

# 煤炭工程与技术

## 专题4：煤炭燃烧

2025年春季学期

吴微

(E-mail: [weiwu\\_ep@xmu.edu.cn](mailto:weiwu_ep@xmu.edu.cn))

厦门大学管理学院中国能源政策研究院



# 煤的利用方式

## 口 煤的利用方式

■ 根据煤炭的使用目的分为三大主要用途：

- (1)动力煤
- (2)炼焦煤
- (3)化工原料

用途	消费量(万吨)	占比
消费总量	448246	100.00%
火电发电	237813	53.05%
炼焦	69449	15.49%
供热	50492	11.26%
煤制油制气	8956	2.00%
工业终端消费	60454	13.49%
生活消费	5550	1.24%
洗选损耗	10173	2.27%

## 口 动力煤

■ 凡是以发电、机车推进、锅炉燃烧等为目的，产生动力而使用的煤炭都属于动力用煤，简称动力煤。我国动力煤的主要用途有：

- 1) 发电用煤：我国约53%以上的煤用来发电。2022年全国火电机组平均供电煤耗为302.5克标准煤/千瓦时。电厂利用煤的热值，把热能转变为电能
- 2) 蒸汽机车用煤，目前已逐渐淘汰。
- 3) 建材用煤：约占动力用煤的6%以上，以水泥用煤量最大，其次为玻璃、砖、瓦等。
- 4) 一般工业锅炉用煤：除热电厂及大型供热锅炉外，一般企业及取暖用的工业锅炉型号繁多，数量大且分散，用煤量约占动力煤的20%。
- 5) 生活用煤：居民生活用煤曾经占煤炭消费的20%，目前已不断下降，现约占煤炭消费的1.2%。
- 6) 冶金用动力煤：冶金用动力煤主要为烧结和高炉喷吹用无烟煤。

## 口 炼焦煤

- 炼焦煤的主要用途是炼焦炭，焦炭由焦煤或混合煤高温冶炼而成，一般1.4-1.5 吨左右的焦煤才能炼一吨焦炭。焦炭85%用于钢铁行业，另外有少量用于有色、建材等行业。

## 口 化工用煤

- 煤化工是指以煤为原料经化学加工转化成气体、液体和固体并进一步加工成一系列化工产品的工业过程。化工用煤主要使用含碳量较高的无烟煤。



# 煤的燃烧

## 口 煤的燃烧

- 煤的燃烧是指煤中的可燃的有机质，在一定温度下与空气中的氧发生剧烈的化学反应，放出光和热，并转化为不可燃烧的烟气和灰渣的过程。
- 煤炭的主要利用途径除了少部分作为炼焦和化工原料制造化肥、甲醇、二甲醚以及烯烃等以外，其余绝大部分都直接或间接作为燃料使用。超过85%的煤炭利用都是采用燃烧利用的方式。
- 煤的燃烧过程的排放也是大气污染物的主要来源。煤的清洁燃烧对改善大气环境质量增强人民体质具有十分重要的作用，尤其是最大限度地节能减排，燃烧煤放出的SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>以及微细的灰粒是我国资源节约型、环境友好型的重要政策。

## 口 煤的燃烧过程

■ 煤的燃烧过程可以粗略地分为5个阶段：

1. 煤受热干燥，水分析出；
2. 继续加热挥发分析出，着火、燃烧；
3. 引燃煤中的碳，并继续析出残余挥发分；
4. 挥发分与碳一齐燃尽；
5. 形成灰渣。在上述过程中主要为挥发分的热分解和碳的燃烧两个过程。

## 口 煤燃烧的基本反应

- 煤燃烧时煤中可燃物质与空气中的氧化合而产生热能。煤中主要成分为碳、氢元素以及两者的化合物，另有少量硫元素也参与燃烧。其主要反应为：

- $C + O_2 = CO_2$  —— 32750kJ/kg 放热
- $H_2 + 1/2O_2 = H_2O$  —— 141694Kj/kg 放热
- $S + O_2 = SO_2$  —— 9292kJ/kg 放热

## 口 煤炭完全燃烧的条件

- 必须维持燃料的温度在着火温度以上；
- 燃料和适量的空气充分接触；
- 及时而且妥善的排出燃烧产物；
- 必须提供燃烧必须的足够空间和时间。

## □ 影响煤燃烧的物质

- 矿物质。在燃烧时，煤中的矸石和矿物质要转变成液体状态，使热量不能充分放出，或者减低热量的放出速度，影响燃烧过程。矿物质的这种影响，以燃烧挥发分较小的无烟煤、贫煤时更为突出。煤中所含矿物质越多，则单位重量或单位体积的煤所储存的热量就越少。锅炉的燃烧效率及燃烧速度也因此而降低。
- 水分。煤中存在水分，则同样要减少单位重量或单位体积的煤所储存的热量，同时使煤中的水分蒸发还要消耗一些热量。但是，如果炉膛温度较高，煤中含有一定水分对燃烧对程并无影响。
- 硫分。煤中的硫分在燃烧时转变为气体，这种气体与金属接触时能起腐蚀作用。



