



除氧器及其 改造和运行经验

电力工业部生产司

21.4

水利电力出版社

内 容 提 要

本书扼要论述了火力发电厂热力设备氧腐蚀的特征及其危害、热力除氧的基本原理、除氧器及其热力计算方法，较为详细地介绍了多年来我国许多电厂在除氧器结构和运行方面的改进经验，此外，对除氧器的调整试验、锅炉给水的辅助除氧方法以及化学监督等也作了简要的叙述。

本书可供从事除氧器改造、检修及运行的同志学习使用，也可供从事汽轮机、锅炉和化学专业有关人员在工作实践中参考。

除氧器及其改造和运行经验

电力工业部生产司

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 5 $\frac{1}{2}$ 印张 120千字

1979年9月第一版 1979年9月北京第一次印刷

印数 0001—7530 册 每册 0.45 元

书号 15143·3488

前 言

锅炉给水的溶氧腐蚀是发电厂热力设备腐蚀损坏的主要类型之一。为了提高给水品质、减少给水溶氧，保证发电设备的安全经济运行，必须加强对除氧器的运行调整和维修工作，使其能经常处于良好的工作状态，从而保证给水溶氧在规定范围之内。不少电厂为了提高除氧器的效率及出力，对其原有设备的结构和系统进行了技术改造，收到了较好的效果。

目前，热力设备的防腐工作仍然是电力生产中的一个薄弱环节，因此，搞好除氧器运行和提高除氧器效率是防腐工作中的一项重要任务。

为了进一步搞好给水除氧工作，在各电厂总结其除氧器的结构改造和运行经验的基础上，我司组织杨树浦发电厂、抚顺发电厂、黑龙江省电力局中心试验所、福建省水电局电力中心试验所和水电部热工研究所的同志编写了这本《除氧器及其改造和运行经验》。书中除着重介绍除氧器的结构改造和运行经验外，还就给水除氧的重要性、除氧原理、除氧器及其有关设计计算、化学监督等作了阐述。本书可供从事除氧器改造、检修和运行的同志学习使用，也可供从事汽轮机、锅炉和化学专业的有关人员在工作中参考。

本书在编写过程中，武汉水利电力学院、东北电业管理局、湖北省电力中心试验所、阜新发电厂、以及大连第二发电厂等提供了不少宝贵意见。由于编写时间仓促，收集的材

料也不够齐全，书中难免有不妥和错误之处，希读者批评指正。

电力工业部生产司

1979年3月

目 录

前 言

第一章 给水除氧的重要性	1
第一节 氧腐蚀及其特征	1
第二节 氧腐蚀的部位	5
第三节 影响氧腐蚀速度的因素	6
第四节 氧腐蚀的危害	9
第二章 热力除氧原理及设备	12
第一节 热力除氧的基本原理	12
第二节 除氧器的分类	19
第三节 淋水盘式除氧器	21
第四节 喷雾—填料式除氧器	32
第五节 真空式除氧器	64
第三章 除氧器的改造经验	85
第一节 喷雾—淋水盘式除氧器	86
第二节 喷雾—Ω填料式除氧器	102
第三节 喷雾—溢水槽栅盘式除氧器	111
第四节 喷雾—角钢栅盘式除氧器	114
第五节 喷雾—扁钢栅盘以及喷雾—半圆栅盘式除氧器	120
第六节 喷雾—蒸汽喷盘式除氧器	123
第七节 提高除氧效果的辅助措施	126
第四章 除氧器的运行和调整	139
第一节 提高运行稳定性的经验	139
第二节 除氧器的检修	146

第三节	高压除氧器的滑压运行	148
第四节	除氧器的调整试验	149
第五章	给水除氧的辅助方法与化学监督	153
第一节	给水的化学除氧	153
第二节	凝汽器的真空除氧	160
第三节	化学监督	163
附 录	国产动力锅炉配套除氧器的型号及规范	166
参考资料		169

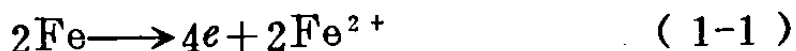
第一章 给水除氧的重要性

给水溶氧是造成发电厂热力设备腐蚀的主要原因。在热力系统中，水、汽的温度一般都较高，氧腐蚀速度较快，再加上腐蚀具有局部和延续性等特点，因而它对热力设备有很大的危害。溶氧腐蚀造成的爆管漏泄事故，会使锅炉被迫停运，缩短设备使用寿命。因此，搞好锅炉给水除氧，防止热力设备腐蚀，对保证电厂安全经济运行是十分重要的。

