

先进燃料组件水力特性实验研究与数值模拟

李华奇, 黄兆庆, 何军山

(中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:采用实验和数值计算方法对先进燃料组件进行水力特性研究。燃料组件采用 5×5 棒束, 棒径尺寸与原型燃料棒相一致, 计算几何模型同于实验装置, 以确保实验计算结果的可比性。研究表明: 结构搅混格架阻力系数为 1.10, 跨间搅混格架阻力系数为 0.84。实验结果与 CFX 程序模拟计算值比较, 相对偏差均在 6% 以内。这一研究结果为燃料组件的结构设计和热工水力设计提供了必不可少的依据。

关键词:先进燃料组件; 定位格架; 阻力特性; 理论计算

中图分类号: TL41 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2007)S0-0055-04

Hydraulic Characteristics Test and Numerical Simulation of Flow Field in Advanced Fuel Assembly

LI Hua-qi, HUANG Zhao-qing, HE Jun-shan

(National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The purpose of this research is to obtain hydraulic characteristics in advanced fuel assembly. The test and numerical simulation were employed in the research. Fuel assembly for test is composed of 5×5 fuel rods. The radius size of the rods is the same as the prototype. The geometry used in numerical simulation is identical with the test mode, so that ensure the comparability between test and computational results. The research shows that the resistance coefficient of constitution grid and span grid is 1.1 and 0.84, respectively. The relative deviation between test and computational results is less than 6%. This research provides input data for structure design and thermohydraulic analysis of the fuel assembly.

Key words: advanced fuel assembly; constitution and span grid; hydraulic characteristics; numerical simulation

先进燃料组件是在 AFA-3G 燃料组件的基础上我国自行设计的改进型燃料组件, 其预期的热工性能与 AFA-3G 相比有所提高。为

了达到这一预期目标, 对 AFA-3G 的定位格架进行了改进, 增大了格架搅混翼的投影面积。由于先进燃料组件的定位格架与 AFA-3G 相

比有较大变化,这必然导致其水力特性的变化,因此,必须对新设计的先进燃料组件进行研究,通过实验得到其水力特性,为燃料组件的结构设计和热工水力设计提供必不可少的依据和临界热流密度实验子通道分析提供必需的输入参数,同时以实验模型为对象进行理论计算,并将实验结果与计算结果进行对比分析。

1 实验装置

1.1 实验模型

在 5×5 燃料组件部件水力特性试验中,选择方形筒体作为水力特性实验的外筒,其长度为1 804 mm,筒内横截面为 $65.1\text{ mm}\times 65.1\text{ mm}$ 。 5×5 棒束组件总长为1 800 mm,入口段裸棒长约400 mm。由于没有上、下管座,燃料组件通过4角的4根燃料棒螺纹连接在法兰上,用以固定燃料组件。在实验筒体上对应于进、出口和燃料棒、定位格架等位置处设置压差测点(图1)。图中AB、BC、CD、DE、EF、AF分别为各段压差测点,每一等高测压面上均布4个测压点。实验筒体内包括3道结构搅混格架和两道跨间搅混格架。为防止燃料棒与格架在筒体内移动,将格架点焊在中间的1根棒上,并在组件下游处增设多孔挡板。

