

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0001-03; doi: 10. 13832/j. jnpe. 2014. S2. 0001

# CPR1000 机组两种典型首循环长期 低功率运行能力分析

白成斐, 王欣欣, 蔡德昌

中科华核电技术研究院有限公司, 广东深圳, 518026

**摘要:** 针对目前 CPR1000 机组两种典型首循环堆芯装载方案(含硼玻璃或含钆)的长期低功率运行(ELPO)能力分别进行分析论证。结果表明,在增加适当的运行限制情况下,两种典型首循环堆芯装载方案进行 ELPO 均是可行的。

**关键词:** 首循环; 长期低功率运行; 运行限制

**中图分类号:** TL413 **文献标志码:** A

## Extended Low Power Operation Justification of Two Typical First Cycle for CPR1000

Bai Chengfei, Wang Xinxin, Cai Dechang

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518026, China

**Abstract:** The ability of extended low power operation(ELPO) of two typical first cycles (with Pyrex or gadolinium) for CPR1000 are analyzed and demonstrated respectively. The results showed that with the appropriate operation limits, both of the two typical first cycles are feasible for ELPO.

**Keywords:** First cycle, Extended low power operation, Operation limits

### 0 引言

长期低功率运行(ELPO)是核电运行生产的成熟做法,具有广泛的实践经验<sup>[1]</sup>。随着国内核电装机容量的增加,为了满足电网负荷不断变化的需求,新建核电机组从首循环开始亟需面对日负荷跟踪或ELPO的需求。本文针对目前CPR1000机组两种典型首循环装载方案(含硼玻璃或含钆<sup>[2]</sup>)进行ELPO能力分析,并对所采用ELPO运行模式的技术限制和实施策略进行论证分析。

### 1 堆芯燃料管理

目前CPR1000机组有两种典型首循环堆芯装载方案:以岭澳核电站二期、红沿河核电厂一期为代表的含硼玻璃堆芯装载和以宁德、阳江核电厂为代表的含钆堆芯装载。

为了展平堆芯功率分布,首循环两种装载方案堆芯燃料均按<sup>235</sup>U富集度分三区装载,富集度为1.8%、2.4%和3.1%的燃料组件数分别为53、52和52。较低富集度的两种燃料组件按不完全棋盘格式排列在堆芯内区,最高富集度的燃料组件装在堆芯外围。但两种堆芯装载在具体的组件布置时略有不同。

当采用Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为可燃毒物吸收体材料时,由于Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可以均匀弥散在较低富集度的UO<sub>2</sub>芯块内,因此可燃毒物可以不占用导向管位置,而硼玻璃可燃毒物则需占用相关位置。因此,含钆堆芯在首循环即可布置61束控制棒,而含硼玻璃堆芯首循环只有57束控制棒。

为满足经济性和安全性的要求,同时参考国内外先进经验<sup>[3]</sup>,对含钆堆芯在设计依据方面进

行了部分调整,主要参数对比见表1。

本文采用SCIENCE V2程序包进行对比计算分析,该程序包已通过大量基准例题和实验结果检验,计算精度满足工程设计要求。

表1 主要参数对比  
Table 1 Comparison of Main Parameters

堆芯类型	循环长度/EFPD	$F_{\Delta H}$ 限值	I类工况 $F_Q$	燃料熔化限值 / $W \cdot cm^{-1}$	停堆裕量 / $10^{-5}$
含钐	332	1.65	2.45	620	2300
含硼玻璃	319	1.55	2.25	590	2000

注: EFPD—等效满功率天;  $F_{\Delta H}$ —焓升因子; I类工况—正常运行工况;  $F_Q$ —热点因子

## 2 ELPO 对堆芯径向和轴向功率分布的影响

在ELPO期间, G棒全部提出堆芯, R棒位置可从全抽出到插入极限。由于ELPO改变了堆芯轴向功率分布,因此有必要研究其对核电厂运行的影响。本文针对两种堆芯装载方案分别考虑两种ELPO模式: 1个月50%功率水平运行; 3个月75%功率水平运行。

