



适应新排放标准的火电厂除尘技术

陈国桀

中国科学院广州能源研究所, 广州 510070

摘要 简要介绍历次修订《火电厂大气污染物排放标准》时,中国火电厂在开发和应用电除尘器、袋除尘器、电袋复合除尘器方面的改进;指出电除尘器按传统凭飞灰比电阻和化学成分确定驱进速度并进行电除尘器选型设计,其偏差颇大;提出应更重视飞灰物相组分,还要重视显微结构、浸润性、黏附性、粒径分布和视密度、煤的燃烧方式、炉温、燃烧气氛等的影响;推荐用满足排放浓度所需要的比集尘面积数值判别不同煤质和飞灰的电除尘难易性;比较电除尘器、袋除尘器、电袋复合除尘器的技术特点和技术经济性后,建议:① 煤、灰品质较稳定,比集尘面积 $<160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ 就能达标者,优先选用电除尘器;② 煤、灰品质多样或多变,比集尘面积 $\geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$,或已运行的除尘器需大幅提高除尘效率才能达标者,优先选用电袋复合除尘器,它与袋除尘器一样能够有效地捕集PM10和PM2.5微尘;③ 燃煤硫分低,除尘器进口烟尘浓度较低,烟气速度场、浓度场、温度场和漏风比较均匀时,需要比集尘面积 $\geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ 才能达标者,优先选用袋除尘器。

关键词 排放标准;电除尘器;袋除尘器;电袋复合除尘器;比集尘面积;煤质;飞灰;技术特点;技术经济比较

中图分类号 X701.2, TM621.7

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)03-0090-06

Dust Control Technologies Under the New Emission Standard for Thermal Power Plants

CHEN Guojie

Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

Abstract The progress of dust control technologies for thermal power plants accompanying with the successive revisions of emission standards are reviewed in this paper. Electrostatic precipitator (ESP), Bag Filter (BF) and ESP-BF integration (COPAC) are among those technologies adopted for meeting these standards. It is pointed out that to design the ESP with a migration velocity, it is not enough to consider only the dust resistivity and the chemical composition, which would involve a large error. One has to consider the influences of dust mineral composition and other properties such as microstructure, infiltration, adhesion, particle size distribution and apparent density, as well as the coal combustion method, furnace temperature, and combustion atmosphere. It is recommended to use the Specific Collection Area (SCA) of the ESP as an index of the dust precipitability for different fly ashes, produced from different coal combustions. Based on technical and economical comparisons between ESP, BF and COPAC, the following suggestions are made. (1) In case of stable coal supply, the ESP is preferred, when $SCA < 160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ in order to meet the emission standard; (2) COPAC is preferred, when $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ is required with a variety of or changeable coal supplies or in case when it is necessary to obviously improve the existing ESP performance in order to meet the emission standard. COPAC can also collect M10 and PM2.5 fine particulates in the same manner as BF. (3) BF is preferred when $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ is required and in case of low sulfur coal, low inlet dust concentration, uniform gas/dust distribution and even air leakage.

Keywords emission standard; electrostatic precipitator; bag filter; electrostatic precipitator and bag filter; specific collection area; coal properties; fly ash; technical features; technical and economic comparison

新的《火电厂大气污染物排放标准》即将颁布实施,新建火电厂烟尘排放浓度必须执行粉尘排放浓度 $C_0 \leq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$

新标准。这对于火电行业来说,既是新的挑战,更是攀登除尘技术新高峰的机遇。

收稿日期: 2009-12-07

作者简介: 陈国桀,研究员,研究方向为烟气净化及其测试技术,电子信箱: chenguoju@126.com





1 《火电厂大气污染物排放标准》促进火电厂除尘技术和设备进步

1.1 电除尘器

1980 年之前,火电厂执行《工业“三废”排放试行标准》(GBJ 4—1973)^[1],烟尘排放量按烟囱高度限制,利用高烟囱排放对策除尘效率为 80%~90%即可达标。火电厂主要使用高效多管除尘器、低阻文丘里除尘器或斜棒栅除尘器都能达标。直至 20 世纪 70 年代末才有少量国产 SHWB 型和由电力部门组织分别在福建邵武、永安电厂研发的电除尘器。火电厂电除尘技术落后于其他行业,电除尘器在全国所占比例极微。80 年代电力部门研发的电除尘技术和设备获长足进步。

