

CEFR 小栅板联箱及其节流件数值模拟

冯预恒, 胡文军, 乔雪冬, 侯志峰

(中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413)

摘要: 使用流体力学软件 CFX 对中国实验快堆 I 型小栅板联箱及其节流件进行稳态模拟计算, 研究 I 型小栅板联箱及其节流件内压力分布、速度分布。并研究联箱内 7 个燃料元件管脚入口的流量分配, 以及影响管脚进口流量分配的因素, 以提高堆芯流量分配的精度。

关键词: 中国实验快堆; 小栅板联箱; 流量分配

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)S1-0463-05

Numerical Simulation for Distribution Header and Throttle Structure in China Experimental Fast Reactor

FENG Yu-heng, HU Wen-jun, QIAO Xue-dong, HOU Zhi-feng

(Research Center of Fast Reactor, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In the simulation of distribution header and throttle structure of China Experimental Fast Reactor, computational fluid dynamic code—CFX was used. Through the study of pressure and velocity inside of the structure, the flux of each one of 7 fuel element inlets and the flow distribution factor were figured out. The result will be reference for precise distribution of core flux.

Key words: China Experimental Fast Reactor; distribution header; flow distribution

栅板联箱是中国实验快堆(CEFR)堆芯支承的主要组成部分, 主要包括大、小栅板联箱。冷却剂流经小栅板联箱后, 由小栅板联箱再分配后, 为堆芯各组件提供必需流量, 达到带走热量、冷却组件的目的。小栅板联箱及其节流件所处堆芯位置如图 1 所示。小栅板联箱共 202 个, 其内共插装 712 盒堆芯组件。小栅板联箱种类繁多, 按每个小栅板联箱插装组件的数目, 可分为 7 根式和单根式两类: 7 根式共 16 种 85 个, 其余为单根式共两种 117 个。其中, 7 根式

小栅板联箱中, 有 37 个可由大栅板联箱提供高压钠, 以冷却堆芯组件, 其余 48 个由燃料组件管脚的漏流冷却其内插装的组件。

小栅板联箱主要功能有 4 个方面: 1) 可靠地固定、支撑堆芯组件; 2) 防止各组件插装错位; 3) 扩大堆芯并保证 81 盒燃料组件构成由 4 排贫铀组件的侧面堆芯屏蔽能力; 4) 为燃料组件提供水力压紧。本次只计算 I 型小栅板联箱及其节流件, 其所处堆芯位置的剖视图如图 2 所示。

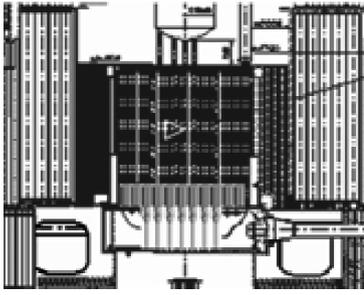


图1 小栅板联箱及其节流件所处堆芯位置

Fig. 1 Position of distribution header and throttle structure

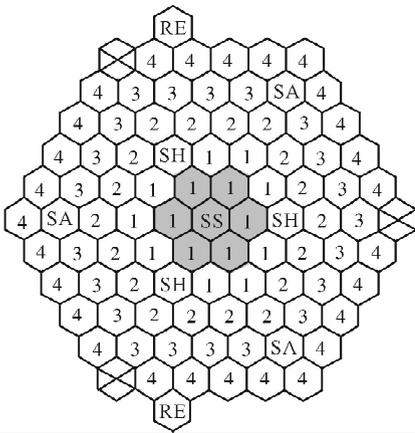


图2 I型小栅板联箱所处堆芯位置

Fig. 2 Position of distribution header I

1 计算模型

计算模型示于图3,严格模拟实验结构的几何形状和尺寸,主要包括两大部分:1)节流件;2)小栅板联箱,小栅板联箱的结构和尺寸示于图4,内部结构示于图5,因其内部结构非常复杂,其相应结构的剖面示于图6,小栅板联箱内部流道结构示于图7。

