

铅铋冷却快堆子通道热工水力初步数值分析

王 俊, 田文喜, 田永红, 苏光辉, 秋穗正

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为探索铅铋冷却快堆子通道的热工水力特性,自主研发了 SACOS-PB 子通道程序。本工作以矩形通道 9 根棒束组件为例,使用 SACOS-PB 程序对铅铋冷却快堆子通道的温度场进行了模拟分析,并用 CFX 软件进行验证。结果显示,SACOS-PB 程序计算结果与文献值比较符合,与 CFX 软件计算结果符合度也较高。使用 SACOS-PB 程序分析比较了 3 种组件结构,表明在铅铋冷却快堆中更适宜使用六边形通道,为进一步对铅铋冷却快堆子通道进行热工水力特性分析奠定了基础。

关键词:SACOS-PB 程序;CFX 软件;六边形燃料组件;子通道

中图分类号:TL333

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)01-0038-05

doi:10.7538/yzk.2013.47.01.0038

Thermal-Hydraulic Primary Numerical Analysis for Pb-Bi Fast Reactor Sub-channel

WANG Jun, TIAN Wen-xi, TIAN Yong-hong, SU Guang-hui, QIU Sui-zheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the thermal-hydraulics characters of Pb-Bi fast reactor sub-channel, the sub-channel program SACOS-PB was developed independently. As an example, the rectangle nine fuel rods construction was set, and its coolant temperature along the axial length was calculated. The results show that calculating results are good agreement with the reference results and the CFX calculating results. The three different constructions of the sub-channels were analyzed using SACOS-PB program, and the results show that the hexagon construction is the most suitable construction. The current research results establish a foundation for the further study.

Key words: SACOS-PB program; CFX software; hexagon fuel assembly; sub-channel

铅铋冷却快堆的结构设计相比其他快堆得到极大的简化。在主回路内,它甚至不需要主泵、蒸汽发生器等,而是将水直接注入铅铋冷却剂中,通过产生的蒸汽来带动一回路的自然循环,并将受热后的蒸汽导出进行热交换。作为

6 种第 4 代先进核能系统中的一种,铅铋冷却快堆以更好的经济性、固有安全性等优点突显出了无可比拟的先进性和强大的竞争力。然而,先进的结构设计也决定了铅铋冷却快堆还需应对更多的反应堆设计技术新挑战。铅铋合金冷却快

堆的堆芯物理、热工相互耦合的三维温度场和流场、蒸汽中铅铋合金液滴的高效分离技术、铅铋合金自然循环能力、燃料组件的热工水力特性及其固有安全特性均需继续研究和探索。本工作以铅铋冷却快堆的概念设计为背景,对铅铋冷却快堆子通道的温度场分布进行研究。

1 SACOS-PB 程序计算及验证

1.1 SACOS-PB 程序简介

自主研发的 SACOS-PB 程序采用标准 FORTRAN 结构化程序设计语言编制,有足够的注释语句,可读性强,程序输入、输出简单明了,使用简单。它由 2 个源程序、4 个数据输入文件和 12 个数据输出文件组成。在输入几何参数和初始条件后,程序分别对质量守恒方程、轴向动量守恒方程、横向动量守恒方程和能量守恒方程进行验证和修正,并判断冷却剂温度是否收敛。完成计算后,输出冷却剂轴向温度和速度、燃料棒表面温度等热工水力学参数。

质量守恒方程为:

$$m_{i,j+1} - m_{i,j} = -\Delta z \sum_{k=1}^{n_i} v_{i,j+1,k} s_{i,k} \rho_{i,k,j}$$

式中: $m_{i,j}$ 为子通道*i*第*j*控制体轴向冷却剂流量,kg/s; $v_{i,j,k}$ 为子通道*i*第*j*控制体内的冷却剂向相邻的子通道*k*的横流速度,m/s; $s_{i,k}$ 为子通道*i*、*k*间的连接宽度,m; $\rho_{i,k,j} = (\rho_{i,j} + \rho_{k,j})/2$,为子通道*i*和*k*的冷却剂的密度平均值,kg/m³; Δz 为控制体长度,m。

