

文章编号：0258-0926(2017)S2-0029-05；doi: 10.13832/j.jnpe.2017.S2.0029

# 基于 CFD 的燃料组件上管座阻力特性数值模拟研究

魏宗岚，杜思佳，王啸宇，吴广皓，刘松涛，张 渝

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，成都，610213

**摘要：**基于计算流体力学（CFD）对燃料组件上管座内冷却剂的流动进行数值研究，形成了上管座阻力特性数值模拟方法，结合整体水力学实验中上管座阻力系数实验结果，验证了计算方法的合理性。基于 CFD 对燃料组件上管座的阻力特性进行了分析和评价，说明了阻流塞是实验测量结果与参考数据存在差异的主要原因，并给出了上管座阻力系数的取值建议。

**关键词：**上管座；水力学；CFD；阻力系数

**中图分类号：**TL352 **文献标志码：**A

## Numerical Simulation Study on Resistance Characteristics of Top Nozzle in Fuel Assembly Based on CFD

Wei Zonglan, Du Sijia, Wang Xiaoyu, Wu Guanghao, Liu Songtao, Zhang Yu

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

**Abstract:** In this paper, numerical simulation study is conducted for the flow of coolant in the top nozzle of the fuel assembly based on CFD methodology and the general simulation settings have been proposed. Comparison between the results of measured coefficient in the experiment and CFD simulation validated the feasibility of this calculation method. Based on CFD simulation, the resistant characteristics of different components of the top nozzle had been evaluated. The analysis and evaluation showed that the main reason for the difference of the experiment data of the top nozzle with the reference data is the resistance coefficient value of the fuel assembly top nozzle. Recommended value is proposed.

**Key words:** Top nozzle, Hydraulic, CFD, Resistance coefficient

### 0 引 言

燃料组件是核反应堆的核心部件，具有复杂的结构，包含燃料棒、格架、导向管、下管座和上管座等。复杂的结构也会造成堆芯冷却剂流动阻力特性复杂，进而影响堆芯的压降、流量分配以及水力学载荷等反应堆水力学设计重要参数的变化。因此，燃料组件各部件阻力系数的确定对于反应堆水力学设计十分重要，通常工程上采用整体水力学模拟实验方法获得。

在某参考组件的整体水力学实验中发现，重

新测量得到的上管座阻力系数，与该组件的上管座阻力系数的参考值有明显差异。由该阻力系数作为水力学计算输入得到的水力载荷，将使得组件压紧力裕量大幅减少，给燃料组件压紧弹簧的设计带来了挑战。

因此，找出该组件上管座阻力系数出现明显差异的原因并最终确定上管座阻力系数，对于组件设计十分关键。目前，实验确实是确定阻力系数的最重要依据，但实验开展起来耗资较大，研究周期长，无法做大量的对比实验；而数值模拟

则可以基于计算流体力学 (CFD) 对燃料组件内冷却剂的流动进行数值计算, 可以方便快捷又经济地进行对上管座水力学特性的评价和分析。

因此, 本文基于 CFD 方法对上管座阻力系数进行了研究, 对比分析该参考组件上管座组件的阻力特性, 给出上管座阻力系数的取值建议。

## 1 分析对象

### 1.1 整体水力学实验

实验本体主要包括参考组件模拟件、堆芯上下板模拟件、试验筒体、过渡段、测压嘴等。为了保证燃料组件其他部件阻力测量的准确性, 避免导向管内旁流的影响, 在上管座组件中加入了阻流塞组件。

### 1.2 上管座结构

上管座组件由上管座、压紧板弹簧及板弹簧压紧螺钉等组成。上管座是一个盒式结构件, 它作为燃料组件的上部构件, 除了为控制棒组件和固定式堆芯相关组件提供保护空腔外, 还是冷却剂出口, 由顶板、连接板以及围板组成一个整体。连接板上开有 24 个导向管连接孔、1 个仪表管连接孔和许多流水孔, 冷却剂经过流水孔进入上管座空腔混合后流出上管座。

