

文章编号: 0258-0926(2018)S2-0124-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2018.S2.0124

岷江试验堆低浓化后堆内反应性变化分析

曹寅, 罗欣, 王皓, 康长虎, 刘水清

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 岷江试验堆 (MJTR) 使用低浓燃料后, 堆芯装载发生变化。本文根据低浓化后各种堆芯参数的改变, 分析计算了 ^{135}Xe 与 ^{149}Sm 这 2 种反应堆中最重要裂变产物的变化对堆芯反应性产生的影响, 并给出额定工况运行与停堆后 2 种情况下的反应性变化曲线, 使反应堆操纵人员了解毒物反应性的变化规律, 以便在实际运行中应对工况变化, 保证反应堆正常安全运行。

关键字: 岷江试验堆 (MJTR); 低浓化; 堆芯反应性; 氙; 钐

中图分类号: TL38+2 文献标志码: A

Analysis for Core Reactivity of Reduced Enrichment MJTR

Cao Yin, Luo Xin, Wang Hao, Kang Changhu, Liu Shuiqing

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: After the use of low-enrichment fuel in MJTR, the loading of the core has been changed. The core parameters are used to calculate the change rule of ^{135}Xe and ^{149}Sm , and the effect on the core reactivity. Then the curves of core reactivity in nominal operating condition and shut down condition are given, which makes the operator understand the change rule of toxic reactivity and response to the change of working condition in actual operation and ensure the safe operation of the reactor.

Key words: MJTR, Reduced enrichment, Core reactivity, Xe, Sm

0 引言

根据国际原子能机构 (IAEA) 的核不扩散条约要求, 岷江试验堆 (MJTR) 进行了低浓化工作, 并于 2017 年 10 月取得了国家核安全局颁发的运行许可。反应堆的运行状态是一个动态的过程, 反应堆操纵人员必须密切监督堆芯反应性、功率水平和功率分布的变化, 并通过及时改变控制棒位置来控制堆芯反应性、功率水平和功率分布。MJTR 低浓化后, 由于其堆芯装载、燃料富集度都发生了变化, 因此堆内反应性也会发生一定变化, 从而对反应堆的运行产生一定的影响。

本文根据 MJTR 低浓化后燃料富集度及堆芯

装载的变化, 分析 ^{135}Xe 和 ^{149}Sm 引起的反应性变化对运行的影响, 使操纵人员能正确理解毒物反应性的变化规律并对其具有正确的应对能力。

1 ^{135}Xe 引起的反应性变化

1.1 ^{135}Xe 的生成与消失

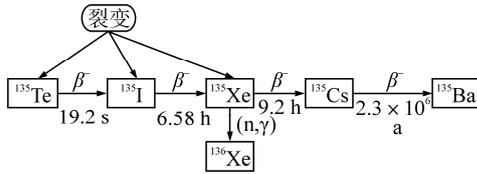
^{135}Xe 具有较大的裂变产额和热中子吸收截面, 是裂变产物中最重要的毒物, 其小部分由裂变直接产生, 大部分由裂变产物 ^{135}Te 和 ^{135}I 衰变而成。 ^{135}Xe 的生成与消失过程如图 1 所示^[1]。

1.2 MJTR 平衡氙的建立

在建立稳定中毒之前的任何时刻 t , 由氙中毒

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-09-10

作者简介: 曹寅 (1986—), 男, 助理研究员, 现从事反应堆运行工作

图1 ^{135}Xe 的生成与消失过程Fig. 1 Production and Disappearance of ^{135}Xe

引起的后备反应性减少由式(2)确定^[2]:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = \rho_{\text{Xe}} \left[\frac{\lambda_{\text{Xe}}^*}{\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_{\text{Xe}}^* t} - e^{-\lambda_1 t} \right) - \left(e^{-\lambda_{\text{Xe}}^* t} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中, λ_{Xe}^* 为堆芯燃料区平均热中子注量率为 Φ 时氙的有效衰变常数, 表示为: $\lambda_{\text{Xe}}^* = \lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}} \Phi$; λ_{Xe} 为氙的衰变常数, $\lambda_{\text{Xe}} = 2.09 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; σ_a^{Xe} 为氙的热中子吸收截面, $\sigma_a^{\text{Xe}} = 2.76 \times 10^6 \text{ b}$ ^[3]; Φ 为堆芯燃料区平均热中子注量率; λ_1 为碘的衰变常数, $\lambda_1 = 2.87 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; ρ_{Xe} 为平衡氙浓度引起的反应性变化:

$$\rho_{\text{Xe}} \approx -\frac{\Sigma_{\text{Xe}}}{\Sigma_a} = -\frac{\gamma \Sigma_f}{\Sigma_a} \frac{\Phi}{\frac{\lambda_{\text{Xe}}^*}{\sigma_a^{\text{Xe}}} + \Phi} = -\frac{(\gamma_1 + \gamma_{\text{Xe}}) \Phi}{\frac{\lambda_{\text{Xe}}^*}{\sigma_a^{\text{Xe}}} + \Phi} \frac{\sigma_f^{\text{U5}}}{\sigma_a^{\text{U5}} + \frac{(1-x)/238}{x/235} \sigma_a^{\text{U8}}} \quad (2)$$