轴向动量守恒方程为:

$$m_{i,j+1} \omega_{i,j+1} - m_{i,j} \omega_{i,j} = -A_i (p_{i,j+1} - p_{i,j}) - A_i \rho_{i,j} g \Delta z - \sum_{k=1}^{n_i} \Delta z s_{i,k} v_{i,j+1,k} G_{i,k,j} - \beta \sum_{k=1}^{n_i} \Delta z s_{i,k} G_{i,k,j} (\omega_{i,j} - \omega_{k,j}) - \frac{1}{2} \left(f \frac{\Delta z \phi^2}{D_h \rho_i} + \frac{k}{\rho_{i,j}} + \frac{1}{\rho_{i,j+1}} - \frac{1}{\rho_{i,j}} \right) \frac{m_{i,j}^2}{A_i}$$

式中: A_i 为子通道*i*的流通面积,m²; g 为重力加速度,m/s²; f 为摩擦因子; k 为定位格架阻力系数; ϕ^2 为两相摩擦倍增因子; ω 为冷却剂流速,m/s; $G_{i,k,j} = (\rho_{i,j} \omega_{i,j} + \rho_{k,j} \omega_{k,j})/2$,为冷却剂质量流量,kg/(cm²·s); β 为湍流搅混因子; p 为压力,Pa; D_h 为加热当量直径,m。

横向动量守恒方程为:

$$v_{i,j+1,k} G_{i,k,j+1} - v_{i,j,k} G_{i,k,j} = \Delta z \frac{p_{i,j} - p_{k,j}}{l_{i,k}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{K_g \Delta z (\rho_{i,j} + \rho_{k,j}) v_{i,j,k}^2}{2 l_{i,k}}$$

式中: $l_{i,k}$ 为子通道*i*与子通道*k*间的质心距,m; K_g 为横向阻力系数。

能量守恒方程为:

$$\frac{m_{i,j+1} h_{i,j+1} - m_{i,j} h_{i,j}}{\Delta z} = \sum_{k=1}^{m_i} \varphi_{i,k} \frac{q_{k,j+1} + q_{k,j}}{2} - \sum_{k=1}^{n_i} \left(\beta G_{i,k} s_{i,k} (h_{i,j} - h_{k,j}) + k c_{i,j} \frac{s_{i,k} (t_{i,j} - t_{k,j})}{l_{i,k}} + \frac{h_{i,j} \rho_{i,j} + h_{k,j} \rho_{k,j}}{2} v_{i,j+1,k} s_{i,k} \right)$$

式中: $q_{k,j}$ 为第*k*根燃料棒与第*j*控制体的线功率,W/m; $\varphi_{i,k}$ 为第*k*根燃料棒与第*i*子通道接触的面积分数; h 为焓。

由于考虑了相邻通道冷却剂之间在流动过程中存在着横向的质量、动量和能量的交换,子通道模型能较为精确地计算出堆芯各子通道内的热工水力参数分布,进而能更为精确地计算出限制反应堆性能的烧毁比和出口含汽量^[1]。因此,SACOS-PB 程序对铅铋冷却快堆子通道进行热工水力分析能在保证安全的前提下,充分挖掘该反应堆的经济潜力。

1.2 SACOS-PB 程序分析计算

矩形通道的子通道划分方案如图 1 所示。初始条件设定如下:燃料棒直径为 12 mm,燃料棒的中心距离为 15.2 mm,入口质量流速为 2.75 kg/(m²·s),横截面积为 1 062 cm²,入口质量流量为 8.5 kg/s,入口温度为 583 K,功率平均分布,轴向长度为 750 mm,最大的线功率为 36 300 W/m^[2]。在此通道中,横向共划分了 16 个子通道,轴向共划分了 50 个控制体^[3]。

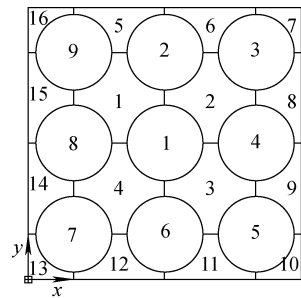


图 1 矩形通道组件子通道的划分

Fig. 1 Sub-channel division of rectangle channel

图 2 示出矩形通道组件冷却剂轴向温度分布。从图 2 可看出,冷却剂进口温度为 583 K,出口温度约为 700 K,这与文献[5]中的结果比较吻合。冷却剂温度在轴向距离上持续地增长,这与程序设定中的平均功率分析是吻合的。

