

文章编号: 1001-4888(2006)03-0399-04

破碎岩石气体渗透性的试验测定方法^{*}

刘卫群, 缪协兴, 余 为, 房敬年, 刘 名

(中国矿业大学 理学院, 徐州 221008)

摘要: 为了测试采矿工程中松散破碎岩体的气体渗透特性, 设计了与 MTS815.02 岩石力学伺服机配套的气体渗透仪和测试系统。依靠 MTS 伺服机改变压力和位移条件, 渗透仪用以稳定破碎岩石并连接气体测试系统, 接入气源、组成回路和测试气透特性等由测试系统完成。通过对几组破碎砂岩岩样氮气渗透性能的测试, 结合考虑状态方程的渗透率换算公式, 得出破碎砂岩气体渗透率随压力和粒径条件的变化规律。该测试方法和测试结果在研究采动破碎岩体瓦斯等气体流动规律方面具有重要意义。

关键词: 破碎岩石; 气体渗透性; 测试系统; 测试方法

中图分类号: TU411.4 **文献标识码:** A

0 引言

煤矿开采中会遇到许多破碎岩体气体渗流问题, 如煤层破碎开发煤层气、采动诱发瓦斯突出、采空区或破碎煤岩中实施瓦斯抽放、采空区注氮灭火等^[1, 2]。仅以瓦斯为例, 我国现有的国有煤矿中, 高瓦斯和突出矿井占到了 44.4%, 且随着开采深度增加, 瓦斯涌出量会不断加大, 上述比例也将增加。近年来, 瓦斯给煤矿带来了深重灾难, 2002~2004 年间, 在煤矿企业所发生的一次死亡 10 人以上事故中, 瓦斯事故分别占事故起数的 72.7%、死亡人数的 77%。只半年内相继发生的“郑州大平 10.20”、“铜川陈家山 11.28”、“阜新孙家湾 2.14”三起特大事故, 就死亡了 528 人。瓦斯是煤的伴生物, 破碎煤岩体是瓦斯聚集和运移的主要场所, 如综放采空区瓦斯最高浓度可高出工作面瓦斯浓度几十倍, 该区域的瓦斯渗透性和移动规律对保证工作面生产安全至关重要。

对于完整和破裂岩石的渗透性, 国内外学者已进行了较多的试验研究^[3-5]。但与解决文中所列工程问题迫切性不相适应的是, 测试破碎岩体特别是承压破碎岩体气体渗透特性的实验方法至今未见报道, 这已对破碎岩体气体渗流规律的研究产生制约, 并对工程气体渗流问题的解决造成影响。考虑到 MTS 伺服机先进的岩石力学测试功能, 本文基于该机开发了破碎岩石渗透仪, 并配备用于气体渗流测试的回路系统。利用该系统测试破碎岩石渗透率随压力和粒径的变化规律, 以期定性和为工程破碎岩体条件下的定量类推提供试验数据基础, 也为结合现场条件的渗流规律研究提供实验依据。

1 承压渗透仪及试验系统

与水渗透试验类似^[6], 首先要设计具有渗透功能的特殊容器, 然后解决加载问题和设计渗透闭环回路, 最后确定数据处理方法。图 1~图 3 是经过专门设计与 MTS815.02 加载系统匹配的承压破碎岩石

^{*} 收稿日期: 2005-05-18; 修订日期: 2006-03-24

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50225414)、国家自然科学基金重大项目(50490270)、中国博士后基金项目(20040350222)、江苏省自然科学基金项目(BK2004033)、江苏省博士后科研资助计划项目

通讯作者: 刘卫群(1970—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事计算力学及采动岩体力学方面的研究。

气体渗透仪,图 4 是承压破碎岩石气体渗透试验系统。

承压破碎岩石气体渗透仪的装配高度 260mm(其中压头高度 110mm,缸筒长度 170mm)。缸筒外径 260mm,壁厚 20mm,加工时用了普通 45 号钢进行全淬火处理,其底部焊有法兰并加有轴向“O”型密封。压头为凸台设计,这样在强度允许的情况下可有效减轻自重,同时适应 MTS 上端的位移控制压头。压头中心开有一直径 14mm 的 90°弯曲气流通道,弯曲设计是为了不影响轴向施压,通道出口为放气口。底座中心也有一直径 14mm 的 90°弯曲通道,该通道外口为进气口,为了与外部管路衔接,底座和压头的进出两气口均攻有螺纹。此外,压头周围的环向“O”型密封可防止侧漏,缸筒和底座不设计成一体可方便岩样的装卸,上下两块透气板的作用一个是用来搜集气体一个是用来分散气体,在渗透仪中加铺纱布是为了将岩石碎屑挡在渗透仪腔体内以保证管路清洁而不致堵塞。缸筒四周开设的凸台小孔在流场分析时使用,此时需由换向阀切换气流通道,如果只进行渗透试验用橡皮垫和螺柱紧封即可。该气体渗透仪设计最大孔隙气压为 10MPa,最大加载轴压为 60MPa。



