

中文引用格式:白刚,王学鹏,苏俊,等. 不同注气压力下燃煤电厂烟气驱替煤层瓦斯研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 65-71.

英文引用格式:BAI Gang, WANG Xuepeng, SU Jun, et al. Study on coal bed gas displacement by flue gas in coal-fired power plants under different gas injection factors [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 65-71.

不同注气压力下燃煤电厂烟气驱替煤层瓦斯研究^{*}

白刚^{1,2}教授, 王学鹏^{1,2}, 苏俊^{1,2}, 刘正东³副教授,
李金雨¹副教授, 范超军⁴教授

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125000; 2 辽宁工程技术大学
矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125000; 3 东北大学 资源
与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 4 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.2963

基金项目: 国家自然科学基金资助(52274204, 52104195, 52074147); 中国科协青年人才托举工程项目
(2022QNRC001)。

【摘要】 为提高瓦斯抽采效率, 采用数值模拟方法, 分析不同注气压力下气体体积分数、气体突破时间、煤层渗透率、CH₄ 抽采速率及抽采量变化特征。结果表明: 注烟气后 CH₄ 体积分数呈下降趋势, CO₂、N₂、O₂ 体积分数呈上升趋势, 注气压力升高会缩短烟气各气体的突破时间、降低煤层渗透率以及提高瓦斯抽采量。在抽采 180 天时, 注气压力由 0.5 MPa 增加至 2.5 MPa, 煤层渗透率由 $8.7227 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 降低至 $8.7115 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 、抽采量由 449.01 m³ 增加至 715.30 m³。瓦斯抽采速率呈现上升-下降-上升-下降的变化特征, 从注气压力对抽采的影响上看, 注气压力对于前 2 个阶段抽采影响较小。

【关键词】 注气压力; 电厂烟气; 煤层瓦斯; 瓦斯抽采; 突破时间; 煤层渗透率

Study on coal bed gas displacement by flue gas in coal-fired power plants under different gas injection factors

BAI Gang^{1,2}, WANG Xuepeng^{1,2}, SU Jun^{1,2}, LIU Zhengdong³,
LI Jinyu¹, FAN Chaojun⁴

(1 College of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125000, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters & Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125000, China; 3 School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;
4 College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of gas extraction, numerical simulation methods were employed to analyze the characteristics of changes in gas volume fraction, gas breakthrough time, coal permeability, CH₄ extraction rate, and extraction quantity under different gas injection pressures. The results show that after flue gas injection, the volume fraction of CH₄ shows a downward trend, while the

volume fractions of CO_2 , N_2 and O_2 show an upward trend. The increase in injection pressure will shorten the breakthrough time of each gas in the flue gas, reduce the permeability of the coal seam and increase the gas extraction volume. At 180 days of extraction, the gas injection pressure increased from 0.5 MPa to 2.5 MPa, the coal seam permeability decreased from $8.7227 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ to $8.7115 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, and the extraction volume increased from 449.01 m^3 to 715.30 m^3 . The gas drainage rate shows the variation characteristics of rising – falling – rising – falling. From the perspective of the influence of gas injection pressure on drainage, the gas injection pressure has a relatively small impact on the drainage in the first two stages.

Keywords: injection pressure; power plant flue gas; CH_4 extraction; coalbed methane; gas pressure; gas drainage volume

0 引言

煤层 CH_4 是非常规天然气资源,约占天然气产量的 6%~9%。煤层 CH_4 是高效的清洁能源,也是温室气体。瓦斯爆炸、突出等灾害仍阻碍着矿井生产。我国煤层渗透率在 $2 \times 10^{-18} \sim 16.17 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 渗透率小于 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 的煤层占已探明煤炭资源总量的 72%^[1-3]。我国大部分煤矿的主采煤层是低透气性煤层,提高瓦斯抽采效率是迫切需要解决的难题。此外,煤炭仍将占据中国电力能源消费的主体地位^[4],截至 2023 年年底,燃煤电厂 CO_2 排放约占全国总排放量的 50%,是我国最大的 CO_2 排放单一来源。对电厂烟气的捕集、回收、利用可以有效减少温室气体的排放^[5-7]。

