

# 富油煤原位热解 U 型水平井产能预测: 试验与数值模拟

东 振<sup>1</sup>, 陈艳鹏<sup>1</sup>, 张梦媛<sup>1</sup>, 王兴刚<sup>2</sup>, 焦立新<sup>2</sup>, 冯 烁<sup>3</sup>, 任 博<sup>4</sup>, 陈 浩<sup>1</sup>,  
薛俊杰<sup>1</sup>, 赵宇峰<sup>1</sup>, 黄蝶芳<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油吐哈油田公司 勘探开发研究院, 新疆 哈密 839009; 3. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 4. 安徽理工大学 力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**“双碳”目标下“取氢留碳”成为煤炭清洁利用的必然选择, 煤炭原位热解为国内油气增产提供了新思路, 科学预测富油煤原位热解产能对于项目经济性和能量回报率评估至关重要。目前针对中深层富油煤原位热解的研究较少, 考虑真实围压条件的块煤热解试验尚未见到报道, 为预测中深层富油煤原位热解产能、查明油气生产规律, 提出基于中深层煤炭原位热解特点的水平井开发方式, 开展了三塘湖盆地 2 套主力煤层的块煤覆压热解试验, 建立了基于 Boltzmann 函数的八道湾组富油煤覆压热解产率评价模型和 U 型水平井产能预测方法, 并对油气产能变化规律、能量回报率进行了讨论。结果表明: ① 煤炭原位热解具有资源丰度高、气体产物清洁低碳、地质风险小等优势, U 型、L 型、多分支水平井可采用间歇或连续方式生产。② 八道湾组煤比西山窑组煤具有更高的焦油和煤气产率, 焦油在 400~500 °C 时产量达到峰值, 围压具有降低热解产物传质能力的负面作用和提高传热效率的正向作用, 温度低于 400 °C 时负面作用占据主导, 随着温度升高, 正向作用逐渐占据主导。煤气在 300~400 °C 时产量快速增大, 400~600 °C 时产量增速减缓, 600 °C 后产量快速降低, 煤气中 H<sub>2</sub> 和 CO 随温度增加单调递增, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 随温度先增后减, 施加围压后更有利于八道湾组煤的煤气生产。③ 富油煤热解产物产率随温度增加呈现“缓慢增大—快速增大—趋于平稳”的 S 形变化规律, Boltzmann 函数能够较好的拟合富油煤热解产物产率变化规律, 直线形和三角形井网分别形成类矩形和类圆形的温度场, 井间煤层达到有效热解温度 (350 °C) 所需的水平井井距分别为 4.5、5.5 m, 三角形井网的加热效果优于直线形井网。④ 油气产能分为“初期低产、中期快速上产、后期稳产”3 个阶段, 按照煤的导热系数为 1 W/(m·°C) 预测, 单口 U 型井生产 5 a 的焦油、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 产能有望达到 1.56×10<sup>4</sup> t/a、260.21×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a 和 201.83×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a, 能量回报率能达到 2.09, 热解水和焦油在热解产物中质量比最大、产能最先企稳, 煤气中 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 质量比最高, CO<sub>2</sub> 随生产年限先增后降, CO 和 H<sub>2</sub> 随生产年限单调递增, 加热后期的产能贡献主要来自于煤气中 CO 和 H<sub>2</sub>。⑤ 等热值情况下, 煤炭原位热解相比地面煤燃烧减碳 97%, 理想情况下热解产生的 CO<sub>2</sub> 能够通过半焦层吸附埋存以实现自身“碳中和”。总体来看, 煤炭原位热解具备规模发展的资源基础、技术可行性以及良好的经济前景, 是一项具有发展潜力的化石能源清洁低碳开发新技术。

**关键词:** 煤炭原位热解; 富油煤; 水平井; 产能预测; 能量回报率

**中图分类号:** TD841; P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1168-17

收稿日期: 2024-04-01 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0340

基金项目: 中国石油前瞻性基础性资助项目 (2019E-25)

作者简介: 东 振 (1988—), 男, 高级工程师, 博士。E-mail: dongzhen69@petrochina.com.cn

通讯作者: 薛俊杰 (1985—), 女, 高级工程师, 博士。E-mail: xuejunjie@petrochina.com.cn

引用格式: 东振, 陈艳鹏, 张梦媛, 等. 富油煤原位热解 U 型水平井产能预测: 试验与数值模拟[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1168-1184.

DONG Zhen, CHEN Yanpeng, ZHANG Mengyuan, et al. Production capacity prediction of U-shaped horizontal wells for in-situ pyrolysis of tar-rich coal: Experimental and numerical simulation study[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1168-1184.



移动阅读

## Production capacity prediction of U-shaped horizontal wells for in-situ pyrolysis of tar-rich coal: Experimental and numerical simulation study

DONG Zhen<sup>1</sup>, CHEN Yanpeng<sup>1</sup>, ZHANG Mengyuan<sup>1</sup>, WANG Xinggang<sup>2</sup>, JIAO Lixin<sup>2</sup>, FENG Shuo<sup>3</sup>, REN Bo<sup>4</sup>,  
CHEN Hao<sup>1</sup>, XUE Junjie<sup>1</sup>, ZHAO Yufeng<sup>1</sup>, HUANG Diefang<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami 839009, China; 3. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 4. School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Under the goal of “dual carbon”, “taking hydrogen and retaining carbon” has become an inevitable choice for the clean utilization of coal, and underground coal pyrolysis provides a new idea for increasing domestic tar and gas production. Scientific prediction of underground tar-rich coal pyrolysis capacity is critical for project economics and energy return assessment, but fewer studies have been conducted on the underground coal pyrolysis in mid to deep layers, and pyrolysis experiments on block coal considering real confining pressure conditions have not yet been reported. To predict underground tar-rich coal pyrolysis capacity and identify the laws of oil and gas production, this paper proposed a horizontal well development method suitable for underground coal pyrolysis in mid to deep layers based on the characteristics of underground coal pyrolysis. Block coal overburden pyrolysis experiments were conducted on two sets of main coal seams in the Santanghu Basin. The overlying pyrolysis yield evaluation model of tar-rich coal in Badaowan Formation based on Boltzmann function and the productivity prediction method of U-shaped horizontal well were established. The variation law of tar and coal gas production capacity and energy return rate were discussed. The results show that: ① Underground coal pyrolysis has the advantages of high resource abundance, clean and low-carbon gas products, and low geological risk. U-shaped, L-shaped and multi-branch horizontal Wells can be produced intermittently or continuously. ② The coal of Badaowan Formation has a higher tar and coal gas yield than that of Xishanyao Formation. Tar production reaches its peak at 400–500 °C, confining pressure also has a negative effect on reducing the mass transfer capacity of pyrolysis products and a positive effect on improving heat transfer efficiency. When the temperature is lower than 400 °C, the negative effect dominates, and the positive effect gradually dominates as the temperature rises. The coal gas production increases rapidly at 300–400 °C, slows down at 400–600 °C, and rapidly decreases after 600 °C. H<sub>2</sub> and CO in coal gas increase monotonously with increasing temperature. CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> increase first and then decrease with temperature, the effect of confining pressure on the two sets of coal is different, and the application of confining pressure is more beneficial to coal gas production of Badaowan Formation coal. ③ Tar-rich coal pyrolysis product yield shows an S-shaped variation pattern of “slow increase - rapid increase - tends to stabilize” with increasing temperature, the Boltzmann function can better fit the law of tar-rich coal pyrolysis product yield. The linear and triangular well patterns form rectangular and circular temperature fields, respectively. To reach the effective pyrolysis temperature (350 °C) required for the coal seam between wells, the well spacing of horizontal wells is 4.5 and 5.5 meters respectively, which shows that the heating effect of triangular well pattern is better than that of linear well pattern. ④ Tar and coal gas productivity is divided into three stages: low production in the early stage, rapid production in the middle stage, and stable production in the late stage. According to 1 w/(m · °C) coal thermal conductivity, the production capacity of tar, methane and hydrogen in a single U-type well for 5 years is expected to reach  $1.56 \times 10^4$  t/a,  $260.21 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a and  $201.83 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a, and the energy return rate can reach 2.09. The mass ratio of pyrolysis water and tar in pyrolysis products is the largest, and the production capacity is the first to stabilize. The mass proportion of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in coal gas is the highest, CO<sub>2</sub> increases first and then decreases with production years, while CO and H<sub>2</sub> increase monotonically with production years. The production capacity contribution in the later stage of heating is mainly from CO and H<sub>2</sub> in the coal gas. ⑤ In the case of equal calorific value, underground coal pyrolysis reduces carbon emissions by 97% compared with surface coal combustion, ideally, and the CO<sub>2</sub> produced can be absorbed and buried through the semi-coke layer to achieve carbon neutrality. Overall, underground coal pyrolysis has the resource base, technical feasibility and good economic prospect for scale development, which is a new technology for clean and low-carbon development of fossil energy with great development potential.

**Key words:** underground coal pyrolysis; tar-rich coal; horizontal well; productivity prediction; energy return rate

## 0 引 言

中国是全球最大的碳排放国和能源进口国, 2022 年  $\text{CO}_2$  排放量达到  $114.8 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ , 原油和天然气对外依存度分别达到 71.5% 和 41.2%<sup>[2]</sup>, 在实现“双碳”目标和保障国家能源安全的双重需求驱动下, 煤炭原位热解作为一项新的人造油气藏非常规开发技术, 为我国化石能源低碳开发和油气增产提供了新思路。美国壳牌公司最早提出煤炭原位热解的技术设想, 并于 2004 年获得名为“煤原位热处理生产碳氢液体和煤气”的美国发明专利授权<sup>[3]</sup>。2008—2014 年, 犹他大学承担了美国能源部资助的煤炭原位热解 (Underground Coal Thermal Treatment, UCTT) 研究课题 (DE-NT0005015), 研发了 3 套煤炭热解试验装置, 开展了不同尺寸 (最大的块煤长度为 15 cm) 的热解试验, 通过数值模拟研究了实际尺寸煤层的传质传热规律<sup>[4]</sup>。ZHANG 等<sup>[5]</sup>认为基础研究要以原位应力约束条件下的块煤热解为重点, 掌握原位条件下的块煤孔缝结构演化和传质传热特征。KELLY 等<sup>[6]</sup>指出煤炭原位热解的温室气体排放量在油页岩原位转化的范围内, 净能量回报率在油砂 (2.8) 和油页岩 (0.48~2.6) 范围内, 油气产量、加热温度、加热井数量和煤的水分含量是决定工艺可行性的关键。

近年来, 国内专家学者在富油煤热处理后孔隙结构演化特征、富油煤热解后油气产出规律、地层温度场数值模拟方面取得了系列研究成果。王双明等<sup>[7]</sup>研究了块状煤样 (20 mm×20 mm×20 mm) 在  $\text{N}_2$  和欠氧气氛下热处理后的裂隙演化规律, 查明了 3 个不同阶段 (25~300、300~500、500~600 °C) 的热解指前因子和活化能变化规律。许涛等<sup>[8]</sup>开展了小尺寸块煤 (10 mm×10 mm×1.5 mm) 无围压热解试验, 研究表明在 300~500 °C 时纳米孔隙发育最为剧烈, 采用慢加热速率并增加该温度段停留时间, 可促进纳米孔隙平均孔径增大。师庆民等<sup>[9-10]</sup>研究了富油煤多源判识规律和热解流体滞留特征, 认为脂肪结构为主的富氢结构类型及丰度决定了富油煤焦油产出总体规律, 富油煤在 500 °C 时存在焦油束缚情况, 700 °C 时焦油发生二次热解后束缚特征消失。唐颖等<sup>[11]</sup>研究了黏结性富油煤柱塞样 ( $\phi 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ) 热解过程中油气析出规律, 500 °C 焦油产率达到最大值, 400 °C 时半焦孔隙度显著增大并接近 45%, 500~700 °C 时  $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$  体积占比接近 80%, 二者产率分别由 5.95 mL/g 和 16.75 mL/g 升至 35.70 mL/g 和 33.56 mL/g。毛崎森

