



尿素漏入对机组水汽品质的影响及关键诊断技术

熊远南

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司中南电力试验研究院, 河南郑州 450000)

[摘要] 城市中水中的有机物在经锅炉补给水系统迁移到热力系统的过程中发生了分解, 引发了机组水汽品质的劣化。采用现场测试与室内分析相结合的技术手段发现中水、超滤、反渗透和除盐水箱中均检测出了尿素, 确认了尿素为中水的有机物污染源。总结了尿素在水汽系统中的分解规律为随水汽温度、压力升高最终分解成氨气和二氧化碳, 从而表现出给水、蒸汽氢电导率的异常升高。开展了系列尿素浓度的给水模拟溶液高温分解实验, 结合理论计算分析, 评估了尿素对水汽品质的影响。提出了准确判断尿素是否漏入热力系统的关键技术, 选定氢电导率与脱气氢电导率的差值以及总有机碳作为诊断参数, 并制定了应对措施。

[关键词] 城市中水; 水汽品质; 尿素; 分解规律; 诊断参数

[中图分类号] TM621 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)05-0184-07

Effects of urea leakage into boiler thermodynamic system on steam-water quality and key techniques on diagnose its existence in coal power units

XIONG Yuannan

(Central South Electric Power Test & Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Organic matters existed in urban reclaimed water was decomposed in boiler thermodynamic system which transferred through boiler feed water treatment system, leading to the deterioration of steam-water quality. It was confirmed that urea was organic pollutant of urban reclaimed water by means of technology combining field testing with laboratory detection, and detected in some water tanks of ultrafiltration, reverse osmosis and desalination. The thermal decomposition characteristics of urea solution under steam-water cycles were summarized in this paper. The results showed that the final decomposition products of urea were ammonia gas and carbon dioxide, contributing to water-steam cation conductivity rises. The thermal decomposition tests of simulated feedwater solution with series of urea concentrations were taken, and effects of decomposition of urea on steam-water quality was estimated by theoretical calculation and analysis. The key techniques on diagnose whether urea or not to leak into thermodynamic system was put forward, the difference between degassed and its cation conductivity, total organic carbon was served as diagnose parameter. The corresponding solutions were formulated.

Key words: urban reclaimed water; steam-water quality; urea; decomposition characteristics; diagnose parameter

水资源的时空分布不均和日益紧缺是我国水资源利用研究中关注的焦点, 形势较为严峻, 已成为制约现代化工业高质量发展的关键^[1-2]。火电厂作为工业用水大户, 为积极响应政府节水减排等相关政策, 实现污水的资源化利用, 已逐步采用经过市政处理后的中水作为主要补给水源^[3-4]。但城市中水具有水质波动大、水质复杂等特点, 往往有机物含量较

高, 且可生化性较差, 加上锅炉补给水处理系统对溶解性有机物的去除能力有限, 除盐水中残留的有机物含量显著增加, 易引发机组水汽品质劣化, 造成热力设备的腐蚀、结垢和积盐^[5], 给机组的稳定运行带来安全隐患。近几年, 有机物造成机组水汽品质劣化现象频发, 对水汽系统中有机物含量的要求也日益严格^[6]。

目前,大部分火电厂对水源以及水汽中的有机物浓度并未实行在线监测,往往是事后进行诊断分析,无法做到精准、及时调控水汽参数^[7]。总有机碳(TOC)是日常水质监测的一个重要指标,能够准确地反映水汽系统有机物污染状况,可快速判断水样中有机物含量是否存在异常^[8-9]。有机物一旦进入到热力系统中易分解产生腐蚀性阴离子,且对水汽氢电导率(CC)的贡献较大。阴离子色谱因其选择性好、灵敏度高、精密度高等优势,逐渐成为火电厂水汽系统中痕量阴离子检测分析的重要手段^[10]。城市中水作为锅炉补给水源已是必然趋势,因此进入热力系统中的有机物会越多,水汽中TOC与阴离子含量的监测分析显得尤为重要。本研究针对某电厂机组水汽品质的劣化原因进行分析,查明了有机

物污染源头,同时开展了水汽中有机物分解规律以及对水汽品质影响试验研究,提出了有效的应对措施。

1 水汽品质劣化原因分析

1.1 锅炉补给水系统介绍

某电厂为2×350 MW超临界机组,锅炉主要补给水源为城市中水和循环水排污水,自来水作为临时备用水源。中水(循环水排污水)由缓冲水池经中水提升泵至机械加速澄清池混凝处理后,经变孔隙滤池后进入清水池,通过纤维过滤器、超滤预处理、反渗透预脱盐、阳床、阴床和混床二级除盐系统,制取合格除盐水供给到机组热力系统中。锅炉补给水处理系统的具体工艺流程见图1。

