

一种核电站蒸汽截止阀在线密封性试验方法

陆 洋 蒋凌云 唐 歆

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518026

摘 要: 本论文对核电站蒸汽发生器供氮隔离阀的在线密封性试验进行了研究, 提出一种简便的阀门在线密封性验证方法, 并通过气液转换系数及理想气体方程, 给出一种将出厂液体密封性试验泄露率转化为在线气体泄露率的计算方法, 并给出了误差分析, 形成了有效的阀门在线密封性试验方案。

关键词: 在线密封性试验; 气液转换; 泄露率; 阀门; 误差分析

引言

国内CPR1000机组蒸汽侧设置有三台蒸汽发生器供氮隔离阀, 其作用是连接氮气系统, 在机组停运时给蒸发器充氮气保养, 避免蒸汽发生器长期停运锈蚀。该三台隔离阀在机组投运期间承受蒸汽侧的蒸汽压力, 属于二回路压力边界, 在国内同类核电厂出现过因阀门内漏导致蒸汽外漏的故障, 因此电厂内部针对该隔离阀制定了定期密封性试验维修大纲, 以验证其密封性能; 同时阀门与蒸汽管道是焊接连接, 若每次实施密封性试验是均将其从管道切割下来离线试验, 则维修代价较大。因此, 有必要针对该隔离阀安装特点, 制定一种在线密封性试验方法。

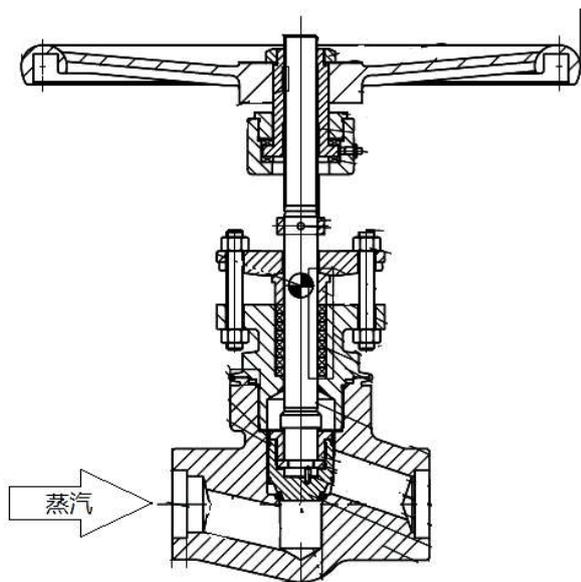


图1 阀门结构图

1 阀门结构及参数

蒸发器供氮隔离阀阀门结构及在系统中安装位置分别如图1、图2所示。该阀门为低进高出的手动截止阀, 入口侧安装在蒸汽侧, 机组正常运行时阀门关闭, 阀瓣

阀座承受主蒸汽压力。在阀门出口侧管道安装有一个盲板, 在机组停机时, 人工拆除阀门下游盲板并连接氮气系统接口, 同时打开阀门, 使氮气经过阀门进入主蒸汽管道。

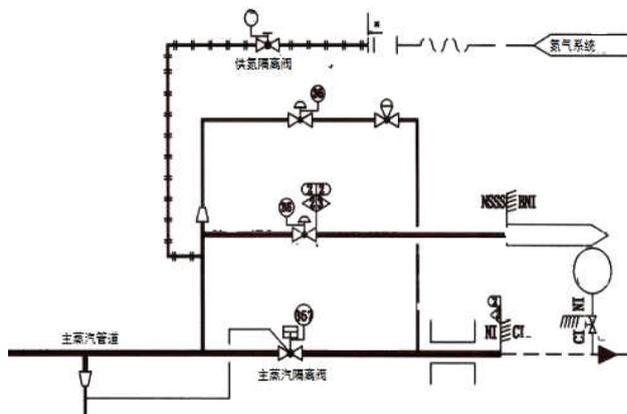


图2 阀门所在系统示意图

该阀门口径为DN50, 压力等级为1500LBS, 制造等级为RCCM-2级, 出厂时阀座密封性要求为在24MPa试验压力下, 使用洁净水进行密封性试验, 允许泄露率 $\leq 5\text{cm}^3/\text{h}$ 。

