

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310145

## 水汽系统积盐问题分析及处理

文慧峰<sup>1</sup>, 张兆<sup>2</sup>, 韩涛<sup>3</sup>, 位承君<sup>1</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安 710054;

3.华能国际电力股份有限公司日照电厂, 山东 日照 276800)

[摘要] 尿素水解制氨技术已广泛应用于火电机组脱硝还原剂的制备。然而, 若出现尿素质量不合格, 尿素水解器发生泄漏以及水解器疏水回用至凝汽器的情况, 会对热力系统造成巨大危害。对某燃煤机组尿素水解器泄漏致水汽系统严重积盐及过热器爆管进行了分析, 并提出了补充处理方案。实施后机组各项水汽指标均达到《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)要求, 为水汽系统积盐的原因分析及处理提供了解决方案。

[关键词] 尿素水解器; 泄漏; 汽轮机; 水汽系统; 积盐; 水冲洗

[引用本文格式] 文慧峰, 张兆, 韩涛, 等. 水汽系统积盐问题分析及处理[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 161-166.  
WEN Huifeng, ZHANG Zhao, HAN Tao, et al. Research and treatment of salt accumulation in the water and steam system of a power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 161-166.

## Research and treatment of salt accumulation in the water and steam system of a power plant

WEN Huifeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>2</sup>, HAN Tao<sup>3</sup>, WEI Chengjun<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Huaneng Power International Rizhao Power Plant, Rizhao 276800, China)

**Abstract:** The urea hydrolysis technology for ammonia production has been widely used in the preparation of denitration reducing agents for thermal power units. However, if the quality of urea is not up to standard, the urea hydrolyzer will leak, and the drainage from the urea hydrolyzer will be reused in the condenser, which will cause great harm to the thermal system. The article analyzes the serious salt accumulation and superheater tube explosion in the water and steam system caused by the leakage of a urea hydrolyzer in a coal-fired unit, and proposes a solution to the salt accumulation problem. The problem has been successfully solved, after the unit is started, all quality criterion of water and steam meet the requirements of *Quality Criterion of Water and Steam for Power Plant and Steam-generating Equipment* (GB/T 12145—2016). This article provides a solution for analyzing and treating the cause of salt accumulation in the water and steam system for reference.

**Key words:** urea hydrolyzer; leakage; steam turbine; water and steam system; salt accumulation; water flushing

火电厂机组水汽品质直接影响机组的安全、经济、稳定运行。《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)<sup>[1]</sup>对机组运行的水汽品质做了明确要求。不合格的水汽品质会引起热力系统污染或积盐, 尤其是过热器、再热器及汽轮机积盐, 会导致热力设备腐蚀损伤, 甚至导致机组被

迫停机<sup>[2-7]</sup>。国内曾发生多起因水汽品质控制不当引起的停机事故, 引起机组水汽品质变化的因素较多, 如凝汽器循环水漏入, 不合格疏水回用, 负压系统空气漏入, 补水带入等<sup>[8-11]</sup>。近年来, 尿素水解制氨技术凭借其安全性好、能耗低、运行维护工作量小等优点得到广泛应用<sup>[12-16]</sup>。然而, 因尿素水

收稿日期: 2023-10-12

第一作者简介: 文慧峰(1981), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂设备防腐防垢技术, wenhuifeng@tpri.com.cn。

解车间运行控制不当、设备腐蚀损伤等也引发了机组运行事故。本文结合某电厂因尿素水解器泄漏引发的过热器、再热器及汽轮机积盐和爆管事故，对事故原因进行了分析，提出了解决方案，实施后彻底解决了积盐问题。

