

富油煤原位热解技术研究现状及进展

王苗, 王长安, 宁星, 陈美静, 黄笑乐, 薛香玉, 毛崎森, 邓磊, 车得福

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西西安 710049)

摘要:我国富油煤资源量丰富, 原位热解提取油气不仅可以实现富油煤的高效清洁低碳利用, 还可以缓解油气对外依存度, 是未来富油煤开采利用的重要发展方向之一。简述了富油煤的热物理性质及分布特性, 地面热解和原位热解的工艺特点, 重点阐述了富油煤原位热解(布井方式、加热方式、原位气化热解一体化、余热利用、储层压裂、地下封闭技术)的研究现状及进展, 最后对富油煤原位热解技术的发展方向进行了展望。① 梯级利用是富油煤地面热解的重要途径, 井工式原位热解可实现井下收油, 但需解决长距离输运管道保温问题, 钻孔式原位热解是通过高温介质或电加热进行热解, 可采用矿区的分布式能源加热载热流体。② 推荐采用对流加热为主, 其他加热方式为辅的复合加热技术, 可利用原位热解后的余热预热载热流体, 也可将煤层局部氧化反应的热量用于富油煤原位热解过程, 降低载热流体的注热能耗。③ 原位气化热解一体化技术可有效提高热能利用率, 但气化空腔需进行填充。④ 综合考虑储层压裂和富油煤原位热解孔隙变化规律, 控制煤层裂缝生成路径, 形成裂缝网络, 以增强煤层热传导效率, 降低油气产物在煤层中的运移难度。⑤ 根据富油煤热解工艺特点, 选择适宜的地下体系封闭技术, 可促进富油煤原位热解过程中能量的高效利用及生态环境保护, 其中CO₂气驱止水技术在实现地下体系封闭的同时, 还可以进行油气驱替并实现CO₂的地质封存。

关键词:富油煤; 原位热解; 加热技术; 储层压裂; 体系封闭

中图分类号: TQ536 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)09-3969-16

Research progress of in-situ pyrolysis technology for tar-rich coal

WANG Miao, WANG Chang'an, NING Xing, CHEN Meijing, HUANG Xiaole, XUE Xiangyu, MAO Qisen, DENG Lei, CHE Defu

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: China has abundant resources of tar-rich coal, and the in-situ pyrolysis extraction of oil and gas can not only achieve efficient, clean, and low-carbon utilization of tar-rich coal, but also alleviate the external dependence of oil and gas, which is one of the important development directions of tar-rich coal exploitation and utilization in the future. In this paper, the thermal and physical properties and distribution characteristics of tar-rich coal, the technological characteristics of surface pyrolysis and in-situ pyrolysis are described briefly. It focuses on the research status and progress of in-situ pyrolysis of tar-rich coal (including well layout, heating method, integration of in-situ gasification and pyrolysis, waste heat utilization, reservoir fracturing, and underground sealing technology). Also, the future development direction of tar-rich coal in-situ pyrolysis technology is prospected. The findings are summarized as follows: ① the cascade utilization is

收稿日期: 2023-06-28 修回日期: 2023-10-22 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0790

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: 王苗 (1988—), 女, 陕西渭南人, 博士研究生。E-mail: xjtu_wangmiao@163.com

通讯作者: 王长安 (1986—), 男, 山东日照人, 教授, 博士生导师。E-mail: changanwang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

an important way for the surface pyrolysis of tar-rich coal. Well drilling in-situ pyrolysis can achieve underground oil recovery, but it is necessary to solve the insulation problem of long-distance transportation pipelines. Drilling in-situ pyrolysis is carried out through high-temperature medium or electric heating, and can use distributed energy from the mining area to heat the heat carrier fluid. ② It is recommended to use a composite heating technology with convection heating as the main method and others as auxiliary heating methods, which can use the residual heat from in-situ pyrolysis to preheat the heat carrier fluid, and the heat from the local oxidation reaction of coal seam can also be used in the in-situ pyrolysis process of oil-rich coal to reduce the heat injection energy consumption of heat carrier fluid. ③ The integrated technology of in-situ gasification and pyrolysis can effectively improve the utilization rate of thermal energy, but the gasification cavity needs to be filled. ④ In order to enhance the heat conduction efficiency of coal seam and reduce the migration difficulty of oil and gas products in coal seam, the porosity change law of reservoir fracturing and in-situ pyrolysis of oil-rich coal is comprehensively considered to control the fracture formation path and form the fracture network. ⑤ Based on the characteristics of the pyrolysis process of tar-rich coal, selecting suitable underground system closure technology can promote efficient energy utilization and ecological environment protection during the in-situ pyrolysis process of tar-rich coal, among them, the CO₂ gas drive water sealing technology can not only realize the closure of the underground system, but also carry out oil and gas displacement and realize the geological storage of CO₂.

Key words: tar-rich coal; in-situ pyrolysis; heating technology; reservoir fracturing; system sealing

我国石油和天然气资源总量相对较低,人均石油和天然气资源占有量约为世界平均水平的 1/15,2020 年原油对外依存度为 73.5%,天然气对外依存度为 43.2%^[1],能源供给安全成为制约经济发展的重要影响因素^[2-3]。我国能源结构呈现“缺油、少气、相对富煤”的资源禀赋特征^[4],短期内煤炭仍将作为我国的主体能源^[5]。我国低阶煤约占煤炭储量的 50% 以上,富油煤主要赋存于中低变质煤中,富含较多的可生成油气产物的富氢结构^[4,6],是一种煤基油气资源^[7-8],在 500~700 °C 热解时所得焦油产率介于 7%~12%^[9-10]。

王双明等^[1]提出按照优先生产油气的原则开发利用富油煤资源,通过热解将高碳含量的煤转化为碳含量较低、热值较高的合成气或液体燃料^[11],将实现富油煤从燃料向“燃料+原料”的转化。煤炭在应对能源危机的同时,也面临着“碳达峰、碳中和”目标要求下清洁高效低碳利用的重大挑战^[12-13]。赵阳升等^[14]提出了原位改性流体化采矿方法,即采用物理或化学的方法在原位对矿物进行流体化,实现清洁开采的目的。葛世荣等^[15]提出煤炭地下原位热解技术方案,将热量导入地下使煤炭受热生成液态和气态有机质。富油煤地下原位热解可缓解我国能源安全,且可实现煤炭的绿色低碳化开采。

国内外学者对煤热解技术开展了大量研究工作,但富油煤原位热解技术近年来随着能源安全问题的逐渐凸显而受到了越来越多的关注,目前主要处于概念性提出和实验室研究阶段,已知仅有陕西煤田地质集团有限公司联合西安交通大学等单位在开展富油煤原位热解先导性试验过程中。因此,目前尚未有关

于富油煤原位热解技术研究现状的相关总结分析。在完成对大量研究资料的收集整理后,笔者结合本团队已经开展的部分研究工作,对富油煤的煤质特性及分布特性、原位热解加热方式、余热利用、储层压裂以及地下体系封闭技术等方面进行了概述,重点分析了不同原位加热技术的特点以及目前所面临的技术难点,为富油煤原位热解过程的高效加热及热能利用提供一定的理论参考,有望推动富油煤原位热解技术的进一步研发与应用。

1 富油煤的热物理性质及分布特性

1.1 热物理性质

富油煤本质上是煤岩,和油页岩干酪根以腐泥型为主不同,煤的成岩母质是高等植物,干酪根类型主要是腐殖型。富油煤热解时芳香簇间的桥键、脂肪侧链和脂肪小分子等不稳定化学键发生裂解,并形成自由基碎片,是形成油气产物和半焦的关键^[4],焦油产率与富油煤中的富氢结构含量有关。干酪根是一种复杂的固态有机化合物,富含脂肪烃结构,芳烃结构较少,受热分解可生成大量烷烃和少量烯烃。富油煤和油页岩在热物理性质、热解特征上有很大的不同^[16],煤的传热能力受导热系数、热扩散系数和比热容等热物性参数的影响^[17]。不同岩石热物性参数见表 1。

富油煤一般为中低阶煤,其导热系数、热扩散系数远小于其他岩石,比热容远大于其他岩石,在相同的质量和受热条件下,煤的传热速率低,受热升高相同温度所需的热量,在加热过程中煤体内部温度差异大,即要求在原位加热富油煤时应该选择更高效的

表1 不同岩石热物理参数^[16, 18-20]Table 1 Thermophysical parameters of different rocks^[16, 18-20]

岩石	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)	比热容/ (J · (g · K) ⁻¹)	热扩散系数/ (mm ² · s ⁻¹)
煤	0.21~0.91	1.20~7.23	0.03~0.23
页岩	1.79~3.14	0.73~0.88	0.64~0.86
泥岩	1.23~2.22	0.80~0.93	0.81~0.91
油页岩	0.54~1.67	0.47~1.24	0.53~1.00

加热技术、提供更大的热量、采用更均衡的传热方式来提高加热效率^[16]。HUANG等^[21]利用 ReaxFF MD 模拟研究了加热速率对富油煤热解过程的影响,结果表明较慢的加热速率有助于获得更多的气体产物,抑制焦油碎片之间的缩合反应,促进其裂解,可以获得更多的轻质焦油。对于煤质传热过程的研究,大多数学者是从煤的热物理参数角度进行分析^[22],不同煤化程度煤的显微组分子结构差异较大,煤中镜质组含较多的脂肪结构和烷基侧链,惰质组的脂肪结构和富氢结构较少,稳定性强^[6]。煤的热量传递过程受到显微组成及其分布的影响,惰质组的导热系数和热扩散系数大于镜质组,受热时率先进入高温区^[22]。镜质组和壳质组含氢量越高,煤热解过程越容易产生更多的焦油,油页岩中的镜质组含量较少。富油煤的热物理性质及显微组分的组成分布特性,是原位热解传热过程首先解决的关键基础问题之一。

