

基于全生命周期的富油煤原位热解碳排放

薛香玉, 王长安, 邓磊, 宁星, 车得福

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:控制碳排放已成为当前和未来中国社会必须解决的重大战略问题。在碳达峰的目标愿景下,煤炭行业亟需更加安全、高效和低碳的利用方法。中国西部的富油煤资源丰富,但多被直接用于燃烧发电,造成资源浪费和环境污染。富油煤原位热解提供了一种全新的煤提油路径。该方法在原位将煤炭转化为油气资源,与传统煤炭开采手段相比,减小了采空区体积,岩体结构变形损伤小,可减轻对地质构造的破坏和环境污染。但作为一个起步阶段的研究方向,鲜见到对其从全生命周期角度进行的碳排放评价。采用全生命周期(LCA)的评价方法,对富油煤原位热解项目从煤层改造、原位加热、产品加工、产品输运以及进入消费终端的全过程碳排放量进行了分析。同时,与煤间接液化和煤直接液化的碳排放清单进行了横向对比,系统分析了富油煤原位热解的碳排放量。研究表明,采用低碳能源是实现富油煤原位热解绿色低碳发展的关键,电力来源为常规电网时,处理1 t煤原位热解的LCA碳排放量约为2.234 5 t(以CO₂计);而电力来源为新能源风电时,处理1 t煤原位热解的LCA碳排放量仅为0.608 6 t(以CO₂计)。与煤间接液化和煤直接液化相比,富油煤原位热解具有明显的碳减排优势。为有效降低碳排放量,需综合运用多种减排措施,包括提高能效利用、优化加热方式以及加大清洁能源比例等。

关键词:原位热解;全生命周期;碳排放;富油煤;碳达峰

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2023)04-1773-09

Carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal based on full life cycle analysis method

XUE Xiangyu, WANG Chang'an, DENG Lei, NING Xing, CHE Defu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The control of carbon emissions has already become a great social strategic problem in China which must be solved at present and in the future. It is imperative to carry out safe, efficient, and low-carbon utilizations in the coal industry under the target of achieving carbon emission peak. Tar-rich coal is abundant in western China. It is mostly combusted for power generation, which results in the wastage of valuable resources and serious environmental pollution. The in-situ pyrolysis process of tar-rich coal provides a new method for generating oil from coal. This method is to produce oil without mining coal while alleviating damage and pollution to geological formations. Compared with traditional coal mining methods, it can reduce the size of goaf section and minimize the damage to rock structure. As a new coal-to-oil route, the in-situ pyrolysis of oil-rich coal is still at an initial stage for research, for which there are still few carbon emission

收稿日期:2022-04-06 修回日期:2022-06-09 责任编辑:张晓宁 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0444

基金项目:华能集团总部科技课题能源安全技术专题资助项目(HNKJ20-H87)

作者简介:薛香玉(1987—),女,陕西韩城人,博士研究生。E-mail: xuexiangyu@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者:车得福(1962—),男,吉林德惠人,教授,博士生导师。E-mail: dfche@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:薛香玉,王长安,邓磊,等.基于全生命周期的富油煤原位热解碳排放[J].煤炭学报,2023,48(4):1773-1781.

XUE Xiangyu, WANG Chang'an, DENG Lei, et al. Carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal based on full life cycle analysis method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1773-1781.



移动阅读

evaluations from the perspective of the full life cycle analysis. Based on the carbon emission accounting method widely adopted, the life cycle analysis (LCA) is employed to analyze the carbon dioxide emission in the whole process of an in-situ tar-rich coal pyrolysis project, including coal seam modification, in-situ heating, product processing, product transportation and terminal consumption. A lateral comparison of greenhouse gas inventory with indirect coal liquefaction and direct coal liquefaction is also carried out. At the same time, the greenhouse gas emission from the in-situ pyrolysis of tar-rich coal is analyzed systematically. The results show that it is necessary to adopt low-carbon energy in the development of in-situ pyrolysis of oil-rich coal. With power grid as the energy source, the LCA carbon emission of in-situ pyrolysis is about 2.234 5 t CO₂ for each tonne of coal treated, while with wind power as the energy source, merely 0.608 6 t CO₂. The in-situ pyrolysis of tar-rich coal has an obvious advantage in carbon emission reduction over indirect or direct coal liquefaction process. To reduce carbon emissions effectively, several mitigation measures need to be combined, including promoting energy efficiency, optimizing heat sources, and increasing the proportion of clean energy.

Key words: in-situ pyrolysis; life cycle analysis; carbon emissions; tar-rich coal; emission peak

我国“富煤少油”的能源禀赋决定了短时间内难以改变煤炭作为主体能源的局面。2018 年,我国石油对国外的依赖已升至 70%^[1],预计到 2030 年将达到 80%^[2]。石油供应已成为了我国发展的重要战略性问题,寻找石油替代路线生产燃料油是改善中国能源结构的重要途径之一。

富油煤是一种热解产油率为 7%~12% 的煤种。我国富油煤资源丰富,仅陕西省探明的富油煤资源达 129.1 亿 t^[3]。若能合理利用,必能缓解中国对于石油的进口需求。随着煤液化技术的发展,我国实现了多条煤制油技术路径,目前已建成 1 个煤直接液化工厂(DCL)和 7 个煤间接液化工厂(ICL)^[4]。传统的煤制油方式是从井下开采煤炭至地面,在地面热解设备转化成焦油、煤气和半焦,并进行深加工。然而,煤炭开采会造成地面下沉,大量堆积的煤矸石和粉煤灰占用大量土地和植被,造成环境污染和耕地流失,煤炭开采安全隐患大,极易引发开采事故,且开发成本较高。地上煤制油设备庞杂,产生的大量废水及废渣难以解决。

