

# 燃煤火电厂锅炉“四管”的高温腐蚀

齐慧滨 郭英倬 何业东 王德仁

(北京科技大学腐蚀与防护中心,北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室 北京 100083)

**摘要** 燃煤火电厂锅炉的高温腐蚀主要发生在受热面的“四管”,即水冷壁管、过热器管、再热器管和省煤器管。腐蚀的主要类型是硫腐蚀、氯腐蚀、水蒸汽腐蚀和钒腐蚀。本文综述了燃煤火电厂锅炉存在的典型高温腐蚀现象和机理,并简要的介绍了一般防腐蚀措施。

**关键词** 燃煤火电厂 锅炉 高温腐蚀

**中图分类号** TG172.32 **文献标识码** A **文章编号** 1002-6495(2002)02-0113-04

## HIGH TEMPERATURE CORROSION IN BOILERS OF COAL FIRED POWER PLANTS

QI Huibin, GUO Yingzuo, HE Yedong, WANG Deren

(Corrosion and Protection Center, Key Lab. of Corrosion, Erosion and Surface Tehcnology of Beijing,  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**ABSTRACT** High temperature corrosion takes place predominantly on the fired - side of the tubes, including water cooling tubes, over - heater tubes, re - heater tubes and coal saver tubes (namely the “four tubes”), in the boilers in coal fired power plants. The major corrosion forms are sulfidation, chloridation, oxidation in water vapour and hot corrosion induced by vanadate. The high temperature corrosion processes and mechanisms have been reviewed and the measures for prevention briefly summarized.

**KEY WORDS** coal - fired power plants, boilers, high temperature corrosion

在锅炉事故中,受热面管(水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管,又称“四管”)的爆漏损坏事故最为严重和常见,约占锅炉事故的 71.7%<sup>[1,2]</sup>。火电厂锅炉的“四管”爆漏引起的非计划停运时间占机组非计划停运时间的 40%左右,少发电量占全部事故少发电量的 50%以上,是影响发电机组安全经济运行的主要因素<sup>[3]</sup>。

锅炉“四管”所遭受到的腐蚀包括炉管内部的水、汽腐蚀和炉管外部的烟气腐蚀。由于锅炉设备结构材料、运行方式和使用燃料的差别,烟气侧腐蚀较为复杂。本文将着重介绍锅炉“四管”的高温腐蚀。

## 1 锅炉烟气侧高温腐蚀

### 1.1 特点及原因

火电厂锅炉的水冷器、过热器和再热器的烟气

侧存在的高温腐蚀与部件工作环境的温度、气体成分、煤质成分和煤粒的运动状况等因素有关,具有腐蚀速度快、腐蚀区域相对集中以及突发性的特点。

如果煤粉在气流的作用下,在贴壁附近燃烧,使其周围区域严重缺氧,形成还原性气氛,导致炉内腐蚀性气氛增强。在含氧量较高的区域 H<sub>2</sub>S 的含量较低;而在含氧量较低且 CO 含量较高的区域 H<sub>2</sub>S 的含量较高<sup>[4]</sup>,导致严重的高温腐蚀。当蒸汽温度高于 565 时,燃料灰分中含有较多的 S、V 及碱性物质等成分时,往往在覆盖有熔盐或积灰层下的管壁上发生烟灰腐蚀。燃料中含有的 S、V 及碱性物质越多,炉管金属的耐蚀性、耐热性越差,腐蚀越易发生;管壁温度越高,腐蚀越严重。

飞灰也是造成高温腐蚀的主要因素<sup>[2,4~8]</sup>,含有较多未燃尽煤粉的气流直接冲向受热管时,除了造成受热管附近的温度增加和形成还原性气氛外,还将直接冲刷金属管壁,导致磨损和腐蚀的发生。由于观察到产生高温腐蚀的水冷壁管表面存在疏松的

