

文章编号: 0258-0926(2016)04-0011-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.04.0011

低压下倾斜加热面临界热流密度模型研究

郭锐¹, 刘晓晶¹, 程旭¹, 余红星²

1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200240; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 通过压力容器外部冷却实现熔融物堆内滞留已经成为先进非能动压水堆核电厂的一项重要的重要的严重事故管理措施。这种措施能够成功的关键是压力容器下封头局部热流密度小于对应位置的临界热流密度 (CHF) 值。本文在气泡壅塞模型的基础上, 开发出适合于低压下倾斜加热面的 CHF 机理模型。在模型的开发中, 重点考虑了加热面倾角对气泡运动速度以及气泡层厚度的影响, 同时修正了含气率的计算方法。模型预测值与实验测量值的误差在 10% 以内, 说明本文的模型能较好的预测实验条件下的 CHF 值。

关键词: 严重事故; 临界热流密度; 倾角; 机理模型

中图分类号: TL364.5 **文献标志码:** A

Theoretical Investigation on Critical Heat Flux at Inclined Heater Surface in Low Pressure

Guo Rui¹, Liu Xiaojing¹, Cheng Xu¹, Yu Hongxing²

1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041

Abstract: In-vessel retention (IVR) of molten core debris via water cooling at the external surface of the reactor vessel is an important severe accident management feature of advanced passive plants. For this concept, it is important to keep the heat load on the vessel wall surface lower than the critical heat flux at any position of the lower head. Based on the existing bubble crowding model in the literatures, a theoretical CHF model is developed suitable for the inclined heater surface in low pressure. In the new model, the effect of orientation on bubble velocity and bubbly layer thickness is taken into consideration. A new method is introduced to calculate the steam quality of both layers. Comparison with the present experimental data shows that the new model satisfies the prediction accuracy. The maximum deviation between the model prediction and experimental data is less than 10%.

Key words: Severe accident, CHF, Orientation, Theoretical model

0 引言

核电厂发生严重事故后, 会释放大量的放射性产物, 引起公众心理恐慌, 严重阻碍核电的发展。严重事故缓解措施成为了核工程研究的重要课题。通过向压力容器外部的堆腔注水, 对下封头进行冷却, 如果下封头外壁的实际热流密度小于对应位置的临界热流密度 (CHF), 则可以避

免压力容器的失效, 从而实现熔融物堆内滞留 (IVR)。

CHF 的机理研究有助于从本质上理解沸腾危机的发生, 并且可以为 IVR 措施的有效性评价提供参考依据。国内外已有的模型^[1-4]主要研究的是竖直流道, 而在压力容器外部冷却的情况中, 加热面有倾角, 因此这些模型无法直接应用。本文

收稿日期: 2015-10-21; 修回日期: 2016-01-05

作者简介: 郭锐 (1987—), 男, 博士研究生, 现从事反应堆热工水力与安全分析

在气泡壅塞模型的基础上,考虑压力容器外部冷却的实际情况,比如单面加热、低压、加热面有倾角等因素,开发出适合于低压下倾斜加热面的CHF机理模型,并与实验结果进行比较,从而验证模型的适用性。

1 气泡壅塞模型

Weisman 和 Pei 提出的气泡壅塞模型,将流场分为靠近加热壁面的气泡层和远离加热面的主流层。壁面受热产生的气泡会阻碍主流层液体通过湍流脉动对加热面的冷却,当气泡层空泡份额达到临界值时,加热壁面发生沸腾危机。

由气泡层内液相质量平衡方程可以得到如下方程:

$$G_3(x_2 - x_1) = q_b/h_{fg} \quad (1)$$

式中, G_3 为气泡层与主流层界面处的湍流脉动质量流速; x_1 为主流层含气率; x_2 为气泡层含气率; q_b 为沸腾传热分量; h_{fg} 为气化潜热。

