

文章编号: 1001-4888(2010)04-0420-05

圆板状岩样破坏过程中的渗透特性实验研究^{*}

黄伟^{1,2}, 陈占清¹, 靳向红², 杨敏³

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
2. 河南城建学院 土木系, 河南 平顶山 467044; 3. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 利用一种自行设计的附加渗透试验装置, 在 MTS815.02 岩石力学伺服试验系统上完成了圆板状岩样破坏过程中的渗透特性试验, 得到了圆板状岩样渗透率、渗透压差、渗流速度与轴向荷载的关系, 并对试验结果进行了分析和讨论。研究表明: 1) 岩样在渗透的同时发生弯曲变形, 岩样的渗透率与其受力状态密切相关, 当达到峰值载荷时, 渗透率急剧增大, 由此验证了突水是伴随着结构破坏的渗流失稳过程; 2) 岩样在破坏过程中, 当轴向载荷达到峰值时, 岩样两端压力差急剧减小; 3) 岩样两端压力差保持 0.2MPa, 轴向荷载达到峰值时, 增压器活塞位移急剧增大, 即渗流速度突然变大; 4) 冲剪破坏为圆板状岩样的主要破坏形式。

关键词: 圆板状岩样; 渗透特性; 突水; 试验

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A

0 引言

岩石破裂前后渗透规律研究是岩土边坡坍塌、煤矿突水和煤与瓦斯突出等灾害防治的基础课题。我国学者对此展开了广泛的探索与研究, 取得了一系列的成果。彭苏萍等^[1]采用三轴岩石力学试验系统分析了标准砂岩岩样在全应力—应变过程中渗透率的变化规律和不同围压下岩石的孔渗性, 建立了砂岩岩石应力—应变与渗透率之间的定性定量关系。李世平等^[2,3]考虑了围压、孔隙压力、试样尺寸等对岩石渗透率的影响, 给出了岩石全应力应变过程对应的渗透率—应变方程。李树刚等^[4]分析了煤样渗透性质随其变形程度发生变化的规律。孙明贵等^[5]利用瞬态渗透法测定了石灰岩在应力—应变全过程的非 Darcy 流渗透特性。此外, 学者们还从颗粒粒径、应力水平和非线性动力学的角度对破碎煤岩的渗透特性进行了深入地研究^[6-9]。本次试验试图在实验室模拟煤矿岩层突水的特征与过程, 研究圆板状岩样破坏过程中的渗透性变化, 用于指导工程实践。

1 试验系统

圆板状岩样渗透试验系统由 MTS815(MTS816)系列岩石力学试验系统和附加装置两部分构成(见图 1)。附加装置(见图 2)由 1-活塞、2-排水管接头、3-毛毡滤垫、4-缸筒、5-多孔透水板、6-圆环柱、7-岩样、8-密封胶料、9-岩样破坏后占据的空间、10-O 型橡胶密封圈、11-锥形压头、12-底板、13-进水管接头、14-螺栓、15-螺母和 16-垫圈组成。底板与缸筒之间放置 O 型橡胶密封圈, 并用螺栓、螺母和垫圈连接。底板上方放置透水板和锥形压头。岩样支撑在压头上, 并用密封胶料实现岩样与缸筒之间的密封。

^{*} 收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-04-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 国家自然科学基金项目(50674087、50974107)

通讯作者: 黄伟(1973—), 男, 博士, 现主要从事非线性动力学、采动岩体力学与工程方向的科研与教学工作。E-mail: pdshuangwei@163.com

