



文章编号:1671-251X(2020)11-0028-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020080018

外加水分对软硬煤瓦斯解吸特征影响研究

陈海栋^{1,2}, 陈蒙磊¹, 肖知国¹, 安丰华¹

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点
实验室培育基地, 河南 焦作 454003)



扫码移动阅读

摘要:目前有关软硬煤的研究主要集中在孔隙结构对其瓦斯吸附解吸特征的影响,而对外加水分条件下软硬煤瓦斯解吸特征差异的研究较少。针对该问题,利用煤层高压注水模拟实验装置,开展了不同吸附平衡压力、外加水分含量条件下的正交实验,分析了软硬煤在不同外加水分条件下瓦斯解吸量、瓦斯解吸速度及扩散系数的差异。结果表明:随着外加水分含量的增大,软硬煤的瓦斯解吸量均减小,但软煤的瓦斯解吸量始终大于硬煤;外加水分对软硬煤瓦斯解吸均起到了抑制作用,但对软煤的瓦斯解吸抑制效应强于硬煤;不同吸附平衡压力、外加水分含量条件下,软硬煤的瓦斯解吸速度都是在初始时刻最大,随着时间的延长及外加水分含量的增加,呈现出减小趋势;在吸附平衡压力相同、外加水分含量相近的情况下,软煤瓦斯解吸速度始终大于硬煤;在吸附平衡压力相同、外加水分含量相近的情况下,软煤扩散系数大于硬煤;同一吸附平衡压力下软硬煤的瓦斯扩散系数均随着外加水分含量的增大而减小。

关键词:煤炭开采; 软硬煤; 煤层注水; 外加水分; 瓦斯解吸; 扩散系数

中图分类号:TD712 文献标志码:A

Research on influence of external moisture on gas desorption characteristics of soft and hard coal

CHEN Haidong^{1,2}, CHEN Menglei¹, XIAO Zhiguo¹, AN Fenghua¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: At present, researches on soft and hard coal mainly focus on influence of pore structure on its gas adsorption and desorption characteristics, but there are few researches on difference of gas desorption characteristics of soft and hard coal under condition of external moisture. In view of the above problem, the orthogonal experiments under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content were carried out by using coal seam high-pressure water injection simulation experimental device, and the differences of gas desorption amount, gas desorption speed and diffusion coefficient of soft and hard coal under different external moisture were analyzed. The results show that with the increase of external moisture content, the gas desorption amount of soft and hard coal decreases, but the gas desorption amount of soft coal is always greater than that of hard coal; the external moisture can inhibit

收稿日期:2020-08-05; **修回日期:**2020-10-10; **责任编辑:**张强。

基金项目:国家自然科学基金项目(51804102); 河南省科技攻关项目(172102310640); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2019B12); 河南省高校基本科研业务费专项资金项目(NSFRF170901)。

作者简介:陈海栋(1986—),男,河南南阳人,讲师,博士(后),现主要从事煤矿瓦斯防治方面的教学与科研工作, E-mail: chenheidong1227@163.com。

引用格式:陈海栋,陈蒙磊,肖知国,等. 外加水分对软硬煤瓦斯解吸特征影响研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(11): 28-33.

CHEN Haidong, CHEN Menglei, XIAO Zhiguo, et al. Research on influence of external moisture on gas desorption characteristics of soft and hard coal[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(11): 28-33.

the gas desorption of soft and hard coal, but the inhibition effect of soft coal is stronger than that of hard coal; under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content, the gas desorption speed of soft and hard coal is the highest at the initial moment, and it shows a decreasing trend with the extension of time and the increase of the external moisture content; under the same adsorption equilibrium pressure and similar external moisture content, the gas desorption speed of soft coal is always higher than that of hard coal and the diffusion coefficient of soft coal is higher than that of hard coal; the gas diffusion coefficient of soft and hard coal decreases with the increase of external moisture content under the same adsorption equilibrium pressure.

