

# 煤炭高效清洁低碳利用研究进展

岑可法

浙江大学能源工程学院, 杭州 310027

**摘要** 随着能源生产和消费革命的到来,中国煤炭利用正在经历从低效、粗放向高效、清洁、低碳的利用方式转变。本文介绍了煤炭高效发电、分级分质利用、污染物综合处理与资源化回收、固废及生物质与燃煤掺烧发电、CO<sub>2</sub>捕集封存和转化利用以及智慧能源等中国未来煤炭利用的主要发展方向。

**关键词** 煤炭高效发电;煤炭高效清洁利用;低碳

改革开放40年来,中国走完了西方大多数国家200多年的工业化历程,随之带来的是能源消费总量的持续快速增长,经历了从能源紧缺到满足能源需求的完整历程。煤炭作为中国能源消费的主体,为中国能源安全提供了重要保障<sup>[1]</sup>。

中国是世界上唯一以煤为主的能源消费大国,煤炭是能源,同时也是化工、冶金等行业的资源(图1<sup>[2]</sup>)。

中国远景煤炭资源总量5.82万亿t,按照目前开发速度,基本满足中国经济社会发展需求,为国家能源安全提供了坚实保障<sup>[3]</sup>。然而,煤炭低效、粗放的原始消费方式无法满足中国对生态环境、气候变化及未来能源消费方式的需求,高效、清洁、低碳开发利用煤炭已成为共识。中国各大高校、科研院所、企业围绕煤炭的高效清洁低碳利用进行了大量研究,取得了很好的成绩。

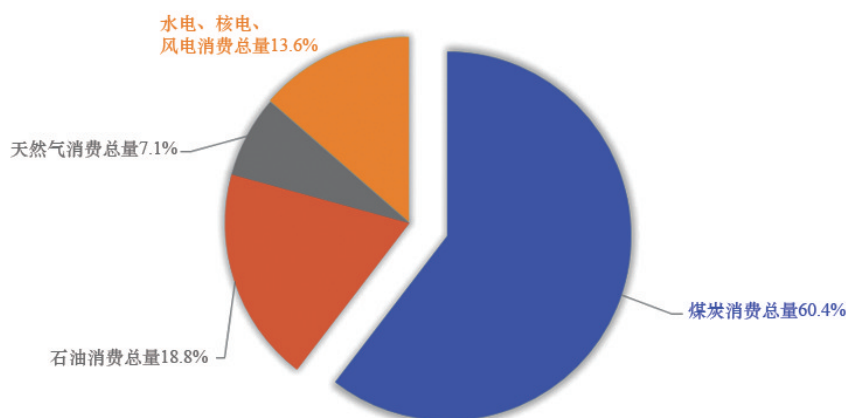


图1 2017年中国能源消费结构

Fig. 1 China's energy consumption structure in 2017

收稿日期:2018-04-21;修回日期:2018-05-05

作者简介:岑可法,教授,中国工程院院士,研究方向为能源高效清洁低碳利用,电子信箱:kfcen@sun.zju.edu.cn

引用格式:岑可法.煤炭高效清洁低碳利用研究进展[J].科技导报,2018,36(10):66-74;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.10.007

燃煤发电大容量、高参数机组达到世界先进水平,污染物超低排放应用达到世界领先水平;煤直接液化、煤制烯烃等新型煤炭转化技术世界领先<sup>[4]</sup>。

## 1 煤炭高效发电

中国当前能源供应主要依靠以煤为主的化石能源体系长期难以改变<sup>[5]</sup>。为了解决大量燃煤引发的能源环境问题,缓解以化石能源为主的能源体系及其粗放式发展与经济高质量发展要求不协调的主要矛盾,发展煤炭高效发电技术是中国燃煤领域的长期研究课题。高效燃煤发电技术常见发展方向有两点,其一通过提高传统火力发电参数,使机组达到超超临界,发展高经济性、高效率的高参数大容量机组<sup>[6]</sup>;其二在于发展先进燃煤技术,减少污染物的排放,缓解燃煤能源供应与环境的矛盾。

### 1.1 新一代高效燃煤发电技术

新一代高效燃煤发电技术旨在研究 700℃火力发电成套技术及电力装备,是具备工程化应用及国内外成套推广价值的自主知识产权的重大电力装备技术,涉及该成套技术的主机装备、主要热力系统、700℃高温管道材料、关键辅机、智能化集成控制技术以及所涉及的全部知识产权管理。20 世纪 90 年代初至 2011 年,全世界已新建超超临界机组超过 100 台,提高参数、进一步提高经济性、降低价格性能比、降低单位能量的排放是现今火电汽轮机的发展方向<sup>[7]</sup>。目前世界上还没有主蒸汽温度 700℃的机组,但国内外对该能级汽轮机材料的研究启动较早。欧洲、美国关于 700℃等级超超临界燃煤发电机组的研发工作在 20 世纪 90 年代中期就相继启动了相关的大型项目。中国 2010 年开始启动国家 700℃超超临界燃煤发电技术开发计划,并于 2010 年 7 月 23 日成立 700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟。目前国内以“700℃先进超超临界燃煤发电主要设备关键技术研究”的国家高技术研究发展计划(863 计划)项目为依托开展了 700℃超临界汽轮机材料研究,国内三大汽轮机主机厂均参与该项目,并各自承担了开发工作。以上技术前沿所研究的 700℃以上高参数火力发电技术进展受制于镍基材料的成熟度及高成本,发展受阻,工业化应用仍有较多问题亟待解决。超超临界机组技术继承性和可行性较高,在目前以及将来一段时间内,具有较高的效率和较低的建设成本,

