

反而会使磁性得以增强。下面以 Zn^{2+} 的晶格取代作用来说明。 Zn^{2+} 离子外层电子构型为 $3d^{10}$ ，它只能以 sp^3 杂化形成四配位络合物，所以当 Zn^{2+} 进入铁氧体晶格时，必然去占据四面体位。原占据四面体位的 Fe^{3+} 就会有一部份(例如 50%) 被取代，被排挤到八面体位置上去，使 Fe^{3+} 的未偶电子不再被完全抵消，从而使磁性增强。见表 3。

我们在试验中发现，加入一定量的 Zn^{2+} 离子处理废水时确实容易得到强磁性的铁氧体。不过，由于 Zn^{2+} 本身是反磁性物质(无未偶电子)，掺入 Zn^{2+} 的数量与磁性关系不会始终线性增长。事实上，当每个化学式单元 Fe_3O_4 掺入 0.5 个 Zn^{2+} 离子时，铁氧体的磁

性已开始下降了。另外，多种金属离子的晶格取代作用也会互相抵消或削弱，这就不能一概而论了。

参 考 文 献

- [1] 徐殿樑等, 环境科学, 6(3), 34(1985).
- [2] Kiyama, M., *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 47(7), 1646(1974).
- [3] 化学工学の進歩 10, 環境プロセス工学, 化学工学協会編, 128, 1976.
- [4] Takada, T., Kiyama, M., *Proc. Intern. Conf. on Ferrites*, 69—71, (1971).
- [5] Takada, T., *Proc. Intern. Conf. on Ferrites*, 3—6, (1982).
- [6] 高田利夫, 公害と対策, 13(1), 37(1982).

试论电除尘器的质量标准

俞 寿 成

(浙江省诸暨电除尘器研究所)

电除尘器在我国火力发电厂的应用越来越普遍。如何评价其质量, 国内至今无统一的评价标准, 国际上也未见有权威性标准。本文参考国内外某些电厂电除尘器的运行经验, 对电厂电除尘器的质量评价标准提出某些看法和建议。

电除尘器的主要技术指标可以分为两类。一类为整机指标, 另一类为单项指标。

能反映整机技术水平和综合质量状况的指标, 称为整机指标。主要有:

1. 除尘效率;
2. 压力降;
3. 能源消耗量;
4. 钢材消耗量;
5. 漏风率。

反映电除尘器某个方面的技术性能和水

平, 并且又对整机性能有较大影响的技术指标, 称为单项指标, 主要包括:

1. 气流分布的均匀性;
2. 主要零部件设计和制造质量;
3. 阴、阳极间距误差;
4. 空载通电试车击穿电压;
5. 阳极排振打加速度及其分布;
6. 阴极线(或阴极框架)最小振打加速度;
7. 易损零部件的使用寿命。

一、关于整机指标

1. 除尘效率

除尘效率是电除尘器一个最基本的技术指标。国外常用出口粉尘排放量或者净化气体的不透明度(OPACITY)代替除尘效率。用户根据国家规定的排放标准提出所要求的

除尘效率。电除尘器应用上的一个主要问题，是确定它的大小和布置方式，即所谓选型。电除尘器的性能不仅同它本身的结构形式有关，而且还同锅炉的工况和它燃用的煤质有关。因此，要根据各个电站的锅炉工况和煤质情况，“量体裁衣”，单台设计。但遗憾的是，用户提供的原始参数，特别是“设计煤种”，往往是实际并不存在的“假想煤种”，为了对电除尘器进行考核，建议采用国外的做法，在考核时对除尘效率进行修正。

修正的办法通常有两种：

一是把考核时的测试结果从实际测试条件修正到原来的设计条件，然后把修正后的除尘效率与设计效率在“设计点”上进行比较。此时，

$$\eta_{修正} = (1 - e^{-K_{修正}}) \times 100\%$$

式中，

$$K_{修正} = K_{试验} \times \frac{1}{C_{总}}$$

总的修正系数：

$$C_{总} = C_{烟气量} \times C_{含氧量} \times \dots\dots$$

如果 $\eta_{修正} \geq \eta_{设计}$ ，则电除尘器已经达到事先规定的设计指标。

第二种办法是把设计效率从设计条件修正到实际测试条件，然后把实际测试效率与修正后的设计效率在“实际测试点”上进行比较。

此时，

$$\eta_{修正} = (1 - e^{-K_{修正}}) \times 100\%$$

式中，

$$K_{修正} = K_{设计} \times C_{总}$$

总的修正系数：

$$C_{总} = C_{烟气量} \times C_{含氧量} \times \dots\dots$$

$$K_{设计} = \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_{设计}} \right)$$

