

文章编号：0258-0926(2018)03-0162-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0162

# 氧化铝纳米流体临界热流密度机理模型研究 ——物理模型

何晓强，余红星，江光明

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610041

**摘要：**针对现有纳米流体临界热流密度（CHF）模型存在的不足，基于气泡力平衡分析方法，考虑接触角和毛细现象带来的影响，构建了针对氧化铝纳米流体CHF的机理模型。结果表明：模型可模拟CHF随纳米流体浓度（ $c_{NF}$ ）变化的规律，随着 $c_{NF}$ 增加，CHF开始增加；但增加至某一浓度之后，CHF不再增加而维持恒定值；模型表明CHF与纳米微粒直径（ $d_0$ ）无关，这与已有实验结果吻合；随着接触角或倾斜角增加，模型计算得到的CHF减小。

**关键词：**氧化铝；纳米流体；临界热流密度（CHF）；接触角；毛细现象；浓度；直径

**中图分类号：**TL375 **文献标志码：**A

## Study on $Al_2O_3$ Nanofluid Critical Heat Flux Mechanism Model: Physics Models

He Xiaoqiang, Yu Hongxing, Jiang Guangming

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

**Abstract:** In this study, to overcome the shortcomings of the present models, based on the analysis of the force balance of the bubble, considering the contact angle and capillary wicking effects, a  $Al_2O_3$  nanofluid critical heat flux (CHF) mechanism model is developed. It is shown that, this model can simulate the effect of nanofluid concentration ( $c_{NF}$ ) on CHF, that is, as  $c_{NF}$  increases, CHF increases at the beginning, and when  $c_{NF}$  is greater than a certain value, CHF no longer increases and maintains a constant value, and this model can explain that the diameter of nanoparticle ( $d_0$ ) has no effect on CHF, which are in a good agreement with experimental results. As the contact angle or inclination angle increases, calculated CHF by this model decreases.

**Key words:**  $Al_2O_3$ , Nanofluid, Critical heat flux (CHF), Contact angle, Capillary wicking, Concentration, Diameter

### 0 引言

压水型核反应堆严重事故及缓解策略中最为关注的是堆芯熔融物冷却。目前，采用得较多的是压力容器外部冷却方式，涉及到的核心问题是临界热流密度（ $q_{CHF}$ ）及其提升方法。其中，纳米流体被认为是很有希望用于 $q_{CHF}$ 提升的一种方案。根据目前国内外的研究结果，基于接触角

理论的模型比较适和用于发展纳米流体 $q_{CHF}$ 模型，但该理论对某些现象缺乏较好的解释。另外，尚没有模型能模拟纳米流体 $q_{CHF}$ 随纳米流体浓度变化的规律。

本文针对纳米流体 $q_{CHF}$ 在模型上存在的不足，基于气泡力平衡分析方法，考虑接触角和毛细现象带来的影响，以氧化铝纳米流体为对象，

构建纳米流体  $q_{\text{CHF}}$  机理模型。

## 1 纳米流体 $q_{\text{CHF}}$ 机理模型构建

基于 Kandlikar<sup>[1]</sup>对气泡力平衡的分析方法进行建模，气泡力平衡的分析如图 1 所示。

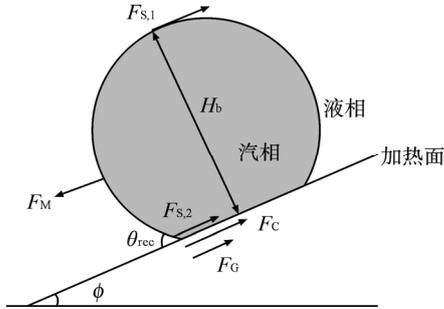


图 1 气泡力平衡示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Forces Balance for Bubble

