

岩石损伤过程中的渗流特性

韩国锋, 王恩志, 刘晓丽

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:目前人们对岩石损伤后渗透性变化定性、定量方面的认识都存在不足,通过分析中国大量岩石全应力应变过程渗透性试验的成果,总结出目前岩石破损过程渗透性变化的4种类型。分析了岩石孔隙、裂隙、岩性等因素对于形成4种不同渗透性变化类型的影响,以及围压对渗透性发展演化的作用。峰值前一般渗透性随围压增加而减小,但峰后比较复杂,值得继续研究。统计分析了目前试验中岩石渗透性的变化范围,结果表明:一般软岩渗透性变化较小,脆性岩石渗透性变化较大。从目前围压1 MPa-40 MPa的全应力应变渗透性试验结果来看,97%渗透性变化不超过1000倍,其中85.9%渗透性变化不超过100倍。提出岩石破坏后是否出现高速非达西流需要从有效应力考虑,提出了渗流失稳与渗流作用下结构失稳的区别。

关键词:岩石;损伤;渗流特性

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)05-0041-10

Seepage Characteristics of Rock during Damage Process

HAN Guo-feng, WANG En-zhi, LIU Xiao-li

(State Key Laboratory of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, P. R. China)

Abstract: Four evolution patterns of rock permeability in damage process are summarized. And how rock pore, micro cracks and lithology form the four patterns of rock permeability evolution is analyzed. The impact of confining pressure on permeability is also presented. The permeability reduces along with the increase of confining pressure before rock failure, however, it is complex after rock failure, and it is necessary to do further research. Statistical analysis is carried out to analyze the variation range of permeability in the process of damage, which shows soft rocks vary less while hard rocks vary more. In the experiments in which the confining pressure is between 1 MPa to 40 MPa, permeability variation of 85.9% rock is within 100 times, 97% within 1000 times. Furthermore, the difference between instability of seepage and that of structure under the function of seepage is distinguished. It is proposed that the presence or absence of non-Darcy flow should be considered from the point of effective stress law.

Key words: rock; damage; seepage characteristic

在采矿、边坡、隧洞、石油、水利水电等涉及岩石力学的工程中都存在地下水渗流问题。地下同时存在渗流场和应力场,一方面,流动的地下水对岩石施加浮力和渗透力,渗流场的改变,必然改变岩石的受

力状态。另一方面,应力场的改变,将引起岩石孔隙、裂隙的变化,也就改变了岩体的渗透性能,从而改变了渗流场。这就是渗流应力耦合问题。由于地下水对实际岩石工程安全稳定有重要的影响,人们

收稿日期: 2011-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872152, 51009079); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金资助项目(sklhse-2010-D-02)

作者简介: 韩国锋(1983-),男,博士生,主要从事岩石力学和渗流方面的研究, (E-mail) hgf02@mails.tsinghua.edu.cn.

对渗流应力耦合进行了大量的研究。包括孔隙渗流和裂隙渗流的耦合研究。但是主要的耦合成果集中在应力状态的分析^[1]。无论是滑坡、溃坝,还是隧洞突水等实际的与地下水相关的工程安全问题中都存在一个岩石体损伤的问题,很有必要把耦合从状态分析发展到损伤过程的分析。

对渗流应力耦合分析的关键是渗透系数与应力应变的关系。损伤过程中的渗流应力耦合分析的关键也在于此。由于岩石损伤本身是一件极其复杂的问题,因此仅从理论上研究损伤过程中渗流应力耦合是很困难的,研究者主要的研究方式是进行试验。试验研究的成果,一方面为建立耦合理论提供了基础,另一方面也是检验所建立理论合理性的依据。除此外试验的成果也能在没有合适的理论模型、简化计算或定量分析的情况下提供有益的参考。损伤过程渗流特性很复杂,特别是在应力峰值后,已有的试验结果千差万别,离散性较大,缺乏系统的分析。比如 Mordecai 等^[2]在 Darley Dale 砂岩的断裂试验中发现渗透率增加 20%, Zoback 等^[3]发现花岗岩达到峰值应力 80% 时渗透率增加 2/3。而 Oda^[4]发现破坏花岗岩比完整时大 2~3 个量级。Peach 等^[5]、Stormont 等^[6]对岩盐的试验发现渗透性能增加 5 个量级。Otto 等^[7]对岩盐的试验得出渗透性与膨胀正相关。而 David 等^[8]对砂岩的试验发现渗透性变化与孔隙率的增加并不总是正相关。

1 岩石损伤过程中渗透性变化特征

岩石渗透性受岩石本身的孔隙、裂隙结构控制。在变形过程中,岩石的孔隙、裂隙发生变化,因此其渗透性也发生改变。一般岩石的变形经历微孔隙裂隙压密阶段、弹性变形阶段、屈服强化阶段、峰后软化阶段、残余强度阶段等五个阶段。随着岩石的变形,渗透性也发生相应的变化。目前试验所涉及的岩石中沉积岩较多,如煤岩^[9-11]、砂岩^[12-15]、灰岩^[15-17]、泥岩^[17-18]。火成岩较少,如花岗岩^[20]。就目前试验研究报道,可以把岩石损伤过程中渗透性变化大致分为 4 类,如图 1—图 4。试验都是在常规三轴试验过程中,测量试件轴向的渗透系数,只是一个方向的渗透性。

