

文章编号: 0258-0926(2021)03-0001-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0001

含钆堆芯平衡循环优化技术研究

马兹容, 宿健, 周胜

华龙国际核电技术有限公司, 北京, 100036

摘要:通过对平衡循环燃料管理技术进行分析,确定对钆棒采用两端装 UO_2 芯块的轴向分区设计并提高 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块中 ^{235}U 富集度的优化方法。根据钆棒两端不同长度 UO_2 芯块对堆芯轴向功率分布的影响初步确定了钆棒两端 UO_2 芯块的长度,根据 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块中 ^{235}U 富集度对燃料经济性和制造的影响初步确定了 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块中的 ^{235}U 富集度。分析了钆棒轴向分区和提高 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块中 ^{235}U 富集度各自及综合相对于比较基准方案对堆芯功率分布的影响,优化方案相对于比较基准方案在 β 和 β_{eff} 类反应性事故工况下对安全性的影响,并对优化方案中的 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块进行了安全验证。研究结果表明,通过在钆棒两端特定区域装载全富集的 UO_2 芯块,能改善堆芯的轴向功率分布,降低 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块在 β 类反应性事故工况下的最大线功率密度;优化方案 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块未超熔化限值且能提高含钆堆芯安全裕量约 5.6%;优化技术能为每个含钆堆芯每循环节省燃料费约 2300 万元。因此,本研究提出的钆棒优化方法能用于大量运行机组的燃料管理改进。

关键词: 燃料管理; 可燃毒物; 轴向功率分布

中图分类号: TL371 文献标志码: A

Research of Optimization Technology for Equilibrium Cycle with Gadolinium

Ma Zirong, Su Jian, Zhou Sheng

Hualong Nuclear Power Technology Co., Ltd., Beijing, 100036, China

Abstract: The design optimization of gadolinium rods is determined by analyzing the fuel management technology used for equilibrium cycle, and the optimization methods are to raise the bearing enrichment of the $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets and loading fully enriched UO_2 pellets at both ends of the gadolinium rods. The length of fully enriched UO_2 pellets at both ends of the gadolinium rods is determined by analyzing the effects of axial power distribution for different lengths. The bearing enrichment of the $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets is also determined by analyzing the effects for fuel economy and fuel manufacture. The effects of core power distribution when raising the bearing enrichment of the $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets and loading fully enriched UO_2 pellets at both ends of the gadolinium rods are analyzed individually and systematically. The effects of safety in condition β and β_{eff} for design optimization are analyzed. Safety for the $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets in optimization case has been confirmed. It is found that the axial power distribution can be improved by loading fully enriched UO_2 pellets at both ends of the gadolinium rods, and the maximum local linear power density of $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets under reactivity accidents in condition β can be reduced. $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ pellets is within the melting limit and the safety margin can be improved by about 5.6% in safety analysis. The fuel cost can be saved by about 23 million yuan per cycle for each core with gadolinium. Thus, the optimization method of gadolinium rods design can be used to improve the fuel management for the operating units.

Key words: Fuel management, Burnable poison, Axial power distribution

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-12-20

作者简介: 马兹容(1971—), 男, 硕士研究生, 现主要从事堆芯设计方面的研究, E-mail: mazirong@hpr.com.cn

0 引言

从大亚湾核电厂 18 个月换料开始,钆就被引入国内核电厂用于降低堆芯循环前期的过剩反应性并展平堆芯的功率分布。大亚湾核电厂 18 个月换料^[1-2]、岭澳核电厂一期 1/4 年度换料^[3]、后续各二代加核电厂的 18 个月换料、台山 EPR 核电厂 18 个月换料^[4-5]和华龙一号 18 个月换料^[6-7],所采用的含钆堆芯燃料管理设计技术一脉相承;在铀棒和钆棒的设计上具有 2 个共同特点:铀棒和钆棒都采用轴向不分区设计; $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 芯块(简称钆芯块)内的 ^{235}U 富集度比 UO_2 芯块(简称铀芯块)内的 ^{235}U 富集度低以避免钆棒成为热棒。

本文以国内已具备的燃料组件轴向分区设计能力和制造能力为基础,借鉴 AP1000 核电厂的轴向分区燃料管理技术^[8],采用 SCIENCE 程序包研究提升钆芯块内 ^{235}U 富集度并采用钆棒轴向分区的钆棒优化设计对堆芯安全性和燃料经济性的影响。

