

燃煤电厂环保设计技术策略分析 及烟气脱汞技术进展

内 容

1

我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

2

我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

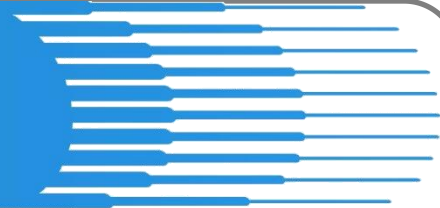
3

烟气脱汞技术进展

1

我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

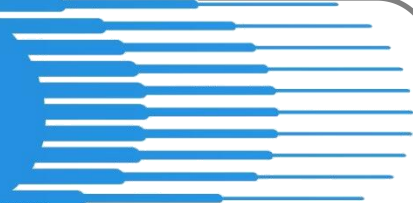


我国一次能源结构的特点，决定了未来几十年燃煤发电机组仍将是我国最主要的发电形式。预计到2020年，我国的火电机组装机规模将达到11亿千瓦。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

另一方面，我国提出2020年单位碳排放强度比2005年下降40%-45%的目标，燃煤火电机组是碳排放大户，摆在我们面前的主要难题是必须实现燃煤火电机组的节能减排技术和机组容量的同步发展。促进大容量、高参数燃煤机组技术的进步，是我国未来10年节能减排、减少碳排放的重要渠道。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析



我国的发展重点：依然是上大压小，热电联产和建设高效、节能、节水和环保型电厂，

布局特点：燃煤火电机组有从沿海地区向内地煤炭基地发展的趋势。煤炭基地的集约化开发将成为燃煤火电机组发展重点，并形成以煤炭基地为主的电站群。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

内蒙古、新疆等地区： 储存有我国最丰富的煤炭资源，有可能将在未来10年形成几个超(超)临界火电机组电站群。而这些地区属于高度缺水地区，必须采取高度节水措施，应考虑采取包括空冷机组等节水措施所带来的机组效率降低等因素。

新上火电机组： 燃烟煤或燃褐煤采用空冷等节水技术火电机组。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

我国沿海地区：未来可能还会发展大容量、高参数超超临界海水直流湿冷机组，其燃煤特点主要是烟煤；

我国部分内陆及边远地区：安徽、河南、四川、云南、湖南、湖北、黑龙江等地区还会上部分超（超）临界机组，燃煤主要是当地煤或外来煤为主。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析

• 2011版《火电厂大气污染物排放标准》

燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值
燃煤锅炉	烟尘	全部	30
	二氧化硫	全部	100 ⁽¹⁾
			200
			400 ⁽²⁾
	氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	全部	100 200 ⁽³⁾
	汞及其化合物	全部	0.03 ⁽¹⁾

注：(1)新建火力发电锅炉执行该限值。

(2)使用高硫煤地区的现有火力发电锅炉执行该限值。

(3)2003 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的燃煤锅炉执行该限值。

1、我国燃煤火电机组未来发展主要布局分析



在这个大背景下，电厂的设计起到关键的作用，应重点研究的问题：

火电机组环保工艺路线选择如何满足新的国家环保排放标准要求。

2

我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

2

我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

1) 烟气脱硝技术

➤ 低NO_x燃烧技术

目前对低NO_x燃烧技术的要求是，在降低NO_x的同时，使锅炉燃烧稳定，且飞灰含碳量不能超标，并兼顾锅炉防结渣与腐蚀等问题。低NO_x燃烧技术可以降低NO_x排放30~60%。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

• 选择性催化还原烟气脱硝技术

- SCR脱硝效率可以高达90以上%， NO_x 排放浓度可控制到 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，这些指标是其他任何一项脱硝技术都无法单独达到的。
- 增加锅炉烟道阻力约 $700\sim 1000\text{Pa}$ ，需提高引风机压头。
 -

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

➤ SCR反应器照片：



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

● 烟气脱硝工艺技术路线

对于已采用低NO_x燃烧技术或进行了低NO_x燃烧改造的系统，NO_x排放距离标准要求依然较远，要求脱硝效率较高的系统，应采用SCR烟气脱硝技术，方可达到要求的脱硝效率。

对于某些适宜的系统可以采用SNCR/SCR混合型脱硝。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

2) 除尘技术

——高效电除尘器

采用包括：高频电源、控制、数模流场优化等措施，对电除尘器采取多项提效措施，根据目前国内除尘器制造技术发展水平，选择双室五电场静电除尘器。当入口除尘器入口粉尘浓度 $20\text{g}/\text{Nm}^3$ 时，能使除尘器粉尘排放浓度控制在 $<30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