# 工业锅炉与窑炉

## 口 锅炉分类

- 热水锅炉：用以产生热水供采暖、制冷和生活用的锅炉
- 工业锅炉：蒸汽主要用于工业企业生产工艺过程以及采暖和生活用的锅炉。
  - 层状燃烧方式：链条炉
- 电站锅炉(煤-劣质煤、重油、天然气、垃圾)：产生的蒸汽主要用于发电的锅炉。
  - 悬浮燃烧方式：室燃炉
  - 沸腾燃烧方式：流化床锅炉
- [https://www.bilibili.com/video/BV1zs421P7ia/?spm\\_id\\_from=33.337.search-card.all.click&vd\\_source=c72cc7447098b306162b02da86fb23fa](https://www.bilibili.com/video/BV1zs421P7ia/?spm_id_from=33.337.search-card.all.click&vd_source=c72cc7447098b306162b02da86fb23fa)

## 口 锅炉分类

### ■ 按燃烧方式分类：

- 层状燃烧：层燃炉有固定炉排、水平链条炉排和阶梯往复式链条炉排等等。其燃烧的方式都是固体块状、粒状和粉状的混合原煤，在固定或活动的炉排上着床燃烧，氧气从炉排的底部空隙进入煤层助燃。层燃炉的燃烧强度低、热效率低，只适应于优质煤、且大颗粒煤块烧不透、负荷调整窄、热工难以形成自控、不能脱硫，而且劳动强度大。
- 煤粉燃烧：将煤磨细成粉后，鼓风送入炉膛中悬浮燃烧。该类炉的煤粉制备能耗高，设备磨损厉害，对原煤的品质及水分有要求，残碳高，烟气排放污染大。负荷调整窄，安全性差，着火难，不便压火。
- 流化床燃烧：流化床燃烧是一种介于炉排燃烧和煤粉燃烧之间的一种燃烧方式。将固体颗粒均匀地堆在有开孔底的容器内，形成一床层，流体自上而下通过床层，低流速时，情况与固体床无异，流速加大则颗粒便活动使床层膨胀，流速进一步加大时，颗粒会彼此离开而在流体中活动，流速愈大，则活动愈剧烈，并在床层内各处各方向运动。

## 口 锅炉分类

### ■ 按锅炉的蒸汽压力分类:

- 中低压(<3.8MPa) 高压9.8MPa 超高压13.7MPa
- 亚临界(16.7MPa)  
    临界点(374.15°C, 22.129Mpa)
- 超临界机组 SC supercritical
- 超超临界机组 USC ultra-supercritical



## 口 锅炉分类

- 按锅炉的蒸汽压力分类:

表 1 蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗关系

机组类型	蒸汽压力 / MPa	蒸汽温度 / °C	电厂效率 / %	供电煤耗 <sup>*</sup> / kW · h
中压机组	3.5	435	27	460
高压机组	9.0	510	33	390
超高压机组	13.0	535/535	35	360
亚临界机组	17.0	540/540	38	324
超临界机组	25.5	567/567	41	300
高温超临界机组	25.0	600/600	44	278
超超临界机组	30.0	600/600/600	48	256
高温超超临界机组	30.0	700	57	215
超 700°C 机组		超 700	60	205



## 口 锅炉用煤

煤 种	干燥无灰基 挥发份	逸出温度 (°C)	着火温度 (°C)
褐 煤	>40	130~170	250~450
烟 煤	20~40	170~320	400~500
贫煤	10~20	370~390	600~700
无烟煤	<10	380~400	>700