## 1 情况介绍

某火电厂超临界 350 MW 燃煤机组尿素水解器于 2022 年 5 月发生泄漏。泄漏前监测到省煤器入口 pH 值达 10，降低给水加氨泵流量，pH 值仍未下降。监测给水水质硬度 0， $\text{SiO}_2$  质量浓度  $70.000 \mu\text{g/L}$ ，铁质量浓度  $4.000 \mu\text{g/L}$ ，铜质量浓度  $0.927 \mu\text{g/L}$ 。随后巡检发现，尿素车间刺激性气味大，判断尿素水解器发生泄漏，遂停止疏水回收至凝汽器，因疏水箱疏水回收至凝汽器，造成凝结水、给水 pH 值偏高。之后，机组引风机电流大幅上涨，炉管泄漏多点报警，现场检查确认炉右前屏过热器处声音较大，判断为炉管泄漏。停炉后进入锅炉水平烟道检查发现前屏过热器（屏过）后半排从炉右至炉左第 1 屏、从炉后至炉前第 10 根管的前屏过热器上方第 1 道夹持管下方约 2 m 处有爆口，首爆口上方约 100 mm 处管道断裂。消缺完毕机组点火启动，锅炉疏水水质化验合格（铁质量浓度  $90 \mu\text{g/L}$ ，硬度 0）；汽轮机冲转，蒸汽品质化验合格（ $\text{SiO}_2$  质量分数  $15.600 \mu\text{g/kg}$ ，铁质量分数  $5.000 \mu\text{g/kg}$ ，钠质量分数  $17.900 \mu\text{g/kg}$ ，铜质量分数  $1.152 \mu\text{g/kg}$ ）。机组并网后负荷升高至 95 MW，出现后屏过 6、8、10 点壁温异常，分别为 580、590、584  $^{\circ}\text{C}$ ，比其他管壁测点偏高约 100  $^{\circ}\text{C}$ 。

经过升降负荷试验初步分析判断管子有堵塞，若继续运行存在爆管风险，限制负荷 95 MW，并向调度申请停机。

此次事故因尿素水解器内尿素溶液经蒸汽疏水系统漏入凝汽器，从而引起机组水汽品质严重恶化，导致低压给水系统、高压给水系统、省煤器系统、水冷壁系统、启动分离系统及其相关管路严重污染，同时，也导致过热器系统、再热器系统、汽轮机及其相关管路严重积盐，以及过热器爆管事故。

尿素水解器停运后对其换热管进行了外观检查，结果如图 1 所示。由图 1 可见，换热管存在严重腐蚀损伤，其中有 1 处换热管发生断裂。机组停机后对过热器、再热器及汽轮机进行检查，结果如图 2—图 4 所示。由图 2—图 4 可见，过热器发生爆管，同时过热器、再热器和汽轮机有大面积积盐。



a) 断裂位置

b) 表面腐蚀损伤

图 1 尿素水解器换热管外观

Fig.1 Appearance inspection results of heat exchange tube in urea hydrolyzer



a) 爆口位置

b) 断口位置

图 2 过热器爆管及断裂位置形貌

Fig.2 Morphology of superheater tube explosion and fracture



图 3 过热器、再热器管内积盐情况

Fig.3 Salt accumulation inside the superheater tube



图 4 汽轮机积盐情况

Fig.4 Salt accumulation situation of steam turbine

## 2 积盐发生的原理及危害

机组汽系统及汽轮机积盐发生的原因有：1) 与盐分在蒸汽中的溶解度有关，一般情况下，蒸汽参数越高盐分在蒸汽中的溶解度越大，即蒸汽的溶解携带能力越强；2) 也与盐分在水系统中的含量有关<sup>[17-18]</sup>。盐分随着水汽转化被溶解携带进入汽系统，随着蒸汽在过热器系统、汽轮机及再热器系统内的流动，蒸汽压力越来越低，尤其是蒸汽进入汽轮机膨胀做功时，蒸汽参数迅速下降，蒸汽溶解携带盐分的能

