

DOI: 10.19666/j.rlfed.202205087

# 超（超）临界机组给水最优运行工况研究

孟龙<sup>1</sup>, 李俊菀<sup>1</sup>, 龙国军<sup>1</sup>, 王亮<sup>2</sup>, 陈俊楠<sup>3</sup>, 赵晓林<sup>2</sup>,  
贾兰<sup>3</sup>, 王宁飞<sup>1</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032;  
2. 安徽华电宿州发电有限公司, 安徽 宿州 234101;  
3. 国能宁东第一发电有限公司, 宁夏 灵武 750408)

**[摘要]** 超（超）临界机组发电效率高，碳排放低，是我国火电机组发展的主力，对其给水运行工况进行优化具有重要指导意义。通过就地取样试验研究了超（超）临界机组不同给水运行工况的最优控制指标，研究了给水取样间集中取样对给水水质的影响，开发了给水运行工况智能化控制系统。结果表明：AVT(O)工况下给水电导率的最优目标值为 6.7  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，OT 工况下给水氧质量浓度的最优目标值为 15  $\mu\text{g}/\text{L}$ ，给水电导率的最优目标值为 3.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；较长的给水取样管路会造成铁腐蚀产物的沉积，干扰对机组腐蚀情况的判断；给水加氧产生的铬酸根离子只与取样管的氧化溶出有关，与水汽系统无关。

**[关键词]** 给水；就地取样；AVT(O)；OT

**[引用本文格式]** 孟龙, 李俊菀, 龙国军, 等. 超（超）临界机组给水最优运行工况研究[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 83-88.  
MENG Long, LI Junwan, LONG Guojun, et al. Research on optimal operation condition of feed water in (ultra) supercritical units[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 83-88.

## Research on optimal operation condition of feed water in (ultra) supercritical units

MENG Long<sup>1</sup>, LI Junwan<sup>1</sup>, LONG Guojun<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>2</sup>, CHEN Junnan<sup>3</sup>, ZHAO Xiaolin<sup>2</sup>,  
JIA Lan<sup>3</sup>, WANG Ningfei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 2. Huadian Suzhou Power Generation Co., Ltd., Suzhou 234101, China;  
3. Guoneng Ningdong No.1 Power Generation Co., Ltd., Lingwu 750408, China)

**Abstract:** With high power generation efficiency and low carbon emission, (ultra) supercritical unit is the main type in China's development of thermal power units. Optimization on feed water operating condition of the (ultra) supercritical unit is of great guiding significance. The optimal control indexes of different feed water operating conditions of (ultra) supercritical units are investigated by in-situ sampling test, and the influence of centralized sampling on feed water quality is researched. Moreover, the intelligent control system for feed water operating condition is developed. The results show that, the optimal target value of feed water conductivity is 6.7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  under AVT(O) condition, the optimal target value of feed water dissolved oxygen is 15  $\mu\text{g}/\text{L}$  and the optimal target value of feed water conductivity is 3.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  under OT condition. Long sampling pipeline of feed water will cause the deposition of iron corrosion products, and interfere with the judgment of unit corrosion. The chromates produced by adding oxygen to feed water is only related to the oxidation of the sampling tube and has nothing to do with the water vapor system.

**Key words:** feed water; in-situ sampling; AVT(O); OT

在“碳达峰”、“碳中和”战略目标的指导下，基于我国能源结构和电源结构的特点，燃煤发电必须坚持走高效低碳之路，提高机组参数，发展超（超）临界机组，这是提高火电厂发电效率，降低

碳排放的重要途径。超（超）临界机组给水处理方式主要有氧化性全挥发处理工况（AVT(O)工况）以及加氧处理工况（OT 工况），给水处理方式不佳会发生给水系统流动加速腐蚀速率高，水汽系统结垢

收稿日期: 2022-05-12 网络首发日期: 2022-10-06

第一作者简介: 孟龙(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电厂腐蚀与防护技术, menglong@tpri.com.cn.

