

Study on the mechanism and improvement of rising check valve jamming fault in nuclear power plant

Lifeng Deng

Static Machinery Department CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract

To address the issues of valve failure (including inability to open or insufficient flow rate) caused by sticking faults in lift check valves, this study takes a 4RCV095VP valve from a nuclear power plant as a case study. Starting from the working principle of lift check valves, we conducted simulation analysis to examine the stress state of the valve disc during operation. The research revealed that the mechanism of sticking faults stems from an excessively narrow clearance between the valve disc and valve cover guide components. The study concluded that this clearance should neither be too large nor too small. Drawing on historical maintenance practices, we proposed optimization suggestions for improving the clearance between these components. These recommendations have been implemented across multiple nuclear power plants with positive results.

Keywords

Lift check valve; Sticking; Clearance

某核电厂升降式止回阀卡涩故障机理研究及改进

邓力丰

中广核核电运营有限公司静止机械部, 中国 · 广东 深圳 518124

摘要

针对升降式止回阀因卡涩故障导致阀门无法开启或流量不足的问题, 本文以某核电站4RCV095VP为例, 从升降式止回阀的动作原理出发, 结合仿真分析, 对阀瓣在运行期间的受力状态进行分析, 研究了阀瓣与阀盖导向配合间隙过小导致阀门卡涩故障的机理, 最终得到了此间隙不能太大也不能太小的结论, 同时结合历史检修实践提出了阀瓣与阀盖导向配合间隙的优化改进建议, 并在群厂进行推广, 使用效果良好。

关键词

升降式止回阀; 卡涩; 间隙

1 引言

止回阀是一种单向流动阀门, 阀门的启闭过程是多种作用力相互作用的结果, 当阀瓣下部所受的流体作用力大于阀瓣本身重力和阻力的合力时, 阀门开启; 当流体作用力减小, 低于阀瓣本身重力和阻力的合力时, 阀门关闭^[1]。压水堆核电站中化学和容积控制系统 (RCV) / 安全注入系统 (RIS) 等重要系统中均使用升降式止回阀用于防止介质倒流。在核电站运行实践中, 经常发生升降式止回阀因卡涩故障导致阀门无法开启或流量不足的问题。本文将以某核电站 4RCV095VP 为例, 研究升降式止回阀的卡涩机理和制定改进措施。

2 阀门简介

4RCV095VP 为国内某厂家生产的 DN50 升降式逆止阀, 介质正向流通, 反向截止, 厂家设计阀门开启试验压差: 0.2MPa。其在系统中的功能为 RCV 泵给主泵轴封供水的逆止阀, 当发生全厂失电事故时由 8RIS011PO 为主泵轴封供水, 4RCV095VP 反向密封, 起到隔离介质通往 RCV 泵侧的功能。

如图 1 所示, 止回阀一般是由阀体、阀盖和阀瓣等组成。阀座密封面是由阀体堆焊硬质合金后加工而成, 阀瓣密封面采用锥型环面密封, 由本体堆焊硬质合金加工而成。阀瓣以阀体中空孔作为导向, 沿着中心线上下滑动。当介质顺流时, 阀瓣靠介质推力开启。当介质反方向流动时, 由介质压力和阀瓣的自重使阀瓣作用于阀座上, 阻止介质出现倒流现象^[2]。