对气泡有：

$$F_M = F_{S,1} + F_{S,2} + F_G + F_C \quad (1)$$

$$F_M = \frac{1}{\rho_v} \left( \frac{q_l}{h_{fg}} \right)^2 H_b D_0$$

$$F_{S,1} = \sigma D_0$$

$$F_{S,2} = \sigma \cos \theta_{\text{rec}} D_0$$

$$F_G = \frac{1}{2} g (\rho_l - \rho_v) H_b H_b D_0 \cos \phi$$

$$F_C = N_C F_{C,1} = 2\pi N_C \overline{R_C} \sigma \cos \theta_{\text{rec}}$$

$$q_l = h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \times$$

$$\left[ \frac{2}{\pi C_1} + \frac{\pi C_1}{4} (1 + \cos \theta_{\text{rec}}) \cos \phi + \right.$$

$$\left. \frac{2F_C}{C_1 \pi \sigma (1 + \cos \theta_{\text{rec}}) D_0} \right]^{1/2}$$

$$H_b = \frac{D_b}{2} (1 + \cos \theta_{\text{rec}})$$

$$D_b = \frac{\lambda_T}{2} = C_1 \pi \left( \frac{\sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/2}$$

$$q_{\text{CHF}} = \frac{1 + \cos \theta_{\text{rec}}}{16} h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \times$$

$$\left[ \frac{2}{\pi C_1} + \frac{\pi C_1}{4} (1 + \cos \theta_{\text{rec}}) \cos \phi + \right.$$

$$\left. \frac{2F_C}{C_1 \pi \sigma (1 + \cos \theta_{\text{rec}}) D_0} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中， $F_M$ 为界面处蒸发带来的动量变化； $F_{S,1}$ 为气泡底部的表面力； $F_{S,2}$ 为气泡顶部的表面力； $F_G$ 为重力； $F_C$ 为毛细管力； $\overline{R_C}$ 为等效半径； $\theta_{\text{rec}}$ 为接触角； $\phi$ 为倾斜角； $D_b$ 为气泡直径； $H_b$ 为实际气泡高度； $D_0$ 为气泡与加热表面接触面的直径； $h_{fg}$ 为汽化焓； $\sigma$ 为表面张力； $\rho_l$ 、 $\rho_v$ 分别为液相、气相密度； $g$ 为重力加速度； $N_C$ 为纳米微粒沉积层中等效平均毛细管通道的数目； $C_1$ 为常数，本模型中取 1.0。

当纳米流体的浓度不同时，其沉积形态不一样。本模型将其分为 2 种简化的分布，并假设纳米微粒的直径均为  $d_0$ ，基于此进行相应的讨论。

(1) 当纳米流体浓度较低时，沉积在加热表面的纳米微粒较少，沉积比较稀疏、分散，无法覆盖加热表面。此时，纳米微粒之间的距离为  $S_m$ ， $S_m > d_0$ 。由此可得到平均毛细管的等效半径  $\overline{R_C}$ 。

(2) 当纳米流体浓度较高时，沉积在加热表面的纳米微粒较多，沉积比较集中，且堆积为多层，基本全部覆盖了加热表面。此时微粒间距为  $S_m = d_0$ 。同理可得到  $\overline{R_C}$ 。

对上述 2 种情形进行分析，最后得到：

情形 (1)：

$$N_C = \frac{D_0}{S_m} \quad (3)$$

情形 (2)：

$$N_C = \frac{D_0}{d_0} L \quad (4)$$

式中， $L$ 为堆积多层时假设的等效层数，其受纳米流体中的纳米微粒浓度 ( $c_{\text{NF}}$ ) 影响，有一上限值  $L_{\text{limit}}$ ，即随着流体浓度的增加，纳米微粒沉积会达到饱和，此时，沉积层数也达到饱和。

基于此，可以得到  $F_C$  的关系式。其中包含变量  $S_m$  和  $L$ ，均为浓度的函数。

基于如下假设得到  $F_C$  与  $c_{\text{NF}}$  之间的关系：

假设  $S_m$  与  $c_{\text{NF}}$  成反比；假设  $L$  与  $c_{\text{NF}}$  成正比。

综上所述，可得到  $q_{\text{CHF}}$  的表达式为：

$$q_{\text{CHF}} = \frac{1 + \cos \theta_{\text{rec}}}{16} h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \times$$

$$\left[ \frac{2}{\pi C_1} + \frac{\pi C_1}{4} (1 + \cos \theta_{\text{rec}}) \cos \phi + \right.$$

$$C_2 4\pi^{-0.5} \frac{\cos\theta_{rec}}{C_1(1+\cos\theta_{rec})} \Big]^{1/2} \tag{5}$$