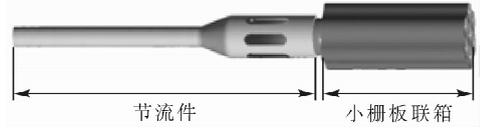


图3 模型示意图

Fig. 3 Model of distribution header and throttle structure

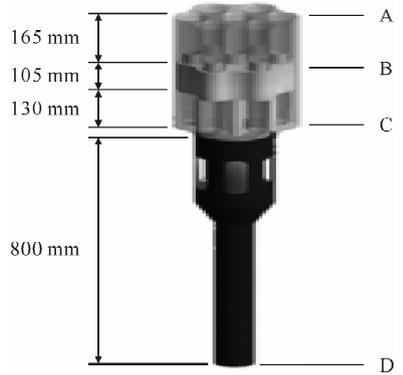


图4 模型尺寸结构

Fig. 4 Size of model

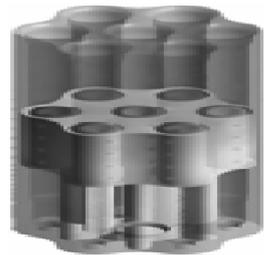


图5 小栅板联箱内部结构

Fig. 5 Inside structure of distribution header

2 边界条件及计算模型

2.1 边界条件

流质为钠、流体内压力为常压,为真实模拟额定工况下冷池的流动及温度的影响,各物性

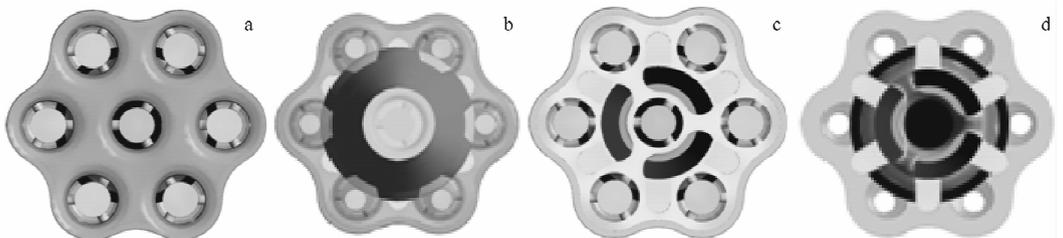


图6 图4中的A(a)、B(b)、C(c)、D(d)剖面图

Fig. 6 Section for A (a)、B (b)、C (c)、D (d) of Fig. 4



图 7 小栅板联箱内部流道结构

Fig. 7 Flow tunnel inside distribution header

参数皆随着温度而改变。

液态钠的具体参数为:密度 = $16.0185 \times [59.3566 - 7.7504 \times 10^{-3}(1.8t + 32) - 0.2872 \times 10^{-6} \times (1.8t + 32)^2 + 0.0603 \times 10^{-9}(1.8t + 32)^3]$ (单位为 kg/m^3), 粘度 = $0.1235\rho^{1/3} \exp(697\rho/(1.8t))$ (单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $t \leq 500^\circ\text{C}$), 比热 = $41.86 \times [0.389352 - 1.10599 \times 10^{-4}(1.8t) + 3.41178 \times 10^{-8} \times (1.8t)^2]$ (单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), 导热系数 = $1.72958 \times [54.306 - 1.878 \times 10^{-2} \times (1.8t + 32) + 2.0914 \times 10^{-6} \times (1.8t + 32)^3]$ (单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。式中: t 为材料相对应的温度, $^\circ\text{C}$; ρ 为液态钠密度, kg/m^3 。

