

脱气膜除氧技术在火力发电厂实际应用与分析

朱明辉¹ 周彬¹ 满忠阳²

1 宝武集团上海宝山钢铁股份有限公司 2 苏州艾吉克膜科技有限公司

DOI:10.12238/eep.v7i5.2095

[摘要] 利用中空纤维疏水性脱气膜,将锅炉补给水溶解气体,主要是氧脱除至5ug/L以下,最终达到消除热力除氧器的排汽损失的目标;并通过实际案例,分析了中空纤维疏水性脱气膜在火力发电厂锅炉补给水除氧中起到的作用,完善了给水除氧全过程,适应机组负荷变化的需要,减少了排汽损失。客观评论中空纤维疏水性脱气膜在火电厂的应用前景,未来可能给企业带来巨大的效益及优势分析。

[关键词] 中空纤维疏水性脱气膜;热力除氧器;凝汽器

中图分类号: TM611 **文献标识码:** A

The Application and Analysis of Hollow Fiber Hydrophobic Deaeration Membrane in Boiler Feedwater Deaeration for Thermal Power Plants

Minghui Zhu¹ Bin Zhou¹ Zhongyang Man²

1 Shanghai BaoSteel Group Co., Ltd 2 Suzhou Edgercross Membrane Technology Co., Ltd

[Abstract] This paper discusses the boiler feedwater deaeration process in thermal power plants and elaborates on the main reasons and harm of dissolved oxygen in boiler feedwater in thermal power plants. It finds an effective solution to eliminate dissolved oxygen in boiler feedwater by adopting hollow fiber hydrophobic deaeration membrane in the feedwater system, which can remove dissolved gases, mainly oxygen, to less than 5ug/L, ultimately achieving the goal of eliminating the loss of condensate from the condensate evaporator. It also discusses the role and advantages of hollow fiber hydrophobic deaeration membrane in boiler feedwater deaeration in thermal power plants through a practical case, objectively evaluating the prospect of hollow fiber hydrophobic deaeration membrane in thermal power plants and analyzing the potential benefits it may bring to enterprises.

[Key words] hollow fiber hydrophobic deaeration membrane; condensate evaporator; condenser

前言

正常情况下火力发电厂纯凝发电机组,锅炉补给水应占锅炉蒸发量的1%-2%,而锅炉补水来自于化学车间的除盐水,除盐水在制水过程中,原水经过澄清、过滤到阳床、除碳、至阴床到混床进除盐水箱,制水过程完全暴露在大气条件下,所以,除盐水中含的可溶气体较多,主要以氧气为主,虽然,在制水除碳过程中能脱除一部分氧气,但实际上进入到锅炉给水系统中的补水,水中含氧量还很高,一般都在7000ug/L-10000ug/L,解决这部分水中溶解氧含量,可以有效改善机组回热系统除氧设备的工作压力,改善机组在极端负荷下的运行条件。本篇论文,重点阐述火力发电厂锅炉补给水除氧的问题。

1 火力发电厂锅炉给水除氧现有的方式及存在的问题

火力发电厂无论是纯凝机组还是供热机组基本上都采用热力除氧方式,以热力除氧器为核心除氧设备。在机组回热系统中

实际上是有2台除氧装置,除了热力除氧器以外,另一台就是凝汽器,凝汽器属于真空除氧器的一种,工作精度没有热力除氧器高。

热力除氧器的工作原理是利用亨利定律和道尔定律原理,单位体积中溶解的气体量,与该液面上该气体的分压力成正比,则我们可推知,若使水面上氧气分压力等于零,水中溶解的氧气也等于零。保证热力除氧效果,必须要满足以下几个条件:

(1)水要加热到定压下的饱和温度;(2)被除氧的水应有足够的表面积,以保证加热蒸汽能传给被除氧水的所需热量;(3)保证水为紊流状态,以增加气体的扩散速度;(4)保证迅速的排走分离出来的气体;(5)蒸汽与水应逆向流动,保证最大压差以加速热量传导。

正常情况下,锅炉补水由化学车间除盐水泵供至凝汽器(或凝补水箱),经凝汽器进行预除氧后,由凝结水泵经轴加、低加升温后进热力除氧器,除氧器出口溶解氧<7ug/L由给水泵送至高加后进锅炉省煤器。

