

基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念 及碳减排潜力分析

刘 臻^{1,2}, 次东辉², 方薪晖², 李文华²

(1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘 要:我国是世界上最大的煤炭生产和消耗国,煤炭的开发利用导致了大量 CO₂ 排放,为助力煤炭的清洁转化利用,基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念及碳减排潜力进行分析。计算了燃煤发电过程和以煤气化为核心的煤制甲醇生产过程 CO₂ 的排放,煤气化过程基于含碳废弃物与煤共气化提出了碳循环概念,利用气化炉协同处理各类含碳废弃物,实现跨系统的碳循环利用及原煤使用量下降,是一项非常有潜力的碳减排技术。以百万吨级的煤直接液化项目为例,实施了碳循环后,液化油渣中 50% 的碳被固定在沥青产品中,减少 CO₂ 排放量约 58 万 t;以油渣萃取物替代约 10% 的煤制氢的气化原料煤,CO₂ 减排量约 30 万 t;避免油渣萃取物直接燃烧产生的 CO₂ 排放量约 35 万 t,即每年可以实现 CO₂ 减排量达 123 万 t。若基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念得以推广,2019 年我国煤化工行业可节约原煤用量 2 391 万 t,碳减排潜力约 3 710 万 t。

关键词:煤气化;碳排放;碳循环;含碳废弃物

中图分类号:TQ53;X502 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)02-0130-07

Concept of carbon cycle based on co-gasification of carbon containing waste and coal and analysis of carbon emission reduction potential

LIU Zhen^{1,2}, CI Donghui², FANG Xinhui², LI Wenhua²

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: China has the largest coal production and consumption in the world. A large amount of CO₂ is discharged due to the development and utilization of coal. In order to help realize the clean transformation and utilization of coal, the CO₂ emissions of coal-fired power generation and coal gasification to methanol process was analyzed. The CO₂ emissions from coal-fired power generation process and coal to methanol production process with coal gasification as the core were calculated. Through the analysis and calculation, in the coal gasification to methanol process, about 37% of carbon from the raw coal enters the product, which can achieve a certain proportion of "chemical carbon fixation". The CO₂ concentration in the syngas produced in the coal gasification process is high. Coal gasification to methanol process is easier to achieve large-scale and low-cost carbon capture and storage than coal-fired power generation. Based on the co-gasification of carbon containing waste and coal, the concept of carbon cycle is put forward. It is a very potential carbon emission reduction technology to use gasifiers to deal with all kinds of carbon containing waste in a coordinated manner, so as to realize cross system carbon recycling and save the use of raw coal. Take 1 million t/a coal direct liquefaction project for example, the reduction of CO₂ emission is about 1.23 million tons every year by the gasification of carbonaceous wastes. CO₂ emission reduction consists of three parts. Part I is about 0.58 million tons, due to about 50% of carbon from the coal liquefaction residues are entered the asphalt product. Part II is about 0.30 million tons, due to 10% raw coal for hydrogen production is placed by coal direct liquefaction residues raffinate. Part III is about 0.35 million tons by avoiding the direct combustion of coal direct liquefaction residues raffinate. If this method extends to the coal chemical industry, it can save about 23.91 million tons of raw coal in China and reduce 37.10 million tons CO₂ emission potentially in 2019.

Key words: coal gasification; CO₂ emission; carbon cycle; carbon containing waste

收稿日期: 2021-07-21; 责任编辑: 张 鑫 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21072104

作者简介: 刘 臻 (1982—), 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 博士研究生。E-mail: zhen.liu.v@chnenergy.com.cn

引用格式: 刘臻, 次东辉, 方薪晖, 等. 基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念及碳减排潜力分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 130-136.

LIU Zhen, CI Donghui, FANG Xinhui, et al. Concept of carbon cycle based on co-gasification of carbon containing waste and coal and analysis of carbon emission reduction potential [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 130-136.



