



基于COSINE软件包子通道软件的换热模型和氧化关系式适应性研究

程以炫, 孟召灿, 张昊, 章艺林, 赵萌, 杨燕华

Study on Adaptability of Heat Transfer Model and Oxidation Relationships Based on COSINE Sub-channel Code

Cheng Yixuan, Meng Zhaocan, Zhang Hao, Zhang Yilin, Zhao Meng, and Yang Yanhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2024.04.0127>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于棒束传热实验的COSINE系统程序验证与确认

Validation and Verification of COSINE Code Based on Rod Bundle Heat Transfer Experiment

核动力工程. 2024, 45(1): 19–26

COSINE软件包基于三代非能动压水堆低功率物理试验的确认与评估

Validation and Evaluation of COSINE Based on Gen III PassivePWR Low Power Physical Test

核动力工程. 2021, 42(1): 61–64

高压条件下燃料组件内过冷沸腾过程传热不均匀性研究

Study on Non-Uniformity of Sub-Cooled Boiling Heat Transfer of High Pressure Water in Fuel Assembly

核动力工程. 2019, 40(4): 9–14

全堆芯热工子通道模型的JFNK全局求解方法研究

Study on JFNK Global Solution Method of Full-core Thermal Sub-channel Model

核动力工程. 2023, 44(5): 39–46

基于加热壁面能量平衡的窄矩形通道内CHF机理模型

CHF Mechanism Model in Narrow Rectangular Channel Based on Energy Balance on Heating Wall

核动力工程. 2023, 44(2): 43–47

COSINE堆用蒙特卡洛分析软件cosRMC研发与应用

Development and Application of COSINE Reactor Monte Carlo Code cosRMC

核动力工程. 2021, 42(3): 218–224



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2024)04-0127-07; DOI:10.13832/j.jnpe.2024.04.0127

基于 COSINE 软件包子通道软件的换热模型和氧化关系式适应性研究

程以炫¹, 孟召灿², 张昊³, 章艺林², 赵萌³, 杨燕华^{1,3}

1. 上海交通大学国家电投智慧能源创新学院, 上海, 200240; 2. 国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京, 102209;
3. 上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240

摘要: 针对压水堆核电子通道软件中换热模型和氧化关系式对提高堆芯安全性和国产化软件模拟预测准确性的迫切需求, 采用数值模拟技术在 COSINE 软件包子通道软件中分析换热模型和氧化关系式, 并运用实验数据研究了不同理论关系式对沸腾换热性能和氧化量的影响。结果表明, 该软件具有模拟棒束内临界前后换热模型的能力, 其模拟结果和实验值吻合良好。在过热度小于 4 K 前, MAX 模型计算核态沸腾适用性较好; 在过热度大于 4 K 后, PLUS 模型适用性较好。Dougall-Rohsenow 模型计算膜态沸腾适用性较好。Baker-Juster 模型在温度低于 1374 K 前, 略微高估氧化量; 在温度高于 1374 K 后, 低估氧化量。

关键词: 子通道; COSINE 软件包; 壁面换热; 氧化量; 适应性

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A

Study on Adaptability of Heat Transfer Model and Oxidation Relationships Based on COSINE Sub-channel Code

Cheng Yixuan¹, Meng Zhaocan², Zhang Hao³, Zhang Yilin²,
Zhao Meng³, Yang Yanhua^{1,3}

1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. State Power Investment Corporation Research Institute, Beijing, 102209, China; 3. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China

Abstract: In view of the urgent need of heat transfer model and oxidation relationships in pressurized water reactor nuclear subchannel software to improve the core safety and the accuracy of simulation and prediction of domestic software, we used numerical simulation technology to analyze the heat transfer model and oxidation relationships in COSINE subchannel software, and used experimental data to study the influence of different theoretical relationships on boiling heat transfer performance and oxidation amount. The results indicate that the software has the ability to simulate the heat transfer before and after the criticality in the rod bundle, and the simulation results are in good agreement with the experimental values. Before the superheat degree is less than 4 K, the MAX model is suitable for calculating nucleate boiling. When the superheat degree is greater than 4 K, the PLUS model has good applicability. Dougall-Rohsenow model is suitable for calculating film boiling. Baker-Juster model slightly overestimated the oxidation amount before the temperature was lower than 1374 K; When the temperature is higher than 1374 K, the oxidation amount is underestimated.