金属腐蚀与防护国家重点实验室资助项目

收到初稿:2001-03-07;收到修改稿:2001-06-04

作者简介:齐慧滨,男,1964年生,博士,副教授

Tel:010-62333957 E-mail:huibinqi@public.fhnet.cn.net

焦渣及 5 mm 厚的浮灰层,也有人认为不存在冲刷磨损,否则这些表层结构就不应存在<sup>[9]</sup>。

烟气侧高温腐蚀还与低熔点的沉积物有关。文献[10]给出了与烟气侧腐蚀有关的一些沉积物组元熔点,重要组元的熔点均在 400 ~ 900 范围内,这也是锅炉“四管”烟气侧的工作温度范围,当燃料中存在这些组元时就会促进“四管”的高温腐蚀。

锅炉烟气侧发生的高温腐蚀主要为硫腐蚀、氯腐蚀和钒腐蚀。

## 1.2 硫腐蚀

### 1.2.1 SO<sub>2</sub> 和 SO<sub>3</sub> 的生成

锅炉燃料普遍含 S,在燃烧过程中 S 几乎都氧化成 SO<sub>2</sub>,其中约有 6% ~ 7% 的 SO<sub>2</sub> 进一步氧化成 SO<sub>3</sub><sup>[11,12]</sup>。在高温状态下,SO<sub>2</sub> 和 SO<sub>3</sub> 均呈气态。由于 SO<sub>2</sub> 不易和高温水蒸汽结合,对锅炉受热面的危害不大,但 SO<sub>3</sub> 能与水蒸汽结合生成 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,对受热面有较强的腐蚀作用。

SO<sub>3</sub> 生成量与锅炉结构、燃烧室容积热强度、过剩空气系数及燃料品种等有关。锅炉型式不同,煤的燃烧率不同,生成 SO<sub>2</sub> 和 SO<sub>3</sub> 的量亦不同。链条炉约 70%、煤粉炉约 85% ~ 90%、旋风炉约 95% 以上的 S 燃烧生成 SO<sub>2</sub> 和 SO<sub>3</sub>。SO<sub>2</sub> 生成量高,则 SO<sub>3</sub> 的含量随之升高。烟气中含 O 是生成 SO<sub>3</sub> 的基本条件,含 O 量越高,SO<sub>3</sub> 生成量越多。此外,管壁温度对 SO<sub>3</sub> 的形成也有影响,且烟气中的飞灰对 SO<sub>2</sub> 氧化能起催化作用,在 700 ~ 800 温度范围内尤为强烈。

硫腐蚀又可分为硫化物型腐蚀和硫酸盐型腐蚀。

### 1.2.2 硫化物型腐蚀

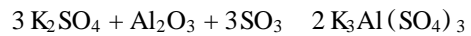
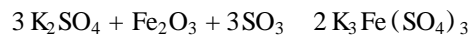
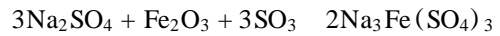
硫化物型腐蚀是由燃煤中的黄铁矿硫造成的,其腐蚀过程包括(1)硫的形成;(2)铁和氧化亚铁的硫化;(3)硫化亚铁的氧化。此外,H<sub>2</sub>S 也可直接与管壁金属反应。由于 H<sub>2</sub>S 是还原性介质,比氧化性介质更具腐蚀性。H<sub>2</sub>S 的浓度越高,壁温越高,腐蚀速度越快。硫化物型腐蚀持续发展的条件是:(1)黄铁矿颗粒能到达壁面;(2)近壁附近是还原性气氛;(3)有较高的壁面温度。一般认为应大于 350<sup>[13]</sup>。

### 1.2.3 硫酸盐型腐蚀

燃用含高 S 和碱性物质的燃料,常会在锅炉的受热管高温部位产生这种类型的腐蚀。腐蚀过程主要有两种方式:

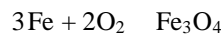
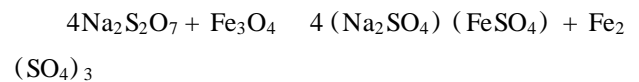
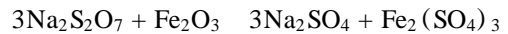
(1)在炉内高温下形成有粘性的碱金属硫酸盐 M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (M = Na, K),吸收 SO<sub>3</sub> 并与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应,生成低熔点的复合硫酸盐 (Na, K)<sub>3</sub>(Fe, Al)(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>,文献[14]给出了复合硫酸盐和一些相关化合物的熔点。当 Na<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/K<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 混合物中 K 与 Na 的摩尔比值在 1:1 与 4:1 之间时,熔点