沸腾传热分量可表示为:

$$q_b = q(h_l - h_{ld})/(h_f - h_{ld}) \quad (2)$$

式中, h_l 为液相焓值; h_{ld} 为气泡脱离点液体焓; h_f 为液相饱和焓值。

界面处的湍流脉动质量流速可表示为:

$$G_3 = G\psi i_b \quad (3)$$

式中, G 为总质量流速; i_b 为界面处湍流脉动强度; ψ 为壁面气泡对湍流脉动的影响。

模型中假定气泡层和主流层内都为均相流,则:

$$x_1 = (\alpha_1 \rho_g)/\rho_1 \quad (4)$$

$$x_2 = (\alpha_2 \rho_g)/\rho_2 \quad (5)$$

式中, α_1 为主流层空泡份额; ρ_1 为主流层平均密度; α_2 为气泡层空泡份额; ρ_2 为气泡层平均密度。发生沸腾危机时, α_2 为 0.82。

气泡壅塞模型适用于高压下的竖直圆管,为了将模型拓展到低压下的倾斜加热面,必须要对模型进行相应的改进。

2 模型改进

2.1 壁面热量分配模型

为了得到气泡层和主流层的含气率,首先需要计算截面的平均含气率。在 Weisman 和 Pei 模

型中,使用了适用于高压情况的壁面热量分配模型计算流道内的平均含气率,本文的模型需适用于低压情况,因此需对此进行修改。

壁面加热热流对管内流体的加热效果可以分为两大部分:单相对流传热部分以及沸腾传热部分。而沸腾传热部分又可以分为两部分:蒸汽产生部分和液相搅混部分。可以表示为:

$$q_b = q_{\text{evap}} + q_{\text{pump}} \quad (6)$$

式中, q_{evap} 为蒸汽产生分量; q_{pump} 为液相搅混分量。

液相搅混分量与蒸汽产生分量之比为搅混因子 ε :

$$\varepsilon = q_{\text{pump}}/q_{\text{evap}} \quad (7)$$

Weisman 和 Pei 的模型中搅混因子为:

$$\varepsilon = [\rho_l(h_f - h_l)]/(\rho_g h_{fg}) \quad (8)$$

Hari 和 Hassan^[5]比较了 4 种不同形式的搅混因子,认为在低压条件下 Weisman 和 Pei 模型中使用的 Lahey 搅混因子会一定程度高估搅混分量从而低估含气率,他们发现低压下 Bowring 的搅混因子表达式会更加适合,表达式为:

$$\varepsilon = (\rho_f C_{\text{pf}} \Delta T)/(\rho_g h_{fg}) \quad (9)$$

式中, $\Delta T=3.2$ 。

因此,对截面积为 A 单面加热矩形流道,某一位置处的平均真实含气率 x 可以表示如下:

$$x = \frac{1}{GAh_{fg}} \int_0^l \frac{q_b w}{1 + \varepsilon} dl \quad (10)$$

2.2 气泡层含气率

Weisman 和 Pei 的 CHF 模型是针对管内竖直流动。该模型在计算气泡层内含气率时,认为气液具有相同的速度。这一假设在高压高流量情况下可以认为近似成立,但是低压低流速,特别是加热面有倾角的情况中,这一假设会受到质疑。一般来说,加热面倾角越大,气相相对液相流速越大,在相同空泡份额条件下,含气率会增加。

在发生沸腾危机时,气泡层内的空泡份额称为临界空泡份额。在模型假设中,认为这一值不变。因此,计算气泡层内含气率的关键是得到气泡层内的滑速比 S 。

Weisman 和 Ying^[6]的动量方程分析认为气泡层内平均速度为主流层气泡层界面处流速的一半。Karman 湍流速度分布可用来计算界面处

流速：

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & 0 \leq y^+ < 5 \\ -3.05 + 5 \ln y^+ & 5 \leq y^+ < 30 \\ 5.5 + 2.5 \ln y^+ & y^+ > 30 \end{cases} \quad (11)$$

