



富油煤热解煤及覆岩温度场时空演化特征

段纪元 耿济世 王双明 孙强 张鹤 师庆民 李雨航 杨勃兴 于珂欣

引用本文:

段纪元, 耿济世, 王双明, 等. 富油煤热解煤及覆岩温度场时空演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 60–73.

DUAN Jiyuan, GENG Jishi, WANG Shuangming. Spatio-temporal evolution of temperature fields in tar-rich coal and overlying strata during pyrolysis[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 60–73.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.20241398>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同气氛下富油煤受热裂隙演化及热解动力学参数变化

Fissure evolution and variation of pyrolysis kinetics parameters of tar-rich coal during heat treatment under different atmosphere
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 15–24 <https://doi.org/10.12438/cst.2023–1688>

陕北榆神矿区富油煤分布规律及形成控制因素

Distribution and geological controls of tar-rich coals in Yushen mining area of Northern Shaanxi

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 161–168 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b8d95b1b-1a92-4aac-851b-7b954aaf2690>

采空区煤体自燃温度场演变模拟试验研究

Simulation test study on temperature field evolution of coal spontaneous combustion in gob

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 114–120 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5ca5720f-90e8-4d4b-bab1-b1ce0c88242c>

新疆北部早、中侏罗世富油煤分布规律及控制因素

Distribution of early and middle Jurassic tar-rich coal and its geological controls in Northern Xinjiang

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 244–254 <https://doi.org/10.12438/cst.2023–0638>

煤炭地下气化过程中温度场及其传热特征研究进展

Research progress of temperature field and heat transfer characteristics in process of underground coal gasification

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 275–285 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8e23924d-2ea2-44e8-99c8-106790d2b372>

陕西省富油煤分布及受控地质因素

Distribution and controlled geological factors of oil-rich coal in shaanxi province

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 171–181 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021–0531>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

段纪元, 耿济世, 王双明, 等. 富油煤热解煤及覆岩温度场时空演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 60–73.
DUAN Jiyuan, GENG Jishi, WANG Shuangming, *et al.* Spatio-temporal evolution of temperature fields in tar-rich coal and overlying strata during pyrolysis[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 60–73.

富油煤热解煤及覆岩温度场时空演化特征

段纪元^{1,2,3}, 耿济世^{1,2,3}, 王双明^{1,2,3}, 孙强^{1,2,3}, 张鹤^{1,2,3}, 师庆民^{1,2,3}, 李雨航^{1,2,3}, 杨勃兴^{1,2,3}, 于珂欣^{1,2,3}

(1. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 富油煤原位热解是通过隔绝空气加热煤层以获取油气资源的创新煤炭利用方式, 对有效提升国内油气供给能力, 保障国家能源安全具有重要意义。为了探究富油煤原位热解过程中地层温度分布规律, 采用自行设计的富油煤热解试验装置, 模拟了富油煤地下热解过程中的温度场演化趋势, 结合扫描电镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 和三维显微镜 (3D Microscopy, 3DM) 分析了富油煤层及其覆岩的温度响应和热弛豫特性, 揭示了富油煤热解过程中的地层传热机制。结果表明: 富油煤热解过程中, 不同位置温度随时间呈非线性增加, 煤层与覆岩温度变化规律相似, 在竖直方向的扩散快于在水平方向的扩散; 煤层及覆岩均表现出明显的热弛豫, 中心区域温度高且增速快, 四周温度较低且增速慢, 热弛豫范围与煤岩体的各向异性及空间位置有关, 距离热解区中轴线横向距离越大, 地层二次升温时间越长; 富油煤热解过程中, 热解半焦内部孔裂隙发育、裂隙网络密度增大, 富油煤导热性能降低, 内部形成封闭空间, 热解焦油滞留于煤基质中。同时, 热解焦油因其密度大、黏度高, 在煤层底部及低温区域凝结, 致使半焦局部胶结成块, 形成隔热层, 降低热量的传递效率, 影响热解反应的深度和速率, 导致煤及覆岩温度整体呈“圆锥形”分布特征。研究成果可为富油煤原位热解工程实践提供理论支撑。

关键词: 富油煤; 原位热解; 温度场; 实时监测; 热弛豫

中图分类号: TQ530.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)10-0060-14

Spatio-temporal evolution of temperature fields in tar-rich coal and overlying strata during pyrolysis

DUAN Jiyuan^{1,2,3}, GENG Jishi^{1,2,3}, WANG Shuangming^{1,2,3}, SUN Qiang^{1,2,3}, ZHANG He^{1,2,3}, SHI Qingmin^{1,2,3},
LI Yuhang^{1,2,3}, YANG Boxing^{1,2,3}, YU Kexin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Coal Green Exploitation and Geological Safeguard, Xi'an 710054, China; 2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Institute of Geological Research on Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In-situ pyrolysis of tar-rich coal is an innovative coal utilization method that heats coal seams by isolating air to extract oil and gas resources. This approach plays a crucial role in improving domestic oil and gas supply and ensuring national energy security. To investigate the temperature distribution pattern during the in-situ pyrolysis of tar-rich coal, a self-designed pyrolysis experimental apparatus was used to simulate the temperature field evolution in the underground pyrolysis process of tar-rich coal. Scanning Electron Microscopy (SEM) and 3D Microscopy (3DM) were employed to analyze the temperature response and thermal relaxation characteristics of the tar-rich coal seam and its overburden, revealing the heat transfer mechanisms within the strata during the pyrolysis process. The results show: During the pyrolysis of tar-rich coal, the temperature at different locations increases non-linearly with time. The temperature variation in the

收稿日期: 2024-10-02

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2024-1398

基金项目: 陕西省“两链”融合重点专项资助项目 (2023-LL-QY-05); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2024JC-YBQN-0289); 陕西省博士后科研资助项目 (2023BSHEDZZ304)

作者简介: 段纪元 (2001—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生。E-mail: 23209071032@stu.xust.edu.cn

通讯作者: 耿济世 (1991—), 男, 河北赵县人, 副教授, 博士。E-mail: gengjishi@xust.edu.cn

coal seam and overburden follows a similar pattern, with diffusion in the vertical direction occurring faster than in the horizontal direction. Both the coal seam and overburden exhibit significant thermal relaxation. The temperature in the central area is higher and increases rapidly, while the temperature at the periphery is lower with a slower rate of increase. The extent of thermal relaxation is related to the anisotropy of the coal-rock body and spatial position. The further the distance from the central axis of the pyrolysis zone, the longer the secondary heating time of the strata. During the pyrolysis process, the development of pores and fractures in the pyrolyzed semi-coke, along with an increase in fracture network density, reduces the thermal conductivity of the tar-rich coal, forming sealed spaces and causing the retention of pyrolysis tar within the coal matrix. At the same time, due to the high density and viscosity of the pyrolysis tar, it condenses in the lower sections of the coal seam and low-temperature areas, causing partial cementation of the semi-coke into lumps and forming insulating layers. This reduces heat transfer efficiency, impacts the depth and rate of the pyrolysis reaction, and leads to a conical temperature distribution pattern in the coal and overburden. The research findings provide significant theoretical support for the engineering practice of in-situ pyrolysis of tar-rich coal.

Key words: tar-rich coal; in-situ pyrolysis; temperature field; real-time monitoring; thermal relaxation

0 引 言

随着我国能源消费水平的不断提高,国内油气供应严重依赖对外进口,能源安全问题日益突出^[1-3]。我国的资源禀赋表现为“缺油,少气,相对富煤”的特征,非常规能源的开发利用变得十分重要^[4-6]。富油煤作为重要的非常规能源,主要分布于陕西、内蒙古、新疆等地^[7]。煤中潜在油资源量约 500 亿 t,气资源量约 75 万亿 m³^[8-9]。相较于传统模式,地下原位热解可直接将富油煤中的油气资源分类提取,同时将半焦保留在原位,实现煤炭资源的多级、清洁利用^[10-12]。富油煤的地下原位热解为缓解我国能源安全、促进绿色能源转型提供了切实可行的技术路径,具有重大战略价值^[13-15]。目前,富油煤原位热解仍处于起步阶段,相关研究主要集中于热解过程中的多场条件的耦合、孔隙结构演化和油气运移特征等方面^[16-18]。杨甫等^[19]、董光顺等^[20]通过数值模拟研究了原位热解过程中多场耦合条件下的传热传质规律,结果表明,温度、煤层渗透率等是影响热解效率的重要因素。师庆民等^[21]利用低场核磁共振试验和热重分析试验揭示了热解焦油的迁移约束性与煤中含氧官能团和脂肪结构不断减少密切相关。郭伟等^[22]构建了陕北富油煤的分子热解动力学模型,探讨了温度与焦油产率之间的关系。王双明等^[23]、耿济世等^[24]通过非等温热失重 (Thermogravimetry, TG) 并结合体视显微镜,将富油煤热解过程分为 3 个阶段,认为 300 ~ 500 °C 阶段,产油量最大,煤孔隙最为发育,活化能最大。通过多手段结合可以相互印证富油煤热解特征,但实验室所采取的技术手段仍有待完善。目前,多数试验研究聚焦于小尺度下 (50 mm×100 mm) 富油煤试样的热解行为^[25-26]。对原位条件下富油煤及覆岩的热解特征研究仍显不足,特别是热解过程中地层温度场实时变化亟待厘清。

