

真空除氧参数关系的理论与试验研究(上)

陈崇枢 邬兆春^① 李瑞扬 张德成

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 本文综述了我国低压锅炉的除氧现状,指出了真空除氧技术在各种除氧方法中所占的地位,提出了将这项技术在国内推广应用所需解决的几个主要问题。针对这些问题,作者以水温为主线,提出了最低有效除氧温度的新见解;分析了运行参数对除氧效果的影响,并通过试验进行了验证;得到了替代对出水水质频繁化学分析的简便易行的监测方法。

关键词 真空除氧 除氧温度

符 号

P_v ——真空度。指除氧塔内的工作压力。文中除注明外,均指表压

t_s ——塔温。即除氧塔内的实际温度。当真空除氧器正常运行时,塔温就等于相应真空度 P_v 下的饱和水温。

t_1 ——进水温度。表示待除氧水在进入除氧塔之前的实际温度。

Δt ——过热度。即进水温度与塔温的差值。

$$\Delta t = t_1 - t_s$$

t_2 ——循环水温。指水喷射真空泵循环水箱中的水温。

1 前 言

《低压锅炉水质标准》(GB1576-85)中规定,对水管锅炉、水火管组合锅炉,当蒸发量 $\geq 2\text{t/h}$ 时均要除氧;并根据锅炉工作压力的不同,要求其给水溶氧量应 $\leq 0.1\text{mg/L}$ 或 0.05mg/L 。对热水温度 $>95^\circ\text{C}$ 的热水锅炉,则要求其补给水和循环水的溶氧量 $\leq 0.1\text{mg/L}$ 。

据原劳动人事部1985年底统计,我国

拥有工业锅炉约30万台,50~60万蒸吨,每年的新增量约为8~9万蒸吨。与此同时,近年来由于节能及其它需要,热水锅炉的品种和数量也在急剧增长。但是,在按规定应要求除氧的工业锅炉中,只有不到50%的锅炉装设了除氧设备,而能够长期运行且除氧效果好的实例则更少。造成这种状况的原因,一方面是由于对锅炉给水除氧的忽视——执行水质标准不严;另外也缺乏可靠和经济的低温水除氧技术和设备。

我国工业锅炉,特别是热水锅炉补给水除氧技术的现状,带来的后果是不少锅炉出现了严重的氧腐蚀。有的热水锅炉炉型从热能利用角度看具有明显的优点,但由于对氧腐蚀问题考虑不周,又不进行补给水除氧,致使其使用年限很短,严重的只要二三年就会腐蚀烂穿。随着国内集中供热和区域性供热的广泛应用和供热系统水温度的提高,氧腐蚀问题更加突出,已严重影响到锅炉及其热力系统的安全运行和使用寿命,造成设备的巨大浪费。有鉴于此,研制效果良好、操作方便且经济可行的低温水除氧设备已势在必行。

^① 邬兆春同志硕士研究生毕业后于1990年4月分配到北京B&W公司工作

收稿时间 1991-02-21

修改定稿 1991-04-10

本文联系人 陈崇枢 男 58 哈尔滨工业大学二系514信箱 150006

2 真空除氧技术及其发展

真空除氧与传统的压力式热力除氧(大气式、高压式除氧)的原理相同,但后者的工作水温较高。在我国,大气式除氧的工作水温为 104.25°C (对应 0.12 MPa 绝压);高压式除氧的工作水温则为 158.08°C (对应 0.6 MPa 绝压)。而真空除氧的水温可为 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。可见,真空除氧相对来说大大降低了对给水的预热要求;同时,由于给水温度的降低可使锅炉排烟温度下降, q_2 损失减少,从而可以提高锅炉的热效率。从耗汽量来看,有人以一台 10 t/h 、 1.274 MPa 饱和蒸汽锅炉为例进行过计算,大气式热力除氧器所耗蒸汽合标准煤为 46 t/y ;而用蒸汽喷射抽真空的真空除氧器所耗蒸汽仅为前者的一半;如果采用水力喷射抽真空,则耗电折合标准煤为 24 t/y 。此外,大气式热力除氧的蒸汽损失(折合标准煤约 82 t/y)比真空除氧要多很多。最后,对工业锅炉用户来说,拿出(10~15)%的蒸汽用来除氧显然是不经济的;而对小型电站来说更是希望尽量减少自用汽耗。因此,对工业锅炉和小型电站锅炉,选用常温水作为喷射抽真空的工作介质,采用真空过热水除氧设备进行补给水除氧,是十分经济合理的。对热水锅炉用户,采用喷射水抽真空除氧更为合理,因为热水锅炉房无蒸汽汽源,且热水锅炉的回水温度低($<70\sim 90^{\circ}\text{C}$)。

真空除氧技术不失为低温补充水除氧的有效手段,早已在国外的热电站和工业锅炉房获得应用。根据第四十五届国际水会议的报导,目前世界上常用的四种除氧方法,以经济、技术性能指标比较,真空除氧排列第二(在氧化还原树脂除氧之后,但在压力式热力除氧和加肼除氧之前)。在我国,真空除氧技术虽早在50年代就已出现,但用水喷射抽真空的真空除氧器的应用则始于70年

