



电力规划设计总院

Electric Power Planning & Engineering Institute

燃煤电厂超低排放改造技术分析

一、火电环保标准应用状况

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

2、脱硫技术

3、脱硝技术

4、经济性分析

三、探讨

一、火电环保标准应用状况

- 《火电厂大气污染物排放标准》 GB13223-1996，
该标准自1997年1月1日起实。
- 《火电厂大气污染物排放标准》 GB13223-2003，
该标准自2004年1月1日起实施，废止1996标准。
- 《火电厂大气污染物排放标准》 GB13223-2011，
该标准自2012年1月1日起实施，废止2003标准。
- 国家发展和改革委员会等三部委联合发布《关于印发<煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020年）>的通知》（发改能源〔2014〕2093号）提出达到燃机排放限值

一、火电环保标准应用状况

- 2015年12月2日，李克强主持召开国务院常务会，决定全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造，大幅降低发电煤耗和污染排放，在2020年前，对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造，东、中部地区要提前至2017年、2018年达标。

一、火电环保标准应用状况

《火电厂大气污染物排放标准》 GB13223-2011，
对于非重点地区燃煤电厂大气污染物排放限值。

污染物项目	适用条件	限值mg/Nm ³
烟 尘	全 部	30
二氧化硫	新建锅炉	100 200 ⁽¹⁾
	现有锅炉	200 400 ⁽¹⁾
氮氧化物 (以NO ₂ 计)	全 部	100 200 ⁽²⁾
汞及其化合物	全 部	0.03

表中 (1) 广西、重庆市、四川省、贵州省新建火电执行200 mg/Nm³限值；现有火电执行400 mg/Nm³限值

表中 (2) 燃用无烟煤，2003年12月31日前建成或通过审批的项目执行200 mg/Nm³限值

一、火电环保标准应用状况

重点地区燃煤电厂执行大气污染物特别排放限值

污染物项目	适用条件	限值 mg/Nm ³
烟 尘	全 部	20
二氧化硫	全 部	50
氮氧化物 (以NO ₂ 计)	全 部	100
汞及其化合物	全 部	0.03

一、火电环保标准应用状况

《火电厂大气污染物排放标准》GB13223-2011规定了重点地区，重点地区共47个城市，除重庆为主城区外。

具体包括：京津冀地区、长三角地区、珠三角地区、沈阳市、济南市、青岛市、淄博市、潍坊市、日照市、武汉市、长沙市、重庆市主城区、成都市、福州市、三明市、太原市、西安市、咸阳市、兰州市、银川市、乌鲁木齐市。

一、火电环保标准应用状况

- 国家发展和改革委员会发改能源〔2014〕2093号提出
- 东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值
- 中部地区新建机组原则上接近或达到燃气轮机组排放限值
- 鼓励西部地区新建机组接近或达到燃气轮机组排放限值

一、火电环保标准应用状况

- 国家发展和改革委员会发改能源〔2014〕2093号提出
- 东部地区：辽宁、北京、天津、河北、山东、上海、江苏、浙江、福建、广东、海南共计11个省市
- 中部地区：黑龙江、吉林、山西、安徽、湖北、湖南、河南、江西共计8个省

一、火电环保标准应用状况

- GB13223-1996、2003、2011标准及燃气轮机排放限值对比

新建、扩建 燃煤电厂	烟尘 mg/Nm ³	二氧化硫 mg/Nm ³	氮氧化物 mg/Nm ³
GB13223-1996	200~600	1200~2100	650~1000
GB13223-2003	50~200	400~1200	450~1100
GB13223-2011	20~30	50~200	100~200
2093号文燃 机排放限值	10	35	50

一、火电环保标准应用状况

中国及发达国家排放标准

国 家	烟 尘 mg/Nm ³	二氧化硫 mg/Nm ³	氮氧化物 mg/Nm ³	汞及其化合物 μg/Nm ³
美 国	20	184	135	
日 本	50-100	200	200	
欧 盟	30	200	200	30
澳大利亚	100	200	460	
加拿大	130	740	460	
新西兰	125	350	410	
中 国（重点地区）	20	50	100	30
中 国（非重点地区）	30	100-400	100-200	30
2093号文燃机排放值	10	35	50	

一、火电环保标准应用状况

- 到2015年11月，全国已完成和正在进行燃煤超低排放改造机组共有122台发电机组，相应的机组容量5004.2万千瓦。
- 其中，单机容量 ≥ 30 万千瓦，有110台，装机容量4866.05万千瓦；单机容量 $> 10 \sim < 30$ 万千瓦，有7台，装机容量125万千瓦；单机容量 ≤ 10 万千瓦，有5台，装机容量13.1万千瓦。

一、火电环保标准应用状况

• 全国燃煤电厂超低排放机组（2014年10月）

集团	单位名称	机组	完工时间	二氧化硫 (mg/Nm3)	氮氧化物 (mg/Nm3)	烟尘 (mg/Nm3)
华能	华能黄台电厂	9号机组	2014年9月22日	8.7	38	1.3
	华能金陵电厂	1号机组	2014年12月23日	5	11	2
大唐	大唐南京发电厂	2号机组	2014年11月25日	29	35	4.5
	大唐国际云冈热电公司	3号机组	2014年12月24日	12	26	3.9
华电	石家庄裕华热电公司	1号机组	2014年9月9日	7	27	4
	石家庄裕华热电公司	2号机组	2014年11月21日	29	29	4
	军粮城发电有限公司	9号机组	2014年11月24日	15	24	3.28

一、火电环保标准应用状况

集团	单位名称	机组	完工时间	二氧化硫 (mg/Nm3)	氮氧化物 (mg/Nm3)	烟尘 (mg/Nm3)
华电	军粮城发电有限公司	10号机组	2014年12月24日	15	30.5	3.59
	章丘发电有限公司	3号机组	2014年12月10日	12	46	1
国电	国电常州发电有限公司	1号机组	2015年1月9日	19	40	3
	北仑第三发电有限公司	7号机组	2015年3月24日	11.6	40.4	2.2
中电投	上海漕泾发电有限公司	2号机组	2014年12月25日	9	21	1.4
国华	舟山电厂	4号机组	2014年6月25日	2.9	20.5	2.6
	三河电厂	1号机组	2014年8月15日	9	35	5

