

# 燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉腐蚀泄漏的缓解与预防措施

魏海军

(四川川润动力设备有限公司, 四川自贡643100)

摘要: 针对燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉腐蚀泄漏问题, 从低压系统FAC腐蚀、蒸汽质量不良和水系统循环不良等3个方面, 结合实际案例对泄漏原因进行分析, 并提出缓解与预防措施。

## 0引言

燃气-蒸汽联合循环机组因其具有高效低耗、建设周期短、对环境污染小等优势而被广泛推广和使用。但是在燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉的运行和使用中, 会因为各种原因出现腐蚀泄漏问题, 导致机组停机, 不仅会使供电质量下降, 还会给发电企业带来了巨大的经济损失。基于此, 为保证燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉的安全稳定运行, 分析余热锅炉腐蚀泄漏的主要原因, 并提出缓解与预防措施。

## 1低压系统FAC腐蚀减薄导致泄漏

FAC (Flow Accelerated

Corrosion, 流动加速腐蚀)

现象主要发生在运行温度为120~180 °C的区域, 该温度区

域 $\text{Fe}_3\text{O}_4$

的溶解度最大, 在介质水流的不断冲击冲刷下, 该区

域形成的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 保护膜极易溶解和脱落, 并在水流的作用下,  $\text{Fe}^{2+}$

等被溶解物质的浓度降低, 并

且当水流的流速达到一定程度时, 已经处于疏松状态的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$

保护膜会随时

被冲刷, 导致低压系统设备

中需要被保护的金属直接暴露于水中, 打破了原有氧化

生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 保护膜反应的平衡, 反应的平衡被打破, 进而向着金属水解方向迅速进行[1]。对于燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉, 其低压系统的运行温度处于120~180 °C, 因此在省煤器、蒸发器上部的出口弯头处、汽包内被水流长时间冲击处等区域极易发生FAC, 导致金属失去保护膜而暴露出来, 进而造成金属材料不断变薄直至发生泄漏。

由FAC现象引起的腐蚀减薄泄漏的案例较多, 例如某厂低压省煤器出口管出现减薄泄漏问题, 导致停工维修, 泄漏的主要部位是省煤器中水流转向处, 因水流的转向冲击导致FAC; 又例如某厂出现低压汽包设备中的导水隔板变薄, 进而出现断裂, 最后引发锅炉泄漏问题, 也是由于FAC导致导水隔板的强度下降, 进而影响了蒸汽的质量。

### 1.1原因分析

FAC的发生存在两个过程, 一是腐蚀过程, 本质为化学反应过程; 二是流动加速腐蚀的过程, 本质为物理过程。其中, 化学过程为腐蚀发生的主要因素, 但是由于物理过程的存在, 导致腐蚀的发生机制产生了一定变化。经研究得出, 影响FAC发生的主要因素包括温度、pH值、含氧量、材料的耐蚀性以及流速。

#### 1.1.1温度

FAC产生的原因是 $\text{Fe}_3\text{O}_4$

受到温度条件的影响, 导致溶解度变化引起的, 加上工质水流的冲刷, 致使金属材料不断被侵蚀变薄, 最后被工质穿透, 导致

泄漏。因此, 当工

质处于静止状态时, 在排除了工质水

冲刷的影响和条件下, 腐蚀发生的速率与 $\text{Fe}_3\text{O}_4$

在工质中的

溶解度存在一定的关系

, 且溶解度与工质温度有关(表1)。当工质温

度处于较低水平时， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的溶解度相对较小，此时腐蚀发生的速率较低，当工质温度升高时， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的溶解度不断上升，此时腐蚀速率不断增加，当温度达到150℃时， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的溶解度最大，腐蚀速率也最高，当温度超过150℃时， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的溶解度下降，但是由于工质的氧化能量提升，逐渐地将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化，将 $\text{Fe}^{2+}$ 转变为 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，由于 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 质地紧密、难溶于水的特性，抑制了腐蚀现象，此时腐蚀速率随着温度的不断升高而逐渐回落。

表 1 腐蚀速率随工质温度变化情况

参数	测量值							
工质温度/℃	75	100	125	150	175	200	225	250
相对腐蚀速率/(mm/a)	0.28	0.51	0.85	1.0	0.84	0.59	0.29	0.16

#### 1.1.2 pH值

腐蚀速率与pH值的高低有着直接关系（表2）。随着pH值的不断升高，金属的相对腐蚀速率在不断下降，但是并不是pH值越高越好，当pH过高时，此时处于强碱性环境，若设备管道存在水垢的情况下，极易发生垢下碱浓缩现象进而导致腐蚀。

表 2 腐蚀速率随 pH 值变化情况

参数	测量值				
pH 值	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4
相对腐蚀速率/(mm/a)	38.1	30.3	21.7	11.5	10.9

