

中文引用格式:杨明,江舒纬,徐靖,等. 不同煤阶煤中水分自发渗吸特性试验研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8):110–117.

英文引用格式:YANG Ming JIANG Shuwei XU Jing, et al. Experimental study on spontaneous water infiltration and absorption characteristics in different coal grades[J]. China Safety Science Journal,2025,35(8):110–117.

不同煤阶煤中水分自发渗吸特性试验研究^{*}

杨明^{1,2,3}教授, 江舒纬¹, 徐靖¹, 周子恒¹, 王明洋¹, 高建良^{1,2}教授

(1 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

2 河南理工大学 煤矿灾害防治教育部重点实验室, 河南 焦作 454003;

3 河南理工大学 郑州高等研究院, 河南 郑州 451464)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1322

基金项目:国家自然科学基金资助(52274186, 52274187)。

【摘要】 为了解不同煤阶煤自发渗吸过程中水分运移特征,以蒙泰满来梁矿、九里山矿、天地王坡矿、平顶山十矿煤样为研究对象,利用低场核磁共振(NMR)试验系统测试煤样渗吸过程中水分在不同时刻的 T_2 谱,结合煤样中水分质量变化,探究煤样在渗吸过程中水分随时间和空间的变化特征。结果表明:低阶煤润湿性较高阶煤和中阶煤好,相同试验条件下,低阶煤的渗吸量最大,其次是高阶煤,中阶煤的渗吸量最小;根据煤样渗吸过程中水分随时间变化情况,可将煤样渗吸过程划分为3个阶段:渗吸初期、渗吸中期和渗吸后期。渗吸初期,低阶煤对水力作用的敏感程度高于高阶煤和中阶煤,低阶煤渗吸速度最大,其次是中阶煤,高阶煤的渗吸速度最小。渗吸中、后期,高阶煤的渗吸速度较中阶煤大;在渗吸过程中,微小孔/中孔范围内由于毛细管力作用,水分会从孔径较小的孔隙向孔径较大的孔隙运移,运移过程中,水分在低阶煤中受到的阻力小于在高阶煤中受到的阻力。

【关键词】 不同煤阶; 煤中水分; 自发渗吸; 润湿效果; 低场核磁共振(NMR); 毛细管力

Experimental study on spontaneous water infiltration and absorption characteristics in different coal grades

YANG Ming^{1,2,3}, JIANG Shuwei¹, XU Jing¹, ZHOU Ziheng¹,
WANG Mingyang¹, GAO Jianliang^{1,2}

(1 School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 2 Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Jiaozuo Henan 454003, China; 3 Zhengzhou Institute for Advanced Research of Henan Polytechnic University, Zhengzhou Henan, 451464, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of water transport during spontaneous infiltration and absorption of coal of different rank, coal samples from Mengtai Manlailiang mine, Jiulishan mine, Tiandiwangpo mine, and Pingdingshan No. 10 mine were taken as the research objects, The T_2 spectrum of water in the coal sample at different times during the imbibition process was measured by using the low-field NMR experimental system, and the variation of water in the coal sample with time and space during the imbibition process was explored based on the change of water quality in the coal sample. The results

show that the wettability of low-rank coal is better than that of high-rank coal and medium-rank coal, and the imbibition capacity of low-rank coal is the largest under the same experimental conditions, followed by high-rank coal, and the imbibition capacity of medium-rank coal is the smallest. According to the change of water in the process of coal sample imbibition with time, the coal sample imbibition process can be divided into three stages: the initial stage of imbibition, the middle stage of imbibition and the late stage of imbibition. In the early stage of imbibition, the sensitivity of low-rank coal to hydraulic action is higher than that of high-rank coal and medium-rank coal, and the imbibition velocity of low-rank coal is the largest, followed by medium-rank coal, and the imbibition velocity of high-rank coal is the smallest. In the middle and late stages of imbibition, the imbibition rate of high-rank coal is larger than that of medium-rank coal. In the process of imbibition and sorption, water will be transported from the pores with smaller pore size to the pores with larger pore size due to capillary force in the micropores/mesopores of the same magnitude, and the resistance of water in the lower rank coal is less than that in the higher rank coal.

