

引用格式: 韦波, 杨曙光, 李鑫, 等. 新疆富油煤地面与原位低碳开发利用技术现状及发展方向[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(6): 959-971.

WEI Bo, YANG Shuguang, LI Xin, et al. Current status and development directions of surface and in-situ low-carbon development and utilization technologies for oil-rich coal in Xinjiang[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 959-971.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.06.002

# 新疆富油煤地面与原位低碳开发利用技术现状及发展方向

韦波<sup>1</sup>, 杨曙光<sup>2</sup>, 李鑫<sup>1,3</sup>, 唐助云<sup>2</sup>, 张娜<sup>4</sup>, 王博<sup>4</sup>, 赵琛<sup>4</sup>, 李锦如<sup>1</sup>, 赵正威<sup>2</sup>, 冯烁<sup>1</sup>, 贾超<sup>1</sup>

(1. 新疆大学新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐 830047; 2. 新疆维吾尔自治区地质局, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐 830000; 3. 怀柔实验室新疆研究院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐 830000; 4. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐 830009)

**摘要:** 新疆富油煤资源禀赋优势显著, 其高效清洁开发利用有助于保障油气资源供给, 促进深部煤炭资源有效利用, 改善传统煤炭燃烧带来的环境问题。目前, 新疆在富油煤资源赋存特征、分布规律及浅部开发利用等方面取得一定突破, 但在深部富油煤原位转化及多能源协同开发等关键技术攻关方面仍存在瓶颈。研究从新疆富油煤地质资源量、煤基油气资源量、地面开发利用技术、地下原位热解-气化开发技术、附产CO<sub>2</sub>地质利用封存、多能互补协同开发及国家级示范区建设等角度出发, 剖析了新疆富油煤开发利用产业现状, 并提出了发展建议。研究结果包括: ①新疆富油煤资源主要富集于东部三塘湖盆地、巴里坤盆地和吐哈盆地, 利用地质块段法、体积法和丰度法, 初步预测新疆东部侏罗系1 000 m以浅富油煤资源量556.6×10<sup>8</sup> t、煤中焦油资源量65.9×10<sup>8</sup> t; ②新疆富油煤地面气化热解提质与煤基化学品制备技术较成熟, 已实现以富油煤为原料生产洁净煤、以煤焦油为原料生产煤基氢化油等油品、以净化后煤气为原料生产甲醇和乙二醇等; ③提出了富油煤原位热解-气化一体化开发技术体系, 包括地质选址评价技术、原位炉体构建技术、煤层原位加热技术和强化抽采技术; ④构建了富油煤煤化工-新能源多能互补协同开发技术路径, 主要是利用新能源制氢, 为富油煤热解加氢制备化工产品提供氢原料、为富油煤热解-气化炉加热提供热能、为富油煤热解提质炼焦提供氢原料; ⑤建议新疆建设富油煤开发利用国家级示范区, 包括富油煤地面煤化工产业示范区、深部富油煤原位热解气化煤基油气产业示范区、富油煤化工附产CO<sub>2</sub>地质利用产业示范区、深部富油煤原位热解半焦CO<sub>2</sub>封存示范区及“富油煤-新能源”多能互补协同开发示范区等, 促进新疆富油煤产业高效、可持续发展。

**关键词:** 富油煤; 煤基油气资源; 原位; 低碳开发利用; 碳封存; 多能互补

中图分类号: TE349

文献标识码: A

## Current status and development directions of surface and in-situ low-carbon development and utilization technologies for oil-rich coal in Xinjiang

WEI Bo<sup>1</sup>, YANG Shuguang<sup>2</sup>, LI Xin<sup>1,3</sup>, TANG Zhuyun<sup>2</sup>, ZHANG Na<sup>4</sup>, WANG Bo<sup>4</sup>, ZHAO Chen<sup>4</sup>, LI Jinru<sup>1</sup>, ZHAO Zhengwei<sup>2</sup>, FENG Shuo<sup>1</sup>, JIA Chao<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China; 2. Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3. Xinjiang Research Institute of Huairou Laboratory, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 4. Xinjiang Asian New Coalbed Methane Investment and Development Group Co. Ltd., Urumqi, Xinjiang 830009, China)

**Abstract:** Xinjiang has significant advantages in oil-rich coal resources. The efficient and clean utilization of these resources can ensure the supply of oil and gas resources, promote the effective utilization of deep coal resources, and mitigate environmental issues caused by

收稿日期: 2024-09-18。

第一作者简介: 韦波(1969—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事煤炭与煤层气勘探开发研究与管理。地址: 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市高新区四平路266号, 邮政编码: 830047。E-mail: weibo\_156@163.com

通信作者简介: 李鑫(1990—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事煤田地质相关研究。地址: 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街777号, 邮政编码: 830047。E-mail: lixinwaxj@xju.edu.cn

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划“新疆地区中低煤阶煤层气富集机理研究与先导示范”(2024B03002); 国家自然科学基金项目“近直立含矸煤储层CO<sub>2</sub>前置增能压裂裂缝扩展机理与界面效应”(42462021); 新疆维吾尔自治区科技重大专项“新疆难开采煤炭煤层气资源高效开发技术”(2022A03015-2); 新疆维吾尔自治区天山英才计划资助项目“新疆深部煤层气成藏地质规律及资源有利区评价”(2023TSYCLJ0005)。

traditional coal combustion. Currently, Xinjiang has achieved certain breakthroughs in understanding the occurrence characteristics, distribution patterns, and shallow development and utilization of oil-rich coal resources. However, bottlenecks remain in key technologies such as the in-situ conversion of deep oil-rich coal and multi-energy collaborative development. This study analyzed the resource of oil-rich coal in Xinjiang and the current status of its development and utilization industry from the perspectives of the geological resource quantity of oil-rich coal, the resource quantity of coal-based oil and gas, the techniques for surface chemical development and utilization, the techniques for underground in-situ pyrolysis and gasification development, geological utilization and storage of by-product CO<sub>2</sub>, integrated development of multiple energy sources, and the construction of national-level demonstration zones. Additionally, it proposed suggestions for industrial development. The results showed that: (1) Oil-rich coal resources in Xinjiang were mainly concentrated in the east, including Sandanghu Basin, Balikun Basin, and Tuha Basin. Using the geological block method, volumetric method, and abundance method, it was preliminarily predicted that the oil-rich coal resource quantity in the Jurassic strata within 1 000 meters in eastern Xinjiang was 556.6×10<sup>8</sup> t, and the coal tar resource was 65.9×10<sup>8</sup> t. (2) The technologies of surface gasification and pyrolysis upgrading of oil-rich coal and preparation of coal-based chemicals in Xinjiang were relatively mature, having realized the production of clean coal using oil-rich coal as raw material, the production of coal-based hydrogenated oil using coal tar as raw material, and the production of methanol and ethylene glycol using purified coal gas as raw material. (3) An integrated in-situ pyrolysis and gasification development technology system for oil-rich coal was proposed, including the evaluation technology for geological site selection, in-situ furnace construction technology, in-situ coal seam heating technology, and enhanced extraction technology. (4) A technological pathway for the coordinated development of oil-rich coal chemical industry and new energy through multi-energy complementarity was developed. It mainly included using new energy to produce hydrogen, which serves as a raw material for the pyrolysis and hydrogenation of oil-rich coal to prepare chemical products and oil products, provide thermal energy for the pyrolysis and gasification furnace of oil-rich coal, and supply hydrogen as a raw material for pyrolysis upgrading and coking of oil-rich coal. (5) It is recommended that Xinjiang establishes national-level demonstration zones for the development and utilization of oil-rich coal, including a demonstration zone for the surface pyrolysis and gasification of oil-rich coal for the coal chemical industry, an in-situ pyrolysis and gasification demonstration zone for oil and gas industries based on deep oil-rich coal, a geological utilization demonstration zone for by-product CO<sub>2</sub> from oil-rich coal chemical processes, a demonstration zone for CO<sub>2</sub> storage of semi-coke from in-situ pyrolysis of deep oil-rich coal, and a multi-energy complementary coordinated development demonstration zone for “oil-rich coal and new energy”, promoting the efficient and sustainable development of Xinjiang’s oil-rich coal industry.