移动阅读

0 引 言

2020 年 9 月,我国明确提出 CO_2 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现“碳中和”的目标。“碳达峰、碳中和”对我国能源行业既是挑战也是机遇,我国能源体系乃至整体运行方式将迎来深刻转型。

我国是世界上最大的煤炭生产和消耗国,2019 年煤炭在一次能源消费中的比重降至 57.7%,但煤炭用量仍增长 1%。2020 年 12 月,习近平提出至 2030 年我国非化石能源消费占比将达 25% 左右,2030—2035 年全国碳排放将稳中有降,意味着我国能源结构未来近 10 多年仍将以化石能源形式为主,短期内我国以煤为主的能源结构不会改变。根据谢和平等^[1]的预测,在 2025 年之前,煤仍占我国能源总消费的 50% 以上。基于国家能源战略考虑,我国现代煤化工亟需发展。目前我国是传统煤化工产品最大的生产国,同时我国现代煤化工也在快速发展^[2]。随着能源革命的不断推进,绿色低碳经济逐渐盛行,产业结构正在逐步进行转型和升级。因此,以化石能源特别是煤炭为主的能源结构转型是一项艰巨而复杂的系统工程。结合我国的能源禀赋和社会经济发展水平,化石能源清洁化是能源转型的基础,提高煤炭清洁转化利用能力对实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要的战略意义^[3-4]。

现代煤化工包括煤制油(直接液化和间接液化)、煤制天然气、煤制烯烃、甲醇制烯烃、煤制乙二醇、已升级转型的煤制甲醇和煤制氢等^[5],均可认为是以煤气化为龙头的煤化工生产过程。若将煤制氢所制得氢气用于煤直接液化,煤直接液化可认为是以煤气化为龙头的煤化工生产过程。煤气化是煤炭清洁高效利用的核心技术,据统计,截至 2019 年底,全年通过气化转化的原料煤约 2.5 亿 t,占我国煤炭消费总量的 6% 左右^[6],煤气化过程中可实现规模化的高浓度 CO_2 分离,故比燃煤发电更易实现低成本的碳捕集和封存。此外,煤气化本质上是高温热化学转化过程,不仅能实现煤的气化,也可实现所有含碳固体废弃物和有机废液的转化。因此,通过煤气化装置来处理工厂产生的含碳废弃物,实现跨系统的碳循环,减少整体碳排放,是一项非常有潜

力的碳减排技术^[4,6-7]。笔者以国家能源集团百万吨级煤炭直接液化项目的碳捕集封存和含碳废弃物气化应用为例,分析煤气化技术的碳减排潜力,以期“碳达峰、碳中和”背景下规划煤炭清洁转化利用创新技术路线提供参考。

1 煤气化技术的碳减排优势

我国煤炭利用领域中,燃煤发电的耗煤量约占我国煤炭消费总量的一半以上,2019 年达 55.2%,约 21.5 亿 t^[8]。燃煤发电过程中,理论上煤充分燃烧后碳元素全部转化为 CO_2 排放到大气,如图 1 所示。其中,1 t 标准煤燃烧将排放 2.54 t CO_2 ^[9],故燃煤发电行业中煤炭燃烧的 CO_2 排放量为 54.61 亿 t。因此,燃煤发电是我国碳排放的主要来源,降低燃煤引起的 CO_2 排放对煤电行业可持续发展及我国实现碳减排目标具有重要意义^[10]。

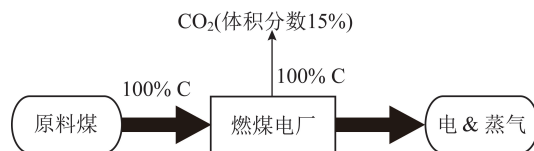


图 1 煤电行业 CO_2 排放分布

Fig.1 Distribution of CO_2 emission in coal power industry

近年来,我国煤炭清洁高效转化利用技术取得一系列创新突破,以煤气化为龙头的现代煤化工是促进我国煤基能源的可持续发展,实现高碳能源低碳化利用的重点方向^[6-7]。以煤气化制甲醇过程为例,原料煤中约 37% 的碳进入甲醇产品,63% 的碳转化为 CO_2 , CO_2 可以在煤气后处理过程中得以富集,体积分数 88% 左右,如图 2 所示。相比煤炭直接燃烧,煤炭经气化转化为甲醇的过程可以实现 37% 的“化学固碳”,大幅减少了直接向大气排放的 CO_2 。煤制甲醇用作燃料时(约占全部煤制甲醇的 20%)会转化释放 CO_2 ,不再具有碳利用功能;若用作原料生产下游多种化工产品时(约占全部煤制甲醇的 80%),碳继续利用,短期内不会转化释放 CO_2 ,具有较强的碳利用功能。根据目前行业内煤制甲醇的平均单耗,合成 1 t 甲醇约消耗 1.5 t 标煤,1 t 标煤在转化为甲醇的过程中约排放 CO_2 1.57 t,相当于 1 t 标煤直接燃烧过程中 CO_2 排放量的 62%,碳减排效果非常显著^[10-11]。

