

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310159

核电厂二回路系统有机胺应用研究

游兆金, 沈亚芳, 卢叶艇

(中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

[摘要] 降低核电厂二回路系统设备管道腐蚀和减少腐蚀产物进入蒸汽发生器, 对维持二回路安全运行和蒸汽发生器可靠性具有重要意义。运行核电厂二回路设备管道的金属腐蚀程度主要取决于其所在部位运行温度下的 pH 值即 pHt 值, 以提高二回路系统所有部位 pHt 值为目标, 分析主要有有机胺吗啉、乙醇胺、3-甲氧基丙胺、二甲胺等及其组合的性能特征, 并结合这些有机胺的应用经验, 探讨了主要有有机胺及其组合的应用原则。对目前国内二回路有机胺的应用现状提出了改进建议: 选择有机胺或其组合时应计算二回路各部位的 pHt 值是否满足设备管道防腐要求, 同时评估对系统树脂床运行时间的影响; 碱性较强挥发性低的乙醇胺适用于二回路腐蚀产物主要来自高温疏水且凝结水精处理需要连续运行的电厂, 3-甲氧基丙胺则因其碱性较强挥发性适中使用范围较为广泛, 吗啉因碱性较弱挥发性适中适用于凝结水精处理非连续运行的电厂, 二甲胺和氨因其挥发性高适合和其他碱化剂组合使用, 碱化剂组合使用可以在设备管道防腐和树脂床运行周期方面体现出更多的优势。

[关键词] 有机胺; 沉积物; 流动加速腐蚀; pHt 值; 树脂

[引用本文格式] 游兆金, 沈亚芳, 卢叶艇. 核电厂二回路系统有机胺应用研究[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 74-80. YOU Zhaojin, SHEN Yafang, LU Yeting. Organic amines application research in secondary cycle of nuclear power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 74-80.

Organic amines application research in secondary cycle of nuclear power plant

YOU Zhaojin, SHEN Yafang, LU Yeting

(CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

Abstract: In order to ensure safe operation of secondary cycle and reliability of steam generator, it is of great significance to reduce corrosion of equipment & piping of the cycle in nuclear power plant. With the deepening research on organic amines and the continuous accumulation of operation experience, the industry realized that the metal corrosion in the cycle during plant operation depends mainly on the pH at the operating temperature of locations of the cycle, i.e. pHt. To improve pHt at the locations of the cycle, performance characteristics of the main organic amines and their combinations are analyzed in this paper. Combined with the application experience and actual effects of organic amines at home and abroad, the application strategy of the main organic amines and their combinations are discussed and proposed, and the improvement suggestions are put forward with regard to current amine application status of the secondary cycle in China. Selections of amine or its combination should calculate the pHt at various locations to meet anti-corrosion requirements and evaluate effects on service life of resin beds in the system. Ethanolamine with stronger basicity and low volatility is suitably used in plant in which corrosion product is mainly from drain systems and condensate polishers are in continuous operation. 3-methoxypropyl with strong basicity and moderate volatility can be used in most plants. Morpholine with weaker basicity and moderate volatility is suitably used in plants in which polishers are not in continuous operations. Dimethylamine and ammonia are suitably used with other amines because of their high volatility. Amine mixture application appears advantages on aspects of the anti-corrosion and service life of the resin beds.

Key words: organic amines; sediment; flow accelerated corrosion; pHt value; resin

收稿日期: 2023-10-09

第一作者简介: 游兆金 (1964), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为核电厂化学控制技术, youzj@cnnp.com.cn.

通信作者简介: 卢叶艇 (1979), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为核电厂化学控制技术, luyt@cnnp.com.cn.

蒸汽发生器 (SG) 是核电厂的关键设备之一, 其完整性直接关系到核电厂运行的安全性和经济性。统计表明, 核电厂 80% 以上的 SG 传热管破损是由沉积物下腐蚀造成的。二回路设备管道均匀腐蚀和流体加速腐蚀 (flow accelerated corrosion, FAC) 的产物进入 SG 会在其缝隙和管板等滞留区形成沉积物, 还会使得支撑板与传热管间通道堵塞, 同时造成传热管表面积污^[1]。这些情况不仅会引发沉积物下腐蚀, 还会造成核电厂出力下降。为此, 必须降低二回路设备管道的腐蚀以减少腐蚀产物进入 SG, 达到防止或缓解沉积物在 SG 内积累而引发的各种问题。

