

清华大学毛健雄：中国煤电发展方向

9月5-7日，由中国电力科技网主办，华润电力（唐山曹妃甸）有限公司协办的第十三届“超超临界机组技术交流2019年会”在唐山召开。中国工程院院士、清华大学原副校长倪维斗，清华大学能源与动力工程系教授毛健雄，国务院参事室特约研究员、国家发改委能源局原局长徐锭明任年会主席。**32**位专家出席演讲并答疑。

会议旨在深入交流超超临界发电技术最新发展动态，持续研讨创新技术、发展成果、运行维护和管理经验，应对深度调峰运行，探讨、设计更高参数超超临界、超临界火电机组，创新亚临界升级改造，降低CO₂排放，加速超超临界发电技术在设计、制造等方面迈上新台阶。

清华大学能源与动力工程系教授毛健雄发表《中国煤电发展方向》演讲。明确以煤为主的中国能源结构将长期无法改变，煤碳作为主要能源对中国的经济增长贡献巨大，煤电是煤炭的最大消费者，也是最大的电力供应者。目前如何实现“低碳发展”，也就是“减煤发展”，以应对“气候变化”的挑战，是中国煤电遇到的最大挑战。当前形势和条件下，控制数量，提高质量，实现高效、清洁和低碳发展，“高温亚临界”技术的推广，具有煤电节能减排和低碳发展的重大意义。同时，指明中国煤电的低碳发展方向（1）继续关闭淘汰约1亿千瓦的落后低效机组；（2）进一步大幅度提高现有超临界机组的效率，示范更先进的超超临界技术；（3）对约3.5亿千瓦的亚临界机组升级改造，使之达到超超临界的煤耗水平；（4）生物质与煤混烧直至燃煤电厂的生物质转换。



毛健雄

超超临界机组技术交流2019年会



毛健雄

清华大学热能工程系教授，曾任清华大学热能工程系副主任，1993年被聘为英国煤炭科学研究院顾问，1995年被英国DeMontfort大学授予荣誉技术博士学位，1999年被选为英国能源学会高级会员。长期从事燃烧理论和燃烧设备、锅炉设计和洁净煤技术、清洁煤燃烧发电技术、超临界和超超临界燃煤发电技术及燃煤电站二氧化碳捕获和封存技术等教学、科研和国际交流工作，至今已有50多年。发表论文上百篇。