Key words: coal mining; soft and hard coal; coal seam water injection; external moisture; gas desorption; diffusion coefficient

0 引言

我国多数井田在开采过程中受地质构造影响较大。在构造应力作用下,煤体不仅会发生变形,而且会产生不同程度的动力变质作用,从而在同一煤层会出现微观结构差异性较大的软硬煤^[1-3]。目前,有关软硬煤的研究主要偏重于从微观结构差异角度分析其吸附和解吸特性。文献[4]认为软煤表面更粗糙,且比硬煤拥有更复杂的表面孔隙结构。文献[5]认为软煤比硬煤拥有更高的分形维数。文献[6]认为软煤微孔孔体积较为发育,有利于瓦斯的储存,但构成渗透容积的大孔、中孔及裂隙发育较少。文献[7-8]认为软煤较硬煤拥有更大的比表面积,软煤吸附性能也更强。文献[9]认为同等压降条件下,软煤比硬煤解吸量更大,软煤的解吸速率更快,累计解吸量更多。文献[10]分析了不同粒度软硬煤吸附性能的差异性,认为随着粒度的减小,软硬煤吸附常数均增大,且增大的趋势随着粒度的减小而减小。文献[11]认为软硬煤孔隙结构差异是导致瓦斯扩散速度和扩散系数随粒径变化而产生差别的根本原因。文献[12]基于吸附层厚度理论,分析了软硬煤吸附机理。

除了原生微观结构会影响软硬煤吸附和解吸特性外,外部环境的改变也会对其产生影响。近年来,水力冲孔、水力割缝、水力压裂等水力化方法^[13-14]被广泛作为增透措施用于高瓦斯突出煤层强化抽采,从煤矿井下瓦斯抽采角度分析,外部环境中最重要影响因素是外加水分。已有研究表明,外加水分会对瓦斯的解吸扩散特征产生较大影响^[15-16]。文献[17]认为随着注水压力的增加,最终瓦斯解吸率逐渐呈非线性规律衰减,在注水压力达到一定极值后解吸率会保持稳定。文献[18]得出了外加水分对瓦斯解吸可起到抑制作用的结论。文献[19]发现煤对瓦斯的吸附能力随着煤中水含量的增加而减小,且煤中水含量越大,瓦斯解吸越慢。文献[20]认为注水煤样的解吸等温线明显处于干燥煤样解吸等

温线上方。外加水分会对煤体瓦斯解吸产生较大影响,软硬煤在不同外加水分条件下也会表现出不同的瓦斯解吸特征。

综上所述,外加水分会影响煤体瓦斯的解吸特征,而现有研究重点分析了软硬煤微观结构差异对其瓦斯吸附解吸特征的影响,而对外加水分条件下软硬煤的瓦斯解吸特征研究较少。基于此,本文采用煤层高压注水模拟实验装置开展不同外加水分条件下软硬煤瓦斯解吸实验,研究外加水分对软硬煤瓦斯解吸特征的影响。

1 高压注水实验

1.1 实验方法

1.1.1 煤样制备与基本物性参数测试

实验煤样取自河南焦煤集团古汉山煤矿。该矿二₁煤层由于受地质构造的影响,软硬煤分层现象明显。软煤分层坚固性系数为 0.21,硬煤分层坚固性系数为 1.46。现场采集软硬煤煤样后放入密封袋,带回实验室分别对软硬煤煤样进行粉碎和筛选,制成粒径为 0.2~0.25 mm 颗粒煤。将制作好的颗粒煤放入真空干燥箱中,在 105 ℃环境中连续干燥 8 h,装入密封袋放至阴凉处备用。同时,对实验煤样的基本物性参数进行了测试,测试结果见表 1。

1.1.2 实验仪器

实验仪器采用自主研发的煤层高压注水模拟实验装置,装置主要由真空脱气模块、吸附/解吸模块、恒温水浴模块及高压注水模块等组成,如图 1 所示。

1.1.3 实验方案与实验过程

选择吸附平衡压力为 0.75, 1.40, 2.10, 2.80 MPa,外加水分含量为 0,10%(左右),20%(左右)开展软硬煤瓦斯解吸正交实验。

具体实验过程如下:

(1) 煤样抽真空:称取质量为 60 g 的干燥煤样,放入煤样罐中;开启恒温水浴,设定水浴温度为 40 ℃;启动真空泵,对整个系统抽真空,抽真空时间不少于 12 h。

表 1 实验煤样基本物性参数
Table 1 Basic physical property parameters of experimental coal samples

煤样	破坏类型	坚固性 系数	瓦斯放散初 速度/mmHg	水分/%	灰分/%	挥发 分/%	吸附常数 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	吸附常数 b/MPa^{-1}	孔隙 率/%
软煤	IV	0.21	21.3	0.92	19.82	8.02	45.079	1.143	6.66
硬煤	I	1.46	20.9	1.05	18.93	10.42	39.255	0.813	6.98

