

第一届煤电超低排放和节能改造技术交流研讨会



于娟

上海外高桥第三发电有限责任公司研发中心主任助理，上海申能能源科技公司工程技术部专业工程师。主要从事锅炉及电厂热力系统的优化、改造、系统分析及环保、节能减排工作，同时负责实施“外三”技术的对外推广及输出。自2008年开始先后全程参与了“外三”烟气余热回收利用、空预器优化改造、弹性回热技术、广义回热技术、全天候脱硝、除尘综合优化、石膏雨治理等一系列重大创新及节能减排项目，并在其中担任主要工作职务。

节能型低成本超低排放系列技术

2016年3月9-10日 中国·济南

节能型低成本超低排放系列技术

演讲人：于娟



上海外高桥第三发电有限责任公司



上海申能能源科技有限公司

二〇一六年三月

演讲内容

- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术
- 六、低能耗石膏雨治理技术
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

演讲内容

一、背景和需求

二、“外三”节能减排技术创新及成效简介

三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术

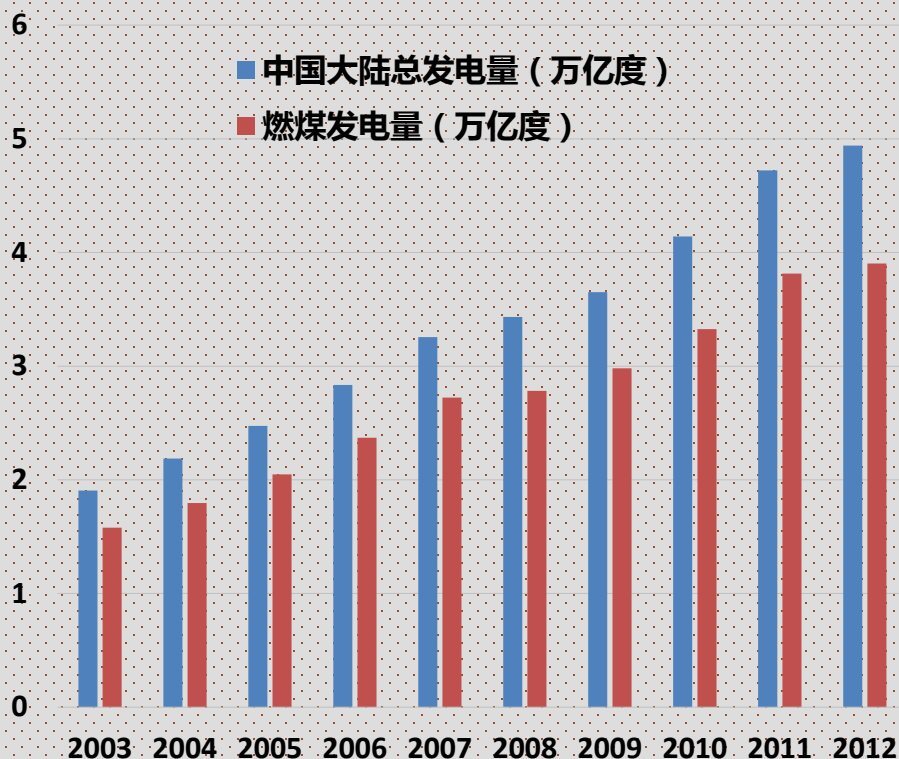
四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术

五、节能型高效脱硫系列技术

六、低能耗石膏雨治理技术

七、冷凝法烟气除湿技术

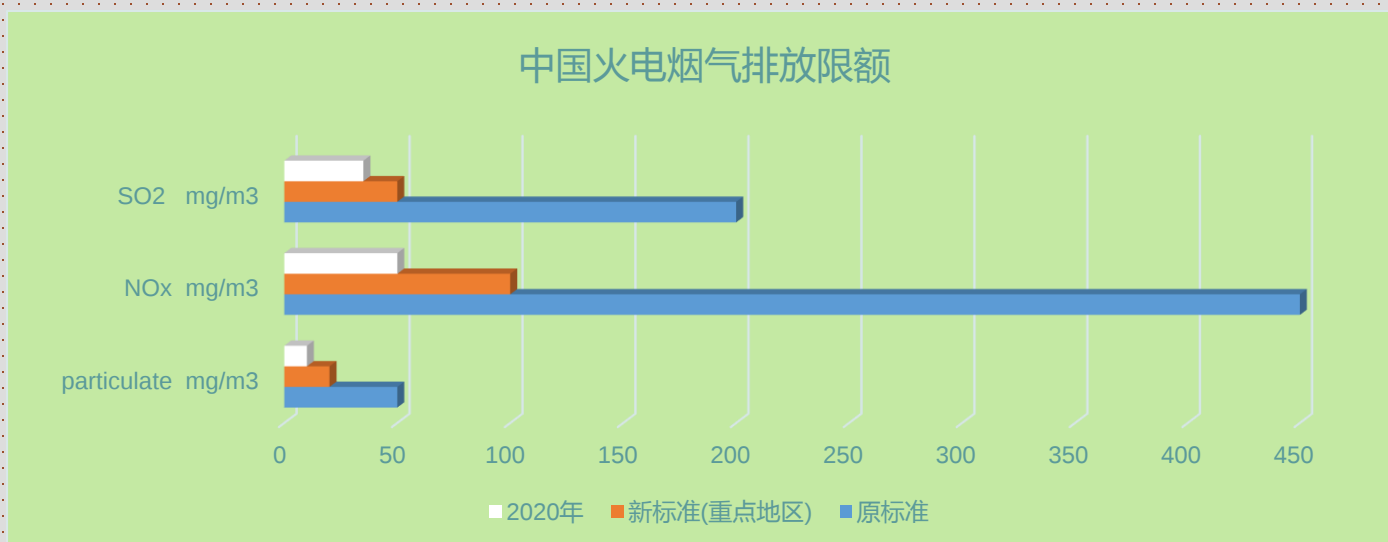
八、结束语



■ 随着各种可再生能源的开发利用，煤电在整个电量中的比重会有所下降，不过，由于中国已探明的一次化石能源中煤炭占了近90%的特殊性，以及中国发电总装机容量已超过13亿千瓦的现实，除煤炭以外的任何发电形式都无法承担起如此巨大的电力需求。因此在今后相当长的一段时期内，煤电的主体地位不会改变。

- 煤电是目前重要的大气污染源，为协调好环境与电力发展的矛盾，煤电行业的高效化和发展节能减排技术应作为我国长期的发展战略。

- 基于中国的煤电占比达世界平均水平的两倍及严峻的大气污染形势，为缓解环境压力，中国政府制定了史上最严厉的煤电烟气排放标准。
- 至2020年，SO₂: 35 mg/m³ (原200 mg/m³) ; NO_x: 50 mg/m³ (原450 mg/m³) 烟尘: 10 mg/m³ (原50 mg/m³)