1991 年的《燃煤电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1991)^[2]对火电厂太优惠,排放标准随燃煤灰分增加放宽,烟尘浓度 2000mg/Nm³ 甚至只要 ≤3300mg/Nm³ 即可达标,《火力发电厂设计技术规程》(DL 5000—94)限定火电厂的电除尘器设计除尘效率仅为 98%。

1996 年的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1996)^[3],虽将排尘浓度限值提高到 200~600mg/Nm³,但仍宽于其他行业。80 年代之后,火电厂电除尘技术和电除尘器数量都得到飞速发展。90 年代中期,火电厂电除尘器占全国比例已达 65.3%,1998 年更是上升到 75%,并催生了中国巨大的电除尘设备产业^[4]。

2003 年的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2003)^[5],规定新建火电机组排尘浓度执行 50mg/Nmm³ 标准,使中国火电装机容量在每年都大幅递增的同时,火电厂烟尘排放却逐年有所下降。虽然该标准仅相当于美、德等先进工业国家 20 世纪 80 年代的水平,但却亟大地推动了中国电除尘技术赶上世界先进水平,也使中国成为全球最大的电除尘器生产国,国产电除尘器输出参与国际竞争。

1.2 袋除尘器

袋除尘器在火电厂中使用和研发经历了多次起落。1975 年,在内江、淄博、合肥等电厂的小机组开始第一代无碱玻纤滤袋除尘器研发试验,虽然有内滤和外滤不同过滤方式,采用分室反吹清灰,但终因结构上仍有问题以及国产滤料损坏而被迫拆除。

1979 年,巡检司电厂和普坪村电厂 100MW 机组再次研发试用滤袋除尘器,尽管设计非常细心,安装、施工也很讲究,采用当时最好的聚四氟乙烯/石墨/硅油处理的玻纤织成滤布并用多针缝纫机三针脚缝合成袋,壳体两遍施焊,漏气率仅 2%……但终因破袋和气动阀门不过关等原因被迫拆除^[4]。

80 年代,美、澳、加等的火电厂已因排放标准为 30mg/Nm³ 大量使用袋除尘器。1993 年,杨树浦电厂将一台电除尘器拆除。虽然全面采用澳大利亚滤料和旋转吹清灰技术,但终因阻力太大和破袋、“糊袋”而再遭拆除。这一打击使火电厂使用袋除尘器又后延许多年。

2001 年,呼和浩特电厂因燃用准格尔煤(占 70%)掺海勃湾老石旦煤,电除尘器效率很差,虽几经改造和扩容仍未见效。

该厂扩建的丰泰电厂 2×200MW 机组再次采用澳大利亚旋转喷吹清灰滤袋除尘器,Ryton 滤料,排放浓度 <30mg/Nm³ ^[6]。这一成功试用大大鼓舞了一批火电厂采用滤袋除尘器的勇气。如高井电厂 100MW,焦作电厂、乌海电厂 200MW,托克托电厂 2×300MW 等机组都先后采用袋除尘器。在滤袋没破损时袋除尘器的排尘浓度 <30mg/Nm³。但这批除尘器中最先使用的电厂滤袋寿命也没超过 30000h 就出现破袋和局部“糊袋”。最近正计划在其前面增加电场而改造成电袋除尘器。

1.3 电袋复合除尘器

在中国,实际上有相当一部分电除尘器因对煤质、飞灰特性认识不足,设计选型失误,或因煤质多变,或因除尘器受损、失修等原因不能达标。2001 年开始,就有在原电除尘器壳体中将电、袋两类除尘技术的优点互扬、缺点互补,研发出电袋复合除尘器。其滤袋有立式圆袋、低压脉冲清灰^[7]和卧式扁袋、循环净烟气脉动清灰^[8]两种型式。它们都大大提高了除尘性能,排放浓度 $C_0 \leq 30\text{mg/Nm}^3$,除尘器阻力比袋除尘器低 400~600Pa。前者清灰周期约 30~60min (比常规的袋除尘器长),后者清灰周期长至 6~8h。这种新型的电袋复合除尘设备既适用于现有电除尘器的提效改造,又可用于新建的电除尘难收粉尘项目,已经投运的几十台 25~600MW 机组中,最长运行时间超过 5 年。目前前者也将用于中国在印度承建的 600MW 火电厂工程中。