最低,达到 550<sup>[15,16]</sup>。管壁表面的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜被复合硫酸盐熔解破坏,使管壁继续腐蚀。硫酸盐型腐蚀主要包括如下反应:



(2)熔融的焦硫酸盐参与反应。焦硫酸盐存在的温度范围为 400 ~ 590,受气氛中 SO<sub>3</sub> 含量的影响<sup>[17]</sup>。当 SO<sub>3</sub> 的浓度低于其存在温度所要求的浓度时,焦硫酸盐不会存在。

在 400 ~ 480 的温度范围内,烟气侧的腐蚀以焦硫酸盐为主。焦硫酸盐与金属表面的氧化膜反应形成相应的硫酸盐,而硫酸盐在此温度分解为不具保护性的金属氧化物<sup>[10]</sup>。外露的金属进一步氧化而导致腐蚀加速。



碱金属硫酸盐,特别是 M<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 对管壁的腐蚀起主要作用<sup>[18]</sup>。腐蚀过程包括:

在金属表面 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的催化作用下,SO<sub>2</sub> 转变成 SO<sub>3</sub>;

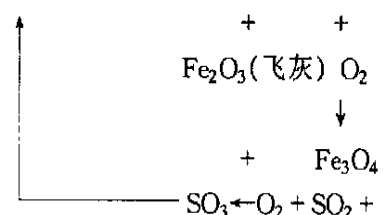
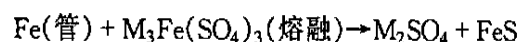
熔融碱金属硫酸盐的形成;

合金中的 Fe、Ni 和 Mo 扩散到熔融碱金属硫酸盐中,Fe、Ni 的氧化物在熔盐表面沉淀;

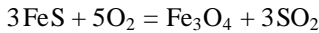
氧化膜和硫化物层断裂和剥落,熔盐进入断层中,熔盐中的硫化物分解;

不断重复、步骤。

熔融复合硫酸盐对腐蚀的影响随温度而改变<sup>[14]</sup>,它在 550 ~ 710 是稳定液态(熔融状态),小于 550 时是固态,大于 710 则分解出 SO<sub>3</sub> 而成正硫酸盐 (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 和 M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)。复合硫酸盐在 600 ~ 710 腐蚀性最为强烈,只要有 O<sub>2</sub> 存在,就可持续地腐蚀管壁金属。其循环反应过程可表示如下:



但也有文献<sup>[9]</sup>对水冷壁管材金属高温腐蚀机理和过程提出另一种解释:由于腐蚀产物的成分中以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主,没有  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,所以认为反应



可能不存在。

**1.2.4 防止硫腐蚀的方法** 硫腐蚀的起因是  $\text{SO}_3$  的形成,防止腐蚀的主要措施应是减少导致  $\text{SO}_3$  生成的因素。燃料和壁温因素是不易改变的,而改进燃煤设备和燃烧工况可减轻和避免硫腐蚀。

### 1.3 氯化物型腐蚀

燃用高氯化物燃料时,炉内存在氯化物型腐蚀,燃煤中的氯在燃烧过程中是以  $\text{NaCl}$  的形式释放出来的, $\text{NaCl}$  易与  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  反应,生成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{HCl}$  气体<sup>[15]</sup>。试验表明氯化物型腐蚀在 400~600 速度最快。氯化物型腐蚀发生的条件,一是有足够高浓度的  $\text{HCl}$  存在,一般应 0.35%;二是近壁处是还原性气氛,存在  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$ 。氯化物型腐蚀单独存在的可能性不大,主要是  $\text{HCl}$  作为一种破坏氧化膜的腐蚀性气体,起到加速其它类型腐蚀的作用<sup>[18]</sup>。受热面处为氧化性气氛可减轻氯化物型腐蚀<sup>[19]</sup>。