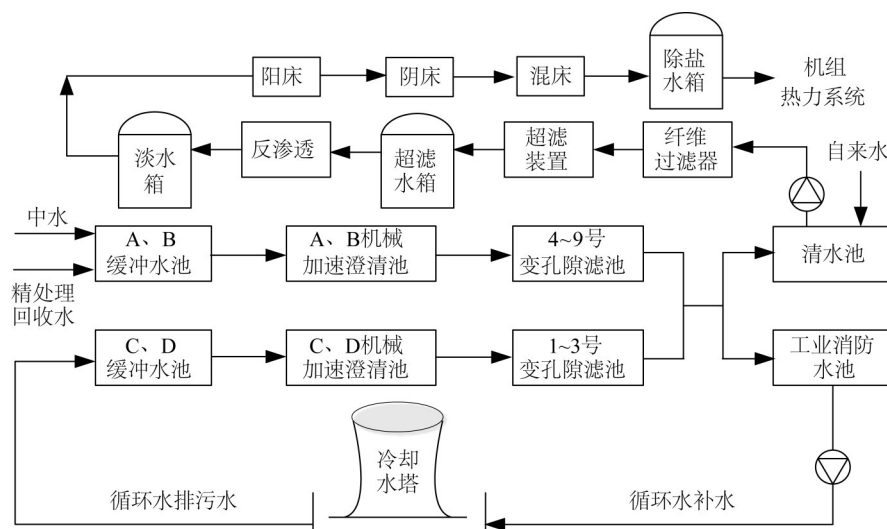


图1 某电厂锅炉补给水处理工艺流程

Fig. 1 Technological processes of boiler feed water treatment system in a power plant

1.2 水源中有机物的迁移规律

进入到机组热力系统中的有机物来源一般包括以下三个方面^[11]:(1)补给水中未能除去的有机物;(2)精处理破碎树脂的漏入;(3)凝汽器的泄漏;其中最主要的方式是通过锅炉补给水带入热力系统中。一般认为,锅炉补给水预处理及除盐系统大概只能去除80%的有机物,但对溶解性有机物的去除率仅为40%~60%左右^[12]。其中,混凝处理主要用来去除原水中悬浮态的有机物;超滤膜能去除相对分子质量大于1 000的有机污染物(腐殖酸),对于小分子的溶解性有机物去除能力很差;反渗透膜在初期能够过滤掉水源中一部分溶解的低分子有机物,但随

着有机物的不断积累,因膜表面与残留的有机物逐渐发生吸附,会导致膜通量大幅降低且几乎不可逆;除盐系统中阴树脂依靠与溶解性有机物之间存在的范德华力而产生吸附去除作用,但吸附到一定程度会导致离子交换性能的恶化。因此,对于水源中的溶解性有机物而言,无论是补给水处理还是除盐系统均不具备完全的净化能力。

除盐水中有机物通过机组补水不断地进入到凝汽器中,由于凝结水温度及压力较低,有机物基本上不会分解。随着水汽温度、压力的升高,会进一步分解成低分子有机酸、CO₂和H₂O^[13-14],且过程会加剧,这对给水、蒸汽CC贡献较大,表现出给水、蒸汽CC急剧上升。由

于蒸汽经汽轮机做功后又回到凝汽器,经抽真空后大部分 CO_2 被去除,因此对凝结水 CC 的影响不大。

1.3 水汽品质劣化分析

自2021年1月以来,1号机组给水、主蒸汽 CC 频

繁出现超标现象(给水最高至 $0.96 \mu\text{S}/\text{cm}$,再热蒸汽最高至 $1.0 \mu\text{S}/\text{cm}$),远超出 GB/T 12145—2016 的规定值^[15],除氧器入口和凝结水 CC 无明显异常,具体变化趋势见图2。