式中, Σ_{Xe} 为氙的宏观吸收截面; Σ_a 为总宏观吸收截面; Σ_f 为宏观裂变截面; γ 为裂变产额, γ_1 和 γ_{Xe} 分别为裂变产物碘和氙的产额, $\gamma_1 = 6.386 \times 10^{-2}$, $\gamma_{\text{Xe}} = 0.228 \times 10^{-2}$; σ_f^{U5} 为 ^{235}U 在中子能量为 0.0253 eV 时的裂变截面, $\sigma_f^{\text{U5}} = 583.5 \text{ b}$ ^[3]; σ_a^{U5} 为 ^{235}U 在中子能量为 0.0253 eV 时的中子吸收截面, $\sigma_a^{\text{U5}} = 680.9 \text{ b}$ ^[3]; σ_a^{U8} 为 ^{238}U 在中子能量为 0.0253 eV 时的中子吸收截面 $\sigma_a^{\text{U8}} = 2.7 \text{ b}$ ^[3]; x 为燃料中 ^{235}U 的富集度。

MJTR 低浓化后, 根据堆芯计算结果, 得出堆芯燃料区 $\Phi = 2.225 \times 10^{13}$, $x = 0.1975$ 。代入式(2)得出平衡氙浓度引起的反应性变化 $\rho_{\text{Xe}} = -0.041 \Delta k / k = -5.77 \beta_{\text{eff}}$, β_{eff} 为缓发中子有效份额。

由上述公式及计算结果得到 MJTR 低浓化前后堆芯燃料区内的氙平衡变化曲线(图2)。

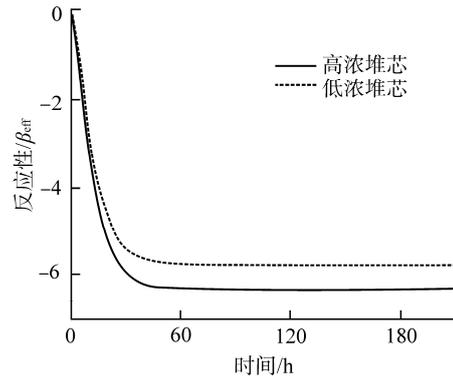


图2 MJTR 堆芯燃料区内的氙平衡变化

Fig. 2 Xenon Equilibrium Curves of MJTR

从图2中可以看出, 低浓化前后, 氙毒引起的反应性变化都随运行时间的增加而增加, 经过大约 50 h, 基本达到平衡值, 但低浓化后氙毒引起的反应性变化更小。

1.3 MJTR 停堆后的碘坑

MJTR 停堆后的碘坑由式(3)确定^[2]:

$$\rho_{\text{碘坑}} = \rho_{\text{Xe}} \left[\frac{\lambda_{\text{Xe}}^*}{\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_{\text{Xe}}^* t} \right) + e^{-\lambda_{\text{Xe}}^* t} \right] \quad (3)$$

将堆芯各相关参数代入式(3)中, 可以得出 MJTR 停堆后的碘坑曲线(图3)。

从图3中可以看出, MJTR 低浓化前后碘坑达到最大值的时间几乎相同, 都为 8.4 h 左右; 低浓堆芯碘坑深度约为 $9.79 \beta_{\text{eff}}$, 碘坑时间 t_1 约为 24.12 h。这说明低浓化以后, 停堆后的碘坑深度变浅, 碘坑时间变短。