#### 1.1.3含氧量

FAC是一种发生在ORP（oxidation-reduction potential，氧化还原电位）低于0的、还原性环境下的腐蚀现象。而工质水的含氧量越低则ORP越低，从而导致工质水减弱了将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化成膜的能力，并降低了使氧化膜处于活性状态的能力，氧化膜的减少和活性减弱会使相对腐蚀速率变大（表3）。

表 3 相对腐蚀速率随含氧量变化情况

参数	值					
工质水含氧量	0	$2 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-8}$	$6 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-8}$	$10 \times 10^{-8}$
相对腐蚀速率/(mm/a)	32.5	4.9	1.2	1.1	1.0	1.0

#### 1.1.4材料的耐蚀性

锅炉材料的等级与金属材料中稀有金属如Mo、Cr的含量有关，其含量越高，材料的等级越高，进而降低FAC的能力越强，FAC的腐蚀速率越低（表4），但是材料的耐蚀性无法彻底消除FAC的影响，仅能降低材料更换的频率，提高管道的使用年限。

表 4 相对腐蚀速率随合金含量变化情况

参数	值										
合金含量/%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
相对腐蚀	Mo	2.87	1.68	1.42	1.35	1.23	1.19	1.14	1.10	1.07	1.03
速率/(mm/a)	Cr	3.85	1.81	1.59	1.43	1.34	1.26	1.21	1.14	1.09	1.05
										1.04	

## 1.1.5工质流速

工质的流速对于FAC的影响程度最高，当工质的流速越高，钝化保护膜生成的环境越恶劣，金属材料表面形成钝化保护膜的难度也就越高，在失去保护膜的情况下，金属表面晶粒更易被工质冲刷，尤其在工质流向转变处，此处的冲刷力度最大，FAC现象也就最明显（表5）。

表 5 相对腐蚀速率随工质流速变化情况

参数	值									
工质流速/(m/s)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
相对腐蚀速率/(mm/a)	1.0	1.11	1.27	1.39	1.58	1.72	1.95	2.2	2.41	2.79

## 1.2缓解与预防措施

（1）提高给水的pH值。缓解与预防FAC最直接、最简单的方式就是通过添加碱性物质（例如氨、NaOH）提高给水的pH值。但是NaOH属于强碱，用量控制不当易形成垢下碱浓缩，造成二次伤害，因此加氨是最适宜的方式，给水pH值建议控制范围为 $9.6 \pm 0.2$ 。此时Fe-H<sub>2</sub>O体系的ORP与pH值处于平衡状态，更利于钝化膜的产生。

（2）提高给水的含氧量。采用给水加氧工艺，可推进Fe<sup>2+</sup>氧化成Fe<sup>3+</sup>的反应进程，并且在氧的去极化作用下，金属材料的表面形成Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>2</sup>O体系的ORP在50~300mV，处于完全钝化，灰黑色疏松状态的氧化膜在给水加氧的方式下，会转变为红色致密状态进而增加相应的保护能力。

（3）材料选择与机组设计。可在机组的设计阶段，尽量对流速、管道布置进行控制，避免发生强烈湍流情况，若难以避免，则需要通过材料的选择进行解决，选择对于FAC抗性较好的材料。在低压系统受热面水流弯头部位，在发生FAC腐蚀的重灾区，可采用替换管道材料的方式，利用Cr含量在0.5%以上的低合金钢进行替换，可对FAC腐蚀起到缓解与预防作用。

## 2蒸汽质量不良造成蒸汽侧腐蚀泄漏

## 2.1原因分析

由于蒸汽质量不良造成蒸汽侧腐蚀泄漏的现象也比较常见[2]。例如，某厂的3#锅炉由于蒸汽的质量不良，高压过热器进口段发生腐蚀泄漏，经检修发现高过受热面存在多处泄漏，主要漏点在距离高过冷段翅片上边界0.8m处。经泄漏原因探查发现，由于该厂的高压包内旋风分离器设备发生倾斜，导致蒸汽携带水，再加上高压饱和蒸汽取样管为单侧取样方式，未能及时地发现异常，导致在高压一级过热器入口处，不合格的蒸汽以及携带的水被加热、烘干，导致向火侧沉积大量的盐类杂质形成盐垢，并且由于温度过高，在盐垢下引发盐类杂质浓缩，进而出现垢下腐蚀，最终导致管道变薄而泄漏。

又如某厂1#炉启动时出现锅炉汽水损失率上升的异常情况，为探明汽水损失率异常上升的原因进行了隐患排查，发

现直接原因是1#高压过热器后的烟气温度比正常情况偏低，经进一步分析，怀疑导致烟温偏低的原因是可能是1#高压过热器发生了泄漏。通过停炉查漏，发现1#高压过热器的鳍片管在进口段存在多处泄漏。经泄漏原因探查，主要是由于给水质量差导致蒸汽质量不良，并且高压包内除雾洗汽铁丝网变形、脱落，且仅有一个蒸汽引出管，导致大量蒸汽从管口下方的两个除雾装置位置流入，使这两个除雾装置的流速、流量超限，发生振动进而使除雾装置产生位移、形变，导致蒸汽带水。由于蒸汽杂质溶解和机械携带的作用，蒸汽质量不良引发管道腐蚀、局部过热结垢，发生垢下腐蚀。