Keywords: different coal ranks; moisture in coal; spontaneous imbibition; wetting effect; low-field nuclear magnetic resonance(NMR); capillary force

0 引言

随着煤炭资源开采逐渐向深部延伸,开采条件日趋复杂恶劣,机械化作业逐步取代传统人工开采方式。机械化程度加深导致工作面粉尘浓度也逐渐升高。为减少粉尘对人体的危害,国内外常用的方法是煤层注水^[1-2]。在注水过程中,水在一定压力条件下通过裂隙通道进入煤体,当压力消耗殆尽时,水依靠毛细管力渗吸至较小的孔隙中^[3],这种现象即为自发渗吸。自发渗吸过程中水分在煤体孔隙内运移的距离可以反映煤体的润湿效果,研究煤体自发渗吸过程中水分运移机制和控制因素^[4],对掌握煤层微观孔隙尺度注水机制和注水润湿效果,具有重要意义^[2]。

诸多学者对此开展了研究,王鑫等^[5]在研究页岩孔隙自发渗吸时发现,渗吸流体在毛细管力作用下通过不断地驱替空气润湿孔隙。SEYYEDI等^[6]认为,自发渗吸的主要驱动力是毛细管力。王青松等^[7]认为,当注水压力消耗殆尽时,煤依靠毛细管力将水运移至微孔隙内成为吸附水,吸附水量主要受时间影响,时间越长,吸附水量越大。杨雪等^[8]研究了高温高压对自发渗吸规律的影响,发现温度和压力对致密岩心的渗吸影响较大。孙晓彤等^[9]研究了平煤自发渗吸过程的低场核磁共振(Low-field Nuclear Magnetic Resonance, NMR)一维频谱,发现在快速上升和缓慢上升前期阶段吸附孔对煤样自发渗吸起主导作用。岳基伟等^[10]通过试验发现,重塑煤体自发渗吸过程中渗吸高度先迅速增大再缓慢增大至最大高度,且最大渗吸高度与孔隙率呈负

相关。杨明等^[11]利用 NMR 技术对煤粉自发渗吸过程中的多态水研究,发现浸润过程中煤粉表面的一级吸附位点对渗吸过程起主要作用,煤孔隙吸附态水峰面积反映了煤层注水降尘效果。

现有研究成果对揭示煤体自发渗吸微观渗流特征具有重要意义,然而,不同煤阶煤体孔隙结构、物性参数不同,煤中水的自发渗吸特征也具有一定差异,进而影响水在煤体中的分布与运移,导致注水润湿效果不同。为此,文中利用 NMR 开展不同煤阶煤体自发渗吸试验,研究不同煤阶煤自发渗吸过程中的水分运移特征,以期能为进一步提升煤层注水润湿效果、确定合理注水布孔间距等提供一定的参考。

1 煤中水分自发吸渗试验概况

1.1 煤样制备及相关参数

试验采集的煤样分别来自河南焦作九里山矿(G1)、山西晋城天地王坡矿(G2)、河南平顶山十矿(Z1)、内蒙古蒙泰满来梁矿(D1)。根据试验需要分别制备4个 $\varnothing 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 煤柱及60~80目的煤粉。

根据《煤的工业分析方法》(GB/T212—2008)和《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》(GB/T6948—2008),分别测试各煤样的基本物性参数,结果见表1。由表1可知:试验煤样涵盖高阶煤(G1、G2)、中阶煤(Z1)和低阶煤(D1),根据接触角测量结果,试验煤样的润湿性由大到小依次为:D1>G1>G2>Z1。

表 1 煤样基本物性参数

Table 1 Basic physical property parameters of coal samples

煤样	工业分析				最大镜质组 反射率/%	接触角/(°)
	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_{ad}/\%$		
G1	0.90	14.92	9.76	75.96	2.77	56.1
G2	1.46	13.65	7.53	80.82	3.09	58.2
Z1	0.69	9.50	23.45	68.75	1.41	77.2
D1	10.86	5.44	27.49	60.69	0.42	41.2

1.2 NMR 测试原理

NMR 技术研究不同煤阶煤体自发渗吸过程的实质是 NMR 能够识别煤体孔隙自发渗吸过程中孔隙结构里的氢原子。氢原子进入磁场后存在 1 个从激励状态恢复到平衡状态的过程,该过程所用的时间称为弛豫时间。横向弛豫时间用 T_2 表示,ms,横向弛豫速率 $1/T_2$ 可表示为:

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2s}} \tag{1}$$

式中: T_{2s} 为表面弛豫时间,ms; $1/T_{2s}$ 为表面弛豫速率,1/ms。表面弛豫速率与表面弛豫率、孔隙表面积以及孔隙体积有关^[12],即:

$$\frac{1}{T_{2s}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \tag{2}$$

式中: ρ_2 为表面弛豫率, $\mu\text{m/s}$; S 为孔隙表面积, m^2 ; V 为孔隙体积, m^3 。

根据式(2),横向弛豫速率 $1/T_2$ 为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \tag{3}$$

