

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.02.018

低渗煤体渗透特性对其加载轴(围)压 变化响应特征试验研究^①

田坤云¹, 李晓丽²

1. 河南工程学院 安全工程学院, 郑州 451191; 2. 郑州工业技师学院, 郑州 451150

摘要: 针对低渗透煤体在轴压及围压变化作用下的渗透率演化规律, 利用自主研发的全应力-应变三轴伺服控温渗流试验系统, 进行了变围压及变轴压条件下煤样渗透率的试验研究. 试验结果表明: (1) 渗透率在轴压及围压变化过程中减小, 围压对渗透率影响高于轴压对渗透率的影响; (2) 围压与渗透率符合 $K = \alpha e^{-0.45\sigma_2}$ 关系式, 拟合系数 α 随着轴压的升高呈依次降低的趋势; (3) 轴压、围压均为 1~10 MPa 的范围内时, 两者和渗透率之间满足 $K = 15.33589e^{-0.45\sigma_2} - 0.27643\sigma_1 e^{-0.45\sigma_2}$ 的函数关系. 研究结果为采动条件下渗透率演化提供理论参考依据, 对现场瓦斯抽放钻孔布置具有一定的实践指导意义.

关键词: 轴压; 围压; 试验研究; 瓦斯; 渗透率

中图分类号: X936

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)02-0135-06

近年来煤炭开采深度不断增加, 煤层透气性也随之愈来愈低. 现有瓦斯抽采资料表明: 我国绝大部分煤层透气性系数较低, 为低透气性煤层, 透气性直接影响着瓦斯的抽采效果, 对瓦斯治理非常关键^[1]. 瓦斯在煤层隙中的扩散及渗流受煤体内部裂隙、所处的应力场、周围温度场等多因素影响^[2]. 煤体应力场环境直接决定了瓦斯渗流规律, 渗透特征很大程度上直接取决于轴向应力或侧向应力.

针对煤体渗透率变化特征, 袁梅等^[3]分析了围压对含瓦斯煤体渗透率演化规律及两次围压升降过程中渗透率最大损失率变化趋势; 李树刚等^[4]的研究成果表明应力加卸载过程中煤样渗流率及体积变化呈现出两个不同阶段的函数关系; 王登科、朱卓慧等^[5-6]认为煤样试件在应力的加卸载过程中, 渗透率随有效应力的变化趋势呈现出近似的“V”型; 黄启翔等^[7]则认为, 试件所加载的围压对渗透性的影响大于其所受载的轴压, 并且渗透率与轴(围)压之间均呈现负指数关系; 祝捷等^[8]研究表明, 加卸载过程中由于受压而发生的煤体形变对瓦斯渗透性的影响作用较大, 形变的大小直接决定了煤体渗透率的大小; C. R. Mckee 等^[9]的研究成果从现场实践方面也证明了煤体渗透率与煤体埋藏深度之间呈负指数关系; 胡耀青等^[10]基于试验表明体积应力变大, 煤的瓦斯渗透率降低; 魏建平^[11]对受载含瓦斯煤渗透性影响因素进行了分析, 发现在温度一定情况下, 煤样渗透率随有效应力的增大而呈现负指数变化关系; 丁宝成等^[12]研究表明: 在相同围压条件下, 煤样渗透率随孔隙压力增大先减小后增大, 变化曲线呈二次函数关系; 王广荣等^[13]研究表明渗透率随围压的增大而减小, 渗透率在应力-应变峰值后呈现急剧上升的趋势; Rongkun Pan 等^[14]对煤样不同层理方向进行了加卸载, 发现层理结构对煤层中气体渗流规律影响很大, 加载过程裂纹破坏很难在卸载过程中得到恢复.

① 收稿日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51604091); 河南省高等学校青年骨干教师项目(2017GGJS153).

作者简介: 田坤云(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿井瓦斯灾害预测与防治方面的科研与教学工作.

