

中国能源消费结构与风电/煤制天然气耦合经济性分析

余波^{1,2}, 曹晨^{1,2}, 顾为东²

(1. 南京大学工程管理学院, 南京 210093; 2. 江苏省宏观经济研究院, 南京 210013)

[摘要] 本文以年产 1×10^9 m³煤制天然气工艺为例, 采用Shell干粉气化技术, 比较了传统煤制天然气工艺和风电/煤制天然气耦合情况下, 工艺过程中(从煤气化到水煤气变换)的设备投资、运行费用以及CO₂排放特性, 结果表明, 尽管风电电解水系统完全取代空分系统和水煤气变换系统设备投资巨大, 但是其年平均运行费用(设备折旧、原料、电耗)却最低, CO₂排放量为传统煤制天然气工艺的1.3%, 为煤制天然气产业发展提供一个参考。

[关键词] 能源消费; 煤制天然气; 非并网风电; 经济性分析; CO₂排放

[中图分类号] TK01 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)03-0100-07

1 前言

1.1 我国面临的能源环境问题

能源不仅关乎国民经济命脉, 还与生活环境, 国际安全等问题紧密相关。去年我国多地笼罩在雾霾之中, 环保部发布的公报显示: 2013年, 首批74个实施新空气质量标准监测城市中仅3个城市达标。北京等华北地区雾霾尤为严重, 雾霾已经危害到人类生命健康。另外, CO₂、SO_x、NO_x以及重金属污染物排放都对环境造成巨大破坏。根据《BP世界能源统计年鉴2014》, 2013年中国CO₂排放量为 9.5243×10^9 t, 比2012年增加4.2%, 占世界CO₂排放量的27.1%。根据《2012年环境统计年报》, 2012年, 全国氮氧化物排放量 2.3378×10^7 t, 全国CO₂排放量 2.1176×10^7 t, 全国烟(粉)尘排放量 1.2343×10^7 t。其中电力、热力生产和供应业的氮氧化物排放量和SO₂排放量占绝大部分。

1.2 我国能源消费现状

根据《BP世界能源统计2013》(见表1), 不难看出

出与欧美发达地区相比, 中国能源消费极其不合理, 煤炭占一次能源消费比例过重, 这与中国能源分布富煤贫油少气特点紧密相关。2013年我国能源消费总量 3.75×10^9 t标准煤, 其中煤炭消费总量 2.475×10^9 t标准煤, 石油消费总量 6.9×10^8 t标准煤, 天然气(NG)消费总量 2.18×10^8 t标准煤, 水电、核电、风电消费总量 3.68×10^8 t标准煤。

表1 能源消费比例

Table 1 Energy consumption ratio

	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生能源
世界平均	32.9	23.7	30.1	4.4	6.7	2.2
美国	36.7	29.6	20.1	8.3	2.7	2.6
欧洲平均	30.0	32.8	17.4	9.0	6.9	3.9
中国	17.8	5.1	67.5	0.9	7.2	1.5

[收稿日期] 2014-12-08

[作者简介] 余波, 1984年出生, 男, 江苏睢宁县人, 博士后, 主要研究方向为风煤多能源系统; E-mail: yubo@zjzw.net

在我国煤炭消费中,约有50%用于燃煤电站,国家对电站锅炉监管非常严格,根据中国电力企业联合会的统计,2013年当年投运火电厂烟气脱硫机组容量约 3.6×10^7 kW;截至2013年底,已投运火电厂烟气脱硫机组容量约 7.2×10^8 kW,占全国现役燃煤机组容量的91.6%。2013年当年投运火电厂烟气脱硝机组容量约 2×10^8 kW;截至2013年年底,已投运火电厂烟气脱硝机组容量约 4.3×10^8 kW,占全国现役火电机组容量的50%。截至2013年年底,火电厂袋式除尘器、电袋复合式除尘器装机容量超过 1.6×10^8 kW,占全国燃煤机组容量的20%以上;其中,袋式除尘器容量约 7×10^7 kW,占全国燃煤机组容量的9%;电袋复合式除尘器机组容量超过 9×10^7 kW,占全国燃煤机组容量的11.5%以上。由于环境污染及雾霾问题的出现,国家进一步对火电厂污染物排放进行严格管制。就我国目前的煤电发展水平来说,无论是从火电运行效率还是污染物排放情况来看,都已处于国际领先水平。