若令 $\frac{F_s}{r} = \frac{S}{V}$, 其中, F_s 为孔隙形状因子; r 为煤样孔隙半径, μm , 假设试验中煤样孔隙为单一的圆柱形孔隙, 则 F_s 取 $2^{[13]}$, 致密岩心 ρ_2 取经验值 $10 \mu\text{m/s}^{[14]}$, 式(3)即为:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{20}{r} \tag{4}$$

根据式(4)建立横向弛豫时间与孔隙结构之间的关系。

1.3 煤样饱水试验过程

将试验煤样放入盛有蒸馏水的烧杯中,将烧杯放置在真空饱和装置中,加负压至-0.1 MPa 进行饱水。当煤中水分不再发生变化时,关闭饱和装置,取出煤样,擦拭煤样表面的水分,将煤样放置在 NMR 中测试煤样的核磁信号幅度。

1.4 煤样自发渗吸试验

自发渗吸试验装置如图 1 所示,利用三聚氰胺海绵将包裹有封口膜(Parafilm)的煤样固定在盛有去离子水的烧杯中,当煤样下底面接触到去离子水面并形成水膜时,固定煤样,开始进行自发渗吸试验。渗吸一段时间后,取出煤样,擦拭煤样底面的水分,然后放置在精密天平上测量并记录煤样质量,测量完毕后将煤样放置在 NMR 内测试煤样的核磁信号幅度。测试完成后将煤样重新放置于烧杯中蒸馏水上继续进行自发渗吸,按照上述步骤反复进行,直到试验结束。渗吸前期煤样处于干燥状态,吸水速度较快,短时间间隔测 1 次核磁信号,渗吸后期煤样接近饱和状态,长时间间隔测 1 次核磁信号。具体渗吸时间及核磁测试时间间隔见表 2。由于试验结束后,获得的试验数据较多,因此选取 9 组具有代表性的数据用于试验分析,具体渗吸时刻为 15、90、720、2 880、7 200、10 080、12000、13 440 min。

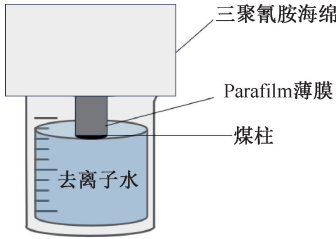


图 1 自发渗吸试验装置

Fig. 1 Spontaneous imbibition experimental setup

表 2 煤样自发渗吸时间间隔设置

Table 2 Time interval setting for spontaneous infiltration of coal samples

渗吸时间	测样时间间隔 min
0~60	15
60~240	30
240~2 880	240
2 880~7 200	360
7 200~12 000	480
12 000~13 440	1 440

2 水运移特征 NMR 试验

2.1 煤样孔隙结构分布特征

依据霍多特分类方法^[15]可将煤样孔隙分为微孔($<10^{-2} \mu\text{m}$)、小孔($10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}$)、中孔($10^{-1} \sim 1 \mu\text{m}$)和大孔($>1 \mu\text{m}$)。根据煤样饱和 T_2 图谱,结合式(4)给出煤样孔径占比,如图 2 所示。

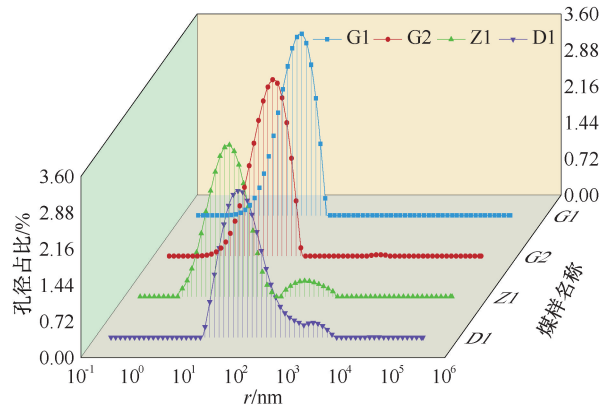


图 2 煤样孔径占比

Fig. 2 Aperture distribution of coal samples

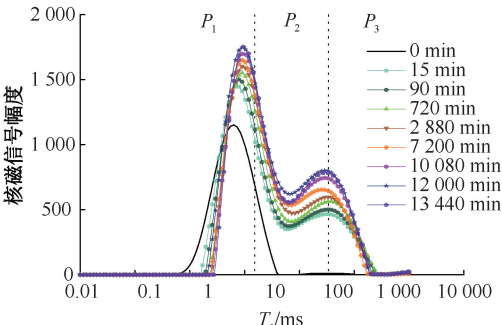
由图 2 可知:4 种煤样的微小孔最发育。不同煤阶煤样孔隙结构对比发现,低阶煤具有小孔、中孔和大孔,孔之间的连通性较好。中阶煤具有微小孔和中孔结构,孔隙之间的连通性较差。高阶煤微小孔发育较好,中孔和大孔相对不发育。

