

# 中国实验快堆一回路热工水力 稳态计算程序开发

饶彧先<sup>1,2</sup>, 崔满满<sup>1</sup>, 郭 贇<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对中国实验快堆(CEFR)的具体结构和稳态运行特点, 利用 Fortran 语言开发了 CEFR 一回路热工水力稳态计算程序。重点开发了有关钠的多种物性的子程序、适应不同工况的钠的流动与换热计算子程序, 并对关系式进行了对比分析, 最后建立了稳态计算模型并开发了程序。在此基础上, 对CEFR的一回路系统在满功率下的稳态热工水力特性进行了计算分析, 所获得的结果同设计参数吻合, 证明了所开发的子程序及稳态程序的正确性。

**关键词:** 钠冷快堆; 热工水力; 稳态计算

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)09-1067-07

## Development of Thermal-Hydraulic Steady-State Analysis Program for Primary Loop of China Experimental Fast Reactor

RAO Yu-xian<sup>1,2</sup>, CUI Man-man<sup>1</sup>, GUO Yun<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** According to the characteristics of structure and steady-state for primary loop of China Experimental Fast Reactor (CEFR), a thermal-hydraulic steady-state analysis program was developed by using Fortran language. This paper focused on the development of a set of subroutine of physical properties of sodium and the sodium flow and heat transfer correlations for different operation conditions. And the difference among these correlations was compared. The calculation program was developed based on the steady model. At last, the thermal-hydraulic characteristics of steady-state of the primary loop of CEFR at full power were calculated. The calculation results are consistent with the design parameters and the correctness of the developed subroutines and steady-state calculation program was proved.

**Key words:** sodium cooled fast reactor; thermal-hydraulic; steady-state calculation

CEFR 为钠冷池式快中子增殖实验研究型反应堆,具有钠-钠-水与蒸汽 3 个回路的热传输系统,于 2010 年 7 月达到首次临界。由于钠作为载热剂具有很好的传热特性及能使系统在常压下工作等特点,国内外的大部分快堆及 CEFR 均使用钠作为冷却剂。因此钠的热工水力性质便是研究 CEFR 热工水力过程的必备条件。近几十年来,国内外关于钠的热工水力性质研究取得了很大进展<sup>[1-5]</sup>。在对钠的热工性质进行研究的基础上,我国针对 CEFR 燃料组件和中间热交换器等部件的热工水力过程进行了计算研究,但针对 CEFR 一回路系统的热工水力过程开展的计算研究还不多。本研究着重于开发钠冷快堆计算的物性、流动与换热子程序库及一回路系统的稳态计算程序,并进行 CEFR 一回路系统在满功率下的稳态热工水力问题的计算,其结果同设计参数进行对比分析,以验证所开发程序的正确性。

## 1 系统描述

CEFR 的热功率为 65 MW,电功率为 20 MW。其一回路采用池式布置,2 台主泵、4 台中间热交换器和堆芯均布置在 1 个直径约 8 m、高约 12 m 的钠池(主容器)中,内装用氩气保护的 260 t 液态金属钠<sup>[6]</sup>。堆芯由 81 盒缠有绕丝的六角形燃料组件、8 盒控制和安全组件、337 盒不锈钢反射层组件和 230 盒 B4C 屏蔽组件及 56 个供乏燃料初级贮存的位置组成。中间热交换器为管壳型换热设备,主要由管束、压力室、排放室、中心管、屏蔽部件和保护套组成。一回路系统流程图示于图 1。整个堆本体支撑在容器下部的支撑结构上,堆芯布置在主容器内的正下方,一次钠循环泵将钠池冷区中的液钠打入堆芯,液钠流经堆芯后被加热到一