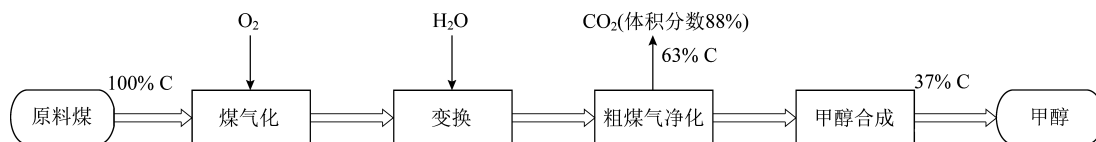


图 2 煤制甲醇过程 CO_2 排放分布

Fig.2 Distribution of CO_2 emissions from the process of coal-to-methanol

煤燃烧或煤化工过程产生的 CO_2 可以通过捕集、利用和封存 (CCUS 或 CCS) 降低排放到空气中的 CO_2 。我国的 CCS 或 CCUS 技术起步较晚,自 2007 年以来我国建立了一系列 10 万 t 级的 CCS 或 CCUS 示范项目^[12]。随着我国对碳排放的要求越来越严格,CCS 或 CCUS 技术在我国受到关注。目前 CCS 技术或 CCUS 技术中 CO_2 捕集成本主要受 CO_2 体积分数影响, CO_2 体积分数越高,碳捕集环节成本越低,CCS 或 CCUS 的成本也就越低^[13-14]。燃煤发电行业的煤炭直接燃烧排放的 CO_2 体积分数只有 15% 左右、压力低且体积流量大、分离过程耗能大,收集困难。以华能某电厂的 CO_2 捕集系统为例, CO_2 捕集成本约 380 元/t^[15];现代煤化工行业的煤制甲醇项目低温甲醇洗环节排放的 CO_2 体积分数约为 88%,只需通过加压、提纯和冷却就可满足 CO_2 输送和封存的要求^[16-17]。据调研,煤气化后煤气后处理单元的 CO_2 捕集成本只有 150 元/t 左右,是燃煤发电烟气 CO_2 捕集成本的 39%,具有显著的成本优势^[18]。

综上,相比燃煤发电的煤直接燃烧过程,以煤气化技术为龙头的煤炭清洁转化过程的优势在于可以实现一定比例的“化学固碳”, CO_2 排放量更少,且可以获得较高浓度的 CO_2 ,更容易实现低成本碳捕集、

利用和封存 (CCUS),是煤炭利用过程中有潜力的碳减排方式。

2 基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环

现代煤化工的 CO_2 排放主要来源于煤中碳原子,虽然可以在煤气净化工段引入 CO_2 捕集纯化、液化封存,但鉴于目前 CCS 或 CCUS 的成本较高、难以普及,发展碳减排技术还应当考虑我国当前社会经济发展水平,优先从提高能源转化效率的角度引入碳循环的概念,即在煤炭转化过程中,对含碳废弃物进行循环利用,从源头上减少煤炭使用,从而降低 CO_2 排放量。

在现代煤化工过程中, CO_2 排放来自于从原料煤生产到化工产品的消费利用整个生命周期^[11,19],由《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》规定的化工厂 CO_2 排放核算边界,结合现代煤化工的特点,煤化工 CO_2 排放核算边界只需要计算原料煤转化过程中的碳排放和煤化工所需能量(电和水蒸气)带来的间接 CO_2 排放。由于笔者提出的现代煤化工过程中的碳循环理念只改变了整个过程中的原料煤用量,因此在计算碳减排过程中,着重研究原料煤转化过程中的碳排放,如图 3 所示。

