

基于 CFD 方法格架局部阻力系数计算模型研究

陈曦

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213)

摘要: 为了研制高性能燃料组件, 定位格架的阻力特性直接关系到燃料组件的热工性能和水力相容性。本文针对 5×5 规模的定位格架, 从流动阻力的基本原理出发, 利用 CFD 方法研究并建立了格架局部阻力特性的理论计算模型, 并对计算结果进行验证。结果表明, 基于计算模型获得的格架局部阻力系数与直接模拟结果基本一致, 验证了计算模型的准确性。

关键词: 燃料组件; CFD; 定位格架; 局部阻力系数

中图分类号: TL333

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)02-0277-05

doi: 10.7538/yzk.2016.50.02.0277

Calculation Model Research of Local Resistance Coefficient for Spacer Grids Based on CFD Methodology

CHEN Xi

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to develop high-performance fuel assemblies, resistance characteristics of spacer grid are directly related to thermal performance and hydraulic compatibility of fuel assemblies. Based on basic principles of flow resistance, the calculation model of local resistance characteristics for 5×5 spacer grids was studied and built by using CFD method and the calculation results were validated. The results show that the local resistance coefficients from calculation model are generally in agreement with those from direct simulation.

Key words: fuel assembly; CFD; spacer grid; local resistance coefficient

压水堆堆芯的热工水力设计和事故分析中, 为了描述定位格架引起的压力损失及横向交混作用, 需要定位格架子通道的局部阻力系数。法马通和西屋等采用半经验方法获取子通道的局部阻力系数作为子通道分析程序(如 FLICA、VIPRE 等)的输入。目前的水力学实

验只能得到格架的整体阻力系数, 无法给出各类子通道的阻力系数。计算流体力学(CFD)方法作为一种标准分析方法, 已广泛应用于燃料组件研制与开发的过程中^[1-4]。本文基于 CFD 方法, 从流动阻力的基本规律出发, 构建计算子通道局部阻力系数的理论模型^[5], 针对 5×5 格

收稿日期: 2014-11-16; 修回日期: 2015-05-11

基金项目: 核反应堆系统设计技术重点实验室运行课题资助项目

作者简介: 陈曦(1988—), 男, 安徽淮北人, 工程师, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

架进行建模与计算,并与 CFX 程序的模拟结果进行验证。

1 理论模型构建

1.1 阻力系数定义

子通道是指压水堆堆芯开式流道下存在的典型栅元、边栅元和角栅元等,如图 1 中的 1、2、3 所示。

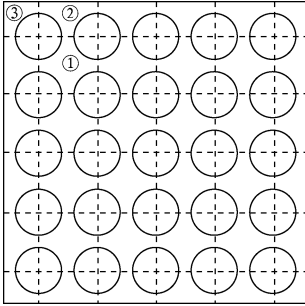


图 1 子通道分类

Fig. 1 Kinds of sub-channels

在堆芯子通道热工分析程序中,为准确模拟交混效应对组件热工性能的影响,需各类子通道的阻力系数描述各子通道间压力损失的差异。

定位格架全流道的阻力系数可由实验直接测量获得,其计算公式如下:

$$K_{\text{grid}} = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho v^2 l_{23}} (l_{23}(p_1 - p_2) - l_{12}(p_2 - p_3))$$

其中: K_{grid} 为格架总的阻力系数; ρ 为平均密度; v 为断面平均速度; l_{12} 为截面 Plane_1 和 Plane_2 间的距离,各截面轴向位置如图 2 所示; l_{23} 为截面 Plane_2 和 Plane_3 间的距离; p_1 、 p_2 、 p_3 分

别为轴向不同高度的静压。

然而,子通道的阻力系数由格架摩阻和条带、弹簧、刚凸及搅混翼等的形阻组成,由于是开式通道的原因无法直接测量,因此有必要探索采用数值模拟方法获得定位格架各子通道的阻力系数的方法。

1.2 阻力分布规律

子通道的阻力系数与其三维几何结构有关,需从轴向和径向两方面分析其阻力分布规律。

1) 轴向串联

尽管各类子通道的内部结构组成不完全相同,但影响其阻力系数的基本元素都是摩擦阻力及条带、弹簧、刚凸和搅混翼的局部形阻。对于一个子通道,各形阻沿流动方向依次形成阻碍,因此每个子通道的阻力系数在轴向上满足串联规律,直接相加可得到该子通道的阻力系数,其表达式如下:

$$K_{\text{subchannel}} = K_{\text{friction}} + K_{\text{strap}} + K_{\text{dimple}} + K_{\text{spring}} + K_{\text{vane}}$$