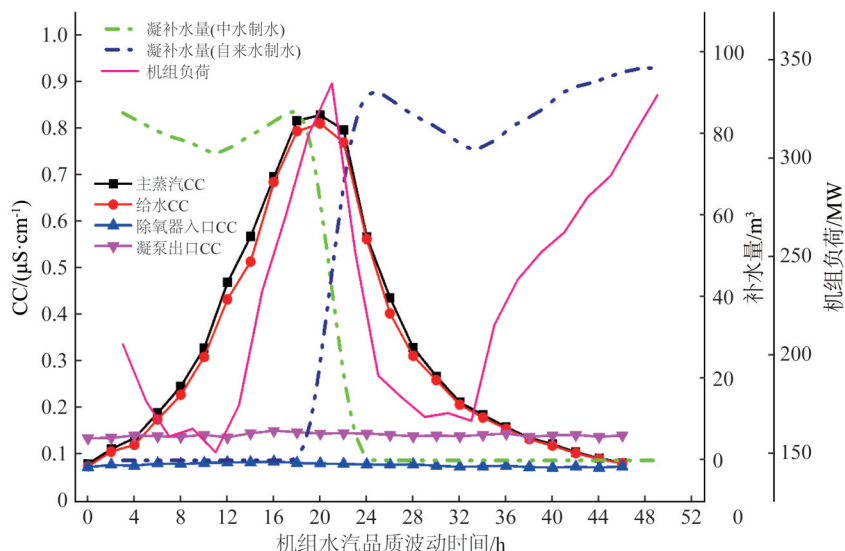


图2 1号机组水汽品质波动与机组补水量、负荷变化的关系

Fig. 2 Relation between fluctuation in steam-water quality and makeup water quantity, load of power unit one

由图2可知,锅炉补给水源采用中水制除盐水时,不断地补入1号机组后,给水和主蒸汽的CC呈现出明显上升且同步的现象,而凝结水和除氧器入口CC未受影响,并不随机组负荷而波动;当水源切换成自来水制水时,发现给水和主蒸汽的CC又同时会下降,这说明中水必然引入了一股污染物,在给水处理环境下发生了完全分解。

为查明水汽品质劣化原因和污染源头,检查了系统设备运行情况,确认水汽取样系统取样管路严密性良好,在线化学仪表显示正确,补给水处理系统、精处理及其再生系统运行无异常;现场采用了脱气氢电导率(degassed cation conductivity, DGCC)仪器对凝结水、给水和蒸汽水样进行了在线检测和对比分析,结果见表1。

表1 1号机组水样DGCC测试值与在线表计显示值

Table 1 Test value of water-steam degassed cation conductivity and displayed value of water-steam conductivity on line chemical instruments in power unit of one $\mu\text{S}/\text{cm}$				
送样时间	水样名称	CC	DGCC	比电导率(SC)
2021年 1月8日	凝结水泵	0.149	0.139	6.019
	除氧器进口	0.093	0.082	5.691
	省煤器进口	0.967	0.091	5.897
	主蒸汽	1.012	0.096	6.021
	再热蒸汽	0.984	0.103	6.135

对补给水处理设备出水、中水和相关水汽进行了取样并进行阴离子色谱和TOC^[16]检测,结果分别见图3、图4。

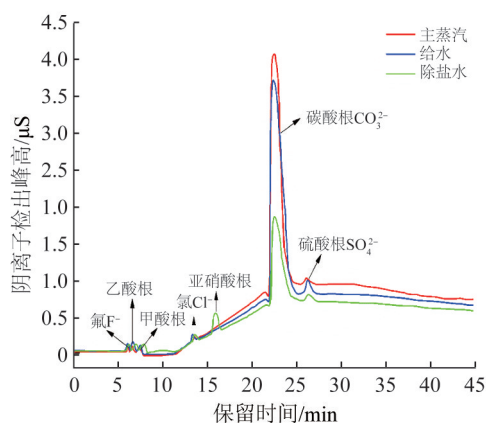


图3 1号机组水汽阴离子色谱分析曲线

Fig. 3 Analysis curve of steam-water anion exchange chromatography of power unit one

由图3可知,1号机组主蒸汽、给水中主要存在 CO_3^{2-} ,其他阴离子含量均低于检出限。表明了某种有机物进入到热力系统,随着水汽温度、压力的升高,分解出的 CO_2 浓度逐渐增加,成为最主要的分解产物。结合表1数据,在水汽劣化期间,给水和主蒸

汽的CC均在 $1.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,但DGCC均在 $0.10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下,从而验证了给水和主蒸汽CC的急剧升高主要是由除盐水携带有机物进入热力系统中分解产生的 CO_2 所致。因此,可认为水汽中 CO_2 浓度较高时,对应水源的TOC含量也较高。

