

一种压水堆 CIPS 风险评估方法

蒙舒祺¹ 胡艺嵩¹ 李昌莹¹ 阮天鸣¹ 廖家鹏^{1,2}

1(中广核研究院有限公司 深圳 518000)

2(西安交通大学 西安 710000)

摘要 功率运行期间,压水堆(Pressurized Water Reactor, PWR)一回路腐蚀产物在燃料组件沸腾区域发生沉积形成污垢(Chalk Rivers Unidentified Deposit, CRUD)。当污垢增长到一定程度,会吸附冷却剂中的硼酸,造成燃料组件局部功率分布异常,进而引发污垢致轴向功率偏移事件(CRUD Induced Power Shift, CIPS)。国际上通常基于污垢厚度评估CIPS风险,但发生过CIPS的反应堆运行数据表明,污垢厚度并不是影响CIPS的唯一因素。为更加科学地评估PWR的CIPS风险,需要综合考虑CRUD特征和热工水力条件对CIPS的影响。本文基于多孔介质中的传质机理和CRUD形貌特征,开发了模拟CRUD内部硼沉积的分析模型,并采用该模型揭示了Callaway电厂和Ulchin电厂发生CIPS的深刻原因。结果表明:引起Callaway发生CIPS的最重要因素是CRUD厚度,而引起Ulchin发生CIPS的最重要因素则是CRUD孔隙率。研究结果为科学评估核反应堆CIPS风险提供了理论依据和数据支撑。

关键词 压水堆, CIPS, 污垢特征, 热工水力, 硼沉积

中图分类号 TL339

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090601

A CIPS risk evaluation methodology applicable for PWR

MENG Shuqi¹ HU Yisong¹ LI Changying¹ RUAN Tianming¹ LIAO Jiapeng^{1,2}

1(China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518000, China)

2(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

Abstract [Background] During pressurized water reactor (PWR) power operation period, corrosion products tend to deposit in the fuel boiling zone and form chalk rivers unidentified deposit (CRUD). At a certain level of CRUD, boron acid will precipitate and depress local nuclear power, causing CRUD induced power shift (CIPS) incident, however, the operation data of reactors that have undergone CIPS indicate that CRUD thickness is not the only factor affecting CIPS. [Purpose] This study aims to evaluate the CIPS risk of PWR more scientifically by establishing an evaluation methodology that comprehensively considers CRUD characteristics and thermal-hydraulic condition. [Methods] Based on the internal mass transfer mechanism of the porous media, a model which could simulate boron deposition process inside CRUD was established by combining the consideration of CRUD morphology. According to the simulated results, the deep causes of CIPS in Callaway and Ulchin power plants were revealed. [Results] Evaluation results show that the most important factor of CIPS in Callaway power plant is CRUD thickness which is different from the contribution of CRUD porosity to Ulchin's CIPS. [Conclusions] The CIPS risk evaluation method of this study provides theoretical evidence and supporting data for more scientific CIPS analysis.

Key words PWR, CIPS, CRUD characteristics, Thermal-hydraulic, Boron deposition

国家自然科学基金(No.U20B2011)资助

第一作者: 蒙舒祺, 男, 1992出生, 2018年于山东大学获硕士学位, 研究领域为反应堆污垢行为

通信作者: 胡艺嵩, E-mail: huyisong@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2021-03-08, 修回日期: 2021-06-07

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U20B2011)

First author: MENG Shuqi, male, born in 1992, graduated from Shandong University with a master's degree in 2018, focusing on reactors CRUD behavior