充分利用富油煤特性,实现富油煤从单一固态燃料向煤基油气资源的转变,可增加油气资源供给渠道和供给量,推动相关技术产业化。

1.2 分布特性

我国富油煤资源主要分布在陕西、内蒙古、宁夏、甘肃和新疆 5 个省份^[23],初步测算的资源量为 5 500 亿 t 以上,煤中潜在油资源为 500 亿 t,气资源量约为 75 万亿 m³^[1, 4, 24]。西北 5 省份以富油煤为主的煤炭消费中,75% 用作动力燃烧,20% 用于化工领域,煤制油气产业占比较低^[1]。陕西省是我国煤炭大省,煤炭资源量居全国第 4^[25],其中富油煤资源量高达 1 500 亿 t,按照陕西省 2020 年煤炭资源生产规模,全省每年煤炭中焦油产量约 6 000 万 t,是大庆油田年产量的 1~2 倍^[1, 24]。因此,我国富油煤资源富集地区“煤替油”产业的规模化发展具有资源基础^[13]。2020 年,中国工程院重点咨询研究项目“西部富油煤开发战略研究”指出:煤基油气资源开发利用应服务国家增加油气供给的需求,并提出了“将富油煤纳入非常规油气资源”的政策建议^[4]。

我国东部地区 1 000 m 内的煤炭浅部资源接近枯

竭,很多煤矿区已转向开发 800 m 甚至 1 000 m 以下的煤炭资源,深部煤炭资源开采是今后发展的必然趋势^[26]。但深部煤岩体处于高地应力、高瓦斯、高温、高渗透性等条件下,受低温和冲击地压影响,安全隐患问题较多,尚无井工开采的技术和经济条件^[27]。西北地区生态环境脆弱,水资源匮乏,煤炭大规模高强度开采与区域生态安全存在明显矛盾^[13]。

富油煤向油气产品的工业转化,既可以增加国内油气供给、缓解油气对外依存度,又符合煤炭清洁低碳发展路径,利于我国实现“碳达峰碳中和”目标^[23]。

2 富油煤热解工艺

与常规油气资源开发不同,富油煤中需要借助人工热解实现煤中不稳定化学键裂解,进而生成油气^[4],富油煤热解工艺主要包括地面热解工艺和原位热解工艺。

2.1 富油煤地面热解工艺

目前对富油煤的热解转化主要是从井下将煤开采至地面进行热解,提取煤中的油气资源,尽管地面热解技术发展较为成熟,但仍存在半焦大量堆积、高温油气除尘困难、碳排放量大、地面生态环境破坏严重、开采及利用成本高等问题,严重制约了地面热解的可持续发展^[28-30]。针对以上问题,企业与科研院所在热解-气化一体化、热解-提油-燃烧-发电一体化等新型综合一体化技术方面开展了大量研究^[23]。

陕西延长石油集团研发的煤粉热解-半焦气化分级转化一体化技术,将粉煤一步转化成高品质中低温煤焦油和合成气,煤焦油收率达 15% 以上^[4]。中科院提出通过热解最大化地提取低阶煤中的油气资源,固体产物半焦可用于发电或者气化加工为液体燃料^[23]。岑可法等^[31]提出低阶煤热解-气化-燃烧分级转化发电技术,并对灰渣进行资源化回收,实现污染物近零排放。太原理工大学提出将低阶煤进行快速热解提油,生成的煤气与半焦气化产生的煤气混合后进入燃气-超临界二氧化碳发电机组进行发电,实现煤热解-气化一体化油电联产,系统能效约为 50.68%^[32]。富油煤地面热解工艺中,一体化技术发展前景较好。

2.2 富油煤原位热解工艺

针对深部煤炭资源难以开采的问题,谢和平等^[33-34]提出了深部煤炭资源原位化学转化流态化开采技术构想,即利用化学反应将煤炭直接原位转化为液体或气体,初步形成了煤炭深部原位流态化开采的技术框架。地下原位热处理技术是目前我国绿色低碳化开采煤炭资源的主要研究方向,主要包括地下原位气化

和地下原位热解技术。

地下原位气化是利用富油煤的可控燃烧,将固态煤炭资源转化为多种气态物质,经过分级处理后形成可供使用的燃气资源。该技术预计将在2030年实现工业化生产,目前面临的关键技术是:地下气化衍生污染物防控技术、产气稳控技术、发电与CO₂封存技术等^[15]。

地下原位热解概念如图1所示,将热量导入地下富油煤中对其直接加热(约600℃),所得油气资源采出至地面进行后续分离及深加工,并将半焦保留在地下^[16],而半焦具有显著增加的内表面积,为CO₂储存提供了巨大的潜力。

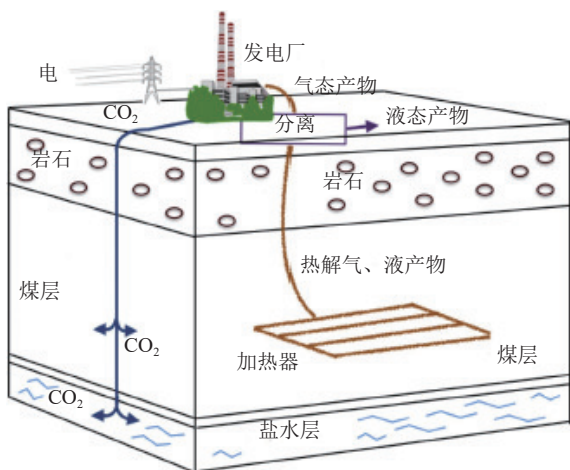


图1 地下原位热处理概念示意^[11]

Fig.1 Schematic diagram of underground in-situ heat treatment concept^[11]

葛世荣^[15]提出向地下煤层注入含催化剂的高温介质,进行煤炭原位干馏,或利用电磁感应和微波辐射加热技术,实现煤炭原位热解提取油气。相比传统的地面处理工艺,地下原位热处理可降低对环境的破坏,降低运输和人工成本,而且可开发深层、高厚度的富油煤油气资源,受煤层形态和分布特征影响较小^[35]。与地下原位气化技术相比,原位热解技术由于半焦被固定在地下,不存在明显的采动空间,对地层结构影响较小^[4,35],且富油煤热解后在地下残留的固体半焦,其性质接近于无烟煤,显著提高了煤层的煤化程度,后期可将残留固体开采至地面;由于产物的大量析出,使半焦层形成发达的孔隙结构,可充分利用富油煤原位热解半焦进行CO₂封存。

原位热解技术主要应用于油页岩开采领域,富油煤和油页岩有着相似的矿藏条件^[36],这种技术应用在富油煤热解领域,将具有广阔的应用前景,目前富油煤原位热解技术鲜有示范规模及先导性试验公开报道。

3 富油煤原位热解研究现状

3.1 布井方式

原位热解主要包括井工式和钻井式2类。

3.1.1 井工式

井工式原位热解工艺是在地面凿出井筒,利用井下巷道对煤层进行分割,在煤层内部布设加热通道和热解油气通道,通过热解油气系统进行井下收油,经输运管道实现油气地面输送和提质^[4],其工艺示意如图2所示。

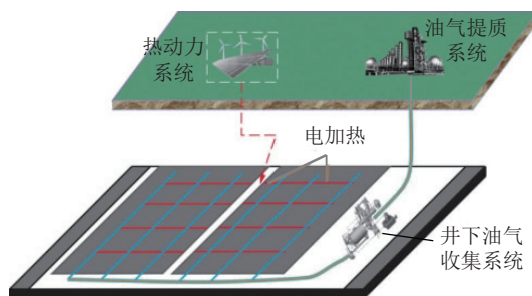


图2 富油煤井工式原位热解工艺示意^[4]

Fig.2 Schematic diagram of in-situ pyrolysis process for tar-rich coal well^[4]

对富油煤层的加热是原位开采的重点,富油煤原位热解需要将地下大尺度煤层加热到500~600℃,煤层导热性低、传热能力差。富油煤井工式原位热解面临的关键技术问题是:井下巷道布置方式、巷道内加热方式和煤层保温方式的选取,需满足煤层热解所需热量,且避免热量积聚。热解产生的气态焦油若在输运管道中冷凝,在抽采过程中易黏附在管道壁面,严重时将堵塞管道,因此还需解决长距离输运管道保温问题。

3.1.2 钻孔式

钻孔式原位热解技术是通过水平井形成加热通道,抽采井与水平井相连,在煤层中开展人工造缝形成微裂隙,通过高温介质或电加热方式对富油煤进行原位热解,再通过抽采井进行热解油气产物抽取^[4],其热解工艺如图3所示,注热热源可采用矿区周围的风能、太阳能等可再生能源。马丽等^[24]提出原位多煤层协同热解共采的工艺,如图4所示。

注热井与抽采井均穿过多个煤层,热源将多煤层同时加热至450℃以上,形成梯级多层次加热炉,该技术可实现多煤层同步开采,具有热量综合利用率高且占地小等优点,但多煤层的选取热量分配,要避免中间煤层热量聚积现象。

钻孔式原位热解的关键技术在于孔位的布设、加热方式的选取等问题。

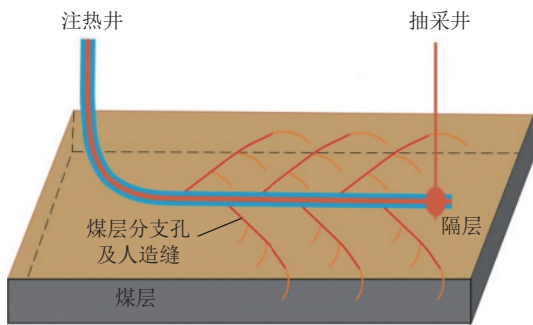


图3 富油煤钻孔式原位热解工艺示意^[4]

Fig.3 Schematic diagram of drilling in-situ pyrolysis process for tar-rich coal^[4]

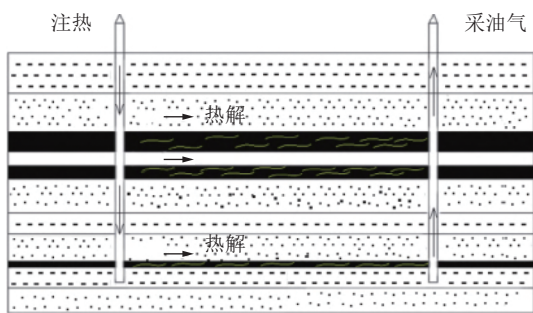


图4 多煤层原位协同热解共采^[24]

Fig.4 In-situ collaborative pyrolysis co mining of multiple coal seams^[24]