第一节 氧腐蚀及其特征

在锅炉给水系统中，当给水的含盐量超过一定范围（一般为电导率大于0.15微姆欧/厘米^①），水中溶氧是引起钢铁材料电化学腐蚀的一个重要因素。在这个腐蚀的过程中，氧是去极化剂，铁是阳极因而遭到腐蚀。其反应的过程为：

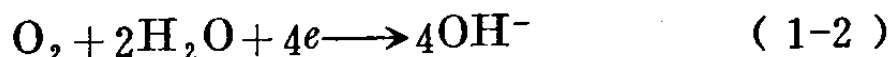
1. 铁素体阳极放出自由电子



Fe^{2+} 进入溶液。

2. 自由电子从阳极铁素体流至阴极渗碳体。

3. 水中溶氧在阴极渗碳体接受电子



① 0.15微姆欧/厘米的电导率，是近代大容量高参数锅炉“中性盐”处理的给水标准。

反应产物 OH^- 也进入溶液。由反应式(1-1)、(1-2)以及自由电子的转移这三个过程综合组成一个完整的氧腐蚀过程。

在氧腐蚀过程中，整个腐蚀反应的速度是受阴极过程所控制，而阴极反应则决定于水中溶氧扩散到阴极表面的速度，因此溶氧腐蚀又称为氧浓度控制的腐蚀。任何能加速氧扩散速度的因素，都会加速阴极去极化的过程而加速腐蚀；同样，任何能阻滞氧扩散速度的措施都会加速阴极的极化而抑制腐蚀。

氧腐蚀一般是不均匀的。当钢铁受到水中溶氧腐蚀时，常常在其表面形成许多小型的鼓包，其直径小至1毫米，大至几十毫米，氧腐蚀的形状大致如图1-1所示。在这类腐蚀中，当直径和深度大致相等时，称为点腐蚀；当直径大于深度时，称为溃疡性腐蚀；当直径远小于深度时，则称为针孔形腐蚀。

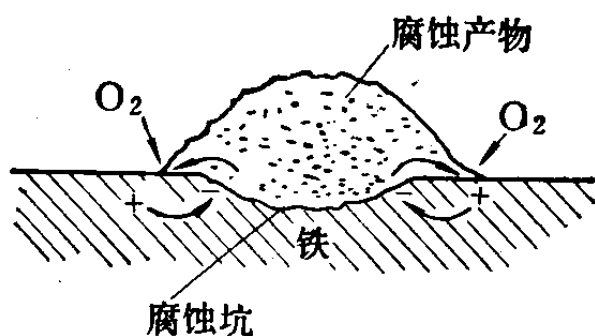


图 1-1 氧腐蚀示意

氧腐蚀是一种全面的微电池腐蚀，阴极面积等于阳极面积，阴阳极靠得很近。阳极产物 Fe^{2+} 和阴极产物 OH^- 进入溶液后即形成氢氧化亚铁 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的溶度积为 10^{-12} ，它是一个很弱的碱，其水溶液的pH值为9.5。纯 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 是白色的，在水中会被溶氧所氧化，部分变成

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。不同比例的二价和三价铁的氢氧化物相混合，其颜色可以从绿色到灰色；如二价铁全部氧化成三价铁，则变成红棕色而沉淀。

铁腐蚀产物的结构都比较疏松，它不能阻挡金属离子的不断向外扩散，而使这一产生腐蚀区域的铁电极的电势在微电池中总是最负的，腐蚀过程将继续进行下去。

实际上，钢铁表面上的腐蚀产物是很复杂的，决不是单纯的二价或三价铁氢氧化物，而往往是其氧化物、氧化物的水化物或氢氧化物的混合物。腐蚀产物对钢铁的保护性能，随钢种、腐蚀介质和环境条件不同而变化。

