

# 超临界机组给水加氧处理技术探讨

肖建群, 李元

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]为有效解决超临界机组热力系统流动加速腐蚀、锅炉结垢速率偏高等问题,需对给水进行处理。[方法]目前给水处理有三种方式:还原性全挥发处理、弱氧化性全挥发处理以及加氧处理。[结果]给水加氧处理后改变了锅炉受热面氧化膜的形态,可适当减少加氨量,有利于提高精处理混床出水水质和延长混床再生周期,对超临界直流炉而言,蒸汽溶解盐类也降低,汽轮机中、低压缸的腐蚀和结盐状态得到进一步改善。[结论]目前给水加氧处理是超临界机组不一而足的选择。

**关键词:** 给水加氧处理; 超临界机组; 直流炉; 流动加速腐蚀; 锅炉结垢速率高

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0010-06

## Discussion on Oxygenated Treatment Technology for Supercritical Unit Feed Water

XIAO Jianqun, LI Yuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to effectively solve the problem of flow-accelerated corrosion in the thermal system and high scaling rate of boiler of supercritical unit, the feed water needs to be treated. [Method] At present, there were three kinds of water treatment: reducing total volatilization treatment, weak oxidation total volatilization treatment and oxygenated treatment. [Result] After the oxygenated treatment of feed water, the shape of the oxidation film on the heating surface of the boiler is changed, and the amount of ammonia can be appropriately reduced, which is beneficial to improve the quality of mixed bed effusive water. For the supercritical DC furnace, the dissolved salts of steam are also reduced, and the corrosion and salt formation of the medium and low pressure cylinders of steam turbines are further improved. [Conclusion] At present, feed water with oxygen treatment is the best choice for supercritical unit.

**Key words:** feed water with oxygenated treatment; supercritical unit; DC furnace; flow-accelerated corrosion; high scaling rate of boiler

为有效解决超临界机组热力系统一般性腐蚀和流动加速腐蚀,防止锅炉结垢和汽轮机积盐,需要对给水进行处理。如果给水不经过任何处理,大部分金属腐蚀产物和盐分会通过给水进入锅炉和热力系统,且容易沉积在热负荷较高的部位,影响水汽品质和热传导,轻则增加锅炉酸洗的频率,重则导致锅炉爆管<sup>[1-2]</sup>。

目前,锅炉给水处理方式有三种:加氨、加还

原剂还原性全挥发处理,简称AVT(R);只加氨的氧化性全挥发处理,简称AVT(O);以及加氧处理,简称OT。目前这三种给水处理方式以及水质标准已经列入我国电力行业标准DL/T 805.4—2016中<sup>[3]</sup>。在进行设计时,可根据机组的炉型材料及给水的纯度选择合适的给水处理方式。

氧在水中具有双重性,在较差的给水水质条件下,氧会加速金属表面的腐蚀;氧在纯度高的给水中又可以在金属表面形成一层致密的保护膜而抑制金属进一步腐蚀。随着超临界机组的水质控制的水平逐渐提升,超临界机组给水加氧不仅可以降低锅炉结垢率,还可以大幅度地减少锅炉酸洗周期,同时减少有毒化学药剂(如联氨)的使用量,有利于保

护环境和节省运行成本。

## 1 给水加氧技术

### 1.1 加氧技术原理

如前所述, 氧在非纯水中能起到去极化剂的作用, 可加速给水系统的电化学腐蚀。但在高纯水 ( $DD_H < 0.15 \sim 0.2 \mu S/cm$ ) 的 Fe-H<sub>2</sub>O 体系中, 铁的电化学特性比非纯水系统弱的多, 水质越纯, 电化学性能越弱, 而氧化物对金属表面的钝化作用越明显。从 Fe-H<sub>2</sub>O 体系的电位 -pH 图中可以看出 (如图 1 所示), 当 pH = 7 时, Fe 的电极电位在 -0.5 V 左右, 处于腐蚀区。如在高纯水中加入氧, 使 Fe 的电位升到 0.3 ~ 0.4 V 时, 就会进入钝化区, Fe 可以钝化<sup>[4]</sup>。