富油煤原位热解提出了一种全新的高效提油理念,其原理是:利用原位开采技术,不经过井下煤炭开采过程,直接将热量导入地下,在地下加热煤层,使富油煤温度升高直至发生热分解反应,产生的油气被导出到地面分离和提质,并进行加工处理,大部分碳被留在地下封存。为了强化换热过程并便于油气的溢出,需利用可控冲击波、水力压裂或爆破法等方式预先对地下煤层进行造缝,形成大规模的裂隙,为油气提供溢出通道,并采用多种方式布置加热井及生产井。加热方式包括:导热(电加热器、等离子加热器和高压工频加热器等)、高温气体对流加热(蒸汽、氮气和 CO₂ 等)、辐射加热和燃烧加热等。加热的热量来源包括传统能源或太阳能、风能和地热能等可再生低碳

能源。

与传统开采手段相比,富油煤原位热解不需要建设复杂的开采矿通道,热解的固体产物——残炭被固定在地下,传统煤炭开采造成的采空区体积减小,不会明显改动矿区的地层结构,大大降低了生产隐患^[5];同时避免了挖掘过程中的大量能源损耗和人力成本,省去了煤炭运输环节;可实现对埋藏较深区域的开采,且不需要在地面建设大型热解设备,节省了建设成本。

中国《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确要求推动煤炭等化石能源清洁低碳利用,助力 2030 年前的碳达峰行动。煤炭的清洁高效利用是降低温室气体排放的重中之重,“取氢留碳”的油气资源提取开发技术迫在眉睫^[5],富油煤原位热解具有绿色低碳开发的巨大潜力。然而,富油煤原位热解尚处于方案论证阶段,鲜见实验报道或工程应用案例。富油煤热解过程需消耗大量能量,若采用化石燃料加热,则存在开采成本高和能耗大等问题,形成大量碳排放。为了达到煤炭清洁利用和节能减排的要求,在前期建立富油煤原位热解的温室气体核算体系非常重要。探索绿色低碳且经济环保的富油煤原位开采技术,是适应国家“碳达峰”和“碳中和”发展战略的重要课题。

此外,富油煤原位热解技术是否低碳、是否值得推广,应与目前地面煤制油技术进行横向比对,才能系统客观的认识其优劣。多位学者从全生命周期角度分析了煤制油的碳排放、能耗和经济性。ZHANG 等^[4]从生命周期的角度,对煤间接制油、煤直接制油和煤焦油加氢过程的碳排放及经济性进行了评价,结果表明,煤焦油加氢的综合竞争力最好。ZHOU 等^[6]对比了煤制油和油页岩制油的全生命周期温室气体排放和耗水量,结果表明 2 种路线均存在较高的温室

气体排放和水消耗。TONG 等^[7]分析了煤直接制油和间接制油的全生命周期生产过程,对其环境风险进行了评估。富油煤原位热解技术尚属于概念提出阶段,鲜见从全生命周期角度对其进行碳排放评价。

笔者基于全生命周期计算富油煤原位热解的碳排放量,对富油煤原位热解提油、煤间接液化及煤直接液化的碳排放进行横向对比,以期全面评价富油煤原位热解的环境影响,同时,探究生产环节对碳排放的主要影响因素,从而为煤的低碳利用提供参考。

1 方 法

1.1 生命周期评价

生命周期评价 (LCA) 是一种对产品生产工艺及活动造成的环境负荷进行评价的客观过程,即分析从开采前准备到油品被消耗完毕的全过程,并计算其产生的温室气体排放量。

1.2 研究对象与计算边界

富油煤原位热解的计算对象为中国陕北神府矿区某区域地下煤层,开采深度为 260 m,可开采煤层共计 5 层,自上而下煤层的平均厚度分别为 10、10、10、10 和 8 m^[8]。加热井呈六边形布置,井间距为 20 m,生产井位于加热井的中心(图 1),加热单元的边长为 20 m 六边形、深度为 260 m,待处理的煤质量为 64 846 t。生产井中布置电加热器,热解的电力来源按电网电力和风力发电 2 种设定分别计算。为了提高热解油采收率,采用注气开采方式将热解油自地下开采到地面,加热煤层至 550 ℃,热解油收率取 10%。

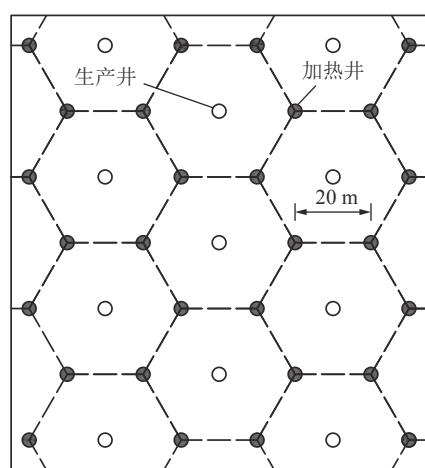


图 1 富油煤原位热解的布井方式

Fig.1 Hole pattern of in-situ pyrolysis of tar-rich coal

富油煤原位热解的 LCA 碳排放计算边界包括: 加热前准备(钻井、增透作业等)、热解转化、油加氢精制、油品运输和产品消费过程。煤地上直接液化和间接液化的碳排放计算边界包括: 原煤开采、煤炭运