极具性价比。

### 1.2 超低排放循环流化床燃煤技术

中国大型燃煤电厂正在推进世界上最严格的超低排放标准( $\text{NO}_x < 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),并采用以选择性催化还原法(SCR)+低温除尘+石灰石/石膏湿法烟气脱硫(FGD)+湿式电除尘(WESP)的烟气净化技术为核心,以锅炉低氮燃烧为辅的技术路线。现已经在 80%以上大型燃煤机组加以推广。因此燃煤污染的控制重心转移到中小燃煤工业锅炉和民用散煤上。燃煤工业锅炉污染控制采用大型燃煤电站的污染控制技术路线无论从投资、运行管理水平、运行成本上均有难于克服的障碍。采用以天然气代煤或电代煤在实施过程中也遇到了天然气来源、价格、管网配套方面的阻力。循环流化床(CFB)燃煤锅炉由于具备劣质煤适应性强,燃烧过程中可实现较低的污染排放( $\text{NO}_x < 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $\text{SO}_2 < 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),在中国工业燃煤锅炉中占有较大比例<sup>[8]</sup>。但现有循环流化床燃烧技术采用流态优化实现炉内高效脱硫和低氮燃烧的研究处于探索阶段,相关的流态化与燃烧,NO 形成与降解,脱硫反应的关联机理认识不清。在工程上如何提高物料循环效率以降低平均循环物料粒度,以及不同煤种的超低排放等工程关键问题需要解决。中国自 20 世纪 90 年代即形成了对循环流化床燃烧的新理论体系<sup>[9]</sup>,在过去 20 年,运用该理论重新设计了图谱的水平风速轴设置计点,发展了先进的国产循环流化床锅炉系列产品,直到世界最大容量超临界 600 MW 循环流化床发电示范工程。国产循环流化床燃烧技术以优异的性能占领了中国循环流化床燃煤锅炉市场,并逐步打入国外市场。

## 2 煤炭资源化分级分质利用

基于煤化工的煤气化、液化技术是指以煤为主要原料经过物理和化学方法将煤炭转为气体、液体和固体产品或半产品的过程<sup>[9]</sup>。煤气化、液化的优势主要体现在资源和市场需求 2 个方面。从资源情况看,中国中西部地区的煤炭资源比较丰富,发展煤气化和煤液化具有经济效益。从市场需求看,煤化工产品尤其是煤制烯烃、煤制油、天然气、乙二醇、芳烃等与石化产品一样具有很大的消费需求,可降低中国经济发展对石油、天然气资源的依赖<sup>[10]</sup>。传统煤化工将煤全部转化为油气产品,因煤的氢碳比远低于石油和天然气,所以需要

高温、高压、纯氧和高耗水。实际上,煤主要由挥发分和半焦组成,通过简单加热就可以变成可燃气,而可燃气体的碳氢比与石油天然气碳氢比相当,易于转化为油气产品。煤炭资源化分级分质利用技术通过热解或部分气化工艺将煤炭所含富氢组分转化为煤气和焦油,半焦用于燃烧发电或者其他用途,实现煤的分级转化和分级利用,大幅度提高煤的利用价值<sup>[11]</sup>。

## 2.1 煤气化与煤液化

煤气化及液化技术是现代煤化工的基础,根据发展进程分析,煤气化技术可分为3代。第1代气化技术为固定床、移动床气化技术,多以块煤和小颗粒煤为原料制取合成气,装置规模、原料、能耗及环保的局限性较大;第2代气化技术是现阶段最具有代表性的改进型流化床和气流床技术,其特征是连续进料及高温液态排渣;第3代气化技术尚处于小试或中试阶段,如煤的催化气化、煤的加氢气化、煤的地下气化、煤的等离子体气化、煤的太阳能气化和煤的核能余热气化等。目前,中国的煤气化工艺由老式的美国联合气体改进公司(UGI)炉块煤间歇气化迅速向世界最先进的粉煤加压气化工艺过渡,同时国内自主创新的新型煤气化技术也得到快速发展。据初步统计,采用国内外先进大型洁净煤气化技术已投产和正在建设的装置有80多套,50%以上的煤气化装置已投产运行。

煤的直接液化(煤变油)法,是以煤为原料,在高温高压条件下,通过催化加氢直接液化成烃类化合物,再通过精馏制取汽油、柴油、其他燃料油等成品油。目前,世界各国对煤转化成液体燃料及化工原料的方法研究进展很快。技术比较成熟的直接液化法有美国氢-煤(H-COAL)法及以两段催化液化法和氢-煤工艺为基础提出HTI法、德国新液化工艺(IGOR)法、由日本新能源产业技术机构NEDO实施NEDOL法。目前,国外尚未达到煤直接液化工业生产阶段,只有中试生产装置在运行。中国神华集团煤直接液化工业化大型工艺支持单元(PSU)装置生产出合格液体燃料,开创了煤直接液化工业化生产的先河<sup>[12]</sup>。煤间接液化法,是将煤通过气化炉生成的气化气转化成合成气,以合成气为基础原料,采用合成工艺路线费-托(F-T)煤液化法转化为烃类化合物,并通过精馏生产出液体燃料和各种化学品,也称C1化学产品。近几年,世界上许多国家十分关注以煤为原料采用鲁奇炉、常压煤粉气流床气化炉(K-T炉)、德士古炉等生产气化气转化生产甲醇。中

