

发电工程设计项目经理（设总）培训课题

第二部分 专业设计基础知识

第三十二章：火力发电燃煤锅炉烟气除尘

华北电力设计院工程有限公司

2012 年 8 月北京

编写：彭方

目 录

1 烟气除尘基本原理	1
1. 1 尘烟分离方式	1
1. 2 集尘收集方式	1
1. 3 代表性除尘装置	1
2 基础参数与原始资料	6
2. 1 原始工艺参数	6
2. 2. 燃煤性质	7
2. 3. 除尘器入口烟气参数	7
3 静电除尘器	8
3. 1 静电除尘	8
3. 2 静电除尘的工作原理	8
3. 3 荷电粒子的运动和捕集	8
3. 4. 被捕集粉尘的清除	8
3. 5. 二次飞扬	8
3. 6. 除尘效率	9
4 对执行新的火电厂大气污染物排放标准采用静电除尘器的一些看法	10
4. 1 建议有条件的工程优先选用静电除尘器	10
4. 2 建议进一步研究加大比集尘面积的必要性和可行性	10
4. 3 建议用好调质技术	11
4. 4 高频电源具有明显优势	13
4. 5 建议设计院配合项目单位进一步做好工程煤源的专题报告	13
4. 6 建议设计院配合除尘器厂家进一步做好除尘器进出口烟道设计	13
4. 7 静电除尘器的一些新技术	13
4. 8 CFB (循环流化床) 干法脱硫装置的除尘器配置	15
5 袋式除尘器和电袋除尘器	16
5. 1 袋式除尘原理	16
5. 2 袋式除尘器的主要参数	16
5. 3 袋式除尘器	17
5. 4 电袋除尘器	17
5. 5 袋式 (电袋) 除尘器需要进一步研究的问题	18
6 工程信息、工程设计参考资料	18

火力发电厂新的大气排放标准实施后，燃煤锅炉烟气除尘基本上只能采用静电除尘器、袋式除尘器或电袋复合除尘器。这三种除尘器各有优缺点，都有一些问题需要进一步研究提高，以便进一步选用好火力发电厂烟气除尘器。

1 烟气除尘基本原理

烟气除尘是烟尘从气固两相流体中的分离，有时也借助液相（水）进行分离，分离的粉尘一般再采取各种措施进行收集。

1.1 尘烟分离方式

- 重力沉降
- 惯性分离
- 离心分离
- 水浴或水洗
- 静电分离
- 过滤分离

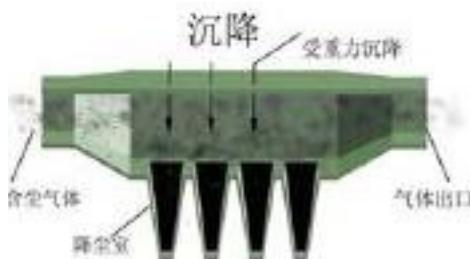
1.2 集尘收集方式

- 重力沉降
- 惯性沉降
- 水膜收集

1.3 代表性除尘装置

1.3.1 重力沉降室

重力分离、重力沉降收集



重力沉降室示意图

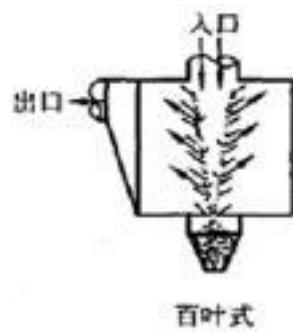
1.3.2 惯性式

惯性反转式——惯性分离、反转重力沉降收集



惯性反转式示意图

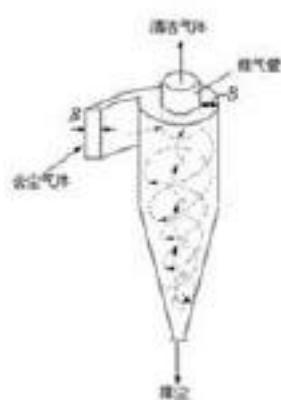
惯性百叶式---惯性分离、反转重力沉降收集



惯性百叶式示意图

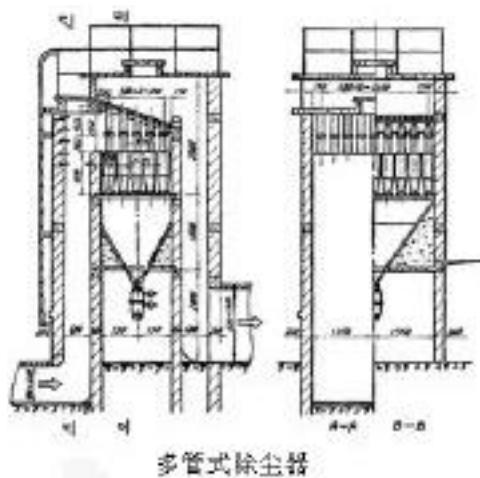
1.3.3 旋风式

旋风除尘器（旋风子）---离心分离、反转重力沉降收集

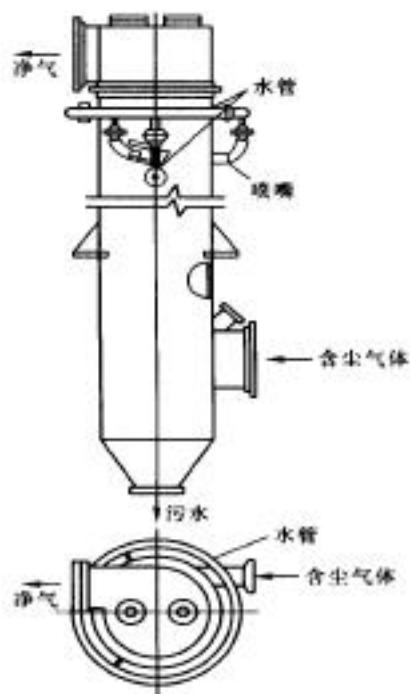


旋风除尘器

多管除尘器（多个小旋风子并列）--离心分离、反转重力沉降收集



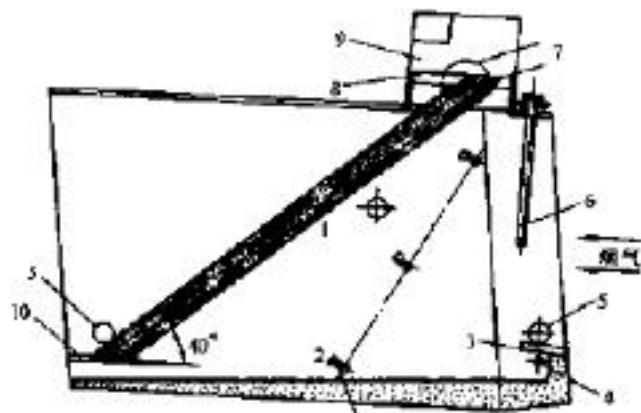
旋风水膜除尘器（无喷淋有水膜）---离心分离、水膜收集



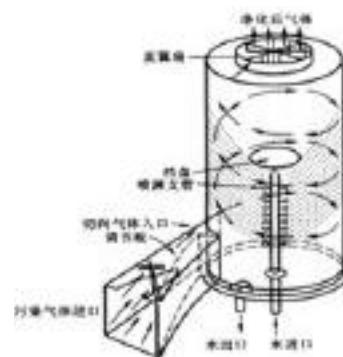
水膜式除尘器

1.3.4 水浴或水洗式

旋风水膜除尘器（入口有水平棒栅或斜棒栅）---水雾凝聚、离心分离、水膜收集

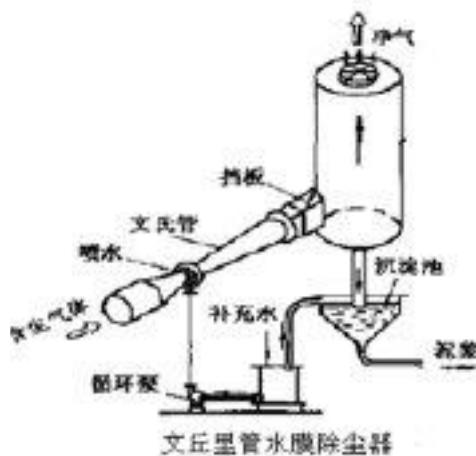


斜坡塵除器結構示意圖
1—斜管;2—霧化噴嘴;3—導灰板;4—沖灰水管;5—噴孔;
6—堵管;7—堵管;8—堵管;9—堵灰管;10—土擋板

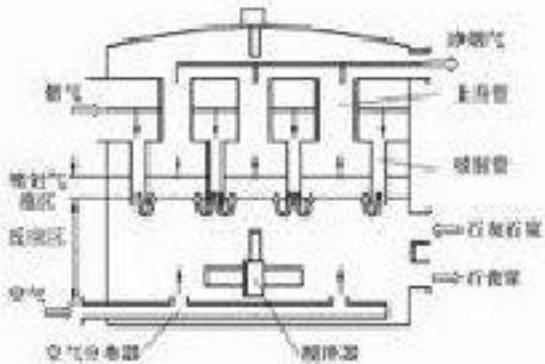


水膜除尘器（入口加噴水）

文丘里管水膜除尘器---增强性水雾凝聚、离心分离、水膜收集



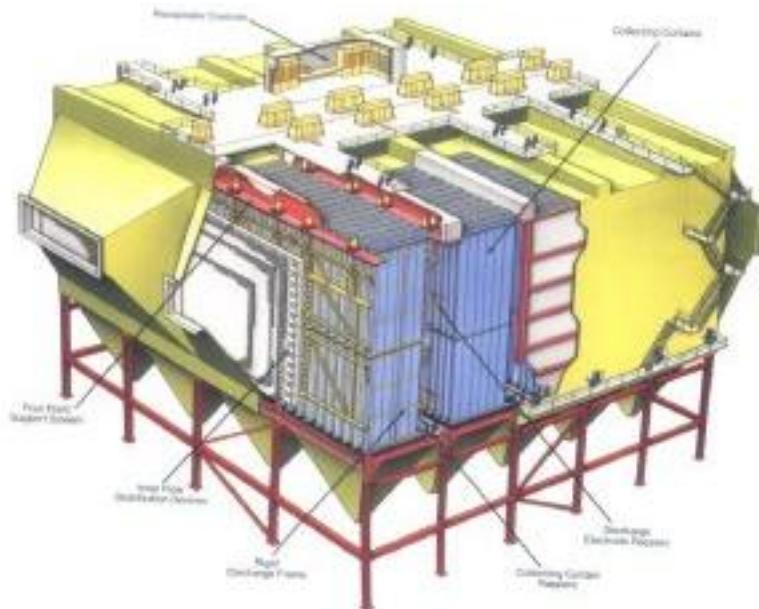
石灰石-石膏湿法脱硫装置---脱硫浆液喷淋凝聚、重力沉降和除雾器惯性分离、脱硫浆液收集（鼓泡床为脱硫浆液清洗和收集）



鼓泡床示意图

1.3.5 静电除尘器

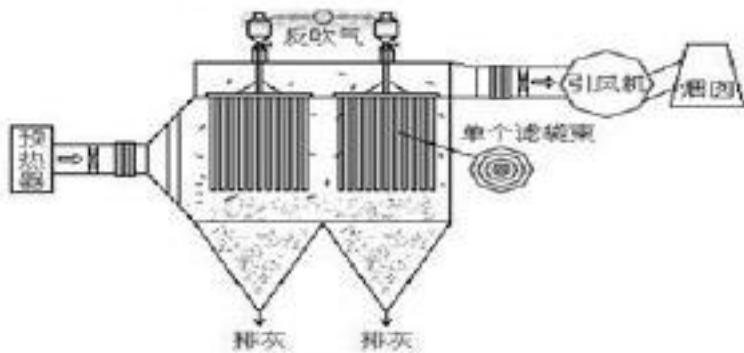
使尘粒荷电并在电场力的作用下沉积在集尘极，振打后靠集尘块重力沉降收集（静电分离，振打后靠重力沉降收集）。



静电除尘器

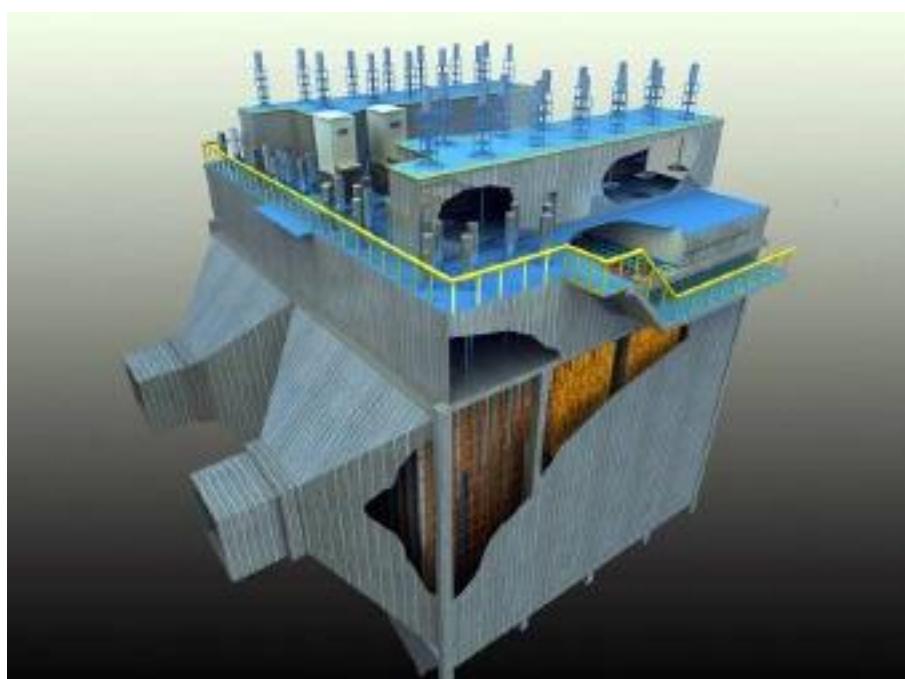
1.3.6 袋式除尘器

原有砂滤、纤维滤，现在火力发电厂采用袋式（过滤）除尘器---织物过滤，反吹重力沉降收集。



袋式除尘器示意图

1.3.7 电袋复合除尘器---静电、过滤组合



电袋复合除尘器

2 基础参数与原始资料

2.1 原始工艺参数

2.1.1 锅炉主要技术参数

炉型（箱型 PC、“W”火焰 PC、CFB），最大连续蒸发量（BMCR）、计算耗煤量、空气预热器形式、飞灰份额等；

2.1.2 制粉系统及磨煤机形式；

2.1.3 脱硫脱硝设施状态；

2.1.4 引风机类型、台数、风量、风压等；

2.1.5 除灰方式

2.1.6 机组调峰要求，大修小修周期和期限；

2. 2. 燃煤性质

2.2.1 设计煤质

2.2.2 校核煤质

2.2.3 煤质分析

煤质分析

项目	符号	单位	设计煤种	校核煤 I	校核煤种 II
1. 工业分析					
收到基全水分	Mt	%			
空气干燥基水分	Mad	%			
收到基灰分	Aar	%			
干燥无灰基挥发分	Vdaf	%			
收到基低位发热量	Qnet, v, ar	MJ/kg			
2. 哈氏可磨度	KHGI	/			
磨损指数	Ke	/			
3. 元素分析					
收到基碳	Car	%			
收到基氢	Har	%			
收到基氧	Oar	%			
收到基氮	Nar	%			
收到基全硫	St, ar	%			
4. 灰熔化温度					
灰变形温度	DT	°C			
灰软化温度	ST	°C			
灰熔融温度	FT	°C			
5. 灰分析资料					
二氧化硅	SiO2	%			
三氧化二铝	Al2O3	%			
三氧化二铁	Fe2O3	%			
氧化钙	CaO	%			
氧化镁	MgO	%			
氧化钾	K2O	%			
氧化钠	Na2O	%			
三氧化硫	S03	%			
二氧化钛	TiO2	%			
二氧化锰	MnO2	%			

2. 3. 除尘器入口烟气参数

2. 3. 1 烟气量：标态干烟气量 (dm³/h)，工况烟气量 (m³/h)；

2. 3. 2 烟温：正常、最高、最低烟温 (°C)，酸露点温度 (°C)；

2. 3. 3 烟气湿度：体积百分比 (%)；

2. 3. 4 烟气含尘浓度 (g/Nm³)；

- 2. 3. 5 烟气成分 (H_2O 、 SO_2 、 SO_3 等)
- 2. 4. 飞灰成分分析 (CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、可燃物等)
- 2. 5. 飞灰粒度分析
- 2. 6 飞灰密度及安息角
- 2. 7 飞灰比电阻
- 2. 8 工程设计原始数据

3 静电除尘器

3. 1 静电除尘

旋风除尘器对于 $<5\mu m$ 粒子的除尘效率较低，须借助外力（电场力等）捕集更小的粒子，静电除尘器的分离力直接作用在粒子上，而不是作用在整个气流上。

3. 2 静电除尘的工作原理

悬浮粒子荷电（高压直流电晕）、带电粒子在电场内迁移并被捕集分离、捕集粉尘经振打（刮刷）后靠重力沉降收集是静电除尘器工作的三个基本过程。

3. 3 荷电粒子的运动和捕集

3. 3. 1 驱进速度

驱进速度是指尘粒在电场中荷电后向集尘极的移动速度，驱进速度与颗粒粒径和场强有关，场强强，驱进速度高；低场强时不同粒径的驱进速度差别不大，高场强时，大粒径粒子驱进速度明显大于小粒径粒子的驱进速度。

3. 3. 2 捕集效率

粒子同时具有随烟气流动方向的流动速度和大体垂直于流动方向的驱进速度，驱进速度起主导作用时，粒子被捕集。有效驱进速度与除尘器结构形式和运行条件有关，有效驱进速度决定了捕集效率。

3. 4. 被捕集粉尘的清除

集尘极集尘到一定程度后将影响新尘的集聚，需要及时清灰以确保静电除尘器的连续运转。干式静电除尘器主要采用振打（顶部或侧向）方式清灰。

3. 5. 二次飞扬

干式静电除尘器振打清灰，灰块靠重力沉降收集，同时有部分粉尘出现二次飞扬，给除尘带来不利影响，使除尘效率下降。

3. 6. 除尘效率

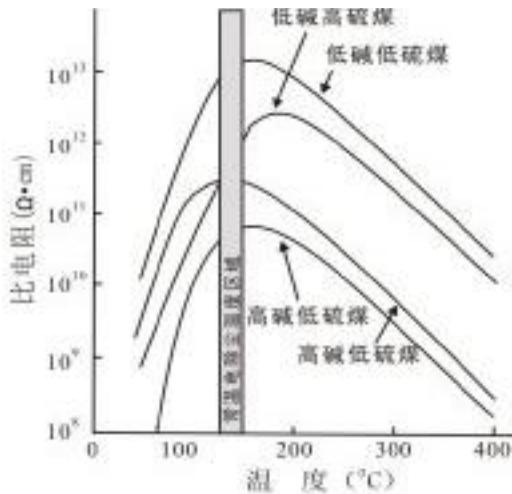
影响静电除尘器除尘效率的因素很多，如飞灰的比电阻、除尘器本体的结构配置和设计参数、供电电源、含尘浓度、进出口烟气和粉尘分布的均匀性、制造和安装质量、运行和维护水平等。

3. 6. 1 飞灰比电阻

飞灰比电阻对电除尘效率至关重要，其值较低时(小于 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)，由于飞灰的导电性太好，到达极板时，立即释放电荷，并带上极板相同的电荷，受到极板排斥，使尘粒重返气流引起二次飞扬，除尘效率随之下降。飞灰比电阻较高时(大于 $5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)，沉积在极板上的粉尘由于所带电荷不能及时释放，造成粉尘层与极板的电势差，到达一定数值时，可导致粉尘层被击穿的反电晕现象，也会引起二次飞扬。降低除尘效率。当比电阻处于 $10^4\text{--}5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内，可获得较好的除尘效果。

在分析飞灰导电性能过程中，一般将飞灰比电阻看成是两种独立的导电机理，一种导电是通过飞灰层内部(体积导电)，此时影响的主要因素是飞灰粒子的化学成份，另一种导电是沿粉尘粒子表面(表面导电)，它取决于烟气的化学成份和粒子本身的化学组成，其中吸附在飞灰表面的气体的种类、数量和冷凝水起支配作用。有人在研究 SO_3 对飞灰比电阻的影响时，提出酸比电阻的概念，指出酸比电阻主要反映的是 SO_3 产生的硫酸蒸汽对飞灰比电阻的影响。

影响飞灰比电阻的因素很多，一般情况下都是飞灰比电阻偏高。一般低硫煤飞灰比电阻比高硫煤高，灰中高碱成分(Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO)高时比电阻较低，灰中高熔点成分(SiO_2 、 Al_2O_3)高时比电阻高，烟气湿度增加时比电阻下降。当飞灰可燃物达10%以上时，比电阻太低，容易出现二次飞扬，对除尘不利。飞灰比电阻随烟温变化明显，从比电阻烟温关系图看到，一般锅炉排烟温度在 120°C — 150°C 之间，这个温度区间是比电阻的高值区，烟温低于 100°C 后，飞灰比电阻明显下降。



燃煤粉尘比电阻烟温关系图

3.6.2 比集尘面积

比集尘面积是除尘器本体设计结构配置和设计参数的关键数据，实际上反映了除尘器内的烟气流速和电场数。

4 对执行新的火电厂大气污染物排放标准采用静电除尘器的一些看法

4.1 建议有条件的工程优先选用静电除尘器

我国燃煤煤质大部分适合采用静电除尘器，静电除尘器是金属结构，经久耐用，运行维护费用低，维护工作量小，能承受高温烟气等非正常运行工况的冲击，在满足环保排放要求的情况下宜优先选用，并加大力度进一步完善静电除尘器的设计、制造及运行维护技术。

欧盟燃煤锅炉烟尘排放标准为 $30\text{mg}/\text{m}^3$, ESP 占 85%; 美国标准为 $20\text{mg}/\text{m}^3$, ESP 占 80%; 日本标准为 $20\text{mg}/\text{m}^3$, ESP 占绝大多数，这些国家电厂燃煤的品质和煤源的稳定性都比较好。印度电厂燃煤高灰、低硫、低 Na_2O 、高比电阻，仍 90% 以上采用静电除尘器。这些都值得我们进一步进行分析和参考。

以前，我国允许烟尘排放浓度较高，采用静电除尘器时起点较低，加上低价竞标，使静电除尘器配置标准偏低，加上煤质多变、管理不到位，致使除尘效率不太理想。为满足新的燃煤锅炉的烟尘排放浓度要求，近来采用袋式或电袋除尘器的项目较多。要使静电除尘器有竞争力，需采用一系列的保障措施。

4.2 建议进一步研究加大比集尘面积的必要性和可行性

上世纪 80 年代，我国火力发电厂从文丘里管水膜除尘器向静电除尘器过渡时，由于排放要求不高，所以静电除尘器配置水平较低，集中体现在比集尘面积

偏低，随着环保排放要求的提高，静电除尘器受低价竞标的影响，配置档次仍然偏低。

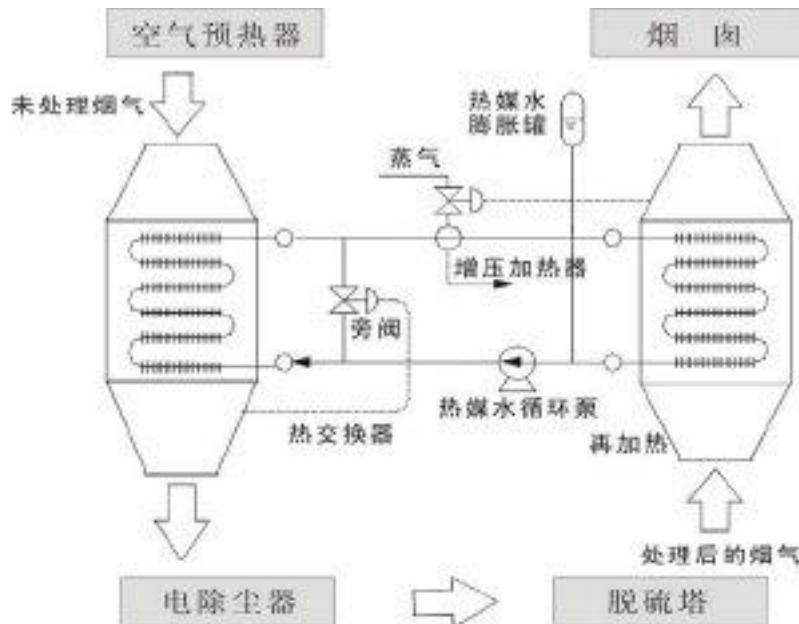
欧美日燃煤电厂静电除尘器比集尘面积一般在 $150\text{--}170\text{m}^2/\text{m}^3\text{/s}$ 之间，其最低值也高于 $130\text{m}^2/\text{m}^3\text{/s}$ 。印度燃煤飞灰比电阻较高，不少电厂比集尘面积一般都在 $240\text{m}^2/\text{m}^3\text{/s}$ 以上，最高达 $300\text{m}^2/\text{m}^3\text{/s}$ ，有的电场数达 7-8 个，最多的达 10 个电场。我国原有静电除尘器比集尘面积仅为 $80\text{--}110\text{m}^2/\text{m}^3\text{/s}$ ，基础比较低，效果不太理想，新建工程采用静电除尘器的压力较大，采用袋式或电袋除尘器较多。新的火电厂烟尘排放浓度标准与欧美日的标准相近，但我国燃煤的煤质较差，新建工程要采用静电除尘器，还需要进一步做好各方面的工作，其中比集尘面积的选取是其基础工作之一，建议进一步研究加大比集尘面积的必要性和可行性。

4.3 建议用好调质技术

4.3.1 低低温静电除尘器（烟温调质）

采用低温省煤器或 MGGH 将除尘器入口烟温降到 90°C 左右，烟温的降低使飞灰比电阻大大降低，降到了适宜于静电除尘器工作的范围之内，使其除尘效率大大提高。

日本三菱公司最早在石灰石-石膏湿法脱硫装置中采用 MGGH（用水媒将入口热烟气加热出口低温烟气）代替 GGH（用入口烟气直接加热出口烟气），取得了较好效果。珞璜电厂一期烟气脱硫三菱供货，采用了该技术，但因燃用高硫煤，低温换热器腐蚀严重，应用不成功。后来，三菱公司进一步将热端加热器从除尘器出口移至除尘器入口，使静电除尘器入口烟温降至 90°C 左右，大大优化了除尘器的工作条件，提高了除尘效率。三菱公司换热系统示意图如下图所示。日本燃煤电厂基本都采用静电除尘器，其中大都采用该技术，效果良好，烟尘排放浓度大大低于日本排放标准。



三菱低温换热系统示意图

我国已有不少单位在进行这方面的研究和技术攻关，一方面要解决低温换热器的腐蚀和堵灰问题，同时要解决低低温静电除尘器的腐蚀和其他问题。在有关问题还未完全解决之前，现有的工程按防腐要求控制烟温比烟气露点温度高10℃以上，即烟温降至100℃-110℃（有SCR脱硝装置时还要高3℃-5℃），与90℃低低温相对应称为低低温静电除尘器。低低温静电除尘器仍有利于提高除尘效率，低温换热器也有一定的节能效果。

低低温、低低温静电除尘器及其配套设施具有很好的节能效果，烟温的降低可使引风机功率明显下降，换热器吸收的热量可加热脱硫后的烟气，改善环境，也可加热汽轮机凝结水、节约能源，也可两者兼用。

低温换热器、低低温静电除尘器已在工程中应用，低低温换热器、低低温静电除尘器在有关问题解决后具有很好的应用前景。

4.3.2 SO₃烟气调质技术（烟气成分调质）

硫磺经加热完全燃烧，SO₂经催化95%以上氧化成SO₃，SO₃进入烟道中可将飞灰比电阻降低一个数量级，从而提高除尘效率。

德国pentol公司二十多年来，已有524台除尘器成功应用经验，（含中国托克托8X600MW机组）我国已全套引进了该技术，也已有十余台的应用经验。调质效果明显，应用灵活，运行成本低，可节约除尘器用电。由于加入的量少，逃逸的SO₃更少，对脱硫设施、对环保、对有关设备的腐蚀、对飞灰的综合利用等基

本不受影响。

目前，采购方一般均不接受采用 SO_3 烟气调质作为保证静电除尘器除尘效率的一种手段。建议 SO_3 调质可作为电厂煤质变化后的后备手段。

4.4 高频电源具有明显优势

高频电源具有运行电压高、电流强、电压和电流平稳，可调节间隙供电时间，可控制一些非正常工况的出现，可配合进行断电和减功率振打，可结合智能供电，与常规的工频供电相比，明显地提高了除尘器效率并节约能源，在智能供电和节约能源方面还有发展的空间。

4.5 建议设计院配合项目单位进一步做好工程煤源的专题报告

由于我国煤炭市场管理不规范，由于煤价较高，不少电厂面临亏损的压力，低价采购，煤质缩水，有的电厂甚至掺烧劣质煤来减亏，使电厂煤质变化很大，锅炉及许多设备受到影响，其中静电除尘器受到的冲击比较大。

《国家能源局关于促进低热值煤发电产业健康发展的通知》（国能电力[2011]396号）再一次强调了将煤矸石、煤泥、洗中煤等低热值、高灰分煤就地就近消纳，避免波及全国各地电厂。政策非常好，还有待于进一步落实。

工程设计中，设计应进一步配合项目单位做好工程煤源的专题调研报告。一要落实，确定的煤源应能保证供应；二要与环保要求和环保措施相适应，确定了煤种的同时也基本确定了相应的环保措施方案；三要确定燃煤几个主要指标（发热量、挥发分、灰分、硫分等）的变化范围。争取电厂运行煤质与设计煤质基本一致。

4.6 建议设计院配合除尘器厂家进一步做好除尘器进出口烟道设计

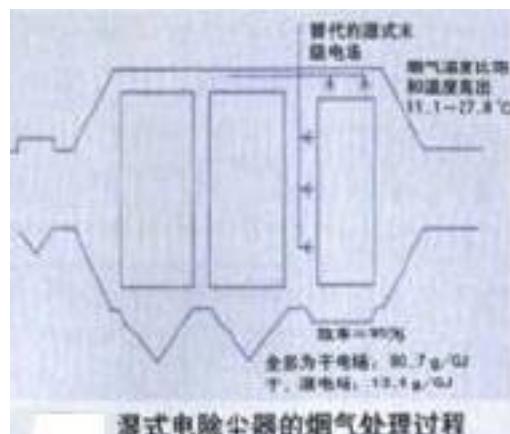
静电除尘器中烟气、烟尘分布的均匀性都对除尘效果带来影响，除尘器进出口设置的气流分布装置，对气流均匀分布的效果较好，而烟尘均匀分布的状况与入口烟道设计关系较大。建议设计院配合除尘器厂家进一步做好除尘器进出口烟道设计，设置必要的导流板；除尘器进出口烟道设计宜纳入除尘器的气流分布试验。

4.7 静电除尘器的一些新技术

4.7.1 湿式静电除尘器

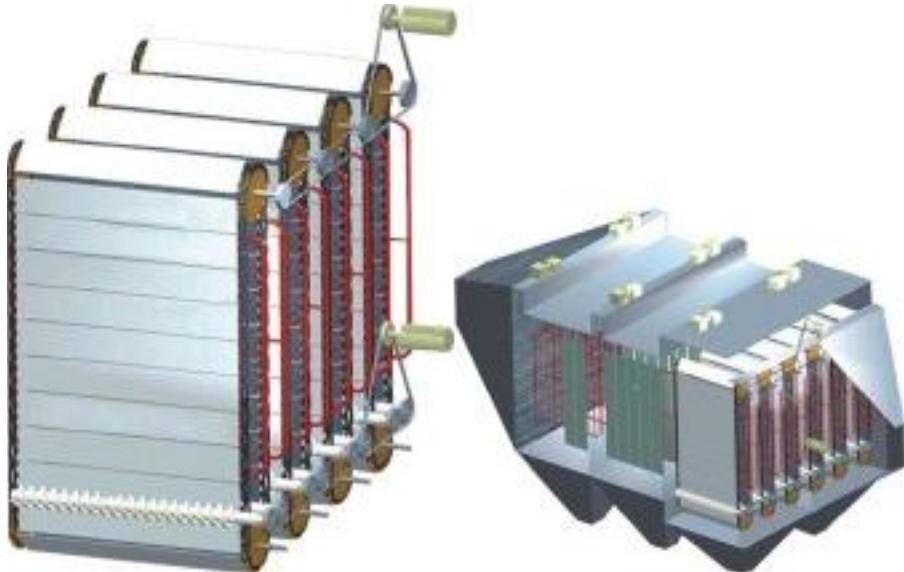
湿式静电除尘器在阳极板上形成水膜，其除尘原理为水雾凝聚、静电分离，

水膜收集，这种工作方式避免了集尘振打时的二次飞扬，可大大提高除尘效率，并有利于收集 PM2.5、SO₃，对汞也有较好地收集作用。湿式静电除尘器存在喷雾、形成水膜、防腐、水系统的处理等技术问题。日本三菱、日立等公司拥有湿式静电除尘器技术，我国钢铁厂 2006 年已采用三菱湿式静电除尘器用于高炉煤气除尘，效果较好。近期有工程准备进行除尘改造，在静电除尘器和海水脱硫后加装一个电场的湿式静电除尘器，这是一种很好的配置方式，可使烟尘排放达标，可解决“石膏雨”问题，还可能解决 PM2.5、SO₃ 及汞的排放问题。国内已有企业自主开发了该技术，并在 20t/hCFB 锅炉水膜除尘器后装设，中试成功，基本上具备扩大试用的条件。该技术在石灰石-石膏湿法脱硫装置后应用时，其水系统可与脱硫系统统一考虑，在老厂改造时，主要需要解决布置场地、引风机压头、核算烟气抬升高度等问题。该技术具有较好的发展前景。



4.7.2 转动极板

静电除尘器的极板由链条带动，转到灰斗内用转动刷清灰，虽然也属于重力沉降收集，但离开了烟气流场，避免了飞灰的二次飞扬，可提高除尘效率。包头三热 2 号 300MW 机组在三电场静电除尘器的改造中，一电场改用高频电源；三电场采用了转动极板，2010 年 11 月改造完毕并进行了测试，结果显示，明显提高了除尘效率。近期已有一些工程在静电除尘器订货时末极板采用了转动极板，转动极板相关设施的机械可靠性还有待于经受长期运行的考验，该项技术具有较好的发展前景。



4.7.3 机电多复式双区电场

将粉尘荷电区与收尘区分开，采用独立电源分别对荷电区与收尘区供电，采用连续多个小双区进行复式配置，使荷电与收尘各区段的电气运行条件最佳化，形成高电压低电流的运行特性，可有效提高对电除尘器后级电场细微粉尘的捕集，并可有效抑制高比电阻粉尘条件下的反电晕和低比电阻粉尘条件下的粉尘二次反弹，从而可提高和稳定除尘效率。该项技术具有一定的应用前景。

4.7.4 凝并技术（交变电场中的凝并）

烟气进入静电除尘器前，先在烟道中经过双极荷电，后进入静电凝并装置。烟气进入双极荷电段，使相邻两列中的烟气粉尘分别荷正或负电荷，再进入静电凝并段，使带不同属性电荷的粒子凝并，再进入静电除尘器，可以有效的提高细微粒子的捕集率。使用时需落实烟道的布置、灰的磨损性及粉尘粒度分布的情况。

4.7.5 极线、极板的不断改进，进一步提高了设备的可靠性，也有利于提高除尘效率。

4.8 CFB（循环流化床）干法脱硫装置的除尘器配置

CFB 干法脱硫装置除尘器入口含尘浓度 $1000\text{g}/\text{Nm}^3$ ，出口排放浓度 $< 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，要求除尘效率为 99.997%，现一般采用电袋除尘器。有关厂家表示若采用静电除尘器，出口烟尘浓度只能保证 $\leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，其除尘效率也达 99.995%。该脱硫装置后烟温为 $70^\circ\text{C}-72^\circ\text{C}$ ，是超低温高除尘效率的一个实例。若打破三电场的约束，采用较大的比集尘面积，采用四电场或五电场，CFB 干法脱硫也有可能采用静电除尘器。

5 袋式除尘器和电袋除尘器

5.1 袋式除尘原理

袋式除尘器是一种干式滤尘装置，它适用于捕集细小、干燥、非纤维性粉尘。滤袋采用纺织的滤布或非纺织的毡制成。利用纤维织物的过滤作用对含尘气体进行过滤，含尘气体进入袋式除尘器通过滤料时，粉尘被阻止，气体得到净化。沉积在滤料上的粉尘，可通过机械振打、气体反吹、脉冲喷吹（高速气体脉动冲振和反吹）等方式从滤料表面脱落，靠重力沉降到灰斗而收集。振打、反吹、脉冲、喷吹时产生的粉尘扬尘仍在滤布的原烟气侧，不会被烟气带走，不会影响除尘效率。

滤料表面形成的粉尘初层吸附在滤料表面上，成为袋式除尘器的主要过滤层，有利于提高除尘效率。滤料上积聚的粉尘太厚后，滤袋阻力增大，同时易使一些细小尘粒穿过，影响除尘效率，因此在滤袋阻力（积尘厚度）达到一定值后，需及时清灰，清灰仍需保留粉尘初层。

袋式除尘器对 $1 \mu m$ 以下的尘粒均有 90% 左右的脱尘率，对 $>1 \mu m$ 的尘粒的脱除率均很高。

5.2 袋式除尘器的主要参数

5.2.1 过滤速度 (m/min)

过滤速度是一项重要的技术经济指标，也称气布比 ($m^3/m^2\cdot h$)，选用较高的过滤速度，所需滤布面积小、占地小、投资省，但阻力大，除尘效率差。过滤速度考虑上述因素后综合确定，过滤速度还需考虑烟气状况、飞灰特性、滤料种类和清灰方式等的影响。

过滤速度一般为 $0.9\text{--}1.1 m/min$ ，最小可取 $0.8 m/min$ ，最大可取 $1.2 m/min$ 。飞灰浓度大、飞灰粘性大、烟气温度高宜取低值。

5.2.2 烟气阻力

袋式除尘器出口与入口处气流的平均全压差 (Pa)。

5.2.3 清灰

为使袋式除尘器的压力损失保持在正常范围内，利用机械或气力等方式使滤袋粘附的粉尘剥落。清灰周期由确定的压力损失(粘附粉尘厚度)控制，清灰时间由清灰方式、清灰工质和清灰流程确定。

5.2.4 粉尘收集

剥落的粉尘通过重力沉降收集在灰斗中，各灰斗中粉尘粒度分布大体相同。

5.2.5 除尘效率

除尘效率为袋式除尘器捕集的粉尘量与入口总粉尘量的比率（%）。

5.3 袋式除尘器

袋式除尘器适应范围广，不受比电阻大小的影响，对煤质变化的适应性较好；其除尘效率较高，在99.9%以上，一般均能满足我国新的火力发电厂烟尘排放标准的要求。

袋式除尘器的关键部件是滤袋，滤袋的制造、加工、包装、运输、安装、运行、检修都要求非常严格，哪个环节出问题都影响布袋的正常运行和布袋的使用寿命，目前基本都用进口布袋，一般使用寿命为2-3年。目前使用的滤袋对烟温有严格的限制，烟温越高，滤袋的使用寿命越短，高于160℃将对滤袋产生致命的损伤。

袋式除尘器的烟气阻力较大，一般为1200-1500Pa，引风机能耗较高；

定期更换布袋，维护工作量大，维护费用较高。

5.4 电袋除尘器

5.4.1 静电袋式复合除尘

为了改善布袋的工作条件，先经过两电场的静电除尘器再进入布袋复合除尘，进入布袋烟尘含量只有锅炉出口烟气含尘量的4-7%，布袋反吹次数大大减少，有利于延长布袋的使用寿命。

5.4.2 电袋除尘可改善布袋工作条件

进入袋式区域都是细灰，细灰粒比粗灰粒温度低、冲刷磨损性低，也都有利于延长布袋的使用寿命，当灰中 SiO_2 含量很高时，灰的磨损性很强，不宜采用袋式除尘器，但电袋除尘器中的布袋基本不受 SiO_{2d} 的影响。

5.4.3 关于臭氧对布袋的腐蚀

国内对这个问题一直有争论。总的看来，静电除尘部分会产生臭氧，臭氧含量达到一定程度时，对布袋有明显地腐蚀作用。据介绍，实测的臭氧含量非常低，对布袋的腐蚀不明显；从实际工程看，由布袋改为电袋后布袋寿命明显延长，厂家对电袋除尘器的布袋使用寿命一般为3-4年，比袋式（现在一般为2-3年）长

1 年，由此来看，臭氧对布袋的腐蚀不明显。

5.4.4 电袋除尘器的能耗

电袋除尘器比袋式除尘器结构要复杂一些，增加了静电除尘器部分的电耗，但袋式部分灰量少，灰层薄，烟气阻力小，一般为 1000–1200Pa，综合能耗略低于袋式除尘器。

5.4.5 综合比较，一般情况下电袋除尘器略优于袋式除尘器

5.5 袋式（电袋）除尘器需要进一步研究的问题

袋式（电袋）除尘器与静电除尘器比较有明显优点，也存在明显的不足，一些国家对采用袋式（电袋）除尘器持比较慎重的态度，我国采用袋式（电袋）除尘器也需要进一步研究一些问题。

5.5.1 废袋的处理

我国目前一般采用进口滤料，主要采用 PPS（聚苯硫醚、可用到 160℃）和 PTFE（聚四氟乙烯、可用到 220℃）的复合滤料，加上覆膜处理，袋式除尘器的布袋使用寿命大致为 2–3 年，电袋除尘器的布袋使用寿命大致为 3–4 年，若出现异常工况或管理不规范，使用寿命还可能缩短。现国内外都未见比较规范的废袋处理方法，目前，我国已有的废袋是采用直埋的方式处理。有关人士表示废袋不能烧，很难回收再生，现基本是直埋，直埋有什么不利影响，也还不明朗，建议有关部门组织研究废袋的处理方式及其对环境的影响，制定相应标准，规范废袋处理的行为。建议暂按采取一定的措施在灰场直埋。

5.5.2 进一步采取措施延长布袋使用寿命

国外电厂布袋寿命一般较长，我国燃煤情况复杂，对延长布袋使用寿命不利，需要设计、制造、安装、运行、维护各个环节从煤质、烟温、气流分布、飞灰分布、滤材选用等方面进行优化配置，争取延长布袋使用寿命。

6. 工程信息、工程设计参考资料

6.1 环保部环评中心于 2012 年 8 月 29 日在北京主持了“中电投长春东南热电厂新建工程(2 × 350MW)除尘器选型专题论证会”，该专题报告由吉林省电力勘测设计院编写，该项目环评报告编制单位为华北电力设计院工程有限公司，会议聘请了五位专家（国电环境保护研究院、华北电力设计院工程有限公司、西南电力设计院、浙江菲达环保科技股份有限公司、江苏新中环保股份有限公司各一人），环

保部环评司环评一处 3 位处长到会提出了要求，全面听取了各位专家的意见。专家组进一步讨论协商形成会议纪要。

长春东南热电厂新建工程除尘措施方案论证会纪要详见附录 1.