2 在线密封性试验方案及泄露率换算

因该阀门安装于核岛厂房, 现场无便捷的洁净水取用接口, 且该管段为蒸汽管段, 在电厂大修期间使用原设计的密封性试验介质来进行试验有一定难度; 相较之下, 压缩空气接口在检修现场较为容易获取, 因此, 针对该阀门结构及安装位置, 在线密封性试验方法: 拆卸阀门下游盲板, 从该法兰位置安装带减压阀的充气装置, 通过向管道注入压缩空气并保压观察压降的方式进行密封性试验。

2.1 泄露率换算方法

试验所涉及的试验介质由洁净水换成压缩空气, 基于人身安全的考虑, 试验压力需降至安全范围内, 同时

试验泄漏率也需进行一定换算。

根据《阀门设计手册》^[1]，阀门的体积流量与压差的关系为

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}$$

即

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

由此推导出在介质一致，不同压差下进行密封性试验时，泄漏率的转换公式为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}}$$

在进行试验介质由洁净水向压缩空气转换时，根据核电行业设计经验，在1个标准大气压、温度为20℃的条件下，空气与水的泄漏率转换系数为171^[2]，则转换为气体后的泄漏率计算公式可转换为

$$Q_1 = 171 \times Q_2 \times \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}} \quad (1)$$

其中：

Q₁：低压试验体积泄漏率

Q₂：阀门出厂密封试验体积泄漏率

ΔP₁：在线低压密封试验压差

ΔP₂：阀门出厂密封试验压差

但此时阀门仍安装于管道上，在现场维修条件受限、未安装流量计的情况下，无法直接测量泄漏流量，则将泄漏流量转换为气体充压腔室的压降，通过读取压降的方式计算泄漏率。具体方法为：充压至额定压力后，关闭供气阀进行保压，在保压一定时间后读取压力表的压降，并对压降进行换算。

2.2 试验系统压降计算

根据气体标准泄漏率的定义，计算压降的方法如下：

因试验过程持续时间短，且与外界有热交换，因此假设试验过程试验系统温度不变；试验开始时阀门下游管段内部内部压力为P₁，此时管段内部气体标准体积为

$$P_1 \times v_1$$

在泄漏一定时间t后，阀门下游管段内部气体压力降至P₂，此时管段内部气体标准体积为

$$P_2 \times v_1$$

则t时间内泄漏出的气体标准体积为

$$Q_1 \times t = (P_1 - P_2) \times v_1$$

在已知气体标准泄漏率Q及试验时间t、初始试验压力P₁的条件下，泄漏后管段内部压力P₂的计算方法为：

$$P_2 = P_1 - \frac{Q_1 \times 1.013 \times t}{v_1} \quad (2)$$

其中

P₁：初始保压压力，即在线试验初始压力，bar.g

P₂：密封试验气体泄漏后压力，bar.g

v₁：阀门下游管段内部容积，cm³

Q₁：1个大气压下压缩空气标准泄漏，atm*cm³/h

t：试验持续时间，h

2.3 计算案例

某核电厂的蒸汽发生器供氮隔离阀的参数如下：

表1 蒸发器供氮隔离阀参数表

代号	物理含义	数值
ΔP ₂	阀门出厂密封试验压差	24.4MPa
Q ₂	阀门出厂密封试验最大允许体积泄漏率	5cm ³ /h
ΔP ₁	在线低压密封试验压差	4bar.g
v ₁	阀门下游管段内部容积	1266.9cm ³

根据式（1），可计算得到转换为低压试验后体积在线密封试验允许泄漏率如下

$$Q_1 = 109.5 \text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{h}$$

根据式（3），当取t=10min时，计算得到3分钟后压降为

$$P_2 = 3.985 \text{bar.g}$$

即保压10min后，可接受的阀门泄漏率标准为压降 ≤ 0.015bar。

2.4 误差分析

根据阀门结构、试验方法及转换公式，可分析得到该泄漏率转换方法的误差主要来自两方面：

(a) 阀门填料部位泄漏的影响；

(b) 管段内部气体流失后压力下降引起的许用泄漏率下降的影响。

阀门填料部位泄漏造成的误差，是因为该在线密封试验目的是验证阀瓣阀座的密封性，在阀门正常关闭正向承压时，介质不会与填料直接接触，因此不会在填料部位形成泄漏通道；而本在线试验是从阀门下游侧进行充压，试验介质会与填料接触，在填料部位形成泄漏通道，从而会使试验得到的阀瓣阀座泄漏率数值偏大，使试验结果偏向保守。消除此误差的方式是试验过程中使用检漏液对填料部位进行查漏，若发现有泄漏，则通过紧固填料的方式消除泄漏。