一、火电环保标准应用状况

集团	单位名称	机组	完工时间	二氧化硫 (mg/Nm3)	氮氧化物 (mg/Nm3)	烟尘 (mg/Nm3)
国华	三河电厂	2号机组	2014年10月 31日	10	25	3
	定州电厂	3号机组	2014年12月 23日	6	17	2
	定州电厂	4号机组	2015年1月5 日	7	21	2
	惠州电厂	1号机组	2014年12月 28日	8	18	1.4
国神	鸳鸯湖电厂	1号机组	2015年3月 11日	35	40	10
	鸳鸯湖电厂	2号机组	2015年3月 11日	35	40	5

一、火电环保标准应用状况

集团	单位名称	机组	完工时间	二氧化硫 (mg/Nm3)	氮氧化物 (mg/Nm3)	烟尘 (mg/Nm3)
国神	大港电厂	1-4号机组	2014年8月 24日	35	40	5
华润	广州华润热 电有限公司	1号机组	2014年8月4 日	6	23	2.6
	华润海丰电 厂	1号机组	2015年3月7 日	15	38	2
浙能	嘉兴发电厂	7号机组	2014年6月8 日	11.8	13.2	1.3
	嘉兴发电厂	8号机组	2014年5月 30日	9.0	20.6	1.3
	嘉兴发电厂	4号机组	2014年12月 6日	11.2	22.1	1.27

一、火电环保标准应用状况

集团	单位名称	机组	完工时间	二氧化硫 (mg/Nm3)	氮氧化物 (mg/Nm3)	烟尘 (mg/Nm3)
浙能	六横电厂	1号机组	2014年7月 10日	22.6	28.4	2.8
	六横电厂	2号机组	2014年9月 17日	20.9	28.7	2.5
申能	上海外高桥 第三电厂	7号、8号机 组	2008年6月 30日	18	15	7.8
恒运	广东广州恒 运电厂	9号机组	2014年7月 16日	1	23	1.7

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

除尘器选型原则

- 电除尘器技术成熟，高效率、维修方便、费用低。多数煤种对电除尘器适应性比较好。对神府东胜煤、晋北煤等电除尘器适应性较好的煤种，宜选用电除尘器；对于准格尔煤、宣威煤、澳大利亚煤等电除尘器适应性差的煤种，不宜选用常规电除尘器，可选用布袋除尘器、电袋除尘器。
- 对除尘效率低于99.8%，通常选用电除尘器；当除尘效率99.8%且99.85%时，一般采用电除尘器加高频电源、旋转电极等技术。
- 除尘效率高于99.85%时，不宜选用常规电除尘器，可考虑采用低低温电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

布袋除尘器

主要优点：

- (1) 除尘效率高，对微细粉尘也有较高的效率。即使入口粉尘达到 $1000\text{g}/\text{Nm}^3$ 以上，经袋式除尘器过滤后的烟气含尘浓度一般都低于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，甚至在 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。
- (2) 适应性强，可以捕集不同性质的粉尘。例如，对于高比电阻粉尘，采用袋式除尘器就比电除尘器优越。此外，入口含尘浓度在大的范围内变化时，采用袋式除尘器效果好。
- (3) 使用灵活，处理风量可大可小。可从每小时几立方米到几百万立方米。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

布袋除尘器

主要缺点：

- (1) 应用范围主要受滤料的耐温、耐腐蚀性等性能的局限，设备阻力较高。破袋与高阻力是制约袋式除尘器应用的两大因素。
- (2) 不适宜于黏结性强及吸湿性强的粉尘，特别是烟气温度不能低于露点温度，否则会产生结露，致使滤袋堵塞。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术 布袋除尘器

内蒙呼市热电厂200MW
外高桥第一发电厂1000MW
托克托电厂600MW
石门电厂300MW
湘潭电厂300/600MW
大唐华银株洲电厂300MW

采用袋式除尘器技术，具有较多的应用业绩，运行经验丰富。



二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

布袋除尘器

上海外高桥电厂的实测数据表明：

布袋除尘器出口烟尘浓度为 $16.1—18.5\text{mg}/\text{Nm}^3$



二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

- 发达国家：美国、澳大利亚等国家火电厂布袋除尘应用较多。大部分项目排放浓度都在 $20\sim 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以内。少数项目排放浓度都在 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以内。
- 我国近几年，随着环保标准的提高，布袋除尘器应用越来越多。滤料的国产化工作应进一步加强。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

低温静电除尘器

利用烟气换热器，将烟气温度降低至高于烟气酸露点温度。

静电除尘器的运行烟气温度下降后，烟气的比电阻下降，提高了除尘效率。

漕泾电厂1000MW机组在除尘器进口加装烟气余热利用换热器后，烟气温度从123℃降低到约105℃，电除尘器效率从99.81%提高到了99.87%，出口排放浓度从21.57 mg/Nm³降低到14.29 mg/Nm³，上述设备已投运1年多，运行良好。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

低低温静电除尘器

- 通常将低于酸露点温度运行的静电除尘器称为低低温静电除尘器。国外研究认为在除尘器前，烟气温度低于酸露点温度，形成的硫酸会被飞灰中的碱金属包裹，不会形成腐蚀。低低温除尘器进口的烟气温度为85-95℃左右。
- 优点：
 - 降低飞灰比电阻，与常规电除尘器相比可少上一个电场。
 - 降低烟气流速。
- 缺点或影响：
 - 灰斗部容易堵塞、绝缘电瓷室温度下降、飞灰二次飞扬。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

低低温静电除尘器

- 日本应用低低温电除尘技术的工程：原町电厂#2 1000MW机组、鹤贺电厂#2 700MW机组、碧南#4、#5 1000MW机组、托马托东#4 700MW机组、苓北#2 700MW机组，其烟尘排放浓度始终维持在较低水平，且运行非常稳定。
- 南昌发电厂1#机组进行了低低温电除尘改造，增加余热利用换热系统，2013年7月实测结果：除尘器入口烟温由140℃下降到95℃，除尘器出口烟尘浓度由58mg/Nm³下降到16 mg/Nm³，除尘效率得到有效提高。
- 低低温除尘器常和管式GGH配套采用。
- 上海电气石川岛引进了日本石川岛的低低温静电除尘器技术。福建龙净有电厂运行业绩。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

