



# 第十届超超临界机组技术交流2016年会



龙 辉

中国电力工程顾问集团公司副总工程师，教授级高级工程师。中国能源建设集团有限公司科学技术委员会专业委员会委员、国家700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟技术委员会委员。主要从事火力发电新技术及环保工艺发展方向研究。近年来在国家级电力期刊上发表有关火电新技术发展及环保工艺方面的研究论文30篇以上。

## 超超临界机组设计参数优化、技术创新 及CO<sub>2</sub>减排最新动向

2017年2月28日-3月2日 中国·济南

主办单位：中国动力工程学会

协办单位：华能山东发电有限公司

承办单位：中国电力科技网

# 超超临界机组设计

## 参数优化、技术创新及CO<sub>2</sub>减排最新动向

龙 辉

2017年3月

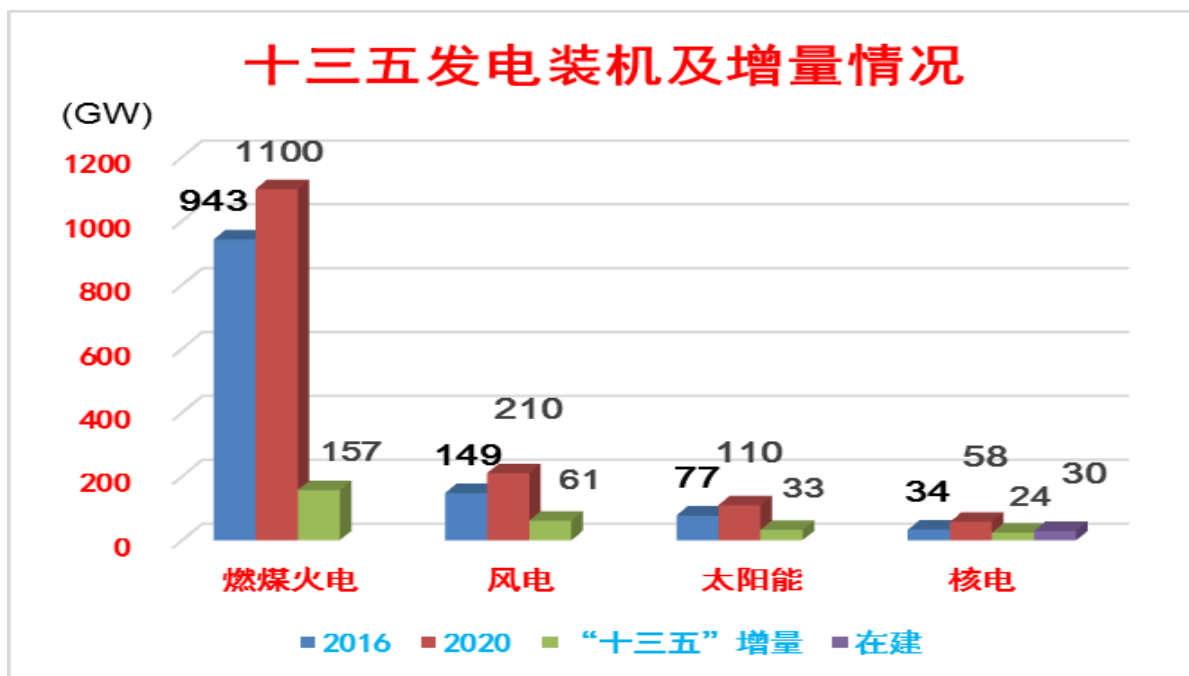
# 主要内容

- 1、超超临界机组设计参数最新优化
- 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新
- 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向
- 4、结论及建议

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

- 随着我国经济的快速发展，我国的全社会用电量快速增长，电力工业因此得到快速发展，电网规模、电源装机总量和发电量均居世界首位
- 截止2016年底，全国发电设备装机容量16.46万千瓦，其中火电装机容量10.5亿千瓦，燃煤净增4753万千瓦发电依然是最主要的发电方式



# 1、超超临界机组设计参数最新优化

- 为进一步降低能耗和减少污染物排放，改善环境，我国常规火电技术飞速向更高参数的超超临界的技术方向发展
- 截至目前，已投入运行的600℃、1000MW超超临界机组达94台，其中有62台由中国电力工程顾问集团有限公司设计，占比65.96%。

## 我国1000MW超超临界机组的分布



# 1、超超临界机组设计参数最新优化

- 2006年11月，随着华能玉环电厂1号机组1000MW机组的投运，标志着我国1000MW超超临界工程设计、制造技术的重大进步
- 2007年12月，外高桥第三发电有限公司并网发电。“外三” 在工程建设过程中实施了多项技术创新和设计优化，2011年实现全年供电煤耗276.02g/kWh
- **中国电力工程顾问集团公司完成了上述电站的设计和优化**



华能玉环电厂4×1000MW机组



上海外高桥电厂三期工程2×1000MW机组

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

| 项目     | 数值                 | 数值               | 数值                  |
|--------|--------------------|------------------|---------------------|
| 原始数据   | 早期设计1000MW机组       | 最新设计1000MW机组     | 1000MW机组            |
|        | 一次再热               | 一次再热             | 二次再热                |
| 汽轮机热耗值 | 7316.00            | 7217.00          | 7040.00             |
| 系统优化   | 无，热耗为合同保证值，没有低温省煤器 | 9级回热，蒸汽冷却器，低温省煤器 | 10级回热，2级蒸汽冷却器，低温省煤器 |
| 锅炉效率   | 93.65%             | 94.70%           | 94.65%              |
| 厂用电率   | 6%                 | 2.98%            | 3.91%               |
| 发电效率   | 45.22%             | 46.77%           | 47.92%              |
| 供电效率   | 42.45%             | 45.37%           | 46.04%              |
| 供电标准煤耗 | 289.7              | 271.1            | 267.1               |

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

与早期设计的1000MW超超临界机组相比，最新设计的1000MW二次超超临界机组供电效率提高3.59%，供电煤耗下降22.6g/kW·h。

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

国内在发展600℃超超临界、一次/二次再热机组的同时，也在开展更高参数超超临界机组设计技术的研究，以采用35MPa等级、630~650℃等级参数的机组为研究对象，在提高机组发电效率的同时尽量降低机组技术难度（尤其是材料上的难度）和降低机组建设成本为目标下开展研究，引领我国高效超超临界燃煤火力发电技术，从而真正达到世界火力发电领先水平创造条件。结合创新的总体热力系统设计和更高效率的主机方案，使机组发电热效率有望达到50%以上。

