

# 中国煤炭清洁高效利用的实践与展望

张绍强

中国煤炭加工利用协会, 北京 100713

**摘要** 煤炭是中国的优势能源矿产,对国民经济的发展和人民生活的改善至关重要;煤炭燃烧使用产生的污染问题已经找到科学和经济可行的清洁高效利用途径,减少 CO<sub>2</sub>排放有多种选项,需要理智选择和应对;完全舍弃煤炭似为不明智的做法。提出了中国下一步发展煤炭清洁高效利用的主要开展方向。

**关键词** 煤炭清洁高效利用;超低排放;碳循环;优势能源矿产

长期以来,中国最主要的能源一直依赖煤炭,时至今日,煤炭仍然占中国一次能源生产总量的 72.6%、占消费总量的 64.2%,是长期支撑中国经济社会发展最可靠的能源保障。

中国曾经饱受能源短缺的煎熬,进入 21 世纪以来,煤炭工业大力发展煤炭高效安全开采技术、不断扩大产能规模,为满足能源需求做出了巨大贡献。但近 10 年来,由于煤炭消费总量快速增长和消费区域和时段过度集中,以及低效、粗放和原始的不科学、不清洁、不负责任的消费方式,使部分地区大气污染较为严重,引起了全社会的高度关注,特别是“雾霾”的出现严重影响了中国的能源和环境政策走向,一些未经充分科学论证和示范验证的“去煤化”政策仓促出台,负面影响了中国经济的发展进程。

大量实践证明,煤炭是可以清洁高效利用的,而且还在不断发展和提高。在确保生态环境质量的前提下,通过清洁高效利用,在未来很长一段时间内,中国煤炭仍可以承担主体能源的重任。

## 1 中国煤炭的主体能源地位在未来较长时期内难以改变

经过长期的研究和评估,在未来 20~30 年或更长时间内,中国煤炭的主体能源地位也很难改变。

1) 煤炭是中国优势能源矿产资源。

中国煤炭资源丰富,储量大、分布广、煤种齐全、煤质较好。据最新的全国煤田地质调查显示,中国煤炭总资源量 5.9 万亿 t,2000 m 以浅已查明资源量 3.88 万亿 t,煤炭在中国化石能源资源总储量中占 94.2%。按照目前的开采强度和回收率测算,煤炭可以保障中国数百年以上的能源需求,这为中国未来的能源保障和清洁能源替代提供了较为宽松的时间和空间。

遗憾的是,中国的石油天然气资源十分有限,两者合计占中国化石能源总资源量的比例不足 6%。经过数十年的持续高强度开采,中国陆上优势油田已经进入多次采油的后期,年产量维持在 2 亿 t 左右也有 6 年,再继续维持现有产量规模已经非常吃力。海上油田和超深部石油、陆上重质原油(稠油)数量也有限,而且开发成本和技术瓶颈很高、开采困难、轻质高质量油品产率低。

中国天然气发展较晚,但开发普遍困难。到 2015 年,中国天然气产量 1346 亿 m<sup>3</sup>,但按同等热值计算仅相当于 1.64 亿 t 商品煤。到目前为止,中国勘探查明的整装常规天然气资源仍然很少,而且大部分已经在高强度开发。在非常规天然气(包括页岩气、煤层气等)方面虽然普查资源量较大,但开采

难度大,与美国页岩气的储藏和开采地质条件不可比。

中国国土范围内的油气地质勘探程度已经比较高,指望继续发现新的大油田和大气田可能性较小。

由于油气品种短缺,自 1993 年开始中国不得不大量进口石油和天然气,2015 年净进口石油达到 3.28 亿 t,成为全球最大的石油净进口国。为了应对国内大气污染防治“以气代煤”的需要,中国陆续建设中亚一、二、三、四线管道、中缅、俄罗斯远东天然气管道等进口天然气,并通过海上大量进口液化天然气,才使得 2015 年中国天然气进口总量达到 624 亿 m<sup>3</sup>,尚不足 7600 万 t 标煤的热值。

此外,油气进口的国际运输安全一直是揪心的问题,每天都有成百艘巨型油轮和液化气船穿梭在海上(图 1),为此付出的经济、政治、外交和军事代价都很大。出于对未来油气产地和运输节点地区政治、经济和军事动荡的考虑,进一步扩大油气进口对中国的能源安全保障提出了很大的挑战。

2) 在能源消费成本中煤炭占有绝对优势,是稳定物价、提升中国产品竞争力的基础。

在目前可获得的所有能源品种中,各种能源的消费成本相差很大,直接关系到各种产品的生产成本和价格竞争

收稿日期:2016-08-15;修回日期:2016-09-03

作者简介:张绍强,世界选煤大会(ICPC)中国委员、中国煤炭加工利用协会理事长,研究方向为煤炭清洁高效利用,电子邮箱:ccpua2@sina.com

引用格式:张绍强. 中国煤炭清洁高效利用的实践与展望[J]. 科技导报,2016, 34(17): 56-63; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.17.008



图1 新加坡马六甲海峡油轮雷达图像

(图中红点为锚停等待中的油轮,绿点为行驶中的油轮)

(图片来源:侠客岛(人民日报海外版公众号)2016年5月28日)

力,也关系到人民生活用能消费的承受能力。在可获得的化石能源中,煤炭相对于油气,如果不考虑品种的使用差异,其消费成本相差很大。

按照天然气降价 0.7 元/m<sup>3</sup> 后全国平均价 1.81 元/m<sup>3</sup> 及其他能源品种最新价格测算,按照同等热值比较,天然气消费成本是煤炭 2.6 倍、电能消费成本是煤炭的 2.9 倍,成品油料综合价格的是煤炭的 7~9 倍(图 2)。所以强行要求“以气代煤”、“以电代煤”,将意味着现有能源消费成本将成数倍增长,势必推动物价上涨和通货膨胀,这对中国能源消耗较高的大量实体经济和收入偏低的居民生活将是难以承受之重。

