

# 某核电机组凝结水溶解氧超标问题分析及试验研究

杨璋<sup>1</sup>, 王瑜<sup>1</sup>, 蒋彦龙<sup>1</sup>, 石建中<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 宇航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 结合核电机组的运行特点与溶解氧存在机理, 对某核电机组凝结水溶解氧超标问题进行系统性分析和试验研究。着手从漏气量检查、凝汽器性能确认、真空泵抽气能力等3方面进行了分析, 研究发现漏气量应参照 ASME PTC 12.2 的规定控制, 核电机组凝汽器过冷度对凝结水溶解氧的影响约为理论计算值的 1/5 - 1/3, 通过提升真空泵抽气能力提高凝汽器真空度约 4 kPa 时能同比降低溶解氧量约  $5 \times 10^{-9}$ 。通过减小漏气量、提升真空泵抽气能力最终将溶解氧控制在  $3 \times 10^{-9}$  的期望值内, 有效处理核电机组凝结水溶解氧超标问题。避免了因凝结水溶氧超标带来的压水堆核电机组产生水腐蚀产物的严重后果。为后续类似问题的处理以及在行业内制定严格的凝结水溶氧控制标准提供了借鉴。

**关键词:** 溶解氧; 真空严密性; 凝结水; 真空泵

中图分类号: TK264.1<sup>+</sup>1 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.027

## 引言

压水堆核电机组凝结水的溶解氧是威胁机组安全运行的重大隐患。溶氧量过高将会引起给水系统设备的过度锈蚀, 不仅消耗给水设备的使用寿命, 产生的锈物流入蒸汽发生器并在其中积聚, 形成局部恶劣环境, 最终将使蒸汽发生器的换热管发生应力腐蚀破坏, 造成二回路放射性污染事件。

为了防止该类事件的发生, 核电机组在化学与放射化学技术规范中制定了比火电机组更加严格的凝结水溶氧量控制指标。火电机组一般只需将凝汽器出口凝结水的溶氧量控制在  $20 \times 10^{-9}$  以下<sup>[1]</sup>; 而压水堆核电机组需控制在  $10 \times 10^{-9}$  以下, 且长期运行时期望能控制在  $3 \times 10^{-9}$  以下。

国内某 1 000 MW 核电机组调试及试运行阶

段, 凝结水溶解氧量始终在  $20 \times 10^{-9}$  左右, 高于机组化学技术规范中规定的上限值 ( $10 \times 10^{-9}$ ), 更达不到期望值 ( $3 \times 10^{-9}$ )。

本研究结合核电机组凝结水溶解氧超标问题案例, 分析了溶解氧产生的根本原因, 在此基础上进行了漏气量检查、凝汽器性能确认、真空泵抽气能力分析等试验研究, 最终解决了该缺陷, 为类似问题处理以及在行业内制定严格的凝结水溶氧控制标准提供了借鉴。

## 1 凝结水溶解氧超标问题的原因分析

凝汽器正常工作时处于负压的工作环境, 有时会漏入一些环境空气。根据道尔顿分压定律和亨利定律可知溶解氧存在凝结水中是不可避免的<sup>[2]</sup>。同时当凝结水系统和设备运转正常时, 凝汽器中漏入的有限空气中绝大部分将通过真空泵及时排出。因此, 凝结水中溶解氧的存在是一个不断产生与抽出的动态平衡过程。

当凝汽器漏入空气量过多, 凝汽器性能不佳, 真空泵抽气能力受限时均会造成凝汽器内部空气分压过高、凝结水温度过冷, 从而导致大量氧气溶入凝结水造成溶解氧含量高。

因此, 解决凝结水溶解氧超标缺陷需从上述 3 个方面入手查找原因, 采取相应措施。

## 2 凝结水溶解氧超标问题试验研究

### 2.1 空气漏入因素的试验研究

为验证凝汽器的严密性, 判断凝汽器的漏气量对溶解氧的影响, 现场参照火电机组的《凝汽器与

收稿日期: 2014-07-02; 修订日期: 2014-08-20

作者简介: 杨璋 (1981-), 男, 福建宁德人, 福建宁德核电有限公司高级工程师。

真空系统运行维护导则》( DL/T932 - 2005 ,以下简称导则) 进行了凝汽器严密性试验<sup>[3]</sup> , 试验数据如表 1 所示。由表 1 计算得到空气分压平均上升速度( 真空下降速度) 为 0. 042 kPa/min , 虽优于导则规定的要求值 0. 27 kPa/min , 但溶解氧仍维持在  $18. 4 \times 10^{-9}$  附近。