- 专家按煤质适合采用电除尘器的工程尽量采用电除尘器的原则，结合本工程具体条件一直建议该工程采用静电除尘器。
- 对静电除尘器提出了比集尘面积不小于 $150\text{m}^2/\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 建议在湿法脱硫装置后，留有适当场地，以适应日益严格的环保要求。

该建议虽未直接说，实际上是指留有增设湿式静电除尘器的条件，以适应大城市（长春）环保要求的提高。湿法脱硫可能带来的“石膏雨”及其他不满足环保要求的情况。

6.2 燃煤电厂电除尘器选型设计指导书

——中国环境保护产业协会电除尘委员会 2010 年 4 月 详见附录 2

6.3 燃煤电厂除尘器选型

——国电环保研究所副院长 朱法华博士 详见附录 3

附录 1：长春东南热电厂新建工程除尘措施 方案论证会纪要

2012 年 8 月 29 日环境保护部环境工程评估中心在北京主持召开了《长春东南热电厂新建工程除尘措施方案论证会》，参加会议的有环境保护部环评司、国电环境保护研究院、华北电力设计院工程有限公司、西南电力设计院、吉林省电力勘测设计院、浙江菲达环保科技股份有限公司、江苏新中环保股份有限公司、长春东南热电厂等单位的领导、专家与代表共 18 位，会议邀请了 5 位专家组成专家组（名单附后）。与会代表和专家就除尘措施进行了热烈的讨论，形成会议纪要如下：

1. 静电除尘器、袋式除尘器和电袋复合除尘器均可实现烟尘低浓度排放，关键取决于煤质、飞灰成份、飞灰比电阻、投资与运行费用等因素。袋式除尘器阻力大，滤袋寿命短，且滤袋处理也是问题，因此适宜电除尘器收尘的电厂宜优先选择静电除尘器。
2. 长春东南热电厂燃用霍林河褐煤，煤中水分高，造成烟气中水分含量在 15% 以上，长春冬季温度低，易造成袋式除尘器滤袋“糊袋”；另外，烟气排放温度高，也易造成滤袋寿命降低。选择袋式除尘器应慎重考虑袋式除尘器的滤料选择及滤袋寿命。
3. 霍林河褐煤发热量低，灰分较高，飞灰适宜电除尘器收尘，选择电除尘器时，本体应足够大，比收尘面积不小于 150 平方米/(立方米/秒)，配置高频电源，采用低温省煤器，同时应加强电除尘器的

设计、制造、安装与运行维护质量。

4. 建议在湿法脱硫装置后，留有适当场地，以适应日益严格的环保要求。

与会专家及代表一致同意，长春东南热电厂新建工程采用静电除尘器。

2012-8-29



中国环境保护产业协会

China Association of Environmental Protection Industry



燃煤电厂电除尘器 选型设计指导书

中国环境保护产业协会电除尘委员会

2010年4月

目 录

前 言	II
1 目的	1
2 范围	1
3 选型设计流程	1
4 选型设计条件和要求	2
5 选型设计条件和要求分析	2
5.1 煤、飞灰样主要成分及其分布	2
5.2 煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析	3
6 电除尘器适应性研究	4
6.1 电除尘效率的基本公式及表观驱进速度 ω_k	4
6.2 电除尘器对煤种的除尘难易性评价	4
6.3 电除尘器的适应性研究	4
6.3.1 国内煤、飞灰样 ω_k 统计分析	4
6.3.2 电除尘器实测结果分析	7
6.3.3 电除尘器的适应性分析	8
7 选型设计	9
8 选型设计修正	10
9 技术经济性分析	11
10 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术	12
11 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见	13
11.1 对选型设计指导意见总的说明	13
11.1.1 对选型设计基准的说明	13
11.1.2 对国标粉尘排放浓度的说明	14
11.1.3 对燃煤电厂燃煤偏离设计情况的说明	14
11.1.4 对煤、飞灰成分与电除尘器选型设计之间关系的说明	14
11.2 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见	15
11.2.1 50mg/m ³ 粉尘排放标准下燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见	15
11.2.2 30mg/m ³ 粉尘排放标准下燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见	15
参考文献	15
附 录 A (规范性附录) 选型设计条件和要求	16
附 录 B (资料性附录) 煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析	22
附 录 C (资料性附录) 选型设计修正	31
附 录 D (资料性附录) 技术经济性分析	34
附 录 E (资料性附录) 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术	39

前　　言

本指导书的附录 A 为规范性附录，附录 B~附录 E 为资料性附录。

本指导书由中国环境保护产业协会电除尘委员会组织编制，并委托浙江菲达环保科技股份有限公司负责编写。

本指导书主要起草人及评审专家：廖建国、刘卫平、闫克平、黎在时、王勋前、张德轩、翟石培根、林国鑫、张滨渭、梁可新、蒋亚彬、陈宇渊、蒋庆龙、林尤文、赵信志、解标、翟鸿平、李宁。

本指导书由中国环境保护产业协会电除尘委员会负责解释。

燃煤电厂电除尘器选型设计指导书

1 目的

本指导书旨在推动和引导电除尘行业技术进步，规范行业市场，指导、规范电除尘行业科学合理地进行电除尘器选型设计，改善目前电除尘器设计偏小、配置不规范，如电场数量偏少、比集尘面积偏小导致部分设备投运后烟尘排放不能达标的现状，保证设备性能并满足排放要求，提升行业整体技术水平。通过分析研究中国煤种成分及其对电除尘器运行性能影响、国内投运电除尘器实情、国内外电除尘器规范，提出了电除尘器选型设计的主要流程，包括：选型设计条件和要求及其分析、电除尘器适应性研究、选型设计及其修正、技术经济性分析。提出了选型设计的指导意见，为电除尘器供货商、设计建设单位及管理部门科学合理地选择电除尘器提供技术支持。

2 范围

本指导书适用于燃煤电厂干式、板式、卧式电除尘器。不适用于半干法脱硫后的电除尘器、其它行业的电除尘器以及使用其它燃料的电站电除尘器。

本指导书分别以电除尘器出口粉尘浓度 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ¹⁾ 作为基础进行编写。

3 选型设计流程

电除尘器选型设计遵循图 1 所示流程：

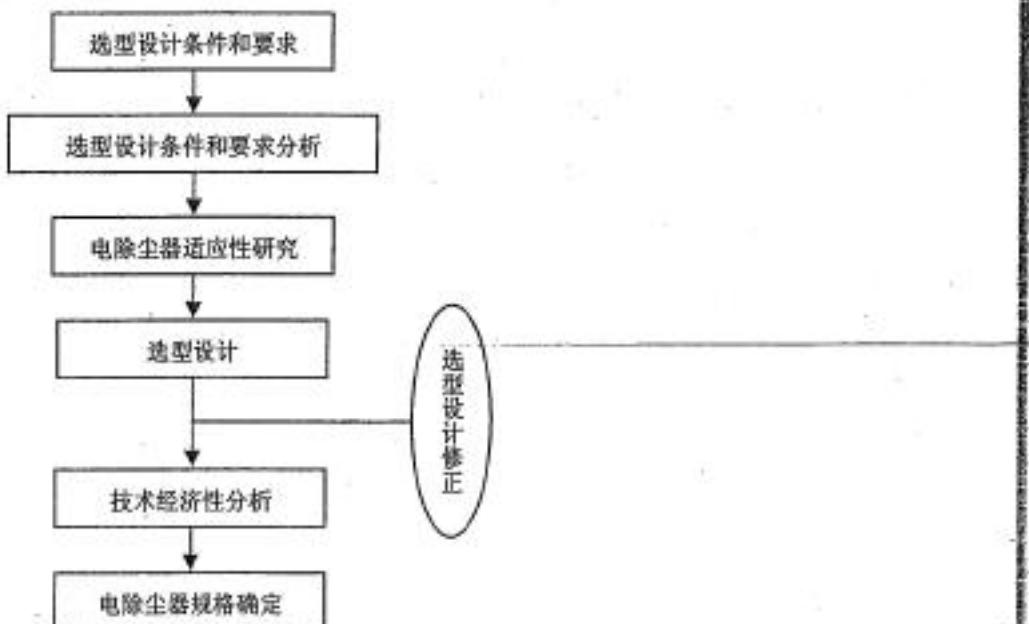


图 1 电除尘器选型设计流程

1) 烟气在温度为 273K，压力为 101325 Pa 时的状态，简称“标态”。本指导书中所规定的粉尘排放浓度均指标准状态下干烟气（过剩空气系数为 1.4）的数值。

4 选型设计条件和要求

为使电除尘器选型正确，必须提供系统概况、燃煤性质、飞灰性质、烟气成分分析、设计参数、厂址气象和地理条件、达到保证效率的条件等选型设计用基本资料（不限如此）。具体内容见附录 A。

5 选型设计条件和要求分析

对选型设计条件的分析主要为选型设计条件对电除尘器的性能影响分析，对选型设计要求的分析主要是性能要求分析。

影响电除尘器性能的因素很复杂，对燃煤电厂而言，燃煤性质（成分、挥发分、发热量、灰熔融性等）、飞灰性质（成分、粒径、密度、比电阻、粘附性等）、烟气成分等工况条件都是重要影响因素。此外，还存在着诸如飞灰物相组份、显微结构（灰粒形状，孔隙率及孔隙结构，表面状况）、湿润性等方面对电除尘器性能的影响，虽然对这些方面的系统论述和定量计算还缺乏基础，但选型时应予注意，煤、飞灰成分以外的煤、飞灰性质对电除尘器性能的影响可概括为：

- 1) 发热量：发热量越低，煤耗就越大，因此烟气量越大；
- 2) 挥发分：挥发分的高低直接影响煤燃烧的难易程度，挥发分高的煤易燃烧，而燃烧的程度又将影响烟气及飞灰成分；
- 3) 灰熔融性：灰的熔融温度与其成分有密切关系，灰中 Al_2O_3 、 SiO_2 含量越高则灰熔融温度越高， Na_2O 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 等有利于降低灰熔融温度。一般地，灰的熔融温度高，对除尘不利。
- 4) 飞灰粒径：当粒径 $>1\mu\text{m}$ 时，粉尘驱进速度与粒径为正相关，当粒径为 $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$ 时，粉尘的驱进速度最小，当粒径 $<0.1\mu\text{m}$ 时，粉尘驱进速度与粒径为反相关；
- 5) 飞灰密度：一般粒度小，堆积密度大。当真密度与堆积密度之比 >10 时，电除尘器二次飞扬会明显增大，应给予注意；
- 6) 粘附性：由于飞灰有粘附性，可使微细粉尘凝聚成较大的粒子，这有利于除尘，但粘附力强的飞灰，会造成振打清灰困难，阴、阳极易积灰，对除尘不利。一般地，粒径小、比表面积大的飞灰粘附性强。

由于煤、飞灰成分对电除尘器性能影响最大，下面主要阐述煤、飞灰成分对其性能影响问题。

5.1 煤、飞灰样主要成分及其分布

在煤的成分中，对电除尘器性能产生影响的主要因素有 S_{w} 、水分和灰分。飞灰包括 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 SO_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 Li_2O 、 MnO_2 、 TiO_2 及飞灰可燃物等成分。

对 2006 年~2008 年国内招标的 138 套电除尘器所使用的 122 种煤种（含 9 种混煤）的煤、飞灰样主要成分进行了分析，影响电除尘器性能的国内煤、飞灰主要成分含量分布见表 1。

表1 国内煤、飞灰样主要成分含量分布

成分	变化范围(参考值)	平均值(参考值)
S _w	0.11%~5.13%	0.87%
Na ₂ O	0.02%~3.72%	0.69%
Fe ₂ O ₃	1.52%~25.88%	7.84%
K ₂ O	0.12%~4.17%	1.16%
MgO	0.17%~6.37%	1.35%
SO ₃	0.02%~21.7%	3.18%
Al ₂ O ₃	9.04%~46.5%	26.33%
SiO ₂	20.7%~70.3%	50.18%
CaO	0.6%~28.4%	6.34%

注：以上数据为122种煤种的统计值，但国内煤种数量超过200种，因此以上各成分的含量变化范围及平均值将有所变化，如有专家提供的数据表明：

- 1) S_w含量的变化范围为：0.11%~9%；
- 2) Al₂O₃含量的变化范围为：2.24%~52.6%；
- 3) CaO含量的变化范围为：0.6%~50%。

5.2 煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析

1) 煤、飞灰成分中的S_w、Na₂O、Fe₂O₃、Al₂O₃及SiO₂对电除尘器性能影响很大，其中S_w、Na₂O、Fe₂O₃对除尘性能起着有利的影响，Al₂O₃及SiO₂对除尘性能则起着不利的影响，煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响是其综合作用的结果。

K₂O、SO₃、CaO、MgO、P₂O₅、Li₂O、MnO₂、TiO₂及飞灰可燃物对电除尘器性能的影响相对较小（在美国南方研究所的Bickelhaupt先生的比电阻预测实验研究报告中，把Li₂O和Na₂O的含量之和作为一个影响因素，实验结果表明两者之和虽然很小，但其微小的变化，对粉尘比电阻的影响却很大，但国内有关专家对此观点存在异议。），其中K₂O、SO₃、P₂O₅、Li₂O、TiO₂对除尘性能起着有利的影响，CaO、MgO对除尘性能则起着不利的影响。

水分的影响是显而易见的。炉前煤水分高，烟气的湿度也就大，粉尘的表面导电性也就好，比电阻相对也会比较低。在燃煤含水量很高的锅炉烟气中，水分对电除尘器的性能起着十分重要的作用。

煤的灰分高低，直接决定了烟气中的含尘浓度。对于特定的工艺过程和在一般含尘浓度范围内，驱进速度或表观驱进速度将随着粉尘浓度的增加而增大。但含尘浓度过大，会产生电晕封闭。出口粉尘浓度要求相同时，其设计除尘效率的要求也越高。烟气含尘浓度高，所消耗表面导电物质的量大，对高硫、高水分的有利作用折减幅度大，综合来讲，高灰分对电除尘器的烟尘排放是不利的。

2) 高S_w煤时，S_w对电除尘器的性能起着主导的作用，而低S_w煤时，S_w的影响相对减弱，主要取决于飞灰中碱性氧化物的含量、烟气中水的含量及烟气温度等。

3) 满足S_w含量<0.3%、Na₂O含量<0.2%、(Al₂O₃+SiO₂)的含量>90%或Fe₂O₃含量<2%四个条件中的一个及以上时，电除尘器的除尘性能很差，一般可称为困难状态，选型

时应特别注意。

具体分析见附录 B。

6 电除尘器适应性研究

6.1 电除尘效率的基本公式及表观驱进速度 ω_k

$$\eta = 1 - e^{-\theta \cdot A/Q} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中: η —除尘效率 (%), Q —烟气流量 (m^3/s), A —总集尘面积 (m^2), θ —驱进速度 (m/s)。

这个公式被称为 Deutsch 公式, 它一直是电除尘器设计公式, 至今仍在应用。但它的缺点是其假设颗粒尺寸为一常值, 粉尘和气流在极间距空间里面的混合是完全均匀的, 并且粉尘一旦被收尘极板捕集就不再返回到电场空间, 而这些假设在实际工程中是不可能存在的。

1964 年, 瑞典专家 S·麦兹 (Sigvard Matts) 对 Deutsch 公式进行了修正, 使用了表观驱进速度 ω_k 概念。

$$\eta = 1 - e^{-(\omega_k \cdot A/Q)^k} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中, k 为常数, 选择不同的 k 值, $\omega_k = f(\eta)$ 曲线有不同的形态。当 $k=1$ 时, ω_k 变成了 ω , 即为我们一般熟知的 Deutsch 公式, 来自许多装置的数据表明, $k=0.5$ 时, $\omega_k = f(\eta)$ 接近于常数, 即此时 ω_k 趋向不再随前后电场粉尘粒径的变化而改变, 也不再随所要求除尘效率的高低而变化。此时, 可以将 ω_k 十分简单地看成是一个“收尘难易参数” (Precipitation Parameter), 由于 ω_k 克服了众多应用中的粒径分布问题而使其使用更加方便。经验表明, 相对于原始 Deutsch 公式中的驱进速度, 常数值的 ω_k 出现在更广的除尘效率范围。最新的研究也表明 ω_k 不仅同煤、飞灰成分煤、飞灰成分有关, 而且在很大程度上也依赖于电除尘器电源技术。

6.2 电除尘器对煤种的除尘难易性评价

如上所述, 煤、飞灰成分直接影响着电除尘器的除尘性能, 且其对电除尘器除尘性能的影响是煤、飞灰成分、电气控制综合作用的结果, 因此, 如直接用煤、飞灰成分分析其对电除尘器性能的影响, 则只能作定性的分析。

一般地, 煤、飞灰成分直接影响着 ω_k 值, ω_k 值的大小可评价电除尘器对粉尘的收尘难易程度, 如表 2 所示。 ω_k 值越大, 电除尘器对粉尘的收集越容易。

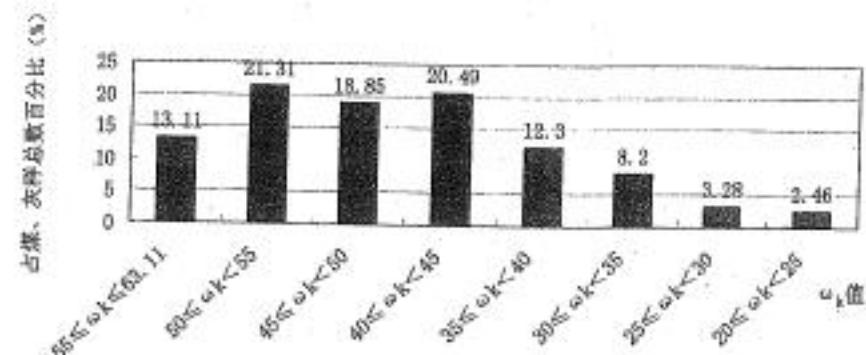
表 2 电除尘器对煤种的除尘难易性评价

ω_k 值	$\omega_k < 25$	$25 \leq \omega_k < 35$	$35 \leq \omega_k < 45$	$45 \leq \omega_k < 55$	$\omega_k \geq 55$
除尘难易性	难	较难	一般	较容易	容易

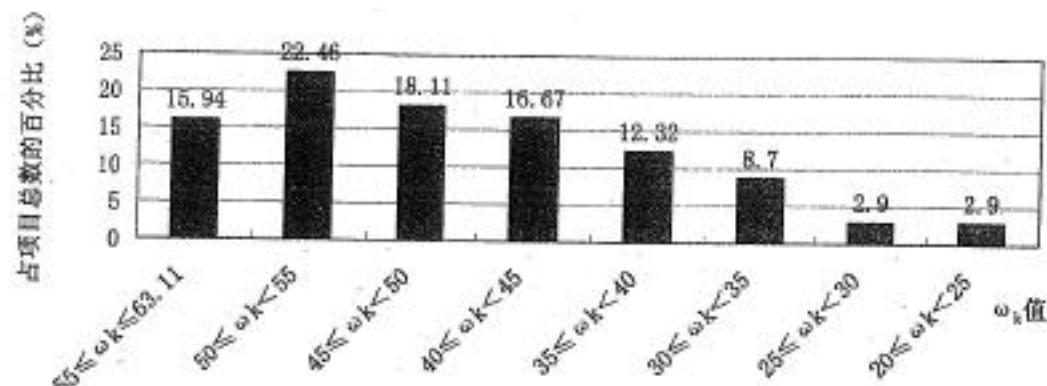
6.3 电除尘器的适应性研究

6.3.1 国内煤、飞灰样 ω_k 统计分析

1) 对前文所述 122 种国内煤、飞灰样本的 ω_k 值进行计算, 其所对应的 ω_k 值分布如图 2 所示。 ω_k 的变化范围为 20~63.11, 其平均值为 45.26。

图 2 国内煤、飞灰样所对应的 ω_k 值分布图

2) 对 ω_k 值所对应的国内电除尘器项目分布进行统计, ω_k 值所对应的电除尘器项目分布图如图 3。

图 3 ω_k 值所对应的电除尘器项目分布图

ω_k 值所对应的煤种及项目统计结果参考值如表 3。

表 3 ω_k 值所对应的煤种及项目统计结果

ω_k 值	$\omega_k < 25$	$25 \leq \omega_k < 35$	$35 \leq \omega_k < 45$	$45 \leq \omega_k < 55$	$\omega_k \geq 55$
除尘难易性	难	较难	一般	较容易	容易
占煤种总数百分比 (%)	2.46%	11.48%	32.79%	40.16%	13.11%
占项目总数百分比 (%)	2.90%	11.60%	32.79%	40.57%	15.94%

3) 国内典型煤种主要成分、除尘难易性评价及 ω_k 值范围, 如表 4、表 5。

表4 国内典型煤种主要成分(%)及电除尘器进口含尘浓度DW(g/m³)

序号	成分 煤种	Ar	Sr	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	DW
1	筠连无烟煤	32.25	2.80	1.40	12.18	1.40	4.57	1.54	18.33	51.77	7.69	39.30
2	重庆松藻矿黄煤	25.35	3.47	0.76	16.51	0.85	2.38	0.63	24.36	44.61	5.22	24.00
3	神府东胜煤	11.00	0.41	1.23	13.85	0.72	9.30	1.28	13.99	36.71	22.92	13.32
4	神华煤	8.50	0.45	1.23	11.36	0.73	9.30	1.28	13.99	36.71	24.69	25.00
5	神木烟煤	6.40	0.39	1.50	7.00	0.70	11.00	1.20	13.00	35.00	26.00	
6	锡林浩特胜利 煤田褐煤	20.22	1.00	2.53	7.74	1.59	4.50	2.13	20.16	52.86	4.89	23.96
7	陕西黄陵煤	18.61	0.98	0.44	5.08	1.33	6.28	1.67	17.12	53.64	6.63	34.62
8	陕西烟煤	28.83	0.90	0.91	5.72	0.78	4.68	0.91	26.66	51.70	4.17	34.62
9	龙烟矿烟煤	23.80	0.78	0.72	11.53	1.43	2.26	1.66	21.83	50.64	10.76	24.80
10	珲春褐煤	32.18	0.24	1.62	5.26	1.46	2.20	1.83	23.73	58.70	2.22	
11	平庄褐煤	20.41	0.89	1.19	7.99	3.00	0.38	1.34	21.99	60.14	3.36	
12	晋北煤	19.77	0.63	0.78	23.46	1.55	1.28	1.27	15.73	50.41	3.93	22.00
13	纳雍无烟煤	21.38	2.90	3.63	7.85	1.39	1.10	1.96	25.19	54.40	2.88	
14	水城烟煤	30.86	2.15	1.32	10.41	0.81	0.54	0.92	28.75	50.25	3.56	
15	铁法矿煤	30.58	0.39	1.78	7.53	2.43	0.74	1.62	19.87	59.91	1.58	
16	永城煤种	21.59	0.42	0.68	3.56	2.43	2.12	1.04	9.76	54.87	4.48	25.47
17	江西丰城煤	30.00	1.62	1.10	7.09	1.29	0.02	0.46	32.12	54.90	0.64	34.62
18	俄霍布拉克煤	13.63	0.62	2.29	8.65	4.98	1.67	2.41	19.06	54.08	5.24	21.00
19	大同地区煤	22.44	1.11	0.53	8.95	1.15	1.28	1.30	31.76	50.50	2.89	29.05
20	乌兰木伦煤	13.07	0.58	0.82	6.11	1.20	6.69	1.18	14.99	45.01	18.21	14.40
21	古叙煤田的无烟煤	16.18	1.11	0.62	11.38	0.89	3.65	0.79	26.00	50.77	3.12	14.10
22	山西平朔2#煤	18.30	1.00	0.71	4.14	0.80	1.32	0.44	42.16	42.76	3.50	25.00
23	潞阳免煤	7.04	0.50	0.43	20.66	0.70	16.20	1.08	12.66	26.31	18.09	7.10
24	陕西彬长矿区烟煤	18.88	0.73	0.30	5.42	0.87	4.15	1.59	22.46	49.59	11.66	19.90
25	山西平朔煤	21.47	1.13	0.68	2.63	0.43	2.20	0.33	40.02	47.96	4.15	24.76
26	宝日希勒煤	7.22	0.24	0.52	12.04	0.74	5.42	2.31	18.80	42.86	12.65	10.80
27	金竹山无烟煤	32.87	0.80	1.00	4.18	1.86	1.86	1.35	32.00	53.97	2.72	
28	水城贫瘦煤	23.78	0.43	0.42	7.81	0.81	0.73	0.67	27.06	55.98	4.23	
29	滇东烟煤	32.45	0.85	0.57	8.97	0.16	0.75	1.04	22.43	58.94	3.25	
30	山西无烟煤	20.84	0.39	0.52	3.97	1.34	2.95	1.03	30.39	52.05	4.55	
31	龙岩无烟煤	30.00	0.98	0.14	7.79	2.27	5.31	2.88	28.61	40.86	9.27	
32	鸡西烟煤	34.15	0.22	0.90	3.35	2.08	0.18	0.96	22.34	64.38	0.48	
33	新集烟煤	26.33	0.63	0.62	4.76	0.95	1.76	0.61	32.61	53.64	1.08	33.30
34	淮南煤	26.65	0.35	0.70	3.20	1.00	1.20	1.20	33.00	54.00	2.00	33.90
35	平朔安太堡煤	21.30	0.87	0.49	3.60	0.67	1.67	0.81	33.50	52.31	4.65	23.30
36	神华侏罗纪煤	7.55	0.47	0.37	15.00	0.70	11.00	1.20	13.00	30.00	28.00	8.77
37	山西贫瘦煤	20.00	0.37	0.62	4.55	0.85	0.62	1.23	31.15	52.88	5.67	21.73
38	鹤岗矿煤	34.93	0.19	0.70	4.53	2.46	0.70	0.79	20.79	66.71	1.56	47.39
39	山西汾西煤	26.86	0.55	0.61	2.82	1.48	0.45	0.70	30.90	59.65	1.36	30.40
40	霍林河露天矿褐煤	19.01	0.34	0.69	2.82	1.11	1.7	0.94	22.6	64.25	4.01	34.58
41	淮北烟煤	29.80	0.70	0.28	4.50	1.78	1.59	1.16	32.81	55.18	2.40	41.50
42	大同塔山煤	11.76	0.45	0.34	5.17	0.85	2.29	0.44	35.47	48.69	3.21	13.30
43	同忻煤	24.52	0.80	0.17	5.76	0.34	1.19	0.41	38.97	47.24	2.13	29.60
44	伊泰4#煤	16.77	0.63	0.20	6.36	0.78	1.51	0.62	34.70	49.90	2.27	20.00
45	兗州煤	21.39	0.55	0.32	3.99	1.54	2.08	1.44	27.45	55.93	4.17	24.82
46	山西晋城赵庄矿黄 煤	20.97	0.33	0.43	2.64	0.85	1.45	1.40	30.55	57.03	3.53	24.80
47	郑州贫煤(告成矿)	28.11	0.17	0.40	4.93	1.40	1.06	0.94	29.00	54.24	6.04	
48	来宾田煤	39.25	0.31	0.10	11.86	0.78	1.50	0.97	25.31	51.13	3.01	
49	平顶山烟煤	37.80	0.44	0.13	4.05	0.30	0.41	0.40	27.93	64.57	0.60	53.70
50	准格尔煤	21.36	0.62	0.02	2.56	0.22	0.49	0.47	46.50	42.75	4.18	19.8

表 5 国内典型煤种除尘难易性评价及 ω_k 值范围

除尘难易性评价	ω_k 值范围	煤种名称	产地	备注
容易	$\omega_k \geq 55$	筠连无烟煤	四川	1. 西南地区的高硫煤除尘难易性评价多为“容易”； 2. 山西煤种除大同塔山煤、同忻煤等以外，除尘难易性评价多为：“较容易”或“一般”； 3. 河南、河北及东北地区煤种除尘难易性评价多为：“一般”； 4. 内蒙古的准格尔煤和陕西神府东胜煤是两种典型煤种，但其它煤种除尘难易性参差不齐。
		重庆松藻矿黄煤	重庆	
		神府东胜煤	陕西、内蒙古	
		神华煤	陕西、内蒙古	
		神木烟煤	陕西	
		锡林浩特胜利煤田褐煤	内蒙古	
较容易	$45 \leq \omega_k < 55$	陕西黄陵煤	陕西	1. 西南地区的高硫煤除尘难易性评价多为“容易”； 2. 山西煤种除大同塔山煤、同忻煤等以外，除尘难易性评价多为：“较容易”或“一般”； 3. 河南、河北及东北地区煤种除尘难易性评价多为：“一般”； 4. 内蒙古的准格尔煤和陕西神府东胜煤是两种典型煤种，但其它煤种除尘难易性参差不齐。
		陕西烟煤	陕西	
		龙烟矿烟煤	山东	
		珲春褐煤	吉林	
		平庄褐煤	内蒙古	
		晋北煤	山西	
		纳雍无烟煤	贵州	
		水城烟煤	贵州	
		铁法矿煤	辽宁	
		永城煤种	河南	
		江西丰城煤	江西	
		俄霍布拉克煤	新疆	
		大同地区煤	山西	
		乌兰木伦煤	内蒙古	
		古叙煤田的无烟煤	四川	
		山西平朔 2#煤	山西	
		洁鸡兔煤	陕西	
一般	$35 \leq \omega_k < 45$	陕西彬长矿区烟煤	陕西	1. 西南地区的高硫煤除尘难易性评价多为“容易”； 2. 山西煤种除大同塔山煤、同忻煤等以外，除尘难易性评价多为：“较容易”或“一般”； 3. 河南、河北及东北地区煤种除尘难易性评价多为：“一般”； 4. 内蒙古的准格尔煤和陕西神府东胜煤是两种典型煤种，但其它煤种除尘难易性参差不齐。
		山西平朔煤	山西	
		宝日希勒煤	内蒙古	
		金竹山无烟煤	湖南	
		水城贫瘦煤	贵州	
		镇东烟煤	云南	
		山西无烟煤	山西	
		龙岩无烟煤	福建	
		鸡西烟煤	黑龙江	
		新集烟煤	河北	
		淮南煤	安徽	
		平朔安太堡煤	山西	
		神华侏罗纪煤	陕西	
		山西贫瘦煤	山西	
较难	$25 \leq \omega_k < 35$	鹤岗煤	黑龙江	1. 西南地区的高硫煤除尘难易性评价多为“容易”； 2. 山西煤种除大同塔山煤、同忻煤等以外，除尘难易性评价多为：“较容易”或“一般”； 3. 河南、河北及东北地区煤种除尘难易性评价多为：“一般”； 4. 内蒙古的准格尔煤和陕西神府东胜煤是两种典型煤种，但其它煤种除尘难易性参差不齐。
		山西汾西煤	山西	
		霍林河露天矿褐煤	内蒙古	
		淮北烟煤	安徽	
		大同塔山煤	山西	
		同忻煤	山西	
		伊泰 4#煤	内蒙古	
		兗州煤	山东	
难	$\omega_k < 25$	山西晋城赵庄矿贫煤	山西	1. 西南地区的高硫煤除尘难易性评价多为“容易”； 2. 山西煤种除大同塔山煤、同忻煤等以外，除尘难易性评价多为：“较容易”或“一般”； 3. 河南、河北及东北地区煤种除尘难易性评价多为：“一般”； 4. 内蒙古的准格尔煤和陕西神府东胜煤是两种典型煤种，但其它煤种除尘难易性参差不齐。
		郑州贫煤（告成矿）	河南	
		来宾国煤	广西	
		平顶山烟煤	河南	
		准格尔煤	内蒙古	

6.3.2 电除尘器实测结果分析

对 2004 年至今所测试的国内 100 套 300MW 以上机组（其中 1000MW 机组 9 套、600MW 机组 55 套、300MW 机组 36 套）配套电除尘器测试结果进行了统计分析，结果如表 6 所示。

表 6 电除尘器实测结果统计表

项目	对应数值	ESP 数量 (套)	占 ESP 总数百分比 (%)
出口粉尘浓度 [mg/m ³]	≤30	18	18%
	30<值≤50	42	42%
	50<值≤100	27	27%
	>100	13	13%
电场数量 [个]	3	2	2%
	4	82	82%
	5	16	16%
实际比集尘面积 SCA [m ² / (m ³ /s)]	≤80	27	27%
	80<值≤90	28	28%
	90<值≤100	33	33%
	100<值≤110	12	12%

注: 1) 项目测试是在电除尘器投运不久后进行的;
 2) 项目测试时的煤种一般为设计煤种或者与设计煤种相近的煤种。
 3) 实际 SCA 为不停供电分区比集尘面积, 并按实测烟气量计算, 而实测烟气量一般小于设计烟气量。

由以上统计分析可得如下结论:

- 1) 实测除尘效率达到设计保证效率的电除尘器占总数的 96%;
- 2) 在电场数量基本上为 4 个、SCA<110 m²/(m³/s)的情况下, 出口粉尘浓度≤50 mg/m³ 的电除尘器数占总数的 60%, 其中≤30 mg/m³ 的电除尘器数占总数的 18%。

说明对于中国多数的煤种, 在适当增加电场数量和 SCA 的情况下, 达到 50 mg/m³ 甚至 30 mg/m³ 的低排放是完全可以实现的。

6.3.3 电除尘器的适应性分析

综合煤、飞灰成分对电除尘器性能影响分析、国内煤、飞灰样 ω_k 值统计结果及电除尘器实测结果分析, 认为在排放标准已提高的今天, 电除尘器仍有广泛的适应性。电除尘器的适应性分析如表 7、8。

表 7 50mg/m³粉尘排放标准下电除尘器的适应性分析

除尘难易性	ω_k 值	占统计项目总数量百分比/%		占统计煤种总数量百分比/%		适应性分析
		占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%	占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%	
容易	$\omega_k \geq 55$	15.94%	13.11%	86.06%	97.54%	推荐使用电除尘器
较容易	$45 \leq \omega_k < 55$	40.57%	40.16%			
一般	$40 \leq \omega_k < 45$	16.67%	20.49%			
	$35 \leq \omega_k < 40$	12.32%	12.30%			
较难	$25 \leq \omega_k < 35$	11.60%	11.48%	11.48%	11.48%	可以使用电除尘器
难	$\omega_k < 25$	2.90%	2.46%	2.46%	2.46%	建议在进行全面、细致的技术经济性分析后决定

注：“占统计项目总数量百分比”、“占统计煤种总数量百分比”均为参考值。

表 8 30mg/m³粉尘排放标准下电除尘器的适应性分析

除尘难易性	ω_k 值	占统计项目总数量百分比/%		占统计煤种总数量百分比/%		适应性分析
		占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%	占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%	
容易	$\omega_k \geq 55$	15.94%	13.11%	73.76%	86.06%	推荐使用电除尘器
较容易	$45 \leq \omega_k < 55$	40.57%	40.16%			
一般	$40 \leq \omega_k < 45$	16.67%	20.49%			
	$35 \leq \omega_k < 40$	12.32%	12.30%	12.30%	12.30%	可以使用电除尘器 (采取增加电场数量、比集尘面积及使用配套实用技术等方法)
较难	$25 \leq \omega_k < 35$	11.60%	11.48%	13.94%	13.94%	暂不推荐使用电除尘器
难	$\omega_k < 25$	2.90%	2.46%			

注：“占统计项目总数量百分比”、“占统计煤种总数量百分比”均为参考值。

7 选型设计

如何确定电除尘器的大小，以符合粉尘排放标准是电除尘器应用上的一个主要问题。选型过大，会使成本增加，造成浪费；选型过小，会使排放达不到标准，满足不了设计要求，后果则更为严重。

电除尘器选型中所面临的主要问题和电除尘器性能取决于许多因素这一事实有关，这些因素又随着电除尘器运行过程中工况条件的不断变化而变化，同时也随着电除尘器结构形式的变化而变化。这些不断变化的因素，对决定电除尘器比集尘面积的大小，造成了复杂的影响。

响。它不但与工况条件，即煤、飞灰成分，烟气成分，粉尘粒径等有关，同时与电除尘器的技术状况，包括极配形式，结构特点，振打方式及振打力大小、气流分布的均匀性以及电场划分情况，电气控制特性等有关，还与运行条件，包括操作电压、板电流密度，积灰情况，振打周期等有关。

众所周知，在决定比集尘面积 (SCA) 时，驱进速度 ω 是关键参数。80 年代初，世界上很多知名的电除尘器公司，例如美国的 Lodge-Cottrell 公司，西德的 Lurgi 公司等都认为不能用理论计算的办法来求得 ω 值。因为它是一个与许多因素有关的经验数据，只能靠经验（有时通过中间试验）来确定。也就是说，如果电除尘器的选型要根据严格的数学公式，则在这样的公式中应包括飞灰粒径、煤及飞灰成分、烟气条件、电除尘器的几何形状和运行条件等。然而事实上，这些关系是十分复杂的。为了选型而要精确地确定这些因素的定量关系，是非常困难的。但也有另外一些公司，例如美国 Research-Cottrell 公司采用理论计算的方法，在计算机上求得一个初始驱进速度 ω ，然后经专家修正后确定设计 ω 值。这些公司也同样认为，选型的理论计算方法尚未发展到只用它就可以进行选型。计算机只帮助人们完成数学运算，其结果要用于设计，十分重要的一步是人为的修正。

国际某些环保巨头的做法，类似于 Research-Cottrell 公司，它根据多年来实际电站的测试数据和小型电除尘器的试验结果，编排了计算表观驱进速度 ω_k 的程序，其中也用到了美国南方研究所的某些研究成果：BI 指数和 BIS 指数。

其结果反映在四个煤、飞灰指标上。

- 1) ASI— Alkali Sulphate Index 酸、碱度指数
- 2) AI— 碱性指数

这两个指数用于比较煤、飞灰的性质和指导、估算、检验计算出来的 ω_k 值，这两个指标的数值低（即碱性氧化物 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 K_2O 等含量少，或者酸性氧化物含量高），粉尘就较难以收集。评价时，一般主要参考 AI。

3) BI— Bickelhaupt Index，它表明飞灰收集难易程度的指数，这个指标是 ALSTOM 公司对美国南方研究所 (SRI) 的 Bickelhaupt 先生 1975 年有关表面比电阻的著作进行推导得来的。BI 指数高，表示粉尘难以收集。

4) BIS— 考虑了含硫量影响后的 BI 指数，即修正了的 BI 指数
选型专家对基础 ω_k 进行一系列的分析、检查和修正。在计算机的输出中，有一项“超范围数据”(Values out of range) 表示在输入数据中有几个超出了编制程序时确定的范围。这就需要逐个对照和检查。如果超出范围过大，就需要考虑专项的修正。得到基础 ω_k 以后，大约还需进行六次以上修正。

以上方法我国的电除尘器供货商可以作为参考。

8 选型设计修正

见附录 C.