Corresponding author: HU Yisong, E-mail: huyisong@cgnpc.com.cn

Received date: 2021-03-08, revised date: 2021-06-07

压水堆 (Pressurized Water Reactor, PWR) 一回路过金属材料长期在高温高压水环境中服役, 其产生的腐蚀产物会在燃料表面沉积形成污垢, 美国将这种 PWR 燃料表面特殊的沉积物称为 CRUD (Chalk Rivers Unidentified Deposit)^[1]。燃料组件中上部区域存在过冷泡核沸腾 (Sub-cooled Nucleate Boiling, SNB), 镍铁等腐蚀产物倾向于在此区域析出, 造成 CRUD 厚度持续增长^[2]。硼酸作为控制堆芯反应性所必须的添加物, 在 PWR 一回路主流体域中以溶解态存在, 但沸腾区域的 CRUD 会吸附硼酸, 造成局部硼浓度富集^[3], 进而影响燃料组件轴向功率分布, 严重时引起垢致轴向功率偏移事件 (CRUD Induced Power Shift, CIPS)。最早发生 CIPS 的是美国二代 PWR, 由于其一回路过金属材料抗腐蚀能力较差, 腐蚀产物在燃料组件 SNB 区域大量沉积, 形成较厚的污垢。以美国 Callaway 电厂为例, 该电厂发生 CIPS 事件后, 研究人员^[4]对 CRUD 进行了测量, 观察到该电厂 CRUD 最大厚度超过 100 μm , 且 CRUD 与燃料包壳之间出现一层均匀分布的 ZrO_2 , 这说明 Callaway 电厂的污垢不光引起了 CIPS 风险, 甚至产生了垢致局部腐蚀 (CRUD Induced Localized Corrosion, CILC)。

CRUD 为硼析出提供了场所, 研究人员对 CRUD 在燃料表面的沉积行为进行过分析和模拟。Robert 等^[5]考虑了 CRUD 对传热和中子通量分布的影响, 并对热工水力分析软件进行二次开发, 得到了考虑 CRUD 效应的换热模型; Zou 等^[6]耦合计算流体力学软件及核物理分析软件, 开发了考虑热工-核物理-化学耦合效应的 CIPS 分析模型; 杨萍和汤春桃^[7]阐述了 CIPS 的成因、危害及控制措施, 并评价了 AP1000 机组首循环 CIPS 风险; 韩旭等^[8]以压水堆燃料元件为研究对象, 针对传热传质对腐蚀产物沉积的影响建立了模型, 并对秦山二期一号机组 CRUD 总量、轴向分布和固相进行了分析。

Zhou 和 Jones 开发了一套分析硼沉积的模型, 并基于 Callaway 电厂数据进行了验证^[9], 结果表明: 当 CRUD 厚度超过 25 μm 后, 硼沉积量急剧增加, 因此美国通常将 25 μm 作为评估 CIPS 的阈值, 即 CRUD 厚度超过 25 μm , 就需要关注 CIPS 风险, 反之可认为 CIPS 风险很低。韩国 Ulchin 电厂同样发生过 CIPS, 停堆后研究人员对该电厂的 CRUD 进行了测量, 发现 CRUD 最大厚度仅 10~15 μm , 远低于 25 μm ^[10]。Ulchin 电厂的数据表明, CRUD 厚度并不是影响 CIPS 的唯一因素, 仅基于 CRUD 厚度评估 CIPS 风险存在较大不确定性。美国电力协会 (Electric Power Research Institute, EPRI) 专门开发了

商用软件评估 CIPS 风险^[11]。由于 CRUD 厚度被证实不是影响 CIPS 的唯一因素, 而 CRUD 内部中硼的沉积量直接影响局部功率分布, 因此 EPRI 基于其开发的商用软件模拟结果, 构造了表 1 所示的以硼沉积量作为 CIPS 风险评估阈值的数据库^[12], 参考此数据库, Callaway 电厂和 Ulchin 电厂发生 CIPS 时, 硼沉积分别达到 0.74 kg 和 0.37 kg。所有影响 CRUD 内部硼沉积的因素, 都会对 CIPS 风险评估产生影响, 综合考虑这些因素的效果, 能够更加科学地评估 PWR 发生 CIPS 的风险。

表 1 CRUD 中硼沉积量与 CIPS 风险等级的对应关系^[12]
Table 1 Relationship between boron deposition mass and CIPS risk levels^[12]

| 堆芯组件数 Assemble number | 低风险 Low risk / kg | 中风险 Medium risk / kg | 高风险 High risk / kg |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 121 | 0.09 | 0.29 | 0.57 |
| 157 | 0.11 | 0.37 | 0.74 |
| 177 | 0.13 | 0.42 | 0.83 |
| 193 | 0.14 | 0.45 | 0.91 |
| 217 | 0.15 | 0.50 | 1.00 |
| 241 | 0.17 | 0.54 | 1.13 |

注: 低风险、中风险和高风险对应的轴向功率偏移程度分别为 -3%、-5% 和 -10%

Notes: The level of power shift corresponding to low risk, medium risk and high risk is -3%, -5% and -10% respectively