研究表明^[2-4], 运行核电厂二回路系统金属腐蚀主要取决于其所在部位运行温度下的碱度即 pH 值 (简称 pH_t 值), 在选择碱化剂时应予以充分考虑^[3]。本文以提高二回路各部位 pH_t 值为目标, 分析主要有有机胺的性能特征, 结合国内外有机胺的应用经验, 探讨主要有有机胺及其组合的应用原则, 并对目前国内二回路的应用现状提出了改进建议。

1 腐蚀与 pH_t 关系

二回路腐蚀主要包含均匀腐蚀和 FAC, 二者与管道材质、介质流速、温度、介质杂质含量以及 pH 值等有关^[4-12]。但是对于运行核电厂, 二回路系统金属腐蚀主要取决于系统各部位接触介质的 pH_t 值。

1.1 均匀腐蚀

研究表明^[4], 二回路系统碳钢均匀腐蚀与铁的溶解度直接相关。在给水温 250 °C 时 pH_t 值为 6.6~7.4, 铁溶解度较低, 具体如图 1 所示。均匀腐蚀的 pH_t 值应控制在 6.6~7.4。

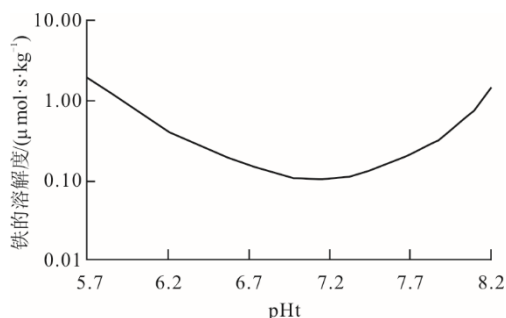


图 1 250 °C 铁溶解度与 pH_t 值关系
Fig.1 Change of iron solubility with pH_t at 250 °C

1.2 FAC

根据核电厂运行经验, 二回路热力系统汽水分离器 (MS) 等疏水部位 FAC 较严重。MS 疏水温

度在 198 °C 时, FAC 速率随 pH_t 值升高急剧下降, pH_t 值从 5.3 到 7.3, FAC 速率下降近 6 倍, 在 pH_t 值升高到 6.6 以后, FAC 速率较小^[13]。可见, 即使 pH_t 值的差异仅 0.1 也能带来 FAC 速率的显著变化。

1.3 提高二回路各部位介质 pH_t 值

二回路运行温度下, 为降低主要材料碳钢在给水和 MS 疏水等高温部位的均匀腐蚀和 FAC, 其 pH_t 值应在 6.6 以上 (即接近或大于相应温度下中性水 pH_t 值 1.0 个单位以上)。该要求已成为 CANDU Energy^[14]、Framatome (AREVA)^[15] 和美国电力科学研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 等机构选用碱化剂的主要原则。

目前, 国内核电厂化学技术规范中规定的给水 pH 值 (25 °C) 一般要求 9.5 以上, 在选用碱化剂时也常用 25 °C 时各部位 pH 值来衡量, 但使用该指标评价会因胺特性不同造成腐蚀控制的较大偏差。对比给水 pH 值 (25 °C) 为 9.5 时各代表性部位的 pH_t 值发现, 目前化学技术规范中给水 pH 值 (25 °C) 指标不能准确反映系统各部位的碱性强弱环境。

2 有机胺物理化学特性

2.1 碱性

目前, 国内外应用的有机胺包括吗啉 (简称 Morph)、乙醇胺 (简称 ETA)、3-甲氧基丙胺 (简称 MPA) 和二甲胺 (简称 DMA) 等^[4,16], 其在溶液里的离解度和质量分数共同决定了溶液的碱性强弱。离解度的负对数 (简称 p_{K_b}) 表示胺的碱性强弱, 数值越小碱性越强。表 1 显示了有机胺和氨在二回路温度下的碱性强度。

表 1 有机胺和氨在二回路温度下的 p_{K_b}
Tab.1 The p_{K_b} of organic amines and ammonia at secondary circuit temperature

氨/有机胺	p _{K_b}		
	25 °C	150 °C	300 °C
ETA	4.5	4.8	6.4
MPA	4.1	4.5	4.6
DMA	3.2	3.6	5.4
Morph	5.5	5.3	6.5
氨	4.8	5.2	6.7

