

DOI: 10.11779/CJGE201408021

# 深部巷道底板岩体渗透性高压压水试验研究

黄震<sup>1</sup>, 姜振泉<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 曹丁涛<sup>2</sup>, 王言剑<sup>3</sup>, 张冬<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500;

3. 兖州煤业股份有限公司东滩煤矿, 山东 邹城 273512)

**摘要:** 岩体渗透性是反映岩体水力学特征的重要参数, 为探究深部岩体的渗透性, 采用钻孔高压压水试验手段, 对东滩煤矿深部巷道底板四段岩体进行了现场原位压水试验, 获得了大量实测数据。试验和数据分析结果表明: 岩体在压水过程中经历了“隔水—导渗—稳渗”的过程, 随着压水的进行, 岩体的渗透性不断增强。东滩煤矿深部底板的厚层泥岩具有低阻弱渗的特点, 厚层砂岩和互层具有高阻弱渗的特点, 四段岩体原始状态下渗透性均较差。注水压力与流量关系曲线具有很好的指数关系, 除厚层砂岩外, 厚层泥岩和互层的注水压力—流量关系具有明显的分段性。岩体等效裂隙宽度随着注水压力的增大具有较好的指数关系且具有明显的分段性, 即可分为突变点前的稳定阶段和突变点后的突增阶段。可通过裂隙宽度变化量 $\Delta b$ 是否大于0来判断岩体内是否发生明显渗流。研究结果有助于加强对深部岩体在水压作用渗透性变化的认识, 为深部煤层的安全开采提供重要的参考依据。

**关键词:** 深部岩体; 高压压水试验; 渗透性; 等效裂隙宽度; 立方定律; 指数关系

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)08-1535-09

**作者简介:** 黄震(1989-), 男, 江西大余人, 博士研究生, 主要从事岩土工程和水文地质工程地质方面的研究。E-mail: huangzhen075@163.com。

## High-pressure water injection tests on permeability of deep rock mass under tunnels

HUANG Zhen<sup>1</sup>, JIANG Zhen-quan<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, CAO Ding-tao<sup>2</sup>, WANG Yan-jian<sup>3</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Yanzhou Coal Mining

Co., Ltd., Yanzhou Coal Mining Company, Zoucheng 273500, China; 3. Dongtan Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Co., Ltd., Zoucheng

273512, China)

**Abstract:** The permeability is a very important factor to determine the hydraulic characteristics of rock mass. To study the permeability of deep rock mass, high-pressure borehole water injection tests are carried out to analyze the four segments of rock masses in Dongtan Coal Mine, and numerous data are obtained. The test results and analyses of data show that the rock mass goes through the process of “water resistance-seepage guiding-stable seepage”. The permeability of rock mass increases with the test process. The thick mudstone under the tunnel of Dongtan Coal Mine exhibits the behavior of low water anti-pressure and permeability, while the thick sandstone and other two rock masses show that of high water anti-pressure and low permeability. The four test rock masses are of low permeability. The regression results indicate the exponential relationship between injection pressure and flow rate with high regression coefficients. The curves of injection pressure and flow rate of thick mudstone and interbed exhibit significant segmentation expect those of thick sandstone. The relationship between injection pressure and equivalent fracture width shows obvious exponential relationship as well, and two significant segmentations appear, that is, stability before mutation and sudden increase after mutation. Whether seepage in the rock mass happens or not can be judged by the relation between  $\Delta b$  and 0. The conclusions will help further understand the permeability of deep rock masses under high water pressure and may make an important reference for safety mining of deep coal mines.