输、煤炭转化、油品运输和产品消费过程。碳排放的计算边界如图 2 所示。

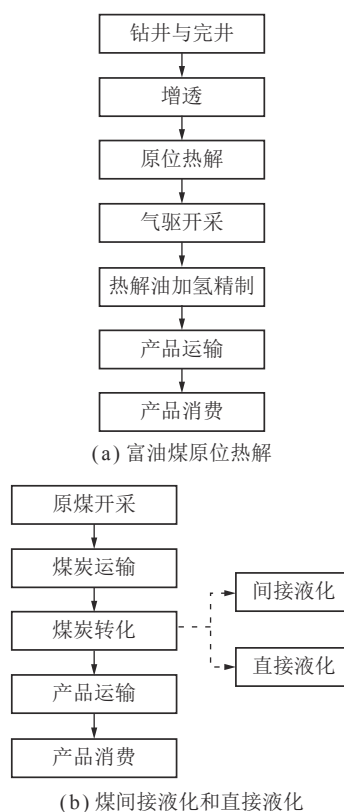


图 2 基于 LCA 的碳排放清单

Fig.2 Inventory of carbon emissions based on LCA

1.3 功能单位

为方便计算和比对,本文碳排放的功能单位为开发单位质量煤的碳排放量(以 CO₂ 计,下同),t/t。

1.4 排放因子计算方法

在进行碳排放核算时,最好采用相对准确的实测法,然而大部分的生产过程难以满足实测法的要求,可采用 IPCC2006 国家清单指南推荐的缺省值。采用碳排放因子的碳排放计算公式为

$$E_{\text{CO}_2,i} = A_D \times EF_i \quad (1)$$

$$E(\text{CO}_2) = \sum_{i=1}^n E_{\text{CO}_2,i} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{CO}_2,i}$ 为第 i 种温室气体排放量; A_D 为第 i 种活动的活动水平; EF_i 为第 i 种活动的碳排放因子; $E(\text{CO}_2)$ 为 n 种活动的碳排放总和。

1.5 数据来源

富油煤原位热解技术在我国的应用鲜见报道,很难从实际案例中获得相关数据。本文数据来源为 IPCC《碳排放指南》《省级碳排放清单》和相关文献,同时辅以典型企业的生产数据,并进行提取、整合和分析。数据难以获得时,采用相似工艺的清单数据替代。

碳排放因子数据汇总见表 1。

表 1 碳排放因子数据汇总
Table 1 Compilation of carbon emission factors data

活动	碳排放因子	来源文献
混凝土	0.538 kg/t(CO ₂ /混凝土)	[9]
耗水	0.34 kg/m ³ (CO ₂ /水)	[10]
钢套	2.7 t/t(CO ₂ /钢)	[9-10]
柴油燃烧	3.19 t/t(CO ₂ /diesel)	[11]
电网电力	0.892 t/(MW · h)	[12]
风力电力	0.017 8 t/(MW · h)	[13]
气驱	12.5 m ³ /t (油)	[14]
生产氢气	0.473 6 kg/m ³ (CO ₂ /H ₂)	[15]
水处理	45.3 kg/m ³ (CO ₂ /水)	[16]
生产蒸汽	0.299 5 t/t(CO ₂ /蒸汽)	[17]
柴油车	600 g/km	[18]
原煤开采	0.499 t/t(CO ₂ /煤)	[19]
火车运送煤炭	0.317 kg/km	[20]
煤间接液化的直接碳排放	5.59 t/t(CO ₂ /油)	[21]
煤直接液化的直接碳排放	3.9 t/t(CO ₂ /油)	[21]

由于影响因素较多,计算中无法涵盖所有的影响因素,对某些过程进行简化。另外,对于生产工艺不明确、数据清单无法获取或碳排放贡献度低的过程,如作业场地整修、设备维修和设备废弃等过程存在不确定性,不在本文计算的范围内。

2 基于 LCA 的碳排放清单

2.1 富油煤原位热解的碳排放清单

富油煤原位热解过程按照生产流程可分为以下 8 个阶段。富油煤原位热解的碳排放因子和活动水平见表 2。

(1) 勘探。

勘探过程的碳排放在整个生产周期内摊销时,其排放量通常很小,故忽略。

(2) 钻井与完井。

钻井过程包括土地清理、钻井和完井过程,一般只发生在生产初期或偶尔发生。由于土地清理过程具有不确定性,故忽略。

钻井的各类运转设备一般采用柴油机驱动。钻井消耗的柴油为 99.4 kg/m^[10],柴油的碳排放因子取 3.19 t/t(CO₂/柴油)^[11]。钻井过程中,需要大量润滑液,从而消耗大量水。钻井的耗水量为 2.5 m³/m^[10],耗水的碳排放因子为 0.34 kg/m³(CO₂/水)。

完井过程,需要消耗大量固井水泥和套管等耗材。每米钢套质量为 32 kg,制造钢套碳排放因子 2.7 t/t

表 2 基于 LCA 的富油煤原位热解的碳排放清单
Table 2 Inventory for carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal

过程	活动	活动水平A _D	碳排放因子EF
造井	钻井	99.4 kg/m (以柴油计)	3.19 t/t (CO ₂ /柴油)
	用水	2.5 m ³ /m (以水计)	0.34 kg/m ³ (CO ₂ /水)
	钢套	32 kg/m (以钢计)	2.7 t/t (CO ₂ /钢)
	混凝土	0.1 t/m (以混凝土计)	0.538 kg/t (CO ₂ /混凝土)
增透	冲击波	5.9 kJ/300 (times)	电网电力:0.892 t/(MW · h)
			风力发电:0.017 8 t/(MW · h)
原位热解	反应	—	0.183 t/t (CO ₂ /煤)
	电加热	4 000 kJ/kg	电网电力:0.892 t/(MW · h)
			风力发电:0.017 8 t/(MW · h)
气驱	注气	19 MPa	电网电力:0.892 t/(MW · h)
			风力发电:0.017 8 t/(MW · h)
加氢	电耗	195 kW · h/t (油)	0.892 t/(MW · h)
	氢耗	530 Nm ³ /t (H ₂ /油)	0.473 6 kg/m ³ (CO ₂ /H ₂)
	水处理	1.04 t/t (水/油)	45.3 kg/m ³ (CO ₂ /水)
	汽耗	0.636 t/t (蒸汽/油)	0.299 5 t/t (CO ₂ /蒸汽)
产品运输	柴油车	175 km	600 g/km
产品消费	柴油燃烧	—	3.19 t/t (CO ₂ /柴油)

