

组合阀流动阻力实验研究与数值模拟

蔡伟, 薄涵亮, 秦本科

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:组合阀流动阻力是控制棒水压驱动系统设计的关键参数之一。对改进后的新阀进行实验研究, 获得了各流道差压、流量、阻力系数和流量系数等关键数据。利用计算流体动力学软件 CFX 进行数值模拟, 分析了雷诺数 Re 对流动阻力的影响。在此基础上, 拟合得到了阻力系数的经验公式, 为驱动系统优化设计和理论分析提供了实验基础和理论依据。

关键词:控制棒水压驱动系统; 组合阀; 流动阻力; 数值模拟

中图分类号: TL351.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)11-1012-06

Experimental Research and Numerical Simulation on Flow Resistance of Integrated Valve

CAI Wei, BO Han-liang, QIN Ben-ke

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The flow resistance of the integrated valve is one of the key parameters for the design of the control rod hydraulic drive system (CRHDS). Experimental research on the improved new integrated valve was performed, and the key data such as pressure difference, volume flow, resistance coefficient and flow coefficient of each flow channel were obtained. With the computational fluid dynamics software CFX, numerical simulation was executed to analyze the effect of Re on the flow resistance. On the basis of experimental and numerical results, fitting empirical formulas of resistance coefficient were obtained, which provide experimental and theoretical foundations for CRHDS's optimized design and theoretical analysis.

Key words: control rod hydraulic drive system; integrated valve; flow resistance; numerical simulation

核反应堆控制棒水压驱动系统^[1]采用新型的内置式控制棒驱动技术, 主要应用于一体化布置核反应堆, 如低温核供热堆, 还可推广到其

他研究堆。该系统由循环泵、过滤器、组合阀和驱动机构组成。组合阀是整个驱动系统的控制部件, 其流动阻力是驱动系统设计的关键参数

之一。研究组合阀的流动阻力,可指导驱动系统的结构优化设计和设备参数选取,确定控制棒步进时间,从而提高其控制性能和整个驱动系统的工作性能。

1 组合阀流道结构

组合阀的示意图示于图 1。组合阀由电磁阀、阀顶盖、阀本体和阀底座组成。阀上方有 1 个进口来水流道,与泵出口高压来水相连;下方有 3 个进棒流道出口和 1 个回零流道出口,分别与驱动机构中的相应水压缸相连。

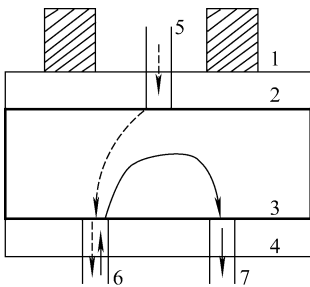


图 1 组合阀示意图

Fig. 1 Scheme of integrated valve

- 1——电磁阀;2——阀顶盖;3——阀本体;4——阀底座;
5——高压来水流道;6——进棒流道;7——回零流道

通过操作组合阀的电磁阀动作,可实现驱动机构的不同工作状态,同时也形成了组合阀本体内部的 6 种流道,其中,3 个为充压入缸(步升)流道,如图 1 中虚线箭头所示,另外 3 个为卸压出缸(步降)流道,如图 1 中实线箭头所示。步升流道结构彼此相似,依据流道的倾斜角度和英文步升(up)的首字母分别命名为 u60、u67.5 和 u76.2;步降流道结构也相似,分

别命名为 d60、d67.5 和 d76.2。

此前研究^[2]发现,旧阀各流道流动阻力较大,流动不均匀,据此,改进了旧阀结构,设计了新阀,主要变化为:增加主要流道管径,调整部分流道角度。除此之外,新阀和旧阀的流道结构基本相似。以 u60 和 d60 流道为例,位于新阀本体内部的步升、步降流道结构实体示于图 2。

