核电厂消防水泵最小流量旁通管孔板空泡腐蚀研究与对策

Cavitation Corrosion Research and Countermeasure of Minimum Flow Bypass Tube Orifice Plate of Fire Pump in Nuclear Power Plant

苏斌¹ 王水勇²

Bin Su¹ Shuiyong Wang²

1. 中广核运营有限公司运营标准化中心
中国·广东 深圳 518000

2. 苏州热工研究院有限公司寿命管理技术中心
中国·江苏 苏州 210000

1. Operation Standardization Center of
Zhongguang Nuclear Operations Co., Ltd.,
Shenzhen, Guangdong, 518000, China

2. Life Management Technology Center of Suzhou
Thermal Research Institute Co., Ltd.,
Suzhou, Jiangsu, 210000, China

【摘要】核电厂消防水生产系统每台消防水泵均在出口位置设置了1个节流孔板,用来控制流量的最小流量旁通管路,管壁腐蚀穿孔多次出现在这条最小流量旁通管道上。通过分析腐蚀形貌,开展流体力学计算,分析了管道腐蚀泄漏原因,改进了原设计方案。

【Abstract】Each fire pump in the fire water production system of nuclear power plant has a throttle orifice plate at the exit to control the minimum flow bypass pipeline. Corrosion perforation on the wall of the pipeline occurs many times in the minimum flow bypass pipeline. Through the analysis of corrosion morphology and hydrodynamic calculation, the causes of pipeline corrosion leakage are analyzed, and the original design scheme is improved.

【关键词】消防水泵;最小流量旁通管路;空泡腐蚀;流体力学;多级节流

【Keywords】fire pump; minimum flow bypass pipeline; cavitation corrosion; fluid mechanics; multistage throttling

【DOI】10.36012/etr.v1i1.74

1 引言

消防设施是核电厂的重要辅助安全设施,消防水管道的泄漏对消防水系统安全稳定运行构成直接威胁。核电厂火灾事故一旦发生且得不到有效控制,不仅对核电厂人员的生命和财产安全构成直接威胁,还会威胁核安全,甚至造成恶劣的公众影响。

在某沿海核电厂,其2机组4台消防水泵的最小流量管道自投用以来,经常发生腐蚀穿孔,并且前后几次发生穿孔时间比较集中。

2 腐蚀状况

最小流量旁通管道材料为碳钢,牌号为A106 Gr.WPB。管道外径为114.3mm,壁厚为3.6mm。节流孔板材料为不锈钢,牌号为Z2CN18-10,节流孔板孔径为19mm。发生腐蚀穿孔部位位于节流孔板下游20cm附近。最小流量管道内部腐蚀形貌以节流孔板为分界,上游腐蚀形貌为管瘤形式腐蚀,管瘤下有腐蚀坑,但未穿孔。节流孔板下游出现蜂窝状腐蚀坑,腐蚀坑边缘锐利,这是典型的空泡腐蚀形貌^[1]。

3 原因分析

当水经过节流孔板缩口时,流束会收缩。流束的最小横断面出现在节流孔板孔的下游,流束缩口处流速是最大的。由流体力学理论可知,流速的增加伴随着压力 P_v 的降低。在缩流断面后的区域,速度下降,压力增加,但由于能量损失,下游的压力不会完全恢复到上游的压力。当缩流断面处的压力 P_v 小于该处水的饱和蒸汽压力 P_w 时,部分水将汽化,同时,溶解在水中的部分气体会逸出,形成蒸汽与气体混合的小气泡,这个过程称为空化。产生空化以后,如果下游压力回升,恢复到高于该饱和压力的水平,气泡在水的压力的作用下,迅速凝结而破裂,形成冲击波或微射流对管壁造成空泡腐蚀^[2]。

管道内腐蚀形貌特征与其距节流孔板距离有所不同,距管道法兰面10cm之内为法兰变径管,内部无腐蚀坑;10~20cm距离范围内为较密的,小而浅的腐蚀坑;20~30cm距离范围内腐蚀坑密度变小,但腐蚀坑大而且较深,这个部位为最先穿孔的部位;30cm之外则无腐蚀坑。之所以会出现这样的腐蚀形貌的区别,是因为水在节流孔板缩断面空化后,在节流孔板下游,随着压力的回升,绝大部分空泡在压力开始回升区