2 除尘器选型

2.1 电除尘器

传统总认为粉尘比电阻在 $10^4\Omega\cdot\text{cm} < \rho < 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 范围内才适合于电除尘。又常以煤中收到基硫分 S_{ar} 、收到基灰分 A_{ar} 、收到基水分 M_1 和飞灰中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等化学成分为依据(忽视飞灰中实际存在的物相组分及其物性的影响),计算(或确定)电除尘器最关键的设计参数——驱进速度 ω (或表观驱进速度 ω_k , cm/s),再根据要求的排尘浓度或除效率,按多伊奇(Deutsch)公式(或麦兹(S. Matts)公式)计算出所需比集尘面积 $SCA(\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}))$ ^[9]。各供应商都把确定 ω (或 ω_k)视为重要技术秘密,但大量实践表明,这种选型方法的失误率颇高。

因为试验室比电阻的测量方法(如德国的梳型法,美国的平盘法或针尖法等)、测量条件(德国为 500V,美国为击穿电压的 90%等)都不统一,不同测量方法、测量条件所获的测量值又相互不能换算;更重要的是实验室在空气介质下测量、而实际应当在烟气条件下测量……总之,试验室比电阻与实际值差别很大,亟易误导并造成失误。

除尘器收集的飞灰中并不是以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等各元素的氧化物存在,实际的物相组分是以各种元素的硅铝化合物熔融非晶玻璃体为主(占总量的 60%~70%);方石英($\alpha\text{-SiO}_2$)、莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)次之,个别煤还有刚玉(Al_2O_3 ,如准格尔煤)等晶体,它们都是高比电阻、电除尘特性难的物质;还有活性氧化钙(CaO)、消石灰



($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、石膏(CaSO_4)、亚硫酸钙(CaSO_3)、赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、未燃尽碳等物相组分存在的。化学成分为 Fe_2O_3 ,可能以赤铁矿(Fe_2O_3)或磁铁矿(Fe_3O_4)物相存在,前者对电除尘影响不大,但后者却严重降低击穿电压;化学成分为 CaO ,可能以上述(消石灰、石膏、亚硫酸钙等)更多的物相形态存在,其电除尘性能差别很大。由此可知,仅凭飞灰化学成分认定其影响比电阻的高低和电除尘的难易性,确定 ω (或 ω_k),并据此进行选型设计,很容易造成重大偏差或失误。除更应重视物相组分外、显微结构、浸润性、黏附性、粒径分布和视密度;煤的燃烧方式、炉温、燃烧气氛(甚至制粉系统)等不同,其电除尘性能也不同。这些都是选型设计者必须认真考虑的^[10]。

呼和浩特电厂、托克托电厂、宣威电厂、禹州电厂、漳山电厂、乌海电厂、霍林河坑口电厂,以及中国在印度承建的 Balco 电厂、JSG 电厂等无不都是按传统的选型设计方法:根据比电阻、煤质的 S_w 、 A_w 、 M_t 和灰的化学成分计算(或确定) ω 或 ω_k ,再根据要求的排尘浓度或除尘效率,按多伊奇公式(或麦兹公式)计算出所需 SCA 。他们的实际除尘效率严重低于设计值;例如在印度承建的 S、D、A 3 座电厂都是 300MW 机组,排尘浓度都要求 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$,就其煤质和飞灰的电除尘难易程度排序,应该是从 S 往 A 排列;如选型以电场烟速度 v (m/s)、比集尘面积 SCA 表示,某设计者选型结果的排序竟正好相反。S 电厂, $v=0.62\text{m}/\text{s}$, $SCA=288.6\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$;D 电厂, $v=0.78\text{m}/\text{s}$, $SCA=208.9\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$,A 电厂, $v=0.97\text{m}/\text{s}$, $SCA=183.8\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$;这 3 座电厂的电除尘器都已运行,S 电厂排放达标,而 D、A 电厂却冒浓烟;又乌海电厂 3 台 12MW 循环流化床锅炉烧当地的小窑煤,配 76m^2 3 台电场除尘器, $v=0.71\text{m}/\text{s}$, $SCA=73.6\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ ^[11],长期看不到排烟;而 2 台 200MW 煤粉炉烧同样的煤,电除尘器 6 电场, $v=0.96\text{m}/\text{s}$, $SCA=119.89\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ ^[12],排尘浓度高达 $800\sim 1500\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。究其原因,主要是前者循环流化床锅炉的炉内燃烧温度低于 900°C 、氧化气氛而且粒径粗,粉尘的物相组分、显微结构都比煤粉炉的粉尘容易除尘。然而在印度 K 电厂的 135MW 循环流化床锅炉同样烧印度煤,设计者却认为属于难收粉尘而配电袋除尘器。