2 流动阻力实验

2.1 实验系统与方案

根据组合阀的工作环境特点,对于步升流道和步降流道,所设计的实验系统回路示于图 3。

实验系统由水箱、循环泵、过滤器、调节阀、实验本体组合阀以及测量系统组成。实验使用去离子水,回路流程如下:水箱内的水由循环泵抽出,一部分经由旁路流回水箱,另一部分通过主回路调节阀进入组合阀步升或步降流道后流回水箱,从而完成 1 个循环。测量系统由流量计、差压计、数据采集板和计算机等构成,动态采样频率 500 Hz,时间 40 s,即对各流道稳定后的进出口差压和流量分别采集 20 000 个数据,经平均处理后得到一对差压和流量稳定值。

实验的主要内容是研究新阀在常温下的流动阻力。通过调节旁路调节阀和主回路调节阀的开度改变进入组合阀流道的水流量,从而获得不同流量下所对应的流道进出口差压。为消除系统误差,提高测量数据的可靠性,对于每个流道,从最小流量上行至最大流量和从最大流量下行至最小流量,分别进行 3 轮测量,共获得 6 组数据。根据仪器的参数精度,差压和流量的实验测量误差分别为 0.2% 和 1%。

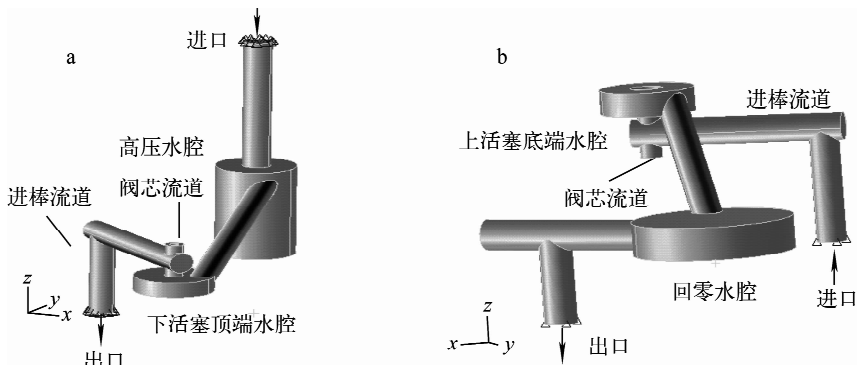


图 2 步升(a)和步降(b)流道结构实体

Fig. 2 Structure entity of step-up (a) and step-down (b) flow channel

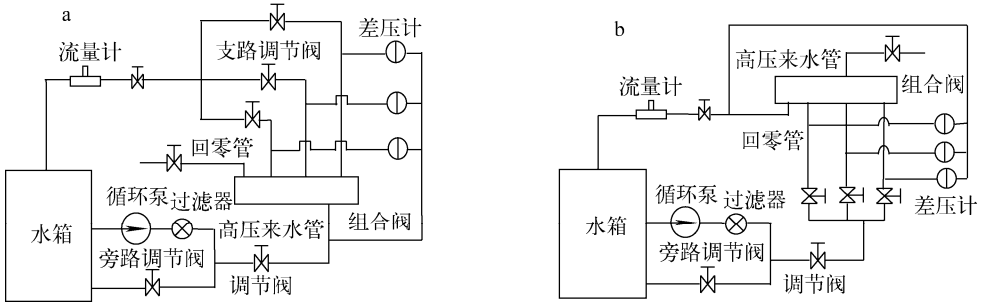


图3 步升(a)和步降(b)流道实验回路

Fig. 3 Experimental loop of step-up (a) and step-down (b) flow channel

2.2 实验结果与分析

管中流动属于粘性流体的受迫运动,对流动状态起决定作用的是雷诺数 Re 。当 Re 较大时,流动进入紊流自模化状态,流动状态及流速分布不再变化,流动阻力系数 ζ (包括局部阻力系数和摩擦阻力系数)与 Re 近似无关^[3]。在流体工程中, $Re = \rho v d / \mu$, 流动阻力系数定义为:

$$\zeta = \Delta p / \frac{1}{2} \rho v^2 = \Delta p / \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 = 2A^2 \Delta p / \rho Q^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流体在某参考截面上的平均速度; d 为管道水力直径; μ 为流体动力粘度; Δp 为流道进出口总压损失(差压); Q 为通过该截面的体积流量; A 为该截面面积。