Key words: Subchannel, COSINE software package, Wall heat transfer, Oxidation amount, Adaptability

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2024-01-10

基金项目: 国防科工局核能开发项目

作者简介: 程以炫 (1995—), 男, 博士研究生, 现主要从事核电软件开发与测试方面的研究, E-mail: cyx1995@sjtu.edu.cn

0 引言

在压水堆事故过程中,堆芯在整个事故序列中均发生复杂的两相传热现象。燃料棒包壳壁面温度变化和氧化量是评价压水堆核电站安全性能的主要指标^[1]。燃料棒包壳壁面温度和氧化量决定了事故的严重程度,也体现出堆芯的安全能力极限值。反应堆内的流体和燃料棒包壳壁面的换热包括单相液体换热及沸腾换热^[2]。另外,对于流体和高温包壳壁面的作用来讲,水与金属会在一定条件下发生化学反应,改变壁面材料特性^[3]。

目前,国内外对沸腾换热特性以及锆合金高温氧化行为开展了广泛研究。在沸腾换热研究方面,Dittus和Boelter通过单相流动实验提出单相液体换热公式^[4]。Thom基于核态沸腾实验研究提出沸腾关系式^[5]。Jens和Lottes在工质为水的垂直管道流动实验中提出核态沸腾关系式^[6]。Groenveld^[7]基于竖直流动开发了膜态沸腾换热公式。Groenveld和Delorme^[8]对Groenveld的公式^[7]进行了修正,建立了过热蒸汽焓计算模型。Dougall和Rohsenow^[9]对Dittus与Boelter的公式^[4]进行了修正,适用于高流量、低含汽量膜态沸腾的计算。Claudi等^[10]通过实验研究了垂直圆管中的核态沸腾传热。结果发现,系统压力的增大和通道直径的减小会提高饱和核态沸腾传热。Tong和Young^[11]基于非平衡热力学理论,建立了过渡和薄膜沸腾传热关联式。Ebrahim^[12]通过实验研究了膜态沸腾换热性能,实验发现,伴随着流体过冷度的增加和壁面温度的降低,换热系数增加。李智^[13]基于均相流假设,引入壁面热流分布和蒸发冷凝模型,该方法可较好地预测沸腾传热和两相分布。傅松^[14]基于均相流思想,研究了核态沸腾极限范围判据。在锆合金高温氧化行为研究方面,根据Cathcart和Pawel的实验^[15],当温度大于1000℃时,燃料棒锆合金包壳在高温下与水发生化学反应。Hu等^[16]研究了核事故中Cr涂层的高温氧化性能,结果表明,涂层在温度1200℃以内能有效保护锆基体。Yeom等^[17]研究了氧化演变和微观组织变化,发现1130℃时的氧化动力学符合抛物线规律,更高温度条件下受挥发影响较明显。

近年来以提升核电软件功能为目标的自主化开发和评价工作引起了广泛关注,特别是堆芯内

部模拟和预测的准确性。国家电投集团自主开发的适用于国和一号(CAP1400)核电站堆芯设计与安全分析软件包COSINE中的子通道软件,已经基本具备了对堆芯热工水力学现象的计算求解和数值模拟能力^[18-19]。

为了评估COSINE软件包堆芯子通道软件对反应堆换热模型和氧化关系式计算准确性和适应性,本文基于该软件包平台,研究了其在计算模拟沸腾换热模型和氧化量方面的性能。

1 控制方程与理论基础

1.1 控制方程

COSINE软件包堆芯子通道分析软件水力学模型采用子通道三方程均相流模型,热构件模型采用一维导热模型,三方程均相流模型认为气液相处于热力平衡状态,水力学控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程。通过求解下列的流体质量、动量和能量守恒方程,从而获得计算对象中流体和热构件的温度、压力、速度(流量)等热工水力参数的分布。