## 口 工业锅炉用煤对煤质的要求

- 发热量：发热量是锅炉设计的一个重要依据。由于电厂煤粉对煤种适应性较强，因此只要煤的发热量与锅炉设计要求大体相符即可。
- 挥发分：挥发分是判明煤炭着火特性的首要指标。挥发分含量越高，着火越容易。根据锅炉设计要求，供煤挥发分的值变化不宜太大，否则会影响锅炉的正常运行。如原设计用低挥发分的煤而改烧高挥发分的煤后，因火焰中心逼近喷燃器出口，可能因烧坏喷燃器而停炉；若原设计用高挥发分的煤种而改烧低挥发分的煤，则会因着火过迟使燃烧不完全，甚至造成熄火事故。因此供煤时要尽量按原设计的挥发分煤种或相近的煤种供应。
- 水分：水分是燃烧过程中的有害物质之一，它在燃烧过程中吸收大量的热，对燃烧的影响比灰分大得多。煤及煤粉中适量含水也有其有利的一面。煤粉过于干燥，磨煤机出口气粉混合物温度过高，煤粉有爆炸的危险。一般说来，在制粉系统尾部（即排粉机前）的气粉混合物中，水蒸气的饱和度保持在70%左右比较适宜

## 口 工业锅炉用煤对煤质的要求

- 灰分：灰分含量会使火焰传播速度下降，着火时间推迟，燃烧不稳定，炉温下降。灰分增高，还将直接增加燃煤运费和厂内输送、制粉除灰等耗电量，增加设备维护费用，减少灰场使用年限。
- 灰熔点：由于煤粉炉炉膛火焰中心温度多在1500°C以上，在这样高温下，煤灰大多呈软化或流体状态。
- 煤的硫分：硫是煤中有害杂质，虽对燃烧本身没有影响，但它的含量太高，对设备的腐蚀和环境的污染都相当严重。因此，电厂燃用煤的硫分不能太高，一般要求最高不能超过2.5%。
- 粒度：层状锅炉中，煤块愈大，透气性虽好，但起反应的煤表面积小，所需要的空气量也小。煤的颗粒愈小，它的表面积虽然大，但由于彼此堆积很紧密，起反应的煤表面积实际上很小，进入的空气也很少。所以在成层燃烧时，对煤的粒度要有严格的要求，粒度不宜于过大，也不宜于过小，一般来说，50~60毫米的煤炭，对燃烧最为有利。

## □ 工业锅炉污染物排放

### ■ 涉及的污染物：

- 废水——工业废水量、化学需氧量。
- 废气——工业废气量、烟尘、二氧化硫、氮氧化物；
- 废渣——工业固体废物(粉煤灰)、工业固体废物(炉渣)；

## 口 工业锅炉污染物排放

- 锅炉产生的污染物——水污染物
- 锅炉排污水：锅炉在运行中，由于锅水不断地蒸发、浓缩，锅水中的含盐量将不断增加。同时，锅筒底部的炉水所含的泥渣、水垢等沉积物的浓度也会越来越高。需要定期或连续排污维护锅炉安全、平稳、经济的运行。
- 软化处理废水：进入锅炉之前的给水预先进行的各种预处理及软化、除碱或除盐等处理(主要是包括沉淀软化和水的离子交换软化)，使水质达到各种类型锅炉的要求。
- 工业锅炉废水的化学需氧量在150mg/L左右；目前锅炉废水几乎没有外排的。

## 口 工业锅炉污染物排放

- 锅炉产生的污染物——气污染物
- 废气量：与空气过量系数有关，烟煤一般在7000~11000立方米/吨
- 烟尘：包括飞灰和炭黑，与灰分有关。一般烟尘产生量=烟尘排放量+粉煤灰；重油产生量较小；气体燃料不产生烟尘。
- 二氧化硫：与硫分（有机硫和无机硫）有关，煤转化率70%-90%，油转化率95%，气体燃料100%。
- 氮氧化物：主要为一氧化氮和二氧化氮，炉温越高，产生量越大。

## 口 工业锅炉污染物排放

- 锅炉产生的污染物——固体废物
- 炉渣和粉煤灰：一般 炉渣+烟尘产生量=灰分。
- 锅炉吨位大，燃烧效率高，炉渣量少，粉煤灰量多。
- 可综合利用。
- <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=12551205130011524661>

## 口 工业锅炉污染物排放

- 为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》，控制锅炉污染物排放，防治大气污染，国家环保部制定《锅炉大气污染物排放标准》。目前采用2014年修订的新标准(GB13271-2014)

表1 在用锅炉大气污染物排放浓度限值

单位: mg/m<sup>3</sup>

污染物项目	限值			污染物排放监控位置
	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉	
颗粒物	80	60	30	烟囱或烟道
二氧化硫	400 550 <sup>(1)</sup>	300	100	
氮氧化物	400	400	400	
汞及其化合物	0.05	-	-	
烟气黑度（林格曼黑度，级）	$\leq 1$			烟囱排放口