(CO₂/钢)^[9-10](忽略运送和安装的碳排放)。完井过程的水泥消耗量为 0.1 t/m,制造水泥的碳排放因子为 0.538 t/t(CO₂/水泥)^[9]。

(3) 煤层增透。

可控冲击波是煤层解堵增透的一项新技术,其原理是利用水中高压放电的脉冲大电流或金属丝电爆炸,在局部范围内产生等离子体,从而推动水介质形成冲击波,对煤层进行压裂增透。其优点是冲量可控,以较小的能量和极快的能量释放速度形成类似于爆炸压裂的模式作用于储层,其脉冲储能电容器的储能为 5.9 kJ^[22],假设在煤层累计作业 300 次。当电力来源为电网外购电,电力供应碳排放因子取我国西北地区电网的平均碳排放因子 0.892 t/(MW · h)^[12]。若电力来源为风力发电,由于风力发电在整个生命周期中几乎所有能耗均来自生产和施工阶段,而运行和维护阶段几乎无污染物排放,其碳排放因子取为 17.8 kg/(MW · h)^[13]。

(4) 原位热解。

原位热解过程的碳排放包括热解反应生成的温室气体引起的直接碳排放,以及消耗电能的间接碳排放。

煤热解反应生成的气体包括 CO₂、CH₄、CO 和 C_xH_y 等^[23],除了 CO₂ 外,其余气体捕获收集后可作为

燃气用于生产,最终也会转化为 CO_2 ,采用化学计量法计算。经计算,煤热解反应过程的直接碳排放量为 $0.183 \text{ t}(\text{CO}_2/\text{煤})$ 。

煤的中低温热解反应为吸热反应,因此热解过程需消耗大量能量。煤热解产油的最佳温度窗口为 $400\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ 。热解升温速率、煤化程度、煤粒径和矿物含量等因素均会影响其吸热量,不同文献中给出的煤热解吸热量差异较大,为 $400\sim 6\,000 \text{ kJ/kg}$ (常温 $\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$)^[24-27]。结合陕北神府煤特性,煤的热解吸热量取 $4\,000 \text{ kJ/kg}$ 。加热方式为电加热,考虑加热过程中地层散热的热损失,电加热效率取60%。

(5) 气驱环节。

气驱环节是将氮气注入地层,从而提高油的采收率过程。气驱的主要耗能设备为气体压缩机,气体压缩机工作过程中消耗电能。综合考虑地层压力和地层裂缝造成的阻力,参考较为成熟的原油气驱的相关数据,假设压缩机出口压力为 19 MPa ,压缩机效率为75%,注气流量为 $12.5 \text{ m}^3/\text{t}$ (油)^[14]。电力供应碳排放因子取中国西北地区电网的平均碳排放因子 $0.892 \text{ t}(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

(6) 热解油加氢。

煤热解油在组成和性质上与原油相似,但 H/C 原

子比较低,需对热解油进行加氢精制,从而得到高品质的燃料油。我国目前已建成多种工艺的热解油加氢生产线^[4],其中全馏分煤焦油加氢的工艺流程简单,收油率可达98.3%。处理每吨原料油的电力消耗为 195 kWh ,氢气消耗为 530 Nm^3 ,消耗蒸汽 0.636 t ,产生废水 1.04 t ^[28]。以天然气为原料制取氢气的碳排放因子为 $0.473 \text{ kg/m}^3 (\text{CO}_2/\text{H}_2)$ ^[15],蒸汽的碳排放因子取 $0.299 \text{ t}(\text{CO}_2/\text{蒸汽})$ ^[17]。废水处理的碳排放量与污水处理的工艺、污水厂规模及污水性质有关,文献数据差异较大^[4,29],由于化工废水处理难度较大,废水处理的碳排放因子取 $45.3 \text{ kg/m}^3 (\text{CO}_2/\text{水})$ ^[16]。

(7) 油品运输。

假设使用 20 t 及以上中重型卡车进行油品运输,中国重型卡车大部分为柴油车,货车燃烧柴油的碳排放因子为 600 g/km ^[18],另假设油品平均运输距离为 175 km (我国货车的平均运输里程数)。

(8) 产品消费。

煤热解油经全馏分加氢后,得到以柴油为主的油。柴油燃烧的碳排放因子仍取 $3.19 \text{ t}(\text{CO}_2/\text{柴油})$ ^[11]。

2.2 煤地上间接液化和直接液化的碳排放清单

按照生产过程,煤地上间接液化和直接液化的碳排放过程包括5个阶段,其碳排放清单见表3。

表3 基于LCA的煤地上间接液化和直接液化过程的碳排放清单

Table 3 Inventory for carbon emissions from coal indirect and coal direct liquefaction process based on LCA

生产阶段	活动	间接液化		直接液化	
		活动水平	碳排放因子	活动水平	碳排放因子
原煤开采	耗煤、耗电、耗油及甲烷逸散等	—	$0.499 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{煤})$	—	$0.499 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{煤})$
煤炭运输	火车运输	40 m	0.317 kg/km	40 m	0.317 kg/km
煤炭转化	直接排放	$0.2 \text{ t} (\text{油})$	$12.9 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{油})$	$0.25 \text{ t} (\text{油})$	$3.9 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{油})$
	间接排放	$890 \text{ kW}\cdot\text{h/t} (\text{油})$	$0.977 \text{ t}(\text{MW}\cdot\text{h})$	$977 \text{ kW}\cdot\text{h/t} (\text{油})$	$0.977 \text{ t}(\text{MW}\cdot\text{h})$
	废水处理	6.1 t	$45.3 \text{ kg/t} (\text{CO}_2/\text{水})$	5.8 t	$45.3 \text{ kg/t} (\text{CO}_2/\text{水})$
	废渣运输	0.5 t	600 g/km	0.5 t	600 g/km
产品运输	柴油车	175 km	600 g/km	175 km	600 g/km
产品消费	柴油燃烧	0.2 t	$3.19 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{柴油})$	0.2 t	$3.19 \text{ t/t} (\text{CO}_2/\text{柴油})$