力不断降低。过饱和盐分就会结晶沉积在汽系统及汽轮机的不同部位，发生积盐现象。当炉水中盐分含量较高时，就会发生大面积积盐事故。因此，控制水汽品质至关重要。

机组运行期间，过热器、再热器发生积盐，会造成换热管通流面积的减小，使换热管温度升高，严重时会发生超温爆管事故；汽轮机通流部分积盐会严重影响汽轮机通流部件的工作性能，降低汽轮机效率<sup>[18]</sup>，如果汽轮机积盐剥落，汽轮机内部构件就可能变得粗糙，进一步降低汽轮机效率。通流部分积盐还危及机组的安全稳定运行，盐类物质沉积在隔板喷嘴上，会增大隔板的弯曲应力；盐类物质沉积在叶片上，会增大隔板的轴向推力，使推力轴承受过负荷，严重时造成动静部分发生摩擦、碰撞。另外，汽轮机叶轮周积盐不均匀会影响转子的平衡，使汽轮机振动加大，甚至引发严重事故。机组停运期间，由于积盐的吸湿作用，加速了设备腐蚀损伤，进而降低了设备使用寿命，增加了机组安全运行的风险。

### 3 积盐原因分析

尿素化学式是  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ，由碳、氮、氧、氢组成的有机化合物，是一种白色晶体，易溶于水，在一定的条件下水解可产生  $\text{NH}_3$ 。尿素水解制氨技术已广泛应用于火电机组脱硝还原剂的制备，其原理为：质量分数 40%~60% 的尿素溶液被输送到尿素水解反应器内，蒸汽通过盘管方式进入水解反应器，蒸汽不与尿素溶液混合，通过盘管回流，冷凝水由疏水箱、疏水泵回收。水解反应器内的尿素溶液气液两相平衡体系的压力为 0.48~0.60 MPa，温度为 136~160 °C，水解反应器中产生出来的含氨等产物经计量模块后由氨喷射系统进入烟气脱硝系统，尿素水解反应方程式为：



国家标准《尿素》(GB/T 2440—2017)<sup>[19]</sup>对工业用尿素的要求(表 1)：火电机组脱硝系统使用合格的尿素原料时，即使尿素水解器发生泄漏导致尿素溶液漏入凝汽器，也只会引起机组水汽品质的恶化，短期内并不会造成大面积水汽系统积盐现象以及爆管事故。

尿素水解器发生泄漏后，该机组水汽取样分析结果见表 2。由表 2 可见，水汽中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  质量分数严重超标。对锅炉爆管处取样进行元素分析，Na 元素和 Cl 元素总量占 78.54%，分析结果见表 3。

根据表 2、表 3 分析结果可以判定，积盐的主要成分为  $\text{NaCl}$ 。为了进一步判定  $\text{NaCl}$  来源，结合尿素水解器泄漏情况，对该机组制氨原料尿素取样分析，发现原料中  $\text{NaCl}$  质量分数为 15%。正常运行情况下，尿素水解器管侧为蒸汽，壳侧为尿素溶液，蒸汽疏水经扩容器回收至凝汽器进入机组水汽系统。由于换热管发生断裂，尿素溶液随蒸汽进入疏水扩容器，再回收进入凝汽器，污染机组水汽系统，同时大量盐分  $\text{NaCl}$  进入水汽系统，最终造成水汽系统大面积积盐并发生爆管，致使机组无法正常运行。

表 1 工业用尿素要求 单位：w/%  
Tab.1 Requirements for industrial urea

项目	等级	
	优等品	合格品
总氮 (N)	≥46.4	≥46.0
缩二脲	≤0.5	≤1.0
水分	≤0.3	≤0.7
铁 (以 Fe 计)	≤0.000 5	≤0.001 0
碱度 (以 $\text{NH}_3$ 质量分数计)	≤0.01	≤0.03
硫酸盐 (以 $\text{SO}_4^{2-}$ 计)	≤0.005	≤0.020
水不溶物	≤0.005	≤0.040