2.2 煤样自发渗吸过程中 T_2 谱演化特征

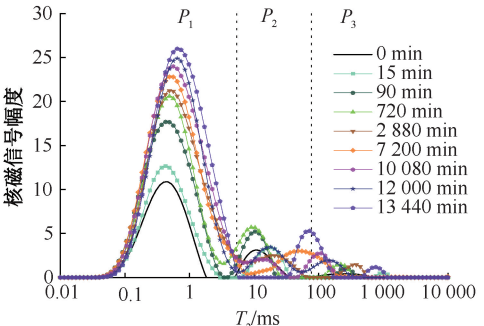
煤样自发渗吸过程中 T_2 谱演化如图 3 所示,其中, P_1 、 P_2 、 P_3 分别代表吸附态水峰、束缚态水峰、自由态水峰。不同煤阶煤样 T_2 谱演化过程对比发现,D1 煤样自发渗吸至试验结束(13 440 min)时, P_1 峰最大信号幅度远大于其他 3 个煤样的最大信号幅度。低阶煤接触角和表面张力较小,羧基、羟基等极性官能团含量丰富^[16],渗吸效果最明显。

根据图 3a,0~15 min 内 P_1 峰、 P_2 峰信号幅度迅速增加。D1 煤样在自发渗吸初期吸附位点空缺,煤样会迅速吸附水分子填充煤孔隙表面的吸附空位。15~13 440 min 过程中, P_1 峰、 P_2 峰信号幅度缓慢增加, P_1 峰右移, P_2 峰左移。小孔和中孔的毛细管力较大^[17],吸附能力较强,孔表面的一级吸附位点先达到饱和,多级吸附位点吸附能力弱,弛豫时间变长。

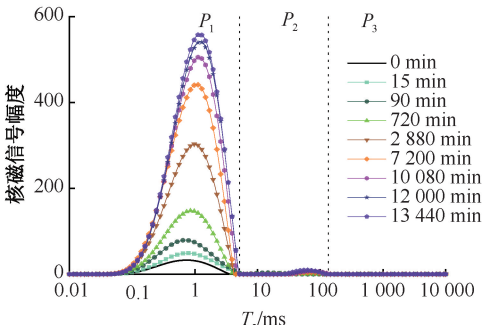
0~13 440 min 内,Z1 煤样 P_1 峰右移, P_2 峰、 P_3 峰左移,峰之间连通效果较差。中阶煤接触角和表



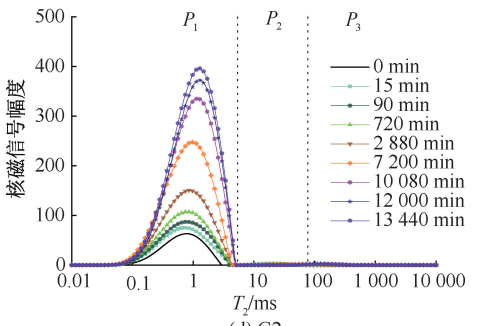
(a) D1



(b) Z1



(c) G1



(d) G2

图 3 煤样自发渗吸过程中的 T_2 谱

Fig. 3 T_2 spectra during spontaneous imbibition of coal samples

面张力较大,润湿效果较差,水进入孔隙后运移时受到的阻力较大,导致小孔、中孔、大孔之间的水只能在同一孔类范围内运移。

G1、G2 煤样 P_1 峰明显, P_2 峰信号幅度接近 0,无 P_3 峰。高阶煤的接触角和表面张力均大于低阶煤,但小于中阶煤。根据杨氏方程,高阶煤的毛细管

力大于中阶煤而小于低阶煤的毛细管力,渗吸结束时,高阶煤煤中水分含量大于中阶煤而小于低阶煤煤中水分含量。

2.3 煤样渗吸过程中水分随时间变化特征

自发渗吸过程中不同煤阶煤样含水率随时间变化情况如图 4 所示。煤样含水率随时间变化曲线斜率代表单位质量煤样的渗吸速度。根据图 4,渗吸至试验结束(13 440 min)时,D1 煤样含水率最高,其次是 G1、G2 煤样,Z1 煤样含水率最低。