**Key words:** deep rock mass; high-pressure water injection test; permeability; equivalent fracture width; cubic law; exponential relationship

## 0 引言

随着近年来煤炭资源的大规模开采及交通和水利

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036003)

收稿日期: 2014-01-06

水电重大基础设施施工工程的建设,中国已成为世界上煤炭开采和隧道修建规模与难度最大的国家,其中突水事故已成为煤炭开采和岩溶隧道施工过程中风险最大的灾害之一,因此煤矿和隧道突水问题已逐渐成为岩土工程领域关注的焦点<sup>[1-8]</sup>。尤其随着浅部煤炭资源储量的急剧减少,很多矿区已开始进行深部煤炭资源的开采,但深部开采条件复杂,受到底板承压含水层的威胁,更易发生突水事故,特别在华北煤田,其下伏的奥陶系灰岩含水层厚度大、水压高、富水性强<sup>[9]</sup>。底板岩体对防止底板承压含水层突水起着重要的作用,而底板岩体的渗透性是评价底板突水危险性的一项重要指标。因此,研究深部岩体的渗透特性具有重要的工程意义。

岩体的渗透性可通过多种方法获得,如室内数值模拟及渗透试验<sup>[10-15]</sup>及现场原位压水试验<sup>[16-22]</sup>等。目前岩体渗透性大都通过室内试验获得,由于室内试验为岩块的渗透性测试,试验条件无法真实反映底板岩体所处的实际地质环境及岩体的结构条件,且试验的孔隙水压力、围压条件与实际岩体所处的条件有较大的差别,因此,室内试验得到的岩体渗透性与底板岩体的真实渗透性存在较大的差异。与室内试验相比,现场原位压水试验能够真实地反映现场地质环境、岩体结构状态下的渗透性,是获得岩体渗透性的一种可靠方法,其可为评价岩体的渗透性提供基本的资料和依据<sup>[20-21]</sup>。但由于现场压水试验,特别在煤矿巷道中的测试方法环节繁琐、工艺复杂,且技术要求严格,因此压水试验数据积累较少,迄今兖州及周边矿区尚未有深部岩体现场压水实验数据。目前兖州矿区东滩煤矿主采3煤,随着3煤资源量的减少,该矿马上面临深部16<sub>上</sub>、17煤开采的问题,由于深部煤层底板近距离分布有太原组十四灰岩和奥陶系灰岩两个富水性较好的含水层,因此东滩煤矿深部煤层的开采受到底板承压含水层突水的威胁。鉴于此,为了获得该矿深部底板岩体的渗透特性,为进一步评价突水危险性提供依据,在该矿深部巷道进行底板岩体现场压水试验,以期对矿井突水评价提供有益的依据。

## 1 岩体高压压水现场实测

### 1.1 试验方法

本次压水采用一个孔注水,一个孔测试的方法,如图1所示。当钻孔钻进至测试岩体顶部时,安装套管,注浆固管、试压后继续钻进至测试岩体设计深度内。钻孔施工结束后,在测试孔内安装水压力探头,通过电缆与水压检测仪连接;压水孔通过高压水管与高压压水泵连接,并接入流量计、压力表。最后,用

法兰盘将孔口密封。

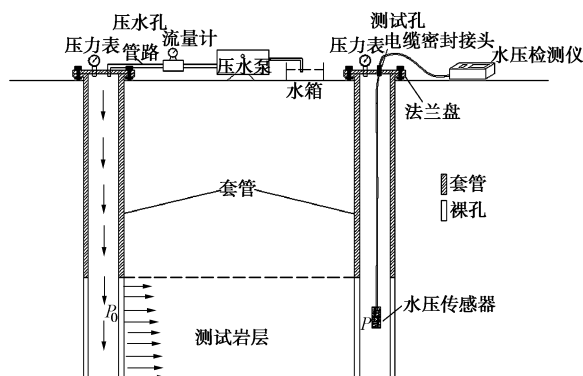


图1 压水测试方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water injection test method

### 1.2 测试点选择

选择东滩煤矿东翼第一回风巷进行现场压水实测,具体位置距离202DX4钻场硐室25 m左右,距离1303工作面轨顺10 m左右,该位置较适合进行压水测试工作:①此位置距离已开采的3煤底板40 m左右,巷道比较稳定,在此位置施工钻窝、钻孔及进行测试工作相对安全;②在测试位置30 m范围内已经施工了202DX4水文孔,因此对测试位置的地层层序结构有较为准确的掌握,有利于测试岩体的选择及划分。