传统环保的困局

高环保标准、低排放→
高投入、高能耗、高运行
费用



如：对于50mg/m³的NO_x排放标准，不可能通过低氮燃烧来满足。因此所有电站锅炉都将安装脱硝装置。目前普遍采用的是选择性催化还原法（SCR）技术。

破解传统环保困局：

寻求节能型环保技术，使社会效益与企业效益和谐统一！

通过“节能型全天候高效脱硝”、“节能型高效除尘”、“零能耗脱硫”“低能耗石膏雨及烟羽治理技术”等系列技术的成功研发，这一传统环保困局已被打破。

演讲内容

一、背景和需求

二、“外三”节能减排技术创新及成效简介

三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术

四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术

五、节能型高效脱硫系列技术

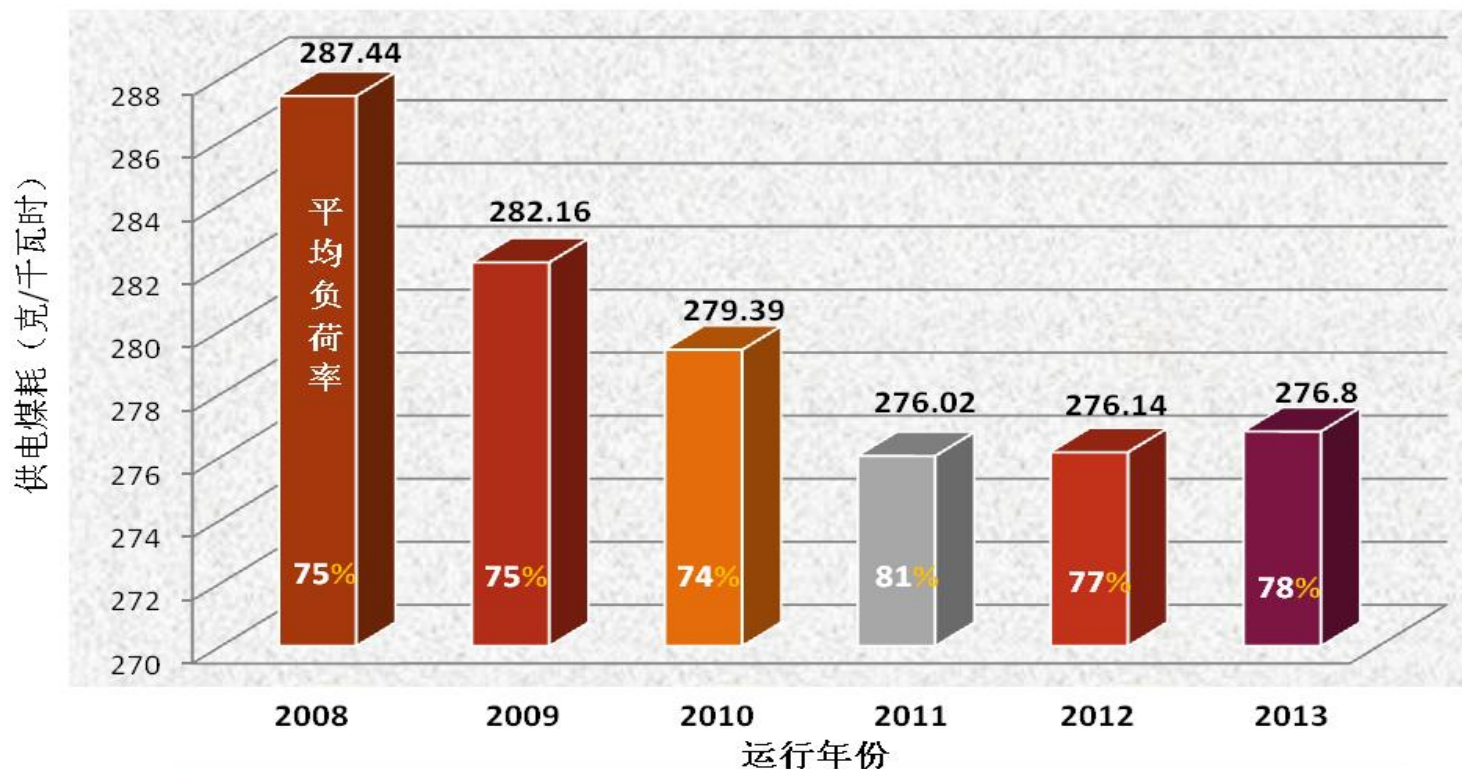
六、低能耗石膏雨治理技术

七、冷凝法烟气除湿技术

八、结束语

技术经济指标

年平均运行供电煤耗（含脱硫、脱硝）



注：为降低生产经营成本，2013年掺烧20%高水分，低发热量的印尼褐煤。

“外三” 机组历年平均供电煤耗

机组主要环保数据

统计区间：2015年全年（两台机组）

	单位	平均值	国家标准 (重点城市)	超净排放 (燃机标准)
NO _x 排放浓度	mg/Nm ³	17.97	<100	<50
SO ₂ 排放浓度	mg/Nm ³	14.83	<50	<35
粉尘排放浓度	mg/Nm ³	2.35*	<20	<10
SO ₃ 排放浓度	mg/Nm ³	2.74	--	--

*注：2015年5月，委托权威第三方单位采用滤膜法对净烟气中的粉尘浓度进行手工测量，在900MW、750MW、600MW工况下分别为：0.74mg/Nm³、0.49mg/Nm³、0.38mg/Nm³。外三安装了满足湿烟气条件的低量程高精度粉尘表计，#7、#8机组的粉尘表计分别于2015年11月和12月将数据连入环保监测系统(CEMS)，2.35mg/Nm³为在线仪表显示均值。目前，我国还没有SO₃排放浓度限值的相关规定。

演讲内容

- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术
- 六、低能耗石膏雨治理技术
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

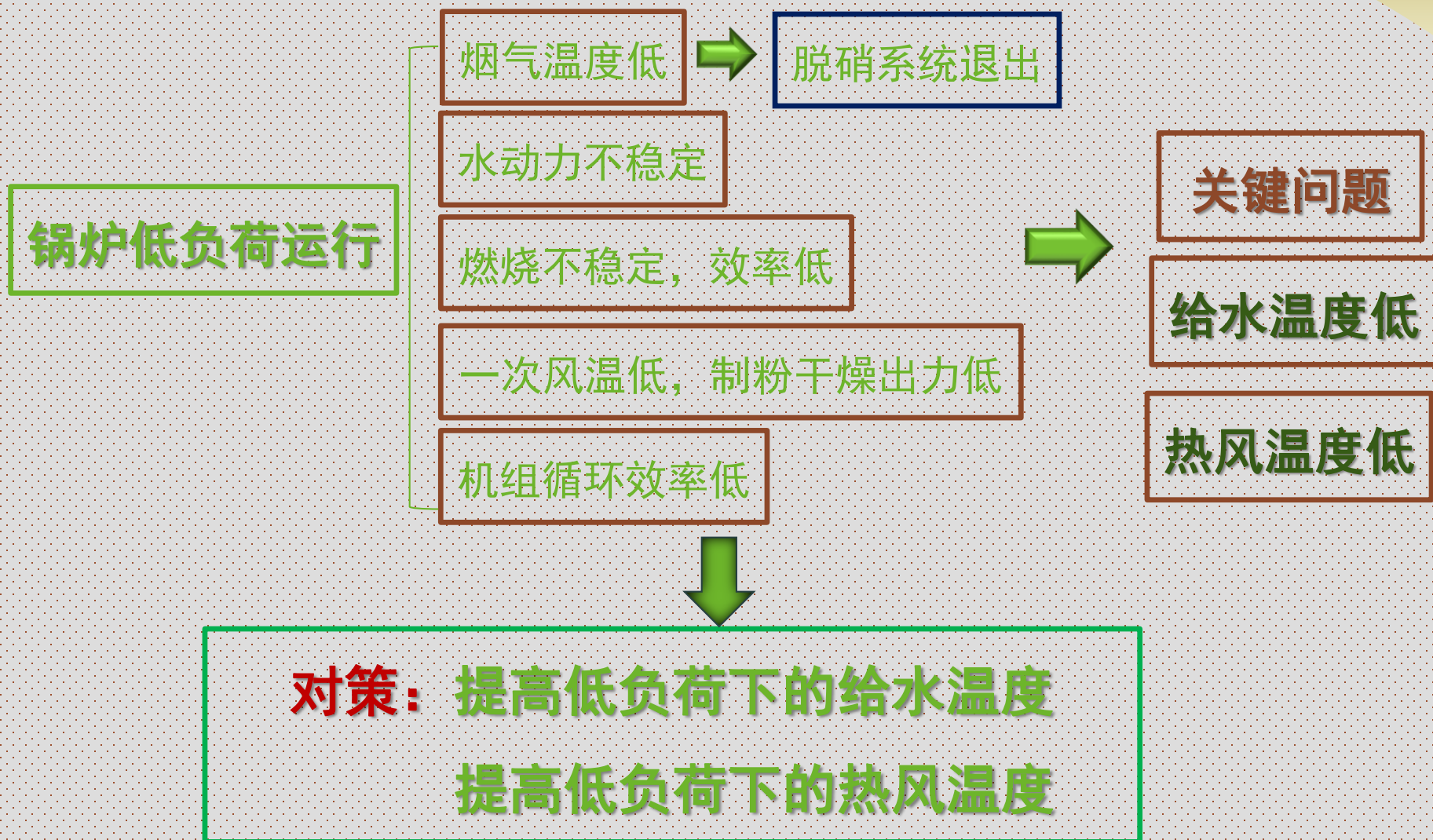
❖ 脱硝运行存在的三大问题：

- 1、中国发电的主要方式为煤电，其调峰不可避免。上海的调峰范围为40~100%。在低负荷下的SCR工作烟温将不能维持，SCR不得不退出运行，但此时锅炉的NO_x产生浓度高达额定负荷时的2-3倍。这意味着在更需要脱硝的情况下，SCR反而却不能作为。
- 2、SCR在运行时，会有少量的NH₃逃逸，并与烟气中的SO₃反应生成NH₃HSO₄，易造成空预器低温段的强烈腐蚀及堵灰，继而风机用电显著增加，严重的甚至可危及锅炉的运行安全及出力。外三的SCR运行不到一年，空预器就发生了较严重的堵塞。
- 3、催化剂寿命有限，需定期更换，费用高，工作量大，废旧催化剂的后续处理困难。