国云南大为焦化公司成功实现以焦炉煤气为原料生产甲醇,目前在中国已有5套装置投产。

## 2.2 分级分质多联产

近年来,国家先后多次发布相关规划及政策,鼓励基于热解过程的煤炭资源化分级分质利用技术的研究开发及工程示范,旨在促进技术发展及推广应用。目前,基于热解的煤炭资源化分级分质利用工艺主要有油-气-半焦联产工艺和油-气-热-电联产工艺。油-气-半焦联产工艺通常采用低灰优质煤,产生油气同时联产大量半焦。半焦通常经冷却外送,主要用于冶炼、化工原料及清洁燃料等。油-气-热-电联产工艺将煤热解和半焦燃烧直接耦合,在煤燃烧利用前先通过热解提取油气,热半焦直接送锅炉燃烧发电供热。该工艺燃料适应性广,同时避免了半焦冷却、储存和运输环节,系统热效率高,被认为是煤炭利用的革命性方向,近年来在国内外得到广泛关注。国外代表性工艺有日本石川岛播磨重工业(IHI)双流化床多联产工艺、英国克兰菲尔德大学的油页岩多联产系统及韩国科学与技术高等学院的内循环煤气化燃烧工艺等;国内浙江大学、中国科学院、清华大学及国家电网公司北京动力经济研究所等单位开发了基于移动床、流化床及下行床等的煤热解燃烧多联产工艺。上述工艺已经进行了大量实验室研究,并部分完成了工业试验,浙江大学和中国科学院等已完成煤处理量2~40 t/h煤热解燃烧工业试验研究,验证了该工艺的可行性,具备工业示范及推广应用能力<sup>[13]</sup>。

目前,中国每年用于燃烧利用的煤炭超过25亿t耗煤(90%以上为烟煤和褐煤)所含挥发份可制取相当于3900亿m<sup>3</sup>合成天然气或3亿t石油(2011年中国石油天然气集团公司进口2.5亿t)。如制取清洁燃气替代现有工业锅炉燃煤,可替代目前国内的工业锅炉燃煤,工业锅炉效率由65%提升至85%,节煤率18%,节约工业锅炉燃煤约1.5亿t,年减排83% SO<sub>2</sub>、39% NO<sub>x</sub>、83%烟尘、18% CO<sub>2</sub>。

由此可见,推广应用煤炭分级转化综合利用技术适合中国的国情和特色,充分体现煤炭既是能源又是资源的理念,既可对现有近8亿kW燃煤电厂进行分级利用改造,又可适用于新建电厂,可应用于高效清洁发电、替代工业锅炉燃煤、运输燃料替代和煤化工等领域,对于中国清洁高效煤炭发电、油气等资源替代、大幅度节能减排、循环经济等具有重要战略意义。

### 3 燃煤污染物超低排放

中国重点区域单位面积煤炭消费强度高, 散烧煤量大且燃烧效率低、污染治理难度大, 导致单位面积污染物排放强度也远高于全国平均水平及美国、日本等发达国家水平, 发达国家的大气污染防治经验可借鉴但是难以复制<sup>[4]</sup>。京津冀、长三角、珠三角等重点地区的煤炭消费强度约为全国平均的 4.92 倍、美国的 15.7 倍。目前, 中国已在大气污染治理技术研发方面取得了显著的进展, 多项关键共性技术取得突破, 有效支撑了各重点行业大气污染物排放标准的制定、修订和实施, 减少了主要大气污染物的排放, 并在一定程度上遏制中国空气质量持续恶化的局面。围绕当前空气质量改善的需求, 针对工业源、移动源、面源等主要大气污染源, 中国正经历从末端污染控制为主, 向全过程污染治理转变, 从单一污染物排放控制向多种污染物系统协同控制转变, 从污染物达标排放向深度治理转变, 并逐步构建源头削减—过程控制—末端治理的全过程大气污染治理技术体系, 以支撑实现大气污染治理能力的全面提升。

#### 3.1 污染物控制

SO<sub>2</sub>控制方面, 发展了石灰石/石灰-石膏湿法、烟气循环流化床法、海水法等脱硫技术, 其中石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术在中国已投运燃煤脱硫机组中占 90% 以上份额, 其脱硫效率一般可达 95% 以上。针对当前量大面广的石灰石/石灰-石膏湿法脱硫机组难以满足环保新要求的现状, 国内外科研单位、环保骨干企业等深入研究了湿法烟气脱硫的强化传质与多种污染物协同脱除机理, 并在 50~1000 MW 燃煤机组上实现了示范应用, 脱硫效率突破了 99%, SO<sub>2</sub> 排放浓度可低于 20 mg/m<sup>3</sup>。高效脱硫关键技术也在钢铁烧结机、玻璃炉窑、垃圾焚烧等行业得到了推广应用。

