

# 碘坑内启堆氙毒反应性研究

黎浩峰<sup>1</sup>, 许国军<sup>2</sup>, 陈文振<sup>1</sup>, 朱倩<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 船舶与动力学院 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 海军 991 工程办公室, 北京 100841)

**摘要:** 本文研究反应堆碘坑内的启动问题, 导出了热堆在碘坑内启动时氙毒反应性、碘和氙浓度随时间变化的解析表达式。通过对所得解析解的计算分析, 对碘坑内启动问题有了更全面、本质了解。反应堆停堆前的运行功率、碘坑内启动功率及启动时所处的碘坑内的位置等均将影响到启堆后氙毒反应性的变化规律, 所处条件的不同可能导致完全不同的变化规律。另外, 碘坑内启堆的时间对反应堆启堆时的安全也是 1 个重要的影响因素。本文所得结论对提高核动力船只的机动性和安全运行有一定的理论意义和参考价值。

**关键词:** 氙毒; 碘坑; 反应性; 船用反应堆

中图分类号: TL327

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)03-0198-05

## Analysis of Reactivity Worth for Xenon Poisoning During Restart-Up of Reactor in Iodine Pit

LI Hao-feng<sup>1</sup>, XU Guo-jun<sup>2</sup>, CHEN Wen-zhen<sup>1</sup>, ZHU Qian<sup>1</sup>

(1. *Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*; 2. *Navy No. 991 Engineering Office, Beijing 100841, China*)

**Abstract:** The reactivity worth of xenon poisoning and the densities of  $^{135}\text{X}$  and  $^{135}\text{Xe}$  were derived when the reactor was restarted up in iodine pit. Through the expressions obtained we can find the physics characteristics of reactor restarted up in iodine pit comprehensively and essentially. The results were analyzed and discussed. The reactor power before shutdown, the start-up power, the position where the reactor starts up in iodine pit, and so on, all have effect on the reactivity worth of xenon poisoning, and the different conditions can lead to totally different physics characteristics. In addition, the time when the reactor starts up in iodine pit is a very important factor for nuclear reactors safety. The conclusions are very important to the maneuverability and operation safety of ship nuclear reactors.

**Key words:** xenon poisoning; iodine pit; reactivity; ship nuclear reactor

碘坑下启动反应堆时, 由于中子通量密度突然增加, 氙吸收中子后被大量消耗, 堆内迅速

释放出正反应性。这时,自动棒虽会自动跟踪下降,但跟踪范围有限,尤其是当在碘坑底部启动核反应堆时,会在极短时间内产生很大的正反应性,自动控制棒跟踪完全有可能补偿不了,有可能造成正反应性引入事故<sup>[1]</sup>。碘坑内启动是影响反应堆运行安全的一个重要问题,以往的一些文献对中毒效应已进行了分析研究<sup>[1-10]</sup>。一般对于核电站而言,由于无机动性的要求,可避开碘坑内启动,因此,碘坑内的启动研究对核电站的运行并不是很重要。船只在海上航行,为回避风浪和海啸等恶劣环境,它必须具备很强的机动性。舰船尤其如此,需具有随时启动反应堆和大幅度甩负荷后很快又提升功率的能力,因此,研究碘坑内启动对提高核动力船只机动性和安全运行有重要的理论意义和应用价值<sup>[6]</sup>。反应堆在碘坑内启动时,反应性的变化复杂,研究碘坑内启动,须首先研究中碘坑曲线<sup>[7]</sup>。然而,有关船用堆碘坑中毒研究报道较少,研究方法除了解析方法外,主要是采用数值计算方法,如解析节块法<sup>[11]</sup>等。数值法虽在某些计算方面比解析法适用范围更大,但一般难以透过数值法从物理意义上得到比较清晰的理解。为对碘坑内启动问题有一清晰了解,本工作利用点堆模型,针对船用堆运行的特点和要求,求得在碘坑下启堆时碘和氙浓度及氙毒反应性随时间变化的解析解。

## 1 物理模型

裂变反应堆内<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe浓度随时间变化的动力学方程<sup>[9]</sup>为:

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \varphi - \lambda_I N_I(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_{Xe}(t)}{dt} = \gamma_{Xe} \Sigma_f \varphi + \lambda_I N_I(t) - (\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi) N_{Xe}(t) \quad (2)$$

其中: $N_I(t)$ 、 $N_{Xe}(t)$ 分别为<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe的浓度; $\gamma_I$ 、 $\gamma_{Xe}$ 分别为<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe的裂变产额; $\Sigma_f$ 为堆内燃料物质的热中子平均宏观裂变截面; $\varphi$ 为堆内平均热中子通量密度; $\lambda_I$ 、 $\lambda_{Xe}$ 分别为<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe的衰变常量; $\sigma_a^{Xe}$ 为<sup>135</sup>Xe的热中子平均微观吸收截面。

设反应堆在稳定功率运行超过50h后,

即<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe浓度均接近或达到它们的平衡浓度后,突然停闭反应堆,停堆后 $t_0$ 时刻堆内<sup>135</sup>I和<sup>135</sup>Xe的浓度<sup>[1]</sup>应为:

$$N_I(t_0) = \gamma_I \Sigma_f \varphi_0 \exp(-\lambda_I t_0) / \lambda_I \quad (3)$$

$$N_{Xe}(t_0) = \Sigma_f \varphi_0 \left( \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \exp(-\lambda_{Xe} t_0)}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi_0} + \frac{\gamma_I [\exp(-\lambda_{Xe} t_0) - \exp(-\lambda_I t_0)]}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \right) \quad (4)$$

其中: $\varphi_0$ 为反应堆停堆前稳定运行时的热中子通量密度。

设处于碘坑下的反应堆重新启动后中子通量密度由0变为 $\varphi$ ,且保持不变,则由式(1)及初始条件式(3)可得:

$$N_I(t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f}{\lambda_I} (\varphi - \varphi \exp(-\lambda_I t) + \varphi_0 \exp(-\lambda_I(t_0 + t))) \quad (5)$$

求解式(2)得:

$$N_{Xe}(t) = e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi)t} N_{Xe}(t_0) + \int_0^t e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi)(t-\tau)} [\gamma_{Xe} \Sigma_f \varphi + \lambda_I N_I(\tau)] d\tau \quad (6)$$

将式(4)和(5)代入上式可得<sup>135</sup>Xe的浓度随时间的变化关系为:

$$N_{Xe}(t) = \left( \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi_0} + \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi_0}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \right) \exp(-\lambda_{Xe} t_0 - \lambda_{Xe}^* t) - \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi_0 \exp(-\lambda_I t_0 - \lambda_{Xe}^* t)}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} + \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi}{\lambda_{Xe}^*} (1 - \exp(-\lambda_{Xe}^* t)) + \frac{\gamma_I \Sigma_f}{\lambda_{Xe}^* - \lambda_I} (-\varphi + \varphi_0 \exp(-\lambda_I t_0)) \cdot (\exp(-\lambda_I t) - \exp(-\lambda_{Xe}^* t)) \quad (7)$$

其中: $\gamma = \gamma_{Xe} + \gamma_I$ ;  $\lambda_{Xe}^* = \lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi$ 。

将式(7)代入 $q_p = \Sigma_{aP} / \Sigma_{aF}$ 和 $\rho_q \approx -f q_p$ <sup>[1]</sup>,其中, $\Sigma_{aP}$ 为毒物宏观吸收截面, $\Sigma_{aF}$ 为燃料宏观吸收截面, $f$ 为无毒堆的热中子利用系数,即可得碘坑内启动时氙毒反应性随时间变化的计算式为:

$$\rho_{Xe}(t) = -\frac{f \eta \sigma_a^{Xe}}{\nu} \left( \left( \frac{\gamma \varphi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi_0} + \frac{\gamma_I \varphi_0}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \right) \cdot \exp(-\lambda_{Xe} t_0 - \lambda_{Xe}^* t) - \frac{\gamma_I \varphi_0 \exp(-\lambda_I t_0 - \lambda_{Xe}^* t)}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} + \frac{\gamma \varphi}{\lambda_{Xe}^*} (1 - \exp(-\lambda_{Xe}^* t)) + \frac{\gamma_I}{\lambda_{Xe}^* - \lambda_I} (-\varphi + \varphi_0 \exp(-\lambda_I t_0)) \cdot (\exp(-\lambda_I t) - \exp(-\lambda_{Xe}^* t)) \right) \quad (8)$$