❖ “外三” 的解决方案

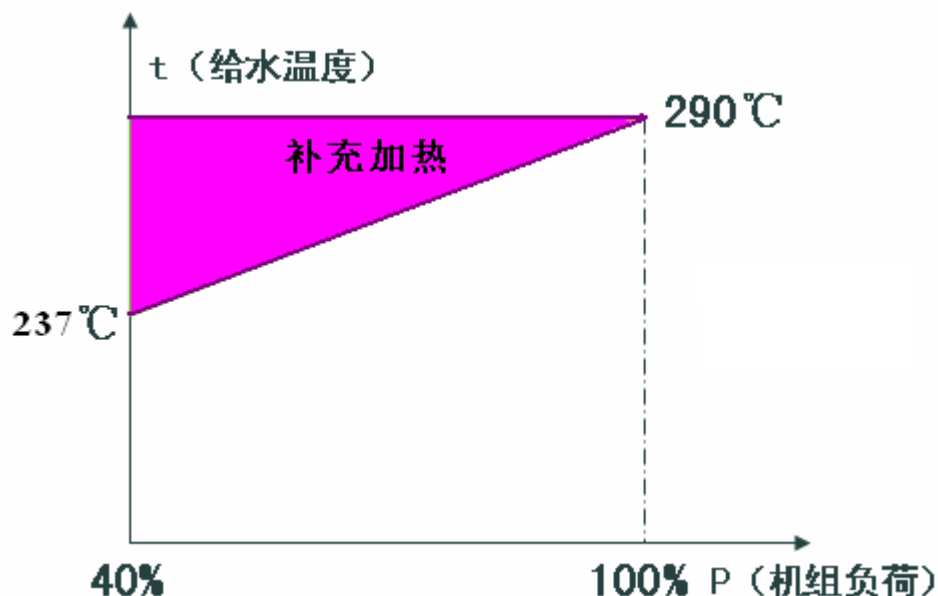
- 1、基于弹性回热原理的--节能型全天候脱硝技术
- 2、基于广义回热原理（I期）的--节能型空预器防堵塞技术
- 3、基于广义回热原理（II期）的--低氮低氧燃烧技术
- 4、基于蒸汽加热启动技术的--节能型催化剂延寿技术

锅炉低负荷运行所产生的一系列问题及原因分析：

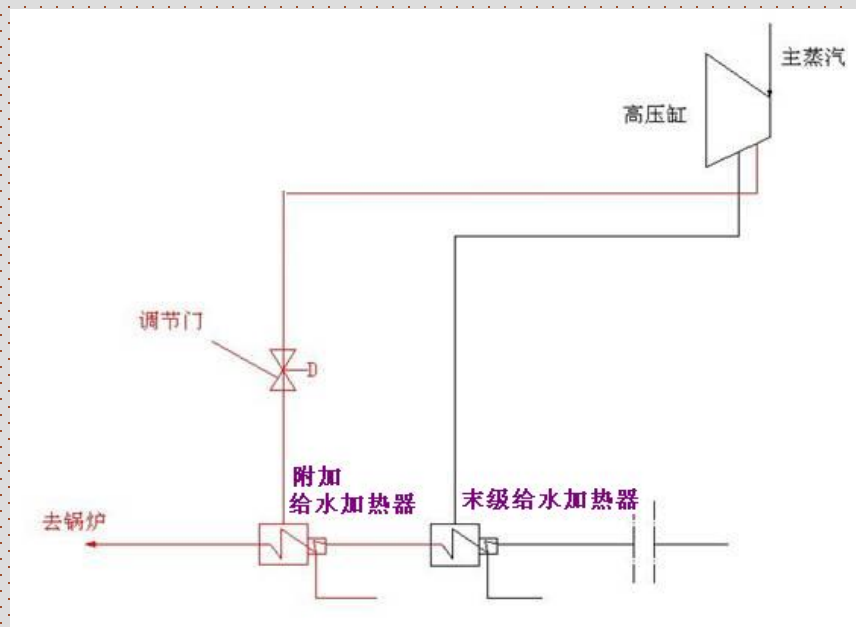


弹性回热技术——可调式抽汽补充加热锅炉给水

- ❖ 于高压缸处选择一个合适的抽汽点，并相应增加一个抽汽可调式的给水加热器
- ❖ 在负荷降低时，通过调节门可控制该加热器的入口压力基本不变，从而能维持给水温度基本不变。



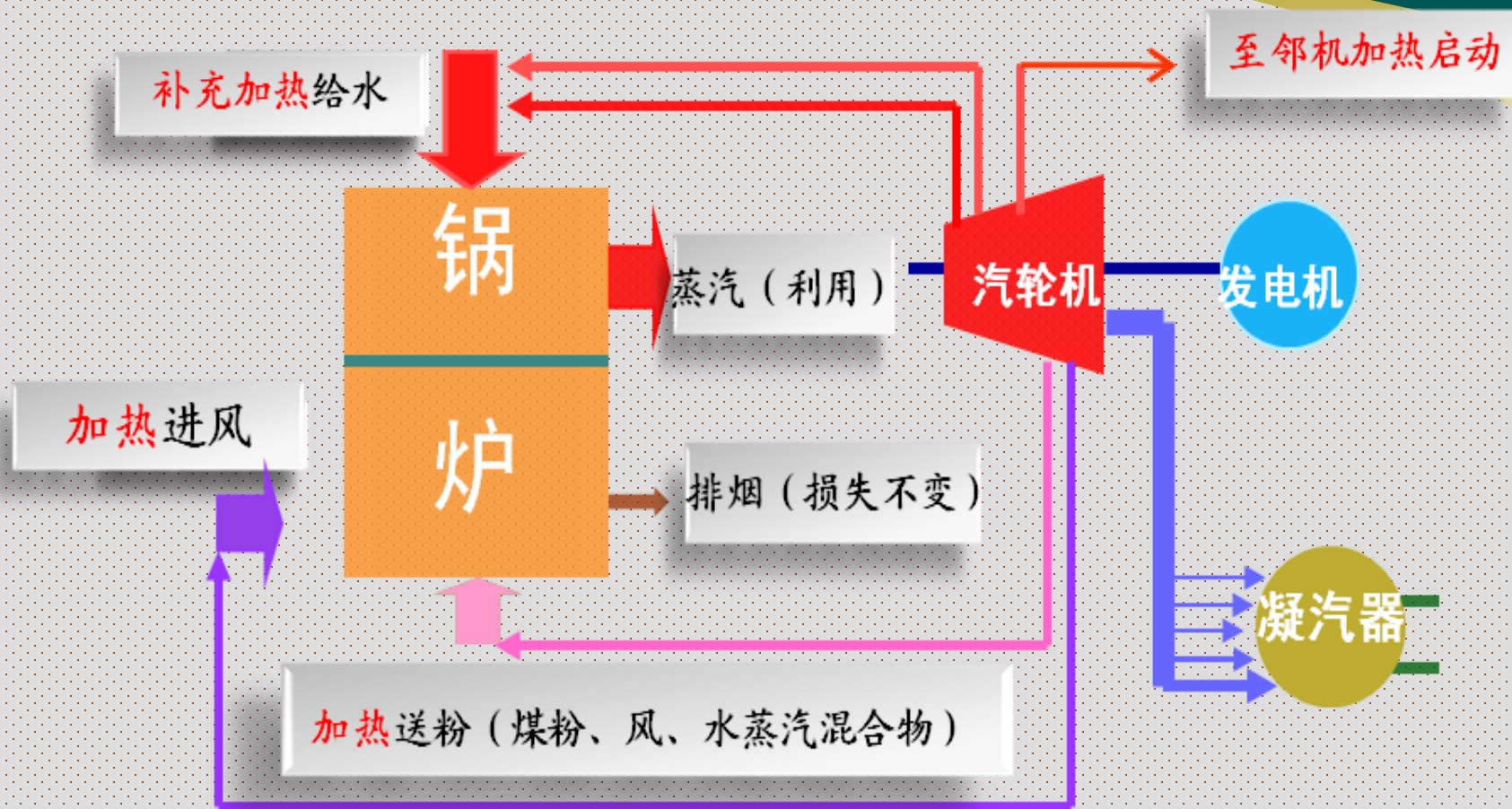
回热抽汽补充加热锅炉给水原理图



回热抽汽补充加热锅炉给水流程图

弹性回热技术的作用及成效：

- 1、解决了SCR低负荷运行的世界难题。
- 2、使环保和节能达到完美统一。
- 3、提高锅炉水动力安全性。
- 4、提高低负荷下的给水温度
- 5、显著提高机组的调频能力和调频经济性。
- 6、提高机组调频运行的安全性。