如果 $\eta_{实测} \geq \eta_{修正}$ ，则说明电除尘器已经达到了预定的设计指标。但如果实测效率已经大于或等于设计效率，则就被认为效率考核已经合格，而不管是否已经经过修正。

必须强调的是，对测试效率的修正，仅仅

是对电除尘器偏离设计条件时运行性能的一种估价，此时它并不运行在设计的最佳状态。

电除尘器运行以后，初期效率往往较高。随着运行时间的加长，逐渐会有所降低，随后将趋于基本稳定。效率开始下降到基本稳定这段时间的长短取决于它的设计、制造和安装质量，也同运行条件和操作有关，一般从几周到一、二个月不等。

军粮城电厂 3 号机组 102m² 电除尘器是目前一台较大的国产电除尘器，经累计 6000 余小时运行后，多次实测，除尘效率稳定在 99.5% 以上，出口平均含尘浓度为 51.7 mg/Nm³，达到设计要求。

2. 压力降

通过本体的气体压力降是电除尘器另一个重要的技术指标。直接影响到机组的运行费用，对处理烟气量很大的电站电除尘器，这个指标就显得特别重要。以一台 30 万 kW 机组为例，假定烟气量为 200 万 m³/h，引风机效率为 85%，那么 9.8Pa(1mmH₂O) 的压力降就相当于 6.4kW 的功率损耗，年耗电量就高达 5.6 万 kW·h。压力降的大小与电除尘器的结构，烟气的流速和流速的分布等因素有关。它主要产生在进出口封头和气流分布板，而电场内产生的压力降较小。所以根据现场的实际情况，对上述部件，选用合适的结构及有关参数，就很重要。烟气流速是设计时必须慎重考虑的一个重要问题，流速分布的均匀性经常需要通过模型试验和现场气流分布试验来保证。值得重视的是：与电除尘器相关的烟道布置对整个系统的压力降大小有着很大的影响，所以在进行总体设计时，不仅要注意电除尘器本体，而且要注意整个系统的压力降。

投运以后，由于分布板正常积灰，或者由于设计时先天不足，制造、安装、维修有缺陷等原因，随着运行时间的增长，压力降会有所增加。如属于前者原因，则运行一段时间后，会逐渐趋于稳定，系正常情况。如属后者原

因,则压力降可能会有较大幅度的增加,这样会破坏气流分布的均匀性,影响除尘效率。此时必须寻找原因,以恢复正常运行。

3. 能源消耗量

评价方法有两种:一种是评价总的能源消耗量;另一种是评价设计条件下,每处理 1m^3 烟气的能耗量。但不管采取哪一种办法,由于燃用的煤种和其他工况条件不同,也由于系统设计不同,它可以有很大差别,同类型电除尘器之间可比性较差。

不同的用户对电除尘器的主要能耗部件如:对阴阳极振打双面还是单面,分布板振打设不设,排灰阀采取何种型式,单轨吊车是电动还是手动,绝缘子室和灰斗是电加热,还是热风加热,灰斗是底部局部,还是整个灰斗加热等有不同的要求,能源消耗因此而有很大差异。所以,给电除尘器能源消耗量提出一个统一的标准事实上是不可能的。考核和评价这一指标的根据也只能是供需双方签订的“技术协议书”。考核时,应将装置数和实际能耗区别开来。

4. 钢材消耗量

电除尘器是一种钢耗量很大的产品,因此如何设计出既安全可靠又经济合理的结构,降低钢耗量,是一个十分重要的问题。评价办法习惯上有三种:(1)总钢耗量,(2)电场数和电场长度确定以后,每平方米烟气流通面积的钢耗量;(3)每平方米集尘面积的钢耗量。笔者认为第三种是比较科学的办法。计算时还应该注意设备的成套范围。但是不管采用哪一个办法,由于设计条件不同,它可以有很大差别,因此要规定一个统一的钢耗量标准,实际上也是不可能的。尽管这样,在分析经济技术指标时,把它作为对比资料进行分析,仍有一定的参考价值。

5. 漏风率

漏风率不仅同电除尘器的设计、制造有关,而且主要的还同它的安装有关。漏风率过大,不仅增加了引风机的负担,使能耗增加,

而且漏入壳体的“冷”风,会使局部结露,造成设备的腐蚀,引起电场局部粉尘比电阻的改变,此外还会使漏风处邻近的极板、极线变形,降低操作电压,直接导致除尘效率下降和影响设备的使用寿命。