**Keywords:** oil-rich coal; coal-based oil and gas resources; in-situ; low-carbon development and utilization; carbon storage; multi-energy complementarity

《矿产资源工业要求手册(2014修订版)》定义含油煤为格金干馏焦油产率小于7%的煤炭资源,富油煤为格金干馏焦油产率介于7%~12%的煤炭资源,高油煤为格金干馏焦油产率大于12%的煤炭资源<sup>[1-3]</sup>,研究中统一将富油煤定义为格金干馏焦油产率大于7%的煤炭资源。富油煤除煤炭资源本身固有能源属性之外,还蕴含着丰富的煤基油气资源<sup>[4-6]</sup>,富油煤热解产物固态半焦作为焦煤与无烟煤代替用煤,能实现将富油煤资源从传统燃料向多级清洁原料方向发展<sup>[7-10]</sup>。新疆是国家煤炭工业的接续基地,在当前中国油气行业“增储上产”和“双碳”目标的大背景下,新疆富油煤资源的清洁开发利用是中国未来10~30 a的重大研究领域之一。

富油煤资源开发利用存在煤炭开采深度下限以浅(以下简称浅部)和深部富油煤开发利用两个维度。当前新疆浅部富油煤资源开发利用已初步形成了富油煤资源分级分质利用技术体系,基本实现“吃干榨尽”<sup>[11-13]</sup>;但深部富油煤资源受限于煤炭深部开采技术水平和市场环境,未能得到有效开发利用。同时浅部富油煤资源开发利用依然存在着高排放、高能耗问题,“双

碳”背景下煤炭清洁利用水平仍然有待进一步提升。再者,新疆油气、煤炭、风能、太阳能等多类能源资源量巨大,但彼此协调互补实现可持续发展的技术体系与路径仍未有规模实施,尚未能有效支撑新疆能源经济可持续清洁发展。针对上述问题,研究从新疆富油煤资源概况和富油煤煤基油气资源属性角度开展研究,试图回答新疆富油煤资源特性问题;从浅部富油煤与深部富油煤开发利用技术体系角度,尝试提出新疆富油煤资源综合开发利用技术体系;结合“双碳目标”,力求构建新疆富油煤附产CO<sub>2</sub>封存利用技术与富油煤-新能源协同开发技术体系,研究分析的成果将为新疆富油煤资源开发利用提供理论支撑。

## 1 新疆富油煤资源概况

新疆富油煤资源主要富集于新疆东部地区三塘湖盆地、巴里坤盆地和吐哈盆地,其中,新疆东部富油煤具有低硫、低灰、高挥发分、高焦油产率、高热值特征。项目团队前期利用地质块段法、体积法和丰度法,初步预测新疆东

部侏罗系富油煤1 000 m以浅富油煤资源量 $556.61 \times 10^8$  t,其中,三塘湖煤田中汉水泉、库木苏和条湖勘查区煤层为富油煤和高油煤,石头梅勘查区9-1煤层为富油煤,富油煤资源量共计 $474.61 \times 10^8$  t;淖毛湖煤田中英格库勒和白石湖勘查区煤层全为富油煤,资源量共计 $28.18 \times 10^8$  t;大南湖煤田3、7、9、10、15-16、20-22、23-25、28-29号煤层为富油煤,富油煤资源量为 $47.94 \times 10^8$  t;巴里坤煤田中黑眼泉勘查区、别斯库都克勘查区、吉郎德勘查区煤层全为富油煤,富油煤资源量为 $5.87 \times 10^8$  t(表1)。

表1 新疆东部地区1 000 m以浅煤中焦油资源估算量  
Table 1 Estimation of coal tar resource quantity in coal seams within 1 000 m depth in eastern Xinjiang

地区	煤炭资源估算量/ $10^8$ t	可采煤层数/层	平均焦油产率/%	焦油资源估算量/ $10^8$ t	类型
汉水泉勘查区	3 01.7	9	13.67	41.25	高油煤
库木苏勘查区	59.48	6	13.49	8.02	高油煤
条湖勘查区	79.68	6	8.30	6.61	富油煤
石头梅勘查区	33.75	1	7.08	2.39	含油煤
英格库勒勘查区	11.59	2	10.79	1.25	富油煤
白石湖勘查区	16.59	4	11.39	1.89	富油煤
黑眼泉勘查区	1.26	1	8.56	0.11	富油煤
别斯库都克勘查区	2.36	2	10.70	0.25	富油煤
吉郎德勘查区	2.25	8	9.22	0.21	富油煤
大南湖勘查区	47.94	7	8.26	3.96	富油煤

项目团队建立了基于测井数据机器学习预测煤焦油产率的方法,利用地质块段法预测三塘湖盆地八道湾组3 000 m以浅主力煤层富油煤资源量为 $588 \times 10^8$  t,主要分布在三塘湖盆地汉水泉一条湖凹陷八道湾组、条湖—马朗凹陷西山窑组及吐哈盆地托克逊—台北凹陷西山窑组。其中,三塘湖盆地侏罗系八道湾组主力煤层全层为富油煤,埋深3 000 m以浅资源量达 $351.48 \times 10^8$  t,其中43.0%为高油煤,为世界罕见,是富油煤原位开发有利矿场。

以三塘湖盆地X1井为例,取心煤样17块格金干馏焦油产率全部大于7%,具有新疆典型富油煤煤质特征:①煤样干燥无灰基挥发分产率高,介于45.7%~56.1%,平均为50.8%;②煤岩成熟度低,煤样平均镜质组反射率介于0.40%~0.48%,平均为0.44%;③煤样镜质组含量高,介于79.1%~95.0%,平均为90.2%。目前,新疆地区深部煤炭资源勘探仍然处于初期,准噶尔盆地、塔里木盆地深部煤炭焦油产率及其控制地质因素研究工作仍处于初期,未来新疆富油煤资源评价在平面上仍需进一步细化各大盆地资源禀赋评价,同时在垂向上需要进一步精细评价西山窑组与八道湾组富油煤资源情况。

## 2 富油煤油气资源属性及煤中焦油资源量

### 2.1 富油煤油气资源属性

富油煤不仅是煤,更是煤基的油气资源<sup>[4,14-15]</sup>。与天然气相比,富油煤热解生成的气态烃以 $H_2$ 和重烃气体体积分数相对较高, $CH_4$ 体积分数相对较低,其中, $CH_4$ 体积分数介于55%~77%, $H_2$ 体积分数介于42%~51%<sup>[4]</sup>,热值基本相当。另外,油煤热解生成的气态烃可以直接用作燃料气或用于生产 $H_2$ 、甲醇等化工产品。

富油煤热解生成液态烃即煤焦油,一般呈黑色或黑褐色黏稠状,煤种、热解温度、加工工艺等均会影响焦油成分及物理化学性质变化<sup>[11,16-18]</sup>。新疆东部富油煤地面气化可生产1号煤基氢化油和2号煤基氢化油,其中1号煤基氢化油为汽油产品的优质调和组分,由烷烃( $C_5-C_{11}$ )、环烷烃、芳烃、烯烃组成的混合物,主要用作化肥、乙烯生产和催化重整原料,也可用于生产溶剂油和优质醇醚清洁燃料;2号煤基氢化油为优质柴油降凝剂( $-20 \sim -45^\circ C$ )和柴油产品的优质调和组分,主要由 $C_{12}-C_{24}$ 烷烃组成,广泛应用于国防工业、柴油内燃机车、船舰和柴油锅炉,也可用于生产优质醇醚清洁燃料。研究区油产品达到 $SO_2 \leq 10 \text{ mg/m}^3$ 、 $N_2 \leq 20 \text{ mg/m}^3$ 标准,为优质清洁燃料,其中, $SO_2$ 含量达到了汽柴油欧V、国VI的标准要求。

### 2.2 富油煤中焦油资源量

三塘湖盆地富油煤中焦油资源丰富,主要包括:汉水泉勘查区23个煤样煤焦油产率介于1.40%~26.80%,平均为13.67%,总体为高油煤;库木苏勘查区9个煤样煤焦油产率介于4.60%~24.40%,平均为13.49%,总体属高油煤;石头梅勘查区5个煤样煤焦油产率介于1.80%~15.90%,平均为7.08%,总体为含油煤,仅9-1煤层为富油煤;条湖勘查区8个煤样煤焦油产率介于2.12%~23.20%,平均为8.30%,总体为富油煤。考虑各煤田富油煤焦油产率平均值,初步预测新疆东部1 000 m以浅煤中焦油资源量达 $65.94 \times 10^8$  t(表1)。

## 3 新疆富油煤地面气化热解提质与煤基化学品制备技术现状

新疆以富油煤为原料,经干馏得到提质煤、煤焦油和煤气,然后以提质煤为原料生产洁净煤,以煤焦油为原料生产煤基氢化油等油品以及石油醚、二甲苯等化学原料,

以净化后的煤气为原料生产甲醇、甲缩醛、乙二醇(图1)。富油煤低温热解或直接液化不但可以获取当前中国对外依存度较大的油气资源,也可通过热解产物固态半焦部分代替焦煤与无烟煤,促进煤清洁利用产业转型发展<sup>[19-21]</sup>。新疆富油煤地面气化热解提质与煤基化学品制备技术主要有富油煤热解制备提质煤、附产荒煤气及其

循环利用、制备煤基氢化油、制备LNG、制备甲醇与乙二醇、合成氨尿素等;新疆富油煤地面气化主体工程建设内容主要包括低阶煤提质装置、洁净煤装置、煤气脱硫脱碳系统、煤焦油加氢装置、甲醇装置、甲缩醛装置、LNG装置、H<sub>2</sub>/CO分离装置、乙二醇装置等,配套建设公辅工程、环保工程。