9 技术经济性分析

为客观地选择综合经济性更好的除尘设备，在选型设计完成后，有必要对电除尘器与其它燃煤电厂用高效除尘设备（如袋式除尘器、电袋复合除尘器）进行技术经济性比较，比较项目汇总于表 9。

表 9 技术经济性比较

类别	比较条款	具体内容	备注
技术特点	技术优点	除尘效率、压力损失、适用范围等	
	技术缺点		
经济性	设备费用	设备初始投资费用	可根据需要增加“烟尘排放费用比较”等
	电耗费用	所有设备功耗总和所对应的电耗费用	
	年运行费用	电耗费用与每年维护费用之和	
安全可靠性	安全及可靠性	耐受烟气温度、湿度、酸碱度变化大小的能力以及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 (m ²)	达到相同除尘效率时的占地面积

电除尘器的技术经济性与燃用煤种、飞灰特性及烟气成分等有着密切的关系。

一般来说，从投资角度看，除了电除尘器除尘较难的煤种外，对于国内大部分常用煤种，电除尘器都具有较好的技术经济性，运行管理压力也比袋式除尘器、电袋复合除尘器轻。另外，电除尘器采用配套的实用技术会进一步扩大其适用范围，此时与其它除尘设备的技术经济性比较就相对复杂，应该进行多因素综合分析才能确定。

从运行成本看，电除尘器的阻力低，风机运行能耗低，不需要滤料的更换，实际能耗也不高，节能运行后能耗明显低于其它除尘设备，所以运行费用电除尘器是比较低的。

电除尘器是能够同时达到低排放、高效率和低能耗的除尘设备。各除尘设备的投资、运行的技术经济性与项目特定的情况密切相关，具体项目应具体分析。

在达到相同除尘效率前提下，将 5 个电场、SCA 约 $110\text{m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 的电除尘器与袋式除尘器、含 2 个电场的电袋复合除尘器（包括一体式和分体式）进行技术经济性综合比较，如表 10。

表 10 电除尘器与袋式除尘器、电袋复合除尘器的技术经济性综合比较

序号	设备名称	技术特点及安全可靠性比较	经济性比较	占地面积比较
1	电除尘器	优点：除尘效率高、压力损失小、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像袋式除尘器那样敏感；设备安全可靠性好。 缺点：除尘效率受煤、飞灰成分的影响。	设备费用较低；年运行费用低；经济性好。	占地面积大
2	袋式除尘器	优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定；采用分室结构的能在 100% 负荷下在线检修。 缺点：系统压力损失最大；对烟气温度、烟气成分较敏感；若使用不当滤袋容易破损并导致排放超标。	设备费用低；年运行费用高；经济性差。	占地面积小
3	电袋复合除尘器	一体式电袋 优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定。破袋对排放的影响小于袋式除尘器。 缺点：系统压力损失较大；对烟气温度、烟气成分较敏感。	设备费用高；年运行费用较低；经济性较好。	占地面积较小
		分体式电袋 优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定；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好。破袋对排放的影响小于袋式除尘器。 缺点：压力损失大；对烟气温度、烟气成分较敏感。	设备费用高；年运行费用较高；经济性较差。	占地面积较大

技术经济性分析举例说明见附录 D。

10 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术

为提高电除尘器除尘性能，电除尘器可配套使用以下实用技术：

- 1) 先进的电控设备
 - a) 先进的单相智能控制器
 - b) 高频高压开关电源
 - c) 恒流高压直流电源
 - d) 三相电源
 - e) 中频高压直流电源

- 2) 烟气调质
- 3) 烟道凝聚器
- 4) 移动电极电除尘器
- 5) 机电多复式双区电除尘技术

其中先进的电控设备、烟气调质、移动电极电除尘、机电多复式双区电除尘等技术在国

内已经成熟，已有数家公司自主开发了此类技术，并在几个项目上试用，情况良好，正在作进一步改进和完善。粉尘凝聚技术在国外已经成熟，国内几家公司也正在研发此项技术。

具体介绍见附录 E。

11 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

我国现行国家标准要求粉尘排放限值为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，可以预见，国家将出台更高的粉尘排放标准，国内某些地区的地方排放标准已提高到 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，这给电除尘器技术带来了挑战，也带来了机遇。

电除尘器是否能满足目前的排放标准和拟提高的排放标准呢？欧洲暖通空调协会联盟（Rehva）/CostG3 组织认为：“干式电除尘器保证排放量在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ~ $20\text{mg}/\text{m}^3$ 甚至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 极限值的情况下也并非不寻常的”，“将来，可以预见会制订更严格的排放标准，但电除尘器仍然是一种去除废气中粉尘的重要设备”。

在发达国家，其粉尘排放标准更高，电除尘器仍被广泛地使用：如欧盟 2001/80/EC 指令中规定粉尘排放限值为 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ，其电除尘器约占 85% 左右；美国 2005 年规定粉尘排放限值为 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ，其电除尘器约占 80% 左右；在日本，虽然国家标准规定大型燃煤电厂烟尘的一般排放标准为 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，特殊排放标准为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，但是绝大部分地方政府制订的粉尘排放标准均低于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ，其燃煤电厂几乎全部采用电除尘器（部分电厂采用了先进的烟气处理系统、移动电极电除尘技术等）；在印度，由于其大部分煤种具有高灰分、高比电阻、低热值、低硫、低 Na_2O 等特性，电除尘器对粉尘的收集比较困难，故采用了多电场和大比集尘面积（电场数量高达 10 个、比集尘面积达 $250\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 以上）。其燃煤电厂 90% 以上均使用电除尘器。到目前为止，我国投产的绝大部分燃煤电厂均采用电除尘器，约占火电厂总装机容量的 95%。电除尘器比集尘面积的正确选取是国内外电除尘器达标排放的最关键因素之一。

中国环境保护产业协会电除尘委员会在对中国煤种成分及其对电除尘器性能的影响进行系统、深入研究的基础上，对国内投运电除尘器性能进行了分析总结，结合国内三十多年的电除尘器研究和工程实践经验，全面研究了电除尘器对国内煤种的适应性，认为在排放标准已提高的今天，电除尘器仍有广泛的适应性，国内少数燃煤电厂电除尘器性能不能满足要求的主要原因不是电除尘器的适应性有问题，而是工况改变或电场数量偏少、比集尘面积偏小（以电场数量 3~4 个、比集尘面积 $80\sim110\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 居多）造成的。

11.1 对选型设计指导意见总的说明

11.1.1 对选型设计基准的说明

电除尘器在选型设计时以表观驱进速度值（即 ω_t 值）作为基准是科学的，虽然该基准可能缺乏直观性，但可通过表 4、表 5 查阅国内典型煤种的 ω_t 值范围以供参考。

粉尘比电阻亦可作为电除尘器选型设计的参考基准，但由于通常所说的“适用于电除尘器比电阻范围的值”，为“工况比电阻值”，并非标书中所提供的“实验室测试比电阻值（容积比电阻值）”，因此，为保证选型的准确，应采用与工况比电阻相一致的比电阻值。

实验室测试比电阻值存在如下问题：

① 实验室比电阻测试只考虑粉尘的成分，没有考虑烟气成分（主要为水分、 SO_2 ），与工况比电阻存在很大差异（一般工况比电阻比实验室比电阻小1~2个数量级，有时可达3个数量级）；

② 实验室测量比电阻时，其测试方法（圆盘法）虽已统一，但因测试仪器的标定没有统一标准等原因，其测试数据的准确性有待论证，且不同测试单位的测试数据亦会存在差异。

工况比电阻的测试同样存在着测试仪器的没有统一标准和不同测试单位测试数据存在差异的问题。

综合考虑以上因素，将表观驱进速度值（即 ω_k 值）作为基准，结合工程经验进行电除尘器选型设计是合理的。

11.1.2 对国标粉尘排放浓度的说明

国家标准所要求的粉尘排放指的是烟囱排放，而不是电除尘器的出口粉尘浓度。事实上电除尘器后续的脱硫系统具有一定的除尘效果（大机组以湿法烟气脱硫系统为主，其除尘效率一般可达50%）。

11.1.3 对燃煤电厂燃煤偏离设计情况的说明

由于我国燃煤资源紧缺，部分电厂实际燃用煤种偏离设计值的情况较为突出，严重制约了这些电厂电除尘器的正常使用。为避免这种情况下所出现的电除尘器出口粉尘浓度超标问题，电除尘器选型设计时应适当增大比集尘面积，也可采用配套实用技术，从而最大限度地为电除尘器长期高效运行提供条件。

11.1.4 对煤、飞灰成分与电除尘器选型设计之间关系的说明

如上所述，煤、飞灰成分中的 S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 及 SiO_2 对电除尘器性能影响最大，且其对除尘性能的影响是煤、飞灰成分综合作用的结果。因此很难直接由煤、飞灰成分对电除尘器的选型设计作具体的指导意见。

下面的定性分析可供参考。

1) 满足下列至少一个条件时，其煤、飞灰的除尘性能一般较好：

- a) S_{ar} 含量>2%（如西南地区的高硫煤）；
- b) Na_2O 或 Fe_2O_3 的含量远高于平均值（如晋北煤）；
- c) Al_2O_3 或 SiO_2 的含量远低于平均值（如神府东胜煤）；
- d) S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 含量均偏高，而 Al_2O_3 、 SiO_2 均偏低。

2) 满足下列至少一个条件时，其煤、飞灰的除尘性能一般很差：

- a) S_{ar} 含量<0.3%；
- b) Na_2O 或 Fe_2O_3 的含量远低于平均值（如兗州煤）；
- c) Al_2O_3 或 SiO_2 的含量远高于平均值（如准格尔煤）；
- d) S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 含量均偏低，而 Al_2O_3 、 SiO_2 均偏高（如大同塔山煤）。

3) 满足 S_{ar} 含量<0.3%、 Na_2O 含量<0.2%、($Al_2O_3+SiO_2$)的含量>90%或 Fe_2O_3 含量<2%四个条件中的一个及以上时，电除尘器的除尘性能很差，一般可称为困难状态，选型

时应特别注意。

11.2 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

11.2.1 50mg/m³粉尘排放标准下燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

50mg/m³粉尘排放标准下的燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见如表 11:

表 11 50mg/m³粉尘排放标准下的燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

ω_k 值	电除尘器所需电场数量 [个]	电除尘器所需比集尘面积 [m ² /(m ³ /s)]	电除尘器适应性分析结论
$\omega_k \geq 55$	≥ 4	≥ 100	推荐使用电除尘器
$45 \leq \omega_k < 55$	≥ 4	≥ 110	
$35 \leq \omega_k < 45$	≥ 5	≥ 120	
$25 \leq \omega_k < 35$	≥ 6	≥ 140	可以使用电除尘器
$\omega_k < 25$	≥ 6	≥ 170	建议在进行全面、细致的技术经济性分析后决定 建议采用配套实用技术

注: 1) 当煤种灰分离或电除尘器入口含尘浓度较大时, 建议增加电场数量并适当增大比集尘面积;
当采用配套实用技术时, 可减小电场数量并适当减小比集尘面积;
2) 比集尘面积按 400mm 同极间距计算;
3) 煤种或煤、飞灰主要成分所对应的 ω_k 值范围可参考表 4 及表 5.

11.2.2 30mg/m³粉尘排放标准下燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

30mg/m³粉尘排放标准下的燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见如表 12:

表 12 30mg/m³粉尘排放标准下的燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

ω_k 值	电除尘器所需电场数量 [个]	电除尘器所需比集尘面积 [m ² /(m ³ /s)]	电除尘器适应性分析结论
$\omega_k \geq 55$	≥ 4	≥ 110	推荐使用电除尘器
$45 \leq \omega_k < 55$	≥ 5	≥ 130	
$40 \leq \omega_k < 45$	≥ 5	≥ 140	
$35 \leq \omega_k < 40$	≥ 6	≥ 170	可以使用电除尘器 建议采用配套实用技术
$\omega_k < 35$	/	/	暂不推荐使用电除尘器

注: 1) 当煤种灰分离或电除尘器入口含尘浓度较大时, 建议增加电场数量并适当增大比集尘面积;
当采用配套实用技术时, 可减小电场数量并适当减小比集尘面积;
2) 比集尘面积按 400mm 同极间距计算;
3) 煤种或煤、飞灰主要成分所对应的 ω_k 值范围可参考表 4 及表 5.

参考文献

- ①《火力发电厂电除尘器规范书》(DG-CC-95-40)
- ②欧洲暖通空调协会联盟 (Rehva) /CostG3 组织工业通风系统和设备指导书——《电除尘器——工业应用》

附录 A

(规范性附录)

选型设计条件和要求

A.1 系统概况

A.1.1 锅炉技术参数

- 1) 锅炉型号及制造厂的编制作遵照 JB/T 1617 执行;
- 2) 锅炉型式;
- 3) 最大连续蒸发量 (BMCR), t/h;
- 4) 制粉系统 (磨煤机型式);
- 5) 磨煤机的磨煤细度;
- 6) 额定蒸汽压力, MPa;
- 7) 额定蒸汽温度, °C;
- 8) 给水温度, °C;
- 9) 最大耗煤量, t/h。

A.1.2 空气预热器

- 1) 空气预热器型式;
- 2) BMCR 下过剩空气系数;
- 3) 空气预热器的设计漏风率, %,

A.1.3 脱硫方式

- 1) 脱硫型式;
- 2) 脱硫方法及工艺。

A.1.4 脱硝方式

- 1) 脱硝型式;
- 2) 脱硝方法及工艺。

A.1.5 引风机

- 1) 引风机型式;
- 2) 引风机型号;
- 3) 风量及风压: T、B 工况; B-MCR 工况。

A.1.6 其它

- 1) 锅炉除渣方式;
- 2) 锅炉除灰方式;
- 3) 电除尘器输灰系统型式;
- 4) 年运行小时数, 小时。

A.2 燃煤性质

A.2.1 煤种

- 1) 设计煤种: 产地:

2) 校核煤种: 产地:

A.2.2 煤质工业分析、元素分析、灰熔融性

煤质工业分析、元素分析、灰熔融性见表 A.1。

表 A.1 煤质工业分析、元素分析、灰熔融性

类别	名称	符号	单位	设计煤种	校核煤种
工业分析	收到基全水分	M_w	%		
	空气干燥基水分(分析基)	M_d	%		
	收到基灰分	A_w	%		
	干燥无灰基挥发分(可燃基)	V_{ad}	%		
	低位发热量	$Q_{net,w}$	kJ/kg		
	高位发热量	Q_g	kJ/kg		
元素分析	收到基碳	C_w	%		
	收到基氢	H_w	%		
	收到基氧	O_w	%		
	收到基氮	N_w	%		
	收到基硫	S_w	%		
	哈氏可磨系数(指)数	HGI	-		
灰熔融性	变形温度	DT	℃		
	软化温度	ST	℃		
	半球温度	HT	℃		
	流动温度	FT	℃		

A.3 飞灰性质

A.3.1 飞灰成分分析

飞灰成分分析见表 A.2。

表 A.2 飞灰成分分析

序号	名称	符号	单位	设计煤种	校核煤种
1	二氧化硅	SiO_2	%		
2	氧化铝	Al_2O_3	%		
3	氧化铁	Fe_2O_3	%		
4	氧化钙	CaO	%		
5	氧化镁	MgO	%		
6	氧化钠	Na_2O	%		
7	氧化钾	K_2O	%		
8	氧化钛	TiO_2	%		
9	三氧化硫	SO_3	%		
10	五氧化二磷	P_2O_5	%		
11	二氧化锰	MnO_2	%		
12	氧化锂	Li_2O	%		
13	飞灰可燃物	Cfh	%		

A.3.2 飞灰粒度分析

飞灰粒度分析见表 A.3。

表 A.3 飞灰粒度分析

序号	粒径 (μm)	单位	设计煤种	核对煤种
1	<3	%		
2	3~5	%		
3	5~10	%		
4	10~20	%		
5	20~30	%		
6	30~40	%		
7	40~50	%		
8	>50	%		
9	中位径	μm		

A.3.3 飞灰比电阻分析

1) 飞灰容积比电阻 (实验室比电阻), $\Omega \cdot \text{cm}$

飞灰容积比电阻测定方法:

飞灰容积比电阻分析见表 A.4。

表 A.4 飞灰比电阻分析

序号	测试温度 (℃)	湿度 (%)	比电阻值 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
			设计煤种	核对煤种
1	20 (常温)			
2	80			
3	100			
4	120			
5	140			
6	150			
7	160			
8	180			

2) 飞灰工况比电阻 (现场比电阻), $\Omega \cdot \text{cm}$

A.3.4 飞灰密度及内摩擦角

飞灰密度及内摩擦角见表 A.5。

表 A.5 飞灰密度及内摩擦角

序号	名称	单位	设计煤种	核对煤种
1	真密度	t/m^3		
2	堆积密度	t/m^3		
3	内摩擦角	度		

注: 此处的“内摩擦角”在一般的技术文件中为“安息角”。内摩擦角与粉尘物料自然堆积形成的安息角不同, 安息角是随着粉料的自然堆积, 沿堆积锥面滚落形成的, 表征物料的自然堆积能力; 而内摩擦角的摩擦面产生于粉料层内部, 表征粉料与粉料主体之间产生的相对滑动, 此处应为内摩擦角。

A.4 烟气成分分析

A.4.1 烟气化学成分分析

烟气化学成分分析见表 A.6。

表 A.6 烟气化学成分分析

序号	名称	符号	单位	设计煤种	校核煤种
1	二氧化碳	CO ₂	%		
2	氮	N ₂	%		
3	水	H ₂ O	%		
4	氧	O ₂	%		
5	一氧化碳	CO	%		
6	二氧化硫	SO ₂	%		
7	三氧化硫	SO ₃	%		
8	氮氧化物	NO _x	%		

A.4.2 烟气其它性质(锅炉 MCR 工况)

- 1) 电除尘器入口处烟气酸露点温度, ℃;
- 2) 电除尘器入口处烟气中水蒸气体积百分比, %。

A.5 厂址气象和地理条件

厂址气象和地理条件见表 A.7。

表 A.7 厂址气象和地理条件

序号	名称	单位	数值
1	厂址	-	
2	海拔高度	m	
3	主厂房零米标高	m	
4	多年平均大气压力	hPa	
5	多年平均最高气温	℃	
6	多年平均最低气温	℃	
7	极端最高温度	℃	
8	极端最低温度	℃	
9	多年平均气温	℃	
10	多年平均蒸发量	mm	
11	历年最大蒸发量	mm	
12	历年最小蒸发量	mm	
13	多年平均相对湿度	%	
14	最小相对湿度	%	
15	历年最大相对湿度	%	
16	最大风速	m/s	
17	多年平均风速	m/s	
18	定时最大风速	m/s	
19	历年瞬时最大风速	m/s	

序号	名 称	单 位	数 值
20	主导风向	方 位	
21	多年平均降雨量	mm	
22	一日最大降雨量	mm	
23	多年平均雷暴日数	d	
24	历年最多雷暴日数	d	
25	基本风压	kN/m ²	
26	基本雪载	kN/m ²	
27	地震设防烈度	度	
28	除尘器地面粗糙度类别	-	
29	场地土类别	-	

A.6 设计参数

A.6.1 性能参数

- 1) 电除尘器入口烟气量, m³/h (BMCR工况状态)
- 设计煤种:
- 校核煤种:
- 2) 电除尘器入口烟气温度, °C;
- 3) 烟气露点温度, °C;
- 4) 电除尘器进口处烟气最大含尘浓度, g/m³;
- 5) 电除尘器出口处的排放浓度, mg/m³;
- 6) 年运行小时数, 小时;
- 7) 设计除尘效率, %
- 保证除尘效率, %
- 8) 本体压力降, Pa;
- 9) 本体漏风率, %;
- 10) 噪声, dB (A)。

A.6.2 结构参数

- 1) 每台炉配电除尘器台数:
 - 50MW 及以下 1 台
 - 100MW ~ 125MW 1 台 ~ 2 台
 - 200MW ~ 300MW 2 台
 - 600MW 及以上 2 台 ~ 4 台
- 2) 同极间距, mm;
- 3) 电场数, 个;
- 4) 总集尘面积, m²;
- 5) 比集尘面积 (SCA), m²/(m³/s)。

A.7 达到保证效率的条件

A.7.1 电除尘器的主要设计参数应根据需方提供的选型设计条件和要求，结合供方产品的特点确定。如有场地要求，应予以明确。

A.7.2 电除尘器应在下列条件下达到保证效率

- 1) 需方提供的选型设计条件；
 - 2) 一个供电分区不工作：
 - a) 当一台锅炉配 1 台单室电除尘器时，不予考虑；
 - b) 双室以上的 1 台电除尘器，按停 1 个供电分区考虑；小分区供电按停 2 个供电分区考虑。
 - 3) 烟气温度为设计温度加 10℃；
 - 4) 烟气量加 10% 的余量；
 - 5) 锅炉燃烧设计煤种，用户需要时也可按校核煤种或最差煤种考虑，但应予以说明。
- A.7.3 供方不能以烟气调质剂作为性能的保证条件；当采用烟气调质作为除尘技术的配套方案时，此条无效。
- A.7.4 电除尘器性能考核时，运行条件超出 A.7.2 规定的范围，允许进行效率修正，但供方必须在投标时提供修正曲线。
- A.7.5 电除尘器应允许在锅炉最低稳燃（不投油助燃）负荷时运行。
- A.7.6 每台电除尘器必须有结构上独立的壳体。

附录 B

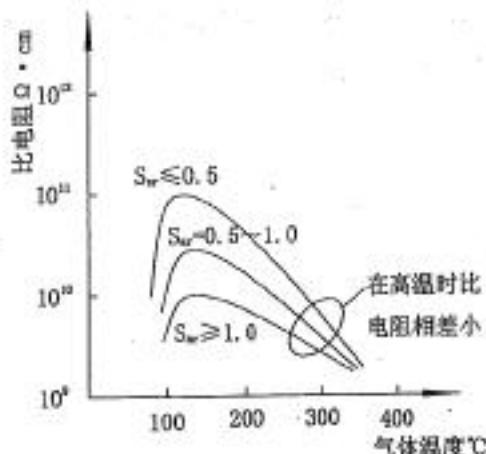
(资料性附录)

煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析

影响电除尘器性能的因素很复杂，但大体上可以分为三大类。对火力发电厂而言，首先是工况条件（即煤成分、飞灰成分、烟气成分、粉尘粒径等）；其次是电除尘器的技术状况（极配型式、结构特点、振打方式及振打力大小、气流分布的均匀性以及电场划分情况、电气控制特性等）；第三则是运行条件（操作电压、板电流密度、积灰情况、振打周期等）。这当中，第一类因素中的煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响最大，因此，为抓住主要矛盾，下面主要阐述煤、飞灰成分对其性能影响问题。

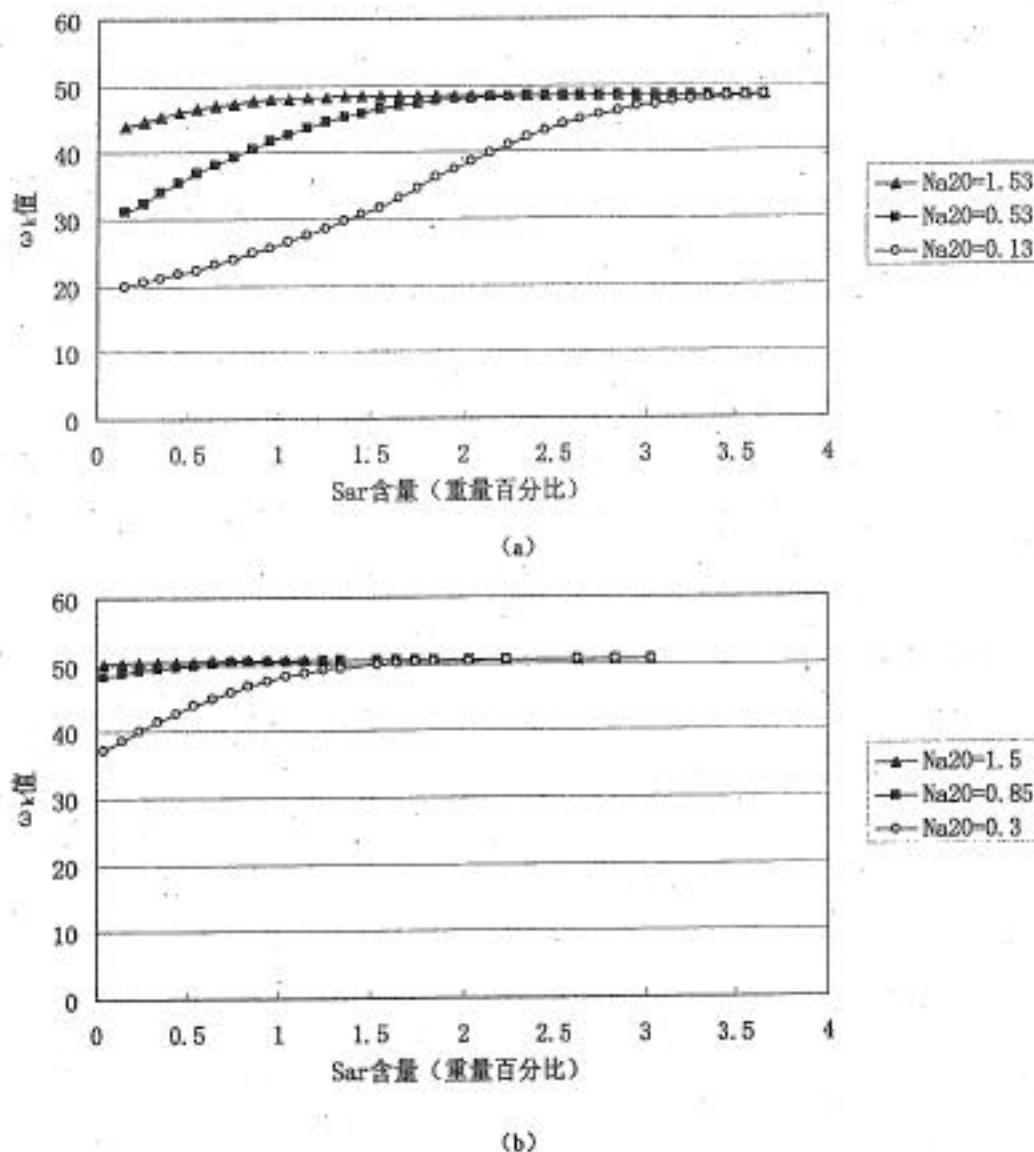
B.1 煤成分的影响分析

在煤的成分中，对电除尘器性能产生影响的主要因素有 S_{ar} 、水分和灰分，其中 S_{ar} 对电除尘器性能的影响最大。含 S_{ar} 量较高的煤，烟气中含较多的 SO_2 ， SO_2 在一定条件下，以一定的比率转化为 SO_3 ， SO_3 易吸附在尘粒的表面，改善粉尘的表面导电性， S_{ar} 含量愈高，工况条件下的粉尘比电阻也就越低， ω_k 越大，这就有利于粉尘的收集，对电除尘器的性能起着有利的影响。见图 B.1 燃煤中 S_{ar} 对比电阻的影响。

图 B.1 燃煤中 S_{ar} 对比电阻的影响

编者以 ω_k 表征电除尘器性能，测试了在国内 122 种煤含 S_{ar} 量范围内某两种典型煤中 S_{ar} 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.2 (a)、B.2 (b) 所示，各图中的三条曲线分别对应飞灰中三种不同 Na_2O 含量时 ω_k 的变化曲线。需要指出的是，由于该曲线是以某两种典型煤种作为基准而获得的，因此曲线虽然用定量关系表示，但反映的仅仅是一种定性关系：① 随着 S_{ar} 含量的增加，曲线整体变化趋势为上扬，表示煤中 S_{ar} 会对电除尘器除尘性能产生有利的影响，即煤中 S_{ar} 含量的增加有利于增强电除尘器除尘性能；② S_{ar} 对除尘性能的影响与碱性氧化物的含量有直接关系，即对除尘性能的影响是 S_{ar} 和飞灰中的碱性氧化物（主要影响成分为 Na_2O 、 Fe_2O_3 ）共同作用的结果，其中当然还有产生负面影响的其它氧化物的作用（主要影响成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 ）；③ 当煤中 S_{ar} 含量小于某一值（B.2 中其值约为 1%）时，一方面， ω_k 值较小，但是随着 S_{ar} 含量的增加， ω_k 增长的幅值较大，即 S_{ar} 含量的增加能明显地增强除尘性能；另一方面，在此 S_{ar} 含量较低的区段碱性氧化物含量的增加能更为显著

地增加 ω_k 值，此时碱性氧化物对电除尘器的性能起着主导作用；④ 当煤中 S_{ar} 含量达到一定值（图 B.2 中其值约为 1.5%）时，一方面， ω_k 值较大，但 S_{ar} 含量的增加， ω_k 变化较小甚至基本维持在某一恒定数值，即 S_{ar} 含量的增加不能显著地增强除尘性能；另一方面，碱性氧化物的含量对除尘性能的影响也很小，此时 S_{ar} 对电除尘器的除尘性能起着主导作用。

图 B.2 ω_k 与 S_{ar} 含量的关系曲线

水分的影响是显而易见的。炉前煤水分高，烟气的湿度也就大，粉尘的表面导电性也就好，比电阻也会相对比较低。在燃煤含水量很高的锅炉烟气中，水分对电除尘器的性能起着十分重要的作用。

煤的灰分高低，直接决定了烟气中的含尘浓度。对于特定的工艺过程来说， ω 或 ω_k 将随着粉尘浓度的增加而增加。但电除尘器对粉尘浓度有一定的适应范围，超过这个范围，电晕电流随着含尘浓度的增加而急剧减小，当含尘浓度达到某一极限值时，或是含尘浓度虽然不十分高，但是粉尘粒径很细，比表面积很大时，极易形成强大的空间电荷，对电晕电流产生屏蔽作用，严重时会使通过电场空间的电流趋近于零，这种现象称为电晕封闭。为了克服

电晕封闭现象。除了设置前置除尘设备以外，就电除尘器本身而言，最重要的技术措施是选择放电特性强的极配型式和能满足强供电的电源，同时要提高振打清灰效果。当然，要求相同的出口粉尘浓度时，其设计除尘效率的要求也高。烟气含尘浓度高，所消耗表面导电物质的量大，对高硫、高水分的有利作用折减幅度大，综合来讲，高灰分对电除尘是不利的。

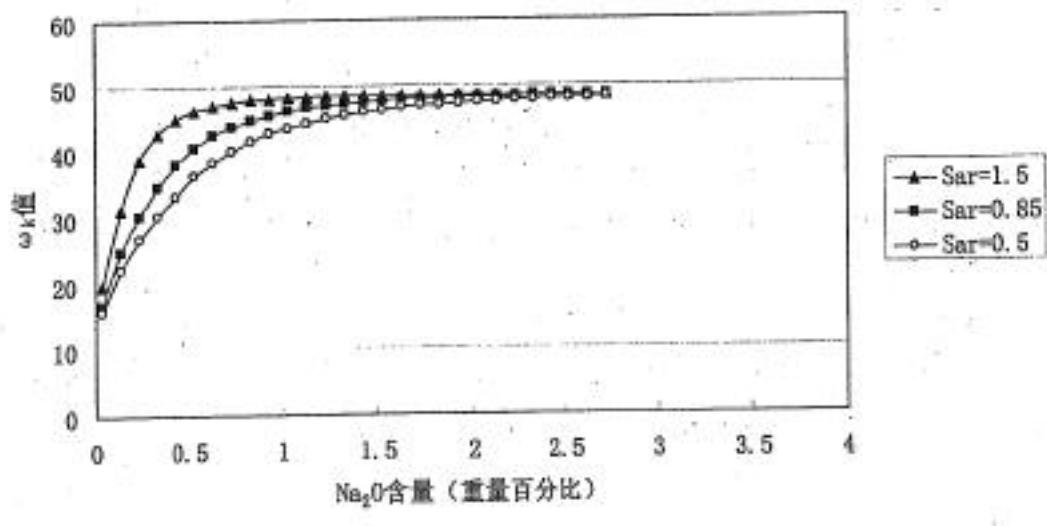
B.2 飞灰成分的影响分析

飞灰包括 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 SO_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 Li_2O 、 MnO_2 、 TiO_2 及飞灰可燃物等成分。由于 P_2O_5 、 Li_2O 、 MnO_2 、 TiO_2 对电除尘器性能的影响较小（在美国南方研究所的 Bickelhaupt 先生的比电阻预测实验研究报告中，把 Li_2O 和 Na_2O 的含量之和作为一个影响因素，实验结果是，两者之和虽然很小，但其微小的变化，对粉尘比电阻的影响却很大），此处不予讨论，下面分别分析其它几个飞灰成分对电除尘器性能的影响。

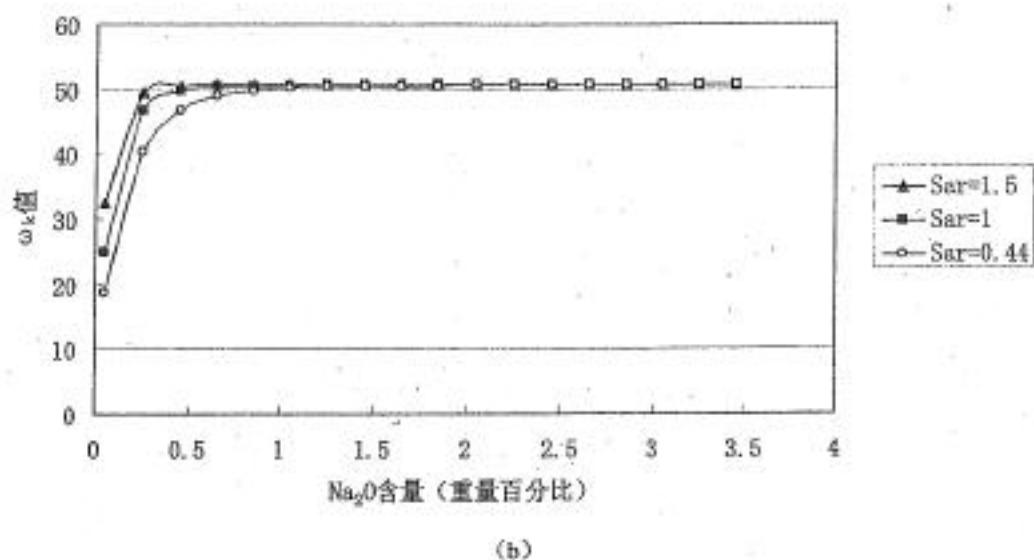
1) Na_2O 对电除尘器性能的影响

Na_2O 可增加飞灰体积导电，使比电阻下降，有利于除尘。有的低硫煤，若 Na_2O 在 2% 以上时，不但不发生反电晕，除尘效率仍很高。

测试了国内某两种典型飞灰中 Na_2O 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.3 (a)、B.3 (b) 所示，各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_{ar} 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关系为：① 随着 Na_2O 含量的增加，曲线整体变化趋势为上扬，表示飞灰中的 Na_2O 会对电除尘器除尘性能产生有利的影响，即飞灰中 Na_2O 含量的增加有利于增强电除尘器除尘性能；② Na_2O 对除尘性能的影响与煤中 S_{ar} 的含量有直接关系，即对除尘性能的影响是 Na_2O 和煤中的 S_{ar} 共同作用的结果；③ 当飞灰中 Na_2O 含量小于某一值（图 B.3 中其值约为 0.5%）时，一方面， ω_k 值较小，但是随着 Na_2O 含量的增加， ω_k 增长的幅度较大，即 Na_2O 含量的增加能明显地增强除尘性能；另一方面， S_{ar} 含量的增加能更为显著地增加 ω_k 值，此时 S_{ar} 对电除尘器的性能起着主导作用；④ 当飞灰中 Na_2O 含量达到一定值（图 B.3 中其值约为 1%）时，一方面， ω_k 值较大，但 Na_2O 含量的增加， ω_k 变化较小甚至基本维持在某一恒定数值，即 Na_2O 含量的增加不能显著地增强除尘性能；另一方面， S_{ar} 含量对除尘性能的影响也很小，此时 Na_2O 对电除尘器的除尘性能起着主导作用。

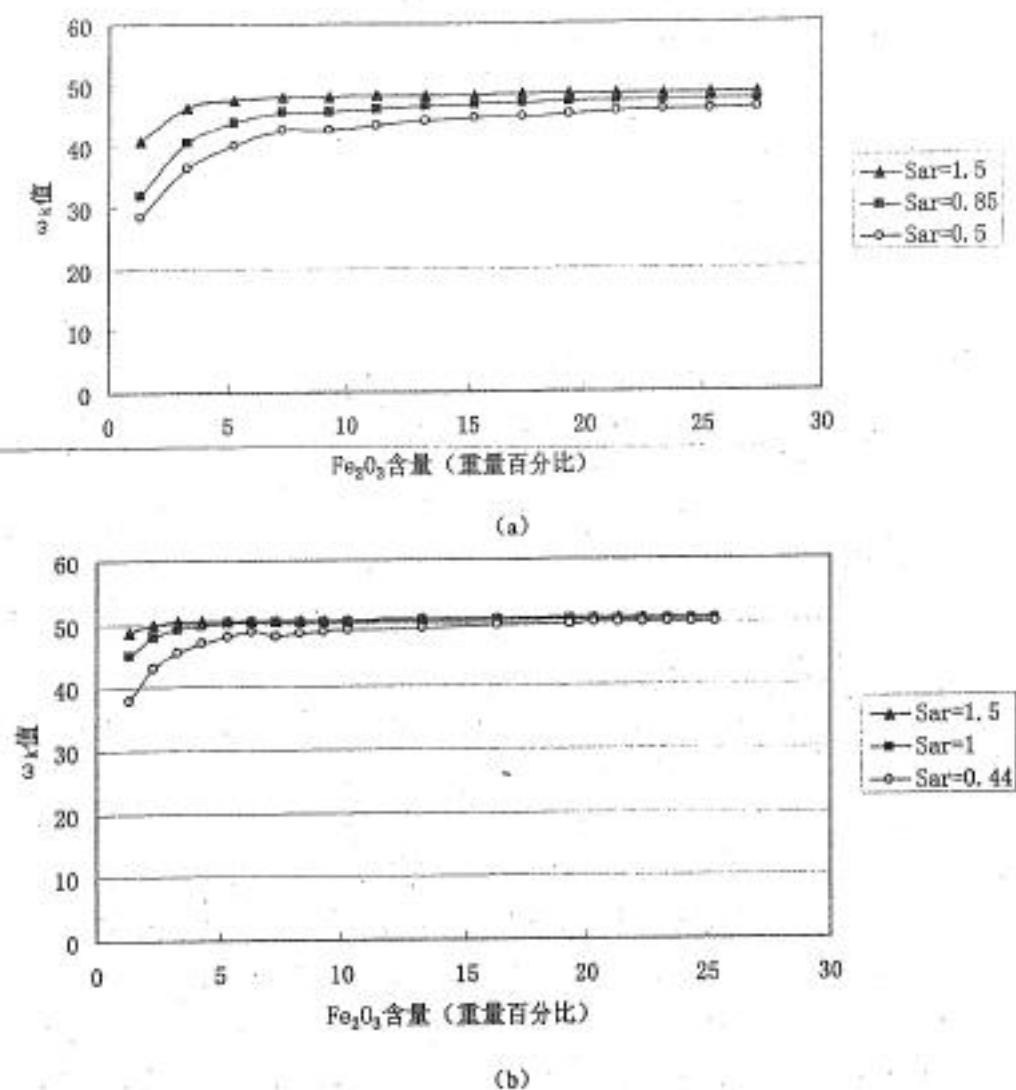


(a)

图 B.3 ω_k 与 Na_2O 含量的关系曲线2) Fe_2O_3 对电除尘器性能的影响

Fe_2O_3 本身比电阻在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右，不是太高，而且它可使灰熔融温度降低， K_2O 通过它使飞灰体积导电增加，为有利因素。

测试了国内某两种典型飞灰中 Fe_2O_3 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.4 (a)、B.4 (b) 所示，各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_{ar} 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关系为：① 随着 Fe_2O_3 含量的增加，曲线整体变化趋势为上扬，表示飞灰中的 Fe_2O_3 会对电除尘器除尘性能产生有利的影响，即飞灰中 Fe_2O_3 含量的增加有利于增强电除尘器除尘性能；② Fe_2O_3 对除尘性能的影响与煤中 S_{ar} 的含量有直接关系，即对除尘性能的影响是 Fe_2O_3 和煤中的 S_{ar} 共同作用的结果；③ 当飞灰中 Fe_2O_3 含量小于某一值（图 B.4 中其值约为 4%）时，一方面， ω_k 值较小，但是随着 Fe_2O_3 含量的增加 ω_k 增长的幅值较大，即 Fe_2O_3 含量的增加能明显地增强除尘性能；另一方面， S_{ar} 含量的增加能更为显著地增加 ω_k 值，此时 S_{ar} 对电除尘器的性能起着主导作用；④ 当飞灰中 Fe_2O_3 含量达到一定值（图 B.4 中其值约为 11%）时，一方面， ω_k 值较大，但 Fe_2O_3 含量的增加， ω_k 变化较小甚至基本维持在某一恒定数值，即 Fe_2O_3 含量的增加不能显著地增强除尘性能；另一方面， S_{ar} 含量对除尘性能的影响也很小，此时 Fe_2O_3 对电除尘器的除尘性能起着重要作用。

图 B.4 ω_k 与 Fe_2O_3 含量的关系曲线3) K_2O 、 SO_3 对电除尘器性能的影响

K_2O 和 Na_2O 作用一样, 对除尘是有利的, 但 K 离子较大且转变为玻璃相, 并需通过 Fe_2O_3 起作用, 因此它比 Na_2O 的作用小。有关研究表明, 其对除尘性能的贡献率约为 Na_2O 的 20%。