### 1.4 钒腐蚀

**1.4.1 钒腐蚀机理** 重油中的  $\text{V}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{S}$  等元素,燃烧后会变成  $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  等物质。 $\text{V}$  是引起油灰腐蚀的主要成分,当  $\text{V}$  与其它组元化合时,形成了低熔点化合物<sup>[20]</sup>。这些化合物沉淀于过热器和再热器及其紧固件的表面,呈熔融态时破坏管壁表面具有保护性的氧化膜,加快腐蚀速率。钒腐蚀的机理有多种解释,尚无定论。

$\text{V}$  的化合物对锅炉的高温腐蚀过程起着重要的作用,腐蚀的程度取决于高温油灰的成分,特别是油灰中的  $\text{V}$ 、 $\text{Na}$  化合物的含量。 $\text{Na}$  被认为是与钒反应生成低熔点化合物的主要元素。钠钒酸盐化合物在 534 就能熔化。在高温下所有的钒化合物均呈熔融状态,钒化合物中含碱金属可促进腐蚀,加入硫后会进一步促进腐蚀。

虽然燃料中  $\text{V}$  的浓度相当低,一般少于  $300 \times 10^{-6}$ ,但  $\text{V}$  在油灰中会出现浓缩,80%的管壁沉积物中都含有  $\text{V}$ 。由于浓缩的影响,很难确定燃料中不会引起腐蚀的安全含  $\text{V}$  量。沉积和浓缩会受到锅炉操作和设计及燃料中其它成分的影响。

### 1.4.2 防止钒腐蚀的方法

- (1) 采用提高烟气流速,增加吹灰措施;
- (2) 低氧燃烧,可降低氧浓度,防止金属氧化和  $\text{V}_2\text{O}_5$  的生成。控制管壁温度,使其低于开始出现腐

蚀的温度,将易受钒腐蚀的部件布置于低温区;

(3) 在燃料中加入添加剂来提高灰分附着物的熔点,这类添加剂有  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  等,它们可以改善附着物的物理和化学性质,使硬的或稠密的附着物变成疏松的颗粒状,易于从管壁上脱落,从而使腐蚀速度降低 1/2~1/3,但受热面可能出现堵灰<sup>[21]</sup>。文献<sup>[22]</sup>给出了  $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  对沉积物腐蚀性影响的关系图<sup>[22]</sup>。

## 2 锅炉受热面水、汽侧的高温腐蚀

受热面水、汽侧的高温腐蚀种类有:水蒸汽氧化腐蚀、垢下腐蚀(氢腐蚀、碱腐蚀、介质浓缩腐蚀)、氧腐蚀等。

### 2.1 水蒸汽氧化腐蚀

当蒸汽过热温度在 450 以上时,蒸汽与碳钢发生反应生成  $\text{Fe}$  的氧化物,使管壁减薄。汽水腐蚀是过热器受热面中的主要腐蚀过程,属于均匀腐蚀,一般不很强烈。大型火力发电锅炉的过热器和再热器使用的是奥氏体不锈钢,在运行一段时间后,钢管内壁生成具有双层结构的氧化皮,外层由  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  锈层和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  锈层组成,内层由含  $\text{Fe}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$  的尖晶石型氧化物组成。氧化皮生长到一定厚度,其外层在停炉时会发生剥落,并堆积在过热器管的 U 形弯曲部位。当锅炉启动时阻塞了蒸汽的回路,因而易于发生因过热而引起的喷泄事故。一部分氧化皮飞溅到涡轮叶片上,成为磨损腐蚀的原因。这样的事故往往发生在蒸汽温度较高的锅炉,在蒸汽温度较低的锅炉则几乎没有发生这类事故。如果锅炉中  $\text{O}$  量较少,则外层  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  锈层消失。

当不锈钢接触水蒸汽时,表面生成  $\text{Cr}$  的氧化物,铁扩散到其缺陷部位而生成氧化铁;另一方面,氧扩散到内部而形成内氧化层。

从动力学来看,水蒸汽氧化服从抛物线规律,但随着时间的延长则逐渐偏离该规律。在 540~570 时的氧化皮厚度可用下列关系式表示:

$$Y(\text{mm}) = 3.59 \times 10^{-4} [t(\text{h})]^{1/2}$$

氧化皮生长的速度控制步骤是  $\text{O}$  和  $\text{Fe}$  在内层氧化皮中的扩散过程<sup>[23]</sup>。因此,即使外层剥离掉,水蒸汽氧化速度也不会快。