1 CIPS 风险评估方法介绍

本节介绍综合考虑 CRUD 特征和热工水力条件的 CIPS 风险评估方法。

1.1 硼在 CRUD 内部的传质过程

燃料表面 SNB 区域温度较高、湍流搅混剧烈^[2], 冷却剂中的腐蚀产物会在此区域大量沉积或析出, 形成 CRUD。美国发生 CIPS 的电厂, 其 CRUD 多为疏松多孔结构, 且表面形成均匀分布的蒸汽通道^[13]。将 CRUD 抽象为由多孔介质和蒸汽通道组成的物质^[14], 冷却剂从多孔介质区域进入 CRUD 内部, CRUD 的流动阻力使液体流速逐渐降低, 同时 SNB 效应还会将液体不断转化为蒸汽, 通过蒸汽通道回到主流体域中重新冷凝。冷却剂在 CRUD 内部发生的气液两相形态转化会导致溶解态硼酸在污垢底部富集, 造成燃料组件局部硼浓度升高, 从而影响功率分布^[15]。

硼在 CRUD 内部的传质过程, 如图 1 所示。

1.2 硼在 CRUD 内部的富集模型

硼在 CRUD 内部的传质过程会造成局部浓度富

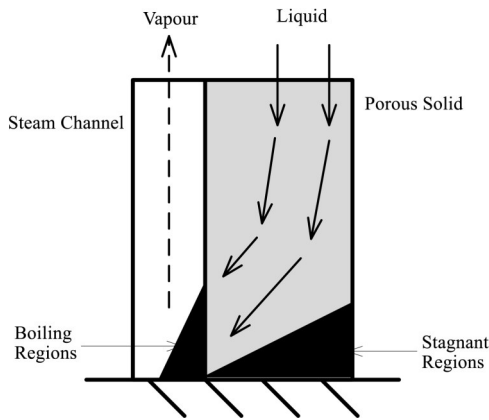


图1 硼在 CRUD 内部的传质过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of boron transport process inside CRUD

集,而影响该传质过程的因素包括污垢形态和热工水力条件。图2给出了硼在 CRUD 内部的富集模型示意图,其中: x 表示污垢厚度方向, δ 表示污垢最大厚度。

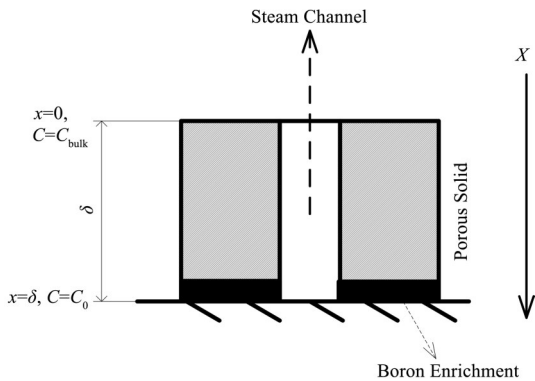


图2 硼在 CRUD 内部的富集模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of boron enrichment model

沿 x 方向,硼在 CRUD 内部的净流量可写为:

$$J = -D \frac{dC}{dx} + Cv \quad (1)$$

式中: J 表示硼在 CRUD 内部的净流量; D 表示硼在 CRUD 内部的扩散系数,可根据 Stokes-Einstein 方程^[16]计算得到; dC/dx 表示污垢厚度方向硼的浓度梯度; C 表示污垢厚度为 x 处的硼浓度; v 表示硼在 CRUD 内部的流速。

忽略硼蒸汽的挥发,可认为硼在 CRUD 内部的净流量为零,对式(1)移项后可写成 CRUD 厚度 x 与富集后的硼浓度 C 之间的微分方程:

$$\frac{dC}{C} = \frac{v}{D} dx \quad (2)$$

式(2)的边界条件为:

$$x = 0, C = C_{\text{bulk}} \quad (3)$$

$$x = \delta, C = C_0 \quad (4)$$

式中: C_{bulk} 和 C_0 分别表示硼在主流体中和 CRUD 底

部的浓度。

联立求解式(2)~(4),得到 CRUD 底部硼浓度与主流体硼浓度之间的关系:

$$\frac{C_0}{C_{\text{bulk}}} = \exp\left(\frac{vx}{D}\right) \quad (5)$$

即 CRUD 中富集后的硼浓度与主流体硼浓度之间存在指数函数关系。

1.3 硼在 CRUD 内部富集的影响因素分析

根据能量守恒,可列出如下公式:

$$q_v \cdot A_v = q \cdot A \quad (6)$$

$$q_v = \rho_0 \cdot v \cdot H_{\text{fg}} \quad (7)$$

式中: q 表示面功率密度; A 表示换热面积;下标 v 表示蒸汽,即由于 SNB 产生的汽态冷却剂; ρ_0 表示冷却剂饱和压力对应的密度; v 表示硼在 CRUD 内部的流速; H_{fg} 表示冷却剂汽化潜热。