加快 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 氧化膜的生成速度, 还能在 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜的间隙和表面生成形态更稳定的 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这样, 在 OT 工况下, 碳钢表面形成的氧化膜具有双层结构, 一层是紧贴在钢表面的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 内伸层, 另一层是外表面含尖晶石型的氧化物层 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)。氧的存在不仅加快了内伸层的形成速度, 而且在 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 层和水相界面处又生成了一层 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层, 使 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 晶粒间的间隙和沟槽得以封闭, 而且 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶解度比 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 低的多, 所以形成的双层保护层更致密、稳定。而且, 当出现局部空隙和裂痕的时候, 水中的氧化剂能迅速通过上述反应对保护膜进行修复<sup>[5]</sup>。采用 AVT(O) 和 OT 处理方式氧化物保护层结构图如图 2 ~ 图 3 所示, 采用 AVT(O) 和 OT 处理方式氧化物保护层微观对比图如图 4 所示。

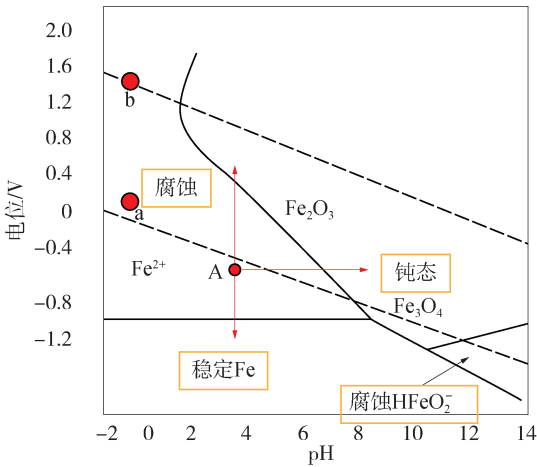
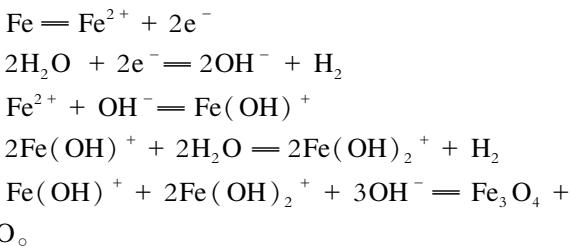


图 1 铁水体系电位 - pH 图

Fig. 1 Potential - pH diagram of Fe-H<sub>2</sub>O system

当水中含有微量氧的情况下, 碳钢腐蚀产物中的 Fe<sup>2+</sup> 会和水中的氧反应形成 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 氧化膜。但是, 这样产水的氧化膜中 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 晶粒间的间隙较大, 水可以通过这些间隙渗入到里层而引起腐蚀, 所以这种情况下的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 氧化膜保护效果较差, 不能抑制 Fe<sup>2+</sup> 从钢材基体溶出, 其氧化物保护层形成的反应如下:



如果向高纯水中加入适量的氧化剂, 不仅可以

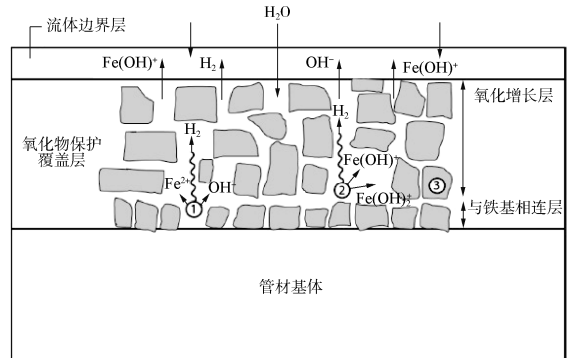


图 2 采用 AVT 处理方式氧化物保护层的结构图

Fig. 2 Structure of oxide protection layer by AVT Treatment

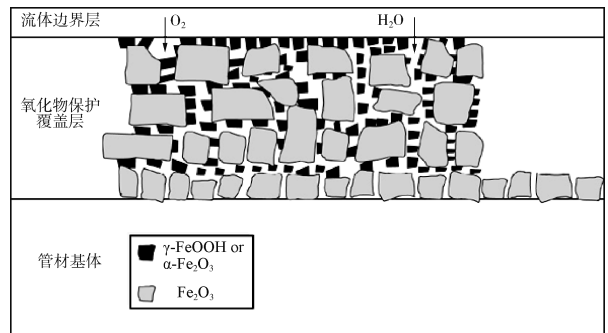


图 3 采用 OT 处理方式氧化物保护层的结构图

Fig. 3 Structure of oxide protection layer by OT Treatment

从图 4 的对比可以发现, 采用 OT 处理方式后, 钢表面生成了致密稳定的保护层, 该膜具有很低的溶解度, 可有效地降低钢结构的腐蚀速率。

### 1.2 给水加氧技术在国内外的应用情况

OT 最初于上世纪 70 年代由原西德研究开发的一种给水处理技术, 随后在前苏联、美国、日本、

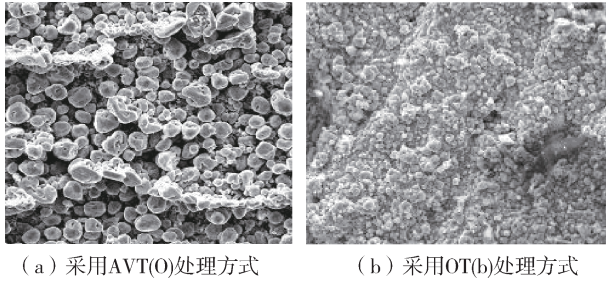


图4 氧化物保护层微观图

Fig. 4 Microstructure of oxide protection layer

丹麦等国家均得到广泛应用。80年代末,我国开始进行OT推广与应用,有效解决了国产300 MW亚临界机组省煤器入口节流圈氧化铁沉积问题。九十年代,随着我国引进的300~600 MW等级超临界机组陆续投运,锅炉受热面结垢速率高、锅炉压差上升速率快成为普遍问题,为此OT得到积极的应用。1995年,我国首先将OT技术应用于上海石洞口二厂2×600 MW超临界直流锅炉,取得了良好效果,该机组也成为我国目前加氧运行时间最长的超临界机组。进入21世纪后,我国大批国产600 MW超临界及1 000 MW超超临界机组相继投运,其锅炉受热面结垢速率高、水冷壁管节流孔结垢以及高加疏水调节阀沉积堵塞的问题更加突出<sup>[6]</sup>。为解决此类问题,OT在超临界电机组上得到了更加积极的推广应用。与此同时,在给水平AVT工况下,凝结水精处理混床运行负荷很重,许多精处理系统被迫采用铵型运行方式,混床出水氯和钠的泄漏严重,由此带来汽轮机机叶片的积盐腐蚀问题也非常普遍,而OT技术在解决这一问题的优势和效果明显,因此也成为该技术发展的推动力<sup>[7]</sup>。

据不完全统计,截止目前,我国已超过150台以上锅炉采用给水加氧处理,国内已投运的1 000 MW超超临界几乎全部采用给水加氧处理。

## 2 直流锅炉给水加氧处理

### 2.1 给水加氧应具备的前提条件

加氧处理必须在水质很纯的条件下才能进行。直流炉给水加氧处理时,需考虑给水含氧量和给水含铁量的关系,严格控制给水的电导率,还应满足以下条件:

- 1) 给水氢电导率应小于 $0.10 \mu\text{S}/\text{cm}(25^\circ\text{C})$ 。
- 2) 凝结水有100%的精处理装置,且运行正常。

