

深部煤层地下煤气化原位点火的 CFD 模拟

张友军¹, 肖逸², 张正¹, 张浩宇², 郝军¹, 吕敏², 方灿²,
邹仁杰^{2,3}, 罗光前^{2,3}, 李显², 姚洪²

(1. 中石油江汉机械研究所有限公司, 湖北 武汉 430021; 2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518000)

摘 要: 地下煤气化 (Underground Coal Gasification, UCG) 作为一种新型采煤技术受到了广泛的关注, 但 UCG 的实验成本较高, 在开展 UCG 实验之前应当对煤层的演变机理进行深入的探究。计算流体力学 (Calculated Fluid Dynamics, CFD) 可以凭借计算机强大的计算能力, 以较为低廉的成本模拟 UCG 的生产过程。采用 Ansys 公司开发的 CFD 软件 Fluent 模拟了 1 000 K 烟气加热下深部煤层的原位加热着火过程, 重点分析了温度、氧气摩尔分数和孔隙度的变化。结果表明, 泵入 500 s 的 1 000 K 烟气不足以点燃煤层, 1 000 s 的烟气加热时间足以点燃煤层, 该结果在时间上与劳伦斯实验室的点火时间相当。在煤层内表面, 高温主要集中在靠近入口 0~0.6 m 内的煤层。着火前的最高温度低于加热烟气入口温度 1 000 K, 而着火后的最高温度超过 1 000 K, 最高温度约 1 250 K。O₂ 在高温区几乎全部消耗, 而在其他温度较低的区域, 到达煤层内表面的氧气摩尔分数不到 2%。高温区孔隙度迅速增长, 在 1 000 s 时部分煤层孔隙度可达 0.9 左右。在煤层内部, 煤层越厚, 温度上升越低。在 1 000 s 和 2 000 s 时, 7 cm 线上煤层的最高温度仅为 500 K 左右, 远低于相同加热时间下煤层内表面的最高温度。在 2 000 s 的点火过程中, 渗入 7 cm 和 14 cm 煤层中的氧气较少, 内部煤层孔隙度均在 0.4 以下。较低的孔隙度是由较低的温度和较低的氧气摩尔分数共同造成的。对温度、氧气摩尔分数和孔隙度的模拟可为如何促进煤层内部的反应提供参考。

关键词: 地下煤气化; CFD 模拟; 点火; 温度; 氧气; 孔隙度

中图分类号: TD84 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2490-08

CFD simulation on in-situ ignition of UCG in deep coal seam

ZHANG Youjun¹, XIAO Yi², ZHANG Zheng¹, ZHANG Haoyu², HAO Jun¹, LÜ Min², FANG Can², ZOU Renjie^{2,3},
LUO Guangqian^{2,3}, LI Xian², YAO Hong²

(1. Jiangnan Machinery Research Institute Limited Company of China National Petroleum Corporation, Wuhan 430021, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430071, China; 3. Shenzhen Huazhong University of Science and Technology Research Institute, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Underground coal gasification (UCG) as an alternative coal mining technology is attracting much attention. However, due to the high experimental cost of UCG, the evolution mechanism of coal seam should be deeply explored prior to the implement of experiments. By virtue of the great computational power of computers, the computational fluid dynamics (CFD) is able to simulate the production process of UCG at a relatively lower cost. The in-situ ignition and com-

收稿日期: 2023-02-17 修回日期: 2023-03-10 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0199

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发资助项目 (2019E-2504); 有机固体废弃物高效清洁利用关键技术研发资助项目 (JSGG20201102153400001)

作者简介: 张友军 (1971—), 男, 湖北孝感人, 高级工程师, 硕士。E-mail: zhangyujun@cnpc.com.cn

通讯作者: 罗光前 (1976—), 男, 湖北宜昌人, 研究员, 博士。E-mail: Guangqian.luo@mail.hust.edu.cn

引用格式: 张友军, 肖逸, 张正, 等. 深部煤层地下煤气化原位点火的 CFD 模拟[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2490-2497.

ZHANG Youjun, XIAO Yi, ZHANG Zheng, et al. CFD simulation on in-situ ignition of UCG in deep coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2490-2497.



移动阅读

bustion of deep coal seam heated by 1 000 K flue gas is simulated and the changes of temperature, molar O_2 fraction and porosity are analyzed by the CFD software, Fluent, developed by Ansys corporation. It is elucidated that pumping 1 000 K flue gas for 500 s is inadequate for coal seam ignition, while 1 000 s heating has been enough for coal seam ignition. On the internal surface of coal seam, the high temperature is accumulated in the 0–0.6 m coal seam near inlet. The maximum temperature before ignition is below inlet temperature of heating flue gas, 1 000 K, while the maximum temperature after ignition exceeds 1 000 K and reaches up to 1 250 K. Almost all O_2 is consumed in the high-temperature zone, while less than 2% molar O_2 fraction arrives at the internal surface of coal seam in other lower-temperature zones. The porosity rapidly increases in high-temperature zone and at 1000 s the porosity in the part of coal seam reaches up to 0.9. In the interior of coal seam, the thicker the coal seam is, the lower the temperature rises. The maximum temperature on 7 cm line is only 500 K at 1 000 s and 2 000 s, much lower than that on the internal surface of coal seam when it is heated for the same time. During 2 000 s ignition, little O_2 penetrates 7 cm and 14 cm coal seam and the porosities of interior coal seam are all below 0.4. The low porosities are attributed to the low temperature and low molar O_2 fraction. The simulation on temperature, molar O_2 fraction and porosity may provide a reference for how to promote the reaction in the interior of coal seam.