对厚度为 δ 的 CRUD,根据孔隙率的定义^[6]可得:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \quad (8)$$

$$V_v = A_v \cdot \delta \quad (9)$$

$$V = A \cdot \delta \quad (10)$$

式中: ε 表示孔隙率; V 表示体积。

联立式(5)~(10),消去变量 v 后得到:

$$\frac{C_0}{C_{\text{bulk}}} = \exp\left(\frac{q}{H_{\text{fg}}} \cdot \frac{x}{\varepsilon \rho_0 D}\right) = \exp\left(\frac{1}{\rho_0 D} \cdot \frac{\dot{m}_e x}{\varepsilon}\right) \quad (11)$$

式中: \dot{m}_e 表示过冷沸腾速率; ρ_0 、 D 为饱和状态下的冷却剂物性参数,在 SNB 区域可视为常数。因此,过冷沸腾速率、CRUD 厚度和 CRUD 孔隙率是影响硼在 CRUD 内部富集的三大因素。过冷沸腾速率、CRUD 厚度和 CRUD 孔隙率变化幅度不同,对硼富集影响的程度也不同,这可以解释为何 Callaway 电厂的 CRUD 厚度超过 100 μm 才发生 CIPS,而 Ulchin 电厂的 CRUD 厚度不到 25 μm (美国推荐用于评估 CIPS 风险的阈值)也发生了 CIPS。

综上所述,针对不同的 PWR,需要综合考虑 CRUD 特征(厚度、孔隙率)和热工水力条件(过冷沸腾速率)对硼沉积的影响,才能准确评估其发生 CIPS 的风险。

2 采用 CIPS 风险评估方法对电厂现象的模拟及分析

不同电厂,主参数、运行模式和燃料组件类型的差异会造成过冷沸腾速率不同;电厂材料种类、批次和表面处理方法的差异会造成 CRUD 增长幅度不同;电厂运行经验以及实验结果表明,CRUD 孔隙率

随镍铁比升高而减小。Callaway 电厂由于 CRUD 质量多、厚度大发生过 CIPS, Ulchin 电厂在 CRUD 质量少、厚度小的情况下也发生过 CIPS, 这说明诱使 Callaway 电厂和 Ulchin 电厂发生 CIPS 的根源存在差异。本节采用热工水力程序、CRUD 生长模型和前文提到的 CIPS 风险评估方法, 对 Callaway 电厂和 Ulchin 电厂发生 CIPS 的根源进行了分析。

2.1 CRUD 生长模型

电厂运行经验表明, CRUD 主要在燃料组件中上部区域大量沉积^[17], 此处也是过冷沸腾速率较大的区域^[18], 说明过冷沸腾可能是促进 CRUD 厚度增加的重要因素。未发生过冷沸腾的区域也会有少量 CRUD 沉积, 通常认为这部分 CRUD 是湍流搅混引起的物理沉降^[19-20]。此外, 沉积在燃料表面的 CRUD 会发生脱落, 随着冷却剂在 PWR 一回路中迁移^[21]。CRUD 的形成是非稳态动力过程, 假设主流体和沉积表面之间存在扩散薄层, CRUD 的形成和脱落均通过薄层与主流体之间的物质交换实现, 扩散薄层内发生的物质交换可视为稳态过程。

基于扩散薄层假设, 对单位面积的燃料组件, 可采用以下公式计算 CRUD 厚度增长速率:

$$w_i = (\dot{m}_e + k_m) C_i - k_r m_{i,old} \quad (12)$$

$$v_\delta = \sum_i w_i / \rho_c \quad (13)$$

式中: w_i 表示沉积速率; k_m 表示湍流搅混系数, 可采用 Chilton-Colburn 公式^[19-20]计算得到; C_i 表示一回路金属元素浓度; k_r 表示 CRUD 脱落系数^[19]; $m_{i,old}$ 表示当前已沉积的 CRUD 质量; i 表示镍铁, 这两种金属

