

瞬态线功率密度对PCI裕量影响研究

翟新杰, 张鹏鹤, 张衡, 林少芳, 李长征

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年9月27日; 录用日期: 2023年10月12日; 发布日期: 2023年11月9日

摘要

当堆芯发生II类瞬态导致燃料棒局部功率快速增加时, 由于芯块热膨胀导致包壳应力和应变快速增加, PCI失效风险增大。本文通过研究燃料棒在不同II类瞬态线功率密度下PCI裕量的变化, 从而确定了II类瞬态线功率密度对PCI裕量的影响规律, 为后续通过修改瞬态保护定值, 避免发生PCI失效奠定了基础。

关键词

芯块, 包壳, PCI, 瞬态, 线功率密度

Study on the Influence of Linear Power Density of Transient on PCI Margin

Xinjie Zhai, Penghe Zhang, Heng Zhang, Shaofang Lin, Changzheng Li

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong

Received: Sep. 27th, 2023; accepted: Oct. 12th, 2023; published: Nov. 9th, 2023

Abstract

When the local power of fuel rods increases rapidly due to Class II transient in the core, the stress and strain of cladding increase rapidly due to pellet thermal expansion, and the risk of PCI failure increases. In this paper, the change of PCI margin of fuel rods under different linear power density of Class II transient is studied, and the influence of linear power density of Class II transient on PCI margin is determined, which lays a foundation for avoiding PCI failure by modifying transient protection setting.

Keywords

Pellet, Cladding, PCI, Transient, Linear Power Density



1. 引言

PCI (Pellet Cladding Interaction), 即芯块包壳相互作用, 是在腐蚀性裂变产物(如 I、Cs)、敏感性材料(锆合金包壳)和包壳内表面拉应力三者共同作用下才会发生[1]。在燃料类型确定后, 通常研究在特定燃料管理方案下, 发生 II 类瞬态时全堆芯燃料棒的 PCI 失效风险[2] [3]。

对于新燃料, 燃料棒芯块与包壳存在一定的初始间隙。随着燃耗的加深, 在堆内中子辐照、高温高压的苛刻环境条件下, 芯块在径向上热膨胀、密实、肿胀、重定位, 包壳在径向上向内蠕变, 直至芯块包壳间隙闭合。而后, 随着芯块对包壳作用的增强, 包壳向外蠕变。在此过程中, 如果发生 II 类瞬态, 包壳可能受到芯块和包壳膨胀差造成的拉应力, 且不能被包壳蠕变补偿。这使得包壳处于高应力应变状态, 从而导致包壳破损。

现行的 PCI 分析方法主要包括三维的核、热工和热 - 力学计算, 具体可分为: 产生燃料棒参考功率史; 建立 II 类瞬态模拟和相应的功率分布; 确立燃料棒的热 - 力学参考状态; PCI 失效风险的热 - 力学评价。其中 PCI 失效风险的热 - 力学评价是将计算得到的极限燃料棒的应变能密度(SED)与 PCI 技术限值比较, 获得 PCI 裕量。

本文通过研究不同 II 类瞬态及不同线功率密度下 PCI 裕量的变化, 掌握了瞬态线功率密度对 PCI 裕量的影响规律, 为后续通过修改瞬态保护定值, 避免发生 PCI 失效奠定了基础。

2. 理论模型

在具体的分析过程中, 根据燃料棒几何特性, 应用平面应变假设, 在轴对称圆柱形几何条件下建立力学方程。总应变为弹性应变和非弹性应变之和[4]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{弹性}} + \varepsilon_{\text{非弹性}} \quad (1)$$

对于包壳, 非弹性应变为[4]:

$$\varepsilon_{\text{非弹性}} = \varepsilon_{\text{塑性}} + \varepsilon_{\text{蠕变}} + \varepsilon_{\text{热膨胀}} \quad (2)$$