## 口 工业锅炉污染物排放

表 2 新建锅炉大气污染物排放浓度限值

单位: mg/m<sup>3</sup>

污染物项目	限值			污染物排放 监控位置
	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉	
颗粒物	50	30	20	烟囱或烟道
二氧化硫	300	200	50	
氮氧化物	300	250	200	
汞及其化合物	0.05	-	-	
烟气黑度(林格曼黑度, 级)	$\leq 1$			烟囱排放口

表 3 大气污染物特别排放限值

单位: mg/m<sup>3</sup>

污染物项目	限值			污染物排放 监控位置
	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉	
颗粒物	30	30	20	烟囱或烟道
二氧化硫	200	100	50	
氮氧化物	200	200	150	
汞及其化合物	0.05	-	-	
烟气黑度(林格曼黑度, 级)	$\leq 1$			烟囱排放口

## 口 工业锅炉污染物排放

### ➤ 火电厂大气污染物排放标准或要求发展历程

阶段	标准名称(编号)	燃煤机组最严格的浓度限值要求/(mg·m <sup>-3</sup> )		
		烟尘	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
第一阶段	无标准阶段	—	—	—
第二阶段	《工业“三废”排放标准(试行)》(GBJ 4—1973)	无要求	无要求	不涉及
第三阶段	《燃煤电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1991)	600	无要求	不涉及
第四阶段	《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1996)	200	1 200	650
第五阶段	《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2003)	50	400	450
第六阶段	《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)	30/20 <sup>1)</sup>	100/50 <sup>1)</sup>	100
第七阶段	《煤电节能减排升级与行动计划(2014—2020年)》	10/5	35	50

注: 1) 重点地区执行该限值。

### ➤ 燃煤电厂大气污染物排放限值比较 mg/m<sup>3</sup>

污染物	中国	美国(2011-05-03 后新、扩建)	欧盟(300 MW 以上新建)
颗粒物(烟尘)	10 或 5	12.3	10
SO <sub>2</sub>	35	136.1	150
NO <sub>x</sub>	50	95.3	150

## 口 工业锅炉污染物排放

- 超低排放机组:
- [http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c\\_1310579713.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c_1310579713.htm)

## □ 工业锅炉污染物排放

### ■ 烟气治理

末端治理技术	除尘效率 (%)	效率取值 (%)
单筒旋风除尘法	50 ~ 70	60
多管旋风除尘法	60 ~ 80	70
湿法除尘法/湿式除尘脱硫	85 ~ 90	87
机械+湿法除尘法/湿式除尘脱硫	90 ~ 95	92
静电除尘法 (管式)	80 ~ 85	82
静电除尘法 (卧式)	96 ~ 98	97
布袋除尘法	99	99
静电除尘 + 布袋除尘法	99	99

## □ 工业锅炉污染物排放

### ■ 脱硫工艺

治理技术	脱硫效率 (%)	效率取值 (%)
湿法除尘法	15	15
湿式除尘脱硫 (钙法/镁法/其它脱硫剂)	60 ~ 80	70
炉内脱硫 (层燃炉、抛煤机炉、煤粉炉)	20 ~ 40	30
添加脱硫剂 (循环流化床炉)	60 ~ 80	70
添加固硫剂 (型煤)	50	50

## 口 工业锅炉污染物排放

### ■ 脱硝工艺

- 低氮燃烧：采用各种燃烧技术手段来控制燃烧过程中NOx的生成，如低温燃烧、富氧燃烧、烟气再循环等
- 烟气脱硝 主要方法：干法以还原法为主，湿法氧化吸收
  - 1)SNCR（选择性非催化还原）技术  
高温850 °C-1100 °C，且温度要求严格,副反应多
  - 2) SCR（选择性催化还原）技术
  - 3) 高温烟气以一氧化氮为主，NO约占90%-95%，温度越高比例越大，而NO难溶于水，氧化剂将NO氧化成NO2,生成的NO2再用水或碱性溶液吸收,从而实现脱硝。运行成本较高。

## 口 工业窑炉

- 无机非金属材料制品，如陶瓷、耐火材料、水泥、玻璃以及石膏、石灰等，一般都是将经过加工处理的原料置于高温下经煅烧反应而制得的。此高温加工的过程称之为烧成。
- 烧成所需设备在无机非金属材料工业中称之为窑炉。窑炉是用耐火材料砌成的用以煅烧物料或烧成制品的设备。按煅烧物料品种可分为陶瓷窑、水泥窑、玻璃窑、搪瓷窑、石灰窑等。
- 目前，我国约有13万台工业炉窑，其中主要分布在冶金、建材、机械和化工等四个部分，约占炉窑总数的85%以上。年总能耗量为全国总能耗量的25%，燃料炉与电炉比例相当。燃烧方式较为原始，劳动强度大，环境污染，重燃耗高，炉子热效率低，自动监测与控制手段差为我国工业炉窑现阶段主要问题。