元素是 CRUD 的主要成分^[8,10,22]; v_δ 表示 CRUD 厚度增长速率; ρ_c 表示 CRUD 密度, 采用 EPRI 推荐的经验值^[22]。

Doncel 等^[23]在燃料棒表面模拟了 CRUD 的沉积过程, 并在给定 CRUD 厚度的条件下, 通过调整 CRUD 镍铁比, 得到了硼沉积量与镍铁比的关系, 结果表明镍铁比越高, 硼沉积量越大。美国对 Callaway 电厂 CRUD 进行了检测, 并在 0~100 μm 内绘制了 CRUD 孔隙率与厚度的关系曲线, 其检测区间可覆盖目前国际上运行的 PWR 工况。Callaway 电厂的检测数据表明, CRUD 孔隙率随厚度增长而减小, 即厚度增长会造成 CRUD 更加致密, 硼沉积量也显著增加^[9]。

综合 Doncel 等的实验结果^[23]和 Callaway 电厂检测数据^[9], 以 CRUD 厚度作为中间变量, 推导出 CRUD 孔隙率与镍铁比的关系式:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.9, & x \leq 0.17 \\ 0.31x^{-0.57}, & 0.17 < x < 2.00 \\ 0.2, & x \geq 2.00 \end{cases} \quad (14)$$

式中: x 表示 CRUD 镍铁比。

2.2 分析结果

在编程软件 MATLAB 中对 CRUD 生长模型进行代码实现后, 将 Callaway 电厂和 Ulchin 电厂的燃料组件均匀划分为 4 000 个控制体, 各控制体随运行时间变化的过冷沸腾速率由热工水力程序提供, CRUD 厚度和孔隙率随运行时间的变化通过 CRUD 生长模型进行模拟, 主要输入参数如表 2 所示。

表 2 Callaway 电厂和 Ulchin 电厂 CIPS 评估的输入参数
Table 2 Input parameters of CIPS evaluation for Callaway plant and Ulchin plant

| 参数 Parameter | 数值 Value | 备注 Notes |
|--|--------------------------------------|--|
| 过冷沸腾速率 | 各控制体不同 | 热工水力程序提供 |
| Mass evaporation rate / $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | Different in each controlling volume | Provided by thermal hydraulic code |
| 燃料表面积 | 各控制体不同 | 热工水力程序提供 |
| Fuel area | Different in each controlling volume | Provided by thermal hydraulic code |
| 冷却剂流速 | 各控制体不同 | 热工水力程序提供 |
| Coolant velocity / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | Different in each controlling volume | Provided by thermal hydraulic code |
| 冷却剂温度 | 各控制体不同 | 热工水力程序提供 |
| Coolant temperature / $^{\circ}\text{C}$ | Different in each controlling volume | Provided by thermal hydraulic code |
| 冷却剂压力 | 15.5 | 用于计算冷却剂饱和密度 |
| Coolant pressure / MPa | | For calculating coolant saturation density |
| 硼酸浓度 | 随运行时间递减 | 与运行值一致 |
| Boric acid concentration / $10^{-6} \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | Reduces along with operating time | Consistent with operating value |
| 镍浓度 | 2 | 参考 PWR 运行经验 |
| Nickel concentration / $10^{-9} \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ | | Based on PWR operating experience |
| 铁浓度 | 5 | 参考 PWR 运行经验 |
| Iron concentration / $10^{-9} \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ | | Based on PWR operating experience |

图3、4给出了某发生CIPS的循环中各参数对Callaway电厂和Ulchin电厂硼沉积的影响分析结果。为更好地体现不同参数对硼沉积的影响,对过冷沸腾速率、CRUD厚度和CRUD孔隙率进行了归一化处理,并用贡献因子(Contribution Factor)表示各参数对硼沉积的影响程度。某参数的贡献因子数值越大,表示此参数对硼沉积的影响越大。对比上述两个电厂的模拟结果可以看出:Callaway电厂发生CIPS时,对其硼沉积贡献程度最大的参数是CRUD厚度;Ulchin电厂发生CIPS时,对其硼沉积贡献程度最大的参数是CRUD孔隙率。如前文所述,孔隙率受到CRUD镍铁比的影响。热工水力参数的差异会造成湍流搅混系数和过冷沸腾速率变化,进而影响局部的镍铁比,最终改变CRUD的孔隙率。