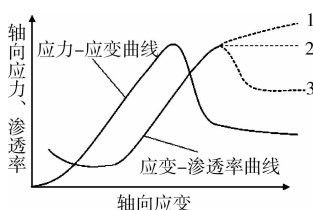


图 1 渗透类型 1

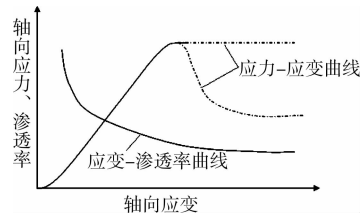


图 2 渗透类型 2

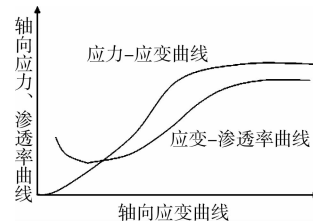


图 3 渗透类型 3

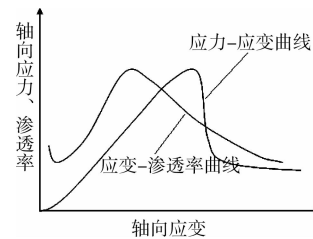


图 4 渗透类型 4

目前试验中观察到的绝大部分是图 1 所示类型。大致可以分为 5 个阶段^[1,20-23]。在第 1 阶段,岩石原有的微孔隙、裂隙被压密,渗透性降低。在弹性阶段微孔隙、裂隙继续被压缩,渗透性进一步减小。随着应力的进一步增加,岩石微裂隙开始扩展,渗透性开始增加。随着微裂隙的相互贯通,渗透性急剧增大。不同种类、结构、围压的岩石在到达峰值以后阶段存在一定的差异,有的渗透性缓慢地增加,有的基本不变,有的下降后趋于不变。一般地在软化阶段,岩石的变形存在两种倾向,一方面,还有部分裂纹继续扩展,另一方面,一部分裂纹由于承载面积的降低,裂纹面有效应力增加,发生闭合。同时轴向应力减小,某些部分开始回弹,也造成裂纹闭合。前一种方式增加渗透性,后一种方式降低渗透性。占主导的倾向决定了渗透性的发展。因此一般在软化阶段渗透性先增加,后降低。到了残余强度阶段,裂隙面摩擦,剪断了部分突起,使渗透性有所降低,到一定程度后渗透性趋于平稳。渗透峰值滞后于应力峰值,渗透峰值大部分在应变软化阶段,少部分接近应力峰值,还有些到流动段还在缓慢增加,但有趋于稳定的趋势。这种类型主要出现在孔隙不太大、脆性的岩石,如砂岩^[1,21,24-25]、灰岩^[1,18,26]、花岗岩^[19]、煤岩^[9,20]、硬质泥岩^[23,27]。如果岩石特别脆,

渗透性开始基本不变,接近峰值应力才开始明显增加,而且增加很剧烈,在较小的应变范围内达到渗透性峰值。如果孔隙度不是特别低,且脆性稍弱点的,如砂岩类,大多在弹性阶段渗透性就开始呈现明显的增加趋势,要在更大的应变范围内达到渗透峰值。岩石峰后渗透性的升降很复杂。一般流动段渗透性继续有所增加的现象出现在脆性强岩石的试验中,但围压增加也会使峰后渗透性降低^[19,28]。围压的增大甚至使某些较软的岩石全应力应变过程渗透性只是在很小的范围波动^[28]。含泥质岩类大多到达渗透峰值后趋于平稳或有所降低,没见到渗透性峰后一直增加的现象。

图2所示类型出现在某些高孔隙度软岩的试验中,整个变形过程中孔隙一直压缩,由于微裂隙不发育或粘土矿物水化膨胀、使微裂隙开度减小,微裂隙对渗透性没有太多的影响^[29]。另外据Zhu^[30]等人的研究,对于孔隙度大于15%的岩石,无论是脆性破坏还是破碎流动破坏,渗透性都一直减小。当脆性破坏时,应力峰值后发生剪胀,孔隙率增加,但是渗透性还是减小。图3所示类型出现在某些泥岩^[31]、煤岩^[32]等颗粒较细,塑性的岩石,一般随轴向应变增加,应力增加,且增加越来越缓慢,趋于某一极限值,不存在软化现象。渗透性在弹性阶段有所降低,而后发生体积剪胀,渗透性增加,渗透性也趋于某一极限值。这样的一般渗透性变化范围不大。图4所示类型出现在高孔隙度的细颗粒脆性岩石,如溶蚀发育的灰岩^[17,25,33-34]、砂岩^[31]。本身渗透性较大,弹性阶段少量的微裂隙即连通了大的孔隙,使渗透性明显增加。进入塑性阶段后,大的孔隙被剪断、塌缩,渗透性反而减小,渗透性峰值一般出现在应力峰值前。

上面的渗透性类型,只是依据目前报道的常见围压条件下的结果进行的划分。当围压发生改变时,岩石会从劈裂破坏、剪切破坏到延性破坏的转变。其渗透性类型很可能不止上面的4种,这需要进一步的试验研究。

2 岩石损伤过程中渗透性变化幅度

一般人们认为岩石破坏后渗透性会有较大的变化,但是到底有多大的改变,却没有具体的量化研究。根据上面对岩石损伤过程中渗透性的分类可以看出,并不是所有岩石破坏后渗透性增大。整理了目前岩石破坏过程中渗透性的试验结果,为回答和深化此问题提供了依据。表1整理了目前所见不同岩石全应力应变过程中渗透性的变化范围。试验都

