

力-热耦合作用下神府富油煤原位热解 提油产物分布特性

郭伟^{1,2}, 俞尊义^{1,2}, 杨盼曦^{1,2}, 王晶^{1,2}, 杨甫³, 李红强^{1,2}, 高琨^{1,2}, 马丽^{3,4}, 敬庆文⁵, 杨伯伦^{1,2}, 吴志强^{1,2}

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西省能源化工过程强化重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 陕西省煤田地质集团有限公司自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710026; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 5. 西安朗杰测试设备有限公司, 陕西 西安 712000)

摘要: 针对富油煤地下原位热解提油面临高地应力、地质情况复杂以及热解产物分析困难等挑战, 设计搭建高温三轴试验装置模拟富油煤地下原位热解工况。试验装置包括高温高压供气模块、原位热解模块、伺服控制模块以及产物分离冷却模块。以陕北神府富油煤为研究对象, 基于高温三轴试验装置模拟了不同埋深深度下的高温高压热解试验。高温三轴仪能够提供 0~15 MPa 的轴压 (埋深深度 0~600 m), 应力加载响应迅速并且在热解过程中能够保持稳定。实验时高温三轴仪可以加热煤样中心温度至 600 ℃ 左右, 能够实现富油煤在设定的温度下进行热解实验。模拟埋深深度从 100 m 增加到 300 m, 轴压从 2.45 MPa 增加到 7.35 MPa, 热解半焦产率从 67.70% 升至 68.04%, 焦油产率呈现先升高后下降趋势, 最高为 6.50%。埋深增加时焦油中轻油、酚油含量逐渐增加, 分别从 19% 和 9.5% 增加至 25% 和 12%; 沥青在焦油中的比例从 25% 降低到 20%; 芳香烃含量从 32% 升高至 38%, 脂肪烃含量从 28.5% 降低到 19.3%。煤层渗透率随地应力增加而降低, 阻碍热解过程中的传热和传质, 导致富油煤热解产物停留时间增加, 焦油二次反应, 长链脂肪烃化合物发生断裂转化为小分子化合物, 甲基、亚甲基同样不断脱出; 另一方面应力促进了焦油分子缩合反应的发生, 多环芳烃的含量迅速提高。地应力增加提高了轻质芳烃及焦炭的产率, 焦油品质向轻质化提升。

关键词: 富油煤; 地下原位热解; 高温三轴仪; 焦油轻质化

中图分类号: TQ536.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)02-0142-09

Hydrocarbon resources production characteristics of in-situ pyrolysis of Shenfu tar-rich coal under mechanical-thermal coupling

GUO Wei^{1,2}, YU Zunyi^{1,2}, YANG Panxi^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, YANG Fu³, LI Hongqiang^{1,2}, GAO Kun^{1,2},
MA Li^{3,4}, JING Qingwen⁵, YANG Bolun^{1,2}, WU Zhiqiang^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Energy Chemical Process Intensification, Xi'an, 710049, China; 3. Shaanxi Provincial Coal Geology Group Co. Ltd., Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural and Resources, Xi'an 710026, China; 4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. Xi'an Langjie Test Equipment Co., Ltd, Xi'an, 712000, China)

Abstract: Given the challenges faced by in-situ pyrolysis of tar-rich coal, such as high ground stress, complex geological conditions, and difficult analysis of pyrolysis products, a high-temperature triaxial test device was designed and built independently to simulate the in-situ pyrolysis process of tar-rich coal. The test device includes a high-temperature and high-pressure gas supply module, an in-situ pyrolysis module, a servo control module, and a product separation and cooling module. Taking the Shenfu tar-rich coal in Northern Shaanxi

收稿日期: 2024-01-22; 策划编辑: 常明然; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.YS24012201

基金项目: 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室资助项目 (SMDZ-2023-Z020); 陕西省创新能力支持计划资助项目 (2023-KJXX-004, 2022KXJ-126)。

作者简介: 郭伟 (1997—), 男, 安徽亳州人, 博士研究生。E-mail: guowei131916@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 吴志强 (1987—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: zhiqiang-wu@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 郭伟, 俞尊义, 杨盼曦, 等. 力-热耦合作用下神府富油煤原位热解提油产物分布特性 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(2): 142-150.

GUO Wei, YU Zunyi, YANG Panxi, et al. Hydrocarbon resources production characteristics of in-situ pyrolysis of Shenfu tar-rich coal under mechanical-thermal coupling [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(2): 142-150.



Province as the research object, the pyrolysis experiments of high temperature and high stress under different burial depths were simulated based on the high-temperature triaxial test device. The results show that the high-temperature triaxial apparatus can provide axial compression of 0 ~ 15 MPa (buried depth of 0 ~ 600 m). The loading response is rapid, and the stress can remain stable during pyrolysis. During the experiment, the high-temperature triaxial apparatus can heat the central temperature of coal samples over 600 °C, and can realize the pyrolysis experiment of tar-rich coal at the set temperature. When the simulated burial depth increased from 100 m to 300 m, the axial stress on coal samples increased from 2.45 MPa to 7.35 MPa, the yield of pyrolysis semi-coke risen from 67.70% to 68.04%, and the tar yield first increased and then decreased, with the highest value of 6.50%. With the increase of simulated burial depth, the contents of light oil and phenol oil in tar gradually increased from 19% and 9.5% to 25% and 12% respectively. The proportion of pitch in tar is reduced from 25% to 20%; The aromatic hydrocarbon content increased from 32% to 38%, and the aliphatic hydrocarbon content decreased from 28.5% to 19.3%. The permeability of coal seam decreases with the increase of stress, which hinders the heat and mass transfer in the pyrolysis process, leading to the increase of residence time of pyrolysis products of tar-rich coal, the secondary reaction of tar, the fracture of long-chain aliphatic hydrocarbon compounds and the transformation of methyl and methylene into small molecular compounds. On the other hand, stress promotes the condensation reaction of tar molecules and the content of polycyclic aromatic hydrocarbons increases rapidly. The increase of in-situ stress improves the yield of light aromatics and coke, and the quality of tar is improved to light weight.

