

**编者按** 能源是社会发展和人类进步的基础,物理学的任务之一就是要揭示能源生产和利用过程中的物理规律,保障国民经济的可持续发展.在全球应对气候变化的大背景下,发展低碳能源技术,实施低碳经济,已成为世界经济社会变革及可持续发展的必由之路.

在我国,低碳能源技术主要包括现有资源(能源)的高效、清洁利用和新能源的开发.根据这一思路,本期专题选择了三篇文章,分别针对我国一次能源以煤为主的特点,深入分析了几种主要的煤的洁净利用技术的现状及存在的主要问题和发展趋势;针对我国垃圾水分高、热值低、品质差的特点,分析了中国垃圾无害化、减量化和资源化的状况、优缺点,指出了资源化的目标和未来的发展方向;从“充分吸收光能,减少能量转换损失”的角度,分析了新一代太阳能电池的结构设计特征,对新一代太阳能电池的基本概念、研究现状和研究目标进行了详细的介绍.

## 煤的清洁利用技术的现状与发展<sup>\*</sup>

陈昌和<sup>†</sup> 王淑娟 褚玉群 赵博 李彦 徐旭常

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室 清华大学热能工程系 北京 100084)

**摘要** 文章针对中国一次能源以煤为主的特点,深入分析了几种主要的煤的洁净利用技术的现状及存在的主要问题和发展趋势,其中包括大容量、高参数的超(超)临界燃煤发电技术、燃煤烟气净化技术、循环流化床燃烧技术(CFBC)、整体煤气化联合循环技术(IGCC)和煤的洗选技术.在此基础上,给出了中国煤的清洁利用方式的建议:近期仍以超(超)临界燃煤发电机组+燃煤烟气净化技术和循环流化床燃烧技术为主;整体燃气化联合循环技术、富氧燃烧技术(特别是加压富氧燃烧技术)以及二氧化碳的捕集和封存技术(CCS),具有广阔应用前景,值得长期大力发展.

**关键词** 煤的清洁利用技术(CCT),超(超)临界燃煤发电(USC),循环流化床锅炉燃烧(CFBC),整体煤气化联合循环(IGCC),二氧化碳捕集和封存(CCS)

## The present and future of clean coal technology

CHEN Chang-He<sup>†</sup> WANG Shu-Juan ZHUO Yu-Qun ZHAO Bo LI Yan XU Xu-Chang

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Based on the primary energy characteristics of China, the current status and future development of clean coal technologies, including large-scale ultra-super-critical (USC) power generators, flue gas cleaning, circulating fluidized-bed combustion (CFBC), integrated gasification combined cycle (IGCC) technology, and coal washing are analyzed in details. It can be concluded that, in the short term, USC generation with flue gas cleaning and CFBC will be the two major clean coal technologies in China. However, IGCC, oxy-fuel combustion (especially pressurized oxy-fuel combustion), and CO<sub>2</sub> capture and storage are of great potential and are worth developing in the long term.

**Keywords** clean coal technology, ultra-super-critical generator, circulating fluidized-bed combustion, integrated gasification combined cycle, CO<sub>2</sub> capture and storage

<sup>\*</sup> 中国工程院项目“煤的洁净化技术前景及定量评估”(2008)和“煤炭的高效洁净化利用”(2008)资助  
2009-06-17 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: cch-dte@mail. tsinghua. edu. cn

## 1 引言

今后 30 至 50 年内,煤炭在我国一次能源构成的主导地位不会改变.除少量用于煤化工等领域外,煤的主要利用方式是直接燃烧,火力发电、工业锅炉和城乡居民生活用煤占煤炭总产量的 80% 以上,其中发电与热电联产用煤总量占煤炭总产量的 50% 以上;预计 2010 年我国煤炭生产和发电用煤分别达到 26 亿吨和 16 亿吨<sup>[1]</sup>.