速率高,精处理混床氢型运行周期短等不利于机组安全、经济运行的问题<sup>[1-4]</sup>。国家和行业标准更多考虑给水控制指标的广泛适用性以保证水汽监督的合格。如《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)<sup>[5]</sup>及《火电厂汽水化学导则第4部分:锅炉给水处理》(DL/T 805.4—2016)<sup>[6]</sup>规定:AVT(O)工况下给水 pH 值控制范围在 9.2~9.6,OT 工况下给水溶解氧控制范围在 10~150 μg/L,给水 pH 值控制范围在 8.5~9.3,相关控制指标仍存在极大的优化空间。

对 10 余个电厂的调研结果表明:多数电厂在 AVT(O)工况下给水铁质量浓度小于 3 μg/L,满足 GB/T 12145—2016 规定的期望值;然而割管检查的结果却显示,锅炉结垢速率高,多数水冷壁管结垢速率在二类水平,个别甚至达到三类水平。相关研究表明,以上异常现象可能是较长且布置复杂的取样管路导致腐蚀产物沉积,干扰机组腐蚀产物检测结果引起的<sup>[7]</sup>,因此给水最优运行工况的研究必须排除较长取样管路的影响。

鉴于上述问题,本文提出通过就地取样方式排除较长取样管路的影响,根据就地取样试验的结果得到不同给水运行工况的最优控制指标,使机组化学运行工况保持在最佳状态,提高化学运行的可靠性。

## 1 给水最优运行工况研究

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 给水就地取样

为获得能够指导现场运行的给水控制指标,首次在国内某电厂选取 1 台超临界 600 MW 机组进行改变给水运行工况的就地取样试验。试验前在锅炉的省煤器入口加装给水就地取样点,就地取样点由原给水取样管就地隔离门后焊接三通引出,同时焊接就地取样一、二次阀,在就地取样二次阀后连接就地减温减压装置。30 MPa、280 °C 的给水水样经过就地减温减压装置后达到手工取样、测量的压力和温度,给水就地取样点及减温减压装置如图 1 所示。

#### 1.1.2 给水铁质量浓度检测

给水腐蚀产物中铁质量浓度是衡量不同工况下给水控制指标优劣的标准。为得到相对准确和稳定的给水铁质量浓度,排除水样波动的影响,应对水样进行过滤并检测过滤时间段内水样中铁质量浓度的平均值。试验使用配有 0.45 μm 微孔滤膜的平板过滤器对 10 L 的水样进行过滤,用滤膜滤出悬

浮铁,用 HNO<sub>3</sub> 溶解滤膜上的悬浮铁,使用岛津 ASC-7000 原子吸收仪测出悬浮铁总量并换算至单位体积水样中的悬浮铁质量浓度,同时测量滤液中的离子铁质量浓度。水样铁质量浓度等于悬浮铁与离子铁质量浓度之和<sup>[8]</sup>。



图 1 给水就地取样点及就地减温减压装置  
Fig.1 The local sampling point of feed water and local temperature and pressure reducing device

### 1.2 研究结果及分析

#### 1.2.1 AVT(O)工况最优加氨量

AVT(O)工况是超(超)临界机组普遍采用的给水处理工况,该工况下给水只加氨。对于纯净的除盐水加氨,  $\text{pH} \approx 8.57 + \lg \text{SC}^{[9]}$ 。试验控制 AVT(O)工况下给水的电导率目标值分别为 9.0、7.0、6.0、5.0、3.0 μS/cm,对应的 pH 值分为 9.52、9.42、9.35、9.27、9.05。每个控制指标维持 3 天,第 1 天为工况转换,不进行取样,第 2 天和第 3 天每天进行 2 次取样检测。取每个目标值下电导率和铁质量浓度实测值的平均值作图,不同给水电导率情况下的就地铁质量浓度及其拟合曲线如图 2 所示(铁质量浓度误差在拟合值的 ±0.15 μg/L 以内)。

