

王倩,卢明玥,王维忠. 干湿循环对含瓦斯煤渗透率的影响[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(3): 20-23.
文章编号: 1008-4495(2018)03-0020-04

干湿循环对含瓦斯煤渗透率的影响

王倩¹, 卢明玥¹, 王维忠²

(1. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了研究干湿循环对含瓦斯煤渗透率的影响, 采用自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置, 对原煤试样进行了不同平均有效应力、不同干湿循环次数条件下的渗流实验。研究表明: 在恒定温度和干湿循环次数下, 煤样的渗透率随平均有效应力的增加呈对数函数关系减小; 平均有效应力对渗透率的敏感性系数随煤样干湿循环次数的增加而增加, 随平均有效应力的增加而减小; 在恒定温度和平均有效应力下, 随煤样干湿循环次数的增加, 煤样渗透率增加, 且煤样渗透率和干湿循环次数关系可以用线性函数表示; 干湿循环次数越多, 煤样的吸水性越强, 饱和含水率越大。

关键词: 原煤; 干湿循环; 平均有效应力; 渗透率; 吸水率

中图分类号: TD712+.51 **文献标志码:** A

Effect of Dry-wet Circulation on Permeability of Coal Containing Gas

WANG Qian¹, LU Mingyue¹, WANG Weizhong²

(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the effect of dry-wet circulation on permeability of coal containing gas, by using the self-developed coal containing gas thermal-hydrological-mechanical (THM) coupling experimental equipment, an experimental study about the permeability of raw coal was made under different dry-wet cycles and different average effective stresses. The research results showed that: under the condition of a constant temperature and dry-wet cycles, with the increase of average effective stress, the permeability of coal samples showed a logarithmic function decreases. The sensitivity coefficient of average effective stress to permeability increased with the increase of coal sample dry-wet cycles, decreased with the increase of average effective stress. Under the condition of a constant temperature and an average effective stress, the permeability of coal samples increased with the increase of coal sample dry-wet cycles, and the relationship between coal sample permeability and dry-wet cycle can be expressed by linear function. The more dry-wet cycles, the stronger the water absorption of the coal sample, the greater the saturation moisture content.

Keywords: raw coal; dry-wet cycle; average effective stress; permeability; water absorption

煤矿地下水位随降雨、季节、水库蓄排水等变化而变化, 工作面除尘、降温等不断洒水和风干, 以及煤层注水或水压致裂等都是干湿循环的过程。干湿循环会劣化煤层的物理力学参数, 影响煤层的渗透系数。随着煤炭开采不断深入, 煤矿开采环境更为恶劣, 在高地应力、高地温、高岩溶水压和采矿扰动“三高一扰动”^[1]情况下, 干湿循环对煤层性质的影响被放大, 控制措施不到位甚至会引发矿井灾害。

目前我国已有许多矿井进入深部开采, 因此开展干湿循环过程对煤岩的力学性质和渗透特性影响的研究有重要的现实意义。

国内外学者已经做过不少干湿循环对砂岩、页岩和土的力学性质的影响研究, 得出了一些规律。其中具有代表性的有: 刘新荣等^[2-4]做了干湿循环下砂岩的各种力学实验, 表明砂岩的抗压强度、抗剪强度、抗拉强度、黏聚力、弹性模量、内摩擦角都随干湿循环次数的增加而减小; 邓华峰等^[5-7]对三峡库区砂岩进行了水岩作用实验, 指出在考虑浸泡-风干循环耦合作用和水压力升降变化下, 砂岩的抗压强度、抗拉强度、断裂韧度等力学参数具有明显的劣化趋

收稿日期: 2017-07-14; 2017-10-27 修订

基金项目: 国家自然科学基金项目(51434003)

作者简介: 王倩(1984—), 女, 重庆人, 硕士, 助教, 研究方向为煤矿安全。E-mail: qian.wang.0921@qq.com.