低低温静电除尘器

- 除尘器材质选择：对于燃煤含硫量 $<1\%$ 的项目采用普通碳钢，当燃煤含硫量进一步提高时，需要做相应的试验。

二、烟气治理技术与展望

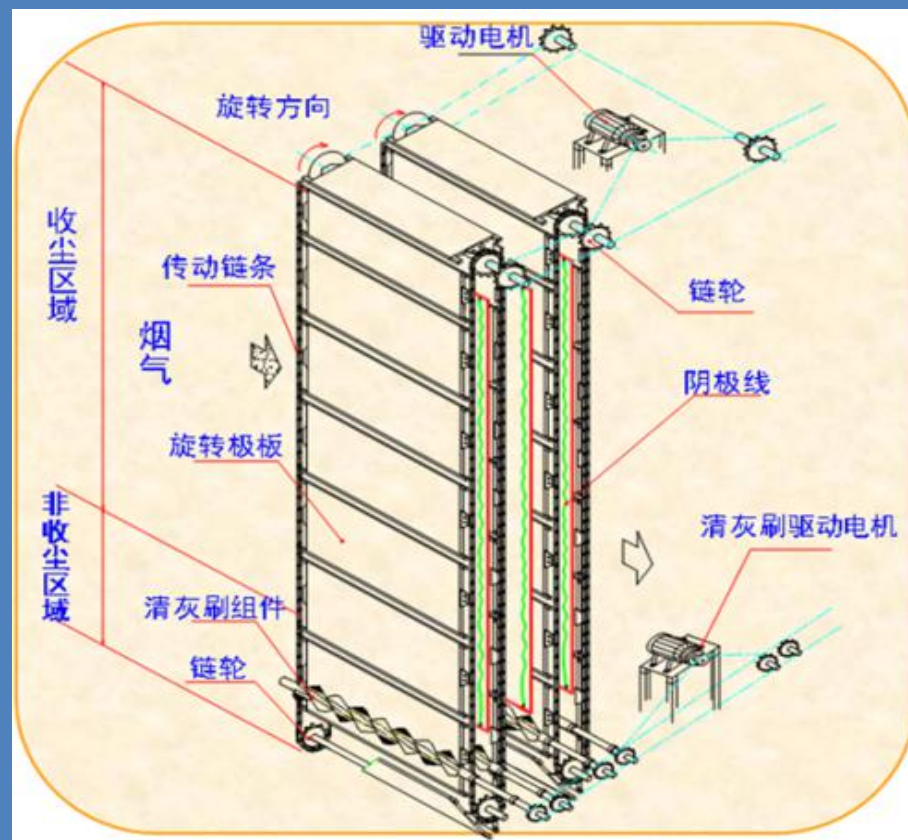
1、除尘技术

移动电极电除尘器

传统电除尘器存在着高比电阻粉尘易产生反电晕、20%的排放量是由二次扬尘引起、对PM2.5除尘效率小于90%三个问题。旋转电极可通过技术改进使上述问题最小化。旋转电极是日本日立公司开发的一种新结构的电除尘器，采用可移动的收尘极板和可旋转的刷子来构成移动电极电场，应用于电除尘器的后级电场。

主要优点：

保持阳极板清洁，避免反电晕；减少二次扬尘；减小占地面积。



二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

移动电极电除尘器

- 国外应用情况：从1979年日本日立公司研制出首台移动电极电除尘器至今，已经有30多年应用历史。到目前为止，该设备约有60多台套的销售业绩，主要用于日本本土，装机总容量已超过9000MW，涵盖150MW-1000MW机组。
- 国内旋转电极静电除尘器投运业绩：
 - 300MW：内蒙包头电厂、达拉特电厂、秦皇岛电厂等
 - 600MW：江苏华润常熟等
 - 1000MW：华电句容电厂、六横电厂

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

移动电极电除尘器

包头第一热电厂燃用内蒙古胜煤，灰份约为30%。电厂1号机组电除尘器供货商为浙江飞达公司，4个电场，一电场装有高频电源，四电场装有旋转电极，实测除尘器出口粉尘浓度： $38\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，除尘器后装有湿法脱硫装置，脱硫装置后烟气中烟尘浓度为 $20.55\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

华电句容电厂2X1000MW机组，五电场静电除尘器，五电场安装旋转电极，由日立设计、阿尼克公司供货，除尘器出口烟尘 $10\text{--}20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

湿式静电除尘器

- 湿式静电除尘器主要去除脱硫吸收塔除雾器后烟气和液滴中所含的粉尘。
- 湿式静电除尘器的主要工作原理，即烟气中的粉尘颗粒吸附负离子而带电，通过电场力的作用，被吸附到集尘极上；湿式电除尘器将水喷至极板上使粉尘冲刷到灰斗中随水排出。同时喷到烟道中的水雾既能捕获微小烟尘又能降电阻率，利于微尘向极板移动。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术

湿式静电除尘器分为

- 金属极板湿式电除尘器
- 导电玻璃钢极板湿式电除尘器
- 柔性极板湿式电除尘器

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 金属极板湿式电除尘器的极板材质基本选用不锈钢316L，其结构型式与常规干式静电除尘器基本相同，阳极板采用平板结构，喷水清灰，除尘器一般采用卧式布置，烟气平进平出，除尘效率可保证70%（一个电场）/85%（两个电场），出口烟尘浓度可低于5mg/Nm³。金属极板湿式电除尘器在国内市场基本占主导地位，其技术成熟，火电机组运行业绩多，在1000MW机组上运行时间超过1年，基建投资低，但该技术水耗、碱耗较大，运行费用高。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 金属极板湿式静电除尘器运行业绩
- 1000MW机组：漕泾电厂2号机组、浙能六横电厂1号机组
- 600MW机组：黄岛电厂6号炉、定州电厂3号和4号机组
- 300MW机组：浙江舟山电厂4号机组、惠州热电1号机组、华电淄博热电厂6号炉。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 浙江某电厂1000MW机组，除尘方案为干式电除尘器为三室五电场，第五电场采用旋转电极，设计要求干式电除尘器出口烟尘浓度不大于 $17.4\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，随后烟气经过湿法脱硫装置，其除尘效率为50%，再加上吸收塔出口液滴所携带的 $8\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的石膏，合计颗粒物浓度为 $16.7\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。最后经过金属极板湿式电除尘器，除尘效率70%，每台锅炉配2台湿式电除尘器，一电场双室，烟囱出口烟气中烟尘浓度不大于 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 湿式电除尘器性能测试实测值烟尘浓度值 $3.0\sim 3.8\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，除尘效率76%~77%
- 干式电除尘器出口烟尘实测浓度小于 $15\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术