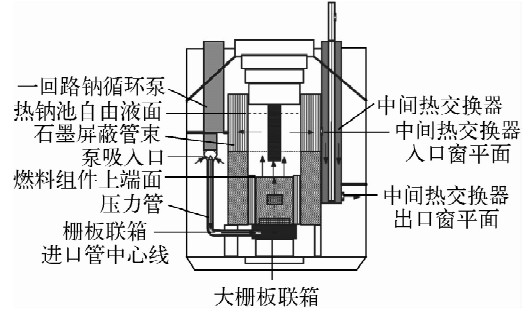


图 1 CEFR 一回路系统流程图

Fig. 1 Schematic of primary loop for CEFR

定温度;从堆芯出来后的液钠与冷却其他组件的液钠混合,温度降低并进入中间热交换器中,经热交换器将热量传递给二次侧液钠后温度降低再流回冷钠池,从而完成一次循环。

## 2 CEFR 一回路稳态计算程序开发

### 2.1 物性模型

物性子程序包含了所有用到的液钠物性值,具体的物性公式列于表 1。

对于液钠的焓,可利用 Maxwell 方程进行求解<sup>[7]</sup>,即:

$$h_L = h_f - \frac{A}{\rho} \left[ 1 + \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] (p - p_{\text{sat}}) \quad (1)$$

$$h_f = 2\,326 [0.389\,352(1.8T) - 0.552\,955 \times 10^{-4}(1.8T)^2 + 0.113\,726 \times 10^{-7}(1.8T)^3 - 29.023] \quad (2)$$

$$p_{\text{sat}} = \frac{303\,266}{(1.8T)^{0.5}} \exp\left(\frac{-23\,073.3}{1.8T}\right) \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = -0.229\,76 - 2.920\,98 \times 10^{-5}t + 1.691\,304 \times 10^{-8}t^2 \quad (4)$$

式中: $h_L$  为液钠在一定压力和温度下的焓, J/kg; $h_f$  为液钠在一定温度下的饱和焓, J/kg; $A$  为常数,  $A=1\,013.9$  kJ/(MPa·m<sup>3</sup>); $p$  为液

表 1 液钠的物理性质

Table 1 Physical properties of liquid sodium

名称	计算公式	单位
导热系数	$\lambda=92.95-0.058t+1.17 \times 10^{-5}t^2$	W/(m·°C)
比定压热容	$c_p=1\,436.05+(4.625 \times 10^{-5}t-0.580\,2)t$	J/(kg·°C)
密度	$\rho=950.076-0.229\,76t-1.460\,49 \times 10^{-5}t^2+5.637\,88 \times 10^{-9}t^3$	kg/m <sup>3</sup>
动力粘度	$t \leq 500\text{ °C}, \mu=0.123\,5 \times 10^{-4} \rho^{\frac{1}{3}} \exp(0.697\rho/T)$ $t > 500\text{ °C}, \mu=0.085\,1 \times 10^{-4} \rho^{\frac{1}{3}} \exp(1.04\rho/T)$	Pa·s
表面张力	$\sigma=0.206\,7-0.1 \times 10^{-3}t$	N/m

钠的压力,MPa; $p_{sat}$ 为对应温度下的饱和压力,MPa; $T$ 为液钠的热力学温度,K; $\rho$ 为液钠的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $t$ 为液钠的摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$ ;下标 $p$ 表示对 $p$ 求偏导。

## 2.2 一回路系统换热模型

对于液态金属钠,流道的几何形状对其热传递特性有一定影响<sup>[2]</sup>。因此换热子程序考虑了液钠在不同截面形状流道内的换热关系式,在本研究的满功率稳态工况堆芯内计算时,选用的是液钠在圆管内的换热关系式,其余模型作为备用。