注气驱替 CH_4 抽采是有效的增产方法。众多学者对 CO_2 驱替煤层 CH_4 展开研究,YU Wu^[8]、DUTKA^[9]等通过物理试验得出注 CO_2 可以提高 CH_4 产出率。在数值模拟方面,FANG Huihuang 等^[10]建立应力场与渗流场耦合模型,发现注入压力提高引起的有效应力和煤体变形会影响煤层的渗透率。FAN Yongpeng 等^[11]建立 CO_2 驱替煤层瓦斯热-流-固耦合模型,发现 CO_2 储存速率和 CH_4 产量均随注入压力的增加而增加。上述学者通过 CO_2 促抽煤层 CH_4 的研究发现,煤层注 CO_2 后会造成煤层渗透率的大幅下降进而限制 CH_4 抽采。故有学者开始提出煤层注 N_2/CO_2 混合气体促抽煤层 CH_4 。REZNIK^[12]、JESSEN^[13]等通过不同气体组分配比的 N_2/CO_2 驱替煤体 CH_4 试验得出,注气可以提高 CH_4 采收率,且 CO_2 大于 N_2 的突破时间。AKASH 等^[14]通过煤层注单一/烟气驱替煤层 CH_4 模拟发现,相较于纯 CO_2 注入,加入 N_2 后可以明显减缓渗透率的下降趋势。FAN Nan 等^[15]通过煤层注 $\text{N}_2/$

CO_2 混合气驱替煤层 CH_4 模拟,确定注混合气体驱替的最佳配比为 30% CO_2 -70% N_2 。ZHOU Lijun 等^[16]建立注 N_2/CO_2 驱替煤层 CH_4 热-流-固耦合模型,通过不同注气工况对比发现,注入压力与 CH_4 速率同样呈正比关系。以上研究大多针对的是 N_2 、 CO_2 及二者混合气体注入驱替煤层 CH_4 研究以及注气压力的影响效应。目前对于(含 O_2)电厂烟气注入煤层的注气压力对抽采的影响效应研究还较少。

故将针对不同注气压力下煤层注电厂烟气驱替 CH_4 展开数值模拟研究,分析不同注气压力对煤层气体运移、储层渗透率、 CH_4 抽采量的影响,以期为后续注烟气促抽煤层 CH_4 工程提供技术指导。

1 注烟气驱替煤层瓦斯数学模型

1.1 注烟气驱替煤层瓦基本假设

注烟气 CH_4 抽采数学模型作出以下假设^[17-18]。

1) 煤层气体运移情况如图 1 所示。首先,基质中 CH_4 分为游离态和吸附态,吸附态瓦斯满足朗格缪尔(Langmuir)吸附平衡方程,其中吸附态 CH_4 从基质解吸;其次,在浓度梯度驱动下瓦斯从基质扩散至裂隙,满足菲克(Fick)扩散定律;最后,在压力梯度作用下 CH_4 从裂隙渗流到抽采钻孔中,满足达西(Darcy)定律。

