

凝汽器海水泄漏的影响研究及案例分析

陈浩,李鹏,乔越,曹松彦
(西安热工研究院有限公司,陕西西安710054)

摘要:针对沿海电厂凝汽器泄漏这一重大安全隐患,总结了不同情况海水泄漏对水汽品质造成的影响,分析了海水污染水汽品质对热力系统造成的危害,同时对国内多起火力发电机组凝汽器海水泄漏典型案例进行了分析和研究。结果表明:如果发生凝汽器海水泄漏时处理措施不当,易导致锅炉水冷壁发生大面积酸性腐蚀、垢下腐蚀、过热器及再热器积盐、汽轮机通流部件氯化钠沉积、低压缸相变区严重溃疡腐蚀等危害。

关键词:凝汽器;海水;泄漏;水汽品质;腐蚀;积盐

中图分类号:TK268 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.02.019

[引用本文格式]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.

Impact Study and Case Analysis of Sea-water Leakage of Condenser

CHEN Hao, LI Peng, QIAO Yue, CAO Song-yan

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: In view of the major safety hazard on condenser leakage in coastal power plants, the influence of sea-water leakage on water vapor quality under different conditions was summarized, and the danger of polluted sea-water vapor quality to different thermal equipments was analyzed in the paper. Meanwhile, a large number of typical cases about sea-water leakage of condenser of thermal power generator set in China were analyzed and studied. The results show that if the treatment measures are not correct when condenser sea-water leakage occurs, the different degrees of hazards are easy to occur, such as under-deposited acid corrosion in large area of boiler water wall, salt accumulation in the superheater and reheater, sodium chloride deposition in the steam turbine flow part and severe ulcerative corrosion in the phase transition zone of low pressure steam turbine and so on.

Key words: condenser, sea-water, leakage, water vapor quality, corrosion, salt accumulation

引言

凝汽器泄漏是火力发电厂水汽品质劣化的一个主要因素。对于海水冷却机组,由于冷却水的含盐量极高且腐蚀性很强,一旦发生凝汽器泄漏,其危害

性往往更大。近年来,因凝汽器泄漏导致的安全事故时有发生,给很多电厂造成了巨大损失,同时也是沿海电厂机组非计划停运的一个重要原因^[1]。

由于不同火电厂的机组类型、运行参数、精处理配置、海水泄漏量均不相同,因此凝汽器泄漏对热力系统造成的危害程度也不同^[2-5]。对于凝结水系统

和给水系统,由于水温和压力相对较低,且未产生相变,因此海水泄漏的影响相对较小,其主要危害在于快速降低高速混床的工作周期和系统停运后的盐类沉积。但给水在进入锅炉后,随着温度和压力的进一步提升,且由液相开始转化为汽相,锅炉四管以及汽轮机的高、中、低压通流部件将受到不同类型、不同程度的影响。

为提高我国沿海电厂对凝汽器泄漏的防范意

识^[6-7],本文就海水对锅炉、汽轮机等热力设备产生的危害及影响原因进行了详细的研究,同时对凝汽器海水泄漏典型案例进行了分析和探讨。

1 凝汽器海水泄漏对水汽品质的影响

对我国部分沿海电厂的海水冷却水水质进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 部分电厂海水冷却水水质

Tab. 1 Cooling sea-water quality of some power plants

电厂	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	Na^+ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	K^+ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Ca^{2+} / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Mg^{2+} / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Cl^- / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SO_4^{2-} / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	HCO_3^- / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
A 厂(海南)	50 400	10 740	328	378	1 232	18 680	2 838	96
B 厂(浙江)	37 500	7 799	298	333	913	14 290	1 998	102
C 厂(山东)	37 900	9 820	238	246	582	18 650	2 437	153
D 厂(辽宁)	45 880	8 300	388	309	766	18 027	2 239	144
E 厂(福建)	46 224	8 350	425	477	1 033	16 800	2 110	131
F 厂(广东)	46 549	11 299	763	421	531	17 968	2 793	98

由表 1 可见,海水的含盐量远远高于淡水,其中含量最高的阳离子是 Na^+ ,阴离子是 Cl^- ,其他主要离子还包括 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 等。而对于火电机凝汽水,其水质标准为:硬度 $\approx 0 \mu\text{mmol/L}$, $\text{Na}^+ \leq 5 \mu\text{g/L}$, 氢电导率 $\leq 0.2 \mu\text{S/cm}$ ^[6],较海水水质相差了若干倍数量级。因此,当海水漏入热力系统后,首先会对凝汽水水质造成严重污染。并且凝汽水精除盐设备一旦被穿透,将导致给水和蒸汽品质的同步恶化。

