

# 煤层注水时有效围压对煤体渗透性的影响

吕品，王志生，黄鹂

(安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室，安徽 淮南 232001)

**摘要：**针对煤层注水渗流过程中，煤体所受的有效围压对煤体渗透性影响很大的问题，通过自行研制的煤岩样渗透率测试系统，对有效围压与煤样渗透率之间作用规律进行了试验测试分析，得到了试验煤样渗透率与有效围压之间相互影响的拟合方程，以及煤样渗透率对有效围压的敏感性系数。结果表明，随着有效围压的增加，不同煤样的渗透率均规律下降，且满足一元二次多项式的变

化规律，不同煤样渗透率对有效围压变化的敏感性相似。

**关键词：**煤层注水；有效围压；渗透率；渗流；敏感系数

中图分类号：TD313 文献标志码：A 文章编号：0253-2336(2012)03-0046-03

## Effective Surrounding Pressure Affected to Permeability of Coal Mass During Seam Water Injection

LÜ Pin, WANG Zhi-sheng, HUANG Li

(Province and MOE Joint Key Lab of Mine Safety and High Efficient Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** According to the problem of the stress on the coal mass highly affected to the permeability of coal mass during the seam water injection and vadose process, with a self researched and developed penetration rate measuring system of coal and rock samples, a test measuring and test analysis was conducted on the function law between the effective surrounding pressure and the coal sample penetration rate. A fitting equation of the mutual influences between the coal sample penetration rate and the effective surrounding pressure was obtained and the coal sample penetration rate to the sensitive coefficient of effective surrounding pressure also was obtained. The results showed that with the effective surrounding pressure increased, the penetration rate of different coal samples would be decreased in order and the one-place secondary polynomial variation law could be met. The penetration rate of different coal samples would be similar to the sensitivity of effective surrounding pressure variation.

**Key words:** seam water injection; effective surrounding pressure; penetration rate; vadose; sensitive coefficient

压力水在煤体内的渗流过程中，煤体有效围压的改变会导致水渗流特性的变化，而渗流特性的变化又进一步影响煤体的应力场，煤体与渗流之间这种相互联系又相互制约的关系被称为渗流场与应力场的耦合效应。在煤层注水过程中，渗透率是反映煤层注水难易程度的重要参数，在固流耦合作用下影响流体在煤体中渗流的因素众多，其中煤体孔隙、裂隙的扩展对渗流的影响很大，而煤体有效围压的变化会直接引起孔隙、裂隙的变化，因此，研究有效围压对煤体渗透性的影响显得很有必要。笔

者进行了有效围压作用下煤体渗透率变化规律的试验研究，将测试煤样置于渗透率测试系统的夹持器中，然后施加不同的有效围压，在孔隙水压一定的情况下，研究分析试验煤样渗透率随有效围压的变化规律，并对煤样的围压敏感性进行分析，为煤层注水防尘技术参数的合理确定提供可靠的依据。

### 1 试验测试原理及煤样制备

#### 1.1 试验测试原理

该试验主要测试煤样在不同有效围压状态下渗

收稿日期：2011-10-13；责任编辑：王晓珍

基金项目：国家级安全工程专业教学团队资助项目（高教函2012[12]）；安徽省科技攻关计划重大资助项目（07010301021）

作者简介：吕品（1963—），男，安徽来安人，教授。Tel: 13085548953, E-mail: PLV@aust.edu.cn

网络出版时间：2012-03-12 04:35:00；网络出版地址：[http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120312.1635.201203.46\\_012.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120312.1635.201203.46_012.html)

引用格式：吕品，王志生，黄鹂. 煤层注水时有效围压对煤体渗透性的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (3): 46-48, 52.

透率的大小，并定性分析渗透率随有效围压的变化规律。为此自行研制了煤岩样渗透率测试系统，该系统主要由煤样夹持器、恒压泵组成的注水调节系统、有效围压控制调节系统、数据采集处理分析系统等组成。煤岩样渗透率测试系统原理如图1所示。