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m u_{m,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_{m,i} \mathbf{u}_m) = -\frac{\partial \tau_{m,ji}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_m \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m - p) + \nabla \cdot (\rho_m h_m \mathbf{u}_m) - \mathbf{u}_m \cdot \nabla p = -\nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3)$$

式中, ρ_m 为混合相密度,kg/m³; \mathbf{u}_m 为混合相速度,m/s; $u_{m,i}$ 为*i*方向的混合相速度; h_m 为混合相的焓,J/kg; p 为压力,Pa; q 为热流密度,W/m²; \mathbf{g} 为重力加速度,m/s²; \mathbf{e}_i 为单位向量; x 为方向空间坐标,m; t 为时间,s; τ 为剪切应力,N/m²;下标*ji*表示*j*表面*i*方向。

1.2 理论模型

本软件沸腾传热模型的工况范围见表1。

核态沸腾Jens-Lottes公式如下:

$$T_w - T_{\text{sat}} = \frac{25 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{1/4}}{\exp \left(\frac{5p}{3.1} \right)} \quad (4)$$

式中, T_w 和 T_{sat} 分别为壁面温度和饱和温度,K。

核态沸腾Thom公式如下:

$$T_w - T_{\text{sat}} = \frac{22.65 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{1/2}}{\exp \left(\frac{10^7 p}{8.7} \right)} \quad (5)$$

表 1 理论模型工况实验范围

Tab. 1 Experimental Range of Theoretical Model Conditions

模型名称	适用范围
Jens-Lottes模型	p 处于0.7~17.2 MPa, q 小于12.5 MW/m ²
Dittus-Boelter模型	流体被加热和冷却, 普朗特数(Pr)指数分别为0.4和0.3
Thom模型	p 处于5.2~13.8 MPa, q 处于0.28~0.6 MW/m ²
Groenveld模型	p 处于3.45~21.37 MPa, 含汽率(X)为0.1~0.9
Groenveld-Delorme模型	p 处于0.69~21.37 MPa, X 为0.12~0.31
Dougall-Rohsenow模型	p 处于0.11~0.16 MPa, X 为0.4
Baker-Juster模型	温度(T)处于1000~1300℃

Dittus-Boelter 公式如下:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (6)$$

式中, Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; n 为常数, 加热条件下为 0.4, 冷却条件为 0.3。

膜态沸腾 Groenveld 换热系数计算形式为:

$$h = \frac{0.052Pr_{g,w}^{1.26}\gamma^{-1.06}\lambda_{sat,g}}{D} \left\{ \frac{G_m D}{\mu_{sat,g}} \left[X + \frac{\rho_{sat,g}}{\rho_{sat,l}} (1-X) \right] \right\}^{0.688} \quad (7)$$

$$\gamma = \max \left[1.0 - 0.1(1-X)^{0.4} \left(\frac{\rho_{sat,l}}{\rho_{sat,g}} - 1 \right)^{0.4}, 0.1 \right]$$

式中, h 为换热系数, W/(m²·K); $Pr_{g,w}$ 为基于壁面温度的汽相 Pr ; γ 为含气率修正因子; $\lambda_{sat,g}$ 为饱和汽相导热系数, W/(m·K); G_m 为质量流速, kg/(m²·s); D 为管道直径, m; $\mu_{sat,g}$ 为饱和汽相动力粘性系数, Pa·s; $\rho_{sat,l}$ 、 $\rho_{sat,g}$ 分别为饱和液相密度、饱和汽相密度, kg/m³。