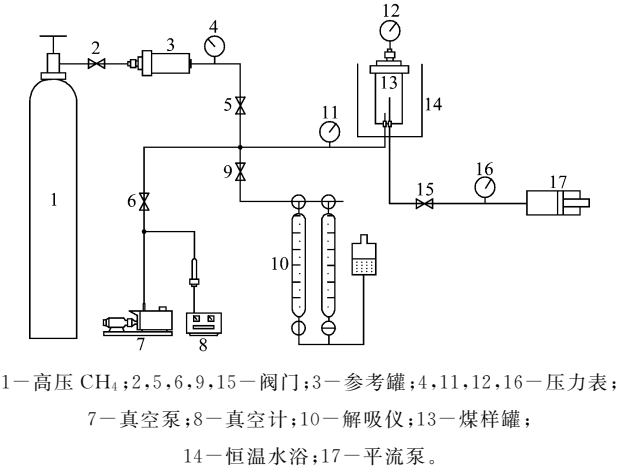


图 1 煤层高压注水模拟实验装置组成
Fig. 1 Composition of coal seam high pressure water injection simulation experimental device

(2) 瓦斯吸附平衡:对煤样罐充入纯度为 99.999% 的 CH_4 ,进行瓦斯吸附平衡,吸附平衡时间不少于 12 h,记录吸附平衡压力及温度。

(3) 对煤样进行高压注水:将一定量的蒸馏水倒入烧杯中并称重,记为 m_1 ;利用平流泵将烧杯中的蒸馏水注入煤样罐中;设定注水压力比吸附平衡压力大 1 MPa,注水流量为 2 mL/min,根据煤样质量及所设定需注入的外加水分含量确定注水时间。

(4) 外加水分含量的确定:注水结束后,称量烧杯及剩余蒸馏水的质量,记为 m_2 ;所注入水的质量即为 $m_1 - m_2$;根据煤样质量及所注入水的质量确定外加水分含量。

(5) 注水后的瓦斯吸附平衡:注水结束后,继续对煤样罐进行瓦斯吸附平衡,直至煤样罐压力表读数不再变化。

(6) 煤样解吸:打开煤样罐出气口阀门,当压力表读数为 0 时,立刻连接解吸仪进行瓦斯解吸,记录瓦斯解吸量、温度及大气压力。

1.2 实验数据处理

为使实验数据具有可比性,需将实验过程中所记录的解吸量换算成标准状态下的解吸量,换算公式为

$$Q(t) = \frac{273.2}{101\,325(273.2 + T_1)} \times (P_a - 9.81h_w - P_s) \times Q'(t) \tag{1}$$

式中: $Q(t)$ 为标准状态下 t 时刻瓦斯累计解吸量, mL/g; T_1 为实验过程中解吸仪量筒内溶液的温度, $^{\circ}\text{C}$; P_a 为大气压, Pa; h_w 为实验过程中所测定的解吸仪量筒液面高度, mm; P_s 为温度为 T_1 时的饱和水蒸气压力, Pa; $Q'(t)$ 为室温下 t 时刻所测定的瓦斯累计解吸量, mL/g。