表 2 尿素水解器泄漏后机组水汽取样分析  
Tab.2 Analysis of water and steam sampling for the unit after leakage of urea hydrolyzer

水样	电导率/ ( $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$\rho(\text{Na}^+)/$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\Sigma \text{Fe})/$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
凝结水	22.4	1 290	7 100	2
给水	26.4	1 120	13 550	4
主蒸汽	28.8	995	9 940	3
再热蒸汽	26.1	125	10 650	2

表 3 锅炉爆管处取样元素分析结果 单位：w/%  
Tab.3 Analysis results of sampling elements at boiler tube explosion

元素	C	Na	Cl
数值	21.47	34.58	43.96

综上所述，造成此次事件的主要原因是水解制氨系统使用的原料尿素产品质量不合格。 $\text{NaCl}$  质量分数 15% 的尿素原料一方面大大提高了尿素水解器内尿素溶液的腐蚀性离子  $\text{Cl}^-$  的含量，从而加速了尿素水解器换热管腐蚀破坏；另一方面，因尿素水解器泄漏随疏水回用至凝汽器，造成了机组水汽系统严重污染。

### 4 水汽系统积盐解决方案

通过检查发现过热器、再热器、汽轮机及其相

关管路均发生了不同程度的积盐, 积盐量大、涉及范围广。由于火电机组水汽系统结构复杂、支管路众多, 一旦发生大面积积盐, 后果不可估量, 且处理难度大, 必须制定系统的、可行的处理方案。根据文献[20-25], 汽轮机积盐的处理方式有湿蒸汽或近饱和蒸汽携带冲洗、揭缸人工水冲洗、喷砂等, 其他系统积盐以注水冲洗为主。结合该机组发生大面积积盐的成因及电厂实际情况, 依据积盐 NaCl 在水中溶解度高的特性, 制定了详细的积盐冲洗方案, 通过机组停机冲洗和启动冲洗相结合的方式, 彻底解决了该机组大面积积盐问题。

#### 4.1 停机冲洗方案

为了抑制水冲洗后设备锈蚀, 要求冲洗水 pH 值控制在 9.5~10.5。为了提高冲洗效率, 要求除盐水补水电导率小于  $0.4 \mu\text{s}/\text{cm}$  ( $25^\circ\text{C}$ ), 二氧化硅质量浓度小于  $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 。该方案对凝结水系统、锅炉给水系统、过热器系统、再热器系统、汽轮机、抽汽管路及加热器汽侧采用不同的冲洗方式。

##### 1) 凝结水系统冲洗

通过正常除盐水补水回路, 对凝结水系统凝汽器热井、凝结水泵、轴封加热器、低压加热器水侧、除氧器及其相关管路依次进行冲洗, 监测各放水点  $\text{Na}^+$  质量浓度, 冲洗终点为  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 。冲洗合格后依次打开各支路放水阀对死区进行冲洗。此外, 考虑到凝汽器热井和除氧器水容积大的特性, 采用直接补水外排的方式冲洗。

##### 2) 锅炉给水系统冲洗

凝结水系统冲洗合格后, 按照锅炉上水回路, 对给水泵、高压加热器、省煤器系统、水冷壁系统、启动分离系统及其相关管路依次进行冲洗, 监测各放水点  $\text{Na}^+$  质量浓度, 冲洗终点为  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 。冲洗合格后依次打开各支管路放水阀对死区进行冲洗。

##### 3) 过热器系统、再热器系统冲洗

冲洗范围包括过热器系统、再热器系统、减温水管路、高低压旁路系统以及相关管路。为了防止过热器、再热器系统因冲洗措施不当, 发生氧化皮堆积堵塞, 同时将已脱落的氧化皮冲洗携带出, 通过外加的临时系统, 采用临时清洗泵对过热器系统、再热器系统分别进行大流量水冲洗。过热器冲洗回路为除氧器→下降管→清洗泵→临时管道→主蒸汽管道→各级过热器→启动分离系统→临时排放管→排放系统; 再热器冲洗回路为除氧器→下降管→清洗泵→临时管道→再热热段管道→高温

