

高效绿色煤电技术的发展之探索

冯伟忠



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

二〇一四年七月

报告提纲：

一、背景和需求

二、煤电的高效化

——现有机组的节能及保效系列技术

三、煤电的清洁化

——节能型超低排放环保系列技术

四、下一代高效超临界技术

五、结束语

报告提纲：

一、背景和需求

二、煤电的高效化

——现有机组的节能及保效系列技术

三、煤电的清洁化

——节能型超低排放环保系列技术

四、下一代高效超临界技术

五、结束语

- 为应对全球变暖 and 环境污染，节能减排已成为国际社会的共识，中国政府承诺，到2020年，单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放（碳排放强度）比2005年下降40%至45%。
- 煤炭 ——是目前以至今后相当一段时间内世界上最主要的一次能源，也是最大的二氧化碳排放来源，同时也是重要的大气污染源。近来频繁的雾霾，更使煤炭成为矛盾的焦点。
- 由于中国已探明的一次能源中煤炭占了近70%的特殊性，以及煤电总装机容量已达9亿千瓦的现实，为协调好环境与电力发展的矛盾，发展**煤电的高效化**和**清洁化**技术，应作为我国长期的能源发展战略。

报告提纲：

一、背景和需求

二、煤电的高效化

——现有机组的节能及保效系列技术

三、煤电的清洁化

——节能型超低排放环保系列技术

四、下一代高效超临界技术

五、结束语

■ 近年来火电行业提效的主要途径 —— 结构性改善

增量

大型高效机组超（超）临界机组

存量

上大压小，关停中小型高耗能机组

近10年来，中国大陆火电的平均效率和环保水平不断提升。但是随着200MW以下高耗能中小机组关停殆尽，结构性改善的潜力将越来越少。

途径之一：采用更高等级蒸汽参数（700℃）

- 一次再热700℃机组的效率,可比600℃机组高3% ~ 3.2%。常规设计,冷却水温20℃,含脱硫、脱硝系统的700℃机组,其理论净效率约为46% ~ 46.7%。
- 目前700℃计划的技术储备不足,尚存在材料技术和造价瓶颈。原定2011年启动的世界首个700℃高效超临界示范工程,德国Wilhemshafen电厂一次再热500MW机组项目已决定无限期推迟。显然,在十年之内将难以见到商业化的700℃高效超临界机组投产。
- 该技术对于我国当前的节能减排形势和完成2020年的减排计划,以及2030年的二氧化碳排放达峰值的承诺,尚远水救不了近火。

途径之二：采用 IGCC 技术

- 日本三菱重工于2007年9月建成并投产了据称目前世界最高效率的250MW IGCC 示范机组（勿来电厂）。
- 机组的性能试验效率42.9%，运行（满负荷）效率42%。
- 目前已完成2000小时连续运行，5000小时长期运行。
- 机组单位造价折合 25000元（人民币）/千瓦。
- 2012年11月，中国华能在天津建成了容量265MW的IGCC机组。
- **IGCC 技术需要解决：**
 - 1、验证长期运行的可靠性。
 - 2、大幅度降低造价，使其具备商业化推广的可能性。
 - 3、进一步提高效率的可行性，使其具备竞争力。
- 这类机组还存在较多的技术和成本瓶颈，其商业化的发展之路还很长。

途径之三：面对现实，立足现有条件，在现有蒸汽参数、材料技术及单位造价条件下。

充分挖掘现有技术体系下的节能潜力

- 现有的热力学等热能动力理论并非终极版本，还有待我们去开拓与发展。近年来我们在这方面的研究已取得了一系列的突破。从这些新的视角去看问题可以发现，在目前的技术体系中，设备、系统设计、调试、运行及控制方式等，仍存在着很大的节能空间。通过优化、改进及创新，充分挖掘各个系统和环节中的节能减排潜力，是一条投资省、风险低、见效快的有效途径。

- 常规设计的600℃等级超超临界、一次再热，20℃冷却水温，含脱硫、脱硝机组的理论净效率约为**43~43.5%**。
- 上海外高桥第三发电有限责任公司，建设两台1000MW超超临界机组，汽轮发电及锅炉的技术引进自德国**SIEMENS**和**ALSTOM**，由上海电气制造。工程于2005年9月开工建设，2008年6月全部建成。
- 公司以新建工程为契机，以节能减排为重点，**立足现有条件，在现有蒸汽参数、材料技术及单位造价条件下**，开展了一大批综合优化和科技创新项目。通过建设期及投产后的全面、持续的优化和创新，机组效率不断提高。目前外三机组的理论净效率（含脱硫、脱硝）已提升至 **46.5%**，这已与目前700℃计划的期望效率相当，在世界上遥遥领先。