3) 中国能源消费体量巨大,其他所有能经济获得的清洁能源总量太少,替代难度大。

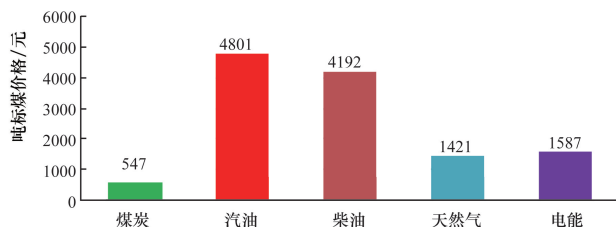
中国是世界第一人口大国和第二大经济体,能源消费总量巨大。据统计,2015 年中国全社会能源消费总量达 43 亿 t 标煤,其中自产的原油和天然气总量合计不足 4.7 亿 t 标煤;水电、核

电、风电、光电、光热等清洁能源和可再生能源总产量折合 5.2 亿 t 标煤,合计不足 10 亿 t 标煤,仅占 2015 年中国能源消费总量的 23%。

即使中国未来经济能够实现平稳转型,并努力强化节能和能效提高,可能会减少一些能源消费和减缓能源消费增长速度,但是中国人口基数大,在目前居民生活用能还处于比较低水平的情况下,单是生活水平改善用能需求的增量就可能吃掉甚至超过通过产业转型和节能所减少的能源消费空间,这是刚性需求。比较当前对石油、天然气、核电、风电、光电等清洁能源的投资和成本,即使不考虑资源的可获得性,单是指望其全面替代煤炭在体量上就很不现实,而且经济代价十分高昂。

据相关研究,中国自产天然气“天花板”在 3000 亿 m<sup>3</sup>/年左右,折合标煤 3.64 亿 t,水电可经济开发的总量约 4 亿 kW,折合年产电力 3.2 亿 t 标煤,核电“天花板”预计不超过 1 亿 t 标煤,如果能全部开发出来,合计 7.84 亿 t 标煤,仅占未来中国能源总需求的 13%~15%,剩余的全部依靠风电和光电不切实际。

此外,水电、风电、光电、光热等稳定性、可靠性、可控性都比较差,很难满

图2 不同能源折算成标煤后的价格对比  
(对比数据为2016年7月市场实际数据)

足电力消费的稳定性要求,需要大量煤电予以保障。

4) 煤炭完全能够实现清洁高效利用,“以进口气代煤”的综合优势并不突出。

随着技术的不断发展和进步,煤炭完全可以洁净高效利用,并已为大量实践所证明。采用原煤洗选提质、分质梯级高效利用、超低排放发电、现代煤化工清洁转化和散煤清洁化治理技术及新型的碳循环利用技术等进行综合治理,从技术层面已经实现了煤炭的清洁高效利用。按照超低排放发电和新型煤粉型工业锅炉的示范实践分析,其法定大气污染物排放与天然气相当(不含 CO<sub>2</sub> 排放),而单位生产成本只在现有基础上增加 10%~20%,在目前承受的范围之内。

目前煤炭消费引起的污染问题,主要是由于法规、制度和强制性标准不健全、监管力度不足、政府监管不到位,以及消费者百年不变、陈旧落后粗放、不负责任的消费方式所致,把煤炭消费应有的污染治理成本转嫁给社会,长期放任不管,形成不科学、不负责任的消费理念和消费习惯并肆无忌惮所致。

天然气的主要成分是甲烷,其碳氢比为 1:4,其燃烧产物中 CO<sub>2</sub> 排放比例确实比煤炭要少得多,但其他污染物同样会产生,特别是颗粒物和 NO<sub>x</sub> 产生比燃煤超低排放后的浓度还大,也是需要净化治理,否则天然气也做不到完全清洁化。天然气相较于煤是比较清洁的化石能源,如果资源富足,理应优先开发和利用,但限于中国的天然气资源缺乏、开发困难,如果依赖远距离进口,需要多方面权衡,适度适量,量力而行,想当然地过分强调天然气优势和偏好脱离中国国情。

中国如果不改变煤炭消费方式,强制实施烟气净化控制,一刀切“去煤化”,仅依靠高价、远距离进口外国的优势资源,费效比并不高。甲烷是强烈的“温室效应”气体,其温室气体全球变暖潜能值(GWP)是 CO<sub>2</sub> 的 21 倍,天然气开发、加工、运输、储存和使用过程中都会有大量的甲烷逃逸进入大气环境中,无论责任是谁,未来进口天然气通过碳足迹机

制最终所有的温室气体排放都要传递给终端消费者,所以进口天然气的综合效益并不突出。

5) 煤炭是中国不少地区经济赖以发展的支柱,这些地区鲜有其他发展机会,转型十分困难。

凭借优势资源发展地方经济是起码的诉求。中国山西、内蒙、宁夏、新疆和陕北老区的煤炭资源丰富,但资源、区位、人才、运输等自然条件比较差,经济发展一直比较落后,这些年所取得的发展进步主要依赖当地煤炭资源开发,如果舍弃煤炭产业,这些地区的经济社会发展将面临停滞甚至倒退,必然造成新的区域发展不平衡,直接威胁到这些地区的经济增长和社会稳定。内蒙古自治区鄂尔多斯市和陕西榆林地区近几年的发展就是鲜活的例证。