3) 除凝汽器管外,水汽循环系统设备应为钢制元件。

4) 锅炉水冷壁管内的结垢量应小于 $250 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

5) 新机组投运三到六个月后,水质符合加氧工艺要求时(机组需运行稳定),可考虑给水加氧处理工艺。

6) 对于已经投运多年的机组,需对锅炉系统的结垢情况进行检测,必要时还需进行锅炉(包括炉前给水系统)的化学清洗后,再转入给水加氧处理。

7) 需配备满足加氧工艺的在线化学仪表。

8) 加氧前加氧装置必须调试完毕。

### 2.2 pH控制方式

给水加氧处理的同时,应进行加氨处理来调节给水pH,加氨点应为凝结水精处理出口,加氨量应由自动加氨装置通过加氨后电导率和凝结水流量控制。

### 2.3 给水加氧处理运行与监督

#### 2.3.1 运行与监督

给水加氧处理时,运行中的水汽质量监测项目应符合表1的要求<sup>[8]</sup>。各监测项目的控制指标应符合表2的规定<sup>[8]</sup>。为了监督凝汽器汽侧严密性,凝结水泵出口溶解氧指标由根据实际需要定时取样监测(T)改为连续监测(C)。

表1 直流锅炉给水加氧处理水汽质量监测项目

Tab. 1 Quality monitoring for feed water with oxygenated treatment

取样点	pH (25℃)	氢电导率	电导率	溶解氧	二氧化硅	全铁	铜	钠离子	氯离子
凝结水泵出口	—	C	—	C	—	—	—	C	T
凝结水精处理出口	—	C	—	—	C	W	W	C	T
除氧器入口	—	—	C	C	—	—	—	—	—
省煤器入口	C	C	—	C	T	W	W	—	T
主蒸汽	—	C	—	T	T	W	W	C	T
高压加热器疏水	—	—	—	T	—	W	W	—	—

注: C—连续监测; W—每周一次; T—根据实际需要定时取样监测。氢电导率和电导率 $25^\circ\text{C}$ 的单位为 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,溶解氧、二氧化硅、全铁、铜、钠离子、氯离子的单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 2 直流炉给水加氧处理水汽质量标准

Tab. 2 Quality standard of feed water with oxygenated treatment

取样点	监测项目	正常运行	
		控制值	期望值
凝结水泵出口	氢电导率(25℃)/(μS·cm <sup>-1</sup> )	<0.3	<0.2
	溶解氧/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤30	≤20
凝结水精处理出口	氢电导率(25℃)/(μS·cm <sup>-1</sup> )	<0.10	<0.08
	二氧化硅/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤10	≤5
	钠离子/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤3	≤1
	全铁/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤3
	铜/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤2	≤1
除氧器入口	氢电导率(25℃)/(μS·cm <sup>-1</sup> )	0.5~2.7	1.0~2.7
	溶解氧/(μg·L <sup>-1</sup> )	30~150	30~100
省煤器入口	pH(25℃)	8.0~9.0 <sup>a</sup>	—
	氢电导率(25℃)/(μS·cm <sup>-1</sup> )	<0.15	<0.10
	溶解氧/(μg·L <sup>-1</sup> )	30~150	30~100
	二氧化硅/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤15	≤10
	钠离子/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤2
	全铁/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤3
	铜/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤3	≤2
主蒸汽	氢电导率(25℃)/(μS·cm <sup>-1</sup> )	<0.15	<0.10
	溶解氧/(μg·L <sup>-1</sup> )	≥10	—
	二氧化硅/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤15	≤10
	钠离子/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤2
	全铁/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤3
高压加热器疏水	溶解氧/(μg·L <sup>-1</sup> )	≥5	≥10
	全铁/(μg·L <sup>-1</sup> )	≤5	≤3

注: 由于直接空冷机组的空冷凝汽器存在腐蚀问题, 因此直接空冷机组的给水 pH 应通过试验确定。

### 2.3.2 机组启动后的水质处理和运行要求

1) 机组启动后应根据 GB/T 12145 的规定进行冷态和热态冲洗, 同时凝结水精处理出口应加氨, 不应加联氨<sup>[9]</sup>。机组启动时, 应尽快投运凝结水精处理设备。