广义回热原理结构示意图

根治SCR运行时氨逃逸导致的空预器堵塞与腐蚀的技术

- 1、空预器堵塞的治理思路是全面提高其进风的温度，显著提高空预器冷端换热片的平均运行温度。从而使其的结露区域下移，结露及烟灰粘结速率下降，确保烟气（灰）流的冲刷能力大于附着物粘结速率，消除烟灰粘结现象。与此同时，腐蚀问题也能迎刃而解。
- 2、广义回热技术（一期）的基本思路是利用汽轮机的抽汽加热空预器进风，与传统暖风器不同的是该系统并不仅在低温季节使用，而是随机组同步运行。
- 3、自2009年10月将该系统安装投用后，空预器堵塞问题得到了彻底根治，到目前为止，空预器再未发生任何堵灰情况。后续的检查中发现，空预器冷端受热面表面呈金属光泽，原先尚未清除的灰垢都已不见踪影。





14.02.2010 14:49

低氧低氮燃烧技术

1、送风回热技术——回热抽汽加热锅炉进风。热风温度升高后，可提高锅炉的燃烧稳定性和煤粉的燃尽率。

2、送粉回热技术——回热抽汽加热锅炉送粉。利用汽轮机抽汽进一步加热锅炉送粉（煤粉、风和水蒸汽的混合物），提升其温度和干燥度。这一技术不仅能提高热力循环效率，还可提高锅炉的稳燃性及其对煤种的适应性，提高煤粉燃尽率，适用低氧燃烧，降低NOX的生成及排烟损失，降低厂用电率。

成效：

1、锅炉满负荷的省煤器出口氧量由设计的3.5%下降至2%左右，烟气量因此下降了约8%。

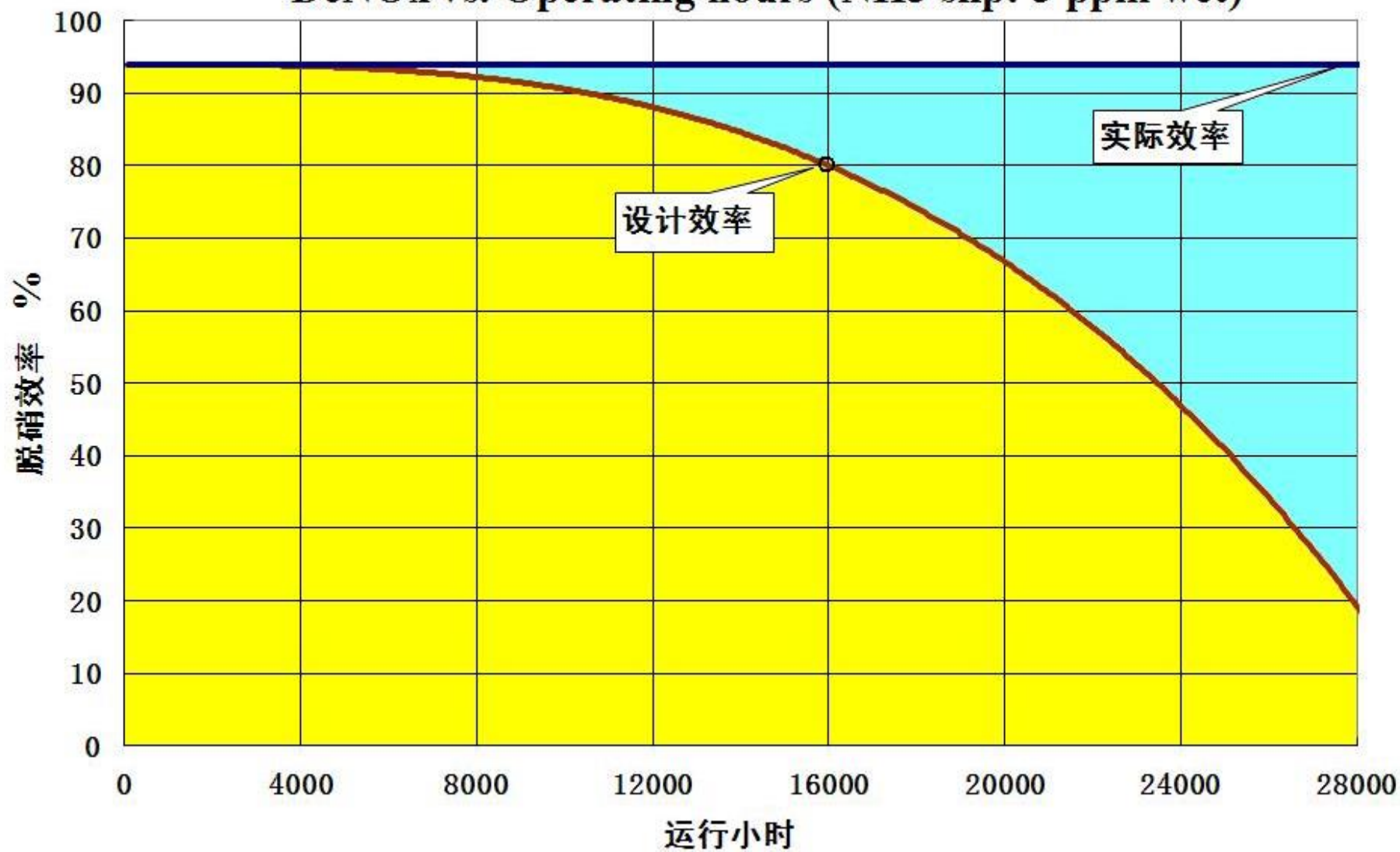
2、全负荷工况下SCR平均入口NOx浓度保持在150-200mg/m³范围内，且飞灰含碳量能长期保持在0.2%-0.4%的极低水平。

3、制粉单耗仅为6.5kwh/T，比同类机组低约30%。

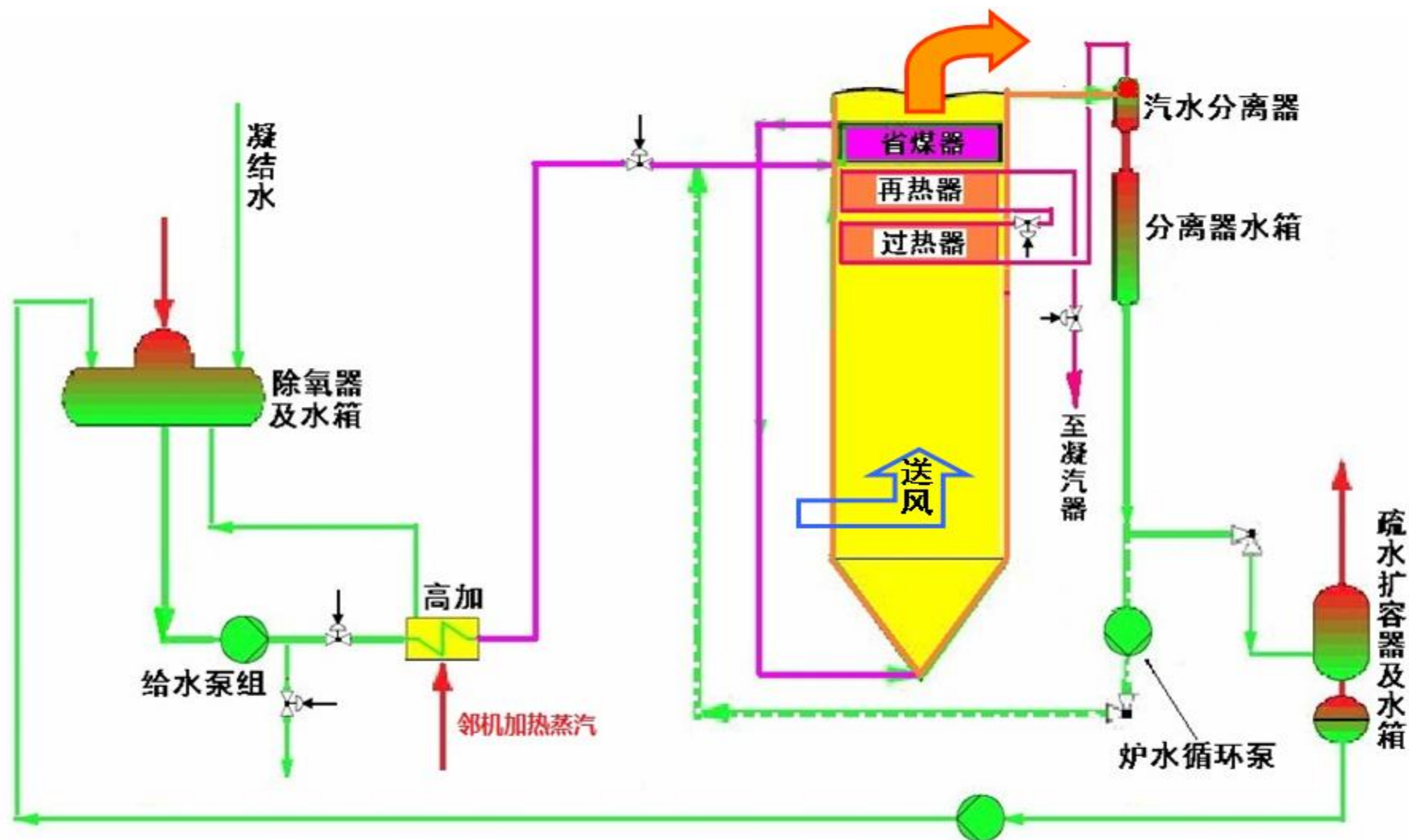
安全节能型催化剂延寿

- ❖ 截止2015年底，第一台SCR已累计运行超过**50000**小时，远远超过了16000小时（80%脱硝效率）的设计寿命。目前的脱硝平均运行效率高达90%，**2015年全年两台机组平均NO_x排放18mg/m³**。投用至今未发现SCR效率的下降迹象。