渗吸初期,低阶煤接触角和界面张力较小,润湿效果较好,对水比较敏感,吸水速度最快。中阶煤较高阶煤具有中孔和大孔结构。中孔和大孔的孔容较大,孔隙表面的一级吸附空位较多,中阶煤煤中水分吸附渗吸水的速度较高阶煤快。90~10 080 min 内,煤样吸水速度减慢,高阶煤的吸水速度大于中阶煤的吸水速度。高阶煤的空气干燥基(M_{ad})较中阶煤高,当煤表面 1 级吸附位点充满水分子后,煤孔隙内水分子层可以作为 2 级吸附位点快速吸附更多的水分子。10 080~13440 min 内,煤样吸水速度趋于平缓。在渗吸后期,水受重力作用明显,吸水速度逐渐趋于平缓,当孔隙毛细管力与水分所受重力大小相同时,煤孔隙不再吸水。

2.4 煤样渗吸过程中水分随空间变化特征

不同煤阶煤样自发渗吸过程中水分随孔径分布的变化如图 5 所示,左峰、右峰面积同时增加,左峰右移,右峰左移,区域面积:中孔>大孔>小孔。低阶煤自发渗吸过程中水分向小孔、中孔和大孔中同时运移,向中孔中运移的量最多,其次是大孔,向小孔中运移的量最少。渗吸过程中,在远距离范德华黏结力的影响下^[18],当小孔内压力升高到足以克服孔隙喉道的阻力时,水分向中孔和大孔运移。在图 5b、图 5c、图 5d 中,中阶煤、高阶煤渗吸过程中,微小孔峰面积不断增加,峰右移。同一区域微小孔范围内,水分依靠毛细管力不断向孔径较大的孔隙中运移。

峰值和峰位随时间变化关系如图 6 所示。渗吸至试验结束(13 440 min)时,D1 煤样中小孔峰值和大孔峰值分别增长 598.125 和 790.715,左峰右移 65.811 nm,右峰左移 81.511 nm。Z1 煤样微小孔峰值增长 15.176,微小孔峰右移 4.705 nm。G1、G2 煤样微小孔峰值分别增长 527.728 和 332.766,峰分别右移 10.994 和 9.264 nm,表明水分在低阶煤孔隙中运移和分布时受到的阻力相对中阶煤和高阶煤较小,