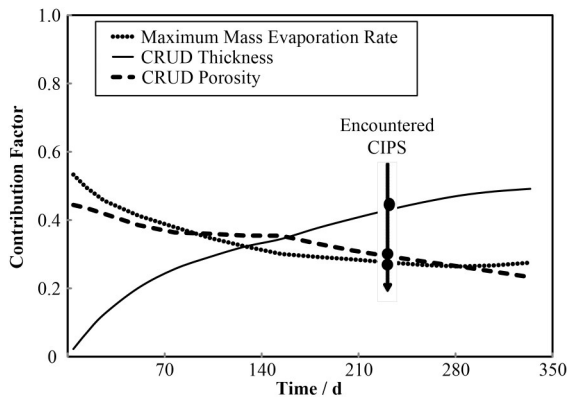


图3 Callaway电厂硼沉积影响因素分析结果
Fig.3 Analysis results of influencing factors of boron deposition in Callaway plant

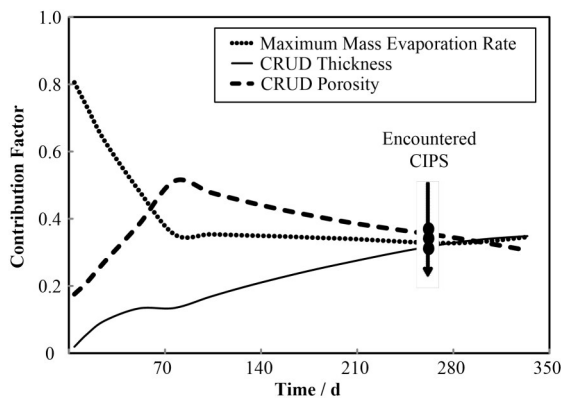


图4 Ulchin电厂硼沉积影响因素分析结果
Fig.4 Analysis results of influencing factors of boron deposition in Ulchin plant

为控制反应性,冷却剂硼浓度随运行时间递减,Ulchin电厂发生CIPS的时刻在Callaway电厂之后,相对Callaway电厂,此时主流体中硼浓度更低,且Ulchin电厂的CRUD厚度远低于Callaway电厂,CRUD厚度对硼沉积的作用呈衰减趋势,而Ulchin

电厂却在此时发生了CIPS,这更加说明促使Ulchin电厂发生CIPS的最重要因素不是CRUD厚度,而是CRUD孔隙率或过冷沸腾速率。

3 结语

1) 美国Callaway电厂和韩国Ulchin电厂的运行数据表明,仅基于CRUD厚度评估CIPS存在较大不确定性。

2) PWR发生CIPS的根源是硼在CRUD内部的富集,经过理论推导及分析,识别出CRUD厚度、CRUD孔隙率和过冷沸腾速率的综合作用是引起CIPS的根源。

3) 针对不同的PWR,CRUD厚度、CRUD孔隙率和过冷沸腾速率对CIPS的影响程度不同,即不同PWR发生CIPS的诱因存在较强特异性。

4) 可采用控制材料腐蚀(降低CRUD厚度)、调节一回路水化学参数(改变CRUD孔隙率)、更新燃料管理策略(降低燃料组件局部的过冷沸腾速率)等方法,降低PWR发生CIPS的风险。

致谢 感谢中广核研究院有限公司和中国科学院金属研究所对此项工作的大力支持。

参考文献

- 1 Yoo J, Lee S W, Park Y J, *et al.* Implementation of the crud layer model into the space code[C]. Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting, South Korea, 2020.
- 2 Short M P. The particulate nature of the crud source term in light water reactors[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, **509**: 478 - 481. DOI: 10.1016/j. jnucmat. 2018.07.008.
- 3 Jung Y H, Baik S E, Jin Y G. A study on the crystalline boron analysis in CRUD in spent fuel cladding using EPMA X-ray images[J]. Corrosion Science and Technology, 2020, **19**(1): 1 - 7. DOI: 10.14773/cst. 2020.19.1.1
- 4 Shim H S, Kim K S, Park H M, *et al.* Impact of zinc concentration on fuel crud in a simulated primary water of PWRs[C]. Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Autumn Meeting, Jeju Island, South Korea, 2020.
- 5 Robert K S, William D P, Marc-Oliver D, *et al.* Implementation of a space grid rod thermal-hydraulic reconstruction (ROTHCON) capability into the thermal-hydraulic subchannel code CTF[J]. Nuclear Technology,