由图 2 可见,AVT(O)工况下在给水电导率变化范围 3.0~9.0 μS/cm 内,给水就地取样点铁质量浓度与给水电导率呈线性关系(相关系数  $R^2=0.99$ ),由拟合结果可得

$$c_{\text{Fe}} = -0.34k + 4.25 \quad (1)$$

式中:  $c_{\text{Fe}}$  为给水就地取样点铁质量浓度, μg/L;  $k$  为给水电导率, μS/cm。

AVT(O)工况下给水只加氨,高纯水加氨条件下根据氨水的电离平衡方程以及电导率和离子浓度的对应关系可得到

$$c_{\text{NH}_3} = (7.71k^2 + 36.85k) \times 10^{-7} \quad (2)$$

式中:  $c_{\text{NH}_3}$  为给水氨浓度, mol/L。

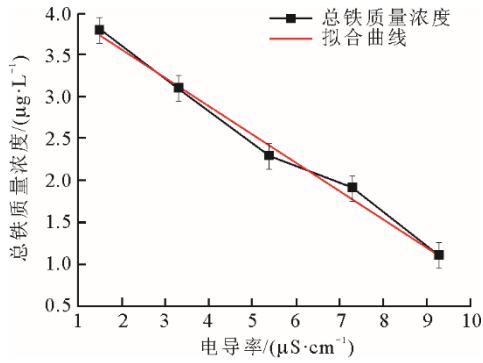


图 2 AVT(O)工况不同给水电导率就地铁质量浓度及其拟合曲线

Fig.2 The local iron mass concentration and its fitting curve under AVT(O) condition with different electrical conductivities of feed water

给水系统的腐蚀结垢速率与给水铁质量浓度正相关，由式(1)可知给水电导率越高，给水铁质量浓度越小。然而，给水电导率越高，凝结水精处理混床的周期制水量越短，混床再生次数越多，相应的精处理再生酸、碱消耗量，再生除盐水消耗量以及运行再生工作量等将显著增加<sup>[10]</sup>。因此，降低给水铁质量浓度应当以不显著增加凝结水精处理运行负担和保障精处理再生为前提。由于电厂高速混床氢型运行的失效原因为置换铵根离子导致的阳树脂失效，根据混床的失效关系可得：

$$n = (q_v \times t \times c_{\text{NH}_3}) / (V_R \times E_R) \quad (3)$$

式中： $n$  为混床的年再生次数； $q_v$  为每小时凝结水最大流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $t$  为机组年利用小时数， $\text{h}$ ； $c_{\text{NH}_3}$  为给水氨浓度， $\text{mol/L}$ ； $V_R$  为阳树脂体积， $\text{m}^3$ ； $E_R$  为阳树脂工作交换浓度， $\text{mol/L}$ <sup>[11]</sup>。

该电厂满负荷工况下凝结水流量为  $1\,330\text{ m}^3/\text{h}$ ，满负荷工况下机组年利用小时数约  $5\,000\text{ h}$ ，混床的阳树脂体积为  $3\text{ m}^3$ ，阳树脂的工作交换浓度为  $1.2\text{ mol/L}$ 。GB/T 12145—2016 规定，超临界机组 AVT(O)工况下给水铁质量浓度期望值为  $\leq 3\text{ }\mu\text{g/L}$ 。为了进一步降低给水系统的腐蚀、结垢速率，本文将给水铁质量浓度最低目标值设定为  $2\text{ }\mu\text{g/L}$ ，由式(1)一式(3)可知，给水电导率应达到  $6.7\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，单台机组精处理混床年再生次数为  $110$  次，通常 2 台机组共用 1 套精处理再生系统，则 2 台机组年再生次数为  $220$  次，平均 3 天再生 2 次混床；如果将给水铁质量浓度最低目标值设定为  $1\text{ }\mu\text{g/L}$ ，则给水电导率应达到  $9.6\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，单台机组精处理混床年再生次数为  $198$  次，2 台机组年再生次数为  $396$  次，平均每天需要再生 1 台以上的混床，其混床再生频率为铁质量浓度目标值  $2\text{ }\mu\text{g/L}$  时的 1.8 倍。考虑混