再热器→低温再热器→再热冷段管道→临时排放管→排放系统。冲洗过程中对疏放水、仪表等死区进行冲洗。冲洗水温度控制在  $50\sim 80^\circ\text{C}$  交替进行, 采用变压、变流量冲洗, 通过监测过热器和再热器的壁温情况, 防止过热器和再热器换热管因氧化皮堆积发生局部堵塞。同时, 在各级过热器和再热器排气位置监测  $\text{Na}^+$  质量浓度, 冲洗终点为  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $20 \mu\text{g}/\text{L}$ 。经大流量冲洗后, 过热器系统  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $20 \mu\text{g}/\text{L}$ ; 再热器系统  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 。

##### 4) 汽轮机积盐揭缸处理

对高压缸、中压缸、低压缸通流部分实施了喷砂和水冲洗处理; 汽轮机其他部件打磨处理; 对高、中压导汽管进行注水冲洗。冲洗终点为  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $20 \mu\text{g}/\text{L}$ 。

##### 5) 抽汽管路及加热器汽侧

抽汽管路及加热器汽侧采用注水冲洗。冲洗终点为冲洗水  $\text{Na}^+$  质量浓度小于  $20 \mu\text{g}/\text{L}$ 。

#### 4.2 机组启动冲洗方案

由于机组水汽系统结构复杂、系统庞大, 难免会出现冲洗不彻底的情况。经过停机期间的水冲洗处理之后, 为确保机组正常启动和水汽品质快速达标, 机组启动期间采取了以下措施。

1) 机组启动期间, 除凝汽器正常补水外, 外系统疏水暂不回收利用。

2) 机组启动期间, 加强系统排污和死区的冲洗, 加强各取样点  $\text{Na}^+$  质量浓度的监测。

3) 机组冷态冲洗合格后, 提前将凝结水精处理系统 100% 投入运行, 系统残留的盐分通过凝结水精处理系统进行吸收处理, 阴阳离子树脂及时再生, 确保氢型运行。

4) 预留机组启动时间, 适当延长热态冲洗、冲转并网时间, 以尽快去除系统内残余盐分。

## 5 处理效果

机组启动冷态冲洗、热态冲洗、冲转、并网运行过程中, 水质随着负荷提升及相关设备投运, 出现反复波动的现象。分析原因为机组系统内残留少量盐分缓慢溶解后造成的水质污染, 机组启动过程中  $\text{Na}^+$  质量浓度随时间变化曲线如图 5—图 8 所示。冷态冲洗采取外排方式进行, 热态冲洗采取外排和投运凝结水精处理系统进行, 冲转、并网运行过程主要采取投运凝结水精处理系统进行。凝结水精处理系统在机组点火后即投入运行, 该过程中对失效

混床进行及时再生, 机组启动水质可控, 符合预期, 积盐问题得到解决。

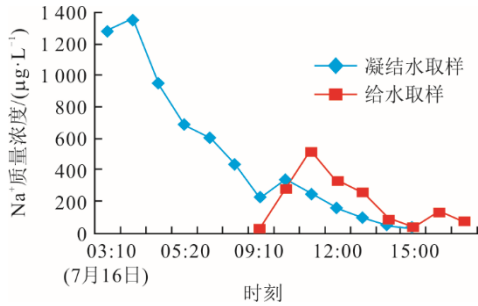


图5 冷态冲洗 Na<sup>+</sup>质量浓度随时间变化曲线  
Fig.5 Change curves of Na<sup>+</sup> mass concentration with time during cold flushing process

