

轻水堆含钆燃料棒稳态辐照行为分析

陈升¹, 韩智杰¹, 季松涛¹, 郑继业^{2,*}

(1. 中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413; 2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 国内外的压水堆燃料组件最新设计中, 广泛采用钆燃料($\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$)作为可燃毒物来控制初始反应性和展平堆芯功率分布。钆燃料棒的性能与普通燃料棒存在较大差异, 本文利用燃料元件性能分析程序 FRAPCON-3.5 对 BR3 堆内含钆燃料棒性能进行计算, 并与实验测量值进行比较。结果表明: FRAPCON-3.5 对含钆燃料棒的计算结果与实验测量值符合较好; 含钆燃料棒在辐照初期强化了燃料棒自屏效应, 对燃料的径向功率分布影响显著; 在平均功率密度相同的情况下, 燃料中加入钆会导致热导率降低, 芯块温度升高; 钆含量不同, 裂变气体释放及燃料和包壳的变形略有差异。

关键词: 含钆燃料棒; 可燃毒物; FRAPCON-3.5

中图分类号: TL349

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)10-1840-06

doi: 10.7538/yzk.2016.50.10.1840

Analysis of Steady Behavior of Gadolinia Doped Fuel Rods for LWR

CHEN Sheng¹, HAN Zhi-jie¹, JI Song-tao¹, ZHENG Ji-ye^{2,*}

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing 102413, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Abstract: In the latest design of PWR fuel assemblies, urania-gadolinia ($\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$) fuel is widely adopted as burnable poison to control the initial reactivity and flatten the power profile in reactor. And the performance of gadolinia doped fuel rods is different from ordinary fuel rods. In this study, the performance of gadolinia doped fuel rods, which were tested in BR3 reactor, was analyzed by using the fuel performance code FRAPCON-3.5. The results show that the calculated values agree with the experiment values. In addition, the self-shielding effect of gadolinia doped fuel rods is enhanced at the initial period of radiation, which has a significant influence on the radial power distribution of fuel rods. Besides, if the average power density is same, the thermal conductivity of gadolinia doped fuel is lower which results in higher pellet temperature. The fission gas release fraction and the deformations of fuel and cladding are different with the weight fraction of gadolinia in fuel.

Key words: gadolinia doped fuel rod; burnable poison; FRAPCON-3.5

核反应堆中,可燃毒物主要用于初始反应性的控制和堆芯功率分布的展平^[1]。目前,欧洲和日本压水堆燃料组件最新设计中,广泛采用含钆燃料($\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$)作为可燃毒物。我国也在大亚湾核电站使用了含钆燃料棒代替硼硅玻璃可燃毒物^[2]。含钆燃料棒制造工艺简单,可延长燃料的循环周期、提高卸料燃耗,且其结构和普通燃料棒相同。

UO_2 芯块中加入钆,会使其热导率和熔点发生变化^[3],进而对芯块温度、变形和裂变气体释放等产生影响,故含钆燃料棒的性能需要进行详细分析计算。在燃料设计和安全评审中,燃料元件的堆内辐照行为分析主要通过燃料元件性能分析程序和堆内辐照试验相结合的方法进行。

本工作利用比利时核能公司(BN)的含钆燃料棒堆内实验数据校核燃料元件性能分析程序 FRAPCON-3.5,并结合含钆燃料棒堆内实验数据,对轻水堆含钆燃料棒的稳态辐照行为进行分析,为我国核电站使用含钆燃料棒提供技术支持。

1 程序模型和实验数据简介

1.1 FRAPCON-3.5 程序^[4]

FRAPCON-3.5 是由美国核管会(NRC)开发的燃料元件稳态行为分析程序,主要对轻水堆稳态辐照情况下单根燃料棒的热工、力学、裂变气体释放等行为进行分析,能计算寿期内燃料元件的温度、应力/应变、裂变气体释放和燃料棒内压等参数。程序中含钆燃料的相关模型如下。

1) 热导率模型

含钆燃料芯块的热导率是温度、燃耗、芯块密度、含钆质量份额的函数。FRAPCON-3.5 中采用 NFI^[5] 模型计算密度为 95% T.D. 的含钆核燃料的热导率 k_{95} ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$):

$$k_{95} = 1/\{A + a \cdot \text{gad} + BT + f(\text{Bu}) + [1 - 0.9\exp(-0.04\text{Bu})]g(\text{Bu})h(T)\} + E/T^2 \exp(-F/T) \quad (1)$$