由表 1 可见, DMA 和 MPA 在各种温度下碱性相对较强, 其他 2 种有机胺和氨则碱性较弱。

2.2 挥发性

二回路介质在很多部位存在汽液两相, 有机胺的挥发性是决定不同部位液相 pH_t 值强弱的另一重

要因素。有机胺在汽液两相中的分配系数 (K_d) 反映了有机胺挥发性的大小^[4,17]。汽相和液相分布均匀的有机胺 K_d 接近 1, 有利于汽液两相介质达到特定温度下的 pHt 值。表 2 为有机胺和氨在核电厂二回路温度下的 K_d 。由表 2 可见, Morph 和 MPA 的 K_d 相对较佳。ETA 则由于挥发性低, 将使 MS 疏水的 pHt 值降低, 这将造成后续凝结水 pHt 值偏低, 氨水则与此刚好相反。

表 2 有机胺和氨在二回路温度下的 K_d Tab.2 The K_d of organic amines and ammonia at secondary circuit temperature

氨/有机胺	10 mg/kg 溶液不同有机胺的 K_d		
	25 °C	150 °C	300 °C
ETA	0.01	0.26	0.66
MPA	0.31	0.98	1.57
DMA	3.03	5.52	6.94
Morph	0.12	0.78	1.28
氨	30.00	9.55	3.31

2.3 对精处理系统树脂床的影响

在选择何种有机胺以及确定有机胺使用质量分数时, 还应评估其对凝结水精处理系统树脂床运行时间的影响^[18]。以有机胺质量分数达到 MS 疏水 Δ pHt 值为 1 且树脂床以 H/OH 模式运行来计算, 相关有机胺质量分数对精处理系统树脂床负荷系数的影响见表 3。

表 3 精处理系统树脂床在各种有机胺工况下的负荷系数

Tab.3 Load coefficients of resin bed in precision treatment system under various organic amine working conditions

氨或有机胺	给水中氨或有机胺质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	凝结水中氨或有机胺质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	树脂床负荷系数
氨	15.0	16.8	51.0
Morph	14.0	13.8	8.2
MPA	7.0	7.1	4.2
ETA	2.0	1.2	1.0

由表 3 可见, 在满足 MS 疏水系统防腐效果较佳的前提下, 氨对树脂床运行时间影响远大于其他碱化剂, MPA 和 ETA 则是较好的选择。此时, 单独使用 ETA, 凝结水 pH 值 (25 °C) 约为 9.1, 会使凝结水系统碳钢腐蚀增大。

2.4 对 SG 排污处理净化床的影响

很多压水堆设计有排污水回收处理净化床, 需要评估对其运行时间的影响。同样, 以 MS 疏水 Δ pHt 值为 1 且排污净化床以 H/OH 模式运行, 计算各种有机胺对排污净化床负荷的影响, 结果见表 4。

表 4 SG 排污净化床在各种有机胺和氨工况下的负荷系数
Tab.4 Load coefficients of SG sewage purification bed under various organic amine and ammonia operating conditions

氨或有机胺	给水中氨或有机胺质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	排污水中氨或有机胺质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	净化床相对负荷系数
氨	15.00	4.31	5.2
Morph	14.00	11.30	2.7
MPA	7.00	4.41	1.0
ETA	2.00	4.62	1.5

由表 4 可见, 同样氨对排污净化床运行时间影响最大, MPA 和 ETA 则是较好的选择。如果要采用氨作为碱化剂, 那只能以降低金属的防腐效果为代价来维持排污净化床运行时间。

由于排污净化床出口水质远低于精处理系统树脂床出水要求, 因此排污净化床可以胺化运行, 如其出水钠质量分数控制在 $0.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。胺化运行时, 出水钠的水平与钠对有机胺的选择性系数密切相关, 选择性系数大会延长树脂运行时间。表 5 给出了有机胺和氨采用不同树脂时的选择性系数 $K_{\text{Naa,Amine}}$ 。

表 5 钠对有机胺和氨的相对选择性系数 $K_{\text{Naa,Amine}}$ Tab.5 Relative selectivity coefficient $K_{\text{Naa,Amine}}$ for sodium to organic amine and ammonia