### 1) 平板

平板公式可计算液钠流经平板结构的热交换设备时的换热系数。在湍流情况下,平行板流道中一壁面均匀热流密度,另一壁面绝热时,可采用关系式<sup>[2]</sup>为:

$$Nu = 5.8 + 0.02Pe^{0.8} \quad (5)$$

双壁面传热,两面的热流密度相等时,可采用关系式<sup>[2]</sup>为:

$$Nu = 9.49 + 0.0596(\bar{\psi}Pe)^{0.688} \quad (6)$$

式中: $Pe$ 为贝克莱数; $\bar{\psi}$ 为湍流热扩散率与湍流动量扩散率之比,可由下式计算:

$$\bar{\psi} = 1 - \frac{1.82}{Pr(4.0 + 0.002897Re^{0.919})^{1.4}} \quad (7)$$

式(5)和(6)适用于 $Pe < 5 \times 10^3$ 的情况。

### 2) 圆管

圆管公式可计算液钠流经圆管结构的热交换设备时的换热系数,也可近似计算液钠流经堆芯时的换热系数。早期,Seban等针对液钠在圆管内的换热特性进行了实验研究并提出了相应的关系式<sup>[1]</sup>: $Nu = 5.0 + 0.025Pe^{0.8}$ ,文献[8]便是使用该式计算换热系数。中国原子能科学研究院石双凯等<sup>[3]</sup>针对液钠在圆管内的换热特性也进行了实验研究,实验结果表明:在低 $Pe$ 工况下,Seban公式的计算值偏高。通过对实验数据的拟合,石双凯等提出了新的关系式如下。

当 $Pe > 100$ 时:

$$Nu = 4.8 + 0.024Pe^{0.8} \quad (8)$$

当 $Pe \leq 100$ 时:

$$Nu = 4.36 + 0.013Pe \quad (9)$$

### 3) 环管

环管公式可计算液钠流经环管结构的热交

换设备时的换热系数,譬如中间热交换器等,也可近似计算液钠流经堆芯时的换热系数<sup>[9]</sup>。西安交通大学张贵勤针对液钠在环管内的换热特性进行了实验研究,结果表明,在高 $Pe$ 工况下Dwyer公式<sup>[2]</sup>的计算值明显高于实验值。通过对实验数据的拟合,张贵勤提出了新的关系式<sup>[9]</sup>:

$$Nu = (4.6 + 0.015Pe^{0.78})(d_2/d_1)^{0.3} \quad (10)$$

式(10)适用于 $0.004 < Pr < 0.0075$ ,  $200 < Pe < 1400$ ,  $1.5 < d_2/d_1 < 3.0$ 的情况。

### 4) 棒束

使用圆管和环管公式可近似计算液钠流经堆芯时的换热系数。但如果对所研究堆芯内棒束几何参数有足够了解,则可采用一些针对棒束的关系式。譬如Kazami和Carelli针对CRBRP(Clinch River Breeder Reactor Plant)给出如下关系式<sup>[5]</sup>:

$$Nu = [-16.15 + 24.96P/D - 8.55(P/D)^2]Pe^{0.3} \quad (11)$$

式中: $P$ 、 $D$ 分别为燃料棒栅距和直径,mm。

式(11)适用于 $1.05 \leq P/D \leq 1.15$ ,  $150 \leq Pe \leq 1000$ 的情况。

对于 $Pe \leq 150$ ,采用下式:

$$Nu = 4.496[-16.15 + 24.96P/D - 8.55(P/D)^2] \quad (12)$$

在 $P/D$ 高于1.15时,采用以下关系式:

$$Nu = 4.0 + 0.16(P/D)^{5.0} + 0.33(P/D)^{3.8}(Pe/100)^{0.86} \quad (13)$$

式(13)适用于 $1.15 \leq P/D \leq 1.30$ ,  $10 \leq Pe \leq 5000$ 的情况。

## 2.3 压降计算模型

液态钠的流动特性与非金属流体无太大的差别<sup>[2]</sup>,因此流动子程序在一般流道中可直接采用非金属流体的经典流动阻力计算关系式,对于较复杂的堆芯内的流道结构的阻力计算可通过修正经典关系式来实现。由于在稳态正常工况下,反应堆内为强迫循环单相紊流流动,本计算选用式(16)计算绕丝组件摩阻系数,选用式(17)计算压降。

### 1) 流动阻力计算关系式

对单相层流流动( $Re \leq 2000$ ),达西摩阻系数 $f = C/Re$ 。对圆形管道, $C = 64$ ;对矩形通道, $C = 96$ 。对单相过渡区流动( $2000 < Re <$