1.1 存在问题

由于发电机组受电网负荷的调度,经常性发生波动,除氧器的抽气来自于汽轮机中压缸蒸汽,当机组负荷在用电低谷时,汽轮机进汽量大幅减少,造成中压缸抽气量减少,热力除氧器进汽量减少,从而影响热力除氧器的除氧效果,一般中间再热机组都在冷却管道接一路除氧器加热补充蒸汽。

如果,发电机组配合电网做深度调峰,对机组除氧器影响更加严重,深度调峰期间,不但除氧器进汽量减少,同时凝汽器进汽量也减少,造成凝汽器除氧能力大大降低,热力除氧器的工作压力急剧增大,如果不做调整,给水溶解氧便会超标。

许多北方供热机组,冬季供暖期间很多机组既要满足电网调峰的需要,还要满足城市供暖需要,所以采用了切缸供热方式,将低压缸切除,利用去低压缸的蒸汽去供热,切缸期间极易发生溶解氧超标,分析原因,低压缸蒸汽切除后,凝汽器进汽量减少,凝汽器除氧能力大大降低,造成凝结水溶解氧严重超标,另外,低压缸到热网加换热后,蒸汽凝结成水,会吸收部分空气,含氧量超标,几部分溶解氧超标的水全部进入到热力除氧器,热力除氧器工作压力加大,被迫开大除氧器排气阀,产生较大的排汽损失。

2 锅炉给水溶解氧产生根源

锅炉给水主要有汽轮机低压缸排汽凝结的水,汽轮机高中低压缸抽气进入加热器换热后的凝结水,轴封加热器的疏水,门杆漏气的疏水,化学车间过来的补充除盐水组成。

从这几路水分析,低压缸蒸汽凝结水是由蒸汽凝结过来的,凝结前蒸汽里是不含氧的,进入到凝汽器预冷后凝结,存在过冷度形成真空,容易将周边的空气吸入到凝结水中,使凝结水产生溶解氧,但这个过程都是在真空密闭下完成的,且凝汽器真空泵还在不断的向外抽出气体,这时的凝结水在凝汽器凝结的过程,即产生溶解氧又被凝汽器真空泵抽出部分溶解的气体,所以凝结水的含氧量较低在可控范围内,其次、加热器的疏水是由高中低压缸抽出的蒸汽预冷凝结后产生的,整个过程都是在密闭下运行,所以含氧量较低,至于轴加疏水,门杆漏气疏水量较小所以含氧量可以忽略不计,重要的是化学除盐水,化学除盐水在制水过程中,原水属于完全暴露在大气下运行,虽然经过除碳器可将部分溶解在水中的气体脱除,但进入到凝结水系统的补水,溶解氧含量也在7000ug/L左右,虽然补水量较小,但溶解氧含量高,所以,化学除盐水溶解氧含量是整个汽轮机回热系统产生溶解氧的根源。

因此,采用中空纤维疏水性脱气膜,解决补给水溶解氧问题,便可以彻底解决整台机组回热系统给水溶解氧的问题,彻底减轻凝汽器的除氧压力,从而减轻热力除氧器的除氧压力,彻底解决应机组负荷变动对除氧效果的影响,最终达到能够逐步关闭除氧器排气阀的目标,减少除氧器的排汽损失,除氧器变成混合加热器,并提高了加热器的热效率。同时可以满足机组负荷变动的需要,解决机组调峰期间溶解氧超标的问题。