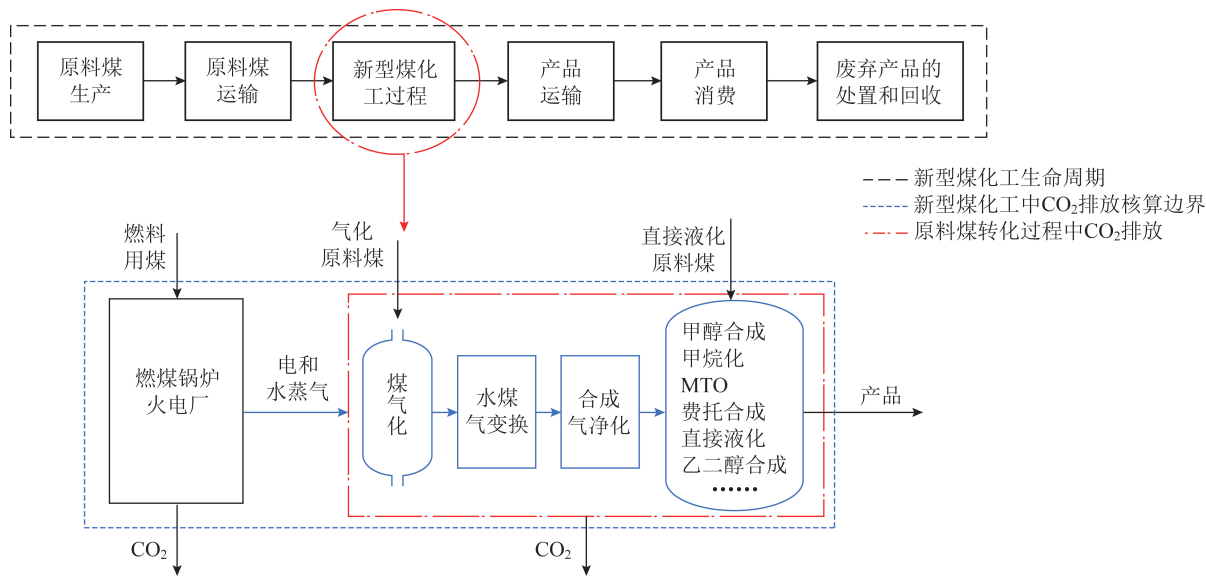


图3 现代煤化工的生命周期和 CO_2 排放核算边界

Fig.3 Life cycle and CO_2 emission accounting boundary of modern coal chemical industry

将含碳废弃物引入现代煤化工过程中替代气化原料,相比于焚烧处理,含碳废弃物用于气化产生的 CO_2 更少;相比于煤,含碳废弃物利用产生的 CO_2 更少;此外,含碳废弃物的利用是循环经济,可以减少 CO_2 排放。因此可以认为含碳废弃物替代气化原料煤,减少了原料煤用量,从而减少了被替代部分原料

煤气化产生的 CO_2 。因此可用式(1)计算含碳废弃物引入现代煤化工过程后 CO_2 减排量。

$$P_i = A_i E_i \eta, \quad (1)$$

式中, i 为某种现代煤化工技术; P_i 为将含碳废弃物替代气化原料煤后该种现代煤化工过程减少的 CO_2 排放量,t; A_i 为该种现代煤化工产品的年产能(或

产量), t; E_i 为该种现代煤化工原料煤转化过程中 CO_2 排放因子, t/t; η 为碳废弃物替代原料煤的百分比, %。

以煤气化制甲醇过程为例,含碳废弃物与煤气化制甲醇提供了一种从源头减少 CO_2 排放且实现碳循环生产甲醇的方案。煤炭经甲醇转化的各种化学品在完成其使用寿命后所形成的含碳废弃物是一种可回收利用的碳资源,其所含碳元素皆来自于煤气化过程固定在化学产品中的碳,将含碳废弃物作为气化原料在煤气化装置转化成 CO 、 H_2 、 CH_4 等粗

煤气,不仅可以实现含碳废弃物循环利用,还能节约气化原料煤;同时可通过粗合成气净化单元实现规模化、高浓度的 CO_2 分离,如图 4 所示。截至 2019 年底,我国煤制甲醇产能为 7 500 万 t/a ,消耗原料煤约 1.125 亿 t ,若用含碳废弃物代替 10% 原料煤作为煤气化原料,可以减少原料煤消耗 1 125 万 t ,实现 CO_2 减排 2 317 万 t 。因此,在现代煤化工过程中引入碳循环,通过煤气化装置进行含碳废弃物资源化和循环化利用,可实现跨系统的碳循环,减少煤炭转化过程碳排放,是一项非常有潜力的碳减排技术。

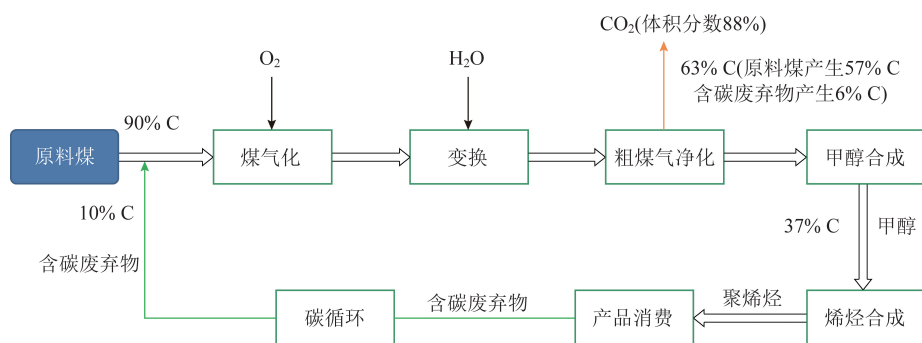
图4 引入碳循环的煤制甲醇过程中CO₂排放分布

Fig.4 Distribution of CO₂ emissions the process of coal-to-methanol with the carbon cycle