上管座顶板顶部四边上用压紧螺钉分别固定了 4 组压紧板弹簧, 压紧弹簧与堆芯上板直接接触, 给燃料组件提供足够的压紧力以向轴向压紧燃料组件。参考组件整体水力学实验中在上管座空腔内放置阻流塞组件, 包括压紧部件和悬挂在其下的 24 根阻流塞棒, 用 24 个螺母将其连接到连接板上, 限制导向管内冷却剂的旁通流量。上管座组件结构如图 1a 所示。阻流塞组件在结构上和上管座组件耦合在一起, 给上管座阻力系数的测量结果引入额外的增量, 阻流塞的阻力并非燃料组件实际结构导致, 目前并未进行其分离阻力系数测量实验。

### 1.3 差异原因分析

参考组件整体水力学实验中测得的上管座阻力系数结果与参考数据有明显差别, 即实验测量中上管座组件阻力系数为 12.770, 参考阻力系数为 9.815。

参考阻力系数也是通过阻力系数测量实验获

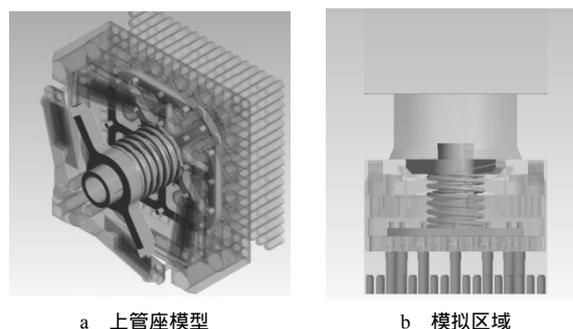


图 1 上管座计算模型示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Top Nozzle Computational Model

得, 但由于对该实验的系统布置和过程资料较少, 不清楚该实验中采用的限制导向管旁流的具体结构, 但肯定与本次所采用的阻流塞结构不同, 这将直接影响上管座组件的阻力系数结果。且该实验中测量了上管座分离的阻力系数为 4.221, 将阻流结构的阻力保守地考虑到了堆芯上板部分, 即 5.594。

本次整体水力学实验中并没有单独测量上管座分离的阻力系数, 且重新设计了阻流塞, 可能是造成整个上管座组件 (包括上管座, 阻流塞和堆芯上板) 的阻力系数比参考数据高很多的主要原因。阻流塞并非燃料组件真实结构, 将此阻力一并考虑为水力学计算的输入, 将造成计算结果过于保守。

因此, 本文采用 CFD 分析阻力系数出现差异的原因。首先建立采用 CFD 计算上管座阻力系数的方法, 通过实验结果验证 CFD 方法的合理性, 再通过 CFD 计算多种工况分析上管座的阻力特性, 找出阻力系数差异出现的具体原因。

## 2 计算方法和验证

### 2.1 计算方法介绍

为了尽可能模拟燃料组件上管座内的真实流动情况, 本文对参考组件的上管座组件进行了整体建模, 模拟区域包括燃料棒端部、导向管、上管座、阻流塞和堆芯上板, 如图 1b 所示。

为得到一个合理、可行的分析模型, 在整体模型基础上, 需要对实际结构做适当简化。如忽略燃料棒端部倒角、板弹簧装配缝隙、沉孔等精细结构, 尽可能避免在流体域出现窄缝、尖角等

表 1 验证计算工况主要参数  
Table 1 Main Parameters of Validation Conditions

工况	入口流速/m·s <sup>-1</sup>	入口雷诺数 $Re/\times 10^4$	水力学直径 /mm	动力粘度 /kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	温度 /
工况一	3.0	7.4	10.18	$4.04\times 10^{-4}$	978	70
工况二	5.0	12.3				
工况三	8.0	19.7				
工况四	—	—				

结构,则可以有效减少整体网格尺寸,提高网格质量,并减小网格生成时出错的概率。流体域出口取足够长度使得流体能够充分发展,避免出口效应对压降计算造成的影响。

## 2.2 计算方法验证

在上述基础上进行网格划分,并开展网格敏感性分析,得到网格无关解,由此确定了合适的网格划分方案。

湍流模型的选择对于单相 CFD 求解复杂流场至关重要<sup>[1]</sup>。常用的湍流模型有以下 3 种:

(1) 标准  $k-\varepsilon$  模型:两方程模型,针对发展很充分的湍流流动建立,适用于高雷诺数  $Re$  的湍流计算。因此标准  $k-\varepsilon$  模型在模拟各向异性的湍流时,比如强旋流、弯曲壁面或流线流动会产生一定的失真。