Key words: underground coal gasification; CFD simulation; ignition; temperature; oxygen; porosity

地下煤气化 (UCG) 是一种新型煤炭开采技术。与传统煤矿开采不同, UCG 通过可控燃烧和气化把地下煤炭直接转化为合成气, 同时将煤层合成气抽送至地面^[1-2]。因为该技术不需要矿工前往地下开采煤炭, 在很大程度上降低了传统人工采矿的危险性^[3]。同时, 由于 UCG 技术使埋深 1 000 m 以上煤层的开采成为可能, 可采煤的储量得到了显著扩大, 据统计, 煤储量可增加 70% 左右^[4]。因此, 越来越多的研究人员致力于 UCG 商业化生产的研究。100 多年前, 前苏联和美国首先对浅层煤层进行了多次现场试验, 然后包括中国在内的许多国家都投资了 UCG 的研究^[5-7]。近些年, 较深部煤层也得到了重点关注, 在加拿大天鹅山试验中, 埋深 1 400 m 的煤层被用来进行了 UCG 技术的开发^[8]。秦勇等^[9]针对 UCG 的可行性问题, 指出微断层、煤的黏结性与膨胀性和上覆含水层距离是评定 UCG 地质条件的 3 个关键因素。除现场试验, 计算流体力学 (CFD) 因其成本低、反馈比试验更详细等优点而备受关注, 软件中的多孔介质模型也被多次用于模拟煤层的反应过程, 并取得了良好的成果^[3, 10-16]。PERKINS 等^[13]在 UCG 上进行了二维模拟, 得到了能产生最高热值产品气的最优注氧速率。在 KARIZNOVI 等^[14]通过综合敏感性分析评价了反应动力学和热解过程对 UCG 的影响, 模拟结果与现场数据作对比, 发现 2 者的一致性良好。LUO 等^[15]也用 CFD 软件模拟了 UCG 生产过程中煤层空穴的生长过程, 所用模型的计算结果与实际生产情况高度契合。崔勇等^[16]借助 Fortran 语言编写的 GSF 程序, 对 UCG 生产展开了模拟研究, 重点探究了供气条件对产气质量的影响。

如何确实地、经济地点燃煤层, 是 UCG 首要解决的一个重要问题。化学点火是重要的 UCG 点火方式

之一, 它具有铺设成本低、加热功率高等优势, 在 UCG 生产中广受青睐^[17-18]。化学点火技术, 是将硅烷和易燃的、能量密度高的、易泵入煤层的点火剂依次注入到注入井中加热煤层, 在加拿大天鹅山的试验中丙烷被选作化学点火的主点火剂^[15]。化学点火因其适用性强、稳定性好而成为一种重要的点火方法, 也有大量的论文采用了化学点火技术, 如将硅烷和天然气泵入煤层进行气化前的预热。XIN L 等^[18]在实验室将加热的氧气泵入煤块用于引燃煤层, 形成了一个梨状的燃烧空洞。这是用热氧气来模拟加热煤层的过程, 是模拟化学点火的一种方法。田廷泉等^[19]利用 CFD 软件对庚烷在狭长通道内的气液两相流点火展开了模拟研究, 该研究与地下煤点火时的狭长水平井类似, 可作为地下煤气化技术探索的参考。

然而, 尽管已经有了许多化学点火研究, 全面描述煤层各种参数变化的报告却鲜有报道。笔者建立了包括煤层和水平井在内的三维 CFD 模型, 分析了 UCG 的点火过程, 着重讨论了温度、氧气摩尔分数和孔隙度的变化过程及 3 者间的相互关系。

1 物理模型

1.1 模型的几何尺寸和网格划分

利用 Ansys 公司开发的 SpaceClaim Direct Modelling (SCDM) 建立一个长 2 m、直径 0.9 m 水平放置的圆柱, 比例尺为 1 : 1, 如图 1(a) 所示。在筒内设置直径为 15.24 cm 的偏心水平井, 用于加热烟气的流动。考虑到水平井入口面后方会发生煤层反作用, 因此加热烟气的入口面不在底面上, 而是在与底面平行的内平面上, 内平面与较近的底面间的距离为 40 cm。在工业生产中, 在注入管周围设置一个环空, 其作用是

泵入少量氮气,防止回火损坏注入管。因此,注入井由 2 根直径分别为 11.43、15.24 cm 的同心管组成。为简化计算,将环空设为壁面,将直径为 11.43 cm 的内圆设为入口面。圆柱体沿垂直方向切割,取一半进行计算。如图 1(b) 所示,在对称平面中选取 3 条采样平行线导出煤层温度、氧气摩尔分数和孔隙度数据。这些平行线位于水平井外表面上或外表面的正上方,管线与水平井外表面上的距离分别为 0、7 和 14 cm,这些线分别被标记为 0、7 和 14 cm 线。0 代表水平