势,而且比单纯的浸泡或者干、湿循环作用的损伤效应更明显;杨和平等^[8]研究了荷载作用下干湿循环对膨胀土的膨胀变形和强度变化规律的影响,得到荷载作用对干湿循环的膨胀土的膨胀幅度和强度衰减有明显的抑制作用;Hales,姚华彦等^[9-10]对岩样进行了干湿循环实验,发现干湿循环对岩石产生不可逆的渐进性劣化损伤效应。上述研究都集中在砂岩、页岩和土等方面,而干湿循环对煤的影响的研究鲜有报道,尤其是干湿循环对煤渗透率影响的研究更少。研究干湿循环对煤的渗透性影响,可对煤与瓦斯安全高效开采起到一定的指导作用。

1 实验方法

1.1 煤样的采集和制备

实验所用的煤样取自南川宏能煤业(原半溪矿)矿井西翼 K₁ 煤层,宏能煤业矿井受水害影响程度极为复杂,矿井时有突水,采掘工程及矿井安全受到水害威胁。煤层受突水影响,存在干湿循环的变化过程,因此将此煤层作为实验研究对象。将原煤制备成尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times (100 \pm 0.25) \text{ mm}$ 标准试样。煤样工业分析结果如表 1 所示。

表 1 煤样工业分析结果

水分 $M_{\text{ad}}/\%$	灰分 $A_{\text{ad}}/\%$	挥发分 $V_{\text{ad}}/\%$	固定碳 $FC_{\text{ad}}/\%$
0.75	12.31	13.01	73.93

1.2 平均有效应力和渗透率的计算公式

根据 Karl Terzaghi^[11]的研究,可用有效应力来表示煤储层所受荷载。根据修正的 Terzaghi 有效应力公式,煤储层骨架所受有效应力的计算公式^[12]为:

$$\begin{cases} \sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_c) - \frac{1}{2}(p_1 + p_2) & (1) \\ \sigma_a = \sigma'_a + p_1 & (2) \\ \sigma_c = \sigma'_c + \frac{1}{2}(p_1 + p_2) & (3) \end{cases}$$

式中: σ_0 为平均有效应力,MPa; σ_a 为轴向应力,MPa; σ'_a 为轴向有效应力,MPa; σ_c 为围压,MPa; σ'_c 为有效围压,MPa; p_1 、 p_2 分别为进口、出口瓦斯压力,MPa。

假设实验中瓦斯在煤岩中的渗透过程为等温过程,线弹性阶段的煤岩中瓦斯渗流符合达西定律,则可得煤岩气测平均渗透率 K 的计算公式^[13-15]为:

$$K = \frac{2Q\mu p_a L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (4)$$

式中: K 为渗透率, m^2 ; Q 为瓦斯渗流流量, m^3/s ; μ 为瓦斯绝对黏度,取 $1.12 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[13]; p_a 为标准大气压力,Pa; L 为试件长度,m; p_1 为试件进口瓦斯压力,Pa; p_2 为试件出口瓦斯压力,Pa; A 为试件渗透有效面积, m^2 。

1.3 实验方案与步骤

根据 1 次干湿循环的定义:“将准备好的煤样按照 SL 264—2001《水利水电工程岩石实验规程》自由吸水法的步骤,制成饱水煤样试件后,取出晾干放入真空烘箱中以 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度烘干至恒重,冷却备用”。

采用含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置进行实验^[13],实验加载过程中轴压加载速率为 0.1 kN/s ,围压加载速率为 0.05 MPa/s ,具体实验参数和结果见表 2。实验全过程由计算机及监控系统控制,包括数据采集和记录。

