天然气耦合煤炭的低碳能源系统: 中国向低碳能源过渡时期的解决方案?

陈倩倩, 汪丹峰, 雷杨, 唐志永*

中国科学院上海高等研究院, 低碳能源转化技术中心, 上海 201203

* 联系人, E-mail: tangzy@sari.ac.cn

2015-02-28 收稿, 2015-03-09 接受, 2015-04-28 网络版发表

摘要 基于我国向低碳能源过渡时期所面临的以高碳能源为主的能源结构与绿色、低碳发展迫切需求之间的巨大矛盾, 本文根据绿色碳科学的概念, 提出了“天然气耦合煤炭的低碳能源系统”的设想, 即根据我国煤层气、页岩气、致密气等天然气资源和煤炭资源地理分布的一致性, 就地利用低碳高氢的天然气与高碳低氢的煤炭耦合制合成气, 取消水煤气变换装置, 提高系统的碳效和能效, 使得碳氧化生成 CO_2 反应发生于能源使用过程而非能源工业自身, 最终实现二氧化碳的减排, 使其成为近期我国向低碳能源过渡时期最有可能实现的低碳能源战略解决方案. 在此基础上, 构建了集成煤-天然气制油系统(CGTL)、集成煤-天然气制甲醇-MTG制汽油系统(CGTG)和集成微生物-煤-天然气制油系统(BCGTL), 并对其进行相应技术评价.

关键词

能源
天然气
煤基能源
低碳
减排
 CO_2

当前全球对 CO_2 排放导致的全球变暖问题越发关注, 作为 CO_2 排放主体的化石能源发展也已进入以低碳化为主要特征的大变革大调整时期^[1]. 中国现阶段面临以高碳能源为主的能源结构与绿色、低碳发展迫切需求之间的巨大矛盾. 据2013年国民经济和社会发展统计公报数据^[2], 2013年中国能源消费总量37.5亿吨标准煤, 其中煤炭消费量增长3.7%. 中国以煤为主的资源禀赋和能源消费结构一方面为经济的快速发展提供了可靠的能源保障, 另一方面也导致了 CO_2 的大量排放. 中国2013年 CO_2 排放量为95.24亿吨(图1), 占全球 CO_2 总排放量的27.1%^[3], 成为全球最大的 CO_2 排放国. 目前, 中国正处于工业化发展阶段, 产业结构是以高能耗、低效率、重污染的重化工业为主, 未来我国仍将处于 CO_2 排放的上升期. 2014年11月的Asia Pacific Economic Cooperation (APEC)会议上, 中国承诺到2030年左右或之前停止增加 CO_2 排放. 《国家应对气候变化规划(2014~2020年)》中也明确提

到, 2020年单位国内生产总值 CO_2 排放比2005年降低40%~45%^[4], 意味着基于现有的能源消费结构和产业结构, 发展低碳能源技术势在必行^[1].

谢克昌提出^[1], 对我国而言, 发展低碳经济和低碳能源技术的实质是: 可再生能源的开发和化石能源的洁净、高效利用, 特别是以煤为主的能源结构和以重化工业为主的产业结构决定了我国目前发展低碳能源技术重点在于煤炭的洁净高效转化利用和节能减排技术. 何鸣元和孙予罕^[5]提出“绿色碳科学”理念, 通过对化石能源利用过程中所涉及的碳科学基础进行深入研究, 把握其碳化学键演变规律并实现基于碳原子经济性的优化, 同时促进碳化学循环, 最终实现化石能源的增效减排. 针对我国未来能源的发展模式和解决方案, “低碳复合能源系统”设想也相应被提出^[6], 将煤等高含碳资源与核能和可再生能源等低碳资源进行耦合, 通过其物质流、能源流和信息流的集成, 提高系统能效和碳效并实现 CO_2 减排与资