考虑到工业燃煤锅炉对环境的巨大影响,煤改气工程在国内稳步推进,根据《2013年中国环境状况公报》,2013年全国各地煤改气工程新增用气量 2.6×10^9 m³,替代原煤 4.9×10^6 t,减少SO₂排放量 3.9×10^4 t。尽管如此,2013年我国天然气消费量占能源消费总量的比例仍然只有5.1%,远低于国际平均水平。

我国目前至未来几十年以煤炭为主的能源消费方式不会有太大改变,这与我国能源资源国情紧密相关。我国石油、天然气储量较少,每年生产量也较小,2013年原油对外依存度已达到57.39%,非常接近61%的红线,2013年天然气对外依存度也超过30%。根据《BP 2030世界能源展望》估算,2030年中国每日消费460亿立方英尺天然气,约为 4.754×10^{13} m³/a。为了应付国内外能源、安全局势,避免局部地区冲突造成的能源供应紧张局面,我国采取了多地域多通道能源进口的战略。2014年5月21日,中俄政府和能源公司在上海分别签署《中俄东线天然气合作项目备忘录》和《中俄东线供气购销合同》。双方商定从2018年起,俄方通过修建东

线管道每年向中方供应不少于 3.8×10^{10} m³天然气,历时30年,供应协议总价值4000亿美元。

1.3 新能源与传统能源结合

煤炭现在乃至将来50年时间都是我国最主要的能源资源,煤炭的清洁化利用是摆在我国未来发展的首要任务。解决我国洁净能源供给紧张矛盾的方法,除了加强对石油、天然气资源的勘探,增加石油、天然气的进口渠道外,开展煤制油、煤制天然气(SNG)技术等洁净煤技术也是解决我国能源环境问题的一个有效手段。天然气不仅是清洁能源,也是未来解决我国食品安全的一个不可或缺的重要原料,发展甲烷制生物蛋白,不仅可以解决人类的营养来源问题,更重要的是甲烷制生物蛋白具有更高的安全性。

传统煤制天然气是一个高水耗、高能耗、高CO₂排放的产业;将新能源与传统能源进行嫁接,如利用风电发电电解水,不仅能够将具有波动性、调节困难的风电高效利用,减少风电投资成本^[1,2],同时能够减少煤制天然气生产过程中CO₂的排放,对风电和煤制天然气行业发展都具有积极意义。但是风电/煤制天然气耦合作用下的经济性和CO₂排放特性的研究较少,本文以年产 1×10^9 m³煤制天然气项目为对象,研究不同风电/煤制天然气耦合生产过程的经济性和CO₂排放特性进行研究。

2 风电/煤制天然气工艺路径

2.1 传统煤制天然气工艺

煤制天然气工艺可以分为一步法和两步法两种;一步法一种是煤与水蒸气在催化剂条件下反应生成富CH₄合成气,该方法典型代表是美国巨点公司的蓝气技术,目前尚未有实际应用报道;另外一种一种是煤炭加氢气化法,由于需要单独制氢单元,该工艺仍处于研究阶段,尚未推广应用^[3,4]。

煤制天然气典型工艺是两步法制取天然气,首先,将煤炭气化生成合成气,合成气经过水煤气变换反应,使得H₂:CO的比例约为3,然后再通过甲烷化反应生成CH₄。典型的工艺流程图如图1所示。

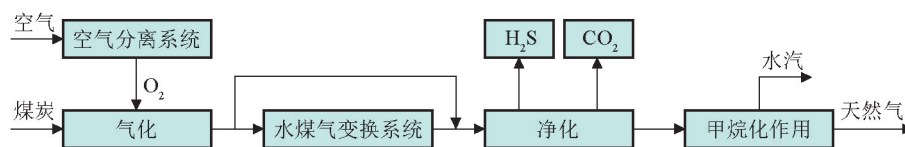


图1 两步法煤制天然气流程

Fig. 1 Two step coal-to-SNG process

其中,气化反应发生在气化炉内,主要反应包括^[5]



由于出气化炉合成气中 H_2 比例较低,一般通过水煤气变换(WGS)来增加合成气中 H_2 比例,水煤气变换反应为^[5]



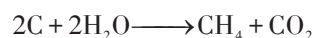
经过调配的合成气中 $\text{H}_2/\text{CO} \approx 3$ ^[6],合成气经过脱硫、脱 CO_2 后,进入甲烷合成器反应,生成甲烷和 CO_2 ,反应为^[7]



