

# 基于反应性温度系数的金属型脉冲堆波形计算

高 辉<sup>1,2</sup>, 钟力晗<sup>1,2</sup>, 梁文峰<sup>1,2</sup>, 宋凌莉<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 中子物理学重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**金属型脉冲堆的反应性反馈效应主要由热膨胀引起, 本文在反应性温度系数的基础上建立了波形计算方法, 该方法由蒙特卡罗中子输运程序、热力学计算程序和点堆方程 3 部分组成。首先由三维中子输运程序和热力学计算程序计算出热功率和反应性的耦合关系, 然后将耦合关系代入点堆方程, 即可求解出波形。采用该方法计算了 Lady Godiva 的波形, 计算结果与 LANL 的实验结果一致。

**关键词:**反应性温度系数; 脉冲堆; 波形计算; 中子输运

中图分类号: TL329

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)05-0798-05

doi: 10. 7538/yzk. 2017. 51. 05. 0798

## Waveform Calculation of Metal Burst Reactors Based on Reactivity Temperature Coefficient

GAO Hui<sup>1,2</sup>, ZHONG Li-han<sup>1,2</sup>, LIANG Wen-feng<sup>1,2</sup>, SONG Ling-li<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Neutron Physics, China Academy of Engineering Physics,*

*Mianyang 621900, China; 2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry,*

*China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** The reactivity feedback effect of metal burst reactors is mainly caused by thermal expansion. The method of waveform calculation was built with MC neutron transport code, the thermomechanics program and point reactor neutron kinetics equations on the basis of reactivity temperature coefficients. The coupling relation between heat power and reactivity is got by means of the three-dimensional MC neutron transport code and thermomechanics program. The waveform is got by way of solving point reactor neutron kinetics equations including the coupling relation. Using this convenient method, the typical waveform of Lady Godiva was calculated, and the calculated results are consistent with the experiment results of LANL.

**Key words:** reactivity temperature coefficient; burst reactor; waveform calculation; neutron transport

收稿日期: 2016-06-08; 修回日期: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11305153); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目资助(91326104);

中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金资助项目(2015AA01)

作者简介: 高 辉(1979—), 男, 山东枣庄人, 副研究员, 博士, 从事反应堆物理研究

脉冲反应堆是一种可短时间处于超瞬发临界状态并爆发裂变脉冲的反应堆,一般开始时加入足以使系统达到超瞬发临界的反应性,依靠堆体自身的热反馈效应使反应性快速降低到瞬发临界以下(即热膨胀自熄灭机制),在此过程中裂变率先骤增再骤降,从而实现单次裂变脉冲的爆发。在脉冲堆的设计和运行过程中,需知道常规情况下的裂变脉冲波形。在爆发脉冲过程中,裂变产生热量,而热量反过来影响裂变率的变化。因此波形的计算需要解决中子输运和热力学耦合的问题。

脉冲堆爆发脉冲波形计算的关键是获得系统反应性的热反馈关系。热反馈一般包括热膨胀效应、多普勒效应和中子热化效应。金属型脉冲堆一般以高浓金属铀为燃料,因其中子吸收材料份额较小,多普勒效应可忽略。由于体积小,并且能谱接近裂变谱,中子寿命较短,因此中子热化效应也可忽略。金属型脉冲堆的反应性热效应以体积膨胀为主要方式。Burgreen<sup>[1]</sup>早期进行了热力学分析,Wimett<sup>[2]</sup>增加了弹性力学分析,但均没有与中子输运计算进行耦合。近年来,Kimpland等<sup>[3-6]</sup>和Wilson等<sup>[7]</sup>分别求解了弹性力学方程和流体力学方程,实现了与点堆模型的耦合,而Kadioglu等<sup>[8]</sup>通过求解中子扩散方程实现了与热力学的耦合。耦合计算均采用逐步计算的方法,由于相邻时间间隔内,热膨胀位移非常小,因此产生的反应性差异较小,为中子输运计算带来了较大的不确定性,而且是逐渐累加的。本工作首先研究脉冲堆的反应性与热力学的反馈关系,而非直接进行耦合计算。将热膨胀产生的效应放大,分别计算较大温升差距下的反应性变化,反应性差异较大可减小蒙特卡罗中子输运程序计算的不确定性。从中提取出温度与反应性的耦合关系,即反应性温度系数。在反应性温度系数已知的情况下,采用求解点堆模型下的动态学方程的方法计算裂变脉冲波形。

## 1 计算方法

点堆模型可较好地描述金属型脉冲堆,通过求解点堆方程的方法可得到脉冲堆的裂变波形,关键是计算热膨胀对反应性的反馈关系。点堆动态学方程有如下形式:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^{I_D} \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{\text{eff},i}}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, I_D \quad (2)$$

式中: $n(t)$ 为 $t$ 时刻堆内中子数; $\rho(t)$ 为反应性; $\lambda_i$ 和 $\beta_{\text{eff},i}$ 分别为第 $i$ 组缓发中子先驱核衰变常量和有效份额; $\beta_{\text{eff}}$ 为总缓发中子有效份额; $I_D$ 为缓发中子组数; $C_i$ 为第 $i$ 组缓发中子数; $\Lambda$ 为中子代时间。除 $\rho(t)$ 外,其余参量均假定不随时间改变。