中国煤电发展方向

2019年9月5-7日 中国·唐山

第十三届超超临界机组技术交流2019年会

中国煤电的发展方向

毛健雄

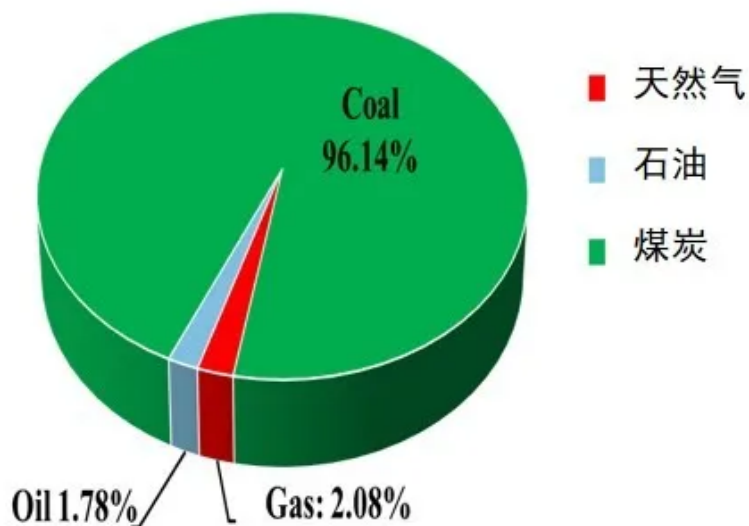
清华大学 能源与动力工程系

2019年9月5日 唐山

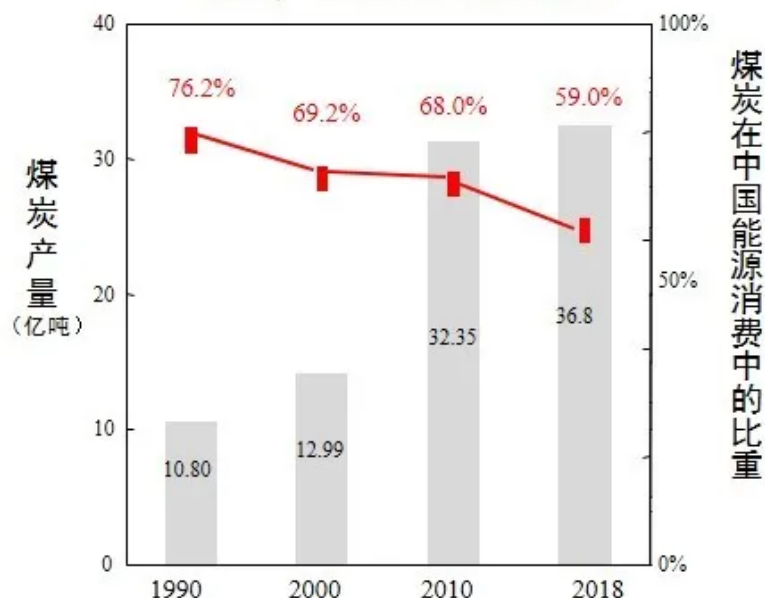


中国能源资源的禀赋决定了煤炭为主的能源结构

在化石燃料的能源结构中，
煤炭为主还无法替代



煤炭的比重虽然在不断
下降，但依然以煤为主

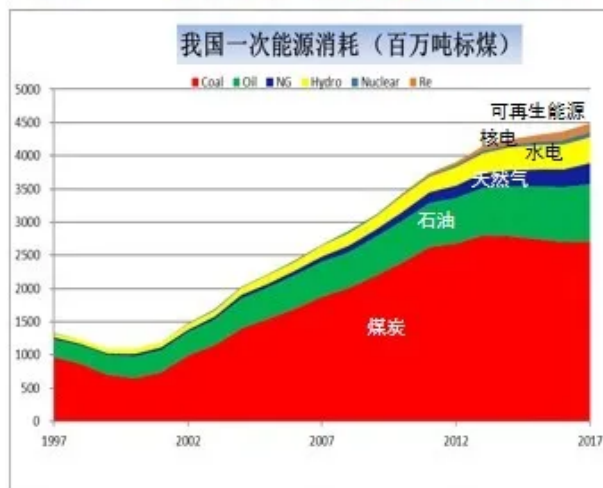


在面对“气候变化”的严峻挑战，能源正在快速进行清洁低碳转型的大背景下，至今仍未能改变“煤为基础，煤电为主，油气进口”这一我国能源的基本格局。

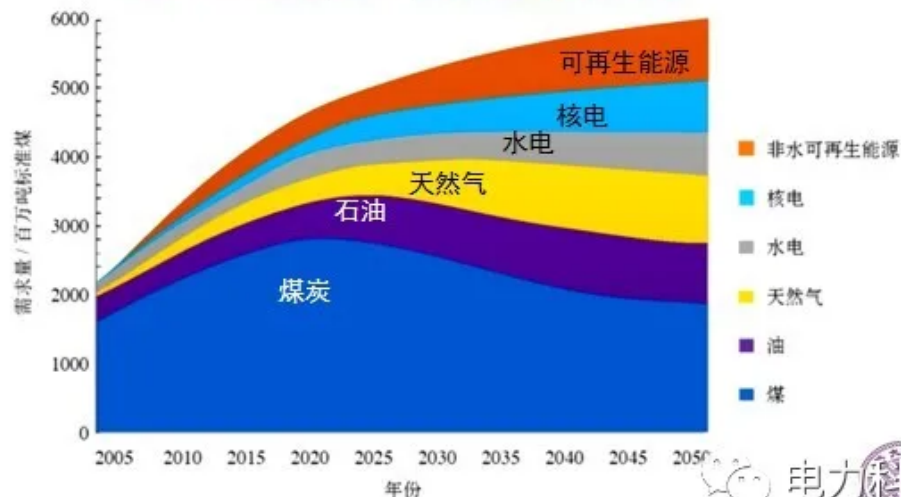
以煤为主的中国能源结构将长期无法改变

为了应对“气候变化”，要求大力发展低碳能源，世界能源结构正在发生很大的变化，尽可能减少煤炭使用已成为共识，“去煤化”甚至成为了一些发达国家的能源发展政策。中国的情况有很大的不同，根据中国工程院预测，中国的年能源消费，将会从2018年的46.2亿吨标准煤增长至2050年的60亿吨标准煤。虽然在中国的能源消费结构中，煤炭消费的比重在下降，但是直至2050年，煤炭消费量的绝对值和所占比重，和其它能源相比仍然是最大的。因此，中国距离“去煤化”还很遥远，现在，除了大力发展可再生能源和核能外，煤炭仍然大有文章可做，而且必须做好这篇文章，也就是高效、清洁、低碳发展。

至2017年中国一次能源消费结构



至2050年中国一次能源消费结构



煤炭作为主要能源对中国的经济增长贡献巨大

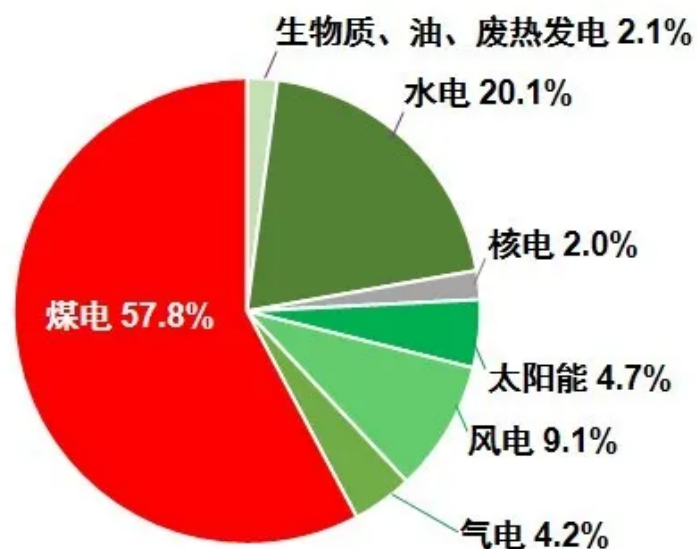
- 煤炭在中国能源消费中的比重为59%
- 燃煤发电量占中国总发电量的65.2%
- 煤炭为中国的钢铁和建材工业提供了80%的能源
- 煤炭为中国的化学工业提供了50%的原材料
- 煤炭及其相关工业为中国GDP的贡献超过了15%
- 由此可见，在一个相当长的时期内，煤炭对中国的能源和经济发展仍然起着至关重要的作用，因此，即使在应对气候变化的巨大压力下，中国必须做好煤炭这篇文章，尤其是煤炭的最大使用者--燃煤发电。