## 2 中国现行煤炭消费存在的核心问题

### 2.1 煤炭消费方式与现状

中国煤炭开采和使用的历史非常悠久,但有史以来,中国煤炭的使用方式变化不大,一直是直接燃烧、敞开排放为主并延续至今。过去由于消费总量少,依靠大气生态环境的自净修复能

力,没有造成大的环境问题。但是近十年来,随着煤炭消费总量快速增加,煤炭燃烧的烟气排放净化和治理措施没有跟上,排放总量超过了环境容纳和自净修复能力,形成了部分高强度煤炭消费区域的大气污染,引起了社会关注。

2015年中国原煤消费总量约38.5亿t,从四大行业消费看,发电用煤18.39亿t、炼焦用煤6.27亿t、煤化工原料用煤2.53亿t。全部工业锅炉、窑炉耗煤预计7.5亿t,生活民用散煤1.6亿t。

各种使用方式所产生的污染和治理控制水平并不一样。发电用煤占比大,但消费集中、污染物控制和减排力度大、治理水平高;现代煤化工起点高、装备齐全、工艺要求高,其大气污染物较好控制;炼焦和建材行业也进步到园区化、集中大工业化生产,燃煤污染物控制也在逐步向好;目前主要是大量分散的工业锅炉和民用燃煤污染控制难操作、难监管,是未来燃煤污染物控制和清洁化治理的重点。

### 2.2 煤炭直接燃烧产生的污染物情况

煤炭是一种因古代植物遗骸经过亿万年的深埋、炭化逐渐形成的一种固体可燃能源矿产,先天性品质不均匀,各种有害矿物(如硫、砷、汞、氟等)浸入

其中,以及大量不可燃的其他矿物混入(统称矸石或灰分),形成混合共生体矿产。所以原煤从地下被开采出来后燃烧使用,除生成物CO<sub>2</sub>外,还会产生大量的烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等大气污染物,原煤如果不经过洗选(纯化)就直接燃烧会加大污染物的产生比例;如果不对其燃烧排放的烟气进行有效治理和净化,直接排入大气中必然引起大气污染。

根据中国商品煤质量情况测算,每完全燃烧1t标煤的商品煤,大约生成约2.46t CO<sub>2</sub>,产生约200~300kg灰渣、100~150kg水蒸气、12~15kg的SO<sub>2</sub>、50~70kg粉尘、16~20kg的NO<sub>x</sub>和其他微量气态产物。中国商品煤中汞、氟含量极少,只有少数矿区的少数煤层含量偏高一些。煤炭直接燃烧产生如此多的产物,基本上对大气和生态环境有害无益,如果不进行高效净化治理,必然造成大气污染。

### 2.3 中国煤炭消费区域和时段过度集中,局部燃煤污染严重

一个地区一旦煤炭消费数量过多、强度过大、过于集中,就会超过环境容纳和自净能力,形成大气污染。

以2013年中国煤炭消费最高年份统计分析(表1),中国华东7省区煤炭

表1 2013年中国重点省区区域煤炭消费情况

区域	煤炭消费总量/ 万t	人均消费量/t	国土面积平均 煤炭消费量/(t·km <sup>-2</sup> )	人口占比/%	国土面积占比/%	煤炭消费 总量占比/%
京津冀	38961	3.57	1811.19	8.08	2.57	9.01
东北3省	41814	3.81	529.09	8.12	9.43	9.67
东部7省	126322	2.74	1562.73	34.04	9.65	29.23
上海	5681	2.35	8959.86	1.79	0.08	1.31
江苏	27946	3.52	2723.78	5.87	1.22	6.47
浙江	14161	2.58	1391.06	4.06	1.21	3.28
安徽	15665	2.60	1122.13	4.46	1.67	3.62
福建	8079	2.14	665.49	2.79	1.45	1.87
山东	37683	3.87	2400.19	7.20	1.87	8.72
广东	17107	1.61	952.51	7.87	2.14	3.96
西部7省区	120155	7.52	270.72	11.81	52.96	27.80
山西	36637	10.09	2348.53	2.69	1.86	8.48
陕西	17248	4.58	838.10	2.78	2.46	3.99
宁夏	8534	13.05	1647.49	0.48	0.62	1.97
中部六省	68842	2.02	655.64	25.23	12.53	15.93
河南	25058	2.66	1500.48	6.96	1.99	5.80
重庆	5794	1.95	703.16	2.20	0.98	1.34
云贵川	35113	2.15	336.52	12.05	12.45	8.12
贵州	13651	3.90	775.63	2.59	2.10	3.16
全国合计	432216	3.20	515.74	100.00	100.00	100.00

消费总量过大,其国土面积仅 80.8 万  $\text{km}^2$ ,仅占全国陆地面积的 9.65%,但煤炭消费占 29.23%。特别是上海市每平方公里国土面积消费煤炭达到 8960 t,天津市达到 4670 t;江苏省超过全国平均值的 5 倍,山东省超过 4 倍,京津冀地区平均超过 3 倍,特别是河北省人口只占全国人口总数的 5.42%,国土面积占全国的 2.23%,但该区域煤炭消费量占全国煤炭消费总量的 7.33%。煤炭消费过度集中并长期居高不下,并与油气集中消费和其他高排放产业叠加在一起,形成高污染区域,与近几年“雾霾”反复出现的区域基本重合。

此外,中国黄河及以北地区冬季取暖基本全部依赖煤炭,冬季取暖范围还有向南方扩展之势。每年取暖期用煤超过 3 亿 t,集中在取暖期 5 个月,煤炭消费强度叠加更为严重,也是“雾霾”反复频繁出现的时段。

