环状流 CHF解析模型

为方便对汽液二相中发生 CHF时的传热强化判定准则进行研究,首先要构建一个窄间隙矩形通道内环状流的 CHF解析模型,从而利用该模型求解出传热强化判定准则式中所需的各个变量。

环状流 CHF液膜蒸干机理^[5]认为:液膜沿管道的蒸发及液体以液滴的形式被汽流携带而使液膜被完全蒸干。这里假设窄间隙矩形通道与圆管内发生的环状流型类似,将圆管环状流 CHF解析计算法经过修正后推广应用到窄间隙矩形通道。

图 1 中 $m_d, m_{ew}, m_{eb}, q/h_{lg}$ 分别是液滴沉积率、液滴的汽相剪切携带率、汽泡破裂液滴携带率和液膜蒸发率,壁面液膜在这几个因素的共同作用下逐渐变薄,只要壁面上液膜流量减少到 0, CHF 即在该侧发生。

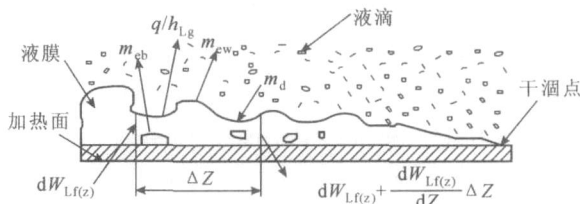


图 1 环状液膜蒸干机理示意图

Fig 1 Schematic of fluid film dry-out mechanics of annular flow

解析计算法从窄间隙矩形通道入口开始逐段进行计算。

1.1 环状流区的判别

用 Mishima 和 Ishii (1984) 准则式^[6]判别环状流是否发生:

$$v_g \left(\frac{g}{g_0} \right)^{0.25} \left\{ \frac{\mu_L}{\rho_L} \left[\frac{\rho_L}{\rho_g} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_g}} \right]^{0.5} \right\}^{0.2} \quad (1)$$

式中, v_g 为汽相折算流速, m/s ; σ 为表面张力, N/m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_L 为液相与汽相的密度差, kg/m^3 ; ρ_g 为汽相密度, kg/m^3 ; μ_L 为液相动力粘性系数, $kg/(m \cdot s)$; ρ_L 为液相密度, kg/m^3 。

1.2 环状流区液膜流量的计算

通过迭代求得环状流发生的起始点位置 z_{an} 后, 用下式在 $[z_{an}, L]$ 内对液膜流量积分:

$$dW_{Lf}/dz = D_{hy} (m_d - m_{ew} - m_{eb} - q/h_{lg}) \quad (2)$$

式中, W_{Lf} 为液膜流量, kg/s ; z 为沿流向的距离, m ; D_{hy} 为水力当量直径, m ; q 为热流密度, W/m^2 ; h_{lg} 为

汽化潜热, J/kg 。

液滴沉积率用 Kaotaoka 和 Ishii 公式^[7]:

$$m_d = 0.22 R_{eL}^{0.74} E^{0.74} (\mu_g/\mu_L)^{0.26} \mu_L/D_{hy} \quad (3)$$

式中, R_{eL} 为液相雷诺数; E 为液滴占截面上所有液体的份额。

$$E = 1 - v_{Lf}/v_L \quad (4)$$

式中, v_{Lf} 为液膜折算流速, m/s ; v_L 为液相折算流速, m/s ; 其中, 液膜折算流速:

$$v_{Lf} = 4W_{Lf}/(L \cdot D_{hy}^2) \quad (5)$$

由于式 (2) 中包含未知量 W_{Lf} , 因此对 E 的求解不采用经验关系式, 而用迭代法。

1.3 液滴携带率的计算

液滴携带率由二部分构成:

(1) 液膜内发生核沸腾产生的汽泡穿过液膜进入汽流时, 汽泡在界面的破裂造成对液相的携带。对该携带率的计算采用 Ueda (1981) 公式^[8]:

$$m_{eb} = 477 [q^2 / (h_{lg}^2 g)]^{0.75} q/h_{lg} \quad (6)$$

式中, δ 为液膜平均厚度, m 。

式 (6) 中 由式 (7) — (10) 迭代求出。

$$U_{Lf,m}^+ = U^+ dY^+ / \quad (7)$$

$$U_{Lf,m} = G_{Lf} / (A_{Lf} L) \quad (8)$$

$$U_{Lf,m}^+ = U_{Lf,m} / (\tau_w / \rho_L)^{0.5} \quad (9)$$

$$A_{Lf} = D_{hy}^2 / [D_{hy}^2 - (D_{hy} - 2)^2] \quad (10)$$

式中, $U_{Lf,m}^+$ 为无量纲液膜平均流速; Y^+ 为与壁面的距离, m ; $U_{Lf,m}$ 为液膜平均流速, m/s ; G_{Lf} 为液膜质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$; A_{Lf} 为无量纲液膜横截面积; τ_w 为壁面剪应力, N/m^2 。

(2) 液膜常呈现波状, 由高速汽流在液膜波的波峰处剪切造成对液相的剪切携带。采用 Kaotaoka 公式^[7]:

$$m_{ew} = 0.22 R_{eL}^{0.74} E^{0.74} (\mu_g/\mu_L)^{0.26} \mu_L/D_{hy} \quad (11)$$

式中, E 为平衡液滴份额。

$$E = \tan h(7.25 \times 10^{-7} We^{1.25} Re^{0.25}) \quad (12)$$

式中, We 为韦伯数, 定义式为 $G^2 D_{hy} / (\rho_L \sigma)$ 。

考虑到圆管和窄间隙矩形通道在几何结构上的差异, 模型中的定性尺寸采用了当量水力直径和热周直径。

1.4 模型的测试

采用 FORTRAN 语言针对上面构建的模型编制了计算程序, 用来自空泡物理和自然循环国家级重点实验室的 57 个窄间隙矩形通道内 CHF 实验数据对程序进行了测试, 测试结果如图 2 (a), (b) 所示。实验本体的进口截面尺寸为 66.0 mm × 2.5 mm, 加

热段长 750 mm,加热方式为双面均匀加热。实验参数:压力为 0.106—13.789 MPa,质量流速为 9.0—13 879.8 kg/(m²·s),工作介质为去离子水,测量误差为 ±1.1%。

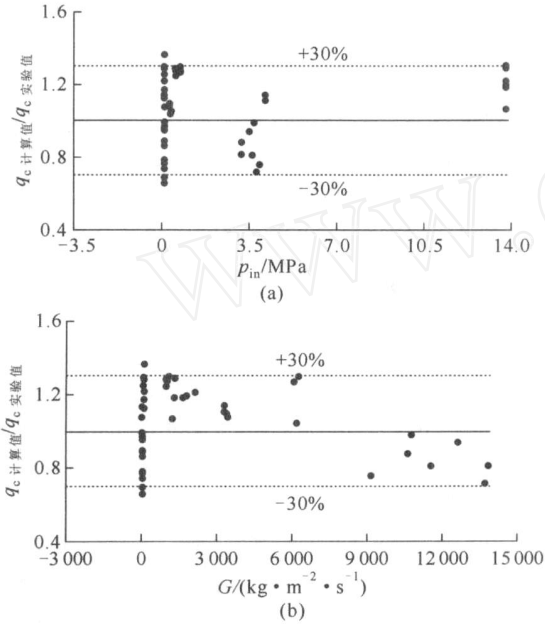


图 2 窄间隙矩形通道 CHF 计算值与实验值的比较

Fig 2 CHF of calculation vs experiment in rectangular narrow channel

从图 2 可以得出,93.0%的数据预测误差在 ±30%以内, $e_{avg} = 7.4\%$, $e_{ms} = 19.9\%$ 。经过计算分析,图 2 中计算值的传递误差为 ±0.8%,总体而言,这个模型预测窄间隙矩形通道中的 CHF 精度较好,可以利用它进行各种几何尺寸和工况下的预测计算。