煤炭利用存在的问题是:效率低和污染严重.对于工业锅炉和城乡居民生活用煤来说,由于量大面广,利用效率极低并且污染特别严重,解决的方法是采用电和天然气等洁净燃料进行替代,因此其煤炭消费比例在不断减小.而随着我国经济继续稳定增长,对电力的需求的增大导致发电用煤的比例不断增大.2001—2020 年的中国电力装机容量发展趋势<sup>[1]</sup>如图 1 所示.截至到 2008 年底,我国发电装机容量达 79253 万千瓦,同比增长 10.34%.其中火电装机为 60132 万千瓦,约占总容量 75.87%,同比增长 8.15%,全国发电生产耗用原煤 13.4 亿吨,同比增长 4.05%<sup>[2]</sup>.



图 1 中国电力装机容量发展趋势

燃煤电厂的污染主要有:大气污染、水污染、固体废物污染和噪声污染等.其中大气污染物主要是由煤燃烧后产生的污染物,包括二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、烟尘和含有汞的重金属等,其中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  是形成“酸雨”的主要污染物,同时氮氧化物又能与碳氢化合物结合形成光化学烟雾,严重危及人体健康与自然环境.二氧化碳排放量的增加,使温室效应日益加重.根据国家环保部的测算,我国环境容量上限为二氧化硫 1620 万吨,氮氧化物 1880 万吨.如不采取有效措施,预计到 2020 年, $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放量将分别达到 4000 万吨和 3500 万吨,大大超出环境容量.另一方面,据国

家发改委能源局 2008 年统计资料<sup>[3]</sup>,我国优质资源日渐减少和短缺,其中煤炭剩余储量的保证程度不足 100 年,石油剩余储量的保证程度不足 15 年,天然气剩余储量的保证程度不足 30 年.若按照 2020 年我国的能源需求预测量估算的话,煤炭、石油和天然气的资源保证程度,则分别下降到 30 年、5 年和 10 年.这样的需求总量,将使中国的能源安全和保障能源资源供应面临严峻的挑战.

因此,深入研究我国煤炭高效净化利用,开发高效、洁净的燃煤发电技术,是保障国民经济持续健康快速发展和保护环境的迫切需要.目前,煤的清洁利用的主要技术有:煤的高效燃烧及其燃烧后的烟气处理、净化,即脱硫、脱硝、 $\text{CO}_2$  的捕获与封存(CCS),循环流化床燃烧(CFBC)技术,整体煤气化联合循环(IGCC)技术,煤炭洗选技术等.

## 2 煤的主要洁净技术的现状及存在的问题

### 2.1 煤的高效燃烧和燃煤烟气污染物控制技术

#### 2.1.1 超(超)临界机组发电技术

目前我国火电厂煤粉锅炉燃烧主要存在锅炉燃烧不稳定、炉膛结渣、发电效率低和环境污染等问题,解决的途径之一就是发展大型高效环保机组,建设大型超(超)临界电站和加快淘汰落后的小火电机组.

超临界压力机组已是世界上比较成熟的一项技术,超超临界发电技术是在超临界技术的基础上,通过进一步提高主蒸汽的温度和(或)压力等级来不断提高发电效率及相应的节能环保水平.超临界及超超临界机组的最大优势是能够大幅度提高循环热效率,降低发电煤耗.一台 1000MW 的超临界参数燃煤机组比同容量亚临界参数机组每年可以节约标准煤 20 万吨以上<sup>[2]</sup>.

20 世纪 60 年代初,美国、俄罗斯和日本就开始发展超临界大型机组.近 10 年来,高效超临界技术在美国、日本和欧洲得到迅速发展,投入运行的高效超临界机组取得了良好的运行业绩,其经济性、可靠性和灵活性代表了当代火力发电技术的先进水平.在已投入运行的高效超临界机组中,单机容量多在 700—1000MW 之间.随着材料技术的发展,各国计划在未来 10—20 年间将开发蒸汽初参数更高的两次再热超临界机组.