组合阀的3个步升(或步降)流道结构彼此相似,流动也具有相似性,这里仅以 u60 流道为例进行分析。图4示出新、旧阀 u60 流道的 $\Delta p-Q^2$ 实验对比曲线。从图4可见:对于新、旧阀的6次实验过程, $\Delta p-Q^2$ 均呈现良好的直线关系,直线斜率即是阻力系数的常数倍;新阀曲线的斜率比旧阀小很多,这说明,在相同的流量下,新阀进出口差压损失比旧阀降低许多。可用最小二乘法对图中曲线作直线拟合,求出斜率,进而得到平均阻力系数。同时也可以定义1个流量系数 K (图4中曲线斜率值),它直接反映差压和流量这两个主要性能指标间的关系,即 $K = \Delta p / Q^2 = \zeta \rho / 2A^2$ 。

实验中,泵后(流道进口)压力约为 1.05 MPa,水温为 25 °C,则此工况下水的密度 $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$,动力粘度 $\mu = 8.899 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。根据这些参数计算出的新、旧阀各流道的阻力系数和流量系数列于表1,其中,计算阻力系数时,以流道出口截面为参考。

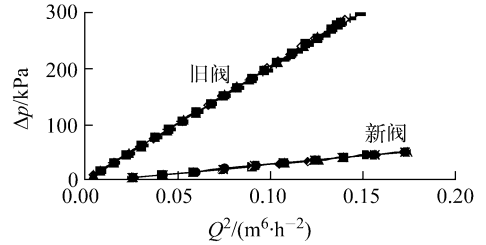
图4 u60 流道 $\Delta p-Q^2$ 曲线Fig. 4 $\Delta p-Q^2$ curves of u60 flow channel

表1 新、旧阀阻力系数和流量系数

Table 1 Resistance coefficients and flow coefficients of new and old integrated valves

流道	ζ		K	
	新阀	旧阀	新阀	旧阀
u60	32.31	42.09	3.992×10^{12}	2.633×10^{13}
u67.5	36.23	57.47	4.475×10^{12}	3.594×10^{13}
u76.2	27.71	42.70	3.424×10^{12}	2.671×10^{13}
d60	45.33	39.78	3.675×10^{12}	2.488×10^{13}
d67.5	49.80	51.93	4.037×10^{12}	3.248×10^{13}
d76.2	42.40	40.92	3.437×10^{12}	2.559×10^{13}

从表1可见,与旧阀相比,新阀步升流道的阻力系数明显减小,而步降流道变化不大,有些流道还略有增加,但这并不意味着新阀流动阻力也随之增加。驱动机构的运动靠组合阀发出的脉冲水流进行控制调节,在一定范围内,阀出口流量越大,水压缸充卸压时间越短,驱动机构的动作响应越快,效果越好。所以,出流能力是组合阀工作性能的重要指标^[4]。表1数据表明,新阀各流道的流量系数均比旧阀小1个量级,约为后者的1/8~1/7,即在给定流道进出口差压(给定输入系统的能量)条件下,新阀出

口流量平方值的提高为旧阀的7~8倍。可见,通过结构改进,组合阀出流能力大为增强,工作性能得到了明显提高。究其原因,是因为新阀在图纸设计的允许范围内,增加了主要流道的管径,使得流体充分混和均匀,减缓了截面形状突变,从而减少了局部能量损失和流动阻力。实验结果证明,新阀的结构改进是合理有效的。