煤电是煤炭的最大消费者，也是最大的电力供应者

2018年，煤电在在我国的电源结构和发电量中仍然是主导者

2018年，中国电力的总装机容量19亿千瓦， 其中煤电装机容量超过10亿千瓦， 占总装机容量的57.8%。全国总发电量69947亿千瓦时， 其中煤电发电量49246亿千瓦时， 占总发电量的 65%



全国电力总装机容量19亿千瓦



全国总发电量69947亿千瓦时

中国煤电的发展和取得的成果史无前例

- 超过10亿千瓦世界最大的煤电装机容量；
- 具有世界上最大总容量和装机台数的超超临界机组；
- 实现了全国煤电平均供电效率和供电煤耗世界领先；
- 10亿千瓦煤电机组达到超低排放，实现了高效和清洁发展；
- 正在建造世界上单机容量最大、供电效率最高和供电煤耗、污染物排放及二氧化碳排放强度最低的二次再热超超临界工程。
- 现在中国煤电遇到的最大挑战，就是如何实现“低碳发展”，也就是“减煤发展”，以应对“气候变化”的挑战，这首先就是最大限度地提高效率、降低煤耗。



中国煤电清洁低碳发展的途径

“上大压小” 发展先进，淘汰落后大幅度降低全国平均煤耗

- 至今，在“上大压小”政策推动下，从2005年开始，已经有大约100GWe的小容量低效率的机组被关停，而与此同时，此后的新机组除热电联产机组外，绝大多数新机组为600-1000MWe的超临界和超超临界机组，至今约300GWe大容量高效率的机组投入了运行；
- 由于“上大压小”政策的推动，全国平均供电煤耗从2005年的370 gce/kwh 降低至2018年的307gce/kwh，13年来全国平均供电煤耗下降了 **63gce/kwh**，平均每年下降**4.85gce/kwh**。

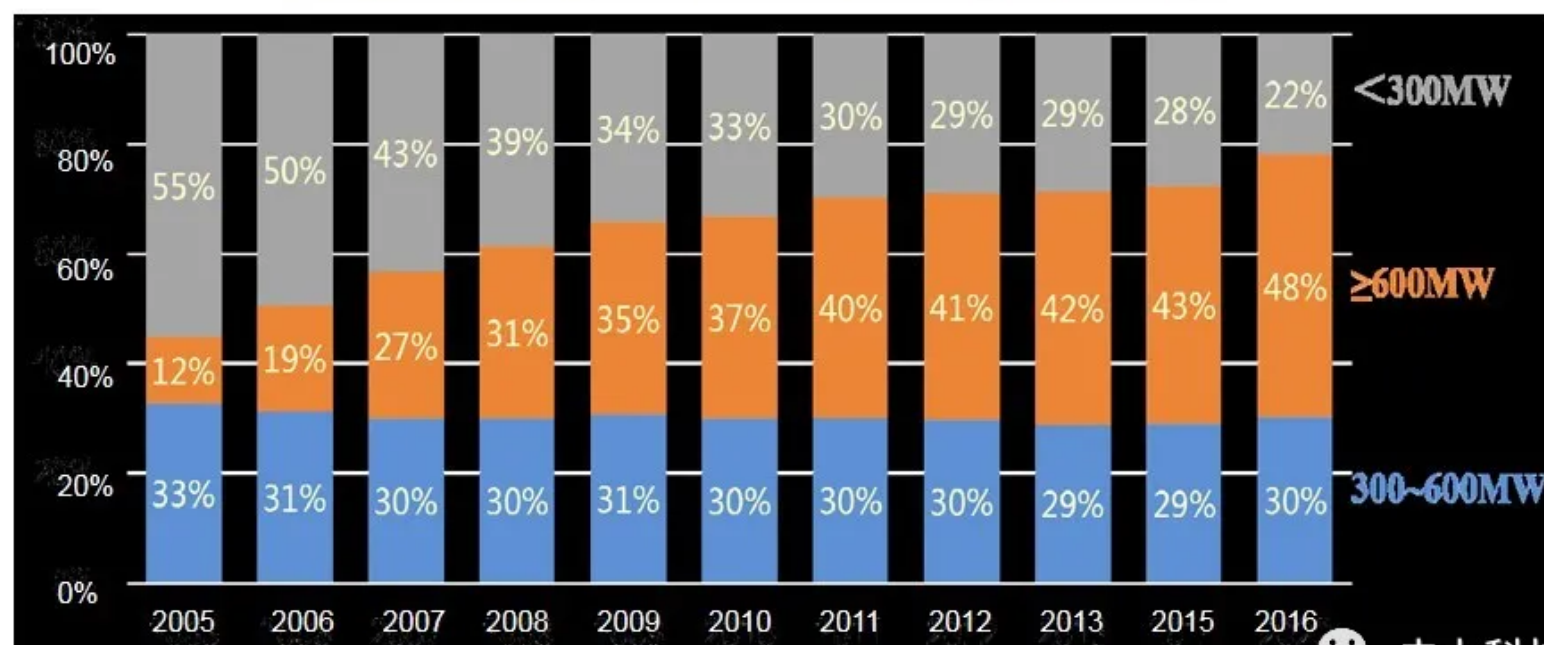
年	火电装机总容量 (MWe)	全国平均供电煤耗 (gce/kWh)
2005	384,130	370
2006	484,050	367
2007	554,420	356
2008	601,320	345
2009	652,050	340
2010	706,630	333
2011	765,460	330
2012	819,170	326
2013	862,380	321
2014	915.690	318
2015	1022.74	315
2018	1122.0	307



