

峰值破裂岩石的气体渗透性试验研究

宋 鑫, 刘卫群, 孙登松, 王 波

(中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 为了测试采矿工程中峰值破裂岩体的气体渗透特性, 设计了与气体渗透系统相配套的气体渗透仪。对淮南顾桥矿采集的标高-653~-771 m 的煤系岩石制成的标准岩样, 先利用 MTS815 系统加压至峰值强度, 而后测试其气体渗透性能。理论分析了一维非 Darcy 渗流过程及该情况下的渗透率求解方法。试验结果表明, 即使位于深部, 岩石破裂后的渗透率也比完整时大 $10^3 \sim 10^6$ 个数量级, 同时, 破裂砂岩的渗透率要比同标高的破裂泥岩高。

关 键 词: 峰值; 破裂岩石; 气体渗透性; 试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Testing study of gas permeability of fracture rock under peak stress

SONG Xin, LIU Wei-qun, SUN Deng-song, WANG Bo

(College of Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A device combined with system of gas permeability measurement was designed to investigate the gas permeability of fracture rock under peak stress in mining. Several groups of fracture rock with elevations of -653 m to -771 m from Guqiao coal mine were employed as the standard samples of gas permeability testing. By the aid of MTS815, the samples achieved their peak stress, and the gas permeability of them was obtained in that elevations. Furthermore, one-dimensional permeability of non-Darcy flow and the solution of their gas infiltration rates are also analyzed theoretically. It is shown that, even in the deep-seated, the gas infiltration rate of rock of that kind is remarkable larger about $10^3 \sim 10^4$ order than that of integrity rock. Meanwhile, the infiltration rate of fracture sandstone is higher than that of fracture mudstone in the same elevation.

Key words: peak stress; fracture rock; gas permeability; test

1 引 言

煤层气是煤矿生产的灾害隐患, 合理开发煤层气资源可以从根本上解除煤矿瓦斯灾害隐患^[1]。由于地下采动或施工, 不可避免会造成岩体开裂甚至冒落塌方, 这种裂隙或堆积岩体的渗透率要远比孔隙渗透率高得多^[2], 因而岩石工程中由于渗流而引起的各种灾害事故往往多发生在破裂岩体中^[3]。目前我国有关单位的科研人员在瓦斯突出^[4]的研究方面, 已取得了一定的成果, 但对于破裂岩体气渗流基本规律与机制的认识方面有待进一步研究。

煤系峰值破裂岩石的气体渗透特性是研究煤层瓦斯流动的重要参数, 是预防瓦斯突出和正确实施瓦斯抽放的理论依据。本文以与顾桥矿安全生产密

切相关的标高-653~-771 m 间各岩层破裂为背景, 采集此间各层岩石制成岩样, 经加载至峰值破坏, 并使用自行设计的气体渗透仪进行了气体渗透试验。试验结果可作为进一步分析采动破坏岩层中瓦斯流动规律的试验基础。

2 峰值破裂岩石气体渗透系统

破裂岩石气体的渗透试验系统组成及测试原理如图 1 和图 2 所示。该系统包括气源、减压阀、流量计、破裂岩石气体渗透仪、差压变送器、数显系统、高压软管及硬管回路、蓄能器等。连接原理: 气源提供氮气或瓦斯气等, 由减压阀减压至工作压力; 测气进口设在渗透仪的进口端、出口设在渗透仪的出口端, 进口连接减压阀及进口流量计, 出口