上述有关研究成果均就煤样渗透率与试件所受围压及轴压的关系进行了探讨. 本文以义煤集团新安煤矿主采的二₁煤层为研究对象(该煤层透气性系数较低), 在对煤样试件进行轴压及围压加卸载的情况下, 测试加卸载过程不同阶段的渗透率, 分别就试件所受围压及轴压与对应的渗透率大小做定性分析, 并对渗透率与两者之间的关系进行定量耦合, 以期对煤层瓦斯抽采过程中的钻孔布置提供一定的理论指导.

1 试验系统与方案

1.1 试验系统

采用“三轴伺服控温全应力-应变渗流试验系统”模拟煤样在不同温度场, 不同瓦斯压力、不同气体压力以及不同的应力场等试验条件下的瓦斯气体渗流特性, 采集测量瓦斯气体通过煤样的流量, 对瓦斯气体的渗流特性进行测量及分析. 实验装置如图 1 所示^[15].

1.2 试验样品

试验煤样来源于义煤集团新安煤矿主采的二₁煤层, 该煤层为硬度较大的原生结构煤, 在煤层的整形成过程中, 未受到强烈的地质构造活动. 采用岩石取样器现场进行柱状煤芯的钻取, 拿回实验室经过加工后得到高径比为 2 : 1 的煤样, 即圆柱形煤截面样直径 $\Phi=50$ mm, 长度 $l=100$ mm.

对煤样的基础参数进行测试, 主要参数包括: 煤的真密度(TRD , g/cm^3)、煤的视密度(ARD , g/cm^3)、煤的普氏系数(f 值)、孔隙率(K_1 , %)、瓦斯放散初速度(Δp) 等. 测试结果如表 1 所示.

表 1 矿区煤样基本参数

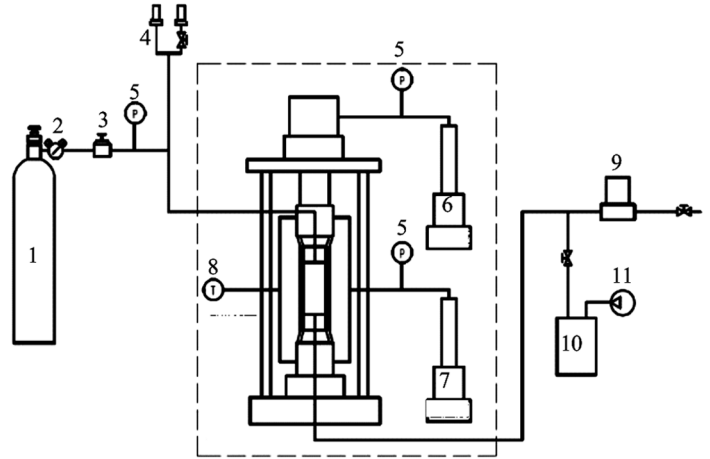
普氏系数(f)	瓦斯放散初速度 (ΔP)	孔隙率(K_1)/ %	真密度(TRD)/ ($g \cdot cm^{-3}$)	视密度(ARD)/ ($g \cdot cm^{-3}$)
0.96	7.8	12.430 8	1.635 2	1.564 5
0.98	6.9	11.599 7	1.724 7	1.435 8
1.07	7.4	10.260 9	1.697 7	1.523 5

1.3 试验方案

为了研究该矿区煤岩应力作用对瓦斯渗流的影响, 试验温度控制在 20 °C 定值, 轴压分别设置为 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 MPa; 围压选取在 2.0~10.0 MPa, 同时为了尽可能模拟义煤集团新安煤矿主采的二₁煤层矿区工作情况, 瓦斯注入压力选用该矿区现场测得煤岩瓦斯压力的平均值 0.8 MPa, 抽放负压选取矿山现场常规抽取瓦斯压力 15 kPa. 试验方案中各参数的具体取值参见表 2.