我国超临界发电技术从 2000 年起步,到 2006 年底,已有 40 余台、近 30000MW 超临界燃煤发电机组

投产运行,其中有3台1000MW超超临界机组投产发电.据不完全统计,目前投产、建设和订货的600MW、1000MW超(超)临界燃煤机组达150余台.

目前超(超)临界机组存在以下三个问题:一是随着参数的提高,蒸汽对汽轮机转子的激振增加,固体颗粒的冲蚀趋于严重,疲劳耗损趋于严重等问题,需要采用新的材料和相应的设计制造技术;二是燃煤量大,烟气量大,排放粉尘量多,需要采用高效率的烟气净化技术;三是采用30—31MPa的高参数在设计、制造和安全性方面尚有较高的风险.

### 2.1.2 燃煤烟气污染物控制技术

由于现代化大型火力发电厂的除尘装备比较完善,除尘效率已高达99%以上,因此目前烟气净化的任务是研发低费用、高效率的脱硫( $\text{SO}_2$ )、脱硝( $\text{NO}_x$ )和二氧化碳的捕集与封存(CCS)技术.典型的烟气净化系统如图2所示.



图2 燃煤电站污染物排放控制

#### (1) $\text{SO}_2$ 排放控制技术

2005年,我国 $\text{SO}_2$ 排放总量为2549万吨,占世界第一,比2000年增加了27%.其中燃煤电厂 $\text{SO}_2$ 排放量占全国 $\text{SO}_2$ 总排放量的52%,比2000年增加了58%<sup>[1]</sup>.

烟气脱硫技术经历了30多年的发展,已经投入应用的技术有十余种,其中80%以上为石灰石—石膏湿法技术.我国300MW及以上火电机组烟气脱硫以石灰石—石膏湿法脱硫为主,100—300MW火电机组少量采用石灰石干法脱硫,沿海地区个别电厂采用海水脱硫等技术.石灰石—石膏湿法脱硫技术的优点如下:技术成熟,脱硫率高(可达95%以上),烟气处理量大,煤种适应性强,对高硫煤优势突出,吸收剂利用率高( $\geq 90\%$ ).但也存在如下缺点:易于结垢、堵塞,设备受磨损和腐蚀性高,投资费用高,占地面积大,耗水量相对较大,有少量污水排放.

#### (2) $\text{NO}_x$ 排放控制技术

我国大气污染物中, $\text{NO}_x$ 约60%来自于煤的燃烧.2000年,火电厂 $\text{NO}_x$ 排放量为469万吨,2006年 $\text{NO}_x$ 排放量增到了850万吨,比2000年增长了81.2%.

目前,国内外控制 $\text{NO}_x$ 排放的技术措施主要有两大类:一是采用低 $\text{NO}_x$ 的燃烧技术,即通过改变燃烧过程来有效地控制 $\text{NO}_x$ 的生成.这些技术主要包括低 $\text{NO}_x$ 燃烧器、低过量空气系数、空气分级燃烧、燃料分级燃烧等;二是尾部烟气脱硝处理,即使

用选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)两种方式对 $\text{NO}_x$ 形成后的烟气进行净化处理.

我国低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术开始于20世纪80年代,主要有低氮燃烧器技术、空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术.低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术工艺相对简单、经济,但不能满足较高的 $\text{NO}_x$ 排放标准.

SCR技术最早是在1950年代由美国人首先提出来的,是目前国际上技术最成熟、应用最广泛的烟气脱硝技术.其反应原理为:在催化剂作用下,向烟气中喷入氨,将 $\text{NO}_x$ 还原成 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ .该技术具有脱除效率高,无副产物二次污染,装置结构简单,运行可靠,便于维护,反应温度较低,催化剂不含贵金属,寿命长等优点.其主要缺点有氨泄漏;催化剂中毒或堵塞;过量的 $\text{NH}_3$ 可能会与 $\text{O}_2$ 发生反应生成 $\text{N}_2\text{O}$ ( $\text{N}_2\text{O}$ 是温室气体).