SO_3 能与 H_2O 结合生成 H_2SO_4 并吸附在飞灰上, 从而降低了飞灰的比电阻, 有利于除尘。但飞灰中的 SO_3 与烟气中的 SO_3 区别很大, 烟气中的 SO_3 对除尘性能的有利作用 $>>$ 飞灰中的 SO_3 对除尘性能的有利作用, 这是因为飞灰中的 SO_3 是将飞灰中不同种类硫化物分子中的硫, 统一折合为 SO_3 分子式来表示的, 所以它并不是单一的 SO_3 , 并且它是以固态形式存在, 其活性或大部分活性已失去, 因而其对除尘性能的影响较小。

4) Al_2O_3 对电除尘器性能的影响

Al_2O_3 熔融温度高、导电性差, 是飞灰高比电阻的主要因素之一, 其含量越高, 飞灰比电阻越高, 粒子也偏细, 不利于除尘。

测试了国内某两种典型飞灰中 Al_2O_3 含量与 ω_k 的关系曲线, 如图 B.5 (a)、B.5 (b) 所示, 各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_n 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关

系为：① 随着 Al_2O_3 含量的增加，曲线整体变化趋势为下潜，表示飞灰中的 Al_2O_3 会对电除尘器除尘性能产生不利的影响，即飞灰中 Al_2O_3 含量的增加会导致电除尘器除尘性能的下降；② 当飞灰中 Al_2O_3 含量大于某一值（图 B.5 (a) 中其值约为 13%，图 B.5 (b) 中其值约为 35%）时， Al_2O_3 含量的增加能明显地减小 ω_k 值，即 Al_2O_3 含量的增加能明显地降低除尘性能；③ 当飞灰中 Al_2O_3 含量小于某一值（图 B.5 (a) 中其值约为 13%，图 B.5 (b) 中其值约为 35%）时， Al_2O_3 含量虽然增加但 ω_k 下降较小或基本维持在某一恒定数值，即 Al_2O_3 含量的增加不能显著地降低除尘性能，此时 Al_2O_3 对电除尘器的除尘性能影响较小。

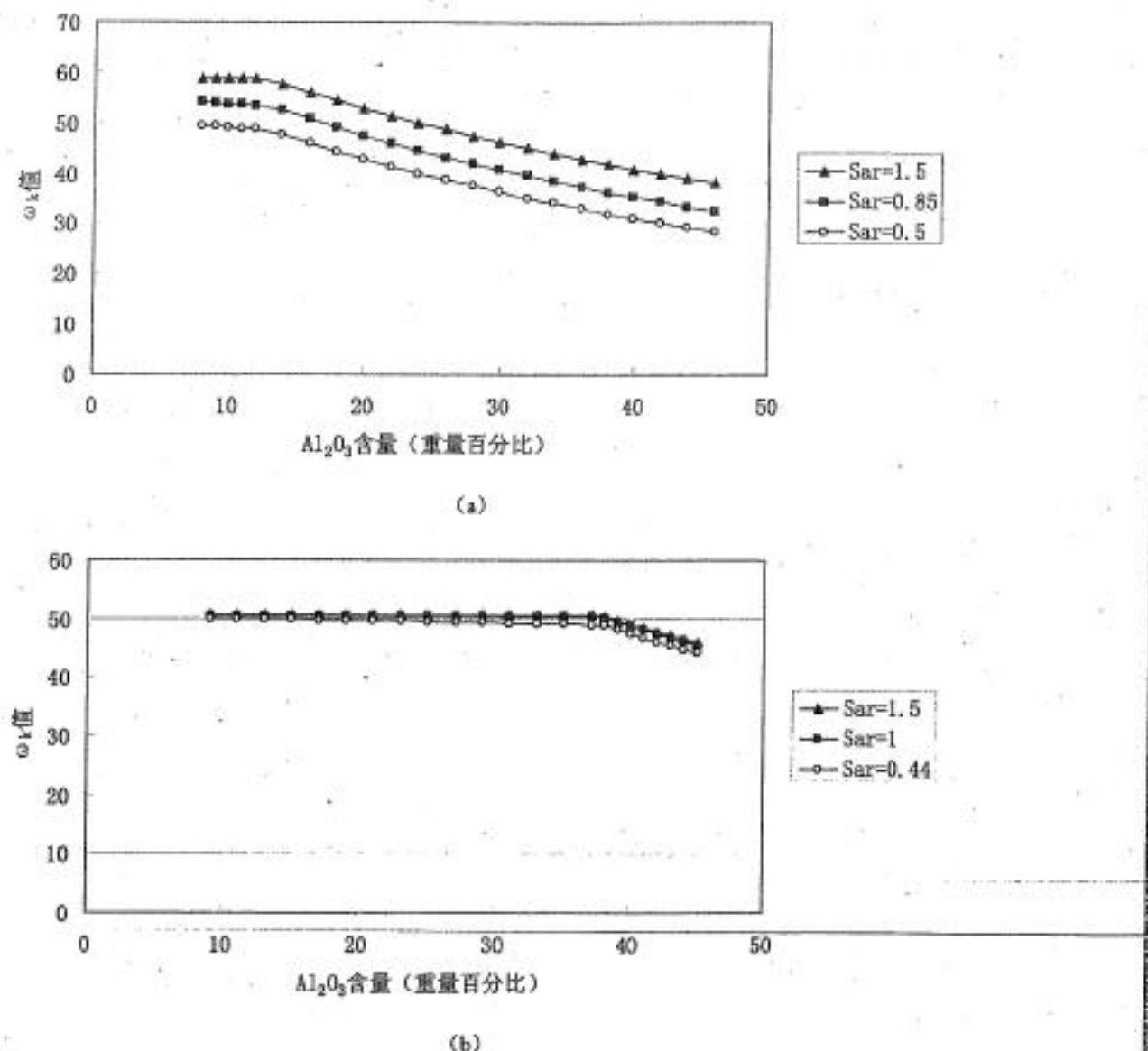


图 B.5 ω_k 与 Al_2O_3 含量的关系曲线

5) SiO_2 对电除尘器性能的影响

SiO_2 熔融温度高、导电性差，是飞灰高比电阻的主要因素之一，其含量越高，飞灰比电阻越高，粒子也偏细，不利于除尘。

测试了国内某两种典型飞灰中 SiO_2 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.6 (a)、B.6 (b) 所示，各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_{tr} 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关

系为：① 随着 SiO_2 含量的增加，曲线整体变化趋势为下滑，表示飞灰中的 SiO_2 会对电除尘器除尘性能产生不利的影响，即飞灰中 SiO_2 含量的增加会导致电除尘器除尘性能的下降；② 当飞灰中 SiO_2 含量大于某一值（图 B.6 (a) 中其值约为 40%，图 B.6 (b) 中其值约为 53%）时， SiO_2 含量的增加能明显地减小 ω_k 值，即 SiO_2 含量的增加能明显地降低除尘性能；③ 当飞灰中 Al_2O_3 含量小于某一值（图 B.6 (a) 中其值约为 40%，图 B.6 (b) 中其值约为 53%）时， SiO_2 含量虽然增加但 ω_k 下降较小或基本维持在某一恒定数值，即 SiO_2 含量的增加不能显著地降低除尘性能，此时 SiO_2 对电除尘器的除尘性能影响较小。

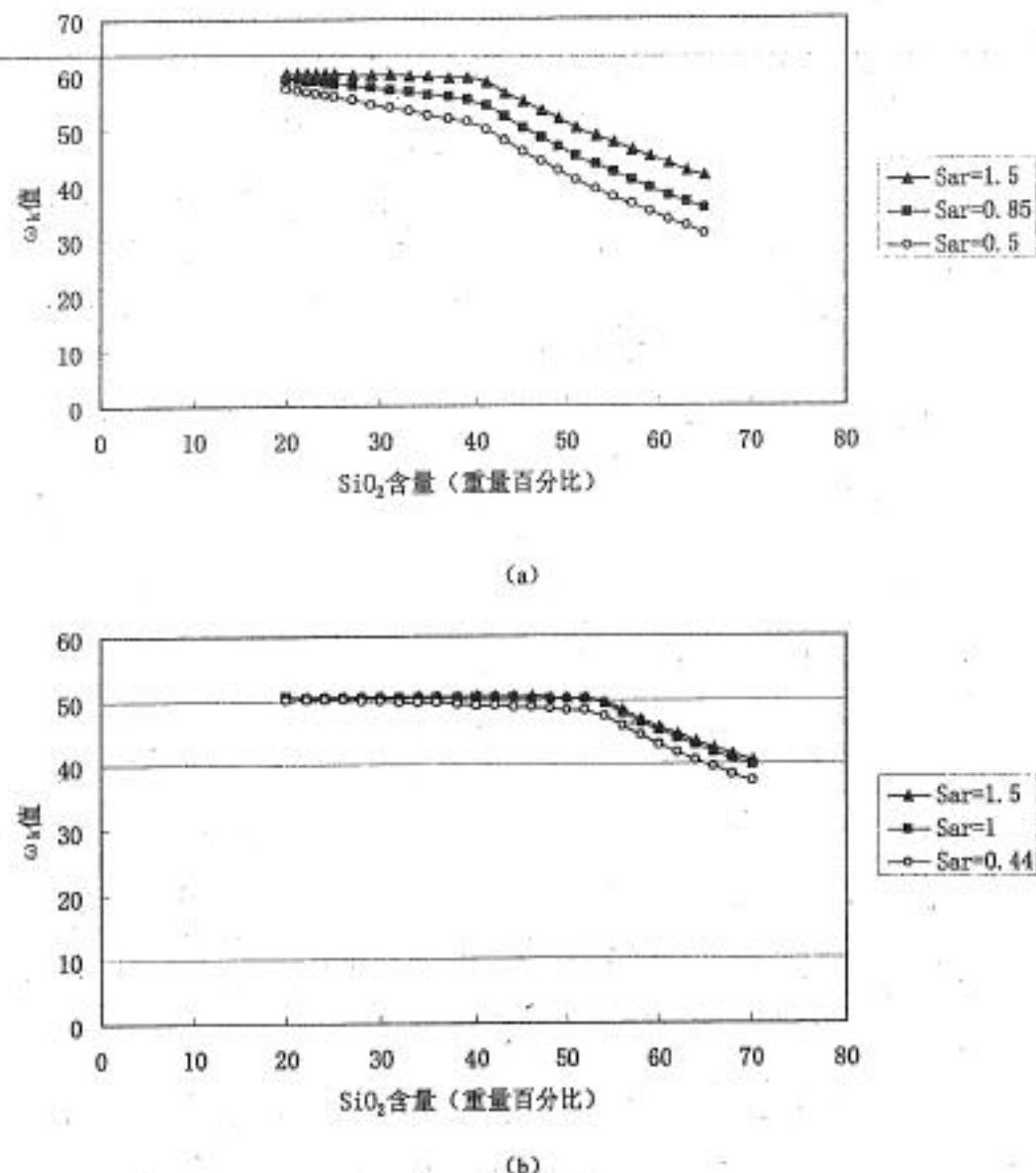


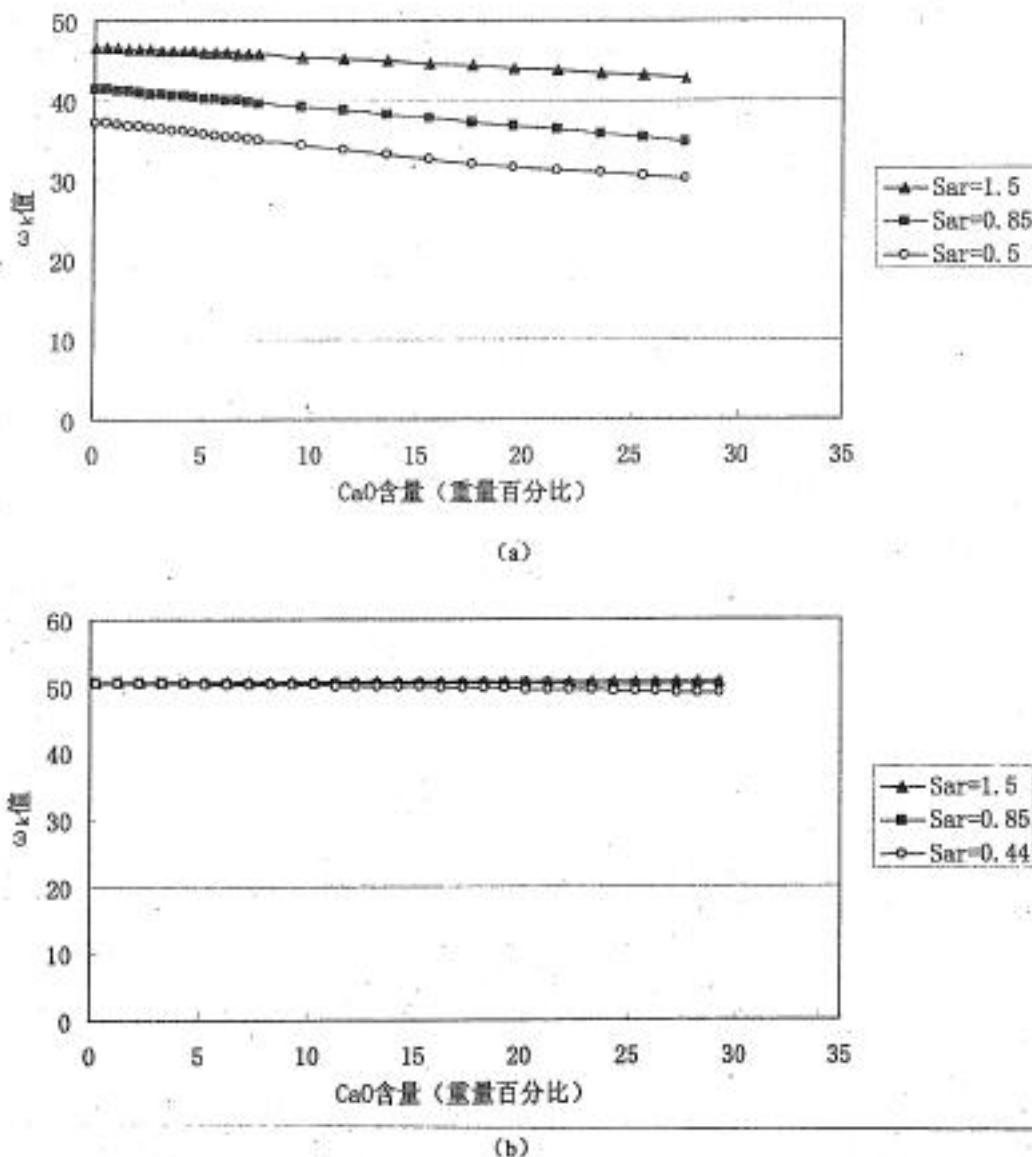
图 B.6 ω_k 与 SiO_2 含量的关系曲线

6) CaO 对电除尘器性能的影响

CaO 易和 SO_3 生成 CaSO_4 ，从而削弱 SO_3 的作用，并导致飞灰粒度减小，因此是不利因素。飞灰中 CaO 含量高时应注意系统漏风和加强电除尘器振打清灰效果。

测试了国内某两种典型飞灰中 CaO 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.7 (a)、B.7 (b) 所

示，各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_{ar} 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关系为：随着 CaO 含量的增加，曲线整体变化趋势为下滑，表示飞灰中的 CaO 会对电除尘器除尘性能产生不利的影响，即飞灰中 CaO 含量的增加会降低电除尘器的除尘性能，但其对电除尘器的除尘性能影响相对较小。但当 CaO 含量特别高时，飞灰有粘性和水硬性，不利影响就比较大。

图 B.7 ω_k 与 CaO 含量的关系曲线

7) MgO 对电除尘器性能的影响

MgO 易和 SO_3 生成 $MgSO_4$ ，从而削弱 SO_3 的作用，并导致飞灰粒度减小，因此是不利因素。

测试了国内某两种典型飞灰中 MgO 含量与 ω_k 的关系曲线，如图 B.8 (a)、B.8 (b) 所示，各图中的三条曲线分别对应煤中三种不同 S_{ar} 含量时 ω_k 的变化曲线。此图表征的定性关系为：飞灰中的 MgO 会对电除尘器除尘性能产生不利的影响，但不论 MgO 含量如何改变其对应的 ω_k 变化较小或基本维持在某一恒定数值，即飞灰中的 MgO 对电除尘器的除尘性能

影响较小。

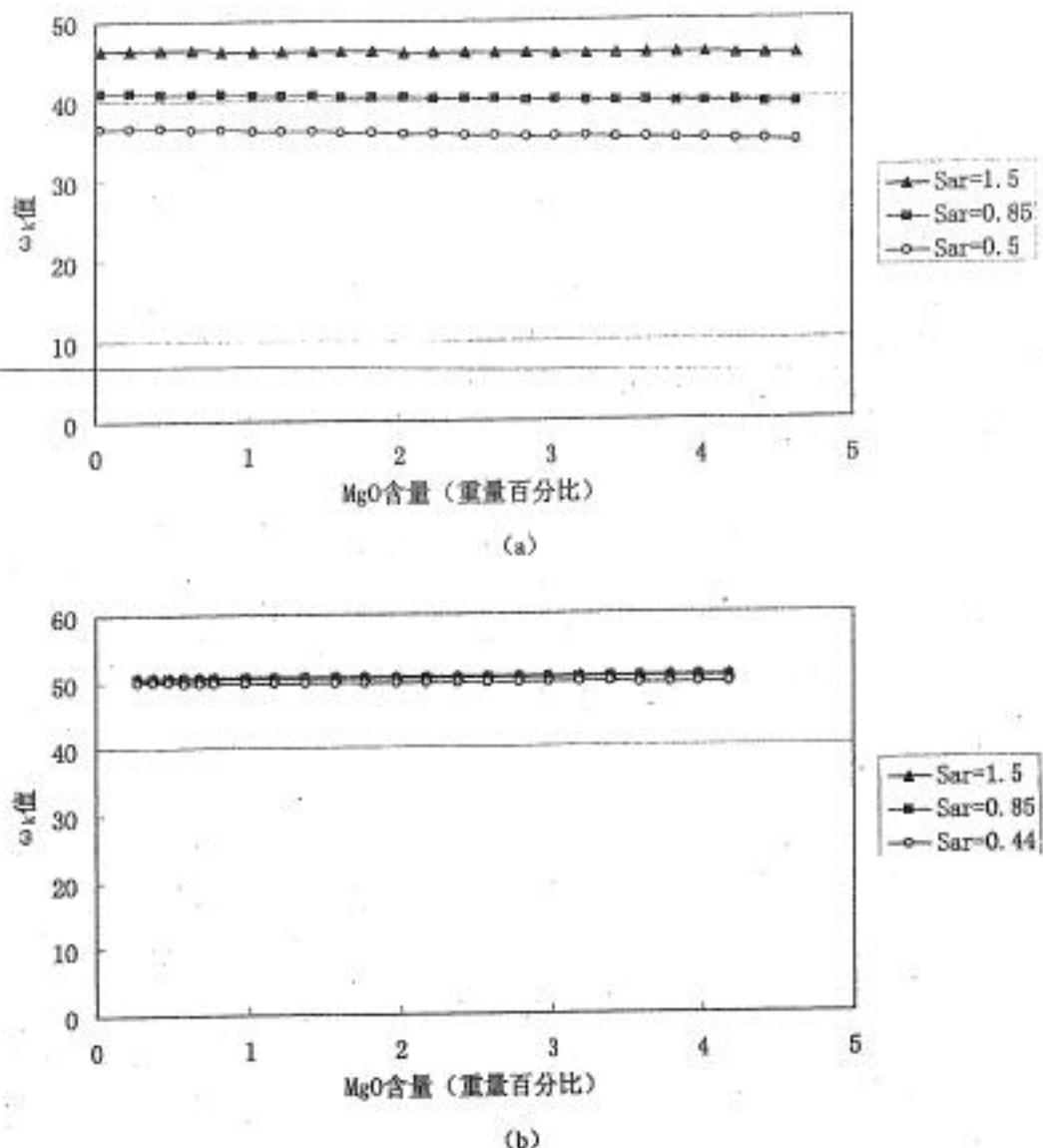


图 B.8 ω_k 与 MgO 含量的关系曲线

8) 飞灰可燃物对电除尘器性能的影响

飞灰可燃物 $C_{fh}=1\sim 8\%$ 时，可使飞灰比电阻下降，可视为有利因素；当 $C_{fh}>8\%$ 后易造成二次飞扬，为不利因素。飞灰可燃物大对除尘不利，尽管能降低比电阻，但在其被收集到极板后很容易返回，对除尘不利，在 $>5\%$ 以上时有时有不利影响，在 $>8\%$ 时影响明显加大。

通过以上分析可知，煤、飞灰成分中的 S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 及 SiO_2 对电除尘器性能影响很大，其中 S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 对除尘性能起着有利的影响， Al_2O_3 及 SiO_2 对除尘性能则起着不利的影响，而且对除尘性能的影响是煤、飞灰成分综合作用的结果。 K_2O 、 SO_3 、 CaO 、 MgO 对电除尘器性能的影响相对较小。高 S_{ar} 煤时， S_{ar} 对电除尘器的性能起着主导的作用，而低 S_{ar} 煤时， S_{ar} 的影响相对减弱，而主要取决于飞灰中碱性氧化物的含量、烟气中水的含量及烟气温度等。

附录 C

(资料性附录)

选型设计修正

本附录参考了欧洲暖通空调协会联盟 (Rehva) /CostG3 组织工业通风系统和设备指导书——《电除尘器——工业应用》一书。

C.1 以燃煤为例, 由于存在大量的变量, 许多供货商和学者们提出了一些 ω_k 的修正模型, 这些模型或多或少具有一定的准确性, 但通常都是他们的专有资料, 因此不会公开。利用修正因数对偏差进行纠正是比较实用的, 所选的修正因数将直接影响 ω_k 的最终值。下文将对其进行定性描述。修正因数可分为两组: 过程修正和设计修正。修正所附加的安全系数经常被应用于以下情况:

- 设备之间的变化。由于“恒等”工况而出现的相似结果;
- 不适当的修正因数。这个比较重要, 尤其是在修正因素在可知范围之外时。

安全系数可以通过很多不同方法表示。例如, 比类似电除尘器获得的驱进速度使用更保守的数据, 或者使用比经验数据中电除尘器尺寸更大的集尘面积。安全系数意味着期望排放值比保证的排放值要低。

C.2 过程修正

烟气温度及密度。电晕特性随着这两个参数的变化而变化。低的烟气温度或者高的密度, 将提高起晕电压、增加电场强度和驱进速度。对于干式电除尘器比较重要的是, 烟气温度在烟气露点之上以防止腐蚀和减少由于粘性粉尘而导致的粉尘集结。

烟气成分。例如, 水分和 SO_2 含量的增加增强了烟气的电特性, 从而提高电压, 增强驱进速度, 湿度的变化将影响粉尘的比电阻。

颗粒尺寸分布。微细颗粒成分越多, ω_k 就越低。大量的微细粉尘将导致电晕抑制, 这将导致其很难获取合适的电晕电流。在这种状况下可预测驱进速度会减小。

粉尘成分及比电阻。这两个因素对驱进速度的影响比较显著, 也是选型设计的首要因素。不同燃煤的粉尘驱进速度相差五倍的情况也不少见, 这也导致了在给定除尘效率前提下电除尘器尺寸存在同样的差异。Si、Al、Ca 元素一般会增加比电阻, 而 Na、Fe 元素则会降低其比电阻。图 C.1 给出了在相同烟气量时达到相等除尘效率所必需的 SCA 随低硫煤中 Na 含量变化的关系。其相关的 SCA 数据是从六十年代和七十年代的实验测试中产生的。虽然从那以后产生的现代高压控制技术导致两者关系有些不同, 煤与诸如 Na_2O 之间关系的数量级仍然没有变化。

含尘量。当粉尘含尘量增加时, 如锅炉中出现的更多更粗的颗粒, 经常需对 ω_k 进行修正。一般认为在电除尘器前对粗颗粒进行预收集可减小用于收集微细颗粒物的电除尘器尺寸, 然而这也并非一直正确, 许多实例表明在不使用预收集时, 其排放却有所降低了。因粗的颗粒有利于捕获微细颗粒, 由于微细颗粒物经常具有较高的比电阻, 因此在捕获后其比电阻降低, 供电性能也得到了改善, 振打效率也因为粉饼层特性的改变而得到提高。高的粉尘浓度本身并不是高效除尘的一个限制因素, 电除尘器在含尘量超过 $2000g/m^3$ 时仍然得到成

功的应用。

碳氯化合物。含量较少，其入口粉尘中含量<0.1%，像未燃烧的油，会对比电阻和电除尘器的性能造成不利的影响。

未燃烧的低比电阻颗粒。这些未燃烧颗粒即为烧失量(LOI, Loss on ignition)。这些颗粒在电除尘器内跳跃或者飞扬而不会沉积在阳极板的粉尘层上。对这部分颗粒的除尘效率取决于气流速度，较低的速度能提高收集效果。

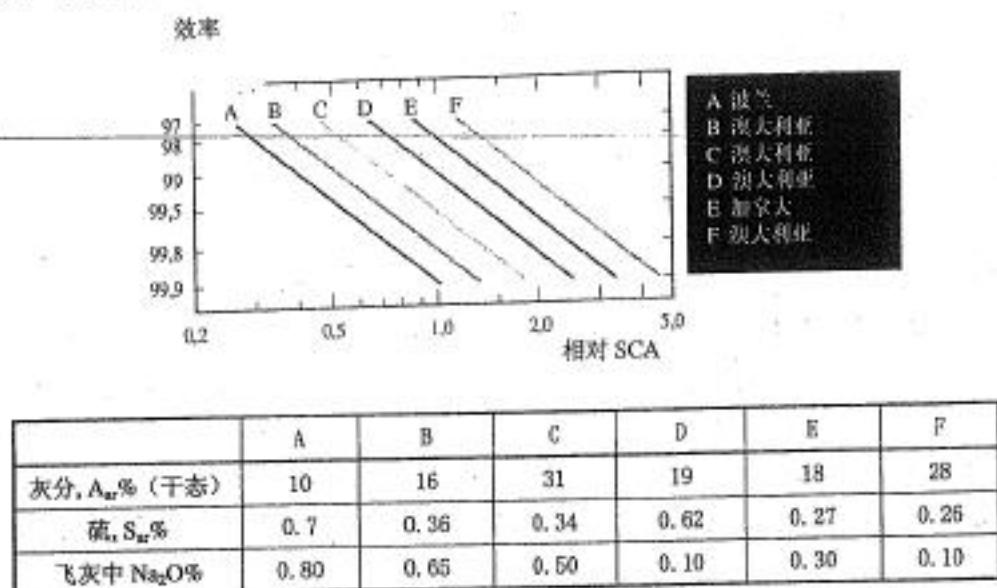


图 C.1 不同低硫煤不同 Na_2O 含量在相同烟气量时达到相等除尘效率所必需的相对 SCA。
例：对于给定的除尘效率 99.5%，在相同烟气量的前提下，F 煤需要五倍于 A 煤的 SCA

C.3 设计修正

电极类型、振打等。放电极可根据多种工况设计：如应对高比电阻工况、减少电晕抑制、方便清灰。振打形式对电除尘器的设计非常重要。在复杂工况中的不合理振打将导致阳极板粉尘的堆积从而降低除尘效率。这些都是影响除尘性能或驱进速度的因素。

在长度上的供电分区数量。由于区间荷电效应—电晕抑制—减少电除尘器下游电流状况变化，对于给定的总集尘面积，更多的供电分区数量将增加驱进速度。

供电分区大小。每个供电分区的大小也是需要考虑的参数。在统计学上，大面积的分区会比小面积的分区更经常性地产生火花。火花将会逐渐地损坏内件（电商蚀）和降低性能（由于火花发生时和过后的短暂停时间内，没有用来驱使颗粒移向阳极板的电场）。即使在大供电分区，火花率(sparks/min)必须保持在一个较低值，因此，供电分区面积越大，其单位面积的能量输入越少。需要注意的是，在试验用电除尘器中，普遍可以看到比大型设备更高的驱进速度。在应用缩小模型试验结果进行全尺电除尘器设计时，必须考虑取决于能量输入和其它参数的尺寸效应。

长高比。长高比定义为总的有效长度与有效高度之比。小长高比（短而高的电除尘器）导致更大的振打损失。振打过程中脱离的粉尘，有一部分由于水平的气体速度而直接进入出口管道。长高比一般都接近或大于 1.0，但在某些特殊场合其值也会降至 0.6。

烟气流速。烟气流速较高时，在振打过程及振打间隔中都存在二次扬尘的风险。为了达到低的排放，其趋势是减小烟气流速，对于现代电除尘器其速度一般在 1m/s 左右。当粉尘具有较好的凝聚性能时，高达 1.7-1.8m/s 的气体速度并不会引起驱进速度的衰减。对于低的气体速度，如 < 0.5m/s，气体将因为温度层原因而使其很难形成较好的气流分布，因此需要避免这种情况的产生。几乎没有将电除尘器烟气流速远小于 0.5m/s 作为设计速度的情况。

附录 D

(资料性附录)

技术经济性分析

D.1 以新建一套 600MW 配套除尘设备为例，处理烟气量按 $3,600,000\text{m}^3/\text{h}$ 计。电除尘器为 5 个电场、SCA 约为 $110\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ ；袋式除尘器的过滤速度为 1m/min ；电袋除尘器（包括一体式及分体式）中电除尘为 2 个电场，除尘效率 90%，其袋式除尘器的过滤速度为 1.2m/min 。电除尘器及电袋复合除尘器均采用节能运行方式。

D.2 技术特点比较

三类除尘设备的技术特点比较如表 D.1。

表 D.1 技术特点比较

项目	电除尘器	袋式 除尘器	电袋复合除尘器	
			一体式	分体式
除尘效率	对设计煤种或与设计煤种相差较小的煤种可以保证排放达标	煤种变化，排放都可达标	煤种变化，排放都可达标	煤种变化，排放都可达标
平均压力损失	$200\text{--}300\text{Pa}$	$<1200\text{Pa}$	$<800\text{Pa}$	$<1000\text{Pa}$
最终压力损失	$200\text{--}300\text{Pa}$	$<1500\text{Pa}$	$<1100\text{Pa}$	$<1300\text{Pa}$
安全性	对烟气温度影响及烟气成分不像袋式除尘器那样敏感	高温烟气通过旁通烟道外排，滤袋不受影响	高温烟气虽可外排，但滤袋受到影响	高温烟气通过旁通烟道外排，滤袋不受影响
检修	停炉检修	能在线分室检修	能在线分通道检修但不能在线分室检修	能在线分室检修

D.3 经济性比较

经济性包括各除尘设备的电耗费用、设备费用、年运行费用。

1) 电耗费用比较

电费按 0.4 元/ kWh ，运行时间按 $7500\text{h}/\text{年}$ 计。电除尘器的电力消耗主要为引风机及高压整流设备的功耗，袋式除尘器的电力消耗主要为引风机、空压机及冷冻干燥机的功耗，其电耗费用比如表 D.2。

表 D.2 电耗费用比较

项 目	电除尘器	袋式除尘器	电袋复合除尘器	
			一体式	分体式
阻力导致引风机的功率消耗 (kW)	290	1410	940	1180
空压机功率消耗 (kW)	0	180	60	60
冷冻干燥机功率消耗 (kW)	0	20	8	8
电除尘器运行功率消耗 (kW)	1200	0	400	400
功率消耗合计 (kW)	1490	1610	1408	1648
电耗费用合计 (万元/年)	447	483	422	494

2) 设备费用及年运行费用比较

电除尘器设计寿命按 30 年计，其易损件：极板、极线、轴承、锤头、瓷套、瓷轴等寿命按 10 年计，易损件每 10 年的更换费用按电除尘器设备费用 15% 计。袋式除尘器及电袋复合除尘器中的滤袋为：PPS/PPS，进口纤维，550g/m²，PTFE 表面处理，其寿命按 4 年，笼骨、脉冲阀寿命按 8 年计。则设备费用与年运行费用比较如表 D.3。

表 D.3 设备费用及年运行费用比较

项 目	设备费用		
	电除尘器	袋式除尘器	电袋复合除尘器
设备相对费用	1.02	1	1.1~1.2
年运行费用			
易损件的更换费用 (万元)	39	0	0
滤袋、笼骨的更换费用 (万元)	0	250	208
电耗费用 (万元)	447	483	422
年运行费用合计 (万元)	486	733	630
相差 (万元)	-247	0	-103

其设备费用与年运行费用比较结果为：

a) 设备费用：

袋式除尘器 < 电除尘器 < 一体式电袋 = 分体式电袋。

b) 年运行费用：

电除尘器 < 一体式电袋 < 分体式电袋 < 袋式除尘器

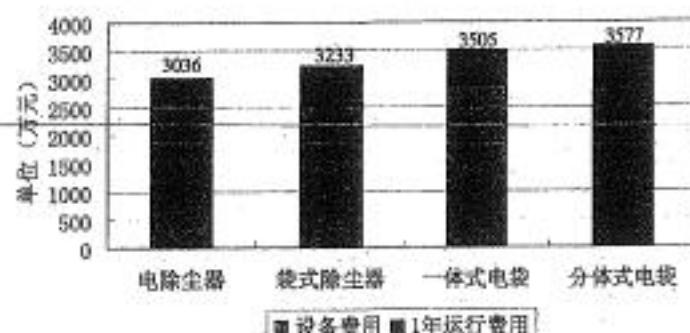
3) 经济性比较

袋式除尘器的设备费用按 2500 万元计，则三类除尘设备的经济性比较（设备费用及运行费用之和）如图 D.1、D.2 所示。其比较结果为：

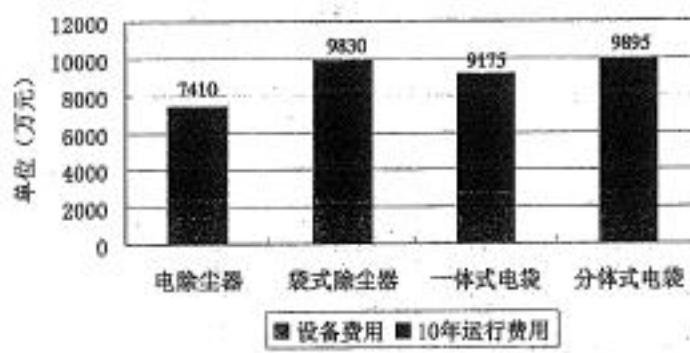
- 第 1 年：电除尘器 < 袋式除尘器 < 一体式电袋 < 分体式电袋
- 运行 10 年：电除尘器 < 一体式电袋 < 袋式除尘器 < 分体式电袋
- 运行 20 年：电除尘器 < 一体式电袋 < 分体式电袋 < 袋式除尘器
- 运行 30 年：电除尘器 < 一体式电袋 < 分体式电袋 < 袋式除尘器

从以上两图可知：

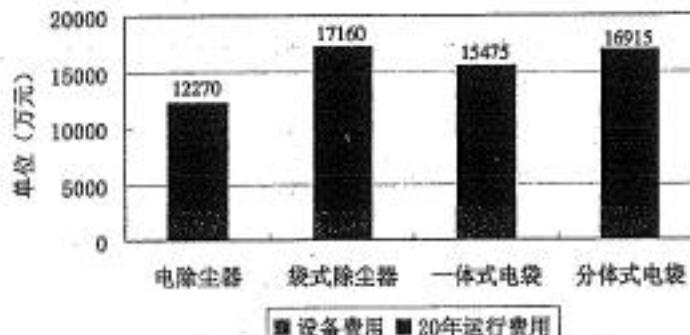
- 从整机寿命 30 年来看，电除尘器的经济性最好，一体式电袋其次，分体电袋较一体式电袋经济性差，袋式除尘器经济性最差。
- 当运行约 4 年时，袋式除尘器与一体式电袋经济性相当，当运行约 12 年时，袋式除尘器与分体式电袋经济性相当，当运行超过 12 年时，三类除尘设备的经济性规律维持不变。



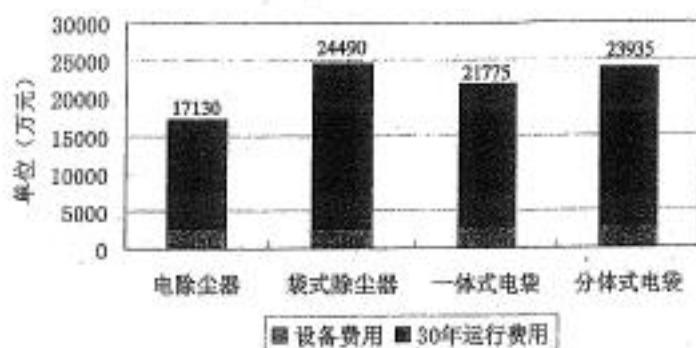
(a)



(b)



(c)



(d)

图 D.1 经济性比较 (一)

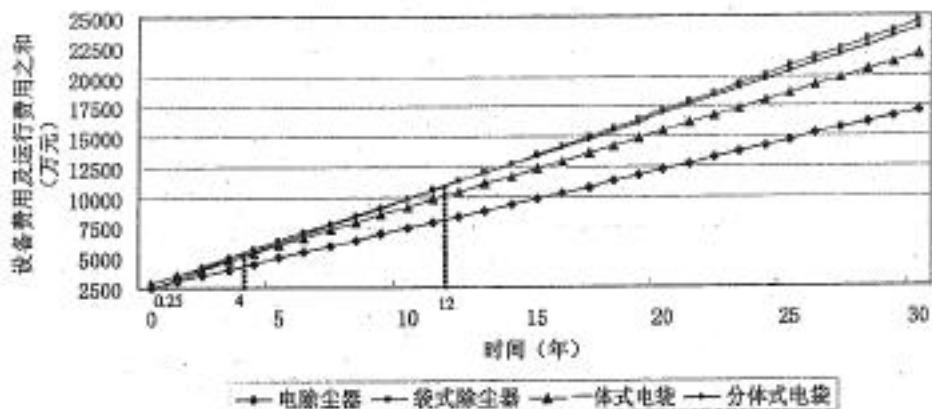


图 D.2 经济性比较 (二)

D.4 安全可靠性比较

由于电除尘器对烟气温度及烟气成分的影响不敏感，所以电除尘器的安全可靠性很好。

袋式除尘器配有完备的旁通烟道，在发生事故时，高温烟气可通过旁通烟道外排，起到保护滤袋的作用，但此时烟尘排放浓度较高。另外，在使用不当时，可能会发生滤袋在短时间内大面积破损的严重问题。

一体式电袋除尘器虽有旁通烟道，但电场区与滤袋区之间没有任何隔离，所以不能完全隔绝高温烟气对滤袋的影响。旁通烟道的入口布置在电场区的上方，经旁通烟道外排烟气的含尘浓度有一定程度的降低，对除尘器后的设备（如风机）影响小于袋式除尘器。

分体式电袋除尘器中，袋式除尘部分的旁通烟道布置与袋式除尘器相同，可以对滤袋起到很好的保护作用。打开旁通烟道时，由于经过 2 个电场的除尘，外排烟气的含尘浓度大大降低。

D.5 占地面积比较

将达到相同除尘效率时三类除尘设备的占地面积进行对比，如表 D.4 所示。表中所占面积含进、出口喇叭，不含边部走梯。

其比较结果为：

袋式除尘器 < 一体式电袋 < 分体式电袋 < 电除尘器

表 D. 4 占地面积比较

项 目	电除尘器	袋式除尘器	电袋复合除尘器	
			一体式	分体式
长*宽 (m)	38*68	22*68	34*66	39*66
占地面积 (m ²)	2584	1276	2244	2574

备注：表中数据为参考值。

D. 6 技术经济性综合比较

综合以上分析，三类除尘设备的技术经济性综合比较如表 D. 5 所示。

表 D. 5 技术经济性综合比较

序号	设备名称	技术特点及安全可靠性比较		经济性比较	占地面积比较
1	电除尘器	优点：除尘效率高、压力损失小、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像袋式除尘器那样敏感；设备安全可靠性好。 缺点：除尘效率受煤、飞灰成分的影响。	设备费用较低；年运行费用低；经济性好。	占地面积大	
2	袋式除尘器	优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定；采用分室结构的能在 100% 负荷下在线检修。 缺点：系统压力损失最大；对烟气温度、烟气成分较敏感；若使用不当滤袋容易破损并导致排放超标。	设备费用低；年运行费用高；经济性差。	占地面积小	
3	电袋复合除尘器	一体式电袋 优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定。破袋对排放的影响小于袋式除尘器。 缺点：系统压力损失较大；对烟气温度、烟气成分较敏感。	设备费用高；年运行费用较低；经济性较好。	占地面积较小	
		分体式电袋 优点：不受煤、飞灰成分的影响，出口粉尘浓度低且稳定；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好。破袋对排放的影响小于袋式除尘器。 缺点：压力损失大；对烟气温度、烟气成分较敏感。	设备费用高；年运行费用较高；经济性较差。	占地面积较大	

D. 7 技术经济性比较结论

- 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 约为 $110\text{m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 的电除尘器其总费用最低，且使用方便、安全可靠性更高。
- 2) 对于某些特殊场合，如粉尘比电阻过高、电除尘器对煤种的适应性差时，建议优先采用电袋复合除尘器或袋式除尘器。

附录 E

(资料性附录)