入口边界条件为节流件的 6 个开孔, 流量 $Q = 7 \times 3.9 \text{ kg/s} = 27.3 \text{ kg/s}$ 。

出口边界条件在此次计算中, 选择流体进入燃料组件管脚最上部开孔 100 mm。

2.2 计算模型

紊流模型采用 $k-\epsilon$ 模型, 壁面对紊流的影响为标准情况, 考虑重力的影响, 各流量下流道内初始流速以理论计算为准, 并且在内壁设置

了膨胀网格。其它的输入和模型选择默认值。模拟计算时, 壁面被设成光滑, 计算模型的出口压力设为 0 Pa, 自动生成四面体非结构化网格。在结构复杂和流动间隙处采用密集网格。保证计算精度前提下, 尽量减少网格数量, 采用网格一体化、模型分区等技术。

3 计算结果与分析

计算结果表明, 安装在小栅板联箱内的 7 根燃料组件管脚, 其流量分配与所在联箱内位置关系较大, 其中, 安装在中心的燃料组件管脚流量比周边 6 根低, 其数值约为 4%。周边 6 根燃料组件管脚的流量分配也不相同, 但差距较小, 且差值在计算误差范围内。

3.1 栅板联箱压力场

传统的看法认为, 联箱内轴向和纵向压力均应等值分布, 即 7 根燃料组件管脚进口处的压力应相等。但计算结果证实, 小栅板联箱在轴向和纵向的变化皆非常复杂。轴向压力分布示于图 8, 纵向压力分布示于图 9。

从图 8 中可看到, 小栅板联箱的轴向压力分布为联箱内压力分布上高下低, 最高值在顶部, 因流道入口在小栅板联箱的下部, 所以, 最小值出现在 3 个节流件异型通道出口处旁侧, 联箱内压力损失小于 2 000 Pa。小栅板联箱的纵向压力分布随联箱高度改变, 且变化非常大。

从图 9a 可见, 联箱纵向顶部最高压力区分 3 个, 分别出现在中心的燃料组件和旁边燃料组件管脚向对处旁。最低压力区分 12 个, 分别

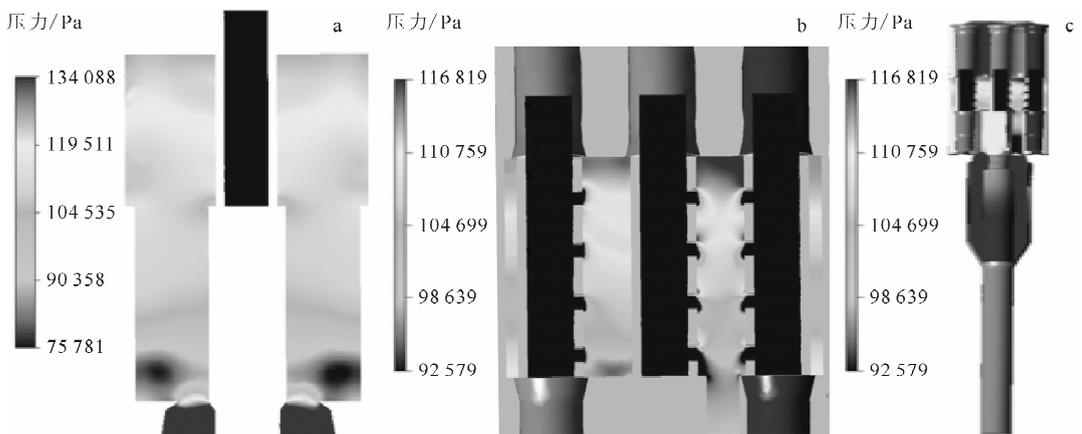


图 8 小栅板联箱的 x 轴向(a)、 y 轴向(b)及其与节流件(c)压力分布

Fig. 8 Pressure distribution at x (a), y (b) axes of distribution header and of whole (c)