上述工程实践表明,偏差很大的重要原因是现行的选型设计对烟尘的电除尘特性及其影响因素认识不足;选型设计参数有疏漏;驱进速度(或表观驱进速度)计算依据不充分、偏差大。

随着环保和节能降耗意识的增强、排放标准的提高,电除尘技术也有新发展。实用技术如下。

1) 先进的电控设备

① 智能化控制系统,在单相电源的节能、提效方面成效显著。

② 高压开关电源是电除尘器高压供电的新动向,具有输出纹波小、平均电压电流高,重量轻、体积小、结构紧凑、成套设备集成一体化,三相负载对称、对电网影响小,转换效率与功率因数高,以及有较高收尘效率等优点。

③ 三相电源输出直流电压平稳、波动小、运行电压高,功率因素可达 0.9 以上,但控制响应时间较长。

④ 恒流高压直流电源是正反馈控制,能自动适应工况变化,克服二次扬尘,并有抑制电晕闭塞和阴极肥大的能力,具有运行电流稳定、运行电压高、功率因数高、工作连续可靠等优点。

⑤ 中频高压直流电源整流变压器体积小、重量轻、移动方便。它比可控硅变压器体积小 $1/3$,且安装方便,输出/输入功率比大于 0.95,比可控硅电源有更高的电能利用率。

2) 烟气调质剂

烟气调质剂主要有 H_2O 、 SO_3 、 NH_3 等,以 SO_3 调质效果最好,但环保者对它有保留看法。实践结果表明,并不是所有烟尘都有效果。例如,在托克托电厂、登封电厂 SO_3 的调质效果显著,但在霍林河坑口电厂和印度 JSG 电厂则效果不明显,这可能与粉尘的物相组分和显微结构(如浸润性)有关。

3) 机电多复式双区电除尘器

在电场结构上,不仅将粉尘荷电区与收尘区分开,而且采用连续的多个小双区进行复式配置;同时在配电上,采用独立电源分别对荷电区与收尘区供电,使荷电与收尘各区段的电气运行条件最佳化。双区的阴、阳极板有效收带阳、阴极性的粉尘,既有利于扩大比电阻适应范围,又减少了二次扬尘,相当于增加收尘面积提高除尘效率。

4) 移动电极电除尘器

移动电极电除尘器是将收尘极做成可以上下移动的形式,再用安装在灰斗中即非电场区域的旋转刷子刷掉被捕集的粉尘,可以有效清除常规清灰方式难以清除的粉尘,始终保持收尘极表面相对清洁,防止反电晕的产生、解决了振打引起的二次扬尘。

5) 烟道凝聚器

含尘气体进入除尘器前,先对其进行分列荷电处理,使相邻两列的烟气粉尘带上正、负不同极性的电荷,然后通过扰流装置的扰流作用,使带异性电荷的不同粒径粉尘有效凝聚,形成大颗粒后进入除尘设备。彻底清灰既克服反电晕又解决了振打二次扬尘问题、有效提高除尘效率。

其中,先进的电控设备、烟气调质、机电多复式双区电技术在国内外已经成熟,已有数家公司自主开发了此类技术,并在一些项目上使用,情况好,正在进一步改进和完善。移动电极电除尘器、烟道凝聚器技术在国外已经相当成熟,国内几家公司也正在研发此项技术。