上海外高桥第三发电有限责任公司，建设两台1000MW超超临界机组，2005年9月开工建设，2008年6月全部建成。



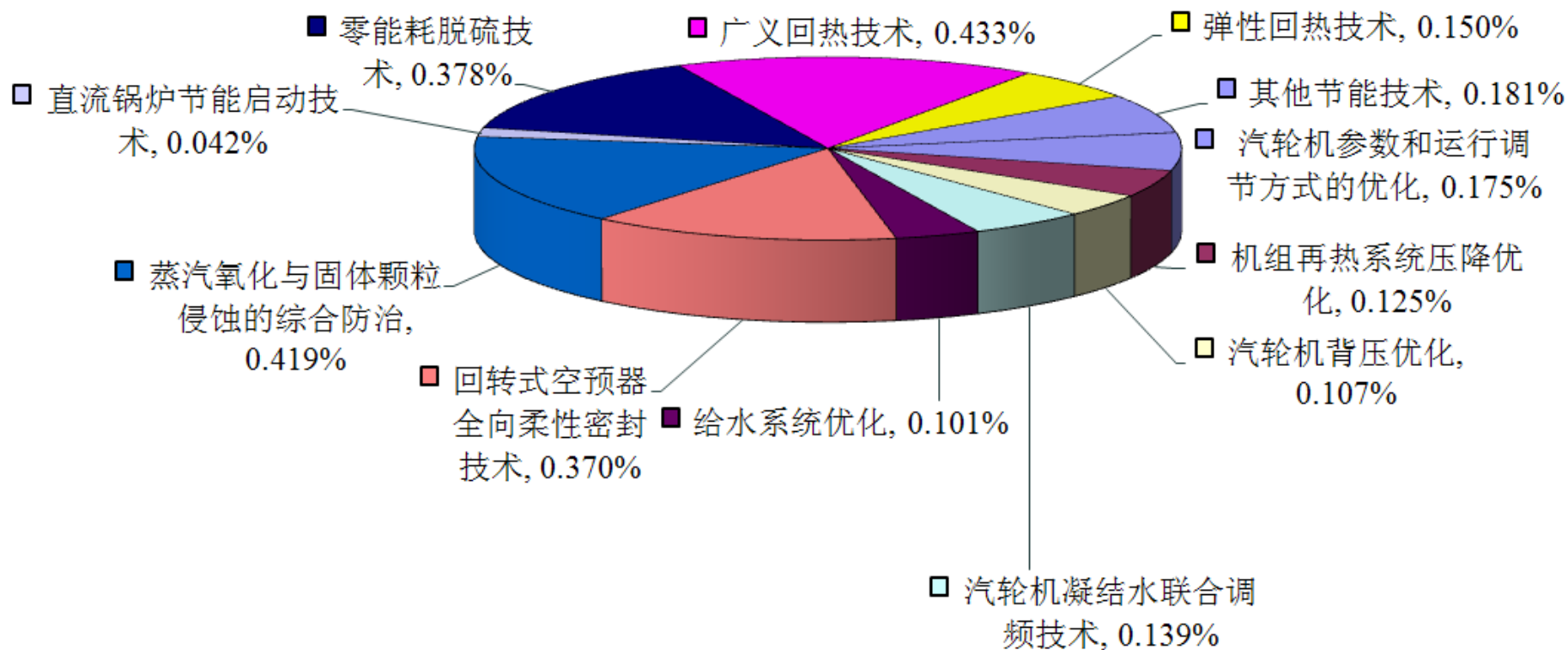


充分挖掘节能潜力——火电厂节能系列技术

上海外高桥第三发电有限公司

节能新技术成效图

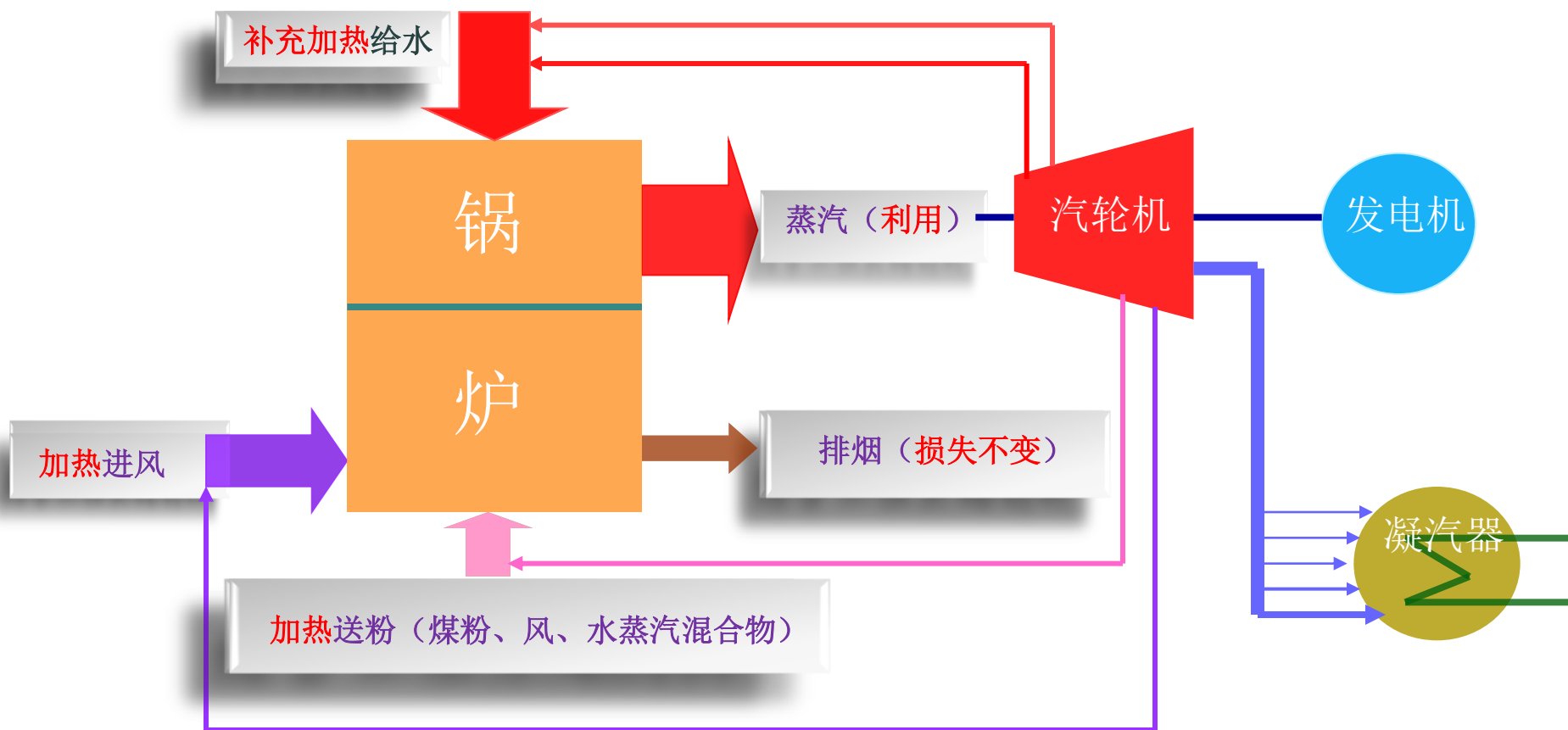
(净效率增量%)



- ❖ 这些节能减排技术涵盖了系统设计优化；设备改进；研发专门节能设备；机组启动和运行方式及控制策略的优化和创新等。
- ❖ 由于部分技术不但节能和减排效果显著，还因简化了系统，提高了安全性，且显著降低了投资，故项目的总投资并不因为这一系列技术的实施而增加。
- ❖ 机组投产后，为进一步提升机组的环保水平，同时又能兼顾机组能耗和运行费用的降低，几年来，又先后研发和实施了“零能耗脱硫技术”；“节能型高效除尘技术”以及“节能型高效全天候脱硝技术”等，使机组的节能和环保水平又有了新的飞跃。
- ❖ 目前已成功实施的这类新技术，大部分属通用技术。不但能应用于新建机组，也适用于现有机组的技术改造，这对提升整个行业的效率水平意义重大。