求解点堆方程需知道缓发临界瞬发中子衰减常数和缓发中子有效份额,这2个参数可通过随机中子输运程序求解得到,而更关键的参数是反应性变化所依赖的反应性温度系数。脉冲堆在不同的运行状态,其反应性温度系数是不同的。脉冲爆发过程持续时间一般在百 $\mu\text{s}$ 以内,裂变热来不及传递,因此温度场的分布与裂变率分布近似,此时的温度效应由脉冲反应性温度系数<sup>[9]</sup>决定。而稳态运行时,堆体内有充足的热传递时间,堆芯内部温度接近均匀,此时的温度效应由稳态反应性温度系数<sup>[10]</sup>决定。两个系数的差异来源于温度场分布的不同,计算脉冲波形只需知道脉冲反应性温度系数。

计算脉冲反应性温度系数首先由随机中子输运程序计算裂变率的分布,获得热源分布和温度分布,并输入到ANSYS程序,计算在一定温度下的位移分布和密度分布,根据膨胀后的密度分布,建立分层模型,每个栅元具有相应的密度,从而实现密度的非均匀分布,利用随机中子输运程序计算不同温升下膨胀前后的反应性变化。从而获得反应性温度系数 $\alpha_T$ ,其定义如下:

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT} \quad (3)$$

采用线性拟合得到中心位置反应性温度系数 $\alpha_{T_0}$ 。球形系统中心位置的温升为 $T_0$ 时,根据温度分布可得到平均温升 $\bar{T}$ :

$$\bar{T} = \frac{T_0}{V} \int_V \phi(r) dV \quad (4)$$

式中: $V$ 为体积; $\phi(r)$ 为裂变率关于半径 $r$ 的分布。

于是得到平均反应性温度系数,其意义是系统平均温升1 K产生的反应性变化,此处的

平均温升是在本征温度分布下加权平均得到的温升,而不是堆芯各处均上升 1 K。

为得到反应性与裂变热的关系,还需得到脉冲堆的关闭系数  $b_f$ , 根据关闭系数的定义<sup>[11]</sup> 可得:

$$b_f = \frac{d\rho}{dF} \quad (5)$$

式中,  $F$  为裂变数。关闭系数的含义是每次裂变产生热量而造成的反应性的变化。在绝热近似下, 裂变数与平均温升有如下关系:

$$F = \frac{CTm}{\epsilon_f} \quad (6)$$

式中:  $C$  为堆芯材料的热容;  $m$  为堆芯质量;  $\epsilon_f$  为平均一次裂变产生的能量。综合式(3)、(5)和(6)可得:

$$b_f = \frac{\epsilon_f}{Cm} \alpha_T \quad (7)$$

只考虑热膨胀效应, 由关闭系数得到的反应性与裂变数的关系如下:

$$\rho(t) = \rho_0 + b_f F \quad (8)$$

式中,  $\rho_0$  为初始反应性。又因堆内裂变率与堆内中子数有如下关系<sup>[11]</sup>:

$$\dot{F}(t) = \frac{n(t)}{\bar{\nu}\Lambda} \quad (9)$$

式中,  $\bar{\nu}$  为每次裂变放出的平均中子数, 因此式(8)又可转化为:

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{b_f}{\bar{\nu}\Lambda} \int_0^t n(t') dt' \quad (10)$$

得到了反应性的变化依赖关系, 联立式(1)、(2)和(10), 采用数值方法求解点火动态学方程, 获得脉冲中子波形。计算过程如图 1 所示。完整的程序由 3 个模块组成, 即随机中子

输运计算、热力学计算、点堆模型计算。首先用随机中子输运程序计算裂变率分布  $\phi(r)$ ; 再用热力学程序计算燃料各点的位移, 进而得出膨胀后的质量密度分布  $\rho_m(r)$ ; 再用随机中子输运程序计算不同温度下的反应性的变化, 从而获得反应性温度系数  $\alpha_T$  和关闭系数  $b_f$ ; 最后数值求解点堆方程, 获得裂变脉冲波形。

## 2 计算结果

以球形金属系统 Lady Godiva 为例, 计算了无惯性效应下的裂变脉冲的波形。模型的半径为 8.8 cm, 堆芯为 93% 高浓铀裸球。首先采用随机中子输运程序计算裂变率分布, 结果如图 2 所示。拟合得到裂变率分布公式为:

$$\phi(r) = \frac{\sin(Kr)}{Kr} \quad (11)$$

其中,  $K$  为几何曲率, 计算获得  $K = 0.292 \text{ cm}^{-1}$ 。爆发脉冲过程相对散热过程非常快, 采用绝热近似的情况下, 裂变率分布就是热源和温升的分布。

