

# 温度反馈阶跃反应性输入下的 燃料元件温度场分析

陈文振, 商学利, 张帆

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**对燃料元件的非稳态温度场进行分析计算。结合反应堆物理、堆芯元件传热与与温度耦合的物性参数,给出了物理数学模型。采用稳定的差分格式进行计算,获得了有温度反馈阶跃反应性输入条件下的棒状燃料元件温度分布和变化规律,计算结果的精度较高,对堆芯热工设计与运行安全分析有参考价值,特别是对处于经常变工况的核动力反应堆更有现实意义。

**关键词:**温度场;反应性;中子动力学;燃料元件;温度反馈

中图分类号:TL326

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S0-0158-04

## Analysis of Temperature Field of Fuel Element Under Conditions of Step Reactivity and Temperature Feedback

CHEN Wen-zhen, SHANG Xue-li, ZHANG Fan

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University  
of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The unsteady temperature field of fuel element was analyzed. Considering reactor neutron kinetics and heat transfer inside fuel element as well as the physical properties coupling temperature, the theoretical model was proposed. Using the steady difference method, the temperature variation and distribution in the cylindrical fuel element were obtained under the conditions of step reactivity and temperature feedback. The results are useful and significant for the thermal-hydraulic design and safety analysis of the nuclear reactor, especially for nuclear-powered reactors.

**Key words:** temperature field; reactivity; reactor neutron kinetics; fuel element; temperature feedback

反应堆热工安全的三大准则有两个与燃料元件的温度有关,即芯块融化与包壳烧毁。因此,确切掌握和控制动态过程燃料元件的瞬态

温度场,对反应堆的安全运行至关重要。核反应堆的启动、停闭、功率提升或降低均需通过引入不同的反应性来实现,但引入的反应性不当,

有可能危及反应堆安全。例如,向反应堆突然引入过量反应性所引起的反应性事故将导致热功率与温度急剧增加而使堆芯燃料元件损坏。因此,研究功率随输入反应性的响应规律和对应燃料元件非稳态温度分布,对处于经常变工况的船用反应堆更有现实意义。本文对燃料元件的非稳态温度场进行分析计算,结合反应堆物理、堆芯元件传热和与温度耦合的物性参数,研究给出阶跃反应性输入条件下的棒状燃料元件温度分布和变化规律。

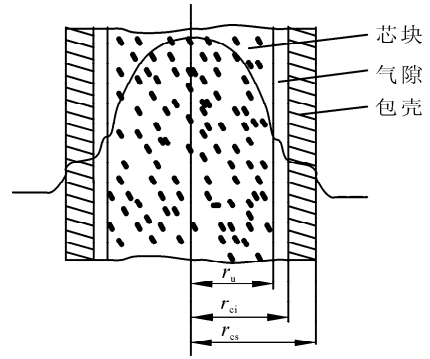


图1 棒状燃料元件内的温度分布

Fig.1 Temperature distribution in cylindrical fuel element

## 1 理论模型

### 1.1 物理模型

对处于稳定功率运行的核反应堆,可忽略外中子源的作用,单群点堆中子动力学方程为:

$$\frac{dn(\tau)}{d\tau} = \frac{[\rho(\tau) - \beta]}{l} n(\tau) + \lambda C(\tau) \quad (1)$$

$$\frac{dC(\tau)}{d\tau} = \frac{\beta}{l} n(\tau) - \lambda C(\tau) \quad (2)$$

式中: $n(\tau)$ 为中子密度,代表了核反应堆功率水平; $\tau$ 为时间; $\rho(\tau)$ 为反应性; $\beta$ 为缓发中子总份额; $l$ 为瞬发中子一代寿命; $\lambda$ 为缓发中子先驱核衰变常量; $C(\tau)$ 为缓发中子先驱核平均浓度。