二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术



二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 导电玻璃钢板湿式电除尘器的极板材料采用导电玻璃钢，收尘板结构形式为管式，其截面形状以正六边形居多，间断喷水清洗极板，采用立式布置方式，烟气上进下出或下进上出，除尘效率可达60%-90%，主要靠烟气流速的选取和调整极板长度来实现除尘效率的要求，出口烟尘浓度可低于 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。该技术基建投资较大，但具有占地小、布置灵活的特点，同时运行费用低。

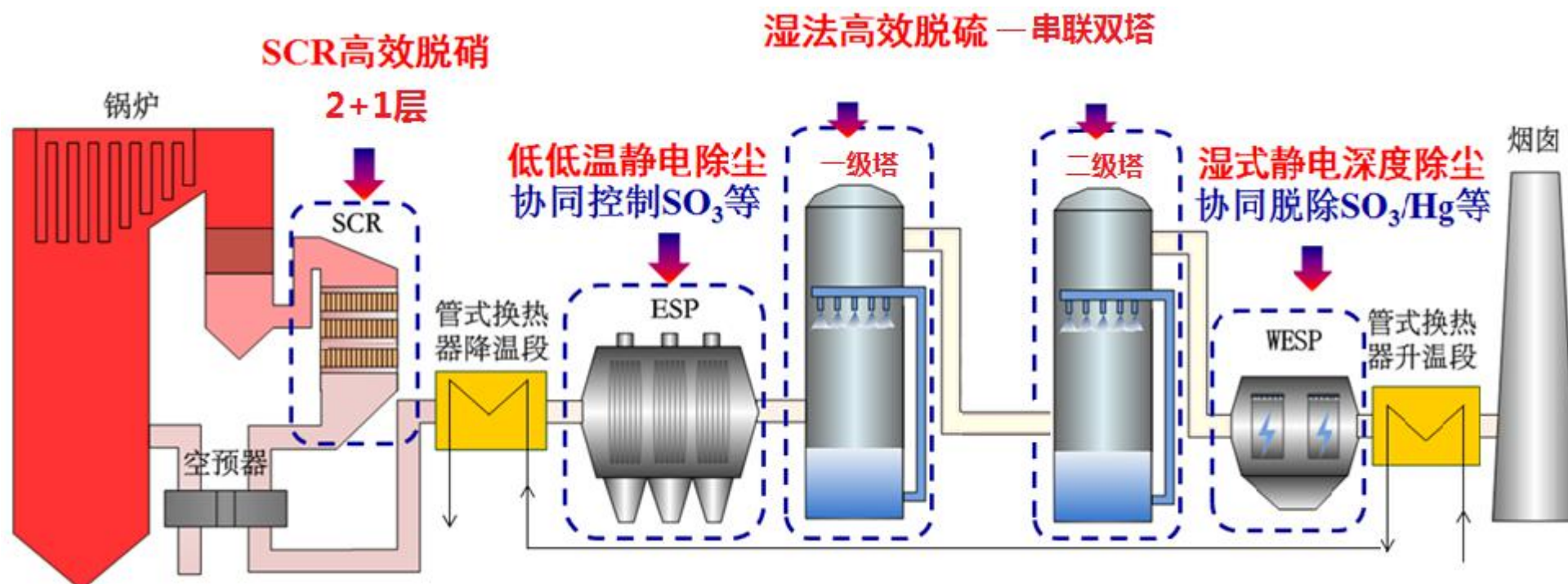
二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 导电玻璃钢极板湿式电除尘器运行业绩
- 铜川照金电厂2号机组
- 华能淄博白杨河发电有限公司6号和7号机组
- 大唐乌沙山电厂4号机组
- 北疆电厂1号机组
- 以华能铜川照金电厂2号机组和北疆电厂1号机组为例，相应的除尘效率分别为80%和75%

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 陕西某电厂一期工程建设两台国产60万千瓦亚临界空冷燃煤脱硫机组。2014年11月16日完成#2机组超低排放改造，2015年5月29日完成#1机组超低排放改造。
- 采用导电玻璃钢极板湿式电除尘器。
- 在超低排放改造过程中，采用联合除尘技术，在电除尘器前增设MGGH烟冷段，将烟气温度从120℃左右降低至90℃；电除尘器进行高频直流电源改造；脱硫拆除GGH，增设一级吸收塔；脱硫系统后增加湿式除尘器。
- 湿式除尘器的安装位置为原脱硫系统GGH的位置。

二、烟气治理技术与展望



二、烟气治理技术与展望

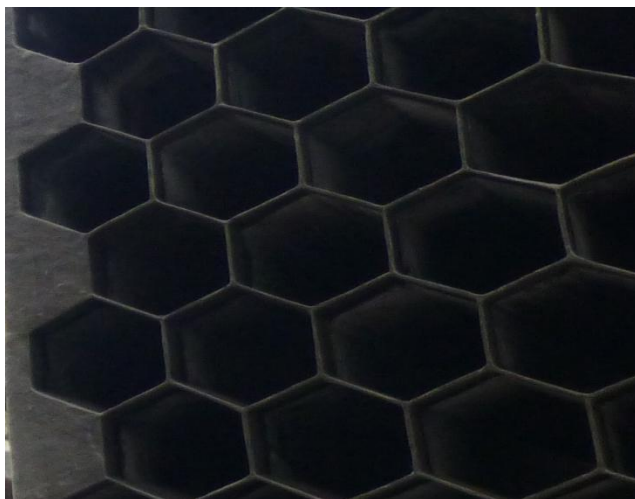
- 1、除尘技术
- 湿式除尘器的设计参数如下：
- 烟气流量：2992274m³/h（标态，BMCR工况烟气量）
- 运行温度：50℃
- 入口固体颗粒物浓度：30mg/m³，（标态，O₂=6%）
- 入口雾滴含量：不大于50 mg/m³（标态，O₂=6%）
- 出口固体颗粒物浓度：<5mg/m³（标态，O₂=6%）。
- 出口雾滴量：≤20mg/m³（标态，O₂=6%）

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 除尘器电场型式：立式、蜂窝式
- 总收尘面积：16783m²
- 比积尘面积：21.00m²/(m³/s)
- 放电极形式及数量：刚性不锈钢（316L），2664个
- 设备运行耗水量：12m³/次，每班冲洗1次
- 除尘效率：≥80%