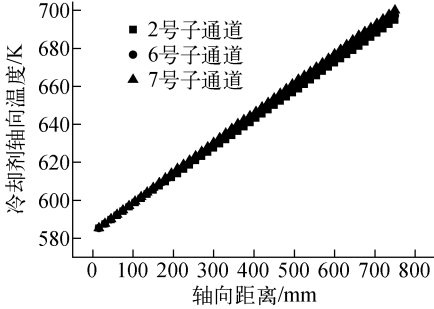


图 2 SACOS-PB 程序计算的矩形通道组件冷却剂轴向温度分布

Fig. 2 Axial temperature of coolant in rectangle channel using SACOS-PB code

1.3 CFX 软件分析计算

首先用 PRO-E 软件建模,然后导入 ICEM-CFD 软件进行网格划分(图 3),在轴向依然划分了 50 个控制体^[4]。在截面上,大致分 9 个区域分别进行网格划分,并在燃料棒表面进行加密。整个矩形通道组件的网格数为 6 000,网格质量在 0.55 以上,质量较高。

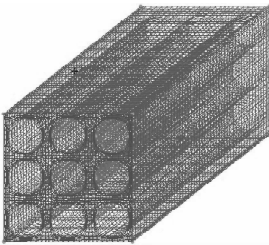


图 3 ICEM-CFD 的网格划分方案

Fig. 3 Mesh scheme of ICEM-CFD

随后,将 ICEM-CFD 的网格划分方案导入 CFX,设定流体区域,给定进、出口等边界条件,修改铅铋合金物性,完成 CFX 计算的前处理过程(图 4)。CFX 可提供智能的分析计算,得出计算结果后,按 1.2 节子通道划分方案,计算出各子通道内的冷却剂轴向温度分布,结果如图 5 所示。

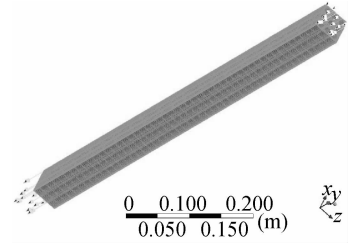


图 4 CFX 软件前处理

Fig. 4 Pretreatment of software analysis

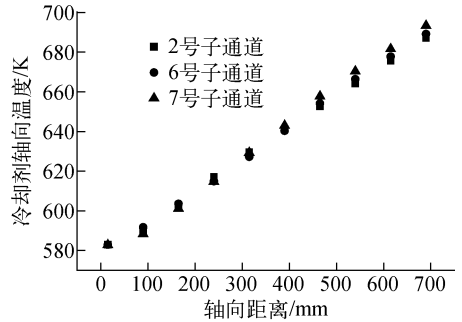


图 5 CFX 程序计算的矩形通道组件冷却剂轴向温度分布

Fig. 5 Axial temperature of coolant in rectangle channel using CFX code

1.4 对比分析

比较图 2、5 可见,两组数据的吻合度较高。两组数据均是基于功率平均分布的假设,所以冷却剂温度上升的趋势也较一致。良好的吻合度充分证明了 SACOS-PB 程序的正确性。此外,出口温度与文献[5]中的数据较接近,更充分验证了 SACOS-PB 程序的正确性。

2 不同组件结构对温度场分布的影响

在整个铅铋冷却快堆子通道中,冷却剂子通道总面积为 $2\,553\,190\text{ mm}^2$,总质量流量为 $20\,547\text{ kg/s}$,堆芯入口温度为 583 K,最大线功率为 $36\,300\text{ W/m}$,表面释热率为 $688\,125\text{ W/m}^2$ ^[2]。对燃料组件做如下设定:1) 内层、外层堆芯燃料组件发热,控制组件、辐射防护组件不发热;2) 冷却剂流经堆芯燃料组件、控制棒组件,不流经辐射防护组件。在此基础上,即可计算出不同结构下各组件的具体参数。