如果在 $\tau=0$ 时刻突然引入一正的阶跃反应性 $\rho_0$ ,反应堆将出现瞬变。假设反应堆有负的反应性温度系数 $\alpha$ ,考虑温度反馈时,反应堆实际反应性为:

$$\rho = \rho_0 - \alpha [T_0 - T(\tau)] \quad (3)$$

式中: $T(\tau)$ 为瞬时温度; $T_0$ 为初始温度。

反应堆温度变化采用绝热模型<sup>[1-4]</sup>,有:

$$\frac{dt}{d\tau} = K_c n(\tau) \quad (4)$$

式中: $K_c$ 为反应堆热容量的倒数。

由式(3)与(4)可得:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\alpha K_c n \quad (5)$$

### 1.2 热工模型

图1所示为棒状燃料元件的结构示意图。元件从里到外依次分为芯块区( $r \leq r_u$ )、气隙区( $r_u < r \leq r_{ci}$ )、包壳区( $r_{ci} < r \leq r_{cs}$ )。热量的传输可分为4个过程,即芯块区、气隙区、包壳区的传热和包壳外表面与冷却剂的换热。对棒状燃料可假设:忽略元件的轴向导热,功率在芯块

的径向分布是均匀的;元件的几何条件和冷却条件是对称的,并保持不变。由此,可得导热的微分方程与边界条件为:

$$c_u \rho_u \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left[ K_u(t) r \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] + q(r, \tau) \quad (r < r_u) \quad (6)$$

$$c_g \rho_g \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = K_g \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \quad (r_u < r < r_{ci}) \quad (7)$$

$$c_c \rho_c \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = K_c \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \quad (r_{ci} < r < r_{cs}) \quad (8)$$

$$K_u \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_u^-} = K_g \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_u^+} \quad (9)$$

$$K_g \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_{ci}^-} = K_c \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_{ci}^+} \quad (10)$$

$$t \Big|_{r=r_u^-} = t \Big|_{r=r_u^+} \quad (11)$$

$$t \Big|_{r=r_{ci}^-} = t \Big|_{r=r_{ci}^+} \quad (12)$$

$$\frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (13)$$

包壳外表面与冷却剂的膜温降可用牛顿冷却定律来描述:

$$-K_c \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_{cs}^-} = a(t \Big|_{r=r_{cs}} - t_f) \quad (14)$$

式中: $c$ 为比热容; $\rho$ 为密度; $q$ 为体积释热率; $t$ 为温度; $r_u$ 为燃料芯块半径; $r_{ci}$ 为包壳内径; $r_{cs}$ 为包壳外径; $K_u$ 、 $K_g$ 和 $K_c$ 分别为燃料芯块、气隙和包壳材料的热导率; $a$ 为包壳表面和冷却剂间的对流放热系数; $t_f$ 为冷却剂的主流温度。

## 2 求解分析

在有温度反馈小阶跃反应性( $\rho_0 < \beta$ )输入条件下,式(1)~(5)的解采用先驱核瞬跳近似<sup>[5]</sup>求得,有:

$$n(\tau) = \frac{\lambda}{2\alpha K_c (\beta + \lambda)} \cdot$$

$$\left\{ \rho_0^2 - \left[ \frac{\rho_1 + \rho_0 - (\rho_1 - \rho_0) \exp\left(\frac{\rho_1 \lambda \tau}{\beta + \lambda l}\right)}{\rho_1 + \rho_0 + (\rho_1 - \rho_0) \exp\left(\frac{\rho_1 \lambda \tau}{\beta + \lambda l}\right)} \right] \rho_1 \right\} + n_0 \quad (15)$$

式中:  $\rho_1 = \sqrt{\rho_0^2 + 2\alpha K_c n_0 (\beta + \lambda l) / \lambda}$ 。

在有温度反馈大阶跃反应性( $\rho_0 > \beta$ )输入条件下,式(1)~(5)的解采用文献[6]的结果,有:

$$n(\tau) = \frac{1}{2\alpha K_c l} \left\{ (\rho_0 - \beta)^2 -$$

$$\left[ \frac{A + \rho_0 - \beta - [A - (\rho_0 - \beta)] \exp(A\tau/l)}{A + \rho_0 - \beta + [A - (\rho_0 - \beta)] \exp(A\tau/l)} A \right]^2 \right\} + n_0 \quad (16)$$