式中: T 为燃料温度, K; Bu 为燃耗, $\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$; gad 为钆的质量份额,无量纲; $f(\text{Bu}) = 0.00187\text{Bu}$ 为晶状体中裂变产物的影响因子; $g(\text{Bu}) = 0.038\text{Bu}^{0.28}$ 为辐照缺陷的影响因子; $h(T) = 1/(1 + 396e^{-Q/T})$, $Q = 6380$ K; 参数

$A = 0.0452$, $a = 1.1599$, $B = 2.46 \times 10^{-4}$, $E = 3.5 \times 10^9$, $F = 16361$ K。

对于其他密度的 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 燃料, FRAPCON-3.5 采用 Lucuta 推荐的球状气孔假设^[6], 计算式为:

$$k_d = 1.0789k_{95}d/[1 + 0.5(1-d)] \quad (2)$$

式中, d 为燃料密度, T.D.。

2) 径向功率分布计算模型

由于钆对热中子有很高的吸收截面,因此在 UO_2 燃料中加入 Gd_2O_3 会影响燃料的径向功率分布,进而影响燃料的温度分布和裂变气体释放等。

FRAPCON-3.5 程序内置了轻水堆和重水堆两种堆型的钆含量为 0%~10%、燃耗为 0~60 $\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ 的燃料径向功率分布因子。钆未耗尽前,采用插值的方式得到径向功率分布,钆耗尽后,采用 TUBRNP 模型^[7-8] 计算径向功率分布。

1.2 试验燃料棒及辐照历史

BN (Belgonucleaire)、CEN/SCK (Studiecentrum voor Kernenergie) 和 BBR (Brown Boveri Reactor GmbH) 共同开展了含钆核燃料的实验项目,该项目旨在获得稳态辐照情况下含钆燃料棒的有关性能参数,用于校验燃料元件性能分析程序。

辐照试验共有 4 根燃料棒: GD301、GD302、GD701 和 GD702。GD301 和 GD302 含钆质量份额为 3%, GD701 和 GD702 约为 7%。4 根燃料棒的功率历史示于图 1,具体制造参数列于表 1。4 根棒在反应堆中经过 3 个循环,其中 GD701 棒在第 2 和第 3 次循环之间经历了 2 次瞬态过程。4 根棒的总辐照时间约为 1200 d,平均燃耗达 40 $\text{GW}\cdot\text{d}/\text{tU}$ 左右。

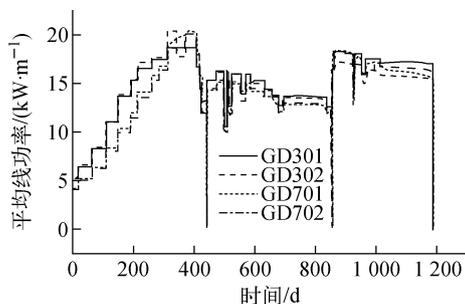


图 1 4 根实验棒的功率历史

Fig. 1 Power histories of four test rods

表 1 GD301、GD302、GD701 和 GD702 棒的制造参数
Table 1 Fabricated parameters of GD301, GD302, GD701 and GD702 rods

参数	数值				
	GD301	GD302	GD701	GD702	
燃料棒	燃料棒长度, mm	1 136.1	1 136.1	1 136.1	1 136.1
	燃料堆积高度, mm	1 000.6	1 002	993.9	993
	气腔高度, mm	59.8	58.4	66.5	67.1
芯块	燃料类型	UO ₂ -Gd ₂ O ₃			
	²³⁵ U 富集度, %	3.483	3.483	3.483	3.483
	烧结温度, °C	1 750	1 750	1 750	1 750
	O/U 原子比	2.022	2.022	2.055	2.055
	Gd 含量, %	3	3	7	7
	蝶形坑深度(上/下), mm	0.19/0.25	0.19/0.25	0.18/0.24	0.18/0.24
	开孔率, %	1.21	1.21		
	外径, mm	8.233	8.235	8.232	8.233
	高度, mm	10.66	10.65	10.79	10.8
	密度, g/cm ³	10.25	10.27	10.07	10.06
包壳	材料	Zry-4	Zry-4	Zry-4	Zry-4
	初始内压, MPa	2.6	2.6	2.6	2.6
	内/外径, mm	8.417/9.638	8.416/9.636	8.416/9.651	8.419/9.650
弹簧	外径, mm	8.15	8.15	8.15	8.15
	金属丝直径, mm	1.42	1.42	1.42	1.42
	圈数	12	12	12	12
冷却剂	压力, MPa	14	14	14	14