是在室温条件下,常规三轴试验中获得的。试验过程中保持围压一直不变,当轴向加载到某一应变后,固定轴向位移,测量轴向的渗透系数。

表1 渗透变化倍数^[9-29,31-49]

岩石名称	试件个数	渗透性变化倍数	备注
泥岩	37	1.7~215.3	48.6%在10以内,32.4%在10~30之间
煤岩	35	1.2~1410	57.1%在10以内,22.9%在10~50之间
灰岩	32	2.0~2700	37.5%在100以上,28.1%在10以内
砂岩	25	1.9~106	80%在20以内(文献没说为何砂岩)
白云岩	25	1.14~2256	40%在100以上
细砂岩	15	1.9~218	66.7%在10~20之间
中砂岩	13	2.0~114.0	69.2%在40以上
泥质砂岩	8	1.2~39	75%在4以内
页岩	5	2.8~37.9	80%小于10
凝灰岩	4	37~311	3个在30~50
烧变岩	3	4.2~9.5	原岩为泥砂质
粗砂岩	2	2.6~22.3	
粉砂岩	2	4.0~77.0	
硬石膏	2	53.0~926	
铝土岩	2	1.4~20	
砾岩	2	6.0~12.8	
底砾岩	1	8.5	
粘土岩	1	5.1	
砂岩汇总	65	1.9~218	63.1%在20以内

表1中的试验围压最大达到40 MPa,90%以上是在1~10 MPa之间。虽然试验数据很零散,同一种岩石同种条件下渗透性差别很大。如文^[47]中6 MPa时花岗岩峰值渗透性两个试件相差3倍。但我们仍然能得出一些有益的结论。85.9%的岩石试样岩石全应力应变过程中渗透性的变化范围不超过100倍,97%的渗透性变化不超过1000倍。一般比较软的岩石渗透性变化范围比较小,脆性岩石渗透性变化范围较大。如泥岩近一半渗透性变化在10倍以内,80%在30倍以内。砂岩63%的变化范围在20倍以内,其中泥质砂岩变化范围比较小,中砂岩变化范围比较大。

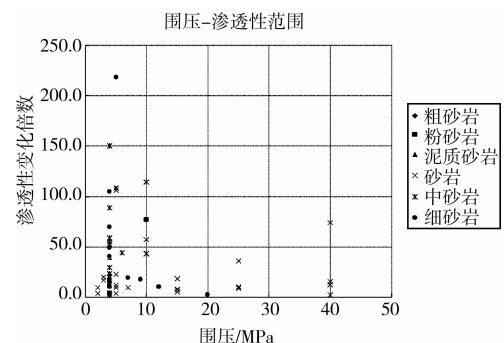


图5 砂岩围压与渗透性变化

图 5 中去掉了 4 个渗透性变化大于 700 倍的点。虽然细看起来点分布比较凌乱,但是总体上有围压越高渗透性变化范围越小的趋势。对于其他种类的岩石这种图表更加凌乱,可见影响岩石破损过程中渗透性变化的因素很多,很复杂。

李玉寿^[17]对煤系地层岩石 100 块试件,每种岩石 10—20 个试件的试验统计来看,每种岩石的渗透性变异很大,变异系数大多在 0.65 以上。从平均的渗透性上下限值来看,泥岩 5.1 倍,砾岩 12.8 倍,砂质页岩 7.41 倍,石灰岩 127.2 倍,粗砂岩 22.3 倍,中砂岩 23.3 倍,细砂岩 48.8 倍。与我们统计的结果是基本符合的。

3 围压对渗透性的影响

由于围压限制了岩石的侧向变形,减小了孔隙度,限制了裂隙扩展及宽度,一般来说随着围压的增大,渗透性降低。目前峰值前围压对渗透性的影响试验研究比较多,得出的结论也基本一致。但是这些试验主要是在应力峰值前。针对于峰值应力后的试验较少^[13]。围压不仅是类似于影响裂隙岩体渗透性那样影响峰后裂隙的开度从而影响其渗透性,同时也影响岩石破坏方式。对渗透性的影响可能比峰值前复杂。

目前研究围压对渗透性的影响大部分都是按照当轴向位移加载到一定值后,固定轴向位移或轴压,加卸载围压,研究围压加卸载过程对渗透性的影响这种方式进行的。人们目前对应力峰值前渗透性与围压的关系做的试验研究较多,得出的结果是渗透性随围压的增加而降低,而且降低的速度越来越小,最后趋于某一个稳定值^[51-55]。对于渗透性与围压的关系,研究者中有用幂函数拟合的^[56-57],有用指数函数拟合的^[25,58-59]。渗透性减小对围压的敏感性性与岩石的成岩程度、孔隙大小、裂隙密度等因素相关。成岩程度低、胶结程度弱的更加敏感^[48,60]。相对于孔隙,裂隙受压更容易变形。刘建军^[54]对低渗透性岩石的试验得出裂隙性岩心应力敏感性低于基质性岩心的结论。裂隙性岩心孔隙度降低 13%,渗透性降低 80%,而基质性岩心孔隙率降低 3%,渗透性降低 60%。

一般来说卸载围压后,岩石渗透性有所恢复,但不是完全恢复到原来的值^[50,56-57,52-54]。李相臣^[53]对煤岩卸围压时渗透性只能恢复 25%~35%。贺玉龙^[58]对砂岩和花岗岩裂隙进行了试验,花岗岩卸载