1 钆棒优化设计

基于国内二代加核电厂和华龙一号所用的活性区长度为 365.76 cm 的燃料组件,采用 3 种钆棒轴向分区方案(钆棒两端布置尺度为 20.32、22.86、25.40 cm 铀芯块)并对堆芯轴向功率分布的影响进行比选后,确定钆棒优化设计的初步方案为:

(1) 钆棒两端各 22.86 cm 装载与同一燃料组件铀棒中相同的铀芯块。

(2) 钆芯块内 ^{235}U 富集度与同一燃料组件铀棒中铀芯块的 ^{235}U 富集度相同。

(3) 钆棒优化方案含钆组件中铀棒和钆棒的轴向设计示意图见图 1。

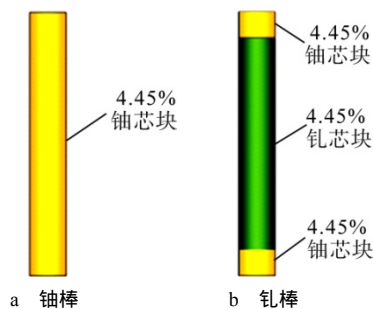


图 1 优化方案含钆组件轴向设计示意图

Fig. 1 Axial Diagram of Optimized Fuel Assemblies Containing Gadolinium Rods

统一燃料组件中钆芯块和铀芯块的富集度可以降低燃料组件的制造难度。同时,由于钆芯块中 Gd_2O_3 的重量百分比不低于 6%, 现有基于测量 ^{235}U 含量的富集度测量仪(判废限为 $\pm 2\%$) 仍能区分同富集度的钆芯块和铀芯块。

2 钆棒优化堆芯计算

2.1 分析比较所用堆芯方案

采用华龙一号的一个平衡循环堆芯装载方案作为钆棒优化分析比较的堆芯基准方案。堆芯基准方案主要参数如下:堆芯由 177 组燃料组件组成,活性区长度为 365.76 cm;换料新组件数为 72 组,换料组件富集度为 4.45%;钆芯块内含 8% 的 Gd_2O_3 ,钆芯块内 ^{235}U 富集度为 2.5%;铀棒和钆棒均采用轴向不分区设计。

分析比较的钆棒优化堆芯方案在基准方案基础上采用了上节所述钆棒优化设计。为明确提升钆芯块内 ^{235}U 富集度和采用钆棒轴向分区对堆芯的各自影响,还建立了只采用其中一种优化设计的 2 个堆芯方案。

2.2 稳态工况计算结果

2.2.1 径向功率分布 钆棒轴向分区设计增加了新组件两端的功率,使焓升热通道因子 F_H 比基准方案更高。增加钆芯块内 ^{235}U 富集度会提高钆棒的功率,降低含钆新组件内的径向峰值因子;另一方面会增加含钆新组件功率,综合效应可降低 F_{H0} 。

优化方案在寿期初氦平衡(BLX)的 F_H 比基准方案高,寿期中(MOL)及以后的 F_H 则明显低于基准方案,有利于提高优化方案的堆芯安全裕量。

优化方案的 F_H 随燃耗持续降低,针对 F_H 进行装载方案优化,可降低 BLX 的 F_H 使其与 MOL 大致相当,为后续通过微调新组件富集度而不是增减新组件数量来调整循环长度的灵活性循环优化提供了空间,因为换料组件数决定了平均入堆次数,是影响燃料经济性的关键因素,但增加新组件富集度会增大 F_{H0} 。

增加钆芯块内的 ^{235}U 富集度使包括钆棒在内的组件平均富集度增加,且能降低 F_H 。但在钆燃耗后,即寿期末(EOL)新组件中的钆芯块在类反应性事故工况下,可能会由于线功率密度

偏高而超过钐芯块的熔化限值。

2.2.2 轴向功率分布 优化方案与基准方案在 BLX 和 85% EOL 燃耗点稳态运行工况下的轴向功率分布比较见图 2 和图 3。

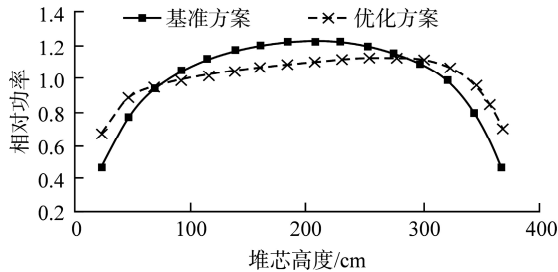


图 2 优化方案与基准方案 BLX 轴向功率分布比较

Fig. 2 Comparison of Axial Power Distribution in BLX between Optimized Case and Base Case

