

软煤塑性流动状态下渗透特性的试验研究

陈绍杰, 孙熙震, 郭惟嘉, 王海龙

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:为研究软煤在塑性流动状态下的透水性能,对山西沁水盆地 15[#] 煤进行了较高围压下的应力-应变全程渗透特性试验,分析了塑性特征明显的软煤试件在进入塑性流动状态前后渗透性的变化特征。研究表明:单轴压缩强度为 7.43 MPa 的软煤岩在 6 MPa 围压下表现出较为明显的塑性;饱和浸水试样在相同围压下表现出更为明显的塑性流动特征;在该围压下,饱水试件在最初压缩时,随着原生裂隙的闭合,渗透率短暂降低;随着试件继续被压缩,试件产生新的裂隙,新裂隙与原生裂隙的贯通导致渗透率急剧增高;当试件进入塑性流动状态时,在围压作用下,已有裂隙压密闭和,新生裂隙的扩展和张开受到限制,软煤的渗透率将大幅度降低。

关键词:软煤;塑性流动;渗透性;全应力应变;围压

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)05-0015-06

Experimental Study on Permeability Characteristics of Soft Coal at Plastic-flow State

CHEN Shaojie, SUN Xizhen, GUO Weijia, WANG Hailong

(Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the permeability of soft coal at plastic-flow state, the full stress-strain process permeability for 15[#] coal of Qinshui Basin, Shanxi Province with a relatively high pressure of surrounding strata was tested, and the variation characteristics of permeability of soft coal specimens with obvious plastic characteristics before and after coming into the state of plastic flow were analyzed. Studies showed that the soft coal specimen with the uniaxial compressive strength of 7.43 MPa had relatively obvious plastic characteristics at the pressure of surrounding rock of 6 MPa. Saturated and soaking specimens had more obvious plastic flow characteristics at the same pressure of surrounding rock, and under this condition of pressure of surrounding rock, specimens were compressed initially, then permeability decreased transiently, along with the closing of existing fissures. With the specimens compressed continually, new fissures were produced and the transfixion between existing fissures and new fissures led to sharp increase of permeability. When specimens come into the state of plastic-flow, existing fissures were compressed and closed, extension and opening width of new fissures were limited by pressure of surrounding strata, the permeability of soft coal would be greatly reduced.

Key words: soft coal; plastic-flow; permeability; full stress-strain; pressure of surrounding strata

渗透特性是指岩石在压力梯度驱动下经过孔隙通道突出液体和气体的属性,煤岩渗透性研究是矿井突水、瓦斯等灾害防治的基础。渗透是固体本身所固有的性质,渗透率可以直接由 Darcy 定律来定义,但 Darcy

收稿日期:2012-08-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51034003);国家自然科学基金项目(50874070,51104094);教育部博士学科点专项科研基金项目(20103718110001);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010NJ013);山东省高等学校科技计划项目(J10LE04)

作者简介:陈绍杰(1978—),男,河北定州人,讲师,博士,从事矿山岩石力学和特殊开采方面的研究。E-mail:csjwyb@163.com

定律是岩石在天然状态下的渗透规律,并没有反映出渗流与孔隙介质应力-应变状态的关系^[1]。多年来,国内外学者对岩石渗透规律进行了大量研究^[2-10],但对煤岩、泥岩等软岩渗透特性研究较少。Kawai 等^[11]对软岩在三轴剪切过程中的渗透率变化进行了试验研究;Durucan 等^[12]试验研究了压力与压裂对煤岩渗透率的影响;杨永杰等^[13]对鲍店煤矿 3 煤试件和新河煤矿 3 煤试件渗透特性进行了试验研究;姜振泉等^[14]对兖州矿区某矿 7 煤底板软岩渗透特性进行了试验研究;李法柱^[15]对葛亭煤矿下组煤底板各岩层岩样进行了不同围压下的渗透性试验。而关于在塑性流动状态下软煤的渗透特性的研究还未见文献报道。本研究对山西沁水盆地 15[#] 煤进行了较高围压下的全应力-应变渗透特性试验,分析其进入塑性流动状态前后渗透率的变化情况,研究成果对于防水煤柱的合理留设具有一定的指导意义。