引用格式: 陈倩倩, 汪丹峰, 雷杨, 等. 天然气耦合煤炭的低碳能源系统: 中国向低碳能源过渡时期的解决方案? 科学通报, 2015, 60: 1546~1552

Chen Q Q, Wang D F, Lei Y, et al, An integrated coal- and gas-based energy system: A strategic option for China's transition toward a low-carbon era? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1546~1552, doi: 10.1360/N972014-01257

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-01257>

图1 2001~2013年中国CO₂排放量^[3]Figure 1 CO₂ emission of China during the year of 2001–2013^[3]

源化利用。

目前,世界进入低碳为主的大调整、大变革时期,中国也开始低碳能源的过渡期。我国目前在可再生能源开发利用方面存在较大的技术瓶颈,技术和经济性仍是可再生能源发展要解决的最基本问题^[7]。因此,在我国向低碳能源过渡期间,可再生能源在能源消费结构中所占比例变化不大(图2)^[8]。按现有的技术水平和产业基础,除水电、风能外,大多数可再生能源产业还处于成长阶段,开发利用的成本仍然较高,加上资源分布不均、市场规模小、不能连续生产等特点,可再生能源在现有市场条件下还缺乏竞争力。因此,对于排碳量高的重化工产业,如何实现化石能源的洁净、高效利用,成为低碳能源过渡期的重中之重。

天然气及非常规天然气(包括致密气、煤层气和页岩气等)作为含氢量高的低碳绿色能源,在我国低碳能源过渡时期起着关键作用。中国“十二五”能源规划提出了2015年煤耗“封顶”在 38×10^8 t/a的指标。因此,必须改变目前传统煤化工高排碳、低能效、高污染的产业模式。以传统的煤制甲醇能源系统为例,由于煤气化制取的合成气含氢量低,若要达到合成甲醇所需氢碳比,须经历水煤气变换过程:即消耗一部分“碳”以提高“氢”的比例,系统中超过50%的碳资源在水煤气变换过程中转化为CO₂排放。煤制甲醇的过程碳效率约在30%,系统的能效在45%左右。如果采用天然气(含非常规天然气)蒸汽重整得到的高氢碳比的合成气与煤气化得到的低氢碳比的合成气耦合制甲醇,取消水煤气变换过程,则系统碳效可提高至60%左右,系统能效可提高15%左右。因此,优先发展天然气尤其我国储量巨大的非常规天然气,优化一次能源消费结构,在我国低碳能源过渡时期尤为重要(图3)^[9]。

图2 2020~2050年中国未来能源发展预测^[8]Figure 2 Forecast of China's future energy development during 2020–2050^[8] 图3 2010~2030年非常规天然气减排CO₂和H₂S数量图^[9]Figure 3 The emission reduction of CO₂ and SO₂ by using unconventional gas during 2010–2030^[9]

1 我国天然气资源开发利用现状和未来趋势

1.1 天然气资源现状和未来趋势

中国天然气现在仍处于高速发展时期,离进入高峰期还为时尚早。最近10年中国天然气产量增长迅速,从2001年的 303×10^8 m³到2013年的 1171×10^8 m³,产量增加了2.86倍(图4);消费量自2001年的 274×10^8 m³到2013年的 1616×10^8 m³,增长了4.89倍。同时,天然气探明储量也大幅度增长。但相对于中国能源消费量的增长,天然气在一次能源消费结构中的比例增长并不明显,2013年天然气消费量仅占总消费量的5.1%^[3]。邱中建和邓松涛^[10]预测,随着非常规天然气的快速发展,2020年中国天然气消费量在一次能源中的比重有望超过10%,2030年有望突破15%。因此在中国向低碳能源过渡期间,中国能源结构调整的重任就落在了天然气的发展上。这既是中国天然气发展的机遇,也是天然气发展必须面对的挑战。

1.2 非常规天然气开发现状和未来趋势

中国非常规天然气资源十分丰富,致密砂岩气、

图4 2001~2013 年中国天然气产量和消费量

Figure 4 China's natural gas production and consumption during 2001–2013

煤层气、页岩气技术可采资源量约为 $34 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是常规天然气技术可采资源量的2倍. 目前, 中国的致密砂岩气已进入规模开发阶段, 煤层气、页岩气的开发利用正在起步, 天然气水合物等资源的基础研究工作也正逐步展开. 2012年中国非常规天然气产量共 $445.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占中国天然气总产量的41.75%(表1).