### 2.2 垢下腐蚀<sup>[3,24~27]</sup>

垢下腐蚀是造成锅炉损坏的另一重要形式,腐蚀速度快。目前,对这种腐蚀发生的机理尚无统一的认识。

一般认为,当受热面金属表面的沉积物中含有氧化铁和氧化铜等杂质时,这些氧化物电位高,成为

阴极,而管壁的电位低,为阳极.阳极的 Fe 不断溶出,与氧化铁和氧化铜发生反应.



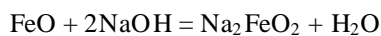
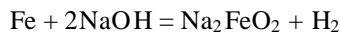
也有人认为,水中的碳酸盐在锅炉内水解生成 NaOH,或者氯化物( $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ )水解生成 HCl,使炉水局部浓缩生成浓碱或酸,破坏  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  保护膜,使管壁金属局部暴露,产生腐蚀.

还有一种观点认为温差是造成水冷壁管向火侧金属低电位的主要原因,加之炉水浓缩形成的强电解质溶液,当热负荷造成金属保护膜破坏时,发生多种形式的电化学作用而形成垢下腐蚀.

垢下腐蚀一般发生在高热负荷区,是大容量高参数锅炉常见的腐蚀方式.

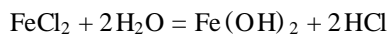
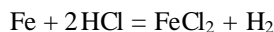
垢下腐蚀按其腐蚀原理分为酸性腐蚀和碱性腐蚀.

(1) 碱性腐蚀:当炉水呈碱性时,炉水中含游离 NaOH 的浓度较高( $\text{pH} > 13$ ),浓缩后会产生强烈的晶间腐蚀.锅炉钢管的金属本身或者表面膜都可能因形成铁酸盐而溶解.其反应式为:



对于碳素钢,NaOH 的危险浓度下限为 5 ~ 10%,低于这个浓度,一般不会产生腐蚀.如果遇到过热,使得热负荷增大,管内炉水浓缩,发生加速腐蚀.向火侧受热集中,附着物较厚,优先受到腐蚀.

(2) 酸性腐蚀:若炉水呈酸性时,游离物质腐蚀管材,并放出  $\text{H}_2$ ,腐蚀产物在炉水中分解又放出了游离酸使腐蚀得以延续下去.其反应式为:



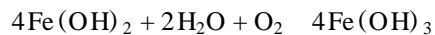
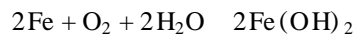
上述反应形成的氢易于向管壁金属扩散进入晶界,与铁碳化合物反应生成  $\text{CH}_4$  和铁素体,造成烟火侧的管壁金属脱碳.因  $\text{CH}_4$  是大分子,在金属中扩散系数低,聚集在铁素体晶界上.当  $\text{CH}_4$  的压力足够大时,就形成晶界裂纹,裂纹逐渐扩展,使钢的强度严重降低,最终发生脆断.

文献[28]给出了蚀坑内离子浓度变化及酸碱性条件转变与蚀坑深度的关系<sup>[28]</sup>.当覆盖有多孔性氧化层的金属表面溶液处于沸腾状态时,溶液便从小孔流向基体金属表面,而蒸汽则从大孔逸出.多孔层中的溶液浓度有可能增加几个数量级.在这种情况下,沸腾热传导效应使坑内形成的稀酸溶液浓度增加.多孔层沉积物越厚,这种浓缩作用就发展得越

快.