$$C_2 = \begin{cases} \left(\frac{c_{NF}}{c_{NF,1}}\right)^{0.5} & 0 \leq c_{NF} < c_{NF,1} \\ \sqrt{\frac{4-\pi}{4}} \frac{L_{limit}}{c_{NF,limit}} c_{NF} = \sqrt{\frac{4-\pi}{4}} \frac{1}{c_{NF,1}} c_{NF} & c_{NF,1} \leq c_{NF} < c_{NF,limit} \\ \sqrt{\frac{4-\pi}{4}} L_{limit} & c_{NF} \geq c_{NF,limit} \end{cases} \tag{6}$$

式中， $c_{NF,1}$  为加热表面刚好铺满一层纳米微粒时的纳米微粒浓度； $c_{NF,limit}$  为纳米微粒沉积会达到饱和时的浓度。

由本模型形式可知， $q_{CHF}$  与  $d_0$  无关，这与已有  $q_{CHF}$  实验的规律一致；另外，从 0 开始，随着流体浓度增加， $q_{CHF}$  会增加，而流体浓度增加到一定程度， $q_{CHF}$  几乎不变，这也与已有实验结果吻合。

对于本模型，最后需要确定  $c_{NF,1}$ 、 $c_{NF,limit}$ 、 $L_{limit}$ 。由于  $c_{NF,1}$  可由后两者计算得到，因此，实际上只需要确定  $c_{NF,limit}$  和  $L_{limit}$ 。

根据文献[2-3]已有的实验结果，模型取  $c_{NF,limit}$  为 0.0001% 体积浓度。

对于  $L_{limit}$ ，目前尚缺少相关的数据。本文根据现有一些纳米微粒沉积后的粗糙度<sup>[4-8]</sup>对可能的纳米微粒沉积层数进行了粗略估算，估算的沉积层数在 10~85 之间。实际上，虽然估算得到的值较大，但只有汽-液界面附近的沉积层才起作用，考虑到其他因素， $L_{limit}$  直接确定较难，实际上是一个待定系数，需要通过宏观的  $q_{CHF}$  实验值反推确定，且对不同纳米微粒材料该值可能不同。在本模型中，对于氧化铝纳米流体，取  $L_{limit} = 4$ ，而不考虑  $d_0$  的影响。

至此，模型建立完毕。

对于有一定流量和过冷度的情形， $q_{CHF}$  模型采取一定的修正，即参考文献<sup>[9]</sup>的关系式。由此，本模型在有一定流量和过冷度的情形下， $q_{CHF}$  形

式为：

$$q_{CHF} = \frac{[950 + 2.25(\Delta T_{in} - 2)](1.2 + 0.004G)^{0.4}}{1017} \times \frac{1 + \cos\theta_{rec}}{16} h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \times \left[ \frac{2}{\pi C_1} + \frac{\pi C_1}{4} (1 + \cos\theta_{rec}) \cos\phi + C_2 4\pi^{-0.5} \frac{\cos\theta_{rec}}{C_1(1 + \cos\theta_{rec})} \right]^{1/2} \tag{7}$$

式中， $\Delta T_{in}$  为温度； $G$  为质量流量。

## 2 各参数的影响分析

本文分析了各主要参数对  $q_{CHF}$  的影响,假设：

- (1)  $\theta_{rec}$ ：基准值为  $10^\circ$ ，变化范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。
- (2)  $\phi$ ：基准值为  $0^\circ$ ，变化范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。
- (3)  $c_{NF}$ ：基准值为 0.0001%，变化范围为 0~0.1%。

分析时所用的其余参数值为： $c_{NF,limit}$  为 0.0001%， $L_{limit}$  为 4，系统压力为 0.1，流量为 0。得到的 CHF 随各参数变化的曲线，分别如图 2 至图 4 所示。

由图 2~图 4 可见：

- (1) 随着  $\theta_{rec}$  增加， $q_{CHF}$  减小，且减小幅度较大。
- (2) 随着  $\phi$  增加， $q_{CHF}$  减小，但减小幅度较小。
- (3) 随着  $c_{NF}$  增加， $q_{CHF}$  开始增加，但增加至某一浓度之后，CHF 不再增加而维持恒定值。

