

文章编号：0258-0926(2015)03-0080-04; doi: 10.13832/j. jnpe. 2015.03.0080

非均匀流场下主止回阀水力特性分析 及其设计改进

谭术洋, 陈 纠, 关 莉, 赵雪岑, 黄 伟, 成 翔

中国核动力研究设计院反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

摘要: 运用计算流体力学 (CFD) 软件对多环路反应堆主止回阀流道模型进行水力特性分析。采用主泵出口非均匀流场, 计算主止回阀全开状态下水冲力矩。考虑非均匀流场下影响主止回阀水力特性关键结构因素, 依据水力特性计算结果开展改进设计, 并对改进设计后的模型重新进行数值分析。结果表明: 采用泵阀耦合运行非均匀流场时, 与改进前相比, 改进后主止回阀阀板全开状态下所受趋开水冲力矩增大, 阻力损失大幅降低, 较好适用泵阀耦合非均匀流场下运行工况, 满足系统运行要求。

关键词: 非均匀流场; 止回阀; 水力分析; 设计改进

中图分类号: TL353+.11 文献标志码: A

Hydraulic Analysis and Design Improvement for Main Check Valve under Non-Uniform Flow

Tan Shuyang, Chen Jiu, Guan Li, Zhao Xuecen, Huang Wei, Cheng Xiang

Science Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: CFD software is applied to analyze the hydraulic characteristics on the main check valve flow model about multi-loop reactor. The outlet non-uniform flow of reactor coolant pump is used to calculate the hydraulic moment of the valve under the full-open condition. By analyzing the key structure factors and its effect on the hydraulic characteristics, the valve configuration was optimized. The results from the improved model show that the pressure drop through flow near the inlet and outlet region has been reduced, and the position of disc has been kept the whole opening, which could avoid the effect of pump-valve coupling operation.

Key words: Non-uniform flow, Check valve, Hydraulic characteristics analysis, Design improvement

0 前 言

在多环路反应堆系统中, 为防止冷却剂反向流动时主泵反转, 在主泵出口设有主止回阀, 该主止回阀安装在主泵接管内, 为降低阀门结构尺寸, 提高流道的流通能力, 主止回阀采用偏心蝶阀式结构。一方面, 该类止回阀的旋转轴靠近流道中心, 其水力特性受流场影响大; 另一方面, 主止回阀与主泵安装距离较近, 造成主泵出口流场未经充分发展即作用在主止回阀上。与其他运行环境下主止回阀入口流场不同, 此时主泵出口流场为典型非均匀流场, 在主止回阀单一设备水力

特性分析中, 入口边界采用均匀流场, 这与实际运行工况存在较大差异。

因此, 研究非均匀流场下主止回阀水力特性, 预测结构是否合理, 从而指导主止回阀的设计, 使其满足设计要求, 是设计主止回阀时应重点关注的问题。

1 计算方法

1.1 计算模型和基本控制方程

计算模型采用主止回阀实际流道模型。为保证计算收敛, 对计算模型作如下假设:

(1) 假定流动为等温流动，不考虑工作介质在流动区域的温度变化。

(2) 不考虑阀板与轴的摩擦力。

基本控制方程如下：

(1) 连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

(2) 动量方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) + \overline{\rho g_i} \end{aligned}$$

式中， u_i ($i=1,2,3$)， u_j ($j=1,2,3$) 为时均速度分量； P 为流体的时均压力； μ 为粘性系数； ρ 为流体密度； u_i' 为速度 u_i 的脉动量； g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量； $\overline{\rho u_i u_j}$ 湍流应力； $\overline{\rho g_i}$ 为重力源项。

模型网格采用非结构化网格，湍流模型采用切应力输运 (SST) 模型。

1.2 边界条件

(1) 入口边界条件：给定泵阀耦合运行时主泵出口导叶处的速度场。

(2) 出口边界条件：适当延长主止回阀出口流道，保证出口截面处无回流，给定参考压力。

(3) 物性参数：工作介质为水，物性参数在常温常压下取值。

2 水力特性分析及设计改进

2.1 止回阀改进前水力特性

非均匀流场下分析计算结果表明，阀板在全开状态下，位于阀板迎流面上部附近压力场明显高于阀板迎流面下端，该状态下工作介质对阀板水冲力矩为负值 ($-7.2 \text{ N} \cdot \text{m}$)，即存在一个趋关力矩致使阀板不能达到全开位置。该水冲力矩是指流体流经阀板时对阀板产生的力矩，随流体的流动状况和阀门的开启角或关闭角而变化。止回阀的水冲力矩包括正向 (阀门开启方向) 流动的水冲力矩和反向 (阀门关闭方向) 水冲力矩。

