

文章编号：0258-0926(2015)06-0014-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2015.06.0014

铍反射层光激缓发中子对物理启动特性的影响

孙寿华，朱 磊，李海涛

中国核动力研究设计院，成都，610041

摘要：给出铍的光激缓发中子组常数、停堆倒换料期间和向临界过渡前堆内中子源强值。全部采用解析函数模型，给出不同反应性引入速率下物理启动到临界状态时的中子源强值及到达周期保护的时间；给出阶跃引入反应性下堆芯发生超临界缓发瞬变、瞬发瞬变时堆功率的变化结果和释放的总能量等。

关键词：光激缓发中子；物理启动；反应性；缓发瞬变；瞬发瞬变；

中图分类号：TL327 文献标志码：A

Research on Nuclear Properties of Beryllium Reflector In Physical Startup of Reactor

Sun Shouhua, Zhu lei, Li Haitao

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610005, China

Abstract: This paper presents photoneutron group constants of beryllium and the neutron source strength value in the core on refueling period and before the critical transition. The paper set up the analytic function model, given neutron source strength value and the time of which the core achieve the periodic protection when the core inserted the different reactivity rate between physical startup to the critical, and given reactor power changes with the time and the total released energy and other physical parameters when the core happened supercritical delayed transient and prompt transient at introducing step reactivity.

Key words: Light induced delayed neutron, Physical startup, Reactivity, Delayed transient, Prompt transient

0 前 言

有些研究堆采用铍作反射层，铍与裂变放出的高能 γ 光子发生 (γ, n) 反应产生中子，这些中子成为铍的光激中子。铍的 (γ, n) 反应阈能为 1.66 MeV，光激缓发中子的平均能量为 0.67 MeV。由于其平均能量低，对热堆而言，光激中子比裂变瞬发中子的价值高。由于运行任务的需要，研究堆经常需要频繁的停堆倒换燃料，每次运行前都要进行物理启动；因此分析光激缓发中子对物理启动特性的影响对于确保物理启动中的安全是非常必要的。

虽然铍的光激缓发中子产额比热中子裂变的

缓发中子的产额小，但关于铍的光激缓发中子产额值的问题，曾有许多研究。1962 年凯宾把铍的光激缓发中子归纳为 9 组，并给出了各组的产额^[1]。在高通量工程试验堆 (HFETR) 设计阶段计算剩余释热等有关参数时也采用该产额。

1 停堆换料期间的中子源强

1.1 反应性阶跃变化分析模型

点堆中子动力学方程如下：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_{i=1}^m \lambda_i c_i + q \quad (1)$$

收稿日期：2015-03-14；修回日期：2015-09-23

作者简介：孙寿华（1964—），男，研究员，现从事反应堆工程与安全研究

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i c_i \quad (2)$$

式中, n 为中子源强 (也可代表反应堆功率); m 为缓发中子组数; c_i 、 λ_i 分别为第 i 组缓发中子先驱核密度和衰变常数; β_i 和 l 分别为缓发中子总份额和第 i 组份额; ρ 为反应性; l 为瞬发中子寿命; q 为光激中子产生率。

在额定功率稳态运行期间, 光激中子的数目相对于 ^{235}U 的裂变中子数来说可忽略不计, 即式 (1) 中 $q=0$ 。由式 (1) 式 (2) 可推导出点堆模型下反应堆反应性阶跃变化从深次临界到瞬发超临界状态中子增殖计算公式见文献[2]。

1.2 停堆期间中子源强

反应堆停堆的过程可简化为反应性阶跃变化。以 HFETR 为例, $l = 7.8 \times 10^{-5} \text{ s}$, $n_0 = 6.1 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ (运行功率为 80 MW), 停堆状态下堆芯有效增殖系数 K_1 约为 0.820, 分别计算出考虑与不考虑铍的光激缓发中子时 n/n_0 随停堆时间的变化, 计算结果见表 1。