表 2 渗流特性试验方案

组别	瓦斯压力/MPa	抽放负压/MPa	轴压/MPa	围压/MPa
1	0.8	15	2	2.0~10.0
2			4	2.0~10.0
3			6	2.0~10.0
4			8	2.0~10.0
5			10	2.0~10.0



1. CH₄ 气瓶; 2. 减压阀; 3. 调压阀; 4. 传感器; 5. 压力表; 6. 轴压加载系统; 7. 围压加载系统; 8. 电热装置; 9. 气体流量计; 10. 真空容积; 11. 真空泵.

图 1 三轴伺服控温全应力-应变渗流试验系统

2 试验结果及分析

2.1 不同轴压作用下煤样渗透率随围压变化分析

试验系统采集到的为瓦斯气体在煤样中的平均流量, 此处利用达西渗流理论, 将流量转化为煤样瓦斯渗透特性的直观参量, 即渗透率 K (mD), 计算公式如下:

$$K = \frac{2\mu P_0 Q_0 L}{[P_2 - (P_0 - P_2)^2]S} \quad (1)$$

K 为渗透率, mD; Q_0 为瓦斯流量, cm^3/s ; P_0 为实验条件下大气压, MPa; μ 为瓦斯动力黏性系数, 取 $10.8 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; P_1 为进气口瓦斯压力, 此处取 0.5 MPa; P_2 为出气口瓦斯压力, 取 0.1 MPa; L 为煤样试件长度, 取 10 cm.

通过试验分别得到轴压在 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 MPa 以及围压在 2.0~10.0 MPa 时煤样的渗透率变化曲线图, 如图 2 所示.

由图 2 可以看出, 煤样的瓦斯渗透率与所受围压之间的曲线趋近于指数函数, 试件加载围压从 2 MPa 增加到 4 MPa 时, 渗透率下降趋势较快, 从 4 MPa 至 10 MPa 时, 渗透率的下降趋势逐渐趋于平缓. 主要原因在于: 围压逐渐加载增大的过程中, 试件内部由于受压发生了收缩变形, 试件内部分布的孔隙(裂隙)结构逐渐缩小直至闭合, 因而试件的渗透率变小, 初期受压变形较快, 后期较慢. 国内外学者的研究成果表明^[16-17], 围压变化对煤岩渗透率的影响规律符合公式(2)的指数函数关系, 按照拟合对试件渗透率与所受围压进行拟合, 可以得到表 3 中的渗透率-围压关系:

$$K = \alpha e^{b\sigma_2} \quad (2)$$

式中 α, b 均为拟合系数.

表 3 不同轴压下渗透率-围压试验数据拟合公式

轴压/MPa	围压/MPa	拟合公式	R^2
2	2.0~1	$K = 14.46723e^{-0.44572\sigma_2}$	0.99845
4		$K = 14.46723e^{-0.44669\sigma_2}$	0.99798
6		$K = 14.58668e^{-0.44759\sigma_2}$	0.99681
8		$K = 14.59755e^{-0.45312\sigma_2}$	0.99597
10		$K = 14.69173e^{-0.45332\sigma_2}$	0.99886

从表可以看出, 公式相关度较高, R^2 均在 0.99 以上, 这表明按照上述公式对该煤样试件渗透率及围压之间的拟合结果具有很高的可信度.

2.2 轴压、围压对渗透率试验值与拟合公式计算值对比分析

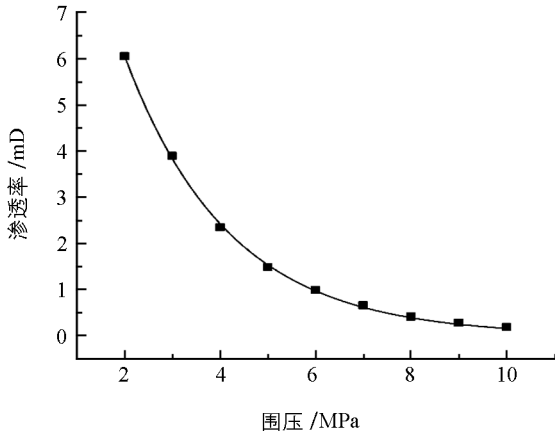
由表 3 可知, 5 个拟合公式中拟合系数 b 均接近 -0.45, 将拟合系数 b 确定为 $b = -0.45$. 其拟合公式为:

$$K = \alpha e^{-0.45\sigma_2} \quad (3)$$

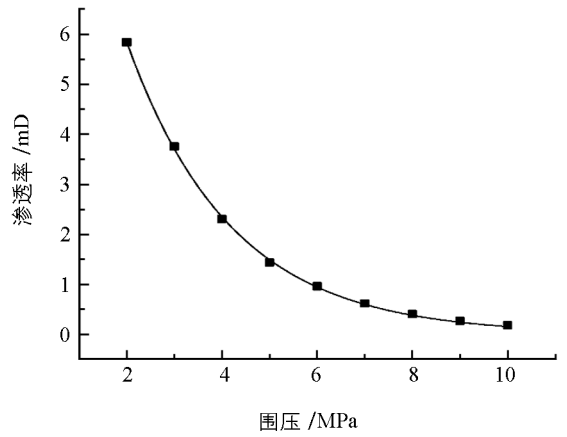
式中 α 为拟合系数, 利用公式(3)重新对图 2 中的(a-e)图分别进行拟合得到表 4.

表 4 $b = -0.45$ 时不同轴压下渗透率-围压拟合公式

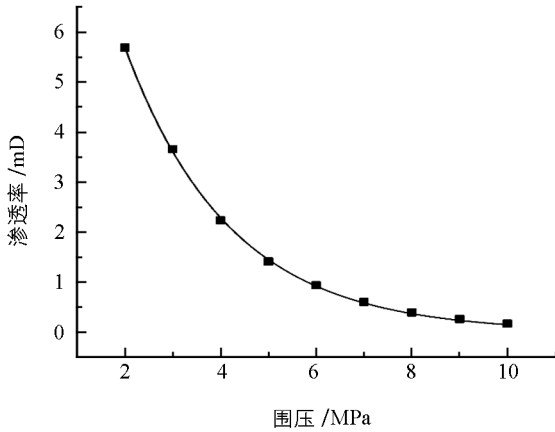
组别	轴压/MPa	围压/MPa	拟合公式	R^2
1	2	1~10	$K = 14.83218e^{-0.45\sigma_2}$	0.99247
2	4	1~10	$K = 14.84568e^{-0.45\sigma_2}$	0.99365
3	6	1~10	$K = 14.53568e^{-0.45\sigma_2}$	0.99423
4	8	1~10	$K = 14.67684e^{-0.45\sigma_2}$	0.99532
5	10	1~10	$K = 14.68689e^{-0.45\sigma_2}$	0.99641



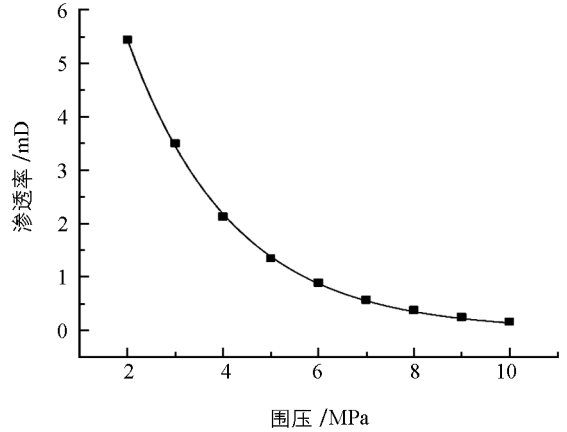
(a) 轴压 2 MPa 时的拟合曲线



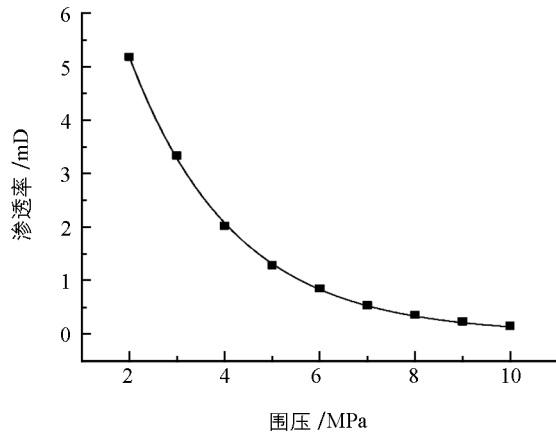
(b) 轴压 4 MPa 时的拟合曲线



(c) 轴压 6 MPa 时的拟合曲线



(d) 轴压 8 MPa 时的拟合曲线



(e) 轴压 10 MPa 时的拟合曲线

图 2 不同轴压作用下煤样渗透率随围压变化曲线

按照公式(4)进行拟合后,由表 4 可看出其拟合优度 R^2 依然均较高,明显看出拟合系数 α 随着轴压的升高呈依次降低的趋势.由此可以认为,在上述试验环境中其拟合系数 α 与轴压具有一定的函数关系,对拟合系数 α 与轴压进行拟合分析得到图 3.