2 实验结果分析

由于实验数据较多,鉴于篇幅限制,只列出吸附平衡压力为 0.75, 2.80 MPa 的实验数据。

2.1 外加水分对软硬煤瓦斯解吸量的影响

不同吸附平衡压力、不同外加水分含量条件下软硬煤瓦斯解吸实验结果如图 2、图 3 所示。

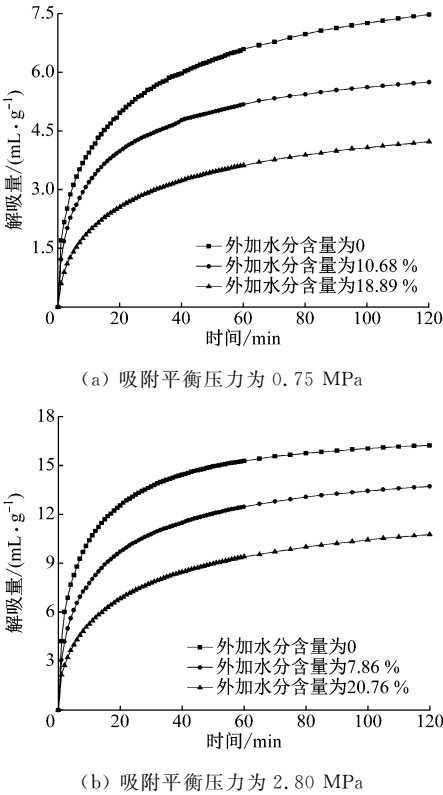
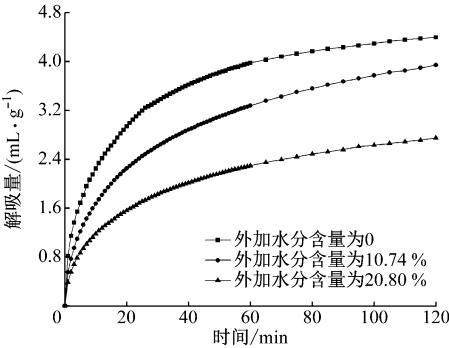


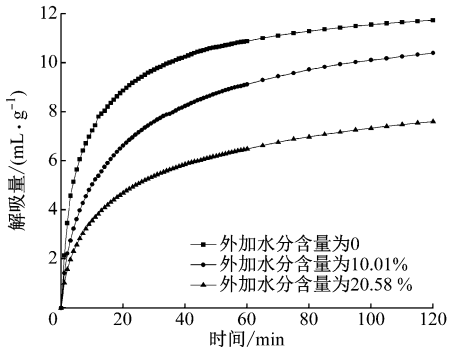
图 2 不同吸附平衡压力、外加水分含量条件下软煤的瓦斯解吸曲线

Fig. 2 Gas desorption curves of soft coal under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content

从图 2 可看出,软煤试样在吸附平衡压力为 0.75 MPa,外加水分含量分别为 0, 10.68% 和



(a) 吸附平衡压力为 0.75 MPa



(b) 吸附平衡压力为 2.80 MPa

图3 不同吸附平衡压力、外加水分含量条件下硬煤的瓦斯解吸曲线

Fig. 3 Gas desorption curves of hard coal under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content

18.89%时,120 min 内瓦斯解吸总量分别为 7.48, 5.74, 4.23 mL/g; 外加水分含量从 0 增加至 10.68%和 18.89%时,瓦斯解吸总量分别减少 27.3%和 47.4%。吸附平衡压力为 2.80 MPa,外加水分含量从 0 增加至 7.86%和 20.76%时,瓦斯解吸总量分别减少 33.69%和 73.26%。

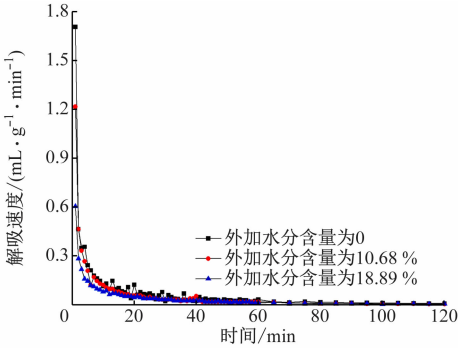
从图 3 可看出,硬煤试样在吸附平衡压力为 0.75 MPa,外加水分含量分别为 0, 10.74%和 20.80%时,120 min 内瓦斯解吸总量分别为 4.40, 3.94, 2.75 mL/g; 外加水分含量从 0 增加至 10.74%和 20.80%时,瓦斯解吸总量分别减少 10.45%和 41.87%。吸附平衡压力为 2.80 MPa,外加水分含量从 0 增加至 10.01%和 20.58%时,瓦斯解吸总量分别减少 11.33%和 39.57%。

根据前人已有的研究结果^[21],软煤的总孔容、总比表面积均比硬煤大数倍,说明软煤吸附能力更强,且在瓦斯解吸时能提供更多的运移通道。所以,相同条件下,软煤的瓦斯解吸量大于硬煤。此外,外加水分进入煤基质后,会产生毛管阻力,阻碍瓦斯解吸^[20],也就出现了图 2 和图 3 中出现的情况,即随着外加水分含量的增大,软硬煤的瓦斯解吸量均减