代末,而低位真空除氧器的出现只不过是近几年的事。

要使真空除氧在国内锅炉给水除氧中得以推广,还必须解决以下几个问题:一是从理论和实践中研究出真空除氧的主要参数之间的定量关系;二是进一步提高和稳定除氧水的质量;三是尽量降低生产成本,并在耗能尽量少的前提下实现除氧器的低位安装。此外,还应找出替代频繁化验除氧水溶氧量的现实可行的监测方法。针对这些问题,我们对过热式真空除氧进行了理论分析和试验研究,设计并研制出“新型低位真空除氧器。”

3 真空除氧技术的理论分析

3.1 最低有效除氧温度

对既定的一台水喷射真空泵而言,它所能形成的真空度是有最大值的,称为极限真空度,如图1中的A点所示。在极限真空度下抽气量为零。根据真空除氧的原理,由理论计算,要使真空除氧器的出水溶氧量达到某一值,除氧器必须有一定的排汽量。设对应于此排汽量下真空泵的抽气量如图1中的B点所示。则真空度处于A至B范围内时除

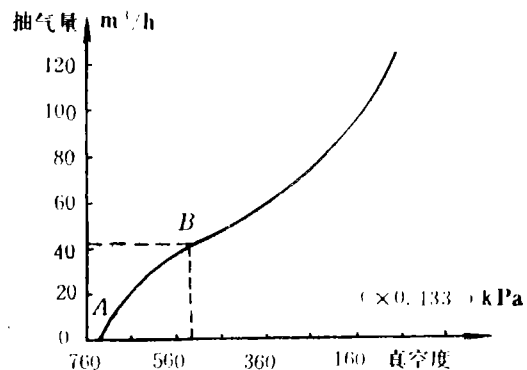


图1 某水喷射真空泵的工作特性曲线

氧器不能有效除氧(只能除去一部分氧,但不能达标)。我们定义,除氧器的除氧水质量正好达标时除氧塔内真空度对应的饱和水

温度(塔温)称为最低有效除氧塔温。由于进水温度等于塔温加上一个必须的过热度,所以同样存在一个最低有效除氧进水温度。我们将这两个温度统称为最低有效除氧温度。由于锅炉水质标准对不同工作压力的锅炉有不同的要求,而且不同型号的真空除氧器的性能也有差异,因此,最低有效除氧温度并不是千篇一律的。

提出最低有效除氧温度的意义还在于:

3.1.1 最低有效除氧温度是衡量一台既定的真空除氧器性能的重要指标之一。最低有效除氧温度低,则有可能取用更低的锅炉给水温度;反之,则需要增加额外的原水预热设备,从节能和简化系统的角度考虑,都有不利之处。

3.1.2 最低有效除氧温度还是指导过热式真空除氧器正常运行的关键参数。如果塔温或进水温度小于最低有效除氧塔温或最低有效进水温度,则不能获得满意的除氧效果,即出水溶氧量要超标。塔温(进水温度)大于最低有效除氧温度是过热式真空除氧器正常运行所应首先满足的条件。

3.2 真空除氧对水温的适应性

从图1的特性曲线可以看出,随着真空度的减小,抽气量将增加。真空度越低,抽气量越大。而且,这种工作特性是连续、稳定的。水喷射真空泵的这一特性保证了真空除氧器在运行中真空度与塔温的连续性配合,即在进水温度大于最低有效温度的情况下,塔温能够连续地自动调节成为相应真空度下的饱和水温。兹分析如下。

我们定义,在一定的真空度下,当塔温等于相应真空度下的饱和水温度时,叫做真空度与塔温匹配,简称温压匹配。假定在某一工况温压匹配,真空度为 p_s ,塔温为 t_s (即 p_s 下的饱和水温),此时的进水温度 t_1 已经具有一定的过热度 $\Delta t = t_1 - t_s$ 。如果我们提高进水温度,设其为 t_1' 。此时,瞬间的过热度将改变为 $\Delta t' = t_1' - t_s$,且 $\Delta t' > \Delta t$ 。根据过热水汽化的自然规律,可以导

出当过热度分别为 Δt 和 $\Delta t'$ 时每千克水产生的蒸汽量分别为:

$$m_w = 4.18 \frac{\Delta t}{r} \text{ kg/kg} \quad (1)$$

$$m_w' = 4.18 \frac{\Delta t'}{r} \text{ kg/kg} \quad (2)$$

式中 r ——相应饱和温度下水的汽化潜热。

显然,进水温度提高的瞬间,过热水产生的蒸汽量 m_w' 大于原来过热度下产生的蒸汽量 m_w 。由于除氧塔的容积不变,除氧塔内气体量增加,压力就会随之升高,即真空度要下降(设为 p_s')。真空度下降后,相应真空度下的饱和水温升高(设为 t_s'),与此相应,过热度变为 $\Delta t'' = t_1' - t_s'$,且 $\Delta t'' < \Delta t'$ 。由式(1)与(2)可知,此时过热水产生的蒸汽量又得减少,真空度则会随之升高。