Key words: Tar-rich coal; underground in-situ pyrolysis; high temperature triaxial apparatus; lightening tar

0 引 言

根据《矿产资源工业要求手册》从煤的低温热解焦油产率出发可将煤炭划分为含油煤（焦油产率≤7%）、富油煤（7%<焦油产率≤12%）和高油煤（焦油产率>12%）^[1-2]。中国富油煤资源丰富，赋存广泛^[2-5]。富油煤最大的特点是其富含脂肪结构的桥键及侧链组成的富氢结构，桥键主要由脂肪结构、部分氧、硫和其他杂原子基团组成，侧链主要由烷基和杂原子基团组成，是影响其焦油产率的核心结构^[6-7]。从富油煤出发热解制备油气资源被认为是缓解中国油气对外依存度的重要途径^[3]。目前富油煤资源利用方式仍以传统的地下开采结合地面热解为主，煤炭通过井下开采至地面，经洗选、粉碎后进入地面热解设备转化成焦油、煤气和半焦^[8-11]。上述过程存在热解半焦产能过剩、大气及水污染、高 CO₂ 排放等挑战^[12-13]，制约了富油煤地面热解的高端化、多元化、低碳化发展^[14-16]。

富油煤地下原位热解即是指其不经过开采，直接在地下进行储层改造、注入支撑剂，通过注入高温高压热载体传递热量来加热煤层，热解产生的油气产物通过采出井输送至地面进行后续加工处理的技术^[17-18]。富油煤原位热解工艺涵盖生产井、注入井、热流体加热装置、产物分离及深加工设备等。相关学者针对煤炭地下原位热解技术提出了地下封闭系统、布井结构、催化模块、支撑剂以及碳捕集等技术策略，为富油煤地下原位热解的实现提供了技术支撑^[19-20]。富油煤原位热解虽然具有广阔前景，但是与地面热解相比富油煤原位热解面临复杂的地质环境，深部煤岩不仅承受较高的地应力和孔

隙压力，地下煤层还存非均质多尺度等问题，其中应力的作用对富油煤热解过程挥发分产物的影响不容忽视，力—热耦合作用下富油煤原位热解提油过程亟待研究^[21]。

高压三轴仪能够模拟矿产资源面临的复杂地质环境，重庆大学^[22]、中国矿业大学^[23]和太原理工大学^[24]等科研团队基于高压三轴试验系统的研究了地应力对煤矿或岩石渗透特性及力学特性的影响。然而，高煤层应力下富油煤原位热解产物生成机制依然不明晰，基于高温三轴仪模拟地应力对富油煤热解焦油品质的影响还有待探究。针对上述问题，笔者通过设计搭建高温三轴试验装置对富油煤进行原位热解试验分析，基于高温三轴试验装置深入分析了地应力对富油煤原位热解产物分布、焦油品质以及气体产物生成特性的影响，为陕北富油煤地下原位热解制备高品质油品提供了试验基础。

1 力—热耦合作用下富油煤热解特性研究设备开发

1.1 高温三轴试验装置设计搭建

设计搭建了一套高温三轴试验装置用来模拟富油煤地下原位热解过程，模拟原位环境下煤炭所受地应力，并探究力—热耦合作用下富油煤热解产物分布及行为。试验装置包括伺服控制模块、原位热解模块、高温高压供气模块以及产物分离冷却模块，装置如图 2 所示。伺服控制模块主要包括主控控制台、控制系统等，能够控制各个电炉的温度设定，轴压及围压的加载，同时能够记录试验过程中的位移、应力、温度、流量等实时数据。富油煤原位热解模块是高温三轴试验装置的核心模块，主要

包含液压油泵、加载油缸、三轴压力室（图 2b）、加热电炉等。液压机最高可以实现 500 kN 的应力加载，可达到 15 MPa 轴压及 12 MPa 围压，加热电炉最高可以提供 800 ℃ 温度，进行热解试验。高温高压供气模块包括蒸汽发生器、高压惰性气体汇流排等，为原位热解系统提供高温高压气体作为热载气、同时能够进行注入高温蒸汽对流热解试验。产

物冷却分离系统主要包括管路伴热器、风冷式冷凝器、焦油收集罐等，主要进行产物的冷却分离及焦油的收集测试。装置包括进出口管路伴热器、气体预热器、试样中心 4 个温度测点，轴压及围压压力、进出口载气压力 4 个压力测点，进出口 2 个流量测点，以及轴向位移、径向位移 2 个位移传感器，能够满足所需试验要求，模拟地下应力环境。