应用理想气体状态方程建立相关微分方程 , 计算出对应的空气漏入量为 83 kg/h。而根据 ASME PTC 12. 2 规定 , 凝汽器性能试验时漏气量不应大于 22 kg/h<sup>[4]</sup> , 否则饱和凝结水在降落过程中难以再热到凝汽器背压下的饱和温度 , 从而出现过冷导致溶解氧上升。表 1 数据也可看出 , 试验期间凝汽器背

压中的空气分压、凝结水过冷度、凝结水溶解氧均随试验进行而同步上升。

为此 , 有必要将凝汽器真空严密性进一步提升。现场借助高精度的氦检漏技术 , 通过氦质谱仪对整个凝汽器真空边界进行了反复氦查漏试验。现场发现并处理 9 处漏点后 , 凝结水溶解氧量由  $18 \times 10^{-9}$  降至  $8 \times 10^{-9}$  左右 , 效果明显。

由于核电机组的蒸汽参数、凝汽器的蒸汽空间容积、凝结水溶解氧控制指标等均与火电机组差别较大 , 因此 , 核电机组为处理凝结水溶解氧问题而进行凝汽器真空严密性试验时 , 应参照 ASME PTC 12. 2 规定的漏气量不大于 22 kg/h 的要求进行。

表 1 某核电机组凝汽器真空严密性试验数据

Tab. 1 The vacuum strictness test result for a condenser in a nuclear power unit

时 刻	循环水入口温度/℃	排汽温度/℃	凝结水温度/℃	溶氧量 $\times 10^{-9}$	凝汽器压力/kPa	过冷度/℃	空气分压/kPa
21: 18: 02	14. 8	50	28. 9	18. 4	4. 4	1. 6	0. 38
21: 19: 02	14. 8	50. 2	28. 9	18. 5	4. 5	1. 9	0. 47
21: 20: 02	14. 8	50. 7	28. 9	18. 5	4. 5	2. 2	0. 54
21: 21: 02	14. 8	51. 0	29. 0	18. 6	4. 64	2. 5	0. 63
21: 22: 02	14. 8	51. 4	29. 1	18. 6	4. 71	2. 7	0. 67
21: 23: 02	14. 8	52. 0	29. 3	18. 8	4. 81	2. 9	0. 73
21: 24: 02	14. 8	52. 4	29. 5	19. 0	4. 9	3. 0	0. 77
21: 25: 02	14. 8	52. 9	29. 8	19. 0	4. 99	3. 1	0. 80
21: 26: 02	14. 8	53. 4	30. 0	19. 1	5. 09	3. 2	0. 84

2. 2 凝汽器性能的试验研究

核电机组中凝汽器的主要功能是利用海水冷凝汽轮机的排汽 , 维持正常的背压水平; 同时还兼有对凝结水进行热力除氧的功能。混有空气的湿蒸汽由管束外周向空冷区集气管方向流动 , 流动过程中蒸汽被凝结成饱和水 , 而空气等不凝结气体向集气管聚集 , 被下游真空泵抽出。

现场长期监测发现额定功率下凝结水溶解氧量呈现出随凝汽器入口海水温度变换而近似线性变换的趋势 , 这说明凝汽器的工作特性对凝结水溶解氧也有一定影响。

图 1 是根据道尔顿分压定律、亨利定律以及蒸汽表函数计算出的不同背压下过冷度与凝结水溶解氧的理论曲线。从图 1 可知 , 同一背压下随着过冷度的增加凝结水的溶解氧逐渐增大; 背压越低 , 溶解氧越高。需要说明的是 , 图 1 是基于亨利定律在平

衡态下溶解氧与过冷度的计算值。工程实际中蒸汽从凝结成水到下降到热井仅只有数 10 s 时间 , 不一定全部会到达饱和溶氧状态 , 所以图 1 计算的是溶氧量上限值。

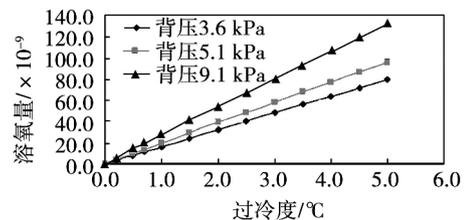


图 1 不同背压下过冷度与溶解氧的理论计算值曲线

Fig. 1 The curves of the theoretical calculating values of undercool and dissolved oxygen in different backpressures