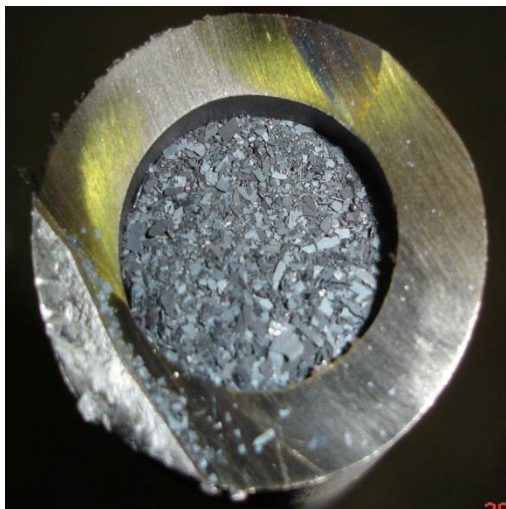
1、火电厂节能系列技术案例——广义回热系列技术

从传统的以锅炉给水为回热媒介的经典回热循环，拓展为以锅炉输入的水、风、煤等均作为回热媒介的广义回热循环



2、防止机组效率下降——SPE综合治理系列技术

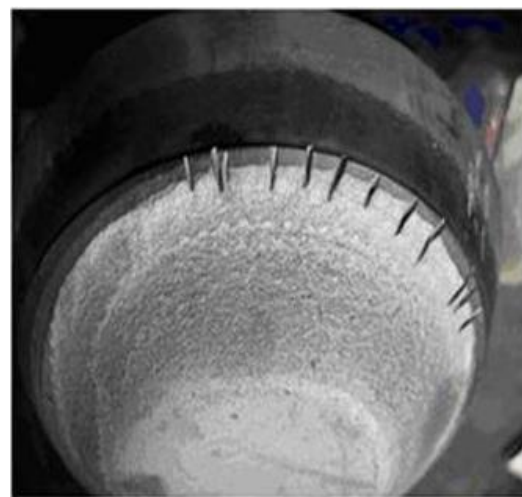
- 管道的蒸汽侧氧化；氧化皮阻塞引起的炉管超温和爆管；氧化皮破碎形成的颗粒引起的汽轮机叶片及旁路阀芯等侵蚀（固体颗粒侵蚀 SPE），导致机组效率不断下降，是超（超）临界机组面临的突出问题，并已经困扰国际发电技术领域几十年。
- 中国近年来投产的超临界和超超临界机组也出现了这方面较严重的倾向，若不加以重视，相当部分的节能减排成果就会被其吞噬。



遭氧化皮阻塞的管子



被固体颗粒侵蚀的叶片

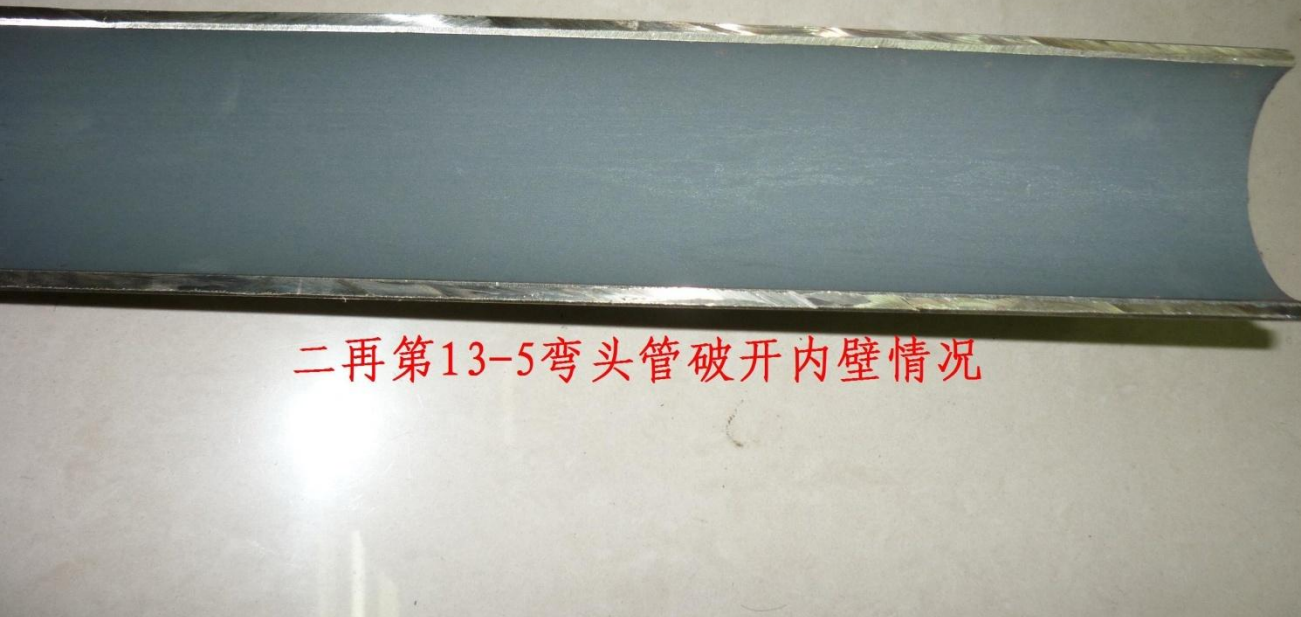


被固体颗粒侵蚀的旁路阀芯

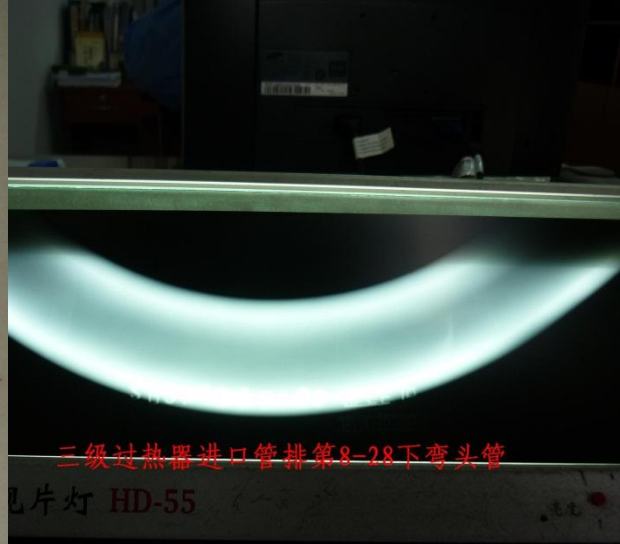
蒸汽氧化及SPE预防系列技术

- ❖ 针对这类问题产生的机理进行了全面和深入的研究，提出了综合治理的技术路线，其基本思路为：
 - ❖ 1、应设法防止和减缓高温蒸汽金属氧化物的生成；
 - 2、对于已生成的金属氧化物应避免其脱落；
 - 3、对已脱落的金属氧化物应尽快予以清除；
 - 4、对未能清除的金属氧化物应尽量减轻其对汽轮机叶片的破坏等。
- ❖ 根据这一思路和技术路线，研发了一整套所谓的中医全身疗法的蒸汽氧化和固体颗粒侵蚀综合治理的系列技术，他涵盖了系统设计、设备选型、施工及调试、机组控制、启动和运行方式等方面的一系列的改进和创新。从而使**这一困扰了世界发电领域几十年的顽症被彻底根治**