基于此,笔者通过构建富油煤热解物理模型,模拟富油煤的热解过程,剖析煤及覆岩在热解过程中的温度场变化规律,以期为富油煤原位热解提供理论支撑。

1 试 验

1.1 模拟试验流程

物理模拟模型主要由 3 个子系统构成,分别为富油煤地层模拟系统、供热及温度监测系统、热解油气及数据采集系统 (图 1)。各系统具体构成如图 2 所示。其中,富油煤地层模拟系统中热解反应装置由模型钢铸造,热解反应装置外观尺寸 (内径×高) 为 $\phi 300 \text{ mm} \times 275 \text{ mm}$,壁厚 10 mm,其内部构造主要包括底板、炉壁和顶盖 3 部分。供热及温度监测系统由控温装置 (加热台) 组成。热解油气及数据采集系统的组成单元包括温度监测装置、油气收集装置、冷凝装置。

试验根据相似准则,强度相似比为 20。模拟地层选用沙子、水泥、石膏粉和水按比例进行配制 (表 1),各岩层材料中,水的质量占岩层总质量的 10%。其中,模拟地层材料的导热系数与实际粉砂岩、细砂岩相近 (表 2)。煤层采用长焰煤 (焦油产率为 9%)。

模型填充时 (图 1),每填充 1 层地层,用水平尺整平并静置 24 h,之后进行下一地层的铺设。煤层铺设时,将陶瓷加热台布置于煤层底部中心区域。此后,在高出加热台 15、85、170 mm 处各呈十字型水平布置 3 层热电偶,每层 12 个。同一半径范围 1—4 号热电偶按照顺时针方向排布 (图 3)。

在模型填充及温度监测系统布设完毕后,将加热台预设温度设置为 600 °C,加热速率设置为 2 °C/min。热解过程中,实时记录地层温度场变化,采样间隔为 10 s。待富油煤热解油气产出,经冷却系统冷却后,使用锥形瓶和集气袋收集。

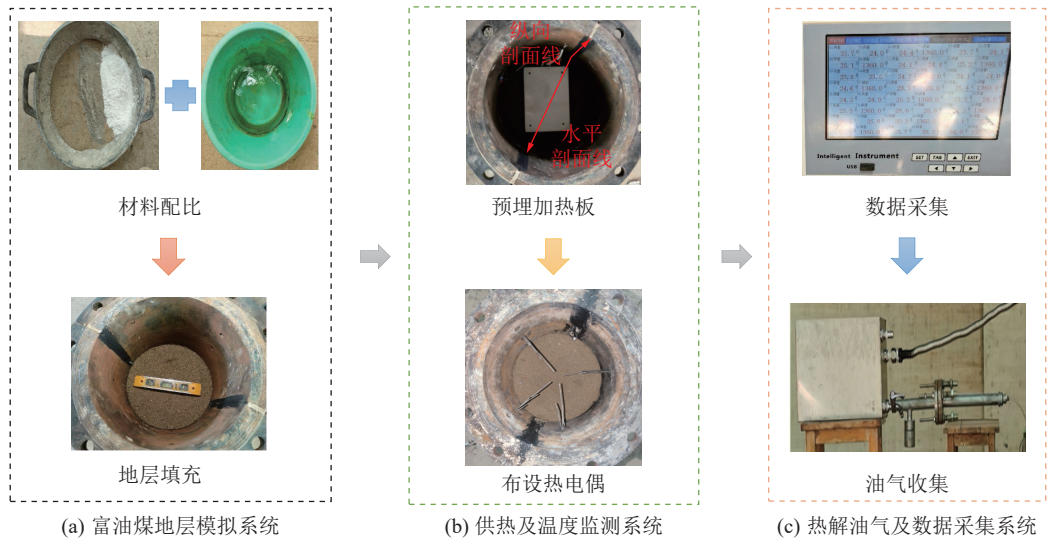


图 1 试验流程
Fig.1 Flow of experiment

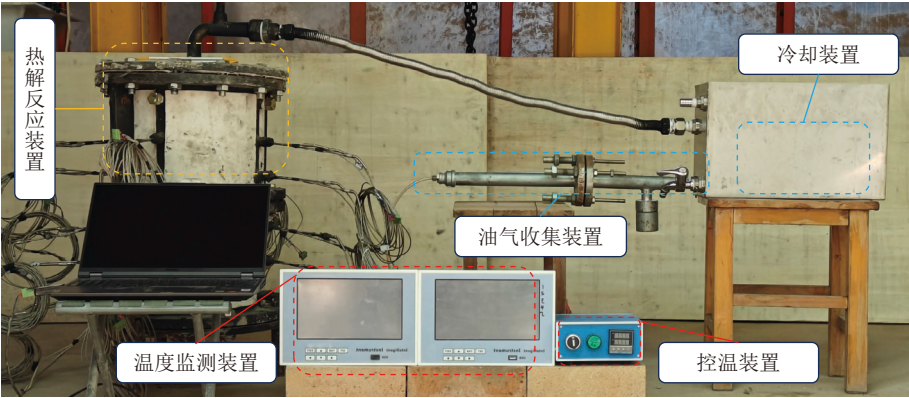


图 2 模型装置
Fig.2 Diagram of modelling device

表 1 各岩层材料配比^[27]
Table 1 Material ratios for each rock layer^[27]

岩层	沙子质量 分数/%	水泥质量 分数/%	石膏粉质量 分数/%
细砂岩层	90	3	7
粉砂岩层	90	5	5

2 试验结果与分析

2.1 煤及覆岩温度-时间响应特征

煤及覆岩温度与时间的变化均呈现出非线性的特征(图 4),不同岩层对温度的响应出现明显差异。通过温度曲线的变化可进一步反映各层岩体受热的快慢。

在热解过程中,粉砂岩层与煤层上部(距离加热台 85 mm)的温度变化特征相似,均经历了极速升温(I)、缓慢升温(II) 2 个阶段(图 4a 和图 4b)。但对于同一阶段,其升温速率出现明显差异,尤其对于极速

升温阶段(I) 20 mm 处,粉砂岩层平均升温速率为 8.7 ℃/h,峰值温度为 87.1 ℃,煤层上部平均升温速率为 12.4 ℃/h,峰值温度为 149.2 ℃。在缓慢升温阶段(II),粉砂岩层与煤层上部则表现出随着距离中心位置逐渐增大,其二次升温时间延长的现象。如对于煤层上部,20、70 和 120 mm 热电偶处的温度保持不变的时间分别是 5、9 和 14 h。值得注意的是,煤层上部温度曲线中阶段(III)仍在升温,而粉砂岩层阶段(III)为降温阶段。与之不同的是,煤层底部(距离加热台 10 mm)的温度曲线特征则表现为极速升温阶段(I)、恒温阶段(II)、降温阶段(III)(图 4c)。其极速升温阶段(I)的平均升温速率为 54.5 ℃/h,峰值温度为 613.8 ℃。

此外,富油煤层及覆岩的水平温度随着与模型中轴线距离的增加逐渐降低。如 47 h 时,随着距离中轴线 20 mm 增加至 120 mm,煤层底部处的温度由 621 ℃降低至 310 ℃。

表 2 模拟材料与实际岩石导热系数^[28-29]
Table 2 Thermal conductivity of each rock formation^[28-29]

温度/℃	细砂岩导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	粉砂岩导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	模拟细砂岩导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	模拟粉砂岩导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	文献
25	—	—	1.10	1.08	[28]
50	1.30	1.20	1.06	1.04	
100	1.23	1.11	1.09	1.05	
200	1.20	1.11	1.03	1.01	
300	1.10	0.97	1.07	1.00	
400	0.98	0.99	0.97	0.99	
500	0.96	1.01	0.94	0.95	
600	0.95	0.93	0.95	0.93	
25	—	—	1.10	1.08	[29]
50	—	—	1.06	1.04	
100	1.15	1.22	1.09	1.05	
200	1.11	1.19	1.03	1.01	
300	1.09	1.09	1.07	1.00	
400	0.97	0.99	0.97	0.99	
500	1.00	0.95	0.94	0.95	
600	0.91	0.94	0.95	0.93	