等<sup>[12]</sup>、陈美静等<sup>[13]</sup>通过计算流体软件研究了直井对流加热过程中地层升温 and 降温规律, 研究指出多井换热比单井换热更有助于改善地温分布均匀性, 六井注热模式下提高流速和加热介质温度均可大幅改善煤层升温速率。董光顺等<sup>[14]</sup>利用 CMG 软件开展了富油煤层反七点井网模拟, 研究指出与注高温  $\text{N}_2$  相比, 注蒸汽开采在开采效率、加热效率和能量回报率方面具有明显优势。陕西省煤炭地质集团在榆林市大保当井田提取了全球第一桶原位热解焦油, 技术可行性得到验证。吐哈油田在三塘湖盆地钻探的两口评价井岩心测试结果表明, 八道湾组煤焦油产率为 8.40%~16.40%<sup>[15]</sup>, 达到了富油—高油煤标准, 显示出良好的资源前景。

综上所述, 富油煤原位热解技术尚处于室内试验研究和小试阶段, 科学预测富油煤原位热解产能对于项目经济性和能量回报率评估至关重要, 笔者认为以下 2 方面的研究仍需加强: 一是富油煤热解规律认识方面, 富油煤的热解油气产出规律受尺寸效应的影响, 煤样研究尺寸已经呈现出粉煤向柱塞样、大尺寸块煤发展的趋势, 但是考虑真实围压条件的块煤试验研究尚未开展; 二是已有研究以浅部煤层的“直井+对流加热”开发方式为主, 随着煤层埋深增加, 水平井成为更加适合的开发井型, 相比于对流加热、微波加热等方式, 电加热方式的作业流程更加简单, 而且井下大功率电加热器能够通过消纳绿电进一步降低生产成本, 但是目前“水平井+电加热”开发方式的研究较少。基于此, 笔者在覆压 (15 MPa) 块煤 ( $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) 热解试验基础上, 揭示了富油煤热解过程中焦油、煤气产出规律并建立了热解产率评价模型, 通过数值模拟手段预测了基于“U 型井+电加热”开发方式的富油煤原位热解产能和能量回报率, 以期为先导试验方案编制和项目决策提供依据。

## 1 中深层煤炭原位热解技术

### 1.1 煤炭原位热解技术内涵

煤炭原位热解 (Underground Coal Pyrolysis, UCP) 是典型的人造油气藏开发方式, 是指在煤层中建立热量导入和产物产出通道, 通原位加热方式使煤发生热解, 生产液态 (焦油、水) 和气态 (煤气) 碳氢化合物, 同时将煤中主要碳元素以半焦形式留在地下。热解反应的实质是煤中大分子弱键在高温作用下发生断裂、聚合, 析出轻质气态物质与焦油, 在此同时, 残余分子键聚合生成稳定的碳类大分子固体物质。

煤热解一般分为 3 个阶段<sup>[16]</sup>, 室温~300 ℃ 时煤逐渐失重, 水分和低分子化合物挥发; 300~700 ℃ 时煤失重速率迅速增大, 部分低碳芳香烃和热稳定差的物质开始分解, 生成大量 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、不饱和烃与焦油; 超过 700 ℃ 后煤的失重速率下降, 高碳稠环芳

烃开始分解, 生成 H<sub>2</sub> 为主的煤气。按热解终温不同, 分为低温热解 (500~650 ℃)、中温热解 (650~900 ℃) 和高温热解 (900~1 100 ℃) 3 类; 按照通道建立方式不同, 分为井工式和钻井式 2 类<sup>[17]</sup>, 本文主要研究低温钻井式煤炭原位热解技术 (图 1)。

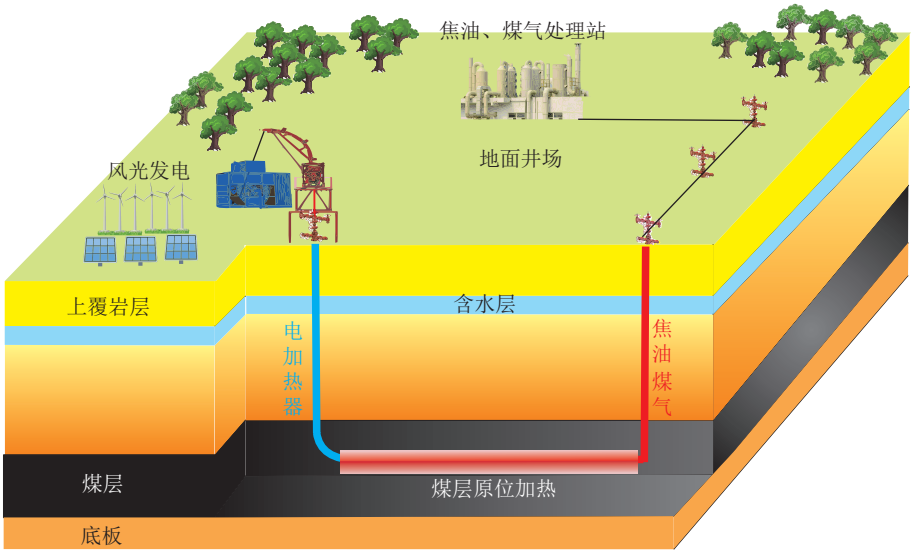


图 1 钻井式煤炭原位热解示意 (据文献[18]修改)

Fig.1 Schematic diagram of UCP using drilling method (Modified according to reference [18])

煤炭原位热解以生产焦油和煤气为目标, 在低温、慢升温速率、高围压的工况下进行。煤炭原位热解与地面热解有 3 点显著差异 (表 1): 一是尺寸差异, 原位热解以块煤 (厘米—米) 为对象, 地面热解以煤颗粒 (微米—毫米) 为对象, 块煤的尺寸、粒径跨度均比粉煤颗粒大。二是空间约束不同, 煤炭原位热解时受到地层约束作用, 粉煤热解时受外界约束作用较小。三是传热传质规律不同, 原位热解比地面热解的升温速率小很多, 属于慢速热解, 煤炭原位热解时热量传递与加热工艺相关。由于煤层初始渗透率较低, 焦油等挥发分在煤中停留时间较长, 因此二次反应比粉煤剧烈。

表 1 煤炭原位热解与地面热解的特征差异  
Table 1 Characteristics difference between UCP and surface coal pyrolysis

| 典型特征 | 原位热解               | 地面热解           |
|------|--------------------|----------------|
| 煤的尺寸 | 大块或超大块(厘米—米)       | 颗粒(微米—毫米)      |
| 空间约束 | 地层约束               | 约束较小           |
| 热量传递 | 升温速率小, 热量传递与加热工艺相关 | 升温速率大, 热对流和热传导 |
| 质量传递 | 相对困难, 焦油二次反应明显     | 相对容易, 焦油二次反应较弱 |

钻井式比井工式更适合中深层 (800~2 000 m) 煤炭资源开发, “水平井+原位加热”是中深层 UCP 的

主要技术路线, 水平井能够增大煤层加热范围、有利于传质传热过程; 原位加热主要包括反应热加热、电加热、对流加热、辐射加热、复合加热等方式<sup>[19-20]</sup>, 需要根据具体的地质和煤质条件, 优选水平井型和加热方式。表 2 为 3 种主要的煤炭原位热解水平井井型, U 型水平井的水平加热井和生产井在煤层连通, 同时适于开发薄、厚煤层, 该井型可拓展为双 U 型井或者多 U 型井。加热井可选择电加热、对流加热、复合加热等方式, 热解产物由水平井进入生产井后采出。采用电加热方式时, 为减少初始阶段热量散失, 生产井采取关井措施, 油气大量生成或者压力超过安全值后打开生产井生产, 该井型的优势是初始产油气的时间短, 根据油气生产情况, 可通过“关井加热—开井生产—再关井加热—再开井生产”的模式间歇生产; 采用对流加热方式时, 生产井始终保持开井状态, 换热后的低温流体 (水蒸气、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等) 通过生产井在地面回收并重复加热利用。L 型水平井适于开发薄、厚煤层, 加热井和生产井都为 L 型水平井, 水平井段保持相对平行, 该井型可拓展为“人”字型的多底井。加热井可选择电加热、对流加热、复合加热等方式, 由于前期煤层加热时间较长, 因此初始产油气的时间也较长, 但是生产井能以相对连续的方式生产油气。多分支水平井适于开发薄煤层, 在煤层中钻多分支水平井后,

生产井与水平井主支末端连通,在水平井主支和分支下入加热电缆后,采用电加热方式加热煤层。

表 2 3 种主要的煤炭原位热解水平井型  
Table 2 Three main types of horizontal well types for UCP

| 井型    | U型水平井                  | L型水平井                   | 多分支水平井  |
|-------|------------------------|-------------------------|---------|
| 示意图   |                        |                         |         |
| 适用煤厚  | 薄、厚煤层                  | 薄、厚煤层                   | 薄煤层     |
| 产油气时间 | 快                      | 慢                       | 快       |
| 开发方式  | 连续或间歇生产                | 连续生产                    | 连续或间歇生产 |
| 扩展井型  | 双U型水平井                 | “人”字型水平井                | 多主支水平井  |
| 已应用领域 | 煤炭地下气化 <sup>[21]</sup> | 页岩油原位转化 <sup>[22]</sup> | 煤层气开发   |

1.2 煤炭原位热解技术优势

UCP 通过“取氢留碳”实现了高碳化石能源的低碳化开发,具有 3 个显著优势:一是资源潜力大,资源丰度高。我国陆上 2 000 m 以浅的煤炭资源量为  $3.88\times10^{12}$  t,长焰煤~肥煤作为潜在开发目标,资源量约为  $2.9\times10^{12}$  t,资源占比达到 74.7%。富油煤资源量为  $5\,500\times10^8$  t<sup>[23]</sup>,按吨煤生产焦油 0.1 t、生产煤气  $250\text{ m}^3$ (CH<sub>4</sub> 占煤气体积的 50%)匡算,仅富油煤的潜在焦油资源量达到  $550\times10^8$  t,天然气资源量达到  $69\times10^{12}\text{ m}^3$ 。煤厚为 10 m 时,煤炭原位热解的热解气天然气丰度为  $17.5\times10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ ,根据《石油天然气储量估算规范》中天然气储量丰度划分标准,达到高丰度等级,是相同煤厚时煤层气(含气量  $20\text{ m}^3/\text{t}$ )储量丰度的 6.25 倍。二是热解煤气中可燃组分占比高、热值高、CO<sub>2</sub> 占比低。表 3 为煤炭地面热解与煤炭地下

气化的气体产物体积比。粉煤热解后的煤气中<sup>[18]</sup>,CH<sub>4</sub> 占比为 28.3~34.2%、H<sub>2</sub> 占比为 30.6%~43.0%、CO 占比为 10.5%~14.4%,可燃组分总占比超过 70%,煤气热值超过  $19.4\text{ MJ}/\text{m}^3$ ,明显高于煤炭地下气化现场试验的粗煤气热值<sup>[24]</sup>,而且 CO<sub>2</sub> 的体积占比降幅超过 90%。三是地质安全风险小,环境污染程度低。煤炭原位热解后并未在煤层形成大体积空腔,半焦层的支撑作用降低了地层变形沉降程度。煤中硫的释放程度随热解温度升高而增大<sup>[25]</sup>,因此煤在低温热解时 H<sub>2</sub>S 的排放量比气化时更低,能够有效降低管道腐蚀、井筒完整性破坏风险,同时半焦作为强吸附剂可以捕获大量污染物,避免其进入地下水系统造成污染。