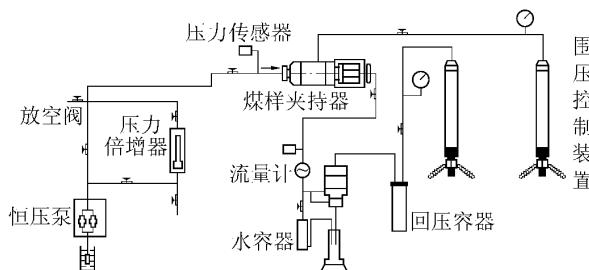


图1 渗透率测试系统原理

首先将按一定要求制作的  $\phi 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的煤样放入研制的夹持器中，并按测试系统原理图，用耐高压不锈钢管将夹持器、恒压泵、围压控制装置连接起来，构成试验测试系统。试验用驱替介质为普通自来水，通过恒压泵注入夹持器的煤样中，并通过恒压泵来调节夹持器入口需要的不同注水压力。在夹持器入口、出口安装有压力传感器，可以对夹持器入口、出口压力的变化精确测定，在夹持器出口管路上还装有流量计，以便对夹持器出口流量的变化进行测试分析。煤样的有效围压是通过手动加压泵和围压控制装置进行加压调节的，并实现恒定加压。通过数据采集控制器对系统测试参数进行采集，由相应的计算机分析软件进行计算分析，并依据相关行业测试规范得出煤样的渗透率值。

## 1.2 煤样制备

该试验煤样分别取自淮南矿区潘集一矿11213工作面、潘北煤矿11218及12128工作面，煤样编号分别为S1、S2和S3。由于这3个地点的煤比较松软，用钻取法钻取煤芯较困难，所以采用人工制样的方法制取煤芯。首先将现场采集的原煤样进行粉碎加工，并筛选至  $\phi 0.25 \text{ mm}$  以下的试验粉煤样，然后将粉煤样置于圆柱形模具中，在压模机上加压至100 MPa，并保持6 h以上，最终制成规格为  $\phi 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的3组试验煤样。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 有效围压对煤样渗透率的影响

利用自行研制的煤岩样渗透率测试系统，对上述3组试验煤样在不同有效围压条件下的渗透率变

化情况进行试验测试，结果见表1。通过对试验测试数据分析，得到了3组试验煤样渗透率随有效围压非线性变化的数学表达式，见表2。

表1 试验煤样渗透率测试结果  $10^{-9} \text{ m}^2$

煤样	不同有效围压下的渗透率							
	4.0 MPa	4.5 MPa	5.0 MPa	5.5 MPa	6.0 MPa	7.0 MPa	8.0 MPa	
S1	0.513 2	0.454 0	0.404 6	0.365 2	0.325 7	0.296 1	0.286 2	
S2	0.227 0	0.167 8	0.128 3	0.088 8	0.079 0	0.049 3	0.039 5	
S3	0.483 6	0.375 0	0.315 8	0.286 2	0.236 9	0.207 2	0.187 5	

表2 试验煤样渗透率与有效围压拟合

煤样编号	拟合曲线方程	相关系数
S1	$K = 0.0176\sigma^2 - 0.2683\sigma + 1.3113$	0.998 8
S2	$K = 0.0153\sigma^2 - 0.2288\sigma + 0.8936$	0.990 5
S3	$K = 0.0236\sigma^2 - 0.3521\sigma + 1.5039$	0.983 4

注: K为渗透率;  $\sigma$ 为有效围压。

此次试验煤样渗透率与有效围压存在一元二次多项式的关系，并且具有很高的拟合精度。在流固耦合试验煤样有效围压与渗透率的关系研究成果中表明<sup>[1-5]</sup>，渗透率与有效围压的非线性关系主要有幂律关系、指数关系和一元二次多项式关系等3种形式。经实测，该试验得到的煤样渗透率与有效围压存在一元二次多项式的关系，也很好地验证了上述结论。分析表2可知，拟合的一元二次表达式包含3个部分，即二次项、一次项和常数项。其中二次项系数值的大小直接影响煤样渗透率的大小；一次项系数值的大小影响渗透率曲线斜率的大小，反映了煤样渗透率随有效围压变化速率的快慢，也反映了煤样的围压敏感程度，同时它还与煤样强度、孔隙特征等物理特性有关；常数项不改变曲线的形状，只改变曲线的位置，与有效围压的变化无关，但反映了煤样固有的本质属性。煤样渗透率与有效围压的拟合曲线如图2所示。由图2可以看出，随着有效围压的增加，煤样的渗透率均呈现下

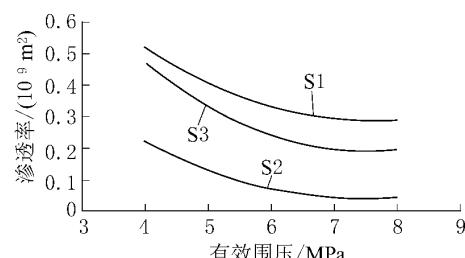


图2 煤样渗透率与有效围压拟合曲线

降趋势，但各煤样渗透率的下降幅度不同。当有效围压由4 MPa增至7 MPa时，S1煤样渗透率减小近42%，而S2、S3煤样渗透率则分别减少78%和51%，充分说明了不同煤样的渗流特性具有一定的差异性，这主要是由于不同煤样个体特性的多样性所致。同时，在渗透率的下降过程中，当有效围压大于7 MPa时，3条曲线都存在1个拐点，在拐点之前曲线斜率较大，表明煤样渗透率随着有效围压的增加减少较快，而在拐点之后曲线趋于平缓，表明煤样渗透率随着有效围压的增加基本不变化。这主要是由于随着有效围压的增加，煤样受压缩，孔隙变小，微裂缝闭合，不利于流体的渗透，致使煤样渗透率减少，但当有效围压增至7 MPa左右时，煤样孔隙基本已被压实，有效围压再升高对渗透率影响较小。