床再生时间长，不同混床失效往往相对集中等问题，如此频繁的再生无法保证混床的氢型运行，而且会显著增加混床再生运行工作量，精处理再生的酸、碱及除盐水费用将显著提高，混床运行经济性差。同时，频繁的投运新混床不利于机组水质的稳定，导致机组腐蚀、结垢速率反而会上升。

综上，在综合考虑降低给水铁质量浓度并延长精处理运行周期的情况下，AVT(O)工况下给水电导率的最优目标值设为  $6.7\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，对应的给水 pH 值为  $9.4$ 。

### 1.2.2 OT 工况最优加氧量

超（超）临界机组采用 OT 工况能有效抑制水汽系统的流动加速腐蚀。多数超（超）临界机组在水质稳定后对给水进行加氧处理，相关研究表明蒸汽中的氧能够促进蒸汽管道  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  氧化层的生成<sup>[12]</sup>，加速某些奥氏体钢蒸汽管道内部氧化层的破裂和剥落<sup>[13-14]</sup>，氧化皮大量剥落导致的过热器和再热器堵管、爆管问题是许多电厂加氧处理最大的顾虑。因此，目前给水普遍采用低氧处理，控制给水氧质量浓度小于  $30\text{ }\mu\text{g/L}$ <sup>[15]</sup>。试验控制 OT 工况下给水电导率为  $3.5\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，对应的 pH 值为  $9.11$ ，控制给水氧质量浓度目标值分别为  $7$ 、 $10$ 、 $15$ 、 $20$ 、 $25$ 、 $30\text{ }\mu\text{g/L}$ 。每个控制指标维持 3 天，第 1 天为工况转换，不进行取样，第 2 天和第 3 天每天进行 2 次取样检测。取每个目标值下氧质量浓度和铁质量浓度实测值的平均值作图，不同给水氧质量浓度情况下就地铁质量浓度及其拟合曲线如图 3 所示（铁质量浓度误差在拟合值的  $\pm 0.05\text{ }\mu\text{g/L}$  以内）。

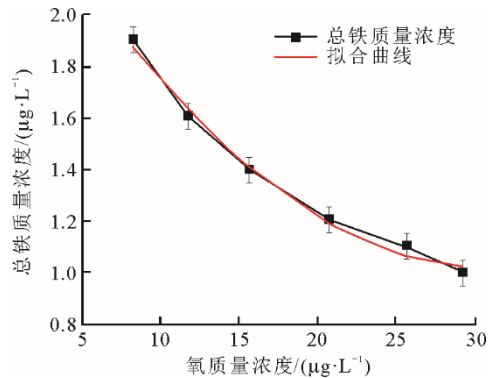


图 3 OT 工况不同给水氧质量浓度的就地铁质量浓度及其拟合曲线

Fig.3 The local iron mass concentration and its fitting curve under OT condition with different oxygen mass concentrations of feed water

由图 3 可见：OT 工况下在给水电导率为  $3.5\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，给水氧质量浓度变化范围为  $7\sim 30\text{ }\mu\text{g/L}$  时，给水就

地取样点铁质量浓度与给水氧质量浓度呈二次曲线关系 (相关系数  $R^2=0.99$ )。由拟合结果可得:

$$C_{Fe} = 2.6154 - 0.1028D_O + 0.0017D_O^2 \quad (4)$$

式中:  $C_{Fe}$  为给水就地取样点铁质量浓度,  $\mu\text{g/L}$ ;  $D_O$  为给水氧质量浓度,  $\mu\text{g/L}$ 。