NO<sub>x</sub>控制方面, 发展了低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术、选择性非催化还原法 (SNCR) 烟气脱硝技术、选择性催化还原法 (SCR) 烟气脱硝技术和 SNCR-SCR 耦合脱硝技术等, 其中选择性催化还原法烟气脱硝技术在中国已投运燃煤脱硝机组中占 95% 以上份额, 脱硝效率最高可达 90% 以上。针对部分机组 NO<sub>x</sub> 排放超标, 尤其是低负荷下 NO<sub>x</sub> 超标现象严重, 大量废烟气脱硝催化剂面临再生等问题, 目前国内研究机构通过技术研发形成了具有高脱硝效率、宽温度窗口、高抗磨性能的催化剂配方及其活

性恢复方法, 在含 1000 MW 等级燃煤机组上也实现了产业化推广应用, 排放浓度可低于 50 mg/Nm<sup>3</sup>; 具有自主知识产权的脱硝催化剂再生改性工艺技术及装备, 已成功应用于 300 MW 及 1000 MW 机组等催化剂再生改性项目, 实现 NO<sub>x</sub> 高效脱除的协同控制汞等污染物。

颗粒物控制方面, 发展了静电除尘、袋式除尘和电袋复合除尘等除尘技术, 其中现有近 80% 的火电机组安装了静电除尘器, 而随着袋式除尘器滤袋材料性能的改善及排放标准的严格, 袋式除尘器和电袋复合除尘器应用呈上升趋势。近年来还研发了湿式静电除尘、高效凝并、高效供电电源等多种高效除尘关键技术。PM<sub>2.5</sub> 总捕集效率可达到 99% 以上, 烟尘排放浓度小于 5 mg/Nm<sup>3</sup>。

汞等污染物协同控制方面, 脱硫塔前一级除尘装备本身可协同控制一部分吸附在颗粒上的 Hg、SO<sub>3</sub> 等污染物; 而通过对选择性催化还原法脱硝催化剂配方改性及向烟气中添加活性组分, 可以将大部分单质汞氧化成二价汞, 以利于在后续的脱硫塔内吸收脱除并固定于脱硫副产物中; 而脱硫后的湿式静电除尘技术可高效脱除 PM<sub>2.5</sub> 的同时, 协同脱除塔后烟气中携带的 SO<sub>3</sub> 酸雾、细小浆液滴、汞等多种污染物, 脱汞效率可达 85% 以上, 汞排放浓度小于 0.002 mg/Nm<sup>3</sup>, SO<sub>3</sub> 酸雾去除效率可达 80% 以上, 能有效解决蓝烟/黄烟、“石膏雨”以及汞、雾滴排放等污染新问题。

#### 3.2 多种污染物协同控制

针对单一污染物高效脱除及其他污染物协同控制技术, 通过对 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物、汞等多种污染物高效脱除与协同控制关键技术的集成开发, 形成了能达到天然气燃气轮机排放标准限值要求的燃煤电站超低排放环保岛技术, 其系统工艺流程如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

目前, 燃煤电站超低排放技术正在京津冀鲁、长三角、珠三角等重点区域的燃煤发电机组和热电联供机组上推广应用。例如, 浙江大学和浙江省能源集团有限公司等单位在完成实验室试验的基础上于 2014 年 5 月 30 日研制成功国内首座 100 万 kW 燃煤电站超低排放示范工程, 获国家技术发明一等奖。发 1 kW·h 仅增加成本 1 分钱, 并达到天然气发电机组的国家标准 (表 1), 被国家能源局授予“国家煤电节能减排示范电站”称号。各类工程示范通过不同的减排技术路线均使燃煤机组烟气的主要污染物排放浓度达到国家燃气排放标准限值要求。随着燃煤发电机组超低排放示范工程

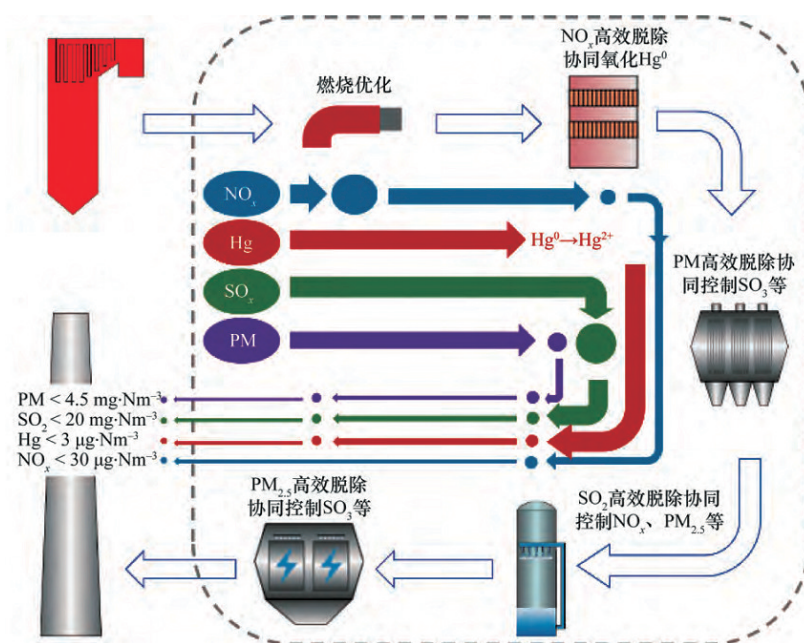


图2 燃煤电站超低排放环保岛

Fig. 2 Ultra-low emission system of coal-fired power station

表1 嘉兴电厂1000 MW机组中国环境检测总站考核数据

Table 1 Evaluation data of jiaxing power plant 1000MW units by China national environmental monitoring centre