(即法兰下游 10~20cm)域内溃灭。有部分空泡未能及时在开始阶段溃灭,则随着压力的继续上升,空泡在更下游的区域(法兰 20~30cm)内积聚更大的能量,对管壁造成的伤害更大,但由于数量较少,产生的空蚀坑密度降低^[9]。

4 消防水泵及其最小流量旁通管道设计要求

4.1 流体力学要求

消防水泵的流体力学要求如下:

①在出口管道关闭时,最小流量旁通管道流量必须大于 30m³/h;

②额定流量为 342m³/h 时,出口压力维持在 13bar(1bar=100kPa)的绝对压力;

③每台泵在异常工况下,提供 445m³/h,和 12bar 绝对压力^[3]。

4.2 孔板压降的限制

孔板的压降指孔板前后管道内的压力变化,定义如下:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (1)$$

式中, P_1 为孔板上游压力; P_2 为孔板下游压力。

节流孔板设计要求除了要满足流体力学的要求,还必须有效避免空泡腐蚀。这里将用 2 种方法判断孔板的空泡腐蚀。

第一种方法是阻塞流压差方法,孔板压降不能低于其发生阻塞流的压降,即阻塞流压差, ΔP_m 。孔板的阻塞流压差计算方法如下:

$$\Delta P_m = 0.8 \times [P_1 - (0.96 - 0.28 \times \sqrt{QRT(P_{1v}/P_c)}) \times P_{1v}] \quad (2)$$

式中, P_{1v} 为孔板上游介质温度下的饱和蒸汽压; P_c 为水的流体力学临界压力。一般认为,只有孔板压降小于阻塞流压差,才能避免空泡腐蚀。即孔板的允许压降:

$$\Delta P < \Delta P_m \quad (3)$$

另外一个判断孔板空泡腐蚀的方法是计算孔板的空泡指数,也称汽蚀数 σ :

$$\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P \quad (4)$$

一般认为汽蚀数小于 0.5 时,将发生严重空泡腐蚀,小于 0.8 时发生空泡噪声,只有汽蚀数大于 0.8 才能避免空泡腐蚀^[9]。

5 流体力学计算

由于消防水泵上下游管道无流量测试装置,但在消防泵出口管道上有压力计,可在泵启动后对其出口管道的压力进行测量。人们无法知道在各种工况下的最小流量管道内部的流量和压力数据。

通过流体力学计算,得到不同工况下消防水泵最小流量

旁通管道的流量和节流孔板前后压降等数据,计算结果将进行必要的验证,即计算得出的出口压力将与现场测量值相比较,并且各种工况下消防泵的流体力学需满足规定要求。

流体力学计算将包括以下 3 种情况:

①针对原有节流孔板设计,计算泵出口管道关闭状态下最小流量旁通管中的流量和压力;

②针对原有节流孔板设计,计算泵出口管道全开状态下(额定流量,主管中流量为 342m³/h)最小流量旁通管中的流量和压力;

③针对原有节流孔板设计,计算泵出口管道全开状态下(异常工况,主管流量 445m³/h)最小流量旁通管中的流量和压力;

①的流体力学计算主要为分析现有设计下空泡腐蚀原因和改进设计提供验证数据;②和③主要为验证新设计是否满足所规定的流体力学要求。

5.1 原有节流孔板设计流体力学计算

为了分析现有孔板造成空泡腐蚀的原因,需要知道 2 个参数,孔板的上下游压力以及通过孔板的流速(该核电厂消防水泵最小流量旁通管道上并无压力测量装置,也无流量测量装置)。为了得到消防水泵最小流量管道的压力和流量流速等数据,人们以该核电厂 1 号机组 1 号泵的具体管道、泵、管件和消防水池和节流孔板数据,建立流体力学计算模型,通过 Pipe Flow Expert 模拟计算最小流量管道的流体力学特性。以图 1 为例,建立 3 种消防泵最小流量旁通管道流体力学计算模型(见图 1)。

①最小流量旁通管道流体力学计算模型;

②消防水主管道流量设定为在异常工况下,单台泵提供 342m³/h;