#### 2.4 煤炭消费污染治理的成本情况

1) 煤炭直接燃烧生成的污染物主要有上述几种,其中大颗粒灰渣数量最大,但它是固体物质,其影响主要是占压土地和局部的景观污染,不会大范围扩散,而且灰渣已经开展资源化综合利用,生产利废建材(如制砖、水泥掺混材、保温材料等)、提取有益矿物(氧化铝、锆、镓等)等已产业化,不少地区已做到电厂灰渣吃干榨净,不存在过多的成本负担。

2) 采用燃煤超低排放发电技术,

烟尘的除尘效率已达 99.8%~99.9%,接近“零”排放;烟气  $\text{SO}_2$  脱硫效率达 95% 以上、 $\text{NO}_x$  脱除效率达 70%~80%, $\text{SO}_3$  排放浓度可  $\leq 5 \text{ mg/Nm}^3$ 、汞及其化合物可以降低到  $3 \mu\text{g}$  以下。目前全国已经改造成投产的超低排放发电机组超过 1 亿 kW,大量工程实践已经验证,实现燃煤超低排放发电,包括电厂污水“零排放”,所增加的发电成本不过 2~3 分人民币/(kW·h),新增成本不足 10%,而大气污染物排放的清洁化程度不亚于天然气发电的清洁化程度( $\text{CO}_2$  除外)(图 3)。

3) 中国现代煤化工技术在全球独树一帜。由于煤炭是作为煤化工的原料,其中的硫全部回收利用并作为无机化工原料销售,其他大气污染物因为化工工艺的需要也已经完全净化回收和无害化处置,煤化工的动力岛部分也可以完全采用超低排放方式,技术上不存在困难。目前反映强烈的主要是煤化工污废水问题,但是现在已经有示范工程做到“零排放”或“近零排放”。作为如此巨大体量的工程而且全是世界首台(套),既有设计经验不足、考虑不周全的原因,也限于投资,因陋就简、污水治理设施不匹配的原因;也有监管不到位,没有完全按照环保“三同时”的要求同步设计、同步施工、同步投产的原因;还有少数急功近利、片面追求经济效益、不负责任偷排乱排的原因,给现代煤化工行业抹了黑。其实达到“污废

水零排放”的工艺技术很多,所增加的投资和运行成本完全可以承受和消化。

4) 中小型燃煤工业锅炉和窑炉由于单炉容量小、使用地点分散,又多是经济效益不高、产品附加值偏低的中小型用户,监督管理工作量巨大,承受力有限。由于监管不严,以致成片成灾,成了顽疾。实际上中国已经有不少高效高清洁化燃煤锅炉,如水煤浆锅炉、中小型煤粉型工业锅炉,再配套高效净化装置,完全能达到清洁化排放水平,进行改造和运行所增加的成本折算成电功率也仅增加 0.1~0.12 元/(kW·h),完全在可承受的范围,而运行操作的便捷性和治理后的大气污染物排放水平接近于天然气。

两相比较,煤炭清洁化治理成本比硬性改为天然气便宜得多,就因为监管不到位、违规超排处罚力度不足、违法违规成本过低,使这些煤炭清洁化技术长期得不到有力的推广采用,降低了技术进步的动力和速度。

#### 2.5 煤炭高碳排放与低碳发展的矛盾

$\text{CO}_2$  不是法定大气污染物,除了浓度过高会造成窒息外对人体无害,也与“雾霾”的形成没有关系。燃煤生成的  $\text{CO}_2$ ,只是具有“温室效应”作用的一种气体。经过大量的科学研究证明, $\text{CO}_2$  是温室效应作用最小的“温室”气体。“温室效应”是一个极其缓慢的过程,构成“温室效应”的气体种类很多。大气生物圈中的  $\text{CO}_2$  含量变化对“温室效应”的贡献份额究竟有多大,科学界争议很大;而且即使真的因为“温室效应”导致地球表面大气气温有限升高,会上升到什么程度,会造成多大的损害,人类能否承受,都还没有令人信服的结论,目前都是处于“宁可信其有”的阶段。

地球大气圈对碳排放容纳能力极大。在地球生物圈内, $\text{CO}_2$  是普遍存在并离不开的一种物质,但含量只有 0.03%,底层表面大气中  $\text{CO}_2$  含量只有  $2.8 \times 10^{-4}$  左右,而且本身在不断碳循环之中,植被、土壤、海洋、水体、湿地、微生物在不断吸收  $\text{CO}_2$ ,植物需要通过光合作用不断吸收固碳生长,人们的食物、所使用的大量工程材料中都含有大



图3 山西国金电力公司 2×350 MW 低热值煤超临界循环流化床锅炉热电厂超洁净排放现场实景

量的碳。生物圈本身需要大气中保持一定浓度的CO<sub>2</sub>,以维持植物和土壤的碳平衡。试想如果地球大气圈CO<sub>2</sub>浓度下降,或许温室效应减轻了,但是因为碳不平衡,可能植被和农作物生长缓慢、矮化、减产,直接危及生态环境和粮食保障,可能带来的问题比目前已知的“温室效应”的危害要严重得多,这都还是未解之谜。

而2013年中国人均的CO<sub>2</sub>排放总量不足100亿t,人均7.2t,和欧盟国家的人均排放水平基本持平,仅为美国人均碳排放16.5t的43.6%。

煤中的固定碳含量一般在60%~70%,其高碳性与生俱来不可改变,它的燃烧生成物是CO<sub>2</sub>,但中国的优势能源资源又恰恰是煤炭,成为中国能源资源经济发展和能源需求保障的制约因素,所以西方在当下提出低碳发展的新观点,并以此为由向中国施压,不得不让人质疑其中有“圈套”之嫌。但是不管是否有“圈套”,人类进步到已经认识到CO<sub>2</sub>确实对地球大气圈有“温室效应”的影响,必须正视并加以控制。作为一个负责任的发展中世界大国,无论如何,都应该适度有序控制碳排放。