3 锅炉给水中溶解氧对金属腐蚀的危害性

锅炉给水中溶解的气体危害性最大的是氧气,氧气在给水

中的溶解对热力设备及其管道具有显著的腐蚀作用,这种腐蚀会降低设备的可靠性与使用寿命。氧气的腐蚀作用在高温条件下尤为明显,因为水的碱性较弱,会加速氧化腐蚀的过程。

所以氧气是造成锅炉及各种管道腐蚀的主要因素,锅炉给水中溶解的O₂分子会与管道金属Fe原子发生电化学反应,Fe和O₂形成腐蚀电池。铁的电极电位总是比氧的电极电位低,所以在铁氧腐蚀电池中,铁是阳极,遭到腐蚀,反应式如下: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$; 氧为阴极,进行还原,反应式如下: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 在这里溶解氧起阴极去极化作用,是引起铁腐蚀的因素,这种腐蚀称为氧腐蚀。金属氧化物在金属管壁内部形成了一种容易被剥离的表层,在水流的冲刷作用下,逐步脱落,进入到炉水中,所以自然循环汽包锅炉都会有排污,表面排污和定期排污,表面排污在锅炉顶端,也就是炉水的顶端,排出含盐浓度大及炉水表面的杂物,定期排污在锅炉底端,也就是炉水的底端,排出炉水中的杂质。金属氧化物被剥离后,会在金属表面形成直径1~20mm不等凹坑,这种腐蚀特征称为溃疡性腐蚀,下列图片为锅炉水冷壁管氧腐蚀照片。



图1 管壁氧腐蚀点



图2 管壁腐蚀

所以,锅炉给水除氧是保证锅炉安全运行,延长锅炉寿命的关键,若锅炉给水未除氧,氧浓度超标将会造成炉管的氧腐蚀,而氧腐蚀直接影响到炉管厚度,造成管壁减薄漏泄,氧腐蚀在管壁面形成的凹坑会产生结垢影响传热,甚至发生爆管,氧化铁固

体会堵塞管道,发生传热恶化而爆管,可以说锅炉给水除氧是保证锅炉安全运行,延长使用寿命的一个关键环节,国家标准对于电站锅炉给水溶解氧的要求是,汽包压力 $>5.9\text{MPa}$ 以上的锅炉,给水溶解氧要求 $\leq 7\mu\text{m/L}$ 。

4 中空纤维疏水性脱气膜(膜接触器)

中空纤维疏水性脱气膜是中空纤维膜分离技术的一种,疏水性脱气膜有别于超滤、反渗透膜,脱气膜的运行原理是脱气膜内装有大量的中空纤维丝(疏水性),纤维丝中空管状,内壁直径 $200\mu\text{m}$ 外壁直径 $300\mu\text{m}$,纤维丝的壁上有微小的孔,水分子不能通过这种小孔,而气体分子却能够穿过。工作时,水流在一定的压力下从中空纤维丝管外侧通过,而中空纤维丝管壁内在真空泵的作用下,将移动到管内的气体不断的抽走,并形成一定的负压,这样水中的气体就不断从高压侧(水侧)经中空纤维丝管壁上的微孔,向低压侧(中空管内)移动,从而达到去除水中气体的目的,脱气膜中装有大量的中空纤维丝,每根纤维丝管壁上都被拉伸出无数个微小的孔洞,大量的纤维丝编制成膜组,每个膜组摊开后,面积达到 240m^2 气液接触面积远远超过任何除氧器,所以中空纤维疏水性脱气膜又叫做“膜接触器”由于有着高效的接触面积,从而使脱气速度加快,脱气效率可高达 99.99% ,出水氧浓度小于 2ppb 二氧化碳小于 1ppm 可广泛用于电子、能源、化工、钢铁、电力锅炉补给水系统。

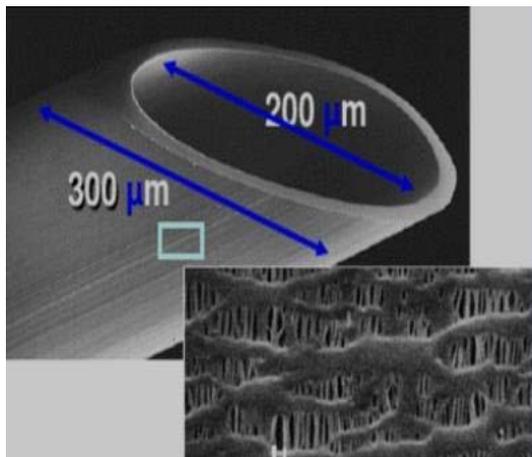


图3 中空纤维丝

中空纤维疏水性脱气膜的核心技术为高效膜接触器,已成为环境保护、资源回收、新能源产业等领域关键性技术和传统产业转型升级的重要共性支撑,被发达国家列入重点优先发展方向,也是我国战略新兴产业、科技创新发展规划的关键组成,高性能分离膜技术被纳入《中国制造2025》重点工程项目之一。膜接触器技术是在二十世纪中期发展起来的一种高新技术,研发于美国和德国,在日本得到广泛的推广,近二、三十年来,在世界上得到了飞速的发展,膜分离技术正在为人类带来巨大的利益。国内在2013年达到自主研发自主生产,并在某些领域已超过国外,在一些工业领域里可以完全替代国外的膜接触器。目前世界单体最大处理量和最高效率的膜记录均来自于苏州艾吉克膜科技有限公司于2020年研制成功的16寸大型膜接触器。该公司膜接