2) 机组带负荷稳定运行后, 并且凝结水精处理出口母管氢电导率小于 0.10 μS/cm, 方可进行加氧处理。

3) 加氧 8 h 后, 应降低凝结水精处理出口加氨量, 水质应符合表 2 的要求。

### 2.3.3 除氧器和高、低压加热器的运行方式

1) 机组启动时, 打开高压加热器排气门, 打开

除氧器排气门; 当开始加氧后, 4 h 内关闭除氧器排气门至微开状态。

2) 开始加氧后, 4 h 内关闭高压加热器排气门, 高压加热器疏水的含氧量应大于 5 μg/L。

3) 正常运行时, 当关闭高压加热器汽侧运行连续排气门影响到高压加热器的换热效率时, 可根据机组的运行情况微开或定期开启运行连续排气门。

### 2.3.4 水质及运行异常时的处理原则

#### 1) 水质恶化

凝结水氢电导率大于 0.3 μS/cm 时, 应查找原因并按 GB/T 12145 的要求采取三级处理。

当凝结水精处理出口、除氧器入口的氢电导率 >0.12 μS/cm, 且省煤器入口的氢电导率 >0.2 μS/cm 时, 应暂停给水加氧。再将除氧器入口电导率的目标值设定为 7.0 μS/cm, 增加凝结水精处理出口的加氨量, 将给水的 pH 增至 9.3~9.6; 待省煤器入口的氢电导率合格后, 再恢复加氧处理工况。

#### 2) 非计划停运

非计划停运时, 应立即停止加氧。

#### 3) 正常停运

正常停运时, 可提前 4 h 停止加氧。

### 2.3.5 停(备)用保养

#### 1) 中、短期停机

停机前应调整给水 pH 为 9.3~9.6。锅炉需要放水时, 应按照 DL/T 956 的相关规定执行<sup>[10]</sup>。

#### 2) 长期停机

应在停机前提前 4 h 停止加氧。待汽轮机跳闸后, 开启分离器回凝汽器的循环回路, 打开凝结水精处理设备的旁路阀门, 并加大凝结水精处理出口的加氨量, 将 pH 调整到 9.6~10.0。

按照 DL/T 956 的相关规定, 停炉冷却时, 在锅炉压力为 1.0 MPa~2.4 MPa 时热炉放水, 打开锅炉受热面所有疏放水阀和空气阀。

## 3 超临界机组加氧处理的重要性和必要性

### 3.1 未进行给水加氧处理的超临界机组易出现的问题

外高桥电厂 1 000 MW 机组给水未加氧处理以前, 经过半年多的运行, 给水系统已经表露出一些流动加速腐蚀特征, 高加疏水阀、再热器减温水调节阀经常出现被铁氧化物堵塞等问题, 需要经常清洗

设备, 锅炉差压明显增加。玉环电厂锅炉节流阀出现堵塞严重的情况, 需经常停炉清理节流孔的沉积物, 锅炉的压差升高, 影响锅炉效率。泰州电厂 1 000 MW 机组锅炉节流出现严重堵塞的情况, 造成水冷壁管过热损坏的情况。目前上述的 1 000 MW 机组均采用了给水加氧技术。

河南电科院调查了 8 台已经运行 1~3 年之间的 600 MW 超临界未进行给水加氧机组的情况, 发现了一些共性的问题, 省煤器和水冷壁受热面的腐蚀产物的沉积量明显偏高, 汽轮机叶片积盐速率高, 汽轮机调节级压力大, 炉本体压差明显增大等问题<sup>[11]</sup>。运行一年以上的机组水冷壁结垢速率在  $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  以上, 最高达到  $150 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 省煤器最高达  $430 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 两年时间就达到了酸洗的条件。运行 3、4 年汽轮机调节级压差高的达到 2.0 MPa, 锅炉运行压降达到 2.0 MPa, 严重影响了机组的安全经济运行。照这种情况下去, 锅炉在一个大修期间必须进行化学清洗。给水加氧是解决上述问题的无一二二的办法。