3 流动阻力数值模拟

实验条件受限于室温和不太高的压力。而控制棒水压驱动机构位于反应堆压力容器内,考虑到该处的高温高压环境,须研究温度和压力对流动阻力的影响,这可通过计算流体力学软件的数值模拟来实现。软件选用CFX,计算过程包括几何建模、物理建模、数值求解和后处理,计算内容包括常温下的计算验证和高温下的模拟预测。

3.1 常温下计算验证

常温下计算验证的目的是将数值计算结果与实验结果进行对比,验证数值模拟的可行性。根据新阀各流道几何结构,建立了1:1组合阀流道模型,流动工质取为25℃水,流域参考压力 1.01×10^5 Pa,湍流模型取为 $k-\epsilon$ 模型,壁面函数为Scalable。参考实验测量范围,对于步升流道,计算入口边界分别给定进口法向速度为0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.0 m/s 6个计算点;对于步降流道,计算入口边界分别给定进口法向速度为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m/s 6个计算点;出口边界相对压差为零;其它未定义的面被默认定义为非滑移绝热面。流域网格划分采用四面体网格,并依据组合阀流道结构尺寸对局部位置分别采用线网格控制以及面网格控制进行网格加密控制,对于壁面附近区域,采用棱柱体网格,这样可保证壁面附近速度变化很快的边界层区域的求解精度,同时也有助于提高整个流场的计算精度。

以u60流道为例,数值计算得到的 $\Delta p-Q^2$ 曲线与实验结果的对比示于图5。在图5中,u60u1表示第1次上行实验,u60d1表示第1次下行实验,其余符号同前。

由图5可见,数值计算与实验的结果符合较好,两条曲线基本重合,且数值计算的工况范围既包含了实验工况,又有所拓展。表2列出

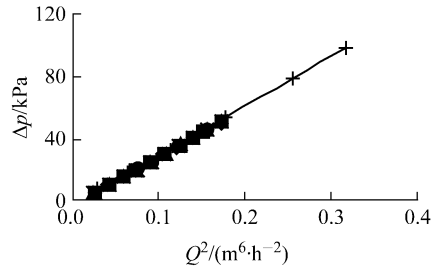


图5 $\Delta p-Q^2$ 曲线的数值计算结果与实验结果的比较

Fig. 5 Comparison of $\Delta p-Q^2$ curves from calculation and experiment

◆—u60u1; ■—u60d1; ▲—u60u2;
×—u60d2; *—u60u3; ●—u60d3; +—计算值

了阻力系数和流量系数数值计算结果及与表1中所列实验值间的相对偏差。表2中参数下标cal表示数值计算值。除u76.2流道的相对偏差约为13%外,其它流道的相对偏差不超过5%,说明数值计算的结果可信。其中,u76.2流道的偏差可能是由计算模型所采用边界条件,诸如入口湍流强度、湍流耗散比率和流道壁面粗糙度等参数与实验工况存在偏差以及流域网格划分精度等所引起的。

表2 阻力系数和流量系数的数值计算结果

Table 2 Numerical results of resistance coefficient and flow coefficient

流道	ζ_{cal}	K_{cal}	与实验值间的相对偏差/%	
			ζ	K
u60	32.30	4.049×10^{12}	-0.03	1.4
u67.5	34.55	4.439×10^{12}	-4.6	-0.8
u76.2	31.43	3.871×10^{12}	13.4	13.1
d60	44.04	3.559×10^{12}	-2.8	-3.2
d67.5	47.31	3.823×10^{12}	-5.0	-5.3
d76.2	41.88	3.384×10^{12}	-1.2	-1.5

3.2 高温下模拟预测

考虑到反应堆的实际情况,假定最高温度为300℃,相应地,为保证水不汽化,环境压力应大于8.6 MPa。模拟过程与常温下的验证计算类似,其中,物理建模部分需重新设计,其它部分的参数设置基本与之相同。