式中:  $A = \sqrt{(\rho_0 - \beta)^2 + 2\alpha K_c n_0}$ 。

对一典型的压水堆燃料元件,物性参数取经验值或经验关系式(表1)。设某反应堆稳定运行在初始功率为 $n_0$ 下,元件芯块体积功率密度 $q_0 = 9.05 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ ,假如反应堆阶跃引入一个小的正反应性 $\rho_0 = 2\beta/3$ ,根据上面小阶跃反应性输入时点堆方程的求解结果式(15),并取反应堆物理参数<sup>[4-5]</sup>  $\beta = 0.0065$ ,  $l = 0.0001 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0.0774 \text{ s}^{-1}$ ,  $K_c = 0.05 \text{ K/(MW} \cdot \text{s)}$ ,  $\alpha = 5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。由于堆的功率 $q(\tau)$ 与中子通量成正比,即:

$$q(\tau)/q_0 = n(\tau)/n_0 \quad (17)$$

根据式(15)和(17),求得阶跃引入一个小的正反应性 $\rho_0 = 2\beta/3$ 时燃料元件功率密度随时间的变化如图2所示。压水堆的负反馈特性

会抑制堆芯功率的增长,因此,从图2可见,功率密度先是增长,约在17 s时达到最大值 $q = 1.4674 \times 10^9 \text{ W/m}^3$ ,尔后开始下降。

利用无稳定性限制的隐式差分法,即Crank-Nicholson法对反应堆在此动态过程中非稳态温度场进行求解。不同时间燃料元件温度场的变化示于图3。

元件中心温度与包壳外表面温度变化曲线如图4所示。元件中心点温度在20.5 s时达到最大值1713.4 °C后开始下降,包壳外表面温度几乎同时达到最大值318 °C后开始下降。可见,元件温度达到最大值的时间比功率达到最大值的时间晚约3 s,这归因于非稳态过程中的内外导热不平衡。同时还可看出,在此反应性扰动下,芯块中心点温升为616 °C,包壳温升16.8 °C,不会影响到燃料元件的结构安全性。

图5为此动态过程的非稳态温度场三维图。由图5可见,在这一过程中,任意时刻的径向温度曲线大致保持抛物线形状,任意一点的温度随时间的变化均是先升高,尔后又逐渐降低,而中心温度增长的幅度为最大。从图5可直观地看出,在引入小阶跃反应性后的整个功率波动过程中元件内各点在各时刻的温度,从而可清楚地判断燃料元件的动态特性。

同样,在有温度反馈大阶跃反应性( $\rho_0 > \beta$ )输入条件下采用式(16)的功率响应规律,也可获得元件的温度场。

## 3 结语

本文对有温度反馈阶跃输入反应性条件下反应堆燃料元件的非稳态温度场进行分析计算,给出了相应的物理数学模型以及与温度耦合的燃料元件物性参数和稳定的数值算法。通过实例计算分析,得到了燃料元件温度的时空

表1 燃料元件物性参数  
Table 1 Physical properties of fuel element

参数	燃料芯块	气隙	包壳
导热系数/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$(0.035 + 2.25 \times 10^{-4} \times (273 + t))^{-1} + 83.0 \times 10^{-12} (273 + t)^3$	0.2	$0.00547(1.8t + 32) + 13.8$
比热/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\frac{22.96 \times 10^6 e^{535.3/t}}{0.302t^2 (e^{535.3/t} - 1)^2} + \frac{6.57}{0.302} \times 10^{-3} t + \frac{44.8}{0.302} e^{(-0.000189/t)}/t^2$	5190	$286.5 + 0.1t (t < 750^{\circ}\text{C})$ $360 (t \geq 750^{\circ}\text{C})$
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$10.4 \times 10^3$	1.5	$6.55 \times 10^3$