## 2 分析计算

假设  $t_0 = 0, \varphi = 0$  时即为反应堆停堆后  $^{135}\text{Xe}$  中毒, 则式(8)可简化为停堆后氙毒反应性随时间变化的计算式, 有:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = -\frac{f\eta\sigma_a^{\text{Xe}}}{\nu}$$

$$\left( \frac{\gamma\varphi_0}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\varphi_0} \exp(-\lambda_{\text{Xe}}t) + \frac{\gamma_1\varphi_0}{\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}} (\exp(-\lambda_{\text{Xe}}t) - \exp(-\lambda_1t)) \right) \quad (9)$$

如果假设  $t_0 = 0$ , 即反应堆未停堆, 只是功率发生变化, 则式(8)可简化为功率变化后氙毒反应性随时间变化的计算式, 有:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = -\frac{f\eta\sigma_a^{\text{Xe}}}{\nu}$$

$$\left( \frac{\gamma}{\lambda_{\text{Xe}}^*} \left( \varphi - \frac{\lambda_{\text{Xe}}(\varphi - \varphi_0)}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\varphi_0} \exp(-\lambda_{\text{Xe}}^*t) \right) + \frac{\gamma_1(\varphi - \varphi_0)}{\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1} (\exp(-\lambda_{\text{Xe}}^*t) - \exp(-\lambda_1t)) \right) \quad (10)$$

令  $\varphi = 0$ , 由式(10)即可得核反应堆启动时氙毒反应性随时间变化的计算式, 有:

$$\rho_{\text{Xe}}(t) = -\frac{f\eta\sigma_a^{\text{Xe}}}{\nu}$$

$$\left( \frac{\gamma}{\lambda_{\text{Xe}}^*} (1 - \exp(-\lambda_{\text{Xe}}^*t)) + \frac{\gamma_1}{\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1} (\exp(-\lambda_{\text{Xe}}^*t) - \exp(-\lambda_1t)) \right) \quad (11)$$

式(9)~(11)即为文献[8]和[9]所得的反应堆停堆、功率变化和新反应堆启动后氙毒反应性随时间变化的计算式。另外, 反应堆功率水平从  $P_1$  降低到  $P_2$  时产生碘坑, 此碘坑达到最大深度的时间  $t_0^m$ , 即最大碘坑反应性发生的时间, 可从式(10)求得:

$$t_0^m = \frac{1}{\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1} \ln \left( \frac{\lambda_{\text{Xe}}^*}{\lambda_1} \left( 1 + \left( 1 + \frac{\gamma_{\text{Xe}}}{\gamma_1} \right) \left( \frac{\lambda_1}{\varphi_0^{\text{Xe}} + \lambda_{\text{Xe}}} - 1 \right) \frac{\lambda_{\text{Xe}}}{\lambda_{\text{Xe}} + \varphi_0 \sigma_a^{\text{Xe}}} \right) \right) \quad (12)$$

以上几种情况在以往文献中有比较详细的分析, 不再赘述。这里主要分析式(10)描述的碘坑内启动时氙毒反应性随时间变化规律。当在碘坑下启动反应堆时, 由式(10)的导数等于零可求得氙毒反应性到达极值的时间表达式, 有:

$$t_m = \ln \left( \left( \frac{\gamma(\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}^*)}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\varphi_0} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{\gamma_1(\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}^*)}{\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}} \right) \lambda_{\text{Xe}}^* \exp(-\lambda_{\text{Xe}}^*t_0) + \frac{\sigma_a^{\text{Xe}} \lambda_{\text{Xe}}^* \gamma_1 \varphi \exp(-\lambda_1 t_0)}{\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}} + \frac{(\gamma_{\text{Xe}} \lambda_{\text{Xe}}^* - \gamma \lambda_1) \varphi}{\varphi_0} \Bigg) / \left( \lambda_1 \gamma_1 (\exp(-\lambda_1 t_0) - \varphi / \varphi_0) \right) / (\lambda_{\text{Xe}}^* - \lambda_1) \quad (13)$$