DeNOx vs. Operating hours (NH3 slip: 3 ppm wet)



直流锅炉蒸汽加热启动示意图



演讲内容

- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术
- 六、低能耗石膏雨治理技术
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

节能及低成本型高效（电）除尘系列技术

- （1）通过一系列的综合优化和科技创新技术，有效减少机组烟气量
- （2）采用高频电源技术对静电除尘器的电源装置进行改造

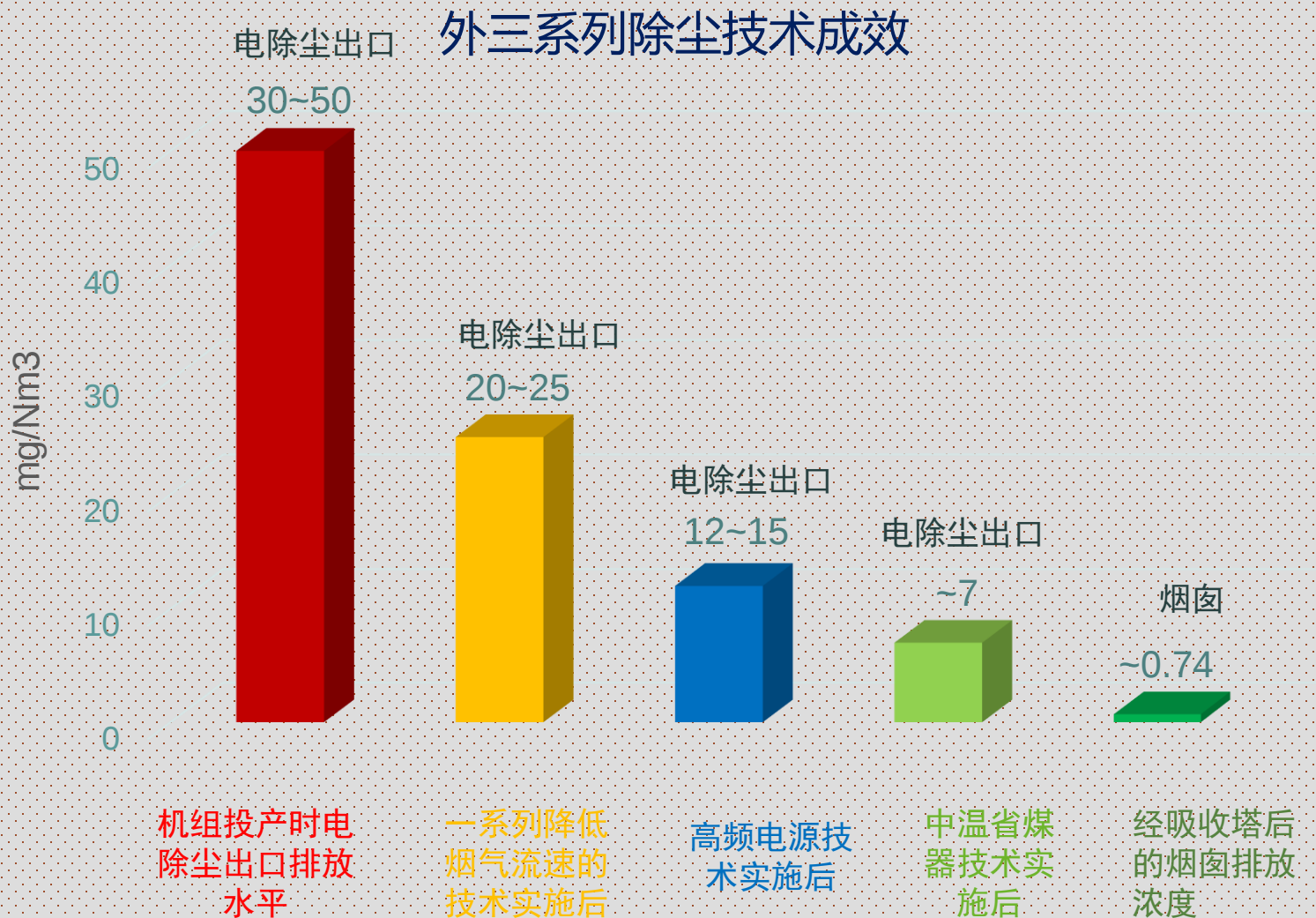
（3）基于中温省煤器技术的低低温电除尘改造

- 在电除尘进口增设中温省煤器，实现节能型低低温电除尘改造，满负荷烟温降至100℃以下。
- 大幅降低电除尘进口烟温，在降低烟尘比电阻的同时，进一步减小烟气流速，大幅减小烟气携带动能，增加烟气在电除尘停留时间，以实现高效除尘。
- 烟气流程的并联设置方式有效降低了烟气系统阻力，降低引风机和增压风机电耗，同时提升了烟气热能回收效率，综合性地实现了节能减排的目的。
- 中温省煤器改造后，电除尘出口烟尘的实际浓度由 $\sim 12\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，降至 $\sim 7\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。**烟气中的 SO_3 浓度由 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 降低至 $2.74\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。**

（4）吸收塔性能优化

- 采用自主创新技术对脱硫吸收塔喷淋进行改造，增加喷淋层，并杜绝烟气走廊。此一改造，不仅进一步提高了脱硫效率，同时大大降低了脱硫塔出口粉尘含量。
- 烟气总量的降低，使脱硫吸收塔内空罐烟气流速有效下降，大大降低了脱硫塔出口的对颗粒物的两次携带，进一步提高脱硫塔的降尘效果。
- 增加一层高效除雾装置，进一步提升对颗粒物的捕捉效果。
- 2015年5月，委托权威第三方单位采用滤膜法对净烟气中的粉尘浓度进行手工测量，在900MW、750MW、600MW工况下分别为：0.74mg/Nm³、0.49mg/Nm³、0.38mg/Nm³。

伴随系列节能高效除尘技术的应用，外三烟尘排放逐步降低



演讲内容

- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术**
- 六、低能耗石膏雨治理技术
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

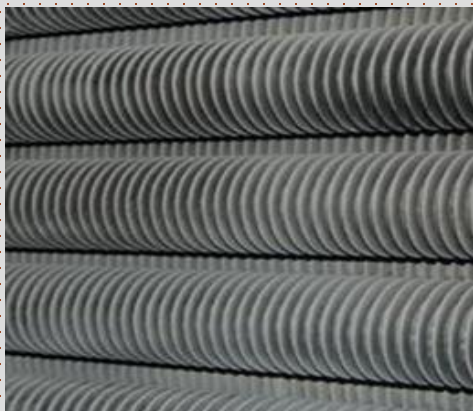
以“零能耗脱硫技术”为核心的高效脱硫系列技术

- 目前的石灰石-石膏湿法脱硫，需耗用约**1%以上**的厂用电，此类系统实际为“**耗能减排**”。

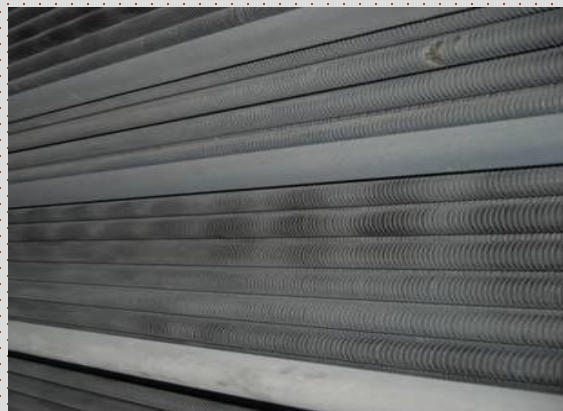
零能耗脱硫技术核心：

- 1、研发并加装了基于碳素钢的脱硫烟气热能回收装置，并将这部分热量送回热力系统以替代汽轮机抽汽加热凝结水，减少汽轮机的热耗，从而平衡脱硫系统的能耗。
- 2、烟气热能回收装置布置于增压风机与脱硫塔之间，不但能回收锅炉的排烟热能，还能回收引风机与增压风机的做功导致的烟气焓升（ $8^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ ），显著提升了项目的边际效益。
- 3、通过改进工艺和运行方式，使整个脱硫系统在额定工况下的耗电率降至**0.8%**以内；