(1) 原煤开采。

煤炭开采环节的碳排放主要包括消耗煤炭、柴油、电力、钢材、水泥、木材、炸药和水等的碳排放,以及甲烷逸散和废物处理的碳排放。原煤开采环节碳排放因子为 $0.499 \text{ t}(\text{CO}_2/\text{煤})$ ^[19]。

(2) 煤炭运输。

我国煤炭运输主要依靠铁路、公路和水路,其中铁路占比约为70%,因此计算中只考虑内燃机车,其燃油基本以柴油为主。煤炭运输的碳排放来自于柴

油燃烧,考虑到煤制油项目一般建设在矿区周边,运输距离按 40 km 计算,铁路运输的碳排放因子取 0.317 kg/km ^[20]。

(3) 煤炭转化。

由于煤种性质、加工工艺和产品方案等不同,煤炭转换过程的二氧化碳排放因子不同^[19-20]。煤间接液化过程主要包括加压气化、煤气净化、费托合成和油品加工大概过程。该过程碳排放源主要来自气化和合成反应过程。设定煤间接液化的收油率为20%,

即每加工 1 t 煤可得到 0.2 t 的产品油;每生产 1 t 产品油的直接碳排放量为 5.59 t,消耗电能 $890 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ^[21]。煤直接液化工艺是在高温高压下煤直接与氢气反应生成液体油品,主要包括煤浆制备、催化热解加氢和提质加工过程。每生产 1 t 产品油的直接碳排放量为 3.9 t,消耗电能 $977 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ^[21]。

煤化工废水的水量大、水质复杂。煤间接液化过程和直接液化过程的水消耗量分别为 6.1 t/t(油)和 5.8 t/t(油)^[7]。煤化工废水的 COD 含量极高(可达 30 000 mg/L),处理难度更大^[30],取处理废水的排放因子 $45.3 \text{ kg/m}^3(\text{CO}_2/\text{水})$ ^[16]。

煤制油过程会产生大量的废渣,包括炉渣、废催化剂及其他有待处理的物质。这些灰渣可用于掺烧、路基材料、回填矿道及资源化处置。设定废渣产量为 0.5 t,用 60 t 重型卡车运送灰渣,平均运送距离为 40 km。

(4) 油品运输。

产品的运输方式设定为货车,其碳排放来自于柴油燃烧。

(5) 产品消费。

油品以柴油为主要组分,经过燃烧后生成 CO_2 排入大气。

3 碳排放量

3.1 富油煤原位热解 LCA 的碳排放量

基于全生命周期分析的煤原位热解的碳排放量如图 3 所示。电力来源为电网时,处理 1 t 煤原位热解碳排放量约为 2.234 5 t,按照碳排放占比依次为煤原位热解电加热间接碳排放、产品消费过程碳排放、煤原位热解直接碳排放、焦油加氢碳排放、注气驱油碳排放、造井过程碳排放、产品运输碳排放和增透过程的碳排放。电力来源为风电时,处理 1 t 煤原位热解碳排放量仅为 0.608 6 t。此时,产品消费过程为最大的碳排放源,其余碳排放源依次为热解直接碳排放、焦油加氢碳排放、热解间接碳排放、造井过程碳排放、产品运输碳排放、注气驱油碳排放和增透过程的碳排放。

由于煤电在中国电力供给中仍处于主导地位,电力来源选择电网时,富油煤热解时碳排放为主要来源,约占总排放的 82.12%,包括加热用电导致的间接碳排放和热解反应直接碳排放,占比分别为 73.93% 和 8.19%。煤热解吸热量与煤的种类和反应条件相关,不同煤种的反应热差异较大。煤热解反应热的取值直接影响加热过程的碳排放量,本文做保守估计,取 $4\,000 \text{ kJ/kg}$ 。另外,本文参考美国 ICP 油页岩热解项

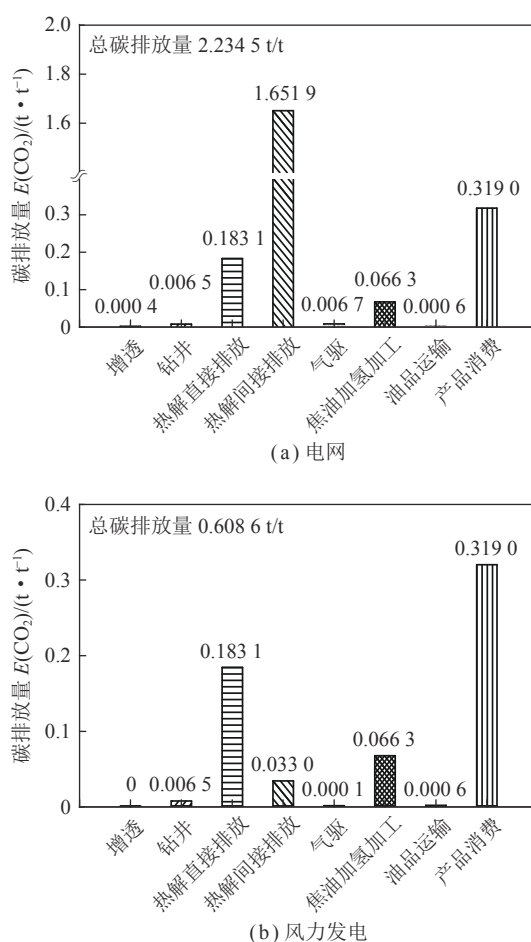


图 3 基于 LCA 的富油煤原位热解碳排放量

Fig.3 Carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal based on LCA

目给出的热损失^[31](取 40%),该值是基于较长的加热周期且未考虑热回收情况下得到的。产品消费碳排放是第二大碳排放源,以重型货车为计算对象,实际上车型和路况也会对碳排放因子的选取产生较大影响,这对估算结果带来一定的偏差。