4 000), 摩阻系数  $f = 0.036$ 。对单相湍流流动, 摩阻系数选用 Colebrook 公式<sup>[10]</sup> 计算:

$$\frac{1}{f^{0.5}} = 1.74 - 2 \lg \left( 2\epsilon/D + \frac{18.7}{Re f^{0.5}} \right) \quad (14)$$

另外, 在计算液钠流经堆芯燃料组件的摩阻系数时, 由于组件存在绕丝, 需考虑绕丝的影响。一种通常的方法是首先计算光棒束的摩阻系数  $f_s$ , 再考虑绕丝的影响, 引入倍增系数  $M$ , 得到绕丝组件摩阻系数  $f_B = Mf_s$ 。文献[8]就是使用此方法计算绕丝组件摩阻系数。 $M$  是绕丝棒束组件几何参数的函数, Novendstern 用下式计算  $M$ <sup>[4]</sup>:

$$M = [1.034/(P/D)^{0.124} + 29.7(P/D)^{6.94} \cdot Re^{0.086}/(H/D)^{2.239}]^{0.885} \quad (15)$$

式中:  $P/D$  为组件的棒栅距与棒径之比;  $H/D$  为绕丝螺距与棒径之比。

中国原子能科学研究院丁振鑫借用意大利 PEC 快堆燃料组件的经验关系式计算我国自行设计的快堆燃料组件水力特性, 其计算绕丝组件摩阻系数关系式<sup>[4]</sup> 如下:

$$f_B = 0.475 Re^{-0.268} \quad (16)$$

经与 Novendstern 计算绕丝组件摩阻系数的方法比较, 两种算法的计算结果比较接近, 差别不超过 10%<sup>[4]</sup>。同时该算法专门针对国产燃料组件, 因此更具有针对性。

## 2) 压降模型

对于压降的计算, 可直接使用下式:

$$p = f \cdot \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (17)$$

式中:  $p$  为压降, Pa;  $L$  为流道长度, m;  $D_e$  为当量直径, m;  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

由于堆芯内棒束结构复杂, 使用式(16)计算堆芯棒束压降与试验值偏差较大, 因此需采用更加合理的棒束压降关系式。中国原子能科学研究院刘一哲等在 CRT 模型和 Engel 等的工作的基础上, 得到了更为合理的关系式<sup>[5]</sup>。

在  $Re \leq 400$  的层流区:

$$\Delta p = \left[ \frac{\varphi}{Re \sqrt{H}} \left( \frac{P}{D} \right)^{1.5} \right] \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (18)$$

在  $400 < Re < 5000$  的过渡流区:

$$\Delta p = \left[ \frac{\varphi}{Re \sqrt{H}} \left( \frac{P}{D} \right)^{1.5} (1 - \Psi)^{0.5} + \frac{0.3M_1}{Re^{0.25}} \cdot \Psi^{0.5} \right] \frac{L}{D_e} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (19)$$

在  $Re \geq 5000$  的湍流区:

$$\Delta p_1 = f_{s1} \frac{L}{D_{e1}} \rho (v_{1/2}^2) \cdot \left[ 1 + C_1 \frac{A_{r1}}{A_1'} \cdot \frac{D_{e1}}{H} \cdot \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} \right] \quad (20)$$

$$\Delta p_2 = f_{s2} \frac{L}{D_{e2}} \rho (v_2^2/2) \cdot \left\{ 1 + \left[ C_2 n \left( \frac{v_T}{v_2} \right)_{\text{间隙}} \right]^2 \right\}^{1.375} \quad (21)$$

$$\Delta p = \frac{N_1 A_1}{N_1 A_1 + N_2 A_2} \Delta p_1 + \frac{N_2 A_2}{N_1 A_1 + N_2 A_2} \Delta p_2 \quad (22)$$