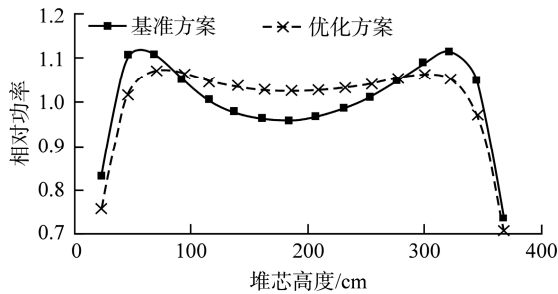


图 3 优化方案与基准方案 85%EOL 轴向功率分布比较

Fig. 3 Comparison of Axial Power Distribution in 85% EOL between Optimized Case and Base Case

如图 2 所示，优化方案在 BLX 两端无毒物，两端功率较基准方案有所提升，轴向功率分布更平坦，中部功率比基准方案低。优化方案在中部更低的功率使燃耗到 85% EOL 时中部燃耗比基准方案小，使得如图 3 所示的优化方案在 85% EOL 时中部功率下降小，两端的驼峰效应没有基准方案明显。

这种轴向功率分布的改善有利于提高优化方案的堆芯安全裕量，因为在 EOL 卡关事故的安全裕量通常最小；同时也有利于降低钐芯块在 85% EOL 类反应性事故工况下的最大线功率密度。

经比较仅采用一种优化设计的 2 种轴向功率分布发现，轴向功率分布的改善完全由钐棒轴向分区设计所贡献。

2.2.3 循环长度 各方案基于基准方案的循环长度增量见表 1。

钐棒轴向分区中两端的钐芯块被铀芯块替换，避免了由于两端燃耗低导致钐在两端的较多

表 1 各方案循环长度增量
Tab. 1 Increment of Cycle Lengths

方案	钐棒轴向分区	提升钐芯块富集度	优化方案
循环长度增量 /[MW · d · t ⁻¹ (U)]	184	475	621

残留；同时轴向功率分布的改善也减小了 EOL 的轴向中子泄漏率。但由于被替换成铀芯块的钐芯块只占原钐芯块总量的 1/8，导致对循环长度的影响效应虽好但总量较小。

堆芯中所有钐芯块的 ²³⁵U 富集度都被从 2.5% 提升到 4.45%，对循环长度的影响较大。

优化方案增加的循环长度与增加 4 组新组件的效果大致相当。

2.3 I 类工况验证

优化方案与基准方案在 I 类工况下冷却剂丧失事故 (LOCA) 限值验证中获得的线功率密度峰值因子 (Q_{\max}^I ，为最大线功率密度与平均线功率密度之比) 和最小偏离泡核沸腾比 (DNBR) 计算结果比较见表 2。从表 2 可以看出，由于功率分布特别是轴向功率分布的改善，优化方案在 I 类工况下的 Q_{\max}^I 降低，相对于限值提升了 8.1% 的裕量。由此可以获得更大的运行灵活性或更高的 LOCA 安全裕量。

表 2 I 类工况计算结果比较
Tab. 2 Comparison of Results in Condition I

结果参数	基准方案	优化方案	限值	裕量提升/%
Q_{\max}^I	2.320	2.122	2.45	8.1
DNBR 最小值	2.375	2.475	1.35	7.4

另外，作为 I 类工况起始点的 I 类工况，优化方案的最小 DNBR 相对于设计限值提升了 7.4% 的裕量。由此，提供给 I 类非反应性事故用的参考功率分布可得到改善，有利于提升 I 类非反应性事故的安全裕量。I 类工况功率分布的改善也将提高 I 类反应性事故的安全裕量。

2.4 II 类工况保护通道验证

优化方案与基准方案 II 类工况超温保护通道验证和超功率保护通道验证获得的最小 DNBR 和线功率密度峰值因子 (Q_{\max}^{II}) 计算结果见表 3。

从表 3 可以看出，由于 II 类工况起始点功率分布的改善，优化方案 II 类工况下的 Q_{\max}^{II} 降低；相对于 I 类工况最大线功率密度限值，裕量提升