---布袋除尘器及电袋除尘器

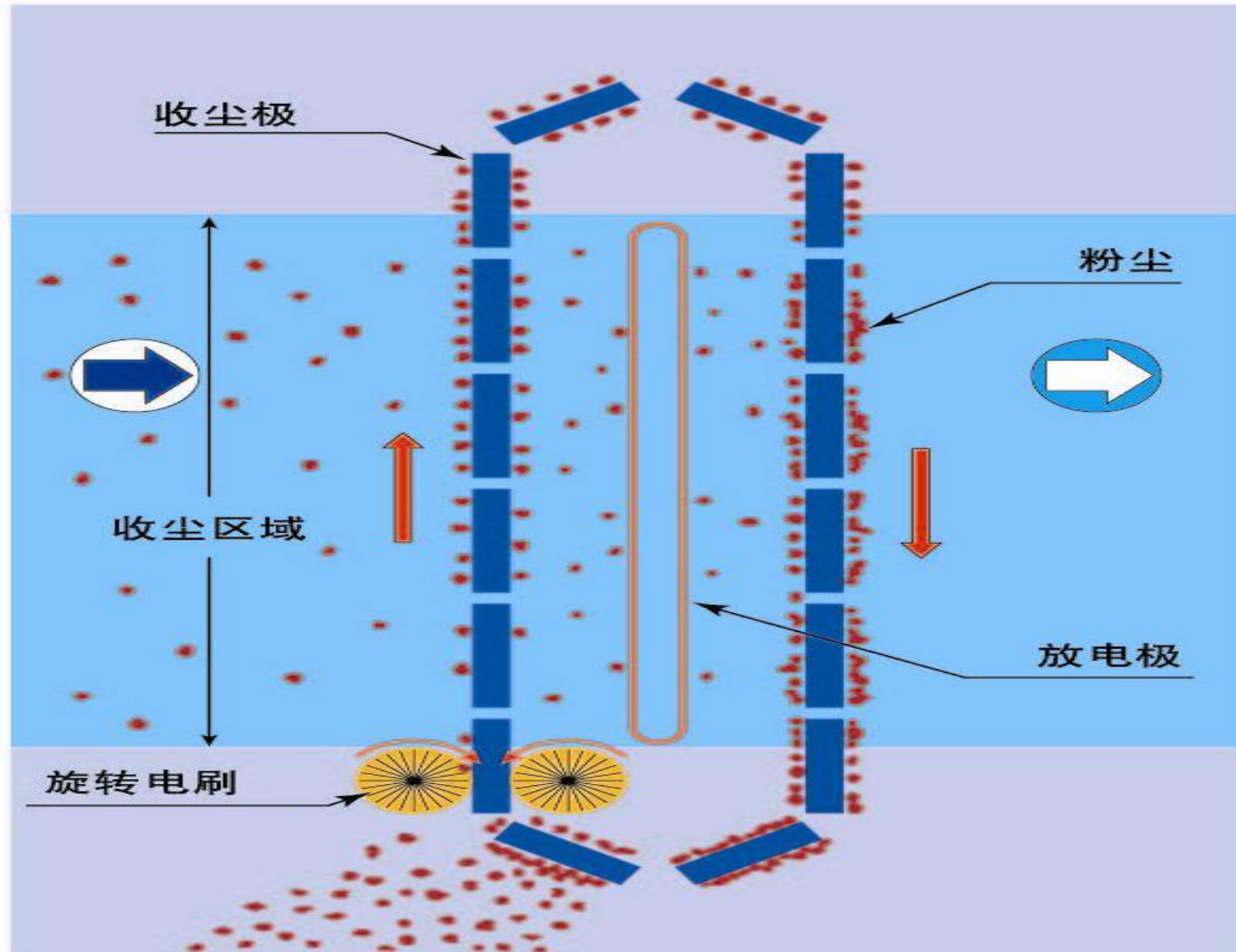
火电厂可考虑布袋除尘器及电袋除尘器进行除尘。根据目前国内布袋除尘器及电袋除尘器制造技术发展水平，选择布袋除尘器除尘效率可达99.95%，控制除尘器出口粉尘排放浓度在 $\leq 10 \sim 20 \text{mg/Nm}^3$ 之间。电袋除尘器在合理选择新型过滤材料（如选择PTFE基布保证过滤材料基本结构及尺寸稳定性）条件下，能够充分满足电袋除尘器后侧布袋的保证使用寿命及较恶劣的运行工况。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

——移动极板电除尘器

移动极板系统，能够利用旋转刷和移动的收尘极板去除捕集的粉尘，从而防止电晕，移动极板系统能有效地收集高电阻率的粉尘。收尘极板通过顶部驱动轮的旋转，以极慢的速度进行上下移动，带电粉尘在集尘区域内被收集。附着在极板上的粉尘在非集尘区域内，被夹住收尘极板的两把旋转电刷刮落。旋转电刷按照与收尘极板移动方向相反的方向旋转，防止粉尘的飞散，同时将粉尘刮落到料斗中。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

1000MW机组固定电极型ESP和移动极板型ESP的比较

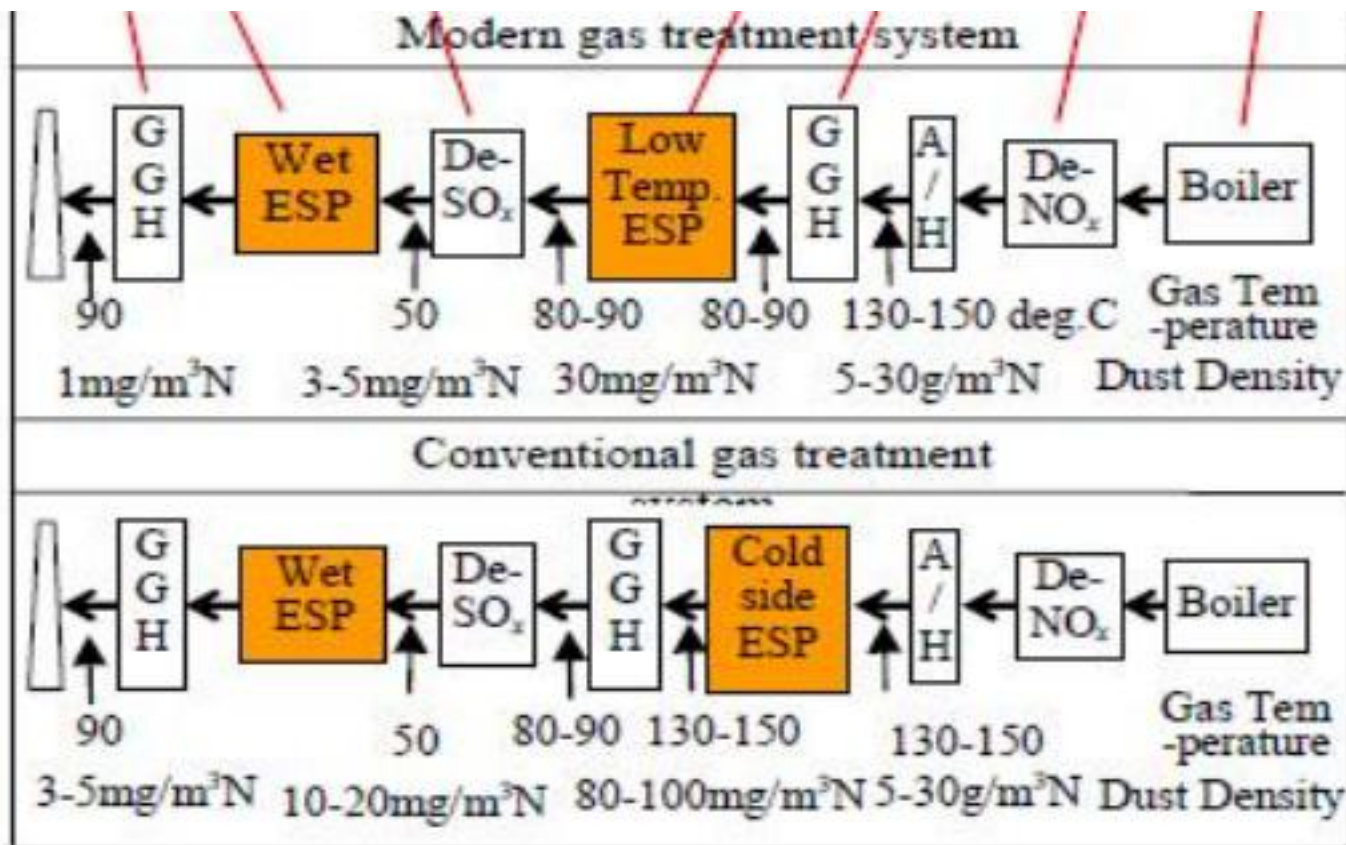
项目	固定电极型ESP	移动极板型电除尘器
电场数	4 (4个固定)	3 (2个固定+1个移动)
占地面积	(100%)	(74%)
重量	(100%)	(71%)
耗电量	(100%)	(67%)
出口粉尘浓度	30 mg/Nm ³	30 mg/Nm ³

