

文章编号: 0258-0926(2015)S1-0194-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.S1.0194

核电站除氧系统孔板后管道减薄机理分析与改进措施研究

田皓文¹, 张腾飞², 曾小康¹

1. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213; 2. 江苏核电有限公司, 江苏连云港, 222042

摘要: 田湾核电站 1 号机组除氧系统某节流孔板后方的直管段在一个换料周期内壁厚由 6.6 mm 减薄至 2.5 mm, 极易造成管道泄漏, 为机组安全运行带来潜在的隐患。本文就除氧系统孔板后管道减薄磨损位置、汽蚀原理进行分析, 对除氧系统孔板设计存在的缺陷、采用多级节流孔板代替单级节流孔板优势及管道减薄改进措施进行综合论述。通过改造, 满足了除氧系统给水管线的运行要求, 且有效降低了管道腐蚀速率。

关键词: 节流孔板; 管道减薄; 汽蚀; 多级孔板

中图分类号: TL334 文献标志码: A

Mechanism Analysis and Improvement Measures for Thickness-Reducing of Pipe behind Restriction Orifice in Deaerating System in Nuclear Power Plants

Tian Haowen¹, Zhang Tengfei², Zeng Xiaokang¹

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;

2. Jiangsu Nuclear Power Corporation, Lianyungang, Jiangsu, 222042, China

Abstract: The pipe-wall thickness in a straight section, which is located behind a restriction orifice in deaerating system in 1# unit of Tianwan Nuclear Power Plant, reduced from 6.6 mm to 2.5 mm in a refueling cycle. It is prone to cause leakages that lead to a potential safety hazard for operation. This paper analyzes the location of abrasion and the mechanism of cavitation happened in this thickness-reducing pipe behind the restriction orifice, and comprehensively discusses the design deficiencies in the orifices of the deaerating system and the advantages of replacing the single-stage orifice by the multistage orifices. After the improvement, the operation requirements of water-supply pipelines in the deaerating system can be satisfied, and the erosion rate of pipelines can be effectively reduced.

Key words: Restriction orifice, Pipe-wall thinning, Cavitation, Multistage orifices

0 引言

节流孔板是一种重要的压力调节装置, 广泛应用于核电站回路系统中。其原理是通过利用流体流经孔板时的局部阻力, 使孔板前后产生压差达到降低流体压力、减少流体流量的目的。但如果节流孔板选用不当, 将会导致管道振动剧烈、噪音超标或者管道腐蚀严重等情况, 给回路系统设备、甚至整个核电站的安全运行带来了极大的安全隐患。

在田湾核电站大修期间, 检测人员对除氧系统节流孔板(设备 KKS 码为 1LAA11BP001, 以下出现设备编号均为设备 KKS 码)后直管段进行了测厚, 发现节流孔板后直管段壁厚减薄现象严重, 无法保证系统长时间正常运行; 且该管段运行介质为汽-水混合物, 温度压力较高, 如发生泄漏可能严重危及人员及机组运行安全, 存在较大安全隐患, 因此必须对该节流孔板后管道减薄情况进行原因分析及改进处理。本文对该节流孔

板后端管道发生减薄进行了机理分析,提出了通过采用多级节流孔板的方式减弱汽蚀,并运行计算流体动力学(CFD)软件方法计算出合理的多级孔板孔径。

1 节流孔板后壁厚减薄分析

1.1 汽蚀机理分析

1LAA11BP001 所在管线连接除氧器和 2#低压加热器。管线内介质为汽-水混合物,其作用是除氧器不凝结气体分离水,管道进出有水蒸汽。除氧器设计压力为 0.883 MPa,设计最高温度为 179 °C;实时监测温度为 172 °C 左右,实时监测压力为 0.76 MPa。2#低加设计压力为 0.1 MPa,设计最高温度为 100 °C;实时监测温度为 61 °C (加热前)至 85 °C (加热后)左右,实时检测压力为 0.065 MPa。如无特殊说明,本文中的压力均为以大气压 0.1 MPa 为参考压力的相对压力。

由于管道进口有水蒸汽且处于热平衡状态,因此 1LAA11BP001 所在管道的流体为饱和水、饱和水蒸汽和不凝结气体的汽-水混合物。当含有饱和水的汽-水混合物经过节流孔板时,流体的压力能转变为动能,压力突降,压力必然小于饱和压力,饱和水闪蒸产生大量气泡,流体体积变大,对管道壁面形成极大的冲击。当流体逐渐远离节流孔板时,部分动能转变为压力能,流体的压力有一定的恢复,气泡凝结破裂,流体以极高的速度填充原本被闪蒸汽泡占有的空间,对管道壁面有较大的冲击。当管道压力无变化时,流体体积不变,对管道壁面无汽蚀。因此,节流孔板下游压力突变引起的汽蚀是导致 1LAA11BP001 所在管道壁厚减薄的原因,经过节流孔板的压力突降是 1LAA11BP001 所在管道汽蚀发生的主要因素,而节流孔板下游压力恢复是次要因素。