2.1. 塑性应变

基于燃料棒内压爆破试验, 建立 M5 包壳塑性应变模型[4]:

$$\varepsilon_{\text{塑性}} = \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{K} \right)^{1/n} \quad (3)$$

式中, σ 为包壳应力, MPa; σ_0 和 K 为温度和快中子注量的函数; n 为常数。

2.2. 蠕变应变

2.2.1. 蠕变和应力松弛

蠕变[5]是金属材料在恒定温度和恒定应力的长期作用下, 随时间延长材料会慢慢地发生永久塑性变形的现象。典型的蠕变曲线如图 1 所示, 分为三个阶段: 第 I 阶段, 蠕变速率随时间的延长而减小, 也称为减速蠕变阶段或起始蠕变阶段; 第 II 阶段, 蠕变曲线接近于一条直线, 蠕变速率达到最小值, 并基本

保持不变，称为稳定蠕变阶段；第 III 阶段，蠕变速率随时间的延长不断增加，直至材料破坏，称为加速蠕变阶段。对于包壳在堆内运行时，一般处于蠕变的第 II 阶段。

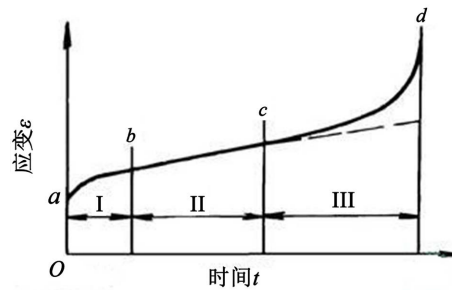


Figure 1. Creep curve [5]
图 1. 蠕变曲线[5]

应力松弛[5]指的是试件的变形在恒温下保持不变时，试件的应力随时间的增加而减少的现象。试件的应力降低是由于在该过程中，试件弹性变形转化为蠕变变形导致。典型的应力松弛曲线如图 2 所示，分为两个阶段：第 I 个阶段持续时间较短，应力随时间延长而急剧下降；第 II 阶段则持续时间很长，应力随时间延长缓慢降低。

从应力松弛和蠕变的定义可以看出应力松弛本质上是蠕变现象的另一种表现[6]。

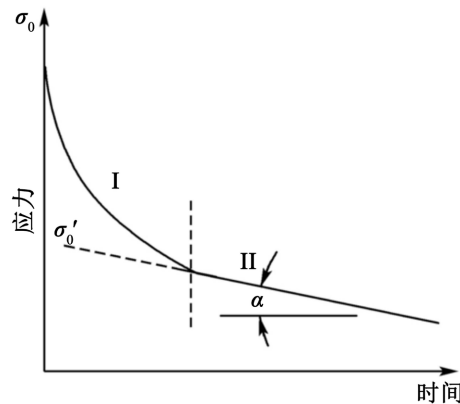


Figure 2. Stress relaxation curve [5]
图 2. 应力松弛曲线[5]

2.2.2. 蠕变应变模型

在堆内运行时，M5 包壳在径向上的变形主要为蠕变变形。而蠕变应变又可分为热蠕变和辐照蠕变，且辐照蠕变为主要贡献。对于 M5 包壳，根据所受应力的不同，其蠕变模型分为低应力蠕变模型和高应力蠕变模型。

2.3. 应变能密度模型[4]

$$SED = \int_A^B \sigma_{\theta\theta} d\varepsilon_{\theta\theta} \quad (6)$$

式中， SED 为应变能密度，MPa； $\sigma_{\theta\theta}$ 为包壳内表面切向应力，MPa； $\varepsilon_{\theta\theta}$ 为包壳内表面总的切向应变； A 为瞬态开始时包壳内表面切向应变； B 为包壳应变速率等于 0 时的包壳内表面切向应变。