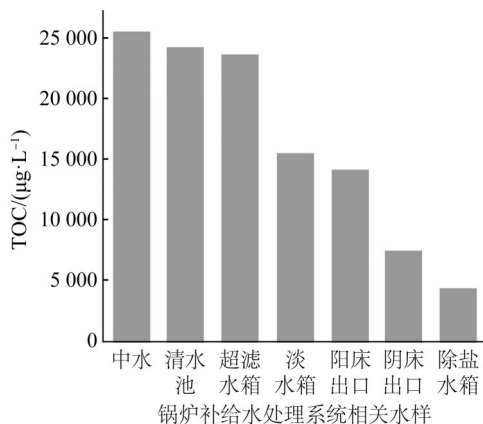


图4 锅炉补给水处理系统设备出水的TOC对比

Fig. 4 TOC content of water yield from boiler feed water treatment equipment

由图4可知,制水系统中对溶解性有机物有去除能力的仅有反渗透(去除率约34.3%)、阴床和混床(总去除率约68.6%),这与上述水源中有机物在锅炉补给水系统中的迁移规律相吻合。加上中水、反渗透和除盐水等水样中检测出尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$,它是一种低分子有机物,进入热力系统中会分解为 NH_3 和 CO_2 ^[18],造成给水、主蒸汽CC异常超标,因此确定尿素为中水的有机物污染源。

依据相关标准^[17]对中水、清水池、超滤和反渗透水箱、除盐水等水样进行了其他成分测定,发现上述水样中均含有尿素,且中水、清水池、超滤和反渗透水箱中尿素质量浓度 $>30 \text{ mg/L}$,除盐水尿素质量浓度约为 5 mg/L 。因电厂采用尿素水解脱硝技术,疏水箱水样未检测出尿素,可排除尿素通过水解系统漏入机组热力系统的可能。

2 尿素漏入对水汽品质的影响

2.1 试验方法与仪器

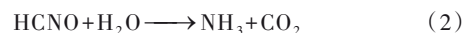
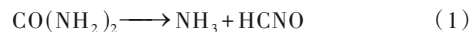
本试验所用的主要试剂为天津市科密欧化学试剂有限公司生产的尿素(纯度99.3%)、氨水(质量分数25%~28%)、硫酸(质量分数98%)、硫酸汞(质量分数99%)和重铬酸钾(纯度99%)等,所有试剂规格均为分析纯,模拟水样统一采用去离子水(25°C 时电阻率 ≥ 18

$\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)配制。采用DIONEX ICS-1100型阴离子色谱分析水样阴离子含量;水样CC先经氢离子交换柱后再通过WTW公司生产的Cond 3310电导率表进行测量;选取ORION STAR A221型便携式pH计直接测定水样的pH;使用岛津仪器(苏州)有限公司生产的TOC测定仪(TOC-LPCH型)检测水样的TOC。依据HJ/T 399—2007标准方法^[19],在水样中加入已知量的重铬酸钾,在硫酸介质中,以硫酸银为催化剂,采用Thermo公司生产CR2200型消解仪对水样进行高温消解,利用岛津仪器(苏州)有限公司生产的紫外分光光度计(UV-2600型)来测定水样的COD。

2.2 尿素对机组给水品质的影响

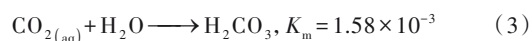
为了考察尿素分解后对机组水汽品质的影响,本研究选取了不同浓度梯度的尿素加入到含有氨的给水模拟溶液中(控制pH为9.2~9.6),尽可能模拟锅炉水冷壁管内封闭的水汽环境,进行高温分解实验6~8 h,冷却至室温后,最后测定水样的pH和CC。

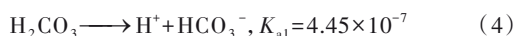
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 易溶于水,水解反应温度一般为 $130\sim 160^\circ\text{C}$,温度越高水解速度越快。其通过凝汽器补水携带进入热力系统水汽环境中会发生循环迁移,由于凝结水泵出口和除氧器入口水温($<130^\circ\text{C}$)较低,基本不会发生水解,且精处理系统不能有效去除尿素。 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在给水系统循环下($160\sim 280^\circ\text{C}$),首先会按照反应式(1)生成 NH_3 和氰酸(HCNO),随反应温度继续升高,最终按照反应(2)发生分解^[20],生成 NH_3 和 CO_2 。 CO_2 溶解于水中生成 H_2CO_3 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ,引起给水和蒸汽CC升高。