推荐使用的与电除尘器配套的实用技术

E.1 先进的电控设备

E.1.1 先进的单相智能控制器

电除尘单相电源是火电厂电除尘器目前使用最为成熟和最多的电源。经过较长期的使用和完善，已形成稳定的控制技术和成熟的生产工艺，控制性能已实现了多样化。随着电子技术的发展和进步，数字化智能化成为电除尘电源发展的主导方向，越来越多的电除尘厂商加大电控系统的研发力度，不断地探索研究，开发出更为先进的智能化控制系统，在单相电源的节能、提效方面成效显著，愈加满足目前市场上对单相电源的需求。

1) 单相电源工作原理

单相电源采用单相 380V 交流输入，通过两只可控硅反并联调压，经单相变压器升压整流实现对电除尘器的供电。

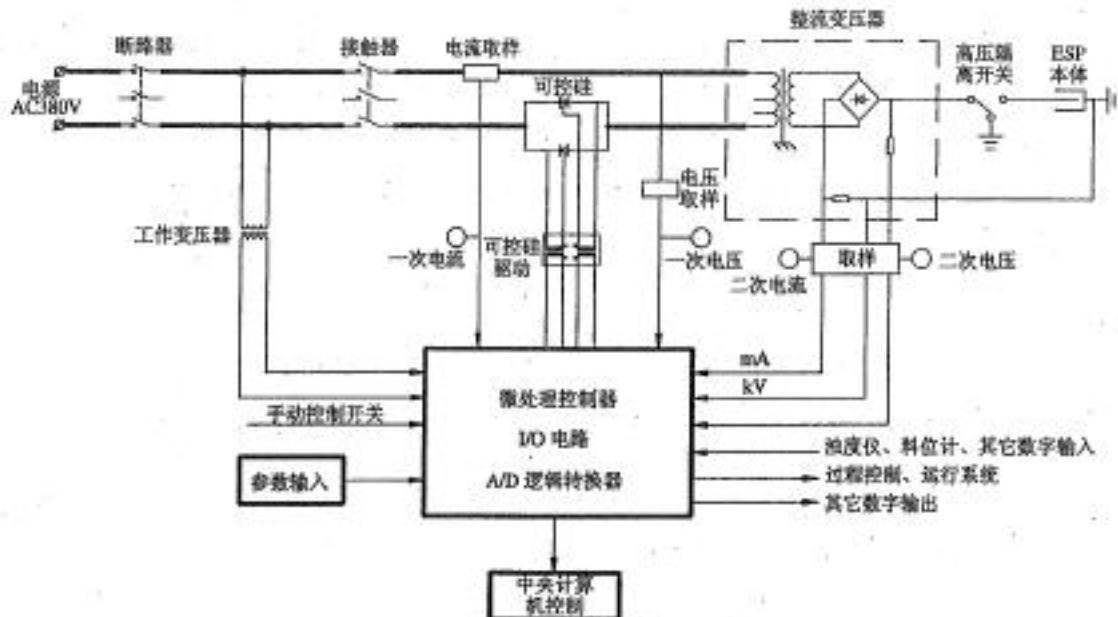


图 E.1 单相电源原理图

2) 控制器的特点与功能

先进的智能型单相控制器可以调节和控制电除尘器的输入电能，当气体温度、粉尘成分、气体流量等发生较大变动时，它可以使火花率维持在一个合适的值，它还可以调节整流器，当火花改变时调整输入电除尘的电流。整个操作过程可以由 Web 浏览器或上位机来完成。先进的控制器具有以下优越性：

- a) 高、低压控制一体化设计，可节省低压控制部分所需的 PLC，同时也有利于提高除尘效率；控制器除了控制整流变压器外，还有另外的 I/O 接口，用来控制振打、加热器或排灰系统，使之成为电场控制器。

- 节省布置空间;
 - 无需振打柜、加热柜及用于振打、加热控制用的低压程控柜;
 - 对于改造项目，除尘变和主开关均可利旧，节省投资。
- b) 先进的智能控制器拥有更加完善的火花跟踪和处理功能。
- 电除尘火花分析技术比较先进，可对火花能级进行判断与控制，有利于提高除尘效率;
 - 可设定的参数多，适应范围广。
- c) 在先进的智能控制器中内置了智能优化、降功率振打和浊度闭环控制等软件，具备了独立的控制和优化能力，使该系统比以往的系统拥有更高的可靠性，在 ESP 控制领域第一次真正实现了离散式分布控制，有效的提高除尘效率。具有卓越的节能功能，采用先进的智能控制器作为电除尘核心控制器，通过专业工程师现场优化以后运行能耗将不大于额定设计容量的二分之一甚至可达到三分之一。
- d) 灵活多变的控制方式
- 根据不同的工况状态，选择不同的工作方式。一般有以下几种工作方式：火花跟踪控制方式、最高平均电压控制方式、间歇脉冲控制方式、反电晕检测控制方式等。
- e) 上位机系统采用以太网通讯，TCP/IP 通讯方式，与其它网络的通讯相比更方便、更流畅，系统画面友好，易操作和监控。上位机与现场控制柜进行数据通信，向下传达操作指令和向上传送运行参数和状态设定；能在上位机上设定电流、设定控制方式，能远程启动、远程停机。在上位机失效情况下，控制柜可完全独立运行，并接受操作人员的手动控制。
- f) 先进的智能控制器可以作为一个独立单元进行操作，每个控制器内部的主控功能可以简化系统操作，另外还可在 PC 机上安装一个控制软件，用来监控整套设备。
- g) 具有负载短路、负载开路、SCR 短路、过流保护、偏励磁保护、油温超限保护和自检恢复功能等。

E.1.2 高频高压开关电源

高频高压开关电源是电除尘器高压供电的新动向，它具有重量轻、体积小、结构紧凑、三相负载对称、功率因数较高以及有较高收尘效率等优点，成为具有吸引力的替代传统可控硅调压整流装置（T/R）的电源。

1) 工作原理

高频高压开关电源原理框图如下图所示，三相交流输入整流为直流电源，经全桥逆变为高频交流，随后升压整流输出直流高压。高频高压开关电源工作频率可达 40KHZ，主要包括三个部分：变换器、变压器、控制器。其中全桥变换器实现直流到高频交流的转换，高频变压器/高频整流器实现升压整流输出，为 ESP 提供电源。

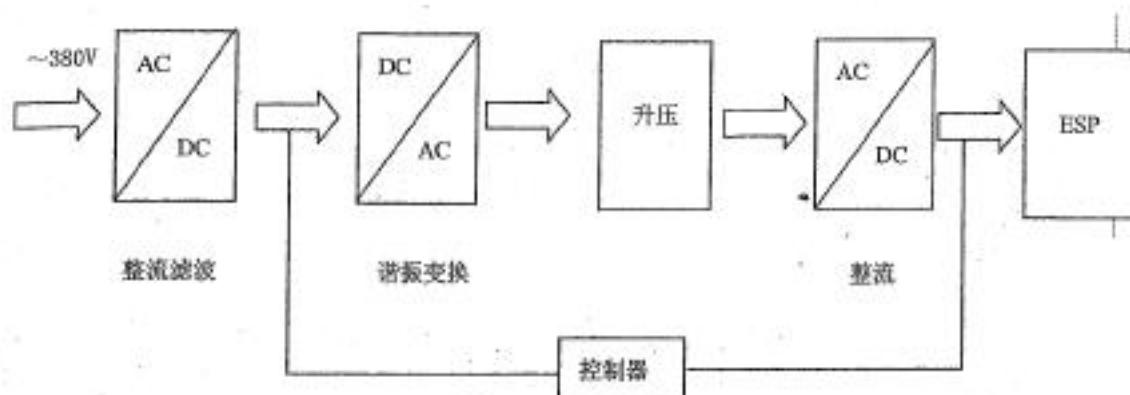


图 E.2 高频高压开关电源原理框图

2) 特点

- a) 纯直流供电电压、电流较常规电源的平均值高，有利于提高中低比电阻粉尘的除尘效率，有效地降低粉尘排放，对高比电阻粉尘的应用需要针对工况研究；
- b) 高频电源大都可在 2~5ms 时间内使火花熄灭，5~15ms 恢复全功率供电。在 100 次/min 的火花率下，输出高压无下降迹象；
- c) 整流变压器重量显著减轻，体积明显变小，成本比常规整流变压器还低，性价比高；
- d) 集成度高；
- e) 电源转换效率高。
- f) 可采取“间歇供电”。

3) 高频高压开关电源推荐应用场合

在以下几种使用条件下，电除尘方案规格选型时应优先考虑在第一电场配套应用高频高压开关电源：

- a) 电除尘器入口粉尘浓度高于 $35\text{g}/\text{m}^3$ 。
- b) 电除尘器高电场风速（大于 $1.1\text{m}/\text{s}$ ）时。
- c) 其他情况，如：电除尘器前电场运行电流小需要改造时。

E.1.3 恒流高压直流电源

恒流高压直流电源已走过二十余年的发展历程，现在已成为电除尘行业除尘电源的重要成员。它具有运行电流稳定，运行电压高，功率因数高，工作连续可靠以及长期保持高除尘效率等优点，在很多特殊除尘环境，如电除雾和电捕焦，已成为电源选型的首选配置。

1) 工作原理

如下图所示，恒流源电路包括三个部分：第一部分为 L-C 谐振变换器，每个变换器由电感 L 和电容 C 组成一个回路网络，将电压源转换成电流源；第二部分为直流高压发生器 T/R；第三部分为反馈控制系统，主要由半导体器件和接触器构成。两相交流电压源输入经 L-C 谐振变换为电流源，然后经升压整流输出直流高压，为 ESP 提供高压电源，反馈控制系统为高压输出提供闭环控制环境。

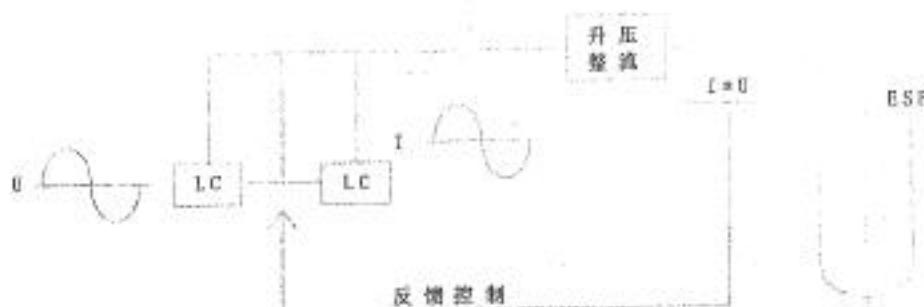


图 E.3 恒流高压直流电源工作原理图

2) 特点

- a) 运行电流稳定，运行电压高于常规电源，能长期保持高沉积效率；
- b) 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；
- c) 有效抑制火花放电的发展，快速恢复全功率供电，对电除尘器适应性强；
- d) 采用并联模块化设计，结构清晰，故障率低，最大程度保障可连续工作；
- e) 功率因数高， $\cos\varphi \geq 0.90$ ，而且不随运行功率水平而变化，节电效果明显；
- f) 输入、输出电压为完整的正弦波，不干扰电网。
- g) 具有脉冲供电和移相供电功能，用于特殊环境，如高比电阻粉尘等，有利提高除尘效果。

3) 推荐应用场合

在以下几种使用条件下，电除尘电源选型时应优先考虑配套恒流高压直流电源：

- a) 电除雾和电捕焦；
- b) 高比电阻粉尘；
- c) 现场工况变化频繁，浓度变化范围大；
- d) 因工况和本体等原因，配套恒流电源后能提高运行参数，降低排放。

E.1.4 三相电源

三相电源是采用三相 380V 交流输入，通过三路六只可控硅反并联调压，经三相变压器升压整流，可实现恒流和恒压供电。目前国内企业自主研发的三相电源已成功应用于大机组的电除尘器电气改造，单台电源最大功率为 84kV&2.2A。从电除尘器第一电场的分级效率实验来看，三相电源比单相电源可提高 5-10% 的除尘效率，实现对细颗粒物的排放控制。电源电路图如下：

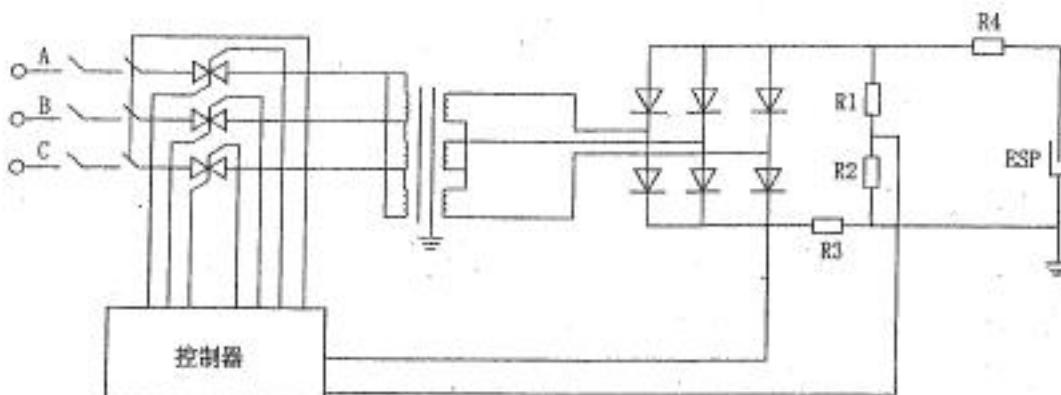


图 E.4 三相电源工作原理图

另外电源供电具有电网输入平衡、可大幅度减少对电网的污染和提高电源利用率，具有提高除尘效率和节约能源两大技术优点。从 125-600WM 机组应用情况看，三相电源有以下主要优点：

- 1) 输出直流电压平稳，波动小，运行电压高，除尘效率可提高 5~10%；
- 2) 三相电源功率因素可达 0.9 以上，能量优化控制功能可根据电场工况条件的变化自动调整输入功率，侦测并控制反电晕，在保证电除尘器达到最高除尘效率的前提下实现节能；
- 3) 16 位单片机处理速度快、在线功能强、可靠、通讯端口兼容，采用单三相电源的集成和利用上位机实现协调控制不仅可减少细颗粒物排放而且有一定节能效果；
- 4) 电除尘器电源的节能由两部分组成：电源的功率系数及最低排放控制；
- 5) 单相电源和三相电源的高低压系统集成技术有望成为我国近期实现节能减排的核心技术之一。

缺点：

由于三相电源电路特点所致，火花上冲较为激烈，较易拉弧，需要采用新的控制技术。

E.1.5 中频高压直流电源

静电除尘器中频高压直流电源是电除尘用的一种新型电源，可很好地满足电除尘器用户节能降耗、保效增效的要求。在不同的工况下都有显著的效果，其主要特点如下：

- 1) 中频电源采用三相电压输入。电除尘用电三相平衡，无缺相损耗，可以减少初级电流；采用调幅调压方式，功率因素高，可提高电能的利用率，是属于节能型环保设备；
- 2) 中频电源采用 AC→DC→AC→DC 的变流技术。采用空间电压矢量脉宽调制技术 (SVPWM)；控制采用数字信号处理器 (DSP)，采用 PI 控制算法，实现无静差稳压/恒流双参数控制；
- 3) 中频电源整流变压器体积小，重量轻，移动方便，比可控硅变压器体积小 1/3，安装方便。其输出功率与输入功率之比大于 0.90 左右，比可控硅电源有更高的电能利用率，对于新设计的电除尘器本体可减少收尘面积，降低电除尘器总重量和总造价；
- 4) 纹波系数小，电压峰谷值与平均值基本一致，纹波系数大大小于单相可控硅电源，也小于三相可控硅电源，可有效地提高电场输入功率，从而提高除尘效率；

- 5) 控制部分采用了高性能的双 DSP 芯片和外围芯片, 具有高速采样, 高速计算、功能完善、电路结构简单、可靠性好等优点, 是目前电除尘电源中最高速的控制芯片;
- 6) 具有优异的闪络控制性能, 火花响应时间小于 20μs, 下降幅度小, 回升速度快, 并能自动适应工况条件的变化, 无需人工调节。可提供最大有效的收尘功率。闪络火花能量大大小于三相可控硅电源, 也小于单相可控硅电源;
- 7) 临界反电晕控制, 可满足各种不同工况条件的要求。针对粉尘比电阻比较高的一些特殊工况条件, 控制器能根据电场中电压电流的变化, 自动调整工作点, 使设备提供的电压维持在电场能接受的最高电压附近;
- 8) 间歇供电方式可任意调节占空比, 脉宽最小可达到 2.5ms;
- 9) 完善保护功能, 具有输出短路、开路、缺相、IGBT 温度高、危险油温等多种保护功能, 能保证设备安全可靠地运行;
- 10) 中频电源采用高、低压一体化设计, 节省控制柜安装空间, 可靠实现降压振打(VCR)功能, 有效增强清灰效果, 提高除尘效率。

E.2 烟气调质

E.2.1 烟气调质的原理

借助飞灰表面毛细孔的孔壁场力、静电力等力的作用, 调质剂(如水汽或硫酸)首先被吸附并凝结在这些毛细孔内, 继而扩展到整个飞灰表面, 形成一层水膜。飞灰表层所含的可溶金属离子, 将溶于形成的液膜中, 而变得易于迁移。在电场力作用下, 溶于膜中的离子以膜为媒介, 快速迁移, 传递电荷。此外, 通过改变飞灰的黏附性以及飞灰颗粒之间的作用力, 增大飞灰的粒径, 提高粉尘层间的粘附能力, 减少二次扬尘。

E.2.2 烟气调质方法分类

烟气调质主要有以下几种:

1) 化学调质剂

常用的化学调质剂有 SO₃、NH₃、氯化物、铵的化合物、有机胺、碱金属盐等。其中, SO₃以其优良的调质效果, 在国外应用最广泛。

2) 水基调质剂

水基调质不存在腐蚀或毒性等问题, 但是如果喷水量较大, 会影响电除尘器的正常运行。烟气降温大, 也不利于排放扩散。

E.2.3 SO₃烟气调质概述

1) SO₃烟气调质的适用范围

燃煤电厂 SO₃烟气调质的使用条件为: a. 处理烟气温度 110℃~180℃; b. 标准状态下处理烟气含尘浓度宜≤100 g/m³(标态, 干基); c. 适用于粉尘比电阻≥1.0×10¹¹(Ω·cm)场合; d. 使用的环境温度为 -20℃~+50℃, 在相对于空气温度 20℃左右时最大相对湿度为 90%, 海拔高度≤1000 m。

2) SO₃烟气调质评价

优点:

能够有效地降低粉尘比电阻，提高电除尘器对高比电阻粉尘的除尘效率。

缺点：

- a) 应用具有一定的局限性，不是所有的工况都适合使用，也会受烟气条件和粉尘性质的影响和制约，其对煤种、烟气条件的适应性往往需经过理论分析后，再经实际实验来确定；
- b) 投资高、系统结构复杂，运行不正常时，可能腐蚀设备，且会带来一定量的二次污染。

E.3 烟道凝聚器

1) 烟道凝聚器的原理

烟道凝聚器的原理：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。

2) 烟道凝聚器评价

优点：

- a) 运行成本相对较低，压力损失较小（<250Pa），运行可靠，维护少，适应性好；
- b) 减少微粒排放，降低总质量排放，减轻因微粒排放引起的人体危害，提高大气能见度；
- c) 满足将来高标准排放要求，如PM_{2.5}、PM₁₀的排放限值；
- d) 有助于减少重金属排放，例如汞、砷、硒等；
- e) 在一定范围内提高电除尘器对不同煤种的适应性；
- f) 静电除尘器的减容。

缺点：

- a) 凝聚器的安装需要一定长度的进口烟道，故其使用受到一定的限制；
- b) 凝聚器提效受除尘设备出口粉尘浓度和粉尘粒径影响，且其提效具有一定的范围；
- c) 不适用磨琢性强的粉尘（如烧结和球团等粉尘）。

E.4 移动电极电除尘器

1) 移动电极电除尘器的原理

移动电极电除尘器的除尘原理与常规电除尘器完全相同，只是它的清灰方式不一样，常规电除尘器采用振打、声波等方式来达到清灰的目的，而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，防止了反电晕的产生。

2) 移动电极电除尘器评价

优点：

- a) 能保持阳极板的永久清洁，电除尘器长期运行，性能不会下降；避免反电晕效应，能有效地解决高比电阻粉尘的收尘问题；
- b) 能最大限度的减少二次扬尘，显著降低电除尘器粉尘排放浓度；

- c) 可使电除尘器小型化，节约场地；
- d) 特别适合于老机组电除尘器改造，在很多情况下，只需将末电场改成移动电极电场，不需另占场地；
- e) 与袋式除尘器相比，压力损失小，维护费用低，运行允许的烟气温度高，并且有着较高的性价比。

缺点：

结构较复杂，对设备的制造、安装工艺要求和运行可靠性要求较高。

E.5 机电多复式双区电除尘技术

1) 机电多复式双区电除尘技术的原理

机电多复式双区电除尘技术，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。其电场极配布置示意图如图 E.5。

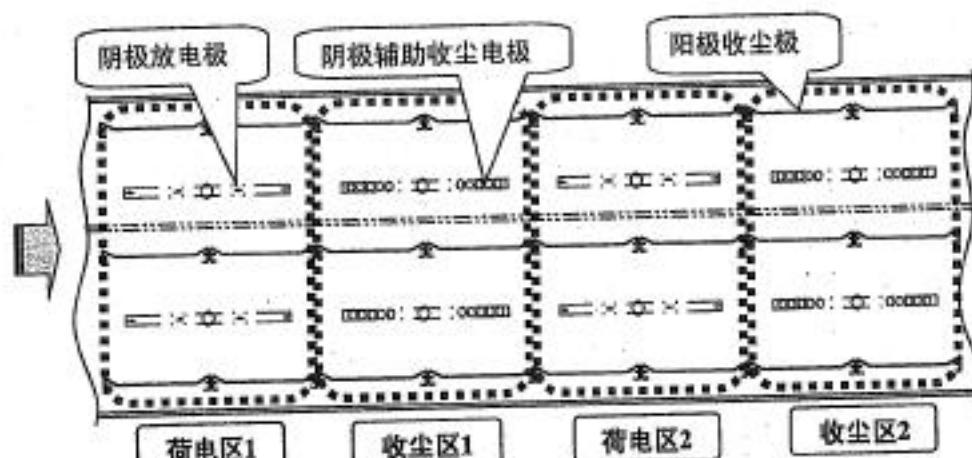


图 E.5 机电多复式双区电场极配布置示意图

由于收尘区采用了高场强的圆管一板式极配，实现了高电压低电流的运行特性，有效提高了对电除尘器后级电场细微粉尘的捕集，并可有效抑制高比电阻粉尘条件下的反电晕发生和低比电阻粉尘条件下的粉尘二次反弹，从而可提高并稳定除尘效率。

2) 机电多复式双区电除尘技术评价

优点：

采用由数根圆管组合的辅助电晕极与阳极板配对，运行电压高，场强均匀，电晕电流小，能有效抑制反电晕，并由于圆管电晕极的表面积大，可捕集正离子粉尘，从而达到节电和提高除尘效率的目的。

缺点：

一般仅用于最后一个电场，同比会增加一套高压设备，而且辅助电极比普通阴极成本高。在实际应用中对电除尘器的提效作用受各种运行条件的影响，改善系数是一个经验值范围，难以一概而论，对提效的贡献很难确定。



中国环境保护产业协会

China Association of Environmental Protection Industry



《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》

编制说明

中国环境保护产业协会电除尘委员会

2010年4月

目 录

1 任务来源	1
2 编制单位、起草人及评审专家	1
3 编制过程	1
4 选型设计条件和要求	2
5 选型设计条件和要求分析	2
5.1 煤、飞灰样主要成分及其分布	2
5.2 煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析	6
6 电除尘器适应性研究	6
6.1 电除尘效率的基本公式及表观驱进速度 ω_k	6
6.2 电除尘器对煤种的除尘性能评价	7
6.3 电除尘器的适应性研究	7
6.3.1 国内煤、飞灰样 ω_k 统计分析	7
6.3.2 电除尘器实测结果分析	9
6.3.3 电除尘器的适应性分析	11
7 选型设计	11
8 选型设计修正	12
9 技术经济性分析	12
10 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术	13
11 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见	13
12 与现行有关法律、法规和标准、规范的关系	13
13 对本指导书进行向有关部门推荐并执行的建议	13

《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》编制说明

1 任务来源

近年来，我国电除尘技术有了进一步的发展，但与国际先进水平还存在一定的差距，特别是在电除尘器的选型和设计方面，由于历史原因，造成我国电除尘器普遍存在电场数量偏少，比集尘面积偏低的现实，使部分电除尘设备不能达标，对此，中国环境保护产业协会电除尘委员会于2009年3月27日在厦门市召开了四届六次常委会会议，在《电除尘委员会四届六次常委会会议纪要》((2009)中环协电字文第02号)中下达了制订电除尘器选型设计指导资料的任务，会议委托浙江大学收集整理国外电除尘器相关资料，浙江菲达环保科技股份有限公司收集整理国内电除尘器相关资料，编制适合我国具体国情和特点的燃煤电厂电除尘器选型设计指导材料。

2 编制单位、起草人及评审专家

本指导书由中国环境保护产业协会电除尘委员会组织编制，并委托浙江菲达环保科技股份有限公司负责编写。

本指导书主要起草人及评审专家：郭建国、刘卫平、闫克平、黎在时、王励前、张德轩、石培根、林国鑫、张滨渭、梁可新、蒋亚彬、陈宇渊、蒋庆龙、林尤文、赵信志、解标、瞿鸿平、李宁。

3 编制过程

接受任务后，浙江菲达环保科技股份有限公司成立了《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》编制组。对浙江大学闫克平教授提供的欧洲暖通空调协会联盟(Rehva)/CostG3组织工业通风系统和设备指导书——《电除尘器——工业应用》(英文版)进行了翻译，并对其进行了深入的研究，在总结研究国内外大量相关文献资料的基础上，结合编制单位30余年的电除尘器选型、设计等经验，初步确定了本指导书的编制思路，在2009年6月于杭州召开的全国环保机械分标委标准审查会期间，本指导书主要编写人邀请了黎在时、王励前、张德轩、刘卫平等专家对本指导书的编制思路作了研讨，专家们也提出了建设性意见。指导书编制组对中国煤种成分及其对电除尘器性能的影响进行了系统、深入的研究，对国内投运电除尘器性能进行了分析总结，研究了电除尘器对国内煤种的适应性，进行了电除尘器的技术经济性分析，在以上研究基础上，提出了电除尘器选型设计的主要流程，确定了燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见，而后在编制单位内部组织召开了多次专家研讨会，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》(讨论稿)。

2009年9月25~26日，《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》(讨论稿)评审会在浙江

菲达环保科技股份有限公司召开，浙江菲达集团董事局主席、电委会主任委员舒英钢、菲达环保首席顾问、全国环保机械分标委会主任委员石培根、电委会秘书长刘卫平及黎在时、王励前、张德轩等业内 18 位知名专家出席会议并对讨论稿进行了评审，专家提出评审意见共计 25 条。编制组根据其修改意见进行修改并再次与个别专家进行单独沟通后形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿）。

2009 年 10 月 15~29 日，中国环境保护产业协会电除尘委员会组织业内 18 位知名专家对《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿）进行了函审，收到函审意见共计 50 条。编制组根据函审意见对其进行了修改，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审二稿）。编制组根据相关资料对送审二稿进行了完善性修改，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿 C 版）。2010 年 3 月 9~19 日，中国环境保护产业协会电除尘委员会再次组织业内多位知名专家对《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿 C 版）进行了函审，收到函审意见共计 80 条。编制组根据函审意见对其进行了修改，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿 D 版）。2010 年 3 月 24~30 日，中国环境保护产业协会电除尘委员会又一次组织业内多位知名专家对《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（送审稿 D 版）进行了函审，收到函审意见 8 条。编制组根据函审意见对其进行了修改，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（报批稿）。2010 年 4 月 14 日，《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》（报批稿）经中国环境保护产业协会电除尘委员会五届一次常委会审定并获一致通过，形成《燃煤电厂电除尘器选型设计指导书》。

4 选型设计条件和要求

本指导书中 4 选型设计条件和要求，参考了 1995 年 3 月发布的《火力发电厂电除尘器规范书》（DG/CC-95-40），增加了“电场数量”和“比集尘面积”等重要内容。其目的是为了保证选型设计时资料的完整性。

5 选型设计条件和要求分析

本指导书中 5 选型设计条件和要求的分析，对选型设计条件的分析主要为煤、飞灰成分对电除尘器的性能影响分析，对选型设计要求的分析主要是性能要求分析。本章对国内煤、飞灰主要成分及其分布以及煤、飞灰主要成分对电除尘器性能的影响作了具体的分析研究，其目的是为了了解煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响，为研究电除尘器对煤种的适应性奠定基础。

5.1 煤、飞灰样主要成分及其分布

编者对 2006 年~2008 年国内招标的 138 套电除尘器所使用的 122 种煤种（含 9 种混煤）的煤、飞灰样主要成分进行了分析研究。

1) 煤样中 S_{ar} 含量

国内 122 种煤样中 S_{ar} 含量的分布如图 1 所示。从图中可以看出煤中 S_{ar} 含量变化范围为 0.11%~5.13%，其平均值为 0.87%。 S_{ar} 含量 <0.5% 的煤种占总煤种数量的 35.25%， S_{ar} 含量 ≥1.5% 的煤种占总煤种数量的 13.11%， S_{ar} 含量在 0.5%~1.5% 间的煤种占 51.64%。

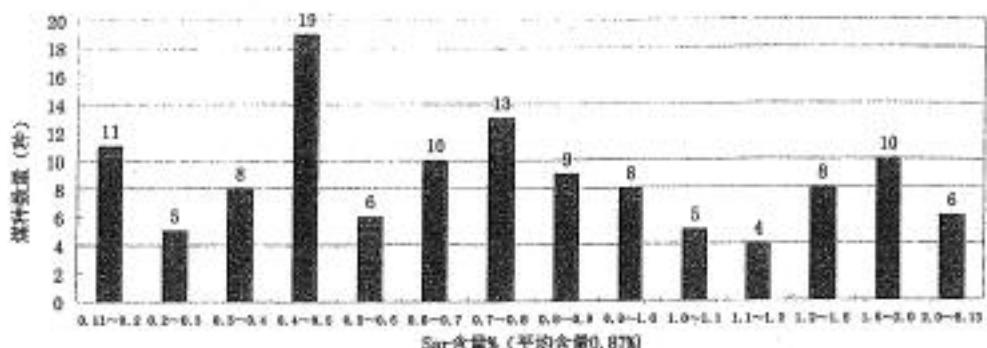
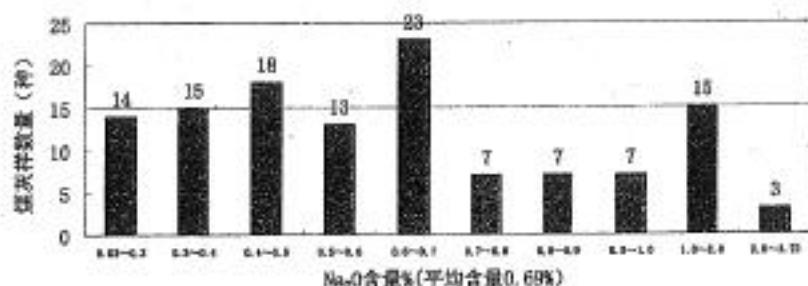


图 1 国内 122 种煤样中 Sr 含量分布图

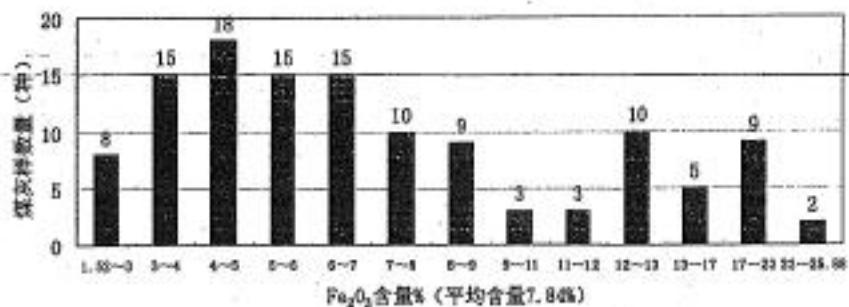
2) 飞灰样中 Na₂O 含量

国内 122 种飞灰样中 Na₂O 含量的分布如图 2 所示。从图中可以看出飞灰样中 Na₂O 含量变化范围为 0.02%~3.72%，其平均值为 0.69%。含 Na₂O 量 <0.5% 的飞灰样占总飞灰样数量的 38.52%，含 Na₂O 量 ≥1% 的飞灰样占总飞灰样数量的 14.75%，含 Na₂O 量在 0.5%~1% 间的飞灰样占 46.73%。

图 2 国内 122 种飞灰样中 Na₂O 含量分布图

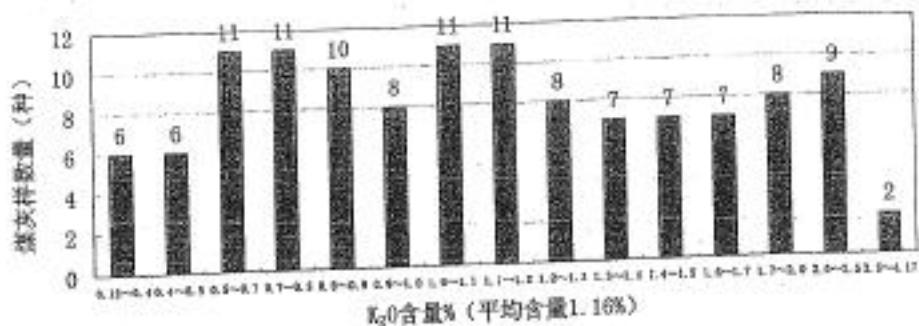
3) 飞灰样中 Fe₂O₃ 含量

国内 122 种飞灰样中 Fe₂O₃ 含量的分布如图 3 所示。从图中可以看出飞灰样中 Fe₂O₃ 含量变化范围为 1.52%~25.88%，其平均值为 7.84%。含 Fe₂O₃ 量 <4% 的飞灰样占总飞灰样数量的 18.52%，含 Fe₂O₃ 量 ≥11% 的飞灰样占总飞灰样数量的 23.77%，含 Fe₂O₃ 量在 4%~11% 间的飞灰样占 57.71%。

图 3 国内 122 种飞灰样中 Fe₂O₃ 含量分布图

4) 飞灰样中 K₂O 含量

国内 122 种飞灰样中 K₂O 含量的分布如图 4 所示。从图中可以看出飞灰样中 K₂O 含量变化范围为 0.12%~4.17%，其平均值为 1.16%。

图4 国内122种飞灰样中K₂O含量分布图

5) 飞灰样中MgO含量

国内122种飞灰样中MgO含量的分布如图5所示。从图中可以看出飞灰样中MgO含量变化范围为0.17%~6.37%，其平均值为1.35%。

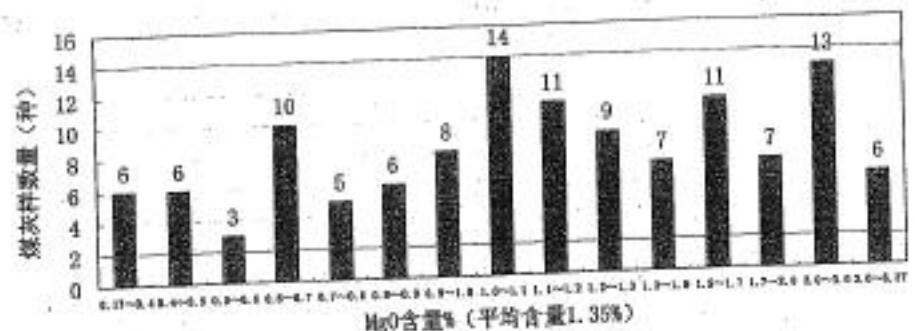
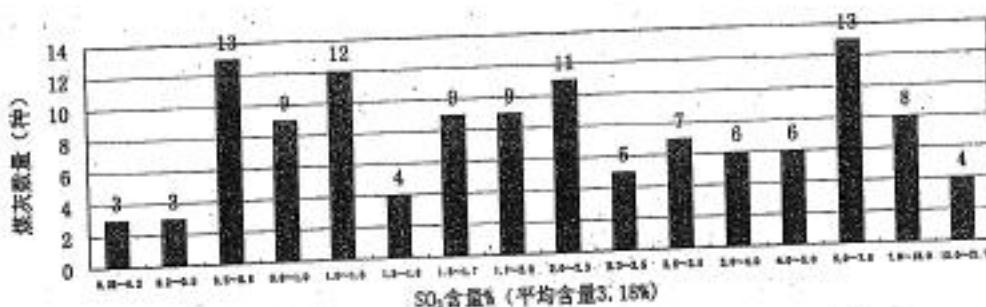


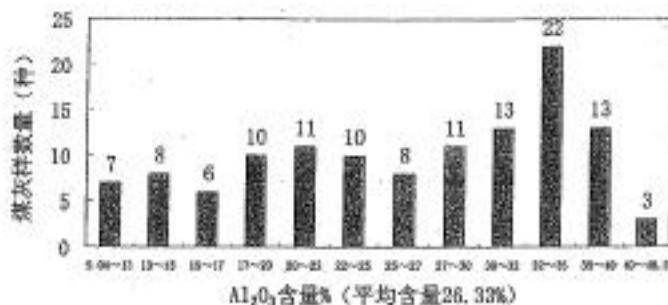
图5 国内122种飞灰样中MgO含量分布图

6) 飞灰样中SO₃含量

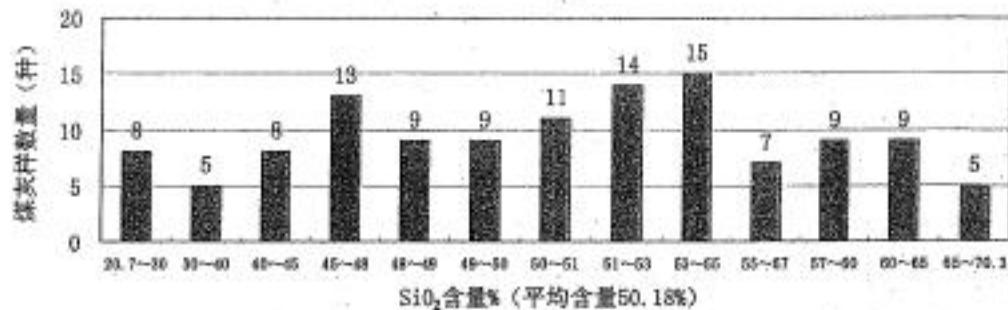
国内122种飞灰样中SO₃含量的分布如图6所示。从图中可以看出飞灰样中SO₃含量变化范围为0.02%~21.7%，其平均值为3.18%。

图6 国内122种飞灰样中SO₃含量分布图7) 飞灰样中Al₂O₃含量

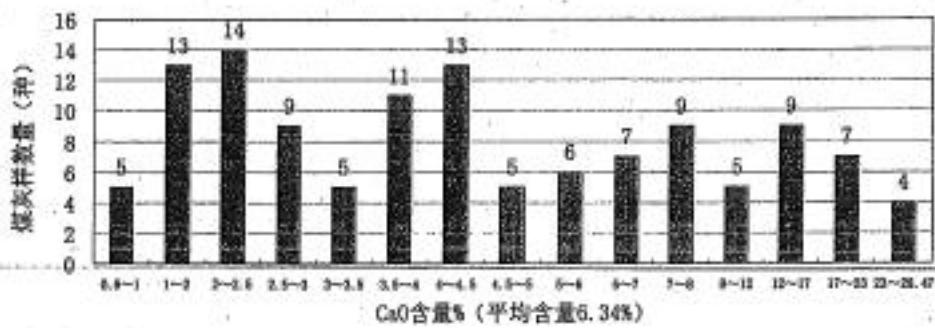
国内122种飞灰样中Al₂O₃含量的分布如图7所示。从图中可以看出飞灰样中Al₂O₃含量变化范围为9.04%~46.5%，其平均值为26.33%。

图 7 国内 122 种飞灰样中 Al_2O_3 含量分布图8) 飞灰样中 SiO_2 含量

国内 122 种飞灰样中 SiO_2 含量的分布如图 8 所示。从图中可以看出飞灰样中 SiO_2 含量变化范围为 20.7%~70.3%，其平均值为 50.18%。

图 8 国内 122 种飞灰样中 SiO_2 含量分布图9) 飞灰样中 CaO 含量

国内 122 种飞灰样中 CaO 含量的分布如图 9 所示。从图中可以看出飞灰样中 CaO 含量变化范围为 0.6%~28.47%，其平均值为 6.34%。

图 9 国内 122 种飞灰样中 CaO 含量分布图

综合以上分析，将影响电除尘器性能的煤、飞灰主要成分含量的分布汇总于表 1 中。

表1 国内煤、飞灰样主要成分分布

成分	含量变化范围	含量平均值
S _w	0.11%~5.13%	0.87%
Na ₂ O	0.02%~3.72%	0.69%
Fe ₂ O ₃	1.52%~25.88%	7.84%
K ₂ O	0.12%~4.17%	1.16%
MgO	0.17%~6.37%	1.35%
SO ₃	0.02%~21.7%	3.18%
Al ₂ O ₃	9.04%~46.5%	26.33%
SiO ₂	20.7%~70.3%	50.18%
CaO	0.6%~28.47%	6.34%