$$y^+ = \frac{s \sqrt{\tau_w \rho_{TP}}}{\mu_{TP}} \quad (12)$$

$$u^+ = u_1 \sqrt{\tau_w / \rho_{TP}} \quad (13)$$

式中， s 为气泡层厚度； u_1 为界面处流速； τ_w 为壁面粘性力； ρ_{TP} 为两相密度。

由以上公式，可以计算得到界面处流速 u_1 ，气泡层内平均流速 u_2 为其一半。

气泡层内的平均流速可以用气泡层内液相速度、气泡层内气相速度以及气泡层内含气率表示：

$$u_2 = u_{2l}(1 - x_2) + u_{2g}x_2 \quad (14)$$

$$u_{2g} = u_{2l} + u_t \quad (15)$$

$$u_{2l} = u_2 - u_t x_2 \quad (16)$$

式中， u_{2l} 为气泡层内液相速度； u_{2g} 为气泡层内气相速度； u_t 为气相相对液相速度。

Wallis^[7]认为在有倾角情况下， u_t 可以表示为：

$$u_t = K \left[\sigma g \sin \theta (\rho_l - \rho_g) \right]^{1/4} / \rho_l^{0.5} \quad (17)$$

式中， θ 为加热面倾角。

Zuber^[8]建议 K 值取 1.41，由式 (16) 可知气相相对速度随加热面倾角的变大而变大。故气泡层内滑速比及含气率为：

$$S = 1 + \frac{u_t}{u_{2l}} = 1 + \frac{u_t}{u_2 - u_t x_2} \quad (18)$$

$$x_2 = 1 / \left[1 + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2} \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{1}{S} \right] \quad (19)$$

由式 (18) 和式 (19)，可迭代计算得到气泡层内滑速比及含气率。

2.3 主流层含气率

在 Weisman 和 Pei 的模型中，主流层的含气率用均相流模型来计算。考虑到气泡相对速度对含气率的影响，本文模型通过截面能量平衡方程来计算主流层的含气率。

在某一截面，单位时间流过的能量既可以用截面平均质量流速与截面平均焓值相乘得到，也可以分别求得通过气泡层和主流层的能量。截面能量平衡方程表示为：

$$h_g \rho_g u_{2g} (1 - \eta) \alpha_2 + h_l \rho_l u_{2l} (1 - \eta) (1 - \alpha_2) + h_l \rho_l u_1 \eta = Gh \quad (20)$$

$$h = h_m + \frac{qLw}{GA} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{d - s}{d} \quad (22)$$

$$h_m = \frac{h - h_g x}{1 - x} \quad (23)$$

$$u_m = \frac{G - \rho_g u_{2g} (1 - \eta) \alpha_2}{\rho_l \eta} \frac{\rho_l u_{2l} (1 - \eta) (1 - \alpha_2)}{\rho_l \eta} \quad (24)$$

式中， h_m 为主流平均焓值； u_m 为主流平均流速； h_m 为入口液相焓值； L 为加热块长度； w 为加热块宽度； d 为流道间距。

由以上方程，可以得到主流层平均焓值。主流层含气率可表示为：

$$x_1 = (h_m - h_l) / (h_g - h_l) \quad (25)$$

2.4 气泡层厚度

气泡层厚度在气泡堵塞模型中是一个非常重要的特征尺度。在前面的分析中可以看到，气泡层厚度对主流层含气率有非常大的影响，从而影响到 CHF 值。Weisman 和 Pei 的模型中气泡层的厚度为：

$$s = kD_p / 0.4 \quad (26)$$

式中， D_p 为气泡直径。

此处的 k 为 2.28，但是在加热面有倾角时，这一数值会发生变化。Cheung 和 Haddad^[9]的实验发现气泡层厚度沿加热容器底部到上部逐渐增大。在本模型中，假定表征气泡层厚度的参数 k 随加热面倾角呈线性变化。经过与实验数据的比对，得到 k 值与 θ 的关系为：

$$k = 0.0244\theta + 0.2369 \quad (27)$$

3 模型验证

本文的模型将与倪亮^[10]的实验数据进行比较。该实验主要研究在类似压力容器外部冷却的情况下，加热面倾角对 CHF 的影响。实验段为等宽弧形加热块，对应的圆心角为 7° ，流道截面为矩形，宽 150 mm，流道间隙 156 mm。根据本文提出的 CHF 模型，可以计算得到不同工况下的 CHF 值。