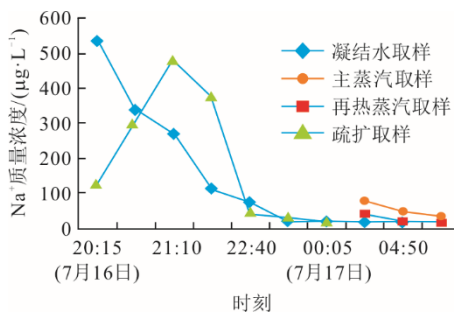


图6 热态冲洗 Na<sup>+</sup>质量浓度随时间变化曲线  
Fig.6 Change curves of Na<sup>+</sup> mass concentration with time during hot flushing process

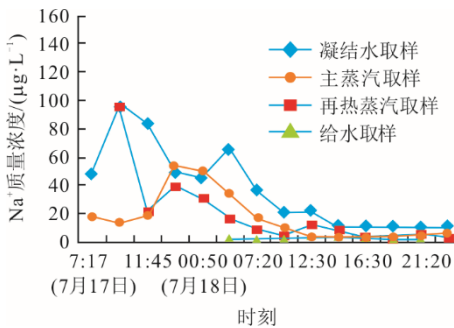


图7 冲转 Na<sup>+</sup>质量浓度随时间变化曲线  
Fig.7 Change curves of Na<sup>+</sup> mass concentration with time during impulse turning process

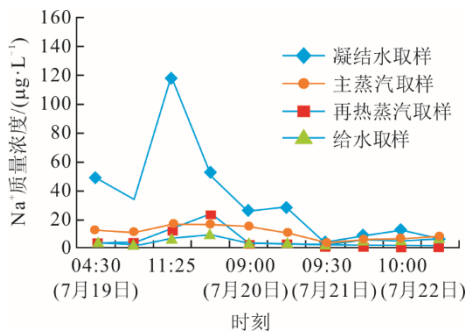


图8 并网运行 Na<sup>+</sup>质量浓度随时间变化曲线  
Fig.8 Change curves of Na<sup>+</sup> mass concentration with time during grid connection operation process

## 6 结论及建议

1) 加强尿素水解器使用的尿素监督检验。符合国家标准的尿素原料不仅可以降低尿素水解车间设备的腐蚀损伤, 同时也是防止因尿素水解器泄漏而造成机组水汽系统污染的根本手段。

2) 设备停运检修时, 对制氨设备进行化学检查, 及时掌握设备腐蚀情况, 评估设备状态, 尤其是尿素水解器的检查评估, 防止发生泄漏事故。

3) 对尿素制氨车间蒸汽疏水的品质进行监督, 增加在线检测仪表如电导表, 可设置报警装置, 同时定期进行人工检测, 以避免因在线检测仪表失准而造成误判。不符合要求的疏水严禁回收至凝汽器, 做到泄漏后及时发现、及时治理。

4) 通过对过热器系统、再热器系统大流量水冲洗, 即可有效去除系统内积盐, 也可清出系统内已脱落的氧化皮, 避免了氧化皮堆积堵塞问题, 降低了机组运行风险。

5) 通过机组停机水冲洗和启动冲洗相结合的方式, 有效解决了机组大面积积盐问题, 确保了机组正常启动。机组并网后, 各取样点 Na<sup>+</sup>质量浓度快速达到了《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)要求, 机组得以可靠运行。

### [参考文献]

[1] 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: 1. Quality criterion of water and steam for power plant and steam-generating equipment: GB/T 12145—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1.

[2] 常亮, 张小霓, 王锋涛, 等. 600 MW 机组汽轮机低压缸腐蚀原因分析与预防措施[J]. 材料保护, 2019, 52(3): 134-137. CHANG Liang, ZHANG Xiaoni, WANG Fengtao, et al. Corrosion cause analysis and preventive measures of steam turbine low pressure cylinder of 600 MW unit[J]. Materials Protection, 2019, 52(3): 134-137.

[3] 尹依军, 李和平, 姚旭. 饱和蒸汽汽轮机通流部位积盐诊断和处理[J]. 冶金动力, 2022(3): 106-109. YIN Yijun, LI Heping, YAO Xu. Diagnosis and treatment of salt accumulation in the flue path of saturated steam turbine[J]. Metallurgical Power, 2022(3): 106-109.