2 汽液二相介质的传热强化判定准则

2.1 传热强化判定准则的推导

考虑到汽液二相介质的特点,这里对传热强化判定准则重新进行了推导,采用综合评价系数 j_k/f_{TP} 对窄间隙矩形通道的传热强化效果进行评价。

$$j$$
 的定义为: $j = St \cdot Pr_L^{2/3}$ (13)

St 是一种修正的 Nu 数,表示流体实际的换热热流密度与流体可传递最大热流密度之比; Pr 数是物性参数,表示动量扩散厚度与热量扩散厚度之比。

根据 St 的定义,发生 CHF 时,实际换热热流密度已经达到了流体可传递的最大热流密度,所以 $St = 1$ 。

$$j$$
 的定义,则有: $j = Pr_L^{2/3}$ (14)

式中, j_k 为发生 CHF 时的无量纲传热因子。

$$f$$
 的定义为: $f = p \cdot D / (2 U^2 \cdot L)$ (15)

式中, p 为加热段进出口压降, Pa; L 为加热段长度, m。

在二相下 f_{TP} 的计算式则为

$$f_{TP} = p \cdot D_{hy} / (2 U_{TP}^2 L)$$
 (16)

式中, f_{TP} 为汽液二相下的阻力系数。其中,相关二相参数的计算式如下:

$$U_{TP} = U_g + (1 - \alpha) U_L$$
 (17)

式中, α 为空泡份额。

$$U_{TP} = G / \rho_L$$
 (18)

合并式 (14) — (18) 可得

$$\frac{j_k}{f_{TP}} = \frac{2 [U_g + (1 - \alpha) U_L] G^2 \cdot L \cdot Pr_L^{2/3}}{p \cdot D_{hy} \cdot \rho_L^2}$$
 (19)

2.2 判定准则的分析校核

把窄间隙矩形通道的几何尺寸重新进行设定,取通道进口宽度为 60 mm、间隙厚度为 0.5—3.0 mm,加热段长度为 750 mm。当通道进口宽 60 mm、高 0.5 mm 时,对应的当量水力直径约为 1 mm,这是普遍接受的窄间隙通道当量水力直径下限。同时,参考实际工程值,这里取 0.5 mm 做为测试的下限值。这里定义窄间隙矩形通道的进口宽度与间隙厚度的比值为 γ ,间隙厚度的变化步长为 0.1 mm,对应的 γ 为 20—120。

进口流量设定为 120 kg/h,进口过冷度为 30,进口压力取 2.0, 3.0, 4.0 和 5.0 MPa。预测计算结果如图 3 所示。从图中的 2 条虚线可以看出, j_k/f_{TP} 为 45—75 时,随着 γ 的增加,在各种进口压力下 j_k/f_{TP} 预测值增加的趋势明显放缓,趋近一个最大值。

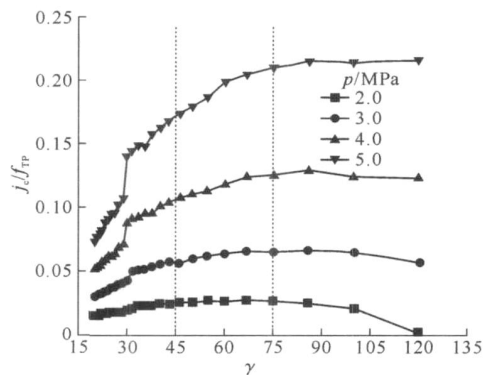


图 3 不同压力下 j_k/f_{TP} 随 γ 的变化趋势

Fig 3 Trend of j_k/f_{TP} with γ in different pressure

仍然采用上面的通道几何尺寸,把进口流量设定为 100 kg/h,进口过冷度取 10, 20, 40 和 60,进口压力为 2.0 MPa。预测计算结果如图 4 所示。从

图中的 2 条虚线可以看出, 为 45—75 时, 随着的增加 j_k / f_{TP} 预测值增加的趋势明显放慢, 趋近一个最大值。在各种进口过冷度下都是同样的趋势。