风力发电的主要碳排放过程为原材料的开采、制造、运输和吊装环节,运营过程碳排放量几乎为 0,在降低碳排放方面起巨大作用。以风力发电为电力来源的富油煤原位热解过程的碳排放量,仅为采用电网电力碳排放量的 27.2%。此时,终端产品消费成为最大的碳排放来源,热解过程的碳排放占比降低为 35.5%。因此,采用清洁能源是实现富油煤原位热解绿色低碳发展的关键。

热解油加氢过程中加氢过程氢气量消耗较大,制氢过程碳排放强度高,应优化氢气来源,降低制氢装置的碳排放量;电力和蒸汽也是此过程主要的碳排放源,用水的碳排放影响最小。

造井过程中,钻井消耗柴油产生的碳排放占造井

过程总碳排放的 58.5% 左右,以钻机的动力碳排放为主。随着钻井技术的进步,使用天然气或电动钻机可减少对环境的影响。计算并未考虑水泥和钢套的运输及安装碳排放。

产品运输碳排放和增透过程碳排放相对较小,但在煤层大规模地下热解情境下,长期累积的碳排放量亦不能忽视,可选择就近建厂以带来最小的碳排放。

3.2 煤地上间接液化和直接液化碳排放量

煤地上间接液化和直接液化的 LCA 碳排放量,分别为 2.703 3、2.765 4 t/(CO₂/煤),如图 4 所示。2 者的最大碳排放源均来自煤液化过程,主要是液化过程中 C 和 H 原子比的调整、化石燃料燃烧和原材料加工的碳排放。相较于间接液化过程,直接液化过程的反应流程短,碳排放量相对较低。煤转化过程中用电量较大,因此由用电导致的间接碳排放也占相当比重。煤地上间接液化和直接液化均存在碳排放量高和水资源消耗大的问题,产生的大量废水和废渣难以处理。废水处理过程中,需消耗大量的电能以及投加

大量化学药剂,因此,间接产生了大量的温室气体排放。废渣运输的碳排放占比相对较小,但因其产量较大,也会给环境带来巨大挑战。

煤开采过程的碳排放量为 0.499 0 t/(CO₂/煤),是煤地上间接液化和直接液化的第三大碳排放源。煤开采过程中由于煤层被破坏导致瓦斯逸散是最主要的直接碳排放源。开采的副产品——煤矸石通常被运输到地面堆积,形成煤矸石山,向大气中缓慢排放 CO₂。人员开采活动、钢铁消耗、水泥消耗、木材消耗和水电消耗也是造成煤矿开采碳排放量高的关键过程。

3.3 碳排放量对比

基于 LCA 的富油煤原位热解、煤地上间接液化和煤地上直接液化的碳排放具有显著差异,从大到小依次为煤地上直接液化、煤地上间接液化和富油煤原位热解,富油煤原位热解体现了低碳减排的优势。

在煤地上制油的前期建设阶段,煤矿开采带来了巨大的碳排放量,每开采 1 t 煤会产生 0.499 0 t/(CO₂/煤)。而富油煤原位热解不需大量的开采活动,钻井和增透过程的碳排放仅为 0.006 9 t/(CO₂/煤)。可见,减少煤矿开采活动是煤低碳利用的重要举措。

采用电网电力时,富油煤原位热解在热解反应阶段的碳排放量较大,但热解油加氢精制阶段的碳排放量较低,约为 0.066 3 t/(CO₂/煤);而煤地上间接液化和直接液化的生产线路较长,原料消耗和能源消耗较大,2 者在煤炭转化阶段的碳排放量远大于富油煤焦油加氢精制阶段。因此,采用电网电力时,富油煤原位热解的总碳排量相对煤地上间接液化和直接液化过程均较低。

4 富油煤原位热解的敏感性分析

在计算富油煤原位热解全生命周期的碳排放时,许多参数是根据实际情况假设的,这种假设可能会导致不同的测算结果。因此,笔者从敏感性分析出发,研究电力来源为电网时,几种关键参数变化对富油煤原位热解碳排放量的影响。主要包括以下 4 个情景:

(1) 情景 1。碳排放因子的取值一般基于统计分析,但由于影响因素的复杂性及发展的不确定性,其取值仍有可能变化。我国正在加速淘汰煤电,并大力推广可再生能源电力,推动电力脱碳,电力的碳排放因子也将随之下降。在低碳背景下,我国的电力碳排放因子有望在 2030 年降到约 0.4 t/(MW·h),并在实现碳达峰后加速下降。对于电网电力碳排放因子,其敏感性分析设为下降 10%、20% 和 30%。

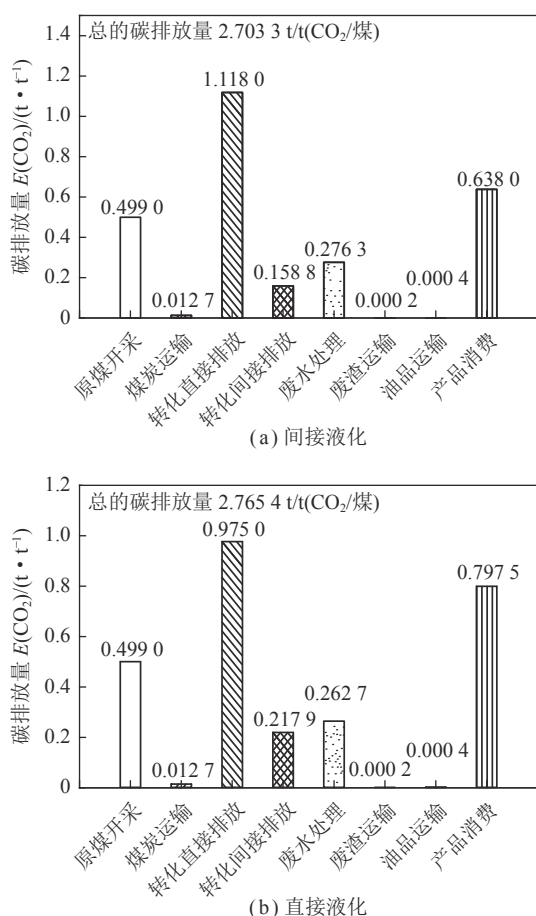


图4 基于 LCA 的煤间接液化和直接液化的碳排放量 (电力来源: 电网)