沿海电厂的凝汽器管材通常为钛管,而钛管发生泄漏的常见原因包括汽侧异物砸伤、水侧硬物划伤、焊口或堵头泄漏等^[7]。由于各厂的泄漏情况不尽相同,因此海水的泄漏量和水汽品质劣化程度也差别较大。

以 1 台 300 MW 机组为例,假设机组在满负荷运行过程中发生凝汽器泄漏,则不同海水泄漏量条件下,凝汽水中被带入的 Na^+ , Cl^- 杂质质量分数如表 2 所示。

表 2 海水泄漏量对凝汽水水质的影响

Tab. 2 Influence of the amount of sea-water leakage on the quality of condensate

凝汽器海水泄 漏量/ $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	每小时凝汽水中带入的杂质质量分数/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	
	Na^+	Cl^-
50	714	1 286
100	1 428	2 571
500	7 140	12 855
1 000	14 280	25 710

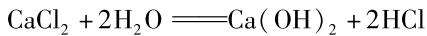
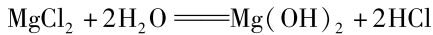
注:海水 Na^+ 以 10 000 mg/L 计, Cl^- 以 18 000 mg/L 计,机组凝汽水水量以 700 t/h 计。

2 海水泄漏对热力系统的影响分析

2.1 汽包锅炉

海水中的钙、镁盐类进入汽包后,由于蒸发浓缩以及溶解度的下降, CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等物质会沉积在锅炉受热面形成水垢。更为严重的是,当海水泄漏量较大时,可能造成汽包炉炉水的 pH 值大幅降低,导致水冷壁管发生大面积酸性腐蚀,危及

锅炉安全运行。其反应式如下:



除此之外,汽包中产生的饱和蒸汽还会溶解携带炉水中的杂质,汽包压力越高,溶解携带杂质质量越大。不同物质在不同压力下的汽、水分配系数如图1所示^[8]。对于亚临界机组,饱和蒸汽压力可达到16.7 MPa以上,因此可以溶解携带绝大部分盐类物质。

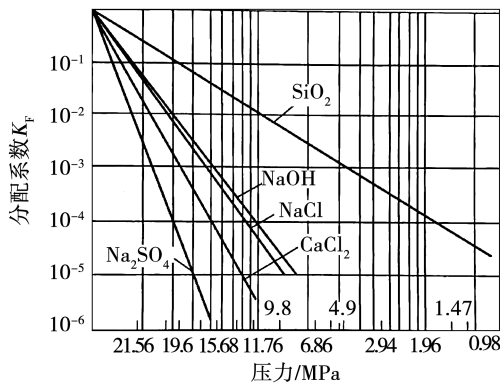


图1 各种物质的分配系数与饱和蒸汽压力的关系

Fig.1 Relationship between partition coefficient and saturated steam pressure of various substances

由图1可知, SiO_2 的溶解携带系数最高。但由于海水中的 SiO_2 含量相对较低,且 SiO_2 在炉水中会与碱化剂反应生成硅酸盐,因此蒸汽仅会携带少量的 SiO_2 。而 Na_2SO_4 的含量虽然在海水中较高,但其溶解携带系数最低,因此蒸汽中的 Na_2SO_4 含量也较少。 NaCl 的溶解携带系数虽然居中,但由于海水中的主要盐类成分为 NaCl ,其含量远远高于其他物质,因此当海水大量进入汽包后,被带入蒸汽中的主要杂质为 NaCl 。

2.2 直流锅炉

对于直流锅炉,由于无法像汽包锅炉一样进行炉水排污,因此除钙、镁、硅、铁等水垢会部分沉积于锅炉受热面,给水中的大部分杂质均会被带入蒸汽中。另外,直流炉虽然不存在炉水pH值大幅度降低的情况,但 Cl^- 同样可能造成巨大危害。根据表1的统计结果,海水中的 Cl^- 含量可以高达18 000 mg/L以上,而超临界机组给水 Cl^- 的标准为不大于1 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。因此,即使精处理设备运行正常,当海水泄