上大压小，煤电装机结构优化，煤耗大大降低

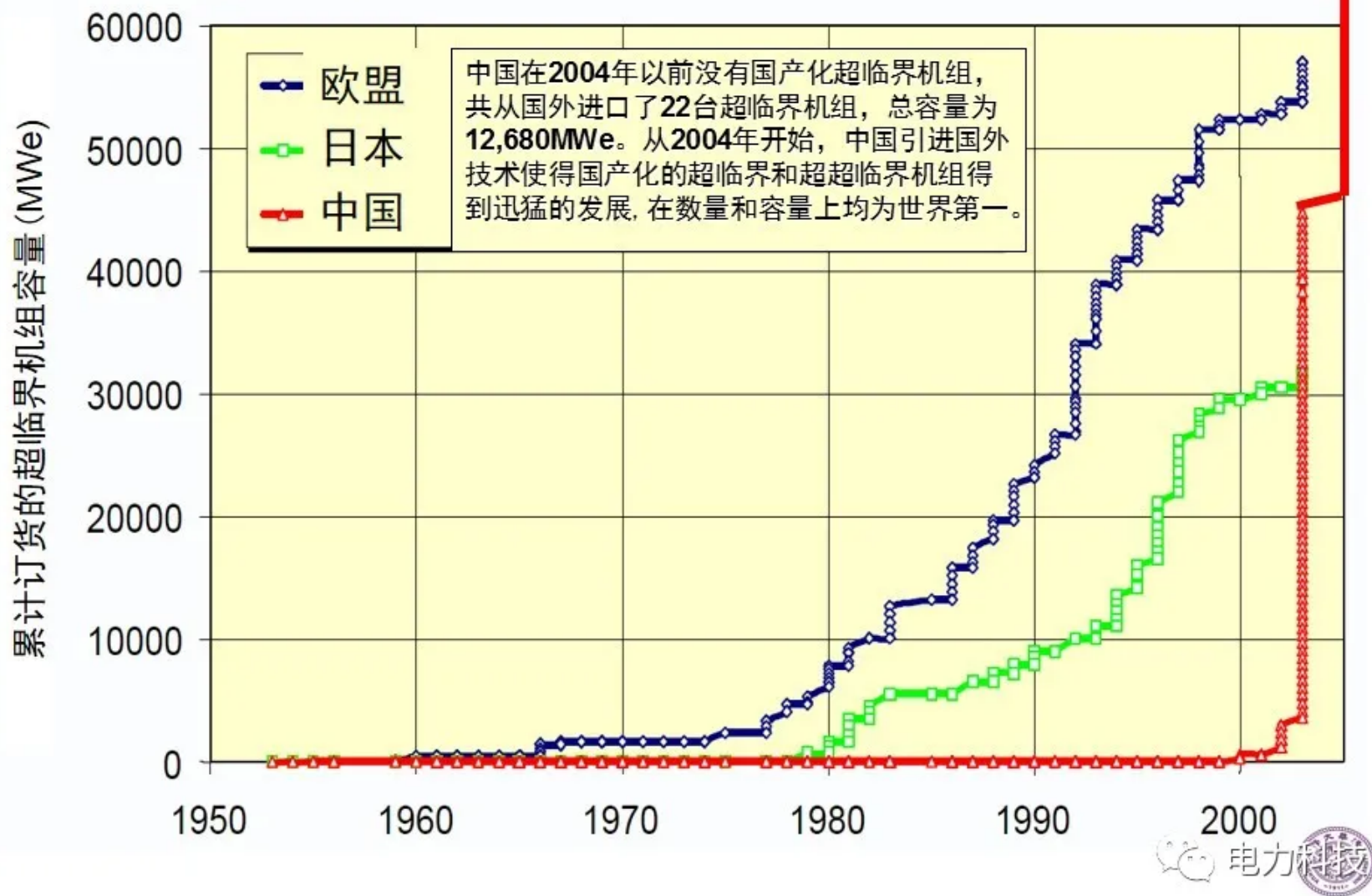
在煤电结构方面，通过实施上大压小，不断淘汰落后产能，装机结构得到显著优化；至2018年底，60万千瓦以上机组的比重持续增加至700台以上，其中百万级超超临界机组超过100台，60万千瓦以上大机组的总容量已经超过50%，高效大机组的比重已占统治地位。