表 1 n/n_0 的计算结果
Table 1 Compute Result of n/n_0

时间	不考虑光激缓发中子	考虑光激缓发中子
1 min	1.597×10^{-3}	2.389×10^{-3}
1 h	1.979×10^{-22}	1.476×10^{-4}
1 d	0	4.182×10^{-6}
5 d	0	2.549×10^{-6}
6 d	0	2.328×10^{-6}
7 d	0	2.140×10^{-6}
1 个月	0	5.277×10^{-7}
6 个月	0	2.045×10^{-10}
12 个月	0	1.659×10^{-14}

由表 2 可知, 不考虑光激中子时, HFETR 停堆 1 h 后 ^{235}U 的裂变中子可以认为为零; 有铍的光激中子后, 停堆 12 个月时堆内中子源强仍达 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 物理启动时仍可不需要外加中子源。表 2 的结果说明停堆后的第 5~7 d 内, 堆内的中子源强变化小于 20%。

目前, HFETR 每炉以 80 MW 功率运行 30 d 左右时停堆, 停堆后第 5~7 d 完成堆内倒换料工作, 由于停堆第 5~7 d 内中子源强变化不大, 取第 6 d 时 n_1 为停堆倒换料期间堆内中子的源强 ($n_1 = 2.328 \times 10^{-6} n_0$), 有:

$$n_1 = q/(1 - K_1) \quad (3)$$

1.3 向临界过渡前堆内中子源强

倒换料完成后进行物理启动, 物理启动中, 首先把两根安全棒提升到顶部, 然后把两根自动棒提升到半高度后, 通过中子计数外推逐步提升补偿棒使堆芯 k_{eff} 不低于 0.998, 最后通过提升补偿棒使堆由次临界向超临界过渡。设 n_2 、 K_2 分别为超临界过渡前的堆芯中子源强和有效增殖系数, 则有:

$$n_2 = q/(1 - K_2) \quad (4)$$

如果 K_2 取值为 0.998, 由式 (7) 式 (8) 可算得 n_1 、 n_2 分别为: $4.190 \times 10^{-7} n_0$ 、 $2.095 \times 10^{-4} n_0$ 。由此可见, 当堆芯 k_{eff} 达到 0.998 时, 堆内中子源强是刚开始倒换料时的 90 倍左右, 是铍引起的光激中子源强的 500 倍左右, 是 HFETR 稳态运行时源强的 0.021% 左右。

2 临界状态时中子源强

反应堆由次临界向临界过渡的过程可简化为反应性线性引入, 即:

$$\rho = \rho_0 + \gamma t \quad (5)$$

式中, ρ 为由次临界向临界过渡期间堆芯的反应性变化; ρ_0 为开始向临界过渡时刻的反应性; γ 、 t 分别为反应性线性引入速率和引入时间。

为简化分析该过程, 采用 ^{235}U 单组缓发中子模型且不考虑光激中子的影响。在反应性线性引入时, 如下两个不等式成立:

$$\beta - \rho_0 \gg \lambda l \quad (6)$$

$$(\beta - \rho_0 + \lambda l)^2 \gg 2\lambda l \rho_0 \quad (7)$$

式中, λ 为缓发中子总衰变常数。

由式 (1) 式 (2) 和式 (6) 式 (7) 可推导出得到 n_2 的计算公式^[3], 从而可得到 γ 下达到临界时所需时间及中子源强 n_3 , 计算结果见表 2。 n_3 与 γ 几乎无关, 与 ρ_0 关系不大。