SNCR技术是把含氨基的还原剂喷入到锅炉炉膛中,还原剂快速热解成 $\text{NH}_3$ ,将烟气中的 $\text{NO}_x$ 还原成 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ .SNCR技术是已投入商业运行的比较成熟的烟气脱硝技术,具有建设周期短、投资少、脱硝效率中等等优点,比较适合于中小型电厂改造项目.

#### (3) $\text{CO}_2$ 捕获、埋存技术(CCS)及 $\text{CO}_2$ 利用

$\text{CO}_2$ 捕获和埋存(CCS)是燃煤减排 $\text{CO}_2$ 的主要方法.通常, $\text{CO}_2$ 捕获的技术路线可以分为:燃烧前脱碳、燃烧后脱碳和富氧燃烧技术,如图3所示.

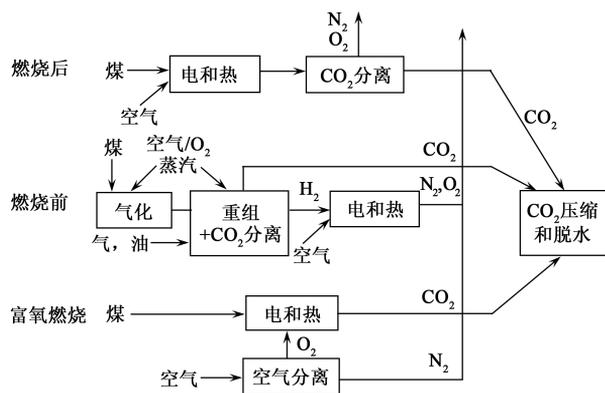


图3  $\text{CO}_2$  捕获技术路线

燃烧后的烟气中分离和捕集 $\text{CO}_2$ 技术有化学吸收法、物理吸收法、吸附法、膜分离法和低温分离法等.

燃烧前脱碳技术是将煤首先进行气化得到合成气,在合成气净化后进行变换,最终变为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2$ 的混合物,再对 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2$ 进行分离.IGCC是典型的可以进行燃烧前脱碳的系统.

富氧燃烧技术首先要制取富氧或纯氧,然后用

氧气代替空气燃烧,生成的烟气主要成分是  $\text{CO}_2$  和水蒸气,很容易得到高浓度的  $\text{CO}_2$ 。这可能重新设计锅炉,同时会带来燃烧、传热方面的新的问题。目前大型富氧燃烧技术正处于研究阶段。

捕集后液态化的  $\text{CO}_2$  如何处理也是一个有待深入研究的重大课题,主要包括被动储存和积极利用两方面。地质封存是封存  $\text{CO}_2$  方法之一,主要是将捕集后的  $\text{CO}_2$  注入到地下地质构造中及深海中,或者通过工业流程将其凝固在无机碳酸盐之中。目前,还没有找到大量利用  $\text{CO}_2$  的可行方案,因为利用  $\text{CO}_2$  制造化学品要消耗能量而产生额外的  $\text{CO}_2$ ,某些利用  $\text{CO}_2$  的过程(如食品工业)并不能达到固定  $\text{CO}_2$  的目的。未来最具发展前景的技术是利用  $\text{CO}_2$  提高石油采收率(EOR),目前正处于工程示范阶段。

## 2.2 循环流化床燃烧(CFBC)技术

流化床燃烧技术是高效、低污染的新一代燃煤技术,它经历了从鼓泡流化床到循环流化床的发展过程。循环流化床燃烧技术是以处于快速流化状态下的气固流化床为基础的技术,具有易于大型化的特点,容量几乎可以像煤粉炉那样不受限制。基于循环流化床燃烧技术的循环流化床燃煤锅炉目前已能投入商业化燃煤发电运营,由于其煤种适应性广,燃烧效率高,以及炉内脱硫脱硝等特点,近二十年来,大容量的循环流化床燃煤锅炉取得了迅速的发展。目前,世界上单机最大容量循环流化床锅炉发电机组已达 600MW。法国已投入单机容量 250MW、蒸发量 700t/h 的 CFBC 锅炉运行,锅炉效率 90.5%,脱硫率 93%, $\text{NO}_x$  排放低于 250mg/Nm<sup>3</sup>。