2005-2016年煤电装机结构逐年变化趋势



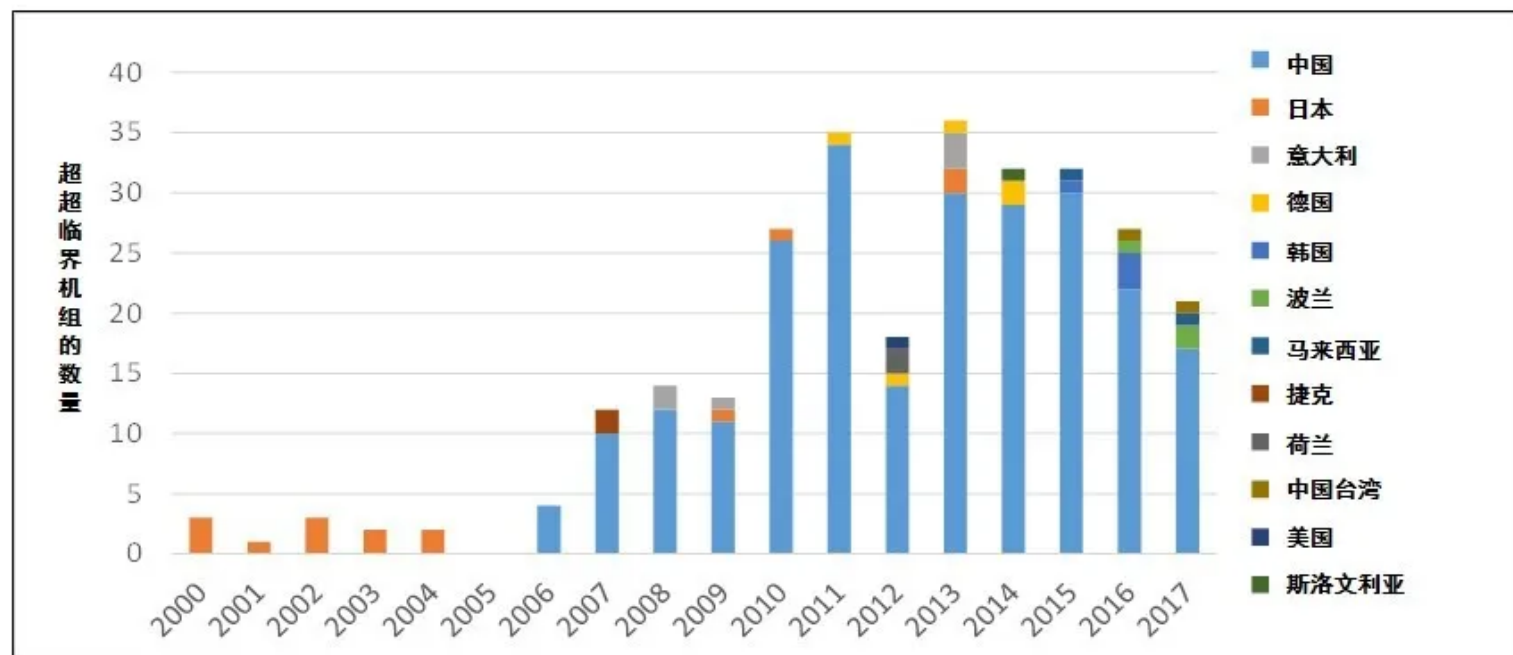
中国煤电清洁低碳发展途径：发展超超临界

欧盟、日本和中国国产化超（超）临界机组容量增长比较

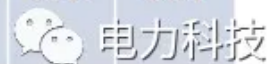


中国煤电进入了高效的超超临界燃煤火电时代

中国成为世界上超超临界煤粉炉机组容量最大和台数最多的国家



年	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1000 MWe 超超临界台数	0	4	4	8	7	17	23	10	16	18	16	13	10
660 MWe 超超临界台数	0	0	6	4	4	9	11	4	14	11	14	9	7
各年超超临界机组容量 MWe	0	4000	7960	10640	9640	22940	30260	12640	16840	25260	25240	18940	14620



Source: McCoy Power Reports

中国煤电的供电煤耗和供电效率不断改善



中国超超临界电厂的典型供电效率和供电煤耗

典型一次再热超超临界机组性能（年均负荷）

电厂名称	外高桥第三发电厂	玉环电厂	泰州电厂I期
机组容量（MW）	1000	1000	1000
供电效率（%）	44.5	42.0	42.1
供电煤耗（g/kwh）	276	292.2	291.5