(2)  $k-\omega$  模型:其优势在于对近壁面的处理,选择湍流频率  $\omega$  替代湍动耗散率  $\varepsilon$  作为另一个湍流参数,对边界层内流动的模拟可从壁面函数法自动转变为低雷诺数,因而对近壁区的模拟更为精确。

(3) 剪切应力输运 SST 模型:考虑湍流剪切应力,通过构造限制算符来捕捉湍流剪切力的输运特性,能够准确预测负压力梯度下流动分离的起点和量级。

基于同一上管座模型以及网格,分别采用以上 3 种湍流模型进行了计算。针对表 1 中所列工况,计算结果表明湍流模型对于压降计算结果影响很小,因此选择对于高雷诺数  $Re$  湍流计算兼具较高的数值计算稳定性、经济性和计算精度的  $k-\varepsilon$  模型。

针对参考组件阻力系数测量实验工况进行了 CFD 计算,计算工况见表 1。CFD 计算分析了入口流速分别为 3、5、8 m/s,其对应的雷诺数  $Re$  范围从  $7\times 10^4\sim 20\times 10^4$ ,处于参考组件整体水力学

实验工况雷诺数范围内,可以与实验结果进行直接对比。

由 CFD 计算得到的流动截面上速度分布可知,复杂的上管座结构造成了流场的不规则扰动,导致压力分布也产生剧烈变化,形成压力损失;流体进入堆芯上板流水孔后,由于流通面积的突扩突缩,也造成了剧烈的流场变化。堆芯上板下游设置了足够长的流动距离,保证了堆芯上板下游流动的充分发展,计算域出口处流动接近均匀分布,确保了出口效应对计算误差的影响降到了最小。

整个上管座组件的阻力系数可通过 CFD 计算结果处理得到<sup>[2]</sup>,计算关系式为:

$$K_{\text{top-nozzle}} = \frac{2}{\rho v^2} (p_1 - p_2) \quad (1)$$

式中,  $K_{\text{top-nozzle}}$  为上管座组件的阻力系数;  $\rho$  为平均密度;  $v$  为参考速度;  $p_1$  和  $p_2$  为上游测量平面和下游测量平面的总压值。上下游测量平面与整体水力学实验中上管座组件压降测量位置保持一致,即上游测量平面为上管座入口上游约 50 mm,下游测量平面为堆芯上板下游约 200 mm。在每一个流动方向的横截面上,总压均会呈现一定的分布,采用截面平均总压值来代表该截面的总压,平均总压的计算关系式为:

$$p_{\text{total-avg}} = \frac{\int p_{\text{total}} \times v dS}{\int v dS} \quad (2)$$

式中,  $p_{\text{total}}$  为流动方向的横截面上各节点的总压;  $v$  为该节点的流体速度;  $dS$  为该节点面积<sup>[3]</sup>。

从表 2 可以看出,计算结果和实验测量结果的相对偏差很小,均在 3% 以内,从而验证了 CFD 计算上管座组件压降流动阻力系数的合理性,也表明本文计算上管座组件流动阻力特性的数值模拟方法正确。

表2 验证计算工况阻力系数结果对比

Table 2 Resistance Coefficient Results Comparison between Simulations and Experiments of Validation Conditions

工况	阻力系数		
	实验测量	CFD 计算	相对偏差/%
工况一	12.622	12.900	+2.2
工况二	12.854	12.865	+0.1
工况三	12.985	12.816	-1.3

注：相对偏差=(CFD 计算值-实验测量值)/实验测量值

### 3 上管座阻力特性分析

参考组件整体水力学实验中测量得到的上管座组件阻力系数，与参考组件上管座组件阻力系数的参考数据有明显差异，主要原因可能是由阻流塞造成，而阻流塞在结构上又和上管座耦合在一起，目前并未开展相应的分离性实验研究。因此本节尝试采用 CFD 方法对不同上管座结构组合进行阻力特性对比分析，为最终确定上管座阻力系数提供建议。