井表面的煤层反应情况,而 7 和 14 代表煤层内部反应情况。

基于 Fluent meshing 网格划分工具,把整个计算区域划分为 699 430 个网格,网格的最小正交质量为 0.228(> 0.2),光顺后最小正交质量为 0.656,满足 CFD 计算要求。此外,由于水平井气体成分和煤层固体成分的物性特征差异性较大,边界层不仅设置在煤层出口面上,在水平井与煤层的界面上也设置有边界层网格,以提高计算精度。

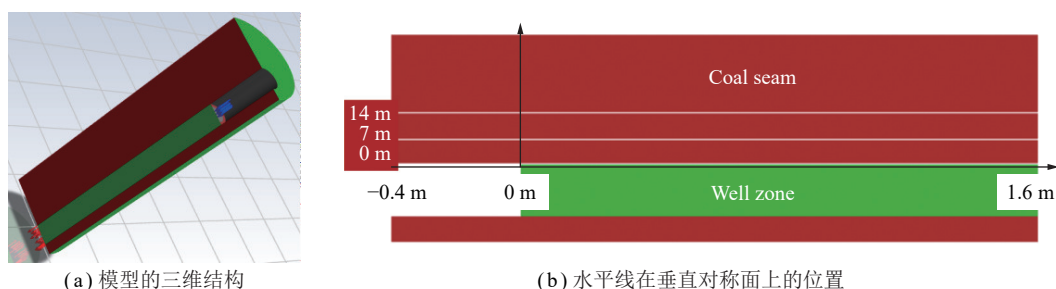


图 1 物理模型的几何尺寸

Fig.1 Geometry of physical model

1.2 控制方程

为模拟气体在固相煤层中的流动,将煤层设为多孔介质区域。加载多孔介质模型的控制方程见表 1。

在表 1 四个控制方程的基础上,由于气体流动的湍流程度较大,湍流模型选取标准 $k-\varepsilon$ 模型。由于 UCG 涉及温度较高、辐射换热较强的燃烧反应,也为模型附加了辐射模型 (P-1)。该湍流/辐射模型在 UCG 模拟计算上既保证了计算精度,也简化了计算量^[8]。

气体的比热容选用 piecewise-polynomial 模型。

同时,针对非均相反应,额外定义了 3 个用户自定义标量方程,如式 (1) 所示,其中每个标量 φ_k 的方程用于跟踪煤层中各单元的固相反应。

$$\frac{\partial(\rho_g \varphi_k)}{\partial t} = S_{\varphi_k}, k = 0, 1, 2 \quad (1)$$

式中, φ_0 、 φ_1 和 φ_2 分别为煤中水分、挥发分和固定碳; ρ_g 为气体密度; S_{φ_k} 为用户自定义方程的源项。

表 1 多孔介质模型的控制方程

Table 1 Governing equations of porous model

控制方程	表达式
连续性方程	$\frac{\partial(\rho_g)}{\partial t} + \nabla(\rho_g \mathbf{v}) = S_g$
动量方程	$\frac{\partial(\rho_g \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho_g \mathbf{v} \mathbf{v}) = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p - \left(\frac{\mu \mathbf{v}}{K} + \beta \rho_g \mathbf{v} \mathbf{v} \right)$
能量方程	$\frac{\partial(\rho_g c_{pg} T + (1 - \varphi) \rho_s c_{ps} T)}{\partial t} + \nabla(\rho_g \mathbf{v} c_{pg} T) = \nabla(k_{eff} \nabla T)_g + S_T$
组分输运方程	$\frac{\partial(\rho_g Y_{ig})}{\partial t} + \nabla(\rho_g \mathbf{v} Y_{ig}) = \nabla(D_{ig} \nabla Y_{ig}) + S_{Y_{ig}}$

注: φ 为孔隙度; ρ_g 、 ρ_s 分别为气体密度、固体密度; \mathbf{v} 为速度; μ 为动力黏度; $\mu \mathbf{v}/K$ 和 $\beta \rho_g |\mathbf{v}| \mathbf{v}$ 分别为动量方程源项的黏性项和惯性项, 其中, K 为渗透率, β 为惯性阻力因子; c_{pg} 、 c_{ps} 分别为气体和固体的定压比热容; T 为温度; k_{eff} 为多孔介质的有效传热系数; Y_{ig} 为 i 组分的质量分数; D_{ig} 为 i 组分的质量扩散系数; S_g 、 S_T 、 $S_{Y_{ig}}$ 分别为质量源项、能量源项、组分质量源项。

均相和非均相反应的反应速率均由 Arrhenius 公式描述。均相反应包括 CO 燃烧、H₂ 燃烧、CH₄ 燃烧和 CO-H₂O 重整。非均相反应包括煤干燥、煤热解、固定碳燃烧、C-CO₂ 气化和 C-H₂O 气化 5 种非均相反应。所有 Arrhenius 公式都列在表 2 中, 表 2 中化学反应的计算结果直接或间接作为表 1 中连续性方

程、能量方程、组分输运方程以及式 (1) 中用户自定义标量方程的源项, 分别对应 S_g 、 S_T 、 $S_{Y_{ig}}$ 和 S_{φ_k} 。

1.3 模型的初始条件、边界条件、输入条件和求解方法

模拟选择的煤层位于埋深 1 000 m 的褐煤煤层。根据工业分析, 煤层的收到基水分、挥发分、固定碳和

表2 均相和非均相反应的 Arrhenius 公式
Table 2 Arrhenius formulas of homogeneous and heterogeneous reactions