我国建设的第一个国产化 300MW 大型循环流化床机组——开远电厂工程,它的脱硫效率可达 95%; $\text{NO}_x$  最高排放质量浓度仅为标准限值的 1/2;除尘效率达 99.6% 以上;各种废水经多级处理后可实现“零排放”<sup>[3]</sup>。到目前为止,在我国云南、四川、河北等地的发电厂中,已建成并投入运行的有 8 台 300MW 的大型循环流化床机组。

与常规煤粉炉机组相比,循环流化床机组(CFB)具有效率高、污染低、煤种适应性好的环保特性,不仅解决了  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的污染问题,又能燃用高灰、高硫和低热值煤,而且可以燃烧木材和固体废弃物,还可实现液体燃料的混合燃烧,是一项极为实用的技术。

循环流化床燃煤锅炉尚存在以下的问题<sup>[4]</sup>:(1)虽然循环流化床的燃烧效率与煤粉炉相当,但除燃烧无烟煤等难燃煤种外,其飞灰含碳量仍略高于煤粉炉;(2)对固体颗粒分离设备的效率以及耐高温和

耐磨性能要求更高;(3)锅炉系统的烟风阻力较大,需要采用高压鼓风机,因此,存在风机电耗高、噪音大等问题;(4)锅炉受热面的磨损严重;(5)燃烧控制系统比较复杂;(6)流化床燃烧中的  $\text{N}_2\text{O}$  生成物大大高于常规的煤粉燃烧系统。 $\text{N}_2\text{O}$  是一种对大气臭氧层破坏性极强的有害气体,同时对人的神经系统也有毒害作用。

## 2.3 整体煤气化联合循环(IGCC)技术

目前,在洁净煤发电领域中,IGCC 发电技术被普遍认为是最具有竞争力、最有发展前途的燃煤发电技术之一。自 20 世纪 80 年代中期开始运行第一台整体煤气化联合循环电站以来,全世界已建、在建和拟建的 IGCC 电站近 30 套,单机最大为美国的 440MW 机组,计划中容量最大的为德国的 900MW 和前苏联 1000 MW 机组。

IGCC 发电技术把煤炭气化、煤气净化技术与联合循环发电技术结合在一起,具有以下明显特点<sup>[5-7]</sup>:(1)燃料适应性强。可利用高硫分、高灰分、低热值的低品位煤以及常规火力发电技术不能接受的劣质燃料(固体或液体);(2)发电效率高,可达 45% 以上,高于同容量的燃煤机组 5% 以上;(3)环保性能优良。粉尘排放低于 10 mg/m<sup>3</sup>,基本没有脱硫副产品的二次污染,与同容量的燃煤电站相比, $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  排放减少 90% 以上;(4)耗水量较少,只有常规火电厂耗水量的 50%—70%;(5)可以实现多联产;(6)可以为较经济地去除  $\text{CO}_2$  创造条件。在 IGCC 发电系统中,通过对合成煤气中 CO 转换并进行  $\text{CO}_2$  脱除,可实现  $\text{CO}_2$  零排放,是目前现有发电技术中减排温室气体最可行、最经济的方法。

与同容量的常规火电机组相比,IGCC 存在的主要问题<sup>[2]</sup>如下:(1)国外投产和运行的 IGCC 示范电站仅有 10 余台,运行不稳定,缺乏成熟的经验,如果不采用 CCS 技术, $\text{CO}_2$  排放量也较高;(2)装置系统复杂,造价高(约为 1400—1700 美元/kWh),因此,IGCC 单机容量以 300—600MW 较合适,还不宜大型化;(3)大容量煤气化设备、高温煤气除尘及脱硫技术有待于进一步开发;(4)系统的整体优化配置和电站系统的控制技术有待于深入研究;(5)厂用电率高。由于 IGCC 电站需设置制氧设备,用于提供氧气作为煤的气化剂,因此,其厂用电率通常高达 10%—12%;(6)目前燃气轮机叶片耐高温及磨蚀的性能尚不能很好地满足直接燃用煤气的要求,需要进一步的改进。