1 煤岩塑性流动渗透性试验方法及条件

1.1 煤岩塑性流动的产生条件

三向压力作用下的岩石,随着各向压力的增大,其性质将由脆性向延性转变,进入塑性流动状态。具体表现为:岩石的残余强度增大并且由线弹性材料转变为弹塑性材料;岩石试件的破坏形态,由环向压力为零时的劈裂破坏,随着环向压力的增大而逐步转变为以剪切破坏、剪切破坏带形式的剪切破坏,以至演变为延性变形。

煤岩在进行三向压缩试验时,在相对较高的低围压条件下,煤岩性质由脆性向延性转变,进入塑性流动状态,会表现出较为明显的塑性特征。

1.2 试验方法

试验是在 MTS815.03 电液伺服试验系统上进行的。渗透试验采用瞬态渗透法,试验原理及试验方法参见相关文献^[16-17]。

1.3 试验条件

试验试件取自山西沁水盆地 15[#] 煤,在现场钻孔取芯后立即密封运往实验室加工成为 $\phi 50$ mm 的标准试件,进行相关试验。

通过单轴压缩试验确定该煤样单轴抗压强度为 7.43 MPa,然后对试件进行围压 3 MPa,6 MPa 下的常规三轴压缩试验,根据常规三轴压缩试验情况确定渗透试验的条件。

2 渗透试验塑性流动围压值的确定

首先,进行沁水盆地软煤自然状态下、围压为 3 MPa(1[#], 2[#], 3[#])、6 MPa(4[#], 5[#], 6[#])常规三轴压缩试验,试验结果如表 1 所示,全应力-应变曲线如图 1 所示,试验试件典型破坏形式如图 2 所示。

表 1 常规三轴压缩试验结果表

Tab. 1 Results of conventional triaxial compression test

| 试件编号 | 直径/mm | 高度/mm | 峰值载荷/kN | 三轴极限强度/MPa | 残余强度/MPa |
|----------------|-------|-------|---------|------------|----------|
| 1 [#] | 50 | 87.46 | 38.33 | 23.26 | 18.97 |
| 2 [#] | 50 | 98.10 | 40.95 | 24.18 | 18.82 |
| 3 [#] | 50 | 89.56 | 40.60 | 23.88 | 18.86 |
| 平均值 | 50 | 91.70 | 39.96 | 23.77 | 18.88 |
| 4 [#] | 50 | 66.44 | 91.95 | 54.80 | 46.52 |
| 5 [#] | 50 | 84.90 | 56.71 | 35.85 | 29.68 |
| 6 [#] | 50 | 87.80 | 78.59 | 49.67 | 37.64 |
| 平均值 | 50 | 79.72 | 75.75 | 46.77 | 37.95 |

试件极限强度不高,如表 1 所示,试件力学性质的离散性较明显,但 6 MPa 围压下试件的强度与弹性模量均明显大于 3 MPa 围压下的试验结果。在围压作用下,该煤岩强度明显增大,当围压为 3 MPa,6 MPa 时平均极限强度分别为 23.77 MPa,46.77 MPa。残余强度增加较为明显,围压 3 MPa 情况下,残余强度分别为极限强度的 82%,78%,79%,平均为极限强度的 80%;围压 6 MPa 情况下残余强度分别为极限强度的 85%,83%,76%,平均为极限强度的 81%。这说明试件的残余强度较大。