潘继平等^[11]基于中国经济继续保持较快增长, 能源结构不断优化、清洁能源比例不断增加等相关前提条件, 对未来10~20年中国非常规天然气产量进行了预测(表2). 初步预计, 未来10~20年, 非常规天然气产量将显著增长, 成为全国天然气储量、产量增长的主要来源之一, 对保障全国天然气供应起到日益重要的作用. 2015年全国天然气产量将达 $1450 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中非常规天然气产量为 $650 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占当年全国天然气总产量的45%; 2020年全国天然气产量将达 $3500 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中非常规天然气产量占到66%; 2030

年全国天然气总产量将达到 $5500 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中非常规天然气产量约占70%.

根据中华人民共和国国土资源部及各大石油公司和科研院所对我国重点探区、重点领域的天然气资源动态评价报告^[12], 我国天然气资源(含非常规天然气)主要集中在鄂尔多斯、四川盆地、塔里木盆地、松辽盆地等区域, 图5为我国致密气资源分布. 其中鄂尔多斯、四川盆地和塔里木盆地3大气区2010年的天然气产量占我国天然气总产量的75%. 同时, 内蒙古和新疆又是我国煤炭主产区, 就地利用高氢低碳的天然气与低氢高碳的煤耦合制合成气, 取消水煤气变换装置, 降低传统煤化工二氧化碳排放量, 提高系统碳效和能效, 在我国向低碳能源过渡的关键时期具有实际意义.

2 集成煤-天然气的低碳能源系统

基于以上分析, 根据绿色碳科学的概念, 本文提出以下3个集成系统, 即: 集成煤-天然气制油系统(CGTL)、集成煤-天然气制甲醇-MTG制汽油系统(CGTG)、集成微藻生物质-煤-天然气制油系统(BCGTL). 在分析传统煤化工碳排放原因的基础上, 取消水煤气变换, 来自天然气的富氢合成气与来自煤炭的缺氢的合成气进行调配, 一部分直接用于调节粗合成气的氢碳比, 减少系统 CO_2 的排放, 使碳氧化生成 CO_2 反应发生于能源使用过程而非能源工业自身^[5], 同时剩余的 CO_2 从生物循环低碳角度可以通过微藻生物质系统转化为油品, 从生命周期角度实

表1 2012 年中国非常规天然气资源量与产量统计^[9]Table 1 Statistics of China's unconventional gas resources and production in 2012^[9]

名称	技术可采资源量(10^{12} m^3)	产量(10^8 m^3)	产区
煤层气	12	125(地面和地下)	鄂尔多斯盆地、山西等
页岩气	11	0.5	四川盆地
致密砂岩气	11	320	鄂尔多斯、四川等盆地

表2 未来 20 年我国天然气产量预测(10^8 m^3)^[11]Table 2 Forecast of China's natural gas production in the next 20 years (10^8 m^3)^[11]

类型	2015	2020	2030
致密气(产层为致密砂岩、火山岩)	500	1000	1500
页岩气	50	800	1500
煤层气	100	500	800
常规天然气	800	1200	1700
天然气总产量	1450	3500	5500

图5 中国致密气资源分布^[12]

Figure 5 China's tight gas distribution map^[12]

现了CO₂零排放并实现了CO₂作为碳资源的综合利用;并对各个系统从能效、碳效和CO₂排放量等方面进行分析,试图找到我国向低碳能源过渡时期化石能源清洁高效利用的解决方案。