定义参数 CHF (R) 评估模型预测的准确性：

$$\text{CHF}(R) = \frac{\text{CHF模型预测值}}{\text{CHF实验测量值}} \quad (28)$$

图 1 显示了模型预测值与实验测量值的比较，从图中可以看出，模型预测值与实验测量值的误差在 10% 以内。CHF (R) 的标准差为 3.4%，说明本文的模型能较好的预测实验条件下的 CHF 值。

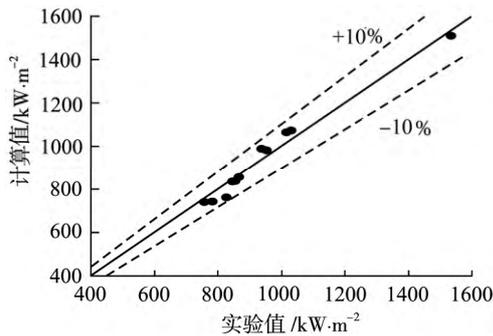


图 1 模型实验值与预测值比较

Fig. 1 Comparison of Prediction and Experimental Result

4 结论

本文在气泡壅塞模型的基础上，提出了适用于低压下倾斜加热面的 CHF 机理模型，主要结论如下：

(1) 模型的改进主要包括：使用 Bowring 模型计算沸腾危机产生处的含气率；使用能量平衡方程计算主流层含气率；模型考虑加热面倾角对气泡运动速度的影响；模型考虑了加热面倾角对气泡层厚度的影响。

(2) 发生沸腾危机时，气泡层厚度随加热面倾角呈线性变化。

(3) 气泡的相对速度随加热面倾角的变大而变大。

(4) 模型的预测值与实验测量值的误差在 10% 以内。

参考文献：

- [1] Tong L. Phenomenological study of critical heat-flux[J]. In Mechanical Engineering, 1975, 105-105, 58 (23): 2327-2340.
- [2] Weisman J, Pei B. Prediction of critical heat flux in flow boiling at low qualities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1983, 26 (10): 1463-1477.
- [3] Lee C, Mudawwar I. A mechanistic critical heat flux model for subcooled flow boiling based on local bulk flow conditions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1988, 14 (6): 711-728.
- [4] Galloway J, Mudawar I. CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall—II. Theoretical CHF model[J]. International journal of heat and mass transfer, 1993, 36 (10): 2527-2540.
- [5] Hari S, Hassan Y A. Improvement of the subcooled boiling model for low-pressure conditions in thermal-hydraulic codes[J]. Nuclear engineering and design, 2002, 216 (1): 139-152.
- [6] Weisman J, Ying S. Theoretically based CHF prediction at low qualities and intermediate flows[J]. Nuclear engineering and design. 1983, 36 (10): 527-540.
- [7] Wallis G B. One-dimensional two-phase flow[J]. 1969, 58 (23): 2327-2340.
- [8] Zuber N, Joint U. Steady state and transient void fraction in two-phase flow systems: Final Report for the Program of Two-phase Flow Investigation[R]. Atomic Power Equipment Department General Electric, 1967.
- [9] Cheung F, Haddad K. Observation of the dynamic behavior of the two-phase boundary layers in the SBLB experiments[J]. Nuclear engineering and design, 1994, 58 (23): 2327-2340.
- [10] 倪亮. 自然循环中朝下曲表面临界热流密度试验研究[D]. 上海：上海交通大学学位论文，2013.

(责任编辑：王中强)