## 2.4 煤炭洗选技术

加强煤炭洗选是实现资源价值最大化和实现煤

的洁净利用的重要途径之一。我国原煤洗选加工中炼焦煤洗选占了很大比例,而真正进入洗煤系统的动力煤比例非常之小。其结果一是导致锅炉热效率下降,造成能源浪费;二是加大运输负荷,造成运力浪费;三是排放烟尘量增加,造成大气严重污染。

煤炭洗选技术主要有:三产品重介及二产品重介工艺,煤泥加压脱水工艺,喷射式浮选机及微泡浮选柱工艺技术等。煤炭洗选中存在的主要问题:我国原煤入洗比例只有 30 %左右,与美、英、澳等发达国家(入洗比例达 55 %—95 %)相比<sup>[8]</sup>,相差甚远;煤炭洗选过程产生的污染物需要妥善处理,以避免二次污染。

### 3 煤的主要清洁技术的发展趋势

考虑煤炭利用技术的现状及未来对环境保护更高的要求,未来煤炭高效洁净化利用必将是煤的高效燃烧、发电技术与燃煤污染物控制技术的结合,如超(超)临界燃煤机组常规燃烧+燃烧后烟气净化技术,超(超)临界燃煤机组富氧燃烧+燃烧后烟气净化技术,整体煤气化联合循环技术+燃烧前分离 CO<sub>2</sub> 技术,循环流化床燃烧技术等。

#### 3.1 超(超)临界燃煤机组常规燃烧+燃烧后烟气净化技术

目前,超超临界发电机组技术已经成熟,由于蒸汽压力和蒸汽温度的提高,机组热效率提高,供电煤耗降低。预期在未来的 20—30 年内蒸汽温度和压力还将大幅度升高。对蒸汽温度为 760℃、压力为 35 MPa 的 750MW 燃煤超超临界发电机组的技术经济可行性研究表明,电厂净效率将达到 45%(基于高位发热量),发电煤耗为 230—240g/kWh;如果采用两次再热方式,效率可达到 47%,所有气体与固体污染物排放将减少约 1/4<sup>[9]</sup>。但是,当超(超)临界燃煤机组采用燃烧后分离 CO<sub>2</sub> 技术,发电效率将会下降,效率降低的主要原因是:CO<sub>2</sub> 分离、压缩和 CO<sub>2</sub> 吸收剂再生时的能耗。

#### 3.2 超(超)临界燃煤机组富氧燃烧+燃烧后烟气净化技术

燃料在氧气和二氧化碳混合气体中的燃烧,能大幅度地提高燃烧产物中的 CO<sub>2</sub> 浓度,将会使分离和捕集 CO<sub>2</sub> 的工艺相对简单且成本降低,同时可以大幅度减少甚至消除燃煤产生的其他污染物的排放。因此,目前该项技术被认为是一项可以实现污染物零排放的新型燃煤洁净发电技术,正处于实验研究与工程示范阶段。富氧燃烧过程如图 4 所示。

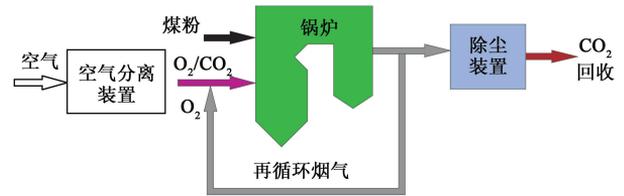


图 4 富氧燃烧技术

表 1 500MW 电厂效率比较(基于高位发热量)