3. 分析程序及不确定性

3.1. 分析程序

采用 OSCAR 程序和 COPERNIC [4]程序进行 PCI 裕量评价。

OSCAR 程序包含简化的燃料棒热力机械模型。在燃料棒 PCI 失效风险评价过程, 首先采用 OSCAR 程序进行基准计算(获得接触压力、内压和裂变气体释放率), 而后基于上述参数, 采用 OSCAR 程序快速完成极限燃料棒的选取。

针对 OSCAR 程序所选取的极限燃料棒, 采用燃料棒综合性能分析程序 COPERNIC 进行 II 类瞬态下燃料棒的 PCI 失效风险评估。在具体的分析过程中, COPERNIC 程序根据燃料棒的几何尺寸特征以及轴对称性, 对燃料棒在轴向进行分段, 在径向分成若干小分区。

3.2. 不确定性

PCI 是在芯块包壳接触时发生, 减小芯块和包壳之间的间隙会更易发生 PCI。因此, 对于芯块外径, 需保守考虑制造间隙公差及芯块重定位模型的不确定性。

4. II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量的影响研究

为了探究 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量的影响, 本章选取特定算例, 在稳态运行功率史保持不变的情况下, 评估不同 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量的影响。

研究的对象为 CPR1000 机组 18 个月换料燃料管理方案。研究的 II 类瞬态包括落棒(RD)、负荷过度增加(ELI), 研究的运行工况包括基负荷、75%FP 长期低功率运行(ELPO)、50% FP ELPO 运行。寿期初(BLX)时 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响研究算例如表 1 所示。

Table 1. Cases for the influence of line power density of transient II on PCI margin at BLX

表 1. BLX 时 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响研究算例

编号	case	组件编号	棒编号	节点编号	PCI 裕量 MPa	瞬态线功率密度 kW/m
1	L0_BLX_RD_K06_F06	H13	n.264	22	1.3762	41.80
2	L0_BLX_ELI_75FP_R24_RI	H10	n.67	24	1.6809	41.92
3	L0_BLX_ELI_75FP_L27_RO	E12	n.188	8	1.9439	37.89
4	L0_BLX_ELPO_75FP_RD_K06_F06	H13	n.264	23	0.7923	41.10
5	L0_BLX_ELPO_50FP_RD_K06_F06	H13	n.264	22	0.9762	41.07

因为瞬态期间功率变化速率以及瞬态线功率密度均对 PCI 裕量产生影响, 因此首先在瞬态线功率密度保持不变的情况下, 研究功率变化速率对 PCI 裕量的影响。以第 1 个算例 L0_BLX_RD_K06_F06 为例, 该算例研究的节点为 H13 组件第 264 根棒第 22 节点, 节点燃耗为 25594 WMd/tU。该节点在 L0 循环 BLX 时, 发生 RD 瞬态, 瞬态功率提升时间约为 195 s, 瞬态最大线功率密度为 41.80 kW/m, PCI 裕量为 1.3762 MPa。对该算例, 在瞬态线功率密度保持不变的情况下, 将瞬态功率提升时间分别变为 0.8、1.0、1.2 倍时, PCI 裕量分别为 1.3757、1.3762、1.3804 MPa。通过结果可以看出, 随着瞬态功率提升时间的增加, 即瞬态功率变化速率降低, PCI 裕量增加。上述算例的瞬态线功率密度、包壳内表面环向应力、包壳内表面环向总应变对比分别如图 3~5 所示, 从图 4 可以看出, 随着瞬态功率提升时间的增加, 瞬态期间最大应力降低, 这主要是由于时间的增加, 包壳发生应力松弛的程度越大。但因为瞬态升功率过程时间较短, 所以瞬态功率提升时间分别为 0.8、1.0、1.2 倍, 包壳内表面环向应力、环向总应变十分接近, 因此其 PCI 裕量差别很小。