③消防水主管道流量设定为在异常工况下,单台泵提供 445m³/h。

如图 1 中所示,消防泵最小流量旁通管道流体力学计算模型中节点 N4,N5,N3 分别代表该核电厂 JPP001DI 入口,JPP001DI 出口和 JPP001LP 测压点。N3 点的压力计算值将与实际 JPP001LP 读数进行检验,以验证计算结果的可靠性。N4,N5 的压力差即为孔板前后的压力差,将用来评估孔板的空泡腐蚀。最小流量旁通管道中的流量也是需要计算重要参数。表 1 是①~③ 3 种情况下,N3~N5 节点的压力和最小流量旁通管道中的流量的计算值。

用于计算的主要流体力学其他参数有:

该核电厂址所在地-15.8m 标高的平均大气压力值为 1010.7mbar ;

图1 最小流量旁通管道流体力学计算模型

注:①消防水池,池底标高取-15.200m,水池水位 14m,开口与大气相通;②消防泵以额定转速运行,转速取 2950r/min,其水力特性曲线取值维修手册消防泵试验曲线,泵轴中心标高取-12.500m;③安装在最小流量旁通管上的流量孔板,孔径为 19mm,厚度为 10mm,压降与流量关系曲线来自于计算数据;④管道长度和节点标高都来源于相应管道等轴图;⑤消防水主管道关闭。

消防水特性:温度 20℃,密度 998.0kg/m³ 饱和蒸汽压为 2.4kPa。
管道和管件参数如表 1 所示。

表 1 管道和管件参数

管道	管道材料	ID/mm	内表面粗糙度/mm	长度/m
P1	A106Gr.B	260.200	0.046	6.410
P2	A106Gr.B	260.200	0.046	1.294
P3	A106Gr.B	107.086	0.046	18.509
P4	A106Gr.B	107.086	0.046	0.1
P5	A106Gr.B	107.086	0.046	12.775
P6	A106Gr.B	107.086	0.046	8.877

管件的压力损失系数见表 2。

表 2 管件的压力损失系数

管件	直径/"	压力损失系数	数量	所属管道
泵吸入口	10	0.78	1	P ₁
弯管	10	0.16	1	P ₁
隔离阀	10	0.63	1	P ₁
变径管	10×8	0.18	1	P ₁
三通	10	0.84	1	P ₁
变径管	6×8	0.13	1	P ₂
弯管	4	0.2	15	P ₃ ,P ₆ ,P ₃
三通	8×4	1.02	1	P ₃
小流量管出口	4	1	1	P ₅ ,P ₆ ,P ₃

注:1"=25.4mm

由该核电厂消防水泵实际扬程曲线数据对该核电厂 1 号机组 1 号消防泵最小流量管进行流体力学计算,计算所得压

力为绝对压力(见表 3)。

表 3 不同节点在不同计算模型中的压力计算值

计算模型	流量/(m ³ /h)	不同节点的压力/bar		
		N3	N4	N5
①	35.276	15.3516	14.9656	1.7091
②	32.868	13.5908	13.2093	13.2093
③	30.669	12.0967	11.7191	1.6990

注:1bar=100kPa。

5.2 计算结果验证

由于该核电厂消防水泵最小流量管道无流量测量仪表对管道压力进行测量,但是在出口主管道上有一个压力表,并在每次消防泵启动试验时对其读数。为了验证流体力学模拟计算的可靠性,人们以该表实际读数与 N3 节点计算结果进行比较,以验证计算结果的可靠性。

查阅 JPP001LP 历次读数记录,其读数换算成绝对压力后,其最大压力为 15.81bar,最小压力为 14.91bar,平均压力位 15.36bar。以平均压力比较,这与计算结果 15.35bar 非常接近,其误差值为 0.07%。所以结果是可信的^[4]。

5.3 原有孔板设计的不足

由表 3 可以看出,在主管道关闭状态下,最小流量管道内的流量为 35.28m³/h,符合流体力学要求,即主管道关闭状态下,最小流量旁通管道能够提供大于 30 m³/h 的流量,以避免消防水泵的损坏。同样②和③的计算结果也分别满足所对应的流体力学要求,即出口绝对压力分别达到 13bar 和 12bar。