表 2 不同 γ 下的临界时间与 n_3/n_2
Table 2 Critical Time and n_3/n_2 of different γ

γ	$\rho_0 = -0.006$		$\rho_0 = -0.004$		$\rho_0 = -0.002$	
	t/s	n_3/n_2	t/s	n_3/n_2	t/s	n_3/n_2
1×10^{-5}	600.0	1.103	400.0	1.078	200.0	1.031
5×10^{-5}	120.0	1.103	80.0	1.078	40.0	1.031
1×10^{-4}	60.0	1.103	40.0	1.078	20.0	1.031
5×10^{-4}	12.0	1.103	8.0	1.078	4.0	1.031
1×10^{-3}	6.0	1.103	4.0	1.078	2.0	1.031
5×10^{-3}	1.2	1.103	0.8	1.078	0.4	1.031

3 超临界状态下中子源强

3.1 λ 值的修正

研究表明,当反应堆处于次临界状态时,单组缓发中子模型计算结果与6组计算结果吻合较好,而当反应堆处于临界直至瞬发临界后,单组模型已基本失真,研究发现,当 $\rho < \beta$ 时,较好的 λ 值见文献[4]。

3.2 反应堆周期

反应堆在启动过程中,必须有2台周期保护系统投入运行,当由于某种原因使反应堆周期达到设定的保护值时,控制保护系统便会保护停堆[5]。

3.3 反应性线性引入

堆达临界后,假设由于某种原因导致反应性线性引入可能达到周期保护(HFETR的周期保护值为22 s)停堆,由 n_2 的计算公式、 λ 和反应堆周期计算结果可得从临界到周期保护所经历的时间 t_B 及其对应的中子源强 n_4 。假设反应堆的2台周期保护系统失效导致反应性不断线性引入直至发生瞬发临界。在不考虑负温度效应下,不同 γ 下的计算结果见表3。

表3 不同 γ 下的计算结果
Table 3 Result of Different γ

γ	周期保护停堆		$\rho/\beta=0.5$		$\rho/\beta=0.99$
	t_B/s	n_4/n_3	t/s	n_4/n_3	t/s
1×10^{-5}	72.1	2.79	324.40	8.88×10^{24}	649.00
5×10^{-5}	16.2	1.46	64.88	1.59×10^5	129.80
1×10^{-4}	6.9	1.22	32.44	5.41×10^2	64.90
5×10^{-4}	4.7×10^{-3}	1.00	6.49	5.73×10^0	12.98
1×10^{-3}	—	1.00	3.24	3.25×10^0	6.49

由表3可知,向超临界过渡过程中 γ 应小于 1×10^{-4} 。如果 γ 过快,则反应堆有可能在仪表来不及反应的情况下就失去了周期保护,甚至可能向瞬发临界演变。

3.4 反应性阶跃引入

3.4.1 超临界缓发瞬变 超临界缓发瞬变是指反应堆在临界状态下阶跃引入反应性 ρ ($0 < \rho < \beta$),以致反应性反馈效应和控制保护系统不能完全补偿的瞬变。负温度效应和绝热模型如下:

$$\rho = \Delta\rho - \alpha T \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dt} = K_c n \quad (9)$$

式中, α 为反应性温度系数($\alpha > 0$); T 为在初始温度上增加的温度; K_c 为反应堆热容量的倒数;瞬跳近似模型下 n 和 ρ 之间的关系式见文献[5]。瞬跳近似模型下,反应性 ρ 和时间 t 的关系式见文献[6]。

在反应堆临界状态下,即使仅阶跃引入 0.3β 的反应性,堆功率也会增长 10^5 倍。随着温度负反馈的增加, ρ 从开始变小,相应的 n 开始增加,达到最大值后逐渐变小,当 ρ 减小到 $-\rho$ 时 $n=0$,反应堆回到刚开始临界状态时的功率水平。在负温度效应下,反应堆功率会形成“脉冲”式变化。当分别引入 0.3β 、 0.5β 的反应性时, n 达到最大值所需要的时间分别为194、93 s,约600 s后堆功率开始缓慢降低,释放的总能量分别为5218、10013 MJ。在缓发超临界下,功率增加会引起小功率保护动作而停堆。