### 3.2 给水加氧处理(OT)与 AVT 全挥发性处理相比的优点

联氨是一种能强烈侵蚀皮肤, 对眼睛、肝脏有损害作用的化学物质, 开发新的无毒的除氧剂可以减少 AVT(R) 所使用的联氨, 另一方面可以改为弱氧化性处理, 即 AVT(O), 后者可以尽量少的向汽水系统加入化学药品。越来越多的实例证明, 给水在 AVT 工况下, 炉前系统会发生严重的流动加速腐蚀, 常熟发电有限公司曾发生多次流动加速腐蚀的情况, 电动给水前置泵泵壳, 密封环, 高加端部进出口堵板均发生了严重的流动加速腐蚀的情况<sup>[2]</sup>。

采用加氧处理与全挥发性处理相比, 可以有效降低锅炉受热面腐蚀产物的沉积量, 提高锅炉的传热效率; 降低汽轮机叶片的腐蚀产物的沉积量; 降低汽轮机调节级的压降, 提高汽轮机的效率; 降低给水系统产生流动加速腐蚀的风险<sup>[12]</sup>; 降低锅炉运行的压降, 提高锅炉的运行效率<sup>[13]</sup>。

### 3.3 加氧处理带来的直接经济效益

#### 3.3.1 延长机组化学清洗周期

以目前的实际运行来看, 不加氧的超临界机组, 其锅炉酸洗周期最短为 1 年, 最长为 3 年左右(按平均周期为两年计算); 机组给水处理 OT 改造

实施后, 化学清洗周期可延长至 8~10 年, 甚至 10 年以上。600 MW 机组每次进行化学清洗的费用约为 100 万元(包括化学药剂、水耗、电耗及相关施工费用)。按此计算, 若机组给水采用加氧处理后, 每年可节约费用 38 万元以上。

#### 3.3.2 延长凝结水精处理混床运行周期

给水采用加氧处理, 可降低凝结水加氨量, 减轻了凝结水精处理混床的运行负担。一般情况下每台精处理混床周期制水能力可由原来 6 万吨提高至 15 万吨, 一台 350 MW 机组的精处理混床再生次数, 可由原来的每月 6 次左右降到 3 次, 1 年可减少 36 次的再生次数, 再生用除盐水量按每次 200 t 计, 每年可节约再生用水约 7 200 t。

另外再生次数减少了, 也可以降低精处理装置再生药剂的消耗, 一台 350 MW 机组每年约可减少一半的酸碱用量, 可节省费用约 18 万元/年。

### 3.4 加氧处理的间接经济效益

1) 锅炉沉积速率和结垢速率降低致使垢层变薄, 可以减少热力系统的传热损耗, 同时降低煤耗, 提高机组的效率。测算因此产生的经济效益每年可达 30 万元以上。

2) 加氧处理后, 由于给水系统的管内壁保护层更致密光滑, 减少了水流动阻力, 可抑制锅炉压差的上升速率。由此驱动给水泵的小汽轮机耗汽量减少, 提高了机组的热效率, 测算因锅炉压差下降而产生的经济效益每年可达 20 万元以上。

3) 采取加氧工艺后可延长锅炉酸洗周期, 由此可缩短检修工期, 可减少每台机组每年的发电量损失量, 可增加的发电利润约 40 万元。

4) 加氧工艺可以减少除氧器和高加排汽阀的排气损失, 每年可节省的排汽损失约 30 万元。

5) 因凝结水精处理混床运行周期延长, 机组水汽品质也可以得到明显提高, 可避免锅炉腐蚀以及汽轮机积盐、腐蚀等一系列问题, 由此也可产生不可估量的经济效益。

6) 因节约自用水量、酸碱消耗量, 减少酸碱废液排放量等, 有利于环保, 具有良好的社会效益。

## 4 结论

近年来国内超(超)临界 600 MW、1 000 MW 机组投入运行的机组很多, 但采用给水加氧处理工况的机组国内各区域发展不平衡, 超(超)临界机组

给水加氧处理在发展的过程中也遇到了一些波折, 如加氧对蒸汽系统的影响—高温氧化皮问题, 但美国电力研究协会在机组蒸汽系统高温氧化方面的研究结果中, 已经明确了高温氧化皮问题与水工况无关(包括给水加氧处理工况), 而与温度和材质有关<sup>[14]</sup>。而且研究结果表明, 运行锅炉采用给水加氧处理的起始时间距锅炉投运时间越长, 风险越大; 蒸汽含氧量越高, 风险越大; 蒸汽参数越高, 风险越大。建议新建直流锅炉投运后越早采用 OT 工艺, 风险就越小<sup>[4]</sup>。