注：以上数据为122种煤种的统计值，但国内煤种数量超过200种，因此以上各成分的含量变化范围及平均值将有所变化。如有专家提供的数据表明：

- 1) S_w含量的变化范围为：0.11%~9%；
- 2) Al₂O₃含量的变化范围为：2.24%~52.6%；
- 3) CaO含量的变化范围为：0.6%~50%。

5.2 煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析

煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响最大，指导书中对影响电除尘器性能的煤、飞灰主要成分逐一进行了分析。

6 电除尘器适应性研究

本指导书中6 电除尘器适应性研究，在第5章基础上进行了电除尘器对国内煤种的适应性评价研究，对国内煤、飞灰样 ω_k 值以及电除尘器实测结果进行了统计分析，在此基础上，结合工程经验，研究了电除尘器的适应性，其目的是为了了解电除尘器对国内煤种的适应性情况，为电除尘器的正确选型设计提供理论依据。

6.1 电除尘效率的基本公式及表观驱进速度 ω_k

$$\eta = 1 - e^{-\omega_k A / Q} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中： η —除尘效率（%）， Q —烟气流量（m³/s）， A —总集尘面积（m²）， ω —驱进速度（m/s）。

这个公式被称为Deutsch公式，它一直是电除尘器设计公式，至今仍在应用。但它的缺点是其假设颗粒尺寸为一常数，粉尘和气流在极间距空间里面的混合是完全均匀的，并且粉尘一旦被收尘极板捕集就不再返回到电场空间，而这些假设在实际工程中是不可能存在的。

1964年，瑞典专家S·麦兹（Sigvard Matts）对Deutsch公式进行了修正，使用了表观驱进速度 ω_k 概念。

$$\eta = 1 - e^{-(\omega_k \cdot A / Q)^k} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中， k 为常数，选择不同的 k 值， $\omega_k = f(\eta)$ 曲线有不同的形态。当 $k=1$ 时， ω_k 变

成了 ω_k ，即为我们一般熟知的 Deutsch 公式，来自许多装置的数据表明， $k=0.5$ 时， $\omega_k = f(\eta)$ 接近于常数，即此时 ω_k 趋向不再随前后电场粉尘粒径的变化而改变，也不再随所要求除尘效率的高低而变化。此时，可以将 ω_k 十分简单地看成是一个“收尘难易参数”（Precipitation Parameter），由于 ω_k 克服了众多应用中的粒径分布问题而使其使用更加方便。经验表明，相对于原始 Deutsch 公式中的驱进速度，常数值的 ω_k 出现在更广的除尘效率范围。最新的研究也表明 ω_k 不仅同煤、飞灰成分煤、飞灰成分有关，而且在很大程度上也依赖于电除尘器电源技术。

6.2 电除尘器对煤种的除尘性能评价

如上所述，煤、飞灰成分直接影响着电除尘器的除尘性能，且其对电除尘器除尘性能的影响是煤、飞灰成分、电气控制综合作用的结果。因此，如直接用煤、飞灰成分分析其对电除尘器性能的影响，则只能作定性的分析。

一般地，煤、飞灰成分直接影响着 ω_k 值， ω_k 值的大小可评价电除尘器对粉尘的收尘难易程度，如表 2 所示。 ω_k 值越大，电除尘器对粉尘的收集越容易。

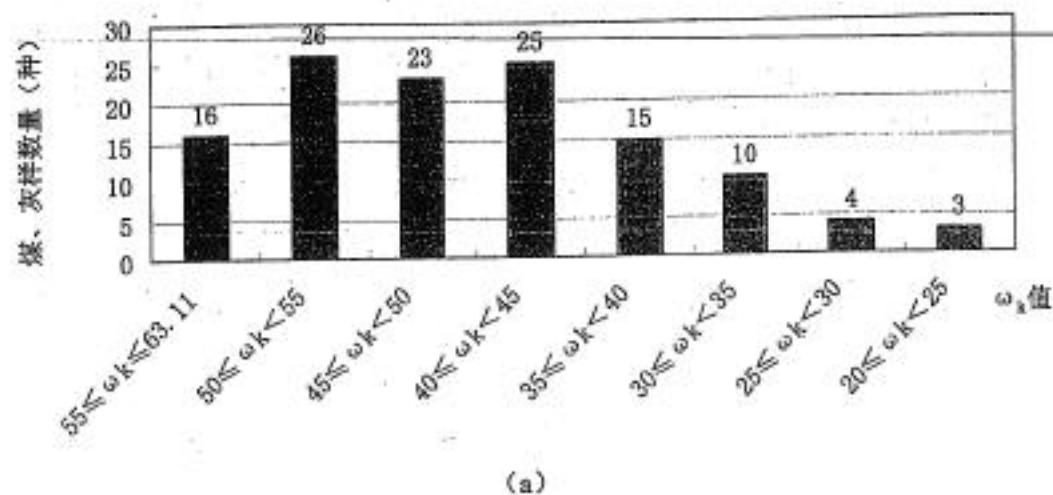
表 2 电除尘器对煤种的除尘难易性评价

ω_k 值	$\omega_k < 25$	$25 \leq \omega_k < 35$	$35 \leq \omega_k < 45$	$45 \leq \omega_k < 55$	$\omega_k \geq 55$
除尘难易性	难	较难	一般	较容易	容易

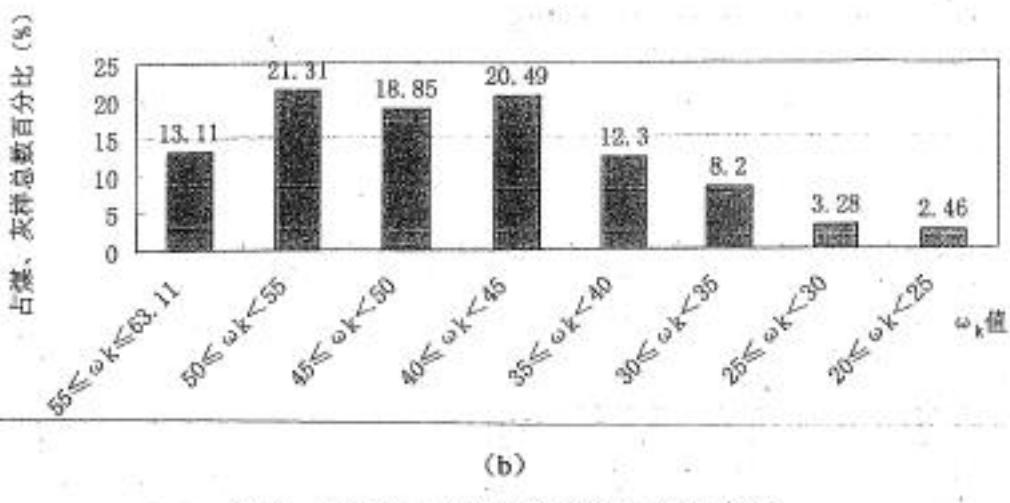
6.3 电除尘器的适应性研究

6.3.1 国内煤、飞灰样 ω_k 统计分析

对上述国内 122 种煤、飞灰样本的 ω_k 值进行计算，其所对应的 ω_k 分布如图 10 所示。从图中可知， ω_k 的变化范围为 20~63.11，其平均值为 45.26。 $\omega_k < 25$ 的除尘“难”的煤种有 3 种，占总煤种数量的 2.46%； $25 \leq \omega_k < 35$ 的除尘“较难”的煤种有 14 种，占总煤种数量的 11.48%； $35 \leq \omega_k < 45$ 的除尘“一般”的煤种有 40 种，占总数的 32.79%； $45 \leq \omega_k < 55$ 的除尘“较容易”的煤种有 49 种，占总数的 40.16%； $\omega_k \geq 55$ 的除尘“容易”的煤种有 16 种，占总数的 13.11%。



(a)



(b)

图 10 国内煤、飞灰样所对应的 ω_k 值分布图

在此基础上, 对 ω_k 值所对应的 2006-2008 年国内 138 个电除尘器投标项目分布进行统计, ω_k 值所对应的电除尘器项目分布图如图 11, ω_k 值所对应的煤种及项目统计结果如表 3。

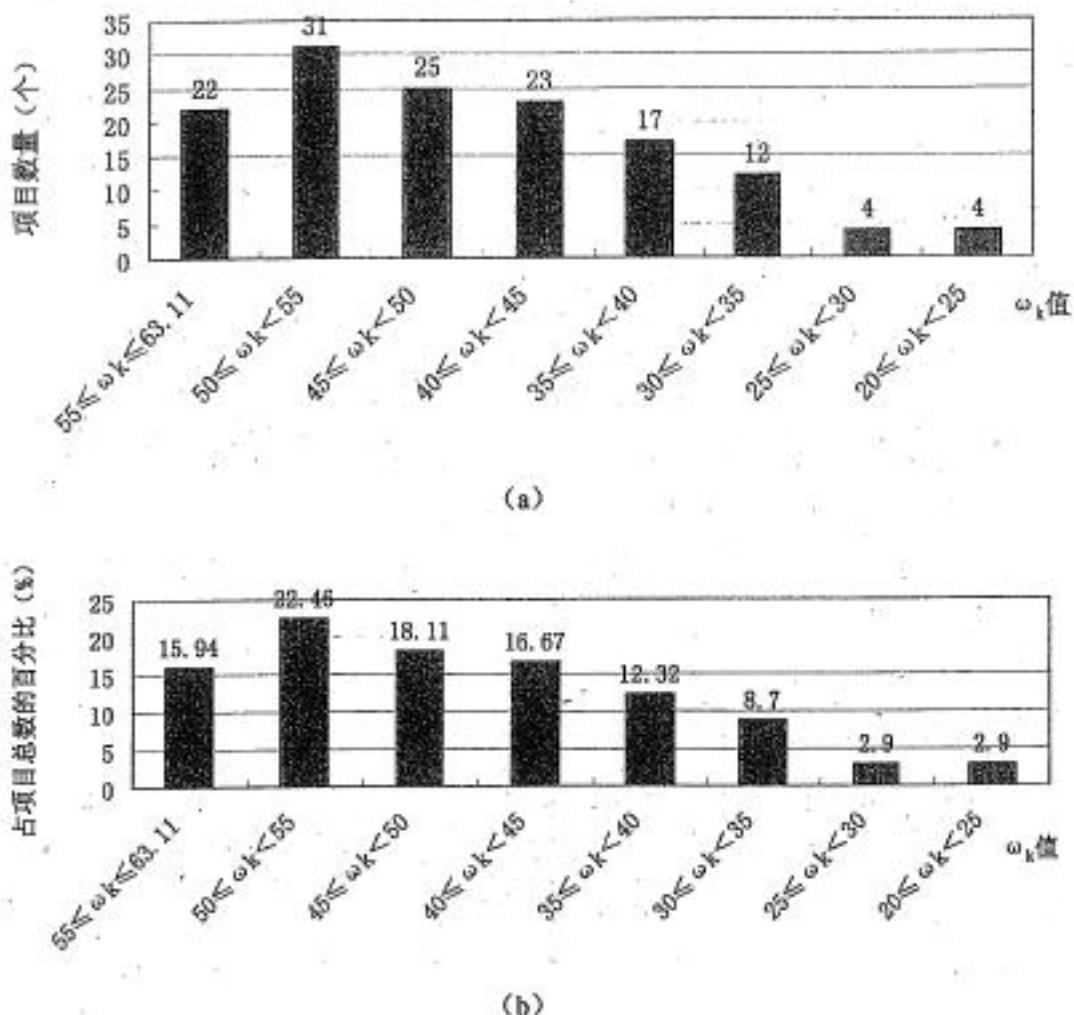
图 11 ω_k 值所对应的电除尘器项目分布图

表 3 ω_k 值所对应的煤种及项目统计结果

ω_k 值	$\omega_k < 25$	$25 \leq \omega_k < 35$	$35 \leq \omega_k < 45$	$45 \leq \omega_k < 55$	$\omega_k \geq 55$
除尘难易性	难	较难	一般	较容易	容易
占煤种总数百分比 (%)	2.46%	11.48%	32.79%	40.16%	13.11%
占项目总数百分比 (%)	2.90%	11.60%	28.99%	40.57%	15.94%

6.3.2 电除尘器实测结果分析

对 2004 年至今所测试的国内 100 套 300MW 以上机组配套电除尘器结果进行了统计，结果如下：

1) ESP 机组大小统计：

1000MW 机组有：9 套；

600 MW 机组有：55 套。

2) 除尘效率统计：

实测除尘效率达到设计保证效率的电除尘器有：96 套，占总数的 96%；

未达到设计保证除尘效率的电除尘器有：4 套，占总数的 4%。

3) 出口粉尘浓度情况统计：

a) 实测出口粉尘浓度 $< 30 \text{ mg/Nm}^3$ 的电除尘器有：18 套，占总数的 18%；

其电场数为 4~5 个（4 电场：17 套，5 电场：1 套）；

实际 SCA 为： $73.77 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 104.53 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

其中： $\geq 100 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 2 套，占 11.11%；

$> 90 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 100 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 3 套，占 16.67%；

$> 80 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 90 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 11 套，占 61.11%；

$\leq 80 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 2 套，占 11.11%。

b) 实测出口粉尘浓度在 $30 \text{ mg/Nm}^3 \sim 50 \text{ mg/Nm}^3$ 之间的电除尘器有：42 套，占

总数的 42%；

其电场数为 3~5 个（3 电场：2 套，4 电场：32 套，5 电场：7 套）（不含 1 套未知电场的 ESP）；

实际 SCA 为（不含 1 套未知 SCA 的 ESP）： $60.62 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 109.76 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

其中： $\geq 100 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 5 套，占 12.2%；

$> 90 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 100 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 15 套，占 36.6%；

$> 80 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 90 \text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 7 套，占 17.1%；

$\leq 80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 14 套，占 34.1%。

* 实测出口粉尘浓度 $\leq 50 \text{ mg/Nm}^3$ 的电除尘器有：60 套，占总数的 60%。其中 SCA 较小的，其燃用的煤种除尘性能较好。

c) 实测出口粉尘浓度在 $50 \text{ mg/Nm}^3 \sim 100 \text{ mg/Nm}^3$ 之间的电除尘器有：27 套，占总数的 27%；

其电场数为 4~5 个（4 电场：21 套，5 电场：6 套）；

实际 SCA 为： $61.53 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 109.38 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

其中： $\geq 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 2 套，占 7.4%，

$>90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 11 套，占 40.8%；

$>80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 6 套，占 22.2%；

$\leq 80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 8 套，占 29.6%；

d) 实测出口粉尘浓度 $>100 \text{ mg/Nm}^3$ 的电除尘器有：13 套，占总数 13%；

其电场数为 4~5 个（4 电场：11 套，5 电场：2 套）；

实际 SCA 为： $56.52 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 102.94 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

其中： $\geq 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 3 套，占 23.1%，

$>90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 4 套，占 30.7%；

$>80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 之间的有 3 套，占 23.1%；

$\leq 80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有 3 套，占 23.1%；

4) 电除尘器的电场数量（不含 1 套未知电场数的 ESP）：

5 电场的有：16 套，占总数的 16%；

4 电场的有：81 套，占总数的 81%；

3 电场的有：2 套，占总数的 2%。

5) 电除尘器的实测 SCA（不含 1 套未知 SCA 的 ESP）：

实际 SCA 为： $56.52 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 109.76 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ ；

实际 SCA $\geq 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有：12 套，占总数的 12%；

实际 SCA $>90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 100 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有：33 套，占总数的 33%；

实际 SCA $>80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s}) \sim 90 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有：27 套，占总数的 27%；

实际 SCA $\leq 80 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的有：27 套，占总数的 27%。

注：本次统计中，实际 SCA 为不停供电分区比集尘面积，并按实测烟气量计算，而实测烟气量一般小于设计烟气量。

由以上统计分析可得如下结论：

1) 实测除尘效率达到设计保证效率的电除尘器占总数的 96%；

2) 在电场数量基本上为 4 个、 $SCA < 110 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ 的情况下，出口粉尘浓度 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ 的电除尘器数占总数的 60%，其中 $\leq 30 \text{ mg/m}^3$ 的电除尘器数占总数的 18%。

说明对于中国多数的煤种，在适当增加电场数量和 SCA 的情况下，达到 50 mg/m^3 甚至 30 mg/m^3 的低排放是完全可以实现的。

6.3.3 电除尘器的适应性分析

综合上述煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响分析、国内煤、飞灰样 ω_k 值统计结果及电除尘器实测结果分析，结合工程实际经验，客观深入地研究了电除尘器的适应性，主要结论有：

1) 国内煤、飞灰成分及其 ω_k 的变化范围均很大，国内煤种复杂多变。针对不同的煤种必须采取与之相对应的电除尘器适应性分析及评价，从而为正确合理地设计高效电除尘器奠定基础；

2) 煤、飞灰成分中的 S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 及 SiO_2 对电除尘器性能影响很大，其中 S_{ar} 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 对除尘性能起着有利的影响， Al_2O_3 及 SiO_2 对除尘性能则起着不利的影响，煤、飞灰成分对电除尘器性能的影响是其综合作用的结果。

K_2O 、 SO_3 、 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 Li_2O 、 MnO_2 、 TiO_2 及飞灰可燃物对电除尘器性能的影响相对较小，其中 K_2O 、 SO_3 、 P_2O_5 、 Li_2O 、 TiO_2 对除尘性能起着有利的影响， CaO 、 MgO 对除尘性能则起着不利的影响。高 S_{ar} 煤时， S_{ar} 对电除尘器的性能起着主导的作用，而低 S_{ar} 煤时， S_{ar} 的影响相对减弱，而主要取决于飞灰中的碱性氧化物含量、烟气中水的含量及烟气温度等；

3) 综合煤、飞灰成分对电除尘器性能影响分析、国内煤、飞灰样 ω_k 值统计结果及电除尘器实测结果分析，认为在排放标准已提高的今天，电除尘器仍有着广泛的适应性。电除尘器的适应性分析如表 4、5。

表 4 50 mg/m^3 粉尘排放标准下电除尘器的适应性分析

除尘难易性	ω_k 值	占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%		适应性分析
			百分比/%	百分比/%	
容易	$\omega_k \geq 55$	15.94%	13.11%		
较容易	$45 \leq \omega_k < 55$	40.57%	40.16%		
一般	$40 \leq \omega_k < 45$	16.67%	20.49%	86.06%	推荐使用电除尘器
	$35 \leq \omega_k < 40$	12.32%	12.30%		
较难	$25 \leq \omega_k < 35$	11.60%	11.48%	11.48%	可以使用电除尘器
难	$\omega_k < 25$	2.90%	2.46%	2.46%	建议在进行全面、细致的技术经济性分析后决定

注：“占统计项目总数量百分比”、“占统计煤种总数量百分比”均为参考值。

表 5 30mg/m³ 粉尘排放标准下电除尘器的适应性分析

除尘难易性	ω_k 值	占统计项目总数量百分比/%	占统计煤种总数量百分比/%			适应性分析	
容易	$\omega_k \geq 55$	15.94%	13.11%	73.76%	86.06%	推荐使用电除尘器	
较容易	$45 \leq \omega_k < 55$	40.57%	40.16%				
一般	$40 \leq \omega_k < 45$	16.67%	20.49%			可以使用电除尘器 (采取增加电场数量、比集 全面积及使用配套实用技 术等方法)	
	$35 \leq \omega_k < 40$	12.32%	12.30%			暂不推荐使用电除尘器	
	$25 \leq \omega_k < 35$	11.60%	11.48%				
较难	$\omega_k < 25$	2.90%	2.46%	13.94%		暂不推荐使用电除尘器	
注：“占统计项目总数量百分比”、“占统计煤种总数量百分比”均为参考值。							

7 选型设计

本指导书中 7 选型设计，其目的是为电除尘器选型设计提供思路。

选型设计是供货商的商业秘密，各供货商均有其作为核心技术的具体方法和经验。因此本指导书不作具体的描述。

8 选型设计修正

本指导书中 8 选型设计修正，参考了欧洲暖通空调协会联盟（Rehva）/CostG3 组织工业通风系统和设备指导书——《电除尘器——工业应用》一书。其目的是为电除尘器选型设计修正提供思路，提高电除尘器设计命中率。

与选型设计一样，选型设计的修正也是供货商的商业秘密，各供货商也均有其作为核心技术的具体方法和经验。因此本指导书不作具体的描述。

9 技术经济性分析

本指导书中 9 技术经济性分析，对电除尘器与袋式除尘器、电袋复合除尘器（包括一体式和分体式）的技术特点、经济性（包括电耗费用、设备费用与年运行费用、总费用）、安全可靠性、占地面积进行了比较，最后进行了技术经济性综合比较（烟气量按 3,600,000m³/h 计。电除尘器为 5 个电场、SCA 约为 110m²/ (m³/s)；袋式除尘器的过滤速度为 1m/min；电袋除尘器中电除尘为 2 个电场，除尘效率 90%，其布袋除尘器的过滤速度为 1.2m/min）。其目的在于客观地选择综合经济性更好的除尘设备。

10 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术

本指导书中 10 推荐使用的与电除尘器配套的实用技术，其目的在于节能降耗，提高电除尘器除尘性能，扩大电除尘器对煤种的适应范围。推荐的实用技术有：

1) 先进的电控设备

- a) 先进的单相智能控制器
- b) 高频高压开关电源
- c) 恒流高压直流电源
- d) 三相电源
- e) 中频高压直流电源

2) 烟气调质

3) 烟道凝聚器

4) 移动电极电除尘器

5) 机电多复式双区电除尘技术

其中先进的电控设备、烟气调质、移动电极电除尘、机电多复式双区电除尘等技术在国内已经成熟，已有数家公司自主开发了此类技术，并在几个项目上试用，情况良好，正在作进一步改进和完善。烟道凝聚技术在国外已经成熟，国内几家公司也正在研发此项技术。

11 燃煤电厂电除尘器选型设计指导意见

本指导书 11 燃煤电厂电除尘器选型指导意见，对发达国家电除尘器应用情况进行了概括（其中燃煤电厂电除尘器使用率方面的数据来源于文献资料和向有关专家咨询的结果，均为估计值），结合国内燃煤电厂现状，认为在低排放下电除尘器仍有着广泛的适应性，并对燃煤电厂不同排放要求下的电除尘器选型设计提供了指导意见，其目的在于更好地为电除尘器供货商、建设单位及管理部门科学合理地选择电除尘器提供技术支持。

12 与现行有关法律、法规和标准、规范的关系

1) 本指导书中 4 选型设计条件和要求参考了《火力发电厂电除尘器规范书》(DG-CC-95-40)，增加了“电场数量”和“比集尘面积”等重要内容。

2) 与现行法律、法规和标准、规范没有冲突。

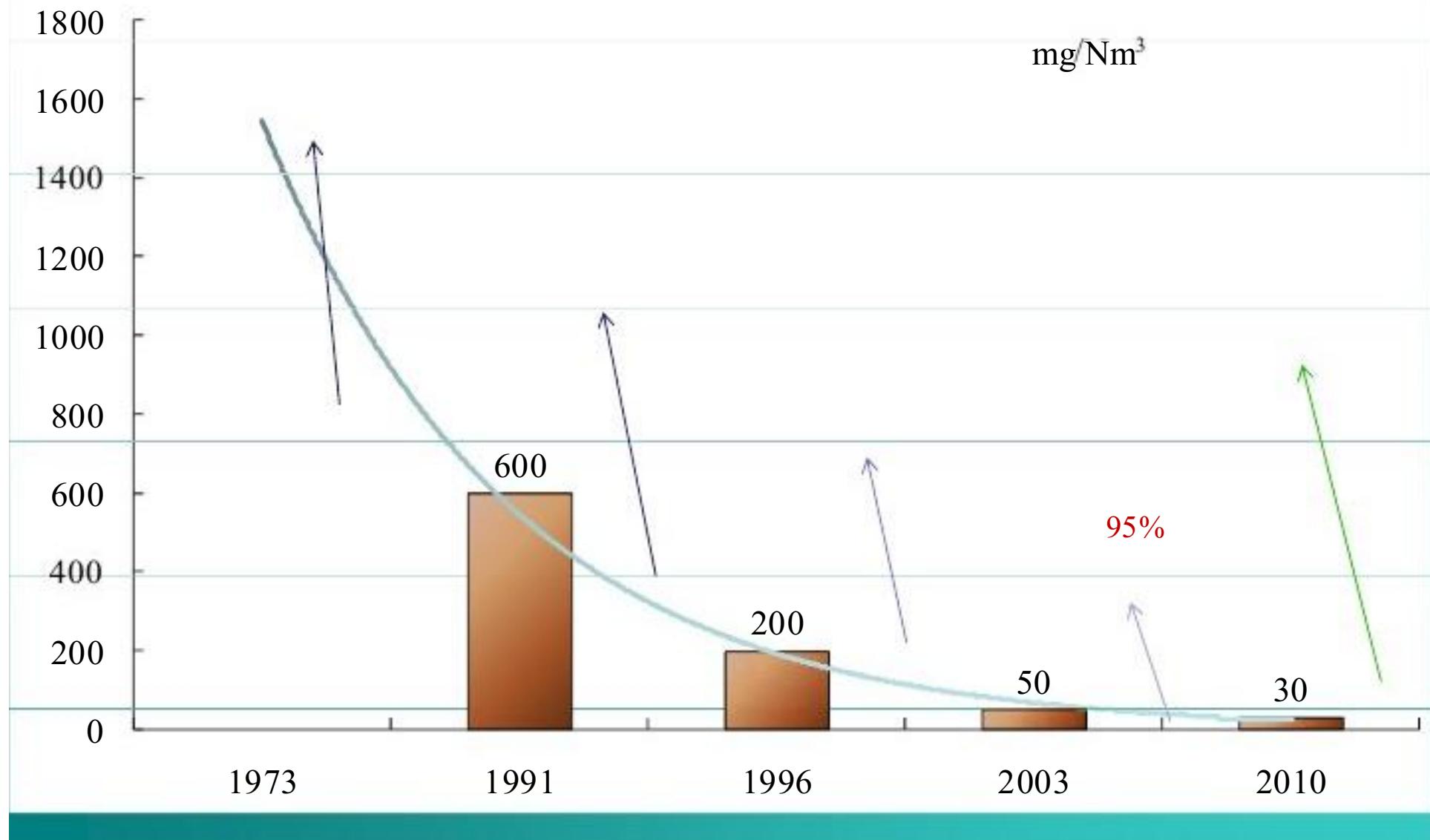
13 对本指导书进行向有关部门推荐并执行的建议

本指导书经中国环境保护产业协会电除尘委员会专家讨论确认并经常委会审查通过后，建议向中华人民共和国环境保护部、中国环境保护产业协会、中国电力企业联合会、中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司、中国电力投资集团公司及其它电力公司、国内各电力设计、规划院、电除尘器供货商、各相关研究机构、招标公司等相关部门、组织和企业推荐，并执行。



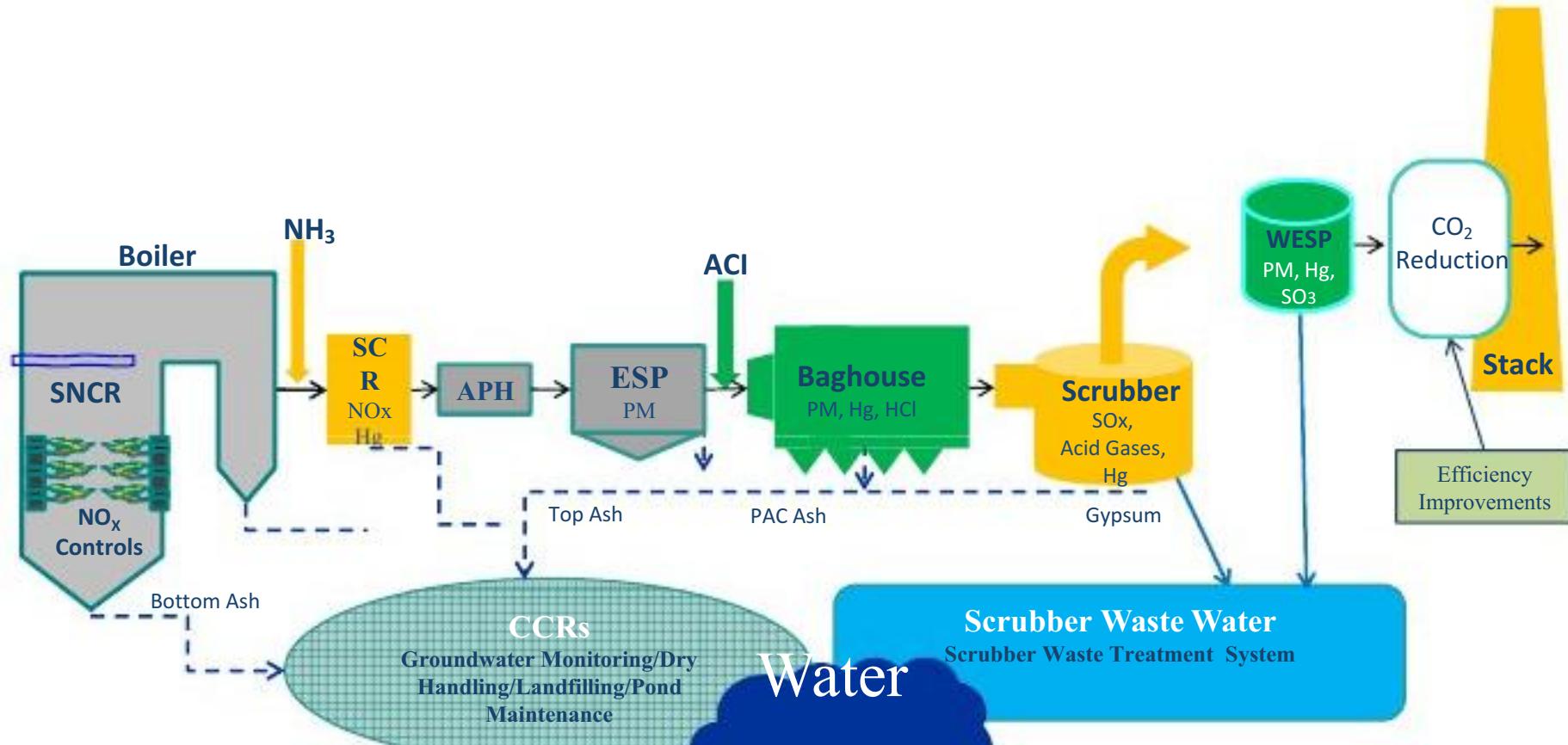
中国国电
CHINA GUODIAN







中国国电
CHINA GUODI



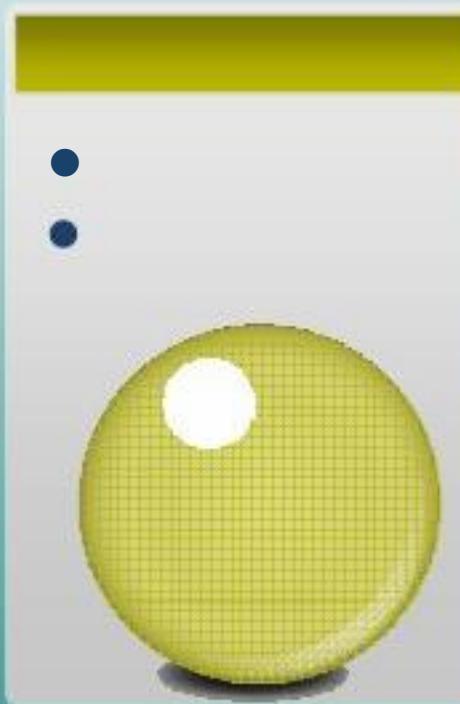
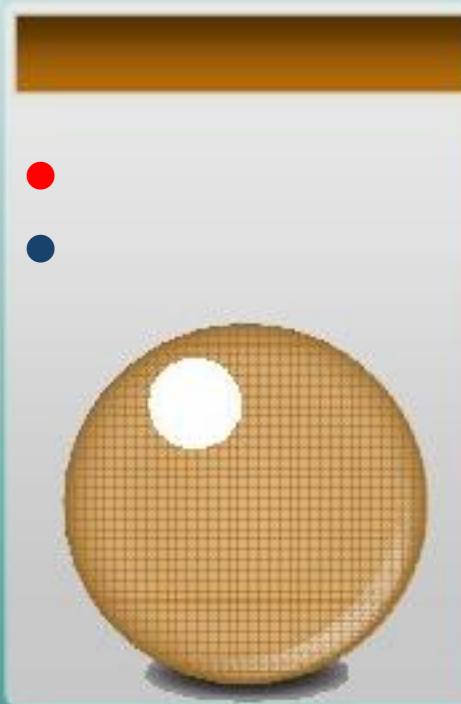
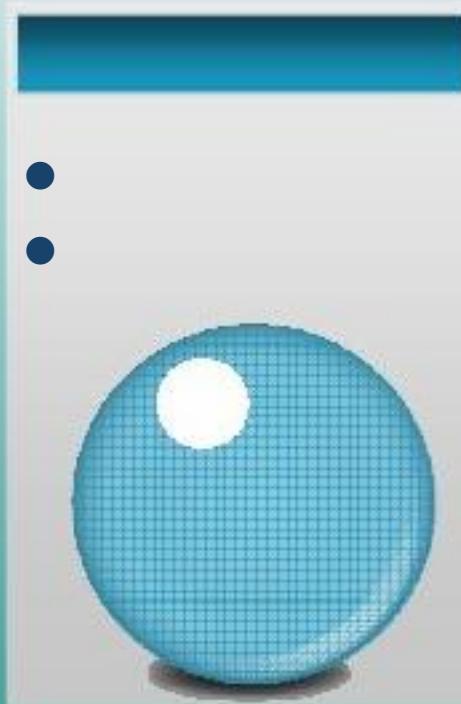
316 A

Cooling Tower
Blowdown

ESP 85%

ESP 85%

ESP 99%





~



中国国电
CHINA GUODIAN

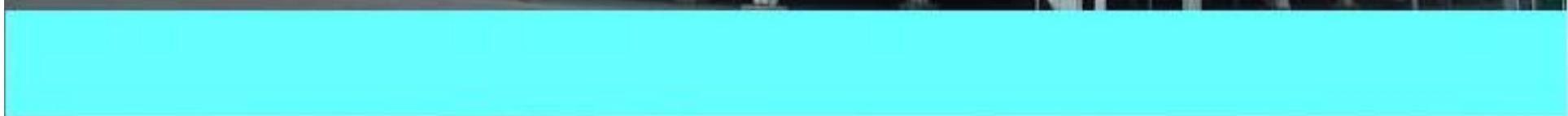
烟尘控制方案





中国国电
CHINA GUODIAN







2011 11 24





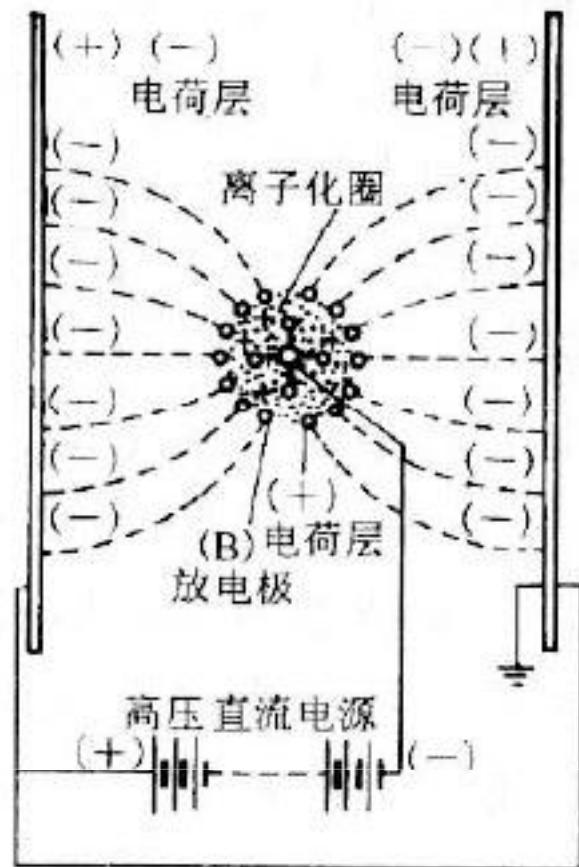


图 2-17 平板式集尘极的电场



中国国电
CHINA GUODIAN



1.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{vA}{Q}}$$

2.

SO₃

$$U = \frac{qE}{3\pi\mu d}$$

3.