触器商业化时间超过8年,成熟应用超过7年。

5 中空纤维疏水性脱气膜在火力发电厂中的实际应用

中空纤维疏水性脱气膜应用在工业领域,已经在国外流行了好多年,国内目前应用在化工、钢铁、石化等领域较多,2013年国内生产的第一批膜应用在宝钢湛江钢铁脱硫废水脱氨氮项目,2016年宝钢电炉分场首次使用国产脱气膜代替热力除氧器,到现在已经连续运行8年,2023年上海宝钢自备电厂,2#机组在化学补充除盐水至凝结水系统增加了1台 35t/h 中空纤维膜除氧装置,主要是为了完善机组回热系统的除氧能力,最终达到减少除氧器排汽损失的目标,下面就宝钢自备电厂2#机组新增 35t/h 脱气膜除氧项目使用情况做简单介绍:

5.1 脱气膜除氧实际案例



图4 膜除氧器



图5 出口氧表

宝钢电厂2#发电机组,是1998年由日本三菱公司引进的 350MW 纯凝发电机组,为亚临界一次再热强制循环汽包锅炉,锅炉蒸发量 1068t/h ,主蒸汽压力 17.18MPa ,主汽温度 541°C 再热器压力 3.9MPa 新增膜除氧项目由宝钢电厂提出课题负责组织研究,由上海宝菱节能工程技术有限公司总包,苏州艾吉克膜科技有限公司提供成套的膜组设备。宝钢能环部发电中心2号机组零汽耗除氧系统科研项目于2023年4月开始在苏州工厂制作2023

年5月完成工厂调试,2023年6月进厂并建设完成,2023年6月25日水冲洗试运,6月25日产出合格除氧水,一次开车成功。2023年6月30日,试运行,产出合格除氧水。

零汽耗除氧系统设计处理规模35—45m³/h,采用中空纤维疏水性脱气膜常温、真空气体除氧的技术路线,零汽耗除氧系统主要包括:除氧单元、换热单元、控制单元。

自除盐水泵来的常温除盐水进入膜除氧装置,通过真空泵提供真空条件辅以氮气冲洗进行常温除氧,经过除氧后,溶解氧含量≤5μg/L的合格除氧水余压送至凝结水系统。

5.2脱气膜除氧功能考核数据

进膜水质参数条件:

(1)表面张力: ≥65mN/m(原水保证); (2)COD: ≤100ppm(原水保证)。 (3)ORP: ≤100(原水保证); (4)SS: ≤3mg/L(原水保证)。 (5)原水进膜温度: 15-40℃(原水保证); (6)pH值: 6-9(原水保证)。 (7)含油量: ≤1mg/L(原水保证)。

脱气膜除氧功能考核数据指标:

表1 功能考核期间主要工艺控制指标

序号	工艺指标名称	单位	控制范围
1	进除氧器氮气流量	m ³ /h	3-5
2	进除氧器除盐水流量	m ³ /h	≤40
3	除氧器压差	MPa	≤0.27
4	脱气膜除氧器出口	Ug/L	≤5ug/L
4	除氧器出水氧含量	μg/L	≤10
5	真空泵真空度	MPa	≤-0.09

表3 零汽耗除氧系统功能考核期间能耗计算表

项目	单位	计量仪表位号	消耗总量	单耗 m ³ /h
气	氮气	m ³	266.4	3.7
水	循环水	m ³	72	1
电	电	KWh	1188	16.5KW

5.3脱气膜除氧功能考核结论

数据分析:

(1)零汽耗除氧系统共1组真空空气提器,最大处理量40m³/h,每组真空空气提器处理能力为40m³/h,功能考核期间氮气纯度稳定,满足纯度≥99.99%要求,除盐水质性质稳定,电导率: ≤0.3μS/cm,二氧化硅: ≤20μg/L,温度: 25~37℃,压力: ≤0.6MPa,满足原料性质设计要求,三天共处理除盐水1892m³,平均处理量26.28m³/h,满足处理量的设计要求。(2)零汽耗除氧系统三天功

能考核,脱气膜除氧器出口氧含量分别为1.2μg/L、1.4μg/L、1.3μg/L,满足除氧水氧含量≤5μg/L的设计要求。(3)零汽耗除氧系统三天功能考核试验,除氧器排气阀关闭,除氧器出口溶解氧含量8.2μg/L、7.4μg/L、5.9μg/L,满足除氧水氧含量≤10μg/L的设计要求。(4)零汽耗除氧系统功能考核三天期间,工艺运行稳定,设备运行质态整体良好,仪表控制满足运行要求,设备能耗、工艺辅料消耗,达到技术协议指标控制要求。(5)零汽耗除氧系统功能考核三天期间,除氧水泵外供除氧水氧含量稳定,管网压力稳定,能满足装置除氧水量及水质需求。

6 增加膜式除氧器后给机组实际运行带来的好处

(1)通过增上膜除氧器后,凝结水系统运行可靠性增加,不用再向凝结水系统中补入化学药剂,结水溶解氧保持连续稳定,不再因机组负荷的变化而发生大幅度的波动,从而提高了机组运行的可靠性,对后期保护设备具有一定实际意义。(2)增上膜除氧器后,可以保证机组在冷态启动过程中,除盐水的除氧处理,不再需要加热蒸汽除氧,也就是说,锅炉在常温下加快炉管冲洗的速度,缩短机组启动时间。(3)由于增上了膜除氧器,进入除氧器的凝结水溶解氧已达到合格状态,热力除氧器继续保持蓄热功能不变,除氧用的排汽可根据进锅炉给水溶解氧的数据逐步关小至全关,逐步减少除氧气的排气损失,最终达到降低能耗的作用。(4)除盐水经过膜除氧器脱氧的同时,能将除盐水中的CO₂脱除30%,提高水质,减小凝结水的电导率。(5)除盐水经过脱气膜后,进入凝汽器可溶气体降低,使凝汽器真空获得提高。

7 热力除氧器排汽损失量计算

为了测算2#机组增加膜除氧后,热力除氧器的排气阀关闭,获得准确的排汽损失数据,取现场3、4、5、6月和8、9、10、11月实际数据记录表,进行实际热力除氧器使用蒸汽量及除氧器排气量测算,3、4、5、6月为改造前8、9、10、11月份为改造后对比,从而获得准确的热力除氧器排汽损失量。(实际运行表报略)

除氧器排气损失量经常计算参数2%~3%。

表4 2#机组除氧器3~6月份实际运行数据表(平均值)

除氧器月平均出水温度	除氧器月平均进气温度	高加疏水平均温度	除氧器平均进水温度
150.04℃	306.90℃	164.37℃	116.45℃
649.75kj/kg	3078.92kj/kg	696.64kj/kg	488.68kj/kg
除氧器月平均进汽压力	除氧器月平均进水量	除氧器月平均出水流量	除氧器排气损失
0.455MPa	589.83t/h	743.95t/h	3%

表2 功能考核期间工艺操作条件记录

序号	指标名称	单位	控制范围	功能考核期间平均值	17日 9:00	17日 16:00	18日 9:00	18日 16:00	19日 9:00	19日 16:00
1	氮气流量	m ³ /h	3-5	3.7	3.8	3.7	3.7	3.6	3.7	3.7
2	除盐水流量	m ³ /h	≈40	22.5	16	34	32	11	24	18
3	除氧器压差	MPa	≈0.27	0.107	0.12	0.15	0.12	0.07	0.1	0.08
4	除氧器出水含氧量	μg/L	≈10	7.6	8.2	5.6	7.4	5.8	5.9	6.1
5	真空泵真空度	MPa	≈-0.09	-0.102	-0.103	-0.102	-0.102	-0.102	-0.102	-0.102
6	膜除氧装置含氧	μg/L	≈5	1.17	1.1	1.2	1.1	1.3	1.1	1.2