为研究该凝汽器过冷度对凝结水溶解氧的实际影响,现场收集了2013年10月份该机组额定功率平台下凝汽器的运行数据如表2所示。

从表2看出,该凝汽器存在过冷现象,过冷度越大凝结水溶解氧越高。比较表2与图1,发现该凝汽器过冷度对凝结水溶解度的影响实际上约为理论计算值的1/5-1/3。

表2 额定功率平台凝汽器相关参数  
与凝结水溶解氧数据表

Tab. 2 The data table of rated power condenser parameters and dissolved oxygen in condensate water

电功率 /MW	海水入口 温度/℃	凝汽器 背压/kPa	背压下饱和 凝汽器 和温度/℃	凝结水 温度/℃	过冷 度/℃	凝结水溶解 氧值 × 10 <sup>-9</sup>
1089	24.43	6.47	37.50	36.27	1.23	5.79
1089	23.55	6.17	36.60	35.27	1.33	5.91
1089	21.90	5.91	36.00	34.29	1.71	6.47
1089	21.61	5.76	35.30	33.68	1.62	6.98
1089	20.14	5.44	34.30	32.40	1.90	7.12
1089	20.56	5.52	34.60	32.75	1.85	7.26

由于该机组未根据冬、夏季不同海水温度工况,配置不同的循环水泵台数或改变循环水泵转速,所以冬季海水温度低时凝汽器过冷度及凝结水溶解氧均高于夏季工况。为降低对机组经济性的影响,现场未对凝汽器本体进行大的变动。但从图1、表2均可看出,同一过冷度下提高凝汽器背压有助于降低溶解氧量,现场通过提升真空泵抽气能力的方式尝试提高背压降低凝结水溶解氧。

2.3 真空泵抽气能力的试验研究

真空泵负责将凝汽器中不凝结气体抽走,减小空气分压并降低凝结水溶解氧量<sup>[5]</sup>。

该机组配备的水环式真空泵为日本鹤见公司设计制造,出厂试验性能曲线参如图2所示。设计抽气能力为85 kg/h,正常工况下维持1台真空泵运行也能完全抽走3.1节计算的实际漏气量。

从图2可见提高真空泵入口压力或降低真空泵密封水的温度,均能大幅提高真空泵的抽气能力。提升真空泵抽气能力则有助于降低凝汽器中空气分压及凝结水溶解氧量。

本研究从以下3个方面尝试提升真空泵抽气能力。

(1) 减小真空泵抽气管路沿程阻力

凝汽器汽侧到真空泵集气管入口的沿程阻力主要由真空泵入口逆止阀支撑弹簧阻力、抽气混合气体流动摩擦阻力等组成。真空泵工作期间,入口逆止阀在前后压差的作用下,克服复位弹簧的阻力,保持一定开度;停运时依靠复位弹簧关闭,如图3所示。

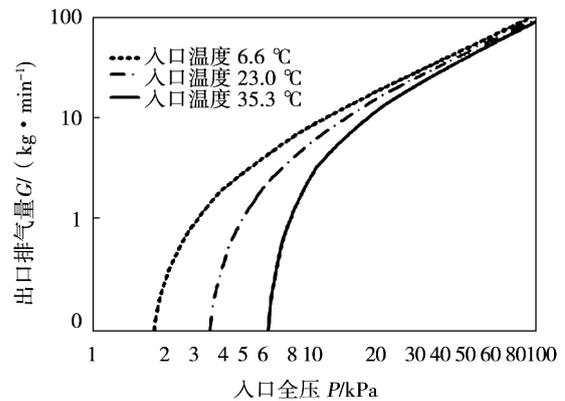


图2 液环式真空泵性能曲线图

Fig. 2 The curve of liquid ring type vacuum pump performance

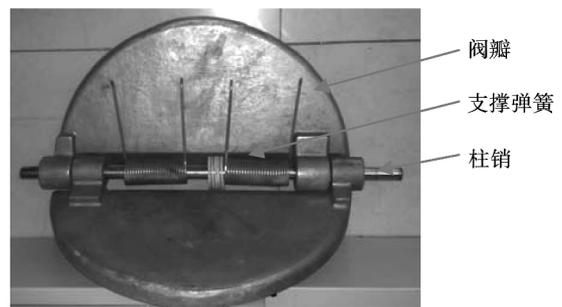


图3 逆止阀实物图

Fig. 3 The physical map of check valve

逆止阀的启闭主要由阀前后压差决定。当真空泵停运时,即使拆除该逆止阀的支撑弹簧,理论上在大气压的作用下也能实现逆止阀及时关闭。现场拆除支撑弹簧后经试验验证逆止阀能维持正常开关。支撑弹簧拆除前,实测凝汽器到真空泵入口的沿程