图 1 渗透仪零件图

Fig. 1 Parts of the gas seepage instrument



图 2 渗透仪组装图

Fig. 2 Assembled gas seepage instrument

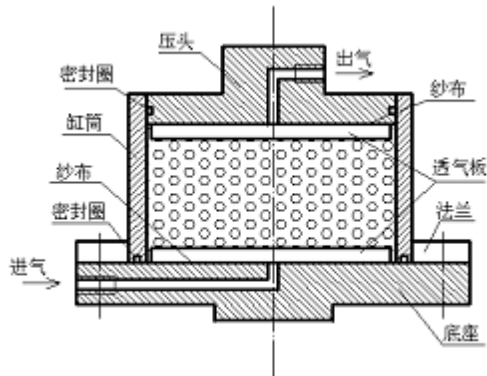


图 3 渗透仪工作原理

Fig. 3 Working principle of the gas seepage instrument

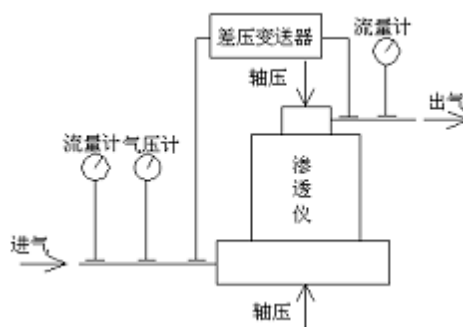


图 4 承压破碎岩石气体渗透试验系统

Fig. 4 Gas seepage testing system for overbroken rock

2 渗透率试验测定换算方法

考虑一维非 Darcy 渗流情况^[7],

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

式中, $\frac{dp}{dx}$ 为孔隙压力梯度; V 为渗流速度; μ 为动力粘度; k 为渗透率; ρ 为质量密度; β 为非 Darcy 流因子。对上式积分,可得

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

式中, P_1 为入口压力; P_2 为出口压力; L 为渗流试件长度。

设 Q 为 $\frac{P_1 + P_2}{2}$ 时的流量, Q_2 为出口流量, 考虑气体状态方程

$$\frac{P_1 + P_2}{2} Q = P_2 Q_2 \quad (3)$$

故得

$$Q = \frac{2 P_2 Q_2}{P_2 + P_1} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)并考虑 $Q = A \cdot V$ (A 为渗流截面面积), 即可解出渗透率 k 。

$$k = \frac{1}{\frac{(P_1^2 - P_2^2) A}{2 \mu P_2 Q_2 L} - \frac{2 \beta_0 P_2 Q_2}{A \mu (P_1 + P_2)}} \quad (5)$$

计算时右侧各变量取国际单位, 导出 k 单位 m^2 。 k 亦可按习惯转记为 cm^2 。

对同样试件, 改变入口和出口压力为 P_3 和 P_4 , 测出出口流量 Q_4 , 可得与式(5)同类型的关系式

$$k = \frac{1}{\frac{(P_3^2 - P_4^2) A}{2 \mu P_4 Q_4 L} - \frac{2 \beta_0 P_4 Q_4}{A \mu (P_3 + P_4)}} \quad (6)$$

比较式(5)和式(6)可得试验条件的非 Darcy 流 β 因子

$$\beta = \frac{\frac{(P_1^2 - P_2^2) A}{4 \rho P_2 Q_2 L} - \frac{(P_3^2 - P_4^2) A}{4 \rho P_4 Q_4 L}}{\frac{P_2 Q_2 (P_3 + P_4) - P_4 Q_4 (P_1 + P_2)}{A (P_1 + P_2) (P_3 + P_4)}} \quad (7)$$

通过相同试件的两次试验求出 β 因子, 再代入式(5)或式(6)就可得到渗透率 k 值。式(7)计算时右侧各变量仍取国际单位, 导出 β 单位为 m^{-1} 。

3 试验方案和结果分析

试验时选取了单轴抗压强度 45MPa, 水渗透率 10^{-13} cm^2 量级的砂岩岩样进行破碎。破碎岩样被筛分成 $\Phi 1(2.5\text{mm} \sim 5\text{mm})$ 、 $\Phi 2(5\text{mm} \sim 10\text{mm})$ 、 $\Phi 3(10\text{mm} \sim 15\text{mm})$ 、 $\Phi 4(15\text{mm} \sim 20\text{mm})$ 四种粒径, 对每种粒径进行三次试验, 最后取三组试验数值的平均作为测试结果。初始破碎岩样试件长度均为 90mm。试验气体为氮气, 为了尽可能避开初始气流补给造成的非稳态阶段影响, 建议采集数据从打开进气阀 30s 后开始。