减少碳排放有很多可选项。调整能源消费品种结构,提高非碳和低碳能源消费比例,减少高碳能源的消费只是一种选择;发展森林植被碳汇等碳中和措施“抵销碳排放量”更是一种简便有效的选择;发展碳固化和碳循环利用以减少向大气环境排放也是一种选择;提高应对“温室效应”负面影响的能力也是一种选择。不应听信对温室效应负面作用的超前过度渲染,偏听那些过度夸大碳排放危害的言论,必须理性研究分析CO<sub>2</sub>导致“温室效应”的程度和产生“温室效应”的后果,明智应对碳排放问题,不应因此而过度影响当前中国的能源政策走向和经济发展。

中国石油对外依存度已超过60%、天然气对外依存度已超过32%,继续靠高价、远距离进口油气调节能源消费结构会过度降低中国的产品价格竞争力和增加人民的生活成本负担。就中国的国情和经济社会长远发展而言,发展

“碳循环利用抵销碳排放”的选择更具有积极战略意义,必须依靠科技创新,尽快加大碳减排、碳抵销、碳循环利用的科技攻关力度,这对中国而言是一项独特的历史任务。

### 3 扬长避短,发展中国煤炭清洁高效利用成效显著

#### 3.1 煤炭清洁高效安全生产进步巨大

就生产侧而言,煤炭作为固体矿产,开采过程中对生态环境的影响包括土地沉陷损坏、地表及地下水系改变、矸石(含洗矸、煤泥)固废堆存、矿井水排放、通风瓦斯排放等几个方面,其中选煤废水已经实现零排放,矿区生活污水已经全部进行处理并达标排放,不做讨论。煤矿开采对生态环境的污染主要是矿井局部的影响,没有区域性、流域性的污染,而且煤矿基本没有有毒有害物质的产生和排放。

煤炭开采引起的土地沉陷损坏和“三废”排放难以避免。为了减少沉陷,煤炭企业大量采用“三下开采”技术,充填开采技术,旋喷注浆减沉技术,地表立体生态修复技术,矸石山、露天排土场植被复垦技术及沉陷土地二次功能性恢复开发技术,基本实现将煤矿开采引起的土地损坏降低到最小程度。此外,把过去单纯的环保末端治理前移,大量开展煤矸石、矿井水、煤矿瓦斯、共生资源和沉陷土地的综合利用,洗矸、煤泥的资源化再利用等。截止2015年,中国原煤入选率达到65.9%,入选总量超过24.7亿t,选煤废水零排放已经普遍实现;当年排放的煤矸石(含洗矸、煤泥)的利用率达到64.2%、煤矸石综合利用电厂装机达到3500多万kW、矸石砖产量超过150块标砖、煤矸石粉煤灰水泥超过5000万t;矿井水利用率达到67.5%,矿井水除净化自用外,一些大水矿区矿井水已经开始净化饮用并接入市政供水管网;矿井瓦斯抽采利用率达到46.4%、高浓度瓦斯民用和发电、中低浓度瓦斯发电、超低浓度乏风瓦斯销毁大量开展;当年沉陷土地复垦利用率达到48%;共生矿产资源产业化利用规模不断扩大。“采煤不见

煤、挖煤不烧煤、沉陷不废弃”的花园式煤矿不断出现,全国有上百处大型现代化煤矿已经实现清洁生产。

中国的煤炭开采技术,已经基本做到了清洁化、高效化、安全化,正在向远程遥控和无人化开采方向发展,未来中国煤炭开采的效率只能是越来越高、安全越来越有保障、清洁化程度也越来越好,而直接生产成本基本稳定,不会出现刚性大幅度上涨,完全可以保证中国经济社会发展对能源的各种需求。

#### 3.2 煤炭消费侧清洁高效利用成果辉煌

煤炭消费侧是引起燃煤污染的核心领域,近几年随着中国大气污染防治力度的加大,各种煤炭终端用户都开展了大量燃煤清洁化的工作,技术和装备进步很大,成效十分显著。

1) 燃煤超低排放,发电规模不断扩大。

所谓的燃煤超低排放发电是指传统燃煤电厂通过节能环保升级改造,其法定大气污染物的排放达到或优于国家规定的“天然气发电”大气污染物排放限值标准。

在神华集团国华电力公司和浙江能源集团商业化示范成功的基础上,燃煤超低排放发电已经大范围推广采用,并且已经形成国家政策,要求到2020年中国所有燃煤电厂全部实现超低排放。在此基础上,山西国金电力公司文水金地低热值煤电厂更上一层楼,除达到上述超低排放标准外,更实现二氧化硫≤5 mg/Nm<sup>3</sup>、汞及其化合物≤3 μg/Nm<sup>3</sup>、电厂灰渣100%利用和废水“零排放”,其发电成本较传统燃煤电厂的发电成本增加2~3分人民币/(kW·h),使中国燃煤发电的清洁化程度进一步达到高清洁化水平(表2)。

中国发电用煤占煤炭消费总量的50%以上,如果按计划到2020年全部实现超低排放发电,这一措施将解决中国50%以上煤炭的清洁高效利用问题。

2) 传统煤化工绿色升级清洁化治理工作已经取得成效。

传统煤化工特指炼焦、电石、煤制合成氨(尿素)和固定床气化联产甲醇4个产业,现代煤化工产业中大量以甲

表2 新型大型燃煤发电机组超低排放标准(GB 13223—2011)

污染物/ 排放限值	烟尘/ ( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	二氧化硫/ ( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	氮氧化物/ ( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	三氧化硫/ ( $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )	汞及化合物/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )
燃煤锅炉排放 限值国家标准	30	100(新建) 200(现有)	100	—	30
燃煤锅炉重点 地区排放限值 国家标准	20	50	100	—	30
天然气发电排放 限值国家标准	5	35	50	—	—
新型燃煤电厂 超低排放实际值	<5(0.23)	<35(2.76)	<50(17)	<5(3.6)	<3(0.82)