现在排放标准是 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、新的标准要求 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。对于大部分烟尘而言,应该通过采用新的成熟电除尘技术既保证达标又提高技术经济性。采用这些新技术后,为了达标其比集尘面积仍需 $160\sim 180\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ 的,不能只在电除尘器上求出路。

建议采用电袋复合除尘器方案。电除尘器部发挥初级除尘和对透过粉尘与荷电器双重作用。电除尘器部分应有两电场,其中第一电场配高频高压开关电源,尽量增强电场强度



和电晕电流,强化高浓度粉尘荷电;第二电场为第一电场如因故失效的备用电场,可配备常规电源。电除尘器后直接连袋除尘器,保证粉尘浓度已降低,大于 90% 的已荷电粉尘的电荷不再丢失,再由袋除尘器进一步除尘,达到 $\leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。袋区的气流分布均匀性不宜用槽型板,多孔板或导流板之类或均布烟箱等传统机械式均流措施而可以通过优化滤袋布置和组合方式解决。以求能节能、降耗、延长滤袋寿命、保证稳定达标的目标。

由于影响驱进速度(或表观驱进速度)的因素非常多,计算(确定)方法又属各商家的核心技术,不可能公开也不可能统一。故建议采用电场烟速度、比集尘面积作为选型设计的关键参数;把满足排放浓度和所需比集尘面积作为评价煤质和粉尘电除尘难易性的指标。

表 1 给出了煤质和粉尘的“电除尘难易性”评价,排放浓度为 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 所需比集尘面积(极距 400mm 计)。

表 1 煤质和粉尘的电除尘难易性评价
Table 1 Coal properties and the evaluation of fly ash removal ability of electrostatic precipitator

SCA $/(m^2 \cdot (m^3 \cdot s^{-1})^{-1})$	≥ 200	$\geq 170,$ < 200	$\geq 140,$ < 170	$\geq 110,$ < 140	≤ 110
难易性	难	较难	一般	较容易	容易

2.2 袋除尘器

总结火电厂袋除尘器和国外或国内其他行业相比,道路曲折、多次受挫的原因,分析中国火电厂烟尘与他们的区别、找出特点、对症下药,定能让这一高效除尘技术发挥出更好的作用。中国火电厂燃煤多样、煤质多变、锅炉烟气烟量大、烟温、湿度和成分波动较大……除尘器进口前的烟道平直段短、漏风较大且不均匀,除尘器内烟尘速度场、浓度场、温度场、湿度场不均匀状况较明显。在以往遭挫折的袋除尘器上常有同时存在局部破袋、烧袋和糊袋的现象。这不是采用更高级滤料就能解决的,需要有相应措施才行。

袋除尘器的选型设计的关键参数:根据粉尘性状(形状、粒径,附着、凝聚性,吸湿、潮解性,磨琢性,可燃、爆炸性);烟气温度、湿度、烟气成分选择滤料、过滤速度。

评价袋除尘器的主要技术指标有:过滤速度 $v(\text{m}/\text{min})$ 、压力损失 $\Delta p(\text{Pa})$ 、 $\Delta p(\text{Pa})$ 限值下的清灰周期 $\tau(\text{min})$ 及滤袋寿命、性价比。

2.3 电袋复合除尘器

电袋复合式除尘器是在一台除尘器内有机集成了电除尘和布袋除尘两种技术,二者结构上有机结合,以达到最佳配置。

电袋复合除尘器的设计思路是让含尘烟气先在电场区中除去大部分粉尘(利用电除尘效率按指数变化的规律),然后让带电粉尘进入袋区。这样,便可有效地降低袋区的阻力,达到低排放、节能的目的。为此,粉尘在电场中的荷电效果至关重要。粉尘荷电充分,在电场力作用下会有更多的粉尘沉

积到极板上;此外从电场逃逸的荷电粉尘,电荷量多,进入袋区后,其过滤阻力也低。

电袋复合除尘器的选型设计的关键参数:根据烟气温度、湿度、烟气成分选择滤料、过滤速度。

电袋复合除尘器由于前置有电除尘区,既降低了进袋除尘区粉尘浓度又予荷电,故滤袋的过滤速度可比袋除尘高约 20%,滤袋压力损失下降约 15%,清灰周期延长一倍以上。实践表明,滤袋寿命延长 25% 以上。袋区能与袋除尘器一样有效地捕集 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 微尘。