式中:  $D$  为子通道水力当量直径, m;  $A_{r1}$  为在子通道里 1 个螺距范围内单根绕丝的投影面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_1'$  为在子通道内未绕丝时的流通面积,  $\text{m}^2$ ;  $n$  和  $(v_T/v_2)_{\text{间隙}}$  分别通过公式计算给出;  $C_i$  是由试验确定的常数, 无量纲;  $N_i$ 、 $A_i$  分别为子通道的个数和流通面积;  $\varphi$  近似看作是一与水力当量粗糙度  $\epsilon$  有关的无量纲参数,  $\varphi = 24.925 + 350000\epsilon$ ;  $\Psi$  为间断因子, 是一连接湍流区和层流区的参数,  $\Psi = (Re - 400)/4600$ 。上述公式的适用范围如下: 1 盒燃料组件内有 19~271 根燃料元件, 元件直径为 5~12 mm,  $P/D$  为 1.06~1.42,  $H/D$  为 8~90, 全雷诺数工况。经与相关试验值比较, 符合较好。但上述压降关系式十分复杂, 需使用的参数较多。

## 2.4 传热模型

### 1) 堆芯传热计算

采用闭式单通道模型描述堆芯传热过程, 图 2 所示为棒状燃料元件的温度分布。燃料芯体与包壳紧密接触, 包壳与堆容器之间为冷却剂通道, 计算中忽略轴向导热。

冷却剂温度为  $T_f(z)$ ,  $z$  代表堆芯轴向高度:

$$T_f(z) = T_{f,\text{in}} + \frac{2\pi r_c z q(r_c)}{\omega_i c_p} \quad (23)$$

包壳外表面温度  $T_{co}(z)$ :

$$T_{co}(z) = T_f(z) + q(r_c)/h \quad (24)$$

包壳内表面温度  $T_{ci}(z)$ :

$$T_{ci}(z) = T_{co}(z) + \frac{q(r_c) r_c}{\lambda_c} \ln \frac{r_c}{r_u} \quad (25)$$

假设包壳和燃料芯块紧密接触, 包壳内表面温度与芯块外表面温度为同一值。

燃料芯块中心温度  $T_{uo}(z)$ :

$$T_{uo}(z) = T_{ci}(z) + \frac{r_c}{2\lambda_u} q(r_c) \quad (26)$$

式中: $q(r_c)$ 为距芯体中心距离为 $r_c$ 的热流密度,  $W/m^2$ ;  $w_i$ 为堆芯内冷却剂流量,  $kg/s$ ;  $h$ 为冷却剂与包壳间表面对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda_c, \lambda_u$ 分别为包壳与芯块材料的导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $c_p$ 为冷却剂比定压热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $r_c$ 与 $r_u$ 分别为包壳外表面与芯块外表面到芯块中心的径向距离,  $m$ 。

$\lambda$ 为传热管壁导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $\delta$ 为传热管壁的厚度,  $m$ 。

在上述模型基础上,采用 Fortran90 程序设计语言开发了 CEFR 一回路系统的稳态计算程序。程序采用模块化结构设计,包含液钠物性、换热、流动等子程序,便于二次开发。

### 3 CEFR 一回路稳态计算分析

CEFR 的稳态工况为:热功率,65.6 MW;堆芯入口温度,360  $^\circ C$ ;入口压力,0.309 83 MPa;一回路总流量,354.6 kg/s;堆芯冷却剂流量,301 kg/s;堆芯流量分配系数,0.85。利用所开发的程序对 CEFR 一回路的稳态工况进行计算,将泵出口至中间热交换器之间的流道划分为 13 段,流道划分示于图 3,并对每段进行控制体划分,共划分成 60 个控制体,其中堆芯活性区段和中间热交换器段控制体数均为 10。