现在来看是否满足孔板压降的限制要求。根据 5.1 中①的计算,孔板前压力 P_1 为 14.9655bar,孔板后压力 P_2 为 1.7091bar,孔板流量为 35.28m³/h。20℃水的饱和蒸汽压力 P_s 为 2.3385kPa,流体力学热力学临界压力为 P_c 为 22.5MPa。结合这些参数,由式(1),(2),(4)式可计算处孔板的压差 ΔP ,阻塞流压差 ΔP_m ,和气蚀系数 σ ,结算结果见表 4 所示

表 4 计算结果

$\Delta P_{\text{case1}}/\text{bar}$	13.2564
$\Delta P_m/\text{bar}$	11.9545
$\sigma_{\text{case1}}/\text{bar}$	0.13

从计算结果来看, $\Delta P > \Delta P_m$,并且 $\sigma < 0.5$ 。根据空泡腐蚀判定标准,原有孔板在①的运行情况下,将不可避免会发生空泡腐蚀。

6 节流孔板设计

孔板设计包括,孔板孔径,多级孔板的压降分布及安装位置,孔板厚度等设计参数。

6.1 孔板压降系数的确定

孔板的压降一般以一个无量纲的流体阻力系数(K ,也称为压力损失系数)来计算:

$$\Delta P = 1/2 \rho v^2 K \quad (5)$$

式中, ρ 为流体的密度,kg/m³, v 为流速为管道中流体的平均轴向速度,m/s。

对于 $Re > 10^4$ 节流孔板(厚壁锐边孔板),流体阻力系数的计算可以按照下式计算^[4]:

$$K = 0.5 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^{0.75} + \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 + \tau \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^{1.375} + f \frac{l}{D_h} \quad (6)$$

式中, d 为节流孔板孔径; D 为上下游管道直径; l 为孔板厚度; f 为孔板的摩擦系数; D_h 为孔板孔的流体力学孔径,对于圆形孔而言, $D_h = d$; τ 为 l/D_h 的函数,计算见下式:

$$\tau = \left(2.4 - \frac{l}{D_h} \right) \times 10^{-0.25 + \frac{0.535 \left(\frac{l}{D_h} \right)^{0.05}}{0.05 + \left(\frac{l}{D_h} \right)^{0.05}}} \quad (7)$$

6.2 多级节流孔板级数与压降

根据 5.1 流体力学的计算结果,①的流体力学状态对孔板下游的空泡腐蚀是最不利的,且①是主要流体力学状态。所以只要避免发生①下的空泡腐蚀,则可避免②和③流体力学条件下空泡腐蚀。

根据 5.1 流体力学计算结果可知,原有孔板设计(即压力降)完全可以满足①、②、③运行条件下的流体力学要求。所以,为了不改变消防水泵流体力学特性,新设计仍然保持原有设计压降。即 ΔP 为 13.2565bar。为了使每一级孔板设计能同

时满足 4.2 节空泡腐蚀的两个判据的要求,新多级孔板压降应按几何级数递减:

$$\Delta P' = 2\Delta P'' = 4\Delta P''' \quad (8)$$

再按式(2)、(4)计算每级孔板的阻塞流压差和气蚀数。每级孔板的压差、阻塞流压差和汽蚀数的计算结果见表 5 所示。

表 5 每级孔板的阻塞流压差和汽蚀数

孔板	压降 $\Delta P/\text{bar}$	阻塞流压差 $\Delta P_m/\text{bar}$	气蚀数 σ
第一级孔板	7.5751	11.9546	0.97
第二级孔板	3.7876	5.8945	0.95
第三级孔板	1.8938	2.8644	0.89

从计算结果来看,每级孔板的压降小于其阻塞流压差,并且气蚀数都大于 0.8,说明三级孔板设计能够避免气蚀的发生。

6.3 节流孔板孔径

孔板孔径的确定是由设计孔板前后的压差决定,孔板孔径计算可有(6)~(7)公式进行计算。与流量、厚度都有关系。根据前文计算,流量和压差都已经确定,这可通过(5)式算出每级孔板的压降系数,通过式(6)和(7)可算出每级孔板孔径,结算结果见表 6 所示。