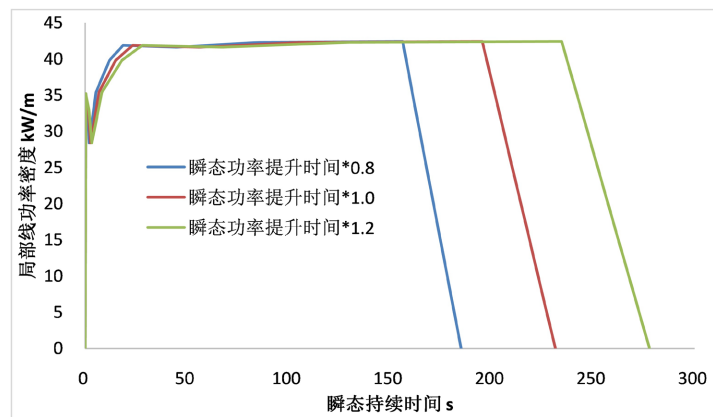


Figure 3. Transient line power density change with time of case 1
图 3. 算例 1 瞬态线功率密度随时间的变化

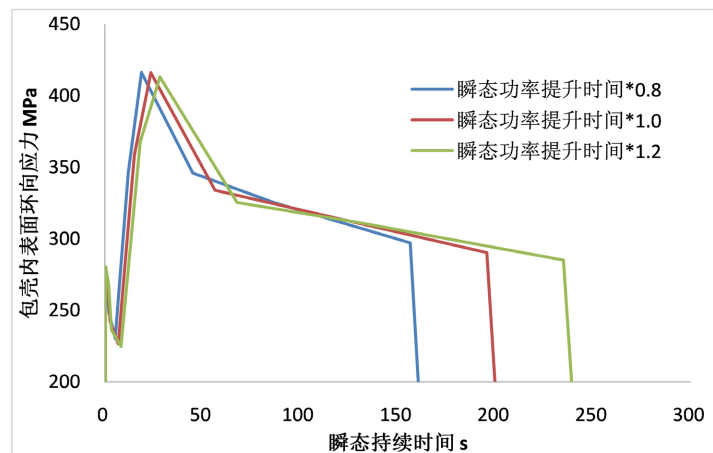


Figure 4. The change of the circumferential stress on the inner surface of the cladding with time of case 1
图 4. 算例 1 包壳内表面环向应力随时间的变化

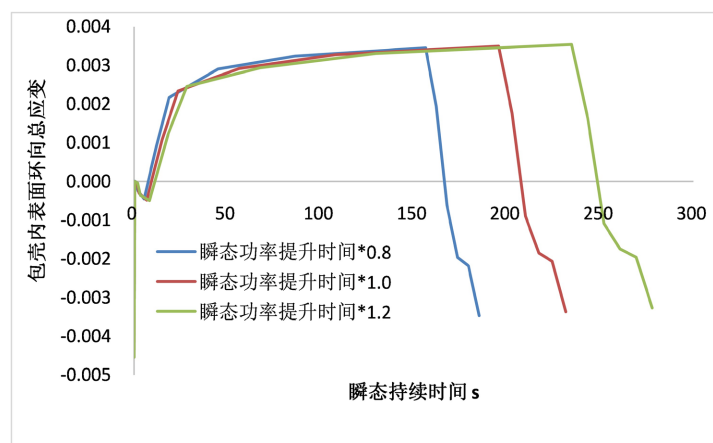


Figure 5. Variation of the total annular strain on the inner surface of the cladding with time of case 1
图 5. 算例 1 包壳内表面环向总应变随时间的变化

通过上述分析,可知,瞬态功率变化速率对 PCI 裕量的影响很小。因此对于表 1 中的每一个算例,在瞬态功率提升时间保持不变的情况下,以该瞬态线功率密度作为基准功率,在此基础上,分别乘以 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 的系数,从而得到该算例在不同瞬态线功率密度下 PCI 裕量变化规律。BLX 时不同 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响分析结果如图 6 所示。从图中可以看出, BLX 时各个算例 PCI 裕量随瞬态线功率密度的增加而降低,且基本呈线性规律。