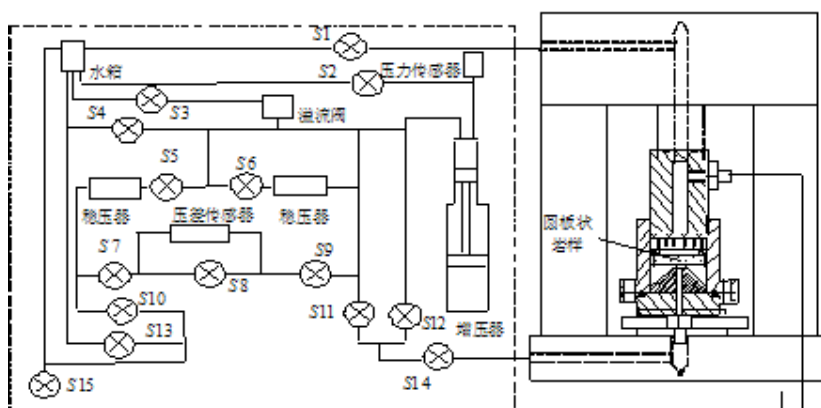


图1 圆板状岩样渗透试验系统

Fig.1 Permeability testing system for round slices of rock specimen

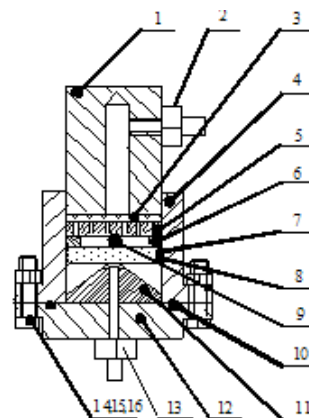


图2 系统附加装置

Fig.2 Attachments of the system

利用 MTS815 或 816 系列岩石力学试验系统的轴向加载分系统使活塞相对于缸筒移动,使圆板状岩样发生弯曲变形。在弯曲变形的同时,利用 MTS815 或 816 系列岩石力学试验系统的孔隙压力分系统对岩样进行渗透特性测试:水从底板经过透水板、锥形压头进入岩样的孔隙,再经过圆环柱中间区域和活塞的中心孔流出。

通过活塞和缸筒的相对运动,岩样与锥形压头之间产生相互作用,将此作用简化为集中力,记为 N (向上)。MTS815.02 型岩石力学试验系统轴向作动筒通过活塞及支撑环传到岩样的作用力为环形区域上的分布力这里也用其合力 N (向下)来表示。为了与空气压力 p_a 相区别,MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力分系统的增压器传到岩样下底面的压力以 p_0 表示。岩样的受力见图 3。

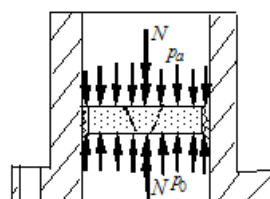


图3 岩样受力图

Fig.3 Mechanical characteristic of the sample

2 试验设计

2.1 试验方案

利用 MTS815.02 岩石力学试验系统的轴向加载系统对岩样进行加载,同时关闭截止阀 S1~S11, S13, S15,打开截止阀 S12 和 S14,对岩样进行渗透试验。通过 TestStar IIIm 控制器控制岩样的位移和渗透压力,并记录时间、轴向位移(即岩样位移)和载荷、孔隙压力系统增压器活塞位移等。

试验采用两种方案。第一种方案,缸筒相对于活塞以均匀速度移动,MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力分系统增压器活塞也均匀移动,压力 p_0 为被动的。第二种方案,缸筒相对于活塞以均匀速度移动,MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力分系统增压器活塞移动速度未知,而压力 p_0 保持恒定值。

2.2 参数设计

本次试验采用的是石灰岩岩样,岩样呈灰色,隐晶质结构致密块状构造,体积密度 2670kg/m^3 ,孔隙度 $0.73\%\sim 12.3\%$,抗压强度为 $20\sim 150\text{MPa}$,无肉眼可见的天然微裂隙。考虑煤矿突水岩层状况,选取直径 $49.5\pm 0.5\text{mm}$,厚度 $12\pm 0.5\text{mm}$ 的岩样以观察岩样渗透特性的变化。需要设计的控制参数及取值范围见表 1,表中同时给出其他的物理量(不是控制量、但可记录的量)。

表 1 试验参数设计

Tab. 1 Selection of the test parameters

参数	符号	单位	取值范围	性质
缸筒相对于活塞移动速度	V_1	mm/s	0.001~0.01	可控量
岩石力学试验系统的孔隙压力分系统增压器活塞移动速度	V_2	mm/s	0.001~0.5	可控量
岩石力学试验系统的孔隙压力分系统增压器传到岩样的压力	p_0	MPa	0.02~1.0	可控量
缸筒相对于活塞移动位移	u_1	mm		可记录量
岩石力学试验系统的孔隙压力分系统增压器活塞位移	u_2	mm		可记录量
锥形压头与岩样之间的作用	N	kN		可记录量

3 试验结果与分析

3.1 主要特征

选取其中的三个圆板状岩样,岩样弯曲破坏渗透试验过程中主要特征包括破坏时位移 u_1 (mm)、破坏时载荷 N (kN)和破坏时压力 p_0 (MPa),见表 2。

表 2 岩样渗透试验过程中的主要特征

Tab. 2 Main features of the sample during permeability test

岩样编号	控制参数	试验方案	破坏时位移 u_1 (mm)	破坏时载荷 N (kN)	破坏时压力 p_0 (MPa)
S1	$V_1 = \frac{3}{200}$ (mm/s); $V_2 = \frac{90}{200}$ (mm/s)	方案一	1.55	27.4	0.15
S6	$V_1 = \frac{3}{200}$ (mm/s); $V_2 = \frac{90}{200}$ (mm/s)	方案一	1.44	14.0	0.10
S14	$V_1 = \frac{3}{200}$ (mm/s); $V_2 = \frac{90}{200}$ (mm/s)	方案二	2.38	34.3	保持 0.2