2) 煤是孔隙-裂隙双重结构,单向渗透率的介质。

3) 煤层地下水仅在裂隙中赋存。

4) 煤层中所有气体均按照理想气体考虑。

5) 煤体与气体不发生化学反应, O_2 在煤层中仅发生物理吸附,不涉及化学吸附。

1.2 注烟气驱替煤层瓦斯数学控制方程

数值模拟所用的基质气体运移、裂隙气体运移、

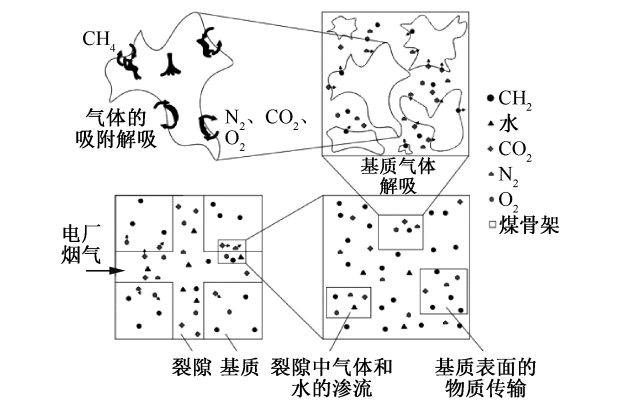


图 1 气体转移机制

Fig. 1 Gas migration mechanism diagram

裂隙中水运移、温度场、固体力学场具体控制方程见参考文献[19]。

1.3 注烟气驱替煤层瓦斯多场耦合关系

O₂、N₂、CH₄、CO₂ 在煤层中的运移受到地下水流场、温度场和煤体变形场之间的耦合影响。裂隙中气体与水、基质与裂隙之间的质量交换均满足质量守恒定律。竞争吸附、气体解吸-扩散和气-水两相流动不仅受到裂隙中水和气体、基质气体之间的影响,温度和煤体变形也会产生影响。基质气体运移场、裂隙气-水运移场、温度场、固体变形场耦合关系如图 2 所示。

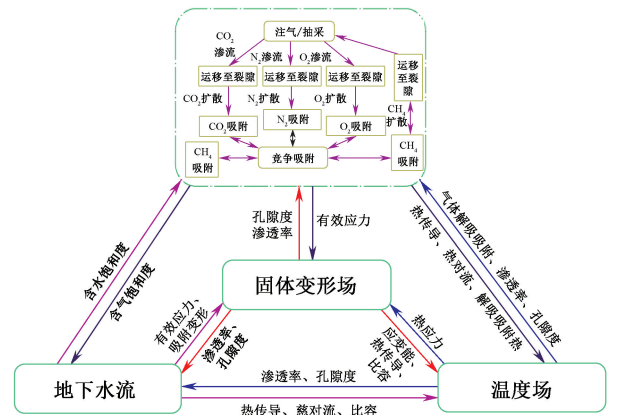


图 2 多场关系耦合

Fig. 2 Multi-field relationship coupling

1.4 注烟气驱替煤层瓦斯几何模型与边界条件

1.4.1 注烟气驱替煤层瓦斯几何模型

以某煤矿 2302 运输巷为研究背景,经测定 3 号煤层瓦斯压力为 0.45 MPa,煤层瓦斯含量为 9.282 m³/t,煤层厚度平均 6 m,煤层近水平。根据现场实际情况,模拟几何模型尺寸设置为 16×6 m,注/抽孔直径均为 94 mm,孔间距为 2 m,初始水饱和

度为 0.82。将几何及数学模型嵌入模拟软件 (Comsol) 进行计算,几何模型如图 3 所示。

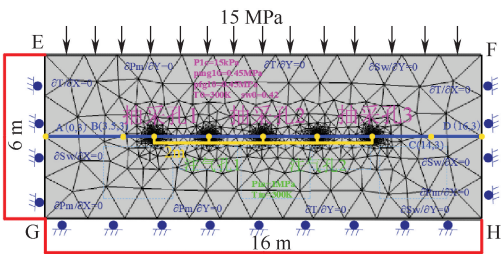


图 3 几何建模

Fig. 3 Geometric model diagram

1.4.2 注烟气驱替煤层瓦斯数学模型验证

在某煤矿 2302 辅助运输巷进行了注气促抽瓦斯的现场试验。每 2 天记录 1 次纯 CH₄ 提取率,共计 180 天,如图 4 所示。由图 4 可知:数值模拟与现场测定抽采速率平均误差较小,与现场试验基本吻合。因此,数学模型及几何模型可以模拟煤层注烟气促进瓦斯抽采过程。