Groenveld-Delorme 公式如下:

$$h = \frac{0.008348\lambda_{g,f}}{D} \left\{ \frac{G_m D}{\mu_{g,f}} \left[X_a + \frac{\rho_g}{\rho_{sat,l}} (1-X_a) \right] \right\}^{0.8774} Pr_{sat,l}^{0.6112} \quad (8)$$

$$X_a = \frac{h_v - h_{sat,l}}{h_{fg}}$$

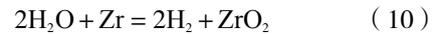
式中, $\lambda_{g,f}$ 为汽膜导热系数, W/(m·K); $\mu_{g,f}$ 为汽膜动力粘性系数, Pa·s; X_a 为真实含汽率; $Pr_{sat,l}$ 为液相饱和状态的 Pr ; h_v 为过热蒸汽焓, J/kg; $h_{sat,l}$ 为饱和液相焓, J/kg; h_{fg} 为汽化潜热, J/kg。

Dougall-Rohsenow 公式如下:

$$h = \frac{0.023\lambda_{sat,g}}{D} \left\{ \frac{G_m D}{\mu_{sat,g}} \left[X + \frac{\rho_{sat,g}}{\rho_{sat,l}} (1-X) \right] \right\}^{0.8} Pr_g^{0.4} \quad (9)$$

式中, Pr_g 为气相的 Pr 。

燃料棒锆合金包壳在高温下与水发生下列化学反应:



根据 Baker 与 Juster 模型, 当温度大于 1000℃ 时会发生氧化, 其氧化率为:

$$\delta \frac{d\delta}{dt} = \frac{C}{2} \exp\left(-\frac{B}{Rt}\right) \quad (11)$$

式中, δ 为氧化层厚度, m; R 为气体常数, $R=8.306$ J/(mol·K); B 为反应能, $B=2.918 \times 10^{-4}$ J/mol; C 为模型常数, 数值为 45498.326。

2 数值模拟与实验评估

2.1 数值模拟

数值模拟的控制体包括主控制体、轴向速度控制体、横向速度控制体等, 采用有限体积方法对微分形式的控制方程进行离散。流体进口条件设置为速度进口, 出口条件设置为压力出口。速度采用一阶迎风格式离散, 收敛准则为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ 。计算方法采用速度压力半隐式耦合方法求解, 主要步骤如下:

(1) 生成速度与轴向压差的关系: 遍历当前层的轴向速度控制体, 生成轴向速度与轴向压差的关系; 遍历当前横向速度控制体, 生成横向速度与轴向压差之间的关系; 获取轴向压差方程: 遍历当前层的主控制体, 将速度与压差的关系代入连续方程, 在每个控制体上得到关于轴向压差的方程。

(2) 轴向压差求解: 对于当前层, 联立所有控制体上的轴向压差方程, 求解该方程得到轴向压差。

(3) 速度更新: 根据求得的轴向压差, 更新当前层的所有轴向速度与横向速度; 压力更新: 重复上述步骤, 计算得到整个流场的速度与压差, 并根据出口压力更新流场的压力。

(4) 焓值的求解: 遍历流场所有控制体, 根据能量方程以及流场信息, 得到关于焓的方程, 求解得到焓值; 更新其他变量, 并进行收敛判断, 若不收敛则继续迭代。

2.2 模型评估所选用的实验

壁面换热影响壁面温度的预测准确性, 可通过考量壁面温度来评估换热模型。选用 Rohsenow-Clark 实验数据^[20] 评估沸腾模型, Rohsenow-Clark 为高压下竖直管加热实验, 镍管外表面布置热电偶, 外壁面进行绝热处理。管长 0.23876 m, 管外径为 5.34 mm, 管内径为 4.58 mm。轴向热流密度非均匀分布, 从 1.89~7.5659 MW/m² 线性变化。压力为 13 MPa, 流速为 6 m/s, 入口温度为 540 K。子通道软件的网格划分轴向为 20 个均分网格, 径向为 3 个均分网格。

选用 THTF 实验^[21] 数据评估膜态沸腾换热模型, THTF 实验是堆芯棒束传热实验, 在高温、高压下运行, 包含稳态实验。THTF 实验段包含 64 根全尺寸棒 (60 根加热棒, 4 根非加热棒), 其中 32 号棒在实验中失效, 加热长度为 3.66 m, 以 8×8 棒束排列。每个燃料棒直径为 9.5 mm, 棒束间的距离为 12.7 mm。编号 3.07.9B 为稳态工况, 对于该工况, 实验先建立并调整入口流量, 以达到预期的流量、温度及压力, 随后增加棒束功率, 直到烧干点出现在期望位置, 当压力和棒束表面温度稳定时达到稳态, 此时压力为 12.75 MPa, 入口流量为 4.4 kg/s, 入口焓为 1399.1 kJ/kg, 线功率密度为 27.23 kW/m。子通道软件的网格划分轴向为 12 个均分网格, 径向为 3 个均分网格。