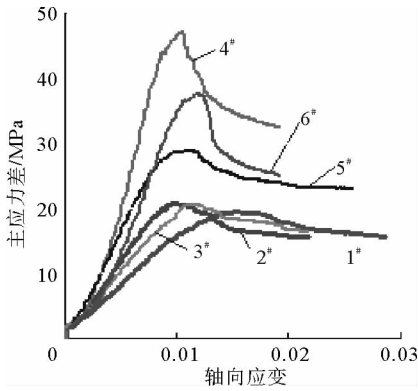


图 1 常规三轴压缩全应力-应变曲线

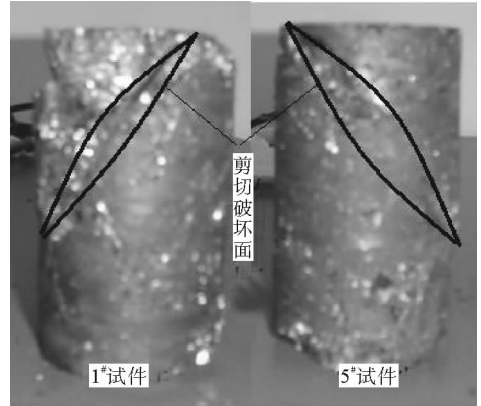


图 2 典型破坏形式

Fig. 1 Complete stress-strain curve of conventional

Fig. 2 Typical form of destruction in a triaxial compression test

从常规三轴压缩全应力-应变曲线看出,其中 1#, 2#, 3#, 5# 试件曲线较为平滑,没有明显的峰值,残余强度与其强度极限相差不大,进入明显的塑性流动状态;4#, 6# 试件曲线在达到峰值曲线后跌落明显,峰后曲线平稳,峰后近似进入塑性流动状态阶段,具有明显的塑性特征。

从图 2 看出,在试验结束后,试件仅出现一条较为明显的剪切破坏面。但沿剪切破坏面难以用手把破坏的试件掰开,说明试件在发生破坏之后又重新压密、结合、粘结在一起。剪切破坏面对试件的强度起到了一定的弱化作用,但弱化作用有限,全应力-应变曲线也反映了这一点。由此看来这些试件均已破坏,但破坏时有明显的塑性流动特征。

以上分析表明,该煤岩在 3 MPa,6 MPa 围压下,呈现比较明显的塑性流动特征。虽然围压 6 MPa 试验条件下 4#, 6# 试件有较为明显的下降且残余强度相对较低,但也呈现出明显的塑性特征。

煤岩试件浸水后,水进入试件孔隙、裂隙中使试件软化并降低其强度,该煤岩进入塑性流动的围压门槛值将会降低,在围压 6 MPa 时,该煤岩就已经进入塑性流动状态。在进行浸水饱和软煤塑性流动状态下的渗透试验时,选用 6 MPa 的围压。

3 软煤塑性流动状态下全应力-应变渗透试验

3.1 试验过程

在进行渗透试验前必须预先使试件充分饱和,试件不饱和或不够充分饱和会造成渗流过程不畅,渗透压差可能不是单调减小,会有局部升高现象。另外,岩石试件为圆柱形,试验时一定要密封良好,否则会造成试件内的水与试件外三轴室内的油相混,造成试验数据失真或试验失败。

通过常规三轴压缩试验结果确定本次渗透试验中取围压 $P_1 = 6$ MPa。MTS815.03 电液伺服试验系统最大渗透压差为 2 MPa,通常渗透试验取 $\Delta P = 1.5$ MPa,结合本试验情况在围压 6 MPa 试验条件下,取孔隙水压力 $P_2 = 4$ MPa, $P_3 = 2.5$ MPa,渗透压差 $\Delta P = 1.5$ MPa。

3.2 试验结果及分析

试件全应力应变过程的应变-渗透率曲线如图 3 所示。图 3 中全应力-应变曲线没有明显峰值且曲线平缓,从曲线上看不出试件具有明显破坏,试件的承载能力基本没有最大值但增大的速率逐渐降低,最后承载

能力将趋于定值,表明在 6 MPa 的试验条件下,试件均已进入塑性流动状态,具有明显的塑性特征。

渗透试验中饱和浸水试件的强度极限与相同围压试验条件下常规三轴压缩试验试件的强度极限相比大大降低,这是由于当水浸入煤岩时,水通过煤岩中原生裂隙进入,湿润煤岩全部自由面上的每个矿物颗粒。水分子的加入改变了煤岩物理性状,削弱了颗粒间的联系,使煤岩强度降低。煤岩属于多孔裂隙岩石,由于水进入煤岩的孔隙、裂隙中,产生孔隙水压,致使煤岩强度降低,所以浸水饱和试样进入塑性流动状态的围压门槛值比常规三轴压缩试验中相应试样的低。