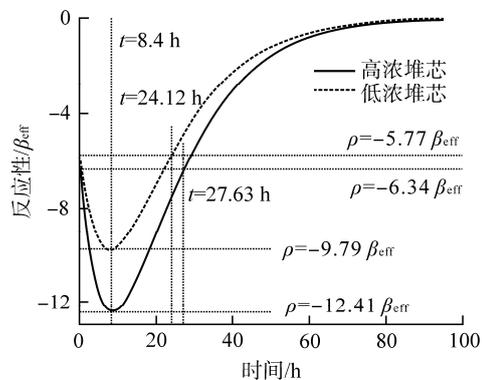


图3 MJTR 停堆后的碘坑曲线

Fig. 3 Xenon Poison Effect Curves after Shut Down of MJTR

2 ¹⁴⁹Sm 引起的反应性变化

2.1 ¹⁴⁹Sm 的生成和消失

在所有裂变产物中，¹⁴⁹Sm 对反应堆的影响仅次于 ¹³⁵Xe 对反应堆的影响，其生成和消失过程如图 4 所示^[1]。

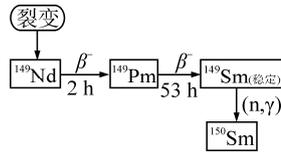


图 4 ¹⁴⁹Sm 的生成和消失过程

Fig. 4 Production and Disappearance of ¹⁴⁹Sm

由于 ¹⁴⁹Nd 的半衰期 ($T_{Nd}=2\text{ h}$) 和 ¹⁴⁹Pm ($T_{Pm}=54\text{ h}$) 相比很小，可近似的认为 ¹⁴⁹Pm 是裂变时直接产生的，因而略去 ¹⁴⁹Nd 的中间作用。此外 ¹⁴⁹Pm 的热中子吸收截面很小，可以忽略不计，故可以认为 ¹⁴⁹Pm 的消失皆是衰变的结果，而 ¹⁴⁹Sm 则只依靠吸收中子进行 (n,γ) 反应而消失。

2.2 MJTR 稳定工况运行时钐的变化

在建立稳定中毒之前的任何时刻 t ，由钐中毒引起的后备反应性减少由下式确定^[2]：

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{oSm} \times \left(1 - \frac{\lambda_{Pm}}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi} e^{-\sigma_{Sm}\Phi t} + \frac{\sigma_{Sm}\Phi}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi} e^{-\lambda_{Pm}t} \right) \quad (4)$$

式中， λ_{Pm} 为钐的衰变常数， $\lambda_{Pm} = 3.58 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ； σ_{Sm} 为钐的热中子吸收截面， $\sigma_{Sm} = 4.08 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ [3]； ρ_{oSm} 为钐平衡中毒引起的反应性损失：

$$\begin{aligned} \rho_{oSm} &\approx -\frac{\Sigma_{Sm}}{\Sigma_a} = -\frac{\gamma_{Pm}\Sigma_f}{\Sigma_a} \\ &= -\gamma_{Pm} \frac{\sigma_f^{U5}}{\sigma_a^{U5} + \frac{(1-x)/238}{x/235} \sigma_a^{U8}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， Σ_{Sm} 为钐的宏观吸收截面； γ_{Pm} 为钐的裂变产额， $\gamma_{Pm} = 0.0113$ 。因此，根据上述公式，可以得出 MJTR 低浓化前后堆芯燃料区内的钐平衡反应性变化曲线，如图 5 所示。MJTR 低浓化前 $\rho_{oSm} = -0.00968\Delta k/k = -1.36 \beta_{eff}$ ，低浓化后 $\rho_{oSm} = -0.00954\Delta k/k = -1.34 \beta_{eff}$ ，低浓化前后钐平衡中毒对反应性的影响微乎其微。此外，根

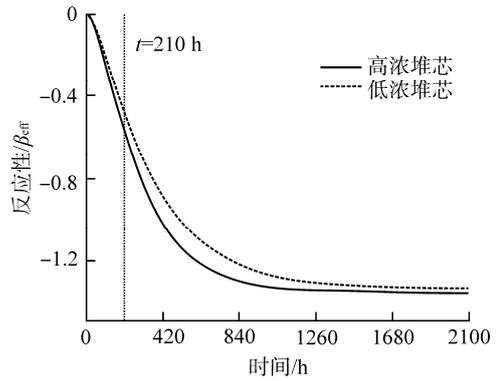


图 5 MJTR 堆芯燃料区内的钐平衡反应性变化

Fig. 5 Samarium Equilibrium Curves of MJTR

据 MJTR 实际运行情况，每段运行 9 d (约 210 h)^[4]，到停堆时刻未达到钐平衡中毒。

此时由于钐未稳定中毒所引起的反应性损失

$$\rho_{Sm高} = -0.575 \beta_{eff}, \rho_{Sm低} = -0.465 \beta_{eff}。$$

2.3 MJTR 启动前钐的积累

当反应堆在稳定的功率水平上运行， t 时刻 ¹⁴⁹Pm 的积累按照钐的半衰期的指数规律进行，表示为^[2]：

$$N_{Pm}(t) = N_{oPm} (1 - e^{-\lambda_{Pm}t}) \quad (6)$$

式中， N_{oPm} 为钐平衡浓度。

以 MJTR 每段运行 210 h 计算，停堆时刻 $N_{Pm}/N_{oPm} = 0.93$ 。在反应堆停堆后，由于钐的衰变而引起钐积累，从而减少的后备反应性钐坑 $\rho_{坑}$ 正比于停堆前建立钐平衡浓度的热中子注量率 Φ ：