Fig.4 Carbon emissions from coal indirect liquefaction process and coal direct liquefaction process (Power source: Grid)

(2) 情景 2。考虑富油煤的热解反应吸热量变化对碳排放的敏感性, 设定吸热量下降 10%、20% 和 30%。

(3) 情景 3。热解后开采区域仍处于较高温度, 这部分热量属于高品位热能。余热回收情况下, 对热损失系数的敏感性分析设为热损失系数下降 10%、20% 和 30%。

(4) 情景 4。设定电力碳排放因子、富油煤的热解吸热量及热损失系数分别下降 10%、20% 及 30%。

图 5 给出了 4 个情景下关键参数对碳排放的敏感性。电力碳排放因子的敏感性最强, 其次为富油煤的热解吸热量, 最后为热损失系数。电力碳排放因子是全生命周期碳排放计算中需要重点控制的因素, 当其下降 30% 时, 全生命周期的碳排放量降幅约为 22.51%。富油煤的热解吸热量和热损失系数也对全生命周期的碳排放量具有很大影响, 因此高效的加热方式至关重要。在情景 4 中, 当电力碳排放因子为 $0.6244 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 、热效率为 72%、富油煤的热解吸热量为 $2800 \text{ kJ}/\text{kg}$ 时, 得到的煤原位热解的碳排放量为 $1.2498 \text{ t}/(\text{CO}_2/\text{煤})$, 相比于煤地上间接液化和直接液化技术, 富油煤原位热解在碳减排方面具有很强的竞争力。

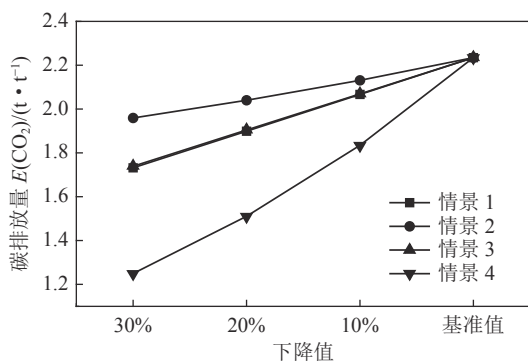


图 5 富油煤原位热解的碳排放敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal

5 富油煤原位热解减排潜力

(1) 降低供电煤耗和提高输电效率减排。电力来源为外部电网时, 由于燃煤发电仍是我国的主要电力来源, 而煤电的碳排放量高, 在大尺度的煤层应用会造成大量碳排放。这部分碳排放可在一定程度上通过技术手段降低。煤原位热解应减小外购的煤电依赖度, 可考虑自建新能源发电系统。

(2) 利用新能源的低碳优势, 与风力发电、太阳能和地热能等低碳能源相结合, 作为加热能量的补充, 从而进一步降低碳排放的压力。

(3) 降低热损耗。缩短加热时间, 采用传热效率更高的加热方式, 尽可能快速加热煤层。垂直井的造井技术较为成熟, 但储层较薄情况下, 不宜采用垂直井, 因为垂直井接触面积有限, 常用的竖直井加热方式热损耗较大。水平布井在加热速度和能效方面更为有利, 可极大减少造井数量, 同时钻井、生产钢套和水泥密封过程中的碳排放量也会相应减少。另外, 热解完成后, 地下煤层仍具有较高的温度, 应回收这部分余热, 提高生产效率。

6 结论

(1) 富油煤原位热解具有绿色低碳的巨大潜力。其最大碳排放源为加热过程, 约占总排放量的 82.12%, 具有较高的碳减排潜力。当采用风电供电时, 处理 1 t 煤原位热解的 LCA 碳排放量仅为 $0.6086 \text{ t}(\text{CO}_2)$ 。尽管上下游碳排放占比相对较小, 但基于煤原位热解的储层大尺度的认知, 也应重视其碳排放量。

(2) 通过横向对比可知, 富油煤原位热解的 LCA 碳排放量低于煤地上间接液化和煤地上直接液化的碳排放量, 体现了绿色低碳的优势。

(3) 基于 LCA 的碳排放分析为降低碳排放指明了方向。依托风力发电和光伏发电等技术, 实现高比例清洁电力供应, 减少煤电的使用, 可以有效降低碳排放。采用节能装置, 回收利用各环节的余热, 提高资源的转化利用率, 从而减少此过程的温室气体排放量。

致谢: 本文的立题和构思得到了邱爱慈院士和王双明院士的指点和启发, 在此由衷的表示感谢。

参考文献(References):

- [1] CHEN Sai, ZHANG Ming, DING Yueting, et al. Resilience of China's oil import system under external shocks: A system dynamics simulation analysis[J]. *Energy Policy*, 2020, 146: 111795.
- [2] HE Shuying, GUO Kun. What factors contribute to the mutual dependence degree of China in its crude oil trading relationship with oil-exporting countries[J]. *Energy*, 2021, 2: 120547.
- [3] JU Yang, ZHU Yan, ZHOU Hongwei, et al. Microwave pyrolysis and its applications to the in situ recovery and conversion of oil from tar-rich coal: An overview on fundamentals, methods, and challenges[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 523-536.
- [4] ZHANG Yueling, LI Junjie, YANG Xiaoxiao. Comprehensive competitiveness assessment of four coal-to-liquid routes and conventional oil refining route in China[J]. *Energy*, 2021, 235: 121442.
- [5] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1365-1377.
WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. *Journal of China Coal*