阻力为 1.7 kPa, 拆除后减小为 0.04 kPa, 抽气管路沿程阻力得到极大降低。

### (2) 提高真空泵热交换器工作性能

该型真空泵配备 1 台板式热交换器, 利用海水冷却密封水。通过提高热交换器的换热能力, 降低真空泵密封水温度以降低对应的饱和压力, 实现降低真空泵集气管中水蒸汽分压的目的, 这也有利于凝汽器汽空间空气的抽取、排出。

现场通过实施热交换器换热片清洗, 扩大节流孔板孔径提高换热器海水侧流量等措施恢复了真空泵热交换器端差至设计值(2℃)。

### (3) 保持真空泵密封水流量, 控制额定过冷度

水环式真空泵运行时, 密封水在泵体内做功产生热量, 同时吸收从凝汽器内抽出气体的热量导致温度升高。为保持额定抽气能力, 其密封水必须保持额定的过冷度。现场实测密封水流量约 20 m<sup>3</sup>/h, 远低于设计值 30 m<sup>3</sup>/h。现场通过扩大真空泵密封水节流孔板孔径并多次尝试, 将密封水流量恢复至设计值。

## 2.4 结果验证

该机组在首次大修期间, 通过采取以上 3 条改善措施, 大幅度提高了真空泵的抽气能力。同比凝汽器真空由之前的 7.33 kPa 提高至 3.54 kPa, 由于降低了凝汽器中空气分压力, 凝结水中溶解氧同比由  $7.55 \times 10^{-9}$  降低至  $2.6 \times 10^{-9}$  左右, 满足小于  $3 \times 10^{-9}$  的期望值要求。

## 3 结 论

本研究分析了某核电机组凝结水溶解氧超标的主要原因是漏入空气量偏多且抽出不及时。通过对空气漏入因素、凝汽器性能和真空泵抽气能力进行试验研究, 成功降低了凝结水溶解氧量, 并得出如下结论:

(1) 试验研究空气漏入影响因素得出: 检查核电机组凝汽器严密性以降低凝结水溶解氧时, 应参

照 ASME PTC 12.2 的规定(漏气量不大于 22 kg/h) 执行。

(2) 试验研究凝汽器性能影响因素得出: 凝汽器过冷度越大凝结水溶解氧越高。由于蒸汽冷凝下降至热井过程中不一定会全部到达饱和溶氧状态, 工程实际中核电机组凝汽器过冷度对凝结水溶解氧的影响约为理论计算值的 1/5 - 1/3。

(3) 试验研究真空泵抽气能力影响因素得出: 核电机组凝汽器汽侧到真空泵集气管入口的抽气混合气体流动摩擦阻力约为 0.04 kPa。根据液环式真空泵的性能试验曲线, 提高真空泵入口压力能大幅提高真空泵的抽气能力。通过提升真空泵抽气能力提高凝汽器真空度约 4 kPa 时, 同比溶解氧量降低约  $5 \times 10^{-9}$ 。

## 参考文献:

- [1] GB/T 12145 - 2008, 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量 [S].  
GB/T 12145 - 2008. Quality criterion of water and steam for generating unit and steam power equipment [S].
- [2] 蔡锡琼, 蔡文钢. 火电厂除氧器 [M], 北京: 中国电力出版社 2007.  
Cai Xi-cong, Cai Wen-gang. Deaerator of thermal power plant [M], Beijing: China Electric Power Press 2007.
- [3] DL/T932 - 2005, 凝汽器与真空系统运行维护导则 [S].  
DL/T932 - 2005, Guide of operation and maintenance for the condenser and vacuum system of power plant [S].
- [4] ASME PTC12.2 - 1998, Performance Test code on Steam Surface Condensers [S].
- [5] 王兴平, 黄功文, 张 林. 电厂水环式真空泵冷却系统的问题及其对机组出力的影响 [J]. 动力工程, 2004, 24(4): 589 - 592.  
WANG Xing-ping, HUANG Gong-wen, ZHANG Lin. The cooling system trouble of water-ring vacuum pump and its effect on turbine exhaust pressure and power output [J]. Power Engineering, 2004, 24(4): 589 - 592.