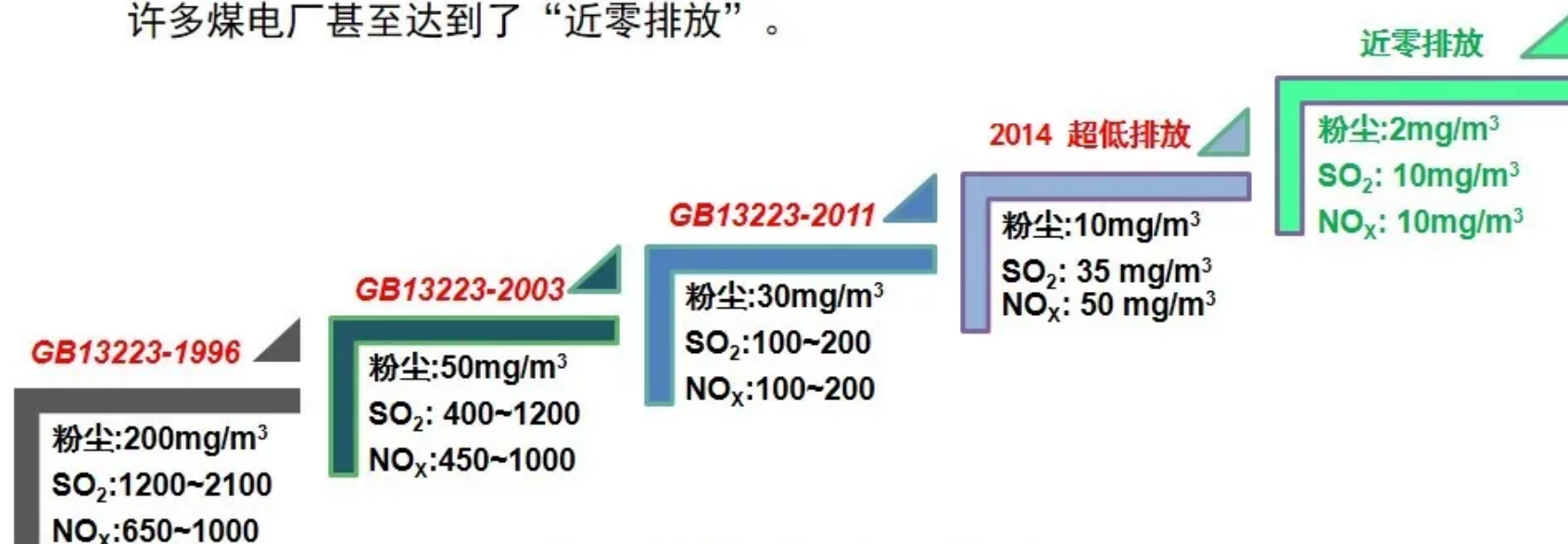
典型二次再热超超临界机组性能（额定负荷）

电厂名称	安源电厂	莱芜电厂	泰州电厂II期
机组容量（MW）	660	1000	1000
供电效率（%）	45.28	46.15	46.09
供电煤耗（g/kwh）	271.24	266.18	266.5

中国煤电已经基本上实现了超低排放的要求

中国煤电经过近20年来的艰苦奋斗，从燃煤污染物的排放大户，发展成全球执行燃煤火电污染物排放要求最严格的国家。

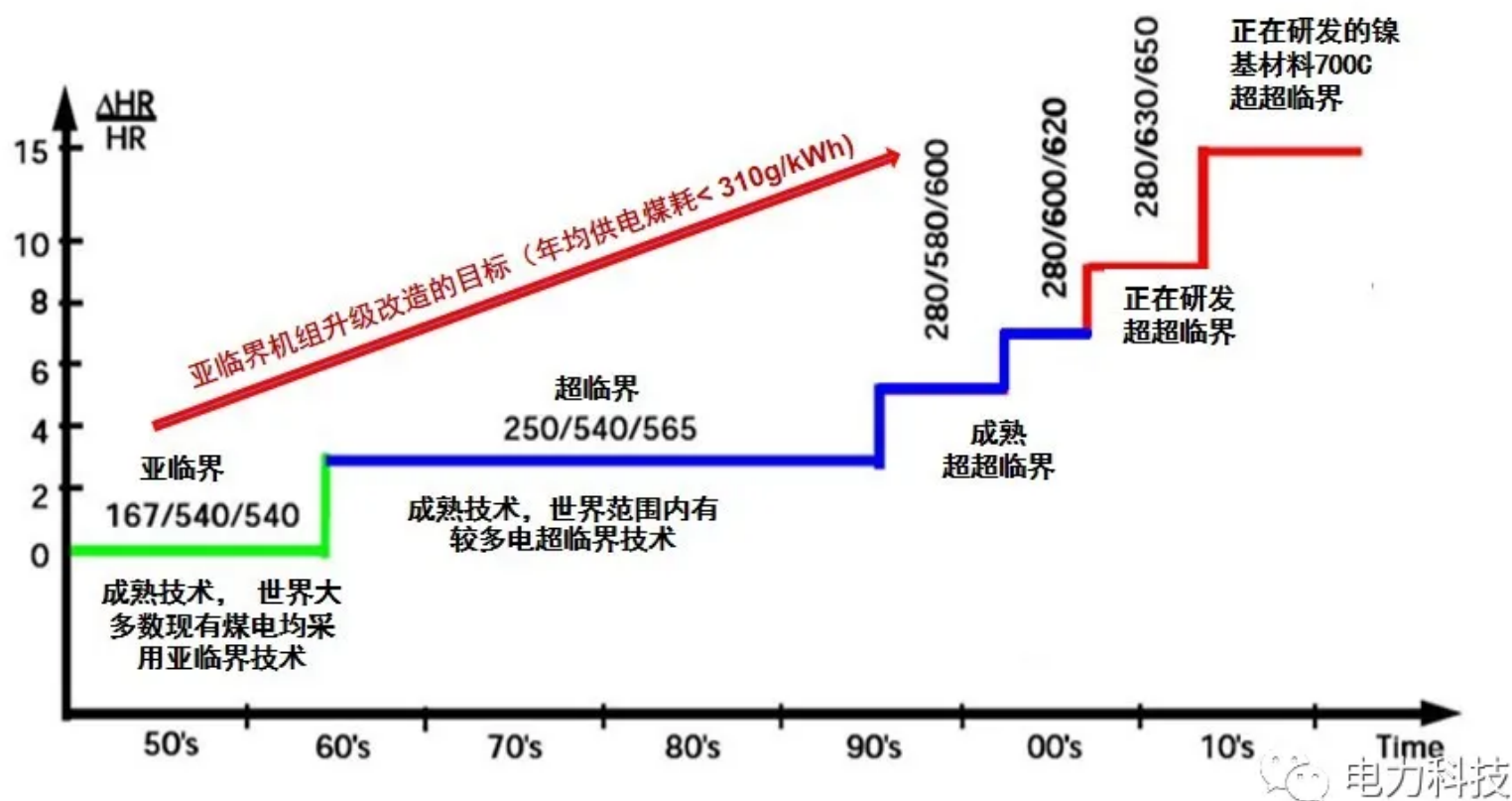
从2014年开始，中国煤电开始进行超低排放改造，至2018,，中国99%的燃煤厂已经安装烟气脱硫（FGD）装置，92%的燃煤厂已经安装烟气脱硝（SCR）装置，加上各种先进的除尘装置，中国燃煤火电已经基本上实现了污染物的超低排放，许多煤电厂甚至达到了“近零排放”。