连接出口流量计并通大气；在渗透仪进出口两端并联差压变送器；所有仪表读数由显示仪显示，也可使用数据端口采集。



图 1 破裂岩石气体渗透系统

Fig.1 Gas seepage testing system for fracture rock

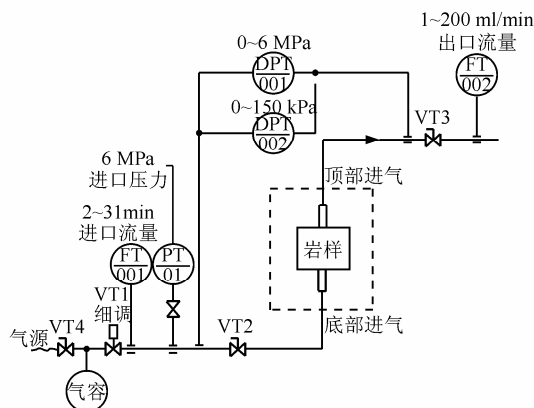


图 2 岩样气体渗透测试系统原理

Fig.2 Testing principle of the gas seepage instrument

系统各项指标：进气流量范围 0~5 L/min，出气流量范围 0~200 mL/min，2 级精度。压差范围为 0~6 MPa，0.25 级精度。气密要求在加压 5 MPa 并保持 10 min 情况下，允许有小于 5 % 的压力下降。渗透仪由缸筒和两端连气盖板组成，缸筒长 120 mm，内径为 70 mm，壁厚 10 mm，底部焊有法兰并加有轴向“O”型密封。盖板配合法兰密封，并在中心焊有硬管联结头以供管路连接使用。盖板和缸筒法兰间依靠螺柱紧固。渗透仪外观及试件安装如图 3 所示，其设计内压大于 40 MPa。



图 3 破裂岩样气体渗透仪

Fig.3 Gas seepage instrument of the fracture rock

3 试件制备和渗透率计算

为保证采集数据的准确性，试验前首先应测试渗透仪的密闭性能，即将渗透仪置入水中观察有无气泡溢出，然后对破裂岩样用合适湿度的紫砂泥将其初步环向包裹密封，待岩样完全放入渗透仪腔内后还需进一步在侧向用紫砂泥密封，防止气体发生侧漏。图 4 为用紫砂泥处理过后的破裂岩样。防止由于紫砂泥挤压而添堵出气孔，将在渗透仪的出气端放置一个透气板。最后，让气体只从岩样进气端的裂纹通入，再用合适湿度的紫砂泥进行端部的贴面环形密封。试件安装如图 5 所示。



图 4 气体渗透测试用的破裂岩样

Fig.4 The sample for gas seepage testing



图 5 置于渗透仪中的破裂岩样

Fig.5 The sample in the seepage instrument

实际的破裂岩体渗流都不是严格意义上的达西流，结合测试系统的特性及其输出变量，渗透率的计算公式及推导过程如下：

一维非 Darcy 流渗流的压力梯度与渗流速度之间满足以下关系：

$$\frac{dp}{dx} = -\left(\frac{\mu}{k}V + \beta\rho V^2\right) \quad (1)$$

式 (1) 也被称为 Forcheimer 方程^[5]，其中 $\frac{dp}{dx}$

为裂隙压力梯度; V 为渗流速度; μ 为空气动力黏度; k 为渗透率; ρ 为质量密度; β 为非 Darcy 流渗透因子。对式 (1) 沿渗流试件的长度 L 积分, 可得:

$$\frac{P_1 - P_2}{L} - \beta \rho V^2 = \frac{\mu V}{k} \quad (2)$$

式中: P_1 为进口压力; P_2 为出口压力。

设 Q_1 为 $\lambda(P_1 + P_2)$ 时的流量, Q_2 为出口流量, 利用气体状态方程^[6]可得:

$$Q_1 = \frac{P_2 Q_2}{\lambda(P_2 + P_1)} \quad (3)$$

式中: λ 为一正数因子。将式 (3) 代入式 (2), 并考虑 $Q_1 = AV$ (A 为渗流截面面积), 即可解出渗透率 k :

$$k = \frac{1}{\frac{(P_1^2 - P_2^2)\lambda A}{\mu P_2 Q_2 L} - \frac{\beta \rho P_2 Q_2}{\lambda A \mu (P_1 + P_2)}} \quad (4)$$