3.2 破坏过程中渗透特性的变化与分析

渗透率按 $k = \left| \frac{\frac{\mu}{p_0 - p_a} V_2}{h} \right|$ 计算,其中 h 为岩样厚度, $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为水的动力粘度。岩样

S1 在破坏过程中的渗透率变化曲线见图 4,只有对照载荷的变化曲线才能更直观地说明渗透率的变化,因此在图中同时给出了载荷曲线。

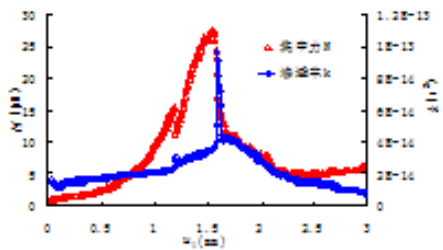


图 4 岩样破坏过程中渗透率变化
Fig. 4 Permeability change during failure process of the sample

从图 4 看出,在弹性阶段,随着岩样压密渗透率减小,这是由于在初始阶段由于受弯矩作用使岩样下表面孔隙被压密,造成渗透率略有降低;从 $u_1 = 0.09 \text{ mm}$ 开始,渗透率逐步增大,岩样在压剪作用下,出现新生微裂隙,岩样的渗透率逐步增加;到 $u_1 = 1.15 \text{ mm}$ 附近,渗透率发生显著变化,这是由于微裂隙的扩展、贯穿; $u_1 = 1.56 \text{ mm}$ 附近,即到峰值载荷时,渗透率急剧增大;之后渗透率却变小,可能是锥形压头的压入岩样,由于锥形压头流水孔过小,岩样破坏后的细屑压入锥形压头,堵塞进水孔,同时由于试验装置中毛毡垫的孔隙被堵塞的缘故。

岩样 S6 在破坏过程中两端压力差曲线见图 5。岩样两端压力差在初始时急剧上升,说明岩样密封质量较好,随着微裂隙的扩展、贯穿,岩样压力差缓慢降低,在缸筒相对于活塞移动位移 $u_1 = 1.53 \text{ mm}$ 附近,即到峰值载荷后压力差急剧减小,这是由于岩样受轴向荷载而破坏,因而岩样两端压力差迅速下降。

岩样 S14 采用第二种试验方案,在破坏过程中岩样两端压力差保持 0.2MPa,增压器活塞位移曲线

见图6。峰前随着岩样微裂隙的扩展、贯穿增压器活塞位移基本上是逐步增大;峰值时增压器活塞位移急剧增大;峰后,由于岩样细屑堵塞进水孔及毛毡垫使得增压器活塞位移又逐步降低。

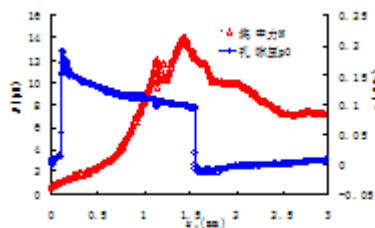


图5 岩样破坏过程中
中孔隙压变化

Fig. 5 Pore pressure change
during failure process
of the sample

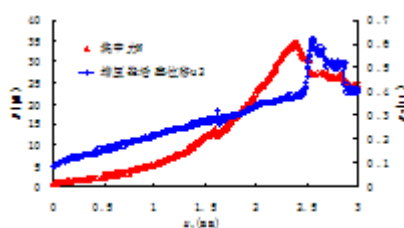


图6 岩样破坏过程中增压
器活塞位移变化

Fig. 6 Displacement change of
the turbocharger piston during
failure process of the sample

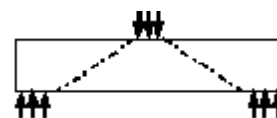


图7 岩样破裂裂纹

Fig. 7 Ruptured surface
of the sample

本试验采用的圆板状岩样的破裂裂纹如图7。在锥形压头的作用下,破裂面呈圆台状,从破裂裂纹判断属于冲剪破坏。这是与标准岩样破坏的不同之处。

3.3 试验不足之处

本试验基本揭示了岩样渗透特性随轴向荷载作用而变化的特点与规律,但由于受技术装备及经验等条件限制,还有诸多不足之处,也是将来进一步改进和完善的方向。

(1) 本试验设计的锥形压头流水孔过小,岩样破坏后岩样的细屑容易堵塞进水孔,而且岩样细屑堵塞毛毡垫使得毛毡的孔隙阻力大于岩样的孔隙阻力。

(2) 煤矿突水岩层一般是由多种岩性不同的岩层组成,因此采用多层复合岩样更合理。

4 结论

通过圆板状岩样破坏过程中的渗透特性试验研究和分析,得到以下结论:

(1) 在实验室可以模拟煤矿突水的特征与过程,即随着岩石结构的破坏、导水裂隙带的贯通和大范围的材料脱落,渗流的速度发生急剧变化,并发生流动性质的变化,其渗透系数相应增大了1个量级以上,验证了突水是伴随着结构破坏的渗流失稳过程。

(2) 圆板状岩样的渗透率与其受力状态密切相关,岩样在渗透的同时发生弯曲变形,岩样在初始阶段随着岩样孔隙压密其渗透率略有降低,随着新生裂隙的扩展、贯穿,岩石的渗透率缓慢增加,在峰后达到极大值。

(3) 从圆板状岩样的破坏情况看,冲剪破坏为主要的破坏形式,因此在实际防治突水中要增强岩层的抗剪能力,以提高岩层的隔水能力。

(4) 采用密封可靠、凝速适中的胶料是试验成败的关键。密封时,由于空间狭小,振捣困难,密封材料凝固时间与振捣时间要相互配合,造成密封性能不稳定。因此下一步要继续探索更高效的密封材料与技术。

参考文献:

- [1] 彭苏萍, 孟召平, 王虎, 马春丽, 潘结南. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 742—746 (Peng Suping, Meng Zhaoping, Wang Hu, Ma Chunli, Pan Jienan. Testing Study on Pore Ratio and Permeability of Sandstone under Different Confining Pressures. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 742—746 (in Chinese))
- [2] Li Shiping, Wu Daxin, Xie Weihong, et al. Effect of Confining Pressure, Pore Pressure and Specimen Dimension on Permeability of Yinhuang Sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, 34(3-4): 432—440.

- [3] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率—应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13—19 (Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. The Permeability-Strain Equations Relating to Complete Stress-Strain Path of Rock. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 13—19 (in Chinese))
- [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 (Li Shugang, Qian Minggao, Shi Pingwu. Permeability-Strain Equation Relation to Complete Stress-Strain Path of Coal Sample. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(1): 22—24 (in Chinese))
- [5] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 雷光宇, 茅献彪. 石灰岩应力—应变全过程的非 Darcy 流渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 484—491 (Sun Minggui, Huang Xianwu, Li Tianzhen, Lei Guangyu, Mao Xianbiao. Seepage Properties of Non-Darcy Flow in Complete Failure Process of Limestone. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 484—491 (in Chinese))
- [6] 刘卫群, 缪协兴, 陈占清. 破碎岩石渗透特性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 56—61 (Liu Weiqun, Miao Xiexing, Chen Zhanqing. A Testing Method for Determining the Permeability of Overbroken Rock. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1): 56—61 (in Chinese))
- [7] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 陈荣华. 破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 11—13 (Sun Minggui, Li Tianzhen, Huang Xianwu, Chen Ronghua. Penetrating Properties of Non-Darcy Flow in Fragmentized Rocks. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 23(2): 11—13 (in Chinese))
- [8] 马占国, 缪协兴, 陈占清, 李玉寿. 破碎煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 985—988, 996 (Ma Zhanguo, Miao Xiexing, Chen Zhanqing, Li Yushou. Experimental Study of Permeability of Broken coal. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 985—988, 996 (in Chinese))
- [9] 李顺才, 陈占清, 缪协兴, 茅献彪. 破碎岩体中气体渗流的非线性动力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1372—1380 (Li Shunca, Chen Zhanqing, Miao Xiexing, Mao Xianbiao. Nonlinear Dynamic Study on Gas Flow in Broken Rock Mass. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1372—1380 (in Chinese))

Experimental Research on Permeability of Round Slice Rock Specimen in Its Failure Process

HUANG Wei^{1,2}, CHEN Zhan-qing¹, JIN Xiang-hong², YANG Min³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. Department of Civil Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, Henan 467044, China;

3. School of Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Using a self-developed device together with a MTS815.02 Rock Mechanics Servo Test System, permeability experiment of round slice rock specimen in its failure process was carried out, relations among the axial load and the permeability, the seepage pressure and the seepage velocity were obtained. Experimentally obtained parameters were analyzed and discussed. Results show that 1) rock specimen bends during the permeability experiment, and the permeability is closely related with its force-acted state. Permeability increases sharply when load reaches peak value, which validates that water-inrush is seepage instability due to the structure destruction. 2) Pressure difference between the upper and lower surface of specimen decreases sharply when load reaches peak value. 3) Keeping the pressure difference between the upper and lower surface of specimen around 0.2MPa during the experiment, it is found that the turbocharger piston displacement increases rapidly when the load reaches peak value, that is, the seepage velocity increases suddenly. 4) The punching shear is the main failure mode.

Keywords: round slice rock specimen; seepage properties; water inrush; test