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

## 德国最新投运的再热蒸汽温度超过600℃超超临界机组情况

| 机组              | 参数                |
|-----------------|-------------------|
| 德国Datteln 4电厂   | 28.5MPa/600℃/620℃ |
| 德国RDK8          | 27.5MPa/600℃/620℃ |
| 德国Westfalen     | 600℃/620℃         |
| 德国Ensdorf       | 600℃/620℃         |
| 德国Walsum 10     | 29.0MPa/600℃/620℃ |
| 德国Herne         | 600℃/620℃         |
| 德国Boxberg R     | 31.5MPa/600℃/610℃ |
| 德国GKM9          | 27.5MPa/600℃/620℃ |
| 德国Moorburg A/B  | 30.5MPa/600℃/610℃ |
| 德国Staudinger 6# | 27.5MPa/598℃/619℃ |
| 德国Neurath F#、K# | 26MPa/600℃/605℃   |

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

德国最新投运的机组全部为一次再热，主汽温度 $600^{\circ}\text{C}$ ，再热温度 $620^{\circ}\text{C}$ 左右，主汽压力 $27.5\text{MPa}\sim 31.5\text{MPa}$ 之间。

# 1、超超临界机组设计参数最新优化

|    | 项目     | 数值                      |
|----|--------|-------------------------|
| 一、 | 原始数据   | 欧洲某1000MW机组最近投标         |
|    |        | 一次再热                    |
| 1  | 汽轮机热耗值 | 6899.00                 |
|    | 汽机厂    | 国外某公司                   |
|    | 系统优化   | 9级回热，蒸汽冷却器，低温省煤器的负作用算汽机 |
| 2  | 锅炉效率   | 95.63%                  |
|    |        | 低温省煤器的效果算锅炉             |
| 3  | 管道效率   | 99.00%                  |
| 4  | 厂用电率   | 7.69%                   |
| 5  | 发电效率   | 49.40%                  |
| 6  | 发电标准煤耗 | 249.0                   |
| 7  | 供电效率   | 45.60%                  |
| 8  | 供电标准煤耗 | 269.7                   |

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

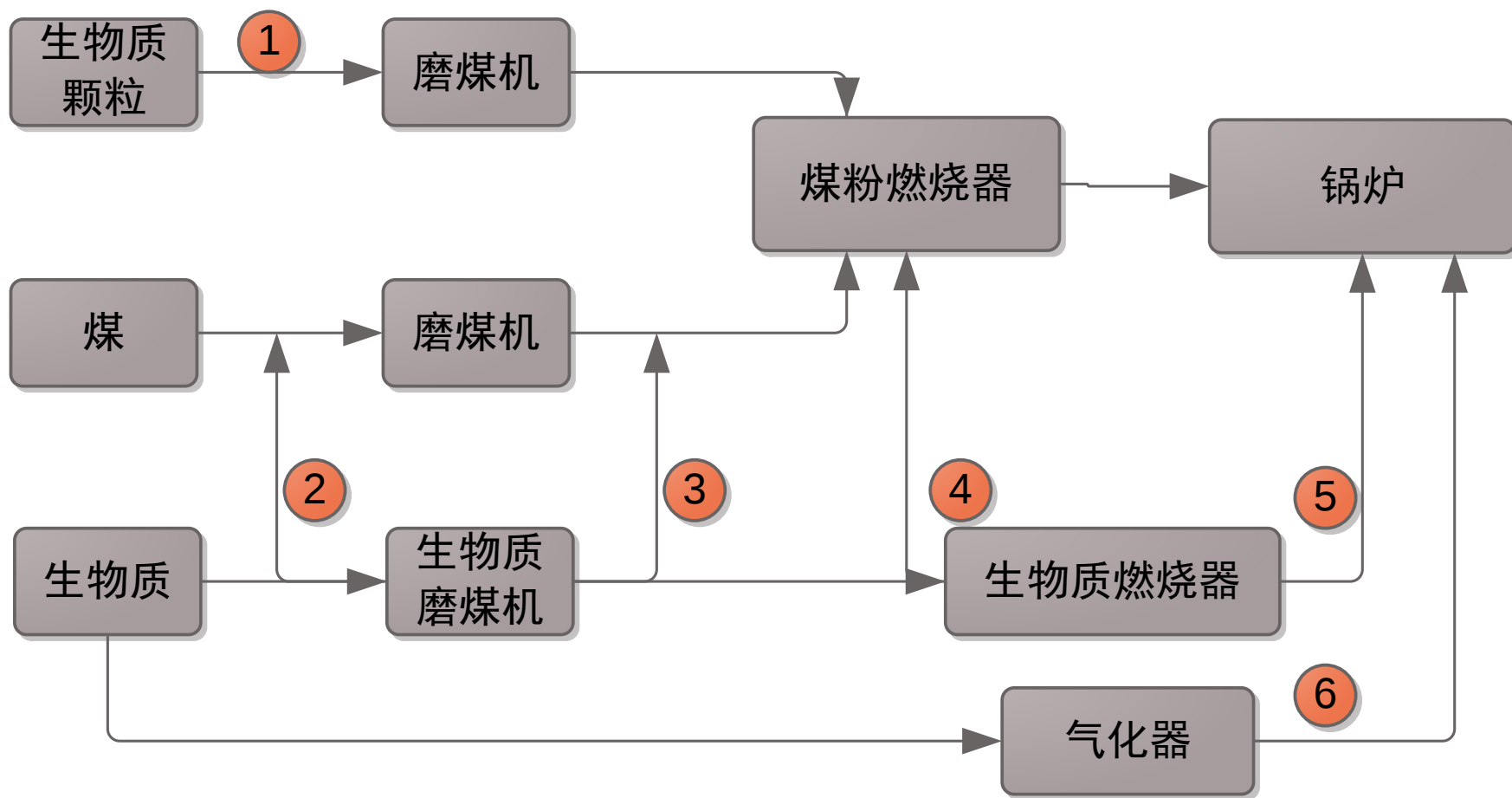
## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### (1) 大型煤粉炉生物质混烧技术研究