树脂类型	氨	Morph	ETA	MPA
10%DVB 凝胶树脂	0.53	1.20	1.00	1.90
20%DVB 大孔树脂	0.27	11.30	3.20	45.50

从表 5 可见, 单独采用 Morph 和 MPA 胺化运行时, 在相同出水钠离子水平下, 排污净化床的运行时间最久, ETA 胺化运行次之, 氨化运行周期最短。法国电厂在将水化学模式从“6.0 mg/kg Morph+1.5 mg/kg 氨”改为“4.0 mg/kg ETA+1.5 mg/kg 氨”后^[1], 排污净化床的运行时间缩短了 1/3。

2.5 有机胺对二回路适用性的综合比较

根据上述有机胺的物理化学性能, 以目前国内核电厂普遍要求给水 pH 值 (25 °C) 9.5 为基准, 对二回路无铜系统的适用性比较, 结果见表 6。表 6 给水 pH 值 (25 °C) 为 9.5 时有有机胺/氨适用性比较。

表 6 给水 pH 值 (25 °C) 为 9.5 时有有机胺/氨适用性比较
Tab.6 The applicability of organic amines/ammonia when the pH value of feedwater (25 °C) is 9.5

有机胺或氨	给水中有机胺或氨质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pHt 值 (给水)	pHt 值 (MS 疏水)	pHt 值 (凝结水)	精处理树脂床匹配性	排污净化床匹配性
氨	1.5	6.14	6.19	9.10	中等	中等
ETA	3.9	6.22	6.92	8.93	优	差
Morph	31.0	6.47	6.83	9.12	差	中等
MPA	4.0	6.14	6.56	9.08	优	优
DMA	1.5	6.46	6.22	9.12	中等	优

从表6可见,对于上述有机胺或氨,没有一种能够完全满足二回路各部位防腐和树脂床的匹配性要求。由于MPA和精处理系统树脂床/排污净化床的相容性较好,碱性也较强,因此将MPA质量分数提高后,采用单独的MPA处理可以满足要求;类似地,选择较高质量分数的单独ETA处理也可行,但此时排污水净化床可运行性差;对于没有设计精处理系统或精处理系统平时不运行的电厂,单独Morph处理是不错的选择;DMA虽然碱性强,但汽液分配系数大(与氨类似),其在高温疏水中的pHt值较低,因此适合与其他胺配合使用。ETA和Morph虽然和非再生式的排污净化床匹配性不好,但随着国内越来越多电厂增设或改造排污净化床为可再生式,这种匹配性正在好转。

鉴于采用单独有机胺不能满足各种要求,目前往往采用2种或多种有机胺/氨组合处理。

3 有机胺使用现状和改进建议

3.1 国外有机胺使用现状

20世纪70年代末以来,发现有机胺Morph对二回路热力系统的防腐效果远优于氨,美国、加拿大和法国等核电厂开始采用Morph作为碱化剂来代替氨。

20世纪80年代末以来,美国评估筛选了近百种有机胺,经实验室实验后选择其中约10种进行电厂试验。经过在不同核电厂近30年的现场试验和组合以及质量分数优化,ETA、Morph、MPA或DMA等在内的4种有机胺或组合得到了较广泛的应用。衡量电厂二回路总体腐蚀水平的给水总铁含量中值(通过滤膜过滤累积采样)从20世纪90年代初的 $5.00\ \mu\text{g/L}$ 降至目前 $0.75\ \mu\text{g/L}$ 的水平。截至2022年,北美75台在运压水堆和重水堆机组中,单独使用ETA有30台,单独使用Morph有21台,单独使用MPA有6台,ETA+MPA处理6台,ETA+DMA处理和ETA+氨处理均为3台,其他Morph+DMA、MPA+DMA和ETA+DMA+氨均为2台。ETA对精处理系统树脂床负担较小,这可能是美国电厂大多采用ETA的原因。加拿大核电厂没有精处理系统,采用较高质量分数的Morph处理(约 $15\ \text{mg/kg}$),可使给水总铁质量浓度保持在较低(约 $0.6\ \mu\text{g/L}$)水平。

2011年以来,法国大多数电厂已从Morph/氨($6.0\ \text{mg/kg}$ Morph+ $1.5\ \text{mg/kg}$ 氨)处理转为ETA/氨($4.0\ \text{mg/kg}$ ETA+ $1.5\ \text{mg/kg}$ 氨)处理,除6台机组外,