### 2.3 氧腐蚀

当锅炉给水中残留有溶解氧和  $\text{CO}_2$  时,管壁金属中的纯铁与杂质之间产生电位差,形成无数个微小的腐蚀电池.电极电位低的纯铁为腐蚀电池的阳极,电极电位高的杂质为腐蚀电池的阴极,阳极铁失去电子成  $\text{Fe}^{2+}$  进入水膜.同时,在阴极溶解氧得到电子与水结合生成  $\text{OH}^-$ , $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$  结合生成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,而  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  是不稳定的,管壁金属便很快遭到腐蚀,总反应为<sup>[31]</sup>:



$\text{Fe}(\text{OH})_3$  及其脱水产物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  是红褐色铁锈的主要成分.而文献<sup>[27]</sup>认为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,在锅炉运行氧含量减少时,作为腐蚀电池的阴极去极化剂,发生还原反应,生成低价氧化铁( $\text{FeO}$ ),随着氧含量的增加,又被氧化成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,腐蚀随之发生恶性循环.

当炉水中同时有  $\text{O}_2$  和  $\text{Cl}^-$  存在时,会使腐蚀程度剧烈增强并产生局部点腐蚀,但水中  $\text{O}_2$  的溶解度随  $\text{Cl}^-$  浓度的增加而减少.

### 2.4 防止水、汽侧腐蚀的方法

1 控制 pH,铁素体钢在酸性溶液中易受到腐蚀,炉水的 pH 介于 8.5 ~ 10 之间时,腐蚀速率最低.推荐 pH 在 7.5 ~ 10 的范围内;

2 确保除氧器的正常运行,使炉水中的氧含量保持在规定的范围内;

3 保证连续排污、定期排污,及时除去水中的固形物;

4 加强锅炉受热面管的化学监督和金属监督工作.

## 3 结语

火电厂锅炉的“四管”高温腐蚀类型主要为硫腐蚀、氯腐蚀、水蒸汽腐蚀和钒腐蚀,但并不限于这几种,而且腐蚀的过程也是多种类型腐蚀互相影响、共同作用的结果.已有对锅炉“四管”用钢高温腐蚀过程的研究多出“四管”爆漏后所进行的事后分析,实验室模拟试验有过文献报道<sup>[29]</sup>,但系统研究锅炉“四管”高温腐蚀机理的工作却开展得不充分,实验室模拟试验的评定方法也少见研究.这显然不利于深入地研究锅炉的高温腐蚀问题,更不利于做好锅炉的高温防腐蚀工作,因此亟待加强这方面的工作.

(下转第 119 页)

$$\text{Fe}^{++} \cdot \text{Fe}^{+++} + \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{O}_2} \rightarrow \text{FeO}, \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}, \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ 等}$$

以上腐蚀反应所需的 O 在循环冷却水通过凉水塔时不断地得到补充,加之冷却水的 pH 值为 6~9,正是 O 作为阴极去极化剂的适当条件,使得腐蚀过程能持续地进行下去。

在腐蚀过程中,O 去极化生成的氢氧根易与亚铁离子生成氢氧化亚铁。氢氧化亚铁溶解在溶液中直至达到饱和,然后在距阳极区不远的地方呈固体析出。亚铁化合物的外层被溶解氧氧化成高铁化合物,如  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{FeOOH}$  等。高铁化合物比亚铁化合物难溶得多,因而也在距阳极区不远的地方析出。于是又有一些亚铁离子通过沉淀的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  或  $\text{FeOOH}$  层扩散出来,并在到达表面时又被氧化成高铁化合物而沉淀。一个活性阳极能不断产生亚铁离子,亚铁离子通过扩散和电化学作用向  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  或  $\text{FeOOH}$  与水的界面迁移,其扩散速度要比 O 通过沉淀层向金属表面扩散速度大得多。因此,腐蚀过程实际上是一个不断起作用的氧浓差电池,其结果是在阳极区形成的小蚀坑很快就被天蓬状的腐蚀产物所覆盖,这种覆盖物就是在换热管外壁形成的大大小小的鼓包,通常称之为结核。在结核下面就是蚀坑,往往是上面结核越大,下面的蚀坑越深,直至最后出现穿孔。

在冷却水系统中,金属腐蚀的决定因素是水质是否稳定,也就是在金属——水界面上能否生成一层不透性的完整保护膜,包括钝化膜、有机吸附膜和薄垢等。当金属表面无有效保护膜时,其腐蚀速度取