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 选用西安西热锅炉环保工程有限公司的导电玻璃钢湿式电除尘器
- 收尘极采用复合玻璃钢材料，模块化结构、蜂窝布置（使用寿命15年）；阴极放电线采用钛合金钢(使用寿命6年)，线型为多刺钛线。



二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- #2机组湿式除尘器性能考核试验结果：
- 2014年12月8日600MW负荷时，湿式静电除尘器出口烟尘质量浓度 $4.99\text{mg}/\text{m}^3$ (标态、干基)，折算烟尘质量浓度为 $4.68\text{mg}/\text{m}^3$ (标态、干基、 $6\%\text{O}_2$)。
- 2015年1月16日600MW负荷时，湿式除尘器测试前冲洗干净，测试期间冲洗水关闭。湿式静电除尘器出口烟尘质量浓度 $4.13\text{mg}/\text{m}^3$ (标态、干基)，折算烟尘质量浓度为 $3.92\text{mg}/\text{m}^3$ (标态、干基、 $6\%\text{O}_2$)。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 柔性极板湿式电除尘器
- 柔性极板湿式电除尘器与导电玻璃钢板湿式电除尘器基本一致，不同点就是采用了有机合成纤维作极板材料，利用浸湿的纤维极板来收集烟气中的雾滴。清灰方式是靠极板的全表面均匀水膜自流，可实现运行零水耗。除尘器的极板采用管式结构，采用立式布置方式，烟气上下进出。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘技术 湿式静电除尘器

柔性极板湿式电除尘器的业绩：

南京国电山大能源环境有限公司自主研发了湿式静电除尘器技术，并于2012年8月在国电益阳电厂300MW机组上进行应用，效果良好。



二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 对于传统的脱硫吸收塔，环评认为其除尘效率为50%，通过优化吸收塔内流场分布、提高除雾器的除雾除尘效果，这被称为高效协同除尘技术。
- 高效协同除尘技术分成高效除尘吸收塔、管束式除尘技术两种

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 高效除尘吸收塔是通过优化吸收塔内部流场分布、提高除雾器的除雾除尘效果、强化传质装置等措施来提高除尘效率，在吸收塔入口含尘浓度不大于 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 且除雾器出口液滴携带量不大于 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，吸收塔出口的含尘浓度可小于 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 运行业绩：华能玉环电厂3号机组、华能金陵电厂、华能长兴电厂1号和2号机组。
- 高效除尘吸收塔在华能玉环电厂3号机组上已稳定运行约9个月。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 浙江某电厂3号机组配置两台三室四电场卧式静电除尘器，除尘效率为99.7%，机组按一炉一塔同步配置有石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置，二氧化硫脱除率不小于95%，出口排放浓度为105 mg/m³；烟气脱硝采用选择性催化还原（SCR）工艺，每台锅炉配备两个SCR反应器，脱硝率不低于80%，氮氧化物的排放浓度可达100 mg/m³以下。
- 燃煤收到基低位发热量22095kJ/kg，灰份11.92%，硫份0.9%

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 脱硫吸收塔入口烟气参数

项目	单位	数据
二氧化硫	mg/Nm ³	1969
三氧化硫	mg/Nm ³	20
氯化氢	mg/Nm ³	132
氟化氢	mg/Nm ³	56
烟尘	mg/Nm ³	20

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 改造目标：
- 脱硫系统出口（烟囱入口） SO_2 排放浓度不大于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ （标态、干基， $6\%\text{O}_2$ ），系统脱硫效率不低于98.5%。
- 入口烟尘浓度为 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫综合除尘效率为76%，烟囱排放口烟尘浓度不超过 $4.8\text{mg}/\text{m}^3$ 。烟尘浓度包括飞灰、钙盐类以及其它惰性物质。

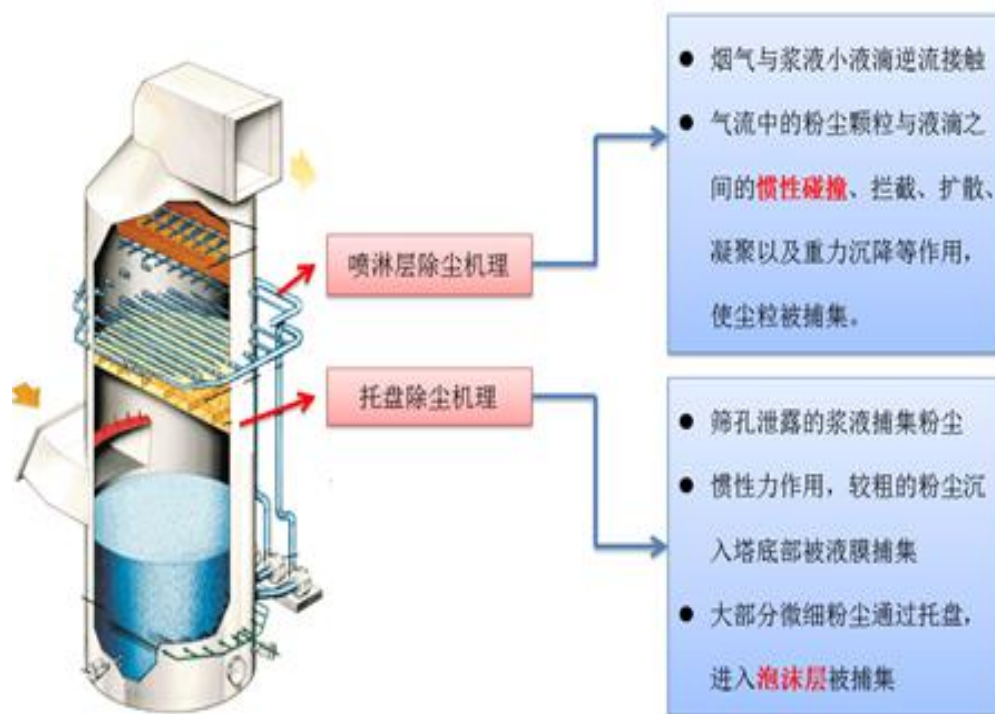
二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 改造内容包括有，拆除原有四层喷淋层下部第一层喷淋层，在此位置和吸收塔入口烟道之间增设两层合金托盘；更换原有第二、三、四层喷淋层，全部喷嘴更换为高性能单向双头喷嘴；在原喷淋层上方增加一层喷淋层，新增一台浆液循环泵；将原有的两级屋脊式除雾器更换为三级高效屋脊式除雾器；吸收塔出口新增一套平板式烟道除雾器；从引风机出口至烟囱入口进行流场优化，包括进行全方位数模和对吸收塔进行物理模拟。