2 计算结果和讨论

2.1 径向功率分布

计算分两种情况:1) 含钐 3% 的 GD301 棒;2) 假设其他条件都相同的情况下, GD301 棒不含钐。两种棒的燃料轴向中心段径向功率分布因子计算结果如图 2 所示。可见, 在辐照初期, 含钐燃料棒与普通 UO₂ 燃料棒的径向功率分布存在较大差异。由于钐是强中子吸收剂, 热中子从燃料棒外围输运至中心的过程中基本都被外围吸收, 导致燃料功率径向分布呈阶梯状, 即较普通燃料棒呈现出更加强烈的自屏蔽效应^[9]。随着燃耗的增加, 钐消耗完毕, 两种燃料棒的径向功率分布相同。因此, 钐的加入会在辐照初期强化燃料棒的自屏蔽效应, 从而影响燃料的径向功率分布。

2.2 芯块温度

钐的加入不仅使径向功率分布不同, 还会

使燃料热导率改变, 从而影响芯块温度。平均功率密度相同时, 不同钐含量的燃料中心峰值温度随燃耗的变化如图 3 所示。图 3 结果显示, 含钐 3% 的燃料的峰值温度较不含钐燃料的峰值温度升高约 50 K, 含钐 7% 的燃料的峰值温度较含钐 3% 的燃料的峰值温度升高约 70 K。可见, 在保持平均功率密度相同的情况下, 随着含钐量的增加, 燃料芯块的峰值温度逐渐升高。

2.3 裂变气体释放和燃料棒内压

裂变气体释放份额与燃耗、温度等因素有关, 并直接影响燃料棒内压。图 4 示出裂变气体释放份额随燃耗的变化。可见, 3 根含钐燃料棒的裂变气体释放份额开始缓慢增长, 在辐照后期(燃耗达 30 GW·d/tU 后) 释放份额增加加快, 且辐照后期同等燃耗情况下, 钐含量较高的 GD702 棒的裂变气体释放份额较钐含量

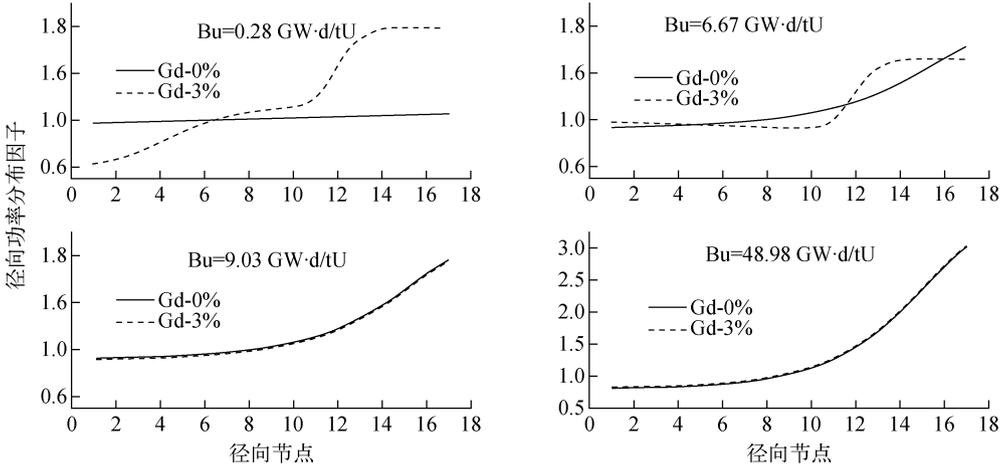


图2 径向功率分布因子
Fig.2 Radial power form factor

较低的 GD301 和 GD302 棒的裂变气体释放份额稍高。此外, GD702 棒的计算值与实验值符合较好, 而 GD301 和 GD302 棒的计算值较实验值大, 这是因为 FRAPCON-3.5 裂变气体释放份额的计算模型采用的是经验公式, 模型本身至少存在 0.3% 的绝对误差^[10]。

图5为燃料棒内压随燃耗(至停堆)的变化。可看出, 随着裂变气体的不断积累, 燃料棒内压逐渐升高, 停堆后, 由于温度降为室温, 棒内压降低; 钆含量不同, 燃料棒内压略有差异。通过对比可看出, RAPCON-3.5 对4根含钆燃料棒的内压计算值均与实验值符合较好。