到2023年计划所有电厂均要转为这种ETA/氨处理。转成ETA/氨处理后,SG排污水净化床运行周期下降了 $1/3$,给水中总铁质量浓度整体仍然维持原来水平^[1](均值从 $7\ \mu\text{g/L}$ 降到 $5\ \mu\text{g/L}$,中值从 $1\ \mu\text{g/L}$ 升至 $2\ \mu\text{g/L}$)。分析原因可能是,MS等疏水中的腐蚀产物不是二回路给水中铁的主要组成。

3.2 国内有机胺使用现状及改进建议

目前,国内对有机胺特别是ETA的研究较多,且已在秦山等多个核电厂得到应用^[12-24],但相对于国内现有核电机组数量而言应用占比仍然偏小,且应用水平仍然偏低。与国外相比,主要表现为给水ETA质量分数较低,给水总铁质量分数较高。这主要是受化学技术规范中SG排污水pH值($25\ ^\circ\text{C}$)小于9.8要求的限制。对此,法国核电厂已将该值提到9.9,这相当于给水ETA质量分数 $7\ \text{mg/kg}$ 的水平。对于M310机组,《化学和放射化学技术规范》中对给水ETA质量分数有要求,但其为非运行技术规范(OTS)参数,随着技术规格书转为中系,该参数将由电厂自主确定,各电厂应尽快做好准备进行修改。如果排污水中因ETA质量分数太高导致阳离子电导率较大,应在确定碱化剂后对阳离子电导率进行评估,然后在化学控制时予以扣除。

目前,国内二回路水工况主要有单独氨处理、单独ETA处理、ETA+氨处理和Morph+氨处理4种模式。其中,采用单独氨处理模式的机组占比最大,仍超过50%。下面以几个典型应用案例,结合有机胺特性来分析各种模式的优缺点,并提出相应改进建议。

3.2.1 单一氨水模式现状以及改进意见

图2给出了国内各种处理模式下高温部位的pHt值。由图2可见,单独使用氨水处理的A电厂高温疏水部位的 ΔpHt 值均达不到接近或大于1要求,给水总铁质量分数处于较高水平($2\sim 5\ \mu\text{g/kg}$)。

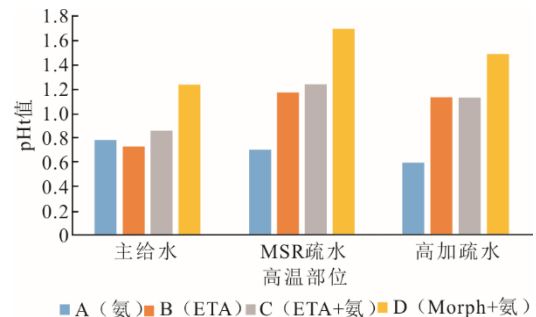


图2 二回路各高温部位的 ΔpHt 比较
Fig.2 The ΔpHt at various high temperature locations of the secondary circuit

由表 3 和表 4 可见,对于精处理系统树脂床连续运行的电厂,无法通过只提高氨水质量分数达到二回路高温疏水部分良好的防腐效果。为达到二回路各部位 ΔpHt 接近或大于 1 的要求,建议采用以下方案。

1) 针对只在启动和凝汽器泄漏时使用精处理系统的电厂,可以改用高质量分数 Morph 处理或者 ETA+氨处理。给水吗啉质量分数宜保持 20~30 mg/kg; ETA 质量分数以不超过 SG 排污水 pH 值 (25 °C) 9.9 为准,即控制给水 ETA 质量分数 4~6 mg/kg 和氨质量分数 1~3 mg/kg。短时间使用凝结水精处理系统时,碱化剂质量分数可以降低到指标下限运行,以延长精处理系统树脂床的运行周期。

2) 针对精处理系统需要长时间投运的电厂,如果 SG 腐蚀产物主要来自 MS 和高加等高温疏水,可单独采用 ETA 处理,给水 ETA 质量分数控制在 4~8 mg/kg; 如果 SG 腐蚀产物均匀来自 MS 疏水、高加疏水和凝结水等,则给水 ETA 质量分数应控制为 3~5 mg/kg,同时给水氨质量分数在 1~3 mg/kg。鉴于 DMA 和 MPA 在高温下碱性较强,且对树脂床运行时间的影响远比氨小,采用单独 MPA 处理、ETA+MPA 或 ETA+DMA 处理 3 种方式都能很好地将各部位 ΔpHt 维持在 1.0 个单位以上。

