

# 上充泵润滑油回路主油泵入口逆止阀损坏分析及处理

## Damage Analysis and Maintenance of the Main Shaft Driven Oil Pump in the Lube Oil System of the Charging Pumps Inlet Check Valve

王江涛 招锦健 张刚柱

Jiangtao Wang Jinjian Zhao Gangzhu Zhang

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518124

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

**摘要:** 中国某核电站的一次大修中,对上充泵(以下简称RCV泵)润滑油系统主油泵入口逆止阀进行密封性试验时发现逆止阀密封失效。论文结合理论计算与逻辑推理,分析逆止阀失效故障原因,并制定改进措施。

**Abstract:** During an overhaul of a nuclear power plant in China, the sealing failure of the check valve was found during the sealing test of the check valve at the inlet of the main oil pump of the charging pump (hereinafter referred to as RCV pump). Combined with theoretical calculation and logical reasoning, this paper analyzes the failure causes of check valve, and formulates improvement measures.

**关键词:** 上充泵;逆止阀;导向座;失效

**Keywords:** charging pump; check valve; guide seat; failure

**DOI:** 10.12346/etr.v3i11.4648

## 1 引言

核电站RCV泵属于化学和容积控制系统,采用三台多级卧式离心泵并联布置。RCV泵把容控箱的来水升压(绝对压力)至17.7MPa后送至一回路<sup>[1]</sup>,实现三种功能:①一回路上充功能;②为主泵一号轴封提供密封水功能;③高压安注功能。正常工况(功能①和②)下,B列一台泵投运,另一台泵冷备用,A列RCV一号泵处于热备用状态;只在定期试验、安注工况或RCV二三号泵切换时启动投运RCV一号泵。

中国某核电站一次换料大修中,执行日常工作对RCV二号泵泵润滑油系统主油泵入口逆止阀进行密封性试验中,发现逆止阀密封失效;同时主油泵入口管与主油泵本体连接处发现从主油泵入口逆止阀阀瓣上脱落的橡胶密封环。

拆卸上充泵油箱盖板,检查发现逆止阀导向座和弹簧掉落在逆止阀下部入口滤网内;解体检查逆止阀,发现逆止阀导向座表面多处开裂,部分部位剥落;阀瓣密封环与塑料导

向座连接螺钉缺失(后在主油泵后端盖内找到)。查询上轮大修执行主油泵入口逆止阀密封性试验,试验结果合格。

随即对RCV二号泵进行油箱清洁检查,未发现异常;油样分析无异常,更换新润滑油;检查主油泵后端盖和相关部件情况未见异常;检查主油泵下游滤网无异常,排除了异物进入油回路下游设备的可能;检查泵驱动端轴瓦部件,未见异常;确认此次主油泵逆止阀脱落未对泵组造成实质性影响,不影响泵组可用性。

基于上述缺陷,对RCV一号泵和三号泵进行反馈检查。拆卸检查RCV一号泵主油泵入口逆止阀,逆止阀状态良好无异常。拆卸检查RCV三号泵主油泵入口逆止阀,检查该阀整体部件完好,阀瓣紧固螺钉未见松动;导向座底部环条表面有轻微剥落和裂纹;导向座四个支撑腿内外表面状态良好;导向座螺孔表面开裂,背部表面有两道裂纹。RCV二号泵主油泵逆止阀缺陷尚为初期阶段(导向座裂纹),未对

【作者简介】王江涛(1991-),男,中国河南济源人,本科,助理工程师,从事核电站核级水泵维修研究。

泵组造成实质性影响,不影响泵组可用性。

## 2 逆止阀结构及工作原理

该逆止阀为立式安装的升降式逆止阀,主油泵工作时,依靠主油泵的吸力,润滑油从下而上克服弹簧力和阀体自重被吸入主油泵;主油泵停止工作时,阀体在预紧弹簧力和自重作用下回座,防止润滑油倒流,保持主油泵入口管段充满润滑油,具体结构如图1所示。