上述分析可以看出,由于管道进口为含有饱和水的汽-水混合物,因此不管节流孔板如何设计,在节流孔板下游都会发生汽蚀。本文对节流孔板的设计改造不关注“避免汽蚀的发生”,而是关注“减弱汽蚀的程度”。对于流体为含有饱和水的汽水混合物而言,汽蚀的强弱不仅与节流孔板下游的最小压力有关,更与节流孔板上下游的压力变化值有关。为减小节流孔板上下游压力变化的幅度,同时减小节流孔板下游的最小压力,采用多级节流孔板替代单级节流孔板的思想

对 1LAA11BP001 进行改造。

1.2 磨损位置分析

根据除氧系统流程图可知,从除氧器到 2#低压加热器的管道中,弯头局部压降和管道摩擦压降很小,大阻力部件只可能为阀门 1LAA11AA101 和节流孔板 1LAA11BP001,而从原设计文件中可以看出,1LAA11AA101 为闸阀,阻力系数仅为 0.4,因此可近似认为节流孔板 1LAA11BP001 的上游压力为除氧器压力 0.76 MPa,下游压力为 2#低压加热器压力 0.065 MPa,即节流孔板前后压力差大约 0.7 MPa。

采用式(1)计算节流孔板单相时的阻力系数:

$$\varepsilon = \left\{ \left[\left(0.5 + \tau(1-\zeta)^{0.5} \right) \right] (1-\zeta) + (1-\zeta)^2 \right\} (\zeta)^2 \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{F_0}{F_1} = \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 ; y = \frac{\delta}{d_0}$$

$$\tau = a_1 \exp(a_2 + a_3 y + a_4 y^2)$$

$$a_1 = 6.3510363, a_2 = -1.5835866$$

$$a_3 = 0.5011904, a_4 = -2.375525$$

基于上述公式,孔径 60 mm、厚度 18 mm 无倒角的节流孔板 1LAA11BP001 阻力系数为 69.05。如果节流孔板上下游均为温度 172 °C 的单相水(即不考虑汽水混合和闪蒸等因素),则节流孔板 1LAA11BP001 所在管道的流量为 70 kg/s,而由于该管道存在闪蒸和水蒸汽,增加了管道阻力,因此,1LAA11BP001 所在管道的流量小于 70 kg/s。

采用 CFD 方法计算出 1LAA11BP001 节流孔板下游直管道的压力曲线,以确定节流孔板下游大约 50~100 mm 之间是否处于压力最小值,进一步说明汽蚀是 1LAA11BP001 管道壁厚减薄的原因。计算工况为:参考压力 3 MPa,温度 172 °C,进口相对压力 0.76 MPa,出口相对压力 0.065 MPa。选择 3 MPa 作为参考压力的原因为提高管道系统压力使管道处于单相,而节流孔板的压力场变化特性在单相和两相条件下无本质区别。节流孔板 1LAA11BP001 阻力系数 CFD 计算值为 68.267,与经典公式的计算值偏差为 -1%,CFD 计算结果可以作为设计分析的依据。图 1 给出了节流孔板上下游的压力曲线(节流孔板位置在 1 m),从图 1 中在节流孔板下游 0.04~0.14 m 之

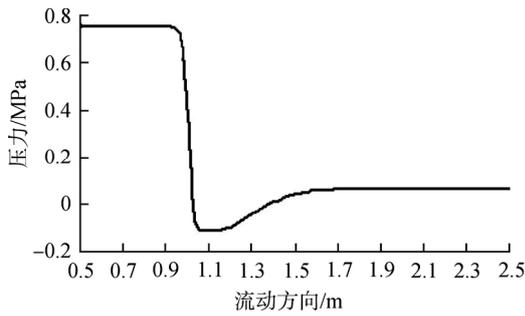


图1 单级节流孔板压力沿流动方向的变化

Fig. 1 Variation of Streamwise Pressure of Single-Stage Restriction Orifice

间, 相对压力处于最小值 -0.107 MPa, 汽蚀最严重的区域就在 $0.04\sim 0.14$ m 之间, 与节流孔板下游 $50\sim 100$ mm 处壁厚减薄最严重基本相符。