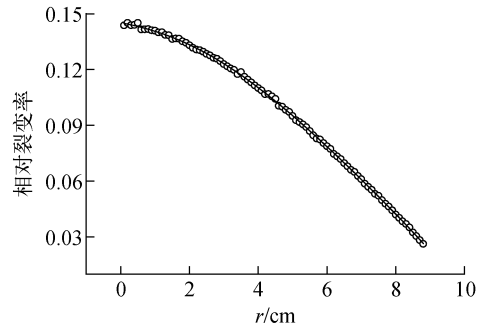


图 2 裂变率分布

Fig. 2 Distribution of fission rate

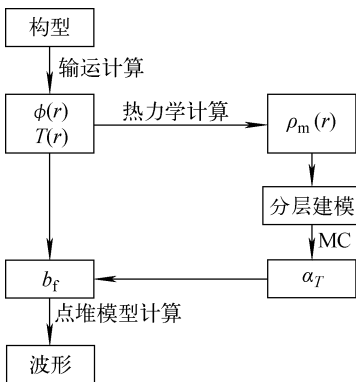


图 1 波形计算流程图

Fig. 1 Flowchart of waveform calculation

由于温度升高, 堆体发生膨胀, 燃料元件的密度发生变化。采用 ANSYS 有限元分析了球形装置的热膨胀情况。根据轴旋转对称性, 模型为半圆结构, 采用二维平面单元 PLANE183<sup>[12]</sup> 进行了建模, 单元形状选为三角形。单元尺寸为半径的 1%, 整个模型包含 36 109 个单元、72 734 个节点。材料的密度为  $18.8 \text{ g/cm}^3$ , 泊松比为 0.22, 材料的弹性模量和热膨胀系数<sup>[2]</sup> 在起始时刻分别为  $2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$  和  $1.48 \times 10^{-5}$ , 而在温度为 541 K 时分别为  $1.69 \times 10^{11} \text{ Pa}$  和  $1.623 \times 10^{-5}$ 。在绝热近似下, 若中心最高温升



具有一定参考意义。但此方法只适应于惯性效应不明显的情形,这是因为没有考虑反应性热反馈稍滞后于功率上升,当滞后时间不可忽略时,峰功率的计算值较实验值偏低。若要描述惯性效应需考虑热膨胀的时间特性。

#### 参考文献:

- [1] BURGREN D. Thermoelastic dynamics of a pulse reactor[J]. Nuclear Science and Engineering, 1967, 30: 317-327.
- [2] WIMETT T F. Dynamics and power prediction in fission bursts[J]. Nuclear Science and Engineering, 1992, 110: 209-236.
- [3] KIMPLAND R H. Preliminary results of GODIVA-IV prompt burst modeling, LA-UR-96-1498[R]. USA: LANL, 1996.
- [4] KIMPLAND R H. Point kinetics modeling, LA-UR-96-3887[R]. USA: LANL, 1996.
- [5] MYERS W L. The simulation of a critical accident excursion occurring in a simple fast metal system using the coupled neutronic-hydrodynamic method, LA-UR-96-3886[R]. USA: LANL, 1996.
- [6] GROVE T J, KIMPLAND R H, MYERS W L. A dynamic simulation tool for critical assemblies using the coupled neutronic-thermoelastic method [J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2008, 99(5): 373-374.
- [7] WILSON S C, BIEGALSKI S R, COATS R L. Computational modeling of coupled thermomechanical and neutron transport behavior in a Godiva-like nuclear assembly[J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 157: 344-353.
- [8] KADIOGLU S Y, KNOLL D A. Multiphysics analysis of spherical fast burst reactors[J]. Nuclear Science and Engineering, 2009, 163: 132-143.
- [9] 高辉,刘晓波,蒋勇,等. CFBR-II堆脉冲状态反应性温度系数测量[J]. 原子核物理评论,2012, 29(1):114-116.
- GAO Hui, LIU Xiaobo, JIANG Yong, et al. Measurement of reactivity temperature coefficient of CFBR-II in burst state[J]. Nuclear Physics Review, 2012, 29(1): 114-116(in Chinese).
- [10] 赵小林,范晓强. CFBR-II堆反应性温度效应分析[J]. 核动力工程,2008,29(5):29-32.
- ZHAO Xiaolin, FAN Xiaoqiang. Analysis of reactivity temperature effect of CFBR-II [J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(5): 29-32(in Chinese).
- [11] 贺仁辅,邓门才. 快中子临界装置和脉冲堆实验物理[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [12] LIANG Wenfeng, XIE Qilin, QIU Dong. A novel coupled computation method for fast burst reactors[C]//Transactions of the American Nuclear Society US: American Nuclear Society, 2015: 437-440.
- [13] 高辉,刘晓波,范晓强. 反应性动态加入对脉冲堆中子脉冲波形的影响[J]. 核动力工程,2013, 34(2):68-71.
- GAO Hui, LIU Xiaobo, FAN Xiaoqiang. The effects of loading reactivity at dynamic state on wave of neutrons in burst reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(2): 68-71(in Chinese).
- [14] WIMETT T F, ENGLE L B, GRAVES G A, et al. Time behavior of Godiva through prompt critical, LA2029[R]. USA: LANL, 1960.