【作者简介】邓力丰 (1991-), 男, 中国四川乐山人, 本科, 工程师, 从事阀门维修研究。

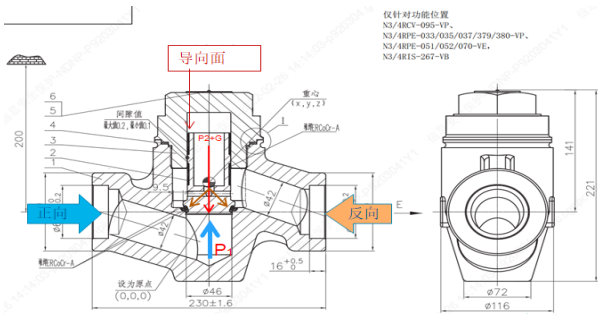


图1 4RCV095VP 阀门结构示意图

2 故障描述

故障模式一：在正常运行工况下，出现流量突然变化。

案例1：2022年3月31日，执行T4RPA010期间，4RIS032VP 开阀瞬间三台主泵轴封注入流量4RCV021/022/023MD 突降后立即恢复初始值（此为正常现象），12s后流量再次突降（1.98 m³/h 降至 1.6 m³/h。），且流量下降后再未恢复初始值，流量突变期间4RCV018MD/4RCV017MP 均未发生变化。现场将4RCV061VP 有36.5% 开大到39.5% 后，4RCV021/022/023MD 升高至1.94m³/h 并稳定，保驾人员敲击4RCV095VP 后，轴封注入流量升高至2.018m³/h。

案例2：2020年7月9日机组执行T4RPA010 试验结束1分钟，三台主泵一号轴封注入流量下降0.26m³/h，开大4RCV061VP 调节满足了流量要求，后分析怀疑为系统扰动后4RCV095VP 动作过程中有卡涩。

故障模式二：在主泵轴封水注入时，逆止阀没有开启。

案例3：2022年2月23日大修执行主泵提轴工作，发现无轴封注入水，运行核实在线无异后，怀疑4RCV095VP 卡涩导致无轴封水。运行通知机械人员按预案对阀门进行现场干预，干预后轴封水恢复正常，怀疑4RCV095VP 卡涩。

案例4：2022年2月26日机组再次投入主泵轴封，4RCV061VP 开启至70% 开度后轴封仍无流量，容控箱液位也无下降，怀疑4RCV095VP 卡涩导致无轴封水，通知机械人员现场对4RCV095VP 干预后主泵轴封正常建立。

3 故障机理分析

3.1 故障模式一：在正常运行工况，出现流量突然变化

系统正常运行期间，主泵轴封注入水来自RCV系统的上充泵，在注入主泵之前，经过滤并用轴封注入水母管上的4RCV061VP 控制注入水总流量，并通过手动调节阀4RCV067、068、069VP 分别调节流到每台主泵的轴封注入水流量。在无外来扰动的情况下影响轴封流量的阀门为4RCV061VP 和4RCV095VP。经过分析认为，4RCV095VP 导向面间隙偏小，造成阀瓣/阀盖导向摩擦力大引起卡涩的可能性最高。下面就该原因导致卡涩的机理进行简要说明。

3.1.1 阀瓣受力分析

每台主泵的轴封流量约为2m³/h，即4RCV095VP 处的流量为6m³/h，此时，4RCV095VP 处于小开度开启状态。实际情况中，阀门上下游的流动情况是极其复杂的三维湍流，为了简单起见，本文将三维流动简化为二维流动。

仿真分析得到升降式止回阀开启过程中不同时刻的压力场和速度场^[3] 如下图2所示，得出阀瓣下方是最高压力区域，阀瓣上方是最低压力区域，阀瓣被推起；同时由于阀瓣靠上游侧的压力高于靠下游侧，因此，介质会将阀瓣推向下游，使得阀瓣紧紧得贴着下游侧的阀盖导向面，产生摩擦力阻止向上运动的趋势。这些压力作用在阀瓣上，使阀瓣处于动态平衡的状态。