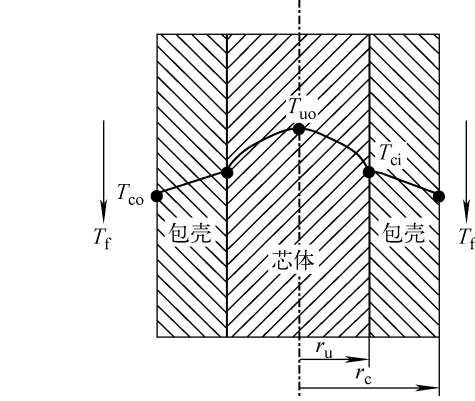


图 2 棒状燃料元件温度分布图

Fig. 2 Temperature profile for cylindrical fuel element

#### 2) 中间热交换器传热计算

假设中间热交换器内热流密度沿冷却剂通道轴向均匀分布且传热管壁内传热过程为一维平壁导热,得到下列方程:

$$Q = G(h_1 - h_2) \quad (27)$$

$$T_{w1} = T_{f1} - Q/(Ak_1) \quad (28)$$

$$T_{w2} = T_{w1} - Q\delta/(A\lambda) \quad (29)$$

$$T_{f2} = T_{w2} - Q/(Ak_2) \quad (30)$$

式中: $Q$ 为一次侧冷却剂传递给二次侧冷却剂的热量,  $W$ ;  $G$ 为中间热交换器内冷却剂流量,  $kg/s$ ;  $h_1, h_2$ 分别为中间热交换器入口和出口焓,  $J/kg$ ;  $A$ 为中间热交换器的换热面积,  $m^2$ ;  $k_1, k_2$ 分别为一次侧、二次侧流体对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_{f1}, T_{f2}, T_{w1}, T_{w2}$ 分别为一次侧、二次侧流体温度和一次侧、二次侧壁温,  $K$ ;

#### 3.1 一回路冷却剂温度分布

图 4 所示为一回路冷却剂温度沿冷却剂流动方向分布。图 4 中,压力管下降段到大栅板联箱段,冷却剂绝热流动温度不变;冷却剂从大栅板联箱流出后大部分由小栅板联箱进入堆芯,小部分被用来冷却一回路其他部件;流入堆芯的冷却剂在小栅板联箱段和堆芯下段仍作绝热流动,进入活性区后该部分冷却剂吸收堆芯产生的热量温度升高,从活性区流出后,该部分冷却剂继续绝热流动,温度不变;在热钠池混合腔室入口处,该部分冷却剂与冷却其他部件的冷却剂相混合,温度降低,混合后的冷却剂继续绝热流动,温度保持不变;冷却剂进入中间热交换器后被二回路液钠冷却,温度降低。

表 2 列出了一些关键位置处温度的程序计算值与 CEFR 的设计值。通过对比,发现温度计算值与设计值吻合良好。

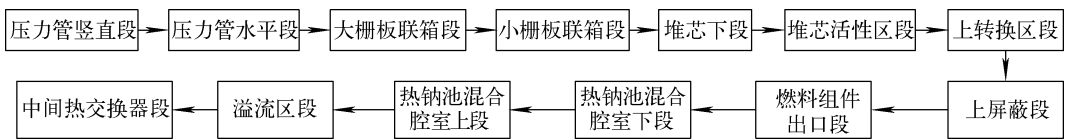


图 3 CEFR 一回路流道划分示意图

Fig. 3 Schematic of flow channel for primary loop of CEFR

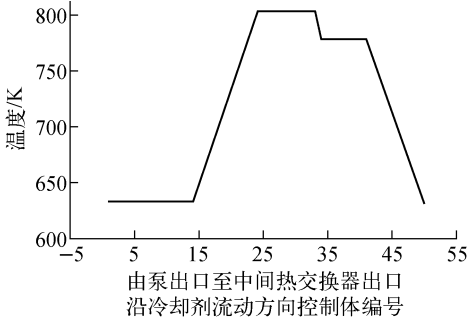


图4 一回路冷却剂温度分布

Fig. 4 Coolant temperature profile for primary loop

表2 温度的计算值与设计值

Table 2 Calculation and design values of temperature

位置	温度/K		相对 偏差/%
	计算值	设计值	
堆芯入口	735.56	733.15	0.32
堆芯出口	804.57	803.15	0.17
中间热交换器一次侧入口	790.70	789.15	0.20
中间热交换器一次侧出口	628.20	626.15	0.33