壳体的漏风主要产生在下列部位:(1)入孔门;(2)穿透壳体的轴孔;(3)支承阴极的电瓷套;(4)与其他设施的连接部(例如卸灰处);(5)壳体焊缝等。减少漏风就必须在这些部位采取适当的措施。其中最重要的是壳体施焊的气密性,施工完毕后应做严格的气密性检查。表 1 为几台电除尘器的实测漏风率。

表 1 某些电厂实测漏风率比较

用户名称	韩城电厂	邵武电厂	元宝山电厂(西德进口)	宝钢电厂(日本进口)	军粮城电厂
漏风率 (%)	15—20	9.5—10	~4.5	5 (平均值)	3.3

笔者认为电站电除尘器因为处理烟气量大,漏风率以控制在 5% 以内为宜。

二、关于单项指标

1. 气流分布均匀性

均匀的气流分布是电除尘器获得高效率的重要因素。国际上判定其均匀性的标准很多,例如美国 RMS 标准、IGCI 标准、瑞士 ELEX 标准等。这些标准各有优缺点。IGCI 和 ELEX 标准对通过电场过大和过小的烟气流速进行了限制,但流速不均对效率的影响不能建立明确的数学关系。RMS 标准中的 σ 值与除尘效率之间可建立明确的数学关系式,它的数学概念和物理意义都比较明确。世界上很多公司,例如瑞典 FLAKT 公司、西德 LURGI 公司等都采用 RMS 标准或与其相似的标准。结合国内当前实际情况,推荐气流分布均匀性判定标准参考 RMS 标准制订。建议如下:

各规定断面测得的风速值相对均方根差

系数值 $\sigma_r \leq 0.20$ 为合格, $\sigma_r \leq 0.15$ 为优良, $\sigma_r \leq 0.10$ 为很好(其中,出口断面最上一行和最下一行测点的风速宜相对小,以减少灰斗内粉尘的二次飞扬和粉尘旁通,所以此断面的 σ_r 仍以小于等于 0.20 判定)。

σ_r 值计算公式如下:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{(n-1)\bar{V}^2}}$$

式中 \bar{V} ——断面平均风速

V_i ——测点风速

n ——测点数

2. 主要零部件设计和制造质量

极板、极线是电除尘器的主要零部件。设计时,极板形式主要根据它单位长度上集尘面积和重量的大小、振打加速度传递性能和清灰效果的好坏、刚性和抗变形能力的强弱等因素来确定。选择阴极线时,要求它具有良好的放电性能,在阳极板上产生较为均匀的电晕电流,并且具有较低的起晕电压和较高的击穿电压。为获得长期稳定的除尘效率,要求它具有易清灰、不晃动、不断线等特性。以上有些要求往往是互相矛盾的,不能兼而得之。设计时要根据具体情况综合进行考虑,考核时也应该进行综合评价。

笔者认为,极板型式确定以后,最重要的制造质量指标是板平面法线方向的平面度 ΔL_c 。国际上大多数公司标准为 $\Delta L_c \leq L/1000$ (式中, L 为极板的公称长度)。根据国内实际情况,规定 $\Delta L_c \leq L/1000$ 也是合适的。有些厂家为了提高产品质量和竞争性, ΔL_c 有更严格的内控标准。

阴极线的制造质量指标因型式不同而异。对框架式结构而言,常用极线与小框架组合后的形位公差来表示,一般规定组合后的框架平面度 $\Delta L_D \leq 5\text{mm}$ 。

3. 阴、阳极间距误差

阴、阳极间距误差是极板和极线制造和

安装误差的综合反映,直接影响着电除尘器的操作参数和运行性能。

瑞典 FLAKT 公司、西德 Rothemuhle 公司、瑞士 ELEX 公司等均要求阴、阳极间距控制在 $150 \pm 10\text{mm}$ 。笔者认为,阴、阳极间距极限偏差规定为 $\pm 10\text{mm}$ 是合适的。有些企业的内控标准可以有更严格的规定。军粮城 102m^2 电除尘器安装时实测间距误差均小于等于 $\pm 6\text{mm}$ 。这是该除尘器能高效率运行的重要保证。