煤制天然气过程产生 CO_2 的环节包括气化反应阶段和水煤气变换阶段。气化炉的气化剂为 O_2 和少量水蒸气(一般调节炉温),不同气化方式,出气化炉合成气成分比例不同。由于进甲烷反应器合成气中的 H_2/CO 比例要满足约等于3。根据C守恒原则,C转化为 CH_4 和 CO_2 ,H来源于 H_2O ,则以纯氧作气化剂时,C转换为 CH_4 的总平衡反应为



以纯水蒸气作气化剂时,C转换为 CH_4 的总平衡反应为



从上述反应方程式可以看出,采用水蒸气为气化剂时至少有1/2的C要转变为 CO_2 ;当采用纯氧为气化剂时至少有2/3的C要转变为 CO_2 。尽管在C转变为 CO_2 的过程中会放出大量热量,这部分热量可以利用,从能量平衡角度来看,这部分能量并没有浪费,但从大量的 CO_2 排放,无论是碳捕获和碳封存(CCS)的成本,还是从煤炭的利用率上都造成巨大的成本浪费。减少这部分 CO_2 的排放,才能真正意义上做到煤制天然气的低碳排放。目前来说,由于气化反应和水煤气变换都是在高压环境下进行的,同时采用气体分离技术,排放的 CO_2 浓度较高,非常有利于采用碳捕集技术,毫无疑问,巨大的 CO_2 排放量采用CCS技术会造成巨大的能源浪费。

唐宏青^[8]指出典型煤化工装置中水的去向中循环水蒸发占53%,而工艺过程分解水只占总水的4%。根据煤制天然气新鲜水耗6.6 t/km³^[9]可知,折算成单位质量水耗约9.2 t/t(天然气),而分解水量约为2.25 t。除去工艺分解用水是必须消耗用水外,其他方向用水都应该或者尽可能循环利用,这样,煤制天然气就有了很大的节水空间。

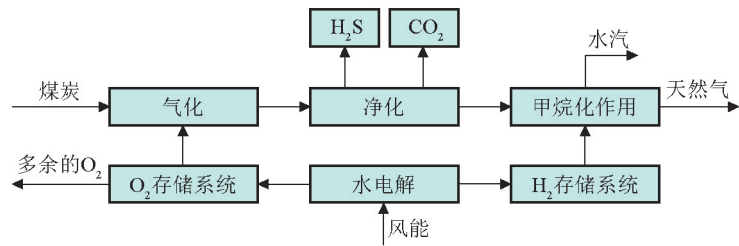
2.2 风电/煤制天然气工艺

风场的随机性、波动性给风力发电并网带来一系列的影响,随着风电并网的增加,对电网系统的安全性、稳定性及经济性的影响愈加明显。非并网风电是指风电系统终端负荷不再是传统的单一电网,而是直接应用于一系列能适应风电特性的高能耗产业及其他特殊领域,主要适应于0.5~10 GW以上大规模风电场^[1]。非并网风电采用直流供电,回避风电上网电压差、相位差、频率差难以控制等问题;提高风能利用效率,简化风力机结构和风电并网运行时所需大量辅助设备,大幅度降低风电场的制造成本和风电价格^[10]。

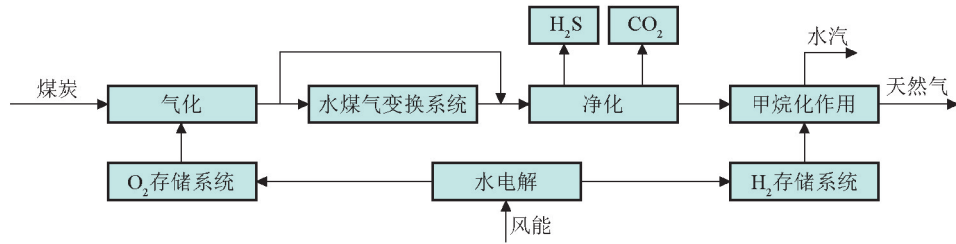
为了实现煤制天然气的低碳排放,需要提供低碳排放的制氢系统。风电/煤制天然气耦合系统即利用风电电解水制得氢气和氧气,用来完全或者部分代替空分系统和水煤气变换系统。由于电解氢气的加入,极大地减少了水煤气变换系统过程中所产生的 CO_2 量,实现煤制天然气系统真正意义上的低碳环保。邵迪等^[11]对风电/煤制天然气系统的 CO_2 减排特征进行分析,指出当氧气集成度达到15%时,年产 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气产业可实现 CO_2 减排 $6.983 \times 10^5 \text{ t}$ 。图2给出两种风电/煤制天然气耦合系统:图2a中,风电电解制氢、氧系统完全替代传统煤制天然气系统中的空分系统和水煤气变化系统,简称为完全耦合系统;图2b中,风电电解制氢、氧系统完全代替了传统煤制天然气系统中的空分系统,部分取代水煤气变换系统,简称为部分耦合系统。

