

## 在线溶解氧表在压水堆核电厂的常见故障及应对方法浅析

石永新

南京华天科技发展股份有限公司, 江苏 南京 210019

[摘要] 文章就 SWAN AMI 溶解氧表在压水堆核电厂二回路系统运行中常见异常故障问题, 进行原因分析并通过现场实践处理从而总结出一套行之有效的改善技术, 大大降低在线氧表的故障率及维护成本, 确保了化学监督的可靠性。

[关键词] 在线溶氧表; 压水堆; 故障

DOI: 10.33142/hst.v3i6.2980

中图分类号: TH83

文献标识码: A

### Brief Analysis of Common Faults of On-line Dissolved Oxygen Meter in PWR Nuclear Power Plant and Countermeasures

SHI Yongxin

Nanjing Huatian Technology Development Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210019, China

**Abstract:** This paper analyzes the common abnormal faults of Swan AMI dissolved oxygen meter in the secondary circuit system operation of PWR nuclear power plant and summarizes a set of effective improvement technology through field practice, which greatly reduces the failure rate and maintenance cost of on-line oxygen meter and ensures the reliability of chemical supervision.

**Keywords:** online dissolved oxygen meter; PWR; faults

#### 1 核电溶解氧监测的重要性

水中溶解氧的存在是核电金属系统发生氧化腐蚀的一大基础条件, 当金属设备中溶氧含量较高时, 将导致系统发生氧腐蚀, 造成设备寿命降低甚至出现损坏, 直接影响核电厂的安全运行。因此出于安全考虑, 核电 CEX 系统的溶氧期望值控制在 5ppb 以内, 限值为 10ppb。其作为核电 OTS 参数, 就是为了确保蒸汽发生器处于安全运行。这就要求我们能及时、准确地在线监测水质中溶氧的指标。

#### 2 SWAN AMI 溶解氧表测量原理和电极基本结构

目前国内外主流的溶氧测量仪表分析原理主要为: “荧光猝灭法” 和 “电化学极谱法”。而核电二回路系统只要使用的是精度相对较高的电化学极谱法测量溶氧。

SWAN AMI 溶氧表采用的是扩散型极谱法电极。电极由贵金属(Au) 阴极、阳极(Ag/AgCl 参比电极)、保护电极组成。测量时, 阴极和阳极浸没在电解液(一定浓度的 KCl 溶液, 含约 1%KOH) 中, 两极之间加一恒定的极化电压, 水中溶解氧通过透氧膜扩散进入电极, 在阴极被消耗产生电流:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 。水中的溶氧浓度和产生的电流成线性比例关系 ( $I = P_m A n F c / \delta$ , 其中  $P_m$ —透氧膜对氧的透气率、 $A$ —阴极有效面积、 $n$ —氧的电价、 $F$ —法拉第常熟、 $c$ —溶解氧浓度、 $\delta$ —透氧膜厚度)。而保护电极处于阴极外圈, 其上加等量的电压用于消耗电解液中扩散出来的氧。

#### 3 SWAN AMI 溶氧表的常见异常故障

- (1) 氧表在线测量过程中读数频繁出现瞬时波动, 波动在几个、几十甚至上百 ppb, 每次波动持续时间 20~30 秒。
- (2) 仪表测量读数缓慢上涨。
- (3) 仪表校验后进行无氧水零点验证时, 本底水平明显较历史水平上涨, 甚至出现零点无法稳定的情况。
- (4) 仪表维护校验重新在线后响应慢。

#### 4 SWAN AMI 溶氧表故障的原因分析

2016~2017 年之间某核电厂各机组 SWAN 氧表运行过程中均频繁出现了上述异常问题, 其中问题 1 出现的频率最高。而为了尽快恢复在线氧表的可用性, 往往只能直接更换电极, 维护成本较高。鉴于此, 为了深入探索仪表异常故障的真实原因, 仪表维护人员以固定一块在线氧表为试验对象, 更换新的电极探头后, 开展了为期一年的电极老化跟踪实验, 借助每月的定期维护校验窗口, 检查电极探头内部的变化并进行拍照比对, 以此分析仪表异常产生的原因并制定解决措施。

电极老化实验跟踪概况如下:

1 个月电极变化: 阳极银丝表面局部由深棕色变浅灰色; 保护电极表面整体由金色变白色; 其他无明显变化。

3 个月电极变化: 阳极银丝表面整体呈现灰色; 保护电极表面整体呈现白色且表面变粗糙; 其他无明显变化。

6 个月电极变化: 阳极银丝表面整体呈现白色; 保护电极表面整体呈现灰白色且表面粗糙、明显起皱; 电解液由无色透明变淡黄色。; 透氧膜与阴极接触的周边存在少量明显的杂质, 杂质吸附在内膜上。