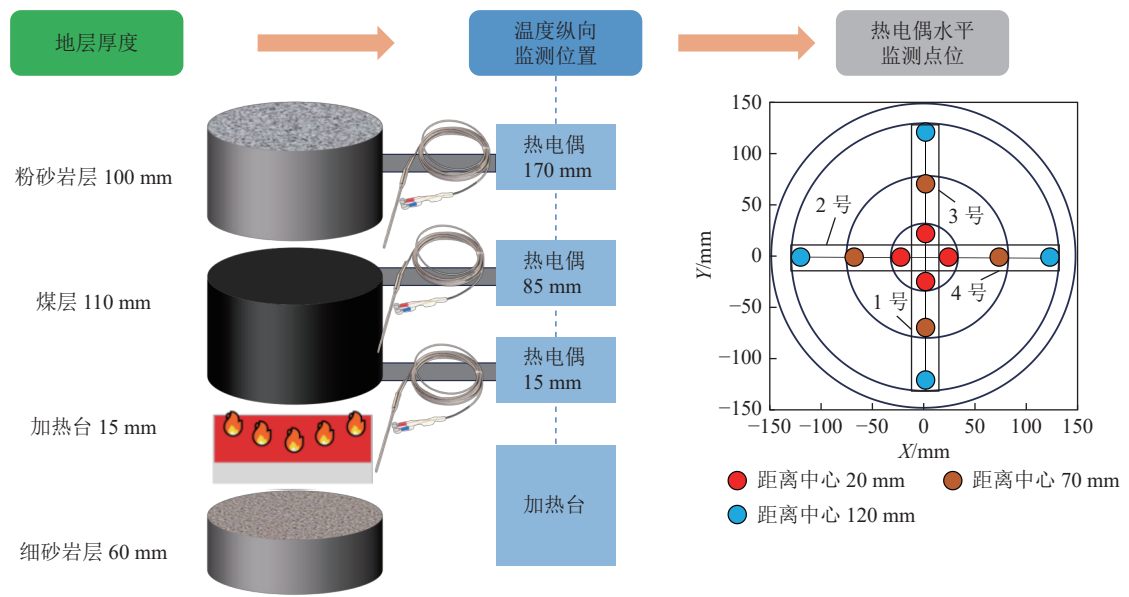


图 3 地层分布及热电偶布设
Fig.3 Stratigraphic distribution and thermocouple placement

2.2 水平剖面温度分布特征

煤及覆岩的水平温度分布特征随着加热时间的延长,表现为中心区域温度最高且增速快,四周温度较低且增速较慢的特点(图 5)。0~12 h,粉砂岩层、煤层上部及煤层底部中心区域的峰值温度依次为 87.1、161.6、613.8 ℃,升温速率分别为 5.4、11.7、49.2 ℃/h。相比之下,该时段各层边缘区域峰值温度

依次为 79.1、90.5、276.8 ℃,升温速率较低,依次为 4.9、5.9、21.4 ℃/h。
当加热时间超过 12 h,粉砂岩层与煤层上部温度上升缓慢,但中心区域与边缘区域的升温速率差异现象依然存在。如 12~47 h,煤层上部中心及边缘区域峰值温度依次为 315.9、152.1 ℃,升温速率依次为 4.4、1.8 ℃/h。煤层底部温度基本维持不变。

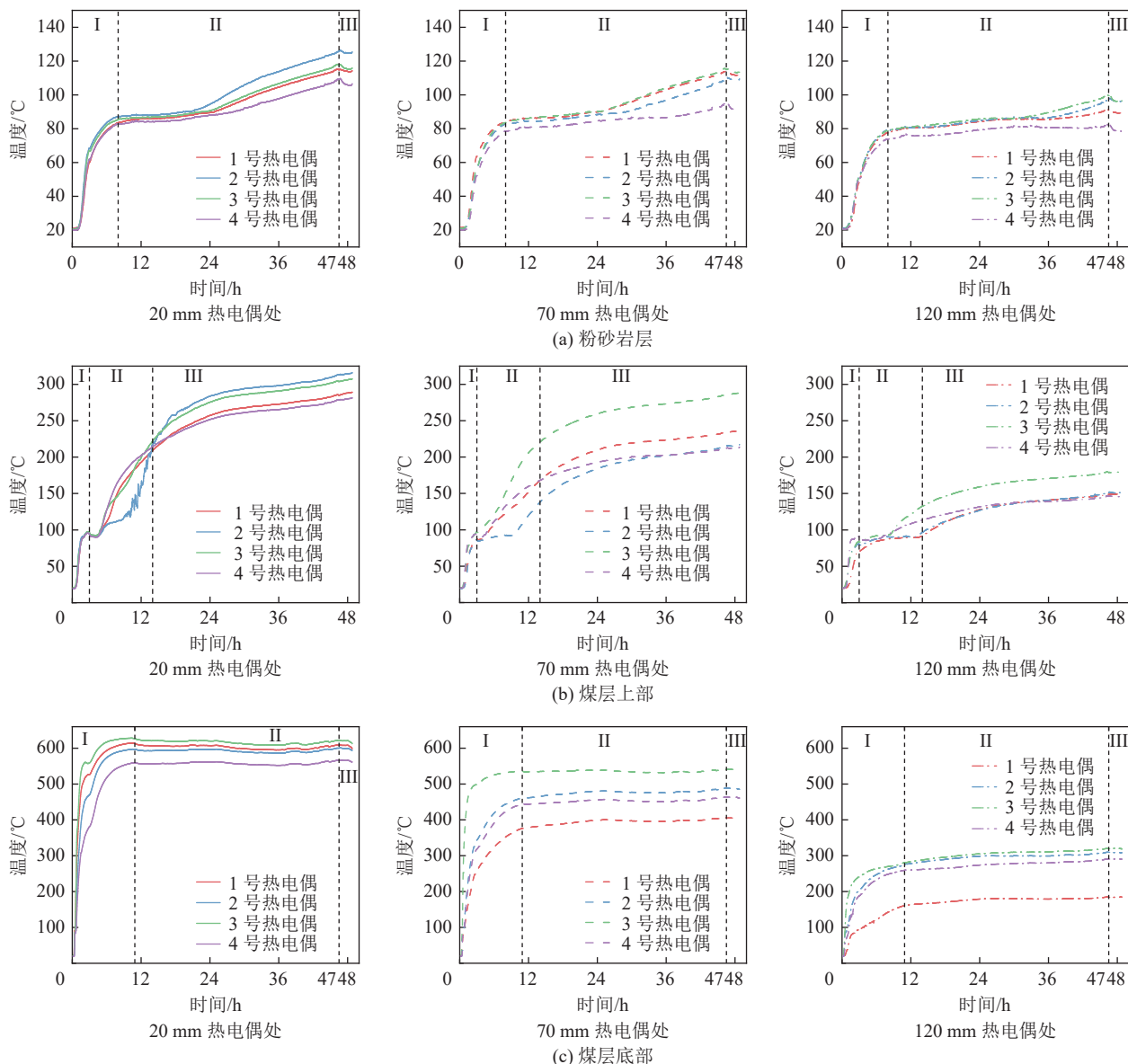


图4 煤层及覆岩各位置横向温度变化

Fig.4 Lateral temperature variations at various locations in overburden and coal seam

47 h 后停止加热,地层中心高温区域逐渐缩小,外缘温度开始下降。

2.3 纵向剖面温度分布特征

模拟地层纵向剖面温度场随时间变化如图6所示,总体呈现出显著的“圆锥形”升温特征。加热开始后至12 h,底部中心区域温度升高明显,具体表现为底部中心温度由20℃升高至570℃,升温速率为45.8℃/h。温度场云显示该区域颜色由深蓝色转变为深红色。同时,两侧边缘温度升至170℃,升温速率为12.5℃/h。温度场云显示该区域颜色由深蓝色转变为浅蓝色。这说明随着煤层底部被加热,温度开始向四周扩散,至12 h时,覆岩温度达到90℃。当加热至47 h时,煤层底部中心区域温度维持在570℃左右,但在高于570℃的区域面积呈现出先

降低后增大的趋势。47 h 后,加热停止,地层开始降温。

3 富油煤及覆岩温度场时空演化

3.1 富油煤热解的非稳态传热模型

为探究富油煤热解过程中热传递特征,将煤体简化为若干个立方体,假设条件如下:

1) 温度函数 $T(x, y, z, t)$ 由时间 t 和空间位置 (x, y, z) 共同决定。

2) 导热系数 $\lambda = \lambda(T)$, λ 为岩体所受温度 T 的函数。

3) 地层三维传热过程中,热量传递遵循傅里叶定律^[30-31],传热模型^[32]如式(1)所示:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + Q \quad (1)$$

式中： ρ 为地层密度， kg/m^3 ； c 为地层比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t 为时间， s ； λ 为导热系数，

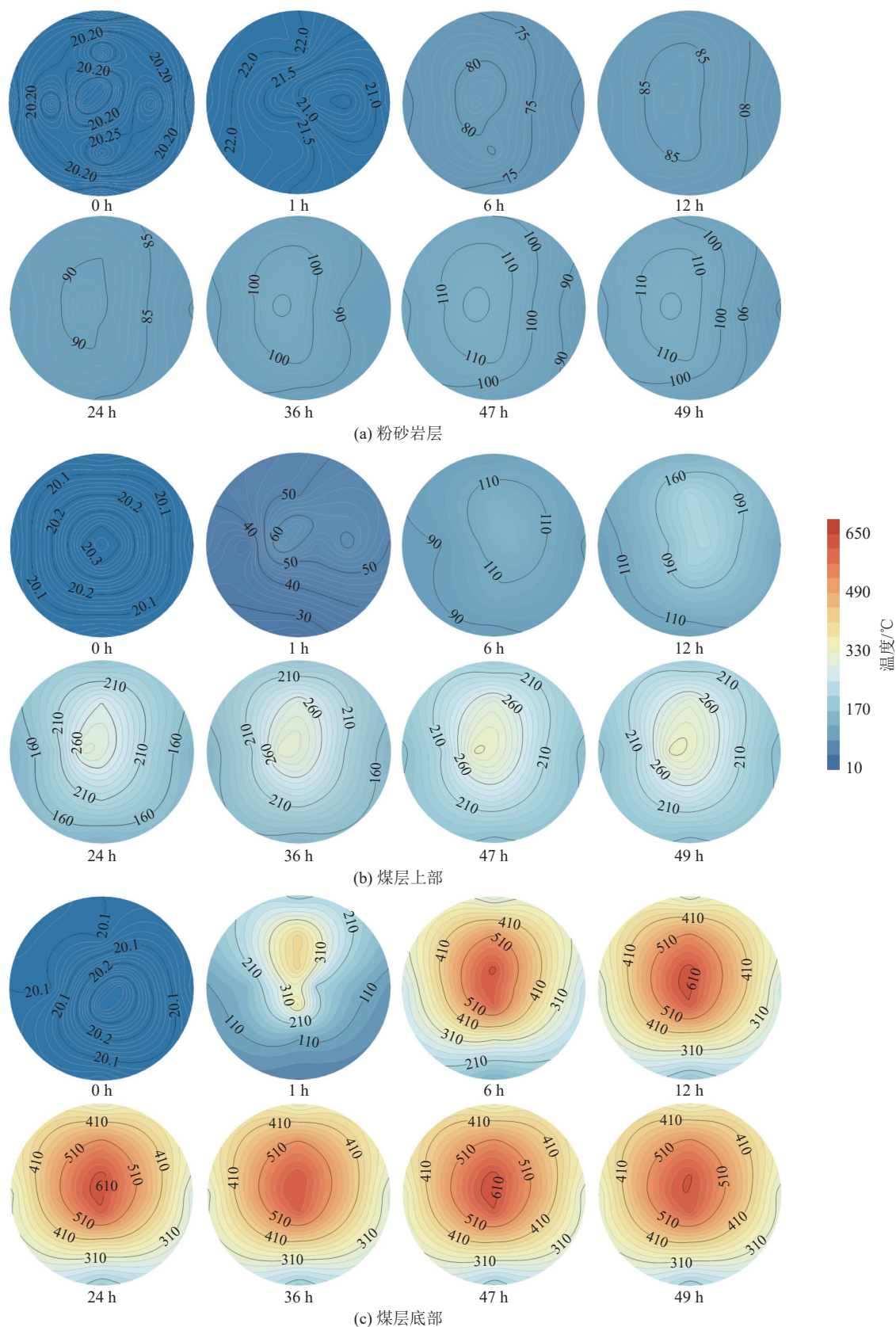


图5 煤及覆岩水平温度分布云

Fig.5 Cloud of stratigraphic horizontal temperature variations over whole time period

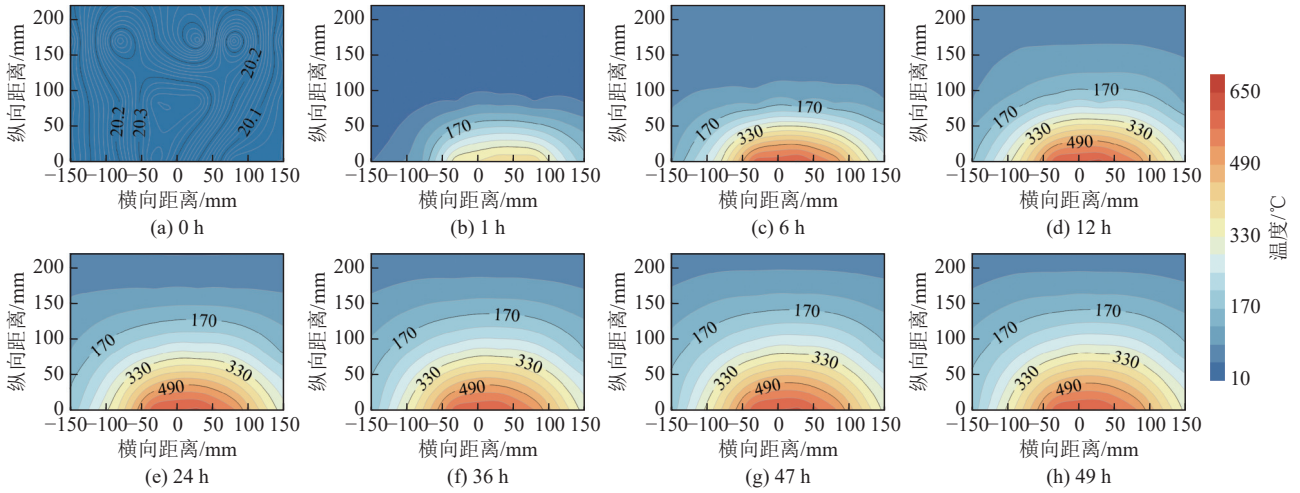


图 6 纵向温度随时间变化云

Fig.6 Longitudinal temperature variation with time cloud plot

表示传热过程中热通量的散度, $W/(m \cdot K)$; ∇T 为温度场梯度, $^{\circ}C/m$; Q 为热通量, W/m^2 。

结合温度场变化实时云, 将煤及覆岩传热模型进一步简化。当温度场在 z 方向上保持均匀, 即考虑 $T=T(x, y, t)$, 认为 T 为平面位置 (x, y) 和时间 t 的函数, 如式 (2) 所示:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q \quad (2)$$

通过控制体积法, 将二维平面划分为若干微小单元, 选取任意一个微单元, 微单元坐标为 (i, j) , 面积为 $\Delta A = \Delta x \Delta y$ 。对 Δt 时间内微单元应用能量守恒定理^[33], 则式 (2) 可改写为式 (3), 即:

$$\rho c \Delta A \frac{\Delta T_{i,j}}{\Delta t} = Q_s + Q_{i,j} \Delta A \Delta t \quad (3)$$

式中: $\Delta T_{i,j}$ 为控制体积 Δt 时间内温度的变化, $^{\circ}C$,

$\Delta T_{i,j} = \Delta T_{i,j}^{t+\Delta t} - \Delta T_{i,j}^t$ 。 Q_s 为在边界 s 上, 由热传导引起的净热通量, W/m^2 。 $Q_{i,j}$ 为单位时间及面积内产生的热量, W/m^2 ; $Q_{i,j} \Delta A \Delta t$ 为 Δt 时间内控制体积内部由热源产生的总热量, J 。