二、烟气治理技术与展望

• 1、除尘技术

• 高效湿法脱硫除尘机理示意图



二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 电厂采用MUNTERS原装进口最新第五代高效系列产品。脱硫后烟气夹带的液滴在吸收塔及烟道除雾器中收集，可确保净烟气的液滴含量不超过 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。
- 高性能除雾技术通过对除雾器的理论模型、结构以及流场进行研究发现，除雾器排放的液滴中的含固量与石膏浆液池中的含固量不一样，而跟除雾器排放的液滴粒径分布有关，除雾器出口液滴浓度 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，液滴含固量为7.5%，液滴携带含固量为 $1.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 由于吸收塔周边喷嘴覆盖密度不如中部喷嘴覆盖密度大，因此吸收塔周边区域阻力较小，导致大部分烟气从靠近塔壁附近通过喷淋层，会造成整个吸收塔截面上液气比分布不均匀，引起脱硫、除尘效率下降。电厂在喷淋层之间加装了两层烟气增效环。
- 此外，通过调整喷淋层与除雾器之间距离从原来的1.8米增加到3.6m，避免喷淋层喷出的浆液被烟气直接带入除雾器；以及为提高烟道除雾器入口流场稳定性，同时为减少吸收塔出口烟道阻力，改变吸收塔顶部形状，将塔顶高度整体增加4.3m。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 电厂3号机组高效除尘脱硫提效改造工程顺利实施并一次性通过168小时试运行。经过浙江省电科院性能测试，平均负荷保持在990MW以上，脱硫效率保持在99%以上，入口SO₂平均浓度为2024mg/Nm³、入口烟尘平均浓度12.5mg/Nm³时，出口SO₂平均浓度为13.1mg/Nm³，出口烟尘平均浓度为2.93mg/Nm³。现已安全运行超过300天，机组运行稳定、性能优良。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 管束式除尘除雾技术是在脱硫吸收塔内设置旋汇藕合脱硫除尘装置和管束式除尘除雾装置来提高除尘效率，在吸收塔入口含尘浓度不大于 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，吸收塔出口的含尘浓度可小于 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 运行业绩：万州电厂1号机组、神皖安庆电厂二期工程。由于该技术在1000MW机组上运行时间较短，技术的可靠性和稳定性尚需得到长期工程实践的检验。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 不同除尘方案的经济比较

机组容量		低低温+高效除尘吸收塔	金属极板湿式电除尘器
1000MW	投资（万元）	8557	9240
	运行费（万元/年）	2933	3239
600MW	投资（万元）	6765	7392
	运行费（万元/年）	2219	2468

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 对高效除尘吸收塔和管束式除尘除雾技术与金属极板湿式静电除尘器进行了技术经济比较结果表明，高效除尘吸收塔和管束式除尘除雾技术的投资和运行费均低于金属极板湿式静电除尘器。

二、烟气治理技术与展望

- 1、除尘技术
- 《固定污染源烟气排放连续监测系统技术要求及监测方法》（HJ/T76-2007）规定CEM系统测量颗粒物排放浓度的准确度为 $15\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，而超低排放烟尘浓度限值为 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，新规范正在征求意见，建议相关部门抓紧发布新规范以适应超低排放技术要求。
- 建议在CEM系统设备采购时选用与超低排放技术配套的烟尘连续监测仪表。

二、烟气治理技术与展望

1、除尘（雾）技术

“石膏雨”

- 近年随着公众环保意识的提高，“石膏雨”问题受到重视。“石膏雨”包含了“石膏”和“雨”两层含义。“石膏”指的是石膏浆液；“雨”指的是净烟气附近的冷凝液滴。控制“石膏雨”的主要技术手段包括：
 - ✓ 合适的塔内烟气流速：低于 3.5m/s
 - ✓ 合适的除雾器类型：屋脊式，三级
 - ✓ 湿式静电除尘器：降低石膏颗粒排放
 - ✓ 设置管式GGH系统，加热烟气

