

# 基于 Hermite 插值法的板型燃料不对称冷却计算

陈章隆

(中国核电工程有限公司, 北京, 100840)

**摘要:** 通过 Hermite 插值积分理论列出积分平均值与边界条件的关系, 进而建立板型燃料芯体及其左右包壳的导热方程, 利用 Fortran 科学计算语言对所建立的数学模型编译求解程序。将求解程序加入到反应堆热工水力实时仿真程序 THEATRe 中进行不对称冷却问题的计算, 并对 THEATRe 程序的输入卡进行修改。通过计算中国先进研究堆(CARR)的标准燃料组件和跟随体燃料组件的稳态温度分布, 与现有参考结果进行对比验证求解程序的正确性。最后模拟分析板型燃料组件流道堵塞事故。

**关键词:** 板状燃料; Hermite 插值积分; 不对称冷却

中图分类号: TL352

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0132-06

## Asymmetrical Cooling Calculation of a Plate-type Fuel Reactor Based on Hermite Interpolation Method

CHEN Zhanglong

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** This paper through the integration of the Hermite interpolation theory of integral average relationship with the boundary conditions, build the plate type fuel pellets and the heat conduction equation of cladding, Use of the Fortran compiler to solve the mathematical model is established. Add the solver to reactor thermohydraulic asymmetrically cooling problems in real-time simulation program calculation by THEATRe, Modify the program input card. By calculating the steady state of in standard fuel assembly and follower fuel assembly distribution of temperature in CARR, Compared with the results in the literature to prove the validity of the program. Finally simulated plate type fuel assembly flow blockage accident.

**Key words:** slab fuel; hermite; asymmertrical cooling

核反应堆的燃料组件结构繁多, 在这些结构中由多块矩形燃料板平行排列而成的板状燃料组件在核反应堆中有一定的应用。因为板状燃料组件的结构特殊, 不同于一般的燃料棒, 所以成为了工程技术人员研究的热点。相比于棒状燃料组件, 板状燃料元件组件有着以下特点: 结构紧凑, 传热好, 燃料芯体温度低, 燃耗高, 具有较高释热率和换热效率, 从而可以大幅度提高堆芯的功率体积比。板状燃料组件的这些特点令较小体积的反应堆可以提供较高的堆功率, 能够满足人们对动力装置与设备小

型化的要求。也正是因为这些特点, 板状燃料组件在一体化反应堆与教学、培训、实验等用途的实验研究堆中有着极大的应用。

由于现有的 THEATRe 程序没有考虑板型燃料两侧的不对称冷却情况, 这在实际的仿真中不能完全模拟出实际的堆芯热工水力条件, 本文的研究可以更准确的分析不对称冷却条件下板型燃料元件的温度分布。

### 1 板型燃料的模型建立

由于设计尺寸不同或加工精度的偏差, 组件内部冷却剂通道缝隙宽度可能是不一致的; 或者由于燃料辐照肿胀起泡、燃料表面结垢、堆内材料碎片进入等原因导致某个流道堵塞。使得燃料板两侧热

工水力条件不同, 两侧冷却剂冷却燃料板能力不同, 这样燃料最高温度就不在燃料几何中心线上, 此时即为不对称冷却。而现在的仿真程序没有考虑燃料元件两侧的不对称冷却情况, 这在实际的仿真中不能完全模拟出实际的堆芯情况。不对称冷却问题的难点在于燃料最高温度的位置难以确定, 不能通过直接积分得到燃料芯块平均温度与燃料内部各界面温度的关系式。本文利用 Hermite 插值积分, 给出边界条件和积分平均值之间的关系, 提出了一种改进的集总参数模型来求解板状燃料元件不对称冷却问题。

对  $[a, b]$  区间上的连续函数  $f(x)$ , Hermite 两点插值积分表达式为:

$H_{0,0}$  近似:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] + \frac{(b-a)^2}{12} [f'(a) - f'(b)] \quad (1)$$