一般氧腐蚀所产生的腐蚀产物大致可分为三层：最内层为二价铁的水合氧化物 $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，它可以看成是 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的脱水产物，呈黑色；最外层是三价铁的水合氧化物 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，它可以看成是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的脱水产物；铁的氧化物中间，往往有一层黑褐色的中间层，其分子式可用 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表示。 Fe_2O_3 通常有两种异构体：一种是 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，呈棕色，具有磁性和保护作用；另一种是 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，呈砖红色，在大气中其性能较稳定，极易生成，但它无磁性，其保护性能不如 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。当 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 进入锅炉后，在碱性介质中，它将转化为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 中的 Fe_3O_4 可看成是 FeO 和 Fe_2O_3 相结合而成的产物，而不是简单的混合物。 Fe_3O_4 俗称铁磁体或磁性氧化铁，它具有磁性而且能导电，很可能是它的磁性使它在金属表面上结合得较牢固和致密，因而它是钝化膜的主要成分。

溃疡腐蚀产物一般都具有磁性，这是因为许多腐蚀产物常常连在一起，而其中 FeO 、 Fe_3O_4 以及 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 都具有磁性的关系。一些铁腐蚀产物的特性列于表1-1中。

表 1-1

铁 腐 蚀 产 物 特 性

序号	组 成	颜色	磁 性	密 度 (克/厘米 ³)	结 晶 形 态	热 稳 定 性
1	Fe(OH) ₂ *	白	顺磁性	3.40	六方晶系 $a^{**}=3.28$ $c=4.64$	在100°C时分解为Fe ₃ O ₄ 和H ₂
2	FeO	黑	顺磁性	5.4~5.73	—	在1371~1424°C时熔化 在低于570°C时分解为Fe和Fe ₃ O ₄
3	Fe ₃ O ₄	黑	铁磁性	5.20	立方晶系(尖晶石) $a=8.39$	在1597°C时熔化
4	α -FeOOH	黄	顺磁性	4.20	$a=4.64$ $b=10.0$ 正菱形 $c=3.03$	在~200°C时失水成 α -Fe ₂ O ₃
5	β -FeOOH	淡褐	顺磁性	—	正方晶系 $a=10.48$ $b=3.023$	在~230°C时失水成 α -Fe ₂ O ₃
6	γ -FeOOH	橙	顺磁性	3.97	$a=3.87$ $b=10.0$ 正菱形 $c=3.03$	在~200°C时转变为 α -Fe ₂ O ₃
7	γ -Fe ₂ O ₃	褐	铁磁性	4.88	立方晶系(尖晶石) $a=8.33$	在>250°C时转变为 α -Fe ₂ O ₃
8	α -Fe ₂ O ₃	由砖红 至黑	顺磁性	5.25	六方晶系 $a=5.03$ $b=13.73$	在1大气压下, 1457°C时分解为 Fe ₃ O ₄

* Fe(OH)₂在有氧的环境中是不稳定的, 在室温下就依不同的条件转变为本表序号6、4或3的形式。

** 符号 a 、 b 、 c 是指晶格在三个座标上的尺寸, 单位为埃, 在立方晶系中, a 、 b 、 c 的大小都一样。

第二节 氧 腐 蚀 的 部 位

在发电厂热力系统中，氧腐蚀发生的部位通常多在给水管管道和省煤器内。在实际运行中，因给水管管道及联箱的管壁较厚，在短时间内一般不会发生腐蚀穿孔；省煤器管则由于其管壁较薄，容易发生腐蚀穿孔，造成停炉事故。

在省煤器中，由于温度较高，所以只要水中有少量的溶氧，就有可能发生氧腐蚀。这种腐蚀在省煤器进口管段部分较集中和严重，在出口部分由于水中溶氧大部分已消耗，因而腐蚀较轻。

在疏水系统中，因疏水箱及低位水箱是通大气的，而且有些疏水管道不经常有水，因此这些管道便常为空气所充满，疏水中常含有较高的溶氧，所以疏水系统也常常是氧腐蚀严重的地方。

此外，凝结水泵出口至除氧器的管道，由于水泵轴封严密性差而漏入空气，也会产生不同程度的氧腐蚀。

在一般正常运行的情况下，锅内不会发生氧腐蚀。这是因为锅炉给水通常都是经过除氧处理的，即使含有微量的溶氧，也往往会在给水管管道和省煤器中被消耗掉。但是如果除氧器运行很不正常，使给水溶氧很大甚至呈饱和状态，溶氧就有可能随给水进入锅内，并在下降管等处产生氧腐蚀。