为准确判断非均匀入口流场下主止回阀阀板开启角度，分别进行阀板固定设置在 45° 、 48° 时主止回阀水力特性分析。分析结果表明，阀板

处于 45° 状态下，主止回阀压降约为 120 kPa ，此时阀板所受水冲力矩约为 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ；阀板处于 48° 状态下，主止回阀压降约为 105 kPa ，此时阀板所受水冲力矩约为 $-0.25 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

据此，可判断非均匀入口流场下主止回阀阀板将处于 $45^\circ \sim 48^\circ$ 范围内，此时，主止回阀的压降在 $105 \sim 120 \text{ kPa}$ 之间，将造成系统流量不能达到额定流量，超出系统允许设计值，影响系统整体性能指标的实现，需要对主止回阀阀板进行设计改进。

2.2 改善止回阀水力特性的方法

考虑到非均匀入口流场下主止回阀阻力偏大的主要原因为主止回阀阀板在该非均匀流场影响下未能完全开启所致，根据阀板水力分析结果，非均匀入口流场下，现有结构下阀板迎流表面上部的受力远大于阀板迎流面下端。因此，可以通过降低阀板迎流面上部压力及增加阀板迎流表面下部压力，改善止回阀水力特性。

(1) 降低阀板迎流面上部压力：为降低阀板迎流面上部压力，在阀板迎流面上设计贯穿阀板的泄压通道，泄压孔的位置、泄压孔的过流面积、泄压孔的孔距对阀板迎流面上部压力影响较大。泄压孔设置在高压区域，对平衡趋关力矩的效果的影响越明显。泄压孔的过流面积越大，数量越多，对平衡趋关力矩的效果越明显，但泄压孔过流面积增大、数量增加后，会增大阀门关闭后的回流量，因此，在泄压孔结构方案设计中，应综合考虑回流量和平衡趋关力矩的关系。

(2) 增加阀板迎流面的下部压力：为增加阀板迎流面的下部压力，在阀板迎流面的下端部加装挡水环，挡水环的弧度、与阀板凹面的角度 (即挡水环的安装斜度)、高度、距阀板中心的位置等对阀板迎流面的下端部压力影响较大。挡水环弧度越大，与阀板凹面的角度越接近垂直来流方向，高度越高，距阀板中心越远，泵阀耦合运行时迎水面趋开力矩增加越明显。但是，上述参数的设计应避免阀板动作时与阀座密封面产生干涉，同时，各参数之间存在相互制约关系，如挡水环距阀板中心越远，则允许的高度尺寸将降低。因此，在进行挡水环结构设计时，应综合权衡各因素取值。

2.3 设计改进关键因素分析

2.3.1 不同结构参数下止回阀水力特性 为获

得较优的泄压孔和挡水环结构方案,需明确阀板改进泄压孔和挡水环的关键结构因素。按照主止回阀结构特征,考虑泄压孔距阀板中心距离及数量、挡水环的弧度根据阀板结构不变,将表1所列参数进行不同的组合,形成多种方案进行比较分析,详见表2。

表1 阀板改进项目预选值

改进因素	参数	取值
泄压孔	距阀板中心距离/mm	固定为 100
	数量/个	固定为 5
	孔径/mm	8, 10, 12
	孔距/mm	25, 30, 40
挡水环	弧度/°	固定为 120
	与阀板凹面的角度/°	50, 60, 90, 120
	距阀板中心距离/mm	120 (厚度为 3 mm), 115 (厚度为 8 mm)
	高度/mm	13, 11