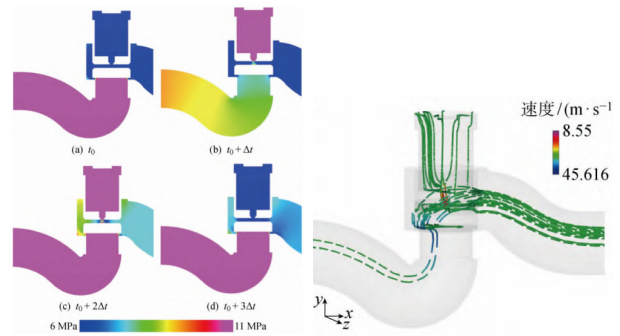


图2 升降式止回阀小开度下仿真分析得到的压力场和速度场

3.1.2 阀瓣运动状态分析

对阀瓣进行受力分析，定义 F_{\uparrow} 为下方压强作用在阀瓣上的向上力； F_{\downarrow} 为上方压强作用在阀瓣上的向下力，受下游压力影响，同时与阀瓣上的泄流孔的分布有关； G 为阀瓣重力，为恒定值； $F_{\text{侧}}$ 为阀瓣上下游侧压差产生的侧向力，由上下游侧的压强以及阀瓣与阀盖接触面积决定； N 为阀盖对阀瓣的反作用力，与 $F_{\text{侧}}$ 相等； f 为阀瓣与阀盖导向之间的摩擦力，由 $F_{\text{侧}}$ 和阀瓣与阀盖导向表面的摩擦系数决定，其方向与阀瓣运动方向相反。

可知，除了重力 G 以外，阀瓣所受的其他力均与流动场直接相关。系统流量是持续波动的，即阀瓣的受力也是时刻变化的，维持动态受力平衡。大部分时候流量波动幅度小但高频的，因此，阀瓣也是时刻处于一个小幅高频的动作的状态。

根据厂家提供的资料，RCV095VP 阀瓣的重力为6.35N，使用仿真软件，在6m³/h 的流量下，通过模拟仿真找到阀瓣受到的抬升力 F 略大于阀瓣的重力 G 的平衡位置点，此时阀瓣开度为26%，阀瓣受到的抬升力 F 为7.11N。

理想情况下，阀瓣动作应该对流量的变化具有很好的跟随性，但是由于摩擦力的存在，阀瓣动作会存在一个死区。例如流量减小， F_{\downarrow} 增大，阀瓣有向下运动趋势，摩擦力 f 方向朝上，阻止阀瓣运动，只有当流量继续减小， F_{\downarrow} 继续增大，直至克服摩擦力动作。因此，摩擦力 f 的大小决定了

死区的大小,也就决定了阀瓣对流量变化跟随性。如果摩擦力 f 偏大,那么就可能出现阀瓣不能很好地跟随流量变化的情况,出现突然的下降或上升,进而引起流量的小幅突变。

3.1.3 阀瓣与阀盖导向面间隙对摩擦力的影响分析

由上述分析可知,阀瓣在侧面压差作用力 $F_{侧}$ 的作用下,被推到下游侧,且与下游侧阀盖导向面紧紧贴合。由于 4RCV095VP 的正常运行压力为 177bar.g,在阀瓣侧面产生的侧向压差力是比较大的,作用在阀瓣上将导致阀瓣轻微变形,进而与阀盖导向面形成面接触。间隙越小,阀瓣与阀盖导向面的接触面积越大,因压差产生的 $F_{侧}$ 也越大。由于 $f = \mu * F_{侧}$ (μ 为接触面的摩擦系数),因此,摩擦力 f 也越大。

同时,由于阀瓣一直处于小幅但高频的滑动状态,在 $F_{侧}$ 的作用下,阀瓣与阀盖导向面一直在摩擦,将导致阀盖导向面出现摩擦痕迹,导致粗糙度增加,进一步导致摩擦力增加。间隙越小,接触面积越大,造成粗糙度增加的面积也越大。

3.2 故障模式二:在主泵提轴试验时,逆止阀没有开启

理想状况下,阀瓣处于关闭位置是应该是竖立的,阀瓣与阀盖导向之间四周都有间隙。实际情况下,阀门运行一段时间后,阀瓣阀座密封面会存在不均匀的压痕,阀瓣回座后会倾斜,导致阀瓣一侧斜靠在阀盖导向面上。此时,管道中没有流动, $F_{侧}$ 为 0,阀瓣侧面因阀腔上方的压力 $F_{下}$ 和重力 G 共同作用而紧贴着阀盖导向面。