煤样变形引起的孔隙和裂隙变化是导致煤样渗透特性发生变化的根本原因,裂隙变化情况是渗透特性变化的主导因素。在煤样全应力应变过程中,煤样的原生裂隙、构造裂隙不断变化,次生裂隙不断发育和扩展,导致煤样的裂隙网络和连通状态不断发生变化,渗透特性也随之变化。但在渗透试验中,在围压的作用下,裂隙存在着闭合倾向,所以渗透特性并非单调增加或减少,而是存在显著的时间效应。其变化规律可分为以下三个阶段。

1) 初始压密阶段:煤岩属于孔隙介质,内部微孔隙、微裂隙发育。在刚刚压缩时,随着这些微损伤的压密闭合,渗透通道变小变窄,渗透率短暂降低。

2) 弹塑性阶段:随着轴向应力的增加,试件被压缩,新裂隙的产生和原生裂隙的扩展,导致煤岩渗透率增加。随着轴向压力增大,其内部裂隙进一步扩展贯通,新裂隙与原生裂隙相互连通形成裂隙网络导致渗透率急剧增高。

3) 塑性流动阶段:在进入塑性流动状态后,煤岩中原生裂隙与压缩破坏产生的裂隙受围压作用压密闭合,并且较高围压限制了新生裂隙的扩展和张开,导致试样的渗透率大大降低,且低于试样的初始渗透率。

煤岩属于疏松多孔介质,在较高围压作用下,经过压密、破坏、再次压密三个阶段,尤其在塑性流动状态下发生再次压密闭合,压密闭合的不仅是新生裂隙,还有煤岩内部的原生裂隙,所以进入塑性流动状态后试件的渗透率小于试件的初始渗透率。

总体来看,在围压 6 MPa 试验条件下,不管是在破坏前还是破坏后,该种煤样的渗透率均较低。尤其是在试件产生塑性流动破坏后,在围压作用下限制了新裂隙的产生与贯通,而试件中原生裂隙在围压作用下也被压密闭合,从而渗透率大大降低。

3.3 软煤塑性流动状态下渗透特性

在非塑性流动状态下,全应力-应变过程渗透率曲线如图 4 所示。

在非塑性流动状态下,煤岩的渗透率、轴向应力均随着轴向应变的增大而逐渐达到峰值,峰值过后随着煤岩的失稳,其强度急剧降低,同时煤岩渗透率也有一定的波动,但始终保持在较高的水平。

在塑性流动状态下,煤岩的强度逐渐增大,但增大的速度逐渐减缓,最后将趋于定值。同时,煤岩内部的原生裂隙以及压缩破坏所产生的裂隙在围压作用下发生闭合,导水通道减少、渗透率降低,因此煤岩试件的

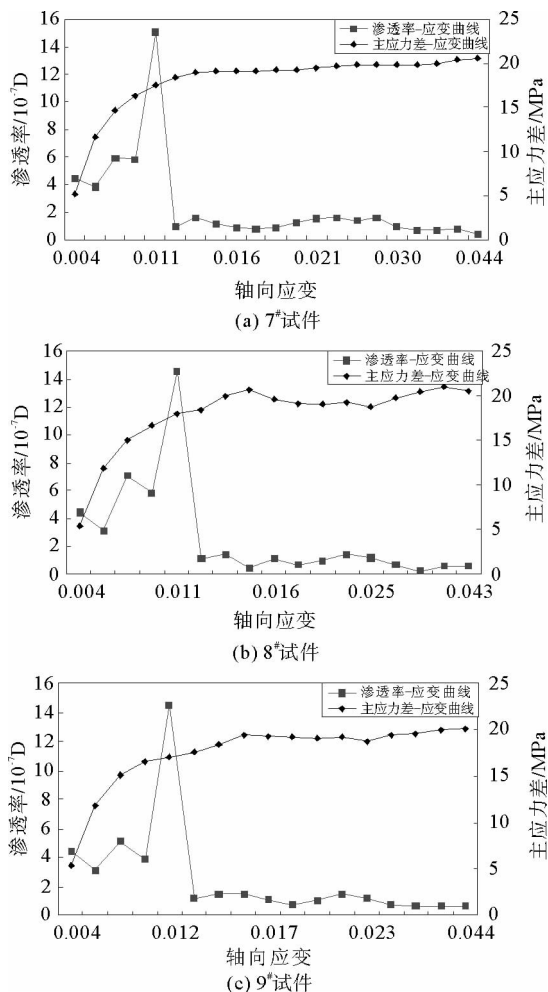


图 3 全应力应变过程的应变-渗透率曲线
Fig. 3 Permeability-strain curve
of complete stress-strain test