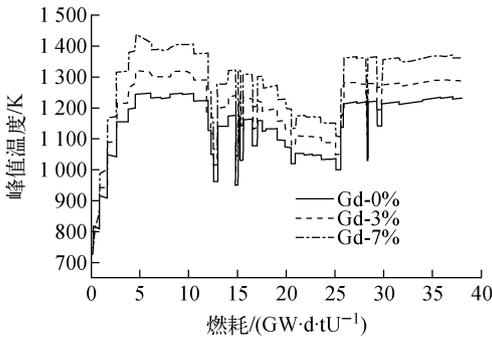


图3 燃料峰值温度随燃耗的变化
Fig.3 Peak fuel temperature vs. burnup

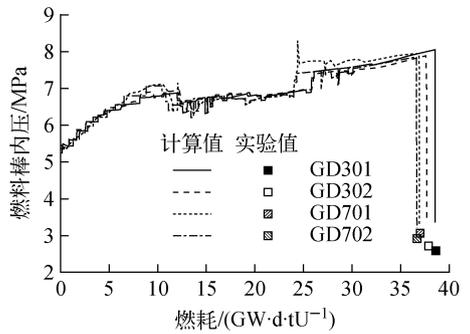


图5 燃料棒内压随燃耗的变化
Fig.5 Rod inner pressure vs. burnup

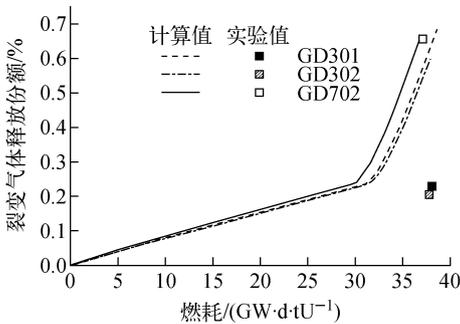


图4 裂变气体释放份额随燃耗的变化
Fig.4 Fission gas release fraction vs. burnup

综上所述, FRAPCON-3.5 对含钆燃料棒裂变气体释放份额和内压的计算值与实验值符合较好, 但都偏保守。

2.4 燃料棒变形

图6为辐照期间 GD301 棒轴向中心段的燃料芯块外半径和包壳内半径随燃耗的变化。可看出, 随着燃耗的增加, 燃料芯块因辐照肿胀和热膨胀等原因, 半径越来越大, 而包壳内半径由于内外压差作用下的蠕变效应而逐渐变小,

芯块-包壳间隙越来越小,至燃耗约为 $28 \text{ GW} \cdot \text{d}/\text{tU}$ 时基本闭合。

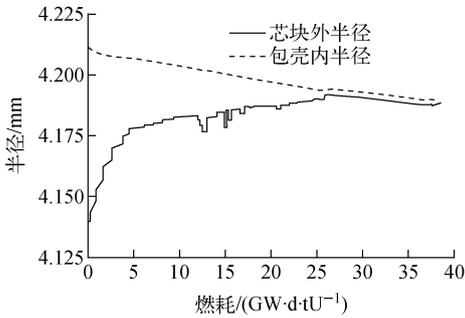


图6 包壳内半径和芯块外半径随燃耗的变化
Fig. 6 Cladding and pellet radii vs. burnup

图7为停堆后GD301和GD701棒包壳永久性周向应变计算值和实验值^[1]的比较。可看出,两根棒的计算值和实验值符合较好。由于轴向功率近似为余弦分布,燃料棒中间段温度高,包壳蠕变速率较大,所以燃料棒轴向中间段的包壳永久性应变绝对值较大,两端较小。通过比较两条曲线还可看出,燃料的含钆量也会影响包壳的永久性周向应变。

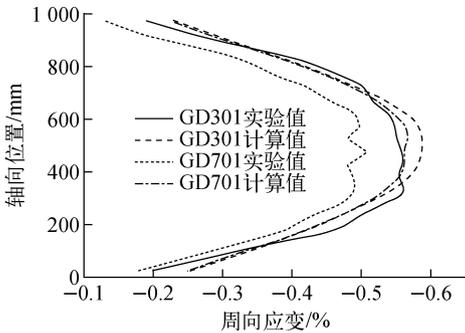


图7 包壳永久性周向应变分布
Fig. 7 Axial profile of cladding permanent hoop strain

图8为GD701和GD702棒的平均周向永久应变随燃耗的变化。可看出,计算值与实验值符合较好。由于在整个辐照过程中,燃料棒内压始终低于外压,因蠕变等因素,包壳平均周向应变始终为负值,并随着燃耗的加深,周向应变绝对值越来越大。