排放标准	颗粒物/( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	二氧化硫/( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	氮氧化物/( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	总汞/( $\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )
燃煤发电机组排放标准	20	50	100	30
天然气发电机组排放标准	5	35	50	30
7# 燃煤机组	1.73	15.1	23.67	1.72
8# 燃煤机组	1.9	8.45	20.6	1.3

的深入推进,中国煤电行业将取得革命性进步,可望建成世界最大的清洁高效煤电体系<sup>[6]</sup>。

#### 4 固废及生物质与燃煤掺烧发电

依托现役燃煤高效发电系统和污染物集中处理设施的技术领先优势,通过实施包括城市生活垃圾和污水处理厂、水体污泥等的固体废弃物和包括农作物及其废弃物、树木等木质纤维素、动物粪便等的生物质与煤炭掺烧发电的方式,破解秸秆田间直接焚烧、污泥和垃圾围城等难题,克服生物质资源资源化利用污染物排放水平高的缺点,增加不需要调峰调频调压等配套调节措施的优质可再生能源电力供应,促进电力行业特别是煤电的低碳清洁发展。因此,为了促进煤电转型、提高可再生能源消纳比例,2016年国家能源局提

出,将在“十三五”期间力推“煤电+生物质”“煤电+污泥”“煤电+垃圾”等煤电为主体、其他可再生能源补充的发电形式。

##### 4.1 固废与燃煤掺烧发电

随着中国城市化及人民生活水平不断提高,城市生活垃圾产量急剧上升。据统计,目前中国城市生活垃圾总清运量超过2.15亿t。城市生活垃圾和污泥是固体废弃物的重要组成部分,其中含有较为丰富的有机物等可通过焚烧的方式来实现垃圾减量和能源回收。但是垃圾焚烧产生的烟气中含有大量的二噁英、氯化物、 $\text{SO}_2$ 、氮氧化物等污染物,需要单独配备复杂的烟气净化系统才能满足排放要求,同时传统垃圾发电项目还存在投资大、能耗高、净化效率低等问题,发电机组效率仅为18%~25%。除此之外,生活垃圾和污泥能量密度相比传统化石能源较低,且含水量高、成分复杂,

直接用于焚烧或燃烧发电难以保证电力稳定供应,会造成经济性较差等问题<sup>[17]</sup>。由于传统燃煤电厂发电效率较高,通过燃煤耦合垃圾发电技术可将垃圾焚烧发电效率提高至30%以上,提效10%左右。可实现垃圾无害化、减量化、资源化、低成本化的处置,提高垃圾能源化利用效率,降低单位垃圾处理投资成本及运行维护费用。该技术能够有效解决传统垃圾焚烧发电厂机组发电效率低、排烟温度高、飞灰沾污、二噁英等污染物处理成本高等难题。

目前污泥流化床焚烧技术,可以实现能量回收以及低污染排放,但是污泥中较高的水分含量会导致能量回收效率低。通过开发污泥干化技术可以实现对污泥的高效预处理,使其水分含量大幅降低,减少了污泥总量,还有利于污泥的存储、运输和利用。污泥干化技术主要有热干化、太阳能干化、微波加热干化、超声波干化及热泵干化等。干化后的污泥热值接近褐煤热值,通过焚烧可以彻底处理污泥,杀死病原体,最大限度地减少污泥体积,还能回收利用其热能。因此,污泥干化技术作为污泥流化床焚烧技术的预处理工艺,可以有效实现污泥中能量回收和低污染物排放的目标。

#### 4.2 生物质与燃煤掺烧发电

生物质是一种清洁可再生能源,主要与农林业生产过程相关。中国拥有丰富的生物质资源,据统计,全国农林废弃物总产量约为16亿t,包括秸秆、薪柴等,还有大量的人畜粪便,每年生物质资源总量折合约8亿t标准煤,如全部利用替代化石能源可减排CO<sub>2</sub> 16亿t<sup>[18]</sup>。通过在燃煤机组中掺烧生物质燃料,可以有效提高生物质燃料的利用率并降低污染物的排放。在掺混燃料中,生物质燃料在总灰渣中生物质贡献的灰渣份额较小,因此在金属表面不易形成坚固的污垢;另一方面,由于燃煤发电机组烟气量大,使锅炉的过热器、再热器、省煤器、空气预热器以及水冷壁等受热金属表面得到很好的冲刷,可以减轻生物质燃烧后烟气中的碱金属及氯的物质对金属的腐蚀。