3.2 加热方式

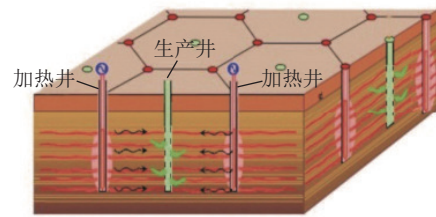
根据加热原理, 原位加热技术可分为: 传导加热、对流加热、辐射加热和化学加热。

3.2.1 传导加热

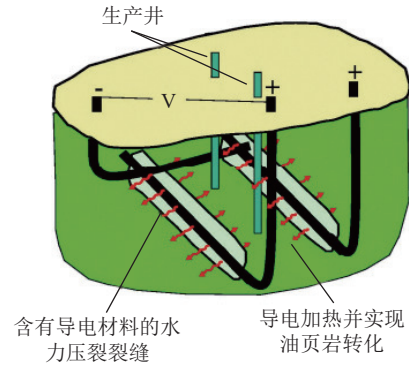
传导加热是利用电阻或导电介质直接加热煤层, 通过煤层自身的导热性能进行热量传递^[16], 传导加热以电加热工艺最为成熟。

壳牌公司的 ICP(In-suit Conversion Process) 技术(图 5(a)) 是利用电加热法将油页岩加热到约 700 °C, 使地下有机质干酪根分解为页岩油和和气, 通过渗流通道对油气资源进行开采, 技术核心是在开采区设置冷冻墙, 防止油气产品的损失以及地下水渗入热解区^[37-40]。埃克森美孚公司的 ElectrofracTM 技术(图 5(b)) 是将导电材料填充至人工致裂的裂缝中并形成加热元件, 实现油页岩原位加热^[41-42]。美国 IEP 公司的 GFC(Geothermic Fuel Cell) 技术(图 5(c)) 是在地层中放入高温燃料电池, 利用燃料电池在发电过程中产生的热量, 将油页岩加热到 400 °C, 使干酪根热解生成油气产物, 部分天然气可就近为燃料电池提供燃料, 维持系统持续运行^[41, 43]。

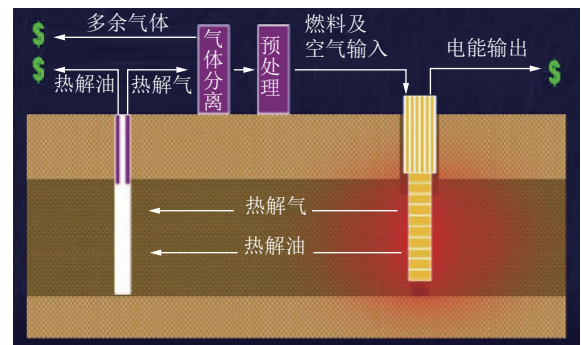
富油煤原位加热中, 传导加热技术的最大瓶颈是煤层加热时间长且热量传递较慢, 加热设备周围容易出现局部过热现象^[44], 煤层导热系数受煤化程度、水



(a) ICP技术^[39-40]



(b) ElectrofracTM技术^[42]



(c) GFC技术^[42]

图5 传导加热技术示意

Fig.5 Schematic diagram of conduction heating technology
分、灰分、温度等因素影响^[12]。

王双明等^[4]提出向煤层布置等密度加热棒, 采用电加热方式进行热解。也可在注热井中植入低温等离子电极, 通过间歇启动低温等离子体对富油煤进行辅助加热, 为热解过程提供可靠的热源, 提高热传导效率, 以维持地下的热解温度^[45]。

传导加热方式灵活, 易于控制, 适用于导热系数高、热解温度低、加热时间长的场合^[44]。油页岩由有机质和无机矿物质组成, 矿物质含量一般高于有机质, 与油页岩相比, 富油煤内部的矿物质组分含量有限, 为增强煤层热传导与热交换, 需在加热前进行煤层预增透并向裂缝中填充导电材料。

3.2.2 对流加热

对流加热技术是在人造缝增渗的基础上, 将高温载热介质注入到目的地层, 并对目的地层进行加热^[16]。雪弗龙公司的 CRUSH 技术(图 6(a)) 首先对油页岩进行爆破压裂, 形成复杂的裂缝网络, 然后利用水蒸气

或超临界高温 CO₂ 对干酪根进行对流加热, 主要问题是油气产物会通过裂缝逸出热解区, 造成水体污染^[46-48]。EGL 公司的 AMSO 技术 (图 6(b)) 是将载热流体通入

油页岩地层下方的一系列管道, 对油页岩进行原位热解, 由地面垂直抽取油气产物, 气体产物通过横向管道向油页岩层辅助供热, 利用对流和回流加热油页岩层^[42]。EGL 公司的 CCR(Conduction, Convection and Reflux) 技术 (图 6(c)) 通过集中加热非渗透页岩下面的页岩层, 将热解油气生成区和地下水源隔开。通过井下燃烧器供给热量, 为增强地层传热均匀性, 热解油通过回流的方式将热量分散到地层中^[40]。太原理工大学的 MTI 技术^[50-51](图 6(d)) 是将高温蒸汽 (400~700 °C) 交替地沿生产井和注热井注入到油页岩地层, 通过对流加热方式使干酪根热解生成油气产物, 中试试验结果显示用于热解反应的能量占总注入热量的 42.7%, 热解区采油率超过 95%, 整体采油率高达 70.7%^[52]。

对流加热技术中重点是载热流体的选择, 载热流体具有流量大、高温高压的特点, 优先选择安全的载热流体^[12]。目前, 已提出的载热流体包括高温 N₂、超临界 CO₂、过热水蒸气、近临界水、烃类气体以及混合气体等^[12, 47], 不同热载体的优缺点见表 2。

采用氮气加热煤层使得热解过程中几乎不发生氧化反应, 提取后的油与氮气容易分离^[53], 水蒸气具有安全、易获取、无污染、储存的能量密度高等特性^[54]。董光顺等^[55]模拟了氮气和蒸汽两种载热流体在富油煤原位热解过程中的开采效果, 结果表明, 注氮气开采的地层流体有效渗透率较高, 利于油气在地层中流动; 注高温蒸汽开采在加热效率和能量回报率具有明显的优越性, 注蒸汽开采与注氮气开采的天然气总产量比例为 1.07~1.11, 能量回报率比例为 1.754~2.363, 油总产量比例为 0.82~0.85。

毛崎森等^[56]采用数值模拟方法分析了不同布井模式下富油煤原位热解传热规律, 结果表明, 六井注热时, 载热流体水蒸气温度为 650 °C 时有效加热区域占比约 70%。杨甫等^[57]提出采用不同温度的水蒸气对煤层进行梯级注热及补热, 逐级利用热能进行富油煤原位热解。为提高煤层导热性及受热均匀性, 可在裂隙中注入铁矿石和石灰的混合浆液, 石灰遇到水放出的热量有助于水蒸气的保温, 铁矿石吸热后可以长时间将温度稳定在一定范围内, 确保热解反应温度, 且铁矿石与石灰混合浆液可以提高富油煤的热解制油效率及轻油比例^[45, 58]。

超临界 CO₂ 的密度接近于水, 扩散性接近于气体, 黏度介于液体和气体之间, 渗透力较强, 具有较好的传热、传质性能, 且溶解萃取能力较强, 有利于油气的提取与分离^[46, 59]。王长安等^[60]提出将富氧燃烧烟道中抽取的 CO₂ 进行加压, 高温高压的超临界 CO₂ 能够渗透进煤层进行充分热解并溶解热解产生的有机

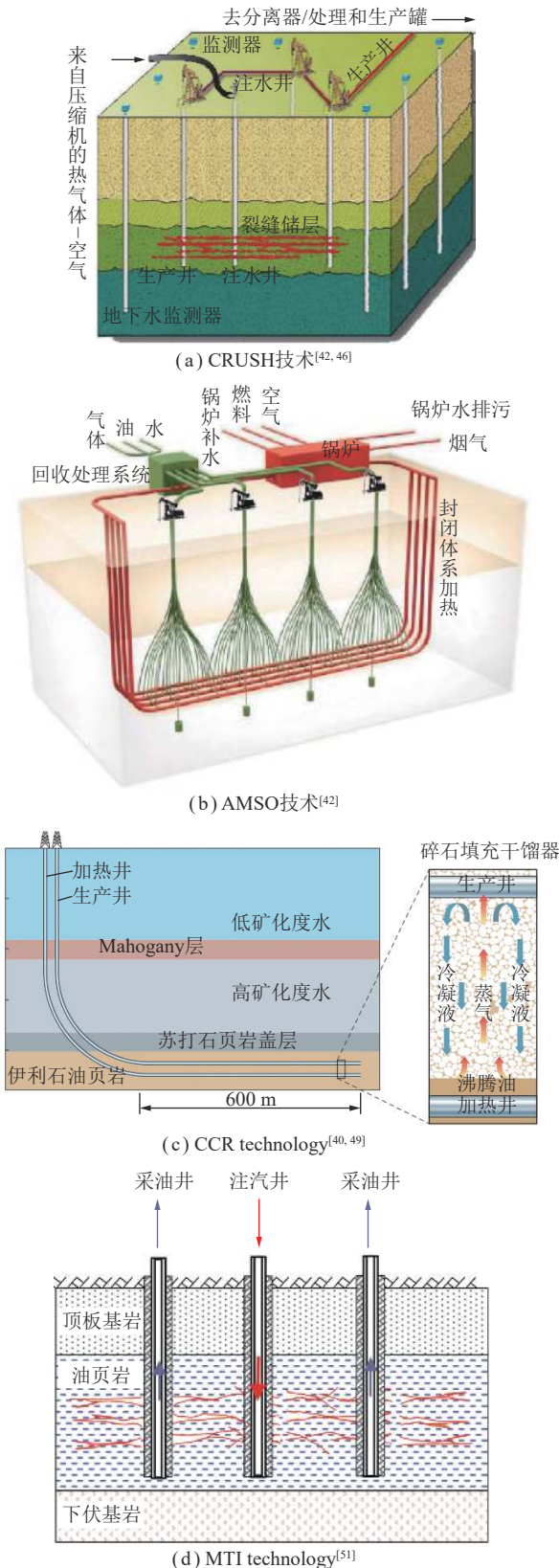


图 6 对流加热技术示意

Fig.6 Schematic diagram of convective heating technology

质,该系统可减少额外的能源消耗,且所有的二氧化碳被循环捕集,对外实现了碳中和。

表 2 富油煤原位热解不同热载体优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of different heat carriers for in-situ pyrolysis of tar-rich coal