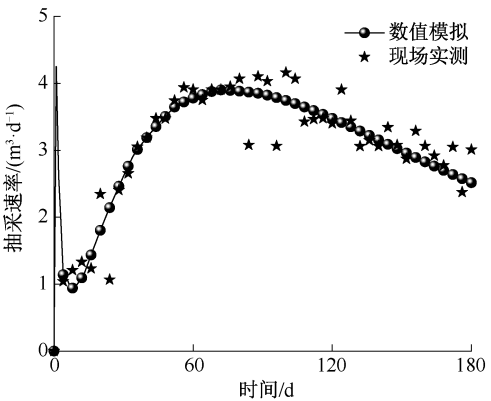


图 4 现场与模拟抽采量对比

Fig. 4 Comparison between simulated extraction and field extraction

1.4.3 注烟气驱替煤层瓦斯数学模型验证

表 1 为模拟所用边界条件。

表 1 边界条件

Table 1 Table of boundary conditions

条件	固体变形	流体边界	温度边界
边界 EF	15 MPa	零通量	零通量
边界 EG	辊支撑	零通量	零通量
边界 FH	辊支撑	零通量	零通量
边界 GH	固定约束	零通量	零通量
抽采孔	自由边界	86kPa	自由边界
注气孔	自由边界	狄式条件	狄式条件

1.4.4 注烟气驱替煤层瓦斯模拟工况

数值模拟工况见表 2。

表 2 模拟工况

Table 2 Simulated working conditions

组	注气压力/MPa	注气温度/K
1	0.5	300
2	1.0	300
3	1.5	300
4	2.0	300
5	2.5	300

2 注烟气驱替煤层瓦斯结果分析

2.1 气体体积分数与突破时间

气体突破时间与体积分数是评价气体驱替能力的 2 个主要指标。图 5 为电厂烟气 B 点监测到的电厂烟气中各组分气体 (N_2 、 CO_2 、 O_2) 及 CH_4 体积分数随注入时间变化特征 (以 0.5、2.5 MPa 为例), 由图 5 可知: 烟气注入煤层后的 CH_4 气体体积分数呈下降趋势, 相反的, 电厂烟气中 CO_2 、 N_2 、 O_2 气体体积分数呈上升趋势。注气初期, 监测点 B 的 CH_4 体积分数接近 100%, 无电厂烟气, 电厂烟气表现出明显的滞后现象。这段滞后时间称为突破时间。

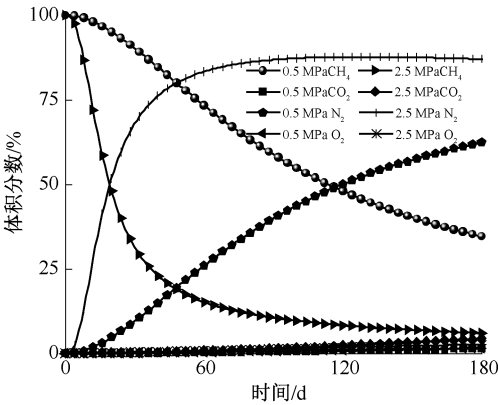


图 5 气体体积分数变化特征

Fig. 5 Variation of gas concentration

由图 5 可知: 电厂烟气中 CO_2 、 N_2 、 O_2 的突破时间不相同, 电厂烟气各组分突破时间见表 3, CH_4 体积分数降低时间点见表 4。

表 3 电厂烟气中各气体突破时间

Table 3 Breakthrough time of each gas in flue gas of power plant

压力/MPa	N_2 用时/d	CO_2 用时/d	O_2 用时/d
0.5	4	48	26
1	3	29	21
1.5	2	16	12
2	2	14	11
2.5	2	12	10