试验期间监测就地取样点给水和水汽取样间主蒸汽的溶解氧质量浓度数据和给水及主蒸汽氧质量浓度变化曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 当就地取样点的给水氧质量浓度大于  $20 \mu\text{g/L}$  时, 取样间的主蒸汽氧质量浓度大于  $3 \mu\text{g/L}$ , 随着给水氧质量浓度的进一步升高, 主蒸汽的氧质量浓度呈现同样的升高趋势, 这表明当给水氧质量浓度大于  $20 \mu\text{g/L}$  时过量的溶解氧会进入蒸汽系统, 因此给水氧质量浓度不应超过  $20 \mu\text{g/L}$ 。加氧工况下应进一步降低给水系统铁质量浓度, 本文将给水铁质量浓度最低目标值设定为  $1.5 \mu\text{g/L}$ , 由式(4)可知, 给水氧质量浓度应达到  $14.2 \mu\text{g/L}$ 。

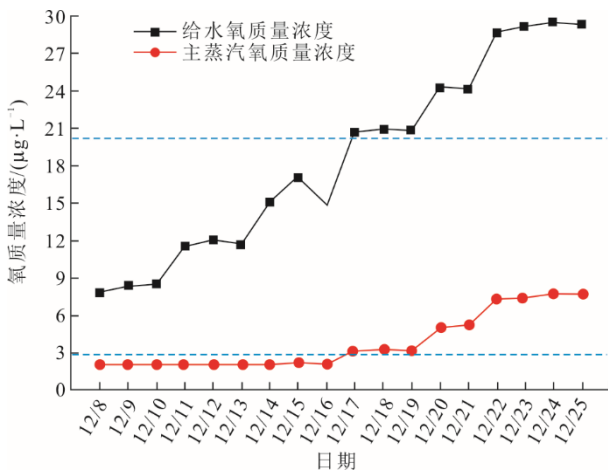


图 4 OT 工况给水及主蒸汽氧质量浓度变化曲线

Fig.4 Change curves of oxygen mass concentration in the feed water and main steam under OT condition

综上, 考虑配备自动加氧设备后给水氧质量浓度的最大波动在  $\pm 5 \mu\text{g/L}$ , 在确保给水氧质量浓度不超过  $20 \mu\text{g/L}$  的前提下应尽量提高氧质量浓度的目标值, OT 工况下给水氧质量浓度的最优目标值设定为  $15 \mu\text{g/L}$ 。

### 1.2.3 OT 工况最优加氧量

超(超)临界机组采用 OT 工况后给水系统的防腐主要依靠  $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{Fe}_2\text{O}_3$  双层钝化膜, 可以大幅降低给水系统的加氧量<sup>[16]</sup>。然而, 加氧量降低后的最佳值, 以及降低加氧量是否会影响加氧运行效果, 需要进行 OT 工况下最优加氧量试验得到。试验控制 OT 工况下给水氧质量浓度为最优指标  $15 \mu\text{g/L}$ , 控制

给水电导率目标值分别为  $4.0、3.5、2.5、1.5、1.0 \mu\text{S/cm}$ 。每个控制指标维持 3 天, 第 1 天为工况转换, 不进行取样, 第 2 天和第 3 天每天进行 2 次取样检测。取每个目标值下给水电导率和铁质量浓度实测值的平均值作图, 结果如图 5 所示。

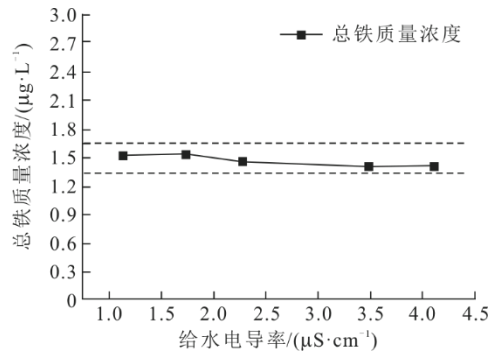


图 5 OT 工况不同给水电导率就地铁质量浓度

Fig.5 The local iron mass concentration under OT condition with different electrical conductivities of feed water