$H_{1,1}$  近似:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] \quad (2)$$

## 1.1 板型燃料基本结构

燃料芯块内裂变释放出来的热量经导热传给燃料包壳, 再由对流换热通过包壳传给冷却剂。图1是板状燃料元件导热示意图。燃料芯块厚度为  $\delta_u$ , 燃料包壳厚度为  $\delta_c$ 。由于燃料元件一般为长而薄的平板, 轴向导热热阻要远大于横向导热热阻, 因此可以忽略其轴向导热, 仅考虑横向导热, 因此可以用一维瞬态热传导方程求解燃料温度。

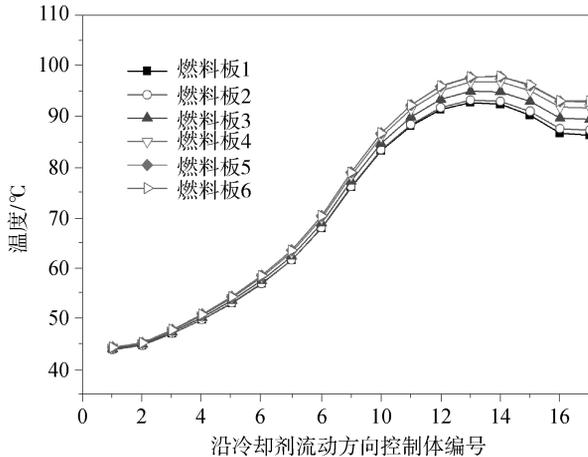


图1 板状燃料元件温度分布示意图

Fig. 1 Distribution of Temperature in Plate Type Fuel Pellet

对于燃料芯块有:

$$(\rho c_p)_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \lambda_u \frac{\partial^2 T_u}{\partial x^2} + q_u^m \quad (3)$$

对于燃料包壳有:

$$(\rho c_p)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_p$  为比热容,  $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ;  $\lambda$  为热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $q_u^m$  为燃料芯块功率密度,  $\text{W/m}^3$ 。

板状燃料芯块和包壳之间不存在气隙, 在这里假设芯块和包壳压实紧密接触, 两者之间没有接触热阻。则包壳内表面和燃料芯块之间为连续性边界条件:

左侧:

$$\left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} \right)_n = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} \right)_c \text{ 和 } T_c \Big|_{x=\delta_c} = T_u \Big|_{x=\delta_c^+} = T_{cir} \quad (5)$$

右侧:

$$\left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_n} \right)_n = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_n} \right)_c \text{ 和 } T_c \Big|_{x=(\delta_c + \delta_n)^-} = T_u \Big|_{x=(\delta_c + \delta_n)^+} = T_{cir} \quad (6)$$

式中:  $T_{cil}$  为燃料包壳左侧内表面温度,  $\text{K}$ ;  $T_{cir}$  为燃料包壳右侧内表面温度,  $\text{K}$ 。

包壳外表面和冷却剂之间为第三类边界条件:

左侧:

$$\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 = h_l (T_{col} - T_{fl}) \quad (7)$$

右侧:

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{2\delta_c + \delta_n} = h_r (T_{cor} - T_{fr}) \quad (8)$$

式中:  $T_{col}$  为燃料包壳左侧外表面温度,  $\text{K}$ ;  $T_{cor}$  为燃料包壳右侧外表面温度,  $\text{K}$ ;  $T_{fl}$  为燃料包壳左侧冷却剂温度,  $\text{K}$ ;  $T_{fr}$  为燃料包壳右侧冷却剂温度,  $\text{K}$ 。

## 1.2 板型燃料不对称冷却问题分析

利用 Hermite 两点插值积分表达式即可给出温度平均值、边界热流密度和温度之间的关系。

计算时做如下假设:

- 1) 忽略燃料轴向导热, 仅考虑横向导热。
- 2) 燃料芯块的热物性取决于芯块的平均温度, 燃料包壳的热物性取决于包壳的平均温度。
- 3) 芯块温度分布用二次曲线近似, 包壳内温度

分布用直线近似。

4) 包壳和芯块紧密结合在一起, 中间没有气隙。

采用  $H_{1,1}$  近似计算燃料芯块的积分平均温度:

$$T_n = \frac{1}{\delta_n} \int_{\delta_c}^{\delta_c + \delta_n} T_n = \frac{1}{2} (T_{cil} + T_{cir}) + \frac{\delta_n}{12} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_n} \right)_n \quad (9)$$