## 口 工业窑炉排放标准

- 目前工业窑炉的排放标准主要是行业标准和地方标准

- 天津市工业炉窑大气污染物排放标准

表 1 非金属矿物制品业大气污染物排放限值

单位: mg/m<sup>3</sup>

行业类别	设备名称/生产过程	污染物类别	限值	
平板玻璃工业 <sup>a</sup>	玻璃熔窑	SO <sub>2</sub>	50	
		NO <sub>X</sub> (以 NO <sub>2</sub> 计)	500	
		颗粒物	30	
砖瓦工业	人工干燥及焙烧	SO <sub>2</sub>	100	
		NO <sub>X</sub> (以 NO <sub>2</sub> 计)	200	
		颗粒物	30	
陶瓷工业	喷雾干燥	SO <sub>2</sub>	100	
		NO <sub>X</sub> (以 NO <sub>2</sub> 计)	240	
		颗粒物	30	
	烧成(烤花)	SO <sub>2</sub>	100	
		NO <sub>X</sub> (以 NO <sub>2</sub> 计)	300	
		颗粒物	30	
其他非金属矿物制品业炉窑		SO <sub>2</sub>	100	
		NO <sub>X</sub> (以 NO <sub>2</sub> 计)	300	
		颗粒物	30	
以上工业炉窑		烟气黑度 (林格曼黑度, 级)	≤1	
注: 非平板玻璃工业使用玻璃熔窑时, 如以石英砂为原料生产硅酸钠等, 参照本标准玻璃熔窑限值执行。				



## 口 工业窑炉排放标准

- 河南省工业炉窑大气污染物排放标准
- 重庆市工业炉窑大气污染物排放标准

表 1 常规大气污染物排放浓度限值

单位: mg/m<sup>3</sup> (烟气黑度除外)

序号	污染物项目	炉窑类型	排放限值	污染物排放监控位置	
1	颗粒物	有色金属工业冶炼及压延工序焙烧炉、冶炼炉、熔化炉	10	车间或生产设施排气筒	
		玻璃制品工业、矿物棉工业玻璃熔炉			
		耐火材料工业干燥及烧成窑			
		陶粒工业、墙板工业干燥及焙烧窑			
		刚玉工业熔炼炉、熔化炉、铝石窑			
		石灰制造工业石灰窑			
		碳素工业煅烧、焙烧炉			
		其他炉窑	30		
2	二氧化硫	碳素工业煅烧、焙烧炉	35	车间或生产设施排气筒	
		有色金属工业冶炼及压延焙烧炉、冶炼炉、熔化炉	50		
		耐火材料工业干燥及烧成窑			
		陶粒工业、墙板工业干燥及焙烧窑			
		石灰制造工业石灰窑	100		
		玻璃制品工业、矿物棉工业玻璃熔炉			
		其他炉窑			
3	氮氧化物(以NO <sub>2</sub> 计)	有色金属工业冶炼及压延焙烧炉、冶炼炉、熔化炉	100	车间或生产设施排气筒	
		耐火材料工业干燥及烧成窑			
		陶粒工业、墙板工业干燥及焙烧窑			
		石灰制造工业石灰窑			
		玻璃制品工业、矿物棉工业玻璃熔炉	260		
		其他炉窑	300		
4	烟气黑度(林格曼黑度, 级)	所有炉窑	1		

表 1 工业炉窑有害污染物最高允许排放浓度

单位: mg/m<sup>3</sup>

序号	有害污染物名称		适用区域	最高允许浓度
1	二氧化硫	燃煤炉窑	主城区	100
		其他炉窑	主城区	100
		燃煤炉窑	其他区域	600
		其他炉窑	其他区域	400
2	氮氧化物	燃气炉窑	主城区	300 <sup>1</sup> /500 <sup>2</sup>
		燃气炉窑	其他区域	700
		其他炉窑	主城区	200
		其他炉窑	其他区域	700
3	氟及其化合物			6
4	铅	金属熔炼		10
		其他		0.1
5	汞	金属熔炼		1.0
		其他		0.01
6	铍及其化合物			0.01
7	沥青烟 <sup>3</sup>			50

1: 小时天然气用量大于 500m<sup>3</sup>/h 的企业使用的除玻璃熔窑外的工业炉窑执行的标准限值;  
2: 小时天然气用量小于 500m<sup>3</sup>/h 的企业使用的工业炉窑及玻璃熔窑执行的标准限值;  
3: 仅限于市政、建设施工临时用沥青加热炉。