省煤器管进口段的焊口处还容易发生针孔形腐蚀。在锅炉经常处于压火状态、低负荷运行以及起停频繁时，省煤器管内的水流常出现停滞的现象。当焊口的组织不致密，特别是用粗焊条单层焊接的地方，热影响区对电化学腐蚀特别敏感，再加上热应力交变发生，水中溶氧量较高时，极易发生

针孔形腐蚀。

锅炉设备在存放、安装以及停用期间，往往也会产生较严重的氧腐蚀。基建阶段的氧腐蚀，其腐蚀产物虽然在启动前的酸洗过程中可予以清除，但由于腐蚀所产生的陷坑，则在锅炉投产以后的运行中，还会成为腐蚀电池的阳极，继续发生腐蚀。锅炉在停用时发生的腐蚀，常常在整个水、汽系统中都存在；特别是在积水放不掉的地方，如水平管道的下侧或弯头处，腐蚀就更为严重。

第三节 影响氧腐蚀速度的因素

溶氧腐蚀的速度主要决定于氧扩散到阴极表面的速度，因此它同溶氧的浓度、水温、水的流速和其 pH 值有关，而与金属的成分、热处理的方式、加工的工艺等关系不大。现将与溶氧腐蚀速度有关的因素分别叙述如下：

一、水的 pH 值

图1-2是溶氧浓度为 1 毫克/升的纯水中，碳钢的平均腐蚀速度和 pH 值的关系。

1. 在 pH 4 ~ 10 范围内，腐蚀速度几乎不随溶液 pH 值的变化而变化。这是因为在这个区域内，溶氧的浓度扩散控制了整个腐蚀过程。如果这个速度固定，则氧腐蚀的反应速度也将恒定不变。腐蚀形式是不均匀的，腐蚀速度较低，这是由于腐蚀产物覆盖在金属表面上，阻碍了氧的扩散而保护了金属表面。