围压渗透性恢复很少,渗透性丧失 98%,砂岩丧失 35%。徐德敏^[52]对蚀变岩的试验发现虽然轴向位移恢复,但是渗透性没有恢复。

当岩石轴压接近峰值强度时,卸载围压会造成岩石的破坏,渗透性变化又与卸载不造成岩石破坏时有所不同。梁宁慧^[61]对风化砂岩在接近破坏状态进行卸围压试验,当卸载位移接近最大卸载位移 80%时,渗透性急剧增加。且随孔隙压力增加,渗透性增加,破坏过程中渗透性增加更大。破坏后渗透性增加 8—12 倍。

李小琴^[13]对砂岩进行了峰后卸除围压的试验。发现渗透性随围压的减小,先增加,而后减小。但是试验的最后一个点是孔隙压力从 3 MPa 减小到 1.8 MPa 的结果,而前面的点都是在 3 MPa 的孔隙压力下进行的。按照有效应力原理,相当于有效围压增大。因此试验的最后一个点是要去掉的。这样,四块试样中两块的结果是渗透性随围压的减小而增加(继续减小围压,渗透性是否减小?),另外两岩块的试验结果是渗透性先增加,而后减小。渗透性的减小说明峰后有裂隙继续在扩展,降低了侧向刚度。如果试验能让围压降到很低,是否能得出这种渗透性先增加后减小的现象具有普遍规律,还是只有部分适合?到了流动阶段降低围压,渗透性又会怎么样?这时围压是不是仅仅像围压对裂隙渗透性那样只是影响裂隙开度?这些需要试验的进一步研究。

研究围压对渗透性的影响主要采用岩石发展到某一阶段后固定轴位移或向轴压,加载卸载围压的方式进行的。对于同种岩石,各项参数接近的情况下,不同围压对全应力应变过程的影响研究较少。由于岩石各项参数离散性一般较大,各种因素都可能对试验结果造成很大的影响。要想获得可靠的试验结果,必须保证选取的试样各种参数接近。这种情况下岩石的破坏模式可能发生根本性的变化,渗透性也可能发生很大的改变^[35]。陈宏敏^[21]对不同围压下砂岩的 CO₂ 气体渗流试验、尹志光^[32]对煤岩进行的瓦斯渗流试验表明,围压越大,渗透性峰值越小,渗透性变化范围越小。

4 影响渗透性变化特征的因素

岩石的渗透性与岩石的孔隙和裂隙直接相关。孔隙结构、裂隙密度、方向、尺度、连通度以及孔隙与裂隙的关系决定着岩石的渗透性。能引起这些参数发展的条件都成为影响岩石渗透性变化的因素。研

究者在研究岩石渗透性演化的方程式时多用指数^[35]、对数函数^[25]、多项式^[20,44]进行拟合。从数学上来说,一般各种函数都能用多项式来逼近,但是不一定能反映其物理本质。这些拟合一般只是在岩石发展的某一阶段比较适合。因此有些研究者对岩石渗透性的不同发展阶段进行分段拟合^[13,22,24]。这是因为在不同发展阶段岩石的孔隙、裂隙特征发生了根本性的改变。这种拟合一般来说不具有普遍性。岩石孔隙、裂隙的发展是岩石内因、外因共同作用决定的。

岩石孔隙裂隙的变化宏观上来说表现为岩石的变形。这也是为什么一些与岩石侧向变形或者体积应变拟合的结果在某些阶段比较好。而影响岩石变形的因素是应力,因此很多研究者利用围压^[25]、轴向变形^[20]、平均应力^[59]、平均有效应力^[62]进行渗透性演化方程的拟合。徐德敏^[52]试验发现轴压与围压相差5 MPa对渗透性影响不大,可见在轴压造成岩石较大损伤以前,轴压并没有围压对渗透性敏感。这是因为在三轴试验条件下,决定岩石轴向渗透性的主要是裂隙、孔隙的侧向尺寸及其连通情况,而围压对其影响更大。一般渗透性随围压、平均应力、有效平均应力的增加而减小进而趋于某个稳定值,这在前面已经详细论述过。渗透性随体积应变、侧向应变的增加而增加。岩石孔隙压力也能影响孔隙裂隙的变形。渗透性演化方程应该考虑孔隙压力的影响。有效应力代替应力应该说是一个更好的选择。朱珍德^[47]对花岗岩的试验中发现10 MPa围压、9 MPa孔隙压力比6 MPa围压、5.8 MPa孔隙压力时渗透性大,花岗岩和灰岩大约为后者的5倍以上。何伟钢^[63]对多个矿区煤层实测渗透率与最小主应力成幂指数关系,而与有效应力相关性更强。康天合^[64]对18个煤矿主采煤层岩样的渗流试验结果统计得出渗透性随体积应力增加呈负指数降低,随孔隙水压呈正指数增加。这些结果证明了这一点。

从内因来说岩石的孔隙度及孔隙结构、岩石的裂隙特征、岩石的脆性、塑性、岩石颗粒的大小都影响岩石损伤过程中的渗透性。孔隙度大且脆性不是很强的岩石,渗透性主要由孔隙渗流决定。变形过程中孔隙压缩变形、塌陷,因此渗透性一直减小。孔隙度大但较脆的岩石,开始渗透性主要由孔隙决定,随变形发展,微裂隙产生,微裂隙贯通了孔隙,渗透性增大很快。但而后孔隙塌陷,渗透性减小。孔隙度不是特别大,而且孔隙尺寸较小,脆性不是特别强