目前火电厂静电除尘器运行中存在的主要问题



m³ h

98

50 m³ h

42



6%



中国国电
CHINA GUODIAN





中国国电
CHINA GUODIAN



10

20

50

125





中国国电
CHINA GUODI





中国国电
CHINA GUODI





中国国电
CHINA GUODI





中国国电
CHINA GUODIAN

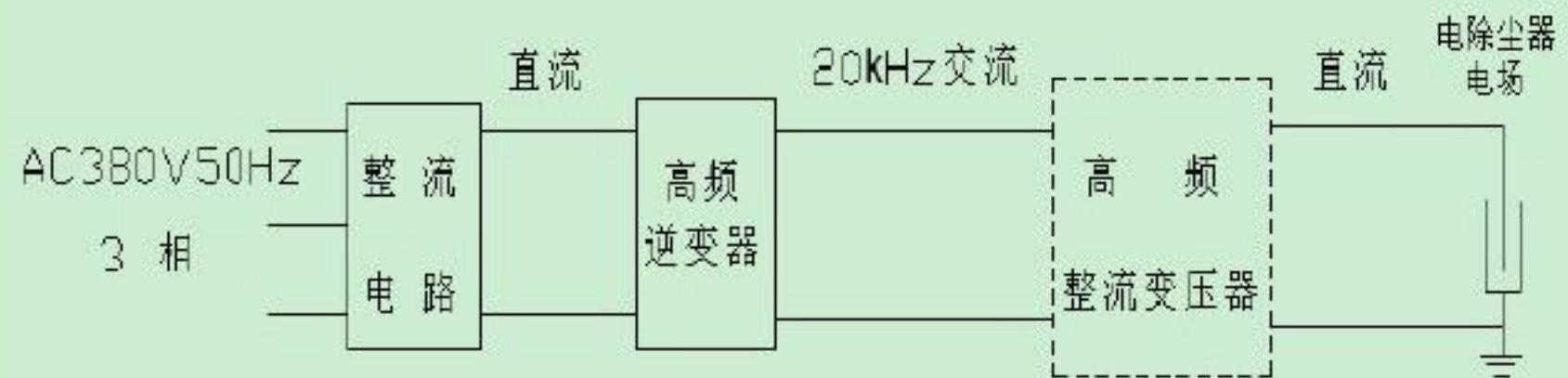
1

2

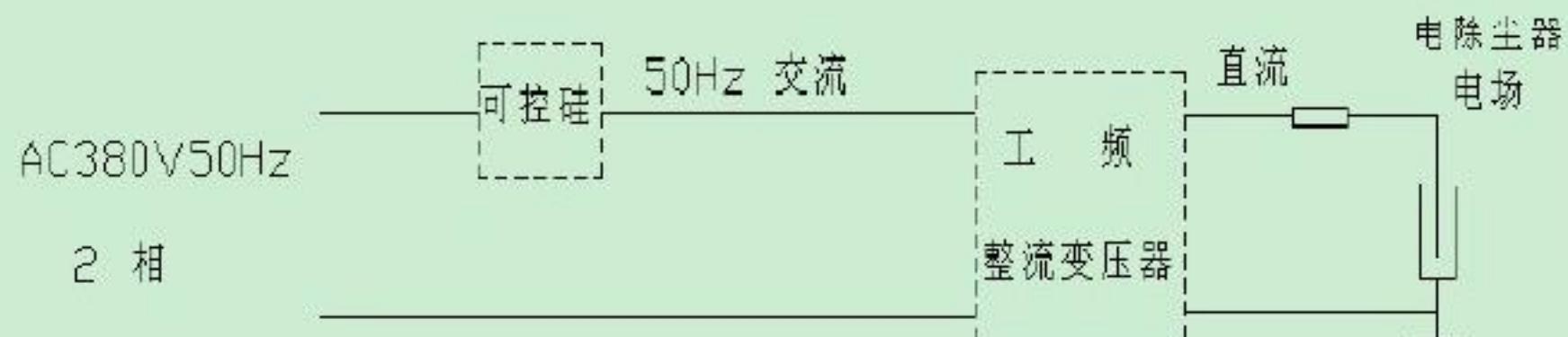
3

4

6



高频电源



工频电源

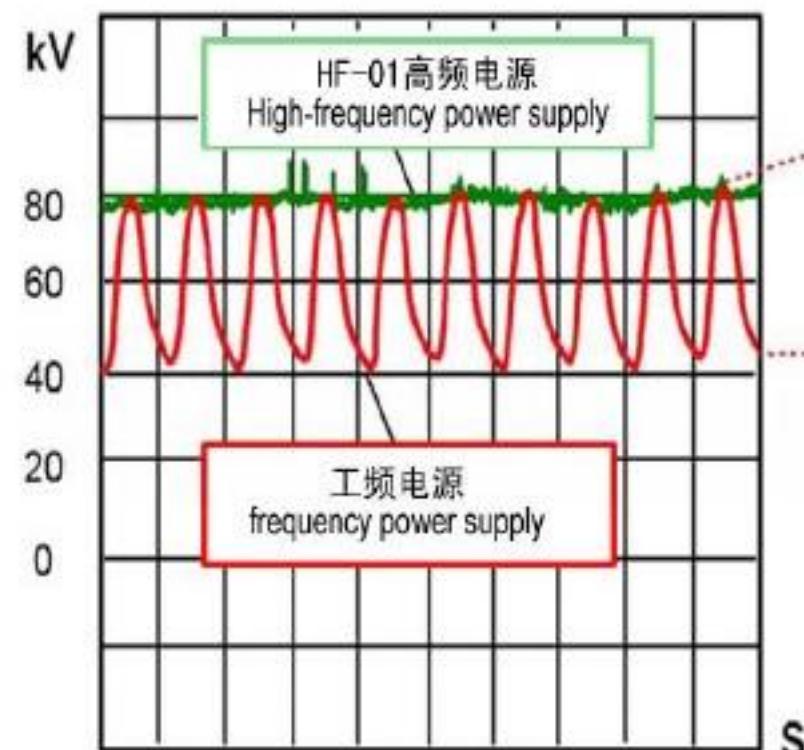
1

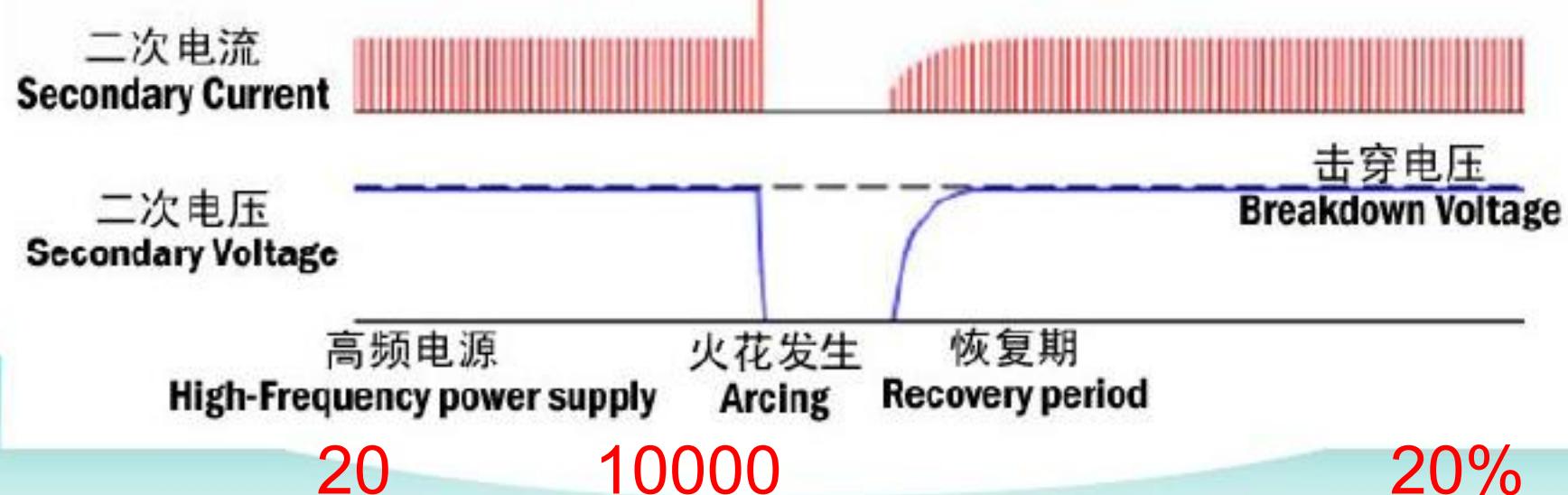
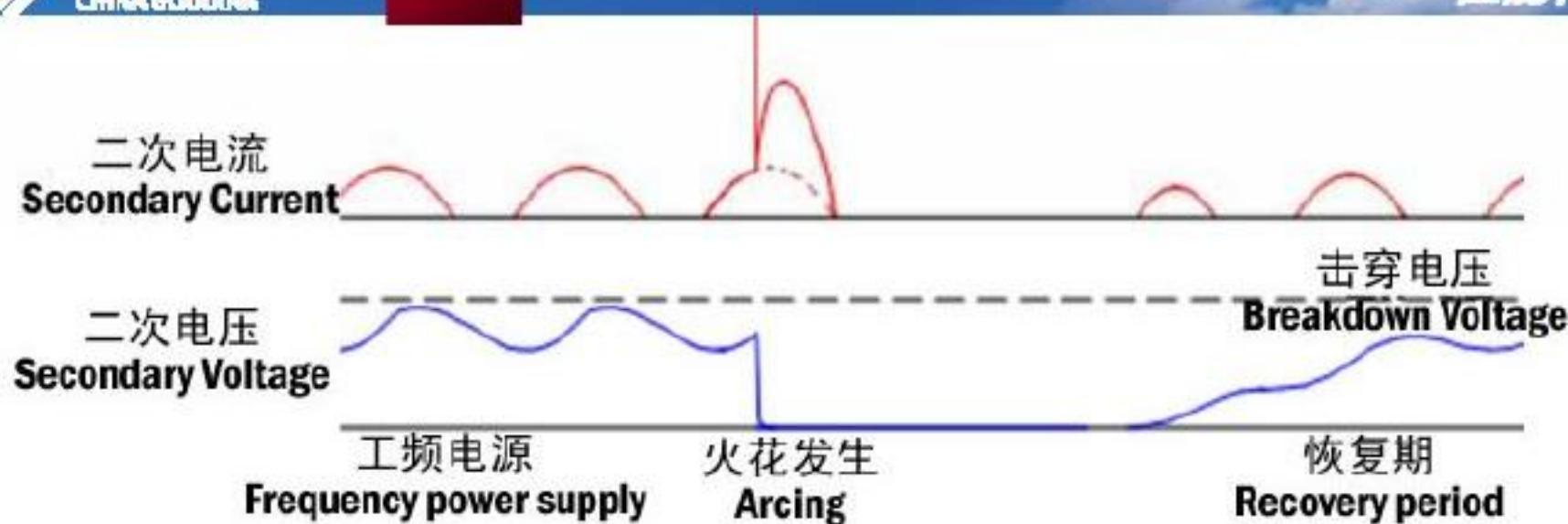
1

>30

130

200

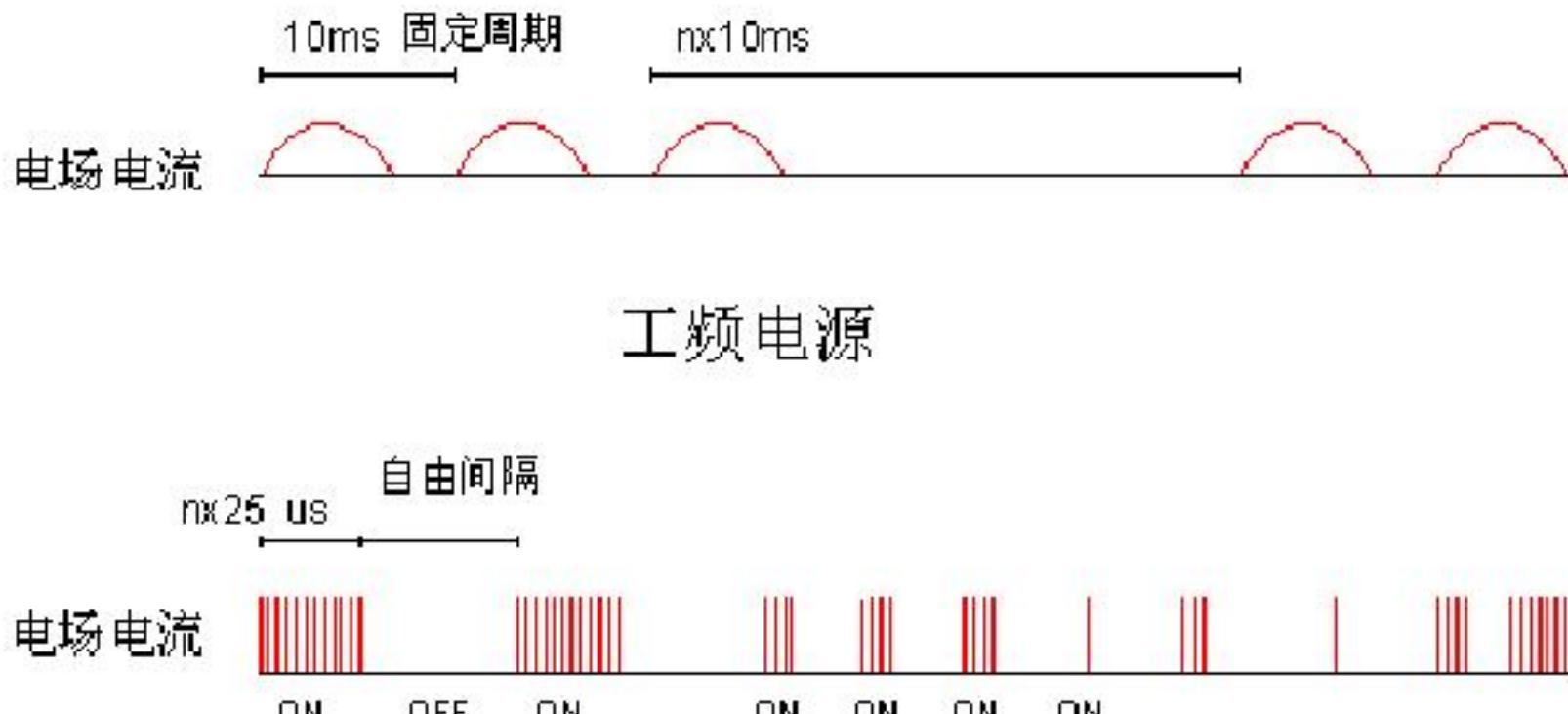






中国国电
CHINA GUODIAN

3



高频电源

高频电源与工频电源外型比较

高频电源：
一体化结构



重量： 600kg

工频电源：
控制柜和整流变压器



重量： >2000kg





中国国电
CHINA GUODIAN

30-70%

50-90%

典型工程应用

871kW 266kW
69.5%

35~50 mg/m³
10~23mg/m³
60%

上海外高桥第三发电有限责任公司电除尘器节能减排
优化改造项目暨社会专家意见

2010年4月25日，上海外高桥第三发电有限责任公司在上海主持召开“上海外高桥第三发电有限公司电除尘器节能减排优化改造”项目验收会，参加会议的有上海市政府信息化委员会、上海市环保局、中能控股有限公司、上海外高桥第三发电有限公司、国电环境保护研究院、华东电力试验研究所有限公司、南京国电环保设备有限公司的有关领导和代表共31人。会议邀请5位专家组成了验收委员会（专家名单附后）。与会专家在实地考察后，听取并审查了优化改造项目报告书、检测报告及用户报告。之后经与会专家充分讨论，形成专家验收意见如下：

1. 验收组听取完各方汇报，质询讨论，并现场随机抽验了在线监测数据，均符合验收要求。

2. 9号炉1100MW超超临界燃煤机组电除尘器运行高耗低电耗改造后，烟气排放测试结果表明，在满管工况下，布袋除尘器出口烟尘排放浓度由改造前的35~50mg/m³降低到10~23mg/m³，烟尘排放浓度下降55~60%，同时布袋除尘器的高压电晕极功率由改造前的871kW降低到266kW，节电69.5%。

3. 经改造优化后，设备运行稳定性好，电耗显著降低效果明显持续，节能效果显著，优于改造合同要求。验收委员会一致同意通过验收。

鉴于高压电晕极模块不处于国际领先地位，国内领先水平，且在1000MW机组上已成功地应用，节能减排效果显著，建议加大高压电晕产品的推广运用，创造更大的环境效益与经济效益。

验收委员会主任：仇峰波主任，林毅文
二〇一〇年四月二十五日



典型工程应用

#1 530kW 155kW

71%

#2 458kW 207kW

55%

#1 99.3mg/m³ 42.6mg/m³

57.1%

#2 99.3mg/m³ 41.0mg/m³

58.7%

用户报告

我厂2009年11月至2010年1月间对1#、2#机组(600MW)电除尘器进行改造，共安装了32套国电环保设备有限公司生产的HF-01型高频电源。并与安装改造完成后正式投入运行，该产品具有节能、高效、体积小、节约土建成本、电源用量少等优点。使用以来，该设备运行稳定可靠，安装方便，操作维护简单，除尘效率高，能耗低，同传统采用的工频电源相比，设备占地面积减少80%，设备总重量减少70%，动力电损投资减少50%。我们对两台机组(600MW)改造前后的除尘效率上进行了对比测试，与传统工频电源相比节电超过80%，节能效果显著。经南京电力设备质量性能检测中心检测表明：使用HF-01型电除尘高频电源后#1、#2除尘效率分别为99.72%、99.02%（出口排放浓度分别为42.0 mg/m³、41.0mg/m³）。#1、#2电除尘器除尘效率都高于原设计值99.70%，除尘效率提高显著。且#1炉除尘器出口烟尘折算排放浓度在脉冲模式下、#2炉除尘器出口烟尘折算排放浓度在手动连续模式下达到国家最高允许排放标准(GB13223-2003《火电厂大气污染物排放标准》第Ⅲ时段标准要求)。

现场近六个月的运行实践表明：HF-01型电除尘高频电源工作稳定，供电平衡、节能显著，是一种新型高效的电除尘供电装置。



典型工程应用

285.7kW 60kW
80.7%

63.9 mg/m³ 35.7 mg/m³
44.1%

用户报告

我厂 2008 年 10 月对 2# 机组 (320MW) 电除尘器进行改造，安装了 20 套国电环境保护研究院生产的 HF-01 型高频电源，于 2008 年 12 初正式投入运行。该产品具有节能、提效、体积小、节约土建成本、电缆用量少等优点。使用以来，该设备运行稳定可靠，安装方便，操作维护简单，除尘效率高，能耗低，同传统采用的工频电源相比，设备占地面积减少 80%，设备总重量减少 70%，动力电缆投资减少 50%。我们对两台机组 (320MW) 除尘器效率上进行了对比测试，其中 1#炉采用了传统工频电源节电模式，2#炉采用了 HF-01 型电除尘高频电源节电模式，经江苏省环境监测中心检测表明：使用 HF-01 型电除尘高频电源的 2#炉电除尘器比采用工频电源的 1# 炉电除尘器节电 80% 以上（2#炉电除尘高频电源供电功率 55.2kW，1#炉电除尘工频电源供电功率 285.7kW），节能效果显著，除尘效率为 99.99% (出口排放浓度 35.7 mg/m³)；高于原设计值 99.78%，与设计值相比其出口烟尘排放减少 45.45%，除尘效率提高显著。

现场三个月运行实践表明：HF-01 型电除尘高频电源工作稳定、供电平衡，节能显著，是一种新型高效的电除尘供电装置。



Aerosol particle size distribution			
Diameter (nm)		Concentration (mg/m ³)	
0.00	1.00	8.90	
1.00	2.00	32.70	15.40
2.00	3.00	41.10	55.70
3.00	4.00	30-50	10-23
4.00	5.00	39.30	22.90
5.00	6.00	47.90	26.40
6.00	7.00	29.78	29.58
7.00	8.00	34.00	0.67
8.00	9.00	63.90	35.70
9.00	10.00	36.80	44.13

					(mg/m ³)	(mg/m ³)	
					93.90	41.00	56.34
					111.79	41.40	62.97
					42.60		
					44.00		
					.	.	.
					73.04	46.48	36.36
					58.30	46.80	19.73
					94.84	47.42	50.00
					74.30	50.5	32.03
					.	.	.
					51.54		
					54.94		
					117.00	55.00	52.99

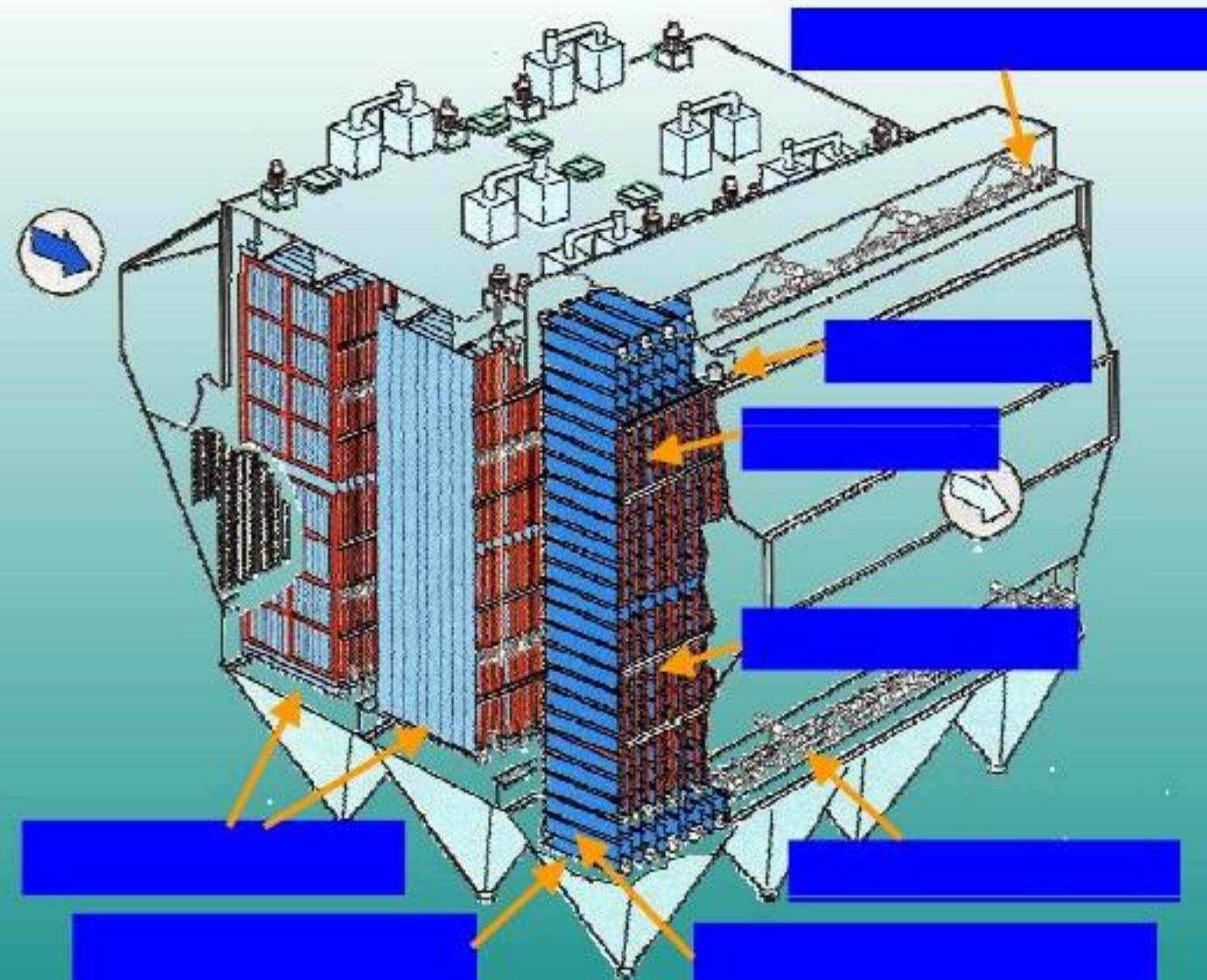


中国国电
CHINA GUODIAN



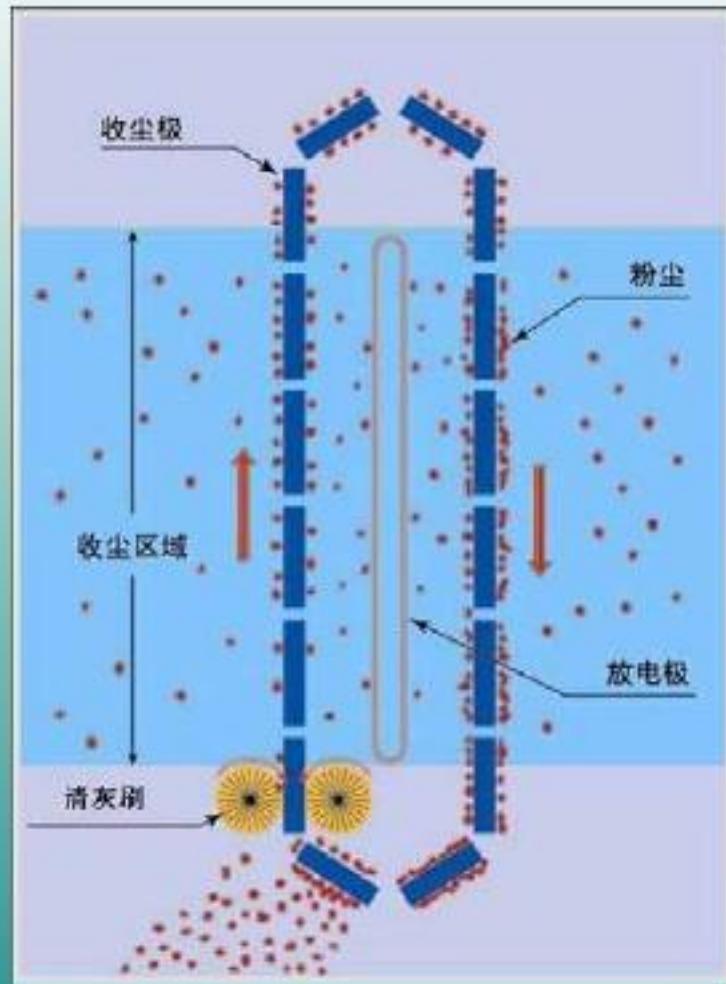


中国国电
CHINA GUODIAN





中国国电
CHINA GUODIAN





中国国电
CHINA GUODI





3湿式电除尘器





	m ³ /h	1690000
		50~60
		1
		2
	Pa	240
	m	13.1 13.1
	m	>4.5
	s	<2.5
	t	360

kWh 135

m³/h 0

30

2 220t/h

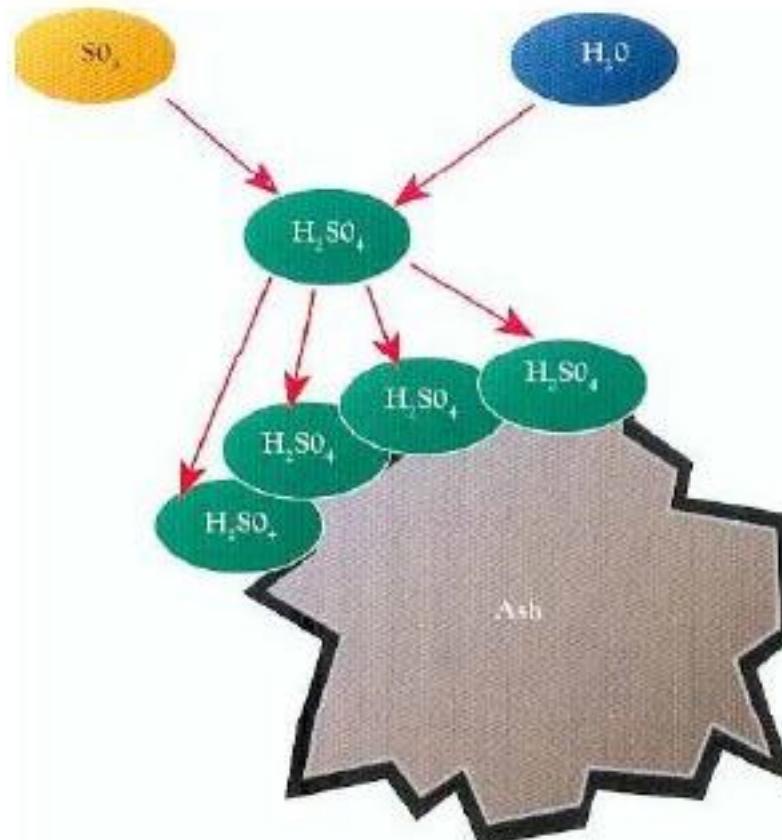




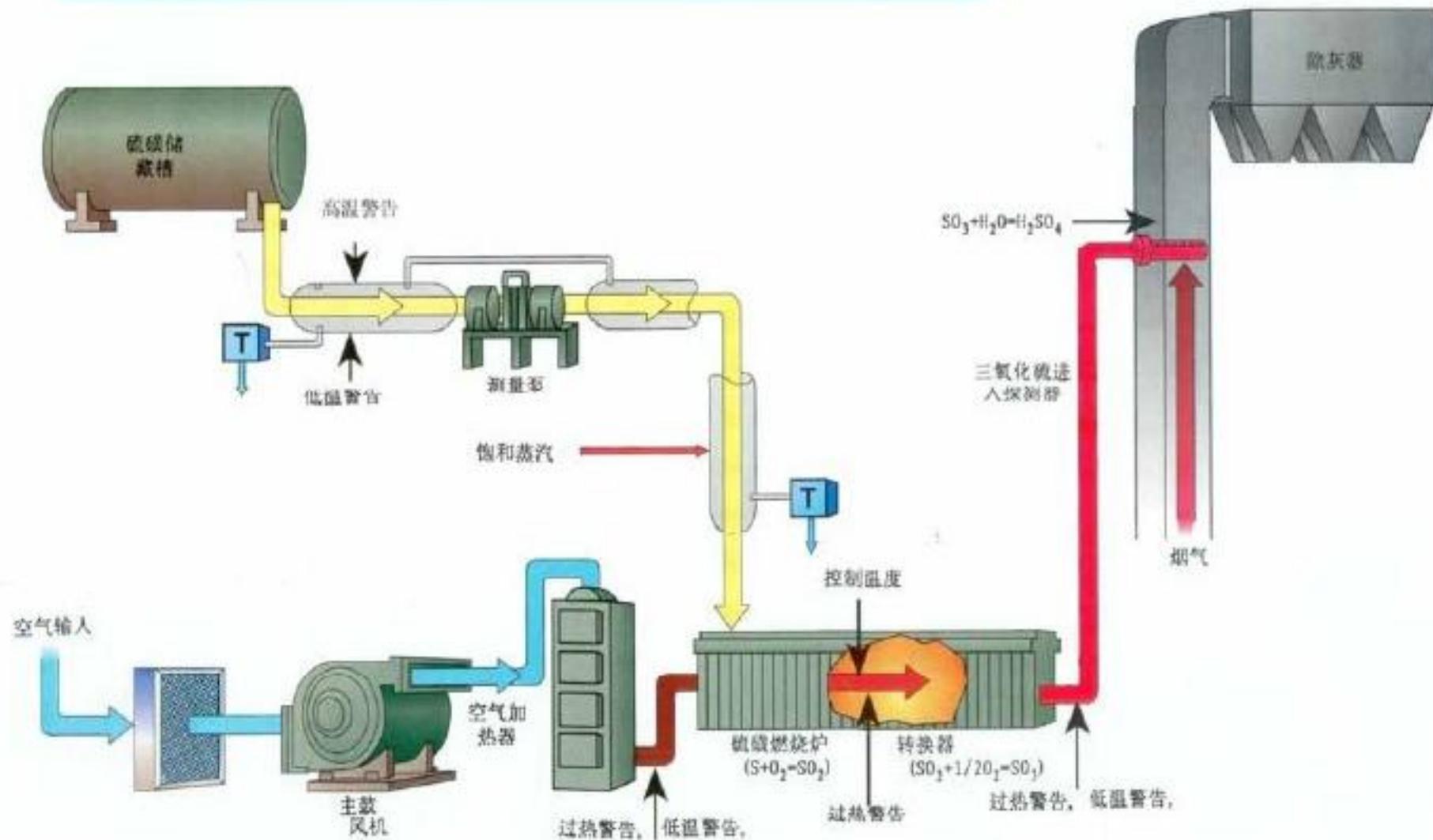
SO_3

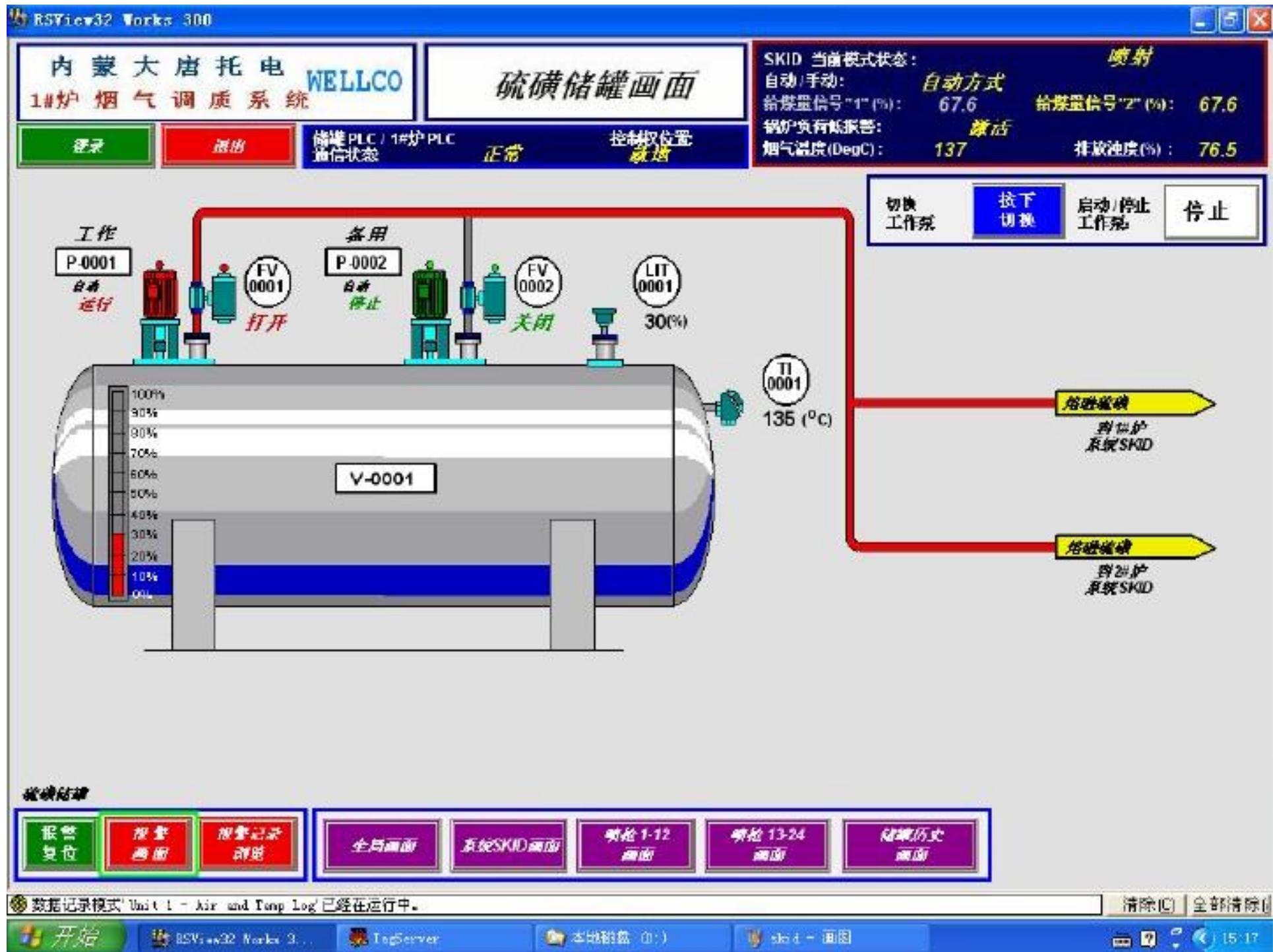


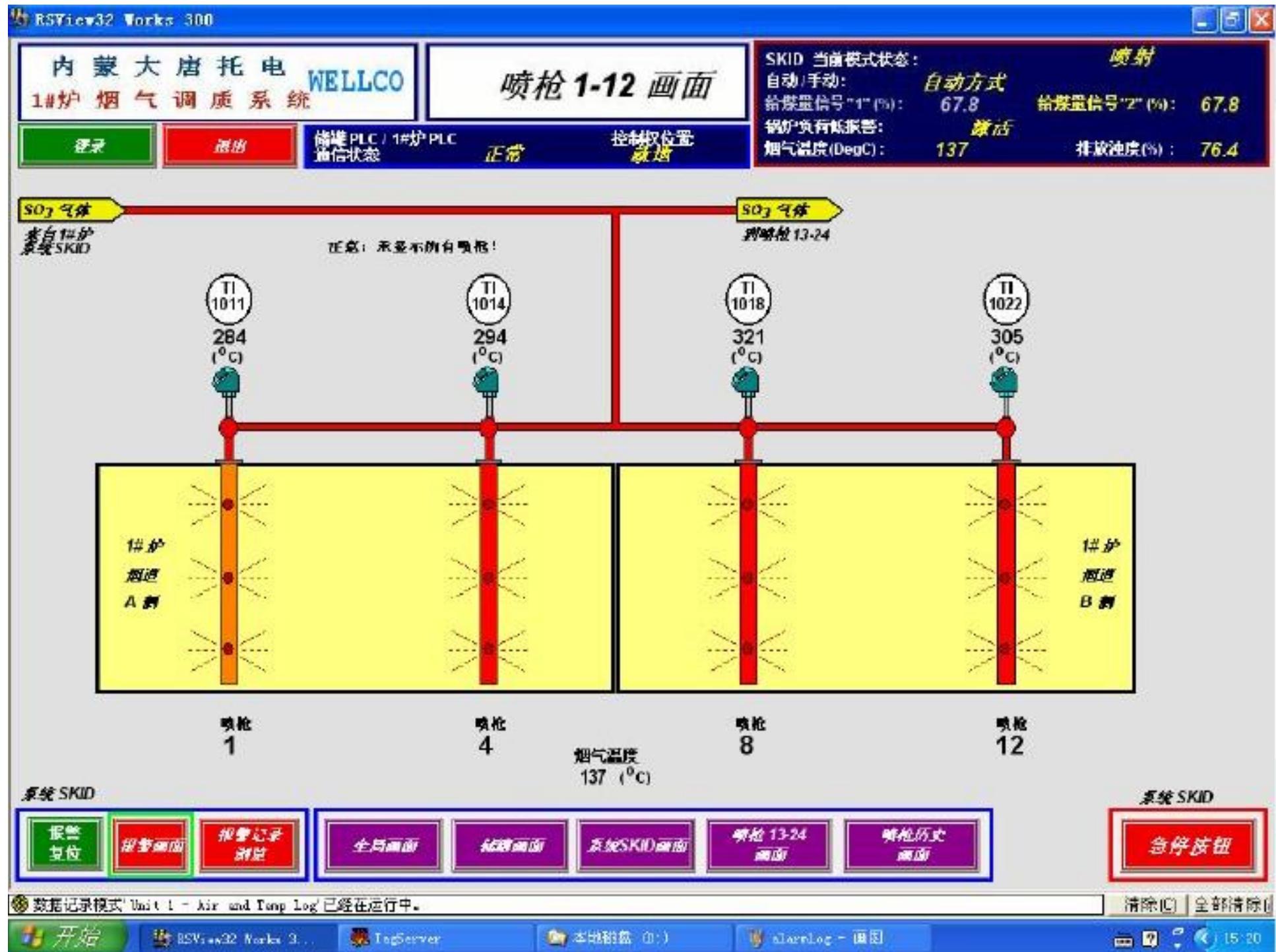
NH_3



烟气调质系统的工作流程









中国国电
CHINA GUODI

Aar 26%

99.76

Sar 0.47%

SiO_2 40.75%

AL_2O_3 47.26%

SO_3 1.06%

SiO_2 AL_2O_3

$1.0\text{E}+12\Omega\cdot\text{cm}$

$1.0\text{E}+13\Omega\cdot\text{cm}$



SO_3

SO_3

SO_3

$1.0\text{E}+10\Omega\cdot\text{cm}$

$1.0\text{E}+11\Omega\cdot\text{cm}$



2004 9 28 9 29

1

1

90%

99.80

99.77



OCT 13 2004



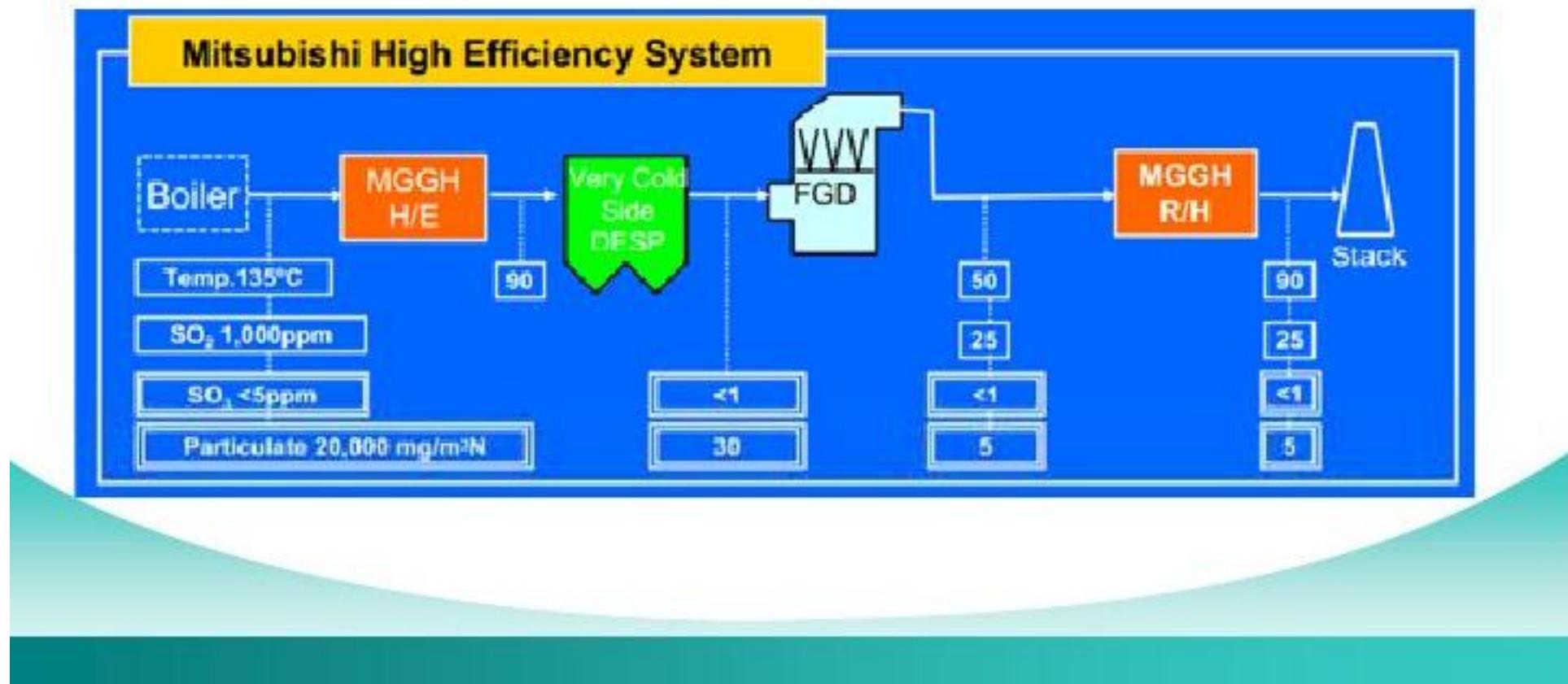


5低低温电除尘器MGGH

- ❖
- ❖
- ❖
- ❖

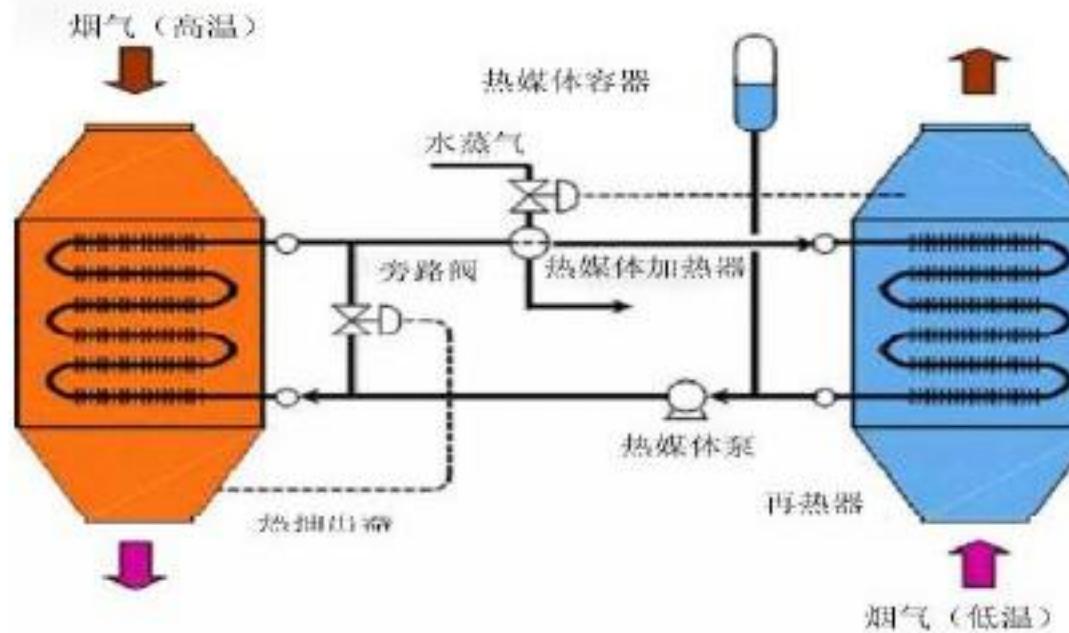


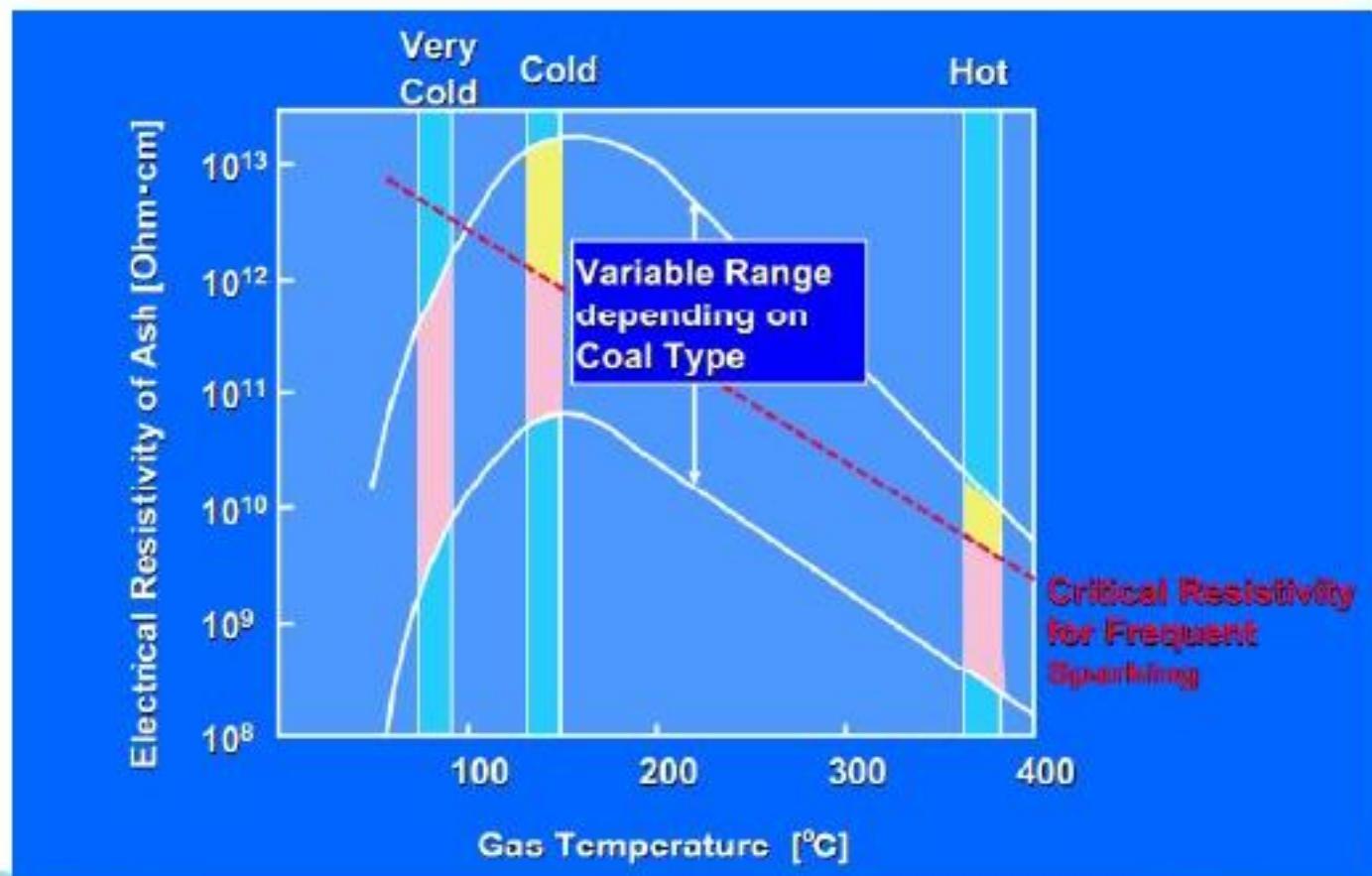
系统由“热回收器·电除尘器·再加热器”三大部分组成。其中，
热回收器 MGGH H/E 在省煤器烟气之后和电除尘器的入口端之间，
再加热器 MGGH R/H 在省煤器之后与烟囱之间的烟道上。