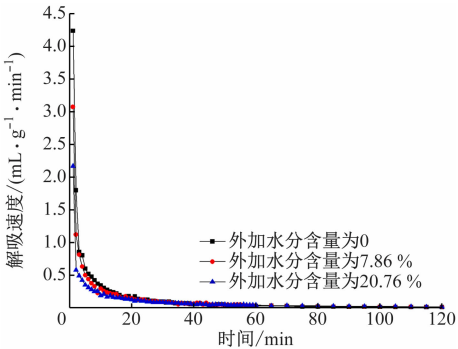
小,外加水分对软硬煤瓦斯解吸均起到了抑制作用。同时,由于软煤的微孔孔容和比表面积大于硬煤,外加水分进入软煤试样后,形成的毛管阻力要远大于硬煤,即外加水分对软煤产生的解吸阻力更大,外加水分对软煤瓦斯解吸抑制效应强于硬煤。

2.2 外加水分对软硬煤瓦斯解吸速度的影响

不同吸附平衡压力、不同外加水分条件下软硬煤瓦斯解吸速度的计算结果如图 4、图 5 所示。从图 4、图 5 可看出,不同吸附平衡压力、不同外加水分含量条件下,软硬煤的瓦斯解吸速度都是在初始时刻最大,随着时间的延长而逐渐减小。由于软煤试样有更短的解吸路径和更多的解吸通道,所以,在吸附平衡压力相同、外加水分含量相近的情况下,软煤瓦斯解吸速度始终大于硬煤;外加水分的进入减少了软硬煤瓦斯解吸通道,随着外加水分含量的增加,软硬煤瓦斯解吸速度均呈减小趋势。当软煤试样解吸至 20 min 后,吸附平衡压力及外加水分对解吸速度的影响较小,随后,不同实验条件下的瓦斯解吸速度大致相同。然而,对于硬煤试样,该时间节点约延长至 30 min。该结果也与前一节所分析的外加水分对软煤瓦斯解吸抑制效应强于硬煤相吻合。



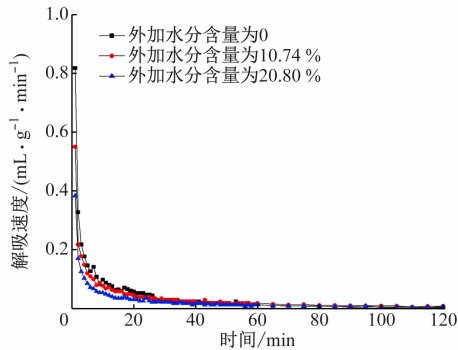
(a) 吸附平衡压力为 0.75 MPa



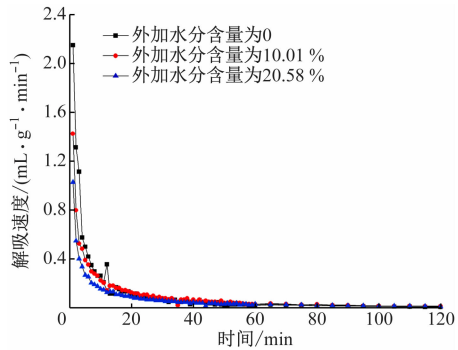
(b) 吸附平衡压力为 2.80 MPa

图4 不同吸附平衡压力、外加水分含量条件下软煤的瓦斯解吸速度

Fig. 4 Gas desorption speed of soft coal under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content



(a) 吸附平衡压力为 0.75 MPa



(b) 吸附平衡压力为 2.80 MPa

图 5 不同吸附平衡压力、外加水含量条件下硬煤的瓦斯解吸速度

Fig. 5 Gas desorption speed of hard coal under different adsorption equilibrium pressure and external moisture content

2.3 外加水对软硬煤扩散系数的影响

扩散系数是表征外加水对软硬煤扩散能力影响的重要参数,其计算公式为^[22]

$$\frac{V_t}{V_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2t}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

式中: V_t 为 t 时刻瓦斯的累计解吸量, mL/g; V_∞ 为 t 趋向于无穷大时, 瓦斯的极限解吸量, mL/g; n 为基数项数; D 为扩散系数, m^2/s ; r_0 为煤颗粒平均半径, m 。