与化石燃料相比，生物质能具有可再生性和低污染性的优点，同时生物质作为燃料时，由于它在生长时需要的二氧化碳量相当于它燃烧时排放的二氧化碳的量，因而对大气的二氧化碳净排放量近似于零，可有效地减轻温室效应。混合燃烧在许多国家都是完成CO<sub>2</sub>减排的最经济的技术措施，益处包括利用本地资源发电、减少烟气处理量以及资源的高效利用，并且上述优势可以非常低的技术风险得以实现。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### 大型煤粉炉生物质混烧技术路线图



(1) 方案1将生物质颗粒送入磨煤机中进一步碾磨，并将碾磨好的生物质输送至已有的点火系统。该方案已在北欧一些小型煤粉炉系统中成功开展，目前，该方法在北美也是一个重要的研究领域。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

(2) 方案2是在煤粉处理系统中，将生物质与煤粉按照混烧比例进行预混，在现存燃煤系统中进行混合燃料的研磨和燃烧。该方法所需增加的投资不高且实现相对容易，成为目前混烧技术中使用最为广泛的一种方法。由于适用生物质原料供应安全性问题，或者政府补贴资助或其他财政鼓励混烧计划的政策的长期安全使用等想法，该方法是火电厂的运行人员最初开始混烧技术时常用的方法。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

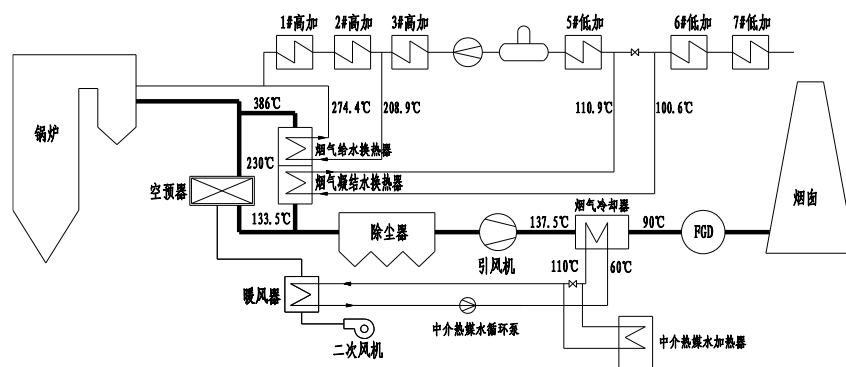
(3) 方案3, 4和5包括预研磨生物质直喷煤粉燃烧系统。例如，喷入煤粉管道、改造燃烧器或者新型专用生物质燃烧器。这些方案涉及更高的资本投资，但是混烧比例比方案2要高很多。在过去的几年间，在北欧的一些燃煤电厂已经安装了直喷系统。这种方法可以作为新建具备生物质混烧能力的燃煤电厂工程的优先选择。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

(4) 方案6包括在专用机组的生物质气化，通常空气在大气压下吹进，在煤粉锅炉中混烧。在产生气体进入煤粉锅炉中燃烧前可净化或者不净化。这种生物质混烧方法已经在北欧少量的电厂中采用。

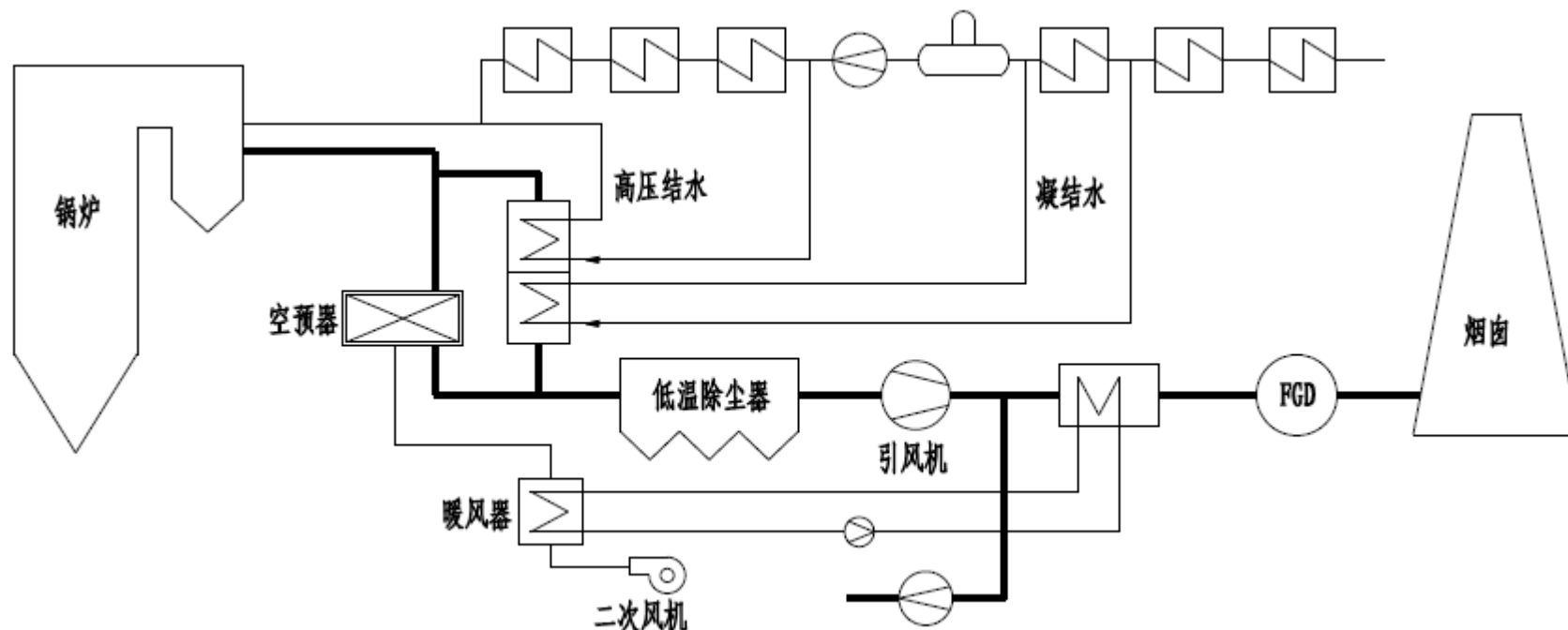
## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

从2010年开始研究高效烟气余热梯度利用技术、加热高压给水、加热凝结水、该部分烟气与空预器出口烟气汇合，通过除尘器进入热媒（水）烟气—空气换热器，加热进入空预器的冷风。



## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### 烟气余热梯度利用系统流程图如下：



与常规烟气余热利用技术相比，燃褐煤锅炉采用烟气余热梯度利用方案的节能效果高出较多，供电煤耗可降低5~6g/kW·h。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### 改进的烟气余热利用技术

在烟气梯度余热回收的基础上，根据不同的建设条件目前也有新建电厂或改造项目采用除尘器前、后均设置烟气余热利用的方案。在烟气余热利用的同时，改善除尘器的工作状态。改进型的烟气余热利用方案，可以加热凝结水，也可以后一级采用热媒（水）加热器加热冷风，提高空气预热器入口风温方案，替换更高品质的蒸汽，进一步提高机组热效率，

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

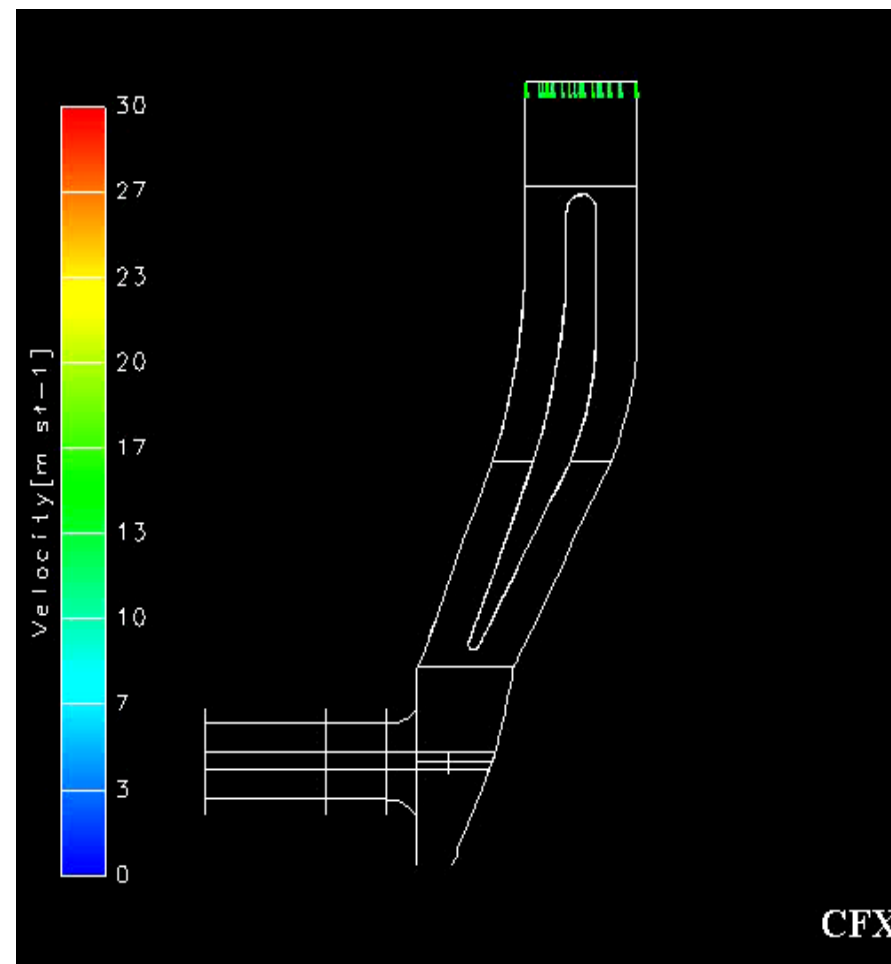
此方案利用烟气余热加热两种介质：**进入锅炉的冷风及汽轮机回热系统的凝结水**。其一，利用吸收塔入口的烟气加热锅炉进口的冷一次风和（或）冷二次风。锅炉进口冷风温度的提高的能力一小部分转化为热风温度的提高并最终输进炉膛，提高了锅炉效率。通常，对于燃烟煤机组，供电煤耗可降低3~4g/kW. h。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### (3) 流线型烟风道设计技术研究

现代设计技术手段的提高，可以使设计技术更加精确化。以传统的烟风道设计为例，传统的烟风道设计按照前苏联标准、美国标准进行计算，现代计算机运算水平的提高，利用数学模拟进行烟风道流场计算可大幅度降低整个烟风系统阻力，与各大设计院目前开展的局部烟风道设计优化、圆形烟风道优化不同，流线型烟风道外形设计成流线型，导流板设计成机翼型。