反应	公式	A	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	n	文献
CO 燃烧	$R=k[\text{CO}][\text{O}_2]^{0.25}$	2.24×10^{12}	107		CFD 数据库
H ₂ 燃烧	$R=k[\text{H}_2][\text{O}_2]$	9.87×10^8	31		
CH ₄ 燃烧	$R=k[\text{CH}_4]^{0.2}[\text{O}_2]^{1.3}$	2.12×10^{11}	203		
CO-H ₂ O 重整	$R=k[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]$	2.78×10^6	12.5		[20]
煤干燥	$-\frac{\text{d}M}{\text{d}t} = k(M^* - M)$	51 000	78		[21]
煤热解	$-\frac{\text{d}V}{\text{d}t} = k(V^* - V)$	51 000	78		
固定碳燃烧		307 000	100.4	1	[22]
C-CO ₂ 气化	$-\frac{\text{dFC}}{\text{d}t} = k(\text{FC}^* - \text{FC})\left(\frac{P_i}{P^0}\right)^n$	3	211	0.5	[23]
C-H ₂ O 气化		30	231	0.5	[24]

注: R 为反应速率; $[\]$ 为对应气体的摩尔浓度; M 、 V 、 FC 分别为煤水分、挥发分和固定碳含量; M^* 、 V^* 、 FC^* 分别为原煤水分、挥发性物质和固定碳含量; P_i 为 i 组分的分压; P^0 为环境压力; k 为反应速率常数, 由 $k=AP^n \exp[-E/(RT)]$ 计算, 其中, A 为指前因子, E 为活化能, n 为压力修正指数。

灰分分别为 8.5%、32.2%、53.8% 和 5.5%。煤的初始孔隙度设定为 0.05, 热导率和热容均为温度的函数^[3]。计算域的环境压力和初始温度分别设置为 10 132 500 Pa 和 400 K, 与地下 1 000 m 的高围压和高温环境相对应, 进而, 模拟的边界条件设定为 400 K 的静止无滑移等温壁面, 壁面上无物质交换。初始气氛设置为纯氮气。入口边界条件设为速度入口, 出口设为压力出口。高温烟气在进气处进气, 用于加热煤层, 烟气温度为 1 000 K, 由 7.5% 的 O₂、10% 的 H₂O、10% 的 CO₂ 和 72.5% 的 N₂ 组成。烟气流速为 0.1 m/s, 方向垂直于入口表面。入口温度的选取参考了 MESUT 等^[25]的研究方法。在本文的研究中, 煤层总共被加热了 2 000 s, 根据前人在 UCG 模拟领域的研究经验, 时间步长设为 2.5 s^[1, 26]。本模型采用 Fluent 软件求解, 算法为 SIMPLE 算法。

2 结果与讨论

2.1 水平井表面上温度、氧气摩尔分数和孔隙度随加热时间和井长的变化

加热 500~2 000 s 后, 0 cm 线上的温度曲线如图 2(a) 所示, 氧气摩尔分数曲线如图 2(b) 所示, 孔隙度曲线如图 2(c) 所示。结果表明: 加热 500 s 后, 注入管入口后方 (-0.4~0 m 段) 的温度基本保持初始温度 400 K 不变, 而位于水平井表面 0~1.6 m 段的煤层温度明显升高, 且煤层内表面的温升随水平井的延长而减少。0 cm 线上的煤在 0~0.6 m 处的加热温度显著高于 0.6~1.6 m 处的温度, 这是因为水平井入口供给的热烟气被入口附近的煤层冷却。0 cm 线的最高

温度随加热时间的变化而变化。在 500 s 时, 0 cm 线的最高温度达到了约 800 K, 低于烟气的加热温度 1 000 K。此时, 温度梯度的方向由烟气指向煤层。同时, 氧与挥发分迅速发生反应, 在 0~0.3 m 的最高温度区内, 煤层中几乎没有氧气残留。在氧气不足的情况下, 煤的燃烧受到抑制, 进而表现为 0 cm 线上煤孔隙度小于 0.45, 即煤层中的固定碳几乎没有被消耗。总的来说, 通过 500 s 的加热, 引入的外部能量对于煤层点火是不足的, 需要进一步加热。

继续加热至 1 000 s, 0 cm 线上的最高温度为 1 250 K 左右, 超过 1 000 K, 说明煤层产生的热量已经超过了煤干燥和气化的消耗量, 煤层被点燃了。该模拟得到的点燃时间与美国劳伦斯实验室的实地试验中化学点火的点燃时间是基本吻合的^[17]。高温集中在水平井入口附近 0~0.2 m 的区域内。在 0~0.2 m 以外的区域, 温度急剧下降, 最终稳定在 600 K 左右。1 000 s 时更高的温度增强了模型包含的所有反应。由于大部分氧气被煤层产生的可燃气体和固定碳所消耗, 在靠近水平井入口的煤层表面上, 氧气的摩尔分数几乎为 0。此外, 7.5% 的 O₂ 似乎略多, 在井长 0.7 m 左右的位置, 到达煤层表面 O₂ 的摩尔分数高达 1.5%, 表明 O₂ 在水平井轴向方向上传质较快, 在径向方向上的传质受到阻碍。煤的消耗也很快, 部分煤层内表面几乎完全燃尽。水平井入口附近 0 cm 线上, 孔隙度在井长 0.07 m 的位置达到 0.86, 基本达到煤层孔隙度的最大值。