2. pH 值小于 4 时，溶氧腐蚀速度将明显增加。在此 pH 范围内，腐蚀产生的氧化物覆盖膜全部溶解，使金属和酸性

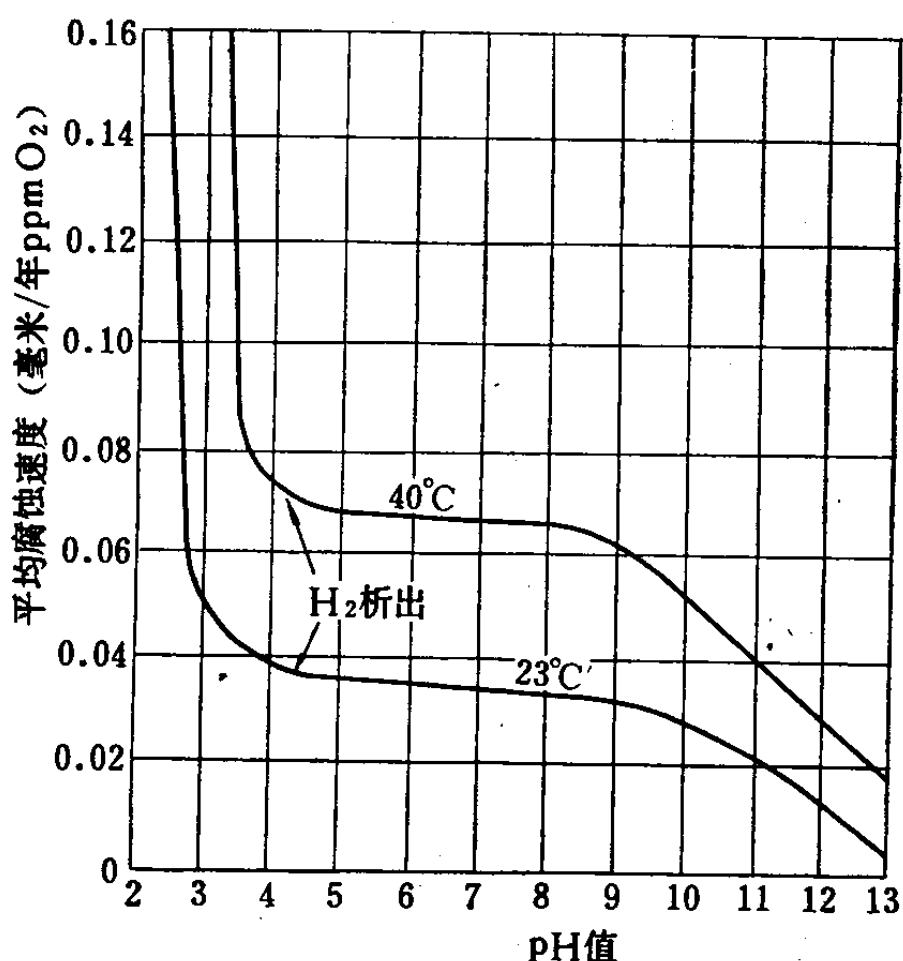


图 1-2 碳钢的腐蚀速度和pH值的关系

介质直接接触（类似酸洗时的情况），腐蚀速度将大大增加。在这个范围内的阴极反应有两个：即既有 $2\text{H}^+ + 2e \longrightarrow \text{H}_2 \uparrow$ 的析氢反应，又有 $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 4e \longrightarrow 2\text{OH}^-$ 的耗氧反应。整个腐蚀速度将不仅被氧浓度扩散所限制，而是两个去极化反应的综合，使腐蚀速度显著增加，可达几毫米/年。

3. 在pH为10~13的范围内时，腐蚀速度下降。因为在此pH范围内，由于形成钝化膜而使腐蚀速度下降，金属表面受到保护。

4. 当水溶液的pH值大于13时，腐蚀速度又将增加。在碱度极大时，金属表面已形成的钝化膜会溶解，生成可溶性的络合物，例如 NaFeO_2 和 Na_2FeO_2 。这种反应在室温时进

行得很慢，但在水溶液的温度达到沸腾时，反应进行得极快，腐蚀速度可达几十毫米/年。因此在给水或炉水加碱处理时，其pH值不可过高，考虑到其它因素的影响，炉水的pH值一般不应超过11.0。

二、水中溶氧浓度

氧在腐蚀过程中为去极化剂，氧浓度的增加会使阴极过程的速度加快，因而也加快了金属的腐蚀。锅炉给水需要彻底除氧，其原因就在于此。但在一些特定的条件下^①，水中溶氧浓度越高，在钢铁表面形成致密保护膜（亦称钝化膜）的可能性也越大，从而减慢其腐蚀的速度。

对于铁—水体系而言，要使铁达到钝化，水中的溶氧必须达到一个较高的浓度值，称之为氧的钝化临界浓度。例如在pH为7的中性纯水中，在室温时氧的钝化临界浓度是12毫克/升；当pH大于10时，氧的钝化临界浓度则为6毫克/升。

三、水的温度

在受溶氧浓度扩散所控制的腐蚀过程中，当溶氧浓度固定时，水温升高，腐蚀速度就会增加。一般温度每升高30℃，腐蚀速度就会加快一倍。

对敞口系统来说，情况有些不同，氧腐蚀的速度在水温为80℃左右时达到了最大值。这是因为水温在80℃以下时，虽然随着其温度的升高，水中氧的溶解度将下降；但在另一

① 指的是“中性盐”处理，即给水是中性，水的电导率小于0.15微姆欧/厘米。

方面，温度升高又使水的粘度下降，氧分子的活动速度增加，从而提高了水中溶氧的扩散速度，使氧腐蚀的速度增加；但当温度继续升高，超过80℃时，由于氧在水中的溶解度急剧下降，因而使腐蚀速度变慢。

四、水的流速

水的流速增加，在一般情况下会使腐蚀速度加快，这是因为随着水的流速加快，氧的扩散速度也增加。但当水的流速达到一定程度时，即金属表面的溶氧浓度达到了使铁钝化的临界浓度，这时就会出现铁的钝化，腐蚀速度变慢。当水的流速继续增加时，钝化膜或腐蚀产物又因被水力的冲刷而破坏，使腐蚀速度又重新增加。实际上，达到临界浓度的“最佳流速”在运行中因受多种因素的影响，不能作为控制腐蚀速度的一种办法。

