

The influence mechanism of fuel burn depth on reactivity control accuracy in pressurized water reactor core

Tao Gao Jing Liu Xing Chen Peng Xiao

CGN Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Lufeng, Guangdong, 516500, China

Abstract

This study first examines the evolution of core physics characteristics under burnup effects, then analyzes the dynamic characteristics of reactivity changes. Building on this foundation, it further reveals how burnup depth influences control rod positioning, boron concentration control accuracy, and the coordination between control strategies. The research findings demonstrate that as burnup depth increases, the neutron energy spectrum in the reactor core gradually hardens while fission products accumulate continuously. These two factors collectively lead to an expanded dead zone for control rod adjustments and a narrowed boron concentration control window, resulting in reduced coordination among control measures. To address these challenges, the paper proposes several optimization pathways.

Keywords

fuel burnup depth; pressurized water reactor core; reactivity control accuracy; control rod; boron concentration

燃料燃耗深度对压水堆堆芯反应性控制精度的影响机制

高涛 刘静 陈兴 肖鹏

中广核陆丰核电有限公司, 中国·广东 陆丰 516500

摘要

本文首先梳理了燃耗作用下堆芯物理特性的变化规律,接着分析了反应性随之呈现的动态特征,在此基础上进一步地揭示了燃耗深度如何作用于控制棒、硼浓度的控制精度以及控制策略的协同精度。最终的研究结果显示,伴随燃耗深度的增加,堆芯中子能谱逐渐地硬化,其裂变产物不断地积累,而这两大因素共同导致控制棒调节死区扩大、硼浓度控制窗口收窄,此时控制手段间的协同性也随之下降。针对于上述问题,本文最后提出了部分优化的路径。

关键词

燃料燃耗深度; 压水堆堆芯; 反应性控制精度; 控制棒; 硼浓度

1 引言

近些年来,随着核电站运行周期的延长以及燃料组件换料策略的优化,燃料燃耗深度不断地提升,其对反应性控制精度的影响也愈发突出。现有部分研究指出,在高燃耗状态下,堆芯反应性控制难度会显著地增加,极易出现控制棒调节滞后、硼浓度控制偏差超标的问题,严重时甚至还可能引发堆芯功率波动等安全隐患。但遗憾的是,目前关于燃料燃耗深度影响反应性控制精度的机制研究依然不够系统,大多数研究仅仅聚焦于单一的控制手段(如控制棒或硼浓度)的调节特性,缺乏了对燃耗影响下多控制手段协同精度的深入分析,这样的研究现状难以全面地支撑压水堆反应性控制策略的优化设计。

2 燃料燃耗深度影响压水堆堆芯反应性的核心路径

2.1 燃耗导致的堆芯物理特性变化

燃料燃耗的过程从本质上来说,是燃料核素在中子轰击下不断发生裂变与转化的过程。而在这一过程中,堆芯物理特性会呈现多维度的变化,即燃料核素组成改变、中子能谱分布硬化与裂变产物积累。

2.2 反应性变化的动态特征

2.2.1 短期波动

反应性的短期波动主要是由瞬态中子毒物(如 ^{135}Xe)的浓度变化引发的,而且这种波动的幅度与频率会随着燃耗深度的增加不断地增大。究其原因是在燃耗初期,堆芯内 ^{235}U 含量较高,此时裂变率会保持稳定,因为 ^{135}Xe 的生成与衰变处于相对平衡的状态,其浓度波动较小,对于反应性的影响也较为平缓。当燃耗逐渐地加深之后,堆芯中子能谱开始硬化, ^{135}Xe 的生成截面与衰变常数会随之发生变化,同时