继续加热。在 2 000 s 时, 高温区域继续扩大, 0 cm 线上的温度曲线在 0.07~0.21 m 内达到了最高温, 约

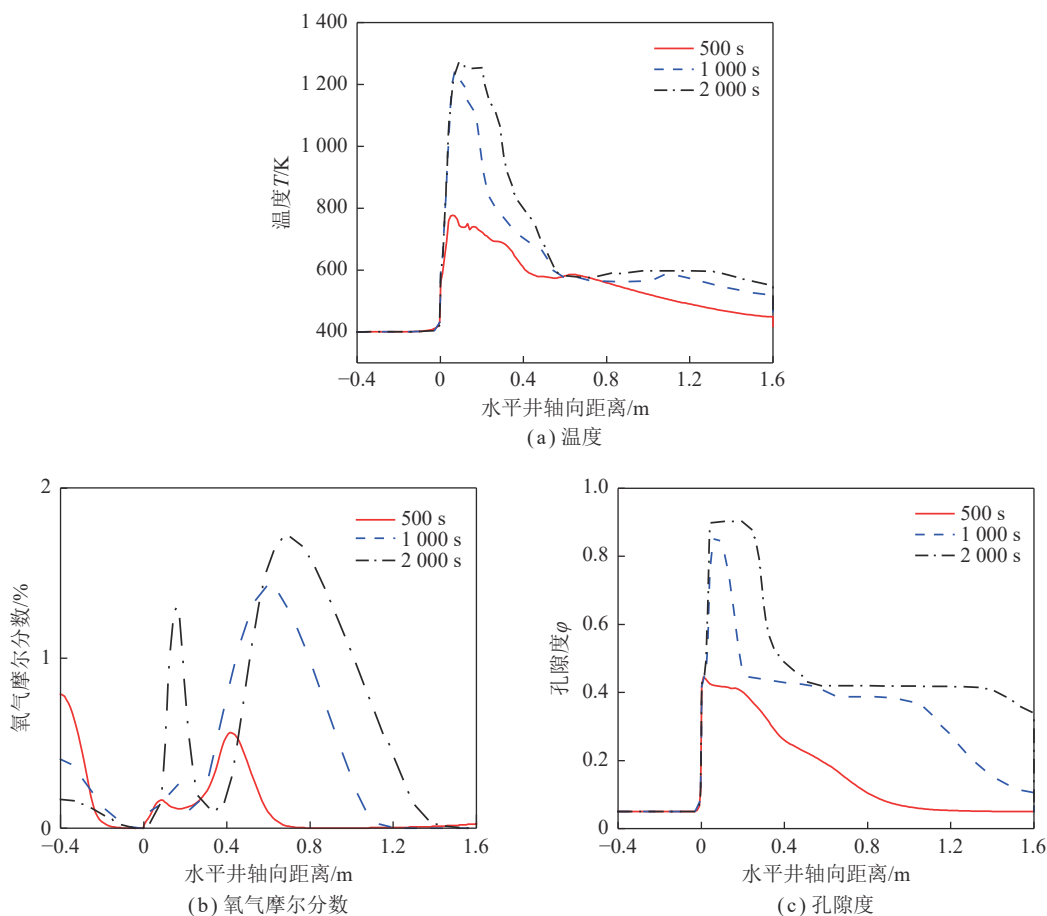


图2 加热 500、1 000、2 000 s 后水平井表面上温度、氧气摩尔分数和孔隙度的分布

Fig.2 Temperature, O_2 molar fraction and porosity on the surface of horizontal well after 500, 1 000 and 2 000 s heating

为 1 250 K, 且温度曲线几乎为水平发展。氧气摩尔分数方面, 不同于 500 s 和 1 000 s 的情况, 在靠近水平井入口的 0 cm 线上首先出现了一个氧气摩尔分数的峰值, 这是由于该区域热解气和固定碳的耗竭所致。这一点可以由孔隙度的分布佐证。与 1 000 s 时一样, 2 000 s 时氧气摩尔分数的分布曲线上存在一个最大值接近 2% 的峰值。0 cm 线上煤完全耗完, 孔隙度的最大值约为 0.9。

2.2 7 cm 线上温度、氧气摩尔分数和孔隙度随加热时间和井长的变化

进一步地, 还考虑了煤层内部的参数变化, 在距煤层内表面上方 7 cm 处建立了一条线来收集数据。图 3(a)~(c) 分别绘制了 7 cm 线上的温度、氧气摩尔分数和孔隙度。煤的热阻比较大, 煤层表面的温度未能有效地传递到煤层内部。在 500、1 000 和 2 000 s 时, 井长 0~0.4 m 内 7 cm 线上所有网格的最高温度分别只有 514、500 和 494 K。随着煤层的加热, 7 cm 线上的 0~0.4 m 区域温度有所降低, 这是因为, 在这段时间内, 7 cm 线上煤层的干燥反应尚未完成, 煤层在干燥消耗热量, 且热量消耗速率大于被加热速率。同时, 煤层升温的另一个热量来源——氧化反应, 也