#### 3.1 整体阻力特性

2.2 节已经计算了参考组件阻力测量实验中上管座组件的阻力系数，模拟区域包括了燃料棒端部、导向管、上管座、阻流塞和堆芯上板。

将计算域中的阻流塞去除之后，针对参考组件上管座组件再次进行 CFD 计算(即模拟区域包括了燃料棒端部、导向管、上管座和堆芯上板)，计算结果见表 3。可以看出，在没有阻流塞的情况下，参考组件整个上管座组件的阻力系数大幅减小，阻流塞组件的阻力系数占了总阻力系数的 40%以上。而相对于参考组件的参考阻力系数 9.815 而言，其所考虑的阻流结构的阻力系数仅占总阻力系数的 23%。因此证明了确实是由于新的阻流塞结构设计存在实验测量的上管座组件阻力系数与参考数据造成了明显差别。

表3 上管座组件阻力系数结果对比

Table3 Resistance Coefficient Results Comparison between Top Nozzles with and without the Plug

工况	上管座组件阻力系数		阻流塞阻力系数份额/%
	有阻流塞	无阻流塞	
工况一	12.900	7.581	41.23
工况二	12.865	7.556	41.27
工况三	12.816	7.518	41.34

#### 3.2 上管座分离阻力特性

上管座与阻流塞、堆芯上板在结构上耦合在一起，造成了测量单独上管座分离阻力系数的困难。通过 CFD 计算可以获取分离后上管座部件本身的阻力系数。模拟区域主体为上管座部件，相较于上一节的计算对象，去掉了阻流塞和堆芯上板部件，为了获得相似的上管座入口流动条件，保留了燃料棒端部和导向管部件。本小节只关注上管座部件的阻力系数，因此压降计算的上游平面选择为上管座入口上游约 20 mm (即除去了流体经过燃料棒端部由于流通面积突变造成的压力损失)，下游测量平面为上管座入口下游约 400 mm，2 个平面的平均总压差可以认为是流体经过上管座分离部件所产生的压力损失。

从表 4 可以看出，CFD 计算得到参考组件上管座的阻力系数结果为 4.6 左右，随着雷诺数  $Re$  的增加，阻力系数略有降低。当  $Re=50 \times 10^4$  时，上管座的阻力系数结果为 4.594，这与上管座单独部件的阻力系数参考数据 4.221 有大约 8.3% 的相对偏差，这对于热工水力计算来说是可以接受的，因此可以认为在参考组件的水力载荷计算中，直接采用 CFD 计算得到的上管座部件阻力系数的结果作为输入是合理且更偏保守的。

表4 上管座分离部件阻力系数计算结果

Table 4 Resistance Coefficient Results of Separated Top Nozzle

工况参数	上管座分离部件阻力系数
工况一	4.686
工况二	4.661
工况三	4.640
工况四	4.594

在目前的水力学实验中，由于上管座和阻流塞在结构上是耦合在一起的，并未单独测量上管座的阻力系数，而在水力学计算中需要上管座的阻力系数作为输入，因此，建议采用  $Re=50 \times 10^4$  时 CFD 计算得到的参考组件上管座阻力系数作为水力学力计算输入。

## 4 结论与建议

本文对燃料组件上管座组件的阻力特性进行了研究，基于 CFD 方法对参考组件的上管座组件

进行了数值模拟分析，与实验结果进行了对比，并分析了不同上管座结构的阻力特性，得出以下结论：

(1) 建立了针对燃料组件上管座阻力系数计算的 CFD 方法，并通过整体水力学实验结果验证了该计算方法的正确性。

(2) 基于 CFD 分析了上管座结构的阻力特性，说明了是由于阻流塞造成了水力学实验结果中上管座组件阻力系数较参考数据有较大差别。

燃料组件上管座阻力系数是水力学计算的燃料组件各部件阻力系数输入参数中的重要组成部分，整体水力学实验所测得上管座组件阻力系数包含了阻流塞带来额外阻力，会造成计算结果的过于保守，而目前暂时没有不带阻流塞的实验数

据为上管座部件阻力系数的确定提供支撑；CFD 计算结果的合理性已经通过实验数据进行了证明，因此本文建议直接采用 CFD 计算的上管座部件的阻力系数。

参考文献：

- [1] Pope. Turbulent Flows [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [2] IDELCHIK IE, Fried E. Handbook of hydraulic resistance, 2 edition [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
- [3] 陈曦. 基于 CFD 方法格架局部阻力系数计算模型研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(02): 277-281.

(责任编辑：杨洁蕾)