[4] 李艳超, 周洋. 超超临界 1 000 MW 机组汽轮机高压缸积盐原因分析[J]. 材料保护, 2021, 54(11): 187-191. LI Yanchao, ZHOU Yang. Cause analysis on salt accumulation in high -pressure cylinder of ultra supercritical 1 000 MW steam turbine[J]. Materials Protection, 2021, 54(11): 187-191.

[5] 施一明, 黄罡星, 何张涛, 等. 某电厂 630 MW 供热机组水汽氢电导率异常分析及处理[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(11): 1-6. SHI Yiming, HUANG Gangxing, HE Zhangtao, et al. Analysis and treatment of abnormal hydrogen

- conductivity in a 630 MW heat supply unit[J]. Total Corrosion Control, 2022, 36(11): 1-6.
- [6] 冯礼奎, 马明强, 宋方圆, 等. 积盐过热器和汽轮机停运腐蚀特性研究[J]. 应用化工, 2020, 49(增刊 2): 345-350.  
FENG Likui, MA Mingqiang, SONG Fangyuan, et al. Study on stand-by corrosion characteristics of superheater and steam turbine with salt deposit[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(Suppl.2): 345-350.
- [7] 张磊. 汽轮机低压缸叶片腐蚀及锅炉四管沉积量大原因分析及对策[J]. 冶金动力, 2016(8): 20-22.  
ZHANG Lei. Cause analysis of corrosion of low pressure cylinder blade and excessive deposits in the four tubes of boiler in steam turbine and countermeasures[J]. Metallurgical Power, 2016(8): 20-22.
- [8] 陈浩, 李鹏, 乔越, 等. 凝汽器海水泄漏的影响研究及案例分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(2): 137-143.  
CHEN Hao, LI Peng, QIAO Yue, et al. Impact study and case analysis of sea-water leakage of condenser[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(2): 137-143.
- [9] 陈浩, 李鹏, 滕维忠, 等. 发电厂供热机组汽轮机低压转子严重积盐、腐蚀原因分析及处理[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 135-138.  
CHEN Hao, LI Peng, TENG Weizhong, et al. Cause analysis and treatment on serious salt accumulation and corrosion in low-pressure rotor of steam turbine for heating unit in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 135-138.
- [10] 程志磊. 凝汽器泄漏导致汽水污染事故分析[J]. 山东工业技术, 2017(23): 28.  
CHENG Zhilei. Analysis of steam water pollution accidents caused by condenser leakage[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(23): 28.
- [11] 曾祥涛, 魏晋, 张晓蕾. 汽水品质对火力发电机组金属材料腐蚀失效的影响[J]. 科技与企业, 2014(24): 207-208.  
ZENG Xiangtao, WEI Jin, ZHANG Xiaolei. The influence of steam and water quality on the corrosion failure of metal materials in thermal power generating units[J]. Technology and Business, 2014(24): 207-208.
- [12] 周军. 尿素水解制氨技术在燃煤电厂中的应用[J]. 山东化工, 2022, 51(15): 136-138.  
ZHOU Jun. Urea hydrolysis ammonia technology application in coal-fired power plants[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(15): 136-138.
- [13] 柴伟, 江鹏威, 孙国良. 尿素水解制氨在燃煤电厂烟气脱硝系统中的应用[J]. 能源科技, 2022, 20(1): 93-96.  
CHAI Wei, JIANG Pengwei, SUN Guoliang. Application of urea hydrolysis to ammonia production in SCR system of coal-fired power plants[J]. Energy Technology, 2022, 20(1): 93-96.
- [14] 黄见勋. 燃煤机组尿素水解制氨系统优化设计研究[J]. 电子质量, 2022(10): 101-106.  
HUANG Jianxun. Study on optimal design of urea hydrolysis system for ammonia production in coal-fired unit[J]. Electronics Quality, 2022(10): 101-106.
- [15] 冯前伟, 张彭, 李存文, 等. 典型燃煤机组 SCR 脱硝还原剂尿素制氨技术经济比较分析[J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 76-80.  