技术类型	净输出功率 /MW	毛输出功率 /MW	锅炉效率 /(%)	蒸汽侧效率 /(%)	净循环效率 /(%)
空气常规燃烧	453	500	89	38	34
常压富氧燃烧	326	500	89	38	23
增压富氧燃烧	377	500	97	41	30

由表 1 可知,富氧燃烧可以提高锅炉效率 2%—7%,但净效率下降 4%—11%,主要原因是富氧燃烧增加了电耗,使厂用电率增加,净效率下降;但如果考虑捕集 CO<sub>2</sub> 的环境效益,则是有利的。随着科学技术的发展,会进一步降低由于增加 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧方式后的能耗,从而提高净循环效率。

#### 3.3 循环流化床燃烧(CFBC)技术

我国煤炭包括种类繁多的劣质煤,还有大量的煤矸石和洗煤泥。要合理利用这些资源,循环流化床锅炉是首选。未来,我国将建设一批利用煤矸石资源和燃用普通动力煤的循环流化床锅炉机组。

清华大学、西安热工研究院等单位,在国家科技部支撑计划的支持下,已经开展 600MW 超临界循环流化床锅炉的相关研究工作,三大锅炉厂已分别提出了各自的 600MW 超临界循环流化床锅炉技术方案。600MW 超临界循环流化床锅炉的示范工程的启动,标志着我国洁净煤发电技术步入了更高的台阶。该机组的主要优点如下:(1)具有较高的机组发电效率,脱硫运行成本比煤粉炉尾部烟气脱硫(FGD)低 50% 以上,而投资与煤粉炉加 FGD 持平;(2)在不需采用其他技术措施的情况下,可将 NO<sub>x</sub> 排放值减至 200mg/m<sup>3</sup> 以下,低于国内目前采用超细粉再燃技术的同容量燃用褐煤的煤粉炉的 NO<sub>x</sub> 排放值;(3)和具有高发电效率的先进的 IGCC 技术相比,在电厂的复杂性、可靠性、投资成本等方面具有明显的优势。

#### 3.4 整体煤气化联合循环技术(IGCC)+燃烧前分离 CO<sub>2</sub> 技术

先进 IGCC 技术在能源转化效率、常规污染物脱除与分离 CO<sub>2</sub> 方面独具技术、经济与环保的整体优势,是一种在国内外都很有前途的发展中的高新技术。我国电力行业 2008 年以来计划建设 20 套以

上 200—400MW 的 IGCC 发电机组。

IGCC+燃烧前分离 CO<sub>2</sub> 技术,比没有 CO<sub>2</sub> 的捕集与封存(CCS)技术时增加了给煤量,发电效率也有所下降,但可以去除 90%以上的 CO<sub>2</sub>,减轻温室效应。未来随着技术不断发展,采用 CCS 技术成本会下降,CO<sub>2</sub> 捕获技术与 IGCC 结合,是最有竞争力的发电技术,且 CO<sub>2</sub> 捕获投资费用要比燃煤发电的费用低。如果不考虑 CCS,则 IGCC 的发电成本比超超临界煤粉锅炉发电机组(USCPC)高,但如果考虑 CCS,则 IGCC 优于 USCPC,这对现有发电机组未来实现 CCS 的改造有利。

## 4 结束语

(1)高效率的燃煤发电机组,特别是超(超)临界燃煤机组+燃烧后烟气净化技术,是我国煤的清洁利用的主要技术,将在今后相当长的时期内为我国煤炭的高效率、低污染的燃烧发电发挥头等重要的作用。

(2)循环流化床燃烧技术是近几年来发展迅速的煤的清洁利用技术,在劣质燃料利用和污染物排放控制方面的独特优势将使它得到更大规模的应用。

(3)以煤的气化技术为核心的整体煤气化联合循环技术是未来洁净煤技术发展的方向,因此,与之相关的煤的气化技术和燃气轮机技术也会取得长足的进步。

(4)随着温室气体 CO<sub>2</sub> 引起的气候变化问题受到越来越广泛的关注,CO<sub>2</sub> 的捕集与封存技术及富氧燃烧分离 CO<sub>2</sub> 的技术会得到极大的发展,CO<sub>2</sub> 的捕集与封存技术可能会成为未来人们考虑能源利用的出发点。