在CFX-Pre中定义6种新的工质,分别为50、100、150、200、250、300℃水,流域参考压力

统一取 13 MPa。对于步升流道,给定进口法向速度为 0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.0 m/s 6 个计算点;对于步降流道,给定进口法向速度为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m/s 6 个计算点。出口边界相对压力取零。

温度和压力对流动阻力的影响主要通过物性参数的影响来体现,其中,温度影响大,而压力影响小。雷诺数体现了物性参数和来流条件的综合效果,是影响流动的主要因素。以 u60 流道为例,图 6 示出了阻力系数和流量系数与雷诺数的关系曲线。其中,计算阻力系数时,以流道出口截面为参考;计算雷诺数时,以流道进口截面为参考。

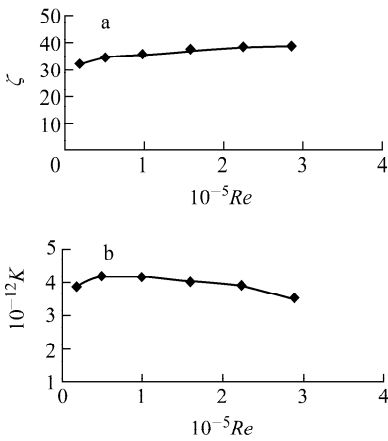


图 6 u60 流道的 $\zeta-Re$ (a)和 $K-Re$ (b)关系曲线

Fig. 6 $\zeta-Re$ (a) and $K-Re$ (b) curves for u60 flow channel

由图 6a 可知, ζ 随进口 Re 的增大而增加,且增加趋势减慢,这符合流体力学经典理论,即流动逐渐进入了紊流自模化区。在图 6b 中, K 先随 Re 的增大而增加,但很快达到最高点,之后又随 Re 的继续增大而减小,且减小趋势加快。这是因为 $K = \Delta p / Q^2 = \zeta \rho / 2A^2$, 其中, ζ 随进口 Re 的增大而增加, Re 对于 ζ 的影响主要来源于温度对 ζ 的影响,而 ρ 随着温度的升高而减少,在二者的综合作用下呈现出了上述变化规律。拐点处所对应的 Re 约为 55 000。当 Re 比较大时, K 随 Re 的增大而减小,这说明,在高 Re 工况下, ζ 值虽略有增加,但流动阻力实际上是减小的,组合阀的出流能力提高。

根据相似原理^[5],影响组合阀流道流动状

况的准则数只有雷诺数 Re 和欧拉数 Eu 。 $Eu = \Delta p / \rho \omega^2$, 实际上即为阻力系数的一半。可见,只要拟合出 $\zeta-Re$ 和 $K-Re$ 的经验式即可对较大工况范围内(包括常温和高温)的流动阻力进行模拟和预测。对 $\zeta-Re$ 曲线进行回归拟合,函数选用对数函数;对于 $K-Re$ 曲线,由于存在拐点,可用多项式函数进行拟合,选用 4 次多项式拟合,则得到各流道经验式如下。

对于 u60, 有:

$$\zeta = 2.8214 \ln Re + 3.59$$

对于 u67.5, 有:

$$\zeta = 2.4496 \ln Re + 8.8267$$

对于 u76.2, 有:

$$\zeta = 2.3944 \ln Re + 7.599$$

对于 d60, 有:

$$\zeta = 2.8263 \ln Re + 15.63$$

对于 d67.5, 有:

$$\zeta = 3.4228 \ln Re + 14.772$$

对于 d76.2, 有:

$$\zeta = 2.8901 \ln Re + 12.265$$

对于 u60, 有:

$$K = -1.668 \times 10^{-9} Re^4 + 1.0845 \times 10^{-3} Re^3 - 250.73 Re^2 + 2.2103 \times 10^7 Re + 3.556 \times 10^{12}$$