FENG Qianwei, ZHANG Peng, LI Cunwen, et al. Comparison on techno-economic analysis of ammonia production using urea from SCR denitration reducing agent in typical coal-fired unit[J]. Boiler Technology, 2022, 53(1): 76-80.
- [16] 何文. 火电厂尿素水解制氨系统改造安全风险防控[J]. 电力安全技术, 2020, 22(12): 45-48.  
HE Wen. Safety risk analysis and control for upgrading of urea hydrolysis ammonia production system in coal-fired power plant[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(12): 45-48.
- [17] 苏尧, 黄兴德, 杨心刚, 等. 水汽系统中钠对超(超)临界机组的影响及对策[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1957-1960.  
SU Yao, HUANG Xingde, YANG Xingang, et al. Effects of sodium in water-steam system on ultra-supercritical generating units and countermeasures[J]. East China Electric Power, 2014, 42(9): 1957-1960.
- [18] 李后森, 王金宝. 浅谈超超临界汽轮机通流部分结垢防腐与防治对策[J]. 电力设备管理, 2018(7):70-74.  
LI Housen, WANG Jinbao. Discussion on corrosion prevention and prevention measures for scaling in the flow passage of ultra supercritical steam turbines[J]. Power Equipment Management, 2018(7): 70-74.
- [19] 尿素: GB/T 2440—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1.  
Urea: GB/T 2440—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1.
- [20] 何晓波. 带负荷清洗叶片技术在调节抽汽式汽轮机上的应用[J]. 东北电力技术, 2008(5): 20-22.  
HE Xiaobo. The use of blades cleaning with load to extraction steam regulation turbine[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(5): 20-22.
- [21] 薛政, 沈云在, 程锁伴, 等. 呼和浩特发电厂通流部分带负荷清洗[J]. 内蒙古电力技术, 2003(2): 47-48.  
XUE Zheng, SHEN Yunzai, CHENG Suoban, et al. Cleaning on flowing passage with load operation Huhhot Power Plant[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2003(2): 47-48.
- [22] 张林. 冷态启动中蒸汽清洗小型汽轮机通流部分钠结垢[C]//中国电力企业联合会科技开发服务中心, 全国发电机组技术协作会. 全国 600 MW 级大型汽轮机优化改造经验交流会论文集. 2013: 3.  
ZHANG Lin. Sodium scaling in the flow passage of steam cleaning small steam turbines during cold start[C]//China Electric Power Enterprise Federation Technology Development Service Center, National Technical Cooperation Association for Generating Units. Proceedings of the National Experience Exchange Conference on Optimization and Transformation of 600 MW Large Steam Turbines. 2013: 3.
- [23] 文慧峰, 龙国军, 姚建涛, 等. 汽轮机积盐不开缸清洗的研究及应用[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 78-81.  
WEN Huifeng, LONG Guojun, YAO Jiantao, et al. Application study on the treatment of steam turbine salt deposit in case closing condition[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 78-81.
- [24] 高友谊, 李向娜. 汽轮机内部结垢分析及清理方法[J]. 化工管理, 2021(27): 164-165.  
GAO Youyi, LI Xiangna. Analysis and cleaning method of turbine internal scaling[J]. Chemical Engineering Management, 2021(27): 164-165.
- [25] 张翠华. 海水污染汽轮机及热力系统清洗方法探讨与实践[J]. 机电信息, 2016(18): 82-83.  
ZHANG Cuihua. Exploration and practice of cleaning methods for seawater polluted steam turbines and thermal systems[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(18): 82-83.

(责任编辑 杨嘉蕾)