2 三塘湖盆地富油煤热解试验

2.1 富油块煤覆压热解试验

三塘湖盆地富油煤资源丰富,中深层富油煤原位热解开发的潜力巨大<sup>[15]</sup>,研究对象选为三塘湖盆地石头梅露天煤矿西山窑组 9 号煤和淖毛湖白石湖露天煤矿八道湾组 1 号煤,西山窑组煤的最大反射率为 0.51%~0.58%,平均反射率为 0.40%~0.51%;八道湾组煤的最大反射率为 0.37%~0.41%,平均反射率为 0.30%~0.35%。如表 4 所示,两套煤属于低灰、中等水分、中~高挥发分煤,八道湾组煤的碳氢比(13.79~14.67)比八道湾组煤小(19.42~22.74),推测前者的脂肪侧链占比更高、更有利于产焦油。参照《煤的格金低温干馏试验方法》,开展了 6 mm 直径煤的低温干馏试验,600 ℃ 时空气干燥基的焦油产率分别为 6.1%和 10.8%(图 2),八道湾组煤的焦油产率和挥发分更高,更适合通过原位热解方式开发,而西山窑组煤的灰分

表 3 煤炭地面热解与煤炭地下气化的气体产物体积比

| 气体组分                     | 煤炭地下气化   |          | 粉煤热解      |          |
|--------------------------|----------|----------|-----------|----------|
|                          | 天鹅山-水氧气化 | 钦奇拉-纯氧气化 | 三塘湖盆地-白石湖 | 吐哈盆地-大南湖 |
|                          |          |          |           |          |
| H <sub>2</sub>           | 15.0     | 44.5     | 30.6      | 43.0     |
| CH <sub>4</sub>          | 37.0     | 10.6     | 34.2      | 28.3     |
| CO                       | 5.0      | 10.1     | 10.5      | 14.4     |
| CO <sub>2</sub>          | 41.0     | 31.9     | 1.8       | 2.6      |
| N <sub>2</sub>           | 0        | 2.7      | 16.7      | 5.3      |
| 其他                       | 2.0      | 0.2      | 6.2       | 6.4      |
| 热值/(MJ·m <sup>-3</sup> ) | 16.7     | 13.4     | 19.4      | 20.1     |

表 4 研究煤样的工业与元素分析

Table 4 Proximate and ultimate analysis of coal samples

%

| 编号    | 工业分析     |          |           |           | 元素分析      |           |           |                   |       |
|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-------|
|       | $M_{ad}$ | $A_{ad}$ | $FC_{ad}$ | $V_{daf}$ | $C_{daf}$ | $H_{daf}$ | $N_{daf}$ | $O_{daf}+S_{daf}$ | 碳氢比   |
| BDW-1 | 9.00     | 10.67    | 30.04     | 50.29     | 73.92     | 5.36      | 1.52      | 19.20             | 13.79 |
| BDW-2 | 9.50     | 10.14    | 30.35     | 50.01     | 73.64     | 5.02      | 1.55      | 19.79             | 14.67 |
| BDW-3 | 8.91     | 10.76    | 29.05     | 51.28     | 73.57     | 5.44      | 1.55      | 19.44             | 13.52 |
| XSY-1 | 7.72     | 3.40     | 55.85     | 33.03     | 79.13     | 3.48      | 0.63      | 16.76             | 22.74 |
| XSY-2 | 8.20     | 4.89     | 52.18     | 34.73     | 79.25     | 4.08      | 0.83      | 15.84             | 19.42 |
| XSY-3 | 9.20     | 5.53     | 55.48     | 29.79     | 79.76     | 3.85      | 0.75      | 15.64             | 20.72 |

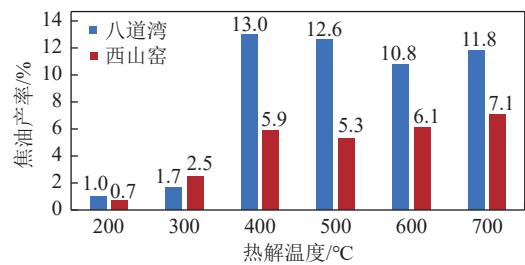


图 2 焦油产率随温度变化规律

Fig.2 Variation law of tar yield with temperature

占比更低、碳元素占比更高,更适合通过地下气化方式开发<sup>[26]</sup>。

与粉煤热解相比,煤原位热解过程中的传热传质阻力显著增强,为揭示原位条件下富油煤热解产物产率变化规律,利用新疆大学研制的块煤覆压热解试验装置(图 3)开展试验。试验采用 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的柱塞块煤(图 4),为反映煤真实含水情况,选用未受风化影响的原始大块煤切割后制作煤样,制样完成后立即通过保鲜膜封装保存,分别开展了常压和加压热解试验,加压试验时设定轴压、围压均为 15 MPa,加压前通过氮气吹扫装置内部、管路中的空气,完成加压后将初始温度设定为 200  $^{\circ}\text{C}$ ,后续设定试验温度分别为 300、400、500、600、700  $^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,

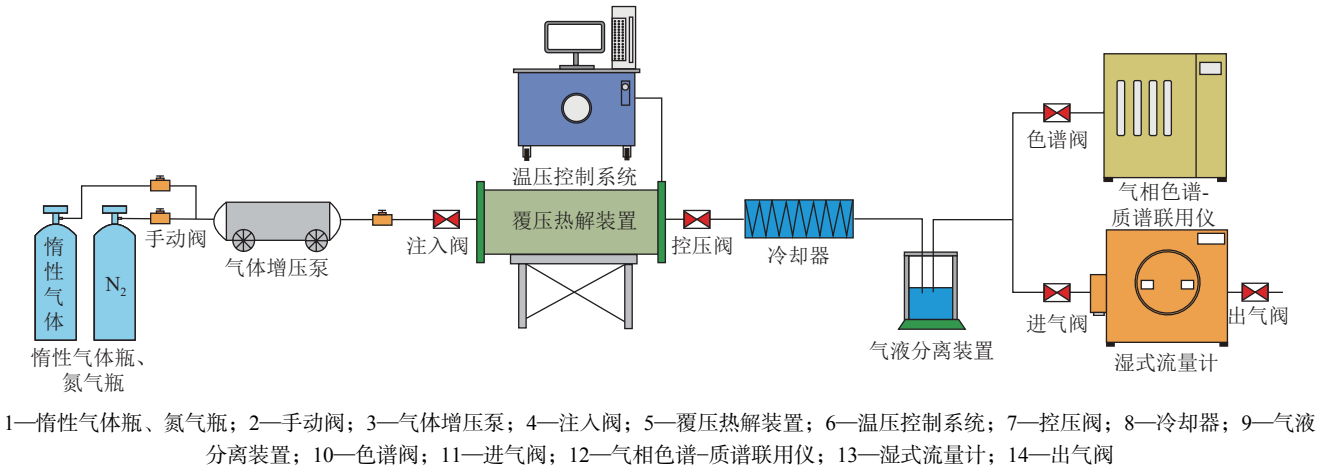


图 3 块煤覆压热解试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus for lump coal pyrolysis under confining pressure

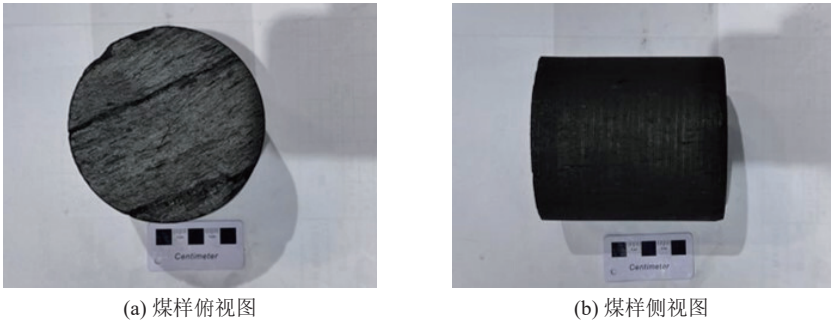


图 4 白石湖采区八道湾组的试验块煤

Fig.4 Experimental lump coal of Badaowan Formation in Baishihu mining area

每个温度维持 4 h, 注入氮气压力为 2 MPa, 用以收集该时间段的热解产物, 如果产气速率骤减或不产气, 并且焦油产出明显减慢, 则表示该温度反应完成。通过气体流量计测量气体体积, 通过集气袋前后质量差计算气体质量, 气相色谱-质谱联用仪检测气体组分。锥形瓶收集液体, 通过蒸馏装置分离焦油和水, 并称量水和焦油的质量。原煤质量减去收集的气体、液体质量即可得到第 1 个温度点反应后的半焦; 前一温度点的半焦质量减去后一温度点产生的气体、液体质量得到当前温度点半焦质量, 试验完成后称量得到 700 °C

的半焦质量。

## 2.2 富油煤热解试验结果与讨论

### 2.2.1 温度对热解产物影响

如图 5 所示, 热解温度低于 300 °C 时, 由于焦油产量很低, 产生的少量焦油主要吸附在试剂瓶的内壁, 400 °C 时焦油产量迅速增大, 当温度超过 500 °C 后产量又迅速下降。不同温度下生产的煤焦油颜色也有差异, 300 °C 时煤焦油中的轻质组分居多, 因此颜色较浅, 随着温度增加, 洗油、蒽油等重质焦油组分含量增大, 导致煤焦油颜色变深。

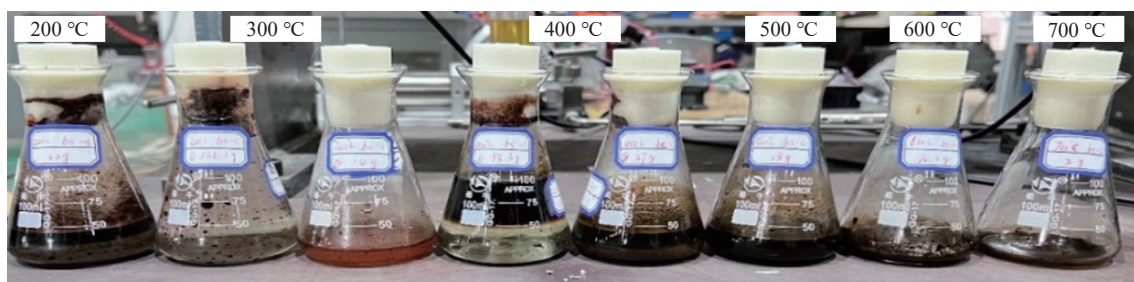


图 5 八道湾组煤不同温度生产的焦油

Fig.5 Tar production of coal from the Badaowan Formation at different temperatures

如图 6 所示, 热解产物 (焦油、煤气和水) 总产率随温度增加呈现“缓慢增大—快速增大—趋于平稳”的变化规律, 八道湾组煤的热解产物产率比西山窑组煤要大, 这与二者在煤质和富氢结构上的差异有关。围压对于二者的影响并不一致, 对于八道湾组煤来说, 施加围压后热解产物产率降幅明显, 400 °C 时的降幅达到 23.1%; 围压对西山窑组煤的影响较小, 400 °C 时热解产物产率降幅仅为 7.6%, 由此可见, 围压对煤热解产物产率的影响与煤自身性质有关, 对富氢结构多、焦油产率高的煤种影响更为显著。