一体式电袋除尘器的滤袋有立式圆袋、低压脉冲清灰和卧式扁袋、循环净烟气清灰两种型式。前者与常规“长袋低压脉冲清灰袋除尘器”相同,依靠 0.2MPa 以上压缩空气脉冲喷吹造成圆滤袋变形、附着在袋上的粉尘层破裂脱落。圆滤袋因变形要求滤料的抗折性好,为此火电厂不用价廉但抗折性差的玻纤材料,而用 PPS 材料(抗氧化性较差)。对于卧式扁袋,清灰不依赖滤袋变形,而是如同斜槽气力输灰原理,由小于 15kPa 低压循环净烟气将粉尘层脱离滤袋并清除。滤袋不变形,故可以用玻璃纤维材质,优点是价廉、抗氧化性好、耐腐蚀、适应温度湿度范围广。已有多台投运超过 5 年而没破袋的实绩。更可取的是其体积很紧凑,通常用电除尘器一个电场的空间可以布置过滤速度为 0.8~1.0m/min 的滤袋(立式圆袋需要约 3 个电场的空间),而且滤袋排布置与原电除尘集尘板排完全相同,更有利于改善前面电场区的气流分布和保持袋区粉尘予荷电,故阻力损失更小($\Delta p < 600\text{Pa}$)、清灰周期更长(6~8h)。尤其适合原来只有 2~3 个电场的电除尘器提效改造。

分体式电袋除尘器(严格地区分)不能算电袋复合除尘器,只是电、袋串联组合除尘器。在进袋区的粉尘予荷电、气流分布、阻力损失、占地和投资等方面均比一体式的差。

3 除尘技术的选择原则

选择除尘技术的原则是:① 满足排放标准、技术性能好;② 可靠安全性、稳定性好;③ 节约能耗;④ 设备费用与运行费用低;⑤ 占地小;⑥ 操作简单、维护容易。

总之,要因煤、灰性质;因燃烧方式;因地制宜;以技术特点、技术经济综合比较结果择优选用除尘技术和除尘设备。要把握好电力生要求安全、高效、降耗、减排等特点。

4 3 类除尘设备的技术特点和技术经济比较

4.1 技术特点比较

表 2 比较了 3 类除尘设备的技术特点^①。

1) 在达到相同排放浓度前提下,将 5 个电场的电除尘器与袋除尘器、(含 2 个电场的)电袋复合除尘器(包括一体式和分体式)进行技术经济性^②综合比较,如表 3 所示。

2) 设备费用与年运行费用比较如下^③:

① 设备费用:袋除尘器<六电场电除尘器<一体式电袋<分体式电袋。

表 2 除尘设备的技术特点比较

Table 2 Comparison of technical features of various dust collecting equipment

项目	电除尘器	袋除尘器	电袋复合除尘器	
			一体式	分体式
排放浓度	按煤质选型可保证排放达标	煤质变化,排放均达标	煤质变化,排放均达标	煤质变化,排放均达标
平均阻力损失	200~300Pa	<1200Pa	<800Pa	<1000Pa
最终阻力损失	200~300Pa	<1500Pa	<1100Pa	<1300Pa
安全性	对烟气温度影响和烟气成分不敏感	高温烟气通过旁通烟道外排,滤袋不受影响	高温烟气由分旁通烟道外排,滤袋不受影响,但其他负荷加大	高温烟气通过旁通烟道外排,滤袋不受影响
检修	停炉检修	能够在线分室检修	能够在线分通道检修但不能在线分室检修	能够在线分室检修

表 3 除尘设备的技术经济性比较

Table 3 Comparison of technical and economic features of various dust collecting equipment

类别	比较条款	具体内容	备注
技术特点	技术优点 技术缺点	排尘浓度、阻力损失、适用范围等	
经济性	设备费用 电耗费用 年运行费用 总费用	设备初始投资费用 所有设备功耗总和所对应的电耗费用 电耗费用与每年维护费用之和 设备费用与年运行费用之和	可以根据需要增加烟尘排放费用比较等
安全可靠	安全和可靠性	耐受烟气温度、湿度、酸碱度变化的能力,保证连续运行时间的长短	重点考虑工况改变或发生故障情况
占地面积	本体占地面积	长×宽	达到相同除尘效率时的占地面积