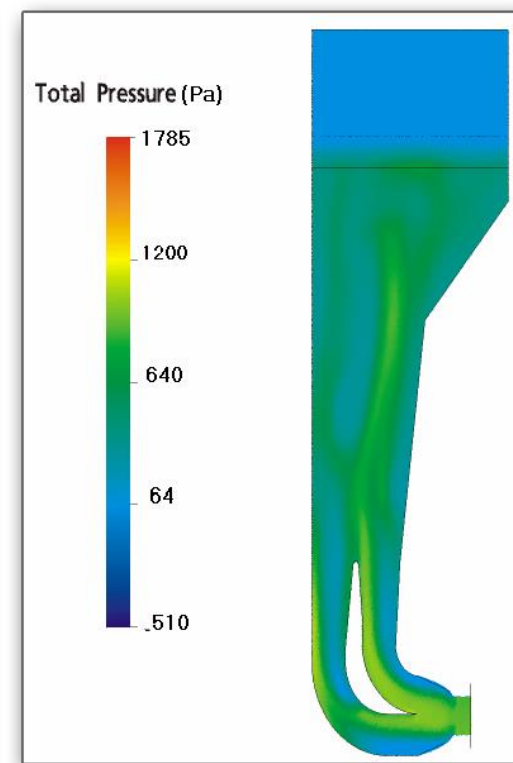
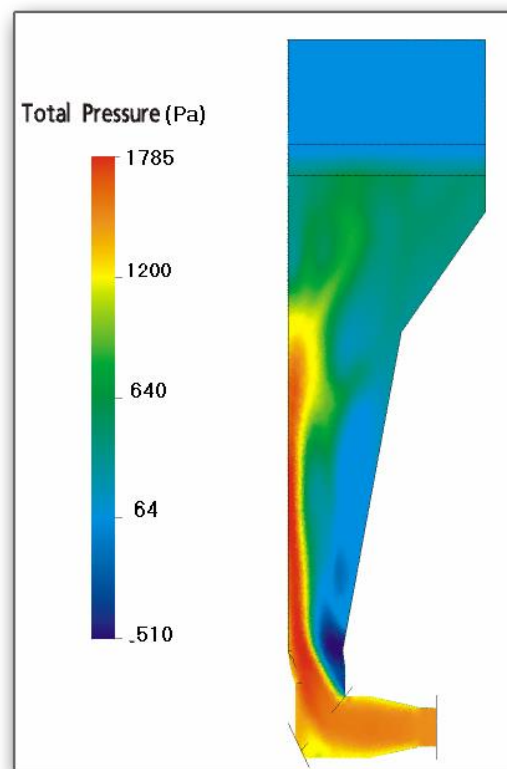
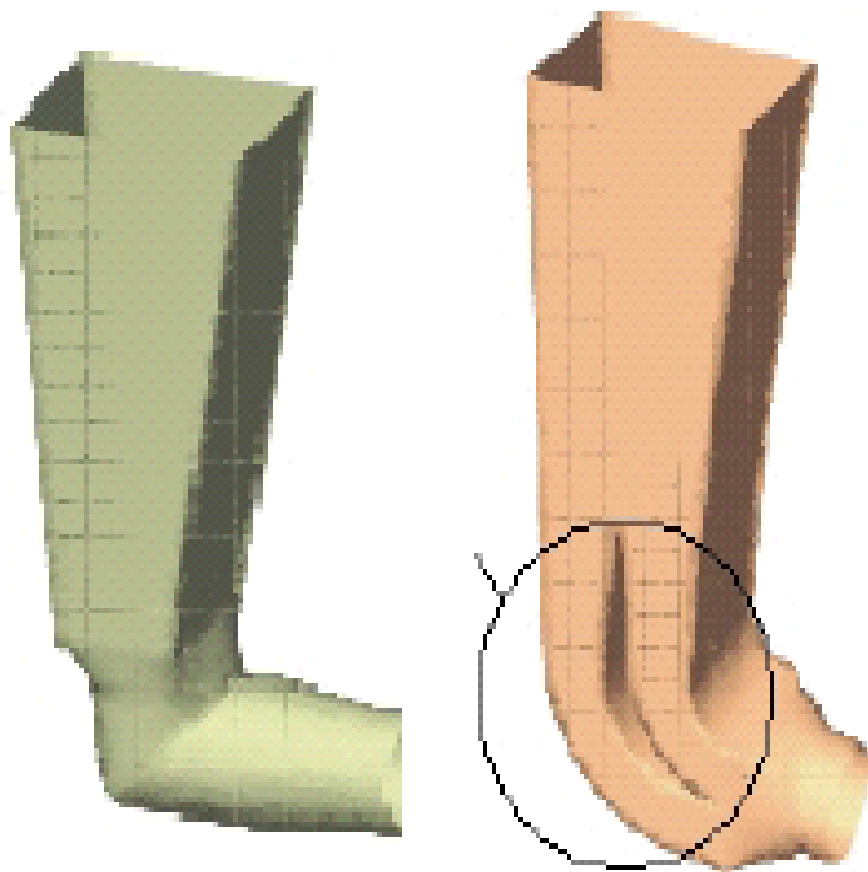
## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新



送风机入口风道阻力降低237Pa

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.



送风机出口可降低阻力747Pa

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

与目前开展的局部烟风道设计优化、圆形烟风道优化不同，流线型烟风道外形设计成流线型，导流板设计成机翼型。通过设计优化送风机、一次风机、引风机系统均可在目前设计条件下降低阻力，从而使送风机、引风机、一次风机轴功率能耗降低，全厂厂用电率降低。以在运的1000MW机组与采用低阻烟风道对比，预期降低的功率见表。

## 2、超超临界机组辅助系统技术创新

| 系统                                                 | 预期降低的压力损失 | 预期节约的功率 |
|----------------------------------------------------|-----------|---------|
| 一次风系统                                              | 1kPa      | 400kW   |
| 二次风系统（包括到燃烧器风箱风道、风门、消音器）                           | 1.2kPa    | 700kW   |
| 烟气系统（包括SCR、空气预热器、除尘器入口、出口，引风机入口烟道、消音器、风门、FGD、烟囱入口） | 1.5kPa    | 1800kW  |
| 每台机组预期降低情况                                         | 3.73kPa   | 2900kW  |

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

采用精确化设计的流线型烟风道比传统设计的烟风道降低阻力共计3.73kPa，可降低厂用电率0.29%。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### (4) 减少火电厂SO<sub>3</sub>排放技术