2 改造设计

2.1 多级节流孔板汽蚀程度的减弱分析

由于 1LAA1BP001 所在管道进口为包含饱和水和水的汽水混合物, 节流孔板如何设计都无法避免汽蚀的发生, 因此 1LAA1BP001 改造关注如何减弱汽蚀的程度, 即减小节流孔板上下游压差和节流孔板下游最小压力。采用 3 级节流孔板替代原型的单级节流孔板, 3 级节流孔板从流动方向分别编号为 1LAA11BP003、1LAA11BP002、1LAA11BP001, 每级节流孔板的上下游压降为原型单级节流孔板上下游压降为总压降的 $1/3$ 。

由于节流孔板下游的压力恢复是汽蚀发生的次要因素, 在比较改造前后节流孔板的汽蚀程度时仅考虑节流孔板上下游压力突变。假设 1LAA11BP001 所在管道进口空泡份额 α 为 10% , 则管道进口质量含汽率可采用式(2)计算:

$$x = \frac{v_f S \alpha}{v_f S \alpha + v_g (1 - \alpha)} \quad (2)$$

滑速比:

$$S = \left(\frac{x v_g + (1 - x) v_f}{v_f} \right)^{0.5}$$

基于公式可得到管道进口含汽率 $x_{in}=0.000585$ 。

对于原型单级节流孔板, 上游压力 0.76 MPa, 下游压力 0.065 MPa, 流体通过节流孔板的闪蒸可看作等熵变化, 下游质量含汽率为:

$$x_{out} = \frac{s_0 - S_f(0.065)}{s_g(0.065) - S_f(0.065)} = 0.107$$

饱和两相水流经节流孔板闪蒸引起的汽蚀程度与节流孔板上下游平均比容的变化有关, 原型单级节流孔板上下游平均比容分别为 0.00125 、 0.115 m^3/kg , 比容相差 0.114 m^3/kg 。

对于改造后的 3 级节流孔板, 1LAA11BP003、1LAA11BP002、1LAA11BP001 的下游压力分别为 0.528 、 0.295 、 0.065 MPa。按照上述方法得到每级节流孔板下游质量含汽率 x 分别为 0.0267 、 0.0596 、 0.107 , 下游平均比容分别为 0.00922 、 0.0288 、 0.115 m^3/kg , 每级节流孔板平均比容变化值分别为 0.00797 、 0.0196 、 0.0866 m^3/kg 。每级节流孔板的比容变化值为原型单级节流孔板的 7% 、 17% 和 76% , 虽然第 3 级节流孔板 1LAA11BP001 的平均比容变化值与原型单级节流孔板相差较小, 由于第 3 级节流孔板上游的质量含汽率已达到 0.0596 , 较大的含汽率对下游闪蒸引起的流体冲击有缓冲作用, 汽蚀变弱。

综上所述, 改造后的 3 级节流孔板汽蚀程度明显小于改造前的单级节流孔板。

2.2 多级节流孔板孔径确定

由于管道处于汽-水混合物, 其流动阻力计算公式不能按照公式(1)进行计算, 而是采用 Chisholm 公式^[1]计算节流孔板两相压降, 其计算公式为:

$$\Delta P = \phi_f^2 \Delta P_f = \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right) \frac{m^2 (1-x)^2 v_f}{2 C_D^2 A_0^2} \quad (3)$$

$$C = S \left(\frac{v_f}{v_g} \right)^{0.5} + \frac{1}{S} \left(\frac{v_g}{v_f} \right)^{0.5}; \quad \frac{1}{X^2} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^2 \frac{v_g}{v_f}$$

$$S = \begin{cases} (\bar{v}/v_f)^{0.5} & X \geq 1 \\ (v_g/v_f)^{0.25} & X < 1 \end{cases}$$

定义 $Y = \frac{\Delta P C_D^2}{m^2}$, 则:

$$Y = \frac{\Delta P C_D^2}{m^2} = \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right) \frac{(1-x)^2 v_f}{2 A_0^2} \quad (4)$$

由于改造后每级节流孔板的压差为原型单级节流孔板的 $1/3$, C_D 可看作常数, m 相等, 因此改造后每级节流孔板的 Y 值为原型节流孔板的 $1/3$ 。

假设 1LAA11BP001 所在管道进口空泡份额 α 为 10% , 管道进口 x 为 0.00585 。

对于原型单级节流孔板:

$$\frac{1}{X^2} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^2 \frac{v_g}{v_f} = 6.87409 \times 10^{-5}$$

$$S = \left(\bar{v} / v_f \right)^{0.5} = 1.057$$

$$C = S \left(\frac{v_f}{v_g} \right)^{0.5} + \frac{1}{S} \left(\frac{v_g}{v_f} \right)^{0.5} = 13.48$$

$$Y = \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right) \frac{(1-x)^2 v_f}{2A_0^2} = 77.7$$