表 6 每级孔板的孔径

孔板	计算孔径/mm	实际取值/mm	压降系数
第一级孔板	22.151	22	319.45
第二级孔板	26.369	26	657.248
第三级孔板	31.213	31	1275.911

6.4 节流孔板厚度

为了满足孔板前后压差造成的作用力而不变形,节流孔板壁厚的设计就必须大于一个最小壁厚。这个最小壁厚与孔板孔径比 β 和孔板材料的屈服强度,以及孔板前后压差有关,以及管道内径有关。这里采用 R.W. Miller 公式计算:

$$l_{\min} \geq \sqrt{\frac{(0.681 - 0.651\beta)\Delta P}{\sigma_{\text{yield}}}} \times D \quad (9)$$

式中, β 为孔径比; ΔP 为压差,单位为 MPa; σ_{yield} 为屈服强度,单位为 MPa; D 为管道内径,单位为 mm。

现在分别对每级孔板的最小厚度进行计算。孔板为 304L 不锈钢材料,其屈服强度为 245MPa。管道内径 D 为 107.2mm,每级孔板的压降 ΔP 和孔径比 β ,以及每级孔板的最小厚度 $l_{\min}$ 见表 7 所示。

表 7 每级孔板的最小厚度

孔板	压降 $\Delta P/\text{MPa}$	孔径比 β	最小厚度 $l_{\min}/\text{mm}$
第一级孔板	0.75751	0.207	4.40
第二级孔板	0.37876	0.247	3.04
第三级孔板	0.18938	0.291	2.09

人们将三级孔板的厚度定为 10mm,完全符合上述最小厚度要求。

6.5 节流孔板安装位置

每个孔板直径最小直管段应该不小于 $5D$ (D 为管道内径)。孔板越近,压力损失可能与计算结果误差越大。

7 多级节流孔板流体力学验证

为了三级孔板设计进行验证,仍然按照 5.1 节所述相同的模型,并将单级孔板替换为三级孔板,其他设备和部件流体力学特性保持不变。每级孔板按照式(5)计算压降与流量的关系,每级孔板的压力损失与流量的关系见图 2 所示。

图 2 第一到三级孔板压力损失与流量的关系

由以上数据对该核电厂 1 号机组 1 号消防泵最小流量管进行流体力学计算,计算所得压力为绝对压力。与 4.1 节相同,计算 3 种情况下的各节点压力和最小流量管道中的流量。N4,N5,N3 分别代表第一级孔板入口、第三级孔板出口和 JPP001LP 测压点。①~③计算结果见表 8 所示。

有计算结果来看,由单级孔板变更到三级孔板后,最小流

量管道以及主管道中的流量压力与单级孔板非常接近。3 种情况下计算出的水里特性满足消防水泵流体力学要求。

表 8 3 种情况下各节点的压力和最小流量

计算模型	流量/(m³/h)	不同节点的压力/bar		
		N3	N4	N5
①	35.158	15.3517	14.9660	1.5845
②	32.738	13.5924	13.2112	1.5791
③	30.573	12.0982	11.7208	1.5745

8 结语

在消防水泵最小流量管线的腐蚀形貌的基础上,对管路的流体力学进行计算分析,判断消防水泵再循环管线出现腐蚀穿孔的原因为原有的单级节流孔板设计不合理,在最小流量运行工况下会发生空泡腐蚀。如果使用 3 级孔板替代现有单级孔板,通过计算确定 3 级孔板的孔径、厚度等参数,并对 3 级孔板的使用效果进行了验证计算,结果表明,3 级孔板可有效解决原单级孔板带来的空泡腐蚀问题。

参考文献

[1]王东志,王金龙,刘红永.核电厂消防水泵管道振动问题分析及应对措施研究[J].给水排水,2017,53(S2):92-94.
[2]陈娟.节流孔板在发电厂的应用[J].广东电力,2004(4):46-48.
[3]祝春艳.核电用消防水泵的抗震安全及内流场分析[D].北京:北京化工大学,2009.
[4]李志强,胡钟,武子斌.核电厂消防设计及超设计基准飞机撞击防火问题分析[J].产业与科技论坛,2018,17(14):45-47.