图9为GD301、GD302、GD701和GD702棒的燃料轴向伸长随燃耗的变化,图中曲线最

后由于停堆而迅速下降。可看出,由于钆含量的不同,芯块轴向伸长存在一定差异,但FRAPCON-3.5对燃料轴向伸长的计算值与实验值符合较好。

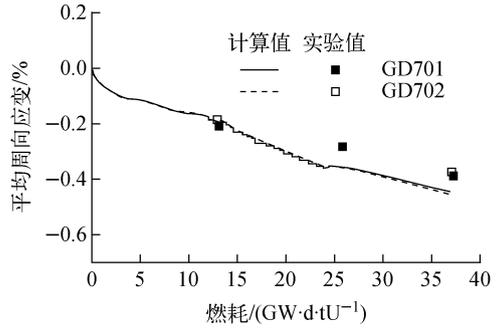


图8 燃料棒平均周向应变随燃耗的变化
Fig. 8 Cladding average hoop strain vs. burnup

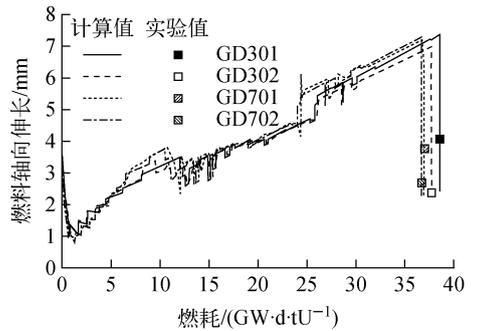


图9 燃料轴向伸长随燃耗的变化
Fig. 9 Fuel stack axial extension vs. burnup

综上所述,含钆燃料棒的燃料和包壳变形与钆含量和燃耗深度有关。如含钆燃料棒的包壳周向应变的绝对值随着燃耗的加深而增大。

3 结论

利用FRAPCON-3.5程序对BR3堆内含钆燃料棒的分析研究表明:程序计算结果与实验测量值符合较好,用FRAPCON-3.5分析含钆燃料棒的性能可给出较为合理的计算结果;含钆燃料强化了燃料棒的自屏效应,影响了燃料芯块径向功率分布因子;平均功率密度相同时,燃料中加入 Gd_2O_3 ,导致燃料热导率降低,使燃料温度升高;含钆燃料棒的钆含量会影响裂变气体释放份额、燃料棒内压以及燃料和包壳的变形。

参考文献:

- [1] 梅晓辉. Gd_2O_3 可燃毒物在中国的发展状况 [C]//中国核学会 2001 年学术年会论文集. 北京:中国核学会,2001.
- [2] 陈宝山,彭海青. 高性能燃料组件用含钷燃料棒的国产化[C]//中国核学会 2004 年学术会议论文集. 北京:中国核学会,2004.
- [3] 黄锦华,程平东. 新型可燃毒物设计与现代堆芯燃料管理[J]. 核动力工程,1997,18(2):108-112.
HUANG Jinhua, CHENG Pingdong. New type burnable poison design and modern in-core fuel management [J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(2): 108-112(in Chinese).
- [4] GEELHOOD K J, LUSCHER W G. FRAPCON-3. 5: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup, NUREG/CR-7022, PNNL-19418, Vol.1 Rev.1[R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2014.
- [5] OHIRA K, ITAGAKI N. Thermal conductivity measurements of high burnup UO_2 pellets and benchmark calculation of fuel center temperature [C]//Proceedings of the ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance. Portland, OR: Nuclear Fuel Industries Ltd., 1997: 541-549.
- [6] LUCUTA P G, MATZK H S E, HASTINGS I J. A pragmatic approach to modeling thermal conductivity of irradiated UO_2 fuel: Review and recommendations[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, 232: 166-180.
- [7] LASSMAN K, O'CARROL C, van der LAAR J, et al. The radial distribution of plutonium in high burnup UO_2 fuels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1994, 28: 223-231.
- [8] LASSMAN K, WALKER C T, van der LAAR J. Extension of the TRANSURANUS burnup model to heavy water reactor conditions[J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 255: 222-233.
- [9] 徐勇,张炜. 200 MW 核供热堆含钷可燃毒物棒 [J]. 核动力工程,1999,20(3):200-204.
XU Yong, ZHANG Wei. Gadolinia fuel rod in 200 MW nuclear heating reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 200-204 (in Chinese).
- [10] GEELHOOD K J, LUSCHER W G. FRAPCON-3. 5: Integral assessment, NUREG/CR-7022, PNNL-19418, Vol. 2 Rev. 1[R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2014.