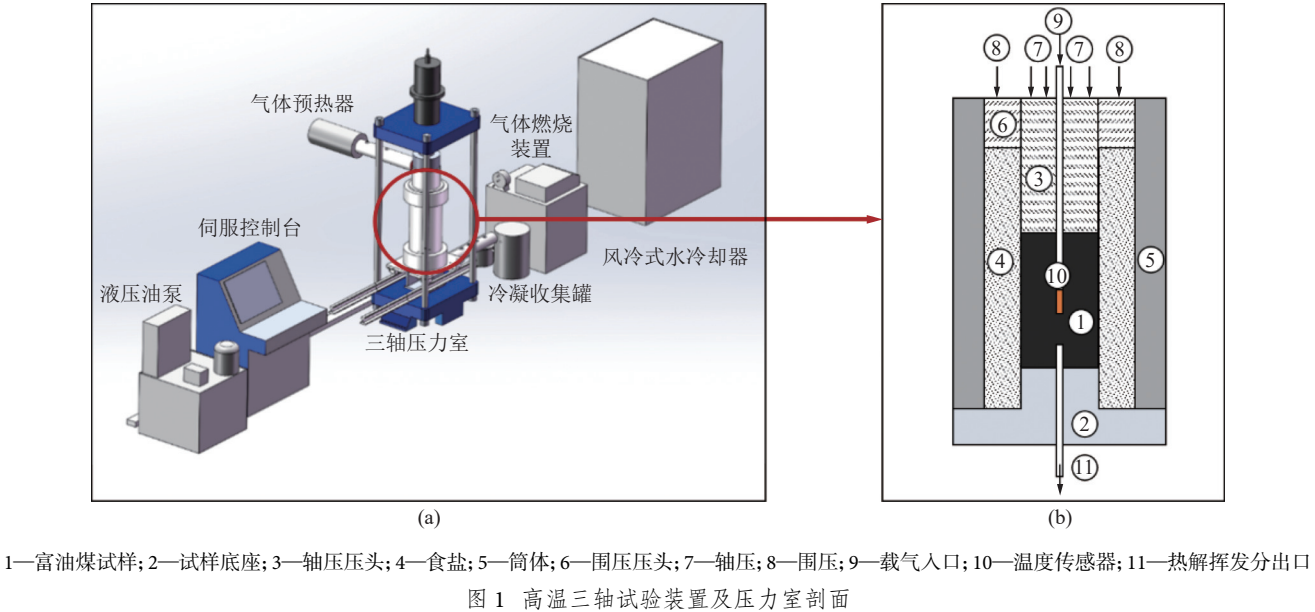


Fig. 1 High temperature triaxial test device diagram and pressure chamber section diagram

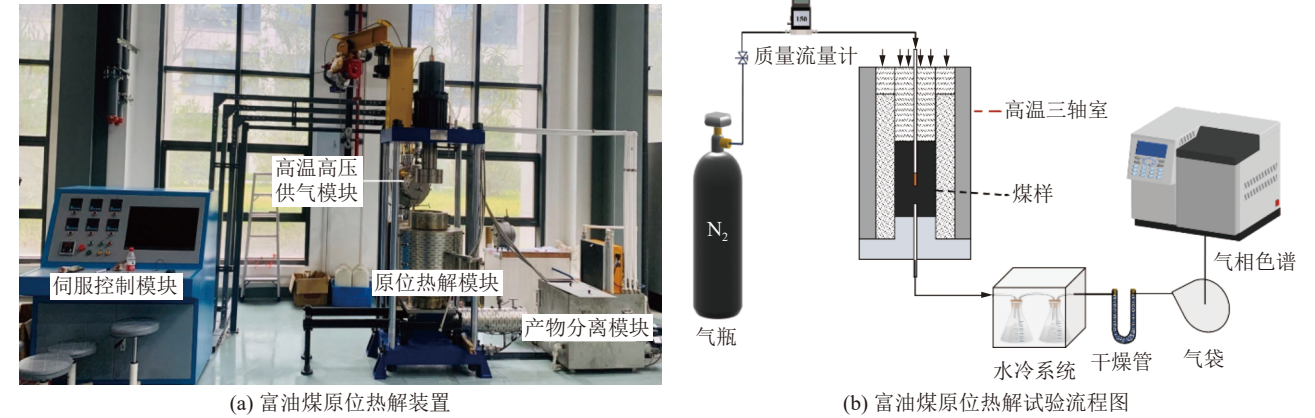


图 2 富油煤原位热解装置及流程

Fig. 2 In-situ pyrolysis device and flow chart of tar-rich coal

1.2 试验条件与数据分析

试验所用富油煤煤样来自陕西省神府矿区，工业分析与元素分析见表 1，将煤样切割成为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱体，供试验使用。基于上述设计搭建的高温三轴试验装置进行不同地应力条件下的富油煤热解试验，试验台及试验流程如图 3 所示，装置参数及试验条件见表 2，主要包括试样尺寸、应力加载大小及电炉温度等。我国矿井地下垂直应力随

埋深变化的关系如公式 (1) 所示^[25]，模拟埋深 100/200/300 m 富油煤地下热解试验，计算得到轴压分别为 2.45/4.9/7.35 MPa，侧压系数为 0.8，围压分别为 1.96/3.92/5.88 MPa，试验气氛采用 N₂ 气氛，流量为 400 mL/min。

$$\delta_v = 0.0245H$$

(1)

式中： δ_v 为富油煤所受地应力，MPa； H 为富油煤埋深度，m。

表 1 神府富油煤煤质分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Shenfu tar-rich coal									
工业分析/%				元素分析/%					
M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_{ad}	C	H	N	O*	S	
5.30	4.82	41.49	52.75	73.41	5.39	1.68	19.13	0.39	