### 3.2 一回路冷却剂压力分布

图5所示为一回路冷却剂压力沿流动方向分布。图5中,堆芯之前各段温度较低,管道直径较大,摩擦压降较小,重位压降对冷却剂压力变化起主导作用;压力管下降段冷却剂向下流,动压力增大,压力管水平段冷却剂水平流动,重位压降为0,冷却剂压力基本不变;大栅板联箱段冷却剂向上流动,压力减小。冷却剂进入堆芯后,温度升高,流道直径减小,摩擦压降急剧增大,冷却剂压力也急剧减小。从堆芯流出后,流道直径变大,流速大幅减小,摩擦压降也大幅减小,在加速压降的作用下冷却剂压力有微小

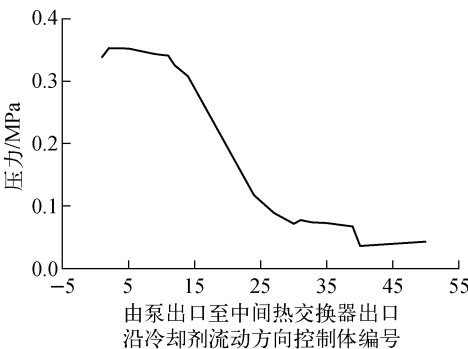


图5 一回路冷却剂压力分布

Fig. 5 Coolant pressure profile for primary loop

升高;之后,在重位压降的作用下,冷却剂压力继续减小。进入溢流区后,因为流向改变和流动环境复杂,冷却剂压力再次大幅下降。进入中间热交换器后,摩擦压降增大,但因冷却剂向下流动,摩擦压降被重位压降抵消,压力略有上升。

表3列出了一些关键位置处的压力或区间压降的程序计算值与CEFR的设计值。通过对比,发现压力计算值与设计值吻合较好。

表3 压力的计算值与设计值

Table 3 Calculation and design values of pressure

位置区间	压力/MPa		相对 偏差/%
	计算值	设计值	
堆芯压降	0.27	0.28	-3.5
泵压力侧压力	0.306 87	0.309 83	-3.8
主管道和栅板联箱压降	0.005 7	0.005 33	-6.9

### 3.3 堆芯冷却剂、包壳内外表面和燃料芯体中心温度分布

图6示出堆芯内冷却剂、包壳内外表面(包壳内表面温度也即芯体外表面温度,未考虑气隙)和燃料芯体中心温度沿冷却剂流动方向轴向分布。图6中,冷却剂、包壳内外表面和燃料芯体中心温度在轴向都沿冷却剂流动方向线性增大,这是由于本研究中假设“热流密度在轴向均匀分布”;包壳外表面与芯体外表面之间温差较小,芯体外表面与芯体中心温度之间温差较大。

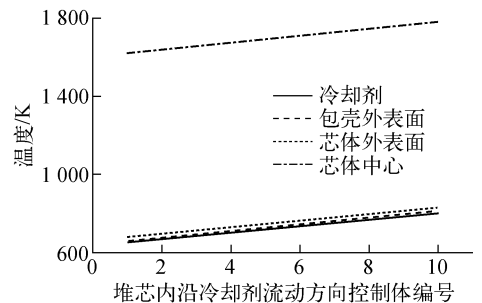


图6 堆芯内冷却剂、包壳内外表面与芯体中心温度分布

Fig. 6 Axial temperature profiles of inside and outside cladding surfaces and fuel center