二、烟气治理技术与展望

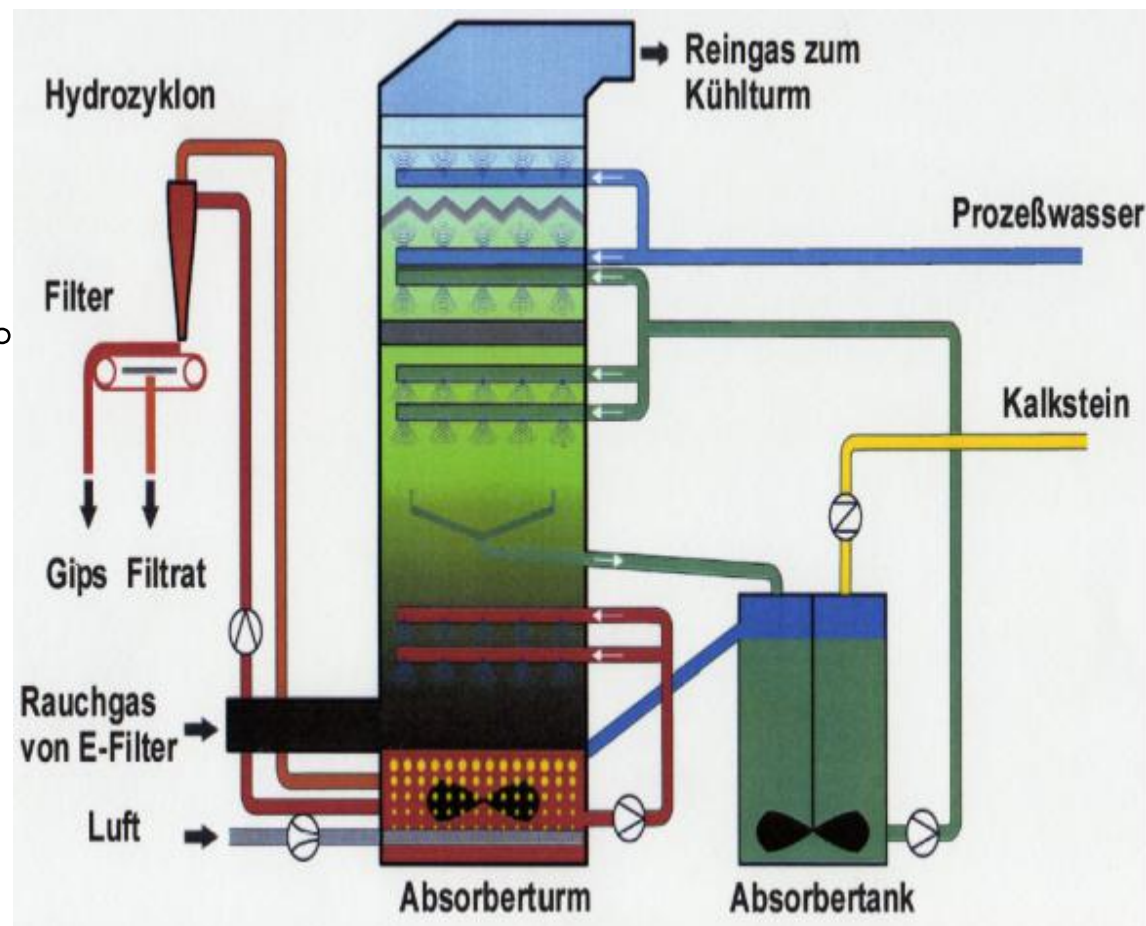
2、脱硫技术

- **石灰石-石膏湿法脱硫：** 常规单塔脱硫效率一般可达到97.5%。
- **采用高效的湿法脱硫技术：** 单塔双循环、双塔双循环、吸收塔两级串联、带双托盘的吸收塔等脱硫工艺，脱硫设计效率可超过97.5%。德国黑泵电厂，采用双循环法，脱硫效率可达到98%。
- 国内厂家如国电龙源、武汉凯迪、中电投远达具备设计和设备供货能力。

二、烟气治理技术与展望

2、脱硫技术

- 单塔双循环吸收塔优点：
 - ✓ 提高吸收塔对于机组负荷和燃料变化的快速反应能力。
 - ✓ 提高氧化空气供给量和分布效率
 - ✓ 增加吸收塔浆液停留时间



二、烟气治理技术与展望

2、脱硫技术

- **单塔双循环：**是将喷淋空塔中的 SO_2 吸收氧化过程划分成两个阶段，两个阶段各自形成一个回路循环。
- 第一阶段起预吸收作用，去除粉尘，氯化氢和氟化氢，部分去除 SO_2 ，使第二阶段不需面对氯化氢和氟化氢及粉尘对吸收过程的有害效应。第一阶段回路中(下环)，主要发生 CaSO_3 氧化成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的反应，最佳PH控制在4.5~5.5左右。
- 第二阶段实现 SO_2 吸收，效率高，石灰石相对过量，PH控制在5.8~6.4，可以应付负荷的变化，保证脱硫效率。

二、烟气治理技术与展望

2、脱硫技术

- 单塔双循环：已投运电厂：广州恒运电厂2×300MW机组、国电肇庆 2×350MW机组等
- 广东恒运电厂单塔双循环脱硫技术性能测试报告
(日期：2013.6.6 测试单位：广州市环境监测中心站)

序 号	处理前SO ₂ 浓度	处理后SO ₂ 浓度	单 位
1	1689	11	mg/Nm ³
2	1646	9	mg/Nm ³
3	1699	13	mg/Nm ³
4	1651	10	mg/Nm ³
平均值	1671	11	mg/Nm ³

二、烟气治理技术与展望

2、脱硫技术

- **双塔双循环：**主要解决现有电厂使用高硫煤导致的原脱硫系统出力不足问题。而充分利用已有脱硫相关设备，改造原吸收塔，又避免了拆塔重建的最不利局面；在不改变脱硫剂的情况下，显著提高了脱硫效率，大大减少改造工期和主机停运时间，降低了整个技改工程造价。
- **吸收塔两级串联：**为两个吸收塔串联，以提高脱硫效率。

二、烟气治理技术与展望

2、脱硫技术

- **带双托盘的吸收塔：**带双托盘的吸收塔的专利托盘技术源于美国巴威公司。
- 吸收塔采用带托盘的喷淋塔，内部无填充物，不仅解决了脱硫塔内的堵塞、腐蚀问题，而且由于入塔烟气经托盘均布，改善了气液传质条件，从而提高了塔内脱硫效率；同时，托盘上的存液也可脱除烟气中SO₂等污染物质，有效降低液/气比，与同类湿法脱硫技术相比约可降低40%以上的浆液循环量，从而大幅度降低物耗及能耗。

二、烟气治理技术与展望

- 2、脱硫技术
- 浙能六横电厂1号机组采用带双托盘的脱硫吸收塔，1台锅炉设1座脱硫吸收塔，每个吸收塔设5台浆液循环泵、4台氧化风机，托盘开孔率为27%。脱硫装置由浙江天地环保工程有限公司总承包建设。
- 2014年7月10日实测结果表明，脱硫装置进口二氧化硫浓度值 $824.8\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口二氧化硫浓度值 $14.23\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，实际脱硫效率为98.27%。