## 2.2缓解和预防措施

(1) 重视对高压汽包内旋风分离器状态的检查。应重点检查旋风分离器的固定情况，检查用于固定的螺丝是否松动、垫片是否损坏缺失、百叶窗是否牢靠、设备是否存在倾倒等，若出现松动、脱落、丢失等情况应及时分析去向，寻找残余部件，并及时加固与更换。

(2) 重视对高压汽包顶部汽水分离钢丝网（板）状态的检查。检查钢丝网是否位移，是否出现形变以及脱落等情况，若出现此类情况，则需要对钢丝网（板）的框体固定处进行加固处理，增添固定措施，减少相邻固定处之间的间隔。

(3) 落实与加强对高压汽包腐蚀情况的检查工作。可采用割管检查或者利用内窥镜检查的方式，割管检查切除处应设置在一级高压蒸汽侧的换热管进口1~3m处；内窥镜插入位置应设置在进口集箱出口连接短管（需割除）处。重点检查设备内部的腐蚀、结垢情况，当问题较为严重时需要对管道甚至设备进行更换。

(4) 落实对高压汽包水位的观察工作，及时发现异常波动，并且判断蒸汽的品质是否存在恶化问题，还需要加强对高压饱和蒸汽盐浓度变化情况的关注，出现异常应及时排查处理。此外，优化高压饱和蒸汽取样管取样方式，将单侧（左/右）取样优化为两侧（左+右）取样。

## 3水系统循环不良造成局部腐蚀泄漏

### 3.1原因分析

由于水系统循环不良进而对高压蒸发器产生不良影响，也是产生余热锅炉腐蚀泄漏的主要原因之一[3]。例如，某厂高压蒸发器发生的垢下腐蚀减薄泄漏案例，经排查，泄漏位置为迎烟侧首排、紧邻中心线右侧、集箱下方向3.6m标高处的管道。经泄漏原因探查发现，直接原因是旋风分离器固定处的螺丝松动，垫片在工质冲刷下发生破碎并脱落，脱落后的垫片流入并卡在管道内部，进而引起卡住处变形、变胀，正是由于管道内部垫片的堵塞，使管道可流动工质的截面变小，导致工质的流动速度降低，在冲洗联箱及炉前残留的铁屑等，因工质流动变慢未被冲走而遗留在管道中，在管道中不断沉积受热而结垢，并因膜态沸腾浓缩反应在垢下形成了闭塞电池，闭塞电池的作用使管道减薄，最终发生泄漏。总结泄漏的根本原因是，水系统循环不良，未能及时带走异物。

### 3.2缓解与预防措施

(1) 与避免高压蒸汽侧出现腐蚀泄漏对策与措施相同，应重点检查旋风分离器的固定情况，检查用于固定的螺丝是否松动，垫片是否损坏缺失，百叶窗是否牢靠，设备是否存在倾倒等，若出现松动、脱落、丢失等情况应及时分析去向，寻找残余部件，并及时进行加固与更换。

(2) 切实保障高压汽包的日常连续排污工作的效果，在排污过程中要确保所有的连排门处于全开状态，进而保证排污的彻底，以保证蒸汽品质合格，保证水循环系统运行的高效性与稳定性。落实对锅炉启动阶段的水冲洗工作，降低因结垢引发的垢下腐蚀现象的发生。

## 4结束语

综上所述，针对由于低压系统FAC腐蚀、蒸汽质量不良和水系统循环不良造成的余热锅炉腐蚀泄漏问题，可通过加强与落实锅炉及有关设备的检查工作、对水质进行质量控制、对水汽进行监督和把控等措施进行缓解和预防。此外，造成泄漏的原因还有很多，如酸洗作业不当、设备焊口存在缺陷等，相关设计和管理人员应根据实际情况采取针对性措施和对策，保证燃气—蒸汽联合循环机组余热锅炉的稳定运行。

## 参考文献



[1]胡海彬.压水堆核电厂二回路管道设计应对FAC策略[J].电力勘测设计, 2022(2): 29-33.

[2]程静, 徐艳, 黄容.工业锅炉饱和蒸汽湿度的运行控制[J].中国特种设备安全, 2021, 37(9): 16-19.

[3]周洋, 伏文, 陈晨, 等.某锅炉水冷壁爆管原因分析[J].工业水处理, 2022, 42(4): 170-174.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/207731.html>