式中, x 、 v_f 、 v_g 为节流孔板上游参数。当节流孔板上下游压降为 0.7 MPa 时, m 为 57.9 kg/s, 小于单相条件下的流量 70 kg/s。

改造后的第 1 级节流孔板 1LAA11BP003, X_3 、 S_3 、 C_3 与原型单级节流孔板相同, 而 Y_3 值为原型的 1/3。通过公式 (4) 可得到第 1 级节流孔板的孔径 $d_3 = 60 \times 3^{0.25} = 78.9 \approx 79$ (mm)。

对于第 2 级节流孔板 1LAA11BP002, 在 2.1 小节已得到第 2 级节流孔板的上游压力 0.528 MPa, 质量含汽率为 0.0267, Y_3 值为原型的 1/3, 那么, 通过公式 (4) 可得到第 2 级节流孔板的孔径:

$$d_2 = \left(\frac{4}{\pi} A_{02} \right)^{0.5} = 106 \text{ (mm)}$$

对于第 3 级节流孔板 1LAA11BP001, 在 2.1 小节已得到第 2 级节流孔板的上游压力 0.295 MPa, 质量含汽率为 0.0596, Y_3 值为原型的 1/3, 通过式 (4) 可得到第 2 级节流孔板的孔径:

$$d_1 = \left(\frac{4}{\pi} A_{01} \right)^{0.5} = 128 \text{ (mm)}$$

由于核电厂未能给出 1LAA11BP001 所在管道进口空泡份额, 本文开展了空泡份额从 0~20% 的敏感性分析, 如表 1。

表 1 空泡份额敏感性分析表

Table 1 Sensitivity Analysis of Void Fraction

空泡份额 $\alpha/\%$	含汽率 $x/\%$	1 级孔径 d_3/mm	2 级孔径 d_2/mm	3 级孔径 d_1/mm
0	0	79.0	108.9	131.3
2.000	0.010	79.0	108.4	130.7
4.000	0.021	79.0	107.9	130.1
6.000	0.033	79.0	107.4	129.5
8.000	0.045	79.0	106.9	128.8
10.000	0.059	79.0	106.4	128.2
12.000	0.073	79.0	105.8	127.6
14.000	0.088	79.0	105.3	126.9
16.000	0.104	79.0	104.8	126.2
18.000	0.122	79.0	104.2	125.6
20.000	0.141	79.0	103.7	124.9

从表 1 可以看出, 以空泡份额 10% 的情况为基准, 当空泡份额从 0 变化到 20% 时, d_3 不变, d_2 的变化幅度小于 2.8%, d_1 的变化幅度小于 2.6%。节流孔板内径变化引起的阻力系数变化大约为: 1LAA11BP003 阻力系数变化幅度为 0, 1LAA11BP002 阻力系数变化幅度小于 10%, 1LAA11BP001 阻力系数变幅度小于 10%。因此, 可以确定 1LAA11BP003 孔径 79 mm, 1LAA11BP002 孔径 106 mm, 1LAA11BP001 孔径 128 mm。

3 结论

通过对 1LAA11BP001 所在管道壁厚减薄的计算分析, 可得到如下结论:

(1) 1LAA11BP001 所在管道壁厚减薄的原因因为汽蚀, 由于管道进口为含有饱和水的汽水混合物, 节流孔板改造不能避免汽蚀, 而是减弱汽蚀。

(2) 可采用 3 级节流孔板替代原型的单级节流孔板, 按照流动方向, 3 级节流孔板的孔径分别为 79、106、128 mm, 厚度不变。

(3) 采用 3 级节流孔板改造后, 汽蚀程度明显减弱, 而流动阻力变化很小, 不影响管道的运行特性。

符号表

A : 流通面积, m^2 ; C : 常数
 d : 管道或孔板内径, m ; F : 管道或孔板流通面积, m^2
 m : 质量流量, kg/s ; ΔP : 孔板流动压降, Pa
 v : 比容, m^3 ; s : 比焓, $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
 x : 质量含汽率, %; y : 孔板厚度与内径之比
 S : 气液两相滑速比; : 两相流动压降的停堆因子
 C_0 : 节流孔板收缩系数;
 X : 两相流动压降汽相倍增因子与液相倍增因子之比
: 空泡份额, %; : 节流孔板阻力系数
: 节流孔板壁厚, m

下标

f : 液相; g : 汽相
0: 孔板上游状态; 1: 第 1 级孔板
2: 第 2 级孔板; 3: 第 3 级孔板
in: 孔板进口; out: 孔板出口

参考文献:

[1] 鲁钟琪. 沸腾传热和汽液两相流 (修订版) [M]. 北京: 原子能出版社, 2001.

(责任编辑: 杨洁蕾)