2.1 集成煤-天然气制油系统(CGTL)

以煤和天然气为原料经费托工艺合成油品,集成传统煤间接液化制油工艺(CTL)与天然气制油工艺(GTL),取消变换装置,以高氢碳比的天然气-蒸汽重整合成气(氢碳比 ≥ 3)和煤气化合成气(氢碳比 ≈ 0.5)为混合原料气,并通过调节两者规模使氢碳比达到下游合成需求的目标值,流程图如图6所示。

以100万吨油品合成规模为计算基准,该系统单位油品耗煤量0.71 t,耗天然气量1.33 t,耗水量为10.13 t。经计算得到系统能效为54.75%,系统碳效为59.45%,同比传统煤间接液化制油路线(CTL),分别上升18.4%和86.9%。系统CO₂排放量为1.23 t/t油,同比传统煤间接液化制油路线(CTL)下降81%。

2.2 集成煤-天然气制甲醇-MTG制汽油系统(CG TG)

以煤和天然气为原料经中间产品甲醇制汽油的工艺,集成煤制甲醇-MTG工艺(CTG)与天然气制甲

醇-MTG工艺(GTG)。以煤气化与天然气重整所得粗合成气为混合原料气,调节氢碳比至合成甲醇需求的目标值,经中间产品甲醇采用MTG工艺合成汽油,流程图如图7所示。

以100万吨油品合成规模为计算基准,该系统单位油品耗煤量0.34 t,耗天然气量1.21 t,耗水量为7.1 t。经计算得到系统能效为61.25%,系统碳效为77.72%,同比煤制甲醇-MTG路线(CTG),分别上升14.1%和78.4%。系统CO₂排放量为0.64 t/t汽油,同比传统煤制甲醇-MTG路线(CTG)下降84%。

2.3 集成微藻生物质-煤-天然气制油系统(BCGTL)

从碳资源的角度出发,CO₂本身就是一种碳资源。因此结合CO₂的生物利用,一方面可以实现碳资源的利用,另一方面可以提高低碳系统的经济性。基于微藻生物质的绿色碳捕集,本文构建了集成微藻生物质-煤-天然气制油系统(BCGTL),一方面从耦合能源角度,通过煤与天然气的耦合,可直接减少大量CO₂。另一方面剩余的CO₂从生物循环低碳角度通过微藻生物质系统转化为油品,从生命周期角度实现了CO₂零排放并实现了CO₂作为碳资源的综合利用。

如图8所示,针对集成煤-天然气制油系统,采用微藻固碳技术吸收排放源所排放的CO₂,建立高效光

图6 集成煤-天然气制油系统(CGTL)流程图

Figure 6 Flow diagram of integrated coal and gas to oil production system (CGTL)

图7 集成煤-天然气制甲醇-MTG制汽油系统(CG TG)流程图

Figure 7 Flow diagram of integrated coal and gas to methanol as intermediates to gasoline production by MTG technical (CGTG)

生物反应器系统,将污染源排放的 CO_2 通入光生物反应器,微藻吸收利用 CO_2 进行快速生长.生成的藻体通过加氢等处理技术,将生物技术和催化技术耦合,在实现 CO_2 零排放的同时,将中间产物生物质转化为高附加值的油品等产品,从而推动微藻固碳,实现碳的循环利用.

以100万吨油品规模为计算基准,考虑 CO_2 的利用率为100%时(即整个系统为零碳排放系统),BCGTL较之于CGTL,煤、天然气消耗量约降低24.7%.

2.4 比较与讨论

各技术路线能效、碳效比较,如表3所示.从能效角度分析,不同路线的比较如下:CGTG>CGTL>

CTG>CTL;BCGTL由于涉及微藻的生长,未对其能效进行计算.总体而言,采用相同原料的路线中,MTG路线的能效要大于FT制油路线.在生产相同产品的路线中,天然气与煤耦合路线的能效均高于传统煤化工路线.