渗透率在达到峰值后急剧下降到一个较低的水平,而且波动幅度很小,始终保持一个较低的渗透率水平,并且低于煤岩试件的初始渗透率。

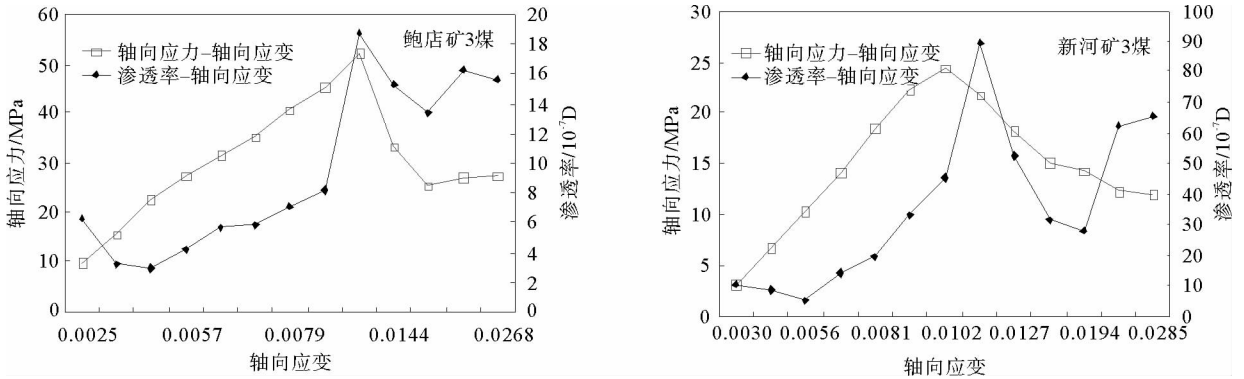


图4 全应力应变过程渗透率曲线图^[13]

Fig. 4 Permeability curves of the whole stress-strain process^[13]

4 结论

1)煤样强度极限不大,但由于围压作用下具有较大的残余强度,约占强度极限的76%~85%,平均约为其强度极限的80%。煤样的塑性特征明显,从应变-渗透率曲线看不出有明显的破坏,承载能力没有最大值而是逐渐增大,但增大的速率逐渐降低,最后趋于定值,进入明显的塑性流动状态。常规三轴试验后的试件端部破碎明显并具有明显的剪切面,沿剪切破坏带难以用手掰开,呈明显的剪切、塑性流动破坏形式。

2)用于渗透试验的饱和浸水试样的强度极限比常规三轴压缩试验试样的强度极限要低,这是因为水的侵入改变了煤岩原有的物理性状,削弱了颗粒间的联系导致了煤岩强度降低;浸水饱和和试样进入塑性流动状态的围压门槛值比常规三轴压缩试验试样的低,是由于水进入煤岩的孔隙、裂隙中产生孔隙水压,导致煤岩强度下降。

3)塑性流动状态下,试验全应力-应变过程中渗透率变化的总体规律可分为三个阶段:弹性阶段,由于试件在压缩过程中原生裂隙逐渐压密闭合,渗透通道变小变窄,渗透率随应力的增大而略有下降;弹塑性阶段,随着原生裂隙扩展和新生裂隙萌生、发育,新生裂隙与原生裂隙相互连通形成裂隙网络导致渗透率急剧增高;塑性流动阶段,在围压作用下原生裂隙被压密闭合,新生裂隙的萌生和扩张又受到围压的限制,因此渗透率大大降低。

4)试件在6 MPa的较高围压试验条件下,试件的渗透率较低。在塑性流动状态下,破坏后的煤岩试件在较高围压的作用下,破坏产生的裂隙被压密闭合,同时新生裂隙的产生、扩展、张开在围压的作用下受到限制。试件的原生裂隙、压缩破坏产生的裂隙的闭合,相对较高围压对新生裂隙的产生、扩展、张开的限制,导致了破坏后的煤岩试件渗透率大大降低,并且低于煤岩试件的初始渗透率。