从上述来看,真空度的变化是一个过程。在这一过程中,进水温度的瞬时升高,使得过热水的汽化量增加;蒸汽量的增加导致了真空度下降;真空度的下降又造成蒸汽量的减少;蒸汽量的减少,再使真空度升高。真空度与过热度的这种变化,使得真空度与塔温达到新的温压匹配,并在新的工况参数下(真空度、过热度……)保持新的稳定。

由于过热式真空除氧器具有上述的对水温的良好适应性,如果仅从除氧效果的角度考虑,只要进水温度大于最低有效除氧温度,则对塔温和真空度的监控可以省略。真空除氧的这一特点已通过后述的试验结果予以证实。可见,它是真空除氧在操作、控制方面优于压力式热力除氧的最主要特点之一。

3.3 塔温对除氧效果的影响

我们可以从分析气体转移速度入手,分析塔温对除氧效果的影响。

根据渗透理论(Higbe, 1935; Danckwerts, 1951),有四个不同的、可能限制氧气从溶液向气相的转移速度的环节,它们是:①氧气靠分子扩散或涡流扩散规则地穿

过整个溶液的分散速度。②氧气通过气液界面处的液体侧液膜的转移速度。③氧气通过气液界面处的气体侧气膜的转移速度。④氧气通过气液界面进入气相的速度。

由于这些速度环节都是连续发生的，所以最慢的那个环节是控制整个转移过程的速度，因此叫做限制速度环节。对于溶解度低的氧气，速度环节③和④不起限制转移速度的作用。如果除氧塔内件的传质性能足够好，则可认为速度环节①是限制速度环节。

由除氧量 G 的两个计算式：

$$G = q(C_1 - C_2) \text{——实际除氧量 (3)}$$

$$\text{和 } G = \alpha_D F \Delta C_m \text{——传质计算值 (4)}$$

式中 q ——进水量

C_1, C_2 ——进、出水含氧量

α_D ——传质系数

F ——气—水接触面积

ΔC_m ——对数平均浓度差

此两式应相等。整理得

$$C_2 = C_1 - \alpha_D F \Delta C_m / q$$

$$= C_1 - k \alpha_D \quad (5)$$

式中 $k = F \cdot \Delta C_m / q$

将式(5)用图线表示出来，如图2所示，就能发现：随着塔温的升高，出水溶氧量减小。即塔温越高除氧效果越好。这一点将在后述的试验中得到证明。

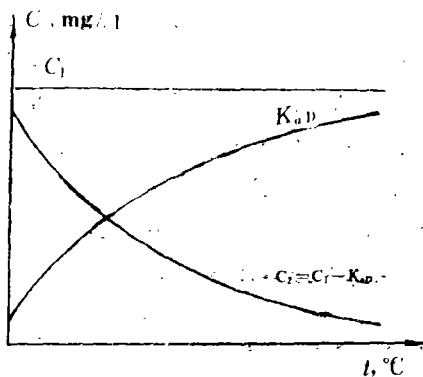


图 2 水温对除氧效果影响的分析示意图

3.4 真空除氧系统的自控问题

过热式真空除氧器运行时需要调节的参

数有：进水温度、真空度、水箱水位（进、出水流量）。前已述及，由于过热式真空除氧器对水温具有良好的适应性能，如果仅从除氧效果的角度考虑，只要进水温度大于最低有效除氧温度，对塔温和真空度的监控是没有必要的。因此，过热式真空除氧器运行中只需对进水温度和水箱水位进行监控即可。进水温度的控制简单易行，这里不赘述，下面我们只讨论水位的控制问题。

水位的自动控制可以通过连续地调节进水量来实现，但存在的主要问题是：在采用机械雾化喷嘴的条件下，流量的变化（减小）带来的是雾化压力的变化（降低），而会使雾化质量恶化，因此，这种控制方式不适合与机械雾化喷嘴的特性相匹配。

我们推荐采用点控制方式来进行水位的调节，即装设高低水位控制器，后者通过控制进水阀门的开启或进水泵电动机的启停，来调节进水流量的有无。这种控制的优点有：

1. 在点控制方式下，进水量 G （或进水压力 P ）与时间 t 的关系是阶跃函数关系，如图3所示。即进水时 $G(P)$ 是恒定的，不进水时， $G(P)$ 为零，这一特点正好能与机械雾化喷嘴的工作特性相匹配，避免了当连续调节流量（压力）时，流量（压力）连续减小，导致雾化效果的恶化。

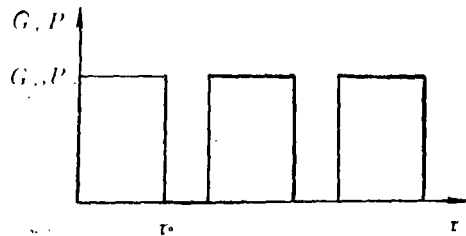


图 3 流量（压力）与时间的关系

2. 点控制方式所用的控制元件简单，价格也较低廉。

点控制方式的上述优点也已被后述的试验结果所证实，该系统的除氧效果稳定、良好，与点控制方式提供的良好的雾化条件不无关系。
(下期待续)