决于溶解氧向金属表面的扩散速度。另外,影响冷却水对金属腐蚀还包括其它因素:进入水中的无机酸、硫化物、二氧化硫等直接影响水的 pH 值;溶解性固形物,特别是氯化物和硫酸盐含量的增加,会加剧腐蚀;水中悬浮物和油污的增加会引起局部积污,使保护膜不易生成或形成浓差电池,产生坑点腐蚀;各部位操作温度和水流速不同也会形成温差和浓差电池,产生局部腐蚀等。综上所述,可以认为造成高压水冷器 E5014 换热管外壁腐蚀的主要原因是:循环水中的溶解氧腐蚀。硫的存在也会有一定的影响。

### 3 防腐措施

由于该高压水冷器已更换新的换热管,因此为保证其长期安全运行,必须采取相应的防腐措施。可从两方面着手:一是控制循环水中 O 的含量,保证水质稳定,而投入合适的缓蚀剂是有效和比较经济的防护措施;二是提高换热管的防腐性,对换热管外壁进行表面防护层处理,如化学镀 Ni-P、镀 Zn、镀 Al 等;另外针对高压水冷器的结构情况,也可采取阴极保护措施。

### 参考文献:

- [1] 胜利石油化工总厂炼油厂. 炼油厂设备的腐蚀与防腐. 北京:石油工业出版社,1978. 50
- [2] 中国石油化工总公司石油化工规划院. 炼油厂设备加热炉设计手册(第四分篇:炼油厂的腐蚀与防腐)(内部发行), 1986. 130

(上接第 116 页)

### 参考文献:

- [1] 赵旺初. 锅炉技术,1996,(6):14
- [2] 吴含蕴,卢尔康. 中国电力,1995,(5):26
- [3] 李凤瑞,池作和等. 锅炉技术,1998,(10):25
- [4] 赵晴川. 华东电力,1998,(7):10
- [5] 李俊. 化工设备与防腐蚀,1998,(3):47
- [6] 深迫纪夫著,乐海南译. 锅炉技术,1989,(10):25
- [7] 戚德芳. 浙江电力,1997,(4):17
- [8] 吴从才. 浙江电力,1999,(1):13
- [9] 李辛庚,雒利勇,傅敏,吴军. 山东电力技术,1997,(4):72
- [10] Fichera M,Leonardi R and Farina C A. Electrochimica Acta, 1987,32(6):955
- [11] 吕慧. 湖南电力,1997,(3):30
- [12] 刘忠海. 压力容器安全技术,1998,(4):38
- [13] 徐夕仁,马春元,李京. 山东电力技术,1998,(6):25
- [14] Srivastava S C, Godiwalla K M. Journal of Material Science, 1997,32(4):835
- [15] 陈梅倩,王哲,李敬. 中国电力,1997,(8):32
- [16] 张家骅. 锅炉压力容器安全技术,1994,(1):47
- [17] Ahila S and Ramakrishna Iyer S. Tool & Alloy Steels,1992, 26(2-3):45
- [18] Godlewski K. Werkstoffe und Korrosion,1988,39:67
- [19] 张鹤声,简瑞民. 能源技术,1994,(4):24
- [20] Paul L D and Seeley R R. Corrosion,1991,47(2):152
- [21] 龚洵洁. 中国电力出版社,1998,5
- [22] Jun - Ichi Shigeta, Yoshio Hamao, Hiroshi Aoki, Ichiro Kajigaya. Journal of Engineering Materials and Technology,1987, 109:299
- [23] 张桂芝译. 华北电力技术,1991,(12):55
- [24] 于延春. 锅炉压力容器安全技术,1998,(1):35
- [25] 王鉴. 冶金动力机械,1998,(3):45
- [26] 刘岭梅译. 锅炉压力容器安全技术,1996,(3):40
- [27] 钟桥,赵林生译. 中国锅炉压力容器安全,1994,10(2):30
- [28] 黄秋龙. 华北电力技术,1990,(5):32
- [29] 戴广华,初立杰. 东北电力技术,1997,(1):52