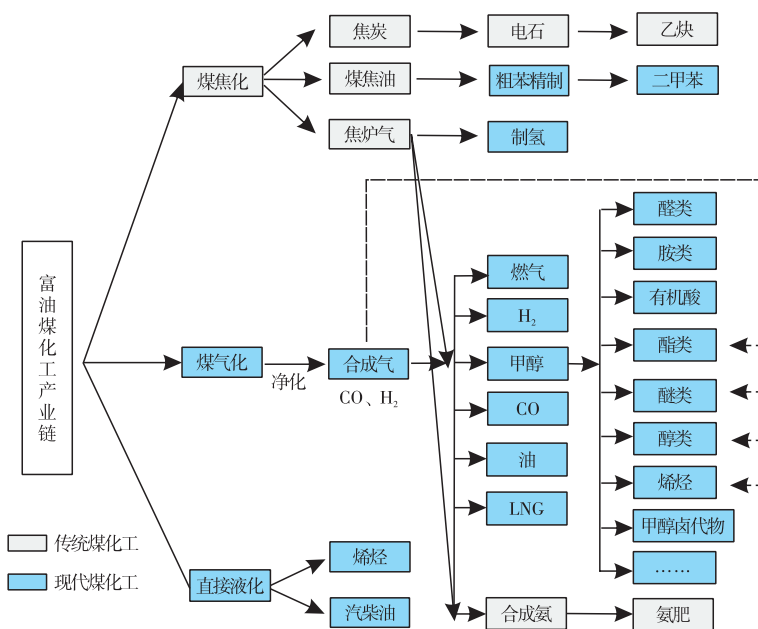


图1 新疆富油煤地面气化热解提质与煤基化学品制备技术体系

Fig. 1 Technical system for surface gasification and pyrolysis upgrading of oil-rich coal and coal-based chemical

### 3.1 富油煤热解提质技术

富油煤热解提质半焦可用于燃料、气化原料,也可作为制备水煤浆、型焦及活性炭的原料<sup>[22-25]</sup>。通过构建黏合剂配比、烘干炉砌筑技术、驻炉时间和温度控制技术体系,可有效保证铸体焦产品质量,生产指标上可使原焦粉固碳率提高5%~6%,灰分产率下降2%~3%,挥发分产率降低3%~4%,固定碳可达85%以上,转鼓强度M40达98%以上,完全可替代优质冶金铸造焦应用于冶炼铸造行业。依据新疆富油煤挥发分高、水分高、灰熔点低、含油率高的煤质特点,新疆富油煤利用企业使用SH4080型热解炉及密闭雾化熄焦方法,实现炉体结构稳定、保温效果好、物料下降均匀、布料均匀、布气均匀、加热均匀、熄焦二次污染有效控制等效果。

### 3.2 热解附产荒煤气及其净化分离利用技术

荒煤气是低阶煤中低温干馏(500~700℃)的气相产物,其有效(可燃)组分主要为H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>,并且含有N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、焦油、粉尘、粗苯、萘、硫(无机硫H<sub>2</sub>S和有机硫)、HCN、氨及其他微量有害组分(如氯离子、砷、汞等催化剂毒物)<sup>[26-28]</sup>。科学分析杂质组分、杂质组分的

危害、整体工艺流程的特点,并对铵盐、轻油、饱和水等进行有效地脱除和控制,为TSA预处理(脱焦油/萘等)提供更为有利的条件。同时,为了防止氧、负离子、重金属等对催化剂活性的影响,在进入催化剂床层前会设置保护剂、复合功能净化剂、除氧剂予以脱除。新疆富油煤附产荒煤气净化与分离根据下游用户的不同,共分为两条线:PSA-1/PSA-2。PSA-1主要是荒煤气制氢供煤焦油加氢装置,PSA-2主要是荒煤气深冷制LNG,再分离制取CO、H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>,供甲醇、乙二醇装置。

### 3.3 富油煤热解制备焦油技术

利用富油煤富氢性质生产煤基油气同时联产芳香烃化学品,工艺流程短、工况条件相对简单、能效高、水耗低、煤种适应性较强,经济优势明显,受到各方关注<sup>[29]</sup>。

### 3.4 煤焦油加氢改质技术

煤焦油加氢裂解可生产汽油、柴油和燃料油。煤焦油加氢在一定温度、压力及催化剂作用下,可实现焦油完成脱硫、脱氮、不饱和烃和芳香烃饱和,获得石脑油和优质燃料油等清洁油品,确保油品质量达到汽油和柴油调和油指标<sup>[30-32]</sup>。新疆富油煤企业采用“沸腾床加氢+固

定床加氢”工艺对煤焦油加氢改制,可将中低温煤焦油25%的胶质及沥青转化为石脑油、柴油和蜡油产品,提高液体产品收率,大幅提升装置的经济效益,同时装置稳定易控制、能耗低、油品适应性强。

### 3.5 富油煤制甲醇技术

煤是制造甲醇粗原料气的主要固体燃料,用煤制甲醇的工艺路线包括燃料的气化、气体的脱硫、变换、脱碳及甲醇合成与精制<sup>[33-35]</sup>。中国甲醇生产中使用煤作为原料的比例较高,产量几乎接近一半<sup>[36]</sup>。目前新疆富油煤制甲醇通过对荒煤气中CO<sub>2</sub>捕集,与H<sub>2</sub>混合经加压至一定压力,在高选择性和非均相催化剂存在下,在一定的温度和压力下发生化学反应,生成粗甲醇,并精馏提纯得到高纯度甲醇。整个生产工艺不产生固体废物和有毒有害副产品,使用过的催化剂由相关公司回收,通过采用此工艺可完全实现烟气中所含CO<sub>2</sub>的无害化和资源化利用,生产的甲醇是名副其实的可再生性资源。

### 3.6 富油煤制乙二醇技术

富油煤富含有机化合物,适用于制备乙二醇。工艺流程是首先将破碎、研磨好的煤粉干燥、筛分、焦化炉热解,将从煤焦化过程中得到的荒煤气净化、除杂,得到高

纯度的合成气,将制备好的合成气送入醋酸裂解反应器中,与醋酸反应生成乙二醇<sup>[36-38]</sup>。合成气中的H<sub>2</sub>和CO与醋酸发生化学反应,生成乙二醇和水。反应过程中会产生大量的热量,需要进行有效的冷却和散热。生成的乙二醇需要进行分离和提纯,去除其中的水和杂质。将从醋酸反应中得到的乙二醇进行精制,去除其中的杂质和副产物,得到高纯度的乙二醇产品。

## 4 富油煤原位热解-气化一体化提取油气资源技术体系

富油煤原位热解-气化一体化提取油气资源技术分为2个阶段:①将热量注入地下富油煤层,并实现100~600℃条件下煤层直接加热,在煤炭固态有机质热解后,将产生的液态烃和气态烃抽采至地表,提取油气组分<sup>[1,39-40]</sup>;②将原位热解后产生的半焦进行原位气化(1000~1600℃),将合成天然气抽采至地表,进一步提取煤基天然气资源。

研究工艺可有效解决地面煤热解或气化无法利用深部煤层和薄煤层等难开采富油煤资源问题<sup>[4]</sup>,提出了新疆富油煤原位热解-气化一体化开发技术体系,包括地质选址技术体系、原位炉体构建技术、煤层原位加热技术和强化抽采技术(图2)。

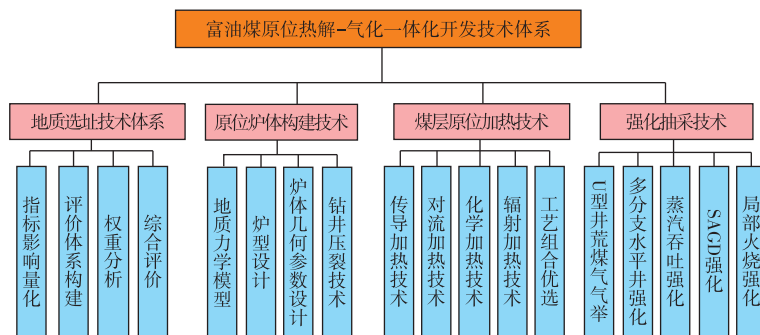


图2 富油煤原位热解-气化一体化提取油气资源技术体系

Fig. 2 Technical system for integrated in-situ pyrolysis and gasification extraction of oil and gas resources from oil-rich coal

### 4.1 地质选址技术体系

从原位热解-气化一体化开发气化过程气化炉的封闭性、稳定性、污染威胁等角度出发,提炼总结出了六大类(煤岩煤质、煤层赋存、水文地质、围岩、封闭、环境)、21个亚类对热解-气化地下炉体生产影响的关键地质指标。煤岩煤质、煤层赋存和水文地质条件指标影响原位热解气化开发过程稳定性,围岩和构造条件指标影响气化炉封闭性,而环境地质条件主要评价分析潜在环境威胁。结合具体研究区实际地质条件,优选原位热解气化开发有利区。根据新疆东部地质条件,对富油煤原位热

解气化地质指标进行了分类分级,将参与评价的亚类地质指标划分为I类(优)、II类(良)、III类(中)、IV类(劣)等4种评价级别,如表2所示。

### 4.2 原位炉体构建技术

原位炉体构建技术包括在开展富油煤“热解-气化一体化”原位开发前,对富油煤进行压裂造缝形成热量传波通道;也包括在后期“气化”过程中,有意识地通过控制燃烧和气化反应形成安全、稳定、密闭的地下气化空腔。建议采取数值模拟与“热-力”耦合计算方式,考虑现实地下加热器供热范围,推导原位热解气化后围岩应力非

表2 富油煤原位热解气化地质选区选址评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system for geological site selection of in-situ pyrolysis and gasification of oil-rich coal