对式(2)进行简化^[23], 得

$$\ln\left(1 - \frac{V_t}{V_\infty}\right) = -\lambda t + B \quad (3)$$

式中 λ 和 B 为实验拟合系数, $\lambda = \frac{D\pi^2}{r_0^2}$ 。

将实验所获得的 $\ln\left(1 - \frac{V_t}{V_\infty}\right)$ 与对应的时间 t 进行线性拟合, 即可得到扩散系数。不同吸附平衡压力、不同外加水条件下软硬煤瓦斯扩散系数的计算值见表 2。由表 2 可知, 吸附平衡压力、外加水含量对软硬煤瓦斯扩散系数影响显著; 在吸附平衡压力相同、外加水含量相近的情况下, 软煤的扩散系数大于硬煤; 同一吸附平衡压力下软硬煤的瓦斯扩散系数均随着外加水含量的增大而减小, 如吸

附平衡压力为 1.4 MPa 时, 硬煤外加水含量从 0 增加至 10.78%、22.06% 的过程中, 扩散系数从 $2.5294 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 分别减小至 $1.6449 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1.0571 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; 相同吸附平衡压力下, 软煤外加水含量从 0 增加至 8.85%、21.41% 的过程中, 扩散系数从 $2.8479 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 分别减小至 $2.0653 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1.2235 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 2 软硬煤瓦斯扩散系数计算值

Table 2 Calculation values of gas diffusion coefficient of soft and hard coal

压力/ MPa	硬煤		软煤	
	外加水 含量/%	$D/$ ($10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	外加水 含量/%	$D/$ ($10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0.75	0	1.791 1	0	2.383 7
	10.74	1.426 8	10.68	1.684 9
	20.80	0.893 6	18.89	1.136 8
1.4	0	2.529 4	0	2.847 9
	10.78	1.644 9	8.85	2.065 3
	22.06	1.057 1	21.41	1.223 5
2.1	0	2.617 9	0	3.660 7
	10.77	2.146 2	11.45	2.297 8
	20.07	1.213 6	19.82	1.603 4
2.8	0	3.002 5	0	4.216 5
	10.01	2.404 5	7.80	2.772 0
	20.58	1.415 3	20.76	1.799 9

3 结论

(1) 外加水含量、吸附平衡压力相同时, 软煤瓦斯解吸量大于硬煤; 随着外加水含量的增大, 软硬煤的瓦斯解吸量均减小; 相同条件下, 软煤的瓦斯解吸量始终大于硬煤; 外加水对软硬煤瓦斯解吸均起到了抑制作用, 但对软煤的瓦斯解吸抑制效应强于硬煤。

(2) 不同吸附平衡压力、外加水含量条件下, 软硬煤的瓦斯解吸速度都是在初始时刻最大, 随着时间的延长及外加水含量的增加, 呈现出减小趋势; 吸附平衡压力相同、外加水含量相近的情况下, 软煤瓦斯解吸速度始终大于硬煤。

(3) 吸附平衡压力、外加水含量对软硬煤瓦斯扩散系数影响显著; 吸附平衡压力相同、外加水含量相近的情况下, 软煤的扩散系数大于硬煤; 同一吸附平衡压力下软硬煤的瓦斯扩散系数均随着外加水含量的增大而减小。

参考文献(References):