如果阀门要开启,上下游的压差 ($F_{上} - F_{下}$) 需要克服重力 G 和摩擦力 f ,其中重力 G 是一个恒定值且比较小,很小的压差即可克服。摩擦力 f 由作用在阀瓣内的压力和阀瓣与阀盖导向面的摩擦系数确定。

由前文的分析可知,正常运行期间,阀瓣与阀盖导向面之间存在摩擦,且间隙越小,摩擦越严重,摩擦面积也越大。当系统停运后,阀瓣往一侧倾倒时,正好处于阀盖导向面摩擦较为严重的部位时,阀门开启需要克服的摩擦力就会

变大。较为严重的情况是,上下游压差力不足以克服重力和摩擦力,阀门无法开启。

在案例 3 中,上下游压差为 1bar;在案例 4 中,上下游压差为 1.9bar,均小于阀门设计开启压力 2bar。当阀瓣正好与阀盖导向面因摩擦导致表面粗糙度较大的部分接触时,就可能发生压差无法克服摩擦力而导致阀门无法开启的情况。此时如果使用橡胶锤或铜棒敲击震动阀体,使得阀瓣脱离与阀盖导向面的接触,摩擦力消失,阀瓣将在压差作用下开启。这也是群厂制定的 RCV095VP 开启卡涩干预预案的基础。

4 改进措施

根据上文分析可知,4RCV095VP 发生卡涩故障的原因是阀瓣与阀盖导向的间隙过小。

根据仿真分析结果可知,介质在阀瓣下面有一个紊流区域,当阀盖与阀瓣的配合间隙大时,阀盖不能很好地约束阀瓣,阀瓣会随着介质转动和摆动,增大了阀门紊流区域,所以阀门压力损失增大。反之,配合间隙小时,阀体对阀瓣有较好的控制,阀瓣随介质的转动和摆动的程度降低,减小对介质流动的影响。通过试验研究表明,阀瓣与阀盖的配合间隙增大, C_v 值会随着减小,最终会影响系统流量。另外,升降式止回阀阀瓣与阀座为线接触的硬密封型式,如果阀瓣与阀盖的配合间隙过大,将影响阀瓣回座时的对中性,进而影响阀门的密封性。

为此,笔者及团队结合国外厂家同类阀门设计经验和多年的检修实践,并与国内阀门厂家共同制定了不同口径的升降式止回阀阀瓣与阀盖间隙值标准如下表 1 所示。

5 结语

升降式止回阀阀瓣与阀盖导向配合间隙太小可能导致阀门出现卡涩,太大可能影响阀门的流量和密封性。改进后的间隙值已经通过反馈在群厂推广使用,使用效果良好,某电厂 4RCV095VP 也未再发生卡涩故障。

表 1 升降式逆止阀盖导向配合间隙标准

口径	磅级	间隙标准	口径	磅级	间隙标准
DN8	通用	0.15~0.50mm	DN15	通用	0.15~0.50mm
DN20	其他	0.15~0.50mm(推荐值: 0.4±0.1mm)	DN20	高磅级	0.20~0.50mm(推荐值: 0.4±0.1mm)
DN25	其他	0.15~0.60mm(推荐值: 0.4±0.1mm)	DN25	高磅级	0.20~0.60mm(推荐值: 0.4±0.1mm)
DN40	通用	0.20~0.60mm	DN50	通用	0.20~0.60mm(推荐值: 0.3±0.08mm,其中 RCV095VP 推荐值: 0.22~0.30mm)
DN65	通用	0.20~0.60mm			

备注: 阀门磅级大于等于 900 磅为高磅级;通用指所有磅级

参考文献

- [1] 刘梦瑶.核电止回阀启闭过程中的复杂流及结构特性研究[D].江苏大学,2020.
- [2] 陈力,王帅,吕纯平,等.核级小口径升降式止回阀流量系数测试及结构改进[J].阀门,2013,(06):4-6.
- [3] 金戈,范珉,周振栋,等.升降式止回阀动态特性分析与改进[J].上海交通大学学报,2021,55(S2):110-118.