一般而言,机组热力系统的水汽较为纯净,几乎不含杂质。据上述反应式, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在含有 NH_3 的纯水溶液中高温分解后可认为是 NH_3 、 CO_2 和 H_2O 的三元体系。因此,本研究将借助Kohlrausch离子独立移动定律、电荷平衡和物料平衡等关系模型来估算 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 分解产生的 CO_2 累积溶入量对给水CC的贡献。式中 λ_{H^+} 、 λ_{OH^-} 、 $\lambda_{\text{HCO}_3^-}$ 和 $\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为无限稀释溶液 H^+ 、 OH^- 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 等离子摩尔电导率,具体推演过程如下:

CO_2 溶于给水中产生的电离平衡以及物料平衡见式(3)~(7)。





$$c_{\text{CO}_2} = c_{\text{H}_2\text{CO}_3} + c_{\text{HCO}_3^-} + c_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (7)$$

由式(3)~(7)可推算出给水中 $c_{\text{HCO}_3^-}$ 、 $c_{\text{H}_2\text{CO}_3}$ 和 $c_{\text{CO}_3^{2-}}$ 与经过氢离子交换柱后给水中 c_{H^+} 的关系,见式(8)~(10),以此推导出给水中溶入 CO_2 浓度与水样中氢离子浓度的定量关系方程[式(11)]。

$$c_{\text{H}_2\text{CO}_3} = c_{\text{CO}_2} / \left(1 + \frac{K_{a1}}{c_{\text{H}^+}} + \frac{K_{a1}K_{a2}}{c_{\text{H}^+}^2} \right) \quad (8)$$

$$c_{\text{HCO}_3^-} = K_{a1} \times c_{\text{CO}_2} / \left\{ \left(1 + \frac{K_{a1}}{c_{\text{H}^+}} + \frac{K_{a1}K_{a2}}{c_{\text{H}^+}^2} \right) \times c_{\text{H}^+} \right\} \quad (9)$$

$$c_{\text{CO}_3^{2-}} = K_{a1}K_{a2} \times c_{\text{CO}_2} / \left\{ \left(1 + \frac{K_{a1}}{c_{\text{H}^+}} + \frac{K_{a1}K_{a2}}{c_{\text{H}^+}^2} \right) \times c_{\text{H}^+}^2 \right\} \quad (10)$$

$$c_{\text{CO}_2} = \frac{c_{\text{H}^+}^2 - K_w}{c_{\text{H}^+}} \times \frac{c_{\text{H}^+}^2 + K_{a1}c_{\text{H}^+} + K_{a1}K_{a2}}{K_{a1} \times (c_{\text{H}^+} + 2K_{a2})} \quad (11)$$

根据电中性原则[式(12)]、Kohlrausch定律[式(13)~(14)]以及物料平衡关系[式(15)~(16)],首先可获得给水中溶入 CO_2 浓度与氢电导率增量 ΔCC 的关系式;再结合化学反应式(1)、(2)可知,1分子的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在给水中高温分解成1分子 CO_2 ,因此尿素在给水中的浓度与其贡献的氢电导率增量变化可描述成如计算模型(17)所示的一元三次方程,其中 A_0 、 B_1 、 B_2 和 B_3 为常量系数。

$$c_{\text{H}^+}^0 + c_{\text{NH}_4^+} = c_{\text{OH}^-} + c_{\text{HCO}_3^-} + 2c_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (12)$$

↓(水样经氢交换柱后)

$$c_{\text{H}^+} = c_{\text{OH}^-} + c_{\text{HCO}_3^-} + 2c_{\text{CO}_3^{2-}}, c_{\text{OH}^-} = \frac{K_w}{c_{\text{H}^+}} \quad (13)$$

$$\text{CC} = \lambda_{\text{H}^+} c_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{OH}^-} c_{\text{OH}^-} + \lambda_{\text{HCO}_3^-} c_{\text{HCO}_3^-} + \lambda_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (14)$$

$$\Delta\text{CC} = \text{CC} - \text{DGCC} = \lambda_{\text{H}^+} c_{\text{H}^+}(\text{CO}_2) + \lambda_{\text{HCO}_3^-} c_{\text{HCO}_3^-} + \lambda_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (15)$$

$$c_{\text{H}^+}(\text{CO}_2) = c_{\text{HCO}_3^-} + 2c_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (16)$$

$$c_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2} = \frac{60}{44} \times c_{\text{CO}_2} \quad (17)$$

$$\Delta\text{CC} = A_0 + B_1 \cdot c_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2} + B_2 \cdot c_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}^2 + B_3 \cdot c_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}^3 \quad (17)$$