注：*由差减法计算

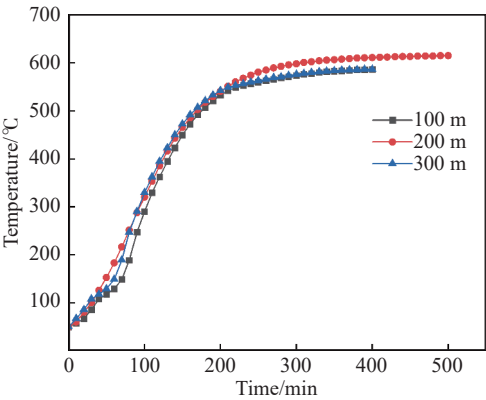


图 3 原位热解升温曲线

Fig. 3 In-situ pyrolysis temperature rise curves

表 2 富油煤原位热解装置参数及试验条件

Table 2 Parameters and experimental conditions of in-situ pyrolysis device for tar-rich coal	
参数名	数值
试样尺寸/mm×mm	φ 50×100
模拟埋深/m	100/200/300
轴压/MPa	2.45/4.9/7.35
围压/MPa	1.96/3.92/5.88
传压介质	石墨/食盐/石墨
热解时间/min	500/600/500
加热电炉温度设置/℃	800
入口管路伴热温度设置/℃	600
出口管路伴热温度设置/℃	400
气体预热器温度设置/℃	600

试验结束后通过称量试验前后煤样质量得到半焦产率；使用丙酮冲洗试验管路、冷凝器及焦油收集罐得到焦油混合溶液，加入无水硫酸镁脱除水分并进行抽滤，得到溶解焦油的丙酮溶液，进行旋蒸得到热解焦油，最终通过称量得到焦油产量；气体产率由差减法获得。热解产物分布计算公式见公式(2)~公式(4)。焦油馏分采用 JAS GC D7169 原油模拟馏程分析仪得到，根据沸点将焦油分为轻油、酚油、洗油、萘油、蒽油和沥青（其中：Light oil-轻

油，170 ℃ 以下；Phenol oil-酚油，170 ~ 210 ℃，Naphthalene oil-萘油，210 ~ 230 ℃；Washing oil-洗油，230 ~ 300 ℃；Anthracene oil-蒽油，300 ~ 360 ℃；Pitch-沥青，360 ℃ 以上）。焦油组分采用气相色谱质谱联用仪 GC/MS-QP2020NX 进行分析。气袋中煤气组分通过采用配有 TDX-01 色谱柱的 FULI9790 II 型气相色谱进行检测分析，检测前采用内标法定量标定，检测得到煤气组分 CH₄、CO、CO₂、H₂ 的体积分数。

$$Y_{char} = \frac{W_{char}}{W} \times 100\%$$

(2)

$$Y_{tar} = \frac{W_{tar}}{W} \times 100\%$$

(3)

$$Y_{gas} = 1 - Y_{char} - Y_{tar}$$

(4)

式中：Y_{char} 为半焦组分产率，%；W_{char} 为半焦组分质量，g；W 为煤样质量，g；Y_{tar} 为焦油组分产率，%；W_{tar} 为焦油组分质量，g；Y_{gas} 为气体组分产率，%，由差减法获得。

将高温三轴试验模拟富油煤的热解试验结果与地面热解试验结果进行了对比。常压慢速热解试验条件为常压，热解终温为 550 ℃，升温速率为 10 ℃/min，保温时间为 30 min，载气 N₂ 流速为 300 ml/min；常压快速热解试验条件为常压，热解温度为 550 ℃，热解时间 30 min，载气 N₂ 流速为 300 ml/min；高孔隙压力下热解试验条件为孔隙压力 2 MPa，热解温度 550 ℃，热解气氛为 N₂，升温速率为 10 ℃/min，保温时间 30 min。

2 结果与讨论

2.1 力-热耦合作用下富油煤热解特性

图 4 为试验过程中富油煤样品中心升温曲线，模拟 100 m 和 300 m 埋深试验时使用的传压介质为石墨粉，200 m 埋深试验使用食盐作为传压介质并延长了试验时间。可以发现，石墨和食盐作为传热介质都可以使煤样中心温度升高至 600 ℃ 左右，能够实现富油煤在设定的温度下进行热解试验。石墨和食盐作为传压介质时，升温阶段效果差别不大，升温速率相近，而食盐作为传压介质是煤样中心最高温度可以达到 615 ℃ 高于石墨粉，说明食盐作为传压介质导热效果较好。

图 5 为不同埋深深度下原位热解产物分布，从图中可以看出，焦油产率在 300 m 时最小为 5.25%，在 200 m 时最高为 6.50%，这是因为进行 200 m 埋深热解试验时，热解时间延长了 100 min，高温三轴试验装置中的焦油有了更多时间流动至冷凝分离模块中，因此热解焦油产率最高。100 m 埋

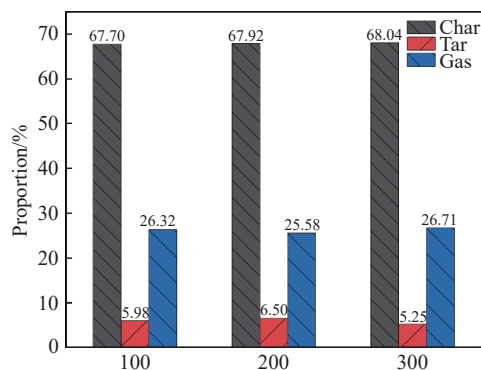
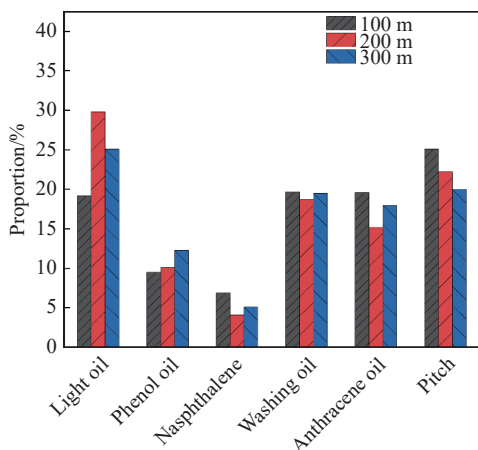
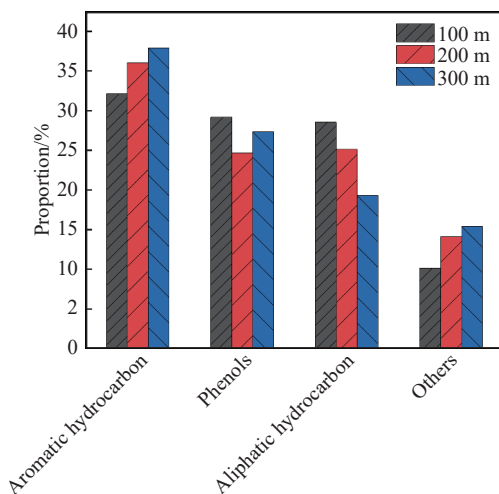