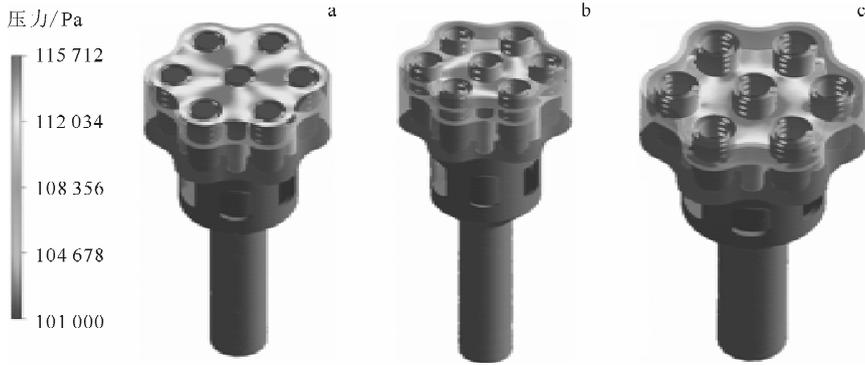


图9 小栅板联箱纵向顶部(a)、纵向中部(b)及纵向底部(c)压力分布

Fig. 9 Pressure distribution in portrait top (a), middle (b) and bottom (c) of distribution header

出现在周边6根燃料组件管脚的进口处,即联箱和管脚间的狭小缝隙间。

从图9b可见,联箱纵向中部最高压力区的分布与顶部分布相类似,只是区域较大且更向中心区集中。

从图9c可见,小栅板联箱纵向底部最高压力区的分布与前两者有较大不同,其中心分布区域较小,除此之外,周边6根燃料组件管脚与联箱间的狭小缝隙间压力也较高。

3.2 栅板联箱速度场和流场

小栅板联箱的纵向速度分布与压力分布相反,小栅板联箱及其节流件的速度分布示于图10,小栅板联箱轴向流速分布示于图11,小栅板联箱内整体流速分布及纵向流速分布见图12。

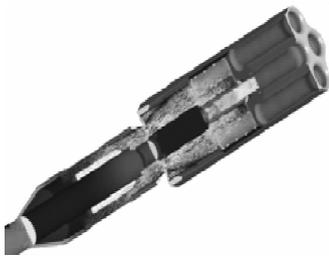


图10 小栅板联箱及节流件流速分布

Fig. 10 Velocity distribution of distribution header and throttle

从图12a可知,小栅板联箱内整体流速在流动方向可分为两部分,即中心上升通道,以及其后沿着小栅板联箱旁壁的下落通道。在此过程中,流体渐次流入所经过的7根燃料组件管脚开孔。

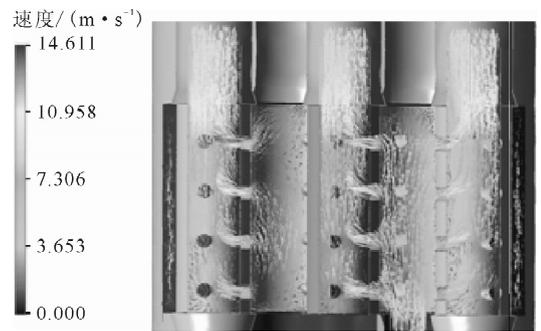


图11 小栅板联箱轴向流速分布

Fig. 11 Velocity distribution in axes of distribution header

流体通过节流件进入小栅板联箱时,其入口流速分布变化大(流速分布示于图13),即在每个异型孔道出口处,中间流速非常高,这决定了小栅板联箱内中心上升周边下降的流动形式。

入口的流速分布直接影响7根燃料组件管脚进口的流量分配。进入小栅板联箱的流体在上升过程中经过燃料组件管脚开孔时,因流速高而压力低,所以,管脚进口的流量小,流体上升达到最高点,即遭遇到联箱上板阻挡,流体旋转180°。沿着小栅板联箱旁壁下降,在下降过程中流速逐渐变小,并只进入周边6根燃料组件管脚。

3.3 燃料组件管脚流场

每根燃料组件管脚分别开有3排共12个 $\phi 8$ mm的孔道,管脚壁厚5 mm,通过每排4个管脚开孔进入燃料组件的流量为上高下低,且差距较大。进入燃料组件管脚的流量可分为两类,即管脚开孔分别处于主流道的上升和下降通道,处于下降通道的管脚开孔的流体速度分布示于图14。从图中可发现,在下降通过程