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

相马共同火力发电（株）敬启/新地1号 (1994年, 1000MW机组)



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略



低温移动极板电除尘器高效烟气处理流程图

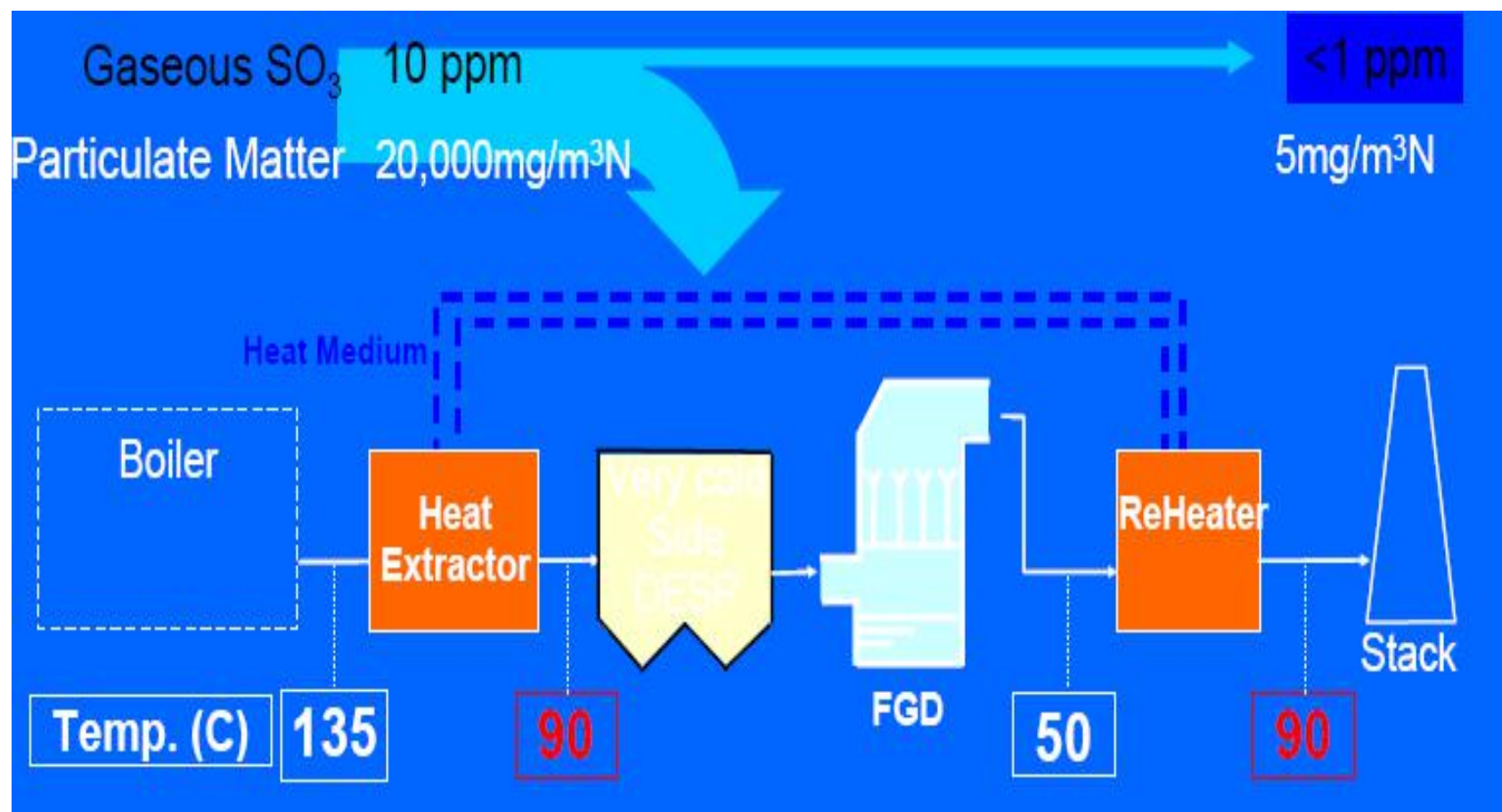
2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

• 低低温电除尘器

这一技术的关键是低温电除尘器工艺，日本新上500MW~1050MW火电机组基本全部采用低温电除尘器工艺。将MGGH的降温换热器安装在电除尘器（ESP）之前，主要工艺流程见工艺流程图。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

低低温电除尘器工艺流程图



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

低低温电除尘器与电厂热力系统及脱硫系统结合，具有综合节能、节水、环保的效果，并能满足燃中、低灰分煤条件下国家环保排放标准的粉尘的控制要求。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

以沿海燃用来煤相对可控的燃高热值、中、低硫煤，灰分中等的某已投入运行的2×1000MW国产化机组为方案，对采用低低温高效烟气处理系统与采用传统四电场电除尘器+湿法烟气脱硫工艺的主要环保排放指标、技术经济指标比较见下表。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