采用便携式 pH 计和经氢离子交换柱后电导率仪表对高温分解后的水样进行检测,通过试验模拟和理论分析,验证和评估了尿素在给水环境下分解后对其体系的 CC 和 pH 产生了显著影响,结果分别见图 5、图 6,这与 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 漏入机组热力系统中发

生的水汽品质波动现象也是相吻合的。

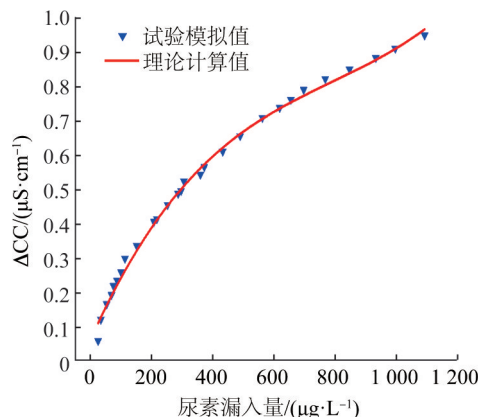


图5 尿素漏入量对CC的影响

Fig. 5 Effect of amount of uera leakage on cation conductivity of feedwater

式(17)定量描述了给水中CC变化值与尿素漏入量的一元三次方程关系,对应的理论计算曲线与实测值也相吻合。由图5可知,随着尿素的不断分解, CO_2 累积溶入量会升高,导致给水体系中 H^+ 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子浓度(给水 pH 控制为 9.2~9.6,水中 CO_2 主要分布形式为 HCO_3^- 和 CO_3^{2-})都升高,对应贡献的 CC 也升高。因此在同一水汽环境下,CC 的增值也就是 CC 与 DGCC 的差值可具体表征 CO_2 的累积溶入量,从而间接反映尿素漏入量对给水 CC 的贡献。

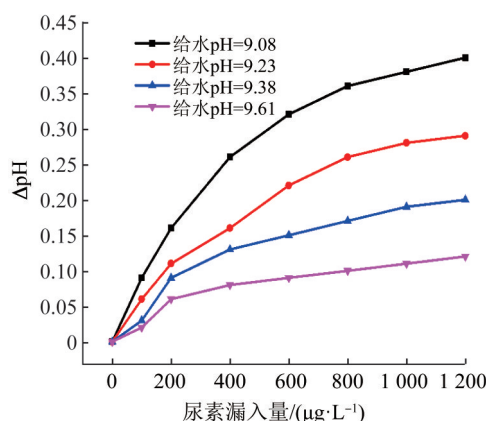


图6 尿素漏入量对给水pH的影响

Fig. 6 Effect of amount of uera leakage on pH of feedwater

由图6可知,给水 pH 会随着尿素漏入量的增加而增加,这主要是因为1分子的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在高温水汽环境下会分解成2分子的 NH_3 和1分子的 CO_2 ,且在给水体系中 CO_2 的溶入有助于促进 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的解离。同时还发现了给水 pH 控制越低时,尿素的漏入量对给水 pH 的影响会更大,增幅会更高。在1号机

组水汽品质劣化阶段,尿素的漏入促使给水 pH 出现一定程度的波动且不易控制。

3 关键诊断技术及措施

3.1 诊断技术及参数选择

在多数机组水汽品质超标案例中,除盐水的有机物污染原因不易发现且诊断处理时间较长。为尽快降低进入水汽系统中有机物的分解对热力设备的腐蚀影响,迅速恢复水汽品质,有必要提出一种针对有机物污染引起水汽品质劣化的快速诊断技术和参数。因此,笔者配制了不同尿素浓度的除盐水溶液,采用了 COD 和 TOC 这两种评价指标来具体反映除盐水中有机物的污染状况,探究 COD 和 TOC 含量与尿素浓度存在的关联,结果见图 7。

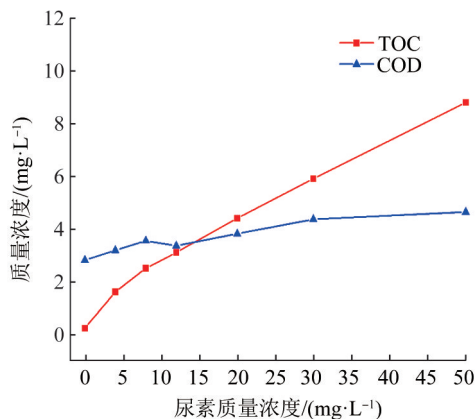


图7 除盐水中尿素含量与有机物污染指标的关联

Fig. 7 Relationship between amount of urea existed in desalted water and corresponding organic pollution index