$$\rho_{坑} = \rho_{oSm} \frac{\sigma_{Sm}\Phi}{\lambda_{Pm}} \quad (7)$$

MJTR 低浓堆芯的最大钐坑值 $\rho_{坑低}$ 为：

$$\rho_{坑低} = 0.00242\Delta k/k = -0.34 \beta_{eff} \quad (8)$$

在钐坑内钐中毒的反应性损失的积累速度与停堆时所积累的钐的衰变速度相同，并趋于停堆时刻的最大钐坑值：

$$\rho_{坑}(t) = \rho_{坑} (1 - e^{-\lambda_{Pm}t}) \quad (9)$$

根据上述公式，可以得出 MJTR 停堆后钐坑深度随时间的变化曲线，如图 6 所示

由图 6 可知，MJTR 停堆后约 10 d (240 h) 钐坑深度基本平衡，此时可认为钐坑达到最大值。钐是稳定毒物，只能通过吸收中子 (n,γ) 反

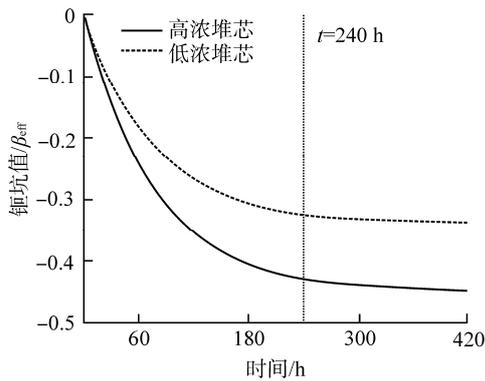


图6 MJTR停堆后钷坑深度随时间的变化
Fig. 6 Samarium Poison Effect Curves after Shut Down of MJTR

应而消失。MJTR启动后堆内除了钷毒的生成，同时启动前已积累的钷毒在一定中子注量率的照射下逐渐消失，释放正反应性。释放反应性随时间的变化用式(10)表示：

$$\rho_{Sm}^{消失} = -\rho_{坑}(t)(1 - e^{-\sigma_{Sm}\Phi t}) \quad (10)$$

可以看出，MJTR低浓化后新钷毒的生成释放的负反应性和已经积累的钷毒的消失释放的正反应性都比MJTR低浓化以前更小。

3 额定工况运行时与停堆后堆内反应性的变化

由上述分析可知，额定工况运行时，堆芯反应性随时间的变化，主要受平衡氙的生成、新钷毒的形成、燃耗释放负反应性、已经积累的钷毒在一定中子注量率照射下释放正反应性四者的叠加影响^[5]。

由于低浓化后平衡氙毒较低，钷的未稳定中毒造成的反应性损失较低，已积累的钷毒逐渐消失释放的正反应性也较低，因此自动棒棒位上升幅度及反插幅度都比较小，这是在额定工况运行时需要特别注意的。

反应堆停堆后，低浓堆芯的碘坑深度变浅，碘坑时间更短。MJTR每炉分阶段运行的实际情况表明，段间最短相距5 d^[4]，由于¹³⁵Xe经过至

少12个半衰期，可以认为每段启堆时堆内无氙毒。但是，对于非计划停堆后短时间内的启堆，低浓化堆芯相对较低的碘坑深度和较短的碘坑时间对于反应堆运行非常有利。

对于停堆后¹⁴⁹Sm浓度来说，¹⁴⁹Sm浓度在停堆后逐渐上升，在停堆约10 d后达到平衡。在停堆初期，由于¹³⁵Xe对反应性的影响远远大于¹⁴⁹Sm对反应性的影响，因此¹⁴⁹Sm对反应性的影响不明显，但在停堆2~3 d碘坑逐渐消失后，¹⁴⁹Sm的积累对于反应性的影响却是不可忽略的。

4 结论

(1) MJTR低浓化后，¹³⁵Xe和¹⁴⁹Sm引起的堆芯反应性变化更小，但达到平衡的时间基本不变。

(2) MJTR低浓化后，碘坑深度更浅，碘坑时间更短，但达到最大碘坑的时间几乎不变。

(3) 在额定工况运行时，低浓堆芯自动棒棒位的波动幅度更小，在运行时需要特别注意。

(4) 对于非计划停堆后短时间内的启堆，低浓堆芯相对较低的碘坑深度和较短的碘坑时间对于反应堆运行非常有利。

参考文献：

- [1] 谢仲生. 反应堆物理分析[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [2] 易洁宜, 于维德. 5MW低功率堆物理计算[J]. 核动力工程, 1992, 13(4): 7-12
- [3] 格拉希维里 T B, 赵志祥, 黄小龙, 等. 核素数据手册(第3版)[M]. 北京: 原子能出版社, 2004.
- [4] 章航洲, 陈启兵, 丁小林, 等. MJTR安全分析报告[R]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2016.
- [5] 黄献. 岷江试验堆稳定运行工况下的反应性分析[R]. 成都: 中国核动力研究设计院, 1999.

(责任编辑: 孙凯)