采用  $H_{0,0}$  近似计算燃料包壳积分平均温度和积分平均热流密度:

$$\bar{T}_{cl} = \frac{1}{2} (T_{cil} + T_{col}) \quad (10)$$

$$\bar{T}_{cr} = \frac{1}{2} (T_{cir} + T_{cor}) \quad (11)$$

$$\int_{\delta_c}^{\delta_c + \delta_n} \frac{\partial T}{\partial x} dx = T_{cir} - T_{cil} = \frac{\delta_n}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} + \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_n} \right)_n \quad (12)$$

$$\int_0^{\delta_c} \frac{\partial T}{\partial x} dx = T_{cil} - T_{col} = \frac{\delta_c}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} + \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 \right)_c \quad (13)$$

$$\int_{\delta_c}^{2\delta_c} \frac{\partial T}{\partial x} dx = T_{cir} - T_{cir} = \frac{\delta_c}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{2\delta_c} + \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} \right)_c \quad (14)$$

对导热方程燃料芯块和燃料包壳在空间坐标进行积分, 并应用边界条件(5)~(7)同时代入式(2)、式(10)~式(13), 可以得到燃料芯块、左侧包壳和右侧包壳平均温度的微分方程:

$$(pc_p)_u \delta_u \frac{dT_u}{dt} = \lambda_u \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_u} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} \right)_u + q_u^m \delta_u = \lambda_u \frac{6}{\delta_u} (-2T_u + T_{cil} + T_{cir}) + q_u^m \delta_u \quad (15)$$

$$(pc_p)_c \delta_c \frac{dT_c}{dt} = \lambda_c \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 \right)_c = \lambda_u \frac{2}{\delta_u} (3T_u - 2T_{cil} - T_{cir}) - h_1 (T_{col} - T_y) \quad (16)$$

$$(pc_p)_c \delta_c \frac{dT_{cr}}{dt} = \lambda_c \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{2\delta_c + \delta_u} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\delta_c + \delta_u} \right)_c \delta_u = \lambda_u \frac{2}{\delta_u} (3T_u - 2T_{cir} - T_{cil}) - h_r (T_{cor} - T_y) \quad (17)$$

联立方程可得:

$$T_{col} + T_{cil} = 2T_{cl} \quad (18)$$

$$T_{cor} + T_{cir} = 2T_{cr} \quad (19)$$

$$(1+2A_l)T_{cil} + A_l T_{cir} - (1+B_l)T_{col} = 3A_l T_n - B_l T_y \quad (20)$$

$$(1+2A_r)T_{cir} + A_r T_{cil} - (1+B_r)T_{cor} = 3A_r T_n - B_r T_y \quad (21)$$

$$\text{式中: } A_l = \frac{\delta_c \lambda_{cl}}{\delta_u \lambda_u}, A_r = \frac{\delta_c \lambda_{cr}}{\delta_u \lambda_u}, B_l = \frac{\delta_c h_l}{2 \lambda_{cl}}, B_r = \frac{\delta_c h_r}{2 \lambda_{cr}}.$$

求解方程(17)~式(21)即可求得燃料内部各界面温度。若假设燃料芯块内温度分布为二次曲线形式  $T_u = ax^2 + bx + c$ , 则可根据  $\delta_c$  和  $\delta_c + \delta_u$  处温度和热流密度值, 求出燃料最高温度和所在位置。

## 2 基于 THEATRe 程序的计算

为了研究中国先进研究堆燃料组件仿真, 首先需要建立起反应堆板状燃料组件的仿真模型, 根据仿真结果的需求选取了美国 GSE 公司开发的核动力装置热工水力仿真软件 THEATRe (Thermal Hydraulic Engineering Analysis Tools in Real Time) 程序是由美国 GSE 公司开发的反应堆热工水力实时仿真分析工具。将所编写的 FORTRAN 算法程序移植到 THEATRe 仿真软件中, 准备填写 CARR 堆的输入卡。