大类	亚类	分类评价级别							
		I类(优)		II类(良)		III类(中)		IV类(劣)	
	煤种	褐煤	长焰煤	瘦煤	气煤	肥煤	贫煤	无烟煤	焦煤
煤岩煤质条件	水分/%	[0, 15]		(15, 35]		(35, 55]		>55	
	灰分质量分数/%	[0, 10]		(10~20]		(20, 50]		>50	
	挥发分质量分数/%	>37		[20, 37]		[10, 20)		<10	
	硫分/%	[0, 1.00]		(1.00, 3.00]		(3.00, 4]		>4	
煤层赋存条件	煤层厚度/m	5		(5, 15]		[2, 5)		>15 <2	
	煤层倾角/(°)	35		[12, 35]		(35, 70]		<12 >70	
	煤层埋深/m	[500, 1 000)		[100, 500)		[1 000, 2 000]		<100 >2 000	
	夹矸系数/%	<20		[20, 30)		[30, 60]		>60	
	夹矸层数	0		1		2		>2	
	煤厚变异系数/%	≥95		[85, 95)		(75, 85)		75	
围岩条件	顶板岩性	石灰岩	泥岩	砂质泥岩	粉砂岩	细砂岩	中砂岩	粗砂岩	砾岩
	底板岩性	石灰岩	泥岩	砂质泥岩	粉砂岩	细砂岩	中砂岩	粗砂岩	砾岩
封闭条件	距断层距离/km	<0.5		[0.5, 1)		[1, 1.5)		≥1.5	
	距矿井距离/km	≥5		(3.2, 5)		(1.6, 3.2]		≤1.6	
水文地质条件	相对涌水量/(m³/t)	<1		[1, 2)		[2, 5]		>5	
	距顶板含水层距离/m	>100		[50, 100]		[30, 50)		<30	
环境条件	氟/(μg/g)	≤100		(100, 200]		(200, 400]		>400	
	砷/(μg/g)	≤4		(4, 25]		(25, 80]		>80	
	氯/(μg/g)	≤0.05		(0.05, 0.15]		(0.15, 0.30]		>0.30	
	磷/(μg/g)	≤0.01		(0.01, 0.05]		(0.05, 0.10]		>0.10	

均质性、破断特征和诱导裂隙发育情况,提出在保证原位热解气化炉封闭性的条件下的最大传热范围,并基于此范围设计原位炉体几何参数。

以富油煤“热解-气化一体化”原位开发为思路,基于确定的原位热解-气化炉几何参数,设计原位热解-气化炉炉型。以“U型井-多通道”热解-气化工作面为例进行说明(图3),具体工作流程如下:①施工定向孔及气化通道;施工定向钻孔形成宽度为a米,长度为b米的初始热解-气化通道;②通过定向钻孔定位于第一工作面的起点,随后对第一工作面按时间依次进行原位热解和气化,直到第一工作面气化完成,最终形成宽度为m<sub>1</sub>米,长度为b米的气化-热解区;③递进地对第二、三、四等其他工作面进行原位热解和气化,直到工作面气化完成,最终形成宽度分别为m<sub>2</sub>、m<sub>3</sub>、m<sub>4</sub>米,长度为b米的热解-气化区。

### 4.3 煤层原位加热技术

煤层原位加热技术主要目的是在富油煤“热解-气化一体化”原位开发地“热解”阶段,采用水平井中的电磁感应加热管、微波加热管进行加热,通过高温热气促使地下煤炭发生热解反应,利用垂直布设的抽采井将热解形成的液态和气态有机物抽到地表。当前主要煤炭原位加

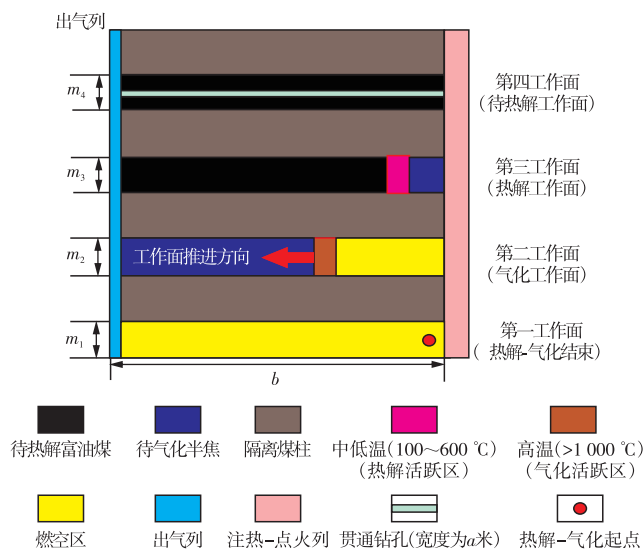


图3 富油煤“U型井-多通道”热解-气化一体化原位提取油气资源炉型设计

Fig. 3 Furnace design of “U-shaped well—multi-channel” integrated in-situ pyrolysis and gasification for oil and gas extraction from oil-rich coal

热技术包括传导加热技术、对流加热技术、化学加热技术和辐射加热技术(表3)<sup>[41]</sup>。

富油煤热解温度要求高、导热系数低、煤岩渗透性差,原位加热必须在加热方式、载热介质、热传导网络3

表3 不同原位加热技术基本原理及技术特点

Table 3 Basic principles and technical characteristics of different in-situ heating technologies<sup>[42]</sup>

加热方式	基本原理	典型技术	技术阶段	加热载体	主要优点	主要缺点
传导加热	利用电阻或导电介质直接加热,通过热量传导加热岩层	ICP技术	先导试验	电加热器	加热方式灵活,设备相对简单,易于控制	热量传递慢,加热时间长,地下水对加热干扰大
		Electrofrac技术	先导试验	石油焦		
		GFC技术	实验室	燃料电池		
		HVF技术	实验室	电阻		
对流加热	向岩层中注入高温载热气体,通过高温气体对岩层进行加热	MTI技术	大件试验	水蒸气	加热效率高,油气易产出,载热气体可循环使用	热量输送过程损失大,注热对井口和井身要求高
		CRUSH技术	试验计划	CO <sub>2</sub>		
		CCR技术	试验计划	烃类蒸汽		
		Petro-Probe技术	实验室	空气		
化学加热	通过有机质的原位氧化或燃烧放热对岩层进行加热	原位燃烧技术	先导试验	N <sub>2</sub>	加热速度快,能量利用率高	控制工艺复杂
		局部化学法技术	先导试验	N <sub>2</sub>		
辐射加热	利用高频电磁波辐射基础上的交变电场作用使岩层自身发热	RF/CF技术	实验室	高频电磁波	加热范围可选择,能量利用率高	技术成熟度低,能量传递范围有限
		LLNL技术	实验室	高频电磁波		
		微波技术	试验计划	微波		

个方面具备高效条件才能实现高效加热<sup>[42-44]</sup>。研究提出了“井上高温蒸汽+井下电加热器+水力压裂”工艺开展富油煤原位加热,具体工艺如下:①水力压裂形成高效热传导裂隙网络。基于工区地应力方位和天然裂隙系统方位确定射孔方位,力求水力压裂能够形成复杂裂隙网络。研发具有导热能力的支撑剂,保证支撑裂缝和传导热量双重目标实现;②井上高温蒸汽载热注入。水蒸气比热容、热焓值高、地面制简单、成本低、不存在污染、与煤高温反应生成CO和H<sub>2</sub>,推荐作为富油煤原位对流加热的载热介质;③井下电加热器二次加热。在富油煤的上部地层中布置或射频加热器阵列对载热介质进行二次加热以提高介质温度,连续油管顶部为散热器,通过连续油管来回拖动可以对煤层进行选择加热。

#### 4.4 强化抽采技术

富油煤地下原位热解过程中,煤层与生产井内流体的黏度和密度是决定其最终能够被抽采至地面的核心因素。研究借鉴稠油、油页岩开发提取油气资源技术,提出了富油煤原位热解提取油气资源强化抽采技术。

##### 4.4.1 U型井中热解附产荒煤气气举强化抽采

富油煤原位热解气态焦油强化抽采技术适用于焦油黏度较低(小于100 mPa·s)、常规抽采开采产能低的情形。施工时在地面利用空气压缩机和气泵将高压附产荒煤气连续地注入生产直井油管/套管内(图4),给原位热解半焦内焦油充CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>,使CO<sub>2</sub>-焦油半混相或混相,降低管柱内液柱的密度,扩大生产压差,提高生产直井产油能力。可通过边气举边放喷、先打压后气举放喷、泡

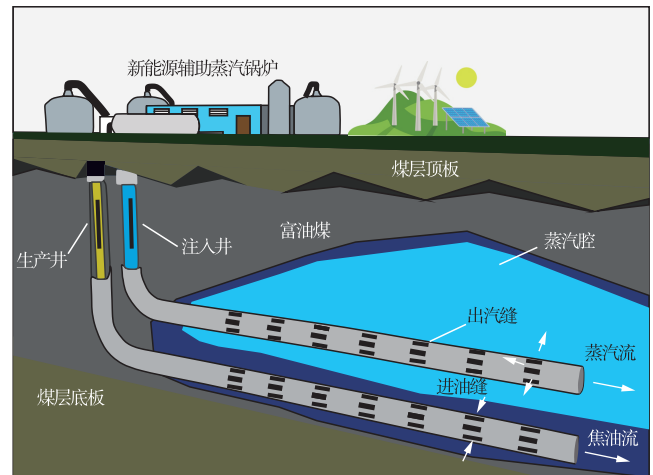


图4 厚层富油煤重力辅助泄油(SAGD)强化开采技术示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of steam-assisted gravity drainage (SAGD) enhanced recovery technology for thick oil-rich coal seams