拟合系数 α 与轴压的函数关系:

$$\alpha = 15.33589 - 0.27643\sigma_1 \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(3)可以得到轴压、围压和渗透率的函数关系:

$$K = 15.33589e^{-0.45\sigma_2} - 0.27643\sigma_1 e^{-0.45\sigma_2} \quad (5)$$

通过函数(5)可以看出, 渗透率和围压呈负指数关系, 与轴压呈线性关系, 渗透率随围压及轴压的增大而减小, 围压对渗透率的影响高于轴压。

将轴压、围压对渗透率影响试验数据与拟合公式计算值进行比对, 如图 4 所示。可以看出在瓦斯压力 $P=0.8 \text{ MPa}$, 温度为 $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下, 轴压、围压均在 $2\sim 10 \text{ MPa}$ 的范围内, 煤样渗透率的试验值与公式(5)的计算值吻合度非常高。

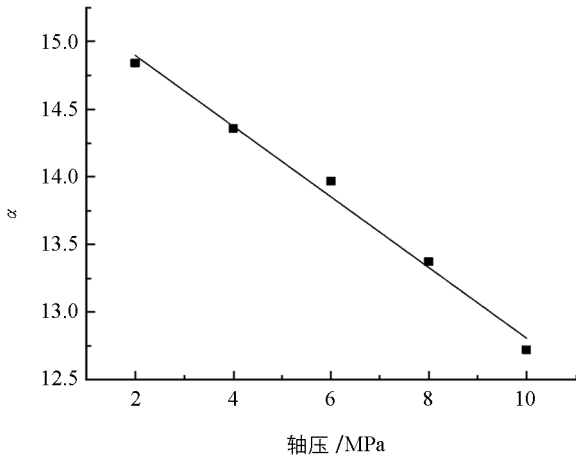


图 3 拟合系数 α 与轴压关系

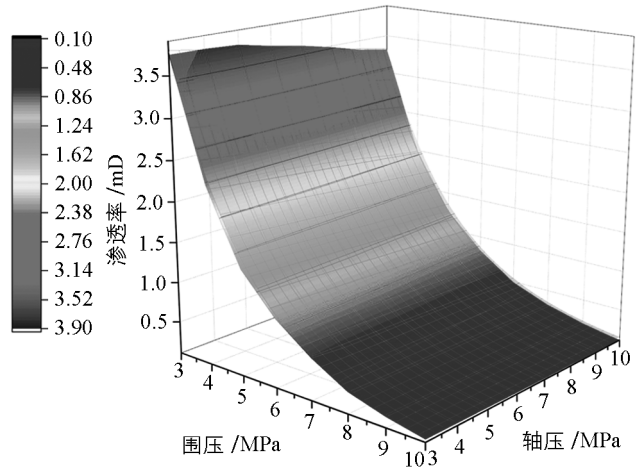


图 4 煤样渗透率实验与拟合计算值比对图

可认为义新安煤矿主采的二₁煤层, 在瓦斯压力 1.0 MPa , 温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 轴压、围压在 $2\sim 10 \text{ MPa}$ 之间煤岩渗透率 K 符合公式(5)的变化规律。

3 结 论

利用全应力-应变三轴伺服控温渗流试验系统, 在不同轴压及围压作用下对低渗透性煤样试件的瓦斯渗透率进行了实验, 结论如下:

1) 试件渗透率在轴压(围压)加载过程中不断降低, 前期较为急剧, 后期趋于平缓, 围压对渗透率影响高于轴压。

2) 围压与渗透率符合 $K = \alpha e^{-0.45\sigma_2}$ 关系, 拟合系数 α 随着轴压的升高呈依次降低的趋势, 拟合系数 α 与轴压符合 $\alpha = 15.42623 - 0.26194\sigma_1$ 函数关系。