低低温高效烟气处理系统与传统工艺技术经济指标比较

序号	项目	低低温高效 烟气处理系统	传统电除尘器+ 湿法烟气脱硫工艺
1	设计煤质	山西神府煤	
2	电除尘器	三电场	四电场
3	脱硫入口实际烟气流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	4093355	4441290
4	烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	90	121
5	SO_2 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	1948	1948
6	SO_x 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	49	49
7	粉尘质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	45	69
8	脱硫装置出口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	80	80
9	SO_2 排放质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	97	97
10	SO_x 排放质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	<2.86	49
11	粉尘质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	22.5	34.5

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

序号	项目	低低温高效 烟气处理系统	传统电除尘器+ 湿法烟气脱硫工艺
13	电耗		
	烟气加热器/ kW	+600	基础值
	电除尘器/ kW	-4700	基础值
	吸风机轴功率/ kW	+437	基础值
	增压风机轴功率/ kW	-2061	基础值
14	总轴功率差/ kW	-5724	基础值
15	炉后综合厂用电率/%	-0.286	基础值

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(1) 低低温高效烟气处理系统与传统的除尘、脱硫工艺相比，综合环保性能有较大提高，粉尘排放质量浓度控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下， SOX 排放质量浓度控制在 $2.86\text{ mg}/\text{m}^3$ 以下。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(2) 低低温高效烟气处理系统与传统的除尘、脱硫工艺相比，综合能耗有较大降低。低低温高效烟气处理系统烟气换热器需要热媒水循环泵等设备，故电耗高于回转式烟气加热器。但电除尘器前设置了降温换热器，使进入电除尘器、吸风机和增压风机的烟气温度降低，尽管降温换热器增加了烟气系统的阻力损失，但较少的烟气体积流量，使吸风机的电耗略微提高；烟气脱硫系统不仅烟气体积流量小，因为降温换热器设置在除尘器前，烟气阻力损失也减少了，增压风机电耗大幅度降低，轴功率降低。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

由于烟气体积流量小、烟气比电阻小及ESP采用低温静电除尘器，四电场改为三电场，并采用先进的控制系统，使电除尘器的电耗大大降低。与传统的电除尘器+湿法烟气脱硫工艺（带GGH）相比，在除尘效率提高的情况下，炉后综合厂用电率降低0.286%，按年利用小时5500h计算，采用低低温高效烟气处理系统，每年可节电3146万kW·h。环保工艺运行技术经济指标主要看厂用电率，由此可见，低低温高效烟气处理系统有较好的运行经济性。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

采用2种烟气处理技术的投资费用比较 万元

投资项目	低低温高效烟气处理系统	传统电除尘器+ 湿法烟气脱硫工艺
烟气加热器	1200	基础值
电除尘器	-1300	基础值
吸风机（含电机）	-120	基础值
增压风机（含电机）	-200	基础值
烟囱及烟道防腐	-300	基础值
投资变化	-720	基础值

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

采用2种烟气处理技术的运行费用比较

项目	低低温高效烟气处理系统	传统电除尘器+湿法烟气脱硫工艺
年运行电耗降低/(万kW·h)	-3146	基础值
年运行费用/万元	-1887.6	基础值

注：表中年运行小时按5500h计算，当地电价按0.60元/(kW·h)考虑

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

与传统的除尘+湿法烟气脱硫工艺比，低低温高效烟气处理系统可降低烟气换热器、增压风机、烟道防腐等费用，可减少设备及材料投资720万元左右。减少年运行费用1887.6万元。具有投资和运行经济性，投资运行经济合理。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

低低温高效烟气处理技术烟气脱硫工艺的适用范围

我国近年来新上火电机组大多数为1000MW机组。从设计选择的煤质分析，煤的热值均为中、高热值、灰份中等、硫分均不高（低于1%），适合于采用低低温高效烟气处理技术烟气脱硫工艺。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

3) 烟气脱硫技术

---石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺的技术进步

采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺是目前效率最高且可靠性最高的脱硫工艺之一。近年来，国内、外在石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺脱硫效率提高方面又有很多进展。包括采用双托盘技术、吸收塔喷淋系统优化等一系列技术的采用对于烟气脱硫装置技术进步（特别是高硫煤地区烟气脱硫装置增容改造）起到重要作用。我国华能珞璜电厂已经使用双托盘技术对脱硫装置进行改造。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

- ### 烟气循环流化床脱硫工艺

烟气循环流化床半干法烟气脱硫工艺是一种气—液和气—固反应的烟气脱硫工艺。在脱硫塔内，一方面进行气相向液相的传质过程，烟气中的气态污染物不断进入溶液中，同时与脱硫吸收剂中的钙离子发生反应，另外一方面进行蒸发干燥的传热过程，颗粒上的液相水分受烟气加热影响不断在塔内蒸发干燥；最后再生成固体干态的脱硫灰渣。

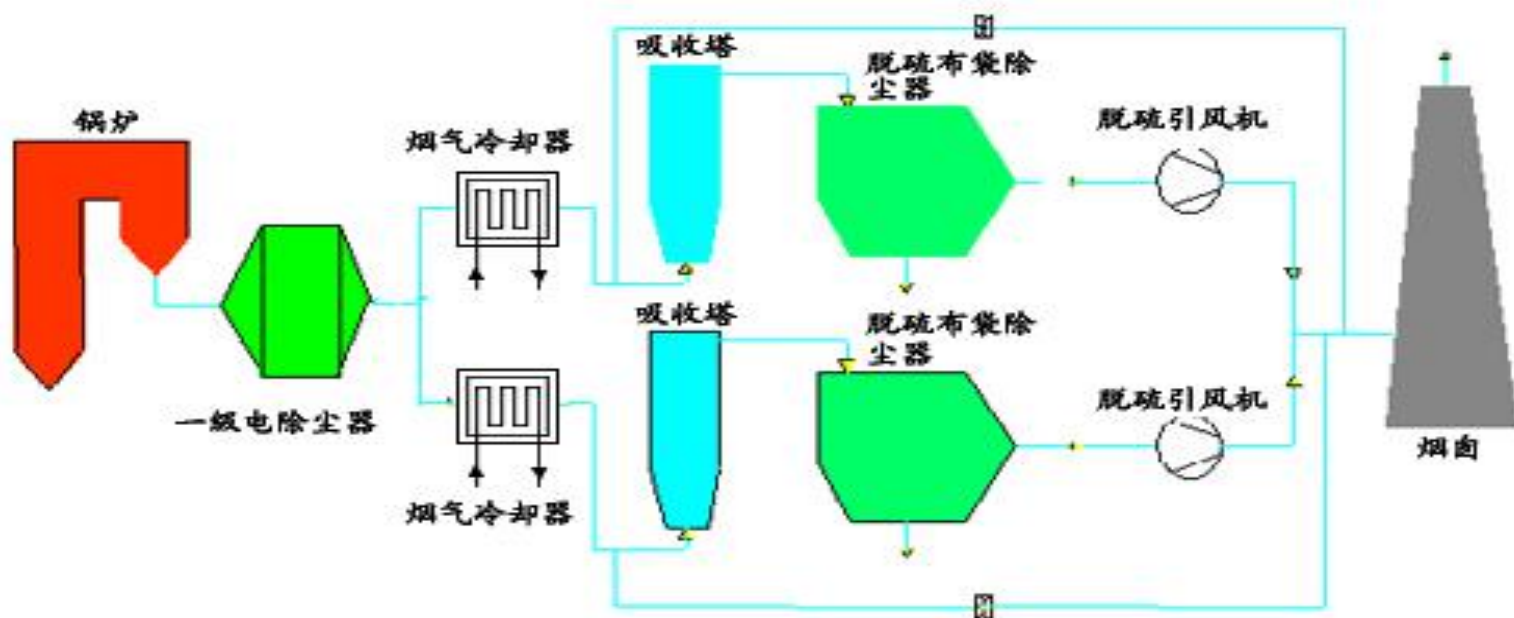
2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