二、烟气治理技术与展望

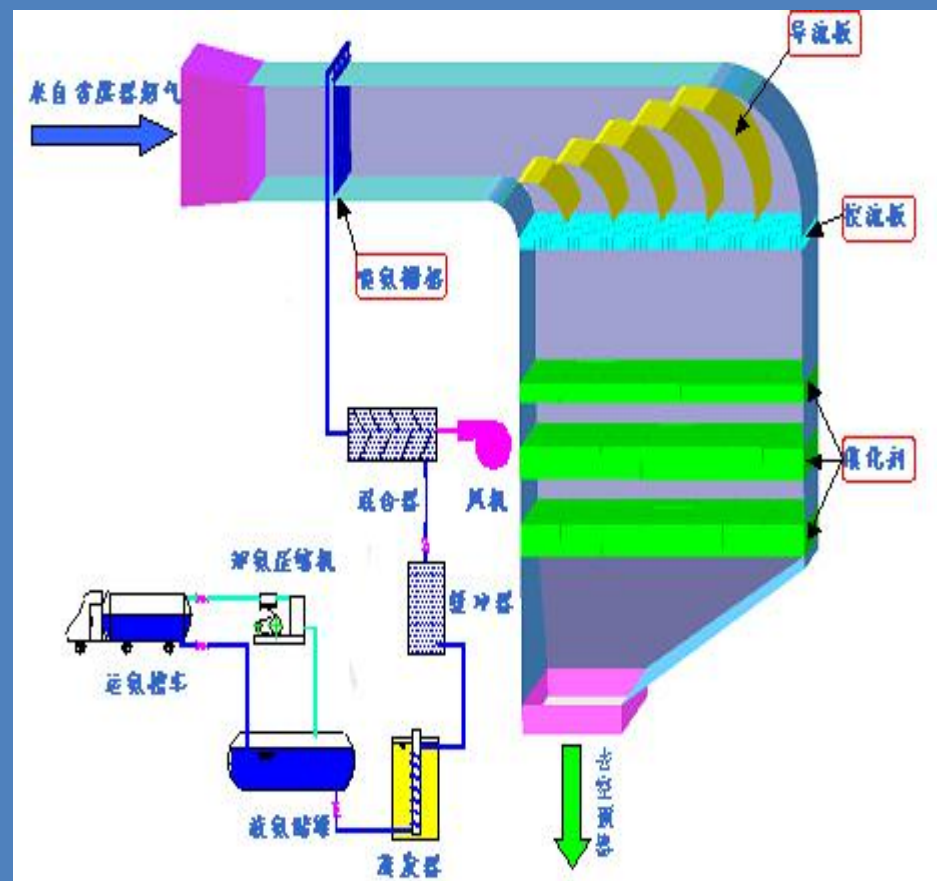
- 2、脱硫技术
- 新疆某电厂2X600MW机组进行脱硫提效改造，吸收塔入口二氧化硫浓度 $2200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 改造前，石灰石-石膏湿法脱硫工艺，一炉配一座吸收塔，每台吸收塔设4层喷淋层、4台浆液循环泵、4台侧进式搅拌器、2层屋脊式除雾器、2台氧化风机（1用1备），液气比为 $11.6\text{L}/\text{m}^3$ ，脱硫效率96%，出口二氧化硫浓度不大于 $88\text{mg}/\text{Nm}^3$

二、烟气治理技术与展望

- 2、脱硫技术
- 改造内容：增加一层喷淋层和提高浆液停留时间需进行吸收塔抬升改造，为了提高吸收塔液位将吸收塔浆池提高4m，相关烟道、工艺水系统进行改造；增加一层屋脊式除雾器
- 改造后，设有5层喷淋层，液气比为 $14.5\text{L}/\text{m}^3$ ，同时在浆液池中实现分区控制浆液pH值，3层屋脊式除雾器，出口液滴含量小于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫效率不小于98.5%，出口二氧化硫浓度不大于 $33\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 提高液气比，可提高传质单元数，提高脱硫效率
- 提高第5层喷淋层浆液pH值，可降低出口二氧化硫浓度

3、脱硝技术

火电厂在降低氮氧化物排放方面，首先应采用炉内低NO_x燃烧技术；其次，在SCR工艺与SNCR工艺之间进行比选，考虑到《火电厂大气污染物排放标准》GB13223-2011要求新建燃煤电厂氮氧化物排放浓度限值100mg/Nm³，燃机排放限值为50mg/Nm³，采用加炉后SCR脱硝技术。



• 3、脱硝技术

- 由于催化剂的设计与很多因素有关，配置的催化剂层数与脱硝装置效率之间没有绝对的对应关系，下列数据仅供粗略参考：
- 脱硝效率：40~50%，配置1层催化剂，预留2层，即1+2布置方式；
- 脱硝效率：50~80%，配置2层催化剂，预留1层，即2+1布置方式；
- 脱硝效率：大于80%，采用配置3层运行催化剂层，即3+1布置方式。

二、烟气治理技术与展望

- 3、脱硝技术
- 新疆某电厂2X600MW机组进行脱硝提效改造，SCR入口氮氧化物浓度 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 改造前，SCR脱硝工艺，反应器内设2层蜂窝式催化剂，催化剂节距为 7.4mm ，预留一层空间，脱硝效率为80%。
- 改造内容为增加备用层催化剂、备用层蒸汽吹灰器、通过数模进一步优化流场。增加催化剂体积相当于半层，可提高脱硝效率，减少下游空预器的堵塞。
- 改造后，SCR反应器内设3层催化剂，脱硝效率提高到85%以上。

二、烟气治理技术与展望

3、脱硝技术

- 脱硝还原剂有液氨、尿素、氨水三种。
- 尿素需采用热解装置还原成氨。
- 对采用以液氨为还原剂的SCR脱硝装置的项目，应在脱硝工艺系统及总平面布置和运输路径上考虑液氨的环境风险防范。
- 脱硝还原剂贮存、制备系统，应按全厂公用1套的原则统一设计。

二、烟气治理技术与展望

- 4、经济性分析
- 浙江某电厂2X1000MW机组实施超低排放增加的静态投资总额为32400万元，动态投资总额35600万元。
- 改造内容包括：湿式电除尘器、干式静电除尘器第五电场采用旋转电极技术、热媒水管式换热器、脱硫和脱硝改造等。
- 发电成本增加值总计为12692万元/年。超低排放升级单位发电成本增加为1.34分/kWh。
- 浙江省经信委对于超低排放机组奖励200小时/年，在机组经过168小时和环保验收后才能实施。

1、燃机排放限值技术经济的合理性

- 超低排放技术路线应根据电厂燃煤煤质、前置治理措施、场地等条件合理选择，如燃煤含硫量低、灰份低、煤质稳定，除尘可选用高效除尘吸收塔；如煤质变化大，应选用湿式电除尘器。
- 实现燃机排放限值，对于改善环境空气质量的作用有限。
- 单位污染物治理成本远高于全社会平均污染治理成本。

2、国内外电煤比例差距、国内相关行业大气污染物排放标准的差距。

- 我国电煤占煤炭消费比重约50%，远低于世界平均水平78%。
- 其他行业排放标准远低于火电厂排放标准，应实行煤炭利用的全过程治理。

- 作者简介：
- 姓名：杨建祥
- 职称：教高
- 专业：环保
- 工作单位：电力规划设计总院
- 地址：北京市安德路65号100120
- E-mail: jxyang@eppei.com
- 电话：13910054568



电力规划设计总院

Electric Power Planning & Engineering Institute

谢谢!