表 4 CH_4 体积分数开始降低时间点

Table 4 Time point at which the CH_4 volume fraction begins to decrease

压力/MPa	0.5	1	1.5	2	2.5
用时/d	4	3	2	2	2

由表 3 可知: 相同注气压力, 电厂烟气中 N_2 的突破时间最早, CO_2 突破时间最晚。以注气压力 0.5 MPa 为例, N_2 、 O_2 、 CO_2 的突破时间分别为 4、26、48 天。这是因为 N_2 对煤具有较高的动态黏度和较弱的吸附能力, 且 N_2 体积分数在烟气中最高, 这极大地促进了 N_2 在煤层中的运移。 CO_2 和 O_2 运移较慢分别受限于强吸附能力和过低的体积分数。同时, 从 CO_2 与 O_2 突破时间可以看出, 强吸附性对气体突破时间影响较大。注气压力由 0.5 MPa 增加到 2.5 MPa, 电厂烟气各组分突破时间均降低。注气压力由 0.5 MPa 增加到 2.5 MPa, N_2 突破时间由 4 天减少到 2 天; O_2 突破时间由 26 天减少到 10 天; CO_2 突破时间由 48 天减少到 12 天。结合表 4 可以看出, CH_4 体积分数开始下降时间节点与 N_2 突破时间一致, 注气压力由 0.5 增加至 2.5 MPa, N_2 突破时间和 CH_4 出口浓度维持 100% 用时均为 4 天和 2 天。当电厂烟气各气体开始突破后, 烟气中 CO_2 通过竞争吸附效应、降低 CH_4 分压比作用, 使得吸附态 CH_4 解吸; 而烟气中的 N_2 、 CO_2 主要通过降低 CH_4 分压比的作用, 加速吸附态 CH_4 解吸; 而烟气注入后加大了煤层与抽采孔的压力梯度, 加速游离态瓦斯向抽采孔的运移速率。综合作用下促进了瓦斯抽采。

2.2 煤层渗透率变化特征

煤层气的开发与煤层渗透率密不可分。图 6、图 7 为监测点 B 在注气压力 2.5 MPa 时吸附解吸、温度效应、有效应力引起的变形特征及不同注气压力下渗透率的变化情况。

由图 7 可知: 不同注气压力下, 渗透率随注气时间增加呈先上升后下降。以 2.5 MPa 为例, 煤层渗透率先由 0 天的 $0.872\ 25\ m^2$ 上升至 6 天的 $0.872\ 27\ m^2$ 之后下降至 180 天的 $0.871\ 15\ m^2$, 由图 6 可知: 先上升的阶段是受抽采孔的影响游离态瓦斯减少, 打破游离态瓦斯与吸附态瓦斯的平衡, 吸附态瓦斯解吸; 瓦斯解吸使有效应力下降; 解吸热效应虽然会使渗透率上升但在此阶段瓦斯解吸与有效应力的收缩变形主导了渗透率上升。之后烟气各气体突破后, 烟气吸附、有效应力上升及解吸热效应引

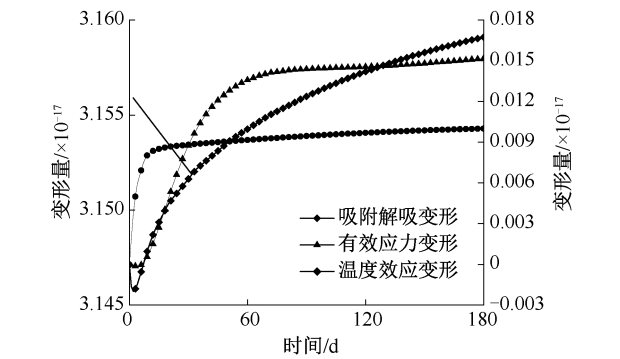


图 6 吸附解吸、温度、有效应力变形

Fig. 6 Changes of adsorption and desorption, temperature and effective stress deformation