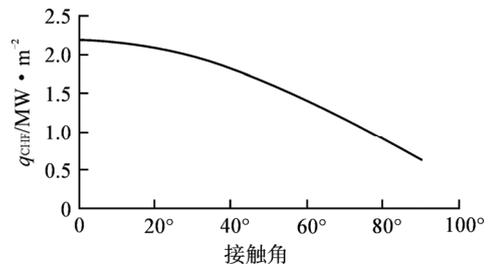
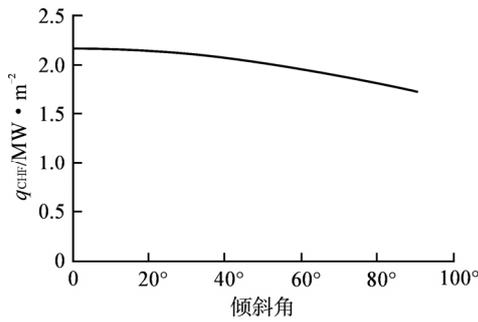
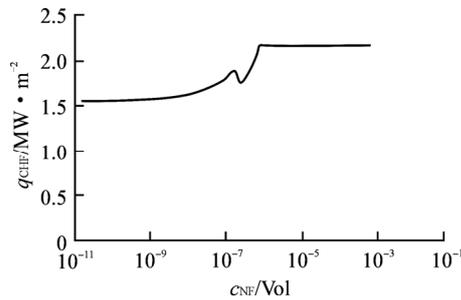


图 2  $q_{CHF}$  随  $\theta_{rec}$  的变化

Fig. 2 Effect of Contact Angle  $\theta_{rec}$  on  $q_{CHF}$

图3  $q_{CHF}$  随  $\phi$  的变化Fig. 3 Effect of Inclination Angle  $\phi$  on  $q_{CHF}$ 图4  $q_{CHF}$  随  $c_{NF}$  的变化Fig. 4 Effect of  $c_{NF}$  on  $q_{CHF}$ 

### 3 结论

本文针对现有纳米流体 CHF 模型存在的不足,考虑接触角和毛细现象的影响,发展了针对氧化铝纳米流体 CHF 的机理模型,并分析了主要参数对 CHF 的影响。结果表明:

(1) 模型建立了  $F_C$  与  $c_{NF}$  之间的关系,可模拟 CHF 随  $c_{NF}$  变化的规律,即随着流体浓度增加,CHF 开始增加,但增加至某一浓度之后,CHF 不再增加而维持恒定值,这与已有实验结果吻合。

(2) 模型表明了 CHF 与  $d_0$  无关,这与已有实验结果吻合。

(3) 模型中,随着  $\theta_{rec}$  或  $\phi$  增加,计算得到的

CHF 减小。

限于篇幅,模型的详细验证将在另外的文章中给出。

参考文献:

- [1] Kandlikar S G, Steinke M E. Contact angles and interface behavior during rapid evaporation of liquid on a heated surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002,45: 3771-3780.
- [2] Ciloglu D, Bolukbasi A. A comprehensive review on pool boiling of nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 84:84, 45-63.
- [3] Aik M, Kosar A, Bostanci H. Pool boiling critical heat flux in dielectric liquids and nanofluids[J]. Advances In Heat Transfer, 2011,43:45-56.
- [4] Bang I C, Chang S H. Boiling heat transfer performance and phenomena of  $Al_2O_3$ -water nano-fluids from a plain surface in a pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfe, 2005,48:2407-2419.
- [5] Kim S J, Bang I C, Buongiorno J. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007,50:4105-4116.
- [6] Ahn H S, Kim H, Jo H J. Experimental study of critical heat flux enhancement during forced convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36: 375-384.
- [7] Mori S, Utaka Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: A review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017,108: 2534-2557.
- [8] Ham J, Kim H, Shin Y. Experimental investigation of pool boiling characteristics in  $Al_2O_3$  nanofluid according to surface roughness and concentration[J].International Journal of Thermal Sciences, 2017,114: 86-97.
- [9] Park H M, Jeong Y H. Experimental CHF study on the geometric scaling effect for the top of the reactor vessel lower head[C]. NURETH15-253, Pisa, Italy, 2013, 12-17.

(责任编辑:张明军)