的岩石,如砂岩,开始主要发生孔隙渗流,随孔隙裂隙的压缩,渗透性减小。还在弹性阶段,少量的微裂隙扩展就使渗透性开始明显增加。而脆性较好的低孔隙岩石如石灰岩、花岗岩等,接近峰值才开始明显的渗透性增加。对于孔隙不太低,颗粒比较小的软岩,岩石应力应变曲线没有软化段,开始随着岩石的压缩,渗透性减小。而后随着剪胀,渗透性增加,微裂隙对渗透性影响不大,到了塑性阶段渗透性趋于平稳,渗透性没有降低。当孔隙与裂隙的作用不存在哪一方明显占优时,应力作用下孔隙与微裂隙的不同发展使岩石渗透性演化复杂化。刘彩平^[65]对红砂岩进行全应力应变实验,总体来说渗透性随轴向应变减小。但出现了峰值前渗透性有先增加的现象。这是因为虽然该实验中主要是孔隙控制渗透性,但是峰值前产生的裂隙还有很大的影响,还不能完全忽略。

另外岩体其他物理、化学性质等内因也影响岩石的渗透性发展。如张守良^[66]试验发现在孔隙压差大时渗透性随压差增加而减小,在孔隙压差小时渗透性增加。这是因为高速的水流使细颗粒流动堵塞了孔隙。同时发现疏松的弱胶结砂岩在峰值前渗透性一直随轴向应力减小,而中等胶结砂岩在接近峰值时开始增大。有些岩石遇水发生膨胀,造成孔隙裂隙的堵塞也影响渗透性。张传凤^[26]对碳酸岩盐的试验中,含石膏的岩石由于石膏吸水膨胀而是破坏后渗透性急剧降低,破坏过程中渗透性起伏很大。

5 损伤过程中的非达西流

对于低渗透性的完整岩石块体,存在低速非达西流的现象。当岩石破坏后,渗透性增加,相同水力梯度情况下,渗透水流速度较大,雷诺数较大,可能出现雷诺数超过达西定律实用范围的现象。有文献^[41,67-68]报道岩石破坏前后达西定律都不适用。对于致密的完整岩石,低速非达西流有比较公认的结论。岩石破坏后是否总是非达西流,值得商榷。岩石峰后渗流试验,改变水力梯度的时候,往往也改变了裂隙水压力,在围压一定的情况下,有效围压也就改变了,这意味着实际上是在不同裂隙开度的情况下进行的试验,不符合达西定律一点也不奇怪。如果是保持侧向位移不变,而不是围压不变,结果可能就不一样的。当然,当围压较小时,破坏后岩石裂隙开度较大,出现高速非达西流也是可能的。在围压较高的情况下,破坏后裂隙较小,渗透性可能是符合

达西定律的。

孙明贵^[41]等研究者认为岩石峰后的非达西流可能出现渗流失稳。但我们必须区分渗流失稳与渗流作用下整体结构失稳。渗流作用下岩体结构的失稳,应该说是结构受到渗透力及其他荷载共同作用下的失稳,渗流失稳不一定造成结构失稳。在室内进行全应力应变渗流试验时,由于受到围压及上下加载头的限制,在位移控制加载的情况下,是不可能失稳的。这也是为什么在试验室情况下即使发现非达西渗流,而且非达西因子出现负值也没有发生失稳的原因^[68-69]。在野外发生失稳是由于实际过程不是位移控制加载,而且围压很低。

6 问题与讨论

目前进行了不少岩石损伤过程中的渗透性试验,取得了大量的成果。由于岩石损伤过程中渗透性的变化是一个很复杂的问题,还存在很多的问题值得继续深入研究。

1)目前中国的试验研究还不够系统、完整。发表的试验成果往往提供的数据不够充分,如提供体积应变、侧向应变的结果很少。很少有系统研究各个影响因素单独对试验结果的影响。可对比性的试验结果较少。往往造成试验结果差别的因素很多,造成分析的困难。

2)室内试验与实际工程的差别。目前的试验研究是在小试件上进行的,要应用的实际过程中存在尺度效应。试验上研究这个问题非常困难。目前渗透性试验中无论是瞬态法还是稳态法,水力梯度都特别大,远远超出实际工程中的水力梯度,试验结果能否适用于实际情况,值得研究。实际工程中岩石破坏的围压可能比较小,破坏过程中存在围压卸载,不是试验中的围压保持不变,岩石大尺度的破裂滑动可能造成比小尺寸室内试验更大的裂隙开度,渗透性变化可能比室内试验渗透性更大。

3)渗透性变化的不同应力路径、时间因素、各向异性。岩石破坏造成的是渗透的各向异性,目前的试验只能测量一个方向的渗透性。岩石破裂可能是在拉应力作用下发生的,而这方面还没有见到试验。实际岩体破坏存在时间因素,目前考虑岩体蠕变破坏下的渗透性变化研究很难见到。

4)峰值后复杂的渗透特性。目前的渗透性变化的数学模型基本是在应力峰值前,对于峰值后还没有很好的模型。岩石渗透性发展极其复杂,Zhu^[30]

等人发现高孔隙度的岩石脆性破坏时虽然孔隙度增加,但是渗透性减小。对于低孔隙度的岩石峰值后也往往出现渗透性有所降低的现象。这些都没有得到很好的解释。只有从岩石破坏过程中细观结构的演化来分析才可能研究清楚。目前岩石损伤时细观结构的观测与渗透性演化的结合还不够。Heiland^[70]等对低孔隙度砂岩的试验后指出峰后渗透性的降低与剪切带的形成相关,在偏光镜中观察到剪切带中岩石糜棱化,渗透性应该很低。笔者也曾观察到饱水砂岩三轴破坏后剪切带中出现大量近似泥质的微细颗粒。因此岩石脆性破坏峰后渗透性有所降低与剪切带中出现低渗透性介质密切相关。