选用 Cathcart-Pawel 实验^[10] 数据评估高温锆水反应氧化量模型, 该实验对锆合金与高温蒸汽反应的过程进行了研究, 测量了最外层的氧化相、中间氧化稳定的 α 相的生长速率, 并根据相的厚度测量以及其他的信息, 计算了总的耗氧量, 获得了在温度区间 900~1500℃ 下的氧化动力学参数。反应室中的锆-4 合金管道实验件长 30 mm, 外径 10.92 mm, 内径 9.65 mm。在实验过程中, 蒸汽外掠管道样件的外表面, 样件管内充满氦气, 压力略大于管道外侧蒸汽压力, 以防止蒸汽进入样件管内。

3 结果与讨论

3.1 核态沸腾模型适用性分析

随着壁面过热度的增加, 热流密度增加, 见图 1。过冷核态沸腾传热系数选取 PLUS 模型 (通过 Thom, Dittus-Boelter 关系式计算出的结果叠加值) 和 MAX 模型 (通过 Thom, Dittus-Boelter 关系式计算出的结果取最大值) 2 种计算模型, 通过比较轴向壁面过热度 (内壁面的温度与系统压力下流体饱和温度的差值) 的计算值和实验结果来进行模型评估。评估结果如图 1 所示。通过计算值和实验结果的对比可知, 模拟结果和实验值的趋势是一致的; 在过热度小于 4 K 前, MAX 模型计算核态沸腾更准确; 在过热度大于 4 K 后, PLUS 模型更合适。此外, Jens-Lottes 模型的计算结果不如另外两个模型准确。

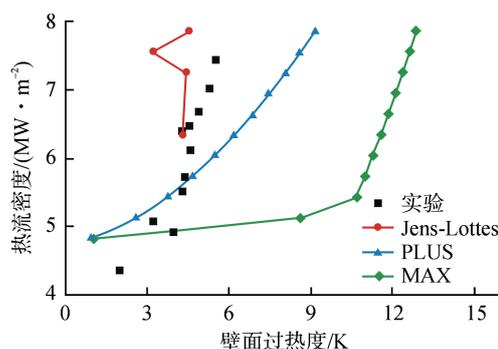


图 1 热流密度和壁面过热度的关系比较

Fig. 1 Comparison of Relationship between Wall Heat Flux and Super Heat

图 2 对比了不同核态沸腾模型所计算出的数值模拟结果与实验值之间的误差。如图 2a 所示, 在过热度小于 4 K 时, MAX 模型的平均相对误差 (MRE) 最小, 数值为 5.15%, 最大、最小误差分别为 11.85% 和 0.44%; 如图 2b 所示, 在过热度大于 4 K 时, PLUS 模型的 MRE 最小, 数值为 8.93%, 最大、最小误差分别为 15.49% 和 1.26%。这是由于 Thom 和 Dittus-Boelter 模型主要在热流密度 2 MW/m² 内进行关系式拟合, 模型系数存在细微偏差。同时, Jens-Lottes 模型是在高热流密度为 12 MW/m² 工况下构建, 从而与实验数据差异略大。

