

文章编号: 0258-0926(2017)S2-0140-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.S2.0140

## 钍燃料重水堆堆芯特性研究

孟智良, 樊 申, 吴天垣, 陈明军, 张振华

中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300

**摘要:** 现有的 CANDU 重水堆 (简称“重水堆”) 以天然铀作为燃料, 但重水堆由于其独特的堆芯设计, 具有较好的燃料灵活性, 还可以烧低浓铀、回收铀和钍等燃料。研究现有重水堆改烧钍燃料后对堆芯特性和运行安全的潜在影响。使用 DRAGON 程序建立了重水堆的无限栅元模型, 研究比较了钍燃料和天然铀燃料的重要堆芯特性参数。结果表明, 尽管 2 种燃料下的堆芯特性有所差异, 但钍燃料利用实际上有助于提升重水堆的运行安全。

**关键词:** CANDU 重水堆; 钍燃料; 天然铀; 无限栅元模型; 堆芯特性参数; 安全提升

**中图分类号:** TL326 **文献标志码:** A

## Study on Core Characteristics of Thorium-Fueled CANDU Reactor

Meng Zhiliang, Fan Shen, Wu Tianyuan, Chen Mingjun, Zhang Zhenhua

CNNC Nuclear Power Operations Management Co. Ltd., Haiyan, Zhejiang, 314300, China

**Abstract:** All the operating CANDU heavy water reactors are using natural uranium as the fuel, however, owing to the unique design features, the heavy water reactor actually is with high fuel flexibility, low-enriched uranium, and uranium and thorium to be reprocessed as well. The paper intends to study the potential impact of fuel changing from natural uranium to thorium fuel on core characteristics and core safety features. This paper uses DRAGON code to set up the infinite lattice model, and then calculate and compare the important core parameters for natural uranium and thorium-fueled heavy water reactor core. The study results show that the core features of thorium-fueled reactor are different from those of natural uranium-fueled reactor, but utilization of thorium will effectively help to improve the safety features of the heavy water reactor.

**Key words:** CANDU heavy water reactor, Thorium fuel, Natural uranium, Infinite lattice model, Core parameter, Safety improvement

### 0 前 言

现有的 CANDU 重水堆 (以下简称“重水堆”) 以天然铀作为燃料, 但重水堆由于其独特的堆芯设计, 具有较好的燃料灵活性, 还可以使用低浓铀、回收铀和钍等燃料。本文比较了钍燃料和天然铀燃料下一些与安全密切相关的堆芯特性参数, 如无限增殖系数 ( $k_{inf}$ )、燃料温度系数 ( $F_{TC}$ )、冷却剂温度系数 ( $C_{TC}$ )、空泡反应性 ( $C_{VR}$ ) 以及径向线功率密度 ( $L_{ER}$ ) 等的差异, 并评估该变化对运行安全带来的潜在影响。

### 1 堆芯及燃料棒束简介

现有重水堆均以天然铀为燃料, 重水为慢化剂和冷却剂。其堆芯本体包括排管容器、端屏蔽、燃料通道、反应性控制装置和密闭的排管容器堆腔。排管容器为圆柱状容器, 卧式布置, 两端为容器法兰, 内设 380 根排管和压力管将重水慢化剂和冷却剂分隔。整个反应堆通过端屏蔽被支承在混凝土堆腔上。压力管内装 12 个燃料棒束, 冷却剂通过热传输支管, 从燃料通道一端流入, 流经燃料棒间以及压力管和燃料棒间的间隙, 带走

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-11-03

基金项目: 国家国际科技合作专项资助 (2014OFA60650)

作者简介: 孟智良 (1989—), 男, 工程师, 现从事燃料元件性能分析

燃料裂变产生的热量，再从另一端流出到蒸汽发生器，在此将热量传递给二回路的轻水。

本文研究重水堆是以钍为燃料，燃料棒束长为 49.53 cm，外径为 10.2 cm。燃料棒束由燃料元件、端板、定位垫片和支承垫片组成。燃料元件由燃料芯块、Zr-4 包壳和 Zr-4 端塞组成。每根燃料元件内装有 29 块芯块，端塞与包壳两端焊接连接，将芯块密封在包壳内，密封前元件内充以氦气。43 根燃料元件分 4 圈布置，从内到外每圈各有 1、7、14、21 根燃料元件。燃料元件由端板和定位垫片定位。