烟气循环流化床脱硫工艺有较多业绩，技术成熟，且已经在300MW及600MW级机组得到商业运行。当燃煤含硫量为1~2%左右，钙硫比不大于1.3时，脱硫率可达90%以上，排烟温度在70℃以上。

我国新环保标准实施后，可在燃低硫煤锅炉与循环硫化床锅炉配套使用，满足国家新的国家环保排放标准。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

- 我们以某 $2 \times 660\text{MW}$ 燃褐煤超临界空冷发电机组的外部条件进行低温烟气循环流化床脱硫工艺节水技术研究。



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

采用低温烟气循环流化床脱硫工艺后，与采用湿式石灰石-石膏法烟气脱硫工艺耗水量215 t/h（带GGH）和300 t/h（不带GGH）相比，烟气循环流化床脱硫工艺的102t/h，分别减少用水113t/h和198t/h，节水率达到52.5%和66%。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

在采用低温烟气循环流化床脱硫工艺后，烟气脱硫装置入口烟气温度由150℃下降到120℃，在保证相同的运行状况和脱硫效率条件下，与目前使用的烟气循环流化床脱硫工艺相比，水量由180t/h降低到102t/h，实现节约用水78t/h，节水率达到43.3%，节水效果明显。

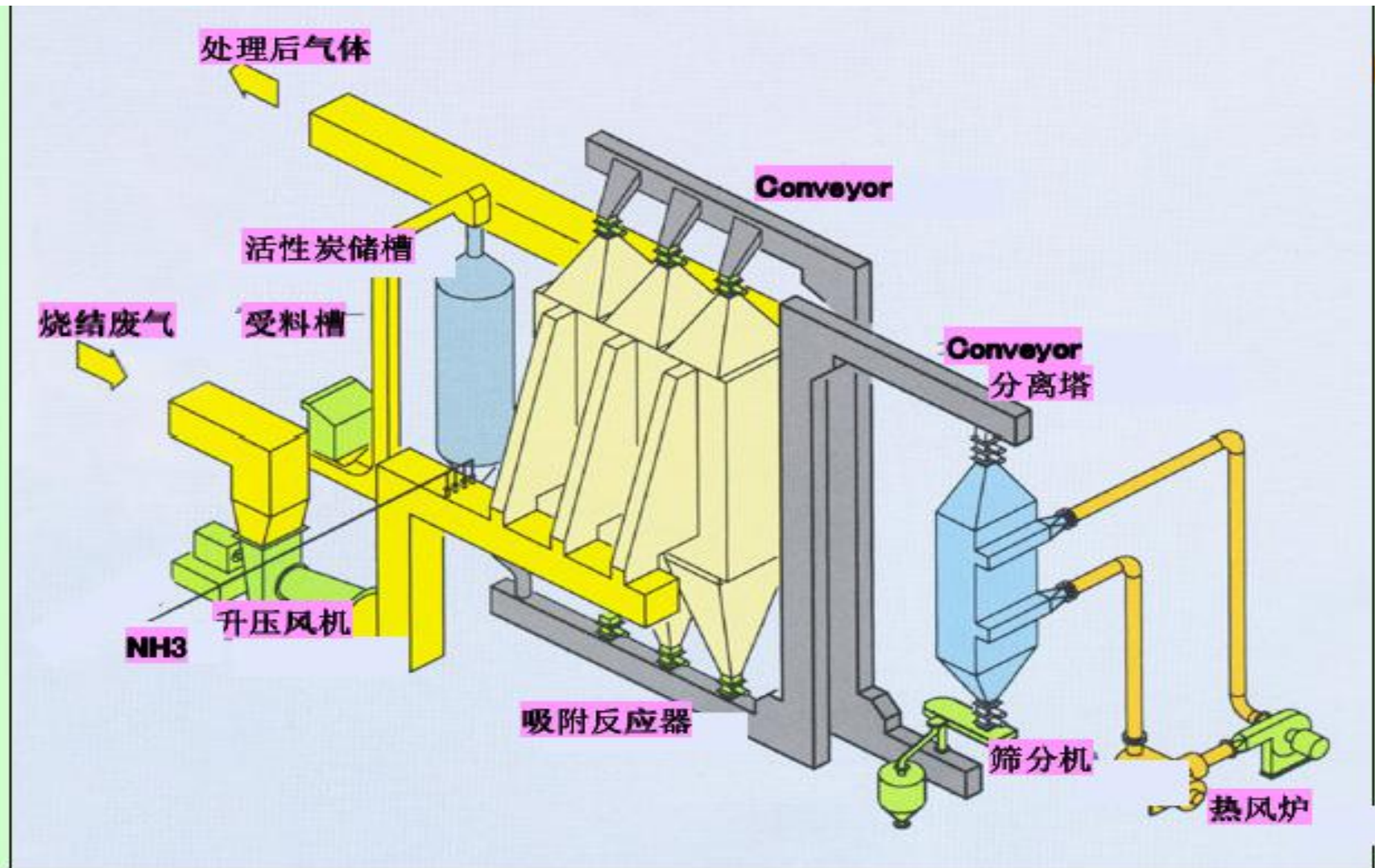
在现有烟气循环流化床脱硫工艺节水的基础上，降低水耗指标0.01 m³/s.GW以上。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