3 风电/煤制天然气耦合系统与传统煤制天然气系统比较

以年产 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 煤制天然气项目为研究对象,对风电/煤制天然气耦合系统与传统煤制天然气系统经济性、碳排放特性进行比较。表2给出典型褐煤工业分析和元素分析^[12],表3给出典型Shell干粉气化技术合成气的组分^[13]。



(a) 风电制氢氧代替空分和水煤气变换系统



(b) 风电制氢氧代替空分系统

图2 风电/煤制天然气耦合系统

Fig. 2 Wind power/coal-to-SNG coupled system

表2 典型褐煤工业分析和元素分析

Table 2 Typical lignite industrial analysis and elemental analysis

工业分析(ar)/%(质量分数)				元素分析(d)/%(质量分数)				
M	AS	V	FC	S	C	H	O	N
39.5	9.14	20.66	30.45	2.14	59.95	3.87	17.98	0.9

表3 典型Shell干粉气化技术合成气组分

Table 3 Typical component of synthesis gas produced by Shell gasification

气体	物质的量组分/%
CO	65
H ₂	30
CO ₂	1.6
CH ₄	微量
N ₂ +Ar	3.1
H ₂ S+COS	0.3

以表1给出的褐煤为原料,采用Shell干粉气化技术来生产SNG,气化炉合成气组成假设见表3,假设水煤气变换CO转化率为99%,甲烷化反应中合成气中不含CO₂,H₂/CO比例为3.05,假设空分制得每立方米O₂的电耗为0.4 kW·h。根据元素守恒,计算获得图1(工况1)和图2(工况2a、工况2b)所需要的煤耗、空分电耗、WGS水蒸气消耗、CO₂排放以及副产氧气量。其中,假设气化炉产生的少量CO₂用于煤粉输送,因此只给出WGS产生的CO₂排放。

由表4可知,由于电解水制氢的加入,可以完全或者部分替换煤制天然气系统中的水煤气变换系统,大大节约系统的水蒸气消耗,即节约了工厂的煤炭消耗,同时由于省掉水煤气变换系统,大大地减少了煤制天然气系统的CO₂排放,完全省略空分和水煤气变换系统时,工艺实现了CO₂的零排放;当风电部分耦合时,工程总排放CO₂是传统工艺CO₂排放量的49.6%。同时,WGS反应需要提供过量的水蒸气来与CO反应,当电解水制氢提供甲烷化合成所需要的全部或者部分氢气时,即全部省略WGS或者部分替代WGS,都能节约一部分能量。

假设原煤价格为150元/t,蒸汽价格为120元/t,空分用电平均电价为0.5元/(kW·h),碳排放税按20元/t计算,氧气价格按照空分制氧成本0.52元/m³出售计算,则不同工艺(从气化至水煤气变换)年平均运行费用见表5。从表5可看出,完全耦合工艺由于富余氧气的销售会给企业带来巨大的经济利益。

表4 不同煤制天然气工艺投入与产出特性比较

Table 4 The comparison of consumption of output between three coal-to-SNG processes

	煤耗/(t·a ⁻¹)	空分电耗/((kW·h)·a ⁻¹)	WGS蒸气消耗/(t·a ⁻¹)	CO ₂ 排放/(t·a ⁻¹)	富余O ₂ /(m ³ ·a ⁻¹)
传统工艺	3.956×10 ⁶	3.712 77×10 ⁸	1.319×10 ⁶	3.338×10 ⁶	—
完全耦合	1.418×10 ⁶	—	—	—	9.091 27×10 ⁸
部分耦合	2.678×10 ⁶	—	6.55×10 ⁵	1.657×10 ⁶	—

注:水蒸气消耗为WGS消耗水蒸气量减去WGS变换副产蒸汽量

表5 不同煤制天然气工艺年平均运行费用

Table 5 The average annual operating cost of three coal-to-SNG processes

工艺	原煤	空分电费	WGS蒸汽消耗	碳排放税	富余氧气	亿元/a
						总运行费
传统工艺	5.93	1.86	1.58	0.67	0.00	10.04
完全耦合	2.13	—	—	—	-4.73	-2.60
部分耦合	4.02	—	0.79	0.33	—	5.14