从碳效角度分析,不同路线的比较如下:BCGTL>CGTG>CGTL>CTG>CTL;从碳效角度分析,BCGTL由于采用微藻固碳并实现了 CO_2 的资源化利用,其碳效最高.其他路线的碳效比较结果类似于能效比较.采用相同原料的路线中,MTG路线的碳效要大于FT制油路线,这是由于甲醇合成的碳原子经济性较高的原因,而生产相同产品的路线中,天然气与煤耦合的路线高于传统煤化工路线的碳效.

图8 集成微藻生物质-煤-天然气制油系统(BCGTL)流程图

Figure 8 Flow diagram of integrated algal biomass, coal and gas to oil production system (BCGTL)

表3 不同路线能效和碳效比较

Table 3 Energy efficiency and carbon efficiency comparisons of different processes

	能效(%)	碳效(%)
CTL	46.26	31.80
CGTL	54.75	59.45
CTG	53.68	43.57
CGTG	61.25	77.72
BCGTL	/	100

从碳排放角度比较,不同路线的比较如下: CTL > CTG > CGTL > CGTG > BCGTL. 图9比较了各种路线的CO₂排放量. 可以看出,以煤为原料的路线碳排放最高,这主要是由于为了提高氢/碳比而进行水煤气变换的原因,天然气与煤耦合路线碳排放相比传统煤化工路线大幅降低,BCGTL路线由于集成微藻生

图9 不同路线 CO₂ 排放量比较

Figure 9 CO₂ emission comparisons of different processes

物质,实现了CO₂的资源化利用,为零碳排放系统.

3 结论

天然气及非常规天然气(包括致密气、煤层气和页岩气等)作为含氢量高的低碳绿色能源,在我国低碳能源过渡时期起着关键作用. 根据我国天然气(含非常规天然气)和煤炭资源地理分布的一致性,就地利利用高氢低碳的天然气与低氢高碳的煤耦合制合成气,以绿色碳科学的概念,取消水煤气变换装置,提高系统的碳效和能效,使得碳氧化生成CO₂反应发生于能源使用过程而非能源工业自身,最终实现CO₂的减排和资源化利用,在我国向低碳能源过渡的关键时期具有实际意义. 基于以上前提,本文提出以下3个集成系统,即:集成煤-天然气制油系统(CGTL)、集成煤-天然气制甲醇-MTG制汽油系统(CGTG)、集成微藻生物质-煤-天然气低碳制油系统(BCGTL).

相比传统煤化工过程,集成天然气-煤的低碳能源系统能效和碳效均有大幅提高,同时系统CO₂排放量大幅降低. 集成微藻生物质-煤-天然气的制油系统实现了系统零碳排放及CO₂的资源化利用. 在我国向低碳能源转化的过渡时期,利用煤层气、页岩气等天然气资源与煤化工耦合的低碳能源系统能够实现煤化工领域的节能减排,提高煤化工系统的能源效率,符合我国低碳能源过渡时期的要求. 相比可再生能源与煤化工的耦合,近期内更具可行性,或可能为我国低碳能源过渡时期提供解决方案.