图 4 原位热解产物产率分析

Fig. 4 Yield analysis of in-situ pyrolysis products



(a) 焦油馏程分布



(b) 焦油组分分布

图 5 不同埋深下富油煤模拟热解焦油分析

Fig. 5 Tar analysis of simulated pyrolysis of tar-rich coal under different burial depths

2.2 力—热耦合作用下富油煤热解焦油分析

不同埋深深度对富油煤原位热解焦油馏分的影响如图 6a 所示。可以看出随着富油煤埋深的增加,轻油含量先升高后降低、酚油含量逐渐增加,沥青逐渐减少。这一现象归因于轴压围压对热解过程中传热和传质的影响。随着埋深深度的增加,富油煤的渗透率降低,进而阻碍了挥发分的扩散^[34-36]。这导致热解产物停留时间延长,增加了自由基的反应,促使已热解产物及煤分子发生二次裂解与聚合反应,包括部分焦油结构中桥键、侧链的断裂^[37]。随着埋深深度的增加,沥青组分逐渐减少,大焦油分子特别是长链脂肪烃类化合物通过进一步的裂解和二次反应,转化为小分子化合物。这一过程导致焦油中轻质组分增多,而重质组分减少,因此轻油和酚油的含量有所升高^[38]。综上所述,埋深深度的增加促进了富油煤原位热解轻质芳烃,使得热解焦油品质向轻质化方向提升。

图 6b 显示了不同埋深下富油煤热解焦油组分分

布(其中: Aromatic hydrocarbon-芳香烃, Phenols-酚类, Aliphatic hydrocarbon-脂肪烃, Others-其他)。从图中可以看出,随着地应力的增大,热解焦油中芳香烃化合物的相对含量增加,酚类化合物的相对含量变化趋势不明显,而脂肪烃化合物的相对含量逐渐降低。主要原因是应力的升高一方面使得二次反应时间延长,有利于挥发分的二次反应,长链脂肪烃化合物发生断裂转化为小分子化合物,甲基、亚甲基同样不断脱出,另一方面应力促进了焦油分子缩合反应的发生,多环芳烃的含量迅速提高^[39]。酚类化合物的相对含量由 29.19% 先降低到 24.69%,随着应力的进一步升高酚类含量升高至 27.36%,Tao 等^[40]在试验中发现类似的现象,非烃类成分的结构更加不稳定,容易发生二次反应。

富油煤基于高温三轴试验装置的 200 m 热解焦油分析结果与地面热解结果对比如图 7 所示。从图 7a 热解焦油的馏分对比分析发现,地面常压热解焦油的中沥青占比最多,其次是蒽油、洗油、轻油、酚

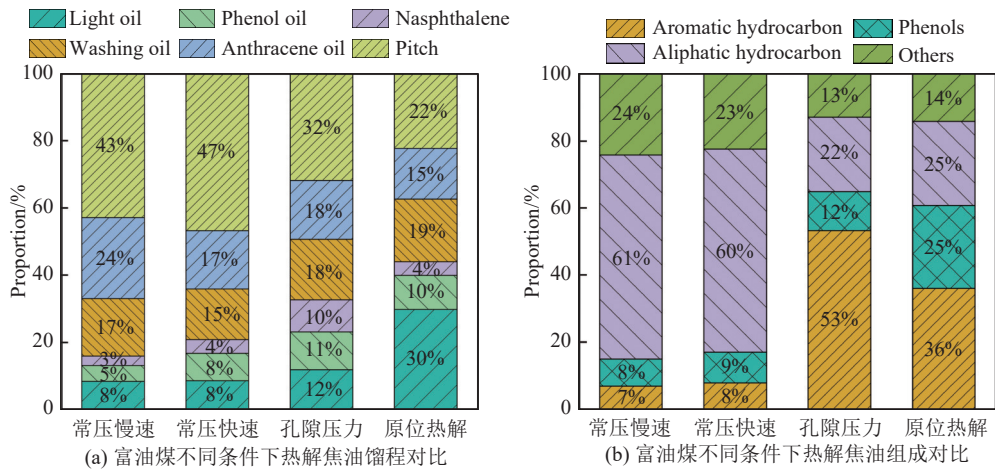


图 6 不同条件下富油煤热解焦油产物对比

Fig. 6 Comparison of tar products from pyrolysis of tar-rich coal under different conditions