## 2.2 煤样渗透率的围压敏感性分析

考虑到煤样结构的特殊性，以及渗流过程中应力场与渗流场的相互耦合作用特性，渗透率的大小是许多影响因素综合作用的结果，很难对其渗流过程进行明确描述。然而，应力场—渗流场的耦合分析之关键，通常又取决于对渗透率变化规律的深刻认识<sup>[6]</sup>，为此，定义 $C_K$ 为渗透率对有效围压的敏感性系数<sup>[7-8]</sup>，其数学表达式为

$$C_K = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial \sigma} \quad (1)$$

式中， $K_0$ 为煤样的基准渗透率。

通过对影响煤样渗透率的因素进行归一化处理，进一步考察渗透率随有效围压变化的规律。 $C_K$ 可反映渗透率随有效围压的变化趋势， $C_K$ 越大，表明渗透率对平均有效围压的变化越敏感，反之表明渗透率对平均有效围压的变化不敏感。

将表1的数据代入式(1)，可得3组试验煤样敏感系数 $C_K$ 与有效围压的拟合关系数学表达式，见表3。

表3 敏感系数与有效围压的拟合关系表达式

煤样编号	拟合曲线方程	相关系数
S1	$C_K = 26.536\sigma^{-3.4392}$	0.9533
S2	$C_K = 26.780\sigma^{-3.3265}$	0.9706
S3	$C_K = 34.608\sigma^{-3.6435}$	0.9610

由表3可得， $C_K$ 与 $\sigma$ 为幂函数关系，其关系式可表示为

$$C_K = a\sigma^{-b} \quad (2)$$

其中 $a$ 、 $b$ 为拟合参数，若煤样的有效围压由 $\sigma_0$ 变到 $\sigma'$ ，由式(1)变换可得到式(3)：

$$K = K_0 \left(1 - \int_{\sigma_0}^{\sigma'} C_K d\sigma\right) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)，且等式两边对 $\sigma$ 取微分，可得到煤样有效围压从 $\sigma_0$ 变化到 $\sigma'$ 时，煤样渗透率 $K$ 与煤样有效围压之间的关系表达式：

$$K = K_0 \left[1 + \frac{a}{1-b} (\sigma_0^{1-b} - \sigma'^{1-b})\right] \quad (4)$$

如果 $K_0$ 、 $a$ 、 $b$ 已知，可由式(4)求出煤样在不同有效围压条件下的渗透率。

每组煤样渗透率敏感系数 $C_K$ 和有效围压拟合曲线如图3所示。由图3可知，3组试验煤样的 $C_K$ 曲线分布比较接近，再结合表1和图2进一步分析可知，渗透率差异较大的煤样，对有效围压的敏感性系数差异并不大。如S2煤样渗透率较小，但其敏感性系数却较大，说明渗透率对有效围压的敏感系数并不与渗透率的大小完全相关；但随着有效围压的增大，煤样的围压敏感性逐渐减弱。

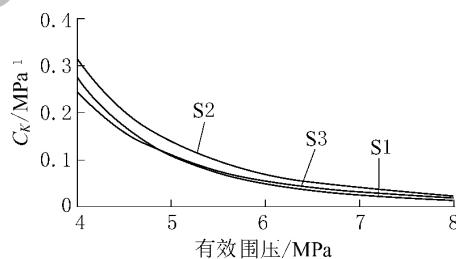


图3 煤样敏感系数与有效围压拟合曲线

## 3 结 论

1) 运用煤岩样渗透率测试系统，对3组不同地点的煤样，在不同有效围压状态下的渗流特性进行了测试试验研究。通过对试验结果分析可以看出，有效围压对渗透率影响很大，并且煤样渗透率与有效围压存在一元二次多项式的函数关系。

2) 定义了渗透率对有效围压的敏感系数 $C_K$ ，将影响渗透率的因素进行归一化处理后，研究发现，不同煤样的围压敏感性比较接近，渗透率对有效围压的敏感系数并不与渗透率的大小完全相关，且可以通过确定围压敏感系数来求得煤样在某有效围压水平下的渗透率。