其中: $K_{\text{subchannel}}$ 为子通道阻力系数; K_{friction} 为摩擦阻项; K_{strap} 为条带形阻项; K_{dimple} 为刚凸形阻项; K_{spring} 为弹簧形阻项; K_{vane} 为搅混翼形阻项。

2) 径向并联

由于流体在进出格架时径向截面内压力一致,因此格架区域的子通道可认为是并联通道(图 3),子通道阻力系数和格架阻力系数满足并联关系:

$$K_{\text{grid}} = \frac{A_{\text{bundle}}^2}{\left(\frac{N_{\text{T}}A_{\text{T}}}{\sqrt{K_{\text{T}}}} + \frac{N_{\text{S}}A_{\text{S}}}{\sqrt{K_{\text{S}}}} + \frac{N_{\text{C}}A_{\text{C}}}{\sqrt{K_{\text{C}}}}\right)^2}$$

其中: K_{T} 、 K_{S} 、 K_{C} 分别为典型栅元、边栅元和角栅元的阻力系数; A_{bundle} 为全流域棒束区的流通面积; A_{T} 、 A_{S} 、 A_{C} 分别为棒束区典型栅元、边栅元和角栅元的流通面积; N_{T} 、 N_{S} 、 N_{C} 分别为 $5 \times$

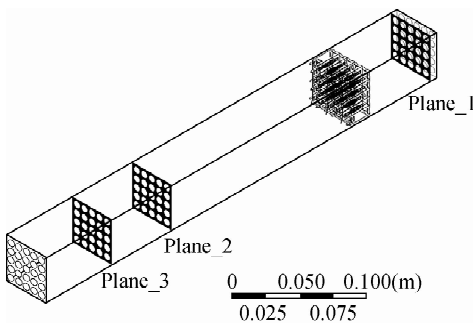


图 2 各截面轴向位置示意图

Fig. 2 Schematic of axial position for different sections

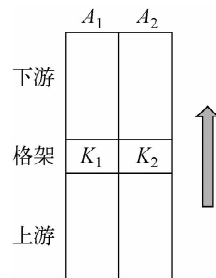


图 3 并联关系

Fig. 3 Parallel connection

5 实验格架典型栅元、边栅元和角栅元的数目。

1.3 各部件阻力评价

1) 摩擦阻力

各子通道的摩擦阻力损失满足达西公式^[6],按下式获得摩擦阻力:

$$K_{T,S,C_friction} = f \frac{l}{(D_h)_{T,S,C}}$$

其中: f 为无量纲摩擦因子; l 为流动长度; $(D_h)_{T,S,C}$ 为各类子通道在格架区的水力直径。

2) 条带形阻

从阻力手册可知,条带形阻为突缩突扩类型,定义条带因子 σ 为某一子通道在格架区的流通面积与该子通道在光棒区流通面积之比,其表达式为:

$$\sigma = \frac{A_{T_grid}}{A_{T_bundle}}$$

其中, A_{T_grid} 和 A_{T_bundle} 分别为格架区和光棒区的流通面积。

各子通道的条带形阻由下式获得:

$$K_{T,S,C_strap} = \left(\frac{\sigma_{T,S,C_strap}}{\sigma_{strap}} \right)^2 K_{strap}$$

其中: K_{strap} 为条带的整体形阻系数,由CFX模拟结果直接获得; σ_{strap} 为整个断面条带的条带因子; K_{T,S,C_strap} 为典型栅元、边栅元和角栅元的条带项阻力系数; σ_{T,S,C_strap} 为典型栅元、边栅元和角栅元的条带因子。

3) 弹簧、刚凸、搅混翼形阻

为获得弹簧、刚凸和搅混翼对各子通道阻力的贡献与对格架阻力的贡献之间的关系,通过分析各类子通道的相似点,本文提出了单栅元理论构想。本构想认为,在 5×5 棒束组件中,以各棒圆心连线和棒间中心线可将整体流动划分为100个流动单元,如图4所示,在内条

带交点周围4个紧邻的流动单元构成1个典型栅元(T栅元),在靠近边条带的两个相邻流动单元构成1个边栅元(S栅元),在组件角上外围边界围成的1个流动单元构成1个角栅元(C栅元)。基于单栅元理论构想,通过分析几何上各类子通道内部阻力项的构成,可得到格架单位面积对应阻力系数与各类子通道的阻力系数之间的关系。