注:表中()内数字为部分超低排放电厂已经实现的最低值。

醇为中间原料平台,本文将煤制甲醇归类于现代煤化工领域中一并说明。

(1) 中国炼焦产能约6.5亿t,年产焦炭4.5亿t左右。过去污染大、能耗高、焦炭质量差的土法炼焦和小机焦已经全部淘汰,现有焦炉均改造提高为大型机械化焦炉,并大量采用干熄焦工艺和焦化副产品的深加工综合利用,使中国炼焦产业完全改变了过去的落后面貌。焦炉煤气生产合成氨、甲醇、分离提氢、提取天然气并网和生产液化气(LNG)都已普遍实施;焦油深加工和加氢精制各种精细化学品已成为新兴产业,目前还在进一步发展炼焦行业VOCs和消味治理,焦化产业绿色升级已经成为共识,相关技术已经成熟,期待不久的将来传统煤焦化产业绿色化、清洁高效化和“三废零排放”将全面实现。

(2) 中国煤制合成氨产能5700多万t。传统煤制合成氨(小化肥)限于当时气化炉技术和装备水平,污染较大、能耗较高、含酚废水治理困难,一度成为污染的“重灾户”。随着现代煤化工技术的发展,大型粉煤高温气化技术不断涌现并得到快速推广应用,大型粉煤高温气化炉替代过去原有的固定床气化炉,已经成为化肥行业的发展趋势,将彻底解决块煤固定床中温气化工工艺焦油和酚水难处理的问题,使中国传统的煤制合成氨产业迎来绿色、清洁生产的新时代。

(3) 中国电石产能4000余万t,

2015年产量2400多万t,主要以煤为碳源,目前电石炉尾气综合利用工作也在普遍开展,清洁化水平不断提高。

3) 现代煤化工煤炭清洁高效转化发展迅速,进展喜人。

现代煤化工以大型高温气化技术为标志。中国经过10余年的示范建设,已经实现煤制油、煤制气、煤制烯烃、煤制芳烃、煤制乙二醇、大型煤制甲醇二甲醚和大型煤制甲醇制汽油的产业化。截止目前,中国已经建成各种煤制油总产能743万t/年,其中直接制油108万t,间接制油150万t,煤油共炼45万t,煤经甲醇制汽油60万t,焦油加氢制油380万t。煤制气31亿 $\text{m}^3$ /年、煤制烯烃474万t/年、煤制乙二醇160万t/年,百万t级煤制芳烃示范工程和百万t级低阶煤分质分级利用示范工程正在建设中。此外,煤制甲醇蛋白、煤制醋酸酐以及甲醇、烯烃、油品深加工精细化、高端化、差异化也在快速发展。

现代煤化工所需的大型关键工艺、技术和装备逐步国产化,不少工艺技术拥有自主知识产权。包括大型气化炉、大型空分、变换、分离净化、脱硫、合成、催化剂、煤化工污水处理和循环利用等都取得很大进步,使中国现代煤化工技术处于世界领先地位。目前示范项目已经证明以煤为原料,可以生产出大多数油气化工产品、清洁油品和天然气,而且部分煤基化学品的品质和成本还比较有优势,为中国化工原料多元化和煤炭的清洁高效利用开辟了广阔前景。

通过现代煤化工转化,不单是实现煤炭产品的多元化,提高经济价值和应对煤炭市场波动风险的能力,也使中国的油品国家能源安全保障得到极大的提高。通过现代煤化工转化,使煤炭得到清洁高效利用,传统直接燃煤的含硫和高挥发分逃逸等问题得到了很好的解决,煤中的硫分全部得到回收并作为硫资源产品。此外现代煤化工所采用的煤源从一开始的优质煤发展到褐煤、高硫煤煤化工,大大拓展了这些低品质煤资源的清洁高效利用。

4) 锅炉窑炉用煤清洁化技术已经得到解决。

根据有关资料,中国各种中小型燃煤工业锅炉保有量从最高时期的约55.3万台下降到目前约47万台,各种窑炉约13万台,年耗煤约7.5亿t。长期以来,由于中小型燃煤工业锅炉生产和使用门槛较低,单炉容量小,生产和使用随意,导致中国中小型工业锅炉技术进步不受重视、研发投入少,无论是主机还是辅机技术进步都很缓慢。锅炉效率低、污染物控制设施简陋,甚至大量小吨位锅炉没有排烟净化设施,长期直排大气中,少有的除尘设施效率低下,脱硫、脱硝设施几乎为空白。

中国中小型燃煤工业锅炉长期采用层燃型链条炉,由于技术落后、燃用煤质差、燃烧效率低、运行管理不规范、运行负荷不稳定、维护保养不及时、工况监测控制不齐全,而且大量供热锅炉因季节性因素负荷变化较大,实际燃烧效率、锅炉热效率平均比国际先进水平低15%~20%,导致目前烟尘排放超过全国排放总量的40%,二氧化硫排放量占全国排放总量的35%以上,成为严重的大气污染物排放源,是当前中国大气污染治理的首要问题。

中国近几年研发成功并快速推广应用的中小型煤粉工业锅炉,一改传统长期沿用的链条炉排式层燃老旧炉型,给中小型燃煤工业锅炉带来了质的飞跃。通过统一制粉、统一配送、密闭运输和储存、喷粉燃烧和锅炉自动控制无人值守、完善的烟气净化控制配套,实现了燃煤工业锅炉的高效清洁化。