技术关键：防止热能回收装置的烟侧低温腐蚀及积灰堵塞。



运行一年后



清除浮灰后



运行三年后

- 金相分析：硫腐蚀对换热器最低温段的金属有效壁厚的最大减薄量仅为0.033mm（管子实际壁厚3.5mm），其对运行寿命的影响可以忽略。
- 根据性能试验结果，该系统降低煤耗**2.71克/千瓦时**，折合年节标煤达**3万吨**，脱硫吸收塔的水耗下降**45吨/小时**以上。其投资回收期<2年。



运行五年后低温省煤器内部样管剖面

脱硫设施新型扩容技术

◆ 技术方案主要特点：

在不加高吸收塔高度、工期不超过60天的前提下，增加一层喷淋层，优化除雾器冲洗水回收系统，优化氧化风系统等，尽可能的保留原有设备继续使用，仅增加一些设备和优化原有系统，来满足扩容改造的需要，满足2014年环保对脱硫排放的考核要求。

◆ 主要技术效果：

通过实现对公司两台机组脱硫设施新型扩容技术研究及应用，目前外三脱硫设施可在不使用脱硫添加剂的条件下达到98%左右的脱硫效率，公司可根据机组负荷、FGD入口SO₂浓度等条件，调整浆液循环泵的运行方式以达到效率与节能的最优运行工况。

演讲内容

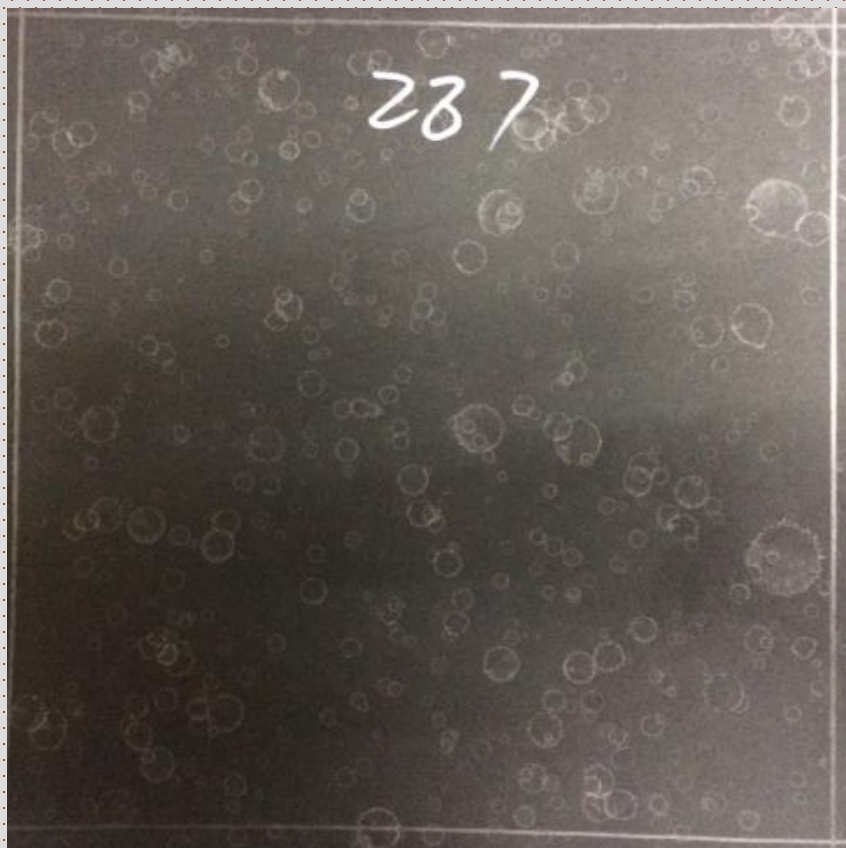
- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术
- 六、低能耗石膏雨治理技术**
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

低能耗石膏雨治理技术

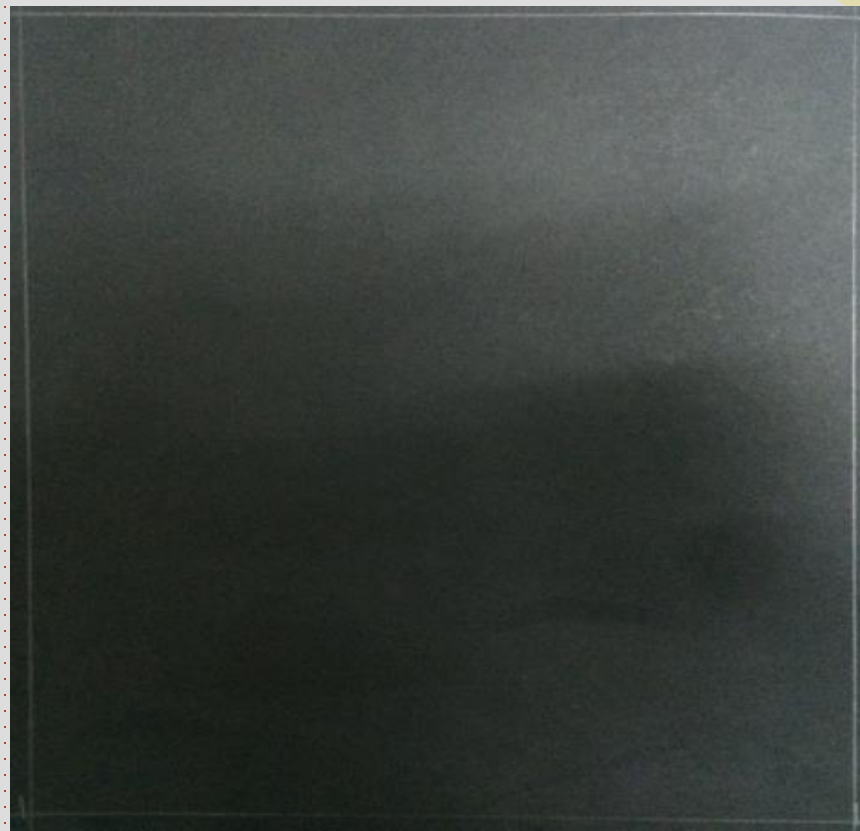
- 目前常见的“石膏雨”防治技术主要有回转式GGH, MGGH技术。但这些技术都是以耗费巨大的投资及等效能耗为代价的，由于回转式GGH存在着“穿越式”泄漏，在实行新的排放国标时难以堪用。而MGGH技术也存在能耗过高以及可能出现的设备的低温腐蚀问题。
- 一般来说增设一套MGGH系统除造价昂贵以外（烟气再热段一般都采用316L或以上等级不锈钢制作），将使机组平均供电煤耗相对上升约2-3g/kwh左右，此外还需要对引风机或增压风机进行改造。

基于广义回热理论的低能耗石膏雨治理技术

- 独创了基于广义回热拓展技术的烟气加热方法用以消除烟囱内液滴的生成，从源头上克制液滴的冷凝过程。
- 对烟气的加热重点在于防止净烟气中的液滴在烟囱内上升过程中凝结产生液膜，被烟气携带出烟囱形成“石膏雨”，这样的加热方法，杜绝较大液滴在烟囱内生成的可能性，从“雨”的生成机理上进行防治。
- 广义回热拓展技术为烟气的加热提供了经济、节能和便捷的加热热源；全新的加热技术从根本上防止了烟囱内的液滴冷凝现象的产生。
- 两者结合后达到采用最小的热能损耗消除“石膏雨”现象的效果。



加热装置投运前



加热装置投运后

演讲内容

- 一、背景和需求
- 二、“外三”节能减排技术创新及成效简介
- 三、节能及低成本型全负荷脱硝系列技术
- 四、节能及低成本型高效（电）除尘系列技术
- 五、节能型高效脱硫系列技术
- 六、低能耗石膏雨治理技术
- 七、冷凝法烟气除湿技术
- 八、结束语

冷凝法烟气除湿技术

- 外三在经过一系列的污染物综合治理后，虽然各项环保指标已达到深度治理要求，但由于机组采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，脱硫出口湿烟气中仍含有大量的水汽，以汽态形式经烟囱排出。
- 经前期石膏雨治理，这些含酸水蒸气虽不会以液滴（石膏）雨形式在附近跌落，但这些带有较高酸度的水汽（凝结水PH一般为2-3）客观上仍然会对大气产生一定的污染，而白色烟羽的视觉效果也会引起公众的误解。