由于式(13)仅是一数学表达式,  $t_m$  具有时间的物理属性,  $t_m$  的影响因素又很多, 如  $\varphi, t_0, \varphi_0$  等, 因此, 对于  $t_m$  表达式的意义还需进一步分析确定。

以  $^{235}\text{U}$  为燃料的压水堆为实例进行分析计算。取  $\nu = 2.43, \eta = 1.8134$  (压水堆运行时的  $\eta$  值),  $f = 0.85, \varphi_0 = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \sigma_a^{\text{Xe}} = 3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$  (相当于压水堆运行中的平均截面值),  $\Sigma_f = 20 \text{ m}^{-1}, \lambda_1 = 2.87 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}, \lambda_{\text{Xe}} = 2.09 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}, \gamma_1 = 0.06386, \gamma_{\text{Xe}} = 0.00228$ 。计算结果示于图1~3。其中, 图1、2的计算中分别取  $t_0 = 2 \text{ h}$  和  $22 \text{ h}$ 。对计算结果分析如下。

当  $t \geq t_0^m$  时, 如果  $\varphi > \varphi_0 \exp(-\lambda_1 t_0), t_m > 0$ , 则将式(13)代入式(8)可得反应堆放出的最大正反应性, 此正反应性大于相应功率下氙毒反应性的平衡值, 且启动功率越大, 此正反应性越大(图1); 如果  $\varphi \leq \varphi_0 \exp(-\lambda_1 t_0)$  时,  $t_m \leq 0$ , 无物理意义, 也不存在极值的出现。在此情况下, 氙毒相对缓慢地释放正反应性, 直至趋于相应功率下氙毒反应性的平衡值。

当  $t < t_0^m$  时, 如果  $\varphi > \varphi_0 \exp(-\lambda_1 t_0), t_m > 0$ , 则  $t = t_m$  时反应堆释放出最大正反应性, 此正反应性大于相应功率下氙毒反应性的平衡值, 且启动功率越大此正反应性越大(图2)。如果  $-\frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \leq \varphi \leq \varphi_0 \exp(-\lambda_1 t_0)$  时,  $t_m \leq 0$ , 则无明确的物理意义, 也不存在极值的出现。氙毒将相对缓慢地释放正反应性, 直至趋于相应功率下氙毒反应性的平衡值, 不存在极值的出现, 其中:

$$A = \left( \frac{\gamma_1 (\exp(-\lambda_1 t_0) - \exp(-\lambda_{\text{Xe}} t_0))}{\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}} - \frac{\gamma \exp(-\lambda_{\text{Xe}} t_0)}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}} \varphi_0} + \frac{\gamma_{\text{Xe}}}{\sigma_a^{\text{Xe}} \varphi_0} \right) \sigma_a^{\text{Xe}2};$$

$$B = \left( \frac{(\gamma \lambda_1 - 2\gamma \lambda_{\text{Xe}}) \exp(-\lambda_{\text{Xe}} t_0)}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}} \varphi_0} + \frac{\gamma_1 ((\lambda_1 - 2\lambda_{\text{Xe}}) \exp(-\lambda_{\text{Xe}} t_0) + \lambda_{\text{Xe}} \exp(-\lambda_1 t_0))}{\lambda_1 - \lambda_{\text{Xe}}} \right) +$$

$$\frac{\gamma_{Xe}(\lambda_{Xe} - \lambda_1)}{\sigma_a^{Xe} \varphi_0} \Big) \sigma_a^{Xe};$$

$$C = \left( \frac{\lambda_1 \gamma - \gamma \lambda_{Xe}}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \varphi_0} + \gamma_1 \right) \lambda_{Xe} \exp(-\lambda_{Xe} t_0) - \lambda_1 \gamma_1 \exp(-\lambda_1 t_0).$$

如果  $\varphi < \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$  时,  $t_m > 0$ ,