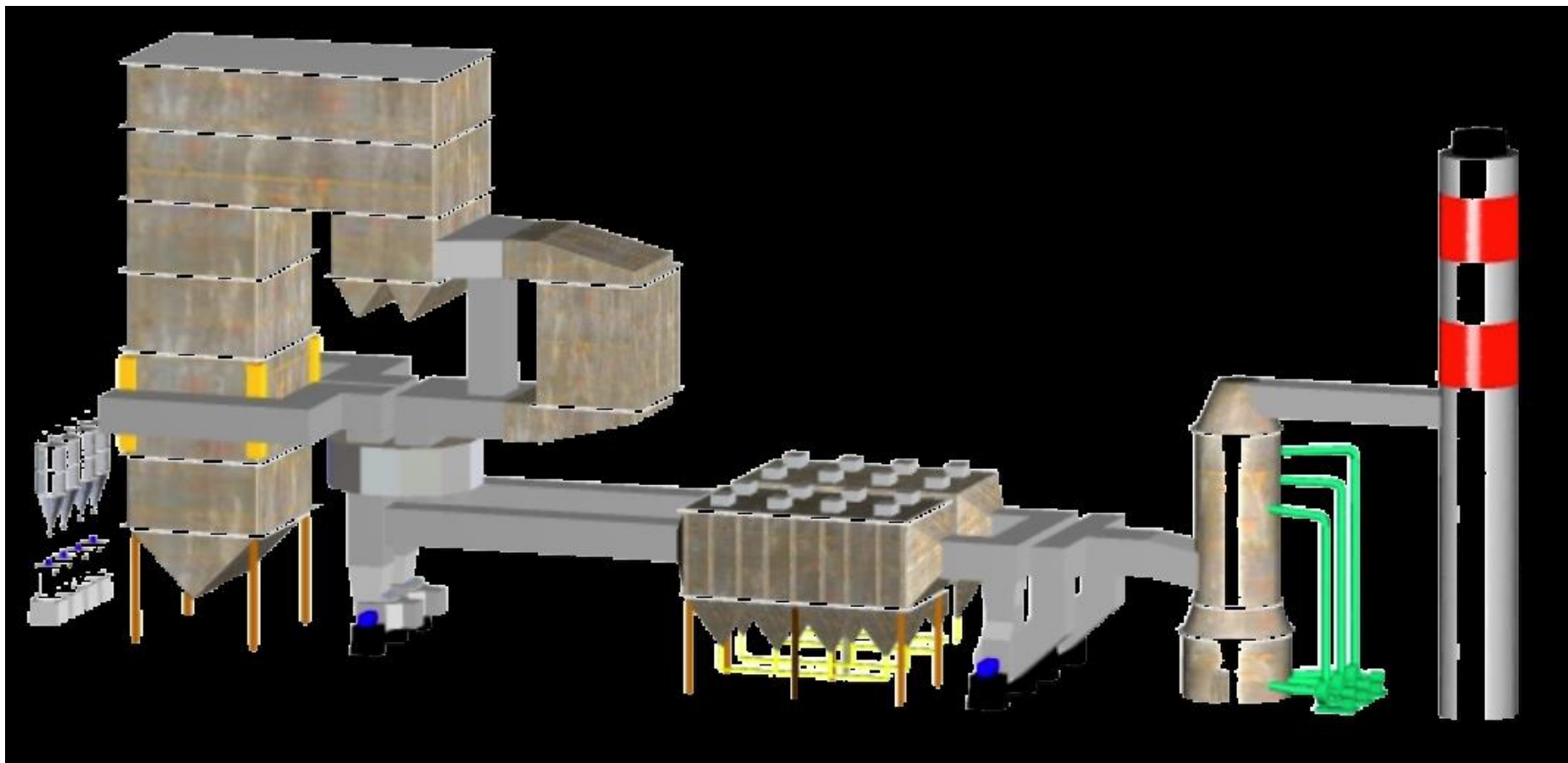
燃煤电厂采用选择性催化还原技术控制氮氧化物，会引起烟气中SO<sub>3</sub>浓度显著升高，形成可见的硫酸烟羽；同时增加烟道末端设备的腐蚀，降低能源效率并影响系统的运行和性能。近年来SO<sub>3</sub>排放及控制问题在我国电力行业开始受到关注。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.

锅炉燃料中的硫有**1-2 %**转化成 $\text{SO}_3$

经过**SCR**有**0.3-1.5 %**的 $\text{SO}_2$ 转化成 $\text{SO}_3$



## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### 降低烟囱硫酸烟羽

$\text{SO}_3$ 排放产生的硫酸盐气溶胶粒子的光散射效应会导致烟羽变色。具体视觉效果取决于各种因素，包括气象条件（日照量、温度、相对湿度及风速）和烟囱特性（烟囱直径和出口气体速度）。但一般认为，如果 $\text{SO}_3$ 浓度小于5ppm时，将不会产生不透明烟羽。随着 $\text{SO}_3$ 浓度增加，出现硫酸烟羽的可能性加大。过去发生的多次重大硫酸烟羽事件已成为公众关注的问题。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.

### 硫酸气溶胶引起蓝烟问题



## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

脱除SO<sub>3</sub>可消除蓝烟，降低烟气酸露点，可降低空预器出口烟温，每降低20°C，锅炉效率增加1%；降低SCR的MOT，可减少催化剂的用量和减少在低负荷时停SCR的次数；减少布袋除尘器的腐蚀和清灰次数；减少锅炉设备的腐蚀；减少SCR对空预器的ABS沾污。

根据国外电厂的估计，一台500MW的机组，每年可以节约运行费用500万美元。

## 2、超超临界机组辅助系统设计技术创新

### 主要技术：SBS喷射技术

在空气预热器入口喷射 $\text{NaCO}_3$ 技术与回转式空气预热器相结合来提高热回收效率，通过前者能有效控制 $\text{SO}_3$ 浓度，后者有效回收热能，燃烧烟气中的硫酸和其他酸性化合物可引起空气预热器内结构与腐蚀，降低热回收效率。清除酸性物质则可以燃煤电厂的热效率。已成功实现了在 $104^\circ\text{C}$ 时稳定运行。电厂这一改进能使综合效率提高3%。

## 2、超超临界机组辅助系统技术创新

- 特点：
- 1、电厂锅炉效率提高，燃煤量降低；
  - 2、减少空气预热器结垢，防止末端腐蚀，空气预热器可靠性提高；
  - 3、三大风机能耗降低；
  - 4、湿法脱硫用水量减少；
  - 5、机组出力降低情况减少；
  - 6、汞的捕集能力增强。

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

#### 荷兰鹿特丹最新建成的MPP3 电厂

采用超超临界参数：28.5MPa/600°C /620°C, 机组容量：1100MW，机组净效率高于46%。混烧30%左右的生物质，区域供热和CO<sub>2</sub>捕集量装置，容量达到250MW。CO<sub>2</sub>捕集量装置是全世界目前最大的CO<sub>2</sub>收集装置，110万t/y，最高500万t/y。该机组2014/2015年投运。

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.



### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

电厂的烟气治理环保设备有： SCR 脱硝、电除尘器、石灰石-石膏湿法脱硫工艺。

主要设备供应商： 汽轮机日立、发电机ALSTOM、电厂控制管理 ABB、脱硫 FISIA、电除尘Balcke

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.



### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

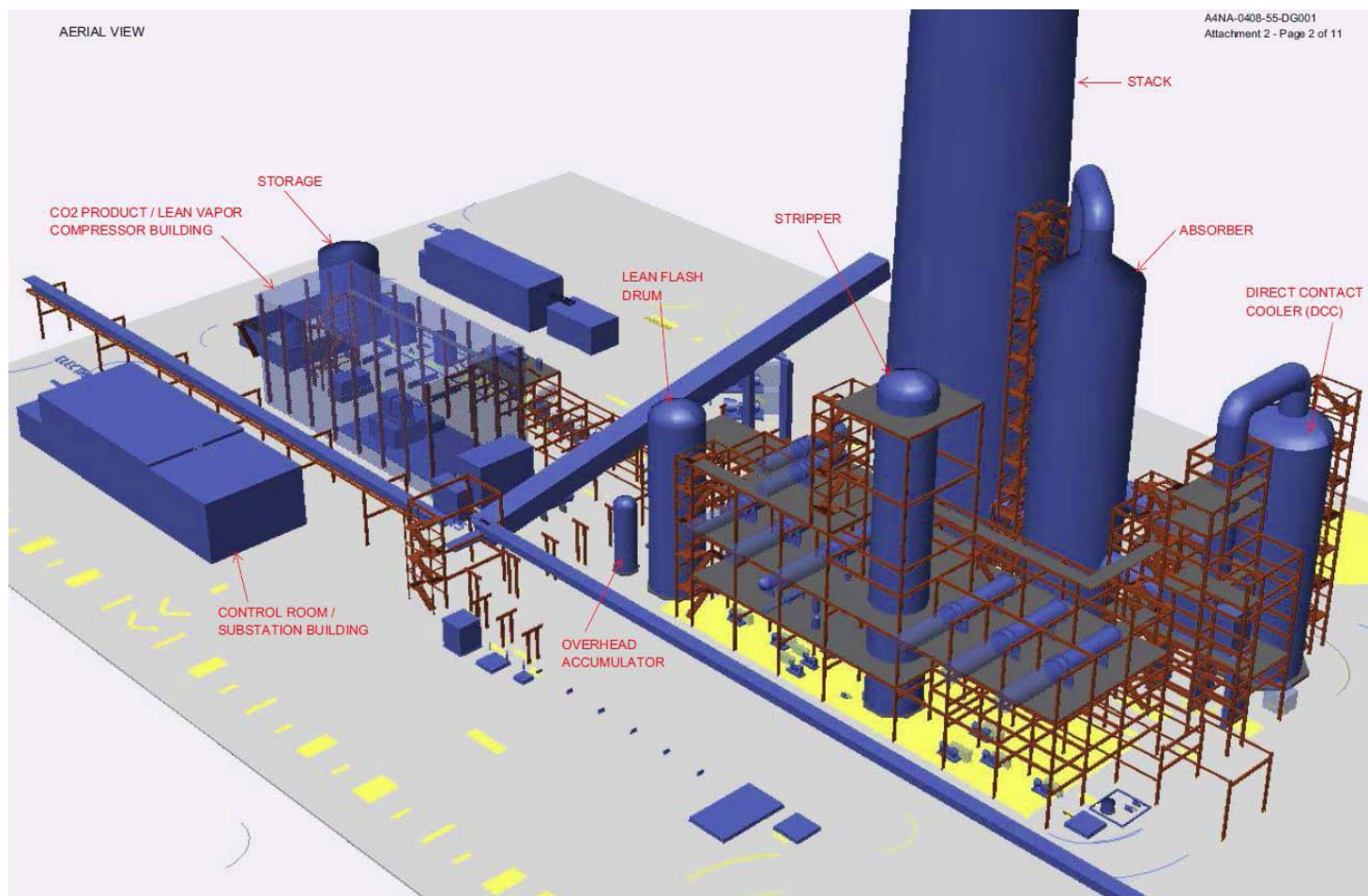
排放值比较 (mg/m<sup>3</sup>)

| 项目              | IPPC /BREF | DCMR  | 环保设施   | MPP 3 |
|-----------------|------------|-------|--------|-------|
| SO <sub>2</sub> | 20~150     | 20~40 | 98%    | ≤40   |
| NO <sub>x</sub> | 90~150     | 30~75 | 80~90  | ≤65   |
| 烟尘              | 5~20       | 1~3   | 六电场除尘器 | ≤3    |