冷凝法除湿干烟技术原理

相变凝聚+热泳力效应

①相变凝聚：

强化气溶胶凝聚概率，
将气溶胶转化为雾滴

②热泳力：

亚微米颗粒在液滴及冷壁面
团聚长大

雨室洗涤环境+湿式惯性除尘

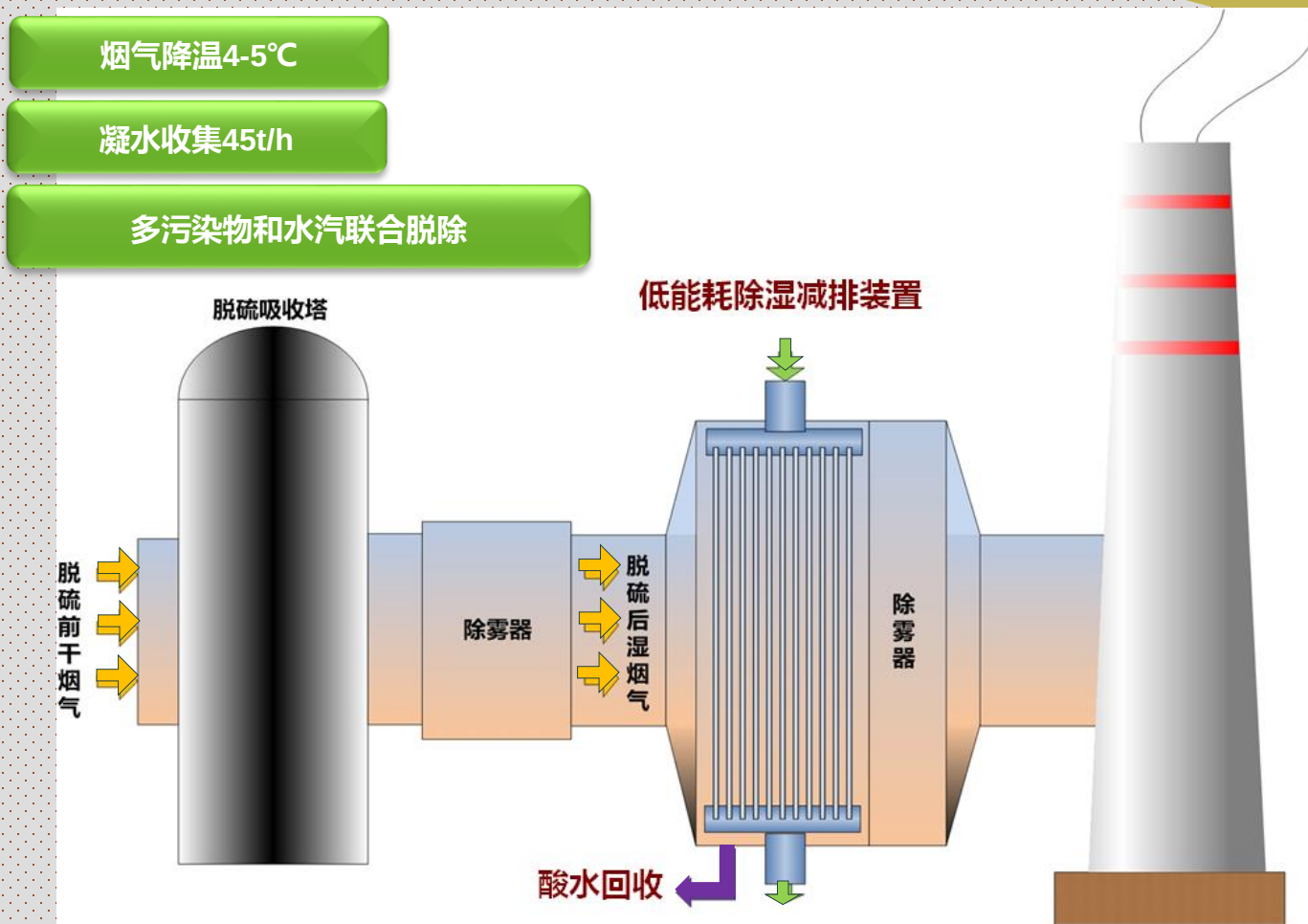
①液滴沉降除尘

利用凝聚液滴重力下降洗尘

②细管水膜惯性除尘

利用细管表面水膜吸附颗粒物

冷凝法在外三实施的初步方案



冷凝法除湿减排装置布置图

技术方案预期效果

1、有效脱除剩余 SO_2/SO_3

2、有效去除多污染物

3、节水效果

- 平均可凝结析出水量45t/h（随季节不同略有差异）。
- 冬季循环水温极限最低5℃时，析出最大水量78.2t/h。
- 收集水用于脱硫除雾器的冲洗水，实现节水效益。

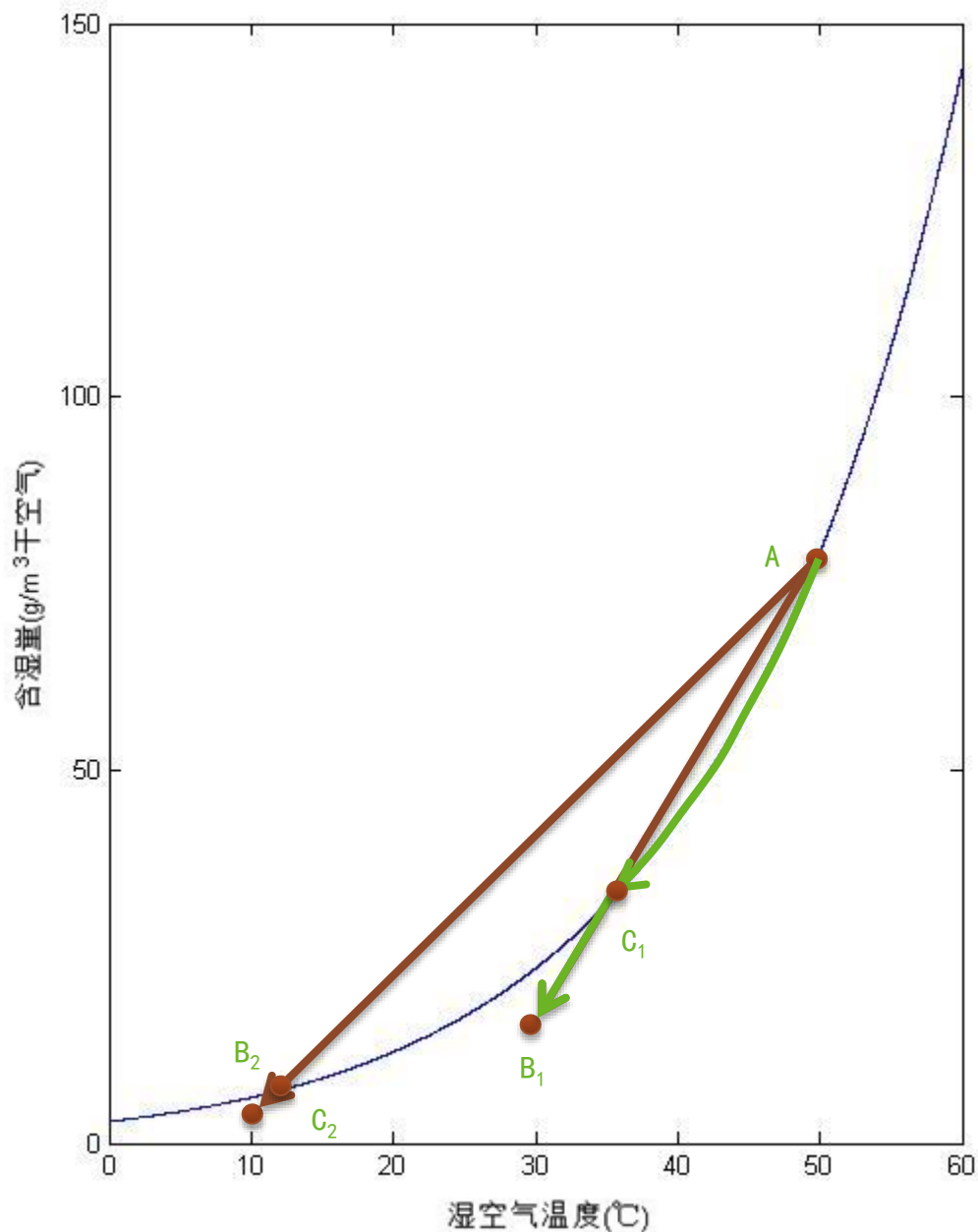
4、进一步减排粉尘

5、改善白色烟羽

该技术实施后，烟囱出口烟气中的水蒸气初始分压力已显著下降，水蒸气在大气中的分压力下降至再蒸发点的过程将显著缩短，白色烟羽会得到明显改善。若再对烟气进行适当的加热，则能极大改观白烟状况。