3.2 膜态沸腾模型适用性分析

由图 3 可知, 实验棒束表面处于过渡沸腾或膜态沸腾的状态, 在烧干点位置后棒束内产生大

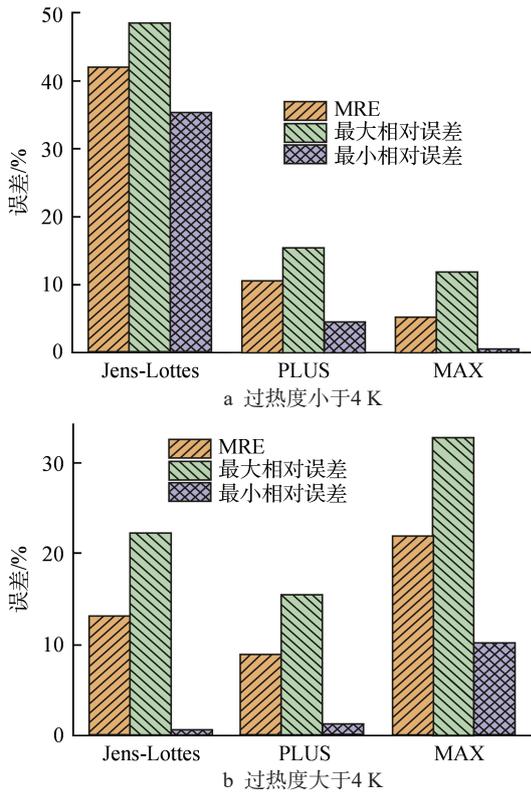


图2 采用不同核态沸腾模型的数值模拟结果误差
Fig. 2 Numerical Simulation Errors Using Different Nucleate Boiling Models

量的蒸汽，蒸汽质量的不断升高增加了流体的混合速度，提高了流体的冷却能力，因此壁面温度在烧干点位置后沿着轴向出口方向逐渐降低。COSINE 软件计算出的温度在轴向 0.9 m 处开始升高。

不同模型预测的整体趋势与实验一致。前部分计算结果的温度飞跃是因为核态沸腾到膜态沸腾的模式转变；轴向温度的计算结果与实验结果

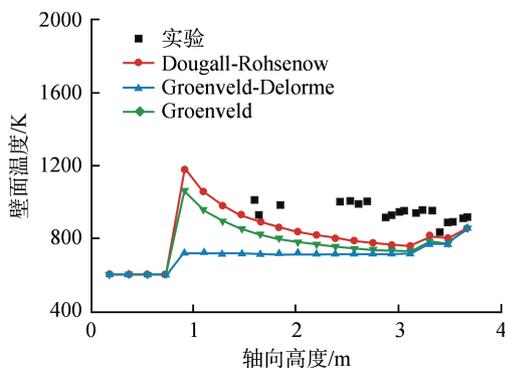


图3 THTF 实验数据与不同膜态沸腾关系式比较
Fig. 3 Comparison of THTF Experimental Data with Different Film Boiling Models

略有差异，且模型计算值均低于实验结果。

图4 对比了不同膜态沸腾模型模拟结果与实验值之间的误差。Dougall-Rohsenow 模型的 MRE 最小，数值为 14.38%，最大、最小误差分别为 22.09% 和 2.7%。引起误差的原因可能是实验测量获取的壁面温度数据为有效壁面温度，有效壁面温度是考虑热损失后得到的，而模拟结果并未考虑热损失，直接将有效数值作为边界条件进行计算，因此存在误差。同时，均相流软件将汽液两相当作混合相处理，无法体现出过热蒸汽与壁面之间的换热效果，这对于处在膜态沸腾模式下的轴向高度也有影响。另外，计算模拟的临界热流密度保守也会导致计算值低于实验值，这是因为临界热流密度决定稳态工况下进入膜态沸腾的轴向高度位置。

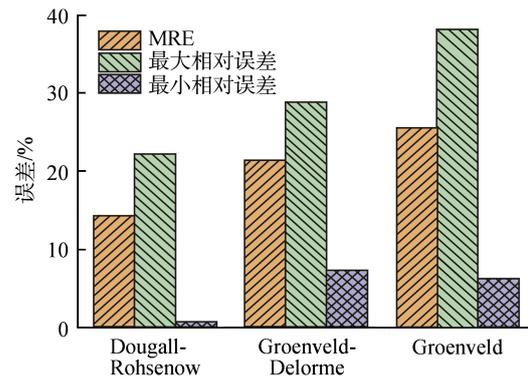


图4 采用不同膜态沸腾模型的数值模拟结果误差
Fig. 4 Numerical Simulation Errors Using Different Film Boiling Models