方程右端各变量取国际单位, 导出 k 的单位为 m^2 。

保持试件, 改变其进、出口压力分别为 P_3 和 P_4 , 测出此时出口流量 Q_4 , 可得到与式 (4) 相似的关系式:

$$k = \frac{1}{\frac{(P_3^2 - P_4^2)\lambda A}{\mu P_4 Q_4 L} - \frac{\lambda \beta \rho P_4 Q_4}{A \mu (P_3 + P_4)}} \quad (5)$$

比较式 (5) 和式 (4) 可得试验条件下的非 Darcy 流 β 因子为

$$\beta = \frac{\frac{(P_1^2 - P_2^2)\lambda^2 A}{\rho P_2 Q_2 L} - \frac{(P_3^2 - P_4^2)\lambda^2 A}{\rho P_4 Q_4 L}}{\frac{P_2 Q_2 (P_3 + P_4) - P_4 Q_4 (P_1 + P_2)}{A(P_1 + P_2)(P_3 + P_4)}} \quad (6)$$

将式 (6) 求出的 β 因子代入式 (5), 或式 (4) 即可得到渗透率 k 值。式 (6) 计算时右端变量均取国际单位, 导出 β 单位是 m^{-1} 。实际计算时, 考虑到方程的物理意义, 可取 $\lambda = 1/2$ 时的平均压力进行计算。

4 数据采集和结果分析

数据采集主要有岩样名称、岩样高度、压差、出口流量以及进气压力。所选试验岩样截面面积为 0.002 m^2 , 测试前加载至峰值破坏。氮气 $\mu = 0.176 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho = 1.16 \text{ g/cm}^3$ 。在试验中,

为减小不确定性因素的影响, 尽量读取稳定时的渗透数据。考虑到渗透率的计算及结果的客观性, 对每个岩样控制输入, 做 2~3 次试验, 并分析数据结果作为所需测定的渗透参数。表 1 为部分标高岩样的测试和分析结果, 其他标高岩样的渗透率测试结果见图 6。

表 1 顾桥矿破裂岩样气体渗透测试与分析
Table 1 Gas seepage testing and analyses for the fracture rock from Gugiao Mine

标高 /m	岩样名称	试样高度 /mm	压差 /MPa	出口流量 /(L·min ⁻¹)	进气压力 /MPa	渗透率 /(10 ⁻¹⁰ m ²)
-675~ -678	深灰色沙质泥岩互层	35	0.01/0.01	0.142/0.216	0.18/0.21	4.30
-726~ -727	深灰色砂岩	35	0.01/0.01	0.172/0.194	0.28/0.20	0.70
-730~ -733	灰色加灰白色带砂岩	35	0.01/0.01	0.109/0.099	0.15/0.14	2.71
-733~ -735	沙泥岩互层	35	0.01/0.01	0.172/0.194	0.18/0.20	2.03
-735~ -738	深灰色砂岩	35	0.01/0.01	0.215/0.196	0.23/0.12	0.99
-759~ -763	深灰色沙质泥岩	35	0.01/0.01	0.127/0.210	0.16/0.19	5.65
-763~ -767	深灰色砂质泥岩	35	0.01/0.01	0.145/0.217	0.18/0.21	4.60
-767~ -775	黑色沙泥岩	35	0.01/0.01	0.147/0.156	0.15/0.17	0.31
-775~ -780	黑色砂岩	35	0.01/0.01	0.147/0.206	0.17/0.19	5.02
-780~ -784	黄褐色砂岩	35	0.01/0.01	0.098/0.216	0.17/0.21	2.93
	砂岩	35	0.01/0.01	0.127/0.175	0.16/0.18	6.48
	灰白色砂岩	35	0.01/0.01	0.137/0.196	0.16/0.18	6.01
	粗砂岩	35	0.01/0.01	0.144/0.212	0.19/0.20	2.46
	粗砂岩	35	0.01/0.01	0.137/0.219	0.18/0.20	3.11