受到了抑制, 即热解气的燃烧反应减缓了。这是由缺氧环境导致的。在 500 和 1 000 s 时, 7 cm 线上的氧气摩尔分数显著低于 0 cm 线上的氧气摩尔分数。2 000 s 后, 0 cm 线和 7 cm 线上的氧气摩尔分数的差值说明了煤层中气体的流动扩散阻力也是不可忽视的, 这与刘振宇^[27]认为地下煤气化低效的原因是煤层中缓慢的传质过程这一观点相对应。此外, 虽然 7 cm 线上的氧气摩尔分数较低, 但在 -0.4~0 m 和 0.8~1.6 m 内却存在少量 O_2 , 最大甚至可达 0.75%。这些 O_2 来自于着火前扩散到煤层内部的 O_2 残余。孔隙度方面, 低温导致 7 cm 线煤层干燥速率和热解速率较低。在 500、1 000 和 2 000 s, 7 cm 线煤层最大孔隙度分别为 0.13、0.18 和 0.24。此外, 由于煤层热解不完全, 氧气摩尔分数接近 0, 7 cm 线上的煤层在 2 000 s 时未发生消耗固定碳的相关反应。

2.3 14 cm 线上温度、氧气摩尔分数和孔隙度随加热时间和井长的变化

最后, 以 14 cm 线为例对内部煤进行进一步分析, 14 cm 线上的温度、氧气摩尔分数和孔隙度如图 4 所示。在图 4(a) 中, 0~2 000 s, 14 cm 线上的温度与 7 cm 线上的温度相比没有明显的增加。14 cm 线的最高温