由图 5 可以看出, 控制给水氧质量浓度为最优指标  $15 \mu\text{g/L}$ , 当给水电导率在  $1.0\sim 4.0 \mu\text{S/cm}$  范围变化时, 给水铁质量浓度在  $1.5\pm 0.15 \mu\text{g/L}$  范围内变化, 这说明 OT 工况下给水电导率对给水铁质量浓度几乎没有影响。然而 GB/T 12145—2016 规定 OT 工况下当给水氧质量浓度接近下限  $10 \mu\text{g/L}$  时, pH 值应大于 9.0, 这主要是从两方面进行考虑: 1) 给水加氧处理时给水的氧质量浓度并不是一直稳定的, 有些电厂的给水氧质量浓度波动范围达到  $\pm 10 \mu\text{g/L}$ , 这会导致给水氧质量浓度低于  $10 \mu\text{g/L}$ , 此时给水需要通过加入一定的氨进行防腐; 2) 给水的水质会发生变化, 当给水水质变差时, 氧气会失去其钝化碳钢管道的作用, 变为阴极的去极化剂发生吸氧反应, 促进碳钢管道的腐蚀, 此时保持一定浓度的氨会起到防腐的作用。

综上, OT 工况下加氨量的改变对铁质量浓度的变化几乎没有影响, 在考虑安全性的前提下, OT 工况给水电导率的最优目标值设为  $3.0 \mu\text{S/cm}$ , 对应的给水 pH 值为 9.05。

## 2 取样方式及运行工况对给水水质的影响

### 2.1 取样方式对给水水质的影响

相关研究表明, 腐蚀产物铁容易在取样管路中沉积, 取样间测得的铁质量浓度往往低于实际水平<sup>[8]</sup>。给水不同运行工况下对比就地取样点及取样间的铁质量浓度数据如图 6 所示。

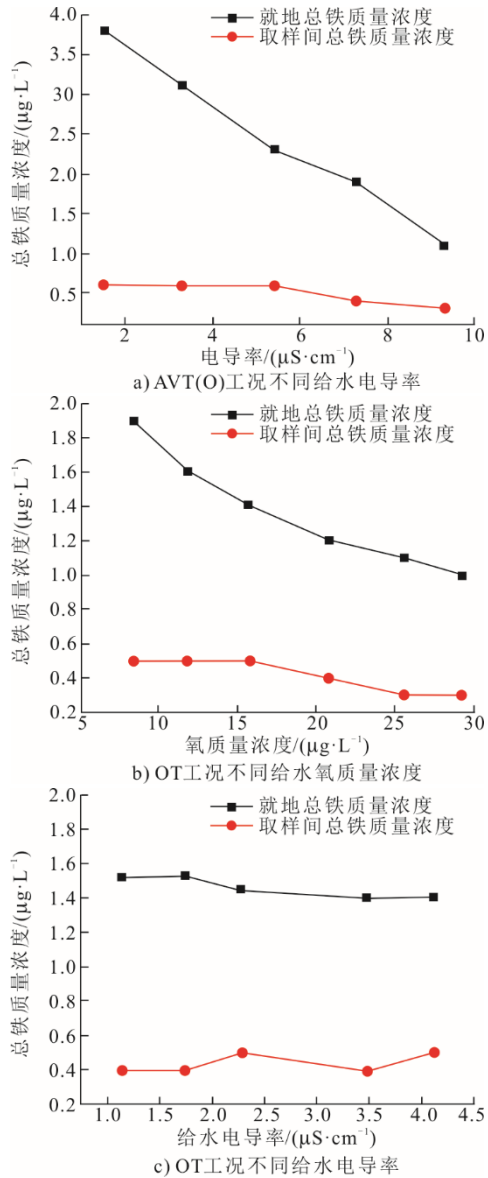


图 6 给水不同运行工况下就地和取样间铁质量浓度对比  
**Fig.6 Comparison of iron mass concentration between samples in local and sampling room of feed water under different operating conditions**