## □ 《煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）》

- <https://mp.weixin.qq.com/s/yu8peF6Wn2iNsg-WnbtX5Q>



# 先进燃煤技术

## 口 发展超临界参数的大容量火电机组

- 火电厂超超临界机组和超临界机组指的是锅炉内工质的压力。锅炉内的工质都是水，水的临界参数是:22.129MPa、374.15°C；在这个压力和温度时，水和蒸汽的密度是相同的，就叫水的临界点，炉内工质压力低于这个压力就叫亚临界锅炉，大于这个压力就是超临界锅炉，炉内蒸汽温度不低于593°C或蒸汽压力不低于31 MPa被称为超超临界。
- 国外第一台超临界机组投运至今，已有近40年的历史，目前超临界机组最大单机容量为1300MW，在美国、日本及俄国，超临界机组占火电容量的50%以上。欧洲的超临界机组在技术上也有其独特性和先进性。目前，国际上已经投运了单机在800MW以上火电机组的国家主要有美国、日本、原苏联和德国等
- 截止2018年，中国66万~100万千瓦超临界发电机组总装机已超过1亿千瓦，居世界首位。目前在建的申能安徽平山二期项目位于安徽省淮北市，由中国能建华东设计院设计，为世界首台单机容量1350兆瓦机组。



## 口 燃气，蒸汽联合循环 (Combined Cycle, 简称CC或GTCC)

- 联合循环就是把在中低温区工作的蒸汽轮机的朗肯 (Rankine) 循环和在高温区工作的燃气轮机的布雷登 (Brayton) 循环的叠置，组成一个总能系统循环，由于它有很高的燃气初温 ( $1200^{\circ}\text{C} \sim 1500^{\circ}\text{C}$ ) 和蒸汽作功后很低的终温 ( $30 \sim 40^{\circ}\text{C}$ )，实现了热能的梯级利用，使总的循环效率很高。其主要优点如下：
- 热效率高，可达50%以上；
- 低污染，环保性能好；
- 运行灵活，可日启停、调峰性能好；
- 单位容量投资较低，简单燃气轮机每千瓦投资为100 ~ 300美元 / kW，汽轮发电机组为600 ~ 1000美元 / kW，而联合循环发电机组为280 ~ 530美元 / kW；
- 标准的模块化设计，建设周期短，可分阶段建设节水，为同容量常规电站用水量的1 / 3；