根据傅里叶定律, 热通量^[34]的计算如式 (4) 所示:

$$q = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4)$$

式中: n 为法向坐标; $\partial T / \partial n$ 为法向温度梯度, $^{\circ}C/m$ 。

净热通量 Q_s 为各个边界上热通量的代数和, 边界 s 由上边界、下边界、左边界及右边界组成, 如式 (5) 所示:

$$Q_s = q_{(i-1)/2,j} - q_{(i+1)/2,j} + q_{i,(j-1)/2} - q_{i,(j+1)/2} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3), 得到控制体积 (i, j) 在 $t+\Delta t$ 时间内温度传导模型, 如式 (6) 和式 (7) 所示:

$$\rho c \Delta A \frac{\Delta T_{i,j}^{t+\Delta t} - \Delta T_{i,j}^t}{\Delta t} = \left[-\lambda_{(i+1)/2,j} \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x^2} + \lambda_{(i-1)/2,j} \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right] \Delta y + \left[-\lambda_{i,(j+1)/2} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y^2} + \lambda_{i,(j-1)/2} \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right] \Delta x + Q_{i,j} \quad (6)$$

化简得:

$$\Delta T_{i,j}^{t+\Delta t} = \Delta T_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{\rho c} \times \left\{ \frac{1}{\Delta x^2} [\lambda_{(i+1)/2,j} (T_{i,j} - T_{i+1,j}) + \lambda_{(i-1)/2,j} (T_{i,j} - T_{i-1,j})] + \frac{1}{\Delta y^2} [\lambda_{i,(j+1)/2} (T_{i,j} - T_{i,j+1}) + \lambda_{i,(j-1)/2} (T_{i,j} - T_{i,j-1})] + Q_{i,j} \right\} \quad (7)$$

对于水平温度场传热方程, 可将坐标系转化为极坐标系, 则温度场函数 $T = T(r, \theta)$, 对坐标进行如下变化:

$$x = r \cos \theta \quad (8)$$

$$y = r \sin \theta \quad (9)$$

$$\Delta x = \Delta r \cos \theta - r \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \sin \theta \quad (10)$$

$$\Delta y = \Delta r \sin \theta + r \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \cos \theta \quad (11)$$

式中: r 为温度测点到原点的距离, m ; θ 为温度测点相对于 x 轴的夹角, $(^{\circ})$ 。

联立式 (6)、式 (8)—式 (11), 则水平温度场传热

$$\Delta T_{i,j}^{t+\Delta t} = \Delta T_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{\rho c} \left\{ \frac{1}{r_i(\Delta r)^2} [\lambda_{(i+1)/2,j}(T_{i,j} - T_{i+1,j}) + \lambda_{(i-1)/2,j}(T_{i,j} - T_{i-1,j})] + \frac{1}{r_i(\Delta \theta)^2} [\lambda_{i,(j+1)/2}(T_{i,j} - T_{i,j+1}) + \lambda_{i,(j-1)/2}(T_{i,j} - T_{i,j-1})] + Q_{i,j} \right\} \quad (12)$$

式中: i 对应 $r_i = r_0 + i\Delta r$, j 对应 $\theta_j = \theta_0 + j\Delta\theta$; r_0 为起始径向坐标, m; θ_0 为起始角向坐标, ($^\circ$)。

通过式 (7)、式 (12) 可知, 富油煤热解过程中的温度变化主要受岩体导热系数 λ 的影响, λ 越大, 热传递速率越快。结合前期导热系数的测量结果 (表 2), 岩石的导热系数显著受温度的影响。随着温度的增大, 岩石导热系数逐渐降低^[28-29]。鉴于此, 笔者在热传导模型中将 λ 表征为一个随温度变化的动态参数, 以更准确描述非稳态传热过程中的热物性变化规律。此外, 温度是影响岩体导热性能变化的宏观性质, 其本质在于改变岩石内部矿物^[35-36] 及孔隙结构^[37]。然而在实际热解过程中, 受煤层导热性质差等因素的影响, 地层传热过程中往往存在局部热传导不均现象, 进而影响其整体传热规律。

3.2 热解过程中微裂隙与胶结作用对温度的影响

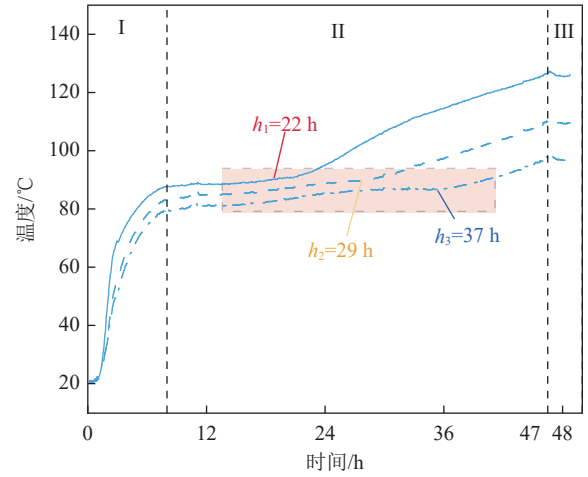
在富油煤热解过程中, 煤体结构的演化显著影响地层温度场的变化特征^[21]。其本质在于由于煤及覆岩热弛豫现象而引发的微裂隙发育不均与胶结现象。

从模型的水平剖面来看, 加热开始后的短时间内 (0 ~ 12 h), 温度变化规律主要表现为中心升温迅速, 边缘升温较慢。随着时间的延长, 热量逐渐向四周扩散, 但由于覆岩向外界热交换明显且受热程度低 (峰值温度为 126 $^\circ\text{C}$, 升温速率为 5 $^\circ\text{C}/\text{h}$), 致使地层横向热扩散现象不明显。

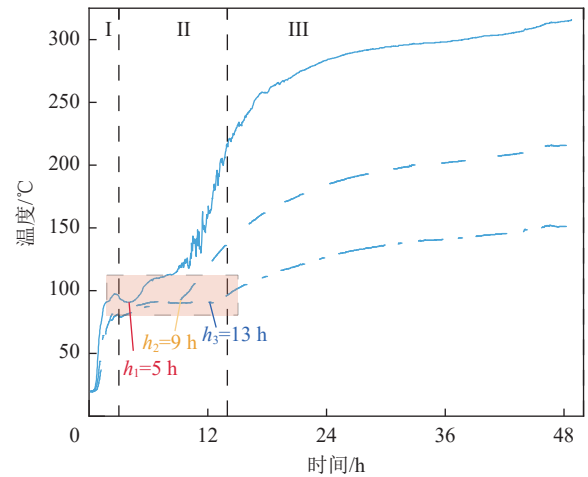
由温度场演化曲线可知, 不同岩层在热解过程中均出现了热弛豫现象, 即图 7 中浅棕色区域。具体表现为随着距离地层中轴线的横向距离增大, 地层二次升温时间也增加。如对于煤层上部, 恒温阶段 (II), 距离地层中轴线横向距离 20 mm 处的二次升温时刻为 5 h, 而在 120 mm 处则延迟至 13 h。此外, 不同层位热弛豫现象对比显示, 热弛豫现象出现的时间正比于岩层与热源之间的距离。具体表现为: 煤层底部在降温阶段 (III) 出现热弛豫, 而煤层上部及粉砂岩层则在恒温阶段 (II) 出现明显响应。图 7 中, h_1 、 h_2 、 h_3 分别对应 2 号热电偶所在岩层 20、70、120 m 位置的初始升温时间。

热弛豫现象反映了地层内部热传导过程中的非均匀性, 其主要受控于地层与热源之间的空间距离

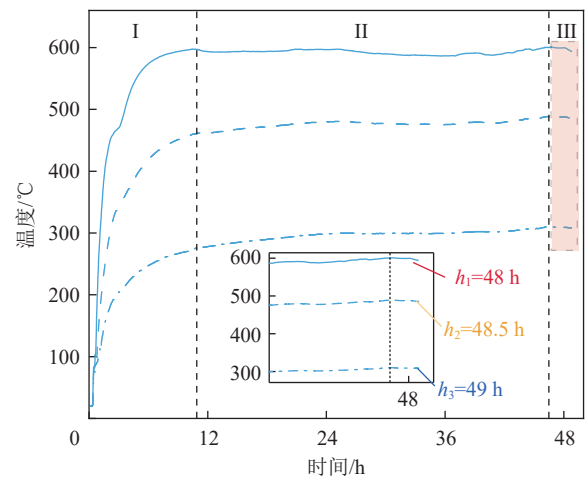
模型, 可表达为式 (12):



(a) 粉砂岩层



(b) 煤层上部



(c) 煤层底部

— 2 号热电偶 20 mm — 2 号热电偶 70 mm
- - - 2 号热电偶 120 mm

图 7 煤层及地层热弛豫现象

Fig.7 Thermal relaxation in coal seams and strata

变化以及岩体导热性能的非均质特征^[38-39]。一方面,靠近热源区域的岩层接收热量更集中,升温更迅速。另一方面,随着温度升高,岩体内部微裂隙逐步发育^[40]并呈现出一定的方向性^[41-43],这改变了热量在地层内部的传热路径,使局部区域表现出导热特性的各向异性,从而影响热量的横向扩散能力。尽管天然岩石中也存在因矿物组构^[35-36]和层理方向等因素造成的固有导热各向异性,但在本研究所设定的试验条件下,该因素对于模拟材料传热性质的影响相较于微裂隙演化所引起的变化有限。