目前, 未进行给水加氧处理的超(超)临界机组, 都出现了一些共性的问题, 如省煤器和水冷壁受热面的腐蚀产物的沉积量明显偏高, 汽轮机叶片积盐速率高, 汽轮机调节级压力大, 炉本体压差明显增大等问题。AVT 给水处理工况明显已不适应超(超)临界机组的运行, 目前给水加氧处理是超(超)临界机组不一无二的选择, 投入运行的超(超)临界机组应尽快采用给水加氧处理工况。

#### 参考文献:

- [1] 陆伟群. 工业 CFB 锅炉掺烧高硫石油焦油页岩混合燃料的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- [2] 靳杰文, 宋振龙, 袁海东. 蒸汽冷凝水管道腐蚀机理及防腐措施 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2018, 35(6): 30-34.  
JIN J W, SONG Z L, YUAN H D. Corrosion mechanism and anti-corrosion measures of steam condensate pipeline [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2018, 35(6): 30-34.
- [3] 国家能源局. 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: 中国电力出版社, 2016.  
National Energy Administration. Guideline for cycle chemistry in fossil plants Part 4: feedwater treatment: DL/T 805.4—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [4] 黄校春. 1 000 MW 超超临界机组给水加氧处理实验与应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [5] 范圣平, 韩倩倩, 曹顺安. 火电厂热力设备结垢、积盐与腐蚀现状及防治对策 [J]. 工业用水与废水, 2010, 41(5): 9-14.  
FAN S P, HAN Q Q, CAO S A. Present situation and prevention countermeasures of scale formation, salt precipitation and corrosion in thermal equipment of power plant [J]. Industry Water & Wasterwater, 2010, 41(5): 9-14.
- [6] 施国忠, 刘春红. 1 000 MW 机组精确控制加氧处理技术的应用 [J]. 浙江电力, 2014, 33(11): 55-57 +65.
- SHI G Z, LIU C H. Application of accurate control of oxygenated feedwater treatment in 1 000 MW units [J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(11): 55-57 +65.
- [7] 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.
- [8] 国家能源局. 火电厂汽水化学导则 第 1 部分: 锅炉给水加氧处理导则: DL/T 805.1—2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量: GB/T 12145—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [10] 国家能源局. 火力发电厂停(备)用热力设备防锈蚀导则: DL/T 956—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [11] 张洪江, 顾融融, 李永立, 等. 660 MW 超超临界机组给水加氧处理试验研究与分析 [J]. 华北电力技术, 2017(8): 25-29 +53.  
ZHANG H J, GU R R, LI Y L, et al. Experimental Study and Analysis on Feed-water Oxygen Treatment of 660 MW Ultra Supercritical Unit [J]. North China Electric Power, 2017(8): 25-29 +53.
- [12] 邓宏伟. 核电厂二回路管道应对流动加速腐蚀机理研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 51-54 +61.  
DENG H W. Research on flow accelerated corrosion discussion for secondary loop piping of nuclear power plant [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(1): 51-54 +61.
- [13] 韩建伟. 电化学噪声技术的基本原理及其在腐蚀研究方面的应用 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊 1): 26-30.  
HAN J W. Electrochemical noise technology and its application on corrosion research [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 26-30.
- [14] IRMA D, DENIS A, KEN J G, et al. Oxygenated feedwater treatment at the world's largest fossil fired power plant-beware of the pitfalls [J]. Power Plant Chemistry, 2001, 3(11): 32-34.

#### 作者简介:



XIAO J Q

肖建群(通信作者)

1977-, 女, 江西永新人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 武汉水利电力大学环境工程学士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、海水淡化技术研究及设计 (e-mail) xiaojianqun @ ge-di.com.cn.

(责任编辑 李辉)