9 个月电极变化: 阳极银丝表面整体呈现灰色且表面变粗糙; 保护电极表面整体呈现灰色且表面严重起皮, 随时有可能脱落; 电解液呈淡黄色; 透氧膜与阴极接触的周边存在大量明显的杂质, 杂质吸附在内膜上。

第 11 个月, 现场监测到仪表出现异常波动, 波动 > 100ppb, 持续时间 19S。经现场检查, 电极状况与第九、十月的观察现象基本一样, 不同的是电解液内可见明显浮动的颗粒杂质。对仪表进行标定, 结果合格; 使用无氧水进行零点验证, 发现零点由原有的 0.8ppb 上涨至 2.1ppb, 且较难稳定。

维护人员依据实验现象, 模拟分析氧表电极老化过程:

1) 水中溶解氧通过电极透氧膜进入电极, 一部分被阴极消耗产生电流, 另一部分溶解于电解液中被保护电极消耗。

阴极发生反应:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 。

阳极发生反应:  $4Ag + 4Cl^- \rightarrow 4AgCl \downarrow + 4e^-$

保护电极发生反应:  $4Ag + O_2 \rightarrow 2Ag_2O \downarrow$

2) 随着电解液中  $Cl^-$  消耗、浓度的降低, 阳极发生反应:  $4Ag + 4OH^- \rightarrow 4AgOH + e^-$ ,  $2AgOH \rightarrow Ag_2O + H_2O$ 。

3) 由于  $AgCl$  本身溶解度低, 附着性较好, 产生  $AgCl$  均匀沉淀并附着在阳极银丝上, 不易脱落; 而保护电极上反应产生的  $Ag_2O$  附着性差, 易脱落, 因此随着电极投运时间的增加, 保护电极外观变化最明显, 阳极银丝次之。电极上不断积累的反应氧化产物使得电极变粗糙、甚至起皱, 然后不断脱落并在透氧膜上沉淀附着。

4) 在反应产物累积至一定程度后, 氧化物的脱落将会由微小细末到肉眼可见的颗粒状的质变, 而大颗粒氧化物的脱落会引起内部扩散电流的明显扰动, 最终表现为仪表大量程波动的现象。

另外, 大颗粒氧化物脱落后无法在透氧膜上附着固定而成为悬浮物, 受外界水流冲击及设备震动的影响而运动, 也会造成内部扩散电流的轻微扰动, 从而表现为仪表测量读数以及零点的异常上涨。

5) 在反应产物累积至一定程度后, 保护电极无法与电解液中氧充分接触, 从而降低了其消耗氧的效率, 从而表现为仪表恢复、响应慢。

## 5 SWAN AMI 溶氧表故障的解决方案

(1) 使用吸水纸清洁保护电极和阳极线圈上的反应产物, 但不可破坏电极结构, 然后使用除盐水进行彻底清洗, 避免有物质残留。

(2) 使用除盐水清洗透氧膜内吸附的反应产物。

(3) 更换新的干净的电解液。

2018 年-2019 年通过以上处理方案, 在某核电厂有效处理了现场近 20 起 SWAN 溶解氧表异常波动的故障问题, 得到了化学部门的积极肯定。

## 6 总结

本文列举了压水堆核电厂在线 SWAN AMI 溶解氧表在二回路系统运行时常见故障问题, 分别是: 氧表测量过程中出现瞬时波动、仪表测量读数上涨, 仪表零点异常上涨, 仪表响应慢。通过现场为期一年的跟踪实验, 对每个问题产生的原因都作出了理论分析, 并以此制定了解决措施, 最终通过现场的实践得以验证成功, 从而确保了仪表在线测量的稳定性、准确性, 大大提升了化学监督的水平, 有效保障核电机组水汽的品质。

### [参考文献]

[1] 陶淑芬, 王震, 王桂林. 溶解氧测定方法分析与研究[J]. 治维, 2011(6): 6.

[2] 钱俊峰. 极谱型氧传感器及溶解氧测定仪[J]. 仪表技术与传感器, 1990(5): 6.

[3] 朱建中. 微型 Clark 氧传感器的进展[J]. 传感器世界, 1996(9): 2.

作者简介: 石永新 (1988.3-) 男, 中国地质大学, 武汉, 材料科学与工程, 南京华天科技发展股份有限公司, 项目经理, 助理工程师。