(下转第52页)

回风巷掘进工作面前方煤体卸压带范围为0~3 m, 集中应力带范围为3.0~7.5 m, 大于7.5 m深度的地方为原始应力带; 水力挤出后, 集中应力带范围推至8 m以外, 卸压带宽度增加了5 m, 大幅提高了抵抗煤体突出的能力。

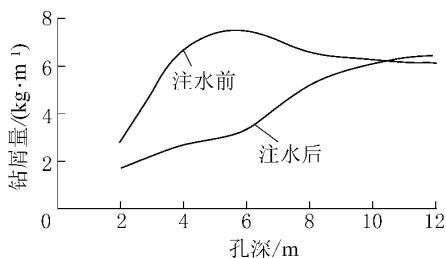


图4 注水前后钻屑量与孔深关系曲线

4) 掘进速度。水力挤出的目的就是快速消突, 达到掘进工作面的快速掘进。因此, 进尺是考察水力挤出措施成功与否的重要指标。根据实践, 水力挤出钻孔施工时间一般5~10 min, 注水时间20~40 min, 注后观察和效检时间按1 h计算, 整个工艺不超过2 h。根据水井头煤矿实际, 每个注水循环需要3个小班, 循环平均进尺约3 m, 月进尺达到75~90 m, 掘进速度提高1倍以上。

## 4 结 论

1) 通过水力挤出技术的研究, 结合水井头煤矿煤层特性, 确定了合理注水压力、钻孔布置、孔深、封孔深度、注水量和注水时间等工艺参数。

2) 水力挤出技术能使工作面前方煤体产生一定的位移, 同时产生大量裂隙, 使工作面前方煤体应力得到释放, 卸压带宽度增加, 集中应力带前移, 增加了抵抗煤体突出的能力。

3) 水井头煤矿实施水力挤出措施后, 工作面前方煤体最大位移为120 mm, 最小位移为60 mm, 且注水过程中未发生瓦斯动力现象, 也未出现效检指标超标现象, 达到了快速消突的目的。

4) 水力挤出措施简单易操作、消突时间短、效检指标超标率低、施工工程量小, 且可以实现正规循环作业, 明显提高掘进速度, 缓解采掘接替紧张的状况。

## 参考文献:

- [1] 刘军. 水力挤出措施合理注水压力研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2005: 1~20.

- [2] WANG Zhao-feng, LIU Jun. Study on the Coal Body Rational Cracking Place of Hydraulic Extrusion Measure for Prevention of Outburst [C] // Progress in Safety Science and Technology (Volume 4). Beijing: Science Press, 2004: 2159~2164.
- [3] 李志强, 王兆丰. 煤巷掘进工作面中高压注水措施消突机理研究 [J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2005, 23(3): 165~169.
- [4] 王兆丰, 李志强. 水力挤出措施消突机理研究 [J]. 煤矿安全, 2004, 35(12): 1~4.
- [5] 黄贵炳, 杨光军. 水力挤出防突技术在牛马司矿业公司的应用 [J]. 煤炭技术, 2009, 28(1): 102~104.
- [6] 王林, 王兆丰. 煤巷水力防突技术在大众煤矿的应用 [J]. 煤炭工程, 2008(6): 71~73.
- [7] 刘建新, 李志强, 李三好. 煤巷掘进工作面水力挤出措施防突机理 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 183~186.
- [8] 许彦鹏, 邱永刚. 水力挤出快速消突措施试验研究 [J]. 煤炭工程, 2008(10): 44~46.
- [9] 梁爱堂, 郑栓龙, 张文清, 等. 寺家庄公司煤巷掘进快速消突技术研究 [J]. 煤炭技术, 2009, 28(10): 83~84.
- [10] 李平. 水力挤出技术在突出煤层中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(8): 45~52.

(上接第48页)

3) 研究所得结论与相关研究结果基本吻合, 对煤层注水防尘技术参数的合理确定具有一定的指导意义, 同时也说明该试验测试系统是可靠的。

## 参考文献:

- [1] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563~1567.
- [2] 彭永伟, 齐庆新, 邓志刚, 等. 考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 509~513.
- [3] 赵阳升. 矿山岩石流体力学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [4] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 410~414.
- [5] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响 [J]. 地质力学学报, 2001, 7(1): 41~44.
- [6] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(S): 1801~1804.
- [7] 程明俊, 许江, 陶云奇, 等. 三向应力下煤层渗透率敏感系数试验与分析 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31(S): 90~93.
- [8] 熊伟. 流固耦合渗流规律研究 [D]. 北京: 中国科学院渗流力学研究所, 2002.