表 2 煤样干湿循环实验参数和结果

轴压 σ_a/MPa	围压 σ_c/MPa	瓦斯压力		平均有效应力 σ_0/MPa	煤样渗透率 $K/(10^{-17} \text{ m}^2)$				
		进气压力 p_1/MPa	出气压力 p_2/MPa		干湿循环 1 次	干湿循环 3 次	干湿循环 5 次	干湿循环 7 次	干湿循环 9 次
2.2	1.3	1.1	0.1	1.0	3.08	3.54	3.94	4.43	4.86
3.1	1.6	1.1	0.1	1.5	2.41	2.70	3.09	3.83	3.90
4.0	1.9	1.1	0.1	2.0	2.13	2.43	2.73	3.23	3.32
4.9	2.2	1.1	0.1	2.5	1.94	2.24	2.48	2.70	2.76

具体实验步骤如下:

1) 煤样安装。将干湿循环 1 次的煤样装入实验装置的压力室内,用热缩管将煤样密封,安装横向引伸计,再安装好装置的其余部分。

2) 抽真空。煤样装入渗流装置后,关闭进气阀,打开出气阀,抽真空 12 h,除去煤样中的杂质气体。

3) 瓦斯吸附。将围压加载到 1.3 MPa ,轴压加载到 2.2 MPa ,关闭出气阀,打开瓦斯进气阀,调节瓦斯进气口压力为 1.1 MPa ,吸附 12 h。

4) 瓦斯渗透实验。按表 2 实验参数进行加载路径控制,每次加载到目标有效应力时,关闭出气阀,吸附 2 h 后,再打开出气阀,待瓦斯流量稳定时记录

瓦斯流量值,从而得到煤样干湿循环1次后,在1.0、1.5、2.0、2.5 MPa不同有效应力下的瓦斯流量。

5)取出煤样。将煤样完好取出,进入下一轮干湿循环处理后,继续重复以上步骤,测得干湿循环3、5、7、9次的煤样渗透率。

2 实验结果及分析

2.1 煤样渗透率与平均有效应力的关系

本实验使用3个煤样进行重复实验,实验结果及规律大体相同,鉴于篇幅所限,只列出1号煤样实验结果进行分析,实验参数和结果见表2。对表2中所得实验数据进行处理,可得到煤样渗透率与平均有效应力的关系曲线,如图1所示。

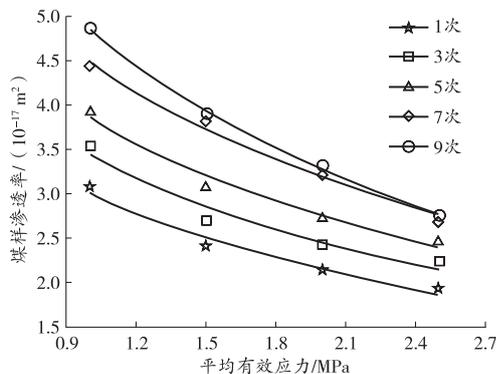


图1 煤样渗透率与平均有效应力的关系曲线

对图1中的曲线进行拟合,可得到拟合方程,如表3所示。

表3 煤样渗透率与平均有效应力的拟合方程

干湿循环次数 N	K 与 σ_0 拟合方程	相关系数 R^2
1	$K = -1.2 \ln \sigma_0 + 3.02$	0.974 5
3	$K = -1.4 \ln \sigma_0 + 3.44$	0.951 6
5	$K = -1.6 \ln \sigma_0 + 3.86$	0.976 4
7	$K = -1.9 \ln \sigma_0 + 4.49$	0.987 9
9	$K = -2.2 \ln \sigma_0 + 4.85$	0.998 8

从图1及表3中可以看出,在相同温度和干湿循环次数的情况下,煤样渗透率随平均有效应力的增大呈负对数关系减小。这是由于气体在煤岩体中流动的难易程度主要取决于煤岩体中裂隙和有效孔隙等渗流通道的发育程度,渗流通道越发育对气体在煤岩体中流通越有利,然而有效应力的增加,会使裂隙及部分孔隙闭合或受压变形,从而使瓦斯运移通道减小,导致渗透率变小。