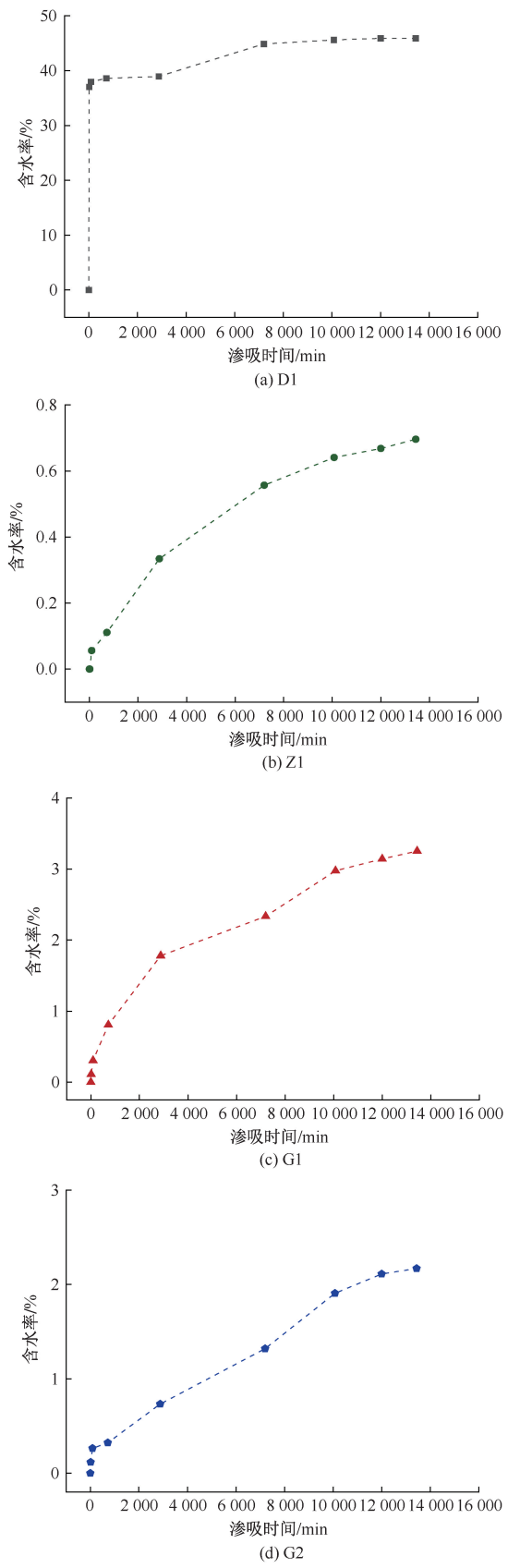


图 4 煤样含水率随时间变化

Fig. 4 Variation of moisture content of coal samples over time

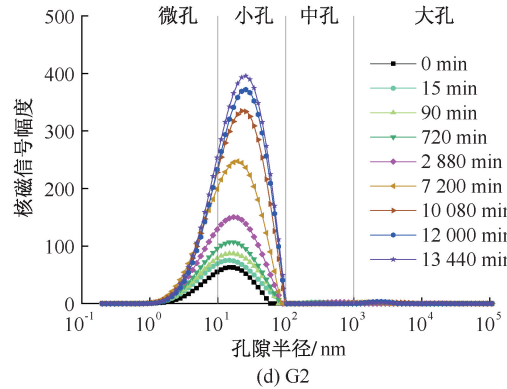
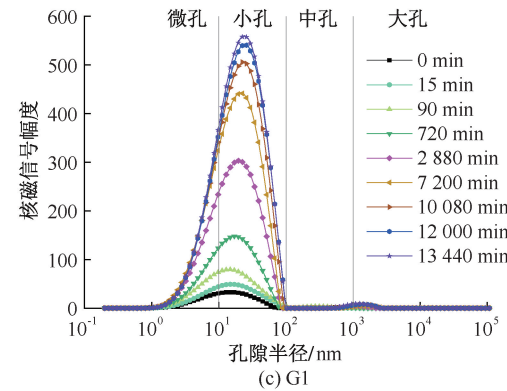
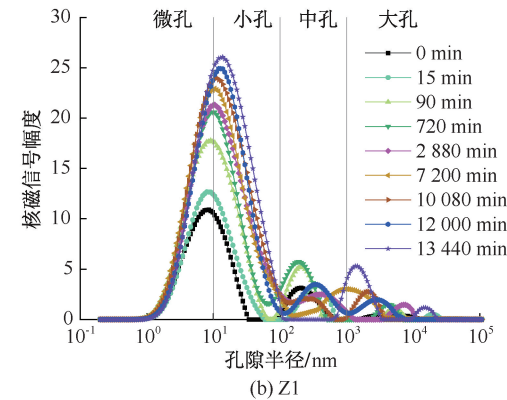
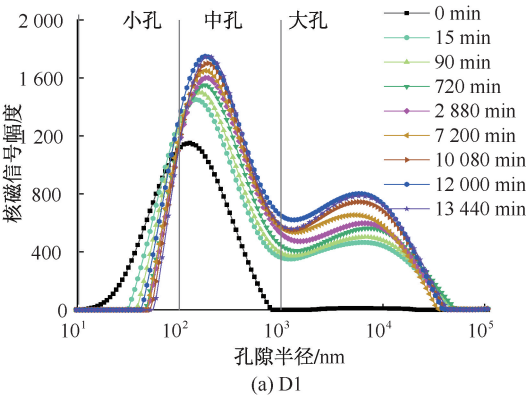


图 5 煤样自发渗吸过程中孔径分布

Fig. 5 Pore size distribution of coal samples during spontaneous imbibition process