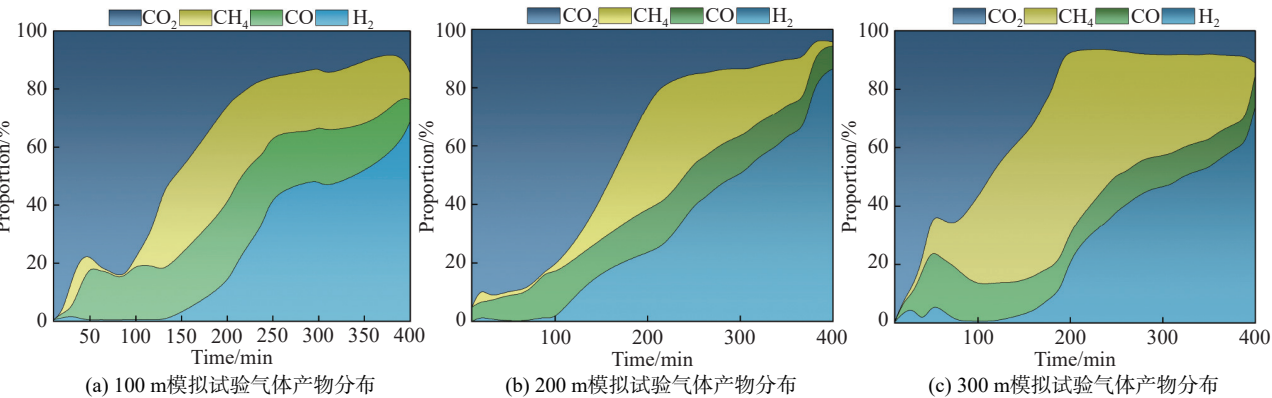


图 7 不同模拟深度下煤气释放曲线

Fig. 7 Gas release curves under different simulated depths

油和萘油，而在高孔隙压力和高地应力作用下焦油产物中沥青含量明显下降，轻油显著升高，说明提高孔隙压力和高地应力有利于富油煤热解焦油的轻质化。从图 7b 热解焦油的组分对比分析发现，常压热解焦油产物中脂肪烃含量最高占比超过 60%，芳香烃和酚类占比分别为 7% 和 8%，而在高孔隙压力和高地应力下焦油中芳香烃含量提高至 53% 和 36%，酚类含量提高至 12% 和 25%。这是因为较高的孔隙压力和高地应力会降低挥发分在煤中传质，延长了反应时间，导致焦油发生二次反应，促进了焦油分子缩合反应的发生，提高了芳香烃的含量^[39-40]。

2.3 力-热耦合作用下富油煤热解气体分析

图 8 为不同模拟深度下富油煤原位热解过程中主要热解气体产量分布，从图中可以看出，100、200 和 300 m 模拟热解深度下，各种气体释放规律类似。CO₂ 在热解初期大量产生，低温时主要来源于煤中吸附的少量气体，随着温度升高时，煤中含氧官能团羰基、羧基等裂解生成。其次是 CO 逐渐生成，主要是由羰基和芳香醚键裂解产生，热解温度在 300 ~ 400 °C。然后是甲烷在 400 °C 左右大量

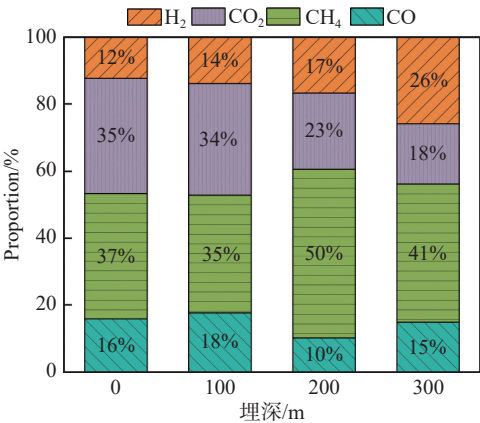


图 8 500 °C 时无地应力作用及不同地应力作用下富油煤热解气体产物分布

Fig. 8 Distribution of pyrolysis gas products of tar-rich coal under no in-situ stress and different in-situ stress at 500 °C

产生，是由于煤中脂肪族分解和碳的甲烷化引起。而 H₂ 一般是在热解后期生成，温度一般在 550 °C 以上，主要来源于热解体系中有机的缩合、烃类的环化以及芳构化等二次反应^[41]。富油煤在不同埋深深度下模拟热解的煤气释放规律与已有报道试验

结果一致^[42]。对比了 500 ℃ 时富油煤在无地应力作用下以及 100 ~ 300 m 地应力作用下热解气体产物组成，如图 9 所示。从图中可以看出，热解气体中 H₂ 和 CO₂ 比例随地应力增加变化规律明显，H₂ 在富油煤热解的主要 4 种气中从 12% 升高至 26%，

而 CO₂ 的比例则从 37% 下降至 18%。这是因为富油煤热解时，随着埋深深度的增加，煤样受到的地应力增加导致其渗透率降低，富油煤热解产生的焦油及气体发生二次反应（芳烃缩合、芳构化等反应）^[41]。