3 碳减排典型案例分析

国家能源集团是国内在煤炭转化过程中开展碳减排相关研究和工业示范的先驱,早在 2011 年就依托鄂尔多斯煤直接液化厂建立我国首个 10 万 t/a 的 CO₂ 的捕获和封存示范装置,开展了规模化 CO₂ 捕获与地质封存的研究和工业试验工作,累计完成注入液体 CO₂ 达 23.3 万 t^[18]。

在煤直接液化工程成功实现 CCS 基础上,国家能源集团积极探索和实践碳循环利用。煤液化油渣

是煤直接液化生产液体油料化学品的副产物,可以通过溶剂萃取工艺分离出约占煤液化油渣总量 50% 的煤液化沥青,其可作为防水卷材和道路沥青原料,将这部分碳固定在沥青产品;剩下约 50% 的萃取物若进入自备电厂锅炉燃烧, CO_2 会直接排放^[18,20-21]。但若作为气化炉的原料,生产合成气,则可以转化为煤直接液化和油品加氢过程所需氢气^[22],制氢过程中产生的高浓度 CO_2 ,又可以进入 CCS 单元,实现了零碳排放。煤直接液化项目的碳循环方案如图 5 所示。

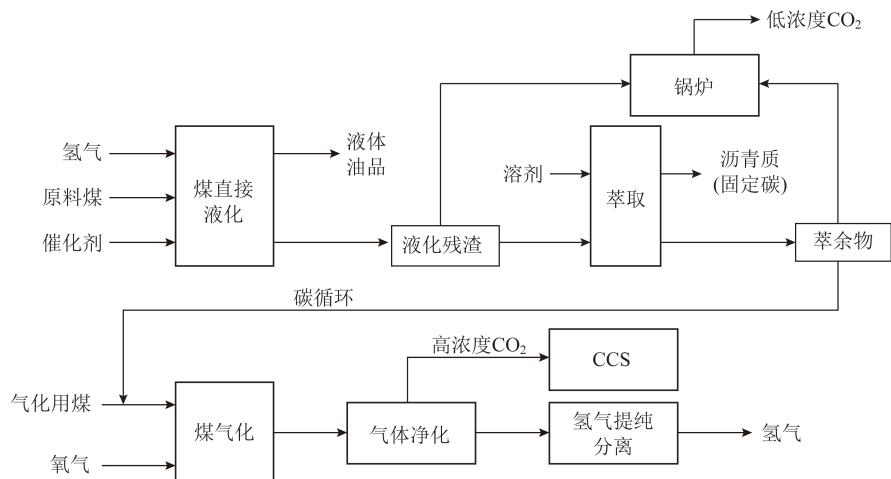


图5 国家能源集团煤直接液化示范工程项目碳循环方案

Fig.5 Technology of carbon cycle in the process of CHN coal direct liquefaction

煤直接液化项目实施碳循环后,不仅对液化油渣进行分质利用,提高了产品的附加值,还通过液化油渣萃取物的气化,实现了含碳废弃物完全利用,促进了碳循环,最大程度减少了煤炭直接液化过程的 CO_2 排放。

针对百万吨级的煤直接液化项目进行测试,可以发现:① 液化油渣通过溶剂萃取约有 50% 的碳固定在沥青产品中,由此带来 CO_2 减排量约 58 万 t; ② 以油渣萃取物替代约 10% 煤制氢的气化原料煤,即每年可以节省 13.32 万 t 气化用煤,从而 CO_2 减排量约 30 万 t; ③ 同时考虑避免油渣萃取物直接燃烧产生的 CO_2 排放,通过气化技术实现 CO_2 减排量约 35 万 t,以上 3 项合计可以实现 CO_2 减排量达 123 万 t。