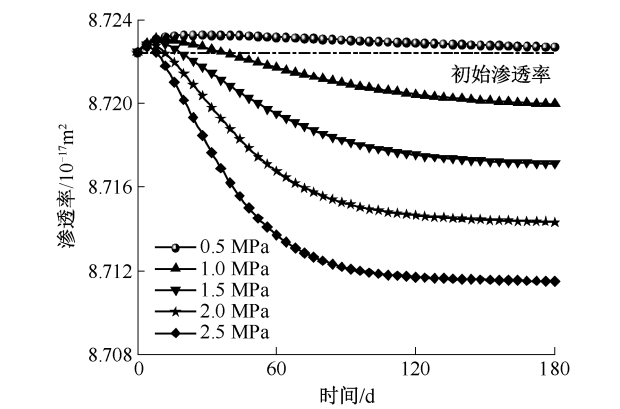


图 7 渗透率变化特征

Fig. 7 Permeability variation rule

起的膨胀变形不断加大,煤层渗透率开始降低。

如图 7 所示,除注气压力 0.5 MPa 时的渗透率高于初始渗透率 $8.7225 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 外,其余条件下渗透率都明显降低。主要原因是当注入压力 (0.5 MPa) 与储层初始压力 (0.45 MPa) 相近时,煤基质吸附烟气膨胀变形较小,而烟气的注入会促进 CH_4 的解吸以及有效应力的变化。而解吸、有效应力的增加以及吸附热效应的作用会引起煤基质收缩进一步抵消了吸附以及解吸热效应的膨胀变形。但随着注气压力的增加,渗透率会不断减小,抽采 180 天时注气压力 0.5 ~ 2.5 MPa 的渗透率分别为 8.7227×10^{-17} 、 8.72×10^{-17} 、 8.7171×10^{-17} 、 8.7143×10^{-17} 、 $8.7115 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。原因是注气压力升高使煤基质吸附大量 CO_2 、 O_2 、 N_2 ,解吸、有效应力的增加以及吸附热效应对煤基质的收缩作用远远不足以补偿烟气吸附、有效应力的减小以及解吸热效应的膨胀作用,渗透率开始下降。需要注意的是 (除 0.5 MPa 外) 不同注气压力下储层渗透率下降至储层初始渗透率的时间节点不同且与 CO_2 的突

破时间相近。由此可见电厂烟气中 CH_4 解吸、 CO_2 的吸附及其引发的热效应是影响储层渗透率变化的主要因素。而储层渗透率的急剧下降会对抽采效果的产生负面影响,这也是注气策略制定时所要考虑的关键因素。

2.3 CH_4 抽采量

瓦斯抽采总量直接反映着瓦斯抽采效率,表 5 是不同注气压力下瓦斯抽采总量。由表 5 可知:抽采总量与注气压力呈正比关系。注气压力由 0.5 增加至 2.5 MPa,抽采时间 60 天抽采总量为 123.37、134.08、155.97、168、177.67 m^3 ;抽采时间 120 天抽采总量为 300.55、336.93、390.28、429.11、464.76 m^3 ;抽采时间 180 天抽采总量为 449.01、509.98、586.47、650.46、715.30 m^3 。

表 5 抽采总量

Table 5 Extracted quantity			
压力/ MPa	抽采总量/ m^3 (60 d)	抽采总量/ m^3 (120 d)	抽采总量/ m^3 (180 d)
0.5	123.37	300.55	449.01
1.0	134.08	336.93	509.98
1.5	155.97	390.28	586.47
2.0	168	429.11	650.46
2.5	177.67	464.76	715.30

图 8 为不同注气压力抽采速率变化情况,由图 8 可见:任一注气压力下抽采速率随时间变化特征相同。根据抽采速率的变化趋势可以划分为抽气 1-抽水-抽气 2 阶段。

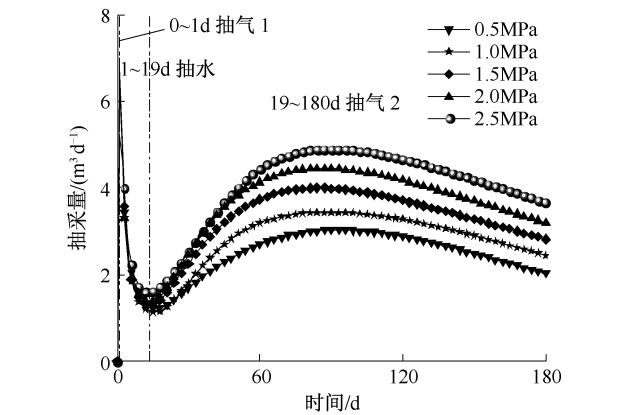


图 8 不同注气压力下抽采速率

Fig. 8 Extraction rate under different gas injection pressure

在抽气 1 阶段,抽采速率极速上升,此时瓦斯抽采的主体源项是抽采孔附近区域的游离态瓦斯,但游离态瓦斯很快耗尽,此阶段结束。此阶段 0.5、2.5 MPa 的瓦斯抽采量分别为 5.173 8、6.718 6 m^3 ,