外高桥三发电锅炉运行30个月后炉管情况

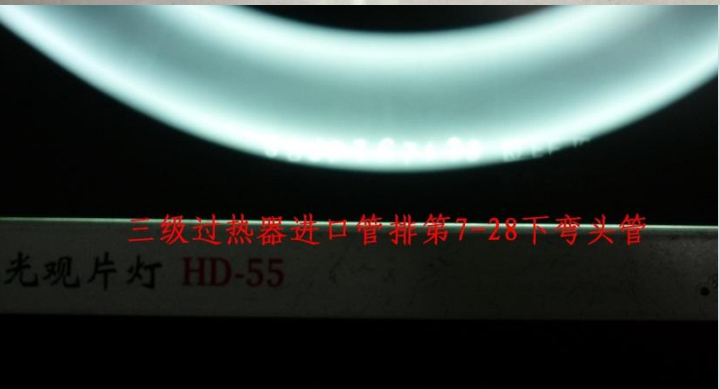


二再第13-5弯头管破开内壁情况



三级过热器进口管排第8-28下弯头管

光观片灯 HD-55



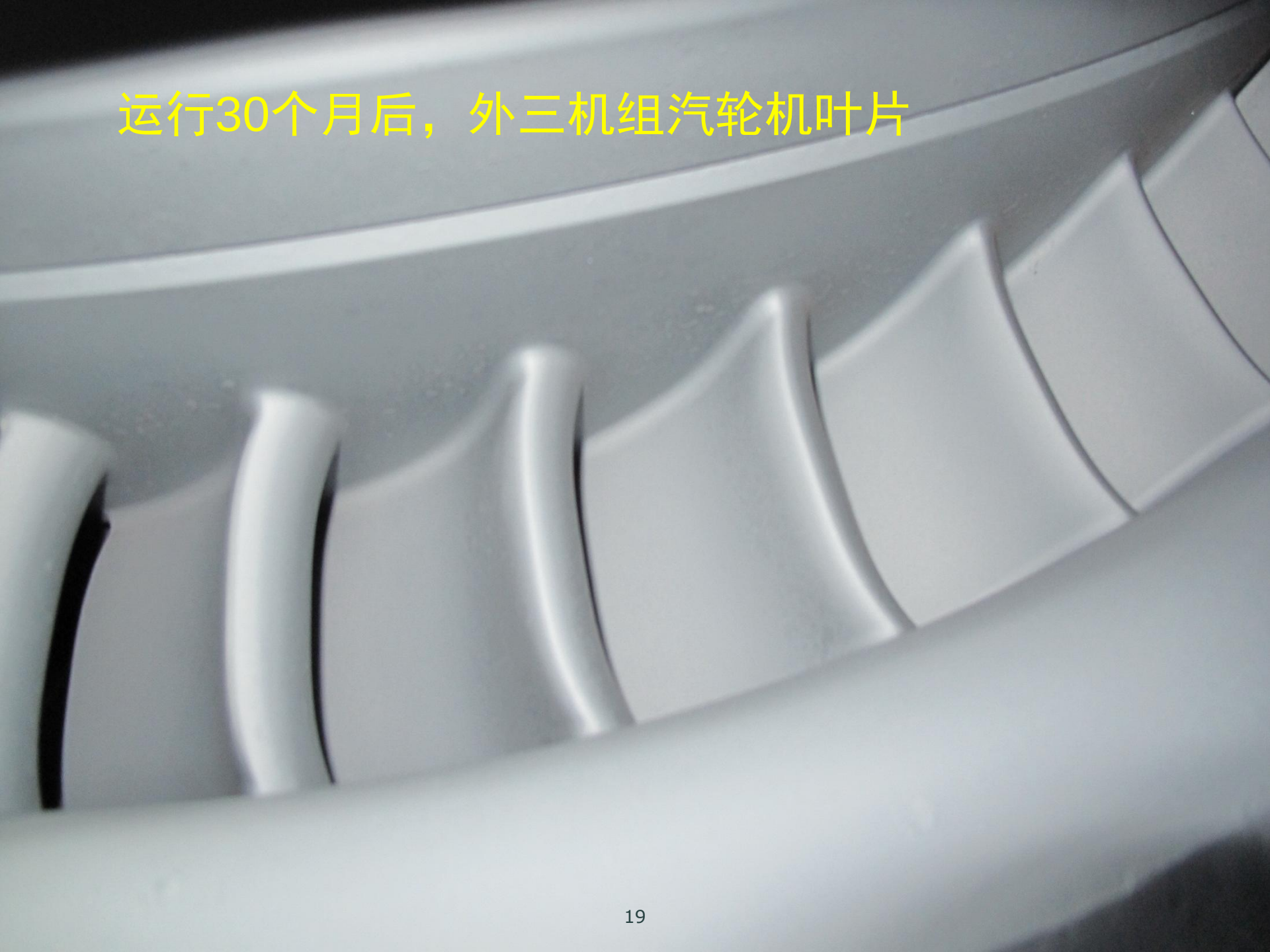
三级过热器进口管排第7-28下弯头管

光观片灯 HD-55

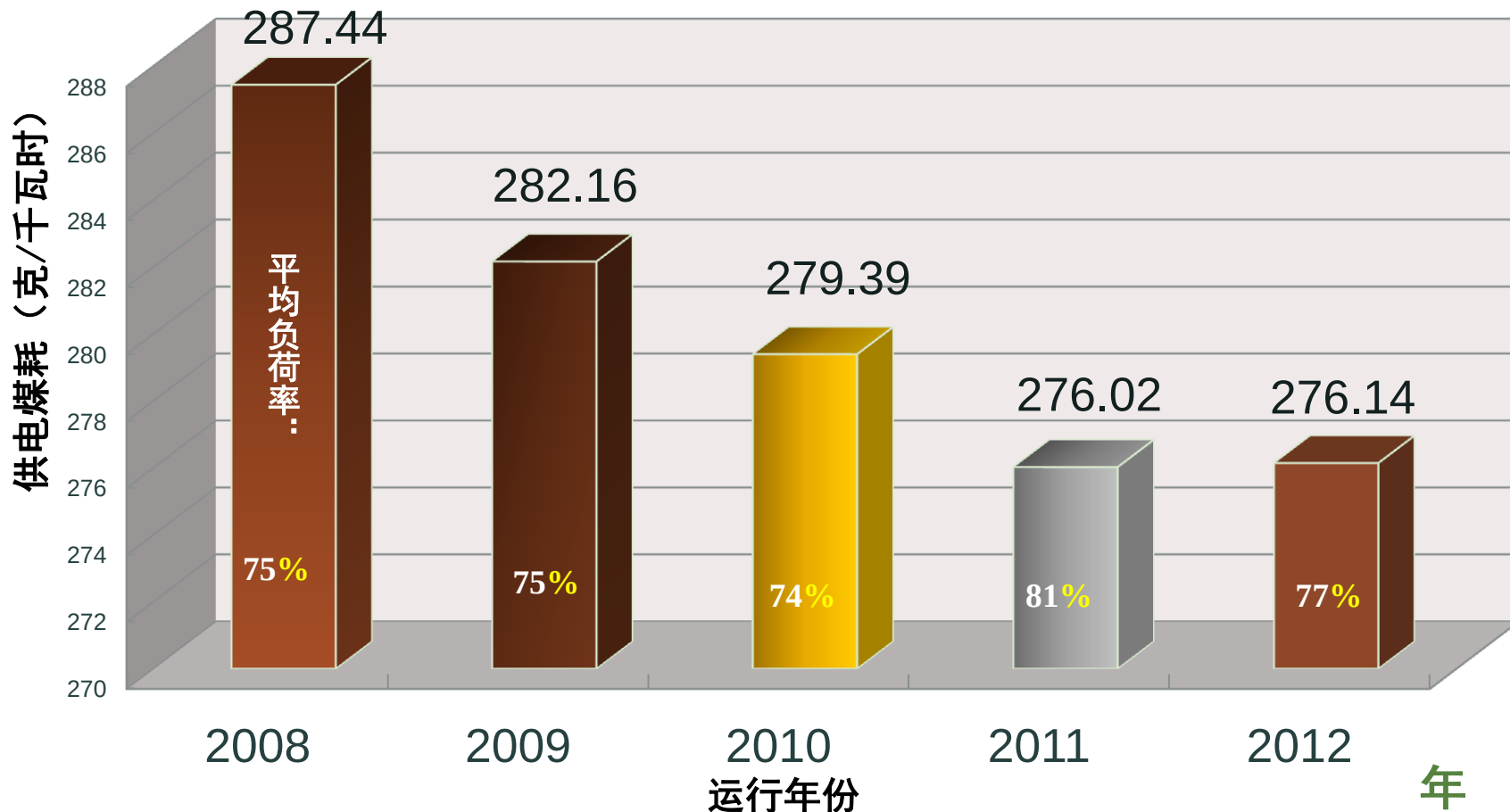


三级过热器第7-38根管破开内壁情况

运行30个月后，外三机组汽轮机叶片



年平均运行供电煤耗（含脱硫、脱硝）



原世界运行效率最高的丹麦Nordjylland电厂3号411MW两次再热，低温海水冷却机组，2009年供电煤耗（不含供热）286.08克/千瓦时（净效率42.93%），平均发电负荷率89%。折合75%负荷率下的供电煤耗**288.48**克/千瓦时。

3、火电机组集中式变频总电源技术

- 由于上海地区煤电的调峰范围大，达40-100%，在低负荷时，辅机均处于低效运行工况，若能进行变速运行，其运行效率将大为改善。但传统的电子式大功率高电压变频技术，可靠性低，占地大，性价比较低。
- 集中式变频总电源技术，利用单独设置的转速可调的小汽轮机推动一个发电机，通过改变小汽轮机的转速，从而改变发电机输出的交流电的频率。这个发电机为连接在同一母线上的所有辅机提供变频动力电源。与此同时，所有连接在该母线上的辅机都连接有一路工频电源，作为备用。
- 本集中式变频电源的小汽轮机为凝汽式，自带凝汽器。汽源取自主汽轮机抽汽。变频小汽轮机选用了SIEMENS产品，21MW，发电机选用了北重的30MVA空冷式。
- 两台机组的变频总电源系统已于2013年全部建成投产，目前额定工况的厂用电率已降至2%以下水平。