通过3~6月汽轮机实际运行数据, 计算得出除氧器用汽量为36.94t/h。

除氧器处理707.01t/h水实际使用蒸汽量为2.12+36.94=39.06t/h。

通过3~6月份生产现场实际数据, 计算除氧器处理每吨水实际消耗的蒸汽量为39.06/707.01=0.05525t。

表5 2#机组除氧器8~11月份实际运行数据表(平均值)

除氧器月平均出水温度	除氧器月平均进气温度	高加疏水平均温度	除氧器平均进水温度
154.26℃	305.42℃	164.96℃	116.44℃
650.71kJ/kg	3075.76kJ/kg	697.22kJ/kg	488.64kJ/kg
除氧器月平均进汽压力	除氧器月平均进水量	除氧器月平均出水流量	除氧器排气损失
0.46MPa	595.38t/h	753.17t/h	

通过8~11月份实际运行数据测算出除氧器用汽量为37.48t/h。

除氧器实际处理水量753.17-37.48=715.69t/h。

除氧器排气阀关闭后, 平均处理每吨水实际消耗蒸汽37.48/715.69=0.05237t。

通过除氧器排气阀关闭前3~6月份数据与除氧器排气阀关闭后8~11月份数据获得除氧器排气量为: 0.05525-0.05237=0.00288t。

8个月的数据表加权平均后, 除氧器平均处理水量711.35t/h。

关闭排气阀后实际减少除氧器排蒸汽损失为711.35×0.00288=2.05t/h。



图6 改造前排汽



图7 改造后无排汽

表6 实际获得效益

机组运行时间 h	除氧器排汽损失 t/h	年减少排汽损失 t	折标准煤系数
7200	2.05	14760	0.1057
年节省标准煤 t	标煤折碳系数	年减少碳排放 t	
1668.47	2.493	4159.5	

8 结论

通过以上数据分析,中空纤维疏水性脱气膜在火力发电厂有着广阔的使用空间,在亚临界以下机组是对锅炉给水除氧AVT工艺的完善,具有一定的节能减排的效果,利用常温除氧水可以大量回收锅炉尾部烟气余热,在火电厂节能减排的工作中发挥巨大的价值。

当前,在超临界及超超临界机组,锅炉给水采用OT方式,主要是防止给水流动加速腐蚀FAC和金属高温氧腐蚀,脱气膜具有双向传质的作用,既能将液体当中的气体脱出,同时又能将气体传入到液体中,对于超临界高参数机组,可通过脱气膜进行精准控制给水泵入口溶解氧含量,可以在低压段利用脱气膜采用AVT方式限制给水溶解氧含量。在高压段通过脱气膜采用OT方式精准控制进入给水溶解氧含量,防止因加氧过多造成设备腐蚀,同时防止因加氧不足达不到氧化膜的钝化形成,失去对设备的保护作用。

总之,中空纤维疏水性脱气膜在火力发电厂有着巨大的使用价值,运用脱气膜可以将溶解在水中的气体全部脱除,可以在纯水当中脱氧或加氧,可以在纯水中脱二氧化碳,可以在脱硫废水中脱氨氮。膜在纯水中使用寿命可以达到8年,设备小型化,占地空间小,没有废水,没有废气,没有废渣,免维护,是火力发电厂未来设备更新换代一个很好的选择。

[参考文献]

[1]王湛,宋芄,陈强,等.膜技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2022.

[2]李培元,周柏青.火力发电厂水处理及水质控制[M].北京:中国电力出版社,2018.

[3]宝钢2#发电机组常温膜除氧工业应用试验研究科研结题报告.

[4][意]库尔乔著,苏学素译.膜接触器原理、应用及发展前景[M].北京:化学工业出版社,2009.

作者简介:

朱明辉(1976--),男,汉族,江苏盐城人,本科,工程师,研究方向:电厂化学、电厂热能动力、电厂脱硫。

周彬(1982--),男,汉族,湖北十堰人,硕士研究生,工程师,研究方向:电厂热能动力。

满忠阳(1970--),男,汉族,吉林辽源人,硕士研究生,高级工程师,注册一级建造师,苏州艾吉克膜科技有限公司副总经理,研究方向:膜接触器在能源领域的应用与研究。