排+气举组合工艺、连续气举辅助间歇气举等方式实现富油煤原位热解提取油气资源强化抽采。

##### 4.4.2 多分支水平井强化抽采

研究技术适用于焦油黏度较低(小于100 mPa·s)、常规抽采开采产能低情形。在选定工区范围内完成富油煤原位热解后,在工区内实施多分支水平井工艺,将热解半焦内焦油抽采至地表,可有效提升热解焦油采收率,但存在工艺复杂且成本较高问题。

##### 4.4.3 蒸汽吞吐强化抽采

适用于焦油黏度大(大于100 mPa·s)情形,由注入井连续注入蒸汽,实现井筒周围的地层,有效加热,并形成逐步扩展的蒸汽带,将含油饱和度降到很低,并将可流动原驱驱出蒸汽带。蒸汽吞吐通过注汽-焖井-一回采循

环,实现将热解产生的焦油高效抽采,适用于近井地带温度降低导致焦油黏度升高和远井焦油黏度较低情况,且具有低成本优势。

#### 4.4.4 厚层富油煤重力辅助泄油开采技术

蒸汽辅助重力泄油技术(SAGD)原是开发稠油的一项前沿技术<sup>[45-47]</sup>,适用厚层富油煤热解后黏度极大焦油(大于10 000 mPa·s)开发。此技术是先在注汽井中注入大量蒸汽,蒸汽向上扩散在厚煤层中形成大范围蒸汽腔体(图4),蒸汽腔体向四周扩展过程中与半焦中焦油发生热交换,加热后的焦油黏度降低,靠重力作用下泄到水平井中产出,可有效提升热解焦油采收率,但也存在工艺复杂且成本较高问题。

#### 4.4.5 局部火烧+附产荒煤气强化开采技术

将空气注入到富油煤层里,利用点火装置将富油煤点燃,通过控制燃烧时间控制煤层燃烧供热范围,产生热量形成降黏、蒸馏等一系列效应产生驱替焦油生产驱动力(图5),燃烧结束后注入高压附产荒煤气,可有效提升热解焦油采收率。

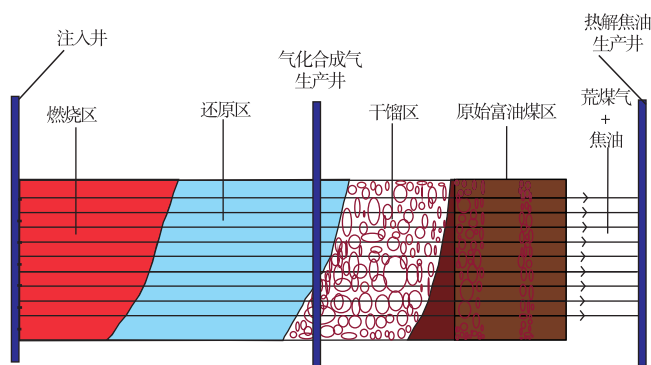


图5 局部火烧+附产荒煤气强化开采技术示意图

Fig. 5 Schematic diagram of localized combustion + by-product waste gas enhanced recovery technology

富油煤热解产物有效抽采的关键在于厘清富油煤热解焦油及气态烃产物的相态动态变化规律和流体黏度及密度动态变化规律,在此基础上,结合储层原位地质条件,优选适用的高效强化抽采技术。

## 5 附产CO<sub>2</sub>地质利用与封存技术体系

### 5.1 富油煤地面提质CO<sub>2</sub>驱油利用

新疆丰富的油气资源集中分布在塔里木盆地、吐哈盆地等区域<sup>[48]</sup>。新疆东部富油煤资源与中国石油吐哈油田公司石油区块高度重合,富油煤原位热解提质产出的CO<sub>2</sub>可用于中国石油吐哈油田公司CO<sub>2</sub>驱油生产<sup>[49]</sup>(图6)。

当前存在低渗油藏提采效果差、CO<sub>2</sub>封存量低、地层CO<sub>2</sub>窜流与逃逸风险监测困难以及缺乏对CCUS(碳捕集、利用与封存)-EOR(提高原油采收率)的碳封存量核证技术和管理方法等问题。建议基于吐哈盆地地质特征和油气开采与碳封存面临的问题,研发低渗油藏注CO<sub>2</sub>高效驱油及增封调控技术、开发CO<sub>2</sub>地层迁移与泄漏风险监控技术、黏土吸附地质封存新方法、全生命周期富油煤附产CO<sub>2</sub>-EOR源汇匹配、碳封存量核证和管理等技术方法。最终,开展低渗油藏富油煤利用附产CO<sub>2</sub>驱采封存示范性验证项目,建成CO<sub>2</sub>注入量100×10<sup>4</sup> t/a的CO<sub>2</sub>驱油封存示范项目,实现CO<sub>2</sub>驱油增产及高效碳封存目标,为中国特别是新疆大规模CCUS工程提供技术方案和决策支撑。

### 5.2 富油煤原位热解半焦CO<sub>2</sub>地质封存

采取原位热解方式,可以最大限度地提取富油煤中的油气资源并将半焦留存地下<sup>[50]</sup>。富油煤原位热解后可形成大量孔隙网络空间,孔隙结构以中孔、大孔为主,可将CO<sub>2</sub>注入热解半焦层进行永久封存<sup>[51-53]</sup>。

## 6 “富油煤-新能源”多能互补协同开发路径

新疆东部富油煤制甲醇、煤制油、甲醇制烯烃、低阶煤的分质转化与综合利用发展空间很大。与此同时,新疆东部地区还具有丰富的新能源资源,如哈密地区风电技术开发量约为7 549.8×10<sup>4</sup> kW,占全新疆的62.9%;太阳能资源方面,哈密全年日照时数为3 170~3 380 h,是中国日照时数最充裕的地区之一<sup>[54]</sup>。从系统集成角度来看,基于大规模新能源发电、大型富油煤化工的特点,可以将大规模非并网的弃风、弃光电的电解废水生产H<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>,为煤化工生产提供原料<sup>[55]</sup>。在有效消化新疆东部地区新能源资源的同时,又降低煤化工装置CO<sub>2</sub>的排放<sup>[1]</sup>。具体路径如下(图7):①新能源制氢为富油煤热解加氢制备轻质焦油、甲醇、氨、乙二醇、乙醇、汽柴油等化工产品和油品提供氢原料;②新能源制氢为富油煤气化炉加热提供热能;③新能源制氢为富油煤热解提质炼焦提供高纯氢原料。