可以看出瓦斯抽采受注气压力影响较小。

在抽水阶段,抽采速率快速下降,在瓦斯抽采初期,煤层含水饱和度较高,由于煤层地下水封闭了煤孔隙,导致气体流动性较差,瓦斯抽采速率下降。此阶段 0.5、2.5 MPa 的瓦斯抽采量分别为 31.018 6、27.048 m³,瓦斯抽采受注气压力影响同样较小。

在抽气 2 阶段,抽采速率先上升后下降,随着抽采的进行,煤层含水饱和度的降低,贯通气体在裂隙中的运移通道,渗流速度加快,瓦斯抽采速率逐渐增加。但随着煤层瓦斯含量不断降低,解吸速率缓慢,瓦斯抽采速率开始衰减。此阶段 0.5、2.5 MPa 的瓦斯抽采量分别为 412.82、681.53 m³,注气压力的升高促进了此阶段的瓦斯抽采。

从注气压力对抽采的影响上看,注气压力对于前 2 个阶段抽采影响较小,而注气压力使抽气 2 阶段的抽采量增加,其原因主要是,抽采初期主要是对于煤层游离态瓦斯和煤层地下水的抽采,注气压力对于抽采速率的影响并不显著。随着裂隙中地下水的不断排出,游离态瓦斯不断减少,吸附态瓦斯的解吸成为影响瓦斯抽采的关键因素,而提高注烟气压气压力会加大煤层气体的竞争吸附效应与降低 CH₄ 分压比作用,这会加快吸附态瓦斯的解吸,此外注气压力的升高会加大煤层压力,拉大了与抽采孔的压差,进而加速煤层瓦斯的运移速率,从而达到促抽瓦斯效果。

从 2.2 节分析得出,高注气压力会造成储层渗透率下降,进而影响瓦斯抽采效果。协同渗透率变化与瓦斯抽采速率特征,为节约能源与提高瓦斯抽采效率,在注气开采煤层气工程中要在瓦斯抽采速率降低至最低值前通过低压注气来节约成本以及避免渗透率急剧降低,之后采用高压注气提高煤层气抽采速率。

3 结 论

1) 文中建立的注烟驱替瓦斯数学模型,能够分析不同注气压力驱替瓦斯效果差异性产生的原因,为研究不同注气压力下燃煤电厂烟气驱替煤层瓦斯效果提供依据。

2) 注烟后煤层 CH₄ 气体体积分数呈下降趋势,CO₂、N₂、O₂ 气体体积分数呈上升趋势。电厂烟气中 N₂ 的突破时间最早,CO₂ 突破时间最晚。N₂ 的分压较大且吸附亲和力小,这导致 N₂ 在煤层中的迁移速度最快,CO₂ 和 O₂ 运移较慢分别受限于强吸附能力和过低的体积分数。