通过对比富油煤在不同热解深度下微观形貌差异(图 8),表明随着热解深度的增加,煤中微裂隙逐渐发育且煤孔逐渐坍塌。图 8b—图 8d 说明,在 1 号试样处(350 °C),煤体处于热解初期,局部形成小尺

度封闭单元^[21]。2 号试样处(400 °C)对应热解最活跃区^[44],但此处,热弛豫效应明显,封闭单元数量最多。这是由于煤体结构因局部热量不足,热解产物无法及时释出。3 号试样接近热源,热解反应充分,封闭单元数量减少,煤体结构出现显著塌陷与裂隙贯通特征。对比试样 1 号—3 号微观形貌分析结果,同时结合热重(TG)和热重导数(Derivative Thermogravimetry, DTG)分析,如图 8e—图 8f 所示,可知对于传热速率较高的区域,热解反应最为迅速,微裂隙发育充分,产物释放最多,封闭单元数量越少。

热解过程中地层的纵向传热主要经历 4 个阶段(图 9),即初始阶段、升温阶段、恒温阶段、降温阶段。从初始阶段至升温阶段,随着温度升高,煤层底部率先受热,呈现出“圆锥形”增长趋势(图 10)。当煤层

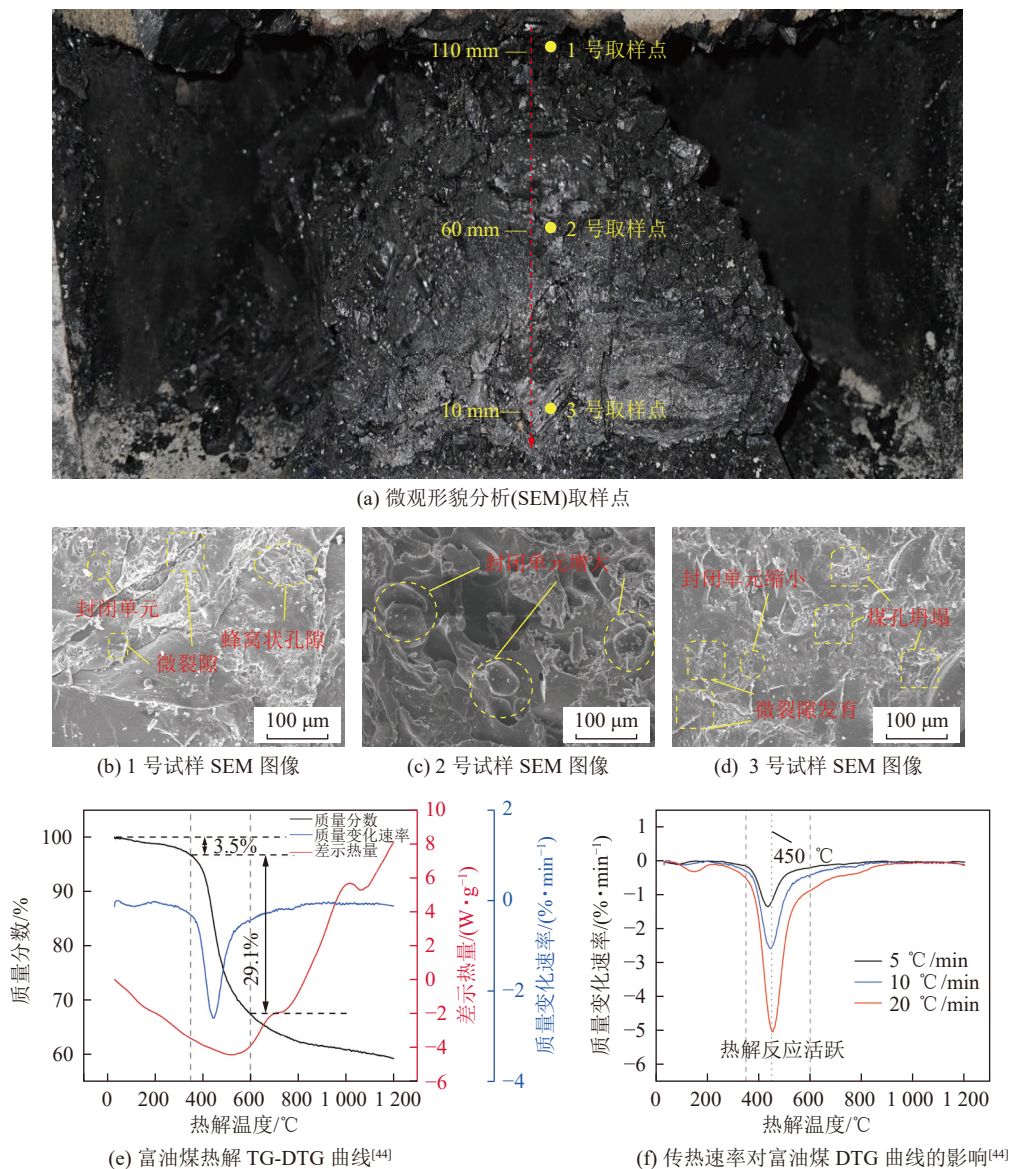


图 8 热解过程中富油煤微观形貌分析

Fig.8 Microscopic morphology analysis during pyrolysis

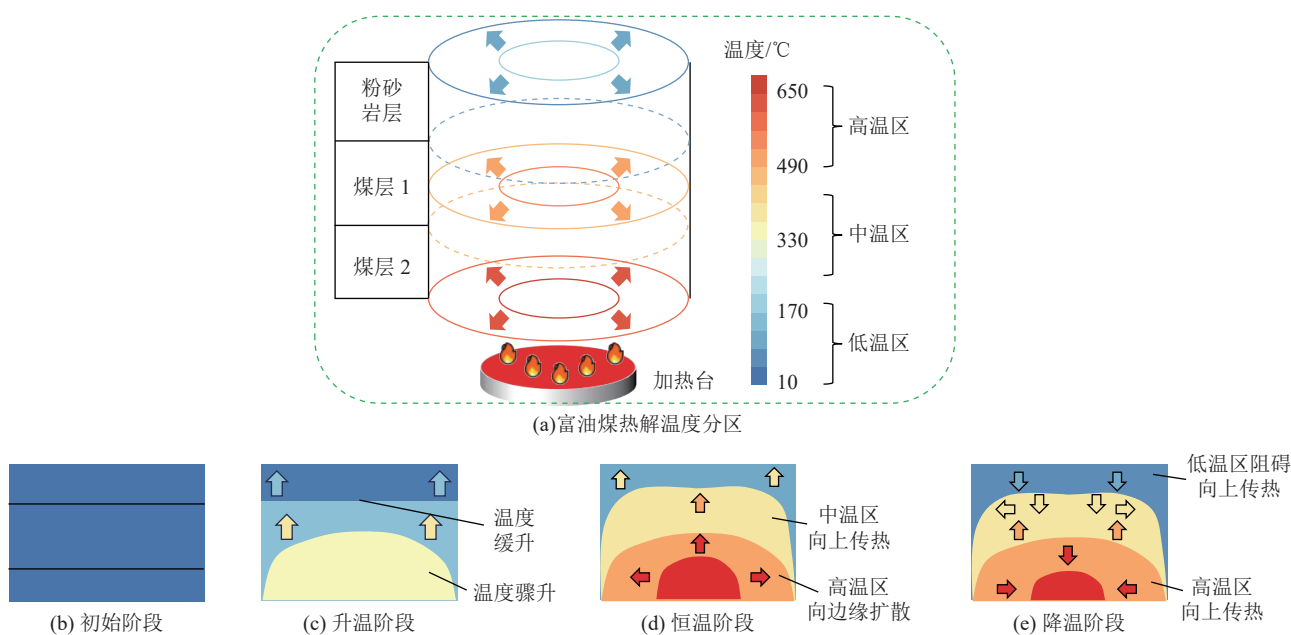


图 9 热解过程中地层传热机制

Fig.9 Stratigraphic heat transfer mechanisms

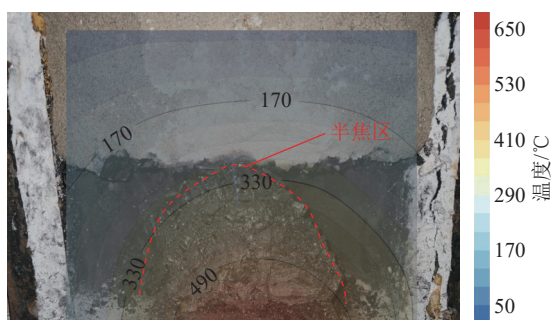


图 10 热解后“圆锥形”半焦区

Fig.10 “Cone-shaped” semi-coke zone after pyrolysis



图 11 热解煤焦油

Fig.11 Pyrolysis of coal tar

底部进入恒温阶段,地层升温速率降低明显,主要原因:一方面,富油煤开始发生剧烈的热解反应^[44]。据畅志兵等^[45]研究表明,半焦孔隙在 400 ~ 600 °C 随温度升高互相连通,孔隙数量更少、体积更大,致使其导热性能差^[46]。另一方面,富油煤热解会生成以焦油蒸汽和煤气为主的气态物,液态煤焦油(图 11)及半焦(图 12)使热量传递受限。液态热解焦油因其密度大^[47-48]、黏度高,在煤层底部及低温区域凝结,形成黏稠状的胶质体。热解过程中产生的挥发分从胶质体中析出,导致胶质体表面产生微裂隙,结合其热解过程中产生的裂隙,在这样的孔裂隙环境及气态、液态产物的相变条件下,热量传入上覆地层受限,煤及地层升温速率变慢如图 13 所示。当地层进入降温阶段,煤层底部大于 570 °C 区域逐渐缩小。这是因为其热量传入中温区 330 ~ 490 °C 地层中,致使其区域短暂扩张,从而散热,热量向上传

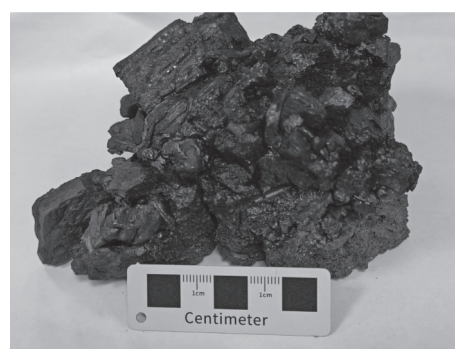


图 12 热解结束后的半焦

Fig.12 Semi-coke at the end of pyrolysis process

递。且加热台停止工作后,其温度低于煤层底部,煤层底部向下进行散热,该区域面积缩小。

此外,部分学者研究表明^[49-51],在常温条件下,长焰煤的导热系数为 0.07 W/(m · K),比热容为 0.83 J/(g · K),粉砂岩的导热系数为 1.12 W/(m · K),

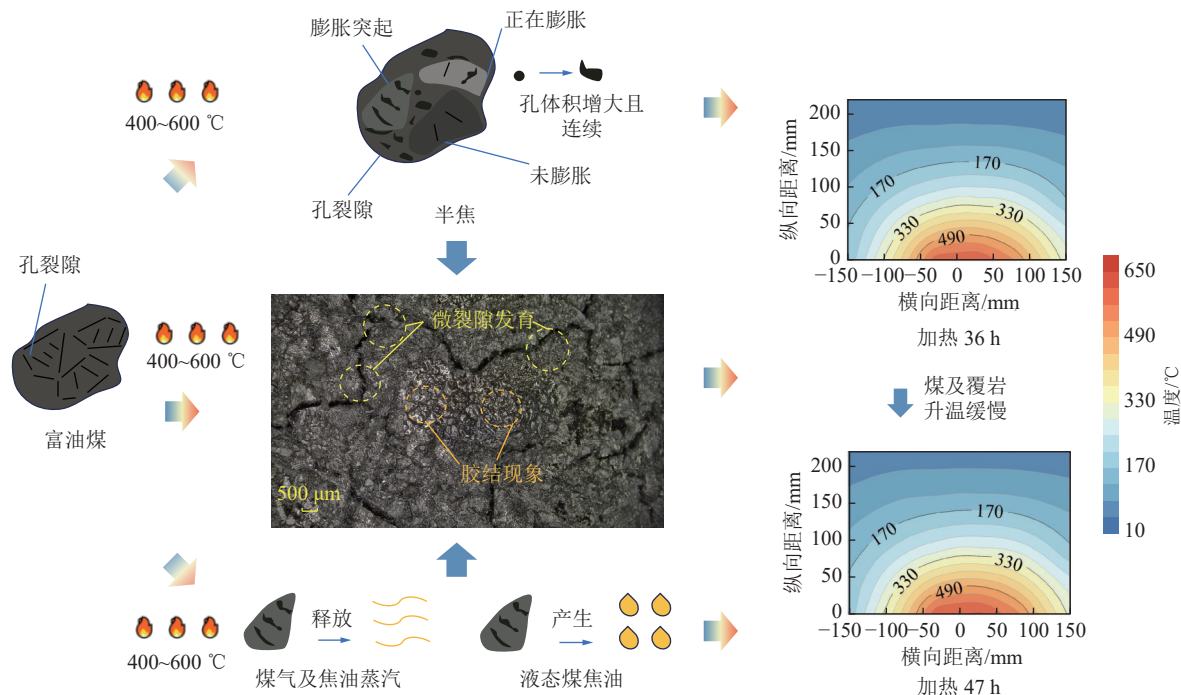


图 13 微裂隙与胶结现象对地层传热的影响