② 年运行费用:六电场电除尘器<一体式电袋<分体式电袋<袋除尘器。

③ 总费用：电除尘器<袋除尘器<一体式电袋<分体式电

袋。

综合以上分析,3类除尘设备的技术经济性综合比较如表4所示。

表 4 除尘设备的技术经济性综合比较

Table 4 Comprehensive technical and economic comparisons of dust collecting equipment

序号	分项	技术特点和安全可靠性比较	经济性比较	占地面积比较
1	电除尘器	优点:除尘效率高、阻力损失最小、适用范围广、使用方便且无二次污染、对烟气温度及烟气成分等影响不敏感;设备安全可靠性好 缺点:除尘性能受煤质、飞灰成分、物相组成、显微结构等的影响敏感	设备费用较低;年运行费用低;经济性好	大
2	袋除尘器	优点:不受煤、灰特性影响,出口排放低且稳定;采用分室结构的能在100%负荷下在线检修 缺点:系统阻力损失最大;对烟气温度、湿度、烟气成分敏感;若使用不当滤袋容易破损并导致排放超标或糊袋	设备费用低;年运行费用高;对电除尘器“难收粉尘”的经济性较好	小
3	电袋复合除尘器	一体式电袋和分体式电袋除尘器 优点:不受煤种、烟气工况、灰特性影响,出口排放低且稳定;设备对高温烟气、爆管等突发性事故的适应性较好。破袋对排放影响小于袋式除尘器 缺点:系统阻力损失较大;对烟气温度、湿度、烟气成分较敏感,但小于袋式电袋除尘器	设备费用较高;年运行费用较低;经济性较差	较小
	分体式电袋	优点:不受煤种、烟气工况、灰特性影响,出口排放低且稳定;能在100%负荷下分室在线检修;在点炉、高温烟气等恶劣工况下可正常使用电除尘器但滤袋不受影响;设备对高温烟气、爆管等突发性事故的适应性较好。破袋对排放的影响小于袋式除尘器 缺点:阻力损失大。对烟气温度、湿度、烟气成分较敏感,但小于袋除尘器	设备费用高;年运行费用较高;经济性差	较大

注:“经济性比较”未考虑不同除尘设备所配用的风机差价。

Note: In the column "economic comparison of", the different price of the fans used in different dust removal equipment is not considered.

4.2 经济性比较结论

1) 在不考虑各除尘设备所配用的风机差价时,采用节能运行方式的 5 电场、 $SCA \leq 110\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 电除尘器其总费用最低(采用普通运行方式的 6 电场电除尘器其总费用与袋除尘器相当),且使用方便、安全可靠性能更高。

采用节能技术运行方式的 6 电场、 $SCA \approx 140\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 电除尘器其总费用与电袋复合除尘器相当。

2) 对于难收粉尘和较难收粉尘,电除尘器需 $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 时,建议优先采用电袋复合除尘器或待积累更多经验教训的基础上采用袋除尘器。

5 结论

对电除尘、袋除尘、电袋复合除尘 3 类除尘技术和设备的技术特点、技术经济性综合比较结果如下。

1) 执行新排放标准,火电厂仍选择电除尘技术为主。电除尘设备仍是适合中国火电厂采用的主流除尘器。以往存在未达标现象主要是现行的选型设计对烟尘的电除尘特性认识不足;选型设计参数有疏漏;驱进速度(或表观驱进速度)计算依据不充分、偏差大;加之煤质多样且多变,选用的比集尘面积偏小所致。

2) 电除尘器对煤质、飞灰的理化特性较敏感,可以用满足新排放标准所需要的比集尘面积值区分烟尘的电除尘难易性。多种实用新技术能有效提高电除尘器的节能、降耗和性价比。

3) 满足新排放标准所需比集尘面积 $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 时,建议优先采用电袋复合除尘器。一体式电袋复合除尘器(包括立式圆滤袋和卧式扁滤袋)很适合现役电除尘器提效改造。