4 碳减排前景分析

近年来,随着现代煤化工技术的突破及一批示范项目的建设运行,我国煤化工产业规模增长较快,已成为现代煤化工最大生产国之一。据相关统计数据,截至 2019 年底,我国煤制油、煤制天然气、煤制烯烃(甲醇制烯烃)和煤制乙二醇产能分别达 878 万 t/a、51 亿 m^3 /a、879 万 t/a(甲醇制烯烃 742 万 t/a)、433 万 t/a^[5-6]; 2019 年产量分别为 628.6 万 t、43.2 亿 m^3 、755 万 t、314 万 t。

利用煤化工项目的煤气化装置处理工厂自身产生的含碳废弃物,如有机污泥、油泥、残渣、煤泥和有机废液等,将含碳废弃废物转化为合成气是对含碳废弃废物的循环利用,实现了跨系统的碳循环,有助于煤炭转化过程实现整体碳减排,如图 6 所示。

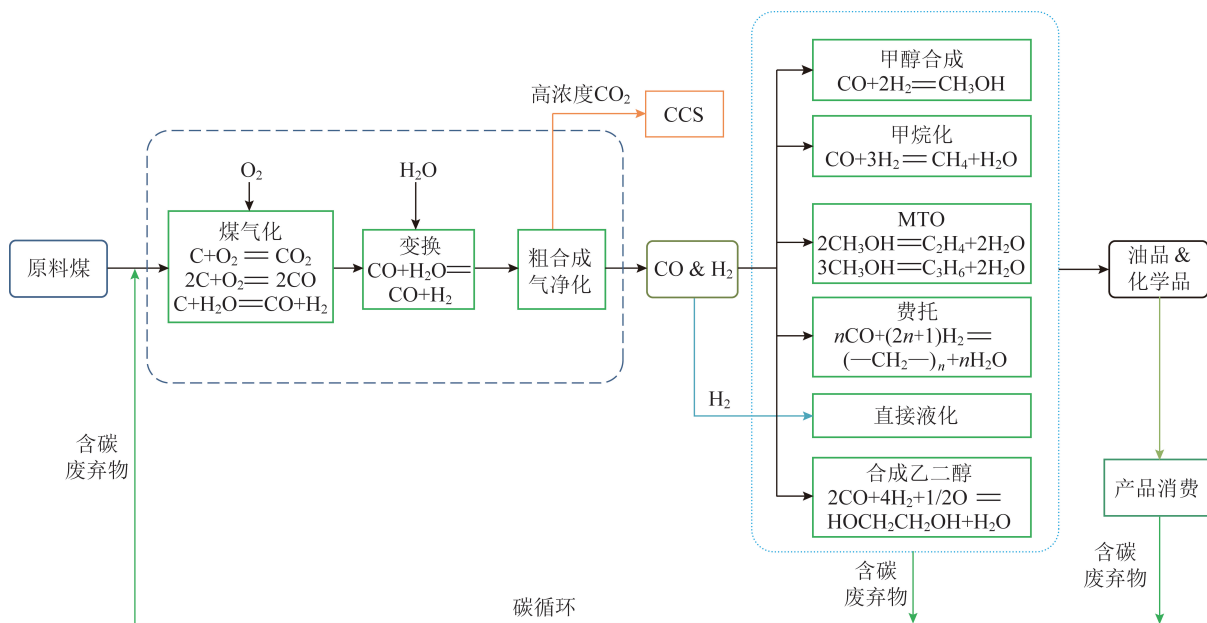


图 6 现代煤化工碳循环方案

Fig.6 Technology of carbon cycle in the process of modern coal chemical industry

以我国 2019 年现代煤化工产能为例,在典型的现代煤化工过程中引入碳循环,即可计算出整个现代煤化工产业每年减少的 CO_2 排放量 P ,按式(2)计算:

$$P = \sum P_i = \sum (A_i E_i \eta) \quad (2)$$

由于甲醇制烯烃的原料是甲醇,此处不考虑甲醇制烯烃这一现代煤化工过程。此外,对于煤直接液化过程,笔者考虑将含碳废弃物气化产生氢气用于煤直接液化,碳减排计算过程和其他以煤气化为龙头的现代煤化工过程不同,其计算分析参考第 3

节案例分析。计算结果见表 1,其中煤制油(直接)项目中液体残渣替代 10% 的气化用煤制氢,煤制天然气产能单位为亿 m^3 。假设含碳废弃物替代气化用煤量的 10%,全年可以节约煤化工行业原料煤 2 391 万 t,并实现碳减排 3 710 万 t。