Fig.13 Influence of microfracture and cementation phenomena on stratigraphic heat transfer

比热容为 $0.95 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。300 $^{\circ}\text{C}$ ，长焰煤的导热系数为 $0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，比热容为 $1.27 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ，粉砂岩的导热系数为 $0.97 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，比热容为 $0.89 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。这表明，随着温度增长，粉砂岩导热系数逐渐增大，比热容降低，其热物理性质强于长焰煤，表现为导热能力强，单位时间吸收或释放的内能大。

在富油煤热解过程中，由于煤体导热性能较差且伴随胶结现象的产生 (图 13)，煤层底部在向煤层上部传递热量的过程中会发生显著的热量损失，进而导致温度场呈现明显的“圆锥形”分布特征。这种分布形式使得粉砂岩层所接收到的热量明显低于煤层本体。此外，粉砂岩的比热容低于煤层，在降温阶段，其温度变化主要受控于外部散热作用。由于其位于模型上部边界，与外部环境热交换频繁，当煤层上部向粉砂岩层传热时，粉砂岩层的散热效应反而对传热过程形成抑制作用，使靠近粉砂岩层界面的煤体温度在一定时间内保持短暂稳定，随后随时间推移而逐渐下降，恒温区域面积也随之减小。

4 结 论

1) 在富油煤热解过程中，煤层与覆岩的温度变化规律相似，具体表现为温度随时间呈现出非线性增长的趋势，且在煤层及覆岩在竖直方向上的温度扩散速率明显快于水平方向，致使地层中心区域温度高且增速快，四周温度较低且增速慢。

2) 热解过程中，煤层及覆岩均表现出明显的热弛豫，热弛豫范围与煤岩体的各向异性及空间位置有关，距离热解区中轴线横向距离越大，地层二次升温时间越长。当煤层上部处于恒温阶段，距离热解区中轴线横向距离 20 mm 处，开始升温时刻为 5 h，当距离热解区中轴线横向距离 120 mm 处，开始升温时刻则增加至 13 h。

3) 富油煤热解过程中升温速率降低主要与其孔隙特征及胶结现象有关。热解过程中，由于半焦内部孔裂隙发育、裂隙网络密度增大，导热性能变差，同时，热解焦油因其密度大、黏度高，在煤层底部及低温区域凝结，致使半焦局部胶结成块，形成隔热层，降低热量的传递效率，影响热解反应的深度和速率，导致煤及覆岩温度整体呈“圆锥形”分布特征。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [2] 王双明, 孙强, 谷超, 等. 煤炭开发推动地学研究发展[J]. 中国煤炭, 2024, 50(1): 2-8.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GU Chao, et al. The development of geoscientific research promoted by coal exploitation[J]. China Coal, 2024, 50(1): 2-8.
- [3] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新