• 活性焦干法烟气脱硫工艺

该工艺是一种以物理—化学吸附原理为基础的硫资源可回收的干法烟气脱硫工艺。它利用以煤为原料制造为脱除烟气中 SO_2 、 SO_3 、汞等的可复原再生的吸附剂。活性焦通过吸附塔中吸附烟气中的 SO_2 ，吸附 SO_2 的活性焦通过活性焦输送系统进入解析塔，用烟气将其加热到 420°C 左右完成解析。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略



2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

我国燃煤火电机组环保技术发展策略

形成高效烟气处理工艺的体系

- 1、烟气低NOX燃烧器及SCR烟气脱硝工艺；
- 2、高效电除尘器、电袋除尘器或布袋除尘器、低低温电除尘器、移动极板电除尘器；
- 3、高效湿法烟气脱硫工艺、烟气循环流化床半干法烟气脱硫技术和活性焦干法烟气脱硫技术。

不同地区不同条件下工艺路线组合。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

针对我国不同地区，结合燃煤火电机组高效烟气处理技术特点，提出如下烟气处理技术发展策略。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(1) 中心城市。

特点：综合环保标准要求高，地区环保排放控制标准高于目前的国家环保标准。燃煤为优质烟煤，煤质具有高热值、中灰、低硫等特点。

建议：1) 采用 低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器、低低温电除尘器或移动极板电除尘器+湿法烟气脱硫工艺；2) 采用低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器或移动极板电除尘器+活性焦干法烟气脱硫、脱硝、脱重金属工艺。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(2) 沿海地区。

特点：综合环保标准要求高，地区环保排放控制标准需满足目前的国家环保标准。燃用煤质一般为我国优质烟煤或进口烟煤，煤质具有高热值、低灰、低硫等特点。

建议：采用低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器、低低温电除尘器或移动极板电除尘器+湿法烟气脱硫工艺。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(3) 内陆、边远地区。

特点：不在国家电源中心，机组排放需满足国家环保排放控制标准要求，煤质具有低热值、高灰、低硫或中等热值、高硫等特点。

建议：燃高灰分、低硫煤的火电机组，需要重点解决煤质中的灰分高问题。 1) 采用低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器或移动极板电除尘器+湿法烟气脱硫工艺； 2) 烟气循环流化床锅炉(或燃低硫煤锅炉)+烟气循环流化床半干法脱硫工艺+布袋除尘器或高效电除尘器。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

燃高硫煤火电机组，需要重点解决煤质中的硫分高问题。

采用低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器或移动极板电除尘器+湿法烟气脱硫工艺。

2、我国燃煤火电机组未来发展可采用的环保技术及技术发展策略

(4) 缺水地区。

特点：富煤缺水，机组排放需满足国家环保排放控制标准要求，煤质具有低热值、高灰、低硫或高热值、高灰、中低硫特点。

建议：需要采取节水型高效烟气处理工艺，1) 采用低 NO_x 燃烧器+SCR+高效电除尘器、布袋除尘器、电袋除尘器或移动极板电除尘器+活性焦干法烟气脱硫工艺；2) 循环流化床锅炉(或燃低硫煤锅炉)+低温烟气循环流化床脱硫工艺+布袋除尘器或高效电除尘器。

3

烟气脱汞技术进展

3、烟气脱汞技术进展

- 燃烧前脱除

燃烧前脱汞主要有两种方法：洗选和热解处理。这种方法主要是改变煤炭的性质和组成，其脱除效率与煤种和煤中汞的赋存形式有密切关系，变化范围非常大；我国原煤入洗率还非常低，尚无法起到有效减少汞排放的作用。

- 燃烧中脱除

主要是改进燃烧方式，流化床燃烧方式和低氮燃烧方式有利于汞向氧化态转化。

- 燃烧后烟气中脱除

目前燃煤火电机组使用较为广泛的控制汞排放的方法。

除上述直接脱汞方法外，一些在燃烧前和燃烧中加入添加剂（如 CaBr_2 等）的方法，可以有效提高燃烧后烟气中汞的脱除效率。

3、烟气脱汞技术进展

- 美国对80个电厂的测试结果表明：
静电除尘系统的汞脱除率可达至36%
布袋除尘系统的汞脱除率高达90%

颗粒物控制设备	平均脱汞率/%		
	烟煤	次烟煤	褐煤
冷端静电除尘器	36（0—63）	9（0—18）	1（0—2）
热端静电除尘器	14（0—48）	7（0—27）	无测试数据
布袋除尘器	90（84—93）	72（53—87）	无测试数据

- 在布袋除尘器内，烟气与滤料表面形成的滤饼层充分接触，滤饼层如同一个固定床反应器，可以促进汞的异相氧化和吸附；
- 热端静电除尘器在较高烟气温度下运行，不利于汞与飞灰之间的吸附和异相反应，因此脱除效果不及冷端静电除尘器。

3、烟气脱汞技术进展

- 对我国23个电厂的测试结果表明：
静电除尘系统的平均脱汞率为28%
布袋除尘系统的平均脱汞率为76%

颗粒物控制设备	平均脱汞率/%		
	烟煤	无烟煤	褐煤
静电除尘器	28 (6 — 43)	15 (13—18)	14 (4 —24)
布袋除尘器	76 (9— 86)	无测试数据	无测试数据