试验测试数据主要有轴压、轴向位移、进出口压力 $P_1 \sim P_4$ 、进出口流量 $Q_1 \sim Q_4$, 以及试件几何尺寸等。试验加载为力控制, 测试轴压分别控制在 75kN (2MPa)、150kN (4MPa)、225kN (6MPa) 和 300kN (8MPa)。测试结果如图 5 和图 6, 这里取氮气 $\mu = 0.176 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho = 1.16 \text{ kg/m}^3$, 试件截面面积为

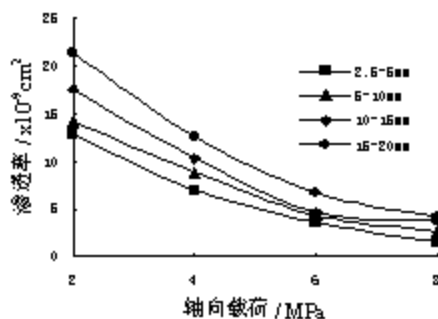


图5 破碎砂岩气体渗透率与荷载关系

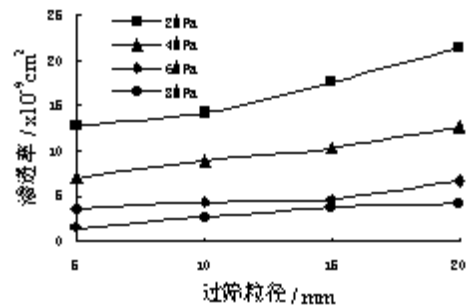


图6 破碎砂岩气体渗透率与粒径关系

Fig. 5 Infiltration rate variation corresponding to pressure Fig. 6 Infiltration rate variation corresponding to rock size

图 5 和图 6 结果表明: 破碎砂岩的气体渗透率比完整砂岩时有数个量级的增加, 且在同样粒径时渗

透率随压力增加而减小,近似呈负指数变化规律。在同一压力水平下,破碎砂岩的气体渗透率随粒径的增加有升高的趋势。与破碎砂岩的水渗透率相比^[6],气体渗透率随压力的变化略显缓和,这与破碎岩屑被水冲刷有填堵作用有关。

4 结语

文中给出了一种承压作用破碎岩石气体渗透率的试验测定方法。该方法基于自行研制的破碎岩石气体渗透仪和测试系统,测试结果与渗透率间通过考虑气体状态方程的非 Darcy 流导出公式转换。破碎砂岩的气体渗透性试验表明,上述测试系统和方法是有效的。

本文方法可用于各类破碎岩石气体渗透性规律的定性研究。在进一步开展现场条件的比较研究后,该方法还可提供满足工程破碎岩石气体渗流规律定量分析要求的数据参数。

参考文献:

- [1] 周世宁, 鲜学福, 朱旺喜. 煤矿瓦斯灾害防治理论战略研讨[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001 (ZHOU Shi-ning, XIAN Xue-fu, ZHU Wang-xi. Strategic investigation of disaster prevention and control of gas in coal mines. Xuzhou: CUMT Press, 2001 (in Chinese))
- [2] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004 (MIAO Xie-xing, LIU Wei-qun, CHEN Zhan-qing. Seepage Theory of Mining Rock Mass. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese))
- [3] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 煤炭工业出版社, 1994 (ZHAO Yang-sheng. Rock fluid mechanics in mine. Beijing: Coal Industry Press, 1994 (in Chinese))
- [4] Springer D S, Loaiciga H A, Cullen S J, et al. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions[J]. Ground Water, 1998, 36:558~565.
- [5] 龚钢延, 谢原定. 岩石渗透率变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8:219~227 (GONG Gang-yan, XIE Yuan-ding. A review of laboratory investigation of rock permeability. Chinese J of Rock Mech and Eng, 1989, 8:219~227 (in Chinese))
- [6] 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, 18(1):56~61 (LIU Wei-qun, MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing. A testing method for determining the permeability of overbroken rock. J. of Experiment Mechanics, 2003, 18(1):56~61 (in Chinese))
- [7] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999 (KONG Xiang-yan. Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media. Hefei: USTC Press, 1999 (in Chinese))

A Testing Method for Determining the Gas Permeability of Overbroken Rocks

LIU Wei-qun, MIAO Xie-xing, YU Wei, FANG Jing-nian, LIU Ming

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

Abstract: In order to test the gas permeability of overbroken rock mass in mines, a seepage instrument and its testing system was designed. The system can match the MTS815.02 servo-machine. MTS gives pressure or displacement conditions, and the seepage instrument encloses overbroken rocks. Besides, the testing system undertakes connecting to a gas bottle, organizing a circuit, testing data, and so forth. Several groups of crushed sandstone were employed as the samples of gas permeability testing. Their gas infiltration rates are obtained from the testing data by a transformation considering the equation of gas state. Furthermore, the rule of infiltration rate with pressure and rock size variations is also achieved. The present method and the obtained results provide necessary preparation for studying gas flow features, such as methane delivery features in overbroken rock mass.

Key words: overbroken rock; gas permeability, testing system, testing method