与煤化工行业类似,石化行业以石油焦作为气化原料制氢也可以减少气化原料煤的用量^[23-25]。研究显示,若我国石化产业将自产石油焦作为其气化制氢装置的原料,每年减煤带来的 CO_2 减排量约 3 112 万 t。

表 1 现代煤化工行业含碳废弃物气化对 CO₂减排贡献

Table 1 CO₂emission reduction contribution of carbon containing waste gasification in modern coal chemical industry

项目	产能/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	原料煤用量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	系统过程 CO ₂ 排放量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	含碳废弃物替代 10% 原料煤	
				节约原料量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	碳减排量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)
煤制油(直接)	108	357	296	13	30
煤制油(间接)	770	3 927	4 304	393	430
煤制烯烃	879	5 678	6 505	568	651
煤制甲醇	7 500	11 250	23 170	1 125	2 317
煤制乙二醇	433	1 299	1516	130	152
煤制天然气	51	1 642	1 300	164	130
合计		24 153	37 091	2 391	3 710

5 结论与展望

1)我国是世界上最大的煤炭生产和消耗国,煤炭开发利用导致大量污染物和 CO₂排放,加剧了温室效应,碳减排压力巨大,因此,煤炭行业是我国碳排放的主要来源和未来碳减排的重点领域。

2)相比燃煤发电的煤直接燃烧过程,以煤气化技术为龙头的煤炭清洁转化过程的优势为可实现一定比例的“化学固碳”,CO₂排放量更少,且可以实现高浓度的 CO₂分离,更易实现规模化和低成本碳捕集和封存,是煤炭利用过程中非常有潜力的碳减排方式。

3)在现代煤化工过程中引入碳循环,通过煤气化装置协同处理各类含碳废弃物,通过含碳废弃物的资源化循环利用,可实现跨系统的碳循环,在源头上减少煤炭使用,减少煤炭转化过程碳排放,是一项非常有潜力的节能碳减排技术。

4)在煤化工、石化等碳排放较大的行业,国内外已经开展了气化炉协同处理含碳废弃物的研究和工业应用,但还缺乏系统性和全面性研究,需今后不断深入开展研究和创新;同时政府应该出台相关政策法规,健全碳排放财税政策,鼓励和支持碳减排技术发展,促进我国能源化工行业节能减排,向清洁化和低碳化发展。

5)在煤气化技术跨行业利用时,如气化炉协同处理农林废弃物、生活垃圾和市政污泥,政府也应制定相关政策或法律法规来进行引导,出台跨行业优惠财税政策,促进跨行业利用发展。

6)以煤共气化产业为例,2019 年我国煤化工行业可节约原料煤 2 391 万 t,实现碳减排 3 710 万 t,对于减少 CO₂排放具有重要作用,可作为我国 2060 年前实现“碳中和”目标的重要技术手段之一。

参考文献(References):

[1] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7):1949-1960.

[2] ZHANG Y, YUAN Z, MARGNI M, et al. Intensive carbon dioxide emission of coal chemical industry in China [J]. Applied Energy, 2019, 236:540-550.

[3] 孙旭东,张博,彭苏萍. 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3):132-140.
SUN Xudong, ZHANG Bo, PENG Suping. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3):132-140.

[4] 张凯,李全生. 碳约束条件下我国煤炭清洁高效开发利用战略研究 [J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(11):10-14.
ZHANG Kai, LI Quansheng. Strategic research on clean and efficient development and utilization of coal in China under carbon constraint conditions[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(11):10-14.

[5] 韩红梅,朱彬彬,龚华俊,等. 现代煤化工行业“十三五”回顾和“十四五”发展展望(一) [J]. 化学工业, 2020, 38(4):27-30.
HAN Hongmei, ZHU Binbin, GONG Huajun, et al. Summary of "13th five year plan" operation of modern coal chemical industry and development prospect of "14th Five Year Lan"[J]. Chemical Industry, 2020, 38(4):27-30.

[6] 王辅臣. 煤气化技术在中国:回顾与展望 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1):1-33.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China: Review and prospect [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1):1-33.

[7] 徐振刚. 中国现代煤化工近 25 年发展回顾·反思·展望 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8):1-25.
XU Zhengang. Review, rethink and prospect of China's modern coal chemical industry development in recent 25 years [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8):1-25.

[8] 杨方亮. 我国电力行业煤炭产品需求前景浅析 [J]. 中国煤炭, 2020, 46(8):22-31.