4. 空载通电车击穿电压

国外用户一般无此要求,厂家也不作此项试验。但笔者认为用空载击穿电压,可以检验电除尘器安装成台后机械部分和高压电源部分的综合质量状况,是检验电除尘器设计、制造和安装质量的关键步骤。它直接影响电除尘器的效率。当然,现场的环境条件(例如空气的湿度和温度、大气压等)对空载试车电压有一定的影响。但在正常情况下,它有一定的可比性。笔者建议,异极距为 150mm 的电除尘器,空载击穿电压 V_B ,在使用芒刺型电极时, $V_B \geq 50\text{kV}$ 为合格, $V_B \geq 55\text{kV}$ 为良好, $V_B \geq 60\text{kV}$ 为很好;在使用非芒刺型电极时, $V_B \geq 55\text{kV}$ 为合格, $V_B \geq 60\text{kV}$ 为良好, $V_B \geq 65\text{kV}$ 为很好。

102m^2 电除尘器第一电场用两套 $1.1\text{A}/66\text{kV}$ 的高压电源并联供电,升压试验所获得的最高平均电压为 63.8kV 。

5. 阳极排振打加速度及其分布

通过锤击,将收集到阳极板表面的灰尘振落到灰斗,是电除尘的一个必要过程。

振打力过大,不仅造成严重的二次飞扬,而且还会打弯振打杆,破坏正常的极间距,导致除尘效率的下降。此外,还会影响振打和电极系统的寿命。但振打力过小不能达到有效清灰的目的。因此必须根据烟气条件和电除尘器的特定结构规定一个有效清灰所必需的最小振打加速度值。

此外还必须对过大的振打加速度加以限

制。理论上讲,整个阳极排各个测点上的加速度值的分布愈均匀愈好。能综合反映这一情况的,有人建议用相对均方差这个指标,笔者认为这是合适的。简述如下:

对被测平面上所有测点的加速度值计算:

$$\text{平均值} \quad \bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\text{均方差} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}}$$

$$\text{相对均方差} \quad \sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{a}}$$

式中 a_i ——测点的加速度值
 n ——测点数

这里所指的加速度值必须同时在气流方向(即振打杆方向)和极板平面上垂直于振打方向和极板法线方向进行测量。

根据目前已有的经验,规定一个最小振打加速度值,再加一个相对均方差限制就可以综合反映振打效果。其评价标准建议如下:

对燃煤锅炉的烟气条件和紧固式连接的阳极排而言,最小振打加速度为 150g。(g 为振打加速度单位, $g = 9.8\text{m/s}^2$)。整排测试时, $\sigma_r \leq 0.45$ 为合格, $\sigma_r \leq 0.35$ 为良好, $\sigma_r \leq 0.30$ 为很好。

6. 阴极线(或阴极框架)最小振打加速度

极线振打主要是为了清扫电极,使之有效地发射电晕电流保持良好的电场分布,稳定电除尘器的运行。振打力过小,会使电极积灰严重,甚至造成电晕闭塞,严重影响除尘效率。而如果振打力过大,不仅影响有关零部件寿命,而且振打时会使极线产生较大的晃动,以致引起电场过多的闪络,破坏电除尘

器的稳定运行。原则上,对阴极振打的要求同阳极振打一样,除了规定一个最小振打加速度外,还应该有一个相对均方差指标。但由于极线上安装传感器十分困难(星形线、螺旋线等根本无法安装,此时只好测框架上的加速度),习惯上只对极线(或框架)规定一个最小振打加速度。根据国内现有经验,在锅炉飞灰电除尘器中,建议框架式紧固吊挂结构的管型芒刺线最小振打加速度为 50g。

102m² 电除尘器现场实测极线最小振打加速度在振打杆方向上为 90g,在框架平面的法线方向上为 55g。在运行间隙停机时,进入电场内观察,无积灰问题,运行时也没有过多的闪络,说明振打效果是好的。

7. 易损零部件的使用寿命

电除尘器的检修周期必须服从主机,国内发电机组的大修周期一般为 2~3 年,小修周期一般为半年。电除尘器易损零部件寿命至少大于这个周期。运行中常见的极线断裂,绝缘子损坏等事故,必须在设计时慎重考虑,采取必要的措施。

电除尘器的主要易损零部件有振打锤头和尘中轴承等。有些厂家在设计前对这些零部件作了模拟寿命试验。实际使用的寿命需要很长的运行时间才能进行考核。笔者意见作为制造厂的保证条件,这些易损零部件的使用寿命能满足机组的检修周期即可。而实验室内模拟试验的结果可供分析水平时参考。

参 考 文 献

- [1] 电力工业部标准, DLJ52-81 电力建设施工及验收技术规范(锅炉机组篇), 1981 年
- [2] 傅祖震, 劳动保护科学技术, (4), 36-41(1983).
- [3] 陈康元、叶昌仁, 华北电力学院学报, (1), 1-10 (1982).