机组变频总电源系统



报告提纲：

一、背景和需求

二、煤电的高效化

——现有机组的节能及保效系列技术

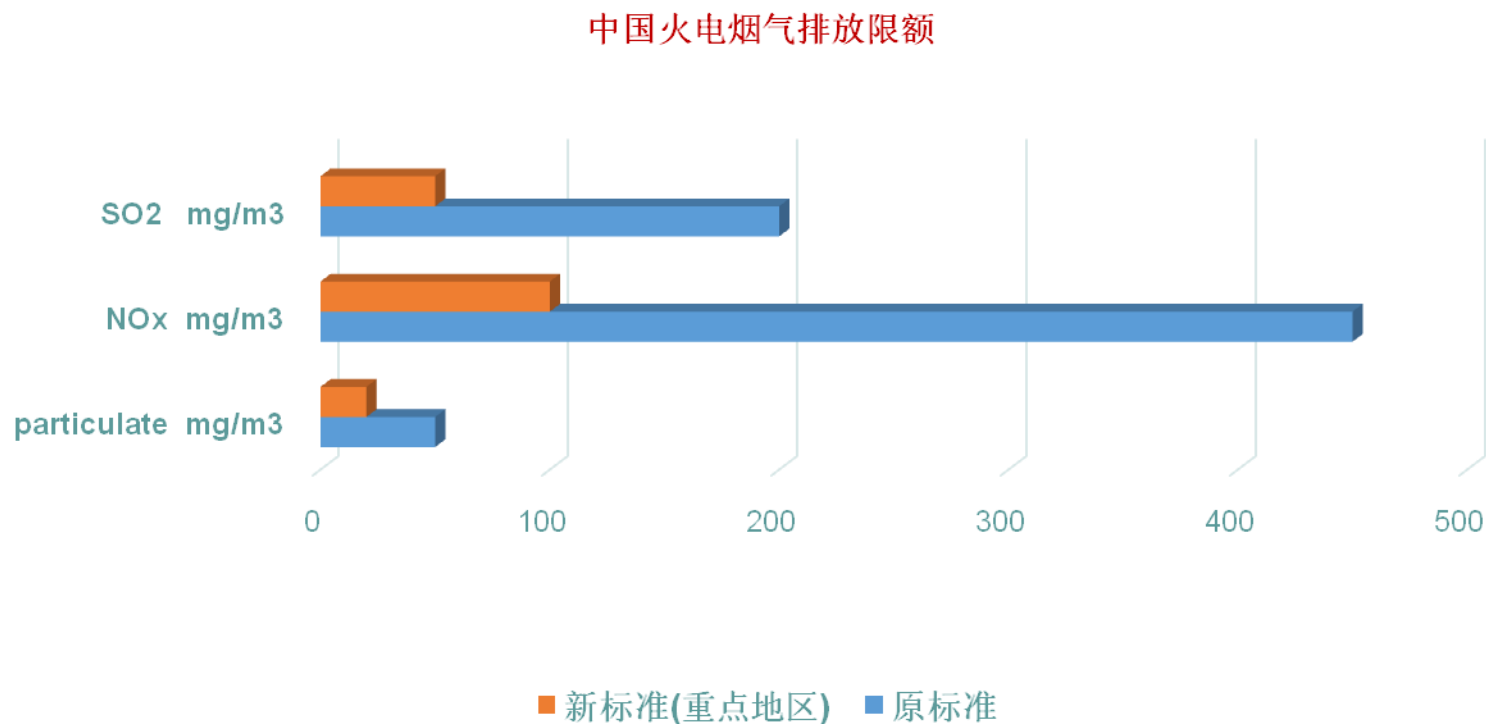
三、煤电的洁净化

——节能型超低排放环保系列技术

四、下一代高效超临界技术

五、结束语

- 基于中国严峻的大气污染形势，为缓解环境压力，中国政府在2012年颁布了号称史上最严厉的煤电烟气排放新标准。对于上海、北京等重点地区为：
- SO₂: 50 mg/m³ (原200 mg/m³) ; NO_x: 100 mg/m³ (原450 mg/m³) ; 烟尘: 20 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100mg/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“零能耗脱硫”、“节能型高效除尘”及“节能型全天候高效脱硝”系列技术的成功研发，这一传统环保困局已被打破。



1、零能耗脱硫系列技术

- 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、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**；
- 2、研发并加装了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。
新技术能有效防止热能回收装置的烟侧低温腐蚀及积灰堵塞。
- 3、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。结合脱硫系统的增效改造，目前的SO₂的排放已降至**20mg/m³**以下的水平。

2、节能高效除尘系列技术

1、降低烟速及烟温

通过综合优化，机组烟气总量较设计值减少达26%。烟速降低使其携带动量减小，滞留时间增加，有利于烟尘的在电场内的沉降和降低电除尘出口的二次携带。烟温的降低至90℃-100℃，烟尘比电阻下降一个数量级，除尘效率大幅上升。