### 参考文献

[1] 黄其励. 中国燃煤发电技术现状和发展. 清洁化石能源研讨

会,西安,2007,10 [Huang Q L. The Now and Future of Coal-fired Electricity Generation Technology in China. The Workshop of Clean Fossil Fuel Energy. Xi'an, Oct. 2007 (in Chinese)]

- [2] 阎维平. 洁净煤发电技术. 北京:中国电力出版社,2008. [Yan W P. Clean Coal Power Generation Technology. Beijing:China Electric Power Press,2008 (in Chinese)]
- [3] 工程动态:国产化 300MW CFB 锅炉连续运行 200 天,循环流化床,8(20),2008. [Engineering News: China-made 300 MW CFB Boiler Consecutively Operated 200 Days. Circulating Fluidized Bed, 8(20), 2008 (in Chinese)]
- [4] 刘德昌,阎维平. 流化床燃烧技术. 北京:水利电力出版社,1995 [Liu D C, Yan W P. Fluidized Bed Combustion Technology. Beijing:Water Resources and Electric Power Press, 1995(in Chinese)]
- [5] 焦树建. 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环. 北京:中国电力出版社,1996 [Jiao S J. Integrated Gasification Combined Cycle. Beijing:China Electric Power Press. 1996(in Chinese)]
- [6] 钟史明. 燃气-蒸汽联合循环发电. 北京:水利电力出版社,1995 [Zhong S M. Combined Gas-Steam Cycle Power Generation. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995(in Chinese)]
- [7] 清华大学热能工程系动力机械与工程研究所等. 燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环装置. 北京:中国电力出版社,2007. [Institute of Power Mechanics and Engineering, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University. Gas Turbine and Gas-Steam Combined Cycle Plant. Beijing:China Electric Power Press,2007(in Chinese)]
- [8] 王成师. 选煤技术,2006,12(6):55. [Wang C S. Coal Preparation Technology ,2006,12(6):55 (in Chinese)]
- [9] 樊泉桂. 超超临界及亚临界参数锅炉. 北京:中国电力出版社,2007[Fan Q G. Ultra-supercritical and Subcritical Boiler Parameters. Beijing:China Electric Power Press,2007(in Chinese)]

### · 封面故事 ·

## 表面磁力效应

在外加电场的作用下,铁磁金属(如铁,钴,镍)中的 3d 巡游电子为屏蔽该电场会集聚在金属表面,而这些屏蔽电子之间的交换关联作用会改变表面磁矩,进而直接影响铁磁金属的表面磁性,这就是表面磁电效应。在表面磁电效应中,磁电效应的产生无需借助离子位移,仅仅通过载流子的移动就能形成,因而能够存在于金属单质中,这使得它显著区别于以前所发现的磁电效应。而如果以巨介电材料为中介,则有可能进一步显著放大铁磁金属薄膜的表面磁电效应。更有意义的是,在外场作用下,铁磁金属表面电子的轨道角动量会发生微小变化,从而改变其自旋轨道耦合,进而直接影响金属表面磁晶各向异性性能。以铁薄膜为例,当强度为 0.5 V/Å 的外加电场发生反转,其表面磁晶各向异性性能会发生近 30%的变化,这就为用电场直接实现磁极化反转提供了有力的理论支持,该效应已直接得到实验[Nature Nanotechnology, 2009(4):158]证实,对未来进一步解决存储器自身体积与信息存储量之间的矛盾、实现存储器“小型化”有指导意义。上述工作由华东师范大学极化材料与器件教育部重点实验室作为第一研究单位完成。

(华东师范大学 段纯刚)