通过对 $F_{\Delta H}$ 和轴向功率偏差( $\Delta I$ )的分析来研究ELPO模式对堆芯径向和轴向功率分布的影响<sup>[4, 5]</sup>。

表2、表3分别列出了ELPO在50%功率水平运行和75%功率水平运行与没有ELPO时 $F_{\Delta H}$ 的对比关系,从表中可以看出,两种装载方案ELPO对 $F_{\Delta H}$ 影响都可以忽略不计。

图1给出了首循环含硼玻璃堆芯装载ELPO期间参考 $\Delta I$ 随燃耗的变化,首循环含钐堆芯装载对

应的ELPO期间参考 $\Delta I$ 随燃耗的变化与图1类似。由图1可知,相同燃耗下ELPO之后得到的参考 $\Delta I$ 比正常运行时的参考 $\Delta I$ 更负。这是因为在ELPO期间,堆芯轴向功率的再分布峰值向堆芯上部偏移,使得堆芯上部在ELPO期间理论上燃耗得更多,在升功率时使得功率分布峰值向下部偏移加剧<sup>[6]</sup>。ELPO期间,越接近寿期末,参考 $\Delta I$ 变得越负。这是由于随着循环燃耗的增加,使得慢化剂对 $\Delta I$ 的影响增加。ELPO期间,堆芯轴向功率再分布趋势在高燃耗时得到扩大,因此在返回满功率时参考 $\Delta I$ 将会变得更负。

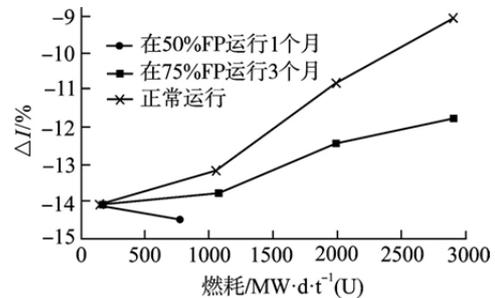


图1 ELPO期间参考 $\Delta I$ 随燃耗的变化(含硼玻璃)

Fig. 1 Reference  $\Delta I$  vs Burnup during ELPO Period (Pyrex)

## 3 ELPO 对堆芯功率能力的影响

堆芯功率能力分析主要研究 I 类工况、II 类工况(事故工况)下的偏离泡核沸腾比(DNBR)和线功率密度。

### 3.1 最小 DNBR 裕量

对于 I 类工况的分析表明,采用硼玻璃可燃毒物堆芯 I 类工况 DNBR 裕量满足限值要求,而含钐堆芯在寿期初其 DNBR 裕量已经低于限值,

表2 50%功率水平 ELPO 1个月以后的  $F_{\Delta H}$   
Table 2  $F_{\Delta H}$  Values after 1 Months ELPO at 50%FP

ELPO 开始时的燃耗/ $MW \cdot d \cdot t^{-1} (U)$		$F_{\Delta H}$					
		基负荷运行		平衡氙返回满功率		固定氙返回满功率	
含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐
150	150	1.3188	1.339	1.3231	1.342	1.3159	1.331
12253	12672	1.2529	1.268	1.2512	1.265	1.2555	1.269

表3 75%功率水平运行 ELPO 3个月以后的  $F_{\Delta H}$   
Table 3  $F_{\Delta H}$  Values after 3 Month ELPO at 75%FP

ELPO 开始时的燃耗/ $MW \cdot d \cdot t^{-1} (U)$		$F_{\Delta H}$					
		基负荷运行		平衡氙返回满功率		固定氙返回满功率	
含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐	含硼玻璃	含钐
150	150	1.3165	1.318	1.3194	1.319	1.3131	1.315
10113	10526	1.2519	1.265	1.2531	1.265	1.2551	1.267

会发生偏离泡核沸腾 (DNB)。这主要是由于含钐堆芯在 ELPO 期间堆芯轴向功率再分布效应使堆芯返回满功率时参考  $\Delta I$  变得更负, 轴向功率分布更加恶劣, 导致 I 类工况瞬态最小 DNBR 裕量低于限值。