2、采用高频电源技术对静电除尘器的电源装置进行改造

高频电源供给电场的是一系列的电流脉冲（脉冲宽度在5~20微秒），可以提高烟尘的荷电效率，提高粉尘迁移速度，从而提高除尘效率。

3、脱硫系统增效改造

消除烟气走廊；提升除雾器效率；脱硫塔内空罐烟速 $<4\text{m/s}$ ，消除二次携带；大幅提升脱硫系统的降尘效率。

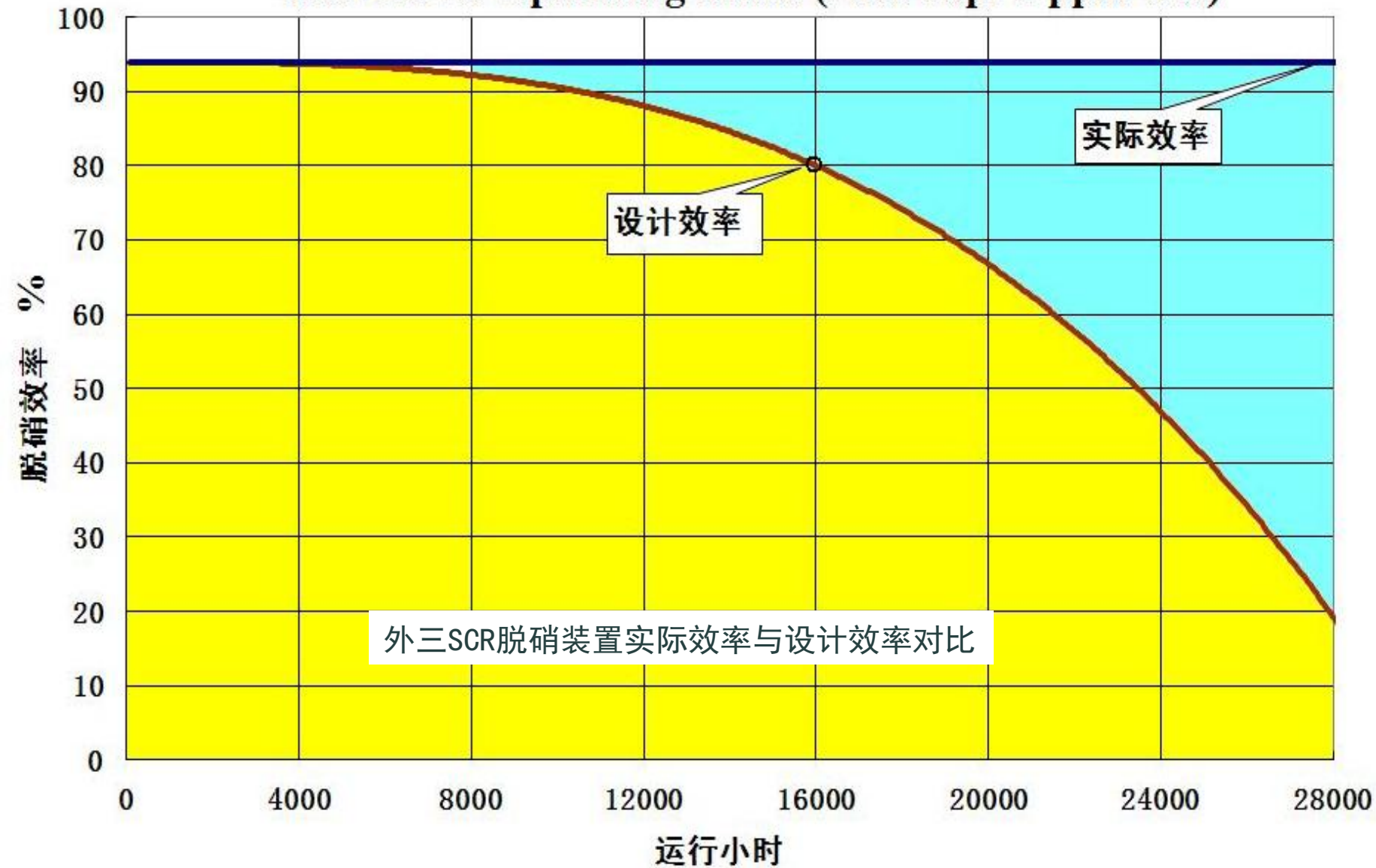
项目成效：

- 外三机组在技术改造后，电除尘出口烟尘浓度及高频电源总功耗显著降低。目前电除尘出口烟尘排放浓度7-8mg/m³，脱硫系统出口烟尘排放浓度约1mg/m³，几乎可以忽略不计。
- 用电量下降了2400kW。

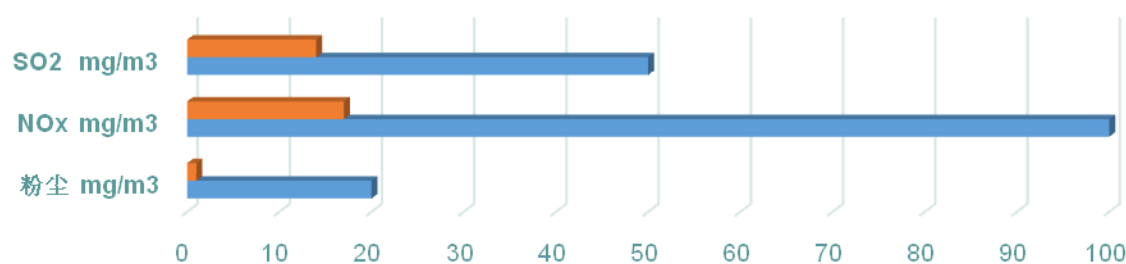
3、节能型高效全天候脱硝系列技术

- 1、**节能型高效全天候脱硝技术，解决了SCR低负荷运行的世界难题。**可确保SCR在全负荷范围内处于催化剂的高效区运行，从2011年起至今，的外三脱硝系统全年投入率均接近100%，**真正实现了全天候脱硝。**经上海市环保局统计，外三一台机组全年的NO_x减排量超过了上海同类两台机组。与此同时，该技术还能降低机组平均供电煤耗约**1克 / 千瓦时**。
- 2、**节能型空预器防堵塞与腐蚀的技术，**自2009年10月将该技术安装投用后，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。经性能试验表明，该技术能降低机组煤耗达**2克 / 千瓦时**
- 3、**节能型催化剂保效及延寿技术、**该技术于机组投产时即投入使用，成效显著。截止于2015年6月底，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89%以上，2015上半年累计平均NO_x排放**16.61mg/m³**，远远优于设计值，甚至远远优于燃气轮机排放标准。从投用至今，从未发现SCR效率的下降迹象。

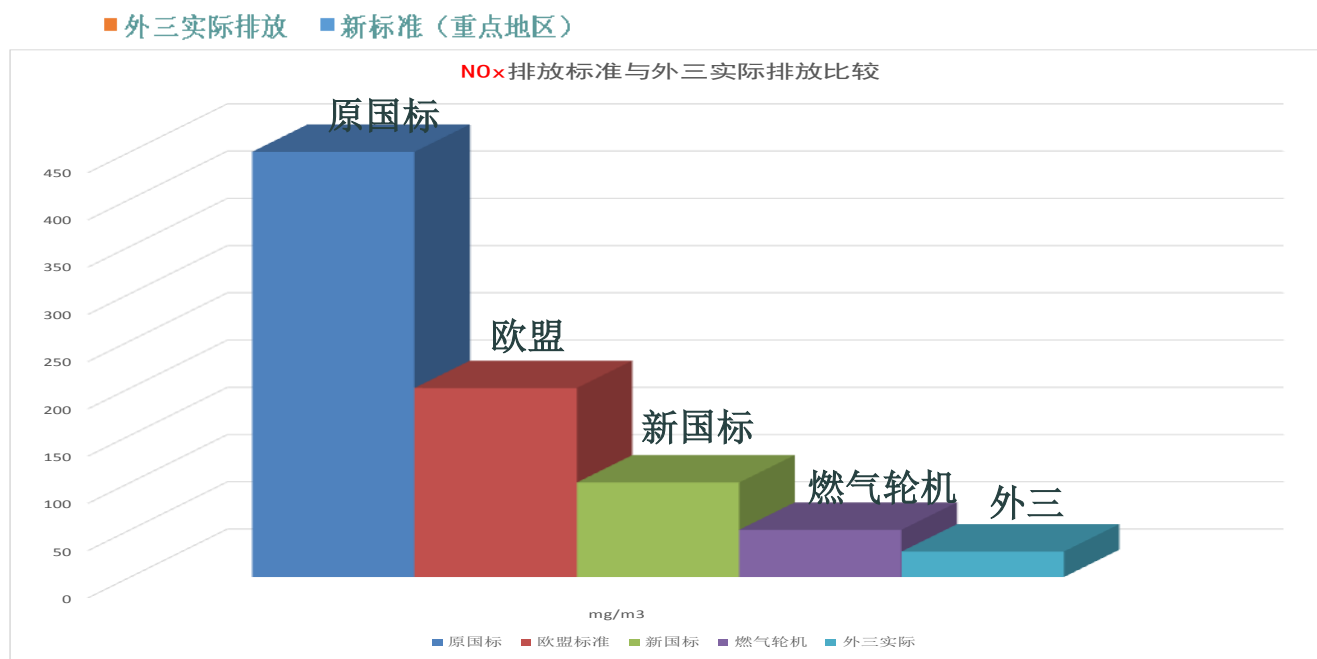
DeNOx vs. Operating hours (NH3 slip: 3 ppm wet)