【作者简介】高涛(1987-),男,中国河南郑州人,本科,工程师,从事核电运行研究。

为了维持功率稳定，堆芯功率调节频率也会增加，上述这些因素共同导致 ^{135}Xe 的浓度平衡被频繁打破^[1]。

2.2.2 长期衰减

反应性的长期衰减是燃料燃耗过程中的主导趋势，它的衰减速率与幅度直接由燃耗深度决定。一般 ^{235}U 的消耗是导致燃耗初期（通常将燃耗深度 $< 10\text{GWd/tU}$ 的阶段定义为燃耗初期）反应性下降的主要原因，但在这一阶段之中， ^{238}U 转化生成的 ^{239}Pu 能够部分补偿反应性损失，所以反应性衰减的速率相对较慢。如果进入燃耗中期（一般认为 $10\text{GWd/tU} < \text{燃耗深度} < 30\text{GWd/tU}$ 的阶段为燃耗中期）， ^{235}U 含量会进一步的降低，加之 ^{239}Pu 的消耗速率逐渐地加快，再加上长寿命裂变毒物（如 ^{149}Sm ）开始显著的积累，反应性衰减速率会随之加快。当燃耗深度超过 30GWd/tU （即进入高燃耗阶段）时， ^{235}U 已基本耗尽，此时 ^{239}Pu 的生成量无法补偿其自身消耗与裂变毒物吸收所带来的反应性损失，反应性便会呈现出快速衰减的趋势，此时堆芯反应性水平显著降低，必须通过大幅度的调节控制棒或增加硼浓度才能维持堆芯临界状态。

3 燃料燃耗深度对压水堆堆芯反应性控制精度的具体影响机制

3.1 对控制棒控制精度的影响

控制棒作为压水堆堆芯反应性控制的快速调节手段，而控制精度由节灵敏度（单位插入深度变化引发的反应性变化量）与调节死区（控制棒动作后反应性无明显变化的区间）这两项关键的指标决定。其中控制棒的调节灵敏度与堆芯内中子通量密度及易裂变核素含量有着密切的联系。结合实践而言，燃耗初期堆芯内易裂变核素（ ^{235}U ）含量较高，中子通量的密度分布比较均匀，当控制棒插入堆芯之后会快速地吸收大量中子，单位插入深度引发的反应性变化量较大，那么调节灵敏度也就较高。伴随着燃耗的加深，堆芯中子能谱会逐渐出现硬化，中高能中子比例也随之升高，而控制棒材料（如银-铟-镉合金）对中高能中子的吸收截面远低于热中子，使得控制棒吸收中子的效率降低。与此同时，燃耗加深还会使堆芯内易裂变核素含量减少，导致中子通量密度分布的不均匀性增强（堆芯中心区域通量密度降低，边缘区域相对升高），因为控制棒插入堆芯后只能在局部区域吸收中子，单位插入深度引发的反应性变化量随之减小，那么调节灵敏度也会显著的降低^[2]。

另外由于控制棒调节死区主要是由堆芯内裂变产物（尤其是 ^{135}Xe ）的瞬态积累与局部中子通量亏损共同引发的。因此燃耗初期 ^{135}Xe 浓度波动较小时，堆芯中子通量的分布均匀，但控制棒动作后，中子吸收效应就能够快速地传递至整个堆芯，此时调节死区较小（通常小于 5mm 插入深度）。后续燃耗的加深， ^{135}Xe 浓度波动会不断地加剧，而且堆芯内局部区域（如燃料组件边缘）会因裂变产物积累出现中子

通量亏损区。一旦控制棒插入上述这些区域时，其吸收的中子量极少，反应性就不会发生明显的变化，这就导致调节死区扩大。

3.2 对硼浓度控制精度的影响

硼浓度控制是压水堆堆芯反应性控制的慢调节手段，其主要用于抵消燃料燃耗、温度变化等因素引发的长期反应性损失。实践中它的控制精度主要取决于硼浓度调节窗口（满足反应性控制要求的硼浓度范围）与调节响应速度。