注: 表中 “/” 上下数据分别为 2 种压差下的流量。

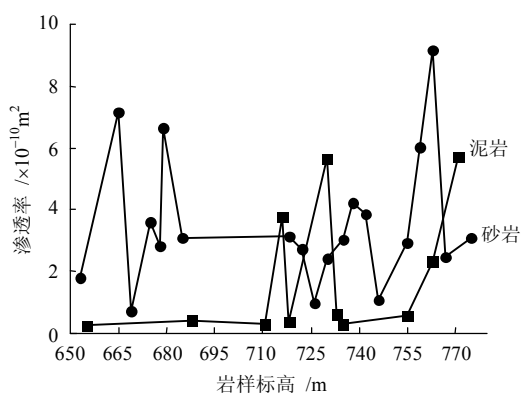


图 6 破裂岩样渗透率随标高深度的变化

Fig.6 Infiltration rate variation corresponding to elevation

从表 1 可以看出, 由于气体及破裂岩石的强渗透能力, 进出口压差较小且读数很接近, 个别试样由于显示仪有效数据位数的限制而呈现出相同的压

差却有不同气体渗透流量,图6为破裂砂岩和泥岩的渗透率随深度变化的趋势,由于破裂裂隙分布和导通方式的差异,各种标高相同岩性的破裂岩石的渗透率具有一定的离散性,趋势不明显。但总体而言,破裂砂岩的渗透率要较同标高的破裂泥岩高。

5 结 语

为了研究峰值破裂岩石的气体渗透性,采用MTS815系统加压至峰值强度使岩石破裂,由系统中的气源、减压阀施加并控制进口压力。试验装置为自行设计的破裂岩石气体渗透仪。测试中利用差压变送器及数显系统,所有仪表读数均由显示仪显示。通过不同岩性和不同标高条件下破裂岩样的气体渗透性试验,给出了试件制备过程,并推导了渗透率计算公式。试验结果表明,即使位于深部,岩石破裂后的渗透率也比完整时大数个量级(一般完整岩石的渗透率是 $10^{-16} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$)。且破裂砂岩的渗透率要较同标高的破裂泥岩高。

本文建立的峰值破裂岩石的气体渗透性测试方法适用于各种岩石类材料,通过进一步的试验研究和完善,可为破裂岩体的气体渗透性研究提供可靠

的试验方法和分析参数。

参 考 文 献

- [1] 邓英尔,刘慈群,黄润秋,等. 高等渗流理论与方法[M]. 科学出版社, 2004.
- [2] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 煤炭工业出版社, 1994.
- [3] 刘卫群,缪协兴,陈占清. 破碎岩石渗透性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2003, 1: 56—61.
- LIU Wei-qun, MIAO Xe-xing, CHEN Zhan-qing. A testing method for determining the permeability of overbroken rock[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, (1): 56—61.
- [4] 蒋承林,俞启香著. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 中国矿业大学出版社, 1998.
- [5] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [6] 刘卫群,缪协兴,余为,等. 破碎岩石气体渗透性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2006, 6: 400—401.
- LIU Wei-qun, MIAO Xue-xing, YU Wei. A testing method for determining the gas permeability[J]. *Journal of Experiment Mechanics*, 2006, (6): 400—401.
- [4] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [5] 刘小丽,罗锦添,闵弘,等. 大型现场室内两用直剪仪研制(II): 试验测试[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 336—340.
- LIU Xiao-li, LUO Jin-tian, MIN Hong, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(II): proof-testing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(2): 336—340.
- [6] WANG Zheng-gui, RICHWIEN Werner. A study of soil reinforcement interface friction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 92—94.
- [7] ZORNBERG J G. Peak versus residual shear strength in geosynthetic-reinforced soil design[J]. *Geosynthetics International*, 2002, 9(4): 301—318.
- [8] 黄晓明,朱湘. 公路土工合成材料应用原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [9] 李力,傅舰锋. 土工格室作用机理与应用研究现状[J]. 山西交通科技, 2003, 160(1): 63—65.
- LI LI, FU Jian-feng. The reinforcement mechanism and status in application and study of geocell[J]. *Shanxi Science and Thechnology of Communications*, 2003, 160(1): 63—65.
- [10] 交通部公路科学研究所. JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

上接第 3138 页