参考文献

- 1 Xie K C. Developing low-carbon energy technologies, arousing beautiful prospective (in Chinese). J TaiYuan Univ Technol, 2010, 41: 464–465 [谢克昌. 发展低碳能源技术 创造美好未来. 太原理工大学学报, 2010, 41: 464–465]
- 2 State Statistical Bureau of the People's Republic of China. National Econ Soc Dev Stat Bull 2013 (in Chinese), 2014 [中华人民共和国国家统计局. 2013年国民经济和社会发展统计公报, 2014]
- 3 BP. BP Statistical Review of World Energy, 2014
- 4 State Development and Reform Commission. National Action Plan to Respond to Climate Change (2014–2020) (in Chinese), 2014 [国家发展和改革委员会. 国家应对气候变化规划(2014–2020), 2014]
- 5 He M Y, Sun Y H. Green carbon science: Scientific basis for the efficient utilization of fossil energy with low emission (in Chinese). Sci Sin Chim, 2011, 41: 925–932 [何鸣元, 孙予罕. 绿色碳科学——化石能源增效减排的科学基础. 中国科学: 化学, 2011, 41: 925–932]
- 6 Tang Z Y, Sun Y H, Jiang M H. Low-carbon hybrid energy systems—Future energy solutions and development models in China? (in Chinese). Sci Sin Chim, 2013, 43: 116–124 [唐志永, 孙予罕, 江绵恒. 低碳复合能源系统——中国未来能源的解决方案和发展模式? 中国科学: 化学, 2013, 43: 116–124]
- 7 State Development and Reform Commission. “Twelfth Five Year Plan” of renewable energy development (in Chinese). SOL Energy, 2012, 16: 6–9 [国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十二五”规划. 太阳能, 2012, 16: 6–9]
- 8 Development Research Center of the State Council. China's low carbon development path: Analysis of energy requirement and carbon emission of China in 2050 (in Chinese), 2009 [国务院发展研究中心. 中国低碳发展之路: 2050年中国能源需求暨碳排放情景分析, 2009]
- 9 Zhou Z B. Trends of, challenges in, and corresponding strategies for unconventional natural gas industry in China (in Chinese). Nat Gas Ind, 2014, 34: 12–17 [周志斌. 中国非常规天然气产业发展趋势、挑战与应对策略. 天然气工业, 2014, 34: 12–17]
- 10 Qiu Z J, Deng S T. Strategic position of unconventional natural gas resources in China (in Chinese). Nat Gas Ind, 2012, 32: 1–5 [邱中建, 邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位. 天然气工业, 2012, 32: 1–5]
- 11 Pan J P, Hu J W, An H Z. Policies for promoting the development of unconventional natural gas resources in China (in Chinese). Nat Gas Ind, 2011, 31: 1–6 [潘继平, 胡建武, 安海忠. 促进中国非常规天然气资源开发的政策思考. 天然气工业, 2011, 31: 1–6]
- 12 Oil and Gas Resources Strategic Research Center of the Ministry of Land and Resources. Dynamic evaluations of national oil and gas resources (2010) (in Chinese). Beijing: China Land Press, 2011 [国土资源部油气资源战略研究中心. 全国油气资源动态评价(2010). 北京: 中国大地出版社, 2011]

An integrated coal- and gas-based energy system: A strategic option for China's transition toward a low-carbon era?

CHEN QianQian, WANG DanFeng, LEI Yang & TANG ZhiYong

Low Carbon Energy Conversion Technology Center, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

The contradiction between the current domination of China's energy sector by carbon-intensive resources and the urgent need for the development of green, low-carbon energy offers a great challenge for transition toward China's low-carbon era. Because of this challenge, based on the “green carbon science” concept, an integrated coal- and gas-based energy system is proposed as a possible solution to China's current carbon-intensive energy use. The geographical distribution and quality of unconventional gas resources were assessed to suggest blending rates with coal, which has a higher carbon content and lower hydrogen content. Integrating these two sources produced syngas for fuel and chemicals synthesis. Removing the water-gas-shift unit used in normal syngas operations allowed improvement of both energy and carbon efficiency and also permitted CO₂ to be used as a resource. Such results suggest an integrated coal- and gas-based energy system as a strategic option to be deployed in China's transition toward a low carbon era. Expanding the analysis further, we discuss a number of other systems. These include using gas and coal to produce oil (CGTL), to produce methanol-MTG for gasoline systems (CGTG), and further integrate algal resources to produce oil (BCGTL). Technical evaluations and detailed explanations of these processes are provided herein.

energy, natural gas, coal-based energy, low-carbon energy, emissions reduction, carbon dioxide

doi: 10.1360/N972014-01257