一方面是收窄了硼浓度调节窗口。硼作为一种可溶性中子毒物，其在堆芯内的作用效果取决于硼的热中子吸收截面与堆芯中子能谱。从燃耗初期来看，堆芯中子能谱以热中子为主，此时硼的热中子吸收截面较大，哪怕少量的硼浓度变化都会实现较大的反应性调节，因此硼浓度调节窗口较宽（通常为 $500\sim 2000\text{ppm}$ ）。跟随着燃耗的加深，堆芯中子能谱会逐渐地硬化，热中子比例得到降低，硼的有效吸收截面便会随之减小，想要抵消相同的反应性损失，就需要更高的硼浓度。同时在高燃耗状态下，堆芯内长寿命裂变毒物（如 ^{149}Sm ）的积累量会增加，而这些毒物会与硼竞争吸收中子，进一步的降低了硼的反应性补偿效率。为了维持堆芯临界状态，硼浓度需要不断地接近限值（约 2000ppm ），进而导致调节窗口收窄。另一方面是降低了硼浓度调节响应速度。一般硼浓度调节的响应速度取决于两个关键因素，分别是硼在冷却剂中的混合均匀性与堆芯对硼浓度变化的敏感度。燃耗初期堆芯内冷却剂流动状态比较稳定，硼注入后能够快速在堆芯内混合均匀，而且堆芯对于硼浓度变化的敏感度较高，反应性的响应速度也比较快（通常在 $10\sim 15$ 分钟内达到稳定）。但燃耗的加深使得堆芯内燃料组件的燃耗不均匀性增强，此时局部区域的冷却剂流动阻力差异会增大，就会导致硼在堆芯内的混合速度减慢，最终出现“局部硼浓度过高或过低”的现象。

3.3 对控制策略协同精度的影响

在压水堆堆芯反应性的控制过程中，通常都会采用“控制棒+硼浓度”的协同策略。简单来说，就是控制棒用于应对短期反应性波动（如功率调节、瞬态毒物变化），硼浓度则用于补偿长期反应性损失（如燃料燃耗、温度效应），此时二者的协同精度直接决定了整体控制效果。原因是上述举动加剧了控制棒与硼浓度的调节冲突。因为燃耗初期控制棒的短期调节动作幅度小、响应快，对于堆芯整体中子环境的干扰较小，并不会明显的影响到硼浓度对长期反应性损失的补偿效果，二者便形成了“快速响应+稳定补偿”的良性配合。但是随着燃耗加深，控制棒调节的灵敏度出现下降、死区扩大，而为了有效地应对短期反应性波动（如 ^{135}Xe 浓度骤变引发的反应性跳变），就必须大幅度的增加控制棒的插入或拔出深度。可这种大幅度的动作会显著地改变堆芯内中子通量的空间分布，如控制棒深度插入时会在周围形成中子通量阴影区，该区域内硼原子与中子的碰撞概率便会大幅

度的降低,进而导致硼的实际吸收效率偏离设计预期。为了维持堆芯的临界状态,控制系统不得不增加硼浓度注入量,而硼浓度升高后堆芯整体反应性又会过度的降低,就需要再次拔出控制棒进行补偿,最终形成了“控制棒调节→硼浓度偏差→进一步调节控制棒”的恶性循环,严重的破坏了二者的协同节奏。

4 基于燃料燃耗深度的压水堆堆芯反应性控制优化路径

4.1 分燃耗阶段优化控制棒策略

对控制棒进行优化时,要紧密地结合不同燃耗阶段的调节特性,通过动态调整控制棒的动作逻辑与参数,来提升其在各阶段的控制精度。展开来说,燃耗初期($< 10\text{GWd/tU}$)的控制棒调节灵敏度高、死区小,那么可采用“精细化小幅度调节”的策略,先将控制棒的单次动作深度从传统的 5mm 降至 $2\sim 3\text{mm}$,同时缩短动作间隔,以应对该阶段较小的反应性波动,便能有效地避免因调节幅度过大导致的超调问题。而在燃耗中期($10\sim 30\text{GWd/tU}$),控制棒调节的灵敏度开始下降,此时需重点优化“死区补偿”与“动作阈值”,如通过堆芯物理计算,建立起“燃耗深度-调节死区”的关联模型,并在控制逻辑中加入死区补偿系数。高燃耗阶段($> 30\text{GWd/tU}$)的控制棒调节特性则存在显著的劣化,应当采用分组协同调节与极限位置保护的策略,就是将控制棒按堆芯区域分为中心组与边缘组,其中中心组控制棒主要应对堆芯中心区域的反应性波动(该区域燃耗最深、波动最剧烈),边缘组则辅助维持整体通量均匀性。同时设定控制棒的极限插入深度——根据燃耗深度动态计算最大安全插入深度,目的是避免因过度插入导致的中子通量畸变^[3]。