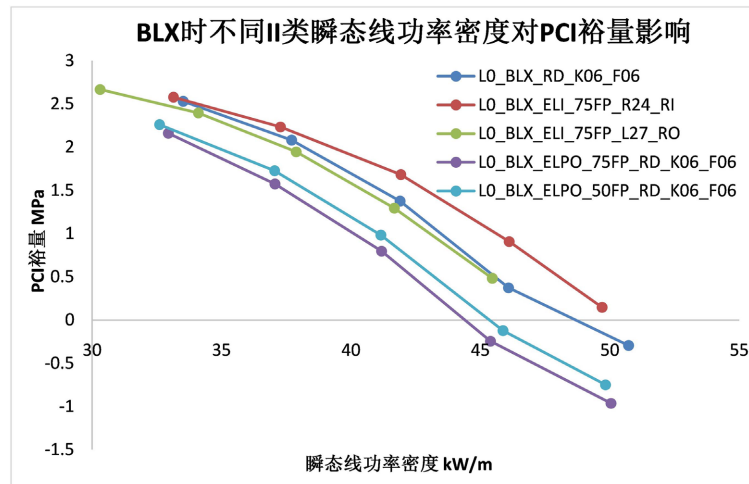


Figure 6. Effect of different line power density of transient II on PCI margin at BLX
图 6. BLX 时不同 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响

以第 2 个算例 L0_BLX_ELI_75FP_R24_RI 为例,该算例研究的节点为 H10 组件第 67 根棒第 24 节点,节点燃耗为 17883 WMd/tU。该节点在 L0 循环 BLX 时,发生 ELI 瞬态,瞬态最大线功率密度为 41.92 kW/m, PCI 裕量为 1.6809 MPa。对该算例,在瞬态功率提升时间保持不变的情况下,对比了瞬态线功率密度分别为 0.8、1.0、1.2 倍时的瞬态线功率密度、包壳内表面环向应力、包壳内表面环向总应变,分别如图 7~9 所示。从图 8 及图 9 可以看出,当瞬态线功率密度更高时,包壳内表面环向应力和环向总应变均增大,使得 PCI 裕量降低。

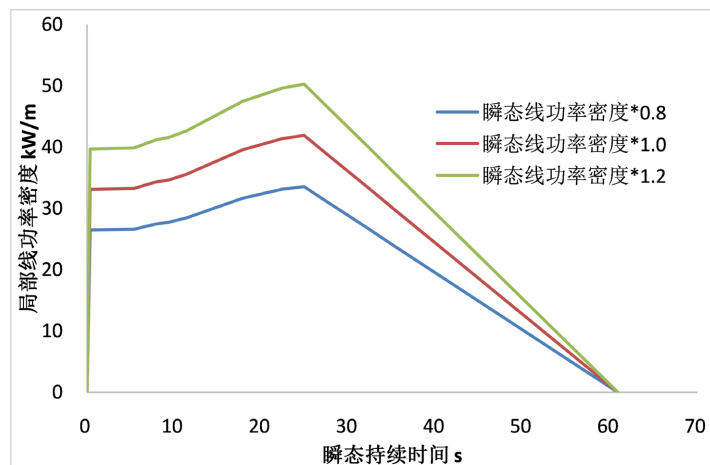


Figure 7. Transient line power density change with time of case 2
图 7. 算例 2 瞬态线功率密度随时间的变化

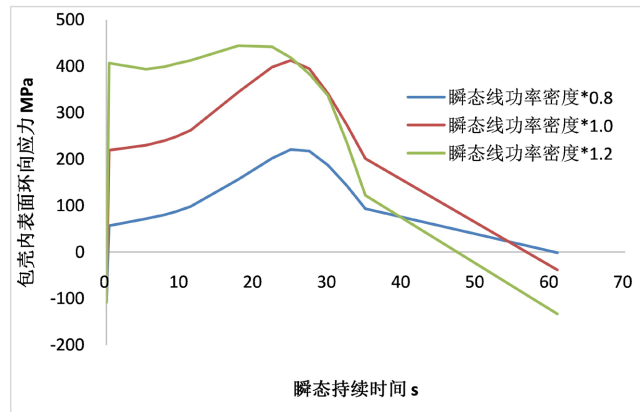


Figure 8. The change of the circumferential stress on the inner surface of the cladding with time of case 2