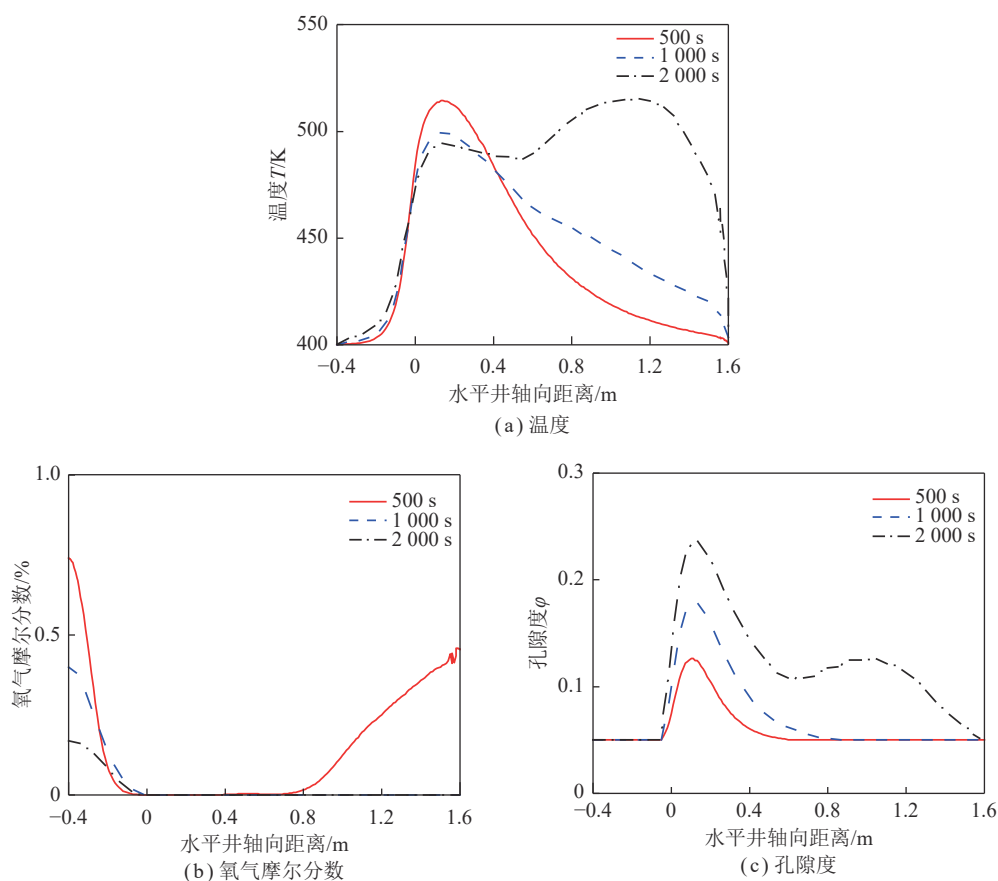


图 3 加热 500、1 000、2 000 s 后 7 cm 线上温度、氧气摩尔分数和孔隙度的分布

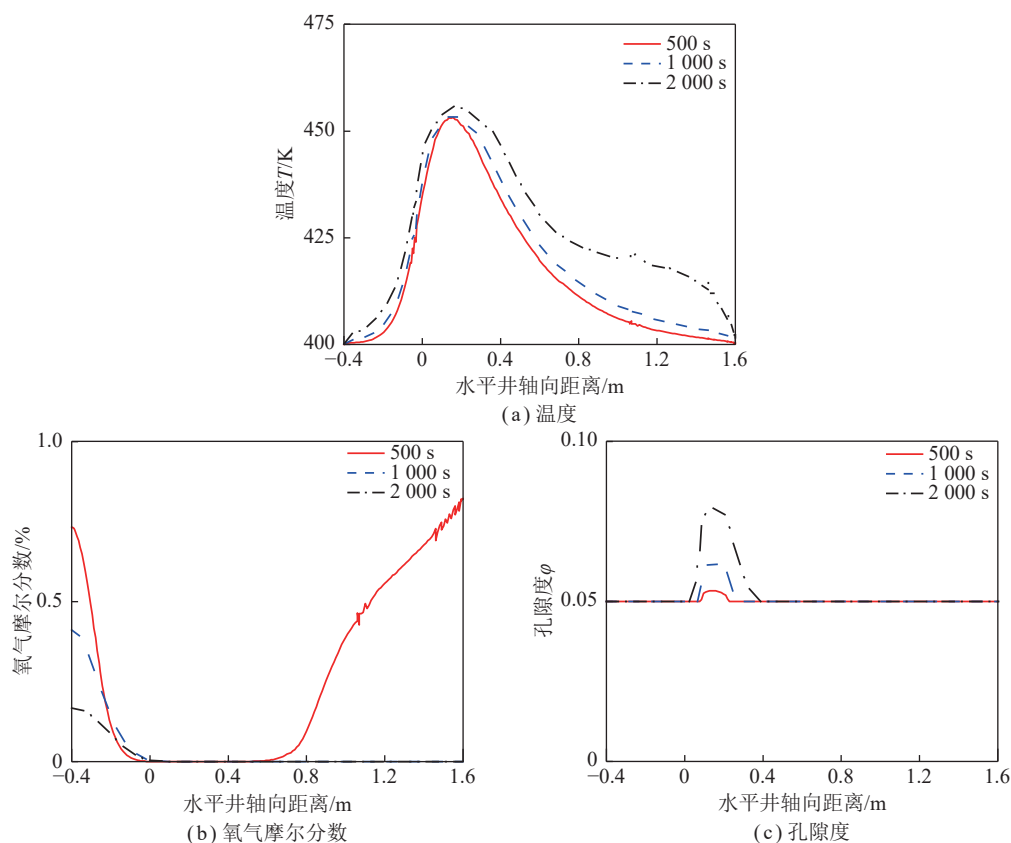
Fig.3 Temperature, O_2 molar fraction and porosity on 7 cm line after 500, 1 000 and 2 000 s heating

图 4 加热 500、1 000、2 000 s 后 14 cm 线上温度、氧气摩尔分数和孔隙度的分布

Fig.4 Temperature, O_2 molar fraction and porosity on 14 cm line after 500, 1 000 and 2 000 s heating

度甚至低于 500 K。至于 O_2 , 14 cm 处的变化趋势与 7 cm 处相似。但 14 cm 线上 $-0.4\sim 0$ m 和 $0.8\sim 1.6$ m 内的氧气摩尔分数均高于 7 cm 线。这也与煤层着火前扩散产生的氧残留有关。另外,越是深入煤层,煤层温度上升越低。较低的温度限制了反应的速率,其中也包括了消耗氧气的反应。在 $400\sim 500$ K 的 14 cm 线上,氧气的消耗量小于 $500\sim 600$ K 的 7 cm 线,因此,虽然 14 cm 线与水平井表面的距离较远,氧气残留量却较多。同时,14 cm 线较低的温度也抑制了煤层的干燥和热解,导致 14 cm 线孔隙度的增幅不大,最大增幅不及 0.05。

3 结 论

(1) 使用 1 000 K 的热烟气点燃埋深 1 000 m 的褐煤时,500 s 的加热时间不足以点燃煤层,1 000 s 的烟气加热时间足以点燃煤层。

(2) 在水平井表面上,入口附近 $0\sim 0.6$ m 内煤层为高温区。着火后最高温度达 1 250 K。该区域内 O_2 几乎全部消耗。而在其他温度较低的区域,到达煤层内表面的氧气摩尔分数小于 2%。高温区煤层的孔隙度增长较快,在 1 000 s 时最大孔隙度可达 0.9 左右。

(3) 在煤层内部,随着与水平井表面距离的增大,温度上升逐渐变慢。在 1 000 和 2 000 s,7 cm 线的最高温度仅为 500 和 494 K,远低于同一时间段煤层内表面的最高温度。在 2 000 s 的点火过程中,7 cm 和 14 cm 处,氧气浓度较低,内部煤层孔隙度均在 0.4 以下。较低的孔隙度是由低温和较低的氧气摩尔分数导致的。

本文对深部煤层 UCG 点火过程的模拟分析,证明了深部煤层可以实现原位点燃,为深部煤层 UCG 的探索提供了理论基础,对未来我国深部煤层的开发利用具有重要借鉴意义,同时,本文探究了煤层原位点火过程中煤层内部温度、氧气摩尔分数、孔隙度的变化过程及 3 者间的关联,研究发现煤层中的传热传质速率较慢的现象。

参考文献(References):