热载体	比热容/(kJ·(m ³ ·℃) ⁻¹)	优点	缺点
水蒸气	1.506	驱替作用强,油收率高; 加速热解速率; 易于油气产物分离	水资源消耗量大; 污染地下水资源
N ₂	1.296	可循环利用; 环境污染小	比热容小, 加热速率低; 不易于油气产物分离
CO ₂	1.713	可做催化剂,加速 热解,油收率高; 降低系统碳排放; 渗透力强	比热容小, 携热效率低;
CH ₄ (热解气)	1.658	能量利用率高, 环境影响小	原料成本高; 安全风险大

注:比热容为热载体在100℃时对应的数值^[16]。

毛崎森等^[61]通过数值模拟研究发现,载热流体温度每升高 50℃,有效加热区域增大 8%,富油煤层平均温度升高 29℃,载热流体种类对煤层升温影响较小,流速对有效加热区域的占比提升较小。

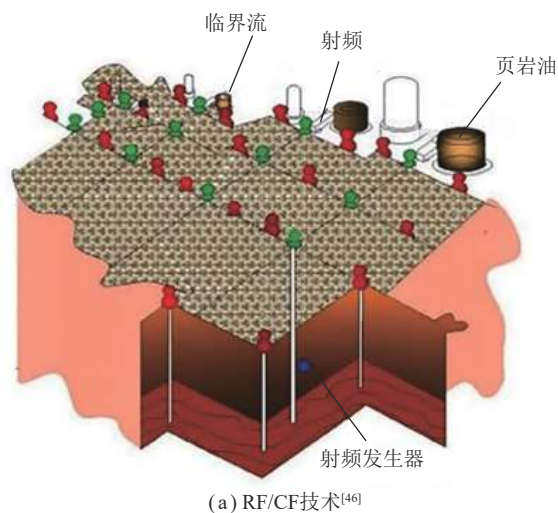
相比传导加热方式,载热介质形成的加热网格可以弥补煤岩导热系数低的缺点,换热系数高、加热周期短且煤层温度分布均匀,能够降低煤焦油的黏度,与焦油形成气液两相流,有利于富油煤原位热解过程中煤焦油的产出。

对流加热技术目前需解决的问题包括:①该加热方式容易受到地层水和煤层渗透性的影响,含水地层加热效率低,注入过程热量损失大^[62],对已开采过的煤层裂隙灌浆封闭,可以减少载热流体的散热^[63]。②注热井和开采井间距离:要考虑载热流体充分进入富油煤层裂隙的深度和水平距离以及致裂裂隙的能力,依据开采进度分段加热、分段开采^[63]。③对载热流体的加热:可采用地上为主、地下为辅的综合加热方案,地面采用常规加热方式直接加热载热流体,通过高频电磁感应对地下输气金属管道定向强化加热,实现对热载体的保温、升温 and 温度调节^[16,57]。也可采用原位热解产生的可燃气体进行燃烧^[45]、太阳能聚焦^[57]、富氧燃烧产生的高温 CO₂ 烟气等方式加热载热流体^[53]。

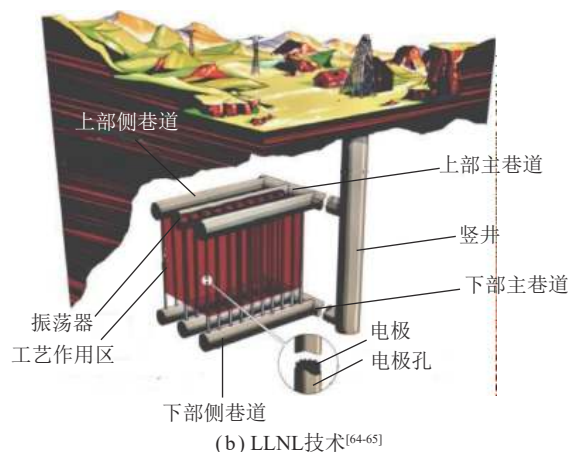
3.2.3 辐射加热

辐射加热技术是利用高频电磁波或微波将目的层加热至既定温度,使富油煤热解产生油气。20 世纪末, Raytheon 公司提出了电磁辐射加热技术 (RF/CF

技术)^[42](图 7(a)),将射频发射器放置在油页岩层内,利用无线电波加热油页岩,使用超临界流体将油气产物携带至采出井^[46]。美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 LLNL 技术(图 7(b))是在热解区加设了水平井以加强油页岩的受热体积,使热量在岩层中平行传递^[39]。



(a) RF/CF技术^[46]



(b) LLNL技术^[64-65]

图 7 辐射加热技术示意

Fig.7 Schematic diagram of radiation heating technology

微波具有较强的介电热效应,且在微波作用下,富油煤层在人工致裂基础上会产生更多的裂纹,强化传质传热过程。煤层热解的最优射频频率与煤质有关, JU 等^[66]发现微波辅助富油煤原位热解产物煤气和焦油溢出率与微波能量输入呈正相关,但当微波能量超过 5.4 MJ,气液溢出率趋于定值,最佳微波功率为 14 kW。

煤中矿物组分的低介电常数会抑制微波吸收能力,需要加入微波吸收剂才能获得理想的加热效果^[15]。水作为强极性物质,介电常数远大于煤岩,在微波辐射下能够快速吸收能量,升温效果显著,但过多的地层水会消耗大量的能量,影响煤层加热^[16]。铁基催化剂有助于增强煤样对微波的介电损耗能力,使煤样在短时间内达到热解温度^[67]。固态吸波介质可以吸收

微波,产生的大量热量可用于富油煤层热解,固态吸波介质在煤层人工通道和裂缝中为离散性填充,不易堵塞油气产物的排放通道^[68]。焦炭粉末可作为强吸波介质,能够吸收电磁波能量,且反射的电磁波较少^[69]。

辐射加热技术的优点是:具有较大的加热功率且加热速率可控^[49],能够提高富油煤内部热量传导速度,直接让目的层温度升高,克服了传导加热技术中煤岩自身导热系数极低的缺陷,避免了对流加热技术中载热介质在注入过程中的热损失,能量利用率高^[29]。缺点是:前期投资成本较大且技术成熟度低,目前应进一步研发适用于井下有限空间的大功率射频工具。若将风能、太阳能和地热能等可再生能源产生的电力直接用于富油煤原位热解技术,辐射加热技术将具有广阔的前景。

3.2.4 化学加热

化学加热技术又称反应热加热技术,是基于地层有机质在氧化剂作用下发生氧化反应并放热,实现对目标地层的加热^[17, 39]。

李守定等^[70]提出油页岩化学生热原位转化开采理论,利用氧化钙(CaO)与水反应生成的热量,为油页岩原位热解提供能量,反应生成的多孔结构氢氧化钙(Ca(OH)₂)可提高储层渗透性及稳定性。吉林大学与以色列科学家联合研发的局部化学加热技术TSA法,如图8所示,该技术是利用油页岩与氧发生局部化学反应放出的热量,对油页岩进行原位热解,该过程是由局部的化学反应触发的一种化学热强化处理过程^[71]。该方法无外界热量输入,耗能少且反应过程容易控制,TSA技术已于2015年6月完成了先

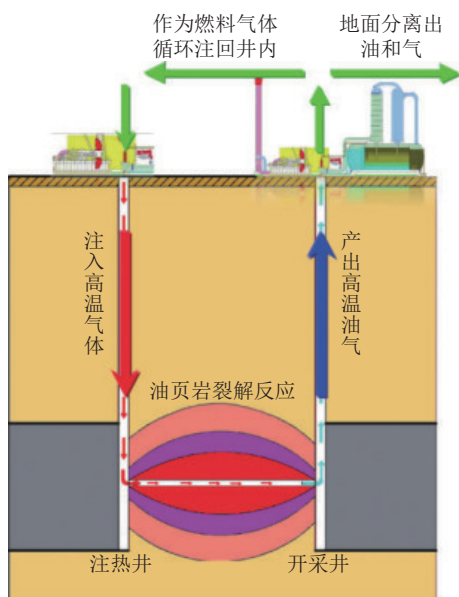


图8 TSA技术^[65]

Fig.8 TSA technology^[65]

导试验并采出了页岩油^[65]。

富油煤原位化学加热是向煤层中注入高温可燃气体或氧气,与煤层中有机质发生氧化反应并释放热量,煤在氧化蓄热的过程中伴随热量的传递^[12, 17],该放热过程发生在煤层内部,因此加热速度快。

与油页岩相比,煤层内部的矿物组分含量有限,有利于煤层的氧化放热,但煤层的非均质性较强,化学反应控制存在较大的困难,无法保证热量的稳定供应,若氧化程度控制不良,可能会发生富油煤层燃烧,地表塌陷的问题^[12, 16, 26]。且煤层导热性较差,需要依靠载热介质进行热量传递。维持化学反应需要向地层中不断注入氧气,原料成本高^[16],化学加热技术目前仍处于先导性试验阶段。

3.2.5 复合加热

就地层加热方式而言,单一加热方式的优、缺点较明显,见表3。针对富油煤原位热解时煤层加热周期长,煤层温度均匀性差以及整体能效低等问题,应多种加热方式相互配合,弥补单一方式的不足,发挥多种方法的优势。对流加热技术在富油煤原位热解工艺中更具优势^[16, 55-56],推荐采用对流加热耦合其他加热技术,以增强煤层中热量传递的稳定性和均匀性。

付德亮等^[72]提出利用煤层与氧化剂发生氧化反应放出的热量,补偿载热流体在原位热解提油过程中供热量不足的缺陷^[12]。车得福等^[73]提出利用富油煤层第一地块燃烧后所携带的烟气热量,加热煤层并发生缓慢氧化反应,氧化过程自生热使煤层达到自燃点后,注入高温水蒸气,控制煤层最终温度为焦油产率最大的温度范围500~600℃,该过程可实现自生热与水蒸气对流加热的耦合运行。建议通过调节氧化剂注入量,调控煤层氧化反应的补偿发热量,实现降低注热能耗的目的。