## 2 计算工况

首先建立二维重水堆无限栅元模型（图 1）。该模型中，燃料、压力管和排管同心布置于栅元中心，43 根燃料元件从内到外分为中心圈、内圈、中间圈和外圈，燃料与压力管之间充满重水堆冷却剂，压力管与排管之间充满环隙气体，排管以外为重水堆慢化剂，详细参数设置如表 1 和表 2 所示。表 2 中仅给出了钍燃料棒束参数。天然铀燃料棒束仅需将芯块材料改为天然铀。

堆芯特性参数的研究包括 2 个方面： $k_{inf}$ 、 $F_{TC}$ 、 $C_{TC}$ 、 $C_{VR}$ 、 $L_{ER}$  随燃耗的变化趋势；栅元反应性在零燃耗和中间燃耗（10000 MW·d/t）下随燃料和冷却剂温度的变化趋势。燃料温度的变化范围选取为 100~1300，冷却剂温度变化范

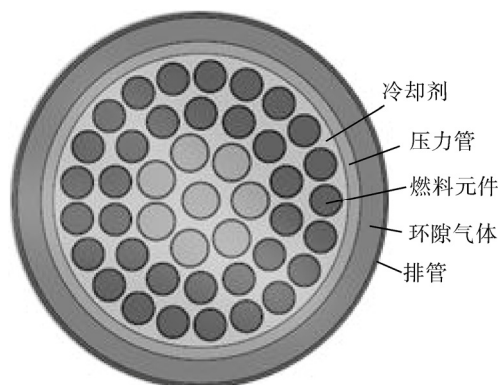


图 1 钍燃料栅元

Fig. 1 Thorium Fuel Lattice

围选取为 40~320。

所用程序为 DRAGON 4，所用数据库为 draglibJef2p2。

## 3 计算结果分析

2 种燃料的  $k_{inf}$  随燃耗的变化趋势如图 2 所示。零燃耗下钍燃料  $k_{inf}$  明显高于天然铀燃料，在达到约 20000 MW·d/t(HE)的卸料燃耗时又低于天然铀燃料。由此看来，钍燃料棒束换料时所引入的扰动较天然铀燃料大，对此可采用减少每个通道的换料数量来应对，以此维持堆芯的通道功率分布与原天然铀堆芯保持接近。该换料方式改变将引起通道功率峰向冷却剂入口方向倾斜，堆芯的临界通道功率整体提高，但调节棒和堆内探测器的适用性需重新加以论证。

表 1 重水堆栅元参数

Table 1 CANDU Reactor Lattice Parameters

区域	参数	数值	区域	参数	数值
慢化剂	浓度/g·cm <sup>-3</sup>	1.08509	燃料通道	压力管内径/cm	5.1689
	纯度/%	99.833		压力管外径/cm	5.6032
	平均温度/	69		压力管材料	Zr-2.5Nb
	毒物浓度	0		排管内径/cm	6.4478
冷却剂	浓度/g·cm <sup>-3</sup>	0.8079		排管外径/cm	6.5875
	纯度/%	99		排管材料	Zr-2
	平均温度/	288	栅元	间距/cm	28.575

表 2 钍燃料棒束参数

Table 2 Thorium Fuel Bundle Parameters

元件位置	元件中心距/cm	元件数量	偏置角弧度	芯块外径/cm	芯块材料	元件外径/cm
中心	0	1	0	0.627	100% ThO <sub>2</sub>	0.675
内圈	1.734	7	0.2244	0.627	100% ThO <sub>2</sub>	0.675
中间圈	3.075	14	0	0.533	1.97% UO <sub>2</sub>	0.575
外圈	4.380	21	0	0.533	1.48% UO <sub>2</sub>	0.575

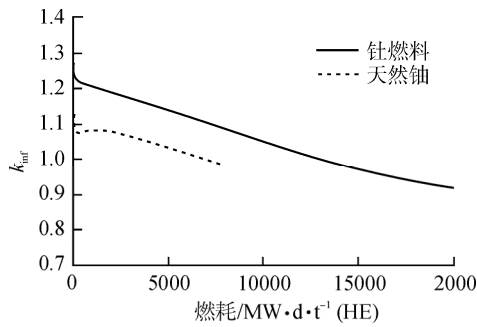


图2 无限增殖系数随燃耗的变化趋势

Fig. 2  $k_{inf}$  Change with Burnup

钚燃料的  $F_{TC}$  随燃耗的变化趋势如图3所示。钚燃料的  $F_{TC}$  随燃耗的变化幅度不大, 燃耗 17000  $MW \cdot d/tHE$  以下均为负, 由此可以推测正常运行时钚燃料堆芯的  $F_{TC}$  将始终保持为负, 且略低于天然铀燃料, 有利于提高堆芯的安全性。