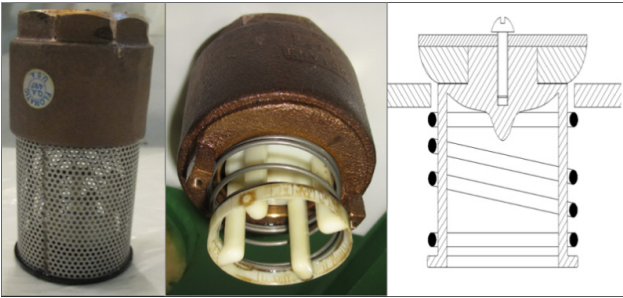


图1 逆止阀结构图

## 3 原因及故障分析

根据故障现象,论文结合理论计算与逻辑推理,从导向座材质分析、安装紧力过大导致裂纹的计算分析、导向座热老化分析、导向座受力分析和预防性大纲分析五方面进行原因分析,具体如下。

### 3.1 导向座材质分析

泵组厂家提供的设备运行和维修手册中未提供逆止阀导向座材质的相关信息;从现场拆卸阀体上得到该阀的制造商为FLOMATIC公司;查询该公司阀门型号目录介绍,其中Foot valve 60se系列阀门与现场阀门外观、型号、功能均一致,制造材质为PVC塑料和铜合金,介绍资料与现场阀门各零部件用材料基本吻合。

实践上,通常通过比重差别或测定比重的方法,来区分PVC和其他塑料。PVC材质的比重为1.35~1.45,一般是1.38左右。分别对RCV二号泵和三号泵主油泵入口逆止阀导向座进行密度测量,比重分别为1.388/1.385。实验测定导向座材质比重非常吻合PVC材质的比重特征。

综上所述,RCV主油泵入口逆止阀中的导向座材质基本确定为硬质PVC材料。

### 3.2 安装紧力过大导致裂纹的计算分析

RCV主油泵入口逆止阀导向座通过连接螺钉与橡胶阀瓣、钢制金属厚片连接。其中连接螺钉为开槽盘头自攻螺钉,螺钉末端为F型——平端。实测d1为4.74mm,d2为3.5mm,参考GB/T 5280—85查询得P为1.6mm,与实测尺寸一致。由 $\tan \psi = P / \pi d_2$ 得螺纹升角 $\psi$ 约为 $8.283^\circ$ 。

当旋紧螺钉时,内螺纹对螺钉的轴向向下拉力 $Q$ 与金属片对螺钉的支撑力 $N$ 平衡。计算各个部位产生的压强应力:螺钉头作用在金属片上的应力 $\sigma_1 = N / S_1$ ,沿连接螺纹各圈分布的 $\sigma_2 = q / S_2$ ,金属片压紧导向座上部表面的应力 $\sigma_3 = N / S_3$ 。测量金属片厚度3mm,上部开孔直径5.3mm;实测螺钉连接时有效螺纹连接约7圈,螺钉头直径8.74mm;导向座上上部圆凸台直径 $D$ 为20.5mm;计算螺钉头作用在金属片上受力面积 $S_1$ 约 $38\text{mm}^2$ ;由螺纹等效受力面积为 $S_2 = 7\pi(d_1 - d_2)$ 得 $S_2$ 约 $27.2\text{mm}^2$ ;金属片压紧导向座上部表面有效受力面积 $S_3 = \pi(D^2 - d_1^2) / 4$ 约 $312.26\text{mm}^2$ ;如图2所示,作用在各螺纹上的法向载荷 $q = Q / \cos \psi = N / \cos \psi \approx 1.01N$ ,分别计算螺钉头作用在金属片上的应力 $\sigma_1$ 、连接螺纹所受应力 $\sigma_2$ ,金属片压紧导向座上部表面的应力 $\sigma_3$ ,得 $\sigma_2 = 1.41\sigma_1$ , $\sigma_2 = 11.59\sigma_3$ 。

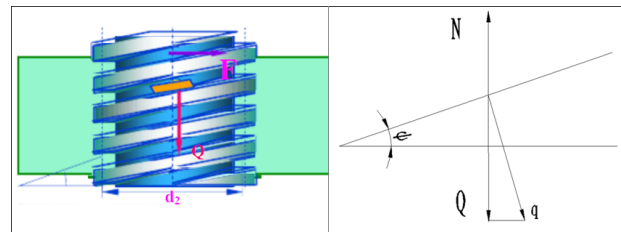


图2 螺纹受力分析

PVC材料的抗拉强度( $\sigma_t$ )为50~80MPa,阀体中的钢制金属片与不锈钢(X5CRNI18-10)材质非常接近,该材质抗拉强度可达到625MPa以上,是PVC材质相同参数的8~13倍。结合上述计算,各部位所受的应力水平 $\sigma_2 = 1.41\sigma_1$ , $\sigma_2 = 11.59\sigma_3$ ,作出如下推断:假设螺钉安装紧力过大,最先失效的应是PVC导向座螺纹本身,而非其他部件。