## 7 存在问题

### 7.1 地面热解气化技术无法利用深部煤层和薄煤层等难开采富油煤资源

富油煤地面热解气化在煤炭提质利用、煤基油气资源地面开发利用转化和煤基化学品制备方面已取得很大技术进展,新疆东部已初步形成富油煤地面热解气化分

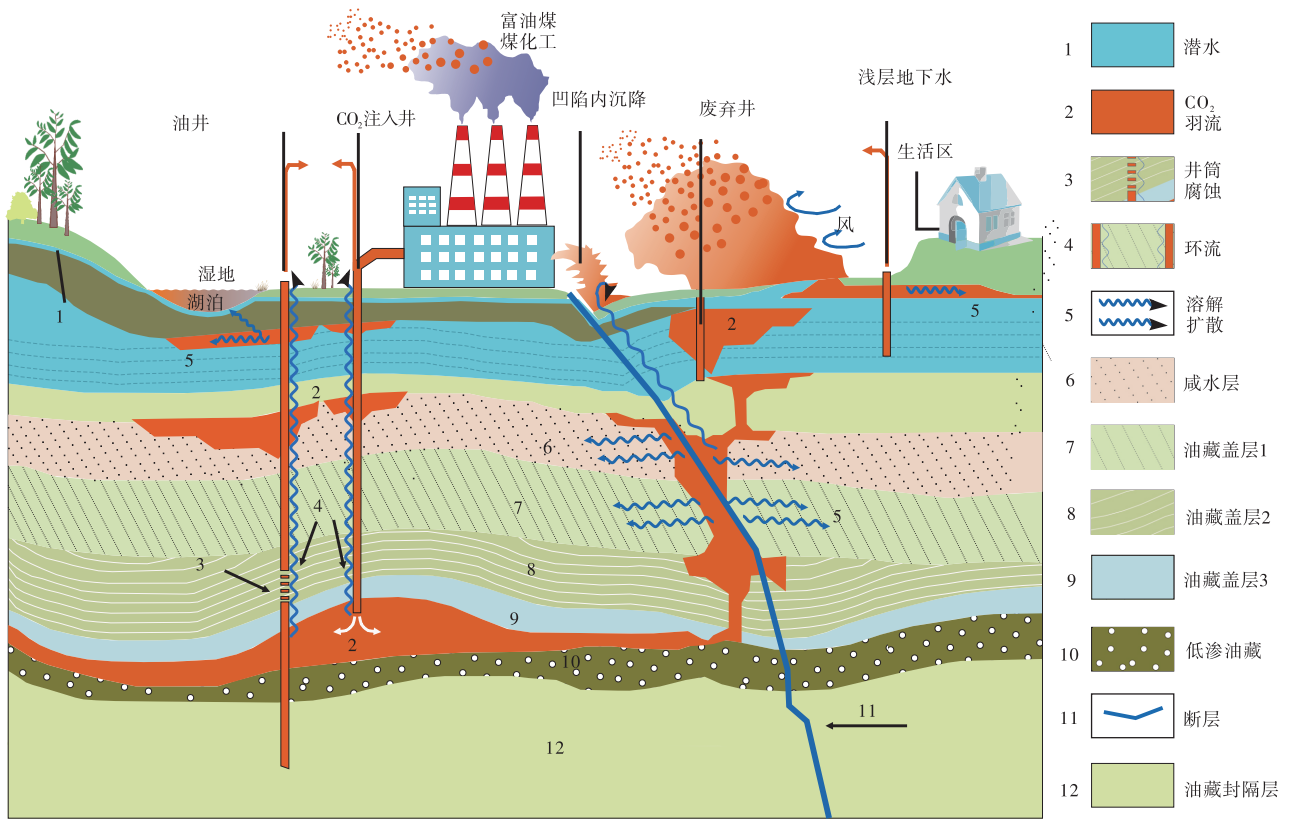
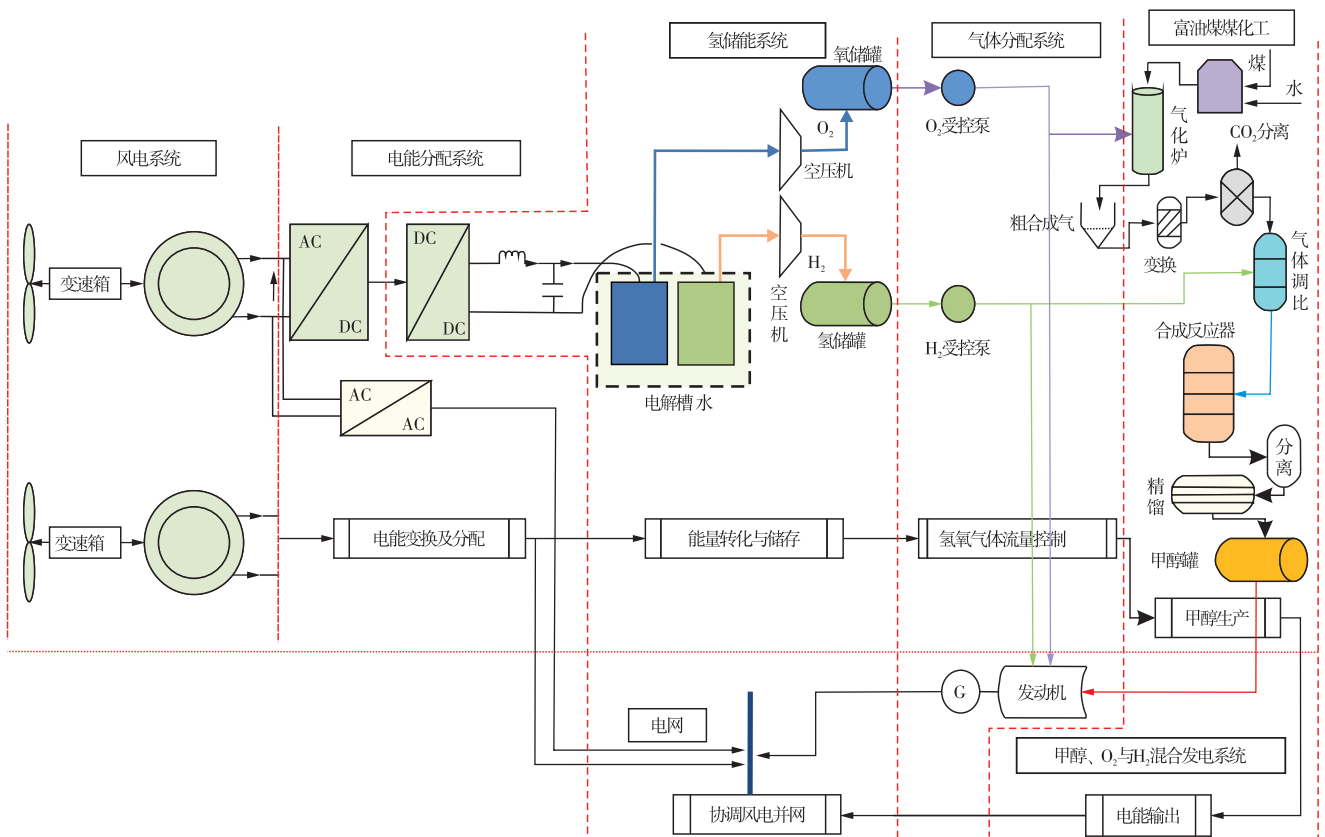


图6 利用富油煤化工副产CO<sub>2</sub>提高低渗油藏采收率示意图

Fig. 6 Schematic diagram of enhanced oil recovery in low-permeability reservoirs using by-product CO<sub>2</sub> from oil-rich coal chemical processes



注:AC表示交流电;DC表示直流电;G表示发电机。

图7 风电制氢为富油煤热解加氢制备甲醇提供氢原料示意图(据参考文献[55]修改)

Fig. 7 Schematic diagram of wind power-based hydrogen production providing hydrogen feedstock for methanol production via hydrogen-rich pyrolysis of oil-rich coal (modified from reference [55])

质利用产业化技术体系。然而据项目团队初步测算,新疆1 000~2 000 m富油煤资源量同样高达 $500 \times 10^8$  t以上,这一部分富油煤资源目前尚无有效技术加以开发利用,同时新疆部分富油煤勘探开发利用企业主采厚煤层未来一段时间将开发殆尽,而企业矿权内的薄层富油煤资源尚无可行技术进行经济、高效开发。

## 7.2 原位提取富油煤煤基油气资源基础研究弱、工业化试验尚未开展

富油煤是煤、油、气共存的特殊能源地质载体,是世界范围内能源地质领域前沿、多学科交叉的综合性和基础性新兴科学问题,富油煤研究主要包括3方面的问题:①生油组分以何种化学形式和物理状态赋存;②何种地质要素制约了富油煤的分布;③富油煤地质成因机理。

富油煤原位热解提取煤基油气资源,是通过地下原位加热,将富油煤分子结构中蕴含的油气资源转变为含天然气和轻质油的合成油气流,把约70%碳以焦炭的形式留在地下的过程。深部与薄层富油煤原位热解提取煤基油气资源,避免了深部与薄层富油煤地面热解的采矿成本、资源浪费、环境污染和CO<sub>2</sub>排放等问题。世界范围内煤炭开发利用领域共同面临的关键难点和共性前沿问题主要包括:①深部与薄层富油煤地下原位提取煤基油气资源技术路径;②力学致裂、电磁波、微波、蒸汽等技术作用下富油煤煤基油气资源采收率;③深部富油煤原位热解半焦封存CO<sub>2</sub>可行性。目前,受限于地质机理与开发工艺基础研究薄弱,新疆富油煤原位热解提取煤基油气资源工业化试验尚未开展。

## 7.3 富油煤化工附产CO<sub>2</sub>地质利用与封存规模有待进一步提升

新疆东部富油煤资源附产CO<sub>2</sub>与油气资源开发利用CO<sub>2</sub>源汇匹配程度高,碳排企业(煤化工、电厂)、碳埋存利用企业(油田)部署相对集中。目前通过广汇气源—吐哈油田的优势匹配,已初步探索出一条CO<sub>2</sub>资源化利用的有效途径,实现CO<sub>2</sub>利用封存量 $10 \times 10^4$  t/a以上,广汇能源的CCUS项目已正式开工建设,未来新疆地区将最先建成千万吨级CCUS产业基地。但富油煤化工附产CO<sub>2</sub>地质利用与封存规模有待进一步提升,以推动地方经济转型并带动区域内碳减排和经济发展的有效融合。

## 7.4 “富油煤—新能源”多能互补协同体系尚未构建

新疆东部富油煤与新能源资源均异常丰富,新疆完成碳中和目标任务重、压力大,然而“富油煤—新能源”多能互补体系的协同机制尚未建立,政策与路径研究薄弱。如“富油煤—新能源”多能互补体系在碳中和目标实现全过程

中的协同机理尚未开展研究,“富油煤—新能源”多能互补体系在碳中和目标下面临的管理问题缺乏深入解决,“富油煤—新能源”多能互补体系协同问题的本质有待揭示,高质量、系统性、原创性“富油煤—新能源”协同开发利用行动框架体系、政策措施和管理优化方案尚未系统提出。

# 8 发展方向

## 8.1 建设新疆富油煤开发利用国家级示范区

基于上述调研分析,须在未来5~10 a内,建设新疆富油煤开发利用国家级示范区来进一步推动新疆富油煤开发利用产业发展。研究提出了新疆富油煤开发利用五大国家级示范区:富油煤地面煤化工产业示范区、深部富油煤原位热解—气化一体化煤基油气产业示范区、富油煤化工附产CO<sub>2</sub>地质利用产业示范区、深部富油煤原位热解半焦CO<sub>2</sub>封存示范区、“富油煤—新能源”多能互补协同开发示范区。

## 8.2 建立富油煤产业公共重大研发平台

以疆内富油煤重点企业为主体,充分发挥高等院校、科研院所的研发基础和专业人才优势,加快富油煤开发利用科技成果的推广应用,建立可统筹富油煤化工、新能源、油气、碳封存等主要富油煤产业协同创新体系关键技术的重大研发平台,为新疆富油煤产业高质量发展和“双碳”目标的实现奠定科技研发基础。