如图 7 所示, 温度低于 300 °C 时, 焦油和煤气产率很低, 热解产物以水为主, 温度超过 300 °C 后焦油、煤气的产率迅速增大, 400、500 °C 时水和焦油的产率曲线分别达到拐点, 此后二者产率基本不随温度变化, 煤气产率在 600 °C 后仍表现出较大的增长趋势。由此可见, 以焦油为目标产物时, 有利温度为 500 °C, 以煤气为目标产物时, 有利温度应大于 600 °C, 不同气体组分的有利温度区间也不相同, 将在下节继续讨论。需说明的是, 生产过程中应控制热解产物压力低于煤层静水压力, 以防止气体泄漏后对地下水造成污染。

### 2.2.2 围压对热解产物影响

如图 8a 所示, 八道湾组煤的焦油产量明显高于西山窑组煤, 虽然西山窑组煤的焦油产量峰值有所滞后, 但都在 400~500 °C 达到了峰值。不同于压力对粉煤热解的影响机制, 围压对块煤热解的影响具有两

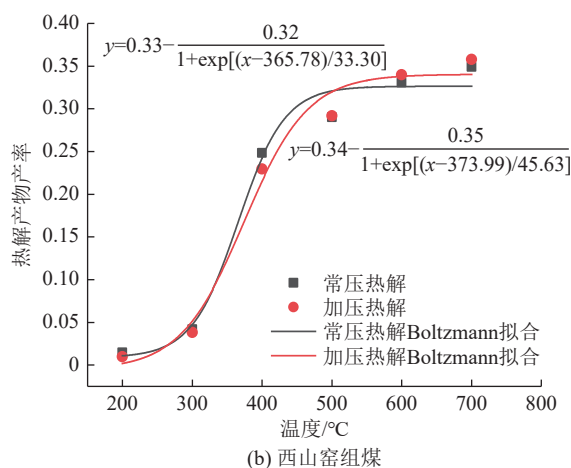
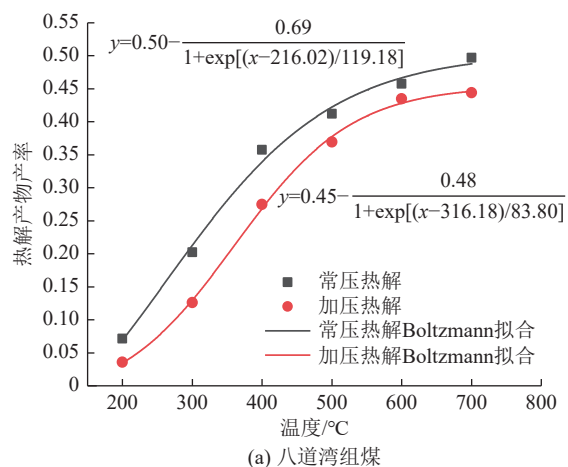


图 6 煤的热解产物总产率随温度变化规律

Fig.6 Total yield of coal pyrolysis products varies with temperature

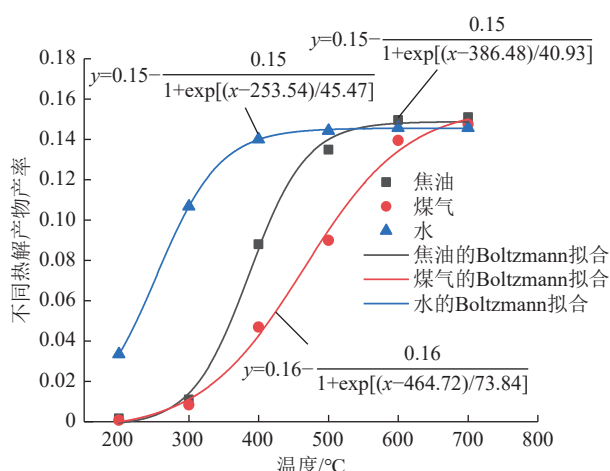


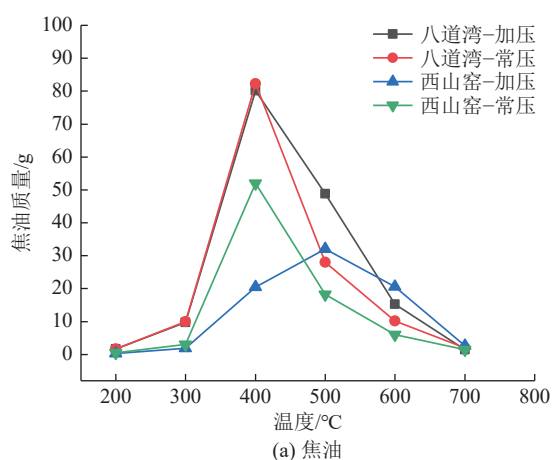
图7 焦油、水、煤气产率随温度变化规律  
(八道湾组煤-加压)

Fig.7 Changes in tar, water, and coal gas yields with temperature (Badaowan Formation-confining pressure)

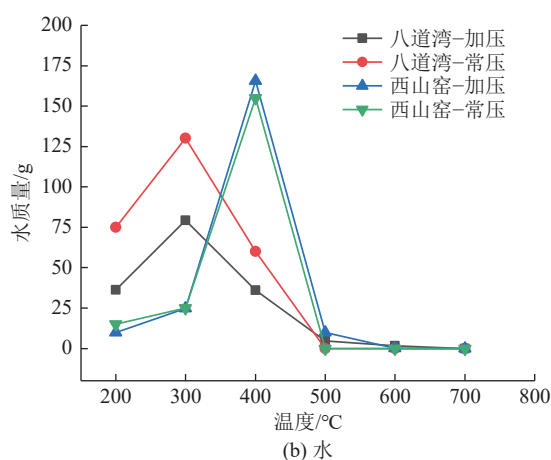
面性,一方面,围压具有提高传热能力的正向作用,原因是孔隙空间压缩后煤的导热系数增大,传热能力提升有助于提高热解范围和焦油产量;另一方面,围压具有降低传质能力的负面作用,加压后割理开度减小、

孔隙压缩,导致煤块中的气、液渗流阻力增大,造成焦油产量降低。焦油产量受传质传热的共同影响,围压的正向、负面作用在热解不同温度阶段的权重不同。八道湾组煤以镜煤、亮煤为主,脆度大易破碎,内生裂隙发育,裂隙密度 300~400 条/m,裂隙被矿物质填充;西山窑组煤以暗煤为主,镜煤、亮煤成分小于 20%,煤体质地比较坚硬,手掰不易破碎,煤心层理不清晰,裂隙不发育。温度小于 400 °C 时,加压导致孔隙、裂隙体积收缩,传质能力降低的负面作用略强于传热能力提升的正向作用,因此焦油产量略有降低;当温度大于 400~500 °C 后,煤内部破碎部分受热体积膨胀,传热能力提升的正向作用更显著,此时焦油产量比常压时有所提高。与八道湾组煤相比,西山窑组煤施加围压后传质能力降低效果更显著,因此焦油峰值产量降低。

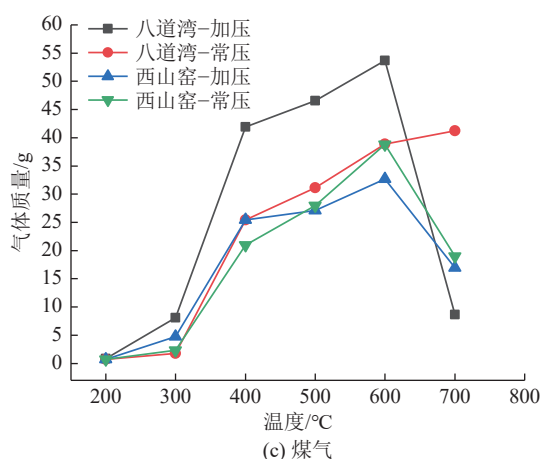
如图 8b 所示,温度低于 300 °C 时,产水主要来自煤中的自由水、结合水,八道湾组煤比西山窑组煤的水分含量大,因此产水量也更大。煤中氧元素多存在于有机氧化物(羧酸、醛、酮等)、含氧官能团(酚、醚等)和羟基中,温度超过 350 °C 后,在有机氧化物发生



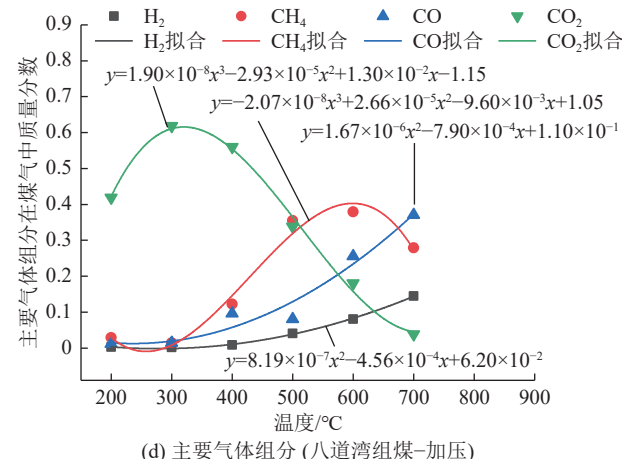
(a) 焦油



(b) 水



(c) 煤气



(d) 主要气体组分(八道湾组煤-加压)

图8 焦油、水、煤气产量和主要气体组分质量分数随温度变化规律

Fig.8 Changes in tar, water, and coal gas production and mass fractions of major gas components with temperature

裂解、脱氧等反应,羟基发生脱水反应,含氧官能团参与各种反应的共同作用下,继续生成热解水。两种煤在氢总质量相差不大的情况下,推测八道湾组煤中可产生裂解、脱氧等反应的有机氧化物、含氧官能团等含量少,因此热解水产量比西山窑组煤小。温度超过 500 ℃ 后基本不再产生热解水。

如图 8c 所示,煤气产量变化规律基本一致,300~400 ℃ 时产量快速增大,400~600 ℃ 时产量增长速率减缓,600 ℃ 后产量快速降低。不同于焦油、水具有明显产量峰值,煤气的稳产温度区间更大。围压的存在会减慢挥发分的传质速率,这种作用使得液态挥发分从焦表面逸出的阻力增加,延长了其在焦样颗粒内部的停留时间,从而促进了挥发分在半焦颗粒内二次裂解的程度,从试验结果可以看出,加压后煤

气产量有所提升,八道湾组煤比西山窑组煤的产气量更大,说明焦油和煤气的产出特征具有一致性,即焦油产量更高的煤,其煤气产量也更高。

如图 8d 所示,  $H_2$  和  $CO$  在煤气中的质量占比随温度增大出现单调递增趋势,  $CH_4$  和  $CO_2$  分别在 600 ℃ 和 300 ℃ 时质量占比达到峰值,  $CH_4$  主要源于自芳香烷烃和脂肪烃的裂解<sup>[27]</sup>,  $CO_2$  占比在 200~300 ℃ 大幅度提高,原因是富油煤中的羟基和羧基结构开始裂解<sup>[28]</sup>,同时有机质和含氧官能团开始发生热解反应<sup>[29]</sup>,在裂解、热解和氧化过程中,产生  $CO_2$  的反应路径相对活跃。如图 9 所示,400 ℃ 时,  $CO_2$  的体积分数最高,八道湾组煤的  $CH_4$ 、 $H_2$  体积分数高于西山窑组;600 ℃ 时,  $H_2$  的体积分数最高,两组煤的  $H_2$ 、 $CH_4$  分数均有所提升,且加压后有效组分都出现显著降低。