由图 7 可知,除盐水的尿素质量浓度与其 TOC 基本上呈正相关,与 TOC 的直接测定法及原理一致,因此 TOC 可以直接反映尿素中的碳含量,也可以计算出对水汽氢电导率的贡献值。COD 指标不能真实反映除盐水的尿素含量,这是由于采用标准 HJ/T 399—2007 方法对 COD 测量时,首先会对尿素的水溶液进行高温(160 °C)消解,尿素会发生完全分解,不会与六价铬发生显色反应。因而尿素作为一种特殊的低分子有机物,不能与水体中腐殖酸等传统有机污染物混为一谈。

上述分析可知,借助阴离子色谱曲线可以直接观察测定的水样中是否存在 CO_3^{2-} ,有利于快速查找水汽污染原因和杂质。而 TOC 是直接反映有机物含量的重要指标,补入机组除盐水的 TOC 含量与水汽中 CO_2

含量成正相关。机组热力系统基本上可认为是纯净的封闭体系,且不考虑漏入空气的影响,在式(11)中输入水汽样品中 CC 与 DGCC 的差值,就可以直接计算出尿素的漏入量。因此,可以选择除盐水 TOC 含量、给水中 CC 与 DGCC 的差值这两个关键参数判断热力系统中是否有尿素混入及计算出漏入量。

3.2 应对措施

(1)首先排查水汽取样管路是否严密,在线化学仪表是否显示正确,锅炉补给水处理系统、精处理及再生系统运行有无异常,与凝汽器补水或者疏水回收是否存在关联。

(2)观察水汽品质变化趋势,当水汽 CC 异常超标时,应结合阴离子色谱分析曲线,快速确定污染来源;同时采用脱气氢电导率仪表对在线水样的 CC 和 DGCC 快速进行对比监测,以 CC 与 DGCC 的差值估算水汽样品中的 CO_2 和尿素含量。

(3)电厂采用尿素水解或热解脱硝技术时,须全面排查尿素系统与热力系统相连接的管道设备,确保与热力系统的严密、有效且完全隔离。

(4)一旦确定尿素等低分子有机物从锅炉补给水源漏入时,须立刻切换水源制水,冲洗相应的制水设备及水箱;并对除盐水 TOC 进行监测,严格控制除盐水的 TOC 小于 200 $\mu\text{g/L}$ 。

4 结论

(1)采用了现场试验与室内检测相结合的技术手段,在中水、超滤、反渗透和除盐水箱中均检测出了尿素,结合尿素在锅炉补给水系统的迁移规律,确认尿素经除盐水携带进入水汽系统发生分解是造成 1 号机组水汽品质劣化的根本原因。

(2)模拟配制了含有不同浓度尿素的给水溶液,开展了高温分解试验,总结了尿素在给水环境体系下的分解规律,其最终分解产物为 NH_3 和 CO_2 。结合了理论计算与试验模拟两种方式,验证和评估了尿素漏入对给水氢电导率和 pH 的影响,且理论计算与实际测量值相符合。

(3)除盐水 TOC 含量与水汽系统的有机物含量呈正相关,且 CC 与 DGCC 的差值可估算 CO_2 的累积溶入量,从而间接计算出尿素漏入量对给水 CC 的贡献。二者可作为快速评估和诊断尿素是否漏入机组热力系统的关键参数,并提出了应对措施。