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向



### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向



CO<sub>2</sub> 捕捉装置：2016年投入运行

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

**CPECC** 中国电力工程顾问集团有限公司  
CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO., LTD.



### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向



输送管线:  $\phi$  406管, 25km长, 5 km 陆地, 20 km 海中, 设计17.5 MPa, 80 °C,

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

#### CO<sub>2</sub> 贮存位置



运行商：TAQA

贮存深度：

3, 500 m

贮存总容量：

3500万t/y

### 3、国外超超临界机组CO<sub>2</sub>减排最新动向

CCS总投资：近4亿欧元 ， 1600欧元/kW

项目发展商：Maasvlakte CCS Project C.V

## 4、结论及建议

## 4、结论及建议

### CO<sub>2</sub>减排目标

欧洲：2030年比2005年降低碳排放40%；

美国：2025年比2005年降低26%~28%；

日本：2030年比2005年降低碳排放24.5%；

中国：2030年单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降60%~65%。

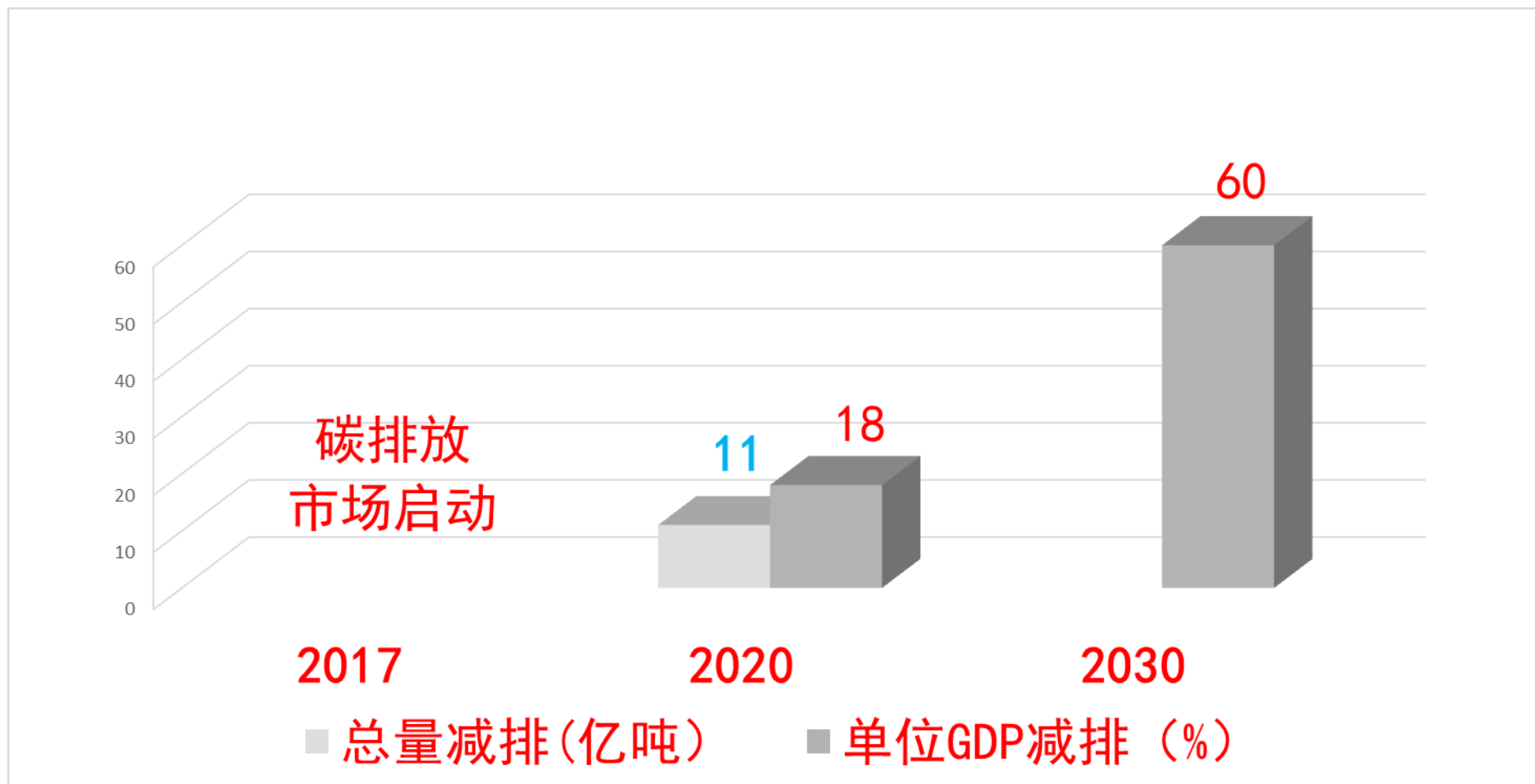
## 4、结论及建议

国务院2016年10月27日关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知国发〔2016〕61号指出：到2020年，单位国内生产总值二氧化碳排放比2015年下降18%，碳排放总量得到有效控制。全国碳排放权交易市场启动运行，到2020年，能源消费总量控制在50亿吨标准煤以内。通知还提出了大型发电集团单位供电二氧化碳排放控制在550克/千瓦时以内。

## 4、结论及建议

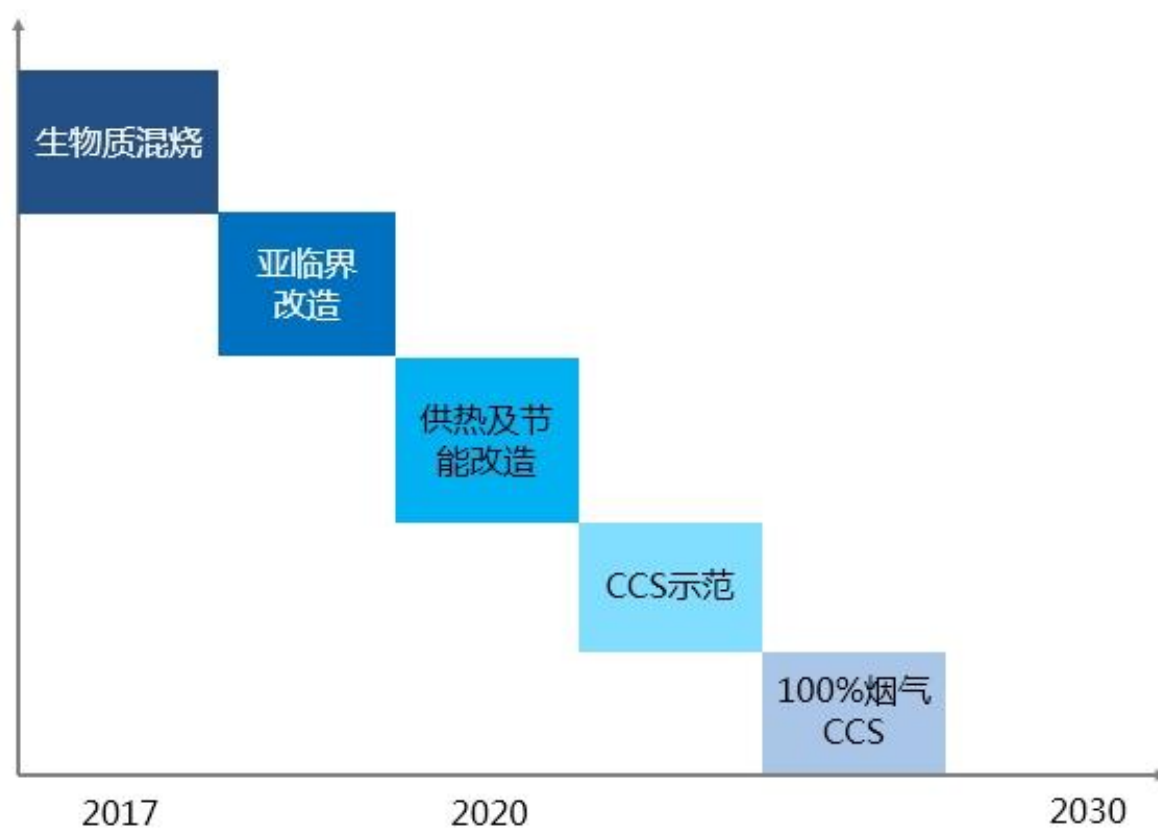
“十三五”期间累计减排二氧化碳当量11亿吨以上，加快区域低碳发展“十三五”期间，北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、山东、广东碳排放强度分别下降20.5%，福建、江西、河南、湖北、重庆、四川分别下降19.5%，山西、辽宁、吉林、安徽、湖南、贵州、云南、陕西分别下降18%，内蒙古、黑龙江、广西、甘肃、宁夏分别下降17%，海南、西藏、青海、新疆分别下降12%。推动部分区域率先达峰。

## 4、结论及建议



## 4、结论及建议

### 燃煤电厂CO<sub>2</sub>减排路线图



## 4、结论及建议

(1) 今后数年，省级政府、各大火电集团、电厂均面临巨大的碳减排压力，需要更加全面的审视我们的燃煤火电机组的技术研究和发展方向。

(2) 我国燃煤火电机组以高效、清洁、低碳技术研究为主要方向，仍将以发展超超临界参数为主。

## 4、结论及建议

(3) 我国南方大部分机组以超（超临界）机组为主，将以进一步节能和降低碳排放为目标，可开展大型燃煤锅炉混烧生物质、供热改造等进行碳减排示范。

谢谢！  
请各位专家  
指正！