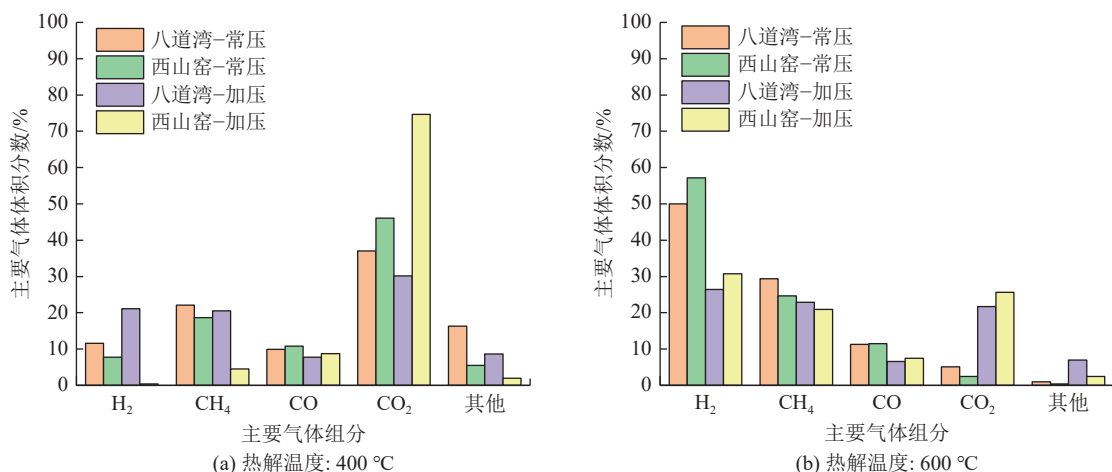


图 9 典型温度的气体产物组分占比

Fig.9 Volume proportions of gas product components at typical temperatures

### 2.3 富油煤热解产物产率评价模型

试验发现富油煤热解产物产率随温度增加呈现 S 形变化规律,分为低温平台区、转化过渡区和高温平台区 3 个阶段(图 10),反映了煤热解过程中不同反应路径的竞争和相互影响<sup>[30]</sup>,温度较低温时(< 300 ℃)煤的热解转化率很低,因此热解产物产率比较低;在转化过渡区(300~500 ℃),煤的热解转化率迅速增大<sup>[7]</sup>,导致热解产物产率随温度增加近似呈线性增大;温度超过 500 ℃ 后,煤中有机物基本被分解,热解产物产率趋近于稳定。在选择回归函数时,综合考虑拟合函数表达简便性和拟合准确性,优选了 3 个典型的 S 形曲线拟合函数:

Boltzmann 函数:

$$y = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 + \exp[(x - \theta_3)/\theta_4]} + \theta_2 \quad (1)$$

Logistic 函数:

$$y = \frac{\theta_1}{1 + \exp[-\theta_2(x - \theta_3)]} \quad (2)$$

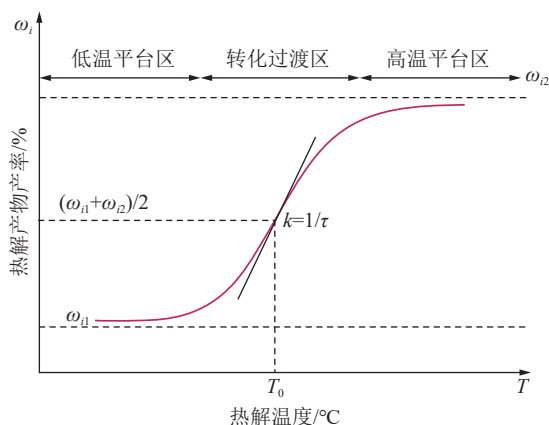


图 10 富油煤热解产物产率评价模型

Fig.10 Evaluation model of tar rich coal pyrolysis product yield

Weibull 函数:

$$y = \theta_1 - \theta_1 \exp[-(\theta_2 x - \theta_3)^{\theta_4}] \quad (3)$$

式中:  $y$  为函数因变量,  $x$  为函数自变量,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  分别为函数中的常数。

表 5 为 3 个函数对图 6 试验数据的拟合结果, 可以看出: 3 个函数对常压、围压条件下的块煤热解产率都有较好拟合效果, 与 Weibull 函数相比, Boltzmann

函数和 Logistic 函数的  $R^2$  偏大、卡方偏小, 说明在相关性和数据偏离程度方面, 后 2 个函数拟合结果更优; Boltzmann 函数和 Logistic 函数在表达式上具有相似性, 后者可看成是前者的特殊形式, 且 Boltzmann 函数在围压条件下的相关性拟合效果最优, 综合分析后认为 Boltzmann 函数具有相关系数高、数据偏离程度小、普适性高的特点, 因此笔者采用 Boltzmann 函数描述富油煤热解产物产率规律。

表 5 不同拟合函数回归块煤热解产物产率效果对比

Table 5 Comparison of regression effects of different fitting functions on yield of lump coal pyrolysis products

| 拟合试验对象 | Boltzmann函数 |                            | Logistic函数 |                           | Weibull函数 |                           |
|--------|-------------|----------------------------|------------|---------------------------|-----------|---------------------------|
|        | $R^2$       | 卡方                         | $R^2$      | 卡方                        | $R^2$     | 卡方                        |
| 八道湾-加压 | 0.998 8     | $8.589\ 26 \times 10^{-5}$ | 0.998 1    | $8.269\ 0 \times 10^{-5}$ | 0.998 7   | $8.972\ 4 \times 10^{-5}$ |
| 西山窑-加压 | 0.986 6     | $7.713\ 6 \times 10^{-4}$  | 0.986 5    | $5.205\ 3 \times 10^{-4}$ | 0.986 4   | $7.824\ 8 \times 10^{-4}$ |
| 八道湾-常压 | 0.994 7     | $3.592\ 6 \times 10^{-4}$  | 0.991 3    | $3.919\ 9 \times 10^{-4}$ | 0.994 6   | $3.619\ 6 \times 10^{-4}$ |
| 西山窑-常压 | 0.963 9     | $7.801\ 6 \times 10^{-4}$  | 0.975 1    | $5.388\ 5 \times 10^{-4}$ | 0.955 1   | $9.698\ 8 \times 10^{-4}$ |

如图 10 所示, 根据 Boltzmann 函数, 将富油煤热解产物产率与温度的数学关系模型描述为

$$\omega_i = \frac{\omega_{i1} - \omega_{i2}}{1 + \exp[(T - T_0)/\tau]} + \omega_{i2} \quad (4)$$

式中:  $\omega_i$  为富油煤热解产物产率, 下标  $i$  表示热解产物类型, 当  $i$  为 o 时表示焦油, 当  $i$  为 w 时表示水, 当  $i$  为 g 时表示煤气,  $\omega_{i1}$  为  $i$  类产物产率的初始值, %;  $\omega_{i2}$  为  $i$  类产物产率的最终值, %;  $\omega_{i2}$  越大表示热解产物的产能越大。  $T_0$  为  $\omega_{i1}$  与  $\omega_{i2}$  算术平均值对应的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ , 是低温、高温平台区间 50% 对应的温度, 代表了 S 型曲线的拐点, 物理意义上反映了煤热解生成产物的难易程度:  $T_0$  值越小, 曲线越“窄高”, 即在比较低的温度就能达到 50% 的产率;  $T_0$  值越大, 曲线越“扁宽”, 即在比较高的温度时才能达到 50% 的产率。  $\tau$  代表热解产物从慢速转化到快速转化的平均变化速率,  $\tau$  值越小, 热解产物产率的转化过渡区温度范围越窄、热解产率提升越迅速。  $k$  为图 10 中产率评价模型转化过渡区斜率。

根据图 7 试验数据, 八道湾富油煤覆压热解过程中, 焦油、煤气和水的产率随着温度变化函数为

$$\omega_o = 0.15 - \frac{0.15}{1 + \exp[(T - 386.48)/40.93]} \quad (5)$$

$$\omega_g = 0.16 - \frac{0.16}{1 + \exp[(T - 464.72)/73.84]} \quad (6)$$

$$\omega_w = 0.15 - \frac{0.15}{1 + \exp[(T - 253.54)/45.47]} \quad (7)$$

根据图 8d 的试验数据, 利用多项式拟合  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、

$\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  四种主要气体组分在煤气中质量分数, 拟合后的  $R^2$  分别为 0.998 6、0.980 7、0.958 7 和 0.994 3, 结合式 (6) 得到主要气体的产率随温度变化函数:

$$\omega_{\text{H}_2} = \frac{0.16 \exp[(T - 464.72)/73.84]}{1 + \exp[(T - 464.72)/73.84]} (8.19 \times 10^{-7} T^2 - 4.56 \times 10^{-4} T + 6.20 \times 10^{-2}) \quad (8)$$

$$\omega_{\text{CH}_4} = \frac{0.16 \exp[(T - 464.72)/73.84]}{1 + \exp[(T - 464.72)/73.84]} (-2.07 \times 10^{-8} T^3 + 2.66 \times 10^{-5} T^2 - 9.60 \times 10^{-3} T + 1.05) \quad (9)$$

$$\omega_{\text{CO}} = \frac{0.16 \exp[(T - 464.72)/73.84]}{1 + \exp[(T - 464.72)/73.84]} (1.67 \times 10^{-6} T^2 - 7.90 \times 10^{-4} T + 1.10 \times 10^{-1}) \quad (10)$$

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{0.16 \exp[(T - 464.72)/73.84]}{1 + \exp[(T - 464.72)/73.84]} (1.90 \times 10^{-8} T^3 - 2.93 \times 10^{-5} T^2 + 1.30 \times 10^{-2} T - 1.15) \quad (11)$$

式中:  $\omega_o$ 、 $\omega_g$  和  $\omega_w$  分别为焦油、煤气和水的产率, %;  $\omega_{\text{H}_2}$ 、 $\omega_{\text{CH}_4}$ 、 $\omega_{\text{CO}}$  和  $\omega_{\text{CO}_2}$  分别为  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  的产率, %;  $T$  为热解温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 富油煤原位热解水平井产能预测

#### 3.1 U 型水平井井距

建立水平井产能预测数值模型前, 需要根据水平井井距确定合理的建模尺寸, 为此利用 COMSOL Multiphysics 多物理场模拟软件研究了不同井网类型

的温度场特征和井距。模拟关井电加热方式时煤层温度扩展规律,假设热量仅在煤层中通过热传导方式传递,并且煤的热物理参数不随地层压力、温度和孔隙结构发生变化。为保证温度场充分扩展,将煤层高度和宽度均设为 30 m,鉴于目前井下大功率电加热器工作性能,将电加热器温度设定为 650 ℃,煤层初始温度设为 28 ℃,煤比热容设为 1 700 J/(kg · ℃),煤导

热系数设为 0.3 W/(m · ℃),煤密度设为 1 380 kg/m<sup>3</sup>。如图 11 所示,2 种井网的井间平均温度均随加热时间增加呈现先快速增加、后缓慢增加的趋势,井距越小这种趋势越明显;相同温度和时间条件下,三角形井网的加热效果更好、井距更大。以加热 5 a 后井间温度达到 350 ℃ 标定有效热解范围,直线形井网和三角形井网的井距分别为 4.5 m 和 5.5 m。