中国先进研究堆 (CARR) 是我国自主设计和建造的一座多用途、高性能研究反应堆。其堆芯由 17 个几何结构相同的标准燃料组件 (编号 1~17) 和 4 个几何结构相同的控制棒-跟随体组件 (编号 18~21) 构成。其中标准燃料组件平行排列了 21 块燃料板, 从燃料组件左右外侧向内侧开始冷却剂流道间隙不同, 从左右外侧开始间隙分别为 1.56 mm、2.59 mm、2.45 mm、2.32 mm, 其余冷却剂流道间隙都为 2 mm。跟随体燃料组件平行排列了 17 块燃料板, 除了最外侧冷却剂流道间隙为 3.94 mm, 其余间隙流道都为 2.25 mm。根据 CARR 的结构与功率份额参数结合以上数据填写 THEATRe 程序的输入卡。

## 3 数值计算结果及分析

利用所编程序计算 CARR 堆稳态工况下, 各燃料组件间流量分配、燃料组件内流量分配问题和组件内部温度场分布。计算时每个燃料组件划分为一个通道, 每个冷却剂通道轴向上均匀划分为 17 个控制体。

### 3.1 CARR 额定运行工况下稳态仿真结果

在计算标准燃料组件选择组件 9, 跟随体燃料组件选择组件 18, 在计算时假设组件内燃料径向功率均匀分布。

#### 3.1.1 流量分配计算结果

图 2 和图 3 分别给出了 CARR 中标准燃料组件

和跟随体燃料组件内部流量分配计算结果，计算中标准燃料组件选择组件 9，跟随体燃料组件选择组件 18，在计算时假设组件内燃料径向功率均匀分布。从计算结果可以看出，流量分配主要受流道的尺寸影响，间隙宽的流道，冷却剂流量分配份额较大。从图中还可以看出本文计算结果和现有参考结果符合较好。