4.2 分燃耗阶段优化硼浓度策略

硼浓度策略的优化核心在于根据燃耗深度动态调整调节窗口、补偿响应延迟,要确保其在各阶段均能稳定的补偿长期反应性损失。对此要动态地调整硼浓度调节窗口,可基于“燃耗深度-中子能谱-硼吸收截面”的关联模型,计算出不同燃耗阶段的最优硼浓度区间,接着针对燃耗加深导致的硼浓度响应时间延长问题,分阶段引入预测性调节。像燃耗初期,由于响应时间较短($10\sim 15$ 分钟),采用实时反馈调节即可;在燃耗中期响应时间被延长至 $20\sim 25$ 分钟,就需根据燃耗深度与反应性衰减速率模型预测出未来 10 分钟的反应性损失量,提前注入 50% 的硼浓度调节量,进而实现预测、反馈的复合调节;高燃耗阶段的响应时间将超过 30 分钟,那么可进一步提升预测比例至 70% ,同时结合堆

芯温度、功率水平等参数动态地修正预测值。

4.3 “控制棒—硼浓度—燃耗反馈”协同控制

为了打破传统控制棒与硼浓度独立调节的局限,要构建包含了燃耗反馈环节的多手段协同控制机制,以此实现三者的动态适配。第一步是建立燃耗实时监测与反馈模块,借助堆芯内布置的燃耗监测探测器,实时地获取各燃料组件的燃耗深度,并将数据传输至协同控制单元,然后控制单元自动地修正控制棒的调节灵敏度系数、硼浓度的吸收效率系数。第二步是设计协同调节逻辑,即明确不同燃耗阶段下控制棒与硼浓度的主次分工,一般燃耗初期以控制棒为主要调节手段,燃耗中期需要二者并重,高燃耗阶段则以硼浓度为补偿手段。第三步是引入动态目标函数,应以“堆芯反应性偏差最小化”“控制动作次数最少化”“功率波动幅度最小化”为多目标优化方向,再根据燃耗深度动态地调整各目标的权重,进而实现协同控制的智能化。

4.4 堆芯设计与换料策略适配

从源头优化堆芯设计与换料策略,得以减少燃耗对反应性控制精度的不利影响,为控制策略优化提供了基础支撑。实际上在堆芯设计阶段,要考虑到燃耗均匀性优化,建议采用分区装载地设计,将不同富集度的燃料组件按燃耗分布规律进行布置,再优化燃料组件的栅格设计,并在堆芯内设置可燃毒物棒(如钐玻璃棒),保证燃耗初期补偿多余的反应性,进而减少硼浓度的初始注入量,为高燃耗阶段预留更大的硼浓度调节窗口。而在换料策略优化方面,可以采用部分换料结合燃耗均衡的策略,就是按燃耗梯度进行换料,同时引入换料周期动态调整机制,根据堆芯的平均燃耗深度与反应性控制余量,动态地调整换料间隔。

5 结语

总之,燃料燃耗深度是影响压水堆反应性控制精度的关键因素,只有充分地掌握了其影响机制,并针对性地优化控制与设计策略,才能实现压水堆在全燃耗周期内的安全、稳定、经济运行,以此为核电行业的可持续发展提供技术方面的保障。

参考文献

- [1] 戴翔.SiC基体TRISO燃料小型压水堆堆芯物理设计[D].哈尔滨工程大学,2014.
- [2] 李小生,靳忠敏.MOX燃料对压水堆堆芯性能影响研究[J].原子能科学技术,2013,47(S2):583-587.
- [3] 段新会.压水堆堆芯系统建模及其控制系统仿真研究[D].华北电力大学,2001.