中国煤电排放标准的发展历程

中国煤电的低碳发展方向

- (1) 继续关闭淘汰约1亿千瓦的落后低效机组
- (2) 进一步大幅度提高现有超临界机组的效率，示范更先进的超超临界技术
- (3) 对约3.5亿千瓦的亚临界机组升级改造，使之达到超/超超临界的煤耗水平
- (4) 生物质与煤混烧直至燃煤电厂的生物质转换



上海申能外高桥第三发电厂的不断创新发展 对中国煤电发展方向的启示

- 从对外三厂 $2 \times 1000\text{MW}$ 一次再热机组的不断创新改造，到华润曹妃甸电厂二期 $2 \times 1000\text{MW}$ 一次再热机组的升级版建成，
- 从申能平山二期 1350 MW 二次再热高低位布置机组的建设，到华润阜阳 660MW 二次再热全高位机组升级版的启动，
- 对华润铜山电厂 300MW 亚临界机组“高温亚临界”改造的实施，以最佳的性价比将亚临界机组升级到超临界/超超临界的水平，
- 策划筹备未来高效清洁大容量煤电厂生物质燃料的转换，实现火电厂碳的零排放，
- 所有这些，体现了我国燃煤火电在当形势和条件下，控制数量，提高质量，实现高效、清洁和低碳发展的方向。

一次再热超超临界的升级版，从外高桥到曹妃甸

申能上海外高桥第三发电厂



外高桥第三发电厂2×1000MWe 一次再热超超临界机组，于2008年建成投产，其机组设计性能为：

- (1) 设计供电煤耗：291.5 gce/kWh
- (2) 设计供电效率：42.1%

经过不断的创新改造后，该2台机组的实际平均运行性能为：

- (1) 全年平均实际供电煤耗：276gce/kWh
- (2) 全年平均实际供电效率：44.5%

一次再热超超临界
创新技术的升级版

华润曹妃甸电厂



华润曹妃甸电厂2×1000MWe 一次再热超超临界机组，于2019年建成投产，其机组设计性能为：

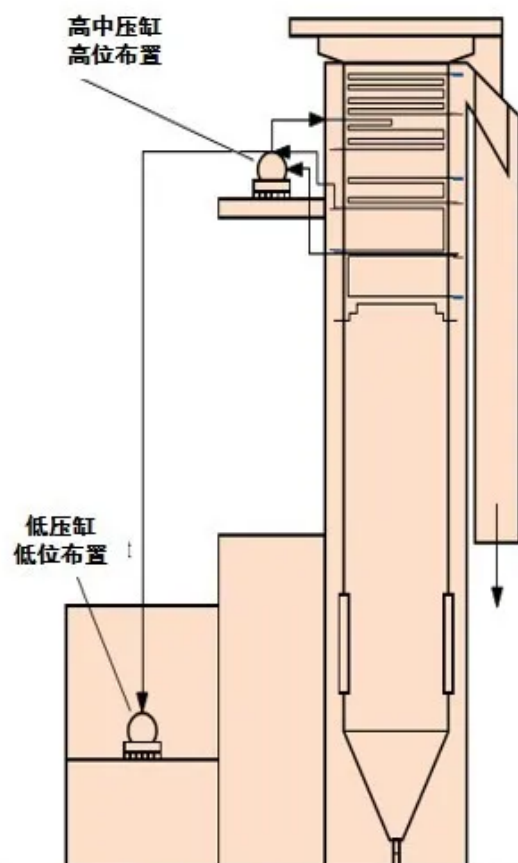
- (1) 设计额定工况供电煤耗：263gce/kWh
- (2) 设计额定工况供电效率：46.7%
- (3) 设计年均供电煤耗：270gce/kWh
- (4) 设计年均供电效率：45.5%