第四节 氧腐蚀的危害

在火力发电厂中，氧腐蚀对热力设备的危害可由两方面表现出来：首先，氧腐蚀会造成给水管道直至锅炉省煤器的局部腐蚀，严重时，会引起管壁穿孔漏泄；其次，氧腐蚀所造成的腐蚀产物——金属的氧化物，会随给水带进锅炉，在炉水的循环和蒸发过程中，这些腐蚀产物在热负荷较高的区域内沉积，造成管壁传热不良以及产生溃疡性垢下腐蚀，严重时，也会发生炉管漏泄和爆破。这不仅要消耗大量的钢材，而且常常造成停炉事故。

在电厂中，由于氧腐蚀较普遍地存在，是造成锅炉漏泄甚至爆管的一个重要原因。有些电厂省煤器管内有氧腐蚀，

内壁布满氧腐蚀麻点，有的甚至被腐蚀成珊瑚状，造成腐蚀损坏而被迫一至二年更换一次炉管；有的从除氧器至高压加热器间的管道因腐蚀需要经常更换。更有一些新投产的锅炉运行不久，管子内壁已有很深的凹坑，几年内（在特别严重的情况下甚至是几个月），就发生腐蚀穿孔。例如有一台130吨/时锅炉实际运行不到四个月，省煤器就有严重腐蚀，水冷壁也大面积腐蚀穿孔；另一台230吨/时锅炉，运行不到七个月，水冷壁管内壁就结有厚达10毫米的氧化铁垢，垢下有严重的溃疡腐蚀，管壁因腐蚀减薄，以致爆管停炉。这些都说明了，氧腐蚀严重地威胁着电厂的安全、经济运行。

造成热力设备腐蚀的当然还有其他方面的原因，例如设备在基建安装或停、备用期间未加保护或保护措施不当；由于运行监督不严造成水、汽品质不良等等。但锅炉给水缺乏良好的除氧，无疑是造成热力设备严重腐蚀的重要原因之一。

造成锅炉给水溶氧合格率低或除氧器出水溶氧长期不合格的原因大致如下：

1. 除氧器不能按额定参数运行。除氧器因加热汽源不足，或由于进水温度达不到设计的要求，都会造成其汽压、水温达不到规定参数，致使除氧效果很差。特别是一些新投产机组，对保持除氧器的正常运行没有引起应有的重视，问题更为突出。

2. 补充水率高，补水不均。由于跑、冒、滴、漏严重，非生产用汽、水过多，以及不适当地增加供热量，使得补充水率大大超过了规定的标准。补水率的增加破坏了除氧器的正常运行，恶化了水质。此外，由于补充水的溶氧高，水温低，因此当补充水的补入量不均匀时，也会造成除氧器运行工况的瞬间恶化。每当在大量补水的时候，瞬时增加了除氧

器的负担，影响其正常运行，使出水溶氧升高。

3.除氧器没有及时维修，缺陷不能及时消除。影响出水溶氧不合格的设备缺陷很多，例如淋水盘因腐蚀而倾斜甚至脱落、淋水孔被锈蚀物堵塞、运行监督表计不全、调节阀门卡涩、自动调节装置失灵等等。

4.化学监督不及时、不准确。在化学监督中，取样的代表性和化验的准确性十分重要。如果不适当地减少化验分析的次数或不认真取样分析；取样器长年失修，取样管被锈蚀物堵塞；取样器无冷却水源或冷却水量不足等，都会使得化学监督不能反映除氧器的真实情况。

5.除氧器结构上存在问题。目前，在我国火力发电厂中，大气式淋水盘除氧器还占有较大的比例。淋水盘式除氧器在进水温度较低、补充水率较大或负荷经常变动的情况下，除氧效果就较差。有些喷雾式除氧器，由于水泵的扬程不足，或喷嘴选择不适当等原因，也达不到满意的除氧效果。

搞好防腐工作，是保证热力设备安全、经济运行的重要环节之一，因此，应当充分认识锅炉给水除氧的重要性，切实加强除氧器的运行管理和监督工作；同时对出力不足或效率低的除氧器要进行必要的技术改造，使给水溶氧达到部颁《火力发电厂水、汽监督规程》的标准。