3、烟气脱汞技术进展

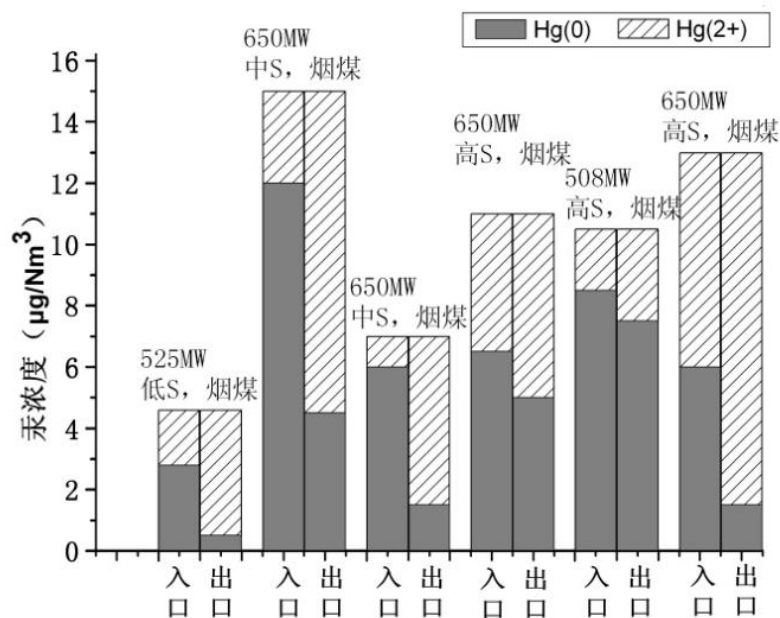
- 气体元素汞的性质不活泼，既不易吸附也不溶于水，因此较难被现有污染物控制设备脱除。
- 因此，所有电厂脱汞技术的思路都是促进元素汞向氧化态或颗粒态转化，走复合式污染控制之路：
 - （1）促进元素汞转化为颗粒吸附态，再利用除尘器回收脱除；
 - （2）促进元素汞转化为氧化态，利用氧化汞的水溶性，在湿法烟气脱硫装置中脱除。
- 由于元素汞难以吸附到固体物质表面，因而在第一条路线中，有时也需要采取一定的措施，提高汞的氧化率。

3、烟气脱汞技术进展

- 从国内外测量结果来看：
- 湿法烟气脱硫可去除烟气中大部分的氧化汞，但几乎不脱除元素汞；
- 湿法烟气脱硫装置对烟煤中汞的脱除效率最高，主要与烟煤的高氧化率有关。优化协同脱汞有效措施是使烟气中氧化汞量最大化；
- 同时安装静电除尘器和湿法烟气脱硫装置的系统，平均汞脱除率可达到50%（4%~88%）；
- 在湿法烟气脱硫中，可能会还原氧化汞（再释放）。这可以通过调整吸收塔化学环境而改变。

3、烟气脱汞技术进展

- 美国6个电厂SCR烟气脱硝工艺前后烟气中汞的形态变化:



- 通过SCR烟气脱硝工艺后, 大多数电厂的元素汞含量都有明显减少, 氧化汞增加, 但总汞量几乎不变。大量元素汞向氧化汞转化, 将显著提高后续除尘器和湿法烟气脱硫装置的脱汞效果。德国、荷兰、中国等电厂的测量也发现类似情况。

3、烟气脱汞技术进展

SCR促进氧化可能的原因：

- 1) 对汞直接催化氧化；
- 2) 改变烟气的化学性质；
- 3) 增加烟气在尾部烟道的停留时间。

添加卤族添加剂的方法，可提高烟气通过各种污染物控制设备时的脱汞效率：

在工程应用中，常采用的是在**输煤皮带**和**煤粉管道**上喷射卤素（一般为 CaBr_2 ）。另外，新提出的一种技术是在布袋除尘器的膜上添加氧化剂。

3、烟气脱汞技术进展



3、烟气脱汞技术进展

美国Pleasant Prairie燃煤电厂测试结果：

600MW，燃PRB次烟煤，安装有SCR、ESP和WFGD

向煤中添加25mg/kg的添加剂后，汞脱除率持续维持在92%–97%。

3、烟气脱汞技术进展

吸附剂喷射技术所使用的吸附剂分为三类：

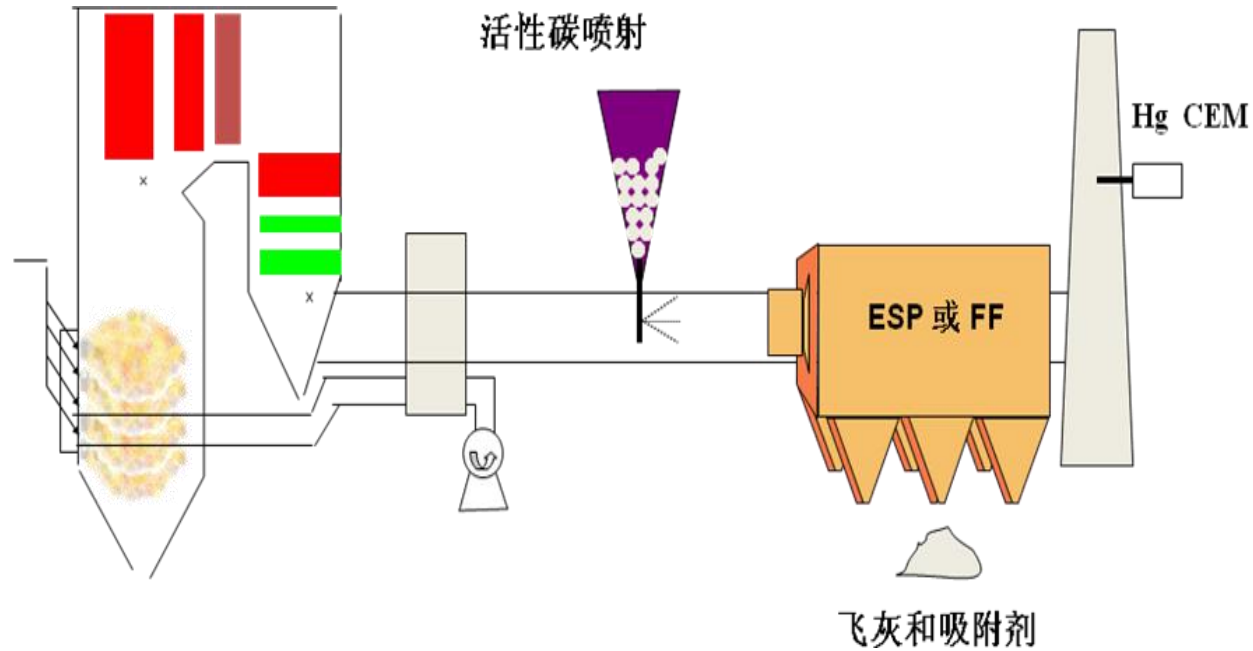
未处理的吸附剂，例如活性炭（activated carbon, AC）；

特殊处理的吸附剂，如溴化活性炭；

自产生的吸附剂，如未燃尽碳和飞灰。

- 烟道活性炭喷射技术（ACI）是目前最为成熟的主动脱汞技术，在垃圾焚烧炉汞排放控制中取得了较好的效果；
- 目前在美国，一些ACI设备已投入运营。有些电厂使用的是未处理的活性炭；有些电厂为减少活性炭用量，提高脱汞效率，使用的是特殊处理的活性炭。
- 新研制的活性炭对汞的吸附能力不断提高。