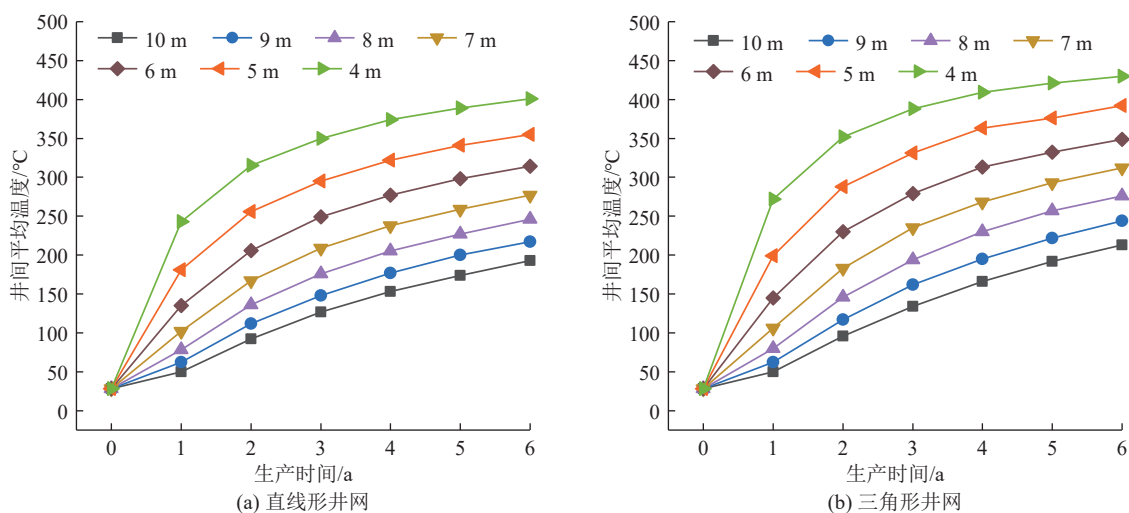


图 11 直线形和三角形井网的井间温度变化规律

Fig.11 Temperature variation between two wells in linear and triangular well pattern

如图 12 所示,以 3 口井距为 5 m 的直线形井网为例,图中蓝线和红线分别为 300 ℃ 和 350 ℃ 等温线,加热前 2 a 井间温度均低于 300 ℃,受温度场叠加效应,第 3 年时井间温度超过 300 ℃,并形成类矩形的温度场,类矩形温度场的几何尺寸随着加热时间增

大,加热 5 a 后垂向热解高度 (温度大于 300 ℃) 为 4.8 m,直线形井网适用于厚度小于 5 m 的煤层。

如图 13 所示,以井距为 5m 的三角形井网为例,图中蓝线和红线分别为 300 ℃ 和 350 ℃ 等温线,与直线形井网相比,三角形井网的温度场叠加效应更加

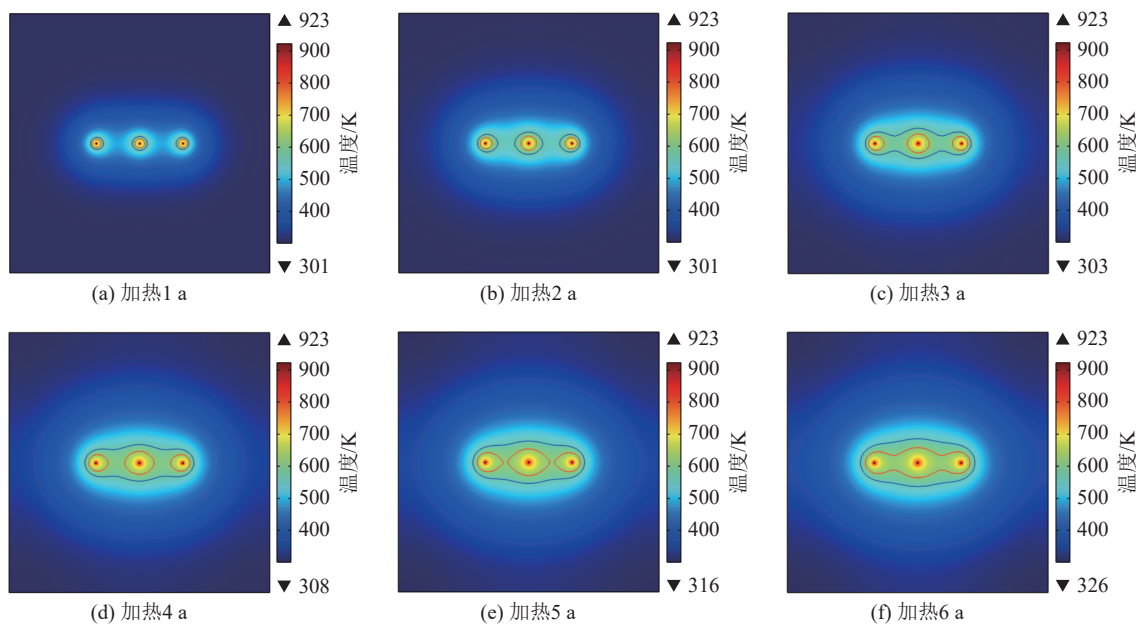


图 12 直线形井网温度场与热解范围

Fig.12 Temperature field and effective pyrolysis range of linear well pattern

明显, 加热 3 a 后井间温度达到 347 ℃, 随着加热时间增加, 温度场不断趋近于圆形, 第 3 年时类圆温度场 (温度大于 300 ℃) 的直径达到 5.6 m, 加热 5 a 后类圆直径达到 7.0 m, 以三角形井网作为基本加热单元, 可

加热厚度大于 5 m 的煤层。加热 1 a、3 a 和 5 a 时间, 三角形井网比直线形井网的加热面积分别提高 27.4%、28.6% 和 5.5%, 整体来看, 三角形井网对煤层的加热效果更好。

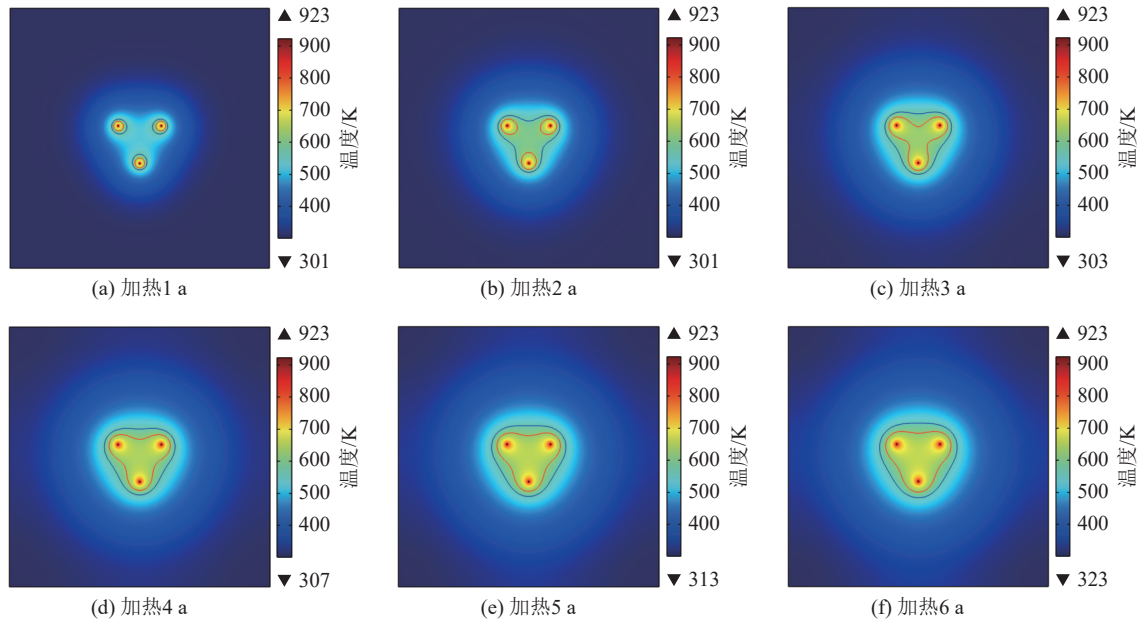


图 13 三角形井网温度场与热解范围

Fig.13 Temperature field and effective pyrolysis range of triangular well pattern

研究表明热解过程中煤的导热系数有所增加<sup>[7]</sup>、孔隙率显著增大<sup>[28]</sup>, 对流传热会显著提高煤层传热效率, 本节模拟时并没有考虑导热系数增加和对流传热作用, 因此井距预测结果相对保守。除考虑煤层自身传热能力提升外, 还可以通过无水压裂的人工方式提高煤层传质传热能力<sup>[31]</sup>, 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂和可控冲击波压裂是两种可行的方式<sup>[19]</sup>, 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂不增加煤层水量, 压后返排迅速, 容易形成复杂裂缝网络, 不易引起储层黏土膨胀; 可控冲击波压裂通过放电电极产生定向冲击波, 选择性的改造煤储层, 无需向煤储层注入任何物质, 对储层无污染和伤害。

### 3.2 U 型水平井产能预测

基于八道湾富油煤覆压热解产物产率模型, 通过 COMSOL Multiphysics 软件建立 U 型水平井油气产能预测模型, 提出 3 点假设: ① 高温作用后煤层孔隙度和渗透率有显著改善, 本文研究重点是预测油气最大产能, 因此不考虑流体流动阻力问题; ② 通过导热系数综合反映煤层改造后传热效率的提升效果, 模拟时分别取导热系数为 1 W/(m·℃) 和 1.7 W/(m·℃), 后者是油页岩原始导热系数<sup>[19]</sup>, 将该值作为煤层导热系数改善上限值, 导热系数不随温度变化。③ 由于水平井三维模型的长度与宽度、高度在数值上差异较大, 因此将模型简化成二维模型, 忽略煤层在不同方向的

物性差异, 简化为各向同性模型。如图 14 所示, 模型采用四边形网格划分, 网格总数量 8 000 个, 单元质量为 0.7, 根据 3.1 节研究结果, 水平井的井距取 5 m, 设置煤层宽度为 10 m、煤层厚度为 10 m, U 型井水平段长设为 1 000 m, 模型的四边设为绝热边界 (图中标红), 为模拟井下大功率电加热器的加热方式, 故将井筒设定为恒定温度, 模型中用到的热解产率模型由式 (5)~式 (11) 确定, 模型其他参数取值参考表 6。

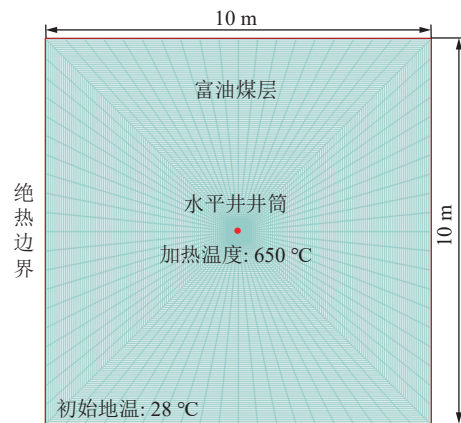


图 14 数值模型的初始条件和边界条件

Fig.14 Initial and boundary conditions of the numerical model

煤层温度场、热解产物产率变化如图 15 所示, 图中白线分别为 450 ℃、焦油产率 7.5% 和煤气产量

表 6 数值模型参数与取值  
Table 6 Numerical model parameters and values

| 基本参数                                                              | 数值    |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )                            | 1 380 |
| 导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | 1和1.7 |
| 比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | 1 700 |
| 地层温度/ $^\circ\text{C}$                                            | 28    |
| 电加热器温度/ $^\circ\text{C}$                                          | 650   |
| 煤层埋深/m                                                            | 1 000 |
| 水平井筒直径/m                                                          | 0.1   |

8% 的等值线。煤层导热系数为  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时, 加热 1 a、3 a、5 a 后温度大于  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的面积占比分别为 2.24%、83.18% 和 100%, 加热 3 a 后发生热解反应的面积迅速增大, 加热 5 a 后煤层全部开始热解, 但是温度大于  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  的面积占比仅为 0.19%、1.07% 和