电加热设备简单,且加热量易于控制。王双明等^[45]提出在注热井水平段植入低温等离子电极,对过热水蒸汽原位热解富油煤技术进行间歇性辅助加热,可以维持地下的热解温度,避免热解油气在生产井中热量损失而凝结。王长安等^[74-75]提出可采用超临界CO₂对流注热与电加热棒导热共同加热地下煤层,为控制各热解区温度,可根据煤层裂缝周围流体加热所影响的区域来设置电加热棒布置的间距,且各加热棒的加热功率可单独控制。在载热流体的注热井中布置电加热器或射频加热器,对载热流体进行二次加热,可以克服对流加热技术中载热流体在传输过程中的热损失,缩短煤层加热周期,提高煤层温度均匀性^[16, 76]。段中会等^[69]提出利用超级电容储能系统储存新能源

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

加热方式	基本原理	主要优点	主要缺点	建议
导热加热	利用电阻或导电介质直接加热富油煤, 通过热量传导加热煤层	加热方式灵活; 设备相对简单; 易于控制	升温较慢, 传热效率低、加热时间长, 受地下水影响较大, 能耗高	提高地层导热性: 煤层增透, 填充导电材料
对流加热	向煤层中注入高温载热流体, 进而加热煤层	升温快, 加热效率高; 利于油气产物保温; 载热流体可循环利用	需进行人工造缝; 污染地下水体; 热量损失大; 热解反应速率受热载体物理化学性质的影响; 能量传递范围有限;	已开采煤层灌浆封闭; 分段加热, 分段开采
辐射加热	利用高频电磁波辐射基础上的交变电场作用, 使煤层发热	加热区域可选; 加热效率高	前期投入较大; 微波吸收能力弱	添加高介电常数粒子; 固体吸波材料
化学反应加热	通过有机质的原位氧化反应放热, 对煤层进行加热	加热速度快; 能量利用率高	依靠热载体传递热量; 燃烧过程不易控制	局部缓慢氧化

发电系统的电能, 对微波加热井进行供能, 使富油煤层均匀加热。该系统使用 N_2 携带强吸波介质在热解系统内进行对流换热, 强化热量传递。

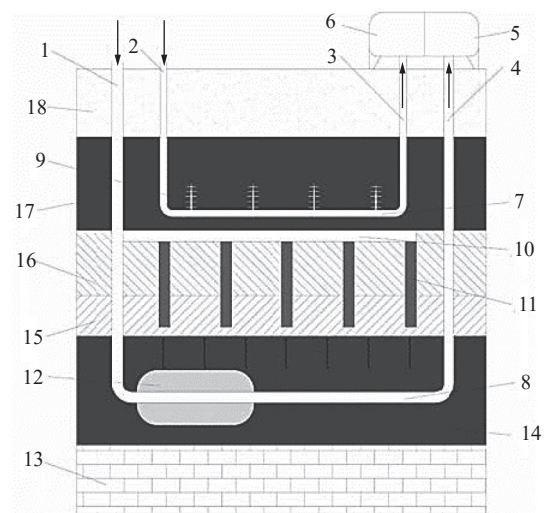
推荐采用煤层局部氧化反应, 降低对流加热技术中的注热能耗, 采用电加热或辐射加热, 补偿对流加热过程因热损失引起的供热量不足问题。

3.3 原位气化热解一体化

地下原位气化工艺是预先建造一个气化通道, 在气化通道内鼓风点火, 使该通道周围煤炭燃烧放热, 燃烧区的热量以热传导方式传递至煤层内部, 在靠近燃烧区的小范围内, 煤吸收热量气化, 产生大量的热解气, 进而将固态煤炭资源转化为燃气资源。地下原位热解是利用富油煤的热解反应, 提取富油煤中的油气资源, 但实际中单一方法会使大量的热能聚集在地层中甚至对地层稳定性造成威胁^[35]。

王双明等^[35]提出富油煤地下原位气化与热解一体化共采的方法, 如图9所示, 在富油煤的下层煤层和上层煤层中分别开设通道, 形成独立的地下原位气化系统和地下原位热解系统, 利用下层富油煤原位气化的热能对上层富油煤进行原位热解供热, 该技术可提高富油煤的开采利用率, 避免热能浪费。

车得福等^[77]提出气化水平井-热解水平井在不同深度的交错排列, 富油煤地下原位气化生成的高温气体扩散至周围煤层, 进行原位热解供热, 气化反应生成的可燃气体燃烧后产生 CO_2 , 将高温 CO_2 从热解输入井注入热解区, 其携带的大量热量用于富油煤原位热解过程。通过监测气化区和热解区的煤层温度, 调节 O_2 注入气化区的速率和总量, 控制气化反应的剧烈程度并维持热解反应在低温下进行。并将捕集得到的 CO_2 封存在上一地块气化后所形成的半焦中, 该过程对气化过程的热量进行了充分利用, 同时可实现



1—气化注入通道; 2—热解注入通道; 3—热解输出通道;
4—气化输出通道; 5—气化产物处理装置; 6—热解产物处理装置;
7—热解水平井; 8—气化水平井; 9—人造裂隙; 10—填充通道;
11—导热柱; 12—气化腔; 13—下层煤层下伏地层; 14—下层煤层;
15—下层煤层上覆地层; 16—上层煤层下伏地层; 17—上层煤层;
18—上层煤层上覆地层

图9 原位气化与热解一体化示意^[35]

Fig.9 Integrated schematic diagram of in-situ gasification and pyrolysis^[35]

了 CO_2 零排放。

将地下原位气化和热解技术综合运用, 可以有效提高热能和煤炭资源的利用率。但地下原位产生的气化空腔若不进行填充处理, 可能使煤层顶板坍塌, 阻断气化工艺的进行。利用超临界 CO_2 携带固体颗粒, 对气化空腔进行填充, 并注入耐高温水泥浆液对固体颗粒进行固结^[78]。

3.4 余热利用

煤的导热性较差, 长时间大规模加热地下煤层将消耗大量的热量, 因此在选择加热方式的同时, 要考虑热解过程结束后余热利用问题^[53]。

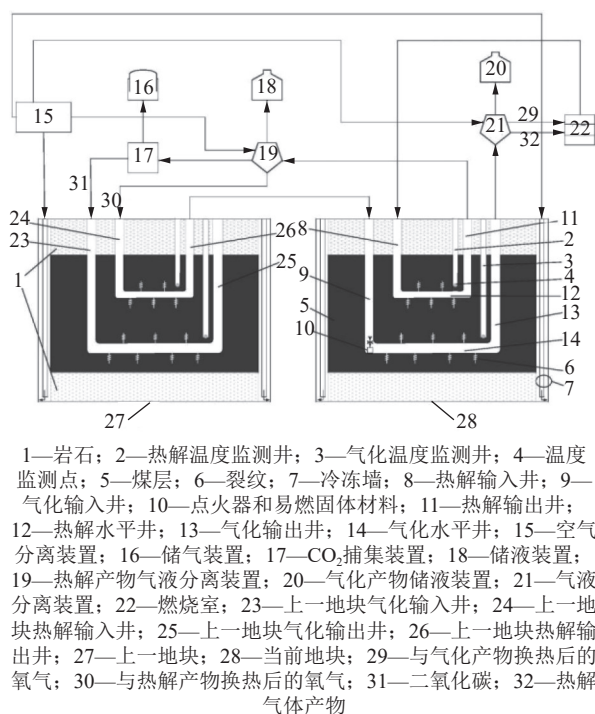


图 10 原位气化-热解-余热利用一体化示意^[77]

Fig.10 Integrated schematic diagram of in-situ gasification pyrolysis waste heat utilization^[77]

邓磊等^[36]提出利用携带余热的载热流体氮气作为热源,驱动制冷机组,获得冷量的冷却介质与煤层换热并形成冷冻墙,达到阻止地下水深入热解区域及油气外渗的目的。王长安等^[53]提出利用原位热解产物中的烃类气体与氮气,预热热解过程中的载热流体纯氮气。车得福等^[77]提出原位气化-热解-余热利用一体化技术,如图 10 所示,气化过程所需要的氧气,可吸收上一地块余热及产物余热后进入当前地块参与气化反应。在对流加热技术中,CO₂作为换热介质有助于半焦层的余热利用,且双水平裂缝布置和增加注气井数量也可提高余热利用效率,有助于改善半焦层温度均匀性^[79]。段中会等^[69]提出可将富油煤层划分为多个热解区,多个地块同时运行,利用热解气体产物热量和初始地块的热解残余热量预热下一地块煤层,提高热量利用率。

推荐采用预热载热流体的方式,对煤层余热进行回收利用,以提高原位热解系统的能量利用率。

3.5 储层压裂

煤属于双孔隙结构,包括煤基质微孔隙和煤层裂隙^[80],前文所述的传导加热、对流加热、辐射加热和化学加热技术均需富油煤层内裂隙与孔隙有良好的沟通条件^[81],富油煤内部裂隙少且致密,不利于热解产物油气采出^[16]。孔隙裂隙通道的分布对热解过程的热量传递至关重要,且连通的孔隙是热解产物运移的主要通道^[82],可采用水力压裂、超临界二氧化碳压

裂、可控冲击波压裂技术,在煤层内部形成大规模网格裂隙,或在煤基质产生微孔隙,来改善煤岩渗透性差的问题,可提高煤层热传导效率,且利于油气产物排出^[45]。

微波辐射可以辅助破岩、改变煤岩性质,增加煤的裂缝数量,从而提高煤的渗透性^[83]。JU 等^[84]发现富油煤经微波辐射后,沿平行于煤层的主层理面,裂缝增多且连通性增强。微波选择性加热会导致原始裂缝的膨胀和延伸,并诱发次生裂缝^[85]。在连续微波照射下,煤的孔隙率和渗透率分别增加了 33%~72%和 73%~181%^[86]。单鹏飞等^[87]研究了微波-水交互作用下富油煤岩渐进性破坏规律,结果表明相较于水,微波对煤样的改造作用更强,同时水的参与使得微波作用效果提升明显。