参考文献:

- [1] 杨天鸿,唐春安,徐涛,等. 岩石破裂过程的渗流特性-理论、模型与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] MORDECAI M, MORRIS L H. An investigation into the changes of permeability occurring in a sandstone when failed under triaxial stress conditions[M]. Proc. U. S. Rock Mech. Symp., 1971,12:221-239.
- [3] ZOBACK M D, BYERLEE J D. The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly granite[J]. J. Geophys. Res., 1997, 80: 752-755.
- [4] ODA M T, TAKEMURA, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34: 313-331.
- [5] COLIN J. PEACH, CHRISTOPHER J. Spiers. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. Tectonophysics, 1996, 256:101-128.
- [6] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(4): 325-342.
- [7] OTTO SCHULZE, TILL POPP, HARTMUT KERN. Development of damage and permeability in deforming rock salt [J]. Engineering Geology, 2001, 61: 163-180.
- [8] DAVID C, MENENDEZ B, ZHU W, et al. Mechanical compaction, microstructures and permeability evolution in sandstones[J]. Phys. Chem. Earth (A), 2001, 26 (1/2): 45-51.
- [9] 杨永杰,宋扬,陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(2):381-385.
YANG YONG-JIE, SONG YANG, CHEN SHAO-JIE. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 381-385.
- [10] 李树刚,徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68-70.
LI SHU-GANG, XU JING-CAI. Experimental study on permeability of soft coal sample with electro-hydraulic servocontrolled testing system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 68-70.
- [11] 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 SHU-GANG, QIAN MING-GAO, SHI PINGWU. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample [J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(1): 22-24.
- [12] 庞义辉,张勇. 三维应力下岩石渗透率试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 367-371.
PANG YI-HUI, ZHANG YONG. Experimental study of rock permeability under triaxial compression [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 367-371.
- [13] 李小琴,李文平,李洪亮,等. 砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究[J]. 工程地质学报, 2005, 481-484.
LI XIAO-QIN, LI WEN-PING, LI HONG-LIANG, et al. Experimental study on permeability of sandstone during post-peak unloading of the confining pressure [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 481-484.
- [14] 杨天鸿,徐涛,冯启言,等. 脆性岩石破裂过程渗透性演化试验[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2003, 24(10): 974-977.
- [15] 杨天鸿. 岩石破裂过程渗透性质及其与应力耦合作用研究[D]. 沈阳:东北大学, 2001, 1-114.
YANG TIAN-HONG. Study on infiltrate character and coupling analysis of seepage and stress in rock failure process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001.
- [16] 韩宝平,冯启言,于礼山,等. 全应力应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 127-128.
HAN BAO-PING, FENG QI-YAN, YU LI-SHAN, et al. Study on the permeability of carbonate during full periods of stress-strain [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 127-128.
- [17] 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, 21(2): 129-134.
LI YU-SHOU, MA ZHAN-GUO, HE YAO-LONG, et al. Experimental research on permeability of rocks of coal-bearing strata [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(2): 129-134.
- [18] 刘进晓,郭惟嘉,陈绍杰,等. 济北矿区底板岩石的渗透试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(6): 8-10.
LIU JIN-XIAO, GUO WEI-JIA, CHEN SHAO-JIE, et al. Study on permeability test of floor rock in Jibei Mining area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(6): 8-10.
- [19] 朱珍德,刘立民. 脆性岩石动态渗流特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 588-592.
ZHU ZHEN-DE, LIU LI-MIN. Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 588-592.
- [20] 杨永杰,楚俊,郇冬至,等. 煤岩固液耦合应变-渗透率试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 760-764.
YANG YONG-JIE, CHU JUN, HUAN DONG-ZHI, et al. Experimental of coal's strain-permeability rate under solid and liquid coupling condition [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 760-764.
- [21] 张宏敏. 砂岩全应力-应变过程气体渗透特性实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1063-1066.
ZHANG HONG-MIN. Experimental on gaseous seepage properties of sandstone on complete stress-strain process [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1063-1066.
- [22] 李世平,李玉寿,吴振业. 岩石全应力应变对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13-19.
LI SHI-PING, LI YU-DONG, WU ZHEN-YE. The permeability-strain equations relating to complete stress-strain path of the rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 13-19.
- [23] 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, 23(6): 489-491.
WANG JIN-AN, PENG SU-PING, MENG ZHAO-PING. Permeability rule in full strain-stress process of rock under triaxial compression [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(6): 489-491.
- [24] 樊秀娟. 岩石渗透率与应变相关特性的实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(2): 94-97.
FAN XIU-JUAN. Experimental of rock permeability dependence on strain [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2007, 17(2): 94-97.
- [25] 王环玲,徐卫亚,杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1703-1708.
WANG HUAN-LING, XU WEI-YA, YANG SHENG-QI. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1703-1708.
- [26] 张传凤. 华北型煤田峰峰组碳酸盐岩渗透性特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 87-92.
ZHANG CHUAN-FENG. Analysis on permeability