- 2019, **205**(12): 1697 - 1706. DOI: 10.1080/00295450.2019.1585734.
- 6 Zou L, Zhang H B, Gehin J, *et al.* Coupled thermal-hydraulic/neutronics-crud framework in prediction of crud induced power shift phenomenon[J]. Nuclear Technology, 2013, **183**(3): 535 - 542. DOI: 10.13182/NT13-A194400.
 - 7 杨萍, 汤春桃. AP1000 核电厂首循环CIPS 风险评价[J]. 核科学与工程, 2012, **32**(3): 284 - 288. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2012.03.017.
YANG Ping, TANG Chuntao. CIPS risk analysis for AP1000 PWR first cycle[J]. Nuclear Science and Engineering, 2012, **32**(3): 284 - 288. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2012.03.017.
 - 8 韩旭, 矫彩山, 侯洪国, 等. 压水堆核电站腐蚀产物在堆芯内沉积过程的模型开发[C]. 中国核学会核材料分会 2020 学术年会, 沈阳, 2020.
HAN Xu, JIAO Caisan, HOU Hongguo, *et al.* Modelling deposit formation on pressurized water reactor fuel cladding surfaces[C]. Annual Conference of Nuclear Materials Branch of China Nuclear Society, Shenyang, 2020.
 - 9 Zhou D W, Jones B G. Boron concentration model and effects of boron holdup on axial offset anomaly (AOA) in PWRs[C]. Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Engineering, 2002, Arlington, Virginia, USA, 2009: 829 - 834. DOI: 10.1115/ICONE10-22636.
 - 10 Maeng W Y, Choi B S, Min D K, *et al.* The status of AOA in Korean PWR and a study on the CRUD deposition on cladding surface[C]. 2009 Spring Meeting of the KNS, South Korea, 2009.
 - 11 Dumnernchanvanit I, Mishra V K, Zhang N Q, *et al.* The fractalline properties of experimentally simulated PWR fuel crud[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, **499**: 294 - 300. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.041.
 - 12 Lange T L. Methodology for an advanced risk assessment of crud induced power shift using coupled multi-physics simulations and a Monte Carlo scenario analysis of the potential financial benefits[D]. The University of Tennessee, Knoxville, 2017.
 - 13 Yeo D Y, No H C. Modeling film boiling within chimney-structured porous media and heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **124**: 576 - 585. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.093.
 - 14 Park B G, Seo S, Kim S J, *et al.* Meso-scale multi-physics full coupling within porous CRUD deposits on nuclear fuel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, **512**: 100 - 117. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.10.002.
 - 15 Cho Y S, Son H H, Han J H, *et al.* Application of time-dependent growing mesh for crud growth simulation in single rod scale[J]. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), 2019, **27**: 2105. DOI: 10.1299/jsmeicone.2019.27.2105.
 - 16 Manacorda A, Schehr G, Zamponi F. Numerical solution of the dynamical mean field theory of infinite-dimensional equilibrium liquids[J]. The Journal of Chemical Physics, 2020, **152**(16): 164506. DOI: 10.1063/5.0007036.
 - 17 Riess R. Chemistry Experience in the primary heat transfer circuit of Kraftwerk union pressurized water reactors[M]. Nuclear Technology, Taylor & Francis Group, 2017: 153 - 159.
 - 18 Li S Z, Yang D M, Zhang T F, *et al.* A combined method for predicting the boron deposited mass and the CIPS risk [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2019, **2019**: 9537421. DOI: 10.1155/2019/9537421.
 - 19 Kang S, Sejvar J. The CORA-II model of PWR corrosion-product transport[R]. EPRI Technical Report, 1985.
 - 20 Lee C B. Modeling of corrosion product transport in PWR primary coolant[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
 - 21 Ferrer A, Dacquait F, Gall B, *et al.* Modelling of crud growth phenomena on PWR fuel rods under nucleate boiling conditions[C]. Nuclear Plant Chemistry Conference, Paris, France, 2012.
 - 22 Deshon J. PWR Axial Offset Anomaly (AOA) guidelines [R]. EPRI Technical Report, 2004.
 - 23 Doncel N, Chen J X, Deshon J. Water chemistry influence on AOA, phase 3 of the Spanish experiment at STUDSVIK[C]. Proceedings of the 2007 International LWR Fuel Performance Meeting, San Francisco, USA, 2007.