3) 煤层渗透率变化受吸附解吸、温度、有效应力效应影响,渗透率随注气时间增加呈先上升后下降趋势,注气压力越大煤层渗透率越低。

4) 依据瓦斯抽采速率变化规律,在工程应用中,为节约能源与提高瓦斯抽采效率,可以采用先低压后高压的注气策略。

参 考 文 献

- [1] LI Guibo, FENG Zengchao, WANG Yanqi, et al. Research on different gas extraction methods of high gas and low permeability coal seam [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1 362-1 366.
- [2] 姜延航,白刚,周西华,等. 煤层注 CO₂ 驱替 CH₄ 影响因素试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 113-121. JIANG Yanhang, BAI Gang, ZHOU Xihua, et al. Experimental study on influence factors of CH₄ displacement by CO₂ [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 113-121.
- [3] 袁亮,薛俊华,张农,等. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 6-11, 17. YUAN Liang, XUE Junhua, ZHANG Nong, et al. Current situation and prospect of key technologies for coalbed methane extraction and coal and gas co-production [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 6-11, 17.
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2021-03-01(010).
- [5] 黄戈. 电厂烟气注入采空区对遗煤自燃影响的数值模拟研究[D]. 葫芦岛: 辽宁工程技术大学, 2016. HUANG Ge. Numerical simulation of effect of flue gas injection into gob of power plant on spontaneous combustion of abandoned coal [D]. Huludao: Liaoning Technical University, 2016.
- [6] JIANG Kai, ASHWORTH P. The development of carbon capture utilization and storage (CCUS) research in China: a bibliometric perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138: DOI: 10.1016/j.rser.2020.110521.
- [7] FU Lippei, REN Zhangkun, SI Wenzhe, et al. Research progress on CO₂ capture and utilization technology[J]. Journal of

CO₂ Utilization,2022,66: DOI:10. 1016/J. ENERGY. 2023. 126664.

[8] YU Wu, LIU Jishan, CHEN Zhongwei, et al. A dual poroelastic model for CO₂ – enhanced coal bed methane recovery[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2/3):177–189.

[9] DUTKA B, KUDASIK M, POKRYSZKA Z, et al. Balance of CO₂/CH₄ exchange sorption in acoal briquette[J]. Fuel Processing Technology,2013,106: 95–101.

[10] FANG Huihuang, SANG Shuxun, LIU Shiqi. Establishment of dynamic permeability model of coal reservoir and its numerical simulation during the CO₂-ECBM process[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 885–898.

[11] FAN Yongpeng, DENG Cunbao, ZHANG Xun, et al. Numerical study of CO₂-enhanced coalbed methane recovery[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 76: 12–23.

[12] FAGHIHI S, MOGHADASI J, JAMIALAHMADI M. Continuous CO₂ injection for simultaneous geological storage and enhanced oil recovery: experimental investigation on the effects of permeability heterogeneity[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology,2025,15(4):458–471.

[13] JESSEN K, TANG G Q, KOVSCEK A R. Laboratory and simulation investigation of enhanced coalbed methane recovery by gas injection[J]. Transport in Porous Media, 2008, 73(2):141–159.

[14] AKASH T,SUBASIS H,INAN A C. Enhancing coal bed methane recovery: using injection of nitrogen and carbon dioxide mixture[J]. Petroleum Science and Technology,2021,39(2):49–62.

[15] FAN Nan, WANG Jiren, DENG Cunbao, et al. Numerical study on enhancing coalbed methane recovery by injecting N₂/CO₂ mixtures and its geological significance[J]. Energy Science & Engineering,2020,8(4):1 104–1 119.

[16] ZHOU Lijun, ZHOU Xihua, FAN Chaojun, et al. Modelling of flue gas injection promoted coal seam gas extraction incorporating heat-fluid-solid interactions [J]. Energy, 2023, 268: DOI:10. 1016/J. ENERGY. 2023. 126664.

[17] 季鹏飞,林海飞,孔祥国,等. 注氮促排煤体瓦斯数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2021,31(11):127–134. JI Pengfei, LIN Haifei, KONG Xiangguo, et al. Numerical simulation research on coal gas drainage by nitrogen injection [J]. China Safety Science Journal,2021,31(11): 127–134.

[18] FAN Chaojun, ELSWORTH D, LI Sheng, et al. Thermo-hydro-mechanical-chemical couplings controlling CH₄ production and CO₂ sequestration in enhanced coalbed methane recovery[J]. Energy, 2019, 173: 1 054–1 077.

[19] BAI Gang, WANG Xuepeng, WANG Jue, et al. Heat-fluid-solid-coupled model for flue gas displacement of CH₄ in coal seams and its applications[J]. ACS Omega, 2025, 10(2):2 338–2 353.

作者简介： 白 刚 （1991—）,男,安徽灵璧人,博士,教授,主要从事矿山灾害低碳防控理论与技术研究。
E-mail:baigang_1992@163.com。