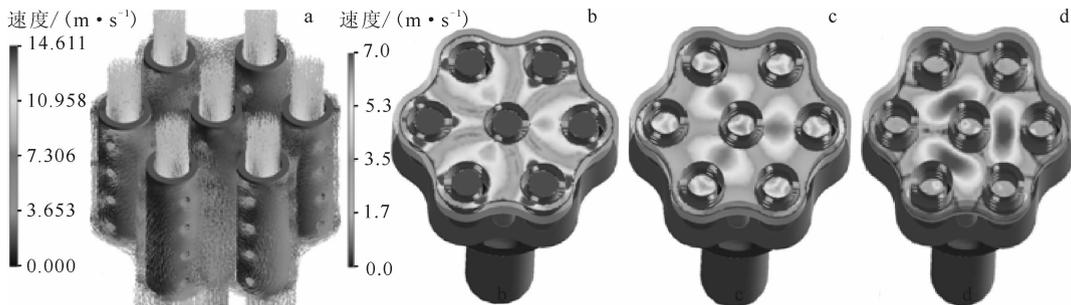


图 12 小栅板联箱整体(a)、纵向顶部(b)、纵向中部(c)及纵向底部(d)流速分布

Fig. 12 Velocity distribution of whole (a), portrait top (b), middle (c) and bottom (d) for distribution header

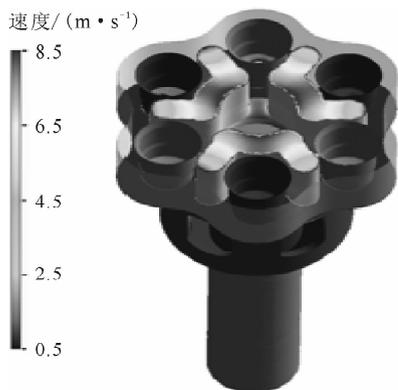


图 13 小栅板联箱入口速度分布

Fig. 13 Velocity distribution at inlet of distribution header

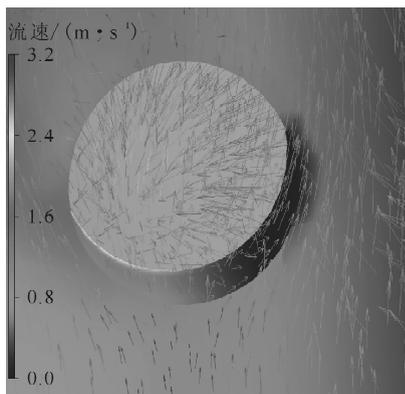


图 14 下降通道管脚开孔速度分布

Fig. 14 Velocity distribution at pin hole of drop channel

中进入组件内的流体,以旋转的方式通过管脚开孔。经计算证实,管脚 5 mm 壁厚对流量分配影响不能忽视,它直接决定流体进入燃料组件管脚后的流动形式和流量。

4 结论

应用大型三维商业软件对中国实验快堆 I 型小栅板联箱及其节流件进行稳态模拟计算获得以下结论。

1) 小栅板联箱内压力场、速度场、流场的分布情况和变化规律,以及小栅板联箱内的精确压力分布情况,为提高堆芯流量分配的精度,提供理论依据。

2) 本次计算获得了 I 型小栅板联箱内 7 根燃料组件管脚进口的流量分配,并详细分析了影响管脚进口流量分配的各因素,即燃料组件管脚所处小栅板联箱主流道的位置、进入管脚形式、管脚壁厚、管脚进口的流动形式及联箱入口流速分布等。

3) 计算获得了燃料组件管脚内的压力场、速度场、流场的分布情况和变化规律,并详细分析了每个单排 4 个开孔的流量分配,为开展研究燃料组件内部流场及温度分布提供边界条件。

通过本次计算找到了小栅板联箱影响管脚进口流量分配的主要因素,为提高堆芯燃料组件的流量分配精度提供理论依据和参考。