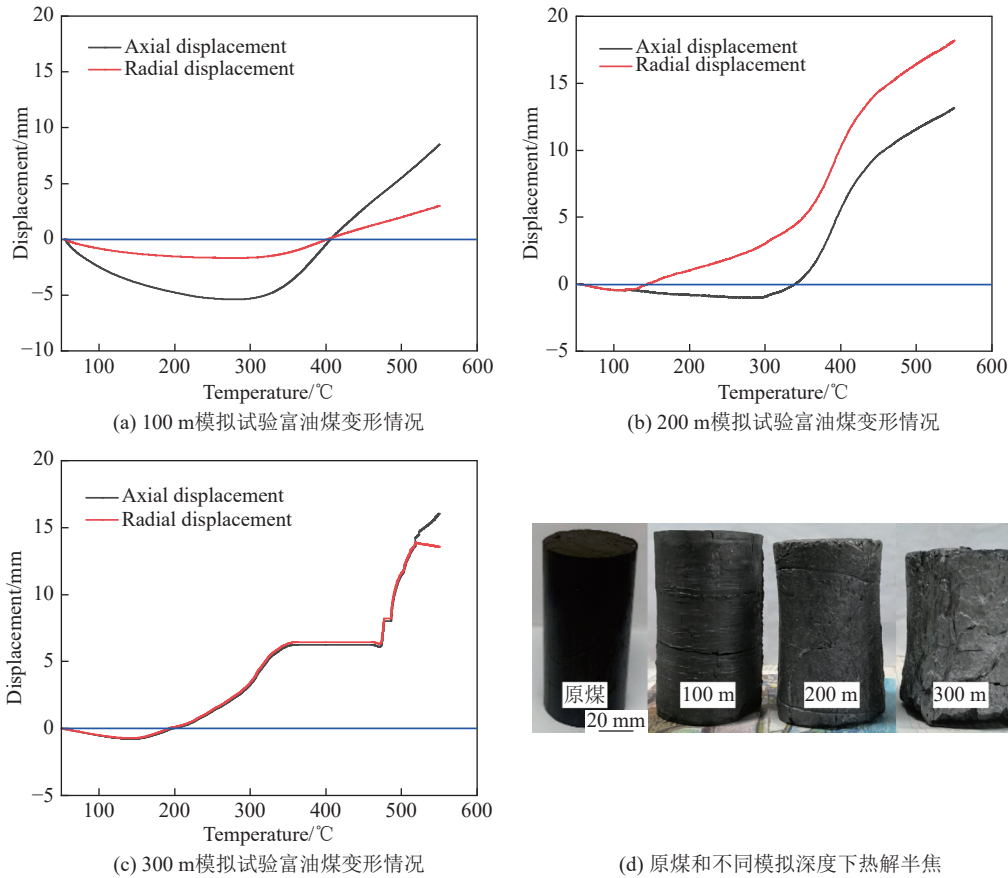


图 9 富油煤热解时变形特征
Fig. 9 Deformation characteristics of tar-rich coal during pyrolysis

2.4 力—热耦合作用下富油煤变形特征

图 10 为不同模拟深度下富油煤热解过程中变形情况及热解半焦形貌。由图 10a ~ 图 10c 可以发现，富油煤热解时，主要分为两个阶段：100 m 埋深对应 50 ~ 400 ℃ 和 400 ℃ ~ 试验结束；200 m 埋深对应 50 ~ 350 ℃ 和 350 ℃ ~ 试验结束；300 m 埋深对应 50 ~ 200 ℃ 和 200 ℃ ~ 试验结束。热解温度较低时，随着温度升高，富油煤样品受热膨胀，轴向位移和径向位移均为负值，且轴向膨胀程度更明显^[43]。在这个温度区间内富油煤主要进行脱水脱气等物理变化。随着温度进一步升高，富油煤开始发生剧烈热解反应，产生大量的热解气体，煤体介质活化程度进一步得到加强，此时煤体处于塑性流动状态，富油煤被压缩直至试验结束^[42]。图 10d 为原煤及热解结束后半焦形貌，可以发现，100 m 试验结果，半焦表明较为光滑，200 m 试验半焦表明有

轻微裂痕和压缩变形情况，300 m 半焦结果表明具有明显的压缩痕迹^[44]。

3 结 论

- 1) 富油煤热解焦油产率在 200 m 埋深时最高为 6.50%，300 m 埋深时最低为 5.25%，与 100 m 埋深试验结果相比，300 m 埋深时气体和半焦产率分别升了 1.45% 和 0.51%，埋深增加导致地应力升高降低了煤炭的渗透率，焦油二次反应加剧生成半焦和气体。
- 2) 地应力增加使得焦油中轻油比例由 19% 升高至 25%，酚油比例从 9.5% 升高至 12%，地应力增加降低了焦油产率但促进了热解焦油品质向轻质化提升。随着热解的进行，气体产物释放存在峰值，其中 CO₂ 最先释放，其次是 CO，甲烷和 H₂。
- 3) 随着热解的进行，富油煤出现先膨胀后压缩

的趋势, 热解温度较低时富油煤主要进行脱水脱气等物理变化, 体积膨胀, 随着温度升高体积膨胀。当温度进一步升高时, 富油煤发生剧烈的热解反应, 样品逐渐被压缩, 体积变小。

参考文献 (References) :

[1] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2014. Editorial Board of *Mineral Resources Industry Requirements Manual*. Mineral Resources Industry Requirements Manual[M]. Beijing: Geology Press, 2014. [自助核对].

[2] 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.

[3] 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.

[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] 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.

[6] 自助核对. XIE Kechang. Structure and reactivity of coal: A survey of selected Chinese coals[M]. Springer-Verlag GmbH: Berlin Heidelberg, 2015.

[7] 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): 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): 138–165.

[8] 张屿, 马明明, 孙鸣, 等. 煤原位热解研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 71–77. ZHANG Yu, MA Mingming, SUN Ming, et al. Research progress on coal *in situ* pyrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 71–77.

[9] 尚建选, 牛犇, 牛梦龙, 等. 以煤热解为龙头的煤分质利用技术: 回顾与展望 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(7): 1–20. SHANG Jianxuan, NIU Ben, NIU Menglong, et al. Coal grading utilization technologies based on coal pyrolysis: Review and

prospect[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(7): 1–20.

[10] 刘壮, 田宜水, 胡二峰, 等. 低阶煤热解影响因素及其工艺技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 50–59. LIU Zhuang, TIAN Yishui, HU Erfeng, et al. Research progress on influencing factors and technology of low-rank coal pyrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 50–59.