15.99%, 可见大部分煤层仍然没有达到焦油峰值产量温度。根据时间-温度补偿效应, 提高煤层导热系数或者延长加热时间都可以进一步提高热解效率, 下面分两种情景讨论, 第 1 种情景: 煤层导热系数为  $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、加热 5 a, 温度大于  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  的面积占比增大为 100%; 第 2 种情景: 煤层导热系数仍为  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、加热时间增加为 6 a, 温度大于  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  的面积占比增大为 100%。焦油、煤气产率与煤层温度直接相关, 以达到焦油、煤层产率的 50% 为考察标准, 煤层导热系数为  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时, 加热 1 a、3 a、5 a 后, 焦油产率大于 7.5% 的面积占比分别为 0.54%、5.27% 和 100%, 煤气产率大于 8% 的面积占比分别为 0.15%、0.74% 和 8.68%, 由此可见, 此时提高导热系数或延长加热时间, 对于提高煤气产率的帮助更大。

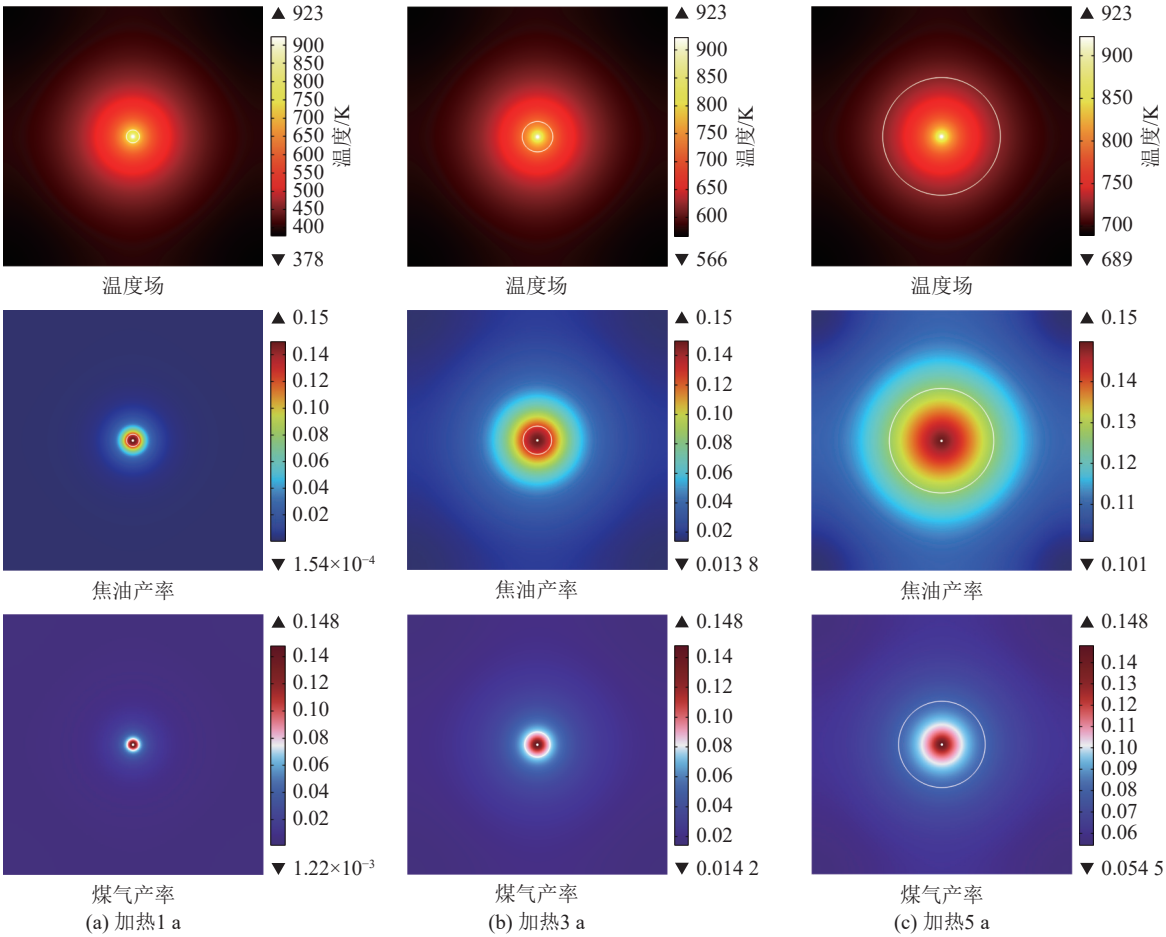


图 15 温度场与焦油、煤气产率分布

Fig.15 Temperature field and distribution of tar and gas yield

产能预测结果见表 7,  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$  的密度按标况取值, 生产 5 a 后, 焦油总产能为  $1.56 \times 10^4 \sim 2.03 \times 10^4 \text{ t}$ , 平均日产焦油  $8.54 \sim 11.12 \text{ t}$ ;  $\text{CH}_4$  总产能为  $260.21 \times 10^4 \sim 864.80 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 平均日产  $1\,425.80 \sim 4\,738.63 \text{ m}^3$ ;  $\text{H}_2$  总

产能为  $201.83 \times 10^4 \sim 1\,099.60 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 平均日产  $1\,105.92 \sim 6\,025.20 \text{ m}^3$ ;  $\text{CO}$  总产能为  $766.13 \sim 3\,003.20 \text{ t}$ , 平均日产  $0.42 \sim 1.65 \text{ t}$ ;  $\text{CO}_2$  总产能为  $4\,585.20 \sim 5\,011.20 \text{ t}$ , 平均日产  $2.51 \sim 2.75 \text{ t}$ 。

表 7 富油煤原位热解油气产能预测结果

Table 7 Prediction results of tar and coal gas production capacity for UCP of tar-rich coal

| 导热系数<br>( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | 时间/a | 水/ $10^4 \text{ t}$ | 焦油/ $10^4 \text{ t}$ | $\text{CH}_4/\text{t}$ | $\text{CH}_4/10^4 \text{ m}^3$ | $\text{H}_2/\text{t}$ | $\text{H}_2/10^4 \text{ m}^3$ | $\text{CO}/\text{t}$ | $\text{CO}_2/\text{t}$ |
|----------------------------------------------------------------------|------|---------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1                                                                    | 5    | 2.03                | 1.56                 | 1 863.10               | 260.21                         | 179.63                | 201.83                        | 766.13               | 4 585.20               |
| 1.7                                                                  |      | 2.07                | 2.03                 | 6 192.00               | 864.80                         | 978.64                | 1 099.60                      | 3 003.20             | 5 011.20               |

如图 16 所示,总热解产物随时间呈现出初期低产、中期快速上产、后期稳产的变化规律,煤层导热系数为  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时,受到温度场没有充分扩展的制约,第 5 年时仍处于产能爬坡阶段,总产能尚未趋稳;

煤层导热系数为  $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  时,温度场扩展比较充分,第 5 年时产能基本进入了稳产阶段,说明此时模型控制的煤层发生了比较充分的热解反应,随着生产时间的增加,后续产能增长比较缓慢。

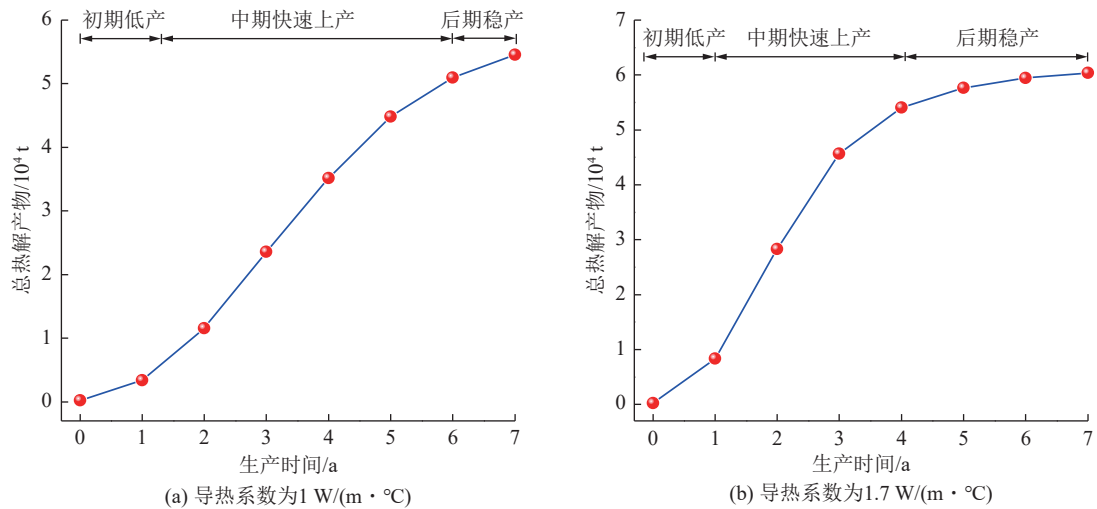


图 16 总热解产物产能随时间变化

Fig.16 Variation law of the production capacity of total pyrolysis products over time

图 17 为不同热解产物的产能变化规律,可以看出:热解水和焦油在热解产物中质量占比最大,并且产能最先企稳,图 17a 中的煤气产能第 5 年时仍然处于较快的增长阶段,图 17b 中的煤气产能第 5 年时增速开始降低。煤气中  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  质量分数最高,

$\text{CO}_2$  出现了先增后降的变化趋势, $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  都呈现出增长趋势,如果继续延长加热时间,产能的主要贡献将来自煤气中  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$ 。受目前井下电加热器性能(设计最大温度为  $650^\circ\text{C}$ 、使用寿命 5 a)限制<sup>[18]</sup>,富油煤原位热解的有效产物仍以焦油、甲烷为主,随着电

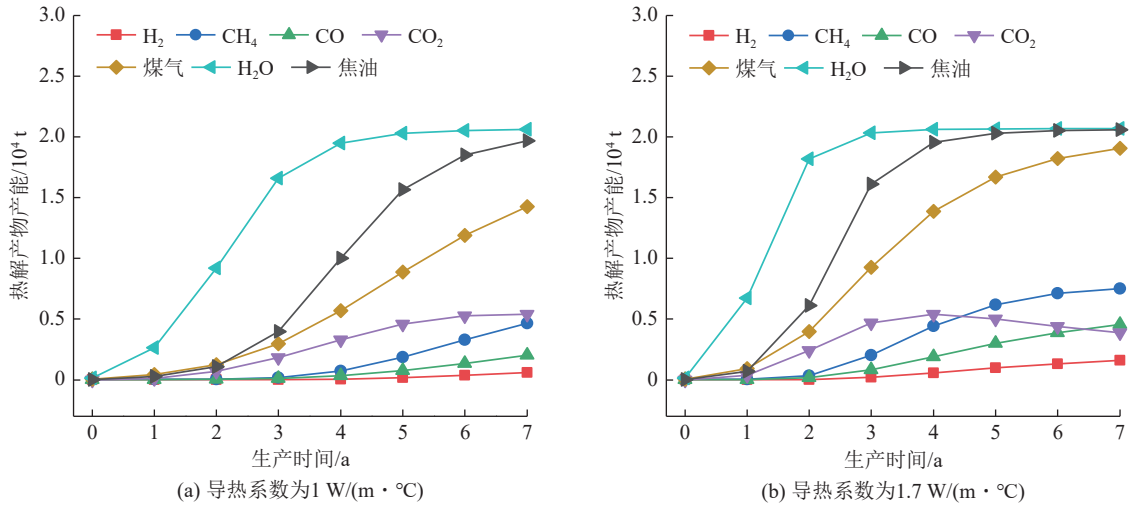


图 17 热解组分产能随时间变化

Fig.17 Variation law of the production capacity of pyrolysis components over time