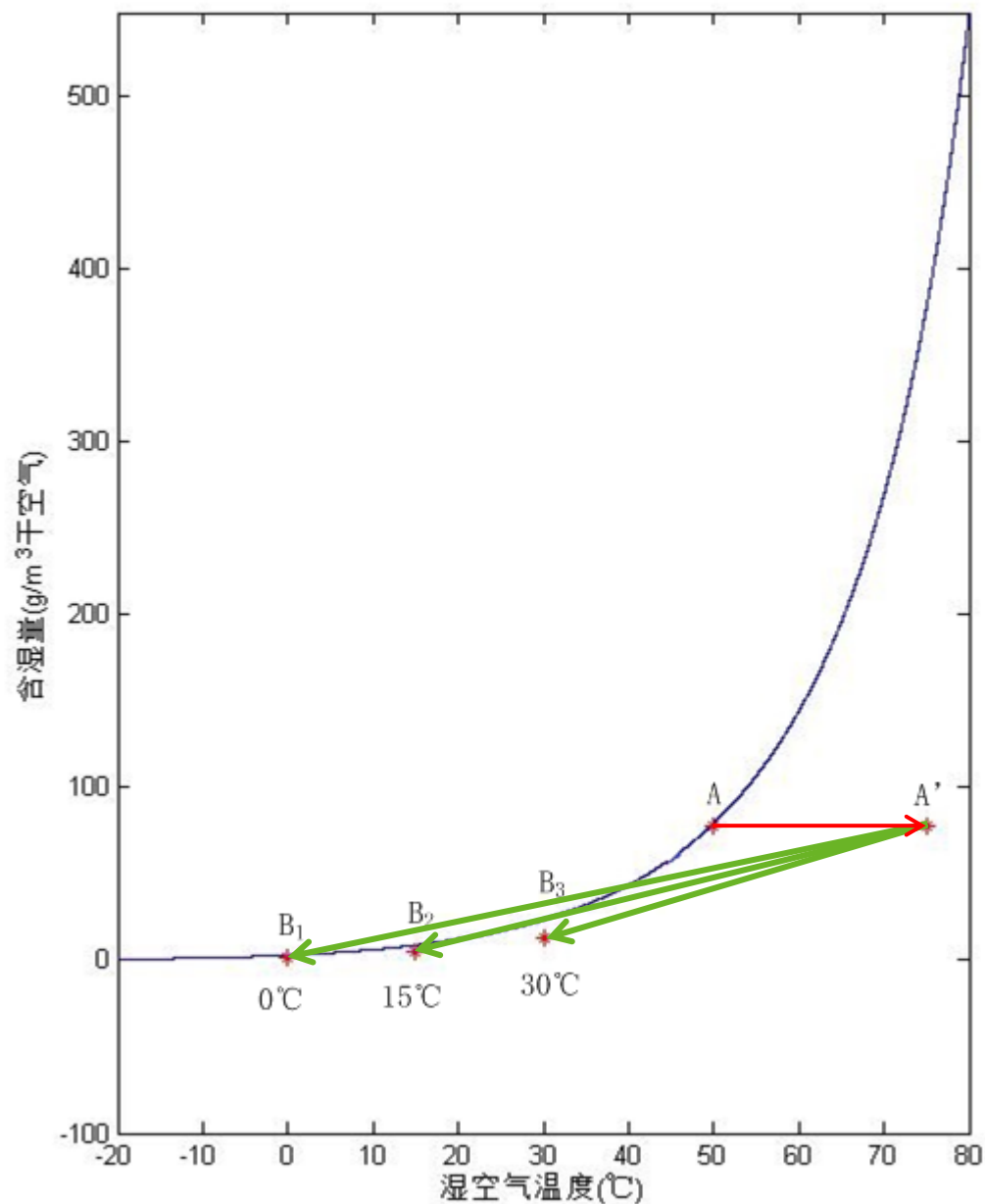
白烟的成因

湿烟气从烟囱口排出后是否会出现白烟，及出现白烟的长度，不仅与烟气本身含水量的多少、烟气的温度（A点位置）有关，而且与它周围环境空气的温度、湿度（即 B_1 、 B_2 点位置）有关。



直接加热法是如何消除白烟？

加热烟气消除白色烟羽的方式，烟气需要加热到多高温度与环境空气的温度和湿度密切相关。

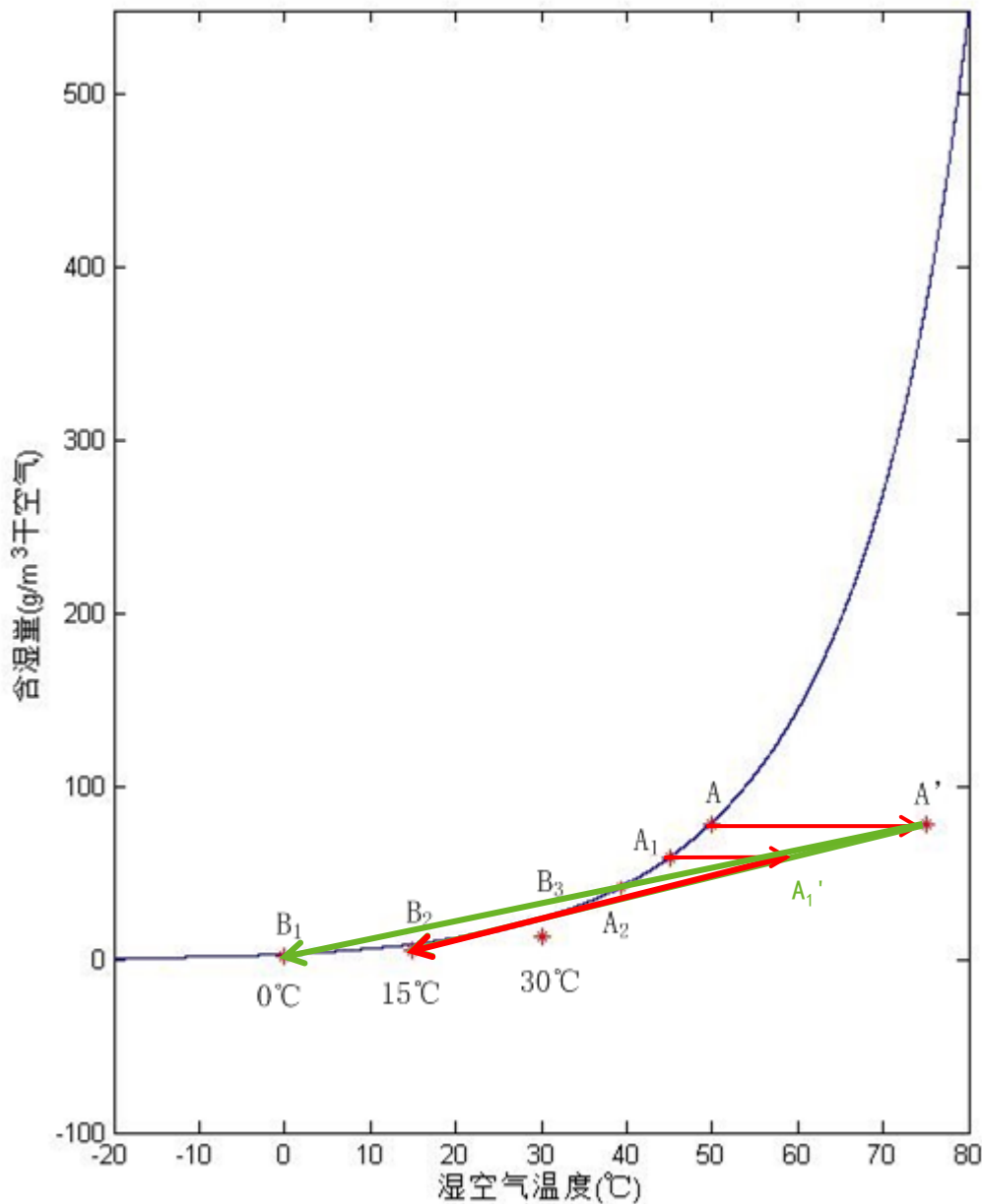


冷凝后再加热

VS

直接加热

在获得相同视觉效果如烟羽形态下，冷凝后再加热对烟气的温升要求要比直接加热法低得多，加热所需的热量要少得多。这是一种耗能较少的消除白色烟羽方式。



结束语

随着一系列节能型，低成本超低排放技术的突破，耗能环保的逻辑前提已不复存在，传统的观念已被颠覆。“外三”的实践已经证明，通过独创的清洁煤技术，燃煤发电甚至可以超越燃气发电，变得更清洁，更环保，与环境更友好。并且这些技术均为可复制的通用技术。

本报告所含相关技术，发明人已向中国专利局提出申请，其中大部分已获得授权，受国家法律保护，特此声明！



谢谢!



上海外高桥第三发电有限责任公司

上海申能能源科技有限公司