- [1] KHADSE A N, QAYYUMI M, MAHAJANI S M, et al. Reactor model for the underground coal gasification(UCG) channel[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2006, 4: 1–27.
- [2] PERKINS G. Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 234–274.
- [3] SHIRAZI A S. CFD simulation of underground coal gasification [D]. Edmonton: University of Alberta, 2012.
- [4] BIALECKA B. Estimation of coal reserves for UCG in the upper silesian coal Basin, Poland[J]. *Natural Resources Research*, 2008, 17(1): 21–28.
- [5] KHAN M M, MMBAGA J P, SHIRAZI A S, et al. Modelling underground coal gasification—A review[J]. *Energies*, 2015, 8(11): 12603–12668.
- [6] HILL R W, THORSNESS C B. Summary report on large-block experiments in underground coal gasification, Tono Basin, Washington. Volume 1. Experimental description and data analysis [R]. Berkeley: University of California 1982.
- [7] BEATH A, CRAIG S, LITTLEBOY A, et al. Underground coal gasification: Evaluating environmental barriers [R]. Queensland: CSIRO Exploration and Mining, 2004.
- [8] PERKINS G. Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 158–187.
- [9] 秦勇, 易同生, 汪凌霞, 等. 面向项目风险控制的煤炭地下气化地质条件分析 [J]. *煤炭学报* 2023, 48(1): 290–306.
QIN Yong, YI Tongsheng, WANG Lingxia, et al. Analysis of geological conditions for risk control of UCG project [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 290–306.
- [10] 崔勇, 梁杰, 王旋. 基于非稳态渗流传递的煤炭地下气化数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S1): 231–238.
CUI Yong, LIANG Jie, WANG Xuan. Numerical simulation on UCG process based on non-steady flow in porous media transport [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014(S1), 39: 231–238.
- [11] PAPANICOLAOU E, BELESSIOTIS V. Transient natural convection in a cylindrical enclosure at high Rayleigh[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(7): 1425–1444.
- [12] NITHIARASU P, SEETHARAMU K N, SUNDARARAJAN T. Natural convective heat transfer in a fluid saturated variable porosity medium[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(16): 3955–3967.
- [13] BEJAN A, KHAIR K R. Heat and mass transfer by natural convection in a porous medium[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1985, 28(5): 909–918.
- [14] PERKINS G, SAHAJWALLA V. Modelling of heat and mass transport phenomena and chemical reaction in underground coal gasification[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, 85(A3): 329–343.
- [15] KARIZNOVI M, NOUROZIEH H, ABEDI J, et al. Simulation study and kinetic parameter estimation of underground coal gasification in Alberta reservoirs[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, 91(3): 464–476.
- [16] LUO Y, COERTZEN M, DUMBLE S. Comparison of UCG cavity growth with CFD model predictions[C]//Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. 2009: 1–5.
- [17] HILL R W, THORSNESS C B. Summary report on large-block experiments in underground coal gasification, Tono Basin, Washington. Volume 1. Experimental description and data analysis [R]. Berkeley: University of California, 1982.
- [18] XIN L, LI J, XIE J, et al. Simulation of cavity extension formation in the early ignition stage based on a coal block gasification experi-

- ment[J]. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 2020, 142(6): 1–7.
- [19] 田廷泉, 王海鸥, 罗坤, 等. 气液两相正庚烷射流燃烧的直接数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(8): 2242–2248.
- TIAN Tingquan, WANG Haiou, LUO Kun, et al. Direct numerical simulation of gas-liquid two-phase n-heptane jet combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(8): 2242–2248.
- [20] BIBA V, MACÁK J, KLOSE E, et al. Mathematical model for the gasification of coal under pressure[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1978, 17(1): 92–98.
- [21] SYAMLAL M, BISSETT L A. METC gasifier advanced simulation(MGAS) model [R]. Morgantown: USDOE Morgantown Energy Technology Center (METC), 1992 .
- [22] DI Blasi C, BUONANNO F, BRANCA C. Reactivities of some biomass chars in air[J]. *Carbon*, 1999, 37(8): 1227–1238.
- [23] YE D P, AGNEW J B, ZHANG D K. Gasification of a South Australian low-rank coal with carbon dioxide and steam: Kinetics and reactivity studies[J]. *Fuel*, 1998, 77(11): 1209–1219.
- [24] ROBERTS D G, HARRIS D J. Char gasification with O_2 , CO_2 , and H_2O : Effects of pressure on intrinsic reaction kinetics[J]. *Energy and Fuels*, 2000, 14(2): 483–489.
- [25] GÜR M, CANBAZ E D. Analysis of syngas production and reaction zones in hydrogen oriented underground coal gasification[J]. *Fuel*, 2020, 269: 117331.
- [26] SAMDANI G, AGHALAYAM P, GANESH A, et al. A process model for underground coal gasification – Part-I: Cavity growth[J]. *Fuel*, 2016, 181: 690–703.
- [27] 刘振宇. 煤地下气化低效的化学反应工程根源: 滞留层及通道中的传质与反应 [J]. *化工学报* 2022, 73(8): 3299–3306.
- LIU Zhenyu. Origin of low productivity of underground coal gasification: Diffusion and reaction in stagnant boundary layer and gasification tunnel[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(8): 3299–3306.