新型煤粉型工业锅炉系统燃烧效率达到98%以上,热效率达到90%以上,与传统的链条炉排锅炉相比较,其平均效率由65%提高至90%以上,综合节煤率超过30%;粉尘减少90%以上、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>减少70%~80%,是中国中小型燃煤工业锅炉的理想换代设备。粗略估算,如果47万台中小型燃煤工业锅炉全部更换为新型锅炉,每年可减排二氧化碳约5亿t、二氧化硫约300万t、粉尘约30万t、废渣约3000万t,可节约燃煤1.5亿t以上,完全可以解决目前存在的工业锅炉能效低和大气污染严重问题。

对窑炉的燃煤污染治理相对复杂。目前大量发展的烟气净化一体化设备,较好地解决了窑炉烟气污染问题。对与物料混合燃烧型用户(石灰、水泥、砖瓦)只能采用烟气高效净化方式;对玻璃、陶瓷、轧钢加热一类的窑炉用户,治理方式众多,既有对烟气总排放口进行直接净化,有条件的也有改烧天然气,也有大量通过建设产业园区将用户集中,由产业园区集中进行煤制气,集中供应、集中净化加以治理,效果显著。

5) 民用散煤污染治理正在积极推进,洁净型煤、消烟兰炭、生物质成型等清洁燃料逐步普及,新型炉具灶具不断出现,以液化气、太阳能、电能、生物质气代煤工作在大力发展。

中国城乡居民散煤消费总量1.6亿t左右,虽然占比很小,但是炉灶低端原始、烟气低空直排、不具备治理净化条件,而且用户数量庞大、单户用量小,使用非常分散,经济承受力较差,监督管理十分困难,是中国煤炭清洁高效利用最难啃的一块硬骨头,需要因地制宜、多策多方式并举。

随着中国东部省区民用散煤治理力度加大,政府财政补贴的支持,近2年来,民用散煤清洁化治理逐步得到重视,新型节能减排炉灶、固硫洁净型煤、消烟型兰炭、优质无烟煤、生物质成型燃料等正在推广使用,特别是河北、山东等省区进展较大。具备条件的地区大力推广小风电、太阳能、液化气、电力、生物质气(沼气)等清洁优质可再生

能源代煤工作。

目前中国沼气用户4200多万,各类沼气工程10万余处,年产沼气158亿m<sup>3</sup>以上,替代2500多万t标煤,减排CO<sub>2</sub>达6000多万t,洁净型煤(含兰炭)产销量3000余万t。“煤改电”、“煤改气”工作在大力发展。中国民用散煤治理的根本出路是实施清洁能源品种替代。

#### 4 适应煤炭供给侧结构性改革的清洁高效利用发展思路

中国经济发展进入“新常态”。随着产业转型、结构调整的逐步推进,生态环境保护和污染治理标准逐步提高,能源供应品种多元化的发展、能源消费方式的变革,都将促使中国煤炭直接消费快速接近“峰值”,煤炭产能过剩的局面或将经常反复出现,倒逼煤炭供给侧结构性改革加速发展,“做好存量、提高质量、增加品种、增加清洁性、减少碳输出”,将是煤炭、煤电、煤化工行业未来发展的主旋律。煤炭的“高碳”秉性不可更改,集约化生产、集中使用、集中转化、集中治理是未来煤炭清洁高效利用的主要方向。

目前,中国煤炭清洁高效利用的技术路线和途径已经明确,并为大量推广应用所验证,只要认真实施,不要假打,从技术层面就已经基本能够解决煤炭消费的污染问题。但是,科学追求无止境,随着技术的不断进步,还会出现更高效、更清洁的煤炭消费利用方式和途径,未来中国煤炭清洁高效利用继续发展的方向主要有如下几个方面。

1) 继续开展超洁净排放燃煤发电技术的研发和推广应用。

发电是中国未来煤炭消费的最主要方向,未来电煤占比可能提高到80%以上,所以燃煤超洁净发电是未来首选的发展方向。目前推广的超低排放发电技术,粉尘和污水已经趋于“零排放”,未来要力争SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、汞及其化合物和其他有害污染物也趋于“零排放”,实现法定污染物完全“零排放”的超洁净燃煤发电,彻底解决燃煤发电的大气、水污染问题。

2) 加大富氧和纯氧燃煤发电技术

的研发。

为了消除NO<sub>x</sub>产生和减轻烟气净化负担,提高发电能效,为碳捕捉创造条件,随着大型空分技术和装备的不断进步,高富氧或纯氧燃煤发电技术已经具备基础条件,需要加大新型锅炉及材料等的研究开发。

3) 继续有序推进现代煤化工清洁高效转化的发展。

现代煤化工技术是对煤炭进行彻底清洁化的又一好办法。通过现代煤化工技术,传统认为的煤中有毒有害杂质都可以得到很好地资源化利用,同时煤炭被化工转化为各种高品质、优质能源品种和化工原材料产品,实现了产品多元化和经济价值的大幅度提高,既弥补了市场紧缺油气产品,又使煤炭得到充分、清洁化、高质高效利用。现代煤化工排放的是高浓度CO<sub>2</sub>,节省了碳捕捉环节,使碳循环利用和碳无害化封存等减碳行动成本大大降低。

中国现代煤化工技术虽然进展很快,但成长时间还很短,前期首台(套)示范项目暴露的问题还需要尽快解决和完善提高,煤化工能效提高、水耗降低、污染物尤其是污水减排等还有大量的工作要做,需要进一步加大科技攻关力度,早日为中国煤炭清洁高效利用闯出一条全新的更加完美的道路。