2.3.2 影响因素分析

(1) 泄压孔结构参数效应分析

方案1与方案2对比分析表明,当泄压孔孔距由25 mm增大至30 mm时,阀板的趋关力矩分别为 $-2.36 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关)和 $-2.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关),变化幅度小,即对阀板水冲击力矩的影响较小;同样,方案3与方案4对比分析结果也是如此。此外,从方案3、方案4与方案5对比分析表明,当泄压孔孔距由25 mm增大至30 mm、40 mm时,阀板所受水冲击力矩分别为 $0.34 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋开)、 $1.13 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋开)、 $-8.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关),该力矩值与泄压孔孔距呈现先增大后减小的趋势,在30

mm处的趋开力矩相对较大;造成该现象的主要原因为当孔距在30 mm处时,开孔的位置位于高压区域。泄压效应大于其他方案,因此,孔距适宜设计在30 mm处。

方案1与方案3对比分析表明,当泄压孔孔径由8 mm增大至10 mm时,阀板的开启力矩由 $-2.36 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关)增加至 $0.34 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋开),其增加效应较为明显,这是因为单个孔径增大2 mm,相对原来孔径,总面积增加约56%,泄压效应较好。

(2) 挡水环结构参数效应分析

方案6、7、8之间的对比分析表明,挡水环与阀板凹面角度分别为 120° 、 60° 、 50° 时,阀板所受水冲击力矩分别为 $-5.65 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关)、 $7.98 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋开)、 $-7.53 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关),呈现非单调变化的趋势,在 60° 附近为趋开力矩,同时各值差异较大,表明挡水环与阀板凹面角度对阀板开启力矩影响较大。造成该现象的主要原因为当挡水环设计在 60° 附近时,挡水环与阀板凹面来流相对垂直,增压效应明显。

方案10与方案9对比分析表明,当挡水环与阀板中心孔的距离由115 mm增大至120 mm时,阀板所受水冲击力矩分别 $-17.99 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关)和 $-4.95 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关),影响效应较为明显。因此,在主止回阀结构允许情况下,应尽量增大挡水环与阀板中心孔的距离。

方案11与方案10对比分析表明,当挡水环的高度由11 mm增加至13 mm时,阀板所受水冲

表2 阀板改进项目组合方案及其水力特性

Table 2 Combination Scheme and Hydraulic Characteristics for Improvement Disc

方案号	阀板结构	参数取值	计算结果	
			力矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	阻力/ kPa
方案1	—	(100, 5, 8, 25); (120°, 90°, 120, 13)	-2.36	—
方案2	在方案1基础上,增大孔距	(100, 5, 8, 30); (120°, 90°, 120, 13)	-2.0	—
方案3	在方案1基础上,增大孔径	(100, 5, 10, 25); (120°, 90°, 120, 13)	0.34	60
方案4	在方案3基础上,增大孔距	(100, 5, 10, 30); (120°, 90°, 120, 13)	1.13	60.1
方案5	在方案4基础上,增大孔距	(100, 5, 10, 40); (120°, 90°, 120, 13)	-8.7	—
方案6	—	(100, 5, 12, 25); (120°, 120°, 120, 13)	-5.65	—
方案7	在方案6基础上,减小与凹面夹角	(100, 5, 12, 25); (120°, 60°, 120, 13)	7.98	60.3
方案8	在方案7基础上,减小与凹面夹角	(100, 5, 12, 25); (120°, 50°, 120, 13)	-7.53	—
方案9	—	(100, 5, 10, 30); (120°, 60°, 120, 11)	-4.95	—
方案10	在方案9基础上,减小与中心孔距离	(100, 5, 10, 30); (120°, 60°, 115, 11)	-17.99	—
方案11	在方案10基础上,增加挡水环高度	(100, 5, 10, 30); (120°, 60°, 115, 13)	-10.3	—

注: 参数取值中分别为泄压孔距中心孔距,数量,孔径,孔距;挡水环的弧度,与凹面角度,距中心孔距,高度;力矩值为负,表示阀板力矩为趋关方向,此时,阀板不在全开位置。

表3 各因素对阀板趋开力矩影响及设计建议

Table 3 Effects and Suggestions for Opening Moment of Disc

参数		趋开力矩影响效应	设计建议
泄压孔	孔径	显著	在不影响回流量的前提下取大值
	孔距	一般	30 mm 附近为宜
挡水环	与阀板凹面的角度	显著	60°附近为宜
	距阀板中心距离	较显著	结构允许, 取大值
	高度	显著	结构允许, 取大值