3) 轴压、围压为 $2\sim 10 \text{ MPa}$ 时, 两者和渗透率满足 $K = 15.33589e^{-0.45\sigma_2} - 0.27643\sigma_1e^{-0.45\sigma_2}$ 的关系。

参考文献:

- [1] 黄磊, 刁勇, 李明建, 等. 煤矿防突信息管理系统设计[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 148-154.
- [2] 蒋长宝, 尹光志, 黄启翔, 等. 含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 802-807.
- [3] 袁梅, 李波波, 杜育芹, 等. 升降围压对含瓦斯煤渗透率影响研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10): 130-132.
- [4] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(1): 22-24.
- [5] 王登科, 刘建, 尹光志, 等. 突出危险煤渗透性变化的影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3469-3474.
- [6] 朱卓慧, 冯涛, 谢东海, 等. 不同应力路径下含瓦斯煤渗透特性的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 570-574.
- [7] 黄启翔, 尹光志, 姜永东, 等. 型煤试件在应力场中的瓦斯渗流特性分析[J]. 重庆大学学报, 2008, 34(12): 1436-1440.
- [8] 祝捷, 姜耀东, 孟磊, 等. 载荷作用下煤体变形与渗透性的相关性研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 984-987.
- [9] 孙建政, 邹云龙, 李明建, 等. 矿井工作面瓦斯涌出动态特征突出预警系统的设计与实现[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(12): 201-206.
- [10] 胡耀青, 赵阳升, 魏锦平, 等. 三维应力作用下煤体瓦斯渗透规律实验研究[J]. 西安矿业学院学报, 1996, 16(4):

308—311.

- [11] 魏建平, 李波, 王凯, 等. 受载含瓦斯煤渗透性影响因素分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 322—327.
- [12] 丁宝成, 李佳芮, 张秀平. 温度、应力对含瓦斯煤渗透特性影响的实验研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(4): 364—367.
- [13] 王广荣, 薛东杰, 郜海莲, 等. 煤岩全应力-应变过程中渗透特性的研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 107—112.
- [14] PAN Rong-kun, CHENG Yuan-ping, YUAN Liang, et al. Effect of Bedding Structural Diversity of Coal on Permeability Evolution and Gas Disasters Control with Coal Mining [J]. Nat Hazards, 2014, 73: 531—546.
- [15] 孙光中, 荆永滨, 张瑞林, 等. 轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 928—938.
- [16] XUE Yi, GAO Feng, LIU Xing-guang. Effect of Damage Evolution of Coal on Permeability Variation and Analysis of Gas Outburst Hazard with Coal Mining [J]. Nat Hazards, 2015, 79: 999—1013.
- [17] 陈德敏. 水射流应力波在煤岩体中的传播规律研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(7): 118—123, 150.

An Experimental Study on the Response of Seepage Characteristics of Low Permeability Coal to Its Loading Axis/Confining Pressure

TIAN Kun-yun¹, LI Xiao-li²

1. Department of Safety Science & Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. Zhengzhou Industry Technicians College, Zhengzhou 451150, China

Abstract: In order to understand the laws of permeability variation of low permeable coal samples under changing axle loads and confining pressures, an experimental research was conducted on coal permeability under different confining pressures and axle loads using a self-developed resultant stress-strain triaxial seepage test system based on servo temperature control. The test results demonstrated that permeability decreased with changes in axle load and confining pressure, but confining pressure exerted greater effects on permeability than axle load; that the relation of confining pressure to permeability could be expressed as $K = \alpha e^{-0.45\sigma_2}$, where the fitting coefficient α decreased steadily as the axle load increased; and when the axle load and the confining pressure were within the range of 1~10 MPa, their relation to permeability could be written as $K = 15.33589e^{-0.45\sigma_2} - 0.27643\sigma_1 e^{-0.45\sigma_2}$. These results are expected to lay a theoretical basis for the evolution of permeability during mining.

Key words: axis pressure; confining pressure; experimental research; gas; permeability

责任编辑 汤振金