图 8. 算例 2 包壳内表面环向应力随时间的变化

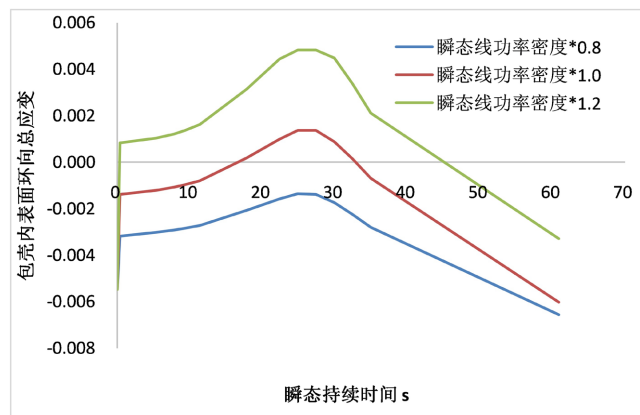


Figure 9. Variation of the total annular strain on the inner surface of the cladding with time of case 2

图 9. 算例 2 包壳内表面环向总应变随时间的变化

利用同样方法，对寿期中(MOL)和寿期末(EOL)时瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响进行分析，结果如图 10、图 11 所示。

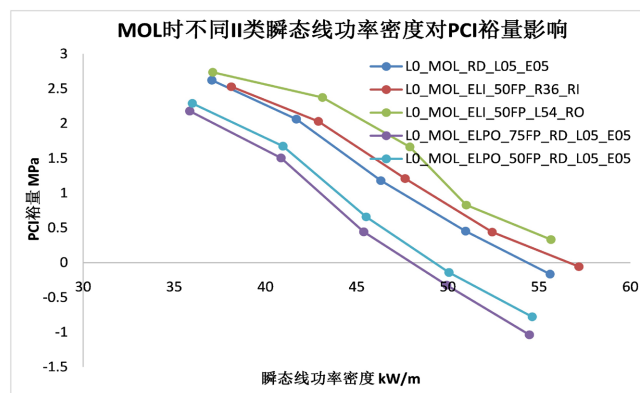


Figure 10. Effect of different line power density of transient II on PCI margin at MOL

图 10. MOL 时不同 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响

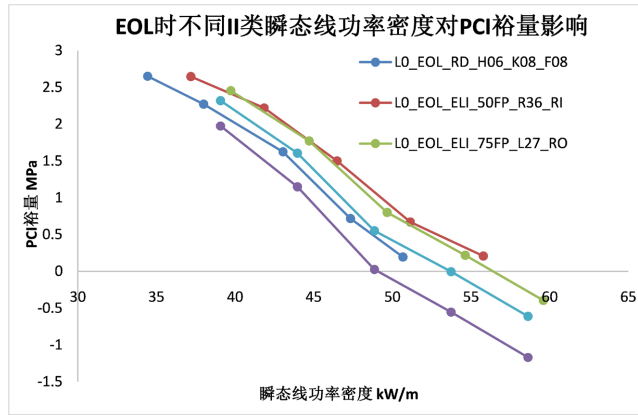


Figure 11. Effect of different line power density of transient II on PCI margin at EOL

图 11. EOL 时不同 II 类瞬态线功率密度对 PCI 裕量影响

5. 应用示例

通过第 4 章分析可知，在 BLX、MOL 和 EOL 时，PCI 裕量随瞬态线功率密度的增加而降低，且基本呈线性规律。这是因为瞬态线功率密度越大，芯块热膨胀也越大，芯块对包壳的作用越强，导致 PCI 裕量越低，失效风险越大。