实验采用临界热流密度筛选实验确定的

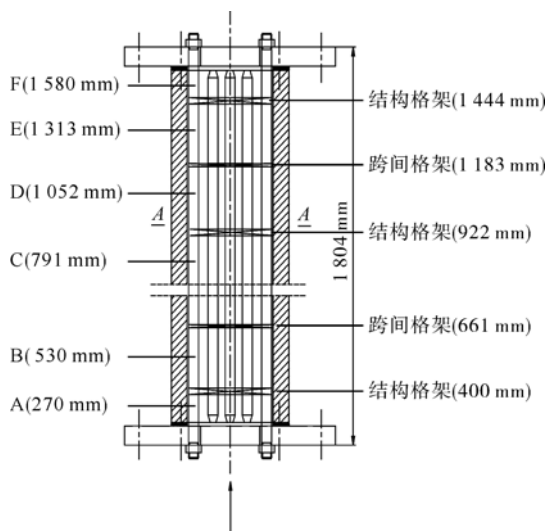


图1 实验模型及压差测点示意图

Fig. 1 Sketch of test model and pressure difference measurement

5×5 格架,其截面形状示于图2。

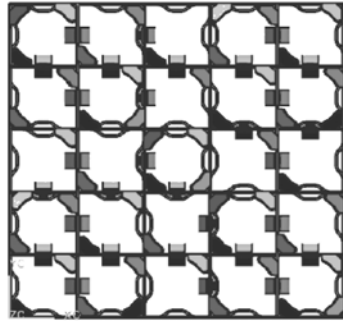


图2 定位格架截面示意图

Fig. 2 Section pattern of constitution grid

1.2 实验回路

根据流动阻力自模原理,实验流量需满足自模。由此,实验流量范围确定为 $20\sim 80\text{ m}^3/\text{h}$ 。实验回路参数为:主泵额定流量, $200\text{ m}^3/\text{h}$;主泵额定扬程, $65\text{ m (H}_2\text{O)}$;工作压力, $\leq 1.0\text{ MPa}$;工作温度, $\leq 70\text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验装置由主泵、稳压器、冷却器、阀门、实验模型和测量仪表等组成。回路流量由主泵变频器调节和调节阀调节。

实验装置流程如图3所示。

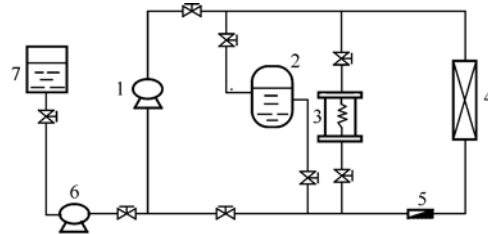


图3 实验回路流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test facility

- 1——主泵;2——稳压器;3——冷却器;
4——实验模型;5——涡轮流量计;
6——补水泵;7——水箱

2 实验方法

2.1 实施的技术路线

实验模型垂直安装在试验回路中,水流方向自下向上。试验筒体上相应于燃料组件结构搅混格架、跨间搅混格架及棒束处的四面分别设置压差测点,用涡轮流量计测量回路流量,最后计算出单个定位格架的阻力系数。

首先,通过整体实验模型获得各段不同雷诺数下的总阻力系数^[1]:

$$\xi_0 = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \quad (1)$$

式中: ξ_0 为总阻力系数,无量纲; v 为参考截面流速,m/s; Δp 为压差,Pa; ρ 为水密度,kg/m³。

然后,去除模型内 A、B 间结构搅混格架,得到光棒摩擦阻系数^[2]:

$$\lambda = \frac{2\Delta p De}{\rho v^2 L} \quad (2)$$

式中: λ 为摩擦阻力系数,无量纲; De 为当量直径,m; L 为光棒长度,m。

利用不同雷诺数下的光棒摩擦阻力系数计算得到各测量段的光棒摩擦阻力。将总阻力减去光棒摩擦阻力后,求得定位格架形阻:

$$\xi_{形} = \xi_0 - \lambda L / De \quad (3)$$

2.2 测量参数及仪器仪表

1) 流量

采用 LW-100 涡轮流量计测量回路流量,其精度为 $\pm 1\%$ 。

2) 压差

根据不同压差选用不同量程的 EJA130 智能差压变送器,所使用的量程分别为 0~30 kPa 和 0~500 kPa,精度均为 $\pm 0.5\%$ 。

数据采集系统为英国 SOLARTRON 仪表公司的 3595 系列隔离式测量模块(IMP)。实验中的差压和流量信号分别采用 3595IC 模块和 35952A 模块采集。

3) 温度

水温变化范围为 10~70 °C。选用量程为 0~100 °C 的铂电阻温度计测量水温,其精度为 $\pm 0.5\%$ 。

3 实验结果及其分析

首先,实验得到了光棒摩擦系数以及对应的雷诺数,拟合出如下公式:

$$\lambda = 0.2104 Re^{-0.2214} \quad (4)$$

通过式(4)计算得到各测量段的摩擦阻力系数和总阻力系数,利用式(3)得到各定位格架的形阻系数(图 4、5)。

图 4、5 表明:在雷诺数为 1.32×10^5 时,各定位格架的阻力系数已达到自模,结构格架阻力系数为 1.1,跨间格架阻力系数为 0.84。与

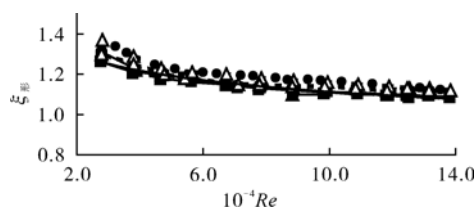


图 4 结构格架阻力系数曲线

Fig. 4 Resistance coefficient curves of constitution grid

●—A-B 间;■—C-D 间;△—E-F 间

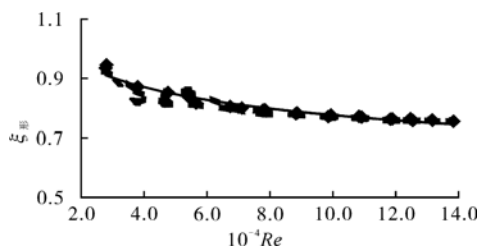


图 5 跨间搅混格架阻力特性曲线

Fig. 5 Resistance coefficient curves of span grid

◆—B-C 间;■—D-E 间

同类格架的阻力相比,其阻力系数有微小增加,说明交混翼对流体流动产生了纵向和横向影响。

4 计算结果

采用 CFX 程序对局部实验模型进行了计算分析。几何求解域包括锥形入口段、上法兰、一道结构搅混格架、一道跨间搅混格架。出口段为光棒流动区域。

对于复杂几何区域,大多采用杂交网格^[2]。本研究的流场计算区域采用了结构化而非结构化相结合的网格。在包含格架的流场内,采用计算机自动生成的四面体网格,而在只有光棒流场区和入口段区,采用了六面体结构网格。具体分段及其长度示于图 6。

流体物性参数和入口流量均与实验的相同,从而保证了两者间的可比性。计算中,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。结构格架和跨间格架的压降计算结果列于表 1。

计算结果表明:流体在进入结构格架前,横向流速几乎为零,在流经两个格架后,流体的横向流动发生了较大变化。

图 7 所示为流体流出结构格架的横向 1/4

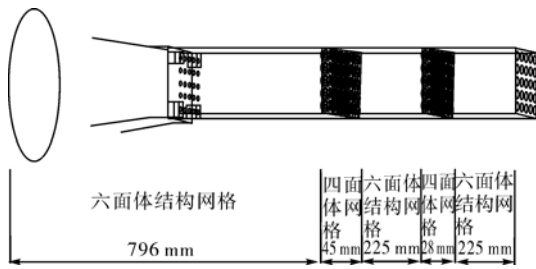


图6 计算网格分布

Fig. 6 Distribution of mesh in computational region

表1 用CFX程序计算的压降
Table 1 Calculated pressure drop

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	Δp_1 /kPa	Δp_2 /kPa
20.71	4.59	3.84
37.20	13.27	11.09
54.23	27.34	22.90
68.42	42.21	35.38

注: $t=45\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho=991.08\text{ kg/m}^3$, $\mu=0.000\ 596\ 19\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

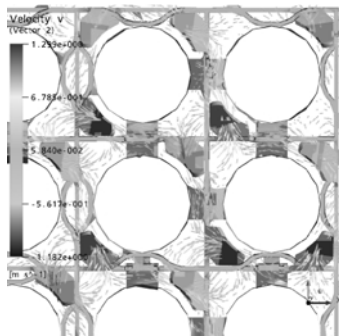


图7 结构格架处1/4横截面速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector section pattern at constitution grid

截面处的速度矢量图。从图7可看到:流体受到了交混翼的影响,整个截面上均出现了横向

流动;在棒间中心区域,均出现了顺着交混翼弯折方向的旋涡流动,且横向最大速度达到了1.2 m/s左右。

在同一流量下,将实验结果与计算值进行了比较(表2)。由表2可见,两者之间的相对偏差在6%以内。

表2 实验与计算的压降比较

Table 2 Comparison of pressure drops from calculation and test

流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	Δp_1 /kPa		相对偏 差/%	Δp_2 /kPa		相对偏 差/%
	计算值	试验值		计算值	试验值	
20.71	4.59	4.32	5.9	3.84	3.71	3.3
37.20	13.27	12.69	4.4	11.10	10.84	2.3
54.23	27.34	25.73	5.9	22.90	21.88	4.4
68.42	42.21	39.84	5.6	35.38	33.70	4.7

5 结论

1) 采用实验和计算方法对先进格架的水力特性进行了研究,得到了结构格架和跨间格架的阻力系数分别为1.1和0.84。

2) 实验压降值与CFX程序计算值间的相对偏差在6%以内。

3) 本研究结果为先进燃料组件的设计提供了依据。

参考文献:

[1] 华绍雷,扬学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
[2] KUPPER C, HENRY F S. Numerical simulation of flow in a circular duct fitted with air-jet vortex generators[J]. Int J Numer Methods Fluids, 2002, 38(10): 919-943.