表3 类工况分析结果比较
Tab. 3 Comparison of Results in Condition II

结果参数	基准方案	优化方案	限值	裕量提升/%
Q_{\max}^{II}	3.012	2.791	3.286	6.7
DNBR 最小值	1.731	1.807	1.35	5.6

了6.7%。

类工况最小 DNBR 相对于设计限值提升了5.6%的裕量。

2.5 钆芯块安全验证

2.5.1 验证范围及验收准则 由于钆芯块内 ^{235}U 富集度提升到4.45%，超过了免于钆芯块验证计算的富集度限值2.67%，需要在类反应性事故工况下验证钆芯块不超过其燃料熔化限值。

对二代加项目和华龙一号项目，核与辐射安全中心批准的钆芯块熔点为2590^[9]，与铀芯块一样。

2.5.2 燃料熔化限值验证 类反应性事故在功率能力分析^[10-11]中被模拟，由此获得了钆芯块在类反应性事故工况下的最大线功率密度(P_{\max})随燃料的包络线，可用于钆芯块最高中心温度的评估。

得益于钆棒轴向分区设计带来的轴向功率分布改善，钆芯块 P_{\max} 随燃料的包络线最大值仅比基准方案提高58 W/cm，为460 W/cm。基于漳州华龙一号燃料最高中心温度随线功率密度的变化曲线^[12]，由460 W/cm获得II类工况下钆芯块的最高中心温度为2077，低于熔化限值2590。

2.5.3 钆芯块熔化限值变化风险及对策 目前国际上还没有被统一认可的钆芯块熔化限值，核与辐射安全中心对此也比较关注。如果核与辐射安全中心要求采用更保守的钆芯块熔化限值，如田湾VVER核电厂的钆芯块熔化限值为2159^[13]，虽然基于华龙一号的优化方案仍能满足要求，但对国内二代核电厂等平均线功率密度更高的含钆堆芯，上述优化设计可能使钆芯块中心温度超过熔化限值，需要有降低钆芯块最高温度的对策。

在正常的钆芯块安全分析中采用的是瞬态分析加钆芯块温度计算的方式，计算工况比上述包络线的评估方式更现实，预计能满足更保守的钆芯块熔化限值。如果仍超限可单独或综合采取如下对策：增加钆棒两端的铀芯块长度；降低钆芯块中的 Gd_2O_3 含量；略微降低钆芯块中的 ^{235}U

富集度；缩小运行图边界或/和缩小超功率保护图边界。

2.6 小结

钆棒优化方案在满足钆芯块安全要求的前提下，不仅能提升包括钆棒在内的新组件平均富集度来提高燃料经济性；还能提升堆芯的安全裕量约5.6%，为通过微调新组件富集度调整循环长度的灵活性循环优化提供可能。

3 钆棒优化经济性分析

3.1 分析方法

在不采用优化技术的情况下，搜索72组和76组（该组件数为针对华龙一号堆芯）4.45%平衡循环方案，分别获得2组循环长度和燃料费用数据。通过插值可得到在现有技术情况下不同循环长度所需的燃料费，作为燃料经济性分析的比较基准。

比较基准与优化方案的燃料费相减即得到优化方案节省的燃料费。优化方案的燃料费中已计入由于钆棒轴向分区和钆芯块内 ^{235}U 富集度提升而增加的费用。

3.2 关键参数假设

优化方案的钆芯块 ^{235}U 富集度与铀芯块 ^{235}U 富集度统一，减少了富集度种类，有利于燃料制造；另一方面，钆棒轴向分区将增加制造难度。综合考虑后优化方案采用与基准方案相同的燃料制造价格。燃料经济性分析中采用的关键参数假设详见表4。

表4 燃料经济性分析关键参数
Tab. 4 Key Parameters for Fuel Economy Analysis

参数	数值
天然铀单价/[$\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{U}_3\text{O}_8)$]	1003
转化单价/[$\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{U})$]	70
分离功单价/[$\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{SWU})$]	980
燃料制造单价/[$\text{¥} \cdot \text{组}^{-1}$]	1505000
通货膨胀率/%	2
运行前利率/%	6