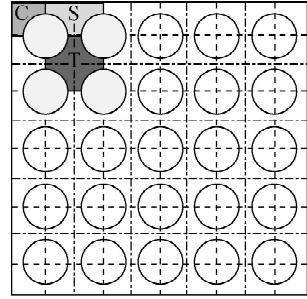


图4 单栅元理论构想

Fig. 4 Single-channel theoretical assumption

流动阻力本质上与流通面积受阻挡的比例有关。基于单栅元理论构想,各类子通道的阻力系数与单位流动单元内的搅混翼、刚凸和弹簧的数量相关,满足以下关系:

$$K_{T,S,C_vane,dimple,spring} = \frac{n_{T,S,C_vane,dimple,spring}}{n_{vane,dimple,spring}} K_{vane,dimple,spring}$$

其中: $n_{vane,dimple,spring}$ 为全格架平均每个流动单元内的搅混翼、刚凸、弹簧的数量; $n_{T,S,C_vane,dimple,spring}$ 为平均每个典型通道(或边通道、角通道)中搅混翼、刚凸、弹簧的数量。 $K_{vane,dimple,spring}$ 通过CFX的计算结果扣除光条带的阻力损失得到:

$$K_{vane,dimple,spring} = K_{cfx_vane,dimple,spring} - K_{strap}$$

其中: $K_{cfx_vane,dimple,spring}$ 为基于图5分别构造结构

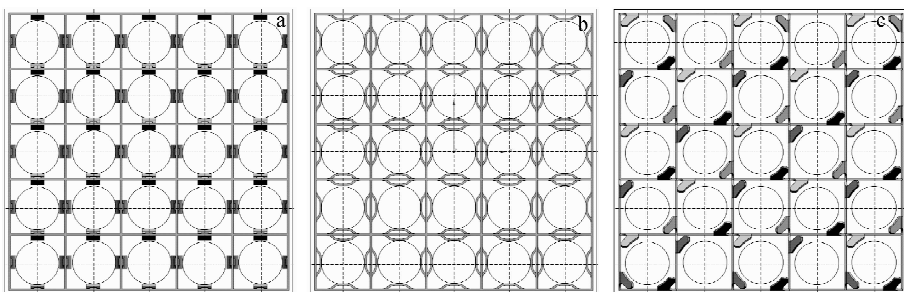


图5 弹簧(a)、刚凸(b)、搅混翼(c)阻力系数的计算模型

Fig. 5 Calculation model for resistance coefficient of spring (a), dimple (b) and vane (c)

获得的带弹簧、刚凸、搅混翼的全流道阻力系数； K_{strap} 为光条带的全流道阻力系数； $K_{\text{vane, dimple, spring}}$ 为全流道弹簧、刚凸、搅混翼的阻力系数。基于单栅元构想则可得到各子通道内部弹簧、刚凸、搅混翼的形阻。

2 CFD 模拟

2.1 计算对象与网格

CFD 模拟采用 CFX14.5 计算, 网格划分采用 ICEM14.5 进行。模拟对象为 5×5 棒束定位格架。定位格架高为 33 mm, 燃料元件棒直径为 9.5 mm, 棒间距为 12.6 mm^[7], 入口段长度为 110 mm, 出口段长度为 510 mm, 流体域外围尺寸为 66.1 mm \times 66.1 mm。

CFD 模拟的格架结构分别为光条带(图 6a)、条带+弹簧(图 5a)、条带+刚凸(图 5b)、条带+搅混翼(图 5c)和实验格架(图 6b)。

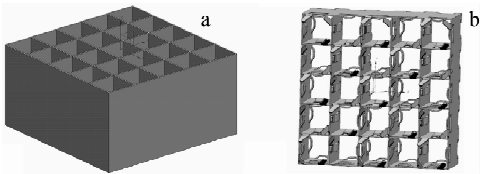


图 6 光条带(a)和实验格架(b)的计算模型

Fig. 6 Calculation model for strap (a) and test grid (b)

2.2 计算工况

计算工况取典型的临界热流密度实验工况, 计算设置列于表 1。

2.3 网格敏感性分析

为确保数值计算结果达到网格无关, 选择光条带格架(图 6a)进行网格敏感性分析, 如图 7 所示。可见, 网格 2 的结果已基本满足计算的精度要求, 且网格数量仅为网格 3 的一半, 因此后续计算采用网格 2 的网格设置。