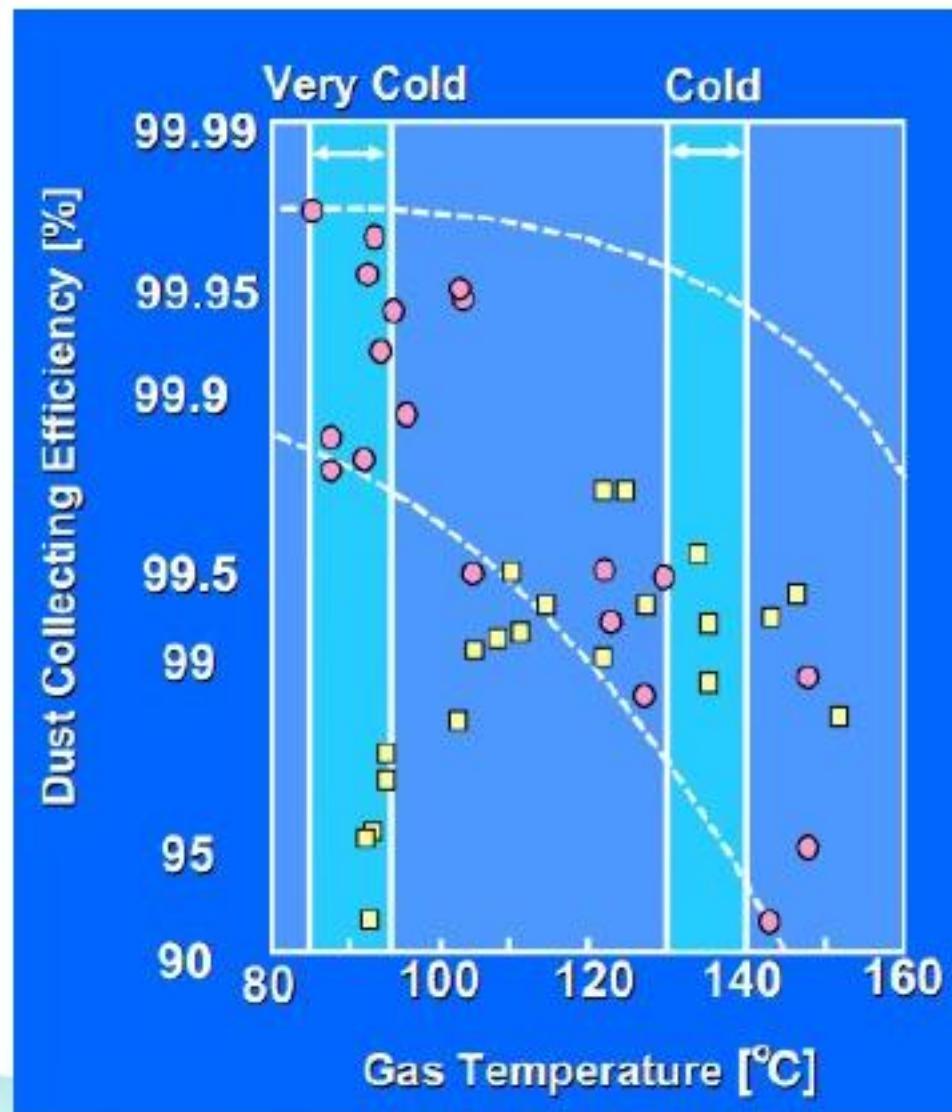




中国国电
CHINA GUODIAN





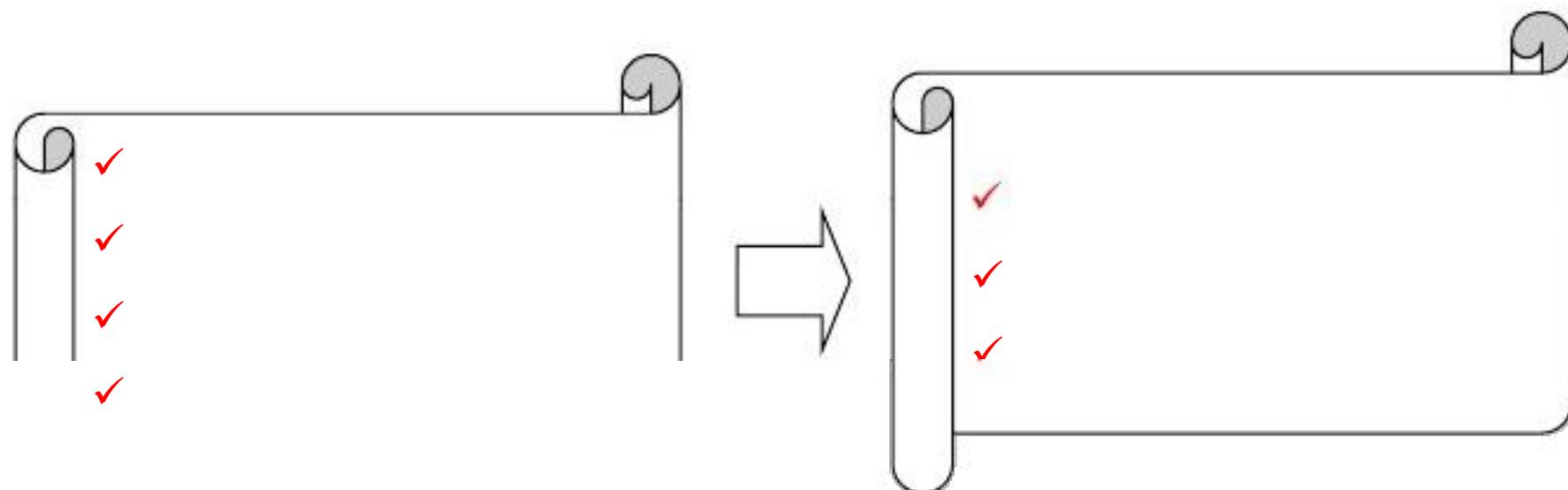




中国国电
CHINA GUODIAN

与普通电除尘器相比，低浓烟电除尘器优点如下：

占地面积排灰尺寸小，进入除尘室及净气室的风量大幅度减少，(MGHH H/E) 收尘后，可实现“四面三清”之效果。





中国国电
CHINA GUODI











中国国电
CHINA GUODIAN

案例





中国国电
CHINA GUODIAN





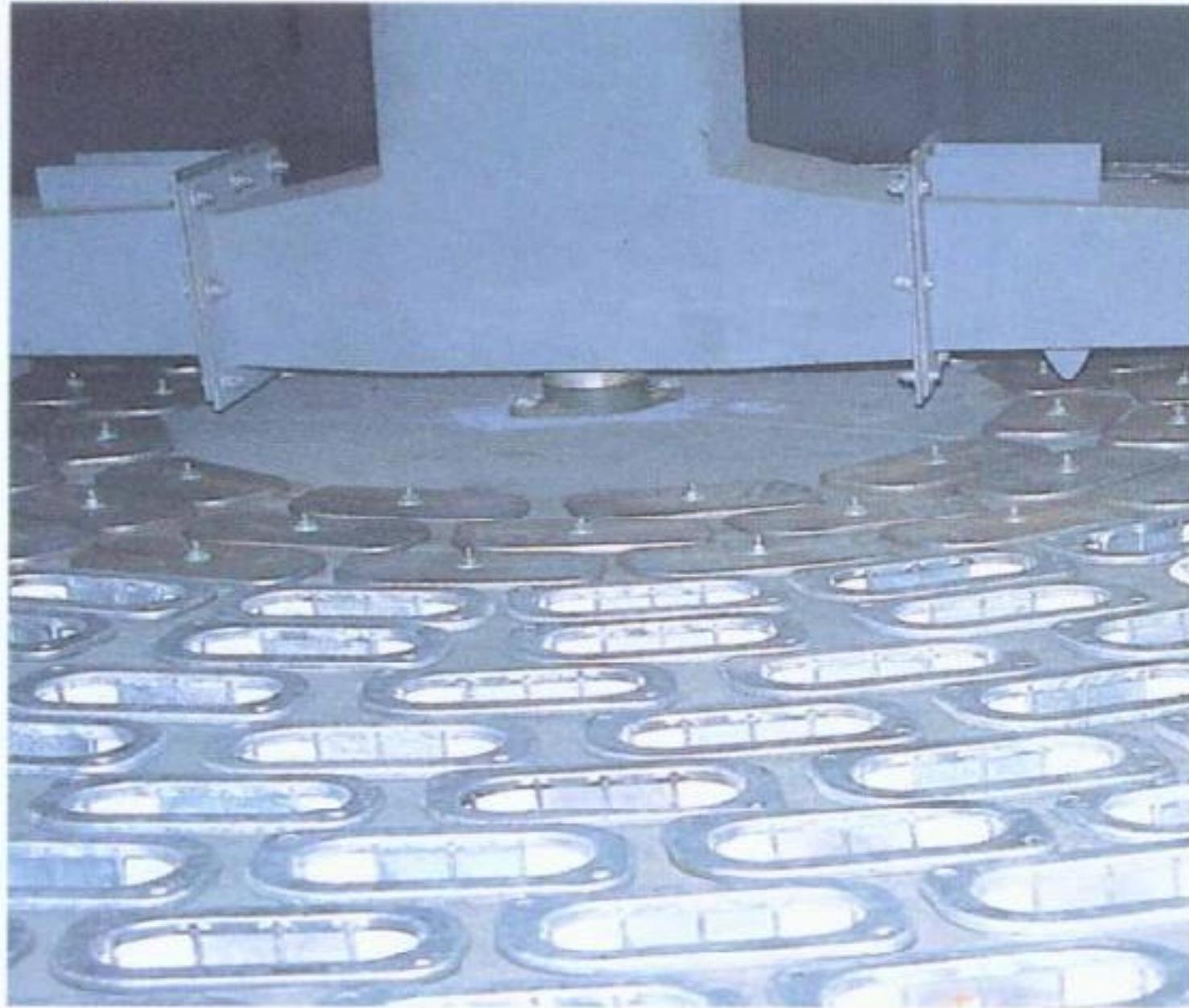


中国国电
CHINA GUODI





中国电网





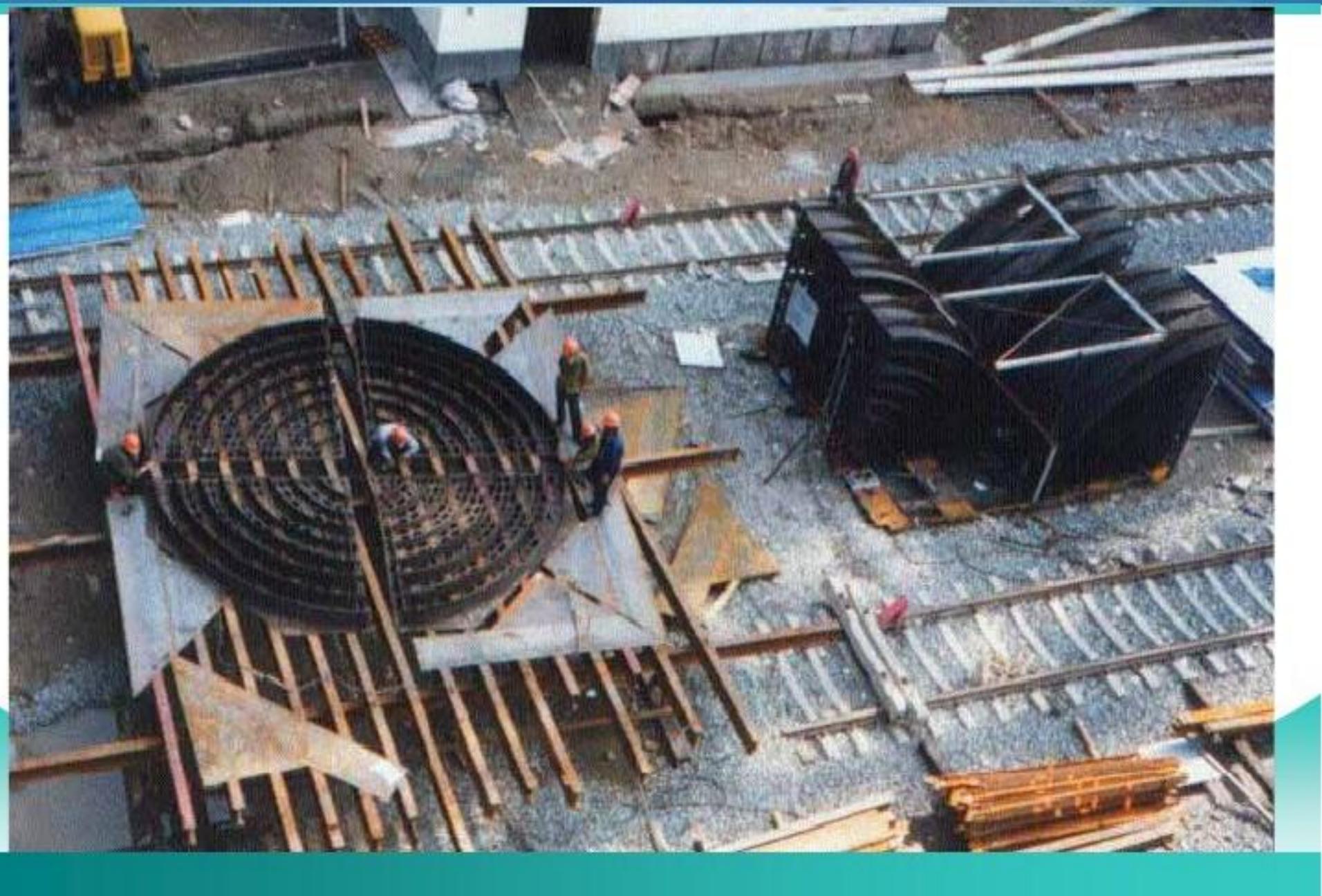


工程介绍——壳体安装（二）





工程介绍——花板组合



工程介绍——花板安装



工程介绍——滤袋安装





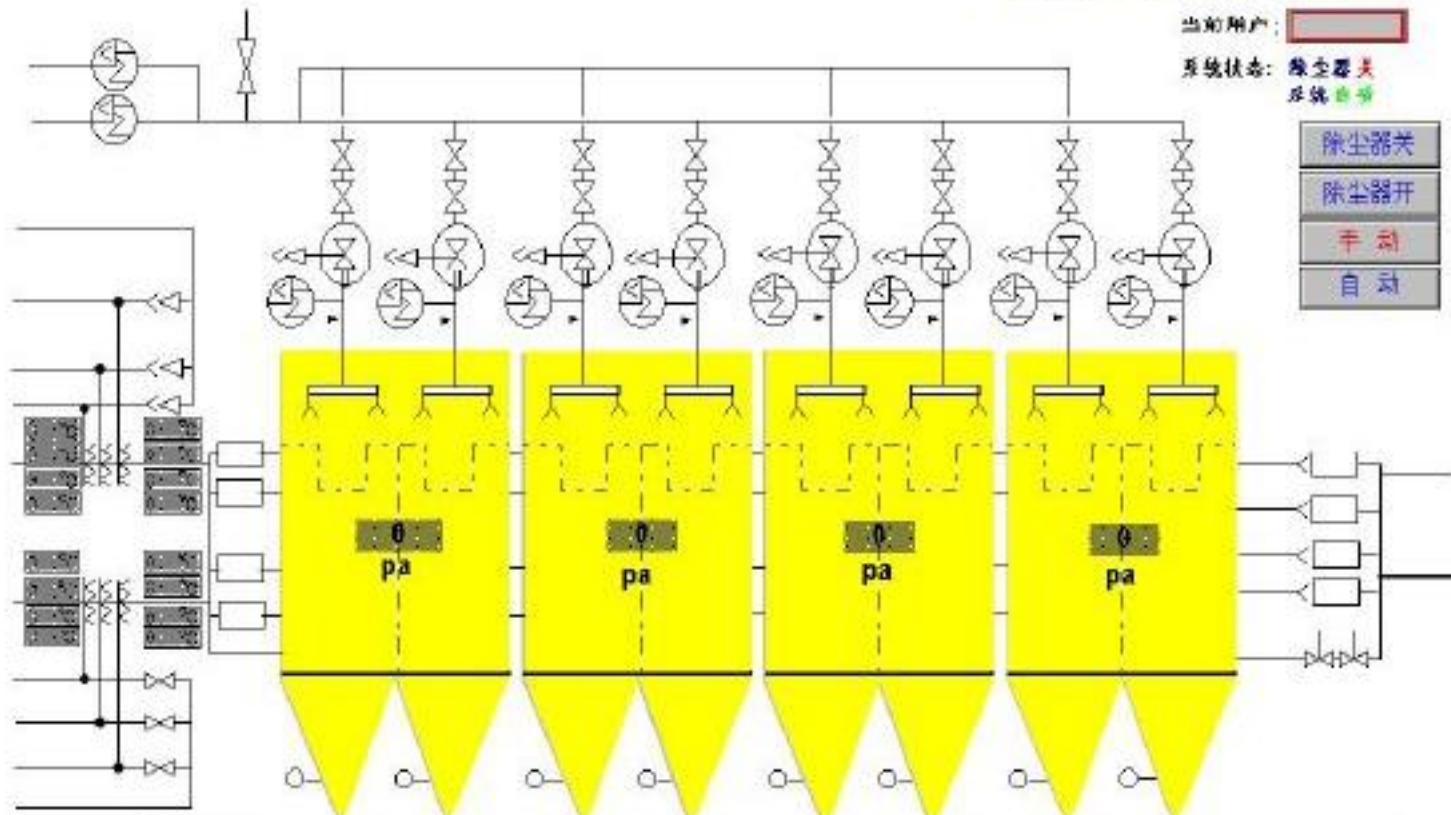


日期时间: Tue Nov 27 13:55:20 2001

当前用户:

系统状态: 除尘器关
系统启动

除尘器关
除尘器开
手动
自动



27/11/2001 3#除尘室压差低	22	200	13:55:00
27/11/2001 4#除尘室压差低	24	200	13:55:00

01-11-27 13:55:20

一号除尘室 二号除尘室 三号除尘室 四号除尘室 喷水系统 差压 其它 退出







中国国电
CHINA GUODIAN





三、电袋复合除尘器





()

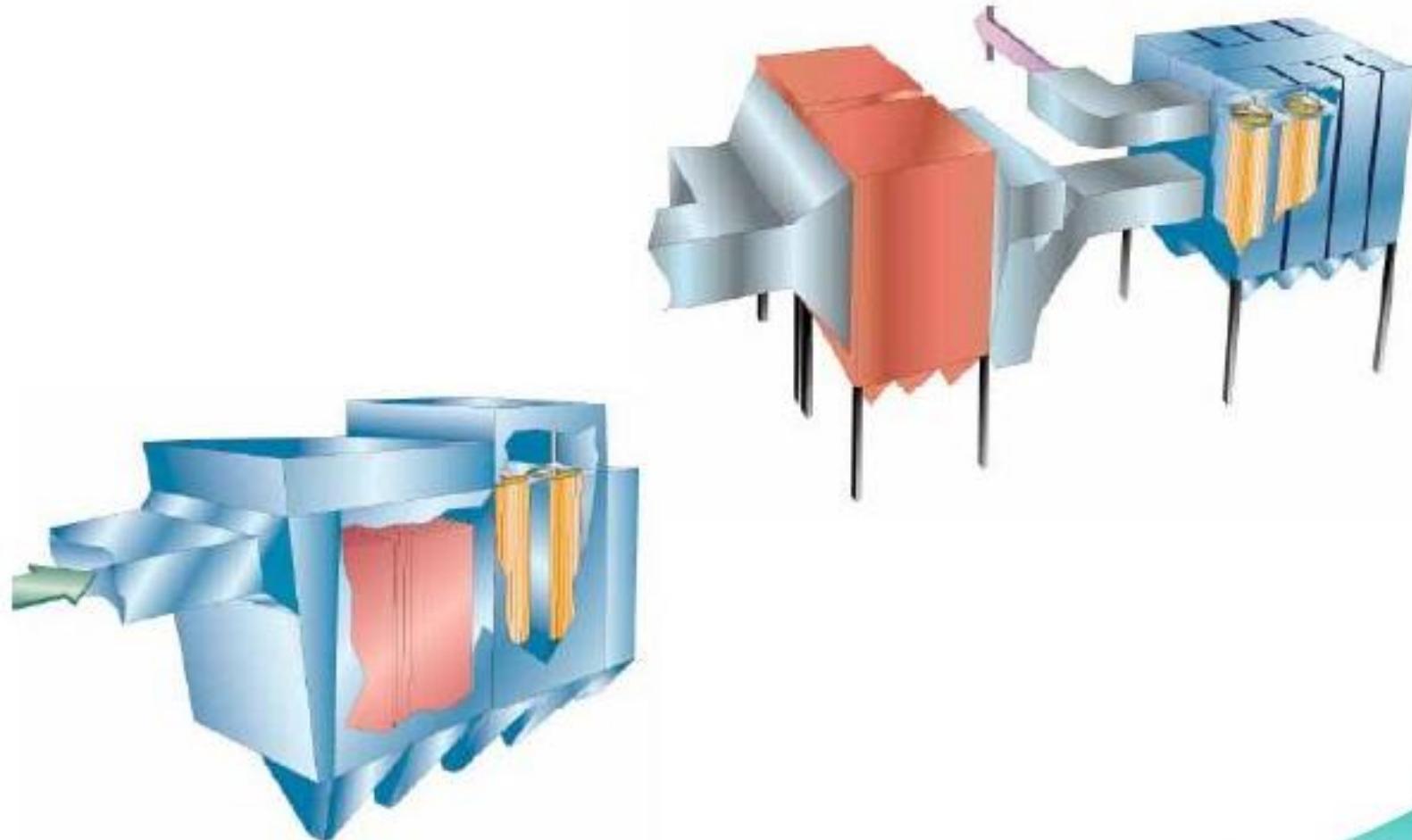
,



),



分体式与一体式电袋除尘器



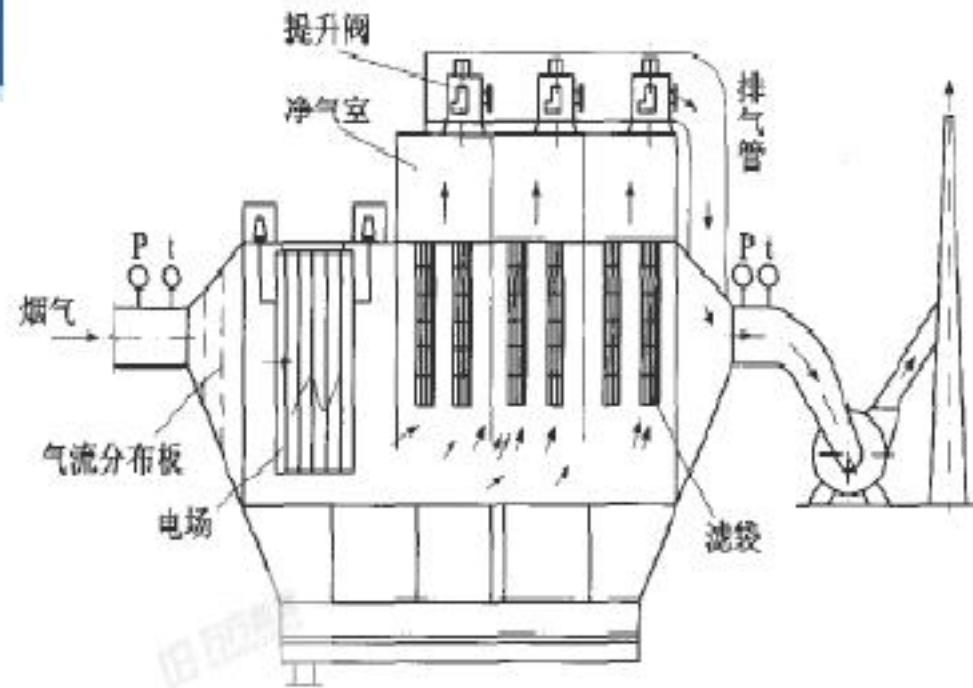
分体式与一体式电袋除尘器的比较



100



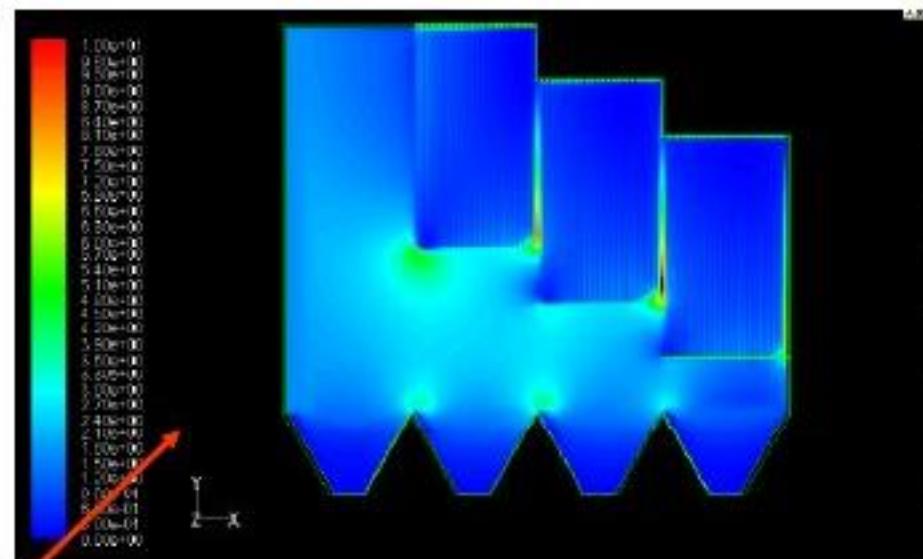
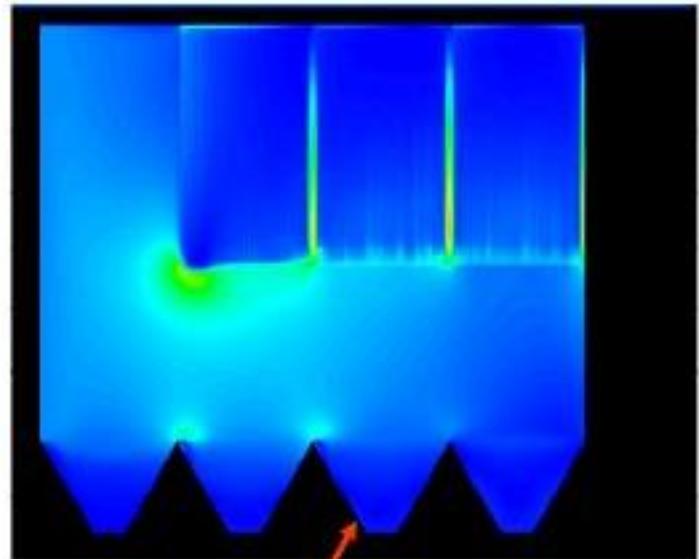
200Pa



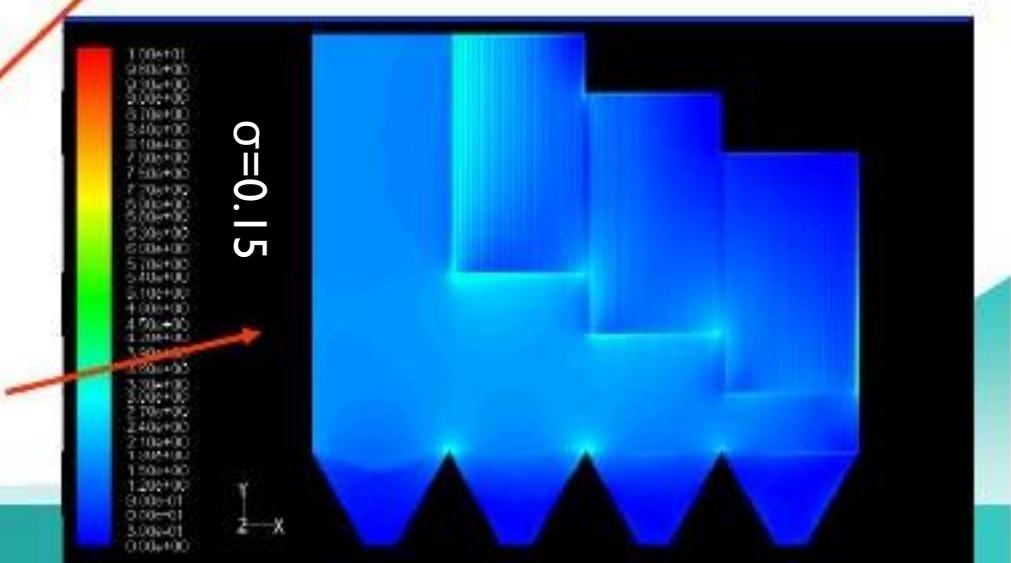
电-袋复合除尘器的结构如图 1 所示。含尘烟气经进口喇叭内气流分布板的作用，均匀地进入收尘电场，大部分粉尘在电场中荷电，并在电场力作用下向收尘极沉积。当有规律地振打收尘极时，被收集的粉尘从极板上脱落并落入下部灰斗。含有少量粉尘的烟气少部分通过多孔板进入袋收尘区，大部分烟气折向下部，然后由下而上地进入袋收尘区，当含尘烟气通过滤袋时（外滤式），粉尘被阻留在滤袋表面上，纯净烟气从滤袋内腔进入上部的净气室，再经提升阀进入烟道排出。



C



$\sigma=0.15$



气流分布设计的特点





中国国电
CHINA GUODI





			2
	$\leq 300\text{Pa}$	1400 1900Pa	600 1500Pa
	(300)	(200)	(200)
	50mg/Nm ³		20%



中国国电
CHINA GUODIAN

2

50mg/Nm³

1 5μm

1 5μm

1 5 m

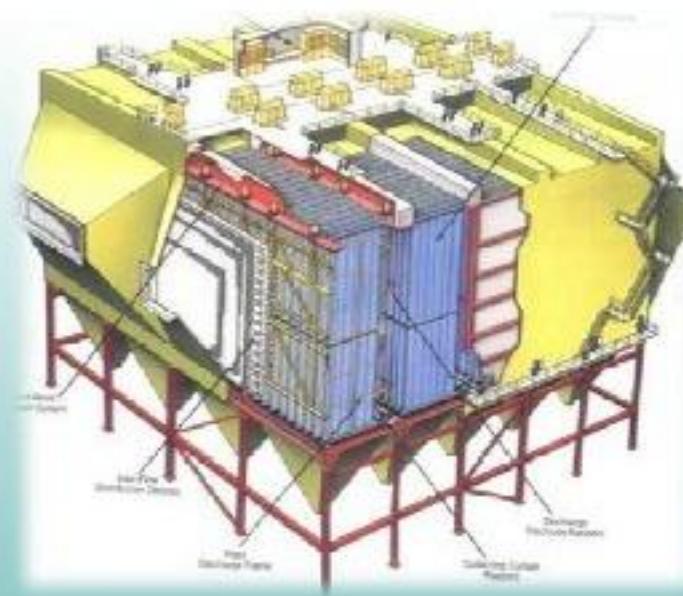
94%

5.5%

0.5%



中国国电
CHINA GUODIAN







中国国电
CHINA GUODIAN



中国国电
CHINA GUODIAN

除尘器选型判据





中国国电
CHINA GUODIAN





中国国电
CHINA GUODIAN

0.34-0.44%
0.86-0.60%
85.07-81.22%



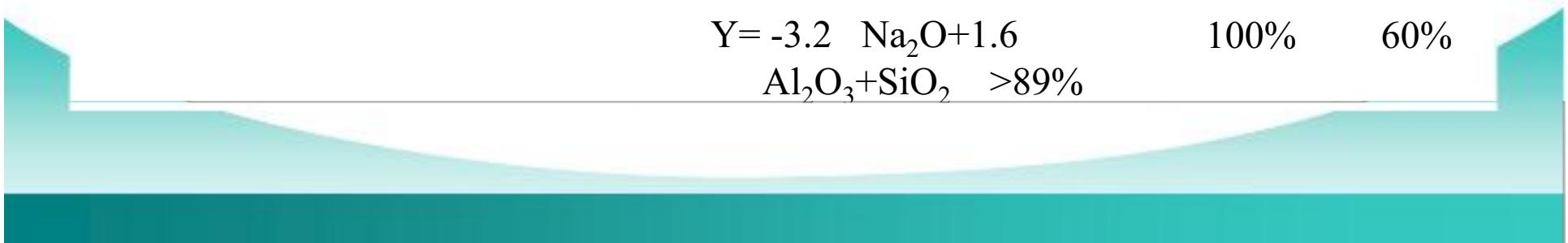
30 /

50 /

$\geq Y$
 $Y = -3.2 \text{ Na}_2\text{O} + 1.6$ 94% 97%

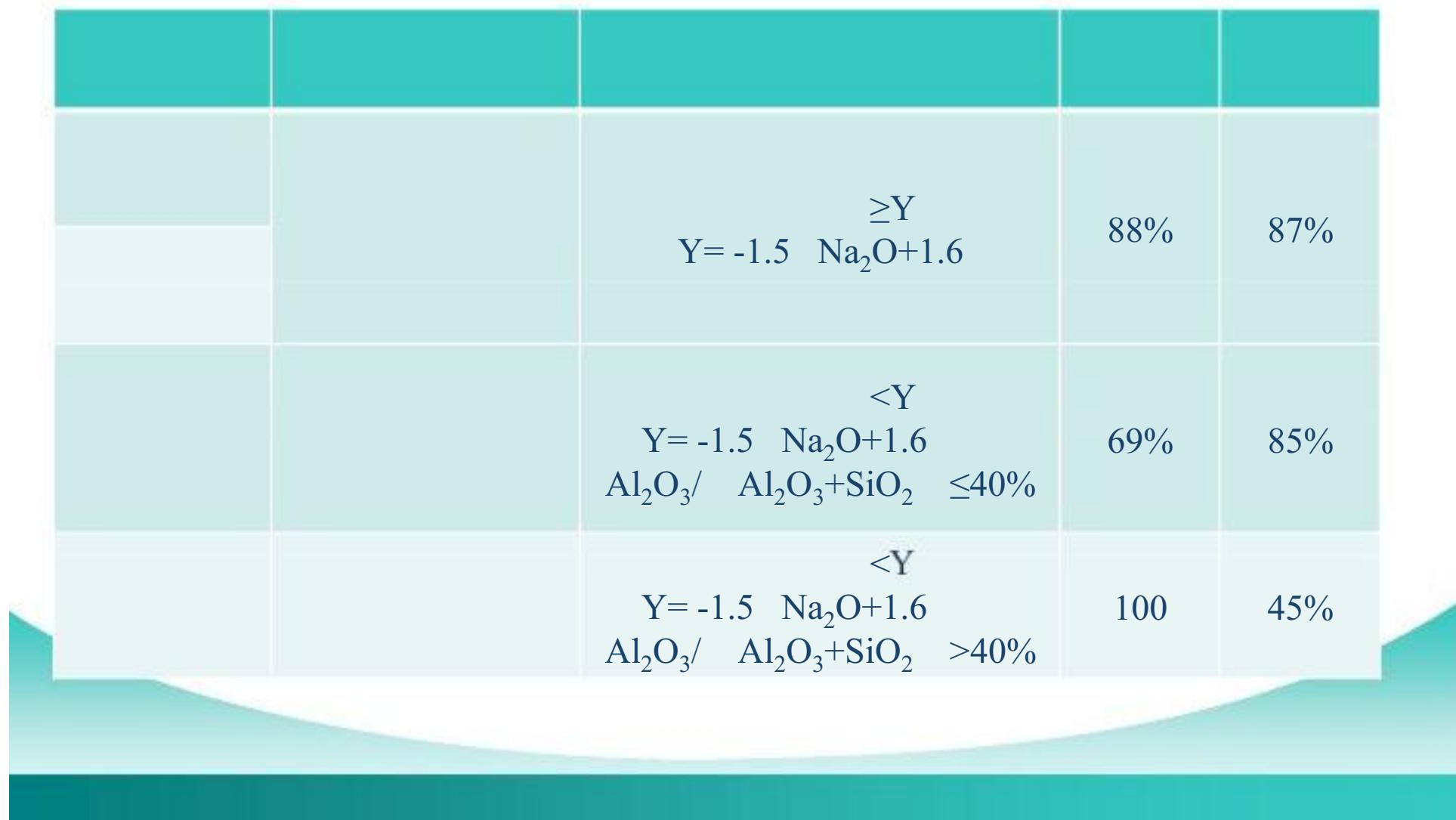
$< Y$
 $Y = -3.2 \text{ Na}_2\text{O} + 1.6$ 94% 89%
 $80\% < \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \leq 89\%$

$< Y$
 $Y = -3.2 \text{ Na}_2\text{O} + 1.6$ 100% 60%
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 > 89\%$



20 /

30 /





中国国电
CHINA GUODIAN

现有机组的ESP改造





Web: www.nepri.com