2.2 平均有效应力敏感性系数与干湿循环次数的关系

为了量化平均有效应力 σ_0 对煤样渗透率 K 的影响程度,定义平均有效应力对渗透率的敏感性系数为:“当干湿循环次数和温度恒定,平均有效应力每升高一个单位所引起的煤渗透率的相对变化量”,即:

$$\eta = - \frac{dK}{d\sigma_0} \quad (5)$$

式中: η 为平均有效应力对渗透率的敏感性系数, m^2/MPa ; dK 为渗透率变化量, m^2 ; $d\sigma_0$ 为平均有效应力变化量, MPa 。

由式(5)可知: η 值越大表明煤样渗透率对平均有效应力变化越敏感,在相同平均有效应力变化幅度下,煤渗透率的变化值越大。为确定敏感性系数 η ,对图1曲线进行拟合,将拟合函数求导结果代入式(5),即可得到敏感性系数 η 与平均有效应力 σ_0 的函数关系曲线,如图2所示。

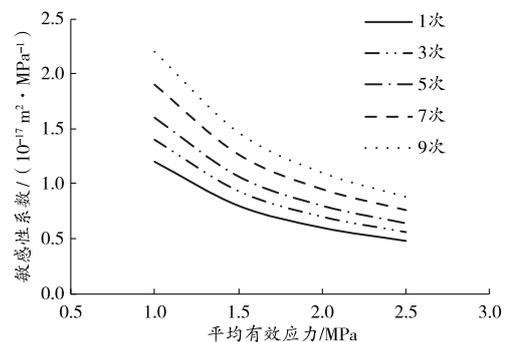


图2 敏感性系数与平均有效应力的关系曲线

从图2可以看出,随平均有效应力的增加,平均有效应力对渗透率的敏感性系数减小,这是由于煤样在随平均有效应力增加过程中孔隙裂隙逐渐被压实,可压缩孔隙裂隙量减少,压缩难度增大;而在相同平均有效应力下,随干湿循环次数的增加,平均有效应力对渗透率的敏感性系数 η 增加,说明干湿循环次数越多,渗透率随平均有效应力的变化程度越大,平均有效应力对渗透率影响越明显。干湿循环次数增加,煤样劣化程度加大,孔隙裂隙增多,煤骨架抗压能力减弱,受载变形增大,因此干湿循环次数越多,平均有效应力对煤样渗透率的影响越明显,敏感性越高。

2.3 煤样渗透率与干湿循环次数的关系

对表2中所得实验数据进行处理,可得到煤样渗透率与干湿循环次数的关系曲线,如图3所示。

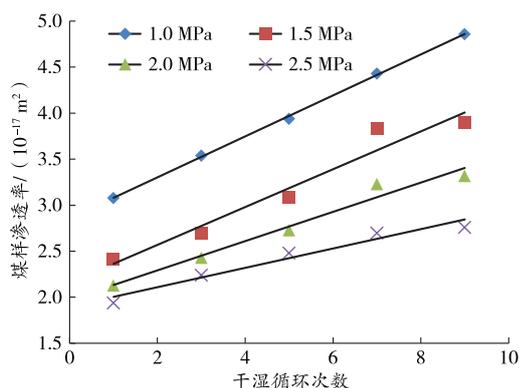


图3 煤样渗透率与干湿循环次数的关系曲线

从图3中可以看出,在相同平均有效应力情况下,煤样渗透率随干湿循环次数增加呈线性函数关系增加,线性函数关系表达式为:

$$K = aN + b \quad (6)$$

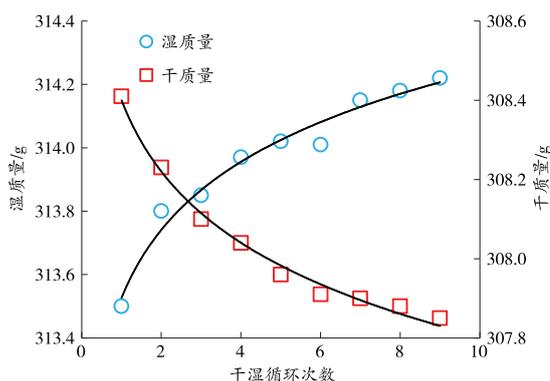
式中: a 和 b 为拟合系数,分别代表渗透率变化率和初始渗透率值, a 、 b 大小受平均有效应力 σ_0 控制,随着 σ_0 增加, a 、 b 都减小; N 为干湿循环次数。