3.2.2 单独 ETA 模式现状及改进意见

图 2 中单独使用 ETA^[16-18]作为碱化剂的 B 电厂,SG 排污水直接回收到凝汽器,因此精处理系统需要连续运行。从图 2 可以看出:单独 ETA 处理的二回路 ΔpHt 值比单独使用氨水的电厂好,特别是 MS 和高加疏水等改善很多;但给水和凝结水的 pH 值还较低。这从凝汽器热井收集到的较多腐蚀产物也可以得到证明。对于该类电厂,建议进一步提高给水 ETA 质量分数到 4.0~8.0 mg/kg; 或者,如果给水中总铁产物大部分来自凝结水,则可考虑添加适量的 MPA 或 DMA 组合处理,以使 ΔpHt 值达到要求。

3.2.3 ETA+氨模式现状及改进意见

图 2 中使用 ETA+氨处理模式的 C 电厂^[21-22]给水 ETA 和氨质量分数均控制在 2.0 mg/kg 左右,给水系统 pH 值较低,给水总铁质量分数为 1.5~3.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。这类电厂应将给水 ETA 质量分数进一步提高到 3.0~6.0 mg/kg,或者将氨改为 MPA 或 DMA 以提高 pH 值,从而进一步减少腐蚀。

3.2.4 Morph+氨模式现状及改进意见

图 2 中使用 Morph+氨处理的 D 电厂^[13,23-24]给水 Morph 质量分数控制在约 20 mg/kg,氨质量分数控制在约 3 mg/kg。经计算,该电厂二回路各部位的 ΔpHt 值都大于 1.0 个单位,给水总铁质量分数均值约 0.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,处于国际领先水平。为进一步缓解传热管表面积污^[25],可考虑再添加 DMA。

3.2.5 4 种模式的处理效果比较

上述电厂 3 种模式下大修期间从 SG 冲洗出来的干泥渣量如图 3 所示。结构相同的凝汽器热井内部磁栅吸附腐蚀产物量如图 4 所示^[26]。对比图 2—图 4 可见, ΔpHt 值越高防腐效果越佳,如 ΔpHt 值大于 1.0,则二回路金属整体防腐效果更优。

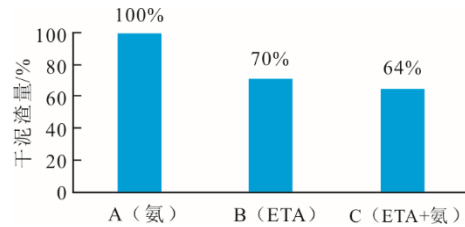


图 3 3 种模式下机组 SG 冲洗出来干泥渣量情况
Fig.3 The amount of dry sludge flushed by SG in three modes

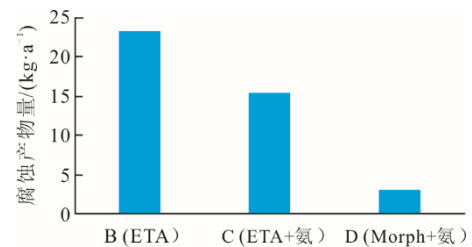


图 4 3 种模式下磁栅吸附腐蚀产物量比较
Fig.4 The amount of corrosion products adsorbed by magnetic grids in three modes

4 结 论

根据电厂二回路材料和树脂床配置情况,结合有机胺特性可根据以下原则确定最佳有机胺及其质量分数或组合。

1) 在确定采用何种有机胺或其组合及控制质量分数后,应计算在该有机胺及其质量分数下二回路各部位的 ΔpHt 值是否大于 1.0 个单位,以评估对各部位设备管道腐蚀的影响。同时,评估在该质量分数下对精处理系统树脂床和排污净化床运行时间的影响。

2) 对于运行电厂,在选择何种有机胺之前,应分析给水中腐蚀产物总铁来源组成。如果给水总

铁大部分来自 MS 疏水和高加疏水等,应采用低挥发性有机胺,如 ETA 处理;如果 MS 疏水和凝结水都是给水中腐蚀产物的重要来源,应采用有机胺组合处理的方式如 ETA+MPA 组合,也可采用兼具挥发性适中和碱性较强的单独有机胺处理,如较高质量分数的 MPA 或吗啉处理。