4) 袋除尘技术可满足新排放标准要求,但在火电厂应用已几遭起落,宜积累更多经验教训后再推广似更为稳妥。

电力生产要求安全、高效、降耗、减排。具体建议如下。

1) 煤、灰品质较稳定、 $SCA < 160\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 即能达标者,优先选用配节能设施的电除尘器。

2) 煤、灰品质多样或多变、 $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ (及已运行的电除尘器需大幅提效)才能达标者,优先选用供电区(2 电场)配节能设施的电袋复合除尘器,与袋除尘器一样能有效捕集 PM10、PM2.5 微尘。

3) 煤硫分低、除尘器进口烟尘浓度也较低、烟气速度场、浓度场、温度场及漏风又较均匀的,需要 $SCA \geq 160\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 才能达标者,优先选用袋除尘器。

参考文献 (References)

- [1] 工业“三废”排放试行标准 GBJ 4—1973[S]. 北京: 中国标准出版社, 1973.
Industrial "three wastes" discharge trial standard GBJ 4—1973 [S]. Beijing: China Standard Press, 1973.
- [2] 燃煤电厂大气污染物排放标准 GB 13223—1991 [S]. 北京: 中国标准

出版社, 1991.

Coal-firepower plant emission standards for air pollutants GB 13223—1991[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.

- [3] GB 13223—1996 火电厂大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

GB 13223—1996 Thermal power plant air pollutant emission standards [S]. Beijing: China Standard Press, 1996.

- [4] 王励前, 张德轩. 火电厂的烟尘治理和排放标准 [C]//第十届全国电除尘/第二届脱硫学术会议论文集. 广州: 中国环保产业协会电除尘委员会, 2003: 74.

Wang Liqian, Zhang Dexuan. Thermal power plant dust control and emissions standards [C]//The 10th National Electrostatic Precipitator/The Second Session of the Conference Proceedings. Guangzhou: China Environmental Protection Industry Association of Electric Dust Committee, 2003: 74.

- [5] GB 13223—2003 火电厂大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

GB 13223—2003 Thermal power plant air pollutant emission standards [S]. Beijing: China Standard Press, 2003.

- [6] 孙家勇. 布袋除尘器在电站治理上的应用 [J]. 电除尘及气体净化, 2002: 13.

Sun Jiayong. *Electric Dust and Gas Purification*, 2002: 13.

- [7] 福建龙净环保股份有限公司. FE 电袋复合除尘器鉴定 [R]. 龙岩, 2006.

Fujian Longjing Environmental Protection Co Ltd. FE electric composite filter bag identification information[R]. Longyan, 2006.

- [8] 甘肃科林电力环保设备有限公司. 元宝山电除尘器—滤槽式布袋除尘器鉴定资料[R]. 兰州, 2003.

Environmental Protection Equipment Co Ltd, Gansu Electric Power, Colin. Yuanbaoshan ESP filter slot bag filter identification data [R]. Lanzhou, 2003.

- [9] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 燃煤电厂电除尘器选型指导 [R]. 诸暨, 2009.

China Environmental Protection Industry Association of Electrostatic Precipitator Committee. The coal-fired power plant to guide selection of electrostatic precipitator[R]. Zhuji, 2009.

- [10] 陈国渠. 燃煤电除尘器选型设计参数补缺 [C]//第十三届全国电除尘学术会议论文集. 青岛, 2009.

Chen Guoju. Coal-dust filled selection of design parameters[C]//The 13th session of the National Conference of ESP Proceedings. Qingdao, 2009.

- [11] 内蒙古海蒙华泰热电厂. 12MW 机组电除尘器设计资料 [R]. 乌海, 2002.

Wuhai thermal power plant. Inner Mongolia, China and Thailand Wuhai Meng 12MW thermal power plant unit of ESP design data [R]. Wuhai, 2002.

- [12] 内蒙古海蒙华泰热电厂. 200MW 机组电除尘器设计资料 [R]. 乌海, 2005.

Wuhai thermal power plant. Inner Mongolia, China and Thailand Wuhai Meng 200MW thermal Power plant units ESP design data [R]. Wuhai, 2005.

(责任编辑 朱宇)