2.1 圆形通道组件结构

圆形通道的子通道划分方案如图 6 所示。

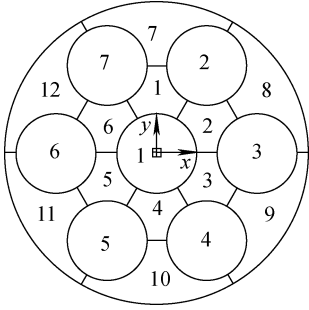


图 6 圆形通道组件子通道的划分

Fig. 6 Sub-channel division of circle channel

初始条件设定为:燃料棒直径为 12 mm,燃料棒的中心距离为 15.2 mm,入口质量流速为 2.75 kg/(m²·s),横截面积为 841 cm²,入口质量流量为 6.8 kg/s,入口温度为 583 K,功率余弦分布,轴向长度为 750 mm,最大线功率为 36 300 W/m^[2]。在此通道中,横向共划分 12 个子通道,轴向共划分 50 个控制体。

图 7 示出圆形通道组件冷却剂轴向温度的分布。圆形通道组件的子通道分为内、外两层,因此,冷却剂轴向温度曲线也为两条。从图 7 可看出,出口温差相对较大,这是因为圆形结构组件内、外两层子通道的受热面积、润湿周长等均有较大不同。随着该结构组件中燃料棒数的增加,该结构会更加典型,各子通道间的温差也会大幅下降。

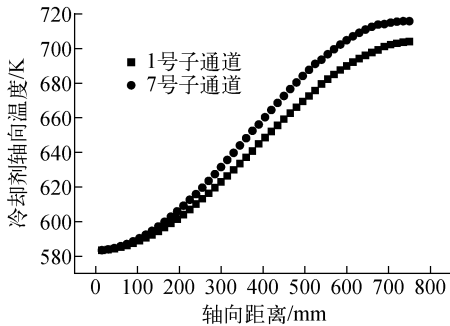


图 7 圆形通道组件冷却剂轴向温度分布

Fig. 7 Axial temperature of coolant in circle channel

2.2 六边形通道组件结构

六边形通道的子通道划分方案如图 8 所示。初始条件设定如下:燃料棒直径为 12 mm,燃料棒的中心距离为 15.2 mm,入口质量流速

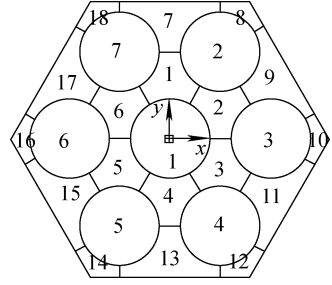


图 8 六边形通道组件子通道的划分

Fig. 8 Sub-channel division of hexagon channel

为 2.75 kg/(m²·s),横截面积为 702 cm²,入口质量流量为 5.6 kg/s,入口温度为 583 K,功率余弦分布,轴向长度为 750 mm,最大线功率为 36 300 W/m^[2]。在此通道中,横向共划分 18 个子通道,轴向共划分 50 个控制体。

六边形通道组件冷却剂轴向温度分布示于图 9。从图 9 可见,1 号和 8 号子通道的温度较为接近,7 号子通道温度略低。这提示在考虑最大温度点时,必须要充分考虑如 8 号这样面积较小却在边界上的子通道。

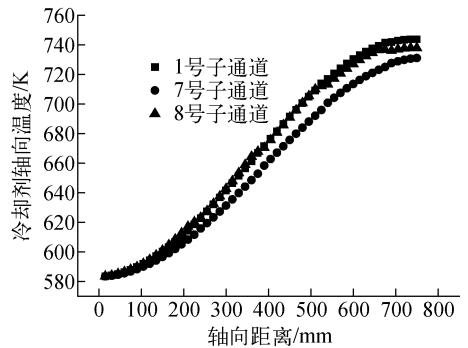


图 9 六边形通道组件冷却剂轴向温度分布

Fig. 9 Axial temperature of coolant in hexagon channel

2.3 矩形通道的子通道划分

该划分方案如图 1 所示。初始条件设定如下:燃料棒直径为 12 mm,燃料棒的中心距离为 15.2 mm,入口质量流速为 2.75 kg/(m²·s),横截面积为 1 062 cm²,入口质量流量为 8.5 kg/s,入口温度为 583 K,功率余弦分布,轴向长度为 750 mm,最大线功率为 36 300 W/m^[2]。在这个通道中,横向共划分 16 个子通道,轴向共划分 50 个控制体^[3]。