3) 对于运行期间凝结水精处理系统采用连续全流量或部分流量处理的电厂,应采用挥发性低的有机胺,如单独 ETA 处理,或碱性强、性能全面的有机胺,如单独 MPA 处理,或者是这些有机碱的组合处理方式。对于没有设置凝结水精处理系统或机组正常运行期间凝结水精处理系统不投运的电厂,可采用单独 Morph 处理等。

4) 对于采用非再生式排污净化床运行的电厂,应采用碱性较强、分配性适中的单独 MPA 处理。采用单独的低挥发性 ETA 会阻碍其达到最佳防腐效果的质量分数或产生较多的废树脂,可将此类排污净化床改为可再生式,或降低目前国内电厂 SG 的高排污率。

[参考文献]

- [1] DUVAL A, DUPONT C, DUCHAUSSOY T, et al. Secondary chemistry conditioning in EDF Fleet [C]. San Francisco, USA: International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 2018.
- [2] KEITH F. PWR secondary water chemistry guidelines[R]. Palo Alto, USA: EPRI, 2017: 3002010645.
- [3] IAEA Safety Standards, Series No. SSG-13, Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants[R]. 2011.
- [4] PETER M. PWR advanced amine application guidelines [M]. Palo Alto, USA: EPRI, TR-102952-R2, 1997: 1.
- [5] 曹松彦, 王今芳, 孙本达, 等. 采用乙醇胺抑制核电站二回路系统的流动加速腐蚀[J]. 热力发电, 2011, 40(1): 73-75.
CAO Songyan, WANG Jinfang, SUN Benda, et al. Adoption of ethanolamine to inhibit flow accelerated corrosion in secondary systems of nuclear power stations[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(1): 73-75.
- [6] 高明华, 刘新福, 雷水雄. ETA 对镍基合金 690TT 应力腐蚀敏感性研究[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(9): 42-44.
GAO Minghua, LIU Xinfu, LEI Shuixiong. The susceptibility of ETA to stress corrosion of nickel-based alloy 690TT[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(9): 42-44.
- [7] 郭亭山, 赵永福, 梁志远, 等. 压水堆核电站二回路水化学处理用碱化剂研究进展[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 1-9.
GUO Tingshan, ZHAO Yongfu, LIANG Zhiyuan, et al. Research progress of alkalinizing agents in water chemical treatment of secondary circuit in pressurized water reactor nuclear power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 1-9.
- [8] 蔡金平, 田民顺, 何艳红, 等. 乙醇胺与核电厂二回路材料的相容性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(7): 485-489.
CAI Jinping, TIAN Minshun, HE Yanhong, et al. Compatibility of ethanolamine and secondary circuit materials of nuclear power plants[J]. Corrosion and Protection, 2019, 40(7): 485-489.
- [9] 潘向烽. 碱化剂对核电厂二回路管道材料流动加速腐蚀的影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 24.
PAN Xiangfeng. Study on the effect of alkalinizing agent on the accelerated corrosion of material flow in the secondary circuit pipeline of nuclear power plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 24.
- [10] 王力, 罗坤杰, 方可伟, 等. 在不同碱化剂溶液中 TU48C 钢的均匀腐蚀及流动加速腐蚀速率[J]. 机械工程材料, 2017, 41(8): 80-83.
WANG Li, LUO Kunjie, FANG Kewei, et al. Uniform corrosion and flow accelerated corrosion rate of TU48C steel in different alkalinizing agent solutions[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(8): 80-83.
- [11] 宋利君, 李新民, 张乐福, 等. 乙醇胺对碳钢腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 828-831.
SONG Lijun, LI Xinmin, ZHANG Lefu, et al. The influence of ethanolamine on the corrosion performance of carbon steel[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(9): 828-831.
- [12] 孙荣鹏, 王俭秋, 韩恩厚. 乙醇胺 ETA 浓度对核电站二回路碳钢和镍基合金 690 腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(2): 97-103.
SUN Rongpeng, WANG Jianqiu, HAN Enhou. Effects of ETA concentration on corrosion of carbon steel and nickel based alloy 690 in nuclear power plant on secondary side[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(2): 97-103.
- [13] 游兆金, 田民顺, 卢叶艇, 等. 秦山重水堆核电站蒸汽发生器二次侧腐蚀产物控制研究和实践[J]. 核科学与工程, 2020, 40(6): 917-924.
YOU Zhaojin, TIAN Minshun, LU Yeting, et al. Steam generator secondary side corrosion product control research and practice in Qinshan PHWR NPP[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(6): 917-924.
- [14] MOSKAL J. Design manual chemistry control qinshan CANDU project[M]. Ontario, Canada: Atomic Energy of Canada Limited, 2000: 1.
- [15] FERNANDO M R, JORG F. Secondary side water chemistry pH control strategy improvements[C]. Paris, France: International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 2012.
- [16] 赵永福, 王今芳, 马韦刚, 等. 核电厂二回路乙醇胺的应用性能研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(6): 167-171.
ZHAO Yongfu, WANG Jinfang, MA Weigang, et al. Research on the application performance of ethanolamine in the secondary circuit of nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(6): 167-171.
- [17] 朱志平, 杨磊, 乔越, 等. 乙醇胺汽液分配系数及高温分解特性的试验研究[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 128-133.
ZHU Zhiping, YANG Lei, QIAO Yue, et al. Experimental study on ethanolamine vapor-liquid partition coefficient and high temperature decomposition characteristics[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 128-133.
- [18] 李新民, 邓佳杰, 宋利君, 等. ETA 对核电厂凝结水净