将式(13)代入式(8),可得氙毒反应性最大值,与  $\varphi > \varphi_0 \exp(-\lambda_1 t_0)$  时的极值性质恰好相反,其氙毒反应性变化规律与反应堆停堆后正常衰减规律相似,氙毒反应性首先上升到最大值,然后逐渐衰减到相应功率下的氙毒反应性平衡值。另外,不难发现其碘坑深度小于正常碘坑深度,且启动时的中子通量密度愈大,即功率越高,碘坑深度愈浅。因此,反应堆同时满足  $t < t_0^m$  和  $\varphi < \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$  这两个条件时,即

即使在碘坑内启动反应堆也不会出现反应堆在极短时间内释放出很大的正反应性这种现象。

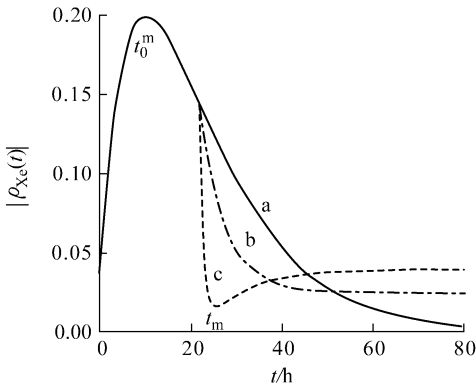


图1 碘坑后期启动时氙毒反应性变化

Fig. 1 Variation of xenon reactivity

with time at later restart stage of iodine pit

- a——正常衰减; b——启动低功率,  $\varphi = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- c——启动高功率,  $\varphi = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

众所周知,当反应堆在碘坑下启动时,提升的功率愈高,氙毒下降愈快,极短时间内释放的正反应性也愈大。在对式(8)的分析中,还发现如图3所示另外一些值得重视和思考的现象。反应堆停堆后,在最大碘坑反应性发生的时间  $t_0^m$  前后,如果氙中毒的情况相同,且以相同功率在碘坑下进行启堆,那么,在  $t_0^m$  后启堆时,反应堆在极短时间内放出的正反应性将比  $t_0^m$  前

启堆时放出的正反应性大得多,正反应性释放速率也明显高于  $t_0^m$  前启堆,且无论启动时功率有多低,也不可能出现像  $t_0^m$  前低功率启堆一样的类似正常衰减的规律。这说明,碘坑下在  $t_0^m$  后启堆比在  $t_0^m$  前启堆的条件更为恶劣,需更加小心谨慎,并应采取必要的措施。

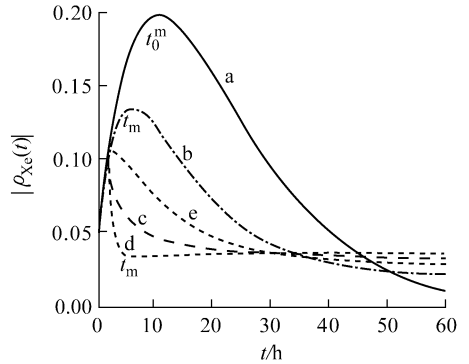


图2 碘坑前期启动时氙毒反应性变化

Fig. 2 Variation of xenon reactivity

with time at earlier restart stage of iodine pit

- a——正常衰减; b——启动低功率,  $\varphi = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- c——启动中等功率,  $\varphi = 5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- d——启动高功率,  $\varphi = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- e——启动功率,  $\varphi = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$

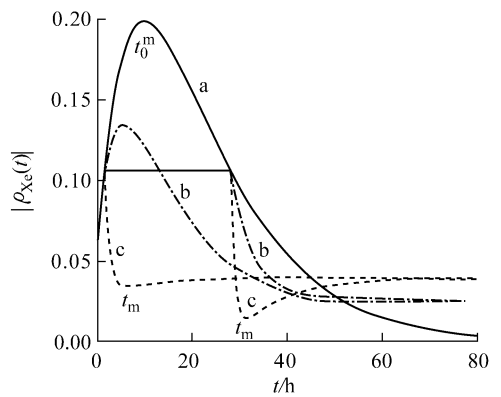


图3 不同条件下氙毒反应性随时间的变化

Fig. 3 Variation of xenon reactivity

with time at different conditions

- a——正常衰减; b——启动低功率,  $\varphi = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- c——启动高功率,  $\varphi = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