5)在较大围压下,软弱致密煤岩进入塑性流动,虽然煤岩承载能力有所下降,但是渗透水的性能大幅度降低,这对于防水煤柱的合理留设具有一定的指导意义。

参考文献:

[1]赵连涛,于旭磊,刘启蒙,等.煤层底板岩石全应力-应变渗透性试验[J].煤田地质与勘探,2006,34(6):37-40.
ZHAO Liantao, YU Xulei, LIU Qimeng, et al. Research on rock complete stress-strain permeability experiment in coal floor [J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34(6): 37-40.

[2]李长洪,张立新,姚作强,等.两种岩石的不同类型渗透特性实验及其机理分析[J].北京科技大学学报,2010,32(2):158-163.
LI Changhong, ZHANG Lixin, YAO Zuoqiang, et al. Permeability characteristics experiment and its mechanism analysis of two types of rocks [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(2): 158-163.

- [3] 杨永杰, 楚俊, 邰冬至, 等. 煤岩固液耦合应变-渗透率实验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 760-764.
YANG Yongjie, CHU Jun, HUAN Dongzhi, et al. Experimental of coals strain-permeability rate under solid and liquid coupling condition[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 760-764.
- [4] 左如松, 朱岩华, 姜振泉. 岩石临界抗渗强度的测定及在工程中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 38-41.
ZUO Rusong, ZHU Yanhua, JIANG Zhenquan. The acquisition of critical anti-permeability strength of rock and its application in engineering[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(6): 38-41.
- [5] 李先炜. 岩块力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982: 1-16.
- [6] ZHU W L, LAURENT G., WONG T F. Shear-enhanced compaction and permeability reduction: Triaxial extension tests on porous sandstone[J]. Mechanics of Materials, 1997: 199-214.
- [7] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. Engineering Geology, 2002, 63(3-4): 291-300.
- [8] 姜振泉, 季梁军, 左如松, 等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 12(10): 1442-1446.
JIANG Zhenquan, JI Liangjun, ZUO Rusong, et al. Correlativity among rock permeability and strain-stress under servo-control condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 12(10): 1442-1446.
- [9] 王金安, 彭苏萍, 孟召平. 岩石三轴全应力应变过程中的渗透规律[J]. 北京科技大学学报, 2001, 32(6): 489-491.
WANG Jinan, PENG Suping, MENG Zhaoping. Permeability rule in full strain-stress process of rock under triaxial compression[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 32(6): 489-491.
- [10] 夏筱红, 杨伟峰, 崔道伟, 等. 采场底板岩石渗透性试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(3): 20-22.
XIA Xiaohong, YANG Weifeng, CUI Daowei, et al. Test study on penetrability of floor rock in stope[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2006, 33(3): 20-22.
- [11] KAWAI Y, NAKASHIMA S, KISHIDA K. Experimental study on the permeability of soft rock during the triaxial shear process[C]// The 42nd U. S. Rock Mechanics Symposium, San Francisco, June 29-July 2, 2008: 8-25.
- [12] DURUCAN S, EDWARDS J S. The effects of stress and fracturing on permeability of coal[J]. Mining Science and Technology, 1986, 3(3): 205-216.
- [13] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透率特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 82(2): 381-385.
YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 82(2): 381-385.
- [14] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力-应变过程渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 32(2): 153-156.
JIANG Zhenquan, JI Liangjun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 32(2): 153-156.
- [15] 李法柱. 济北矿区深部开采底板水害防治关键技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2008: 6-11.
- [16] 李玉寿, 马占国, 贺耀龙, 等. 煤系地层岩石渗透特性试验研究[J]. 实验力学, 2006, 12(2): 129-134.
LI Yushou, MA Zhanguo, HE Yaolong, et al. Experimental research on permeability of rocks of coal-bearing strata[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 12(2): 129-134.
- [17] 杨永杰, 逢焕东. 煤岩强度特征及煤矿采场覆岩破坏微地震监测[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 1-19.