在相同平均有效应力下,煤样渗透率随干湿循环次数呈线性增加,说明干湿循环对煤有劣化损伤作用,能形成新的孔隙裂隙,而孔隙裂隙是控制瓦斯运移的主要通道,干湿循环次数越多,产生的新孔隙裂隙越多,渗透率也就越大。但干湿循环产生的新孔隙裂隙随平均有效应力增加,被压密程度增大,平均有效应力对干湿循环引起煤样渗透率增加的效果具有削弱效应,平均有效应力越大削弱程度越大,所以煤样渗透率变化率 a 和初始渗透率 b 都随有效应力 σ_0 的增加而减小。

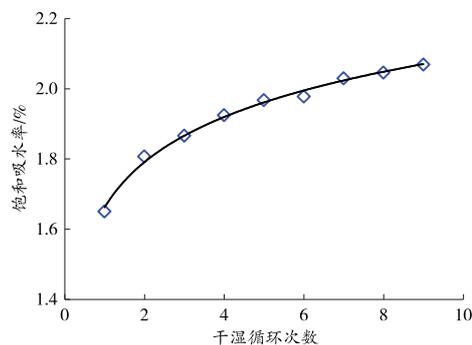
干湿循环对煤样有一定的损伤累积效应,可用水岩相互作用来解释这个劣化过程。水岩物理作用方面,浸水过程中水分通过孔隙、裂隙向内渗入,在裂隙端点处产生楔劈作用,容易诱发细微裂隙扩展、发育,而烘干过程水分蒸发,温度变化和水压力变化也会产生次生孔隙;水岩化学作用方面,浸水过程中煤样可溶物质被水溶解,裂缝中微小矿屑被水带走,从而增大了煤样的孔隙率及渗透性,同时煤岩中裂隙有吸水膨胀现象^[16],裂隙进一步发育,产生新的溶蚀裂隙面。故干湿循环引起煤样孔隙裂隙增加,继而引起煤样渗透率增大。

2.4 煤样吸水率与干湿循环次数的关系

实验过程中每次进行干湿循环前后都会对煤样进行称重,并计算出煤样每次干湿循环后的吸水率,得到干湿循环次数与煤样干、湿质量变化及饱和吸水率的关系曲线,如图4所示。



(a) 干湿循环次数与煤样干、湿质量关系



(b) 干湿循环次数与饱和吸水率关系

图4 干湿循环次数与煤样干、湿质量变化及吸水率的关系曲线

从图4可以看出,随干湿循环次数的增加,煤样的吸水性增大,煤样饱水质量增加,而烘干质量却有所减小。这是由于干湿循环作用不断侵蚀劣化煤样,产生新的孔隙裂隙,同时孔隙裂隙中存在一些可溶的原生矿物质和微小矿屑,在干湿循环过程中不断被水带走,从而使煤样的吸水空间增大,吸水量增多,饱和吸水率增大。

3 结论

- 1) 在恒定温度和干湿循环次数下,煤样的渗透率随平均有效应力增加呈对数函数关系减小。
- 2) 平均有效应力对煤样渗透率的敏感性系数随干湿循环次数的增加而增加,随平均有效应力的增加而减小。
- 3) 在恒定温度和平均有效应力下,随着煤样干湿循环次数的增加,煤样渗透率增大,在本实验干湿循环次数范围内,煤样渗透率和干湿循环次数关系可以用线性关系表示。
- 4) 干湿循环次数越多,煤样的吸水性越强,饱和吸水率越大。

参考文献:

[1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.