对于 u67.5, 有:

$$K = -1.626 \times 10^{-9} Re^4 + 1.1094 \times 10^{-3} Re^3 - 270.61 Re^2 + 2.4307 \times 10^7 Re + 3.8385 \times 10^{12}$$

对于 u76.2, 有:

$$K = -1.107 \times 10^{-9} Re^4 + 7.4889 \times 10^{-4} Re^3 - 187.34 Re^2 + 1.7726 \times 10^7 Re + 3.4955 \times 10^{12}$$

对于 d60, 有:

$$K = -3.67 \times 10^{-10} Re^4 + 2.679 \times 10^{-4} Re^3 - 79.645 Re^2 + 8.994 \times 10^6 Re + 3.8442 \times 10^{12}$$

对于 d67.5, 有:

$$K = -8.83 \times 10^{-10} Re^4 + 6.2856 \times 10^{-4} Re^3 - 160.96 Re^2 + 1.5303 \times 10^7 Re + 4.2553 \times 10^{12}$$

对于 d76.2, 有:

$$K = -5.99 \times 10^{-10} Re^4 + 4.4044 \times 10^{-4} Re^3 - 121.23 Re^2 + 1.2834 \times 10^7 Re + 3.5076 \times 10^{12}$$

以上拟合经验式的相关系数均在 0.97 以上,说明拟合效果良好。

采用经验式的计算值与实验数据存在一定偏差。 Re 较小时,偏差大; Re 较大时,偏差迅速减小。若以 10% 的偏差作为允许值,则可得

到以上经验式的使用范围分别为:对于 $u60$ 和 $u67.5$ 流道, $Re > 10\ 000$; 对于 $u76.2$ 流道, $Re > 30\ 000$; 对于 3 个步降流道, $Re > 15\ 000$ 。

通过联立 Re 定义式、 ζ 定义式和 $\zeta-Re$ 经验式,在给定温度和环境压力条件下,只需知差压、流量或 Re 中的任意一个参数值,即可计算出进出口速度、进出口压力、流量和流动阻力,从而对组合阀在较宽工况范围内的流动阻力给出良好的模拟和预测,指导驱动系统优化设计和理论分析。

4 结语

1) 对改进后的新组合阀流动阻力进行了常温下的实验研究,获得了各流道差压、流量、阻力系数和流量系数等关键参数。与旧阀相比,新阀流动阻力明显降低,出流能力大为增强,工作性能得以提高。

2) 利用 CFX 软件进行了常温和高温下的数值模拟计算,计算结果与实验结果符合较好,说明数值计算结果是可信的,这为计算结果的推广打下了基础。

3) 分析了 Re 对流动阻力的影响,拟合得到 $\zeta-Re$ 和 $K-Re$ 经验式,用经验式可在较宽工况范围内对组合阀流动阻力进行模拟预测,预

测结果可为驱动系统优化设计和理论分析提供依据。

参考文献:

- [1] 薄涵亮,郑文祥,王大中,等. 核反应堆控制棒水压驱动技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005,45(3):424-427.
BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, WANG Dazhong, et al. Hydraulic control rod drive technology for nuclear reactor[J]. J Tsinghua Univ: Sci Tech, 2005, 45(3): 424-427(in Chinese).
- [2] 秦本科,薄涵亮,郑文祥. 组合阀流道流动阻力研究[C]//第 14 届全国反应堆结构力学会会议论文专辑. 桂林:[s. n.],2006:87-90.
- [3] 华绍曾,杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [4] 薄涵亮,郑文祥,董铎,等. 水力驱动控制棒步进动态过程的研究[J]. 核科学与工程,2000, 20(4):228-231.
BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, DONG Duo, et al. Analysis on step action of hydraulic control rod driving[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000, 20(4): 228-231(in Chinese).
- [5] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

补 遗

本刊 2008 年第 42 卷第 9 期发表的周兰、桂凯、肖江等的署名文章“直流电沉积制备纳米铜丝阵列”为高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金资助项目(9140C6805020705)。