生物质在燃煤机组掺烧可以降低生物质燃料供应风险,具有燃料的灵活性,直接提高生物质能源的利用效率,而且城市生活垃圾等固废的再利用有利于能源可持续发展<sup>[19]</sup>。生物质混烧发电可充分利用燃煤电厂大容量、高蒸汽参数达到高效率的优点,减少燃煤发电厂的CO<sub>2</sub>排放、降低燃料费用和每千瓦发电的投资费用,并有可能使生物质发电的效率达到今天燃煤电厂

能够达到的最高水平。根据广东省生物质与煤共燃发电技术项目应用案例,在不同生物质掺烧比例下,可以达到较好的碳减排效果<sup>[20]</sup>。固体废弃物及生物质掺烧能够充分利用现有燃煤电厂原有的设施和系统来实现生物质发电,充分利用原有燃煤电厂已经存在的供电和供热市场,固废预处理及生物质燃料预加工工艺简单、工艺设备要求低,对原有燃煤机组系统运行维护的要求较小。

## 5 CO<sub>2</sub>捕集封存及转化

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新报告提出,根据气候模型研究,为实现全球温升不超过2℃目标,2030—2050年碳排放必须达到顶峰<sup>[21]</sup>。目前中国CO<sub>2</sub>年排放约100亿t,短期内难以摆脱以化石能源为主体的能源结构,因而亟需开发低成本的大规模CO<sub>2</sub>捕获、封存与利用技术。低成本低能耗的大规模捕获CO<sub>2</sub>,并通过矿化等技术实现碳封存或将利用太阳能等可再生能源将CO<sub>2</sub>转化为燃料,是减少CO<sub>2</sub>排放、缓和气候变化的有效途径。

### 5.1 CO<sub>2</sub>捕集

在众多CO<sub>2</sub>捕集技术中,化学吸收法因其捕集效率高和适应性好,是目前最具大规模捕集CO<sub>2</sub>潜力的技术路线之一<sup>[22]</sup>。近几年,国内外在化学吸收分离燃煤烟气中CO<sub>2</sub>研发方面取得了显著进展,启动了一批示范项目,如美国Petra Nova 140万t/年碳捕集和封存(CCS)项目以及华能上海石洞口发电有限责任公司12万t/年碳捕集项目等。但燃煤/燃气烟气中CO<sub>2</sub>的浓度低、成分复杂、气体流量巨大,导致CO<sub>2</sub>捕集系统投资和运行成本高。新型吸收剂和吸收工艺的研发,是降低捕集能耗和提高经济性的关键,近年来,国内外针对新型吸收剂和吸收工艺已投入数十亿美元开发新一代碳捕集技术。日本三菱重工KS系列胺基吸收剂和美国ADA公司胺基吸附材料已能够将CO<sub>2</sub>捕集能耗从约4 GJ/t CO<sub>2</sub>降低至3 GJ/t CO<sub>2</sub>以下。浙江大学、清华大学、中国华能集团清洁能源技术研究院等单位长期致力于CO<sub>2</sub>吸收剂的研究,研发了混合胺、相变有机胺、离子液体等吸收剂可将CO<sub>2</sub>捕集能耗降低至2.5~3 GJ/t CO<sub>2</sub>。在吸收工艺研究方面,研究人员对强化过程传质、优化捕集工艺、开发超重力反应器、热泵技术等进行大量研究,显示了节能潜力。

## 5.2 CO<sub>2</sub>矿化封存及转化利用

CO<sub>2</sub>矿化作为CCUS(碳捕获、利用与封存)技术的重要发展方向,有望低能耗、规模化的实现CO<sub>2</sub>永久安全封存,环境风险性小。以富钙镁的天然矿物为原料矿化固定CO<sub>2</sub>具有原料丰富,成本低廉的优点。目前国内国外针对其开展了大量研究工作。美国能源部、芬兰埃博学术大学等研究了镁橄榄石、蛇纹石等天然矿物矿化固定CO<sub>2</sub>工艺路线,净封存率在30%~50%,成本高达600~1600美元/t CO<sub>2</sub>。与天然矿石相比,利用工业废弃物固定CO<sub>2</sub>具有反应活性高,粒度小无需预处理等优点,特别是不少固体废弃物靠近CO<sub>2</sub>排放源,为CO<sub>2</sub>矿化封存提供了便利条件。若充分利用中国工业生产过程伴生大量废弃矿物进行矿化固定CO<sub>2</sub>,可实现年处理固废超过10亿t,固定减排CO<sub>2</sub>超过1亿t,具有显著的经济、环境效益和市场前景。浙江大学、香港理工大学和湖南大学等研究水泥基胶凝材料与CO<sub>2</sub>的矿化养护制建材技术。四川大学以纯碱固废氯化钙活化天然钾长石为原料,矿化固化CO<sub>2</sub>并副产氯化钾产品,可以有效抵消固碳成本,完成了千t级中试<sup>[23]</sup>。