参考文献

- [1] 王熹,王湛,杨文涛,等.中国水资源现状及其未来发展方向展望[J].环境工程,2014,32(7):1-5.
WANG Xi, WANG Zhan, YANG Wentao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 1-5.
- [2] 杨宝红.新形势下火电厂节水减排工作特点及关键[J].热力发电,2016,45(9):95-99.
YANG Baohong. Features and key process of water saving and wastewater discharge reduction in thermal power plants at current situation[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 95-99.
- [3] 毛进,李亚娟,刘亚鹏,等.MBR工艺中膜系统污染与堵塞的研究[J].中国电力,2016,49(1):44-48.
MAO Jin, LI Yajuan, LIU Yapeng, et al. The study of membrane fouling in MBR[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 44-48.
- [4] 杨阳,胡大龙,黄倩,等.火电厂废水排放控制政策法规与技术路线综述[J].中国电力,2020,53(8):131-138.
YANG Yang, HU Dalong, HUANG Qian, et al. Review on policy and technology route of water discharge control in thermal power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 131-138.
- [5] 李春芬,郑镇.锅炉除盐系统中的有机物污染及处理方法[J].中国给水排水,2009,25(4):74-76.
LI Chunfen, ZHENG Zhen. Organic pollution in boiler desalination water system and its treatment method[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(4): 74-76.
- [6] 张燕,侯亚琴,刘国强,等.火电机组水汽系统总有机碳(TOC)检测与规律研究[J].华东电力,2014,42(4):757-760.
ZHANG Yan, HOU Yaqin, LIU Guoqiang, et al. Detection and law of TOC in water and steam system in power plants[J]. East China Electric Power, 2014, 42(4): 757-760.
- [7] 刘玮,齐全友,胡兴,等.16台超超临界机组在线化学仪表运行现状调查和分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1026-1035.
LIU Wei, QI Quanyou, HU Xing, et al. Investigation and research on the operation status of on line chemical instruments for 16 ultra supercritical units[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1026-1035.
- [8] LUUKKONEN T, TOLONEN E T, RUNTTI H, et al. Removal of total organic carbon(TOC) residues from power plant make-up water by activated carbon[J]. Journal of Water Process Engineering, 2014, 3: 46-52.
- [9] 王娜娜,王锋涛,常亮,等.锅炉补给水中典型有机物分解规律及其对低压缸叶片腐蚀特性研究[J].中国腐蚀与防护学报,2017,37(6):597-604.
WANG Nana, WANG Fengtao, CHANG Liang, et al. Decomposition of typical organic substance in water supply of boiler and corrosivity of its decomposition products[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(6): 597-604.
- [10] 慕晓炜,张达光,陈皓,等.离子色谱法测定水汽中有机酸和无机阴离子[J].工业水处理,2019,39(10):100-103.
MU Xiaowei, ZHANG Daguang, CHEN Hao, et al. Determination of organic acids and inorganic anions in the steam by ion chromatography[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(10): 100-103.
- [11] 李海洋,王仁雷,祁东东,等.供热工况下超临界机组水汽氢电导率异常研究分析[J].工业水处理,2020,40(4):113-116.
LI Haiyang, WANG Renlei, QI Dongdong, et al. Study and analysis of supercritical unit's abnormal hydrogen conductivity of water and vapor under heat addition[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(4): 113-116.
- [12] WANG Jinnan, LI Aimin, ZHOU Yang, et al. Study on the influence of humic acid of different molecular weight on basic ion exchange resin's adsorption capacity[J]. Chinese Chemical Letters, 2009, 20(12): 1478-1482.
- [13] 徐洪.给水TOC对蒸汽氢电导率的影响[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):129-136.
XU Hong. Influence of feedwater TOC on steam cation conductivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 129-136.
- [14] 张龙明,侯海军,刘玮,等.某供热机组水汽氢电导率异常波动及超标原因分析[J].工业水处理,2021,41(4):134-138.
ZHANG Longming, HOU Haijun, LIU Wei, et al. Analysis on abnormal fluctuation and over-standard of cation conductivity of water vapor in a heat-supply unit[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 134-138.
- [15] GB/T 24001—2016环境管理体系 要求及使用指南[S].
- [16] 张文耀,田文涛,冶卿,等.总有机碳测定在火电厂水汽品质异常分析中的应用[J].中国电力,2020,53(5):150-154.
ZHANG Wenyao, TIAN Wentao, ZHI Qing, et al. Application of total organic carbon measurements for abnormal WaterSteam quality analysis in thermal power plants[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 150-154.
- [17] GB/T 18204.2—2014公共场所卫生检验方法 第2部分:化学污染物[S].
- [18] 马双忱,孙云雪,赵毅,等.氨水捕集模拟烟气中二氧化碳的实验与理论研究[J].化学学报,2011,69(12):1469-1474.
MA Shuangchen, SUN Yunxue, ZHAO Yi, et al. Experimental and mechanism research on CO₂ capture from simulating flue gas using ammonia solution[J]. Acta Chimica Sinica, 2011, 69(12): 1469-1474.
- [19] HJ/T 399—2007水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法[S].
- [20] 吕洪坤,杨卫娟,周俊虎,等.尿素溶液高温热分解特性的实验研究[J].中国电机工程学报,2010,30(17):35-40.
LÜ Hongkun, YANG Weijuan, ZHOU Junhu, et al. Investigation on thermal decomposition characteristics of urea solution under high temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 35-40.

[作者简介] 熊远南(1992—), 硕士, 工程师。E-mail: xyn07915060@163.com。

[收稿日期] 2022-03-20(修改稿)