水力压裂会使煤层产生主裂缝和分支裂缝,赵帅等^[88]对水力压裂后油页岩储层的传热导流渗透能力进行了数值模拟,结果表明,载热流体沿压裂产生的裂隙对油页岩进行热传导,在高压驱替作用下,热解产物主要沿油页岩层理方向形成的裂隙中流出。富油煤原位热解技术中,水力压裂可增大热解时高温蒸气与煤层的接触面积,使富油煤层整体均匀受热升温,且增加注热介质与油气产物流体流动的连续性,提高富油煤储层加热效率,减少热量损失^[89]。脉冲水力压裂是向煤层通过注入具有一定脉动频率的压裂液来产生流体压力波纹,使分支裂缝完全延伸,增强煤层裂缝网络连通性^[90]。但水力压裂会产生水资源浪费及地下水污染等问题。且富油煤在地下处于三维应力状态,在地层深处甚至处于高应力状态,利用高压水力压裂使煤层产生裂缝的同时,煤层其他区域在高压的影响下若发生塑性变形,渗透性将更低,因此利用水力压裂进行储层造缝增隙的技术是否可行,需进行深入研究。

超临界二氧化碳分子具有黏度低、零表面张力、渗透性极强等特点,可以进入煤层微孔并产生较强的吸附力,使煤层发生膨胀变形,降低煤基质之间的结合力,有利于煤体裂纹扩展并形成复杂裂缝网络^[91]。地下煤层含有水分,超临界二氧化碳溶于水后会与煤基质中矿物质发生物理、化学反应,有利于煤体形成微裂隙^[92]。因此,超临界二氧化碳在煤层裂缝改造方面具有明显的优势。超临界二氧化碳具有较强的溶剂化能力,能够有效溶解煤层中的重油组分,增加油气通道的渗流能力,且由于其在煤层中具有较强的吸附能力,能够高效置换富油煤原位热解生成的气态产物。

液氮能够渗入煤层裂缝内部,在温差作用下(常

压下液氮温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)使裂缝两侧煤体冻缩,发生扩展变形而产生新的裂缝,且液氮会渗入新裂缝中,增加煤层裂缝宽度的同时,形成新的分支裂缝,为热解油气产物的运移提供通道。液氮压裂对煤层伤害小、压裂液容易返排,形成的裂缝网络复杂^[93]。丛钰洲等^[94]发现,对深部煤炭进行液氮增透时,可采用分段注入的方法,低速率注入液氮,可降低液氮损耗且提高注入效率。对于非均质性较强的煤层,液氮致裂的范围较难控制。可以将储层压裂技术与富油煤原位转化技术综合应用,控制裂缝生成路径,与煤层天然裂缝相沟通,从而形成裂缝网络,并在裂缝支撑剂中增加导热介质以增强传热。

3.6 地下体系封闭技术

地下体系封闭技术是在地下构建“密闭反应釜”,将热解开采区相对封闭在三维空间内,该技术是通过减小目标地层的空隙率,以削弱或隔绝密封区内外的传热传质过程,抑制裂解区有机烃、重金属元素等产物向周围含水层扩散污染,提高开采过程中能量利用率^[95]。地下体系封闭技术主要包括地下冻结技术、注浆帷幕技术、气驱止水封闭技术和泡沫止水方法等^[96]。

地下冻结技术是通过向地层注入低温冷流体,将地质基层与井筒周围孔隙中的水冻结在一起,通过群井施工使冻结体交圈形成连续的地下冻结墙^[97]。该技术对地层原始结构的影响是可逆的,可通过解冻使地层恢复原;但该技术能量消耗极大且冻结范围有限,冻结周期漫长,需要连续注入冷源^[98]。煤层深度增大,井筒热损失显著提升,因此地下冻结法不适用于中深层富油煤原位热解工艺。对于小规模富油煤原位热解试采,可采用地下冻结技术,其具有冻结速率较慢、封闭性好且冻结半径小等特点^[95]。

注浆帷幕技术向地层注入水泥浆,封闭地层裂缝和孔隙,并利用群井联结固体形成连续的地下注浆帷幕^[95]。由于地层的低渗透性和泥浆的低流动性,注入的泥浆的扩散半径为 $0.5\sim 1.5\text{ m}$ ^[99],水泥浆固结可以提高岩土体的抗变形能力,但对地层结构的影响不可逆。浆液配方和注浆工艺的选择,与地层的裂缝网络有关,注浆帷幕技术也适用于小规模富油煤原位热解先导性工程^[95]。

注浆帷幕技术可以达到较好的止水效果,但其施工成本较高,为此,吉林大学自主研发的气驱止水封闭技术^[96](图 11)是向地层热解区注入高压气体,形成高压充气区,降低地下水的渗透能力并抑制开采区污染物扩散,该技术显著提高了单井止水区域,降低了施工成本。气驱止水封闭技术是动态气驱水过程,不影响地层原始结构,且注入的气流具有油气驱替作用;

但该技术不适合有断层的地质结构,高压气体会流入高渗透性通道,影响地层封闭效果^[95,100]。 CO_2 具有降低油水界面张力和黏度的作用,可以将热解产物 CO_2 作为气驱止水注入流体,在进行地下体系封闭的同时,可进行油气驱替并实现 CO_2 的地质封存。

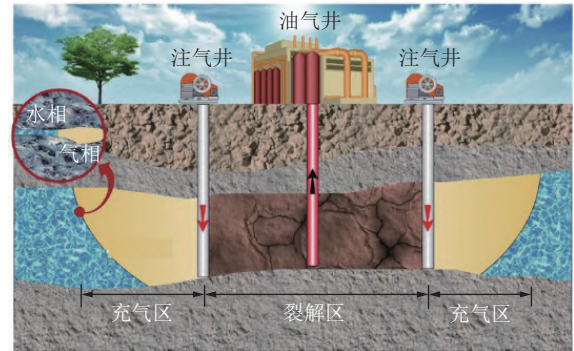


图 11 气驱止水系统^[95-96]

Fig.11 Gas driven water stop system^[95-96]

泡沫止水技术是在目标地层注入黏度较高的泡沫,降低水在注入区的流动性,实现封堵地下高含水层的目的^[101]。该技术止水封闭范围大且可控,对非均质储层的适用性较强,注入的泡沫会优先封堵裂缝较大的高渗透通道,泡沫消泡后地层可恢复原始结构。但边缘区域消泡严重,需要定期补充泡沫。因此泡沫止水技术适用于大规模富油煤地下原位热解工艺,热解开采区具有温度高、含油及高矿化水,实际工艺中所选取的泡沫需耐温、耐油和耐油^[95]。

陕西省榆神矿区是我国富油煤主力区块,70%~80%为富油煤层,焦油产率约11%,该矿区地层构造简单,未发现大断层,煤层埋藏较深,甚至达到700 m,煤层厚度 $10\sim 27\text{ m}$ ^[102]。富油煤原位热解技术的先导性试验,可选择地下冻结和注浆帷幕技术;大规模热解工艺可选择气驱止水封闭和泡沫止水技术,通过调节注入的气体和泡沫的压力调节原位热解区域,控制热解过程中流体流动^[95]。

可根据热解开发工艺的不同,合理选用地下体系封闭技术,并将体系封闭关键工艺参数与热解工艺参数相关联,促进注入能量高效利用,实现热解油气高效采收。

4 总结与展望

(1) 煤的热量传递过程不仅与热物理性质有关,而且受到显微组成及其分布的影响,后期建议以显微组成及其热演化路径为切入点,研究富油煤热解过程的传热控制机理,以期为加热方式的优化提供依据。

(2) 传导加热易于控制,但对煤层升温慢、能耗较

高,建议通过煤层增透、填充导电材料的方式提高煤层导热性,提高电加热经济性。对流加热对煤层的加热效率高,但热量损失大且污染地下水体,可对已开采煤层进行体系封闭,以减少热量损失。辐射加热的加热区域可选、加热效率高,但电能消耗大,需在煤层添加强吸波材料,增强煤对微波的吸收能力;在风、光及地热资源丰富的富油煤原位热解区,可以将可再生能源产生的电力用于辐射加热技术。化学加热的加热速率快但燃烧过程不易控制,建议将煤层局部缓慢氧化的自生热,用于原位热解过程的补偿热量,降低注热能耗。

(3)单一的加热方式优、缺点明显,推荐采用对流加热耦合其他加热技术,以增强煤层中热量传递的稳定性和均匀性。利用煤层局部氧化反应,降低对流加热技术中载热流体的注热能耗,利用电加热或辐射加热,补偿对流加热过程因热损失引起的供热量不足问题。可采用热解后煤层或热解气余热预热载热流体,以充分利用原位热解后的余热;也可利用太阳能聚焦等方式加热载热流体。

(4)原位气化热解一体化技术可以提高热能和煤炭资源利用率,但原位气化产生的气化空腔需进行填充处理,可采用超临界 CO₂ 携带固体颗粒进行填充。

(5)为增强原位热解过程热量传递效率,可采用储层压裂来改善煤层渗透性,建议将储层压裂和原位热解技术相结合,形成裂缝网络以提高热传导效率且促进油气产物排出。也可进行地下体系封闭,减少热量和油气产物向非热解区扩散,泡沫止水技术适用于大规模富油煤地下原位热解工艺,地下冻结和注浆帷幕技术适用于小规模富油煤原位热解试采工艺,CO₂ 气驱止水技术在地下体系封闭的同时,可进行油气驱替并实现 CO₂ 的地质封存。