漏量较大时,也极易导致给水水质超标。如果水冷壁管内的沉积量较大, Cl^- 在水垢下可能产生严重的局部腐蚀乃至“氢脆”损伤^[9]。

2.3 过热器

当饱和蒸汽携带的杂质进入到过热器,如果携带量大于该物质在过热蒸汽中的溶解度时,就会部分沉积于过热器中,反之则会全部带入汽轮机中。因此,当海水泄漏量较小时,积盐主要发生在汽轮机部分;当泄漏量很大时,过热器和汽轮机都有可能发生严重的积盐现象。过热器内的严重积盐可能引发爆管,汽轮机内的严重积盐会影响机组的运行效率。另外,由于机组运行中过热器内的蒸汽均有一定的过热度,因此不会发生电化学腐蚀。但停机时,如果因锅炉放水压力偏低或其他原因导致过热器水平管有存水时,可能会诱发局部腐蚀。对于TP347等材质的奥氏体不锈钢,还可能造成晶间腐蚀。

2.4 汽轮机

过热蒸汽在进入汽轮机后,压力会逐步降低,溶解度也随之下降。根据不同物质的含量及溶解特性,盐类会在汽轮机高、中、低压缸的不同部位沉积。汽轮机中沉积物的分布特性如图2所示^[10]。

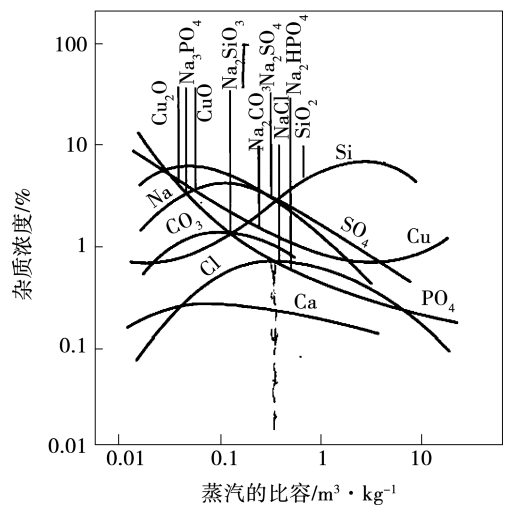


图2 汽轮机中沉积物的分布特性

Fig.2 Distribution characteristics of sediment in steam turbine

与过热器同理,进入汽轮机高、中压缸的蒸汽具有一定的过热度,因此运行中不会产生电化学腐蚀。停机以后,如果汽轮机进行了揭缸且放置时间较长时,叶片表面的盐分可能因为吸潮而导致腐蚀。因

凝汽器泄漏导致的汽轮机腐蚀主要发生在低压缸部分,尤其是2~5级。该区域位于干湿蒸汽转换区,由于氨的汽液两相再分配,氨大部分存在于汽相中;而蒸汽中各种盐类和无机酸的汽、水分配系数都非常低,这些盐类和无机酸更倾向于溶解在液相中。无论向锅炉里漏入何种氯化物(NaCl、NH₄Cl),在初凝水中都表现为HCl^[11],导致初凝水的pH降低,从而造成了低压缸叶片的腐蚀。另外,由于低压蒸汽带有湿分,因此低压缸的后级叶片很少发生积盐现象,因为湿蒸汽可以起到洗盐的作用。

3 凝汽器海水泄漏典型案例

3.1 案例 A

A厂1号机为350 MW超临界燃煤机组,2019年6月机组运行中突然发生凝汽器泄漏情况,凝结水氢电导率峰值达到8.3 μS/cm(标准值≤0.2 μS/cm)。由于现场高速混床无法及时再生、切换,并且精处理旁路门关闭不严,导致大量受污染的凝结水进入到系统。经离子色谱检测,主蒸汽氢电导率为1.9 μS/cm时,Cl⁻含量已高达202.8 μg/L(标准值≤1 μg/L)、Na⁺含量为83.9 μg/L(标准值≤2 μg/L),均严重超标。

2019年9月对1号机组进行检修,检查发现汽轮机低压缸第1级叶片积盐明显,3、4级叶片腐蚀严重,如图3~图5所示。积盐和腐蚀程度均达到DL/T 1115-2019《火力发电厂机组大修化学检查导则》^[12]规定的3类。