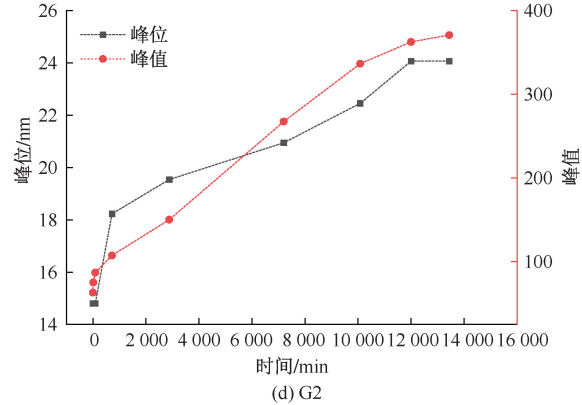
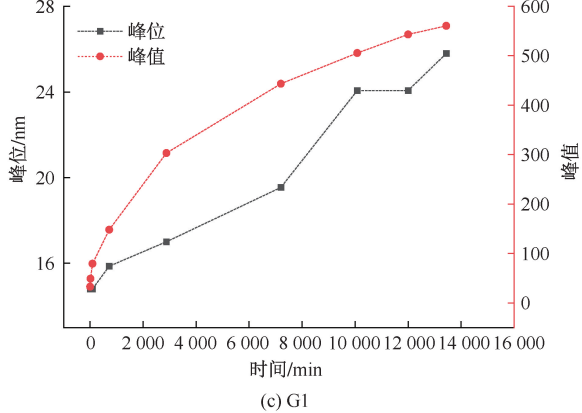
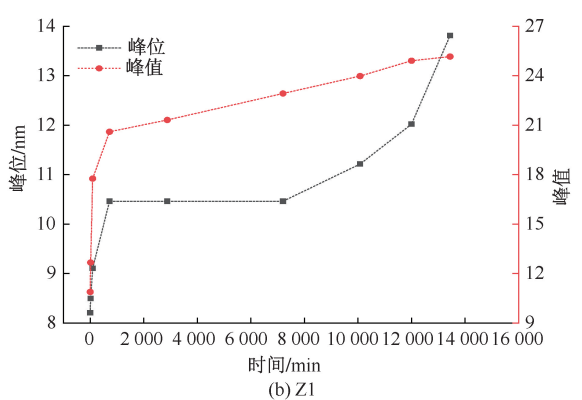
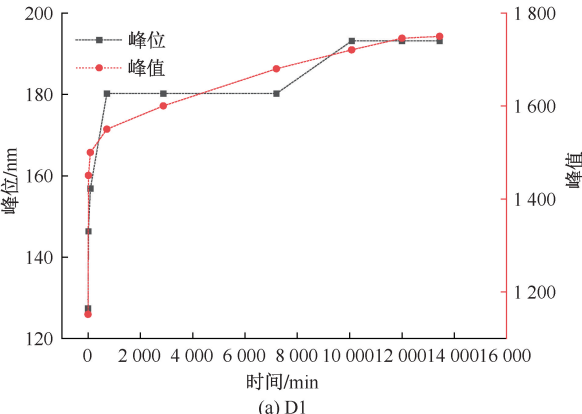


图 6 自发渗吸过程中峰值和峰位随时间变化

Fig. 6 Peak and peak position over time during spontaneous imbibition

且孔隙的孔径越大,越有利于水分的运移和分布。

3 结 论

1) 低阶煤渗吸量最大,其次是高阶煤,中阶煤渗吸量最小。低阶煤接触角小,孔隙连通性较好, P_1 峰峰值最大,渗吸量最大。高阶煤次之,中阶煤因接触角、表面张力较大,润湿效果最差, P_1 峰峰值最小,吸水量最小。

2) 不同煤阶煤在不同渗吸阶段所表现的渗吸状态不同。渗吸前期,润湿性较好的低阶煤吸水速

度最快,具有中、大孔结构的中阶煤吸水速度快于高阶煤,渗吸中、后期,高阶煤因具有更多的二级吸附位点而呈现出更高的吸附速度。

3) 不同煤阶煤的孔隙结构不同,水分随空间运移特征也不同。中、高阶煤在同一区域微小孔范围内,水分依靠毛细管力向孔径较大的孔隙中运移。孔隙连通性较好、中大孔占比较高的低阶煤,在远距离范德华黏结力影响下,水分从小孔向中孔和大孔中运移,且孔隙孔径越大,越有利于水分运移和分布。

参 考 文 献

[1] 肖知国,王兆丰. 煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(10): 150-158.

XIAO Zhiguo, WANG Zhaofeng. Status and progress of studies on mechanism of preventing coal and gas outburst by coal seam infusion[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(10): 150-158.

[2] 文建东,刘炬,李作泉,等. 魏家地煤矿钻孔静压注水治理瓦斯技术[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增2): 60-64.

WEN Jiandong, LIU Xuan, LI Zuoquan, et al. Gas control technology by static pressure water injection in borehole of weijiadi coal mine[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2): 60-64.

[3] 吕浙江,唐海,吕栋梁,等. 利用相渗曲线研究低渗气藏水锁效应的新方法[J]. 天然气勘探与开发, 2008(3): 49-52.

LYU Jianjiang, TANG Hai, LYU Dongliang, et al. New research method of water locking effect in low permeability gas reservoir by relative-permeability curve[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008(3): 49-52.