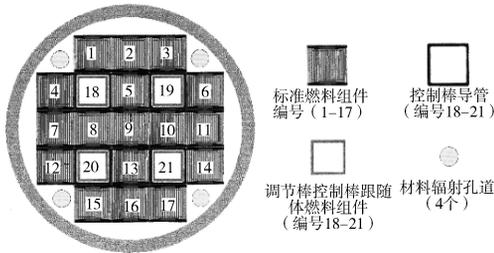


图 2 CARR 堆芯燃料布置图

Fig. 2 Core Fuel Position Arrangement of CARR

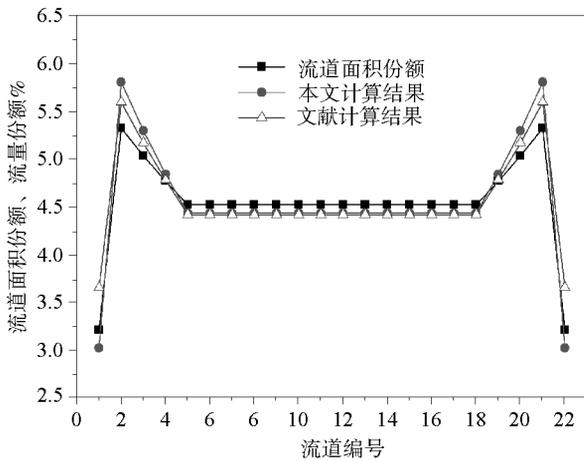


图 3 CARR 标准燃料组件流量分配

Fig. 3 The Standard Fuel Assembly Flow Distribution of CARR

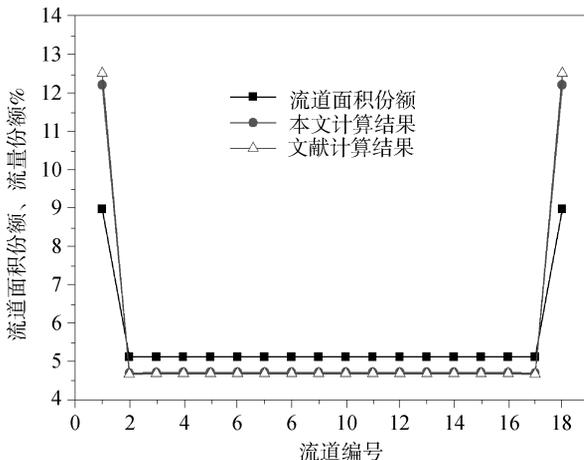


图 4 CARR 跟随体燃料组件流量分配

Fig. 4 The Following Fuel Assembly Flow Distribution of CARR

表 1 标准体组件冷却剂计算结果比较

Table 1 Stangard Fuel Components Coolant Calculation Results

流道编号	冷却剂最高温度/°C	
	本文计算结果	现有参考结果
1	53.97	51.21
2	55.14	54.96
3	56.80	56.91
4	58.82	58.73
5	60.77	60.43
6	61.00	60.65

表 2 标准体组件温度计算结果比较

Table 2 Stangard Fuel Component Temperature Calculation Results

流道编号	燃料芯块最高温度/°C	
	本文计算结果	现有参考结果
1	92.73	85.52
2	93.22	87.81
3	94.98	89.16
4	96.82	90.49
5	97.86	91.14
6	97.92	91.19

### 3.1.2 组件内温度分布计算结果

从以上分析和计算结果可以看出，由于 CARR 燃料组件中边界流道尺寸不一致，各流道内冷却剂流量是不一样的，使得燃料元件两侧冷却条件不一样，这时燃料元件为非对称冷却。图 4 和图 5 分别显示了标准燃料组件 9 内冷却剂温度和燃料芯体最高温度沿流动方向分布。

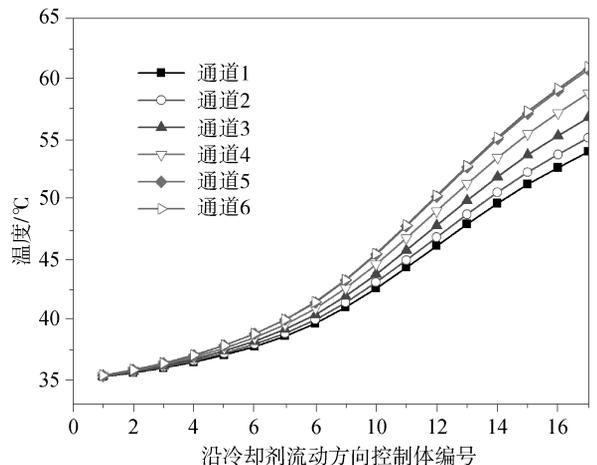


图 5 CARR 标准燃料组件冷却剂温度

Fig. 5 Coolant Temperature Standard Fuel Components of CARR

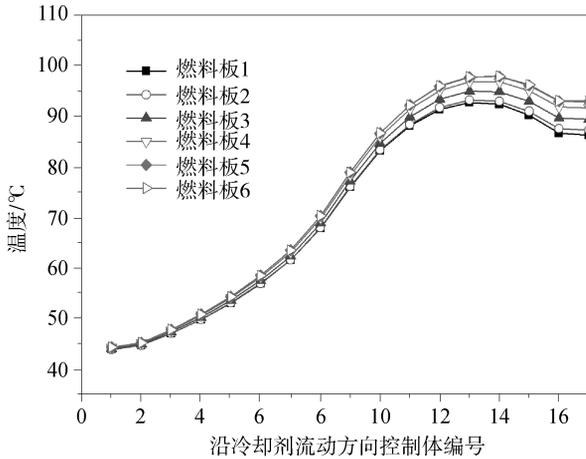


图6 CARR标准燃料组件燃料芯块最高温度

Fig. 6 The Highest Temperature Standard Fuel of CARR

从图中可见，组件最边缘通道1冷却剂温度最低，但与其它流道温度相差不大，这是由于边缘通道只有单侧燃料板加热，但同时流道间隙最窄，流量分配份额最小。由外而内流道冷却剂温度逐渐升高，这是由于冷却剂通道逐渐变窄，通道冷却剂流量减小，在燃料功率相同的情况下，温度升高较多。燃料组件内部的通道5和通道6的温度分布基本相同。燃料板5和燃料板6的燃料最高温度也分布基本相同，这说明组件边缘流道由于流量分配不均而导致为非对称换热，内部间隙相同的流道流量分配均匀为对称换热。表1和表2为本文计算结果和参考结果比较，从比较可以看出，冷却剂温度计算结果与参考结果符合较好，但燃料温度整体偏高，这可能是获得的燃料芯体物性不够准确造成的。