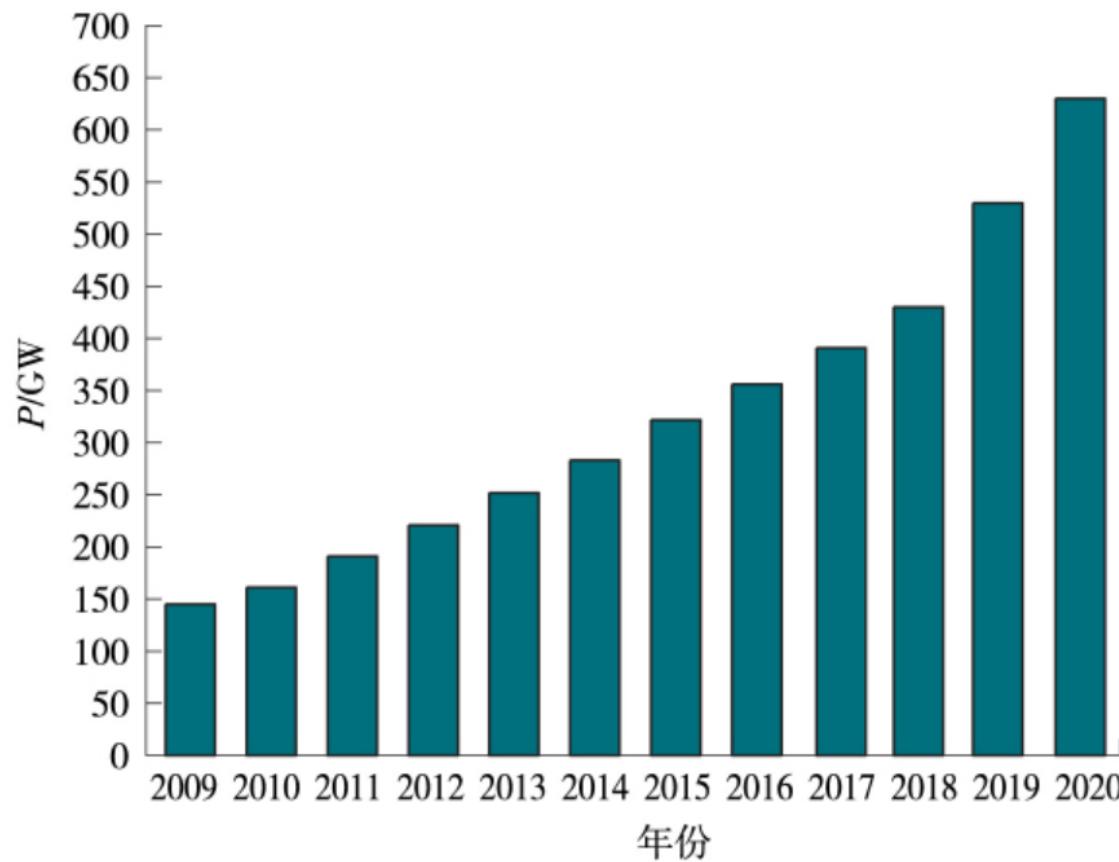
## 口 热电联产技术

- **热电联产**是实现能源高效利用的供热与发电过程一体化的多联产能源系统。热电联产是在火电机组在发电的同时，用抽汽或背压机组的排气进行供热，由于实现了热能的梯级利用，其总的能源利用率为80% ~ 90%。如果联合循环机组用于热电联产，即高作功能力的燃气（1000°C以上）在燃气轮机中做功，其排气在余热锅炉中产生中等作功能力的蒸汽（500°C以上），驱动汽轮机继续做功，其低作功能力的抽汽或排气用于工业或生活用汽用热，形成联合循环热电联产其总的能源利用率可达80% ~ 90%（理论极限为93%）。热效率高，可达50%以上；
- 目前我国热电联产机组承担了30%的城市热水采暖供热量和约83%的城市工业用汽量，2017年装机规模达到了435.26GW。

## 口 热电联产技术

- 中国热电联产装机规模增长迅速，目前占火电装机规模的约40%

◦



## 口 热电联产技术

- 热电联产目前主要有以热定电和以电定热两种运行模式。
- 热电联产发展主要存在的问题有：
  - 热电供需总量不匹配
  - 空间不匹配
  - 时间不匹配

## 口 冷热电三联产技术

- **冷热电三联产**指锅炉产生的蒸汽在背压汽轮机或抽汽汽轮机发电，其排汽或抽汽，除满足各种热负荷外，还可做吸收式制冷机的工作蒸汽，生产6~8°C冷水用于空调或工艺冷却。
- 随着经济发展水平的提升，夏季空调制冷负荷需求越来越高。冷热电三联产技术能够有效地减少空调负荷高峰期对电网的依赖，减少尖峰负荷。