3、烟气脱汞技术进展



3、烟气脱汞技术进展

向除尘器之前的烟道中喷入活性炭，使活性炭在伴随流动过程中不断吸附烟气中的汞，将气态汞转化为固定在吸附剂上的颗粒汞，然后利用颗粒物排放控制装置将其脱除。

3、烟气脱汞技术进展



活性炭储仓



给料机



喷射管

3、烟气脱汞技术进展

底特律爱迪生电厂只安装了ESP，燃次烟煤，煤中氯含量低，自然脱汞率较低（约20%）。而以每分钟48mg/m³的速率喷射活性炭后，其30天平均脱汞效率达到94%。

3、烟气脱汞技术进展

- 未经处理的活性炭脱汞能力有限，特别对于燃次烟煤和褐煤的电厂，由于氯含量较低，需要大量喷入才能达到较好脱汞效果。为了增强活性炭吸附剂的脱除效率，研制了一些改性活性碳吸附剂，能够以较小的喷入量达到较好的控制效果。
- 改性活性炭，包括热力活性炭和化学活性炭。热力活性炭是指表面经过热力活化处理的碳，化学活性炭是指表面经过卤素处理的碳。两种改性活性炭在较低温度下都有较好脱汞效果；但温度升高时，热力活性炭效率显著下降，化学活性炭效果变化不大。
- 在美国一个燃用褐煤（North Dakota褐煤）的电厂测试常规活性炭和溴化活性炭的汞吸附性能。气态总汞浓度： $7.5\sim 13\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，氧化汞不到10%。不喷入吸附剂时，经过旋转喷雾脱硫装置和布袋除尘器后，汞脱除率不到10%。当以 $96.2\text{mg}/\text{m}^3$ 的速率喷入某种未改性活性炭时，脱汞效率达75%。当以 $6.0\text{mg}/\text{m}^3$ 的速率喷入同种活性炭溴化得到的溴化活性炭时，脱汞效率大于85%，当喷入溴化活性炭速率增加到 $24.0\text{mg}/\text{m}^3$ 时，汞脱除率增加到90%。

3、烟气脱汞技术进展

- 活性炭喷射技术工程应用的难点和问题：
 - 燃煤电厂烟气量大，除尘器前活性炭颗粒的停留时间较短，且活性炭会与烟气中其他成分发生反应等因素，使得活性炭的消耗量增加；
 - 使用活性炭提高电厂运行成本；
 - 喷入活性炭会增加飞灰中的碳含量，当飞灰中总含碳量（包括未燃尽碳和喷入的活性炭）超过1%时，会影响飞灰的利用；
 - 燃用褐煤或者SO₃浓度较高，ACI技术的脱汞效果并不理想。
- 使喷射活性炭后的飞灰仍可用于水泥工业的方法：
 - 采用特殊处理的活性炭，使其不影响水泥工业使用；
 - 将活性炭的喷射点改在除尘设备之后，另外再安装1个布袋除尘器脱除活性炭，这种方法的设备投资成本较高。

3、烟气脱汞技术进展

- 美国威斯康辛Weston电厂4号机组：

容量580MW，安装有SCR，干法烟气脱硫和布袋除尘器。

CaBr_2 +微ACI能获得92%的脱汞率，只消耗很少量 CaBr_2 和活性炭。



测试条件	活性炭 (mg/m^3)	CaBr_2 (l/hr)	汞脱除 率
基础条件	0	0	40%
ACI	25.6	0	90%
CaBr_2 +微ACI	3.2	3.79	92%
CaBr_2	0	9.1	87%

3、烟气脱汞技术进展

- 汞控制的效果和成本受许多因素的影响。主要包括：
- 煤的品种/煤质：煤中氯、硫和铁的含量；
- 接触时间/温度：增加接触时间可提高汞的脱除效率；
- 烟气中 SO_3 的浓度： SO_3 会降低汞的脱除率，锅炉和SCR中都会产生 SO_3 ，进行烟气调质以提高静电除尘的效率时，也会增加 SO_3 浓度；
- 除尘装置：袋式除尘比静电除尘更有利于脱汞（静电除尘需增加3-5倍的活性炭用量）；
- 吸附剂的选择和化学品添加；
- 流量分布。

3、烟气脱汞技术进展

• 汞控制方法的经济性和可行性比较

措施	投资费用	运行费用	说明
洗煤	中等	中等	一般去除效率可达30%。
混煤	很低	很低	次烟煤和烟煤混合，可能影响锅炉性能。
煤添加剂	很低	中等	会增加烟气的腐蚀性。
除尘装置	低	低	一般去除效率小于30%。
脱硫装置	很低	低	需要控制汞的再释放。
脱硝装置	中等	中等	可能需要更换催化剂种类。
活性炭喷射	低	高	飞灰的商业利用价值受到限制。
TOXECON	很高	高	保证飞灰的商业利用价值。

3、烟气脱汞技术进展

- 针对燃煤电厂汞污染控制，尽管已开发出了许多种方法，不过多数尚处于研究阶段。
- 目前较为成熟且投入商业化应用主动脱汞工艺主要有三种：
1、活性炭喷射；2、添加氧化剂（一般为卤族元素，主要是 CaBr_2 ）；3、添加氧化剂辅以微量活性炭喷射。这几种工艺再配合SCR、ESP和FGD的使用，可以达到较好的汞控制效果。
- 除此之外，混煤燃烧也是一种可行的工艺。将卤素含量（特别是溴含量）较高的煤种，与卤素含量较低的煤种混合燃烧，这种方法可以提高汞脱除效率，并且无副产物的处理问题，具有很好的经济性。

谢谢!