利用可再生能源将CO<sub>2</sub>作为廉价丰富的碳源转化为燃料和化学品是一种极具前景的CO<sub>2</sub>转化利用技术。近年来,将CO<sub>2</sub>清洁高效的转化合成燃料成为学术界和工业界的研究热点,是能源科学前沿研究中的“圣杯”<sup>[24]</sup>。CO<sub>2</sub>是化学性质不活泼的分子,需要输入能量激发其参与反应,根据能量输入转化方式可分为电催化、光催化、热化学与光热耦合等。电能转化CO<sub>2</sub>主要利用电解池-原电池原理,反应在常温常压下进行且通过调节外偏电压控制反应速率;光能转化CO<sub>2</sub>利用光催化材料吸收一定波长的太阳光后产生电子-空穴对诱发氧化反应与还原反应,实现光能向化学能的转变;热能转化CO<sub>2</sub>则通过几个连续化学反应实现热能向化学能的转换;光热耦合在热能利用的同时引入光能,实现高品质光能与低品质热能分级利用,耦合光能热能向化学能转化<sup>[25]</sup>。利用光、电、热和光热耦合转化CO<sub>2</sub>,在实现CO<sub>2</sub>转化同时产生具有高附加值产品,良好地与现代能源构架相匹配,为CO<sub>2</sub>减排提出了新思路,满足可持续发展要求。

## 6 智慧能源

18世纪60年代以来,世界经历了分别以蒸汽机、电力和计算机为引领的3次产业革命,每一次产业革命都

使得世界的产业发展水平提高一大步。第4次产业革命将是适应文明演进的新趋势和新要求为目标由智慧能源引领的能源革命。能源革命可以从根本上解决文明前行的动力困扰,实现能源的安全、稳定、清洁和永续利用<sup>[26]</sup>。美国、欧盟、日本等发达国家和地区较早提出了智慧能源网的概念,并开发了智能电网、智慧城市、智能交通、智能燃气和智能社区等新一代概念和技术,以实现能源的高效低碳利用。进入21世纪后,中国也提出了智慧能源网概念,智能电网建设工作已经全面展开,但相较发达国家,中国的新能源利用水平还较低,这限制了我国智能电网的发展<sup>[27]</sup>。进入社会主义新时代以来,中国能源消费模式不断创新,智慧能源、多能互补等新业态新模式不断涌现。大数据、物联网、云计算等技术,提供了对多源、异构、高维、分布、非确定性的数据及流数据进行采集、存储、处理及知识提取的手段,可以使信息创新与能源革命在更高层次上深度融合,实现能源生产模式与消费模式的革命<sup>[28]</sup>。

### 6.1 智慧电站

智慧能源系统通过智能生产制造、先进超低排放和燃料混烧实现能源高效、清洁、低碳利用。“智慧电站”是以自动化、数字化、信息化为基础,综合应用互联网、大数据等资源,充分发挥计算机超强的信息处理能力,集成统一的一体化数据平台、一体化管控系统、智能传感与执行、智能控制和优化算法、数据挖掘以及精细化管理决策等技术,形成一种具备自趋优、自学习、自恢复、自适应、自组织等特征的智能发电运行控制与管理模式,以实现安全、高效、环保的运行目标,并具有优秀的外界环境适应能力<sup>[29]</sup>,是加快构建高效、清洁、低碳、循环的绿色能源生产体系,实现能源与信息深度融合的智慧能源发展策略的重要一环。

目前,中国各发电集团均在积极建设智慧电厂,树立样板工程。其中大唐姜堰智慧电厂是全国首家智慧电厂,其智慧电厂模式共包含五大功能:基于“互联网+”的安全生产管理系统、基于大数据分析的运行优化系统、基于专家系统的三维可视化故障诊断系统、三维数字化档案系统和三维可视化智能培训系统。现阶段中国在“智慧电站”的发展道路上已具备一定的基础。第一,现有电厂在数字化、信息化、自动化等方面达到了较高的水平。第二,网络技术和计算机处理能力得到了极大的提升。第三,中国的发电装备制造水平得到快速发展。目前,国内各类发电企业均配备了

自动控制系统、监控信息系统以及管理信息系统等,但其与智能化生产仍存在较大距离。“智能发电”是一种多学科交叉的高新技术领域,其并非简单的数字化和信息化,而是在此基础上实现更高级别的应用及人工智能化。

## 6.2 多能互补

在传统能源基础设施架构中,不同类型的能源之间具有明显的供需界限,传统产能过剩、系统协调性不足、整体效率较低,能源的调控和利用效率低下,而且无法大规模接纳风能、太阳能等分布式发电以及电动汽车等柔性负荷。多能互补分布式能源系统能够将分式能源系统与太阳能光伏、天然气机组发电,余热锅炉回收等多品种的能源进行联合,减少传统分布式能源系统的能源消耗,解决风能、太阳能等可再生不连续的问题,平抑可再生能源出力的波动性<sup>[30]</sup>。多能互补集成优化是能源变革的发展趋势,倡导的融合、统一、高效、清洁理念是当今能源革命的方向。多能互补集成系统主要有两种模式:一是面向终端用户电、热、冷、气等多种用能需求,因地制宜、统筹开发、互补利用传统能源和新能源,实现多能协同供应和能源综合梯级利用;二是利用大型综合能源基地风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势,推进风、光、水、火、储多能互补系统建设运行。