3.3 高温氧化模型适用性分析

本研究计算了实验样件温度分别为 1274、1374、1476、1577 K 共 4 个工况。建立热构件模型模拟样件，热构件表面为第三类边界条件，流体温度为各工况的蒸汽温度。在启动金属与水反应模型前，计算足够长的时间，以确保热构件的温度为蒸汽温度。启动金属与水反应模型，采用 Baker-Juster 模型。随着时间的增加，氧化层厚度增加。

样件温度为 1274 K 和 1374 K 工况的计算结果见图 5，样件温度为 1476 K 和 1577 K 工况的计算结果见图 6。氧化层计算值的变化趋势与实验值是一致的，并且计算值基本均在实验值的上

下限内,表明计算的准确度是可接受的。Baker-Juster 模型在温度低于 1374 K 前,略微高估氧化量;在温度高于 1374 K 后,低估氧化量。

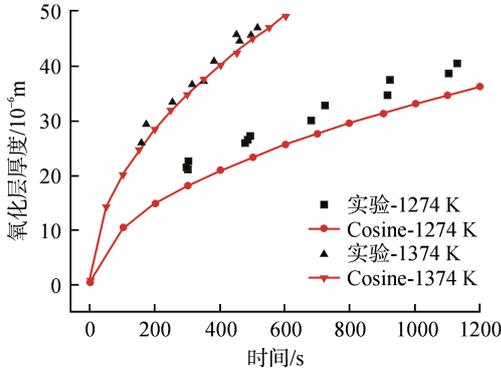


图 5 较低温度工况下氧化层厚度分布

Fig. 5 Oxide Layer Thickness Distribution at Lower Temperature

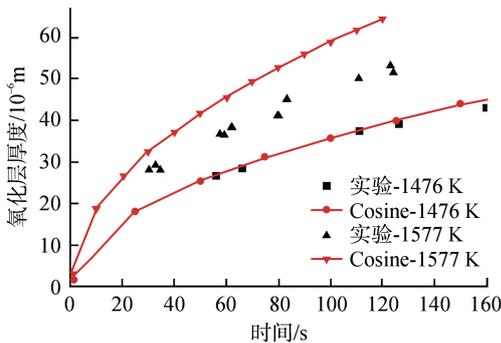


图 6 较高温度工况下氧化层厚度分布

Fig. 6 Oxide Layer Thickness Distribution at Higher Temperature

图 7 对比了不同温度条件下模拟结果与实验值之间的误差,其中,1374 K 工况 MRE 最小,数值为 4.05%,最大、最小误差分别为 10.06% 和 0.78%;1577 K 工况 MRE 最大,数值为 22.15%,最大、最小误差分别为 27.57% 和 15.68%。这是由于实验样件的温度控制在期望值难以长时间保持。另外, α 层测量存在 6.5%~7.3%的散射相对误差,很难精确定位 α 界面位置。

4 结论

选用管内换热 Rohsenow-Clark 实验和 Cathcart-Pawel 实验进行评估。评估结果显示 COSINE 软件包子通道软件具有模拟棒束内临界前换热模型的能力, COSINE 模拟结果和实验值

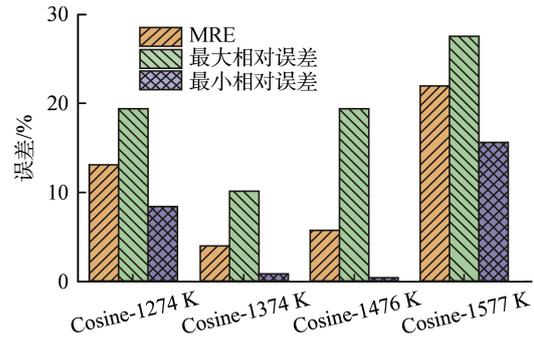


图 7 氧化量的数值模拟误差

Fig. 7 Numerical Simulation Errors of Oxidation Amount

吻合良好。在过热度小于 4 K 前,MAX 模型计算核态沸腾适用性较好,平均相对偏差值为 5.15%;在过热度大于 4 K 后,PLUS 模型适用性较好,平均相对偏差值为 8.93%。Dougall-Rohsenow 模型计算膜态沸腾适用性较好,平均相对误差值为 14.38%。Baker-Juster 模型在温度低于 1374 K 前,略微高估氧化量;在温度高于 1374 K 后,低估氧化量。