### 3.4 中间热交换器一次侧、二次侧流体和传热管壁温度分布

图7所示为中间热交换器内一次侧、二次

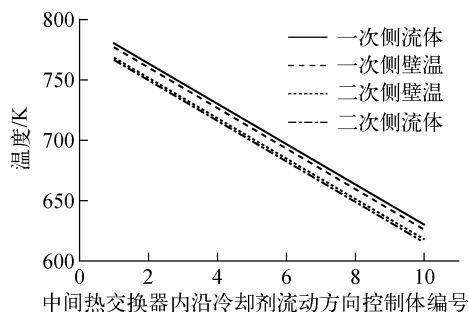


图7 中间热交换器内两侧流体和传热管壁温度分布  
Fig.7 Temperature profiles of coolant in primary loop and secondary loop and tube wall in IHX

侧流体温度和传热管壁温度沿一次侧流体流动方向轴向分布。图7中,一次侧流体温度和一次侧传热管壁温在轴向沿一次侧流体流动方向线性减小,二次侧流体温度和二次侧传热管壁温在轴向沿一次侧流体流动方向线性增大,这与模型假设条件(热流密度在轴向均匀分布)一致;另外,由表2可知,中间热交换器一次侧出入口冷却剂温度也与设计值相符。

#### 4 结论

本文为CEFR开发了有关钠的物性、流动与传热计算子程序库,进一步开发了针对CEFR一回路的稳态热工水力计算分析程序,其中关键参数同设计参数进行了比对,吻合良好,证明了本文所采用的模型和方法是合理的,所开发的程序可用于未来CEFR仿真平台的研发和为下一代钠冷快堆的研发提供技术支持。

#### 参考文献:

[1] MOCHIZUKI H, TAKANO M. Heat transfer in heat exchangers of sodium cooled fast reactor systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 295-307.

[2] 邱仁森. 钠技术和液金属钠回路[M]. 北京:科学出版社,1987:83-104.

[3] 石双凯,张振灿,张永积,等. 液态金属钠在圆管和套管内的传热实验研究[J]. 工程热物学报, 1981,2(2):173-179.

SHI Shuangkai, ZHANG Zhencan, ZHANG Yongji, et al. Experimental study of heat transfer to liquid metal sodium flowing in circular tube

and annuli[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1981, 2(2): 173-179(in Chinese).

- [4] 丁振鑫. 快堆燃料组件水力特性计算[J]. 原子能科学技术,1991,25(5):25-30.
- DING Zhenxin. The calculation of the hydraulic characteristics of FFR's fuel assembly[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1991, 25(5): 25-30(in Chinese).
- [5] 刘一哲,喻宏. 快堆燃料组件热工流体力学计算研究[J]. 原子能科学技术,2008,42(2):128-134.
- LIU Yizhe, YU Hong. Thermal-hydraulic analysis of fuel subassemblies for sodium-cooled fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(2): 128-134(in Chinese).
- [6] 徐铼. 快堆和我国核能的可持续发展[J]. 现代电力,2006,10(5):76-81.
- XU Mi. Fast reactor and sustainable development of China nuclear energy[J]. Modern Electric Power, 2006, 10(5): 76-81(in Chinese).
- [7] 单建强,秋穗正,朱继洲,等. 安全分析用钠物性偏导数公式的推导研究[J]. 核动力工程,1997,6(3):238-239.
- SHAN Jianqiang, QIU Suizheng, ZHU Jizhou, et al. Calculation of partial derivatives of thermophysical properties of sodium for safety analysis [J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 6(3): 238-239(in Chinese).
- [8] 郝老迷. 快堆燃料组件的子通道分析[J]. 原子能科学技术,1993,27(5):426-431.
- HAO Laomi. Subchannel analysis of fuel assembly for fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1993, 27(5): 426-431(in Chinese).
- [9] 张贵勤,向明忠,周学智. 液态金属钠在环管进口段的紊流换热实验研究[J]. 化工学报,1990(3):346-351.
- ZHANG Guiqin, XIANG Mingzhong, ZHOU Xuezhong. Experimental investigation of turbulent heat transfer to liquid sodium in the thermal entrance region of an annulus[J]. CIESC Journal, 1990(3): 346-351(in Chinese).
- [10] JAMAL M S. 流体流动手册[M]. 邓敦夏,译. 北京:中国石化出版社,2004.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.