图3 低压缸第1级动叶片

Fig. 3 The first stage moving blade of LP



图4 低压缸第3级动叶片

Fig. 4 The third stage moving blade of LP

对低压缸第1级叶片白色沉积物和第3级叶片腐蚀产物进行了分析,结果见表3、表4。



图5 低压缸上第4级静叶

Fig. 5 The fourth stage upper stator blade of LP

表3 低压缸第1级叶片沉积物元素质量百分比分析(%)

Tab. 3 Elemental analysis result of the sediment of the first stage blade of LP(%)

Na	Fe	Mg	Ca	Si	Cl	S	O
35.20	5.43	3.23	0.93	1.83	41.29	0.88	9.97

表4 低压缸第3级叶片腐蚀产物元素质量百分比分析(%)

Tab. 4 Elemental analysis result of the corrosion products of the third stage blade of LP(%)

Fe	Cl	Cr	Na	Si	Cu	O
45.85	5.68	4.47	3.85	1.58	2.48	34.55

根据检测结果,低压缸第1级叶片沉积物的主要元素为Na和Cl,第3级叶片腐蚀产物的主要成分为Fe的氧化物。由于本次海水泄漏事件导致汽轮机低压转子积盐、腐蚀较为严重,检修期间对其进行了喷砂处理。

3.2 案例 B

B电厂4号机为300 MW亚临界汽包锅炉机组,某次启机过程中发生凝汽器严重海水泄漏。由于机组未配备凝结水精处理设备,导致大量海水直接进入热力系统,炉水pH值最低降至2.8,机组被迫停机。

事故发生后,对锅炉四管进行了割管检查,结果发现,水冷壁管向火侧发生了严重的垢下腐蚀,并且后屏过热器下弯头处积盐严重,还发生了爆管,具体如图6~图8所示。



图6 水冷壁管垢下腐蚀

Fig. 6 Under-deposited corrosion in water wall tube



图7 后屏过热器下弯头积盐

Fig. 7 Salt accumulation at lower elbow of rear platen superheater



图8 后屏过热器爆管

Fig. 8 Tube burst of rear platen superheater

对水冷壁腐蚀部位取样进行分析,金相照片如图9所示。金相分析结果为:珠光体球化等级为2~3级,无脱碳及微裂纹产生,金相组织正常。通过分析可知,虽然水冷壁管腐蚀较为严重,但尚未发生“氢脆”损伤。

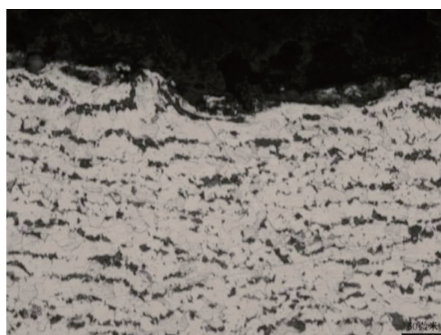


图9 水冷壁管腐蚀部位金相照片

Fig. 9 Metallograph of corrosion in water wall tube

3.3 案例 C

C电厂5号机为660 MW超临界燃煤机组,机组在某次运行过程中突然出现水汽品质急剧恶化的情况。短时间内,凝结水、给水、主蒸汽汽电导率表相继达到满量程,但并未停机,而是解列凝汽器半侧查漏。若干小时后,凝结水 Na^+ 含量已高达 $87\ 400\ \mu\text{g}/\text{L}$,超出标准值1万倍以上,并且机组多项运行参数异常,必须打闸停机,随后机组转入事故抢修。

经检查,汽轮机低压缸第4级叶片发生断裂,导致多根银管被击伤,造成海水大量漏入,汽轮机出现了严重的积盐情况,具体见图10、图11和表5。



图 10 调节级喷嘴形貌

Fig. 10 Morphology of adjustable stage nozzle



图 11 中压缸叶片形貌

Fig. 11 Morphology of moving blade of MP

表 5 汽轮机不同部位盐类沉积量

Tab. 5 The amount of salt deposition in different parts of steam turbine

部位	沉积量/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
高压缸调节级上隔板	40.29
高压缸调节级叶片	63.19
高压缸第 5 级动叶片	54.56
高压缸第 6 级动叶片	45.89
高压缸第 8 级上隔板	57.71
中压缸第 4 级上隔板	10.97
低压缸第 3 级动叶片	1.56
低压缸第 6 级动叶片	1.48