力矩分别为 $-17.99 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关) 和 $-10.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋关), 趋关力矩明显降低。因此, 在主止回阀结构允许情况下, 应尽量提高挡水环的高度。

综上所述, 各因素对阀板趋开力矩影响效应及设计建议见表 3。

因此, 为保证非均匀流场下主止回阀阀板具有较大的趋开力矩, 在阀板结构优化设计中应重点考虑上述影响显著和较显著因素对应结构尺寸设计。

2.4 阀板设计改进及试验

2.4.1 阀板设计改进及分析 依据阀板水冲击力矩影响因素分析结果, 方案 3、方案 4 和方案 7 的阀板所受水冲击力矩为开启力矩, 上述 3 种方案中, 阀板泄压孔孔径不小于 10 mm, 孔距 25 ~ 30 mm, 挡水环弧度 120°, 挡水环高度不低于 13 mm, 挡水环与阀板内表面夹角为 60°、90°。在进行阀板改进方案设计时, 综合考虑阀板关闭时的回流量对主泵的影响(孔径不宜过大)、阀板加工的难度(与凹面交角为 90°的挡水环加工较容易)等因素, 采用在方案 4 基础上, 结合结构参数效应分析结果, 在主止回阀结构尺寸允许的情况下增大挡水环的高度, 调整后的挡水环高度为 17 mm, 考虑到挡水环与凹面夹角设计为 90°, 为尽量减小结构因素分析时建议取 60°的效应影响, 在挡水环结构设计中将弧度由 120°增大为 150°。

阀板改进方案见图 1。改进设计分析结果表明, 改进后的阀板在非均匀流场下所受水冲击力矩为 $16.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ (趋开), 额定流量下压降约为 60.5 kPa。

2.4.2 试验验证 确定阀板改进方案后, 利用改进后阀板进行性能试验和回流量试验。试验结果表明, 改进后阀板在泵阀耦合非均匀流场下保持全开状态, 阀板迎流表面下端设置挡水环对主止回阀总阻力影响较小, 约为 62 kPa, 阀板迎流表面上端设置泄压孔后, 进行回流量计算和测试,

满足系统规定设计要求。

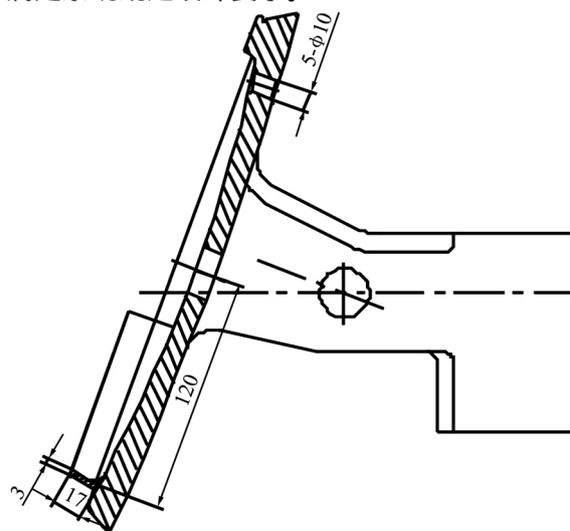


图1 阀板改进后方案示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Improvement Disc

3 结论

通过对非均匀流场下主止回阀改进前后的模型分别进行水力特性分析, 得到以下结论:

(1) 通过对阀板增加泄压孔、设置挡水板结构等改进措施, 有效降低非均匀流场下主止回阀处的流动阻力, 主止回阀内流道冷却剂流动的压降由 120 kPa 降低至 62 kPa。

(2) 结构改进后, 主止回阀阀板能稳定处于全开位置, 保证强迫循环工况下系统流量能够达到额定流量, 满足系统设计要求。

参考文献:

- [1] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [2] Moler C B. 喻文健 译. MATLAB 数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 关振群, 宋超, 顾元宪, 等. 有限元网格生成方法研究的新进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(1): 1-14.

(责任编辑: 杨洁蕾)