设计值 年均实际值 设计值

供电煤耗 (gce/kWh) : 291.5 → 276 → 263

电力科技

二次再热超超临界创新技术的升级版，从平山到阜阳

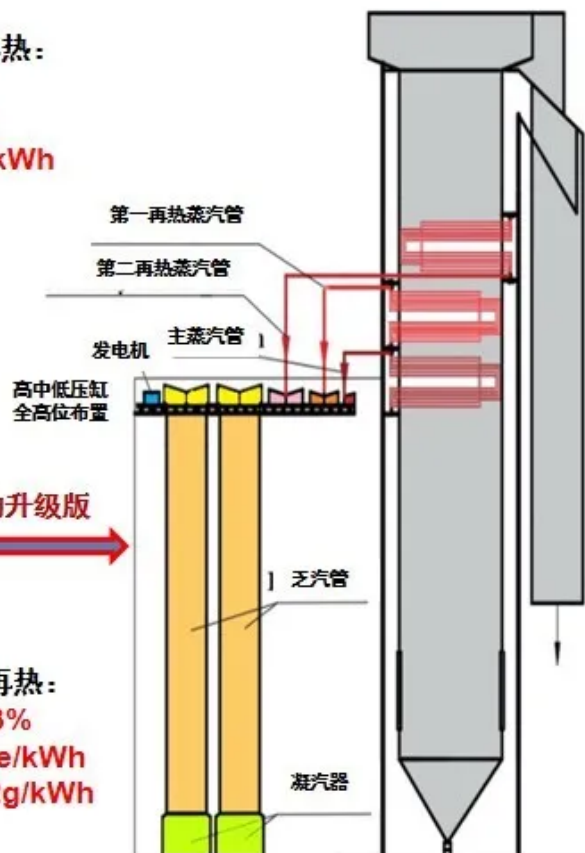


申能公司平山二期1350MW二次再热汽轮机高低位布置超超临界示范工程正在建设中，预计2020年投产

平山电厂二期高低位二次再热：
设计供电效率：48.94%
设计供电煤耗：251g/kWh
设计碳排放强度：678gce/kWh

二次再热超超临界创新技术的升级版

阜阳电厂全高位二次再热：
设计供电效率：49.33%
设计供电煤耗：249gce/kWh
设计碳排放强度：672g/kWh



华润公司阜阳电厂660MW二次再热汽轮机全高位布置超超临界项目已经正式启动，预计2021年投产

设计供电煤耗 (gce/kWh) : 251 → 249

电力科技

300MW亚临界机组不同改造技术方案比较

为实现国家《六年行动计划》年均供电煤耗低于310g/kWh的目标，亚临界机组改造后在额定工况下供电煤耗需要降低至290g/kWh以下才能够达标

对比项目	常规汽轮机通流部分改造	将亚临界升级至二次再热	将亚临界升温至566℃	600℃高温亚临界改造
改造效果 预期供电效率和煤耗	额定工况下 效率：~ 39.6%， 煤耗：约310g/kWh， 且收益逐年下滑	额定工况下 效率为~ 41.6%， 煤耗高295g/kWh	额定工况下， 效率为~40.3%， 煤耗约305g/kWh	300MW等级机组 额定工况下 效率：~42.3% 煤耗：<290g/kWh，
节能效果 效率提升和煤耗下降	效率：~1.2 % 煤耗：10g/kWh (5g/kWh)	效率：3.2 % 煤耗：<25g/kWh	效率：~1.9% 煤耗：15g/kWh	效率：~4 % 煤耗：>30g/kWh
投资费用 人民币/台	300MW等级改造 一般5500万元/台	300MW等级改造 至少8.5亿元/台	300MW等级改造 约2.5亿元/台	300MW等级改造 约3.5亿元/台
性价比 成本效益	约1000万/克标煤 性价比一般	>3400万/克标煤 性价比很差	1700万/克标煤 性价比较差	约1100万/克标煤 综合性价比比较高

华润徐州电厂320MW“高温亚临界”改造成功

- 由上海申能电力科技有限公司负责改造的华润徐州华润电厂320MW机组项目，采用冯伟忠总经理发明的“高温亚临界”技术，于2019年8月10日一次性通过168小时满负荷试运行；
- 改造后，原320MW亚临界机组的主蒸汽和再热蒸汽的温度均提高到超超临界的600°C，结合一系列创新技术，该#3号机在额定工况下的**供电煤耗从改造前的318gce/kWh，降低至改造后的287gce/kWh，降幅达31gce/kWh**；
- 168时试运期间，根据在线数据测算，高中压缸的效率均优于原设计值。“高温亚临界”改造后，320MW亚临界机组的效率水平超过了全球现役所有超临界机组和相当一部分超超临界机组。
- “高温亚临界”改造过程中，由于采用了原外三厂的一系列创新技术，除了效率大幅度提升外，机组的负荷灵活性、环保和安全性能也得到大幅度提高，尤其是机组超低负荷下的高效率 and 低排放运行能力得到质的提升；
- 据统计，至2018年底，我国仍有约3.5亿千瓦的装机容量为亚临界机组，其额定工况下的供电煤耗普遍高于318gce/kWh，如果“高温亚临界”技术能够在全国推广，按照每台机组降低煤耗30gce/kWh计，则年节煤量将会超过5000万吨标准煤，减排二氧化碳1.35亿吨，并相应地降低粉尘、二氧化硫和氮氧化物的排放。因此，“高温亚临界”技术的推广，具有煤电节能减排和低碳发展的重大意义。



蒸汽参数 (MPa/ °C / °C) : 16.7/538/538 → 16.7/600/600

供电煤耗 (gce/kWh) : 318 → 287

电力科技

煤电最终实现CO₂的接近零排放的可能技术方向

(1) 最大限度提高煤电的净效率；(2) 混烧生物质；(3) 生物质转换或CCS