¥—人民币

3.3 经济性分析结果

表5给出了华龙一号4.45%平衡循环优化方案和4.45%加4.95%平衡循环优化方案相对于比较基准的每循环节省的燃料费用。

表 5 优化方案燃料经济性
Tab. 5 Fuel Economy of Optimized Cases

方案	循环长度/[MW·d·t ⁻¹ (U)]	节省燃料费/万元
4.45%平衡循环优化方案	19407	2300
4.45%加 4.95%平衡循环优化方案	20105	4000

其中 4.45%平衡循环优化方案为在现有组件燃耗限值 52000 MW·d·t⁻¹(U)的基础上,采用钐棒优化技术和 72 组 4.45%单一富集度换料组件的华龙一号堆芯装载方案,该方案为延伸运行预留了燃耗增加空间。

4.45%加 4.95%平衡循环优化方案为在预期将批准的组件燃耗限值 57000 MW·d·t⁻¹(U)基础上,采用钐棒优化技术和 72 组 4.45%加 4.95%双富集度^[14-15]换料组件的华龙一号堆芯装载方案,该方案为延伸运行预留了燃耗增加空间。

由表 5 可知,优化技术可为华龙一号每循环节省约 2300 万元燃料费;组件燃耗限值提升使双富集度换料成为可能,可为每循环再节省约 1700 万元,共 4000 万元的燃料费。

4 结论与建议

本研究的钐棒优化设计为钐棒轴向分区并提升钐芯块内 ²³⁵U 富集度。对采用本钐棒优化技术的华龙一号平衡循环含钐堆芯进行了安全性分析和经济性分析,得出如下结论:

- (1) 能满足钐芯块的熔化限值要求。
- (2) 能提升堆芯安全裕量约 5.6%。
- (3) 每循环能节省燃料费约 2300 万元。
- (4) 叠加燃耗限值提升,每循环能节省燃料费约 4000 万元。

本钐棒优化技术适用于二代核电厂的含钐堆芯,不仅可在组件燃耗限值提升后的燃料管理改进中与双富集度换料一起实施,也可在现有燃耗限值内开展补充安全分析论证并获批后实施。

参考文献:

[1] 张洪,李雷,李庆,等. 大亚湾核电站 18 个月换料燃

料管理研究[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 14-17.

[2] 章宗耀,傅先刚. 大亚湾核电站 18 个月换料设计论证[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 1-4.

[3] 高立刚,韩庆浩,肖岷,等. 岭澳核电站先进燃料管理策略研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 1-6.

[4] BENICHOU YANNICK. EPR Taishan fuel management calculations for plant design and safety demonstration: NEPC-F DC 20010[R]. Paris: AREVA NP, 2010.

[5] 王永刚,向文欣,姚波,等. 台山核电厂 CEPR 堆芯设计及燃料管理[J]. 核动力工程, 2015, 36(S1): 51-53.

[6] 陈亮. 漳州核电厂一期工程(华龙一号)-堆芯燃料管理报告:FZX42101001N51144GN[R]. 成都:中国核动力研究设计院, 2016.

[7] 刘同先,王晨琳,李天涯,等. 华龙一号平衡循环燃料管理策略研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(6): 999-1004.

[8] 叶青. AP1000 内陆核电厂标准设计-堆芯燃料管理报告, CAP-GX-F1-001[R]. 上海:上海核工程研究设计院, 2011.

[9] 王婷. 宁德核电厂一期工程 1、2 号机组 18 个月换料专项钐棒安全分析:ABX00600025DRED02GN[R]. 深圳:深圳中广核工程设计有限公司, 2010.

[10] 咸春宇,刘昌文,张洪,等. 压水堆核电厂堆芯功率能力验证分析[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 26-28, 43.

[11] 厉井钢,张洪,梁薇,等. 岭澳核电站延伸运行工况下的功率能力分析[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 62-64.

[12] 刘同先. 漳州核电厂 1、2 号机组(华龙一号)初步安全分析报告:FZX00610004B22K02GN[R]. 成都:中国核动力研究设计院, 2017.

[13] 周红,王小海. 田湾核电厂钐钐燃料管理的主要安全问题[J]. 核安全, 2009, 1(1): 27-30,49.

[14] 张仕勋,邹婷婷,张洪,等. 双富集度 18 个月换料燃料管理可行性研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(S2): 203-206.

[15] 彭靖含. 双富集度堆芯燃料管理方案对中子学参数影响研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(S2): 62-66.

(责任编辑:杨洁蕾)