表 1 计算设置

Table 1 Calculation setting

参数	数值
压力, MPa	10.3
入口温度, °C	210
入口流速, m/s	3.154
出口静压, Pa	0
外围壁面边界	无滑移/自由滑移

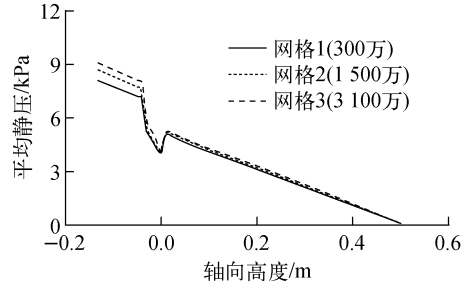


图 7 不同网格尺寸下平均静压的沿程分布

Fig. 7 Average pressure with different meshes along axial direction

3 结果分析

为了更充分验证基于 CFD 方法格架局部阻力系数计算模型的正确性, 本研究采用筒体无滑移和自由滑移两种边界条件, 对 5 种格架方案进行模拟, 结果列于表 2、3。基于表 2、3 中光条带、条带+弹簧、条带+刚凸、条带+搅混翼的计算结果, 根据理论模型构建出典型栅元、边栅元和角栅元的阻力系数, 结果列于表 4。表 4 中亦列出两种边界条件下两种计算途径结果的相对偏差, 计算公式如下:

$$\text{相对偏差} = \frac{K_{\text{assembled}} - K_{\text{calculated}}}{K_{\text{calculated}}} \times 100\%$$

其中, 格架阻力系数 $K_{\text{assembled}}$ 基于理论模型构建得到, $K_{\text{calculated}}$ 由实验格架的 CFX 计算结果得到。

由表 4 可见, 基于本文提出的子通道阻力系数计算模型重构获得的全格架阻力与数值模拟结果吻合较好, 初步验证了模型的准确性。

表 2 无滑移边界 CFX 计算结果

Table 2 CFX calculation results of no-slip boundary

截面	静压/Pa				
	光条带	条带+弹簧	条带+刚凸	条带+搅混翼	实验格架
Plane_1	5 289	5 995	7 247	5 852	7 228
Plane_2	1 317	1 313	1 318	1 288	1 294
Plane_3	693	693	695	676	678

表 3 自由滑移边界 CFX 计算结果
Table 3 CFX calculation results of free-slip boundary

截面	静压/Pa				
	光条带	条带+弹簧	条带+刚凸	条带+搅混翼	实验格架
Plane_1	4 096	4 759	5 941	4 671	5 989
Plane_2	927	919	915	925	930
Plane_3	488	487	486	485	487

表 4 子通道阻力系数计算模型验证
Table 4 Validation of calculation model
for sub-channel resistance coefficient

方法	位置	阻力系数	
		无滑移	自由滑移
理论模型构建	典型栅元	0.760	0.732
	边栅元	0.887	0.830
	角栅元	1.114	1.021
	全流道	0.828	0.787
程序直接计算	全流道	0.811	0.768
相对偏差, %	全流道	2.08	2.40

4 结论

本文基于阻力轴向串联和径向并联相加的思想,提出了单栅元理论构想,构建了基于 CFD 方法计算格架局部阻力系数的理论模型。此外,通过 CFD 建模分析格架中各单元结构对阻力系数的贡献,获得各单元构件的阻力系数,并以此为基础得到实验格架内各子通道及全流道的局部阻力系数,通过与 CFX 程序直接计算结果相比较,验证了计算模型的准确性。后续将开展相关实验进一步验证该计算模型的正确性。

参考文献:

[1] LIU C C, FERNG Y M. Numerically simulating the thermal-hydraulic characteristics within the fuel rod bundle using CFD[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240: 3 078-3 086.

[2] DOMINGUEZ-ONTIVEROS E E, HASSAN Y A. Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 5×5 rod bundle with spacer grids using PIV and MIR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 888-899.

[3] NAVARRO M A, SANTOS A A C. Evaluation of a numerical procedure for flow simulation of a 5×5 PWR rod bundle with a mixing vane spacer [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(8): 1 190-1 196.

[4] 陈畏洪,张虹,朱力,等. CFD 方法在棒束定位格架热工水力分析中的应用研究[J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 34-38.
CHEN Weihong, ZHANG Hong, ZHU Li, et al. Research on application of CFD method in thermal-hydraulic performance analysis of rod bundle grid [J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(5): 34-38(in Chinese).

[5] IMAIZUMI M, ICHIOKA T. Development of CFD method to evaluate 3-D flow characteristics for PWR fuel assembly[C]// Transaction of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 13). [S. l.]: [s. n.], 1995.

[6] IDELCHIK I E. Handbook of hydraulic resistance[M]. 2nd ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.

[7] 陈杰,陈炳德,张虹. 燃料组件格架几何建模及网格划分技术[C]//核动力工程热工流体专集. [出版地不详]:[出版者不详],2010.