由于现场检查PVC导向座螺纹本身状态良好,结合上述分析可排除由于螺钉安装紧力过大导致裂纹产生的可能。

### 3.3 导向座热老化分析

老化现象是塑料制品中普遍存在的一种现象<sup>[2]</sup>。塑料老化是指经过长时间高温或长时间强光照射,使塑料的内部结构发生物理或化学变化,从而产生失效。其中温度影响塑料性能主要是因为温度影响了材料的化学反应速率。塑料的温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ,化学反应的速度就会翻倍<sup>[3]</sup>。根据ASTM(美国材料试验协会)D 3045—92和GB/T 7141—2008中关于塑料热老化的描述,塑料的被测性能值与热老化时间应符合如图3所示曲线。

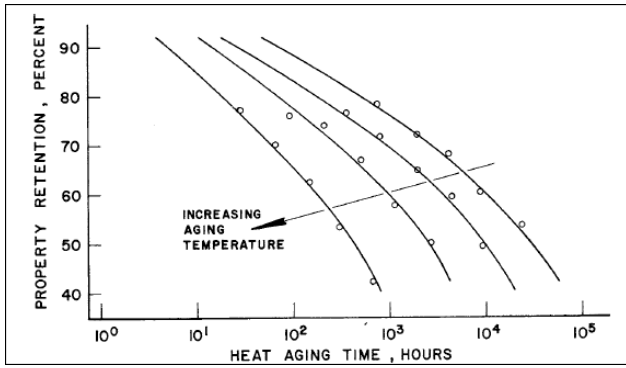


图 3 典型的热老化曲线—被测性能值对时间

根据 RCV 泵组运行规则可知, RCV 二、三号泵累计运行时间大致相当, 其远大于 RCV 一号泵累计运行时间。由于现场泵房通风投运差异等, 此核电机组 RCV 二、三号泵运行时润滑油油箱温度并不相同。根据巡检记录统计, RCV 二号泵运行时润滑油油箱温度约为 53℃~55℃, RCV 三号泵运行时润滑油油箱温度约为 47℃~49℃, RCV 二号泵运行时润滑油油箱平均温度比 RCV 三号泵高出约 6℃。RCV 一号泵由于长期处于热备用状态, 大部分时间油箱温度基本上与室温(约 25℃)相当。

中国有相关研究对硬质 PVC 的热老化性能进行过研究<sup>[4]</sup>。相关文献表明, 随着热老化时间的增加, PVC 材料的断裂伸长率迅速降低; 且随老化温度越高, PVC 材料的断裂伸长率降低越严重, 如图 4 所示。表明热老化可明显降低 PVC 材料的韧性, 使 PVC 材料变脆, 受外力作用时易出现脆性破坏; 在热老化作用下, PVC 材料表面发生黄变, 且逐渐粗糙、出现大量微细沟壑, 微观形态破坏。

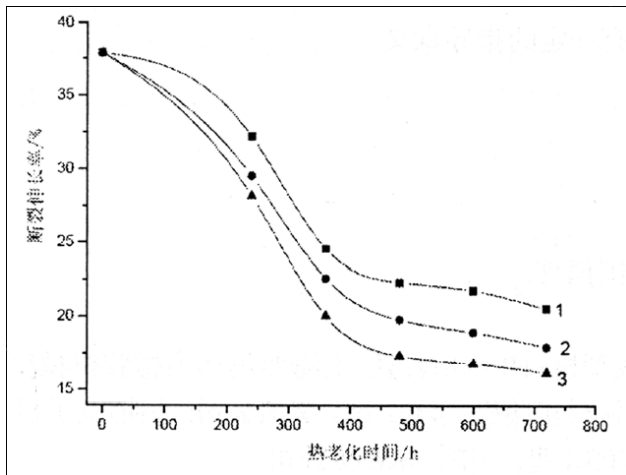


图 4 热老化时间对 PVC 断裂伸长率的影响

1—75℃; 2—90℃; 3—105℃

结合已有研究结论, 对比现场检查情况分析, 汇总如下:

RCV 二、三号泵主油泵入口逆止阀导向座螺孔一侧表面均有三道裂纹, 裂纹位置、分布形状类似, 二号泵相应的裂纹更深更宽, 断裂口间隙更大。对比新备件, RCV 二、三号泵主油泵入口逆止阀导向座外观色泽颜色由浅变深; 新备件外观色泽呈亮白色, RCV 二号泵主油泵入口逆止阀导向座颜色呈暗黄色。可以得出, 运行温度越高, 导向座表面黄变程度越深。

对导向座四个支撑腿内表面状态进行分析, 可排除导向座与铜壳体、弹簧部件刮磨等因素的影响。RCV 二号泵主油泵入口逆止阀导向座支撑腿内表面比较粗糙, 分布大量粗细不均的沟壑, 部分已形成点坑; RCV 三号泵主油泵入口逆止阀导向座支撑腿内表面状态相对良好, 底部环条材质变脆, 分布有大量微细沟壑, 部分已剥落。上述现象均符合 PVC 材料热老化作用下的特征表现, 可以得出, 运行温度越高, 导向座表面状态破坏越严重。

综上, 由于长期处于备用状态, RCV 一号泵主油泵入口逆止阀导向座并未发现热老化迹象, RCV 二、三号泵主油泵入口逆止阀导向座均有不同程度的热老化现象, 鉴于运行时 RCV 二号泵油箱温度比 RCV 三号泵油箱温度高, 故 RCV 二号泵对应的逆止阀热老化失效表现更严重。由此可得, 逆止阀导向座所处的环境温度对导向座本身的老化过程有着非常重要的影响。

### 3.4 导向座受力影响分析

泵组运行时逆止阀处于开启状态, 弹簧通过四个支撑腿对导向座上部圆周外围形成拉力。润滑油流沿着导向座下部流线型面从下至上, 对导向座形成向上推力(液动力); 分析润滑油流流动的动量改变量可知, 润滑油流液动力集中在导向座下部中间区域处最大, 沿流线依次往圆周外围递减, 如图 5 所示。弹簧拉力与液动力共同作用在导向座上, 形成弯曲力矩, 对导向座进行受力分析, 如图 6 所示。

当逆止阀处于开启期间, 从受力分析可知, 导向座始终承载着弯矩载荷; 在弯曲载荷的作用下, PVC 导向座会发生相应的形变, 并产生应力, 应力集中区域为形变量最大的地方, 即导向座上部螺孔附近, 圆圈标注处为应力集中区域。结合现场检查情况, RCV 二、三号泵逆止阀导向座裂纹形状均以螺孔处为中心, 沿圆周径向发展, 符合在长期应力作用下发生脆性断裂的特征。

综上, RCV 二、三号泵主油泵入口逆止阀导向座运行时所承受的载荷方式对导向座裂纹产生的部位、发展方式起决定性影响。



### 3.5 电站预防性大纲影响分析

查询该核电站已生效的预防性维修大纲，没有对 RCV 泵主油泵入口逆止阀的解体检查或更换的预防性计划，只有 RCV 泵主油泵入口逆止阀状态年度检查预防性计划。查询该机组 RCV 泵主油泵入口逆止阀更换记录（至此次大修前），三台 RCV 泵主油泵入口逆止阀均无更换记录，运行时间约 11 年；查询相应电气柜，截至大修泵组再鉴定结束，RCV 二号泵累计运行时间 45582h，RCV 三号泵累计运行时间 48085h。