阀门下游密闭管段内部气体流失后，密闭试验系统压力下降引起，实际上即是密闭试验系统与外界压差下降，因而式（1）中的低压试验条件下许用泄漏率Q₁会下降，继而导致试验持续一段时间后，试验结束时密闭系统的最

终压力应较式(2)计算得到的压力要高,即许用压降变小。因密闭管道系统中压力下降是一个连续的过程,因此关于此部分误差的分析,可通过将式(2)中的密闭管道系统空气泄漏后的压力 P_2 代入式(1)中的 ΔP_1 来求解。

将式(2)代入式(1)后,得到

$$Q_1 = 171 \times Q_2 \times \sqrt{\frac{P_1 - \frac{Q_1 \times 1.013 \times t}{v_1}}{\Delta P_2}} = \frac{171 Q_2}{\sqrt{\Delta P_2 v_1}} \times \sqrt{P_1 v_1 - 1.013 t Q_1}$$

令公式两边取平方,得到

$$Q_1^2 + \frac{(171 Q_2)^2}{\Delta P_2 v_1} \times 1.013 t Q_1 - \frac{(171 Q_2)^2 P_1}{\Delta P_2} = 0 \quad (3)$$

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{1.013 t (171 Q_2)^2}{2 \Delta P_2 v_1} \right) + \frac{(171 Q_2)^2 P_1}{\Delta P_2}} - \frac{1.013 t (171 Q_2)^2}{2 \Delta P_2 v_1} \quad (4)$$

从式(4)知道, Q_1 是关于时间 t 的函数。将(4)代入式(2),可得到 P_2 随时间变化的公式

$$P_2 = P_1 + \frac{(1.013 t)^2 (171 Q_2)^2}{2 \Delta P_2 v_1^2} - \sqrt{\left(\frac{1.013 t (171 Q_2)^2}{2 \Delta P_2 v_1} \right) + \frac{(171 Q_2)^2 P_1}{\Delta P_2}} \times \frac{1.013 t}{v_1} \quad (5)$$

以时间1min为步长,按表1参数分别计算式(2)与式(5)的 P_2 值并计算其误差,结果如下表

表2 考虑压差变化/不考虑压差变化时 P_2 对比

时间 (min)	不考虑压差变化 P_2 (bar.g)	考虑压差变化 P_2 (bar.g)	差值	误差
1	3.9985	3.9985	0.0000	0.00%
10	3.9854	3.9854	0.0000	0.00%
20	3.9708	3.9709	0.0001	0.00%
30	3.9562	3.9565	0.0002	0.01%
40	3.9416	3.9421	0.0004	0.01%
50	3.9271	3.9277	0.0007	0.02%
60	3.9125	3.9134	0.0010	0.02%

由表2可知,在低压试验条件下,考虑是否考虑试验系统压差随时间变化对实验结果影响很小,实际进行密封性实验时按照式(2)进行简化计算即可。

结论

(1) 通过气液转换系数及泄漏率与试验压差的关

公式(3)是一个一元二次方程,令

$$\begin{cases} a=1 \\ b=\frac{(171 Q_2)^2}{\Delta P_2 v_1} \times 1.013 t \\ c=-\frac{(171 Q_2)^2 P_1}{\Delta P_2} \end{cases}$$

且

$$Q_1 \geq 0$$

则求解得

系,可将试验介质为水的阀门高压密封试验转换为试验介质为空气的低压在线密封试验,并将空气体积泄漏率转换为密闭管段试验系统的压降,简化试验装置,方便操作;

(2) 通过对试验系统的误差分析,可知道:(a) 阀门盘根处的泄漏通道对试验结果的影响趋向保守,且可通过紧固盘根进行消除;(b) 试验过程中密闭管段内压力下降造成的误差对试验结果影响极小,因此按无需考虑压差变化的影响,按简化公式计算结果即可。

参考文献

- [1] 杨源泉主编. 阀门设计手册[M]. 1. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 佚名. EPP系统泄漏和反应堆安全壳及隔离系统定值试验完整性说明[R]. 北京: 中核核电工程有限公司, 2008.