- 化系统性能的影响[J]. 离子交换与吸附, 2014, 30(6): 569-576.
- LI Xinmin, DENG Jiajie, SONG Lijun, et al. Effect of ETA on the performance of nuclear power plant condensate purification system[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2014, 30(6): 569-576.
- [19] 曹松彦, 孙本达, 黄万启, 等. 乙醇胺的热稳定性试验及其在核电站二回路系统的应用[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(11): 1019-1021.
- CAO Songyan, SUN Benda, HUANG Wanqi, et al. Experiment on thermal decomposition characteristics of ETA and its application to secondary system of NPPM[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(11): 1019-1021.
- [20] 左萌, 范晓梅, 何汉华, 等. 核电厂二回路吗啉与乙醇胺加药工况的水化学影响研究[J]. 广东化工, 2012, 39(14): 50-52.
- ZUO Meng, FAN Xiaomei, HE Hanhua, et al. Research on water chemistry effect of nuclear power secondary loop morphine and ethanalamine dosing conditions[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(14): 50-52.
- [21] 赵永福, 姜峨, 龚宾, 等. 一种新型复合碱化剂及其用途: CN105417668A[P]. 2016-03-23[2023-10-08].
- ZHAO Yongfu, JIANG E, GONG Bin, et al. A new type of composite alkalizer and its use: CN1054176 68A[P]. 2016-03-23[2023-10-08].
- [22] 赵永福, 姜峨, 龚宾, 等. 核电站二回路乙醇胺与氨复合应用可行性研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 127-132.
- ZHAO Yongfu, JIANG E, GONG Bin, et al. Feasibility study on the combined application of ethanalamine and ammonia in the secondary loop of nuclear power plants[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 127-132.
- [23] 方岚. 秦山三期重水堆核电站二回路水化学优化[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 246-253.
- FANG Lan. Qinshan Phase 3 PHWR NPP secondary water chemistry optimization[J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 246-253.
- [24] 游兆金, 沈照根, 刘祖洁, 等. 核电站二回路热力系统吗啉-氨协同化学控制方法: CN106854017B[P]. 2015-12-09[2023-10-08].
- YOU Zhaojin, SHEN Zhaogen, LIU Zujie, et al. Morphine-ammonia coordination chemistry control method of secondary system in nuclear power station: CN106854017B[P]. 2015-12-09[2023-10-08].
- [25] TURNER C W. New insight into controlling tube-bundle fouling using alternative ammonias[C]. Avignon, France: International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 2002.
- [26] 杨镇海. 核电凝汽器磁栅除铁过滤器的应用[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(14): 264-265.
- YANG Zhenhai. Application of magnetic fence filter in nuclear condenser [J]. Turbine Technology, 2007, 49(14): 264-265.

(责任编辑 杨嘉蕾)