采用 X 射线荧光光谱法和 X 射线衍射法对沉积物进行了分析,结果如表 6 所示。

表 6 热力系统沉积物成分分析

Tab. 6 Component analysis of sediment in thermal system

部位	主要成分
低压缸第 6 级动叶片	$\text{FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4
低压缸第 3 级动叶片	$\text{FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4
中压缸第 4 级动叶片	NaCl
高压缸调节级叶片	NaCl
高压缸第 8 级动叶片	NaCl

由于本次泄漏事件导致热力系统受污染严重,之后采用加氨除盐水对热力系统进行了整体冲洗^[13]。

4 结 论

结合以上案例及相关分析研究,凝汽器海水泄漏对热力系统的影响主要体现在以下几方面:

- (1) 锅炉受热面结垢,水冷壁向火侧垢下腐蚀、氢脆爆管;
- (2) 水冷壁大面积酸性腐蚀;
- (3) 过热器、再热器 NaCl 沉积,不锈钢晶间腐蚀、应力腐蚀破裂;
- (4) 汽轮机高、中、低压通流部件积盐,机组带负荷能力降低;
- (5) 汽轮机低压缸相变区严重腐蚀、应力腐蚀破裂。

参考文献:

[1] 孙本达. 电力系统水处理事故案例分析[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
SUN Ben-da. Case analysis of water treatment accidents in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[2] 张维科,李俊苑,龙国军,等. 凝汽器换热管检漏装置应用现状及改进措施[J]. 热力发电,2020,49(1):125-128.
ZHANG Wei-ke, LI Jun-wan, LONG Guo-jun, et al. Leakage detection device of condenser heat exchanger tubes; application situation and improvement measures[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1):125-128.

[3] 宗绪东,吴鲁东. 海水冷却机组运行中凝结水钠离子异常升高分析及处理[J]. 电站系统工程,2021,37(2):46-48.

- ZONG Xu-dong, WU Lu-dong. Analysis and treatment of abnormal rise of sodium ion in condensate during operation of seawater cooling unit[J]. Power System Engineering, 2021, 37(2): 46-48.
- [4] 刘影恬,袁胜涛,陈光,等. 凝汽器换热管泄漏事件分析[J]. 科技资讯, 2018(15): 101-102.
- LIU Ying-tian, YUAN Sheng-tao, CHEN Guang, et al. Analysis on leakage event of condenser heat exchange tube[J]. Science & Technology Information, 2018(15): 101-102.
- [5] 魏传峰,程福林,张强. 海水冷却电厂凝汽器泄漏分析和处理[J]. 科技创新与应用, 2021(3): 126-128.
- WEI Chuan-feng, CHENG Fu-lin, ZHANG Qiang. Analysis and treatment of the condenser leakage in sea water cooling power plant[J]. Technology Innovation and Application, 2021(3): 126-128.
- [6] GB/T 12145—2016, 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量[S].
- GB/T 12145—2016, Quality criterion of water and steam for power plant and steam-generating equipment[S].
- [7] 陈庆辉. 沿海电厂凝汽器钛管泄漏原因分析与运行维护策略[J]. 节能, 2011(9): 73-75.
- CHEN Qing-hui. Cause analysis and maintenance strategy of titanium tube leakage of condenser in coastal power plants[J]. Energy Conservation, 2011(9): 73-75.
- [8] 周柏青,陈志和. 火力发电厂水处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- ZHOU Bai-qing, CHEN Zhi-he. Water treatment of thermal power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [9] 刘锋,张贵泉,张祥金,等. 某亚临界300 MW机组锅炉水冷壁爆管原因分析[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 146-150.
- LIU Feng, ZHANG Gui-quan, ZHANG Xiang-jin, et al. Cause analysis for tube burst of water wall in a subcritical 300 MW unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 146-150.
- [10] 孙本达,杨宝红. 火力发电厂水处理实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- SUN Ben-da, YANG Bao-hong. Questions and answers on practical technology of water treatment in thermal power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [11] 孙本达. 电力系统水处理培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- SUN Ben-da. Training materials of water treatment in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [12] DL/T 1115—2019, 火力发电厂机组大修化学检查导则[S].
- DL/T 1115—2019, Directive of chemistry check-up for unit maintenance in fossil plant[S].
- [13] 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 Hui-feng, LONG Guo-jun, YAO Jian-tao, et al. Application study on the treatment of steam turbine salt deposit in case closing condition[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 78-81.

(姜雪梅 编辑)