设备投资由式(1)来计算^[4],设备投资成本按照文献计算^[2]。风电投资成本为4 900元/kW,风电年运行小时数为2 900 h(采用低风速风机,非并网风电投资成本比传统风电投资成本下降30%,风电效率提高12%),电解水电耗为4.5 kW·h/m³氢气(碱性水电解),计算3种工况的设备投资见表6。

$$I_2 = I_1 \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

式(1)中,I₁、I₂为老厂设备和新厂设备投资;P₁、P₂为老厂设备和新厂设备规模。

表6 3种不同煤制天然气工艺投资比较

Table 6 The investment of three different coal-to-SNG processes

工艺	空分系统	WGS系统	风电场	电解水设备
传统工艺	8.96	5.99	—	—
完全耦合	—	—	203.23	59.27
部分耦合	—	2.97	102.82	29.99

目前已有33个国家以及18个地区实施了碳排放税,澳大利亚碳税从2013年的23美元/t调整至现在的24.15美元/t,随着全球变暖所带来的极端天气加剧、环境问题,可以肯定越来越多的国家会开始征收碳税。采用传统煤制天然气工艺,由水煤气变

换反应产生的CO₂量为3.338×10⁶ t,若碳排放税从20元/t上升至100元/t,则每年需上交碳排放税从0.67亿元上升至3.34亿元。

假设煤制天然气厂、风电场和电解水系统设计寿命都为25年,定义年平均投资为设备折旧和年运行费用总额之和,如图3所示为原煤价格从120元/t至280元/t、碳税为20元/t时,3种工艺的年平均投资。完全耦合工艺的年平均投资额度在3种工艺中最低;传统工艺的年平均投资额度最高,随着煤价增长,年平均投资增长最快。图4为碳排放税从20元/t至150元/t,原煤价格为150元/t时3种工艺的年平均投资。由于完全耦合工艺没有CO₂排放(忽略气化炉产生的CO₂),所以其年平均投资不随碳排放税变化而变化,其年平均投资额度在3种工艺中最低;传统工艺的年平均投资在3种工艺中最高,随着碳排放税增加,其增长幅度也最快。

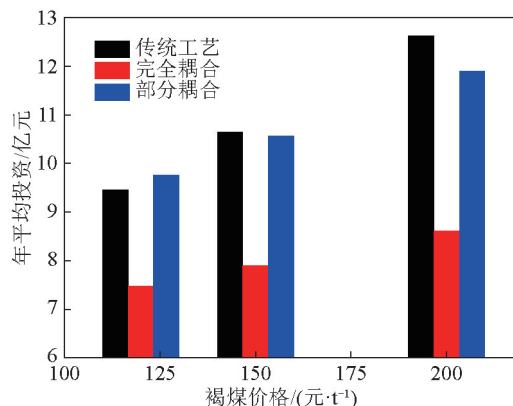


图3 褐煤价格对3种工艺年平均投资影响

Fig. 3 The effect of lignite price on the average investment per year of three different coal-to-SNG processes

同时,由于风电电解水产生氢气的引入,使得合成气总量下降,气化炉的规模也可减小,这样气化炉的投资也会相应降低,相应的管路,动力设备

规模也会减小,同时动力设备电耗也会降低。因此总的来说,完全耦合和部分耦合工艺年平均投资还有进一步下降空间。但是,这里忽略氧气储罐和氢气储罐的投资,以及利息的影响,这样年平均投资会有小幅升高。

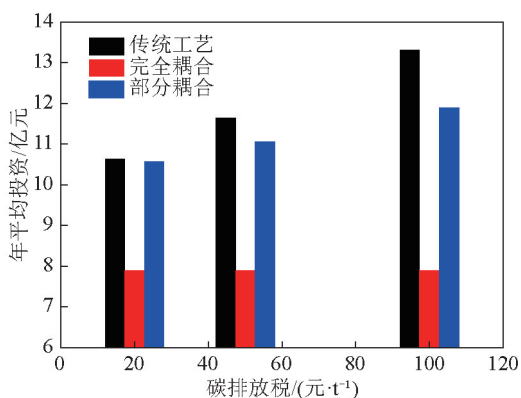


图4 碳排放税对3种工艺年平均投资的影响

Fig. 4 The effect of carbon tax on the average investment per year of three different coal-to-SNG processes