参考文献:

- [1] 于平安,朱瑞安,喻真焱,等.核反应堆热工分析[M].上海:上海交通大学出版社,2002:48-60.
- [2] BROMLEY L A. Heat transfer in stable film boiling[J]. Chemical Engineering Progress, 1950, 46(5): 221-226.
- [3] 刘彦章,邱军,刘欣,等. N18 铝合金在 600~1200℃ 蒸汽中的氧化行为研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 85-88.
- [4] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type[J]. University of California Publications in Engineering, 1930, 2: 443-461.
- [5] ONG'IRO A, UGURSAL V I, AL TAWHEEL A M, et al. Modeling of heat recovery steam generator performance[J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(5): 427-446.
- [6] JENS W H, LOTTES P A. Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high-pressure water: ANL-4672[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 1951.
- [7] GROENEVELD D C, MOECK E O. An investigation of heat transfer in the liquid deficient regime: AECL-3281[R]. Chalk River: Chalk River Nuclear Labs, 1969.
- [8] GROENEVELD D C, DELORME G G J. Prediction of thermal non-equilibrium in the post-dryout regime[J]. Nuclear Engineering and Design, 1976, 36(1): 17-26.
- [9] DOUGALL R L, ROHSENOW W M. Film-boiling on the inside of vertical tubes with upward flow of the fluid

- at low qualities[D]. Cambridge: Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [10] MARTÍN-CALLIZO C, PALM B, OWHAIB W. Subcooled flow boiling of R-134a in vertical channels of small diameter[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 33(8): 822-832.
- [11] TONG L S, YOUNG J D. Phenomenological transition and film boiling heat transfer correlation[C]// International Heat Transfer Conference. Tokyo, 1974.
- [12] EBRAHIM S A. An experimental investigation of the effects of surface conditions on pool-boiling heat transfer for various materials[D]. State College: The Pennsylvania State University, 2018.
- [13] 李智. 天然气发动机气缸盖热负荷及冷却水腔内沸腾传热研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [14] 傅松. 缸盖冷却水套内沸腾传热特性的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [15] CATHCART J V, PAWEL R E, MCKEE R A, et al. Zirconium metal-water oxidation kinetics: IV reaction rate studies: ORNL/NUREG-17[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1977.
- [16] HU X G, DONG C, WANG Q, et al. High-temperature oxidation of thick Cr coating prepared by arc deposition for accident tolerant fuel claddings[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, 519: 145-156.
- [17] YEOM H, MAIER B, JOHNSON G, et al. High temperature oxidation and microstructural evolution of cold spray chromium coatings on Zircaloy-4 in steam environments[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, 526: 151737.
- [18] 葛炜, 杨燕华, 刘飒, 等. 大型先进压水堆核电站关键设计软件自主化与 COSINE 软件包研发 [J]. 中国能源, 2016, 38(7): 39-44.
- [19] 傅孝良, 刘丽芳, 于楠, 等. COSINE 系统分析程序模型评估需求分析 [J]. 核动力工程, 2015, 36(1): 144-147.
- [20] ROHSENOW W M, CLARK J A. Heat transfer and pressure drop data for high heat flux densities to water at high subcritical pressures: NP-3385[R]. Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooperation, 1951.
- [21] YODER G L, MORRIS D G, MULLINS C B, et al. Dispersed-flow film boiling in rod-bundle geometry: steady-state heat-transfer data and correlation comparisons. [PWR; BWR]: NUREG/CR-2435[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1982. DOI: [10.2172/5425380](https://doi.org/10.2172/5425380).

(责任编辑: 马 蓉)