- YANG Fangliang. Analysis of the demand prospect of coal products in China's power industry [J]. China Coal, 2020, 46(8): 22-31.
- [9] 涂华,刘翠杰. 标准煤二氧化碳排放的计算[J]. 煤质技术, 2014(2): 57-60.
- TU Hua, LIU Cuijie. Calculation of CO₂ emission of standard coal [J]. Coal Quality Technology, 2014(2): 57-60.
- [10] 韩红梅. 煤化工生产和消费过程的碳利用分析[J]. 煤化工, 2020, 48(1): 1-4, 14.
- HAN Hongmei. Carbon utilization analysis of coal chemical production and consumption Process [J]. Coal Chemical Industry, 2020, 48(1): 1-4, 14.
- [11] 武娟妮,张岳玲,田亚峻,等. 新型煤化工的生命周期碳排放趋势分析[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 69-74.
- WU Juanni, ZHANG Yueling, TIAN Yajun, et al. Analysis on carbon emission based on the life cycle of new coal chemical industry [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(9): 69-74.
- [12] 赵志强,张贺,焦畅,等. 全球CCUS技术和应用现状分析[J]. 现代化工, 2021, 41(4): 5-10.
- ZHAO Zhiqiang, ZHANG He, JIAO Chang, et al. Review on global CCUS technology and application [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(4): 5-10.
- [13] 韩涛,赵瑞,张帅,等. 燃煤电厂二氧化碳捕集技术研究及应用[J]. 煤炭工程, 2017, 49(S1): 24-28.
- HAN Tao, ZHAO Rui, ZHANG Shuai, et al. Research and application on carbon capture of coal-fired power plants [J]. Coal Engineering, 2017, 49(S1): 24-28.
- [14] 张建府. 碳捕集与封存技术(CCS)成本及政策分析[J]. 中外能源, 2011, 16(3): 21-25.
- ZHANG Jianfu. Analysis of cost and policies of CCS [J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(3): 21-25.
- [15] 屈紫懿. 燃煤电厂烟气CO₂捕集技术经济性分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2019, 24(4): 31-34.
- QU Ziyi. Economy analysis of CO₂ collection technique for flue gas of the coal-fired power plant [J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2019, 24(4): 31-34.
- [16] 张军武. 煤化工二氧化碳捕集输送与封存概述[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(1): 16-17.
- ZHANG Junwu. Coal-chemical carbon dioxide capture transport and storage summarize [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2016, 42(1): 16-17.
- [17] 王秀芬. CCS示范工程捕集工艺优化及运转情况分析[J]. 广州化工, 2015, 43(20): 163-166.
- WANG Xiufen. Analysis of optimization and operation of the capturing process of CCS demonstration project [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(20): 163-166.
- [18] 吴秀章,舒歌平,李克健,等. 煤炭直接液化工艺与工程[M]. 北京:科学出版社, 2015: 785-805.
- [19] WANG B, HE L T, YUAN X C, et al. Carbon emissions of coal supply chain: An innovative perspective from physical to economic [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 1-13.
- [20] 舒歌平. 神华煤直接液化工艺开发历程及其意义[J]. 神华科技, 2009, 7(1): 78-82.
- SHU Geping. Development history and its significance of Shenhua coal direct liquefaction [J]. Shenhua Science and Technology, 2009, 27(1): 78-82.
- [21] 常鸿雁,程时富,王国栋,等. 神华煤直接液化残渣的萃取分离与利用研发进展[J]. 煤炭工程, 2017, 49(S1): 61-66.
- CHANG Hongyan, CHENG Shifu, WANG Guodong, et al. Study and development on extraction and utilization of Shenhua coal direct liquefaction residue [J]. Coal Engineering, 2017, 49(S1): 61-66.
- [22] 胡瑞生,李玉林,白雅琴. 现代煤化工基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- [23] 雷雳光,盖朋波. 石油焦综合利用研究进展[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(5): 21-25, 38.
- LEI Liguang, GAI Pengbo. Research development of petroleum coke comprehensive utilization [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas 2018, 47(5): 21-25, 38.
- [24] 严东. 气化炉掺烧高硫石油焦技术经济分析[J]. 大氮肥, 2020, 43(3): 164-168.
- YAN Dong. Technical and economic analysis on gasifier with blended feedstock of high sulphur petroleum coke [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2020, 43(3): 164-168.
- [25] 赵锦波. 高硫石油焦气化研究进展和技术经济分析[J]. 大氮肥, 2014, 37(4): 217-223.
- ZHAO Jinbo. Research on progress of high sulphur petroleum coke gasification and technical and economical analysis [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2014, 37(4): 217-223.