4) 抓紧开展CO<sub>2</sub>高效低成本分离捕捉、固化和循环利用技术研究。

对以煤炭作为优势能源矿产和主要能源的国家,开展CO<sub>2</sub>增量的消减工作是一项长期的任务。虽然目前人类还没有寻找到经济可行、一劳永逸的碳封存技术方向和碳循环使用途径,但是无论未来CO<sub>2</sub>如何循环利用或碳封存,CO<sub>2</sub>捕捉都是前置环节,无论是改变使用方式(纯氧燃烧)或对现有空气助燃方式的分离提纯,都是必须抓紧开展攻关研究的内容。

煤炭本身源于古代植物,是很好的碳固化方式,今天人类把煤炭开采出来并加以利用,是把已经固化的碳再次释放到大气环境中,必然产生碳增量和冗余,需要加大力度开展碳固化技术的研发攻关,以实现碳平衡。其中大兴植树

造林是很好的天然碳固化(碳汇)措施,还有利于生态改善。碳埋藏也是未来发展的一个方向,当然最好方式是直接进行碳的循环利用,既有经济效益也有生态环境效益,但是由于利用总量有限,需要拓展新的利用领域。矿化发电、化工转化、微藻制油、植被碳浓相促生长等都是已经出现的新方向,只要坚持不懈,依靠科技创新,人类一定能找到可承受的碳固化途径,彻底解决碳排放冗余加重“温室效应”的隐忧。

## 5 结论

能源是人类社会赖以生存和发展的基础条件。随着经济社会的不断发展,还需要大量的能源,预计中国能源需求的“峰值”在60亿t标煤左右。通过提高能效和产业结构转型可以减缓能源消费强度和增速,但毕竟是有限度的,而且不宜以降低人类生活舒适水平为代价,生产和生活对能源的需求是刚性需求,必须得到保障。

在目前所能获得的所有能源品种

中,无论是传统的化石能源还是现有的清洁能源和可再生能源,都存在各自的问题,大规模的太阳能光伏发电和风力发电,效率低、占地大、投资巨大、稳定性差,将给中国土地、生态带来严重的负担和损害,并不只是碳排放少就一好百好。化石能源的资源保障能力和经济性、可控性、稳定性无疑最高,化石能源的其他污染物治理从技术层面已经基本可以做到“近零排放”。

CO<sub>2</sub>并不是人类的大敌。地球大气生物圈的CO<sub>2</sub>处于动态平衡的过程中,只有打破平衡的那部分增量才需要额外的控制。“温室效应”是一个极其缓慢的过程,其真实的不利效应可能要数十年或者上百年以后才会有所显现,相信人类未来的智慧完全有能力应对“温室效应”危害问题,这不是“急之火燎、立竿见影”的事。

煤炭是中国优势资源,储量最丰富、性价比最高、生产能力最大、可以实现清洁高效利用,这已毋庸置疑,不可轻言放弃,徒增大量的能源消费成本,

降低国家能源安全保障能力,削弱中国产品的价格优势和竞争力。在中国人均碳排放还很低的情况下,煤炭消费所产生的碳排放增量部分,可以通过提高能效以减少消费,通过碳中和、碳置换、碳循环利用等综合措施加以抵消。

煤炭工业为了自身的稳定和可持续发展,必须强力介入煤炭消费侧的清洁高效利用工作,逐步将单一的煤炭开采企业转变为“优质商品煤+高品质油气+精细化学品+清洁电力+廉价热力+利废建材”为一体的现代清洁能源综合体。否则由于消费侧的不清洁、不科学的煤炭消费利用方式引起的污染而总会让煤炭生产企业“背黑锅”,制约煤炭行业的可持续发展。对煤炭“妖魔化”,故意夸大其词、牵强附会、以讹传讹,不切实际、不科学、不理智的宣传误导,会害民误国。脚踏实地认真做好煤炭清洁高效利用这篇大文章,才是切合中国国情的明智选择。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Special Report on climate change and oceans and the cryosphere (SROCC)[EB/OL]. [2016-8-25]. <http://www.ipcc.ch>.
- [2] 全球碳计划(Global Carbon Project)公布2013年全球碳排放量数据[EB/OL]. (2014-09-23)[2016-08-30]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-3258-1.html>.
- [3] 煤炭科学研究总院节能工程技术研究分院. 煤粉工业锅炉研制总结报告[R]. 2003.
- [4] 燃煤超低排放发电和煤电一体化发展现场会报告集[C]. 浙江舟山, 2015.
- [5] 山西国金电力公司. 2×350MW 低热值煤CFB锅炉超洁净排放竣工验收报告[R]. 2016.
- [6] 复旦大学能源研究中心. 能源流向与碳排放因子数据库[EB/OL]. [2016-08-30]. <http://dvn.fudan.edu.cn/dvn/dv/FDED>.
- [7] 中国石油集团经济技术研究院. 2015年国内外油气行业发展报告[R]. 2016.
- [8] 国土资源部. 中国矿产资源报告(2015)[EB/OL]. (2015-12-04)[2016-08-30]. <http://www.in-en.com/finance/html/energy-2233046.shtml>.

# Practice and Prospect of clean and high efficient utilization of coal in China

ZHANG Shaoqiang

China Coal Processing and Utilization Association, Beijing 100713, China

**Abstract** The paper specifies coal is a kind of ascendant energy mineral resource in China, very important for the national economic and human life improvement. The problems of fire coal pollution have been addressed in multiple ways of cleaning and highly efficient utilization with scientific and economic feasibility. There are many wise options to reduce CO<sub>2</sub> emission. Complete abandonment of coal is an unadvisable thought. Moreover, we put forward main development directions of clean coal utilization that need pay close attention to carry out in future China.

**Keywords** clean and efficient utilization of coal; ultra-low emission; carbon cycle; dominant energy minerals

(编辑 王志敏)