3.4.2 超临界瞬发瞬变 超临界瞬发瞬变是指反应堆在临界状态下,阶跃引入一个大反应性 ρ ($\rho > \beta$),在这种情况下,缓发中子和光激中子都可以忽略。则由式(1)式(8)式(9)可得到 n 随时间变化的表达式[5]。

发生超临界瞬发瞬变时,峰值功率与起始功率无关,但与负温度系数的绝对值成反比。引入的阶跃反应性 ρ 越大,峰值功率越大。 n 随 ρ 的响应过程为: ρ 从 ρ 开始不断变小,当 $\rho=\beta$ 时 n 达到峰值;当 $\rho=2\beta-\rho$ 时 n 回到原来的功率水平。在发生瞬发超临界的几毫秒内,堆功率已增长到 10^4 MW,约40 ms时刻功率达到峰值 $10^5 \sim 10^6$ MW。在瞬发临界状态下反应堆的保护系统不起作用。对 n 随时间变化的表达式积分可得到反应堆释放的总能量 E 。反应堆中燃料组件的温升为 T 。

$$E = \frac{2(\Delta\rho - \beta)}{k_c \alpha} \quad (10)$$

$$\Delta T = 2(\Delta\rho - \beta)/\alpha \quad (11)$$

以上可知,假设阶跃引入的反应性 $\rho=2\beta$,则反应堆释放的总能量为8606 MJ,燃料组件温升为430。由此可见,必须消除反应堆阶跃引入大反应性的条件,以保证反应堆安全;即使是脉冲堆,也应设定阶跃引入反应性的限值。

4 结论

(1) 当没有铍的光激中子时,反应堆停堆后

再启动必须使用外中子源；有铍的光激中子后，停堆 12 个月时堆内中子源强仍达约 10^5 s^{-1} ，物理启动时仍可不需要外加中子源。

(2) 物理启动中，当堆芯 k_{eff} 达到 0.998 时，堆内中子源强是刚开始倒换料时的 90 倍左右，是铍引起的光激中子源强的 500 倍左右，是 HFETR 稳态运行时源强的 0.021% 左右。

(3) 反应堆达到临界状态时的中子源强和 γ 几乎无关，和向临界过渡初始时刻的次临界度关系不大。

(4) 向超临界过渡过程中 γ 应小于 10^{-4} 。

(5) 在缓发超临界状态下，在负温度效应反馈下，反应堆功率会形成“脉冲”式变化，即使仅引入 0.3β ，反应性堆功率也会增长 10^5 倍，功率达到最大值所需要的时间为 194 s。在缓发超临界下，功率增加会引起物理启动前已投入的“小功率保护”动作而停堆。

(6) 发生瞬发超临界的几毫秒内，堆功率能增长到 10^4 MW ，约 40 ms 达到 $10^5 \sim 10^6 \text{ MW}$ 功率

峰值。在瞬发临界状态下反应堆的保护系统不起作用，必需通过技术和管理手段避免发生瞬发超临界。

参考文献:

- [1] Keepin G R. Neutron data for reactor kinetics delay ed neutron from fission[J]. Nucleonics ceased publication, 1962, 20(8): 151-167.
- [2] 蔡章生，桂学文，于雷. 反应性阶跃变化从深次临界到瞬发超临界中子增殖统一公式[J]. 核动力工程, 2006, 27(2): 14-19.
- [3] 蔡章生. 反应性线性变化中子动力学方程的解析解[J]. 核动力工程, 1995, 16(6): 9-12.
- [4] 张帆，陈文振，蔡章生. 临界反应堆阶跃正反应性输入时中子密度响应的近似修正解[J]. 原子能科学与技术, 2006, 40(3): 25-28.
- [5] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 北京：原子能出版社，1983.
- [6] 王少明，许国学，章德. 任意初始功率下考虑温度反馈的反应堆缓发超临界过程[J]. 核动力工程, 2009, 30(2): 28-31.

(责任编辑：王中强)