### 3.2 组内单一通道堵塞事故稳态仿真结果

在板状燃料堆芯中，冷却剂通道之间彼此相隔，通道之间没有流动交混。因此当某个燃料组件内流道传热恶化时，可能由于热量不能及时导出而造成恶劣通道热工水力条件更加恶劣，直至燃料烧毁。板状燃料堆芯中冷却剂通道大都比较狭窄，在运行中由于燃料辐照起泡，燃料板结垢或异物堵塞通道等工况，使得冷却剂通道局部堵塞而造成传热恶化，因此有必要对这一现象进行分析。

事故描述：如图6所示，假设在额定工况下，10s时CARR堆芯标准组件11、12的中间流道(编号12)发生流道堵塞事故，在1s内流道流通面积被堵塞90%。假设在堵流事故中不能停堆。由于点堆

模型不能反映局部热工水力参数变化对局部功率的影响，因此在瞬态计算时采用保守估计，认为组件功率在堵流后保持不变，同时各燃料板间功率均匀分布。

图7为堵流事故后，被堵塞流道所在的燃料组件11冷却剂流量变化曲线。从图中可以看出，组件内一个小流道堵塞对整个组件流量影响很小，通过组件的冷却剂流量仅由11.88kg/s下降至11.86kg/s。从下图7中可以看出被堵的通道12流量迅速降低，其它通道的流量均有所增加，与被堵通道相邻的通道11和通道13流量增加的更多一些。这是由于通道12堵塞后两侧燃料板的热量传给另一侧冷却剂通道11和13，使得这两个通道受热功率增加，而且从以上计算结果看出，对于CARR功率份额高的通道，其流量份额也高，因此与被堵流道相邻两个流道，流量增加的更多些。