由图 6 可以看出：给水不同运行工况下水汽取样间的总铁质量浓度始终低于就地取样点的总铁质量浓度；当工况发生改变的时候，取样间的总铁质量浓度基本不变，始终维持在较低水平。这说明较长的给水取样管路会造成铁腐蚀产物的沉积，当给水取样流量偏小时这种沉积现象更加显著，这会导致取样间集中取样的铁质量浓度始终维持在较低水平，干扰对机组腐蚀情况的判断。运行中提高取样流量可在一定程度上抵消沉积的影响。

**2.2 OT 工况取样方式对给水水质的影响**

相关研究表明，某些机组在加氧运行期间给水的氢电导率会明显升高，而机组其他取样点的氢电导率却没有明显变化。产生这种现象的原因可能与不锈钢取样管在加氧过程中溶出铬酸根离子有关<sup>[17]</sup>。本文试验对比了就地取样点和取样间的水质差异。OT 工况不同给水加氧量试验时分别取就地取样点及取样间的水样，使用戴安 ICS-2000 离子色谱仪化验水中阴离子质量浓度，结果见表 1。

由表 1 可以看出：在 OT 工况下，给水就地取样点的水质良好，给水氢电导率满足 GB/T 12145—2016<sup>[5]</sup>的期望值，各阴离子质量浓度皆低于检测限；而给水取样间的氢电导率高于 GB/T 12145—2016 的期望值，甚至高于标准值。给水取样间测得的铬酸根离子明显升高，其他阴离子仍低于检测限，同时铬酸根的质量浓度随着给水氧质量浓度的增加而增加。这说明给水加氧产生的铬酸根离子只与取样管的氧化溶出有关，与水汽系统无关。不能因个别取样点的铬酸根离子偏高，而简单认为其来自水汽系统中含铬材料的腐蚀。

表 1 OT 工况下不同给水氧质量浓度的就地取样点及取样间阴离子质量浓度

**Tab.1 Comparison of the anionic ion mass concentrations between samples in local and sampling room of feed water with different oxygen mass concentrations under OT condition**

位置	DO/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	k/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	F/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Cl <sup>-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	HCOO <sup>-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NO <sub>3</sub> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NO <sub>2</sub> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
就地	8.5	0.064	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.4
取样间	7.8	0.083	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	8.0
就地	11.8	0.062	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.4
取样间	10.9	0.088	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	11.8
就地	15.7	0.063	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.4
取样间	15.0	0.097	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	13.6
就地	20.8	0.064	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.4
取样间	20.2	0.104	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	15.2
就地	25.7	0.064	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.4
取样间	25.2	0.111	<0.1	<0.1	<0.2	<0.3	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	16.7

### 3 结 论

1) 某超(超)临界 600 MW 机组 AVT(O)工况下给水电导率的最优目标值为  $6.7 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 对应的给水 pH 值为 9.4。OT 工况下给水氧质量浓度的最优目标值为  $15 \mu\text{g}/\text{L}$ , 给水电导率的最优目标值为  $3.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 对应的给水 pH 值为 9.05。相关控制指标对超(超)临界机组的优化运行具有重要指导意义。

2) 较长的给水取样管路会造成铁腐蚀产物的沉积, 导致取样间集中取样的铁质量浓度始终维持在较低水平, 干扰对机组腐蚀情况的判断。运行中提高取样流量可在一定程度上抵消该影响。