[4] 王彬,王兆丰,岳基伟,等. NMR 成像技术测试煤样渗吸过程中水分变化规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(10): 32-38.

WANG Bin, WANG Zhaofeng, YUE Jiwei, et al. Study on change laws of moisture during imbibition process of coal samples tested by NMR imaging technology[J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(10): 32-38.

[5] 王鑫,曾溅辉,孔祥晔,等. 页岩孔隙润湿性对自发渗吸的控制作用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2022, 53(9): 3 323-3 336.

WANG Xin, ZENG Jianhui, KONG Xiangye, et al. Controlling effect of shale pore wettability on spontaneous imbibition[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2022, 53(9): 3 323-3 336.

[6] SEYYEDI M, SOHRABI M. Enhancing water imbibition rate and oil recovery by carbonated water in carbonate and sandstone rocks[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(1): 285-293.

[7] 王青松,金龙哲,孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(1): 70-73.

WANG Qingsong, JIN Longzhe, SUN Jinhua. Analysis of coal seam water injection process and study on wetting mechanism of coal body[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(1): 70-73.

[8] 杨雪,廖锐全,袁旭. 基于核磁共振技术的致密岩心高温高压自发渗吸实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(3): 58-65.

YANG Xue, LIAO Ruiquan, YUAN Xu. Spontaneous imbibition experiment in high-temperature and high-pressure for tight cores based on NMR technology[J]. Petroleum Geology and Development in Daqing, 2023, 42(3): 58-65.

[9] 孙晓彤,周宏伟,薛东杰,等. 基于 NMR 的低渗煤体自渗吸实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 804-812.

SUN Xiaotong, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Experimental study of spontaneous imbibition of low-permeability coal based on NMR[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(4): 804-812.

- [10] 岳基伟,王兆丰. 不含瓦斯重塑煤体的渗吸特性[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增2):377-384.
YUE Jiwei, WANG Zhaofeng. Imbibition characteristics of remolded coal without gas[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2):377-384.
- [11] 杨明,徐靖,何敏,等. 浸润环境下煤体多态水分布及运移规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2):787-794.
YANG Ming, XU Jing, HE Min, et al. Distribution and transport law of polymorphic water in coal body under infiltration environment[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2):787-794.
- [12] 姚艳斌,刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体表征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6):14-22.
YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysics and fluid properties characterizations of coalbed methane reservoir by using NMR relaxation time analysis[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6):14-22.
- [13] 杨明,韩龙祥,张铁岗,等. 变压注水环境下煤体孔隙动态演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增2)1-9.
YANG Ming, HAN Longxiang, ZHANG Tiegang, et al. Study on the dynamic evolution of coal pore under variable pressure water injection environment[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2)1-9.
- [14] 杨甫,贺丹,马东民,等. 低阶煤储层微观孔隙结构多尺度联合表征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(3):14-23.
YANG Fu, HE Dan, MA Dongmin, et al. Multi-scale joint characterization of micro-pore structure of low-rank coal reservoir[J]. Lithologic Reservoir, 2020, 32(3):14-23.
- [15] 高建良,关孟瑶,张琛,等. 高阶煤润湿过程中水分运移的低场核磁共振试验[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10):46-52.
GAO Jianliang, GUAN Mengyao, ZHANG Chen, et al. Low-field nuclear magnetic resonance tests characterizing moisture transport during wetting of high-rank coal[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10):46-52.
- [16] 李祥春,聂百胜. 煤吸附水特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4):417-419.
LI Xiangchun, NIE Baisheng. Study on the characteristics of coal adsorption water[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4):417-419.
- [17] 王俊杰,胡勇,刘义成,等. 致密砂岩气层毛细管自吸水锁损害及控制因素[J]. 断块油气田, 2019, 26(5):626-631.
WANG Junjie, HU Yong, LIU Yicheng, et al. Damage of water blocking by spontaneous imbibition in tight sandstone gas reservoir and its controlling factors[J]. Fault-Block Oil and Gas Fields, 2019, 26(5):626-631.
- [18] WANG Ning, DU Yi, FU Changqing, et al. Experimental study on spontaneous imbibition of coal samples of different ranks based on the NMR relaxation spectrum[J]. Acs Omega, 2023, 8(37):33 526-33 542.



作者简介: 杨明 (1982—),男,安徽怀宁人,博士,教授,主要从事安全技术及工程、矿井通风、热环境控制理论与技术研究。E-mail: yming@hpu.edu.cn。