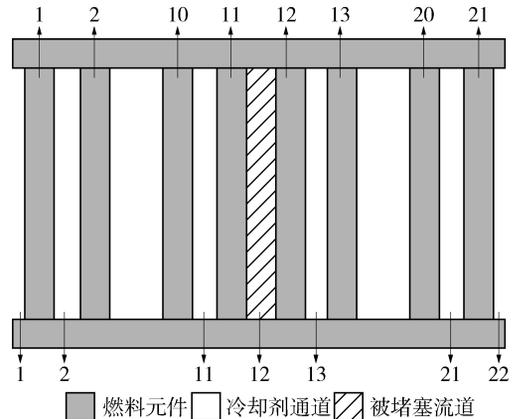


图7 单一通道堵塞示意图

Fig. 7 Single Channel Block Diagrammatic Sketch

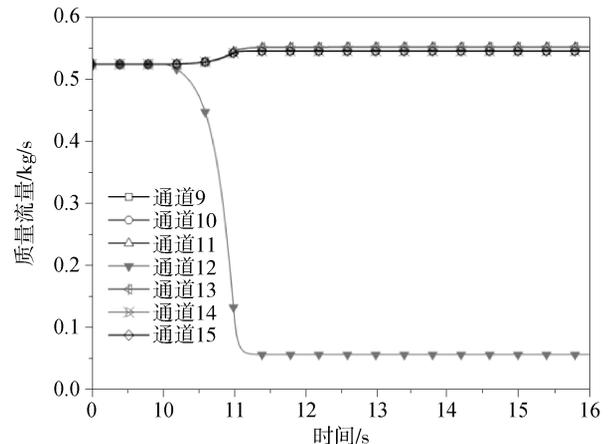


图8 组件内流量分配

Fig. 8 Flow Distribution Within the Fuel Subassembly

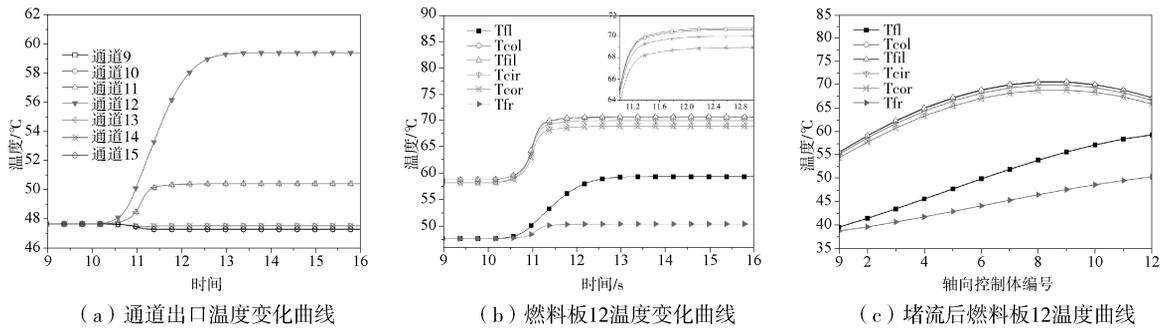


图 9 通道出口、燃料板 12 和堵流后燃料板 12 温度变化曲线

Fig. 9 Temperature Variation Curve of the Channel Outlet, the Fuel Slab 12 Before and After Blockage

图 8 为堵流事故中组件内各通道出口冷却剂温度计算结果。堵流后通道 12 流量减小，冷却剂温度升高。相邻通道 11 和 13 尽管流量有所增加，但是堵流通道两侧燃料板对通道 11 和 13 加热功率也增加，因此这两个通道冷却剂出口温度增加，其余通道冷却剂出口温度由于冷却剂流量增加而都有所降低。图 9 为被堵通道右侧燃料板 12 温度场计算结果。堵流前燃料板 12 两侧为对称传热，其温度场为对称分布有： $T_{cil} = T_{cir}$ ， $T_{col} = T_{cor}$ ， $T_{fl} = T_{fr}$ ，且  $T_{ci} > T_{co} > T_f$ 。堵流后，燃料板 12 左侧对流传热减弱，两侧为不对称传热，温度场为不对称分布，其中  $T_{cil} > T_{col} > T_{cir} > T_{cor} > T_{fl} > T_{fr}$ 。其中： $T_{fl}$ ——燃料左侧通道冷却剂温度， $T_{col}$ ——燃料板左侧包壳外表面温度， $T_{cil}$ ——燃料板左侧包壳内表面温度， $T_{cir}$ ——燃料板右侧包壳内表面温度， $T_{cor}$ ——燃料板右侧包壳外表面温度， $T_{fr}$ ——燃料右侧通道冷却剂温度。

#### 4 结论

本文通过 Hermite 插值积分理论列出求解方程，利用 Fortran 语言将方程转换为算法程序，并将算法

程序移植加入反应堆热工水力实时仿真程序 THE-ATRe 中。通过计算中国先进研究堆 (CARR) 的标准燃料组件和跟随体燃料组件的稳态温度分布，并与参考数值对比验证了此种方法的可行性。应用该方法模拟板型燃料组件流道堵塞事故，可以更准确的分析出不对称冷却条件下燃料元件的温度分布。

#### 参考文献：

- [1] 卢庆, 秋穗正, 田文喜, 等. 板状燃料元件堆芯流量分配及不对称冷却计算研究[J]. 核动力工程, 2008(2): 24-29.
- [2] 张志俭, 李磊, 郭赞. 板状燃料反应堆热工水力实时仿真程序研究与开发[J]. 核动力工程, 2010(6): 56-63.
- [3] 卢庆, 张志俭, 秋穗正, 苏光辉, 田文喜. 板状燃料元件堆芯热工水力特性分析程序开发及验证[J]. 核动力工程, 2009(5): 26-29.
- [4] ALHAMA F, CAMPO A. The Connection Between the Distributed and Lumped Models for Asymmetric Cooling of Long Slabs by Heat Convection [J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer. 2001, 28(2): 127-137.

(责任编辑 高春萌)

## 广 告

广东阳江核电站工程 ..... 封二  
 广西防城港核电站工程 ..... 封三  
 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ..... 封底