加热器性能的提升, CO 和 H<sub>2</sub> 的产能将继续提高。

### 3.3 能量回报率与减碳效果

水平段长为 1 000 m 的 U 型井, 连续生产 5 a 后累计耗电  $8\,760 \times 10^4$  kWh(按加热器功率为 2 kW/m 计算), 根据表 7 数据计算能量回报率(表 8), 当煤层导热系数为 1 W/(m · °C) 时, 焦油和可燃气体(CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、CO) 按照热值折合  $1.83 \times 10^8$  kWh 电或  $1.65 \times 10^4$  t 原油, 此时能量回报率(油气折合电量/生产耗电量) 为 2.09、吨油当量耗电(生产耗电量/折合原油当量) 为 5 308.49 kWh/t。当煤层导热系数为 1.7 W/(m · °C) 时, 焦油和可燃气体按照热值折合  $3.40 \times 10^8$  kWh 电或  $3.06 \times 10^4$  t 原油, 此时能量回报率为 3.89、吨油当量耗电为 2 859.72 kWh/t。

按照八道湾富油煤覆压热解试验数据, 600 °C 时 1 t 煤热解能够生产 150 kg 焦油、98 kg 可燃气体(H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO 分别为 11.5、54、32.5 kg) 和 28.4 kg 的 CO<sub>2</sub>, 焦油热值取 33.4 MJ/kg, 可燃气体均取低位热值, 1 t 煤的原位热解产物共产生 10 466 MJ 的热量, 如需获得 1 t 标煤燃烧相同热量(29.3 MJ/kg), 则需原位热解 2.8 t 煤, 此时产生 0.08 t 的 CO<sub>2</sub>, 与标煤地面燃烧利用(CO<sub>2</sub> 排放量为 2.8 t) 相比, 可以减少 97% 的 CO<sub>2</sub> 排放。国外文献<sup>[4]</sup>表明煤炭经过 600 °C 处理后, 半焦对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力提升为原始煤的 1.5 倍(0.088 kg/kg), 考虑煤层扰动空间 CO<sub>2</sub> 封存地质要素<sup>[32]</sup>, 在理想情况下, 煤原位热解产生的 CO<sub>2</sub> 可以被半焦层以吸附方式完全封存, 从而实现富油煤原位热解的“近零碳排放”。

表 8 焦油、煤气折合电量与能量回报率

Table 8 Equivalent electricity of tar and coal gas and energy recovery ratio

| 导热系数/<br>(W · m <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> ) | CH <sub>4</sub> 折合电<br>量/10 <sup>4</sup> kWh | H <sub>2</sub> 折合电<br>量/10 <sup>4</sup> kWh | CO折合电<br>量/10 <sup>4</sup> kWh | 焦油折合电<br>量/10 <sup>4</sup> kWh | 油气折合电<br>量/10 <sup>4</sup> kWh | 能量回报率 | 折原油当<br>量/10 <sup>4</sup> t | 吨油当量<br>耗电/(kWh · t <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1                                                  | 2 593.42                                     | 1 053.45                                    | 215.20                         | 14 473.33                      | 18 335.40                      | 2.09  | 1.65                        | 5 308.49                            |
| 1.7                                                | 8 619.22                                     | 5 739.28                                    | 843.57                         | 18 833.89                      | 34 035.95                      | 3.89  | 3.06                        | 2 859.72                            |

## 4 结论与建议

1) 煤炭原位热解具有资源丰度高, 煤气清洁低碳, 地质安全风险小等优势, 研究提出了适用于中深层煤炭原位热解的 3 种水平井井型和生产方式, 目前技术研究尚处于起步阶段, 需要在物模装置、基础理论、关键技术、配套工具装备研发等方面开展更深入研究。

2) 三塘湖盆地两套主力煤层的焦油产量峰值均在 400~500 °C, 围压对块煤热解具有降低传质能力和提高传热效率的双重影响, 温度小于 400 °C 时前者占主导, 焦油产量出现不同程度降低; 随着温度升高, 后者的正向作用逐渐占据主导, 相比常压时焦油产量有所提高。煤气在 300~400 °C 时产量快速增大, 400~600 °C 时产量增速减缓, 600 °C 后产量快速降低, 煤气中 H<sub>2</sub> 和 CO 随着温度增加单调递增, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 随温度先增后减, 在 600、300 °C 时达到峰值, 加压后更有利于八道湾组煤的煤气生产。八道湾组煤的产水峰值温度比西山窑组煤低, 温度低于 300 °C 时, 产水主要来自煤中的自由水、结合水, 主要取决于煤的水分含量; 300~500 °C 的产水主要来自有机氧化物裂解、脱氧, 羟基脱水等化学反应。

3) 富油煤热解产物产率随温度增加呈现“缓慢增大—快速增大—趋于平稳”的 3 段式变化规律, Boltsmann 函数能够较好的描述富油煤热解产物产率模型,

直线形和三角形井网分别形成类矩形和类圆形的温度场, U 型水平井保守井距为 4.5~5 m。建立了基于热解产率评价模型的产能预测方法, 按水平段长为 1 000 m 的 U 型井生产 5 a 预测, 生产焦油为  $1.56 \times 10^4 \sim 2.03 \times 10^4$  t, 生产 CH<sub>4</sub> 为  $260.21 \times 10^4 \sim 864.80 \times 10^4$  m<sup>3</sup>, 生产 H<sub>2</sub> 为  $201.83 \times 10^4 \sim 1\,099.60 \times 10^4$  m<sup>3</sup>, 生产 CO 为 766.13~3 003.20 t, 生产 CO<sub>2</sub> 为 4 585.20~5 011.20 t。

4) 案例中富油煤原位热解的能量回报率为 2.09~3.89, 吨油当量耗电为 2 859.72~5 308.49 kWh/t, 按照相同热值换算, 原位热解比地面煤燃烧减少 97% 的 CO<sub>2</sub> 排放, 理论上热解产生的 CO<sub>2</sub> 能够被半焦层完全吸附封存。需要注意的是, 富油煤原位热解技术实现了(焦)油(煤)气共采, 焦油产率高的煤, 热解后的煤气产量也高, 二者具有统一性, 需要加强对煤气开发利用的重视程度。

**致谢** 本文得到了陈旋、范谭广、师庆民、孙宏亮、刘翰林、龚万兴、李新、张天印、富永红、王瑞英、林潼、田继军等的大力帮助, 在此由衷表示感谢。

### 参考文献(References):

- [1] IEA. CO<sub>2</sub> emissions in 2022 [R]. International Energy Agency (IEA), 2023.
- [2] 中国石油集团经济技术研究院. 2022 年国内外油气行业发展报告

- [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2023.
- [3] VINEGAR J H, WELLINGTON L S, ROUFFIGNAC D P E, et al. In situ thermal processing of a coal formation to produce hydrocarbon fluids and synthesis gas[P]. United States Patent: US6761216, 2004-07-13.
- [4] University of Utah, Institute for Clean & Secure Energy. Clean and Secure Energy from Coal[R]. Salt Lake City: University of Utah, 2015.
- [5] ZHANG H R, LI S H, KELLY K E, et al. Underground *in situ* coal thermal treatment for synthetic fuels production[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 62: 1-32.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 许涛, 陈杰, 伍永平, 等. 富油煤地下热解过程中纳米孔隙结构特性演化规律[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(11): 4553-4562.
- XU Tao, CHEN Jie, WU Yongping, et al. Evolution law of nanopore properties during underground in-situ pyrolysis of tar-rich coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(11): 4553-4562.
- [9] 师庆民, 王双明, 王生全, 等. 神府南部延安组富油煤多源判识规律[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.
- [10] 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.
- [11] 唐颖, 吴晓丹, 孙景耀, 等. 黏结性富油煤热解油气析出规律及物性演变特征[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(1): 58-65.
- TANG Ying, WU Xiaodan, SUN Jingyao, et al. Tar and gas production rules and physical property evolution characteristics during the pyrolysis of cohesive tar-rich coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(1): 58-65.
- [12] 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 Changan, HOU Yujie, et al. Numerical simulation of waste heat utilization process after in-situ pyrolysis of tar-rich coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(8): 19-29.
- [13] 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 Changan, 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.
- [14] 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.
- [15] 支东明, 李建忠, 周志超, 等. 三塘湖盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 115-132.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHOU Zhichao, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Santanghu Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 115-132.
- [16] 张蕾, 韩智坤, 舒浩, 等. 陕北富油煤低温热解提油基础特性[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(9): 124-128.
- ZHANG Lei, HAN Zhikun, SHU Hao, et al. Basic characteristics of tar extraction in low temperature pyrolysis of tar-rich coal from Northern Shaanxi[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(9): 124-128.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 东振, 陈艳鹏, 孔令峰, 等. 煤炭地下气化试验综述与产业化发展建议[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 180-196.
- DONG Zhen, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification: Overview of field tests and suggestions for industrialization[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 180-196.
- [22] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 537-545.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua. Connotation and strategic role of in situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 537-545.
- [23] 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.
- [24] BLINDERMAN M S, KLIMENKO A Y. Underground coal gasification and combustion[M]. Duxford: Woodhead Publishing, 2018: 9–398
- [25] 李梅, 李佳佳, 金权, 等. 炼焦煤及其脱矿物质煤热解过程中硫的逸出特性[J]. *煤炭转化*, 2018, 41(6): 7–14.
- LI Mei, LI Jiajia, JIN Quan, et al. Sulfur-containing evolution characteristics of coking coal and their demineralized coal during pyrolysis[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(6): 7–14.
- [26] 王兴刚, 范谭广, 焦立新, 等. 三塘湖盆地煤炭地下气化地质评价与有利区域[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(3): 307–313.
- WANG Xinggang, FAN Tanguang, JIAO Lixin, et al. Geological evaluation and favorable areas of underground coal gasification in santanghu basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(3): 307–313.
- [27] LIU J X, JIANG X M, SHEN J, et al. Pyrolysis of superfine pulverized coal. Part 1. Mechanisms of methane formation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 87: 1027–1038.
- [28] 耿济世, 王双明, 孙强, 等. 富油煤热解特性及其孔裂隙结构演化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(7): 46–53.
- GENG Jishi, WANG Shuangming, SUN Qiang, et al. Pyrolysis characteristics and pore-fracture evolutionary patterns of tar-rich coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(7): 46–53.
- [29] 毛宁, 王强, 杨妍, 等. 基于显微组化化学键特征的宁夏庆华煤热解特性及动力学分析[J]. *化工学报*, 2020, 71(2): 811–820, 903.
- MAO Ning, WANG Qiang, YANG Yan, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics analysis of Qinghua coal, Ningxia based on chemical bonding characteristics of macerals[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(2): 811–820, 903.
- [30] 姚宏哲, 黄飞宇, 杨松, 等. 重质油高温快速热解自动反应网络的动力学建模[J]. *化工学报*, 2024, 75(7): 2644–2655.
- YAO Hongzhe, HUANG Feiyu, YANG Song, et al. Kinetic modeling of the high-temperature rapid pyrolysis auto-reaction network of heavy oil[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(7): 2644–2655.
- [31] 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.
- [32] 王双明, 寇海波, 申艳军, 等. 含煤岩系 CO<sub>2</sub> 突出对浅层 CO<sub>2</sub> 地质封存的启示[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 33–47.
- WANG Shuangming, KOU Haibo, SHEN Yanjun, et al. Implications of CO<sub>2</sub> outburst from coal-bearing rock series for the CO<sub>2</sub> geological sequestration under shallow layers[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 33–47.