[11] 郭伟, 杨盼曦, 俞尊义, 等. 化学渗透脱挥发分模型在碳基固体原料热化学转化领域应用进展 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(4): 65–85. GUO Wei, YANG Panxi, YU Zunyi, et al. Application progress of chemical percolation devolatilization model in thermochemical conversion of carbon-based solid raw materials[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(4): 65–85.

[12] 丁肖肖, 李洪娟, 王亚涛. 褐煤低温热解分级利用现状分析及展望 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 1–7. DING Xiaoxiao, LI Hongjuan, WANG Yatao. Present situation analysis and prospect of classification and utilization of lignite pyrolysis at low temperature[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 1–7.

[13] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状 & 展望 [J]. 绿色矿山, 2023(1): 1–24. KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 1–24.

[14] 崔艳, 宋颖霞, 李娜. 煤炭开采项目生态及地下水环境影响后评价重点分析 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 7–10. CUI Yan, SONG Yingxia, LI Na. Key points of environmental impact post-assessment of ecology and underground water for coal mining projects[J]. Coal Engineering, 2019, 51(10): 7–10.

[15] 郝吉明, 王金南, 王志轩, 等. 中长期煤利用中大气污染控制技术路线 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 42–48. HAO Jiming, WANG Jinnan, WANG Zhixuan, et al. Technology roadmap on air pollution control for coal utilization in medium and long term[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(9): 42–48.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 吴志强, 郭伟, 张杰, 等. 一种地下煤炭原位热解的催化模块、制备方法和使用方法: CN202010987908.1[P]. 2020-12-25. 自助核对.

- [20] 吴志强, 郭伟, 张杰, 等. 用于煤炭地下原位热解的支撑剂, 制备方法和填充方法: CN202010992622.2[P]. 2021-12-28.
- [21] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [22] 鲁俊, 尹光志, 高恒, 等. 真三轴加载条件下含瓦斯煤体复合动力灾害及钻孔卸压试验研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1812–1823.
LU Jun, YIN Guangzhi, GAO Heng, et al. Experimental study on compound dynamic disaster and drilling pressure relief of gas-bearing coal under true triaxial loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1812–1823.
- [23] 贾恒义, 王凯, 王益博, 等. 围压循环加卸载作用下含瓦斯煤样渗透特性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1710–1718.
JIA Hengyi, WANG Kai, WANG Yibo, et al. Permeability characteristics of gas-bearing coal specimens under cyclic loading-unloading of confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1710–1718.
- [24] 冯子军, 万志军. 高温三轴应力下煤中甲烷生成特征及在注热开采瓦斯中应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 442–448.
FENG Zijun, WAN Zhijun. Methane release under triaxial stressed coal at high temperature and its application in methane extracting by heat injection[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 442–448.
- [25] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23–33.
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground *in situ* stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23–33.
- [26] JASINGE D, RANJITH P G, CHOI S K. Effects of effective stress changes on permeability of Latrobe valley brown coal[J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1292–1300.
- [27] ZHANG Y H, XU X M, LEBEDEV M, et al. Multi-scale X-ray computed tomography analysis of coal microstructure and permeability changes as a function of effective stress[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 165: 149–156.
- [28] CHEN Z W, PAN Z J, LIU J S, et al. Effect of the effective stress coefficient and sorption-induced strain on the evolution of coal permeability: Experimental observations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(5): 1284–1293.
- [29] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3(1): 81–91.
- [30] TIAN J W, LIU J S, ELSWORTH D, et al. An effective stress-dependent dual-fractal permeability model for coal considering multiple flow mechanisms[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126800.
- [31] YANG F, GAO K, YU Z Y, et al. Thermodynamic analysis of *In situ* underground pyrolysis of tar-rich coal: Primary reactions[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(21): 18915–18929.
- [32] 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.
- [33] FU D L, YU Z Y, GAO K, et al. Thermodynamic analysis on *In situ* underground pyrolysis of tar-rich coal: Secondary reactions[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(14): 12805–12819.
- [34] MENG H, YANG Y Z, WU L Y. Strength, deformation, and acoustic emission characteristics of raw coal and briquette coal samples under a triaxial compression experiment[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(47): 31485–31498.
- [35] PAN R K, GU Q Y, CHAO J K, et al. Study on the spontaneous combustion oxidation properties of coal under the coupling effect of stress and temperature[J]. *Combustion Science and Technology*, 2023, 195(6): 1369–1385.
- [36] LIU Z, SHENG K H, YANG H, et al. Numerical simulation study and application of coal seepage evolution law around water injection borehole in the stope “dynamic-static” pressure zone[J]. *Measurement*, 2022, 195: 111107.
- [37] 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.
- [38] PORADA S. The influence of elevated pressure on the kinetics of evolution of selected gaseous products during coal pyrolysis[J]. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 1071–1078.
- [39] 黄勇, 高亚男, 刘丹等. 油坊梁煤加压热解特性的实验研究 [J]. 煤炭转化, 2023(5): 31–41. HUANG Yong, GAO Yanan, LIU Dan, et al. Experimental study on pressurized pyrolysis characteristics of Youfangliang coal[J]. Coal Conversion, 2023(5): 31–41. [自助核对].
- [40] TAO W, ZOU Y R, CARR A, et al. Study of the influence of pressure on enhanced gaseous hydrocarbon yield under high pressure-high temperature coal pyrolysis[J]. *Fuel*, 2010, 89(11): 3590–3597.
- [41] 谢克昌. 煤的结构与反应性 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [42] 万志军, 冯子军. 煤的热力耦合特性及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [43] 李志强, 鲜学福, 隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 523–527.
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 523–527.
- [44] WANG S, LI H M, WANG W, et al. Experimental study on mechanical behavior and energy dissipation of anthracite coal in natural and forced water-saturation states under triaxial loading[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(21): 668.