3) 给水加氧产生的铬酸根离子只与取样管的氧化溶出有关, 与水汽系统无关。个别取样点的铬酸根偏高不能代表水汽系统含铬材料发生腐蚀。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈裕忠, 黄万启, 卢怀钊, 等. 1 000 MW 超超临界机组长周期给水加氧实践效果分析与评价[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 43-51.  
CHEN Yuzhong, HUANG Wanqi, LU Huaidian, et al. Analysis and assessment on effect of long-term oxygenated treatment for 1 000 MW ultra supercritical units[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 43-51.
- [2] HUBBARD D, BECK M, MCCORMACK S, et al. Continuous fossil plant corrosion product transport monitoring and corrosion control optimization[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2012: 12.
- [3] MATHEWS J. Interim guidance-amine treatments in fossil power plants[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2010: 4.
- [4] 刘祥亮, 王宁, 周臣, 等. 某超临界机组给水 AVT 与 FPOT 技术对比[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 8-14.  
LIU Xiangliang, WANG Ning, ZHOU Chen, et al. Comparison of AVT and FPOT technology for feed water of a supercritical unit[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 8-14.
- [5] 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量: GB/T 12145—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 1.  
Steam quality of thermal power sets and steam power equipment: GB/T 12145—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 1.
- [6] 火电厂汽水化学导则 第 4 部分: 锅炉给水处理: DL/T 805.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1.  
Guidelines for steam-water chemistry in thermal power plants: Part 4: boiler feed water treatment: DL/T 805.4—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1.
- [7] 李琼. 超(超)临界机组汽水系统腐蚀产物等状态监测技术的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 1.  
LI Qiong. Study on state monitoring technology for corrosion products of ultra supercritical units steam-water system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [8] 孟龙, 贾兰, 张文帅, 等. 超(超)临界机组高压加热器疏水加氧处理的研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 172-178.  
MENG Long, JIA Lan, ZHANG Wenshuai, et al. Research on high pressure heater drainage oxygenated treatment of ultra supercritical units[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 172-178.
- [9] 刘伟, 顾雷. 发电厂在线 pH 表准确度的一种检验方法[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(1): 45-48.  
LIU Wei, GU Lei. A test method for the power plant online pH meter accuracy[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(1): 45-48.
- [10] 翟雅. 高参数机组凝结水精处理系统运行工况优化试验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013: 1.  
ZHAI Ya. Experimental study on operation Condition optimization of condensate refined treatment system of high parameter unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013: 1.
- [11] 火电厂凝结水精处理系统技术要求 第 1 部分: 湿冷机组: DL/T 333.1—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 1.  
Technique requirements of condensate polishing in thermal power plant-part 1: water-cooled unit: DL/T 333.1—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 1.
- [12] 朱志平, 柳森, 郑敏聪. 外加加氧对锅炉过热器管内氧化皮生长及剥落的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(5): 12-18.  
ZHU Zhiping, LIU Sen, ZHENG Mincong. Effect of dissolved oxygen on the growth and spalling of oxide skin in superheater tube of boiler[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(5): 12-18.
- [13] 曹杰玉, 贾建民, 刘锋, 等. 给水加氧处理对氧化皮脱落的影响研究[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 56-60.  
CAO Jieyu, JIA Jianmin, LIU Feng, et al. Effect of oxygenated treatment on oxide scale exfoliation[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 56-60.
- [14] 张广文, 孙本达, 张金升, 等. 给水加氧处理对过热器高温氧化皮生成影响的试验研究[J]. 热力发电, 2012, 41(1): 31-33.  
ZHANG Guangwen, SUN Benda, ZHANG Jinsheng, et al. Influence of adding oxygen into feed-water treatment upon high-temperature oxide skin formed in the superheater[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(1): 31-33.
- [15] 李俊菀, 曹杰玉, 刘玮, 等. 改进型低氧处理精确加氧技术在超超临界机组中的应用[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 149-152.  
LI Junwan, CAO Jieyu, LIU Wei, et al. Application of Improved oxygenated treatment on ultra-supercritical unit with precise low oxygen content dosing technology[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 149-152.
- [16] 卫翔, 任全在, 卫喆, 等. FPOT 技术在 660 MW 超超临界机组中的应用[J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 104-110.  
WEI Xiang, REN Quanzai, WEI Zhe, et al. Application of FPOT technology in 660 MW ultra supercritical unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 104-110.
- [17] 李志刚, 沈保中, 黄万启. 锅炉给水加氧转换期间铬酸根离子释放研究[J]. 热力发电, 2012, 41(2): 47-52.  
LI Zhigang, SHEN Baozhong, HUANG Wanqi. Study on chromate ion release during boiler feed water oxygenation conversion[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(2): 47-52.

(责任编辑 杨嘉蕾)