致谢 本文的构思和立题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] 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] 谢克昌.“十四五”期间现代煤化工发展的几点思考[J]. *煤炭经济研究*, 2020, 40(5): 1.
XIE Kechang. Reflections on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five-Year Plan[J]. *Coal Economic Research*, 2020, 40(5): 1.
- [3] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 821–835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821–835.
- [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] 王双明.对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考[J]. *中国煤炭*, 2020, 46(2): 11–16.
WANG Shuangming. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China[J]. *China Coal*, 2020, 46(2): 11–16.
- [6] YU Z Y, GUO W, YANG P X, et al. *In-situ* infrared and kinetic characteristics analysis on pyrolysis of tar-rich coal and macerals[J]. *Fuel*, 2023, 348: 128601.
- [7] 李发林,尚庆雨,王国房,等.低阶煤制备高浓度水煤浆技术现状及发展趋势[J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(6): 20–26.
LI Falin, SHANG Qingyu, WANG Guofang, et al. Progress and technology development of preparing high concentration coal water slurry from low-rank coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(6): 20–26.
- [8] 师庆民,王双明,王生全,等.神府南部延安组富油煤多源判别规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 2057–2066.
SHI Qingmin, WANG Shuangming, WANG Shengquan, et al. Multi-source identification and internal relationship of tar-rich coal of the Yan'an Formation in the south of Shenfu[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 2057–2066.
- [9] 师庆民,米奕臣,王双明,等.富油煤热解流体滞留特征及其机制[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1329–1337.
SHI Qingmin, MI Yichen, WANG Shuangming, et al. Trap characteristic and mechanism of volatiles during pyrolysis of tar-rich coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1329–1337.
- [10] 杨甫,段中会,马丽,等.陕西省富油煤分布及受控地质因素[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 171–181.
YANG Fu, DUAN Zhonghui, MA Li, et al. Distribution and controlled geological factors of oil-rich coal in Shaanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 171–181.
- [11] KELLY K E, WANG D, HRADISKY M, et al. Underground coal thermal treatment as a potential low-carbon energy source[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 144: 8–19.
- [12] 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.
- [13] 赵平,谭克龙,韩效忠,等.新形势下我国能源与生态安全保障研究[J]. *中国煤炭地质*, 2021, 33(1): 1–7.
ZHAO Ping, TAN Kelong, HAN Xiaozhong, et al. Research for

- energy and ecological security in China under new situation[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(1): 1-7.
- [14] 赵阳升, 梁卫国, 冯子军, 等. 原位改性流化采矿科学、技术与工程[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 25-35.
ZHAO Yangsheng, LIANG Weigu, FENG Zijun, et al. Science, technology and engineering of *in situ* modified mining by fluidization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 25-35.
- [15] 葛世荣. 深部煤炭化学开采技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 679-691.
GE Shirong. Chemical mining technology for deep coal resources[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 679-691.
- [16] 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.
- [17] 邓军, 任帅京, 肖旸, 等. 煤低温氧化与热解过程的传热特性对比研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S1): 171-177.
DENG Jun, REN Shuaijing, XIAO Yang, et al. Comparative study on heat transfer characteristics of coal during low temperature oxidation and pyrolysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 171-177.
- [18] 刘泽宇. 油页岩原位开采耦合数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LIU Zeyu. A coupled numerical simulation for oil shale in-situ mining[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [19] TSOLMON D. 中国东北典型矿区和蒙古国巴彦加拉等矿区油页岩裂解前后的物理化学性质实验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021.
TSOLMON D. Experimental study on physical and chemical properties of oil shale before and after pyrolysis in typical mining areas in Northeast China and Bayanjargalan mining area in Mongolia[D]. Jilin: Jilin University, 2021.
- [20] 马砾, 张朔, 邹立, 等. 不同变质程度煤导热系数试验分析[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(6): 146-150.
MA Li, ZHANG Shuo, ZOU Li, et al. Experimental analysis of thermal conductivity of different ranks of coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 146-150.
- [21] HUANG Z B, ZHOU W J, WEI J J. Study on the molecular structure model of tar-rich coal and its pyrolysis process[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1286: 135613.
- [22] 张和伟, 申建, 李可心, 等. 不同煤组成与分布差异传热特征及其机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2519-2529.
ZHANG Hewei, SHEN Jian, LI Kexin, et al. Differential heat transfer characteristics and mechanism of different coal composition and distribution[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(6): 2519-2529.
- [23] 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.
- [24] 马丽, 王双明, 段中会, 等. 陕西省富油煤资源潜力及开发建议[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 1-8.
MA Li, WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, et al. Potential of oil-rich coal resources in Shaanxi Province and its new development suggestion[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 1-8.
- [25] 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.
- [26] 杨甫, 段中会, 马东民, 等. 煤炭地下气化技术进展[J]. *科技导报*, 2020, 38(20): 71-85.
YANG Fu, DUAN Zhonghui, MA Dongmin, et al. New development of coal gasification technology[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(20): 71-85.
- [27] 刘淑琴, 畅志兵, 刘金昌. 深部煤炭原位气化开采关键技术及发展前景[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(3): 261-270.
LIU Shuqin, CHANG Zhibing, LIU Jinchang. Key technologies and prospect for *in situ* gasification mining of deep coal resources[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(3): 261-270.
- [28] 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.
- [29] JU Y, ZHU Y, ZHOU H W, 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.
- [30] 张喻, 高宁博, 全翠, 等. 低阶煤热解高温油气除尘技术进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(4): 1814-1824.
ZHANG Yu, GAO Ningbo, QUAN Cui, et al. Research progress on high temperature oil-gas dust removal technology during pyrolysis of low-rank coal[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(4): 1814-1824.
- [31] 岑可法, 倪明江, 骆仲洪, 等. 基于煤炭分级转化的发电技术前景[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(9): 118-122.
CEN Kefa, NI Mingjiang, LUO Zhongyang, et al. The prospect of power generation technology based on coal staged conversion[J]. *Engineering Sciences*, 2015, 17(9): 118-122.
- [32] 王铨. 低阶煤热解-气化一体化油电联产系统的初步研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
WANG Quan. Primary study on the oil-electricity cogeneration system of integrated pyrolysis and gasification of low-rank coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [33] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1210-1219.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for *in situ* fluidized mining of deep underground coal re-

- sources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1210–1219.
- [34] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 547–556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 547–556.
- [35] 王双明, 孙强, 薛圣泽, 等. 一种富油煤地下原位气化与热解一体化共采方法: CN113803040A[P]. 2021–12–17.
- [36] 邓磊, 黄笑乐, 铁渊, 等. 一种富油煤原位热解和余热回收利用系统: CN216198022U[P]. 2022-04-05.
- [37] 李宇航, 张宏, 张军华, 等. 油页岩勘探开发现状及进展[J]. *CT理论与应用研究*, 2014, 23(6): 1051–1063.
LI Yuhang, ZHANG Hong, ZHANG Junhua, et al. The present situation and progress of oil shale exploration and exploitation[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2014, 23(6): 1051–1063.
- [38] 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.
- [39] 白奉田. 局部化学法热解油页岩的理论与室内试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
BAI Fengtian. Theoretical and experimental research of oil shale pyrolysis triggered by topochemical heat[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [40] 汪友平, 王益维, 孟祥龙, 等. 美国油页岩原位开采技术与启示[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 55–59.
WANG Youping, WANG Yiwei, MENG Xianglong, et al. Enlightenment of American's oil shale *in situ* retorting technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 55–59.
- [41] 李年银, 王元, 陈飞, 等. 油页岩原位转化技术发展现状及展望[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(3): 1–8.
LI Nianyin, WANG Yuan, CHEN Fei, et al. Development status and prospects of *in situ* conversion technology in oil shale[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(3): 1–8.
- [42] DAMMER Anton R, KILLEN James C, BIGLARBIGI Khosrow, et al. Secure fuels from domestic resources: The continuing evolution of America's oil shale and tar sands industries[J]. 2007.
- [43] SULLIVAN N, ANYENYA G, HAUN B, et al. In-ground operation of Geothermic Fuel Cells for unconventional oil and gas recovery[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 302: 402–409.
- [44] 张传文, 孟庆强, 唐玄. 油页岩开采技术现状与展望[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(8): 1798–1805.
ZHANG Chuanwen, MENG Qingqiang, TANG Xuan. Present situation and prospect of oil shale mining technology[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(8): 1798–1805.
- [45] 王双明, 石智军, 王生全, 等. 一种过热水蒸汽原位热解富油煤高效提油方法: CN110541695A[P]. 2019–12–06.
- [46] 王海柱, 李根生, 刘欣, 等. 油页岩开发研究现状及发展趋势[J]. *中国基础科学*, 2020, 22(5): 1–8.
WANG Haizhu, LI Gensheng, LIU Xin, et al. Research status and development trend of oil shale development[J]. *China Basic Science*, 2020, 22(5): 1–8.
- [47] KANG Z Q, ZHAO Y S, YANG D. Review of oil shale *in situ* conversion technology[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115121.
- [48] HAN X X, JIANG X M, CUI Z G. Studies of the effect of retorting factors on the yield of shale oil for a new comprehensive utilization technology of oil shale[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(11): 2381–2385.
- [49] PIERRE Alix, ALAN Burnham, TOM fowler. Coaxing oil from shale[J]. *Oilfield Review*, 2010, 22(4): 4–15.
- [50] 赵阳升, 冯增朝, 杨栋, 等. 对流加热油页岩开采油气的方法: CN1676870A[P]. 2005–10–05.
- [51] ZHAO J, YANG D, KANG Z, et al. A micro-ct study of changes in the internal structure of Daqing and Yan'an oil shales at high temperatures[J]. *Oil Shale*, 2012, 29(4): 357.
- [52] KANG Z Q, ZHAO Y S, YANG D, et al. A pilot investigation of pyrolysis from oil and gas extraction from oil shale by *in situ* superheated steam injection[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 186: 106785.
- [53] 王长安, 毛崎森, 周磊, 等. 一种富油煤地下热解热能循环利用系统: CN113738336B[P]. 2022–06–07.
- [54] 王磊. 过热蒸汽原位热解油页岩开采油气微观特征研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
WANG Lei. Study on microscopic characteristics of *in-situ* pyrolysis oil shale and oil gas exploration through superheated steam[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [55] 董光顺, 朱超凡, 厉家宗, 等. 黄陵矿区富油煤对流加热原位转化开发效果数值模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(4): 57–67.
DONG Guangshun, ZHU Chaofan, LI Jiazong, et al. Numerical simulation on development effect of tar-rich coal through *in situ* conversion by convective heating in Huangling Mining Area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 57–67.
- [56] 毛崎森, 刘嘉晔, 王长安, 等. 不同布井模式下富油煤原位热解传热规律数值模拟[J]. *煤炭转化*, 2022, 45(6): 7–19.
MAO Qisen, LIU Jiaye, WANG Chang'an, et al. Numerical simulation of *in situ* pyrolysis heat transfer of Tar-rich coal under different well distribution modes[J]. *Coal Conversion*, 2022, 45(6): 7–19.
- [57] 杨甫, 毛崎森, 段中会, 等. 一种水蒸气注热原位热解富油煤的系统及方法: CN114790880B[P]. 2023–06–09.
- [58] 张蕾, 贾阳, 石智军, 等. 富油煤原位热解固体热载体的制备及利用方法: CN110903841B[P]. 2022–03–29.
- [59] 丁璐. 超临界二氧化碳页岩钻井井壁稳定性研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2023.
DING Lu. Study on the wellbore stability of supercritical CO₂ drilling in shale[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2023.
- [60] 王长安, 毛崎森, 周磊, 等. 一种富油煤原位热解与碳捕集耦合的系统: CN113738325B[P]. 2022–05–20.
- [61] 毛崎森, 王长安, 侯育杰, 等. 富油煤原位热解对流加热过程传热规律数值模拟[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(8): 19–29.
MAO Qisen, WANG Chang'an, HOU Yujie, et al. Numerical simulation of heat transfer during *in situ* convection heating pyrolysis of tar-rich coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(8): 19–29.