[1] 据宜文, 林红, 李小诗, 等. 煤岩构造变形与动力变质

- 作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 158-166.
- JU Yiwen, LIN Hong, LI Xiaoshi, et al. Tectonic deformation and dynamic metamorphism of coal[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 158-166.
- [2] 姜波, 琚宜文. 构造煤结构及其储层物性特征[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 27-29.
- JIANG Bo, JU Yiwen. Tectonic coal structure and its petrophysical features [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 27-29.
- [3] 柳先锋, 宋大钊, 何学秋, 等. 微结构对软硬煤瓦斯吸附特性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 155-161.
- LIU Xianfeng, SONG Dazhao, HE Xueqiu, et al. Effect of microstructures on methane adsorption characteristics of soft and hard coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 155-161.
- [4] 于军. 不同软硬煤的结构差异性研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(12): 5-8.
- YU Jun. Research on structural difference for different soft and hard coal samples[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 5-8.
- [5] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 中梁山南矿构造煤吸附孔分形特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 134-139.
- SONG Xiaoxia, TANG Yuegang, LI Wei, et al. Fractal characteristics of adsorption pores of tectonic coal from Zhongliangshan southern coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 134-139.
- [6] 顾熠凡, 王兆丰, 戚灵灵. 基于压汞法的软、硬煤孔隙结构差异性研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 64-67.
- GU Yifan, WANG Zhaofeng, QI Lingling. Study on porous structure difference of soft coal and hard coal based on mercury intrusion method[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 64-67.
- [7] 乔伟. 软、硬煤结构特征与吸附特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 133-137.
- QIAO Wei. Study on structure characteristics and adsorption features of soft and hard coal[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 133-137.
- [8] 邢萌, 傅永帅. 东曲矿软硬煤瓦斯吸附特性对比研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 14-17.
- XING Meng, FU Yongshuai. Comparison research on methane adsorption property of soft and hard coals in Dongqu Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1): 14-17.
- [9] 田敬, 林晓英, 苏现波, 等. 软硬煤孔隙结构特征及对变压解吸规律的影响[J]. 煤矿安全, 2018, 49(12): 21-26.
- TIAN Jing, LIN Xiaoying, SU Xianbo, et al. Pore structure of soft and hard coal and its influence on gas adsorption characteristics under variable pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 21-26.
- [10] 刘彦伟, 潘保龙, 张加琪, 等. 不同粒度软煤与硬煤吸附性能差异性研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 52-55.
- LIU Yanwei, PAN Baolong, ZHANG Jiaqi, et al. Study on difference of gas absorption between soft and hard coal with different grain sizes[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 52-55.
- [11] 刘彦伟, 刘明举. 粒度对软硬煤粒瓦斯解吸扩散差异性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 579-587.
- LIU Yanwei, LIU Mingju. Effect of particle size on difference of gas desorption and diffusion between soft coal and hard coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 579-587.
- [12] 岳基伟, 岳高伟, 曹汉生. 基于吸附层厚度理论的软、硬煤吸附机理解析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 653-661.
- YUE Jiwei, YUE Gaowei, CAO Hansheng. Mechanism analysis on adsorption properties of soft and hard coal based on adsorption layer thickness theory[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 653-661.
- [13] LI Quanguai, LIN Baiquan, ZHAI Cheng. The effect of pulse frequency on the fracture extension during hydraulic fracturing [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 296-303.
- [14] YAN Fazhi, LIN Baiquan, ZHU Chuanjie, et al. A novel ECBM extraction technology based on the integration of hydraulic slotting and hydraulic fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 571-579.
- [15] 赵东, 赵阳升, 冯增朝. 结合孔隙结构分析注水对煤体瓦斯解吸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 686-692.
- ZHAO Dong, ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao. Analysis of effect of water injection on methane desorption in coal combining pore structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 686-692.
- [16] 陈攀. 水分对构造煤瓦斯解吸规律影响的实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- CHEN Pan. Experimental study on influence of moisture on gas desorption laws of tectonic coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [17] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 547-555.
- ZHAO Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng.

- Experimental study of effects of high pressure water injection on desorption characteristic of coal-bed methane (CBM) [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 547-555.
- [18] 陈向军,程远平,王林. 外加水分对煤中瓦斯解吸抑制作用试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 296-301.
- CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping, WANG Lin. Experimental study on the inhibition of injection water to the gas desorption of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 296-301.
- [19] 李耀谦,刘国磊. 煤中水含量对瓦斯吸附与解吸特性影响规律研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(6): 76-77.
- LI Yaoqian, LIU Guolei. Research of influence law of water content in coal to gas adsorption and desorption characteristics[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(6): 76-77.
- [20] 肖知国,孟雷庭. 压力水影响煤层瓦斯解吸的试验研究及机理分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(1): 122-127.
- XIAO Zhiguo, MENG Leiting. Experimental study and mechanism analysis of impact of pressure water on coal seam gas desorption[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 122-127.
- [21] 毋首杰. 古汉山矿二₁ 煤瓦斯吸附解吸特征及对瓦斯抽采的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- WU Shoujie. The characteristics of gas adsorption/desorption from 2₁ coal and its influence on gas extraction in Guhanshan Coal Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2018.
- [22] 陈向军,程远平,何涛,等. 注水对煤的瓦斯扩散特性影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 781-787.
- CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping, HE Tao, et al. Water injection impact on gas diffusion characteristic of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 781-787.
- [23] 康博. 低温环境煤的瓦斯解吸特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- KANG Bo. Gas desorption characteristics of coal in low temperature environment [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.