## 8.3 贯彻创新驱动发展战略,优化富油煤产业结构

大力推进绿色制造,加快富油煤产业转型升级。全面推行富油煤产业生态化、清洁化、低碳化、循环化、集约化生产方式,大力推进富油煤化工绿色制造,积极组织一批富油煤企业、园区入选国家级、省级绿色制造名单,构建高效、清洁、低碳、循环的富油煤绿色化工体系,增强富油煤工业经济绿色发展能力,积极“延、拓、补、强”富油煤化工产业下游产品链,提高富油煤制化学品附加值。

## 8.4 推动富油煤原位提取煤基油气资源技术开发

以富油煤原位热解—气化一体化提取煤基油气资源技术体系研发为目标,开展核心技术攻关,紧盯基础研究、工程示范,实施构建富油煤地下原位热解—气化炉、地面工程建设、采油工程、测试产能先导试验,共同推动富油煤资源原位高效开发和清洁利用技术创新。

## 8.5 实施“富油煤—低渗油田—新能源”多能互补协同开发示范工程

优化富油煤产业能源消费结构,提高可再生能源占

比和利用率,鼓励使用富油煤制备的清洁高质燃料。树立战略性、全局性思维,聚焦新疆东部典型区域协同和重点用能行业协同,研究“富油煤-低渗油田-新能源”多能互补体系在碳中和目标实现全过程中的协同机制,形成高质量、系统性、原创性“富油煤-低渗油田-新能源”协同开发利用行动框架体系、政策措施和管理优化方案,强化“富油煤-低渗油田-新能源”多产业CO<sub>2</sub>封存和地质利用源汇匹配与协同发展路径研究,实施“富油煤-低渗油田-新能源”多能互补协同开发示范工程。

## 9 结论

研究从新疆富油煤地质资源量、煤基油气资源量、地面化工开发利用技术体系、地下原位热解-气化一体化开发技术体系、附产CO<sub>2</sub>地质利用与封存技术、“富油煤-新能源”多能互补协同开发路径、新疆富油煤开发利用国家级示范区建设等角度出发,剖析了新疆富油煤资源情况与开发利用产业现状,并提出了相关发展方向,主要取得以下结论:

1) 利用地质块段法、体积法和丰度法,初步预测新疆东部侏罗系富油煤1 000 m以浅富油煤资源量556.6×10<sup>8</sup> t,初步预测新疆东部1 000 m以浅煤中焦油资源量达65.9×10<sup>8</sup> t。

2) 新疆富油煤地面气化热解提质与煤基化学品制备技术主要有富油煤热解制备提质煤、附产荒煤气及其循环利用、制备煤基氢化油、制备LNG、制备甲醇与乙二醇、合成氨尿素等。

3) 提出了富油煤原位热解-气化一体化开发技术体系,包括原位热解-气化地质选址评价技术、原位炉体构建技术、煤层原位加热技术和强化抽采技术。

4) 富油煤煤化工-新能源多能互补协同开发的具体路径包括:新能源制氢为富油煤热解加氢制备轻质焦油、甲醇、氨、乙二醇、乙醇、汽柴油等化工产品和油品提供氢原料,新能源制氢为富油煤气化炉加热提供热能,新能源制氢为富油煤热解提质炼焦提供高纯氢原料。

5) 建议新疆富油煤开发利用国家级示范区,包括5个部分:富油煤地面热解气化煤化工产业示范区、深部富油煤原位热解气化煤基油气产业示范区、富油煤化工附产CO<sub>2</sub>地质利用产业示范区、深部富油煤原位热解半焦CO<sub>2</sub>封存示范区、“富油煤-新能源”多能互补协同开发示范区。

### 参考文献

[1] 王双明,王虹,任世华,等.西部地区富油煤开发利用潜力分析和技术体系构想[J].中国工程科学,2022,24(3):49-57.  
WANG Shuangming, WANG Hong, REN Shihua, et al. Potential analysis and technical conception of exploitation and utilization of tar-rich coal in Western China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24

(3): 49-57.  
[2] 王双明,师庆民,孙强,等.富油煤原位热解技术战略价值与科学探索[J].煤田地质与勘探,2024,52(7):1-13.  
WANG Shuangming, SHI Qingmin, SUN Qiang, et al. Strategic value and scientific exploration of in-situ pyrolysis of tar-rich coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 1-13.  
[3] 段中会,杨甫,王振东,等.陕北富油煤地下原位热解先导试验[J].煤田地质与勘探,2024,52(7):14-24.  
DUAN Zhonghui, YANG Fu, WANG Zhendong, et al. Pilot experiment for underground in-situ pyrolysis of tar-rich coal in the northern Shaanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 14-24.  
[4] 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.  
[5] 周安宁,张致,陈永安,等.铈改性磁性核壳HZSM-5催化富油煤热解研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(7):144-155.  
ZHOU Anning, ZHANG Zhi, CHEN Yong'an, et al. Exploring the pyrolysis of tar-rich coals under the catalysis of cerium-modified magnetic core-shell HZSM-5[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 144-155.  
[6] 王双明,鲍园,郝永辉,等.富油煤研究进展与趋势[J].煤田地质与勘探,2024,52(4):1-11.  
WANG Shuangming, BAO Yuan, HAO Yonghui, et al. Research on tar-rich coals: Progress and prospects[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 1-11.  
[7] 桑树勋,李瑞明,刘世奇,等.新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向[J].煤炭学报,2024,49(1):563-585.  
SANG Shuxun, LI Ruiming, LIU Shiqi, et al. Research progress and breakthrough directions of the key technical fields for large scale and efficient exploration and development of coalbed methane in Xinjiang[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 563-585.  
[8] 乔军伟,王昌建,赵泓超,等.基于煤岩煤质多元指标的BP神经网络焦油产率预测方法研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(7):108-118.  
QIAO Junwei, WANG Changjian, ZHAO Hongchao, et al. A method for predicting the tar yield of tar-rich coals based on the BP neural network using multiple indicators of coal petrography and coal quality[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 108-118.  
[9] 田华,王前吉,张晴,等.富油煤热解焦油在粉砂中的自然降解与挥发行为[J].环境工程学报,2023,17(8):2665-2673.  
TIAN Hua, WANG Qianji, ZHANG Qing, et al. Natural degradation and volatilization of oil-rich coal pyrolysis tar in silty sand[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2665-2673.  
[10] 王振东,段中会,杨甫,等.富油煤地下原位热解井下加热器研究现状及展望[J].煤田地质与勘探,2024,52(7):35-45.  
WANG Zhendong, DUAN Zhonghui, YANG Fu, et al. Downhole heaters for in-situ pyrolysis of tar-rich coals: A review and prospects[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 35-45.  
[11] 程坤.我国煤炭资源勘查开发主要问题及对策措施[J].中国煤炭,2024,50(7):1-7.  
CHENG Kun. Research on the main problems and countermeasures of coal resources exploration and development in China[J]. China Coal, 2024, 50(7): 1-7.  
[12] 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.
- [13] 付德亮, 段中会, 杨甫, 等. 富油煤钻井式地下原位热解提取煤基油气资源的几个关键问题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1759-1772.  
FU Deliang, DUAN Zhonghui, YANG Fu, et al. Key problems in in-situ pyrolysis of tar-rich coal drilling for extraction of coal-based oil and gas resources[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1759-1772.
- [14] 王双明, 孙强, 胡鑫, 等. 不同气氛下富油煤受热裂隙演化及热解动力学参数变化[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 15-24.  
WANG Shuangming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Fissure evolution and variation of pyrolysis kinetics parameters of tar-rich coal during heat treatment under different atmosphere[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 15-24.
- [15] 王苗, 王长安, 宁星, 等. 富油煤原位热解技术研究现状及进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3969-3984.  
WANG Miao, WANG Chang'an, NING Xing, et al. Research progress of in-situ pyrolysis technology for tar-rich coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3969-3984.
- [16] 东振, 张梦媛, 陈艳鹏, 等. 三塘湖-吐哈盆地富油煤赋存特征与资源潜力分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3789-3805.  
DONG Zhen, ZHANG Mengyuan, CHEN Yanpeng, et al. Analysis on the occurrence characteristics and resource potential of tar-rich coal in Santanghu and Turpan-Hami Basins[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3789-3805.
- [17] 曹景沛, 姚乃瑜, 庞新博, 等. 煤热解研究进展及其发展历程[J]. 化工进展, 2024, 43(7): 3620-3636.  
CAO Jingpei, YAO Naiyu, PANG Xinbo, et al. Research progress and development history of coal pyrolysis[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(7): 3620-3636.
- [18] 田华, 张若琳, 王前吉, 等. 富油煤原位热解典型污染物时空分布特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 64-72.  
TIAN Hua, ZHANG Ruolin, WANG Qianji, et al. Spatiotemporal distributions of typical contaminants from the in-situ pyrolysis of tar-rich coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 64-72.
- [19] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO<sub>2</sub>地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45-60.  
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO<sub>2</sub> storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [20] 王佟, 张博, 王庆伟, 等. 中国绿色煤炭资源概念和内涵及评价[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 1-8.  
WANG Tong, ZHANG Bo, WANG Qingwei, et al. Green coal resources in China: Concept, characteristics and assessment[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 1-8.
- [21] 梁雨彤, 黄伟, 张乾, 等. 低阶煤催化热解研究现状与进展[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3617-3622+3675.  
LIANG Litong, HUANG Wei, ZHANG Qian, et al. Research status and advances in catalytic pyrolysis of low-rank coal[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(10): 3617-3622+3675.
- [22] 王向辉, 门卓武, 许明, 等. 低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 36-41.  
WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming, et al. Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 36-41.
- [23] 马丽, 段中会, 杨甫, 等. “双碳”背景下煤炭原位地下热解采油意义研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(4): 5-7.  
MA Li, DUAN Zhonghui, YANG Fu, et al. Study on the significance of coal in-situ underground pyrolytic oil production under carbon peaking and carbon neutrality background[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(4): 5-7.
- [24] 俞尊义, 郭伟, 杨盼曦, 等. 陕北富油煤热解提油产物分布特性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 176-188.  
YU Zunyi, GUO Wei, YANG Panxi, et al. Distributions of products from the pyrolysis of tar-rich coals for tar extraction in northern Shaanxi Province, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 176-188.
- [25] 邹卓, 张莉, 孙杰, 等. 富油煤热解技术及利用前景研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(11): 31-34.  
ZOU Zhuo, ZHANG Li, SUN Jie, et al. Study on Pyrolysis Technology and Utilization Prospect of Oil-rich Coal[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(11): 31-34.
- [26] 范振华, 李绍京, 寇竹娟. 煤焦化过程中污染物的产生与控制[J]. 煤炭转化, 1997, (4): 34-40.  
FAN Zhenhua, LI Shaojing, KOU Zhujuan. Producing and controlling of the pollutant in the coal's coking process[J]. Coal Conversion, 1997, (4): 34-40.
- [27] 狄子琛, 雷飞霞, 常成功, 等. 焦化行业碳氢资源利用潜力与低碳路径评价[J]. 化工进展, 2024, 43(5): 2862-2871.  
DI Zichen, LEI Feixia, CHANG Chenggong, et al. Evaluation of hydrocarbon resource utilization potential and low-carbon path in the coking industry[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(5): 2862-2871.
- [28] 贾晓洋, 姜林, 夏天翔, 等. 焦化厂土壤中PAHs的累积、垂向分布特征及来源分析[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3525-3531.  
JIA Xiaoyang, JIANG Lin, XIA Tianxiang, et al. Analysis on accumulation, distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under a coking plant[J]. CIESC Journal, 2011, 62(12): 3525-3531.
- [29] 高浩. 陕北富油煤热解提油基础特性及煤焦油净化机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.  
GAO Hao. Basic characteristics of oil extraction from northern Shaanxi oil rich coal pyrolysis and purification mechanism of coal tar [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [30] 戴厚良. 芳烃生产技术展望[J]. 石油炼制与化工, 2013, 44(1): 1-10.  
DAI Houliang. Outlook of aromatics production technology[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2013, 44(1): 1-10.
- [31] 张晓静. 中低温煤焦油加氢技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 840-844.  
ZHANG Xiaojing. Hydrogenating process for coal tar from mid-low-temperature coal carbonization[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 840-844.
- [32] 邱泽刚, 李壮壮, 李志勤. 中低温煤焦油转化利用技术研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(4): 953-964.  
QIU Zegang, LI Zhuangzhuang, LI Zhiqin. Research Progress in Conversion and Utilization Technology of Middle/Low-Temperature Coal Tar[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2024, 40(4): 953-964.
- [33] 朱汉雄, 王一, 茹加, 等. “双碳”目标下推动能源技术区域综合示范的路径思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 559-566.  
ZHU Hanxiong, WANG Yi, RU Jia, et al. Thoughts on regional path of promoting comprehensive demonstration of low-carbon energy technology under “dual carbon” goals[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 559-566.
- [34] 葛世荣, 刘淑琴, 刘金昌, 等. 能源强国目标下煤炭安全保供及高