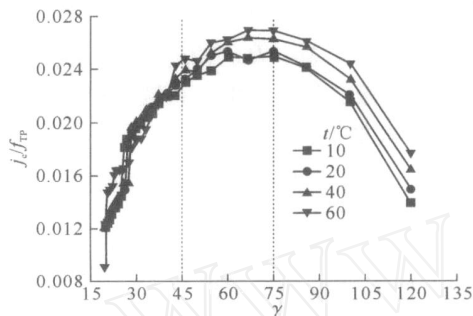


图 4 不同进口过冷度下 j_k / f_{TP} 随 γ 的变化趋势

Fig 4 Trend of j_k / f_{TP} with γ in different inlet subcooling

保持上面的通道几何尺寸, 把进口流量设定为 60, 70, 80 和 90 kg/h, 进口过冷度为 30, 进口压力为 1.5 MPa。预测计算结果如图 5 所示。从图中的 2 条虚线可以看出, 为 45—75 时, 随着 γ 的增加, 在各种进口流量下 j_k / f_{TP} 预测值增加的趋势明显放慢, 也趋近一个最大值。

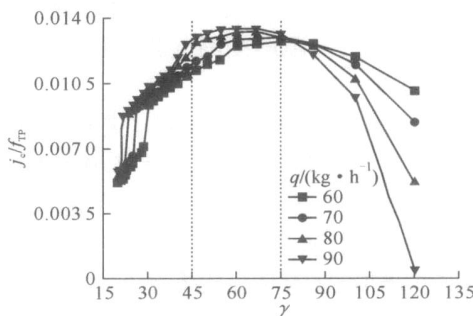


图 5 不同进口流量下 j_k / f_{TP} 随 γ 的变化趋势

Fig 5 Trend of j_k / f_{TP} with γ in different inlet mass flow rate

综合以上预测结果可以看出, 当 γ 为 45—75 时, 窄间隙矩形通道内的 j_k / f_{TP} 达到最大值。通道宽度固定在 60 mm 时, γ 为 45—75 对应的窄间隙宽度为 0.8—1.3 mm, 位于实际工程常用参数: 0.5—3.0 mm^[9]之内, 因此, 这个判定准则是合理的。

3 结论

基于圆管环状流 CHF 解析模型, 得到了可以较好地预测在间隙不小于 0.5 mm 的窄间隙矩形通道

内环状流的 CHF 解析模型。根据汽液二相介质的特点, 推导出了在沸腾二相流系统中发生 CHF 时的传热强化判定准则, 通过计算分析, 证明了这个判定准则是合理的。这个判定准则适用于高 Re 数下, 在窄间隙矩形通道内强迫流动工况下发生 CHF 时的传热强化研究。

参考文献:

- [1] Torii K, Kwak KM, Nishino K Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with wingle-type vortex generators for fin-tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 3 795—3 801.
- [2] Akira Murata, Sadanari Mochizuki Effect of cross-sectional aspect ratio on turbulent heat transfer in an orthogonally rotating rectangular duct with angled rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 3 119—3 133.
- [3] Leu Jin-Sheng, Wu Ying-Hao, Jang Jiin-Yuh Heat transfer and fluid flow analysis in plate-fin and tube heat exchangers with a pair of block shape vortex generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 4 327—4 338.
- [4] Joardar A, Jacobi A M. Impact of leading edge delta-wing vortex generators on the thermal performance of a flat tube, louvered-fin compact heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 1 480—1 493.
- [5] Joel Weisman The current status of theoretically based approaches to the prediction of the critical heat flux in flow boiling[J]. Nuclear Technology, 1992, 99: 1—21.
- [6] Mishima K, Ishii M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1984, 27(5): 723—737.
- [7] Kataoka I, Ishii M, Mishima K Generation and size distribution of droplet in gas-liquid annular two-phase flow[J]. ASME J Fluids Engng, 1983, 105: 230—238.
- [8] Ueda T, Inoue M, Nagatome S Critical heat flux and droplet entrainment rate in boiling of falling liquid films[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1981, 24(7): 1 257—1 266.
- [9] Ishibashi E, Nishikawa K Saturated boiling heat transfer in narrow spaces[J]. Int J Heat Mass Trass, 1969, 12: 863—894.