- 思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152–171.
- WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 152–171.
- [4] 王潇. 浅议我国煤炭进出口现状和发展趋势[J]. 科技视界, 2018(30): 205–206.
- WANG Xiao. Discussion on the present situation and development trend of China's coal import and export[J]. *Science & Technology Vision*, 2018(30): 205–206.
- [5] 张勇, 李超. 国内油气对外依存度发展趋势[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17): 124–126.
- ZHANG Yong, LI Chao. Development trend of domestic dependence on foreign oil and gas[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(17): 124–126.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 许婷, 李宇, 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.
- [10] 王双明, 师庆民, 孙强, 等. 富油煤原位热解技术战略价值与科学探索[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 1–13.
- WANG Shuangming, SHI Qingmin, SUN Qiang, et al. Strategic value and scientific exploration of in situ pyrolysis of tar-rich coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(7): 1–13.
- [11] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 煤炭开采地球关键带响应及减损开采技术体系[J]. 中国地质, 2025, 52(1): 1–21.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological support for response and damage reduction in the Earth's critical zone under coal mining[J]. *Geology in China*, 2025, 52(1): 1–21.
- [12] 王双明, 孙强, 袁士豪, 等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 1–10.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, YUAN Shihao, et al. On the coordinated development of coal-water-soil multiple resources[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 1–10.
- [13] 新华网. 全球第一桶地下原位热解煤焦油在陕西产出[J]. 化工管理, 2024(3): 41.
- [14] 段中会, 杨甫, 王振东, 等. 陕北富油煤地下原位热解先导试验[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 14–24.
- DUAN Zhonghui, YANG Fu, WANG Zhendong, et al. Pilot experiment for underground in situ pyrolysis of tar-rich coal in the northern Shaanxi Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(7): 14–24.
- [15] 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.
- [16] 王双明, 鲍园, 郝永辉, 等. 富油煤研究进展与趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 1–11.
- WANG Shuangming, BAO Yuan, HAO Yonghui, et al. Research on tar-rich coals: Progress and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(4): 1–11.
- [17] NGUYEN M, BERNDT C, REICHEL D, et al. Pyrolysis behaviour study of a tar-and sulphur-rich brown coal and GC-FID/MS analysis of its tar[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 115: 194–202.
- [18] 周安宁, 张致, 陈永安, 等. 钕改性磁性核壳 HZSM-5 催化富油煤热解研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 144–155.
- ZHOU Anning, ZHANG Zhi, CHEN Yongan, et al. Exploring the pyrolysis of tar-rich coals under the catalysis of cerium-modified magnetic core-shell HZSM-5[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(7): 144–155.
- [19] 杨甫, 程相强, 李明杰, 等. 富油煤原位热解多物理场演化规律数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 25–34.
- YANG Fu, CHENG Xiangqiang, LI Mingjie, et al. Numerical simulations of the evolutionary patterns of multi-physical fields during the in situ pyrolysis of tar-rich coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(7): 25–34.
- [20] 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 Jiazhong, 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.
- [21] 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.
- [22] 郭伟, 杨盼曦, 俞尊义, 等. 陕北富油煤分子模型构建及其热解提油分子动力学特性[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 132–143.
- GUO Wei, YANG Panxi, YU Zunyi, et al. Molecular modeling of tar-rich coals from northern Shaanxi and their molecular dynamic characteristics in the process of pyrolysis for tar extraction[J].

- Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 132–143.
- [23] 王双明, 孙强, 胡鑫, 等. 不同气氛下富油煤受热裂解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.
- [24] 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.
- [25] 李改改, 姜鹏飞, 黄佳齐, 等. 富油煤热解过程动力学参数变化规律研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 52–56.
LI Gaigai, JIANG Pengfei, HUANG Jiaqi, et al. Study on change of kinetic parameters of tar-rich coal during pyrolysis[J]. Coal Technology, 2023, 42(10): 52–56.
- [26] 俞尊义, 郭伟, 杨盼曦, 等. 陕北富油煤热解提油产物分布特性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 176–188.
YU Zunyi, GUO Wei, YANG Panxi, et al. Distributions of products from the pyrolysis of tar-rich coals for tar extraction in northern Shaanxi Province, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 176–188.
- [27] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [28] 张华磊, 王连国, 唐芙蓉, 等. 地下气化过程中煤系沉积岩热物理性能试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4): 592–598.
ZHANG Hualei, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Thermophysical properties experimental study of sedimentary rocks of coal measures in underground gasification process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4): 592–598.
- [29] TANG F R, WANG L G, LU Y L, et al. Thermophysical properties of coal measure strata under high temperature[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(10): 6009–6018.
- [30] KHALILI N, LORET B. An elasto-plastic model for non-isothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media; Formulation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(46-47): 8305–8330.
- [31] ZHENG K, GHOSH S, GRANICK S. Exceptions to Fourier's law at the macroscale[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(11): e2320337121.
- [32] LIU J P, YANG Z Z, YI L P, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical cohesive phase-field model for hydraulic fracturing in deep coal seams[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2025, 46(4): 663–682.
- [33] TLILI I, BILAL M, QURESHI M Z A, et al. Thermal analysis of magnetized pseudoplastic nano fluid flow over 3D radiating non-linear surface with passive mass flux control and chemically responsive species[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 8125–8135.
- [34] HAYDAR A, GALUPPI L, ROYER-CARFAGNI G. A neat flux-based weak formulation for thermal problems which develops Biot's variational principle[J]. International Journal of Engineering Science, 2024, 202: 104103.
- [35] 谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 443–446.
CHEN Lunjian, ZHAO Hongbao, GU Haitao, et al. Study on microstructure of coal roof sandstone under high temperature[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 443–446.
- [36] HUANG H, SUN Q, GUO C, et al. Investigating the evolution of pore space and magnetization rate of rocks under the effect of coal fire burning[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(2): 81.
- [37] 武治盛, 冯子军, 惠峥, 等. 干热岩体热冲击后纵波波速演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 58–65.
WU Zhisheng, FENG Zijun, HUI Zheng, et al. Study on law of longitudinal wave velocity evolution of dry hot rock after thermal shock[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 58–65.
- [38] 李丹琼, 张士诚, 张遂安, 等. 基于煤系渗透率各向异性测试的水平井穿层压裂效果模拟[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 988–994.
LI Danqiong, ZHANG Shicheng, ZHANG Suian, et al. Effect simulation of horizontal well fracturing through strata based on coal seam permeability anisotropy test[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 988–994.
- [39] 屈扬, 张学博. 冲击煤体各向异性特征与其波速关联性分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(10): 148–153.
QU Yang, ZHANG Xuebo. Analysis of correlation between anisotropic characteristics and wave velocity of impact coal[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 148–153.
- [40] 张金晗, 王勤. 砂岩和页岩弹性波性质的实验研究进展[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 141–161.
ZHANG Jinhan, WANG Qin. Experimental progress on elastic wave properties of sandstones and shales[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(1): 141–161.
- [41] WU S H, YU Z W, KANG J G, et al. Research on the anisotropy of thermal conductivity of rocks in Songliao basin, China[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 593–603.
- [42] ZHAO J H, PLAGGE R. Characterization of hygrothermal properties of sandstones: Impact of anisotropy on their thermal and moisture behaviors[J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 479–494.
- [43] 唐博宁, 邱楠生, 朱传庆, 等. 松辽盆地岩石热导率柱及占地温场分布特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(1): 26–35.
TANG Boning, QIU Nansheng, ZHU Chuanqing, et al. Thermal conductivity column of rocks and distribution characteristics of paleo-geothermal field in the Songliao Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(1): 26–35.
- [44] 薛圣泽. 热解条件下富油煤热力学响应与热损伤机制研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2023.
XUE Shengze. Study on the physical property response and thermal damage mechanism of coal petrography during in-situ development of coal [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2023.
- [45] 畅志兵, 王楚楚, 旷文昊, 等. 黏结性对富油煤热解孔隙结构演

- 变及渗流的影响研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 54–63.
- CHANG Zhibing, WANG Chuchu, KUANG Wenhao, et al. Impacts of the caking property of tar-rich coals on their pore structure evolution and seepage during pyrolysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 54–63.
- [46] 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.
- [47] 张蕾, 刘春江, 宋瑞康, 等. 富油煤热解重质焦油基泡沫炭性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 166–175.
- ZHANG Lei, LIU Chunjiang, SONG Ruikang, et al. Performance of carbon foams based on heavy tar produced by tar-rich coal pyrolysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 166–175.
- [48] 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.
- [49] XUE S Z, SUN Q, SHI Q M, et al. Experimental study on the thermophysical property of long-flame coal after oxidation and pyrolysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(24): 14797–14810.
- [50] 陆银龙, 王连国, 唐芙蓉, 等. 煤炭地下气化过程中温度–应力耦合作用下燃空区覆岩裂隙演化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1292–1298.
- LU Yinlong, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Fracture evolution of overlying strata over combustion cavity under thermal-mechanical interaction during underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1292–1298.
- [51] 赵瑞. 煤火燃烧中心迁移过程温度传播特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- ZHAO Rui. Study on temperature propagation characteristics of migration process in coal fire combustion center[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.