4 结语

将新能源嫁接到传统能源上,如利用风电/煤制天然气耦合实现真正意义上的煤炭的低碳排放,同时提高风电的利用效率,节约风电投资成本,为我国煤炭清洁化利用开辟一条新的路径。本文以年产 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 煤制天然气项目为例,分析采用典型褐煤和Shell干粉气化技术来制得替代天然气,通过对比风电/煤制天然气耦合工艺与传统煤制天然气工艺比较,得出如下结论。

1)随着风电/煤制天然气耦合程度提高,煤制天然气的 CO_2 排放量可以快速减少,当风电电解水系统完全取代传统煤化工中的空分和水煤气变换系统时,工艺的 CO_2 排放量几乎为零。

2)尽管风电/煤制天然气耦合系统中风电的一

次性投资相当大,如完全耦合系统风电场一次性投资达到154.17亿元,但是完全耦合系统的年平均运行费用却最低,由于煤耗量较小,同时几乎没有 CO_2 排放,其受煤炭价格和碳排放税影响也较小。

3)传统煤制天然气行业受到煤炭价格和碳税价格影响较大,且其年平均投资最高,经济性最差。

4)风电/煤制天然气工艺无论从低碳经济考虑,还是年平均运行费用上都具有比传统煤制天然气更大的优势。

参考文献

- [1] 顾为东. 大规模非并网风电系统开发与应用[J]. 电力系统自动化, 2008(19): 1-9.
- [2] 顾为东. 非并网风电对超大规模风电利用的战略意义和路径[J]. 上海节能, 2010(5): 8-11.
- [3] 朱瑞春, 公维恒, 范少锋. 煤制天然气工艺技术研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 17(6): 81-85.
- [4] Chandel M, Williams E. Synthetic natural gas (SNG): Technology, environmental implications, and economics [J]. Climate Change Policy Partnership, " Duke University, Durham, NC, available at: <http://www.canadian.cleanpowercoalition.com/pdf/SNG3>, 2009.
- [5] 许祥静. 煤气化生产技术(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [6] 李 瑶, 郑化安, 张生军, 等. 煤制合成天然气现状与发展[J]. 洁净煤技术, 2013(6): 62-66.
- [7] Kopyscinski J, Schildhauer T J, Biollaz S. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass—A technology review from 1950 to 2009 [J]. Fuel, 2010, 89(8): 1763-1783.
- [8] 唐宏青. 正确处理煤化工与水的关系[J]. 化工设计通讯, 2014, 40(1): 1-4.
- [9] 王雷石, 段书武. 现代煤化工产业能耗状况与节能对策研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(4): 1-3.
- [10] 顾为东. 大规模非并网风电产业体系研究[J]. 中国能源, 2008, 30(11): 14-17.
- [11] 邵 迪, 胡 敏, 代正华, 等. 风电/煤制天然气集成系统的研究[J]. 化学世界, 2012(增刊): 69-71.
- [12] 胡四斌. 煤制合成天然气项目工艺方案与技术经济比较[J]. 化肥设计, 2012, 50(4): 1-6.
- [13] 郑振安. Shell 煤气化技术(SCGP)的特点[J]. 煤化工, 2003, 31(2): 7-11.
- [14] 王静康. 化工过程设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

Energy consumption structure in China and the economic analysis of coupled wind power and coal to substitute natural gas

Yu Bo^{1,2}, Cao Chen^{1,2}, Gu Weidong²

(1. School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Jiangsu Institute of Macroeconomic Research, Nanjing 210013, China)

[Abstract] In this paper, taking an annual output of 1×10^9 m³ coal to substitute natural gas (SNG) as an example, Shell coal gasification technology was used to produce synthesis gas. The equipment investment of air separation system (ASU), water gas shift system (WGS), wind power plant (WP) and electrolyzed water system (EWS) was compared between traditional coal-to-SNG and wind/coal SNG. The oxygen consumption, water steam consumption, electricity consumption and CO₂ emission were also analyzed. Results show that although the investment of WP and EWS replacing the ASU and WGS is huge, its average annual operating cost (equipment investment, raw materials, power consumption) is lower, and CO₂ emission is only 1.3 % of the traditional coal-to-SNG technology. This paper provides a reference for the development of coal-to-SNG industry.

[Key words] energy consumption; coal-to-SNG; non-grid wind power; economic analysis; CO₂ emission