- 效降碳效力研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 40-51.
- GE Shirong, LIU Shuqin, LIU Jinchang, et al. Effectiveness of secure supply and carbon reduction in the coal sector for strengthening the energy power of China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 40-51.
- [35] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
- WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [36] 葛世荣, 刘淑琴, 樊静丽, 等. 低碳化现代煤基能源开发关键技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 2949-2972.
- GE Shirong, LIU Shuqing, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy[J]. Journal of China coal society, 2024, 49(7): 2949-2972.
- [37] 周张锋, 李兆基, 潘鹏斌, 等. 煤制乙二醇技术进展[J]. 化工进展, 2010, 29(11): 2003-2009.
- ZHOU Zhangfeng, LI Zhaoji, PAN Pengbin, et al. Progress in technologies of coal-based ethylene glycol synthesis[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(11): 2003-2009.
- [38] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
- LIU Feng, CAO Wengjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China coal society, 2021, 46(1): 1-15.
- [39] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋, 等. 温度对褐煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1585-1590.
- HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. Experimental study of effect of temperature on permeability characteristics of lignite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1585-1590.
- [40] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.
- XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [41] 王双明, 孙强, 胡鑫, 等. 煤炭原位开发地质保障[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(1): 1-11.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Geological guarantee for in-situ development of coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(1): 1-11.
- [42] 唐颖, 吴晓丹, 李乐忠, 等. 富油煤原位热解地下加热技术及其高效工艺[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(12): 42-50.
- TANG Ying, WU Xiaodan, LI Lezhong, et al. Heating technology of in-situ pyrolysis for tar-rich coal and its high efficiency process[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(12): 42-50.
- [43] 郭威, 刘召, 孙友宏, 等. 富油煤原位热解开发地下体系封闭方法探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 107-114.
- GUO Wei, LIU Zhao, SUN Youhong, et al. Discussion on underground system sealing methods in in-situ pyrolysis exploitation of tar-rich coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 107-114.
- [44] 李改改, 姜鹏飞, 黄佳齐, 等. 富油煤热解过程动力学参数变化规律研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 52-56.
- LI Gaigai, JIANG Pengfei, HUANG Jiaqi, et al. Study on change of kinetic parameters of tar-rich coal during pyrolysis[J]. Coal Technology, 2023, 42(10): 52-56.
- [45] 袁士义, 王强. 中国油田开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 657-668.
- YUAN Shiyi, WANG Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 657-668.
- [46] 于连东. 世界稠油资源的分布及其开采技术的现状与展望[J]. 特种油气藏, 2001, 8(2): 98-103.
- YU Liandong. Distribution of tight oil resources in the world and the present situation and prospect of their extraction technology[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2001, 8(2): 98-103.
- [47] 计秉玉. 国内外油田提高采收率技术进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 111-117.
- Ji Bingyu. Progress and prospects of enhanced oil recovery technologies at home and abroad[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(1): 111-117.
- [48] 张磊. 基于可持续发展的新疆矿产资源开发利用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006.
- ZHANG Lei. Exploitation on Xinjiang's mineral resource based on the theory of sustainable development[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2006.
- [49] 葛世荣, 王兵, 冯豪豪, 等. 煤基能源动态碳中和模式及其保供降碳效益评估[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 122-135.
- GE Shirong, WANG Bing, FENG Hao hao, et al. Dynamic carbon neutrality mode for coal-based energy systems and effectiveness assessment thereof[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 122-135.
- [50] 吴志强, 杨盼曦, 郭伟, 等. 富油煤绿色低碳转化技术研究进展[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 138-165.
- WU Zhiqiang, YANG Panxi, GUO Wei, et al. Research progress on green and low-carbon conversion technology of oil-rich coal[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 138-165.
- [51] 杨甫, 程相强, 李明杰, 等. 富油煤原位热解多物理场演化规律数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 25-34.
- YANG Fu, CHENG Xiangqiang, LI Mingjie, et al. Numerical simulations of the evolutionary patterns of multi-physical fields during the in-situ pyrolysis of tar-rich coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 25-34.
- [52] 来兴平, 方贤威. “双碳”目标驱动西部煤炭分阶控碳减熵增效与协同发展路径[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(5): 841-848.
- LAI Xingping, FANG Xianwei. Exploration of carbon control, entropy reduction, efficiency increase and their coordinated development for coal in Western China under "Dual Carbon" target [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 841-848.
- [53] 陈兆辉, 高士秋, 许光文. 煤热解过程分析与工艺调控方法[J]. 化工学报, 2017, 68(10): 3693-3707.
- CHEN Zhaohui, GAO Shiqiu, XU Guangwen. Analysis and control methods of coal pyrolysis process[J]. CIESC Journal, 2017, 68(10): 3693-3707.
- [54] 徐建华. 西北地区3种新能源发电技术效能评估[J]. 系统仿真技术, 2018, 14(2): 140-144.
- XU Jianhua. Efficiency evaluation of three new energy generation technologies in Northwest China[J]. System Simulation Technology, 2018, 14(2): 140-144.
- [55] 黄文章, 袁建军, 石国峰, 等. 风电制氢与煤化工系统集成系统可行性分析[J]. 现代化工, 2021, 41(7): 5-8.
- HUANG Wenzhang, YUAN Jianjun, SHI Guofeng, et al. Feasibility discussion about an integration system between hydrogen production by wind power and coal chemical industry[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(7): 5-8.