图 10 示出矩形通道组件冷却剂轴向温度分布。从图 10 可看出,冷却剂进口温度为 583 K,出口温度约为 700 K,这与文献[5]中的结果比较吻合。冷却剂温度在出口处增长比较缓慢,然后缓慢加速,在出口处又趋于平缓,这是因为在程序的设定中,功率在轴向是呈余弦分布的。

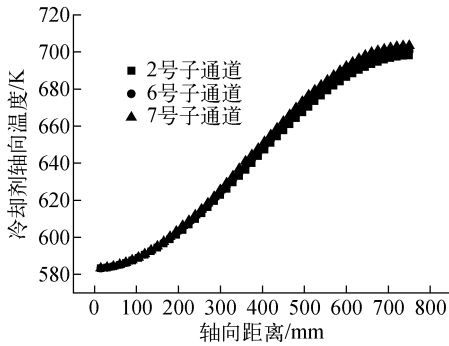


图 10 矩形通道组件冷却剂轴向温度分布

Fig. 10 Axial temperature of coolant in rectangle channel

2.4 子通道组件结构的比较和选择

由图 7、9、10 可看出,冷却剂轴向温度从高到低分别为:六边形结构的 1 号通道、8 号通道、7 号通道,圆形结构的 7 号通道、1 号通道,矩形结构的 7 号通道、6 号通道、2 号通道。在满足安全需求的前提下,冷却剂轴向温度高则可带走更多的热量,因此,可认为六边形通道结构具有最高的输热能力^[6],是较为合适的结构方案。这与文献[5]的结果一致。在六边形结构的组件中,平均每根燃料棒要对 100 cm² 以上的冷却剂进行冷却。而在圆形通道和矩形通道中,这一数值均在 120 cm² 左右。即在矩形通道结构组件中,相同数量的燃料棒对相对较少的冷却剂加热,所以冷却剂的温升会更加明显,而在另外两种结构中,这种差别并不明显。此外,六边形通道的结构设计已广泛运用在最新的快堆设计和工程实践中,与本工作所得结论相吻合。

3 结论

1) 通过 CFX 软件对 SACOS-PB 程序的计算结果进行了验证,结果表明两者吻合度很好。此外,SACOS-PB 程序所得出口温度与文献

[5]也较吻合。这充分证明了 SACOS-PB 程序在铅铋冷却快堆子通道热工水力特性分析中的正确性和价值。

2) 六边形通道的热管可能出现在 8 号子通道。因此,8 号类型子通道的分析计算对铅铋冷却快堆子通道的安全性分析极其重要,在进行安全性分析时应给予足够重视。

3) 使用 SACOS-PB 程序对不同结构组件的冷却剂轴向温度进行了分析和比较,认为六边形通道能够在满足安全需求的前提下达到最大的输热能力,是铅铋冷却快堆较适宜的子通道方案。

4) 本工作计算结果为更进一步的铅铋冷却快堆子通道分析奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 章靖武. 子通道热工水力分析[J]. 核动力工程, 1982, 3(1): 49-54.
ZHANG Jingwu. Thermal hydraulic analysis of sub-channel [J]. Nuclear Power Engineering, 1982, 3(1): 49-54(in Chinese).
- [2] MINORU T, SHOJI U, KOJI H, et al. Pb-Bi-cooled direct contact boiling water small reactor [J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 47(1-4): 190-201.
- [3] 刘展, 杨燕华. ADS 原理验证装置子通道热工分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(S1): 21-24.
LIU Zhan, YANG Yanhua. Thermal-hydraulic analysis of sub-channel on ADS principle verification device [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(S1): 21-24(in Chinese).
- [4] 顾汉洋, 程旭, 卢冬华. 方形子通道内超临界流体流动传热 CFD 分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(2): 1-5.
GU Hanyang, CHENG Xu, LU Donghua. CFD analysis of thermal-hydraulic behavior of supercritical water in square sub-channels [J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(2): 1-5(in Chinese).
- [5] MINORU T, SHOJI U, YOSHIYUKI K. Design study on reactor structure of Pb-Bi-cooled direct contact boiling water fast reactor (PBWFR) [J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50: 197-205.
- [6] ZHI S, SIMON L. Numerical investigation of supercritical water-cooled nuclear reactor in horizontal rod bundles [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240: 776-782.