- Society, 2021, 46(5): 1365–1377.
- [6] ZHOU Huairong, YANG Qingchun, ZHU Shun, et al. Life cycle comparison of greenhouse gas emissions and water consumption for coal and oil shale to liquid fuels[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 144: 74–81.
- [7] TONG Ruipeng, ZHANG Boling, YANG Xiaoyi, et al. A life cycle analysis comparing coal liquefaction techniques: A health-based assessment in China[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 44: 101000.
- [8] 苗霖田. 榆神府矿区主采煤层赋存规律及煤炭开采对水资源影响分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- MIAO Lintian. Study on hosting pattern and influence of the seam exploitation on water recourses in the main seam of Yushenfu deposit[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [9] 中国国家发展改革委应对气候变化司. 省级温室气体排放清单[Z]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [10] MCCAY A T, FELIKS M, ROBERTS J J. Life cycle assessment of the carbon intensity of deep geothermal heat systems: A case study from Scotland[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 685: 208–219.
- [11] 王莉莉. 永煤集团煤炭矿区碳排放核算及减排对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- WANG Lili. Study on the carbon emissions accounting and reduction measures of Yongmei Group coal mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. [2020-12-29]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/xdqhbh/wsqtkz/202012/W020201229610353340851.pdf>.
- [13] 马艺, 段华波, 李强峰, 等. 基于生命周期分析的风电场GHGs减排效益[J]. *深圳大学学报*, 2020, 37(6): 653–660.
- MA Yi, DUAN huabo, LI Qiangfeng, et al. Benefits of GHGs emission reduction of wind farm based on life cycle assessment[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2020, 37(6): 653–660.
- [14] 周广响. 原油生产过程温室气体排放核算研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2016.
- ZHOU Guangxiang. Research of crude oil production process greenhouse gas emission estimation[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2016.
- [15] American Petroleum Institute. Compendium of greenhouse gas emissions estimation methodologies for the oil and natural gas industry [R/OL]. 2009. <https://www.docin.com/p-1952088453.html?toImg=1>.
- [16] 纪振宇. 基于生命周期评价的煤化工废水处理全过程节能减排研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- JI Zhenyu. Study on energy saving and emission reduction of coal chemical wastewater treatment based on life cycle assessment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [17] 胡柯. 纺织企业生产过程关键环节碳排放研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- HU Ke. Research on the carbon emissions of textile enterprises in the key link of production process[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [18] 彭美春, 李嘉如, 胡红斐. 营运货车道路运行油耗及碳排放因子研究[J]. *汽车技术*, 2015(4): 37–40.
- PENG Meichun, LI Jiaru, HU Hongfei. Research on fuel consumption and carbon emission factor of road freight trucks[J]. *Journal of Automotive Technology*, 2015(4): 37–40.
- [19] TAO Ming, CHENG Winqing, NIE Kemi, et al. Life cycle assessment of underground coal mining in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 805: 150231.
- [20] 张优, 程明今, 刘雪薇. 中国煤炭铁路运输生命周期温室气体排放研究[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 601–611.
- ZHANG You, CHENG Mingjin, LIU Xuewei. Life cycle greenhouse gas emissions from China's coal railway transport[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 601–611.
- [21] 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. Anylisis on carbon emission based on the life cvcie of new coal chemical industry[J]. *Engineering Science*, 2015, 17(9): 69–74.
- [22] 张永民, 张硕, 汤俊萍, 等. 一种多级储能可控冲击波产生装置: CN109973052A[P]. 2019.
- [23] 任磊, 杨凤玲, 贾阳杰, 等. 低阶煤热解条件对气相产物分布和半焦结构的影响[J]. *煤炭转化*, 2019, 42(6): 17–27.
- REN Lei, YANG Fengling, JIA Yangjie, et al. Effect of conditions of low-rank distribution and coal pyrolysis on gas phase product semi-coke structure[J]. *Coal Conversion*, 2019, 42(6): 17–27.
- [24] 李铖. 煤热解过程热效应的实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LI Cheng. Experimental investigation of thermal effect in coal pyrolysis process[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [25] 解强, 梁鼎成, 何璐, 等. TG-DSC同步联用测定煤热解反应热[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 538–546.
- XIE Qiang, LIANG Dingcheng, HE Lu, et al. Measurement of coal pyrolysis reaction heat by TG-DSC[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 538–546.
- [26] CHENG Xiaojie, SHI Lei, LIU Qingya, et al. Heat effects of pyrolysis of 15 acid washed coals in a DSC/TGA-MS system[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117325.
- [27] WANG Tao, LI Cheng, ZHOU Binxuan, et al. Experimental investigation of thermal effect in coal pyrolysis process[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 200: 106269.
- [28] 常院. 煤焦油加氢技术对比及经济分析[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- CHANG Yuan. Comparison and economic analysis of coal tar hydrogenation technology[D]. Xi'an: Northwestern University, 2018.
- [29] WANG Hongtao, YANG Yi, KELLER A A, et al. Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 873–881.
- [30] 刘兴社, 刘永军, 刘喆, 等. 煤化工废水中油、酚、氨回收研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(2): 1048–1057.
- LIU Xingshe, LIU Yongjun, LIU Zhe, et al. Research advances on recovery of oil, phenols, and ammonia in coal chemical wastewater[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(2): 1048–1057.
- [31] BRANDT A R. Converting oil shale to liquid fuels: energy inputs and greenhouse gas emissions of the shell in situ conversion process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(19): 7489–7495.