对 II 类工况的分析表明, 两种堆芯在 II 类工况下 DNBR 裕量均满足限值要求。

由于含钐堆芯在 I 类工况寿期初 DNBR 裕量超限, 因此, 首循环含钐堆芯燃耗在寿期初平衡氙 (BLX) 燃耗点~ 3000 MW·d/t (U) 之间。出于安全考虑, 机组在实施 ELPO 时, 需要预先进行安全分析来论证其安全性。

### 3.2 最大线功率密度

对 I 类工况的分析表明, 含硼玻璃可燃毒物堆芯由于 I 类工况失水事故 (LOCA) 最大线功率密度限值为 2.25, 因此在 BLX 燃耗点~3000 MW·d/t (U) 燃耗点进行 ELPO, 返回满功率后最大线功率密度超限; 在加入运行限制条件 (机组不进行负荷跟踪) 后, 3000 MW·d/t (U) 燃耗可以满足线功率密度限值要求, 而 BLX 燃耗点仍然无法满足限值要求; 6000 MW·d/t (U) 燃耗和 85%EOL (EOL 表示寿期末) 燃耗点返回满功率后最大线功率密度依然被功率密度限值包络。而含钐堆芯在将 LOCA 最大线功率密度限值提升至 2.45 后, 最大线功率密度均满足设计限值要求。

对 II 类工况的分析表明, 虽然两种堆芯设计在燃料熔化限值方面略有差异, 但两种方案 II 类工况最大线功率密度均满足设计限值。

以上分析论证表明, 对于含硼玻璃可燃毒物堆芯, I 类工况线功率密度在寿期初至寿期中部分特征燃耗点超限, 而含钐堆芯同样在寿期初由于 I 类工况 DNBR 裕量超限, 因此, 两种堆芯装载

方案在寿期初至寿期中均不能直接进行 ELPO, 而寿期中至寿期末均具备 ELPO 能力。但是, 通过在寿期初至寿期中燃耗区内加入一定的运行限制条件后, 两种堆芯装载方案下机组均具备一定的 ELPO 能力。

## 4 结 论

两种典型的首循环堆芯装载方案, 除寿期初外, 在加入适当的运行限制条件后, 从寿期中至寿期末均具备 ELPO 能力, 在首循环进行 ELPO 是可行的。但是本文仅分析了两种特定的 ELPO 模式, 同时文中分析结论未包含 ELPO 下燃料棒芯块与包壳间相互作用裕度计算<sup>[7]</sup>等内容, 因此核电机组在首循环进行 ELPO 时, 需根据现场实际情况进行更为详细的分析论证。

### 参考文献:

- [1] 朱闽宏, 傅先刚, 王斐, 等. 大亚湾核电站延伸运行与长期低功率运行[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 22-25.
- [2] Kloosterman J L. Application of boron and badolium burnable poison particles in UO<sub>2</sub> and PuO<sub>2</sub> fuels in HTRs[J]. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30: 1807-1819.
- [3] 赵晶, 刘志宏, 郭德朋, 等. 大功率压水堆堆芯燃料管理设计[J]. 原子能科学技术, 2012, 46: 397-401.
- [4] 刘启伟, 于颖锐. 首循环含钐堆芯控制模式改进研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 102-106.
- [5] 廖业宏, 肖岷, 李现锋, 等. 大亚湾核电站延伸运行及降功率期间反应堆轴向功率偏差的控制及其计算机模拟分析[J]. 核动力工程, 2004, 25(4): 297-300.
- [6] 陈自强, 陈成. 压水堆核电厂寿期末堆芯轴向功率偏差控制[J]. 核科学与工程, 2012, 32 (增刊): 63-70.
- [7] 刘彤, 沈才芬, 周洲, 等. AFA 3G 燃料棒芯块与包壳间相互作用分析[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 62-65.

(责任编辑: 尚作燕)