外三实际排放与新标准之比较



SO2 mg/m3	Nox mg/m3	粉尘 mg/m3
14.9	17.6	0.74



随着煤电高效化和清洁化技术的历史性突破，煤电的综合环保水平已可超越燃气发电。运用这些技术，完全可以充分发挥东部地区水资源优势，放心的在负荷中心地区建设绿色煤电。

报告提纲：

一、背景和需求

二、煤电的高效化

——现有机组的节能及保效系列技术

三、煤电的清洁化

——节能型超低排放环保系列技术

四、下一代高效超临界技术

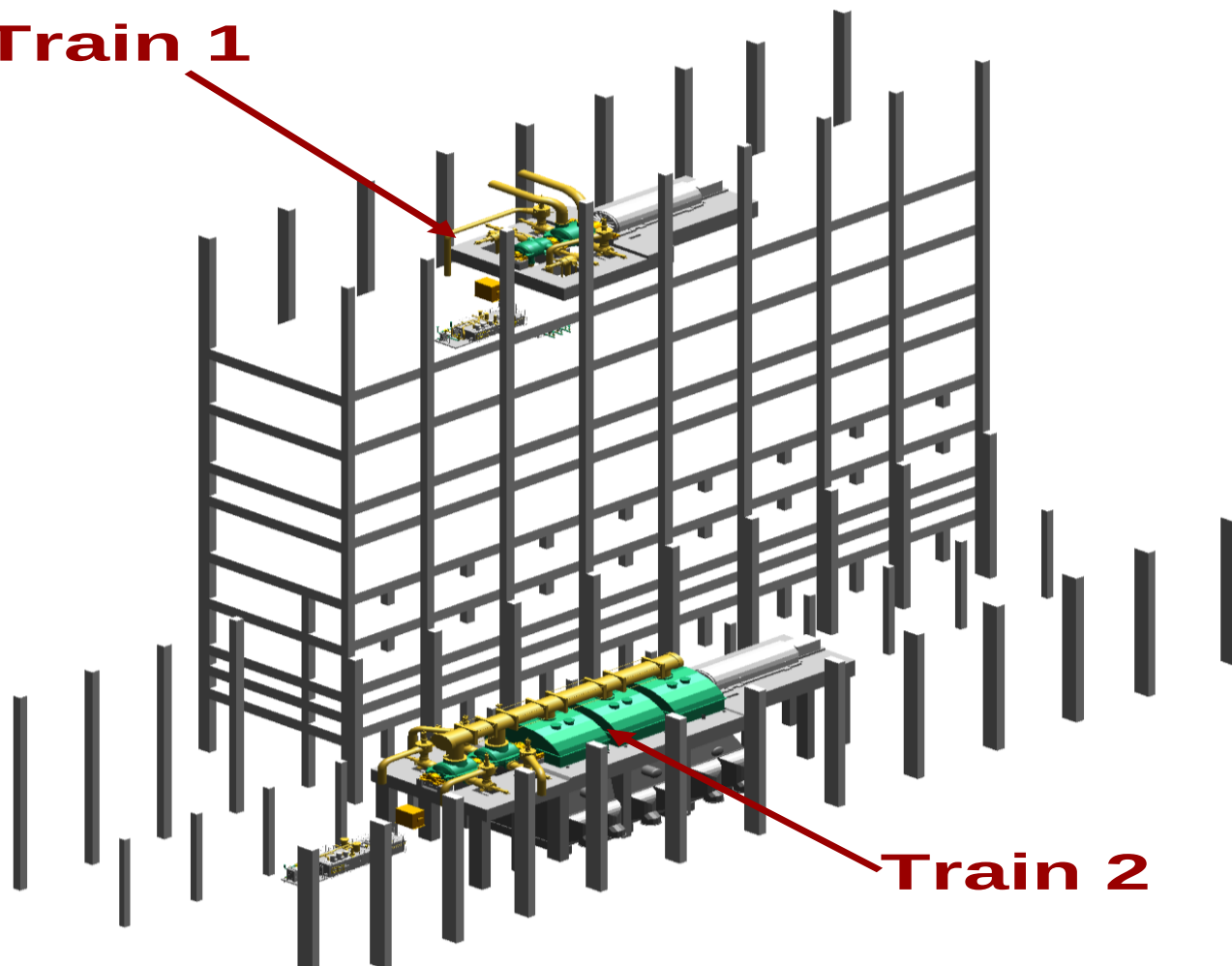
五、结束语

1、根据“一种高低位分轴布置的汽轮发电机”专利技术， 研发新一代高效超临界机组

技术核心：采用双轴汽轮发电机，将其中的高（中）压缸轴系布置于锅炉上靠近过热器和再热器的出口联箱处，（中）低压缸轴系则仍按常规布置。

技术优势：取消了大部分高价值的高温高压蒸汽管道，从而也相应消除了这部分管道对应的压力和散热损失。该技术尤适合于二次再热机组和700℃高效超临界机组。

Train 1



Train 2

1350MW高低位分轴布置二次再热汽轮发电机

- 根据SIMENS所做的热平衡计算表明，若采用600℃等级蒸汽参数及二次再热，高/低位布置方案，其汽轮发电机的热耗水平相对目前一次再热常规布置方案可再下降5%。若再集成外三已成熟的节能创新技术，机组含脱硫、脱硝的净效率可达49%的划时代水平。若将来700℃材料成熟，机组净效率可进一步升至52%。
- 应用本技术技术，还可将原4×300MW或2×600MW的亚临界机组就地改建成2×750MW的新型汽轮发电机组。其投资和改造工作量远远小于新建电厂。而其新增的容量相当于零能耗发电，故其商业价值及减排价值均极其可观。
- 换一个角度看，这些新增的发电容量，应该被称为一种更稳定，更优质，更经济，零污染的新能源。
- 若该型示范机组能建成，则此后新建的机组及现有亚临界机组的改造均可采用该技术。而对于今后发展700℃高效超临界机组，需要采用极其昂贵的蒸汽管道，本技术将具有无可比拟的优势。



五、结束语：

基于中国能源中煤炭资源占了近70%的现实，我国的低碳绿色电力的发展战略，并不应是否要发展煤电的问题，而应是如何将先进的低碳和绿色环保理念与中国的资源现实相结合，走出有中国特色的并符合中国国情的生态电力发展之路。因此，立足现有条件，最大限度的提高中国火电机组的节能和环保水平，才是我们电力企业符合科学发展规律的正确选择。

煤炭不应是污染的代名词，通过技术创新的实践证明，煤电完全可以做到比燃气轮机发电更清洁，更环保，与环境更友好！

今后，我们还将继续推动热能动力和电力环保领域的理论研究和创新实践，不断开发节能减排的新技术，为我国及国际社会的节能和环保事业作出新的贡献。

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