综上，该核电站预防性维修大纲缺乏相应的预防性解体检查计划，导致该设备缺陷未能得到提前识别，使该缺陷得以长期发展并致使该逆止阀密封性失效。

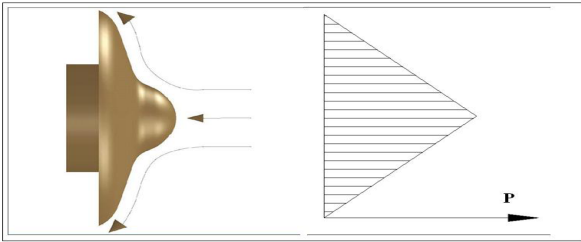


图 5 液动力分布图

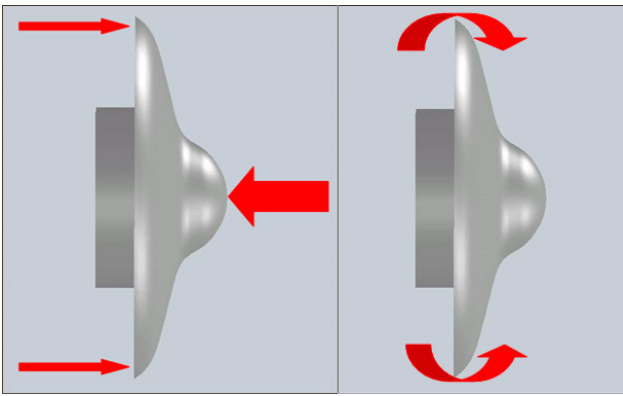


图 6 导向座受力图

### 4 故障原因逻辑推理

RCV 主油泵入口逆止阀导向座设计选材为硬质 PVC 材质，泵组日常运行期间，导向座长期处于较高温度环境中持续运行，在温度和外部弯曲载荷的共同作用下产生相对定向的变形量。受材料特性影响，导向座累计达到一定运行时间后开始出现热老化现象，材料的韧性开始降低，使材料变脆；当导向座的断裂伸长率降低到一定水平，材料的断裂伸长量与某些部位的形变量开始接近甚至相同，在形变量较大的部

位（上部螺孔附近）开始出现细微或微观裂纹。当泵组继续运行，随着导向座热老化的时间进一步增加，导向座断裂伸长率和韧性进一步降低，在外部弯曲载荷的促进作用下裂纹逐渐发展，拓宽加深；出现裂纹后的螺孔内径变大，对连接螺钉的有效约束力随裂纹的加大而降低。逆止阀启闭过程即对连接螺钉产生一次往外拉拔的冲击，造成螺钉松动；主油泵日常运行期间，润滑油油流不断流过逆止阀，处于动态平衡的导向座在一定开度位置附近上下微振，长时间的微振使螺钉逐渐松脱；主油泵运行期间产生的吸力较大，相当于对螺钉施加持续的往外拉拔力；当裂纹进一步发展，螺孔内螺纹不足以克服外部吸力，连接螺钉脱开被吸至主油泵入口，导向座与橡胶阀瓣、钢制金属厚片失去连接；比重较大的金属厚片散落在铜制壳体里，比重较小的橡胶阀瓣则被吸至主油泵入口管道中，导向座与弹簧则散落在阀体内，在油液不断流动过程中与上部铜制壳体、金属滤网发生不规则摩擦和刮碰，同时导向座与弹簧本身发生不规则摩擦和刮碰，造成材质相对较软的导向座外表面形态进一步受破坏；逆止阀内部结构解体，逆止阀功能失效。

### 5 结语

该核电站 RCV 二号泵主油泵入口逆止阀 PVC 材质的导向座在系统运行温度长期作用下由于热老化作用材质特性发生改变，同时叠加外部载荷作用，导向座逐步出现裂纹、剥落，进而发展为部件损坏，最终导致逆止阀本次失效故障。

逆止阀导向座原始设计选材为非终身免维护设计，而 EOMM 中没有对该部件的维修要求作出相应描述，电站预防性维修大纲暂无对逆止阀进行定期解体检查或更换的相应计划。

为提升设备可靠性，该核电站制定主油泵入口逆止阀 6 个燃料循环更换的预防性维修大纲，并对逆止阀进行替代，从根本上避免此类缺陷再次发生。

### 参考文献

- [1] 广东核电培训中心.900MW压水堆核电站系统与设备[M].北京:原子能出版社,2004.
- [2] 陈惠钢.浅谈塑料制品的老化试验[J].城市质量监督,1999(4):45.
- [3] 田永.汽车外饰塑料零部件的耐温性试验评述[J].上海汽车,2009(7):41-44.
- [4] 潘文军.硬质聚氯乙烯的热老化性能研究[J].西南民族大学学报,2009,35(3):559-561.