图 12 为各个算例下 PCI 裕量随瞬态线功率密度的变化速率，从图中可以看出，PCI 裕量随瞬态线功率密度的变化速率比较接近，范围为 0.130~0.183 MPa/(kW/m)，15 个算例的平均值为 0.153 MPa/(kW/m)。

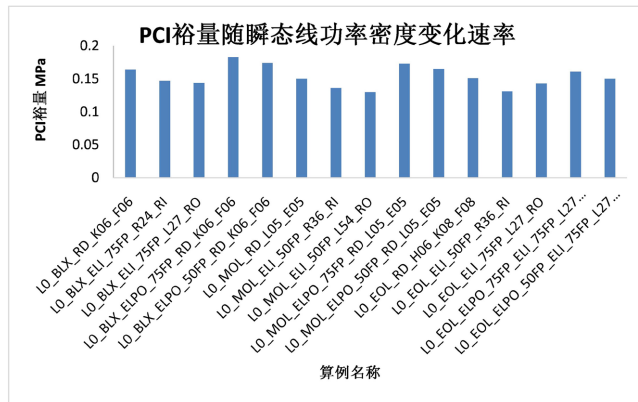


Figure 12. The rate of change of PCI margin with line power density of transient II

图 12. PCI 裕量随瞬态线功率密度的变化速率

上述规律应用的情景为：当分析评估结果表明，机组在特定工况下发生 II 类瞬态时存在 PCI 失效风险，则需要修改瞬态保护定值，从而避免发生 PCI 失效。但保护定值如果调整过低，则机组跳堆的概率将增加，不利于机组稳定运行，此时可通过上述规律，为保护定值的调整提供参考。

应用示例为：假设机组由于电网要求，需要 ELPO 运行较长时间，根据评估，在 ELPO 结束时，发生的 II 类瞬态最大线功率密度达到 50.10 kW/m，PCI 裕量为 -0.1374 MPa，即存在 PCI 失效的风险。在此情况下，根据上述研究结果，PCI 裕量随瞬态线功率密度增加时的降低速率范围为 0.130~0.183 MPa/(kW/m)，此时需要通过修改瞬态保护定值，将瞬态最大线功率密度降到 48.77 kW/m 以下，才能保

证 PCI 裕量大于零, 从而避免 PCI 失效的发生。这样既保证了机组的安全运行, 又最大程度上保证了机组运行的稳定性。

6. 结论

本文通过对 RD、ELI 等不同 II 类瞬态的线功率密度对 PCI 裕量的影响进行研究, 得到如下结论:

- PCI 裕量随瞬态线功率密度的增加而降低, 且基本呈线性规律;
- PCI 裕量随瞬态线功率密度变化速率范围为 0.130~0.183 MPa/(kW/m), 平均值为 0.153 MPa/(kW/m);
- 上述研究结果可为瞬态保护定值调整提供参考, 从而避免燃料棒发生 PCI 失效。

参考文献

- [1] Adamson, R., Cox, B., Davies, J., *et al.* (2006) Special Topic on Pellet Cladding Interaction. ZIRAT-11. ANT International, Sweden.
- [2] 李长征, 林少芳, 刘维超, 蔡智毅, 聂立红, 邓勇军. CPR1000 核电机组换料后再启动升功率策略优化研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(5): 74-78.
- [3] 刘振海, 周毅, 郭兴坤, 张坤, 谢清清, 谷明非. 反应堆 II 类瞬态下燃料棒 PCI 研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(5): 133-137.
- [4] Jacoud, J.L. (2000) Description and Qualification of the COPERNIC/TRANSURANUS Fuel Rod Design Code. TFJC-DC-1556. FRA Nuclear Fuel, France.
- [5] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [6] 湛利华, 阳凌. 时效蠕变与时效应力松弛行为转换关系[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(3): 126-131.