- features of carbonate in Fengfeng group of north China type coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2008, 36(5): 87-92.
- [27] 杨伟峰. 烧变岩伺服条件下渗透特性试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2007, 27(1): 79-81.
YANG WEI-FENG. Experimental research on permeability of burnt rock under servo-control condition[J]. *Mining R & D*, 2007, 27(1): 79-81.
- [28] 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, 23(2): 153-156.
JIANG ZHEN-QUAN, JI LIANG-JUN. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 153-156.
- [29] 杨林德, 闫小波, 刘学成. 软岩渗透性、应变及层理关系的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 473-477.
YANG LIN-DE, YAN XIAO-BO, LIU CHENG-XUE. Experimental study on relationship among permeability, strain and bedding of soft rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 473-477.
- [30] ZHU WEN-LU, WONG TENG-FENG. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution[J]. *Journal of geophysical research*, 1997, 102(B2): 3027-3041.
- [31] 彭苏萍, 屈洪亮, 罗立平, 等. 沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 113-116.
PENG SU-PING, QU HONG-LIANG, LUO LI-PING, et al. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress-strain path[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 113-116.
- [32] 尹光志, 李广治, 赵洪宝, 等. 煤岩全应力-应变过程中瓦斯流动特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 170-175.
YIN GUANG-ZHI, LI GUANG-ZHI, ZHAO HONG-BO, et al. Experimental research on gas flow properties coal specimens in complete stress-strain process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 170-175.
- [33] 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 XIAO-HONG, YANG WEI-FENG, LIU LANG-TAO, et al. Test study on permeability of floor rock in stope[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2006, 33(3): 20-22.
- [34] 韩宝平. 任丘油田迷雾山组白云岩储集层的渗透性试验研究[J]. *地质科学*, 2000, 35(4): 396-403.
HAN BAO-PING. Study on permeability test of dolomite reservoir of wumishan formation in Renqiu oil field[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 396-403.
- [35] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 凝灰岩破坏全过程渗流演化规律的实验研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(7): 1030-1033.
LIU HONG-LEI, YANG TIAN-HONG, YU QING-LEI, et al. Experimental study on fluid permeation evolution in whole failure process of tuff[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2009, 30(7): 1030-1033.
- [36] 张天军, 李树刚, 陈占清, 等. 某高瓦斯矿煤岩渗透特性的实验研究[J]. *武汉工业学院学报*, 2009, 28(3): 86-89.
ZHANG TIAN-JUN, LI SHU-GANG, CHEN ZHAN-QING, et al. Experimental study on the permeability of coal rocks of an gas-rich coalmine[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2009, 28(3): 86-89.
- [37] 李树刚, 张天军, 陈占清, 等. 高瓦斯矿煤样非 Darcy 流的 MTS 渗透性试验[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 23(3): 1-4.
LI SHU-GANG, ZHANG TIAN-JUN, CHEN ZHAN-QING, et al. Non-Darcy flow MTS permeability experimental of coal samples of a gas-rich coal mine[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Nature Science Edition*, 2008, 23(3): 1-4.
- [38] 丁玉梅, 韩宝平, 裴宗平. 兖州矿区红层全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. *江苏煤矿*, 2004, (1): 44-45.
DING YU-MEI, HAN BAO-PING, PEI ZONG-PING. Experimental study on permeability of red layer of Yanzhou mining area during the complete strain-stress path[J]. *Jiangsu Coal*, 2004, 1: 44-45.
- [39] 王玉怀, 潘德祥, 张建华. 底板岩石渗透率的试验研究[J]. *河北煤炭*, 1997, (2): 26-27.
WANG YU-HUAI, PAN DE-XIANG, ZHANG JIAN-HUA. Experimental study on permeability of mining floor rock[J]. *Hebei Coal*, 1997, 2: 26-27.
- [40] 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 LIAN-TAO, YU XU-LEI, LIU QI-MENG, et al. Research on rock complete stress-strain permeability experimental in coal floor [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2006, 34(6): 37-40.
- [41] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 等. 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 MING-GUI, HUANG XIAN-WU, LI TIAN-ZHEN, et al. Seepage properties of non-darcy flow in complete failure process of limestone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 484-491.
- [42] 张天军, 李树刚, 陈占清. 突出矿煤岩微孔隙特征及其