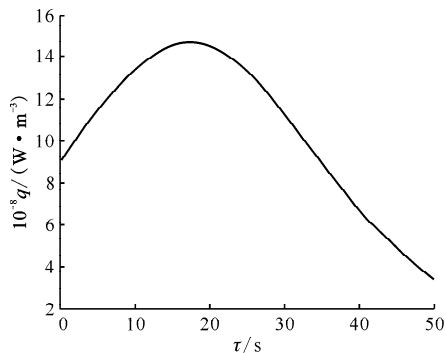


图 2 有温度反馈小阶跃反应性输入燃料元件功率密度变化

Fig. 2 Power density characteristic of fuel element under conditions of step reactivity and temperature feedback

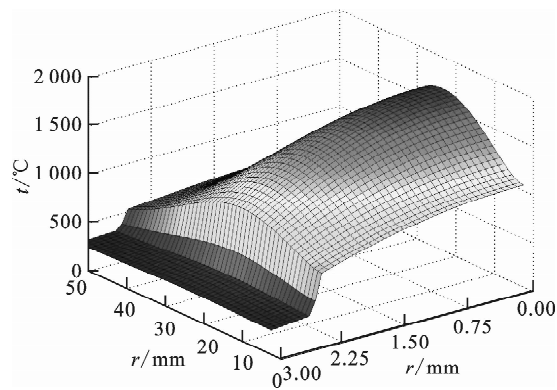


图 5 燃料元件三维非稳态温度场

Fig. 5 Unsteady three dimensional temperature field of fuel element

变化规律,有利于掌握和判断芯块是否熔化、包壳是否烧毁,对堆芯设计和运行安全分析有重要的参考价值,特别对于处于经常变工况的核动力反应堆更有现实意义。

参考文献:

[1] 凌备备,杨延洲. 核反应堆工程原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.  
 [2] 张法邦. 核反应堆运行物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.  
 [3] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1983.  
 [4] 蔡章生. 核动力反应堆中子动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
 [5] 陈文振,朱波,黎浩峰. 小阶跃反应性输入时点堆中子动力学方程的解析解[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 80-84.  
 CHEN Wenzhen, ZHU Bo, LI Haofeng. The analytic solutions of point-reactor neutron-kinetics equation with small step reactivity[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 80-84(in Chinese).  
 [6] CHEN Wenzhen, KUANG Bo, GUO Lifeng, et al. New analysis of prompt supercritical process with temperature feedback[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 1 326-1 329.

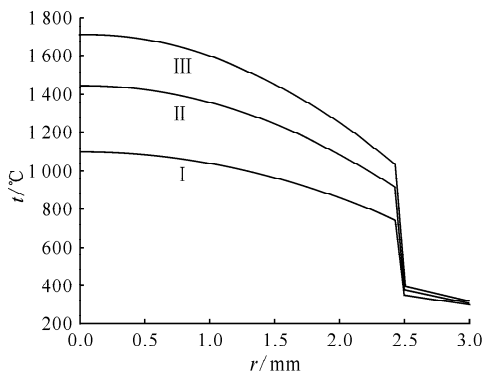


图 3 不同时间燃料元件温度场的变化

Fig. 3 Temperature distribution of fuel element at different time

I —— 初始时刻; II —— 10 s; III —— 20 s

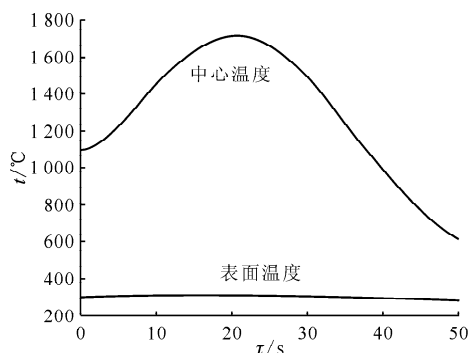


图 4 燃料元件中心和表面温度的变化

Fig. 4 Variation of temperatures at center and surface of fuel element