推进互补集成应用一方面要整合多种新能源发电技术,并且针对中国能源资源分布不均的情况进行差别化的重点发展。另一方面要创新用能的供需方式,提高经济性实现可再生能源的供能更加贴近用户、就地取能、就近消纳。建设多能互补集成优化示范工程是构建“互联网+”智慧能源系统的重要任务之一,有利于提高能源供需协调能力,推动能源清洁生产和就近消纳,减少弃风、弃光、弃水限电,促进可再生能源消纳,是提高能源系统综合效率的重要抓手,对于建设清洁低碳、安全高效现代能源体系具有重要的现实意义和深远的战略意义。

## 7 结论

能源是人类社会赖以生存和发展的基础条件,中国煤多油少气不足,煤炭是中国的优势资源,储量最丰富、性价比最高、生产能力最大。煤炭的高效清洁低碳利用仍将是未来中国能源战略的重中之重,而且相关技术

正在朝着有利的方向发展。在社会主义建设进入新时期的背景下,应当脚踏实地地做好煤炭高效清洁低碳利用工作,有力推动中国能源生产消费方式革命。

## 参考文献(References)

- [1] 谢克昌. 推动能源生产和消费革命战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [3] 岑可法. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究: 先进清洁煤燃烧与气化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 黄其励, 岳光溪, 刘青. 本世纪我国燃煤发电发展的战略思考[C]/中国工程院/国家能源局能源论坛. 北京: 中国工程院/国家能源局能源论坛, 2012.
- [5] 谢克昌. “煤炭革命”的核心是清洁利用[N]. 中国能源报, 2015-06-15.
- [6] 刘入维, 肖平, 钟犁, 等. 700℃超超临界燃煤发电技术研究现状[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 1-7.
- [7] 徐炯, 周一工. 700℃高效超超临界火力发电技术发展的概述[J]. 上海电气技术, 2012, 5(2): 54-58.
- [8] 程乐鸣, 周星龙, 郑成航, 等. 大型循环流化床锅炉的发展[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 817-826.
- [9] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1-13.
- [10] Attwood T, Fung V, Clark W W. Market opportunities for coal gasification in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(4): 473-479.
- [12] 李维明. 加快煤炭分级分质利用是推动我国能源革命的必然选择[J]. 煤炭经济研究, 2016, 36(2): 1.
- [13] 张玉卓. 神华现代煤制油化工工程建设与运营实践[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 179-184.
- [13] 方梦祥, 曾伟强, 岑建孟, 等. 循环流化床煤分级转化多联产技术的开发及应用[J]. 广东电力, 2011, 24(9): 1-7.
- [14] 中国科学技术协会. 环境科学技术学科发展报告(大气环境) 2014—2015[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- [15] 岑可法, 倪明江, 高翔, 等. 煤炭清洁发电技术进展与前景[J]. 中国工程科学, 2015, 17: 49-55.
- [16] 陈吉宁. “十二五”生态环境保护成就报告[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.
- [17] 李晓东, 陆胜勇, 徐旭, 等. 中国部分城市生活垃圾热值的分析[J]. 中国环境科学, 2001, 21(2): 156.
- [18] 秦建光, 余春江, 王勤辉, 等. 流化床秸秆燃烧技术研究与开发[J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 72-75.
- [19] 陈汉平, 李斌, 杨海平, 等. 生物质燃烧技术现状与展望[J]. 工业锅炉, 2009(5): 1-7.

- [20] 马晓茜, 何军飞, 赵增立, 等. 生物质与煤共燃发电 CDM 项目案例分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 91-95.
- [21] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [22] 方梦祥, 周旭萍, 王涛, 等. CO<sub>2</sub> 化学吸收剂[J]. 化学进展, 2015, 27(12): 1808-1814.
- [23] 谢和平, 谢凌志, 王昱飞, 等. 全球二氧化碳减排不应是 CCS, 应是 CCU[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 1-5.
- [24] Liu C, Colón B C, Ziesack M, et al. Water splitting-biosynthetic system with CO<sub>2</sub> reduction efficiencies exceeding photosynthesis[J]. Science, 2016, 352(6290): 1210-1213.
- [25] Xu C, Zhang Y, Pan F, et al. Guiding effective nanostructure design for photo-thermochemical CO<sub>2</sub> conversion: From DFT calculations to experimental verifications[J]. Nano Energy, 2017, 41: 308.
- [26] 刘建平, 陈少强, 刘涛. 智慧能源: 我们这一万年[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [27] 中国智能城市建设与推进战略研究项目组. 中国智能电网与智能能源网发展战略研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2017.
- [28] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(一)大数据与电力大数据[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.
- [29] 刘吉臻. 智能发电: 第四次工业革命的大趋势[N]. 中国能源报, 2016-07-25.
- [30] 谭忠富, 谭清坤, 赵蕊. 多能互补系统关键技术综述[J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 1.

## Research progress and outlook for efficient, clean and low-carbon coal utilization

CEN Kefa

College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract** Along with the revolution of the energy production and consumption, the coal consumption and utilization in China turns from the original inefficient extensive ways to the efficient low-carbon clean methods. This paper reviews the research status and main development directions of coal consumption in China, including the efficient power generation, the classified and graded utilization, the comprehensive disposal and recycling with pollutions, the solid waste and biomass blended with the coal combustion power generation, the CO<sub>2</sub> capture storage and utilization and the smart energy.

**Keywords** coal efficient power generation; high efficiency and clean utilization of coal; low carbon emissions ●



(责任编辑 傅雪)