- [62] LIU Z, SUN Y H, GUO W, et al. Sealing effects of marginal gas injection on oil shale *in situ* pyrolysis exploitation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 189: 106968.
- [63] 肖国春, 梁得亮, 焦在滨, 等. 一种富油煤原位热解的氮气电加热方法及系统: CN113685161B[P]. 2022-10-25.
- [64] BURNHAM A, MCCONAGHY J R. Comparison of the acceptability of various oil shale processes[J]. *Oil Shales & Tar Sands*, 2006: 11097221.
- [65] 孙友宏, 郭威, 邓孙华. 油页岩地下原位转化与钻采技术现状及发展趋势[J]. *钻探工程*, 2021, 48(1): 57-67.
SUN Youhong, GUO Wei, DENG Sunhua. The status and development trend of *in situ* conversion and drilling exploitation technology for oil shale[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(1): 57-67.
- [66] JU Y, ZHU Y, ZHANG Y W, et al. Microwave-aided pyrolysis and fragmentation of tar-rich coal and rocks for *in situ* coal conversion and clean utilization[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 167: 105391.
- [67] 脱凯用, 刘淑琴, 王莉萍, 等. 微波辅助铁催化华夏煤热解及煤焦结构演变特性[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 1030-1041.
TUO Kaiyong, LIU Shuqin, WANG Liping, et al. Microwave-assisted iron-catalyzed pyrolysis of Huaxia coal and structural evolution characteristics of coal char[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 1030-1041.
- [68] 孙强, 薛圣泽. 一种富油煤地下微波原位热解开采方法: CN113944454A[P]. 2022-01-18.
- [69] 段中会, 陈美静, 王长安, 等. 一种富油煤地下直接热解提油系统: CN115095307B[P]. 2023-06-13.
- [70] 李守定, 李晓, 王思敬, 等. 页岩油化学热原位转化开采理论与方法[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(1): 127-143.
LI Shouding, LI Xiao, WANG Sijing, et al. Theory and method of *in situ* conversion of shale oil by chemical thermal[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 127-143.
- [71] SUN Y H, BAI F T, LIU B C, et al. Characterization of the oil shale products derived *via* topochemical reaction method[J]. *Fuel*, 2014, 115: 338-346.
- [72] 付德亮, 段中会, 杨甫, 等. 煤层地下原位补偿发热注流体热解提油井结构及提油方法: CN114109340A[P]. 2022-03-01.
- [73] 车得福, 陈美静, 王长安, 等. 一种富油煤温和氧化自生热与水蒸气加热耦合的原位热解系统: CN115405276B[P]. 2023-06-20.
- [74] 王长安, 毛崎森, 侯俊杰, 等. 一种富油煤原位复合加热及热能利用系统及方法: CN115678588A[P]. 2023-02-03.
- [75] 王长安, 李惠彦辰, 王超伟, 等. 一种富油煤地下电加热直接提油及余热利用系统: CN114016990A[P]. 2022-02-08.
- [76] 李明杰, 魏进家, 吴志强, 等. 一种富油煤原位热解的煤层对流加热系统及方法: CN112177579B[P]. 2022-07-12.
- [77] 车得福, 陈美静, 王长安, 等. 一种富油煤地下原位气化-热解-余热利用一体化系统: CN115287100B[P]. 2023-06-27.
- [78] 王振东, 杨甫, 马丽, 等. 一种用于富油煤地下原位转化的模块化及梯级开发方法: CN114876428B[P]. 2023-09-15.
- [79] 陈美静, 漆博文, 王长安, 等. 富油煤地下原位热解余热利用过程数值模拟[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(1): 48-58.
CHEN Meijing, QI Bowen, WANG Chang'an, et al. Numerical simulation of waste heat utilization process after *in situ* pyrolysis of tar-rich coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(1): 48-58.
- [80] 梁运培, 王庆慧, 朱拴成, 等. 深部低煤阶煤层高值化学品与天然气共采技术构想[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 317-334.
LIANG Yunpei, WANG Qinghui, ZHU Shuancheng, et al. Conception of co-extraction technology of valuable chemicals and natural gas in deep low-rank coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 317-334.
- [81] GENG Y D, LIANG W G, LIU J, et al. Evolution of pore and fracture structure of oil shale under high temperature and high pressure[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(10): 10404-10413.
- [82] 黄笑乐, 杨甫, 韩磊, 等. 富油煤(长焰煤)孔隙结构三维表征及渗流模拟[J]. *化工学报*, 2022, 73(11): 5078-5087.
HUANG Xiaole, YANG Fu, HAN Lei, et al. 3D characterization of pore structure and seepage simulation of tar-rich coal(long flame coal)[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(11): 5078-5087.
- [83] 胡国忠, 王春博, 许家林, 等. 微波辐射降低硬煤冲击倾向性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 450-465.
HU Guozhong, WANG Chunbo, XU Jialin, et al. Experimental investigation on decreasing burst tendency of hard coal using microwave irradiation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 450-465.
- [84] JU Y, ZHU Y, ZHANG Y W, et al. Effects of high-power microwave irradiation on tar-rich coal for realising *in situ* pyrolysis, fragmentation, and low-carbon utilisation of tar-rich coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 157: 105165.
- [85] LI H, TIAN L, HUANG B X, et al. Experimental study on coal damage subjected to microwave heating[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5631-5640.
- [86] LI H, LIN B Q, YANG W, et al. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154: 82-91.
- [87] 单鹏飞, 杨攀, 来兴平, 等. 微波-水交互作用下富油煤岩渐进性破坏规律试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2): 3884-3896.
SHAN Pengfei, YANG Pan, LAI Xingping, et al. Experimental study on progressive failure law of oil-rich coal and rock under microwave-water interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2): 3884-3896.
- [88] 赵帅, 孙友宏, 杨秦川, 等. 非稳态原位热解扶余油页岩热-流耦合模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 896-902.
ZHAO Shuai, SUN Youhong, YANG Qinchuan, et al. Thermal-fluid coupling simulation on *in situ* unsteady pyrolysis of Fuyu oil shale[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(6): 896-902.
- [89] 高喜才, 张锡琛, 刘帅, 等. 一种高温蒸汽压裂原位热解富油煤分采系统及方法: CN115163019A[P]. 2022-10-11.
- [90] MA C C, JIANG Y P, XING H L, et al. Numerical modelling of fracturing effect stimulated by pulsating hydraulic fracturing in coal seam gas reservoir[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 651-663.
- [91] 梁卫国, 贺伟, 阎纪伟. 超临界 CO₂ 致煤岩力学特性弱化与破裂机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2557-2568.

- LIANG Weiguo, HE Wei, YAN Jiwei. Weakening and fracturing mechanism of mechanical properties of coal and rock caused by supercritical CO₂[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2557–2568.
- [92] 肖畅, 王开, 张小强, 等. 超临界 CO₂ 作用后无烟煤力学损伤演化特性及机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2340–2351.
- XIAO Chang, WANG Kai, ZHANG Xiaoqiang, et al. Mechanical damage evolution characteristics and mechanism of anthracite treated with supercritical CO₂[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2340–2351.
- [93] 黄中伟, 李国富, 杨睿月, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3212–3238.
- HUANG Zhongwei, LI Guofu, YANG Ruiyue, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3212–3238.
- [94] 丛钰洲, 翟成, 丁熊, 等. 煤层钻孔内注入液氮过程中的传热传质规律及煤损伤分析[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8): 3128–3137.
- CONG Yuzhou, ZHAI Cheng, DING Xiong, et al. Analysis on heat and mass transfer law and coal damage during liquid nitrogen injection into coal seam borehole[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(8): 3128–3137.
- [95] 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.
- [96] SUN Y H, LIU Z, LI Q, et al. Controlling groundwater infiltration by gas flooding for oil shale *in situ* pyrolysis exploitation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 179: 444–454.
- [97] ZHANG S, YUE Z R, LU X Z, et al. Model test and numerical simulation of foundation pit constructions using the combined artificial ground freezing method[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 205: 103700.
- [98] ZHAO D J, LIU Y M, SUN Y H, et al. Experiments and simulations of underground artificial freezing with the use of natural cold resources in cold regions[J]. *Building and Environment*, 2015, 87: 224–233.
- [99] HASHIMOTO K, NISHIHARA S, OJI S, et al. Field testing of permeation grouting using microfine cement[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2016, 169(2): 134–142.
- [100] LIU Z, SUN Y H, GUO W, et al. Experimental study of the characteristics of gas-injection barrier in two-dimensional porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125919.
- [101] DAVARZANI H, ARANDA R, COLOMBANO S, et al. Experimental study of foam propagation and stability in highly permeable porous media under lateral water flow: Diverting groundwater for application to soil remediation[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, 243: 103917.
- [102] 许婷, 李宁, 姚征, 等. 陕北榆神矿区富油煤分布规律及形成控制因素[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(3): 161–168.
- XU Ting, LI Ning, YAO Zheng, et al. Distribution and geological controls of tar-rich coals in Yushen Mining Area of Northern Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 161–168.