### 3 结论

通过以上的计算和讨论,可对导出的  $N_1(t)$ 、 $N_{Xe}(t)$  和  $\rho_{Xe}(t)$  的函数表达式作出如下

结论。

1) 用计算式可得到以往文献的结果,且计算结果与物理过程符合得很好,推导是正确的,对反应堆安全分析和反应堆运行有重要应用价值。

2) 反应堆运行功率高时,碘坑较深,碘坑内启动功率高时反应堆极短时间内释放出的正反应性也越大,且反应堆停堆前的运行功率、碘坑内启动功率以及启动时所处的碘坑内的位置等均影响启堆后氙毒反应性变化规律,所处条件的不同可能导致完全不同的变化规律。

3) 对于碘坑内启堆的问题,不应仅关心碘坑的深度、死区时间长短和启堆功率的大小等,碘坑内启堆的时间对反应堆启堆时的安全同样是一重要的影响因素,但这一因素均被以前的文献予以忽略。由本文分析可知,在  $t_0^m$  后启堆时,反应堆在极短时间内放出的正反应性将比  $t_0^m$  前启堆时放出的正反应性大得多,正反应性释放速率也明显高过  $t_0^m$  前启堆,因此,在  $t_0^m$  后启堆比在  $t_0^m$  前启堆的条件更为恶劣,需更加小心谨慎,并需采取必要的措施。

#### 参考文献:

[1] 张法邦. 核反应堆运行物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.

[2] 付正中, 邓圣, 何绍群, 等. 西安脉冲堆额定功率运行考验和氙毒测量[J]. 核动力工程, 2002, 23(6): 78-80.

FU Zhengzhong, DENG Sheng, HE Shaoqun, et al. Operation trial at rated power and measurement of xenon poison on Xi'an Pulsed Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(6): 78-80(in Chinese).

[3] 曾道桂, 郑洪涛, 沈锡荣. 西安脉冲堆氙、钐反应性分析[J]. 核动力工程, 2002, 23(6): 74-77.

ZENG Daogui, ZHENG Hongtao, SHENG Xi-

rong. Analysis of xenon and samarium reactivity for Xi'an Pulse Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(6): 74-77(in Chinese).

[4] 朱焕南, 胡华琛, 耿义侠, 等. 研究性重水堆中毒碘坑的分析[J]. 原子能科学技术, 1962, 9(1): 81-86.

ZHU Huannan, HU Huachen, GENG Yixia, et al. The poison reactivity analysis for heavy-water research reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1962, 9(1): 81-86(in Chinese).

[5] 郭诚湛. 高通量工程试验反应堆毒物反应性分析[J]. 核动力工程, 1982, 3(6): 30-36.

GUO Chengzhan. The poison reactivity analysis for HFETR [J]. Nuclear Power Engineering, 1982, 3(6): 30-36(in Chinese).

[6] 张帆, 朱波, 蔡章生, 等. 舰船用反应堆停堆氙毒特性仿真研究[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(1): 67-71.

ZHANG Fan, ZHU Bo, CAI Zhangsheng, et al. Simulation of xenon poison characters for ship nuclear reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(1): 67-71(in Chinese).

[7] 张帆, 蔡章生, 于雷, 等. 碘坑仿真研究[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(4): 77-80.

ZHANG Fan, CAI Zhangsheng, YU Lei, et al. Real time simulation research in iodine pit[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2004, 16(4): 77-80(in Chinese).

[8] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.

[9] WESTON M. Nuclear reactor physics[M]. USA: John Wiley Sons Inc., 2001.

[10] CHANG J J, HANGBOK C. Xenon transient analysis for direct use of spent pressurized water reactor fuel in CANDU reactors (DUPIC) [J]. Annals of Nuclear Energy, 2000, 27: 269-278.

[11] 谢仲生, 张育曼, 张建民, 等. 核反应堆物理数值计算[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.