- 渗透特性[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 310-313.
- ZHANG TIAN-JUN, LI SHU-GANG, CHEN ZHAN-QING. Microscopic porous characteristics and permeability of coal rocks of an outburst coal mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 310-313.
- [43] 刘启蒙,李文平,徐浚,等. 模拟煤层开采岩石渗透性试验研究[J]. 能源技术与管理[J]. 2007,(2):5-7.
- LIU QI-MENG, LI WEN-PING, XU JUN, et al. Research on rock permeability experiment simulating coal mining[J]. Energy Technology and Management, 2007, 2:5-7.
- [44] 李树刚,张天军,陈占清,等. 高瓦斯煤的渗透性试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4):8-11.
- LI SHU-GANG, ZHANG TIAN-JUN, CHEN ZHAN-QING, et al. Experimental research on the permeability of gas-rich coal [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4):8-11.
- [45] 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 SHU-GANG, QIAN MING-GAO, SHI PING-WU. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample [J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(1): 22-24.
- [46] 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.
- [47] 朱珍德,张爱军,徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5):555-563.
- ZHU ZHEN-DE, ZHANG AI-JUN, XU WEI-YA. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 555-563.
- [48] 彭苏萍,孟召平,王虎,等. 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 SU-PING, MENG ZHAO-PING, WANG HU, et al. Testing study on pore ration and permeability of sandstone under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 742-746.
- [49] 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, 21(10):1442-1446.
- JIANG ZHEN-QUAN, JI LIANG-JUN, ZUO RU-SONG, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servo-control condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1442-1446.
- [50] 叶源新,刘光廷. 三维应力作用下砂砾岩孔隙型渗流[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(3):335-339.
- YE YUAN-XIN, LIU GUANG-TING. Porous seepage in calcirudite rock with 3-D stresses[J]. J Tsinghua Univ; Sci & Tech, 2007, 47(3):335-339.
- [51] 石必明,刘健,俞启香. 型煤渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2007, 27(1):5-8.
- SHI BI-MING, LIU JIAN, YU QI-XIANG. Experimental study on the coal briquette permeability [J]. Journal of Anhui University of science and Technology: Natural Science, 2007, 27(1): 5-8.
- [52] 徐德敏,黄润秋,张强,等. 高围压条件下孔隙介质渗透特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 752-756.
- XU DE-MIN, HUAN RUN-QIU, ZHANG QIANG, et al. Experimental study on permeability of porous media under high confining pressure [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 752-756.
- [53] 李相臣,康毅力,罗平亚. 应力对煤岩裂缝宽度及渗透率的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1):29-32.
- LI XIANG-CHEN, KANG YI-LI, LUO PING-YA. The effects of stress on fracture and permeability on coal bed [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(1): 29-32.
- [54] 刘建军,刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, 7(1):41-44.
- LIU JIAN-JUN, LIU XIAN-GUI. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44.
- [55] 薛永超,程林松. 微裂缝低渗透岩石渗透率随围压变化实验研究[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1):108-110.
- XUE YONG-CHAO, CHENG LIN-SONG. Experimental study on permeability variation with confining pressure on micro-fracture and low-permeability rock [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1):108-110.
- [56] 黄远智,王恩志. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 410-414.
- HUANG YUAN-ZHI, WANG EN-ZHI. Experimental study on coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective pressure for low permeability rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2):410-414.
- [57] 黄远智,王恩志. 低渗透岩石渗透率与有效围压关系的试验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(3):340-343.
- HUANG YUAN-ZHI, WANG EN-ZHI. Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability [J]. J Tsinghua Univ; Sci & Tech, 2007, 47(3):340-343.
- [58] 贺玉龙,杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性

- 的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415-419.
- HE YU-LONG, YANG LI-ZHANG. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 415-419.
- [59] 孙培德, 凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(增): 28-31.
- SUN PEI-DE, LING ZHI-YI. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(sup): 28-31.
- [60] 陈祖安, 伍向阳, 孙德明, 等. 砂岩渗透率随静水压力变化的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 155-159.
- CHEN ZU-AN, WU XIANG-YANG, SUN DE-MING, et al. Study on elationship between permeability of sandstone and hydrostatic pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 1995, 14(2): 155-159.
- [61] 梁宁慧, 刘新荣, 包太, 等. 岩体卸荷渗流特性的试验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(10): 133-135.
- LIANG NING-HUI, LIU XIN-RONG, BAO TAI. Experimental study on the characteristic of seepage with unloading rock mass[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(10): 133-135.
- [62] 彭守建, 许江, 陶云奇, 等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(3): 303-307.
- PENG SHOU-JIAN, XU JIANG, TAO YUN-QI. Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3): 303-307.
- [63] 何伟钢, 唐书恒, 谢晓东. 地应力对煤层渗透性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2000, 19(4): 353-355.
- HE WEI-GANG, TANG SHU-HENG, XIE XIAO-DONG. Effect of in-situ on coalbed permeability[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2000, 19(4): 353-355.
- [64] 康天合, 白世伟, 赵永宏. 煤体导水系数及其变化规律的实验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 587-591.
- KANG TIAN-HE, BAI SHI-WEI, ZHAO YONG-HONG. Testing study on water conduction coefficient of coal mass and its variation law [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 587-591.
- [65] 刘彩平, 段庆全. 红砂岩三向应力状态下渗透性能的实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(3): 9-11 转.
- LIU CAI-PING, DUAN QING-QUAN. Laboratory study of permeability of red sandstone under three-Dimensional stress[J]. Mining R & D, 2009, 29(3): 9-11.
- [66] 张守良, 沈琛, 邓金根. 岩石变形及破坏过程中渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 885-888.
- ZHANG SHOU-LIANG, SHEN CHEN, DENG JIN-GEN. Testing study on the law of permeability variation in process of rock deformation and damage[J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2000, 19(sup): 885-888.
- [67] 胡大伟, 周辉, 谢守益, 等. 峰后大理岩非线性渗流特征及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 451-458.
- HU DA-WEI, ZHOU HUI, XIE SHOU-YI, et al. Research on character and mechanism of nonlinear seepage in post-peak marble [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 451-458.
- [68] 程宜康, 陈占清, 缪协兴, 等. 峰后砂岩非 Darcy 流渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2005-2009.
- CHENG YI-KANG, CHEN ZHAN-QING, MIU XIE-XING, et al. Testing study on permeability of non-Darcy flow in post-peak sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2005-2009.
- [69] 唐红度, 唐平, 陈占清. 煤样渗透特性及渗流稳定性的实验研究[J]. 煤炭科技, 2009, 3: 1-3.
- TANG HONG-DU, TANG PING, CHEN ZHAN-QING. Experimental study on coal sample of seepage characteristic and seepage stability[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2009, 3: 1-3.
- [70] HEILAND J, RAAB S. Experimental investigation of the influence of differential stress on permeability of a lower Permian (Rotliegend) sandstone deformed in the brittle deformation field[J]. Phys. Chem. Earth(A), 2001, 26(1-2): 33-38

(编辑 胡玲)