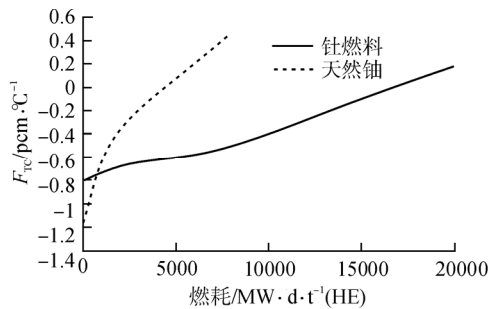


图3 燃料温度系数随燃耗的变化趋势

Fig. 3  $F_{TC}$  Change with Burnup

2 种燃料的大部分燃耗期间  $C_{TC}$  均为正, 但系数很小, 并且钚燃料堆芯的  $C_{TC}$  在中间燃耗时约为 1.6 pcm/, 天然铀燃料在中间燃耗时约为 1.8 pcm/, 可见钚燃料堆芯的  $C_{TC}$  将低于天然铀燃料堆芯, 同样有利于提高重水堆的安全性。重水堆由于是过慢化堆型, 因此  $C_{VR}$  为正。钚燃料的  $C_{VR}$  随燃耗加深而上升, 天然铀燃料的  $C_{VR}$  随燃耗加深而下降。钚燃料堆芯的  $C_{VR}$  在中间燃耗时约为 1050 pcm, 低于天然铀燃料的 1575 pcm, 这将显著降低于大破口失水事故 (LOCA) 发生后的瞬态功率峰值, 有利于提高运行安全。

从图4可见, 钚燃料和天然铀栅元反应性在零燃耗随燃料温度变化。新钚燃料和中间燃耗钚燃料下, 栅元反应性随燃料温度变化均为负, 但随着燃耗增加, 由于能谱硬化的影响, 引入负反应性的能力有所降低。从图5可见, 钚燃料和天

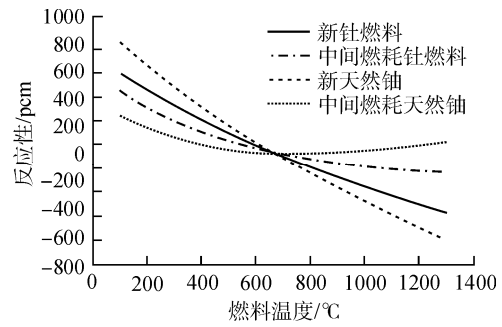


图4 反应性随燃料温度的变化趋势

Fig. 4 Reactivity Change with Fuel Temperature

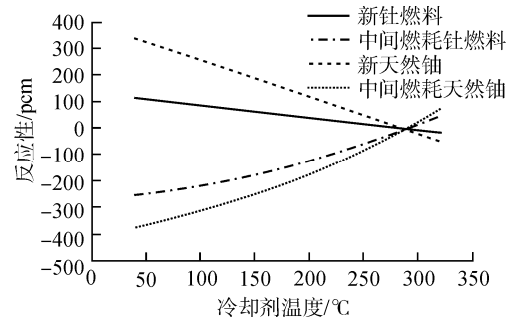


图5 反应性随冷却剂温度的变化趋势

Fig. 5 Reactivity Change with Coolant Temperature

然铀燃料栅元在零燃耗时反应性随冷却剂温度增加而降低, 在中间燃耗时随冷却剂温度增加而增加。

钚燃料棒束中间圈和外圈的燃料元件的  $L_{ER}$  随燃耗降低, 而中心圈和内圈的燃料元件的  $L_{ER}$  随燃耗而增加。在卸料燃耗范围内, 最大  $L_{ER}$  (54.5  $kW/m$ ) 出现在外圈, 低于天然铀燃料的  $L_{ER}$  最大值 (57.3  $kW/m$ )。由此可见, 钚燃料棒束因应力腐蚀破裂导致的燃料失效概率将有所降低。

## 4 结论

钚燃料和天然铀燃料重水堆的堆芯特性对比表明, 在现有的重水堆上使用钚燃料, 其堆芯特性参数将发生明显的变化, 因此将来必须作一些调整, 如换料方式以及调节棒布置等以适应这一改变。但燃料改变将维持更负的燃料温度系数、更小的冷却剂温度系数、更低的大 LOCA 瞬态功率峰, 这些将有利于提升重水堆的运行安全。

(责任编辑: 王中强)