(下转第28页)

- [5] 高延法,黄万朋,刘国磊,等. 覆岩导水裂缝与岩层拉伸变形量的关系研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(3):301-306.
- [6] 杨倩. 采动影响下煤层顶板承压含水层水位变化及覆岩变形与破坏规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- [7] 刘英锋,王世东,王晓蕾. 深埋特厚煤层综放开采覆岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报,2014,39(10):1970-1976.
- [8] 张雁. 导水裂缝带研究成果及研究方向[J]. 煤炭技术,2015,34(2):121-122.
- [9] 黄欢,姬亚东. 运用偏最小二乘回归法计算导水裂缝带高度[J]. 矿业安全与环保,2017,44(1):40-44.
- [10] 赵子浩,刘进晓,王来河,等. 近水平煤层覆岩导水裂隙带高度预计与实测[J]. 矿业安全与环保,2017,44(2):66-69.
- [11] 赵宗泽. 胡家河矿采掘工作面强矿压防治与监测[D]. 邯郸:河北工程大学,2015.
- [12] 车禹恒,朱志浩. 特厚煤层工作面长度对矿压显现的影响[J]. 矿业安全与环保,2016,43(3):81-85.
- [13] 杨军伟,赵忠义,陈才贤,等. 深井强冲击矿压煤层巷道控制技术数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保,2017,44(3):49-52.
- [14] 余学义,许文强,刘俊杰,等. 亭南煤矿深埋大采高综采工作面矿压规律研究[J]. 煤炭工程,2015,47(8):80-83.
- [15] 滕永海. 综放开采导水裂缝带的发育特征与最大高度计算[J]. 煤炭科学技术,2011,39(4):118-120.
- (责任编辑:李 琴)

=====

(上接第23页)

- [2] 刘新荣,傅晏,王永新,等. (库)水—岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的实验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(9):1298-1302.
- [3] 傅晏,刘新荣,张永兴,等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质,2009,36(6):54-58.
- [4] 刘新荣,傅晏,王永新,等. 水—岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学,2009,30(3):613-616.
- [5] 邓华锋. 库水变幅带水—岩作用机理和作用效应研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [6] 邓华锋,李建林,朱敏,等. 饱水—风干循环作用下砂岩强度劣化规律实验研究[J]. 岩土力学,2012,33(11):3306-3312.
- [7] 邓华锋,李建林,刘杰,等. 浸泡—风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(9):1620-1626.
- [8] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1936-1941.
- [9] HALE P A, SHAKOOR A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2003, 9(2): 117-130.
- [10] 姚华彦,张振华,朱朝辉,等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的实验研究[J]. 岩土力学,2010,31(12):3704-3708.
- [11] KARL TERZAGHI. Record, Principles in soil mechanics[N]. Engineering News, 1925, 95: 832-836.
- [12] YIN G Z, JIANG C B, XU J, et al. An Experimental Study on the Effects of Water Content on Coal bed Gas Permeability in Ground Stress Fields [J]. Transport in Porous Media, 2012, 94: 87-99.
- [13] 蒋长宝,段敏克,尹光志,等. 不同含水状态下含瓦斯原煤加卸载试验研究[J]. 煤炭学报,2016,41(9):2230-2237.
- [14] JIANG C B, DUAN M K, YIN G Z, et al. Experimental study on seepage properties, AE characteristics and energy dissipation of coal under tiered cyclic loading [J]. Engineering Geology, 2017, 211: 114-123.
- [15] 黄学满. 煤结构异性对瓦斯渗透特性影响的实验研究[J]. 矿业安全与环保,2012,39(2):1-3.
- [16] 闫立宏. 水对煤岩力学性质的影响实验研究[C]//中国煤炭学会第六届青年科技学术研讨会论文集. 北京:煤炭工业出版社,2000:77-80.
- (责任编辑:逢锦伦)