## 口 煤炭洁净燃烧发电技术

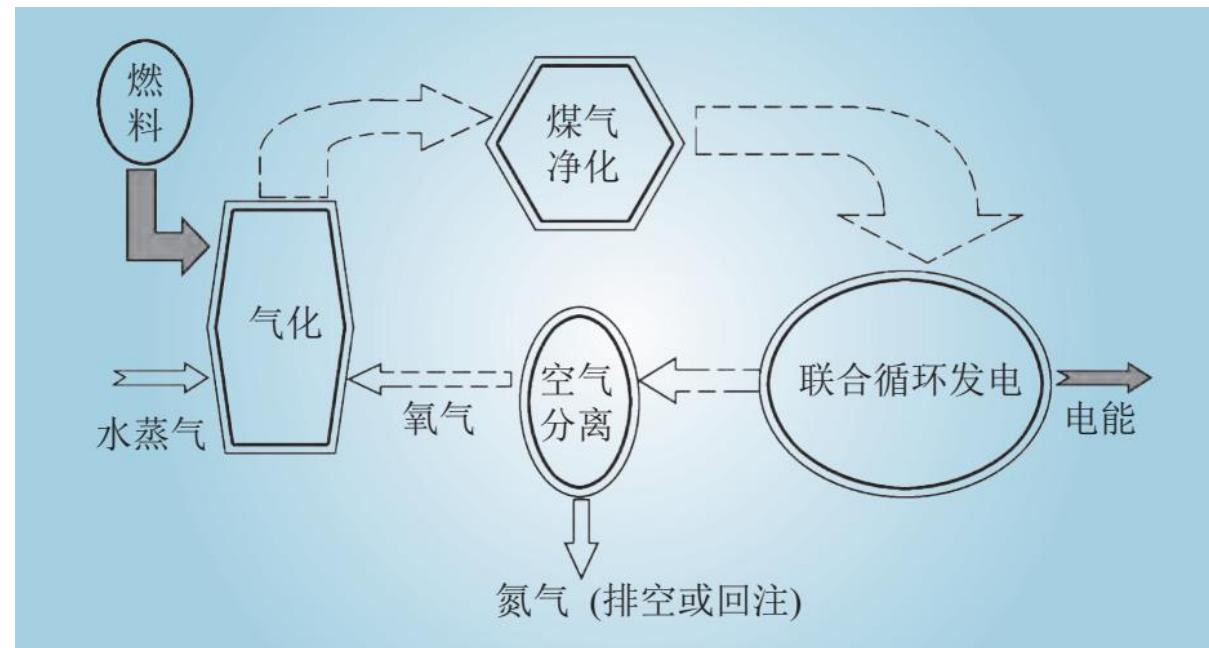
- **洁净煤技术 (CCT-Clean Coal Techno1ogy)** , 指的是在利用煤炭发挥一次能源最大作用的同时, 污染环境的气、固、液态排放量最少; 也可定义为减少污染、提高效率的煤炭开采加工、运输、转化、燃烧、污染控制、综合利用等技术的总称。它是以三E为目标 (经济, 环境, 效率) , 是先进、清洁的“绿色煤电”。其分类如下:
- **燃烧前处理** (源处理) 指在开采到用户使用前这一阶段煤的处理方法;
- **燃烧中清洁利用** (过程处理) 主要指流化床燃烧技术 (FBC: Fluidized-bed Combustion) ; 整体煤气化蒸汽燃气联合循环 (IGCC : Integrated GasificationCombined Cycle) ; 整体煤气化燃料电池 (IGFC: Integrated Gasification Fuel Cell) 、磁流体发电技术; 炉内脱硫: 炉内喷钙脱硫, 喷钙加尾部增湿活化脱硫; 炉内脱硝: 低NO<sub>x</sub>燃烧器、低温燃烧、整体分级燃烧、回气再循环、再燃烧技术等;
- **燃烧后清洁处理** (烟气净化) ; 包括除尘、脱硫、脱硝、废水处理及零排放, 废水资源化和干除渣、灰渣分除及综合利用。

## □ 流化床燃烧技术FBC

- 流化床燃烧技术是把8mm以下的煤粒和脱硫剂石灰石，加入燃烧室床层上，在通过布置在炉底的布风板送出的高速气流作用下，形成流态化翻滚的悬浮层，进行流化燃烧，同时完成脱硫。
- 按燃烧室运行压力的不同，FBC可分为常压流化床AFBC (Atmospheric Fluidized-bed Combustion) 和增压流化床PFBC (Pressurized FBC)；按流化速度和床料流化状态不同，二者又可分为鼓泡床BFBC (Bubbling FBC) 和循环流化床CFBC (Circulating FBC) 。

## 口 整体煤气化联合循环发电 (IGCC)

■ **IGCC** (Integrated Gasification Combined Cycle) 即整体煤气化联合循环发电系统，是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。煤经过气化和净化后，固体燃料已转化成清洁气体燃料，以此驱动燃气轮机发电，再用排出的高温燃气进入锅炉，产生蒸汽带动汽轮机发电，形成燃气与蒸汽联合循环发电。



## 口 整体煤气化联合循环发电 (IGCC)

### ■ IGCC的特点

- 热效率高，其效率比煤粉炉高10%以上，可达40% ~ 50%；
- 污染排放少，环保性能优良；脱硫率98% ~ 99%，NOx及CO<sub>2</sub>排放减少
- 燃料适应性强，同一电站设备可燃用多种燃料，对高硫煤有独特的适应性；
- 容量可大型化，单位造价不断降低；
- 调峰性能好，起停机时间短；

■ IGCC由于需要额外投资气化炉和空分装置等设备，成本远高于传统燃煤发电。然而，由于其废气中二氧化碳浓度较高，捕集成本较低，因此当碳价较高时结合CCUS技术将有可能具备经济性。



## □ Tip: 煤炭利用效率现状

### 1. 火电厂发电煤耗 Gross Coal Consumption Rate for Fossil-Fired Power Plant

单位: 克标准煤/千瓦时

(gce/kW·h)

国家	Country	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
中国 <sup>①</sup>	China	392	379	363	343	312	297	294	292	290	289	287
日本 <sup>②</sup>	Japan	317	315	303	301	294						

### 3. 钢可比能耗 Comparable Energy Consumption for Steel

单位: 千克标准煤/吨

(kgce/ton)

国家	Country	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
中国 <sup>①</sup>	China	997	976	784	732	681	644	640	634	613	605	603
德国	Germany			602								
日本	Japan	629	656	646	640	612						



# Thanks!