(姜雪梅 编辑)

a smaller uniformly distribution factor ( within 2% ) and better hydraulic performance. **Key words:** cooling tower , tube type water distribution ,hydraulic calculation ,genetic algorithm ,optimized design

基于 PID 型神经网络的除氧器压力和水位解耦控制研究 = **Study of the Decoupled Control Over the Pressure and Water Level of a Deaerator Based on a PID ( Proportional ,Integral and Differential) Type Neural Network** [刊 ,汉] WANG Peng ,MENG Hao ( College of Automation ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ZHANG Wei ( CSIC No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) ,DAI Ri-hui ( Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 6) . -926 -931

In marine steam power plants ,the pressure and water level in deaerators are correlated and have a strong coupling property. As a result ,it is very difficult for the traditional PID control to achieve satisfactory control effectiveness and it is mandatory to take corresponding decoupling measures. PID type neural networks not only have the merits of the traditional PID control but also have an ability of performing a self-learning and approaching to any function. A model for the pressure and water level in deaerators was established and through establishing a neuron corresponding to the proportional ,integral and differential control ,the PID control and the neural network were integrated and a PID type neural network decoupling control method was proposed. By making use of the model thus established ,a simulation by using the PID type neural network decoupling control method was performed. It has been found that compared with the single loop PID control method ,the method in question boasts a better decoupling result ,the stabilization time durations of the pressure and water level in the deaerator can be shortened by 100 s and 60 s respectively and both overshoots can be reduced by 0. 6 KPa and 0. 005 m respectively. **Key words:** steam power ,pressure in a deaerator ,water level in a deaerator ,PID type neural network ,multi-variable decoupled control

某核电机组凝结水溶解氧超标问题分析及试验研究 = **Analysis and Experimental Study of the Problem That the Dissolved Oxygen Content of Condensate Water in a Nuclear Power Unit Exceeds the Standard** [刊 ,汉] YANG Zhang ,WANG Yu ,JIANG Yan-long ( College of Astronautics ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,Nanjing ,China ,Post Code: 210016) ,YANG Zhang ( Fujian Ningde Nuclear Power Co. Ltd. ,Ningde ,China ,Post Code: 355200) ,SHI Jian-zhong ( China Guangdong Nuclear Power Engineering Design Co.

Ltd. ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518057) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30 ( 6) . - 932 - 935

In combination with the operation features of nuclear power generation units and the mechanism governing the presence of dissolved oxygen , a systematic analysis and experimental study were performed of the problem that the dissolved oxygen content of condensate water in a nuclear power unit exceeded the standard. The analysis begun from the following three aspects: inspection of the leakage flow rate ,verification of the performance of the condenser and the air extraction capacity of the vacuum pump. It has been found that the air leakage flow rate shall comply with the requirements as stipulated in ASME PTC 12.2 and the influence of the supercooling degree of the condensate water in the condenser of a nuclear power generation unit on its dissolved oxygen content is about 1/5 to 1/3 of the value theoretically calculated. When the vacuum degree in the condenser decreases by 4 kPa through increasing the gas extraction capacity of the vacuum pump ,the dissolved oxygen content can decrease by about 5 ppb accordingly. Finally ,through reducing the leakage flow rate and increasing the gas extraction capacity of the vacuum pump ,the dissolved oxygen content was controlled within the value of 3 ppb as expected ,thus the problem that the dissolved oxygen content of condensate water in the nuclear power unit exceeds the standard can be dealt with effectively and the serious consequence of water corrosion products in the pressurized water reactor nuclear power units due to the dissolved oxygen content exceeding the standard can be avoided ,thus offering reference for subsequent treatment of similar problems and formulation of a strict condensate water dissolved oxygen content control standard in the industry. **Key words:** dissolved oxygen ,vacuum tightness ,condensate water ,vacuum pump

生物质下吸式气化炉热解气化试验研究 = **Experimental Study of the Pyrolytic Gasification of a Biomass Downdraft Type Gasifier** [刊 汉] LI Rui-rong ,ZHU De-wen ,CHEN Yong-sheng ( Nanjing Agricultural Mechanization Research Institute ,Agricultural Ministry ,Nanjing ,China ,Post Code: 210014) ,ZHANG Lian-fa ( Nanjing Li-anchi Biology and Energy Source Co. Ltd. ,Nanjing ,China ,Post Code: 211100) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30( 6) . - 936 - 940

With a biomass downdraft type gasifier serving as the object of study and the rice stalk particles as the raw material , through an experimental study ,analyzed were changes in the temperature distribution inside the gasifier and the influence of the gasification temperature on the fuel gas constituents of the products ,fuel gas heating value ,gas pro-