### 1.3 测试岩体选择

东滩煤矿深部煤层底板近距离发育有十四灰岩和奥陶系灰岩两个含水层:

(1) 十四灰厚0~16.89 m,平均8.34 m,厚度变化较大,属岩溶裂隙承压含水层。单位涌水量0.0000014~0.00065 L/s·m,矿化度0.829~2.208 g/L,

水质类型为HCO<sub>3</sub>-Na型。十四灰含水层为本矿深部煤层开采时的直接充水含水层。

(2) 奥陶系灰岩为煤系基底,岩性为灰、青灰色厚层灰岩,致密坚硬,间夹黄色泥质灰岩,属岩溶裂隙承压含水层。上部岩溶裂隙发育,是区域性强含水层,单位涌水量0.00018~0.038 L/s·m。本井田奥灰补、径、排条件较差,但厚度大、水压大,水位埋藏浅。因此,奥陶系灰岩含水层对本矿深部煤层的开采威胁较大。

根据202DX4水文孔钻孔资料可知,测试位置附近三灰与16<sub>上</sub>煤之间分布有厚层状泥岩及砂岩段;16<sub>上</sub>煤和17煤相隔约12 m,岩性以铝质泥岩为主;17煤底板主要由铝质泥岩、砂质泥岩、灰岩等相间组成,17煤与底板直接充水含水层(十四灰)的间隔厚度约36 m。为此,本次岩体压水测试选择四段岩体进行:

第一、二段测试岩体为分布于三灰与 16<sub>上</sub>煤之间的厚层状泥岩及砂岩段; 第三、四测试岩体为分布于 16<sub>上</sub>煤与十四灰之间的铝质泥岩互层段和灰岩、泥岩互层段。为了准确的对测试岩体进行划分, 对其中一个测试孔进行岩芯取样 (图 2), 根据岩芯取样结果可知: 第一测试段为灰黑色泥岩, 断口贝壳状, 底部岩芯破碎, RQD 值约为 40%; 第二测试段主要为灰白色细砂岩, 成份以石英、长石为主, 泥质胶结, 岩芯较完整, RQD 值约为 90%; 第三测试段主要为铝质泥岩和泥岩互层, 夹 17 煤, 铝质泥岩和泥岩局部岩芯破碎, RQD 值约为 70%, 17 煤以亮煤为主, 块状; 第四测试段为灰岩泥岩互层, 其中灰岩致密坚硬, 发育少量闭合裂隙, 底部岩芯破碎, RQD 值约为 85%, 泥岩局部岩芯破碎, RQD 值约为 30%。最终测试岩体划分结果如表 1 所示。

表 1 测试岩体划分

Table 1 Classification of test rock masses

测试岩体	岩性描述	层厚 /m	距巷道底板距离 /m
第一测试段	厚层泥岩	12.79	31.51~44.30
第二测试段	厚层砂岩	12.13	96.17~108.30
第三测试段	铝质泥岩、泥岩、煤	14.90	145.20~160.10
第四测试段	灰岩、泥岩互层	10.57	172.23~182.80

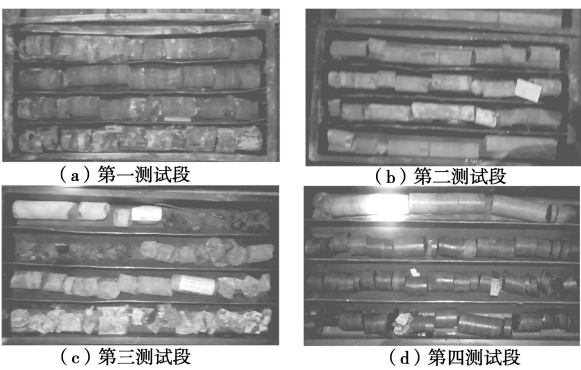


图 2 测试岩体部分岩芯照片

Fig. 2 Photos of test rock core samples

1.4 钻孔布置、施工及测试

本次压水试验共布置 2 个垂直测试钻孔 (C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub>), 两孔间距 5 m。两测试孔交叉注水和测试, 即一个钻孔注水时, 另一个钻孔测试。限于篇幅, 本文只对第一段岩体钻孔施工过程进行简要说明:

- (1) C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 两孔钻进至孔深 32 m, 并安装套管, 之后进行注浆固管并进行耐压测试, 以确保 10 MPa 下无泄漏、位移现象。
- (2) C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 孔钻进至孔深 44 m。
- (3) 在 C<sub>1</sub> 孔中安装水压压力探头并通过导线穿过

- 法兰盘与水压检测仪连接, 并用法兰盘将套管封住 (图 3 (a))。
- (4) 用法兰盘将 C<sub>2</sub> 孔密封, 并用高压水管连接压水泵 (图 3 (b))。
- (5) 完成以上步骤后, 启动压水泵对 C<sub>2</sub> 孔进行注水, 并对 C<sub>1</sub> 孔进行水压监测。
- (6) 试验完成后将 C<sub>1</sub> 孔中的水压力探头取出, 进行后续工作。

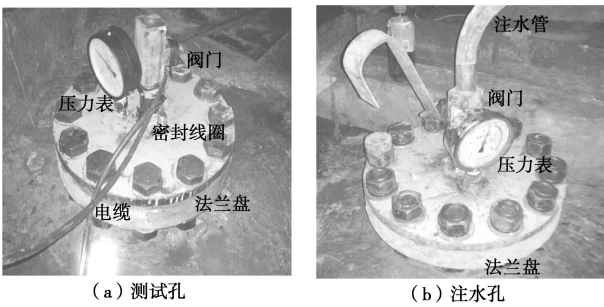


图 3 现场测试孔图片

Fig. 3 Photos of test boreholes

2 岩体高压压水试验结果

现场压水试验自 2013 年 5 月 3 日开始, 至 5 月 31 日结束。由于测试孔中水压力传感器收集的数据是传感器埋设位置的水压数据, 压水孔压水压力为孔口压力, 数据处理时将二者换算到测试岩体位置的压力值。图 4 为岩体高压压水试验过程中测试水压、注水压力及注水流量随时间的变化过程曲线。

图 4 (a) 为第一测试段 (厚层泥岩) 压水过程曲线, 由于测试水压较注水压力小, 二者绘制在一张图中时不能明显显示测试水压的变化, 故将测试水压数据放大 10 倍制图。本次测试注水压力分 6 个压力级别逐步提高。其中注水压力保持 3.32 MPa 持续压水 25 min 左右, 测试水压和流量均未发生明显变化, 表明此时测试岩体处于隔水状态; 注水压力 3.32 MPa 持续压水 25 min 后, 测试孔开始监测到水压变化, 之后的压水过程中测试水压一直缓慢升高, 表明测试岩体已开始发生渗流, 此过程注水流量也慢慢增大, 其中在注水压力由 11.32 MPa 增至 13.32 MPa 的过程中, 流量出现较大幅度增大的情况; 压水后期注水压力稳定在 13.32 MPa 的过程中, 测试水压基本稳定在 1.35 MPa, 此阶段注水流量也基本稳定。

对于第二测试段 (厚层砂岩) 压水过程曲线 (图 4 (b)), 压水前期约 90 min 时段内, 注水压力逐步增至 11 MPa, 测试水压基本维持稳定, 其值在 0.85~1.32 MPa 范围小幅波动, 表明测试岩体尚未发生明显渗

流;之后随着注水压力的增大(约 90~180 min),测试水压持续缓慢升高,由 1.32 MPa 升高至 5.46 MPa,表明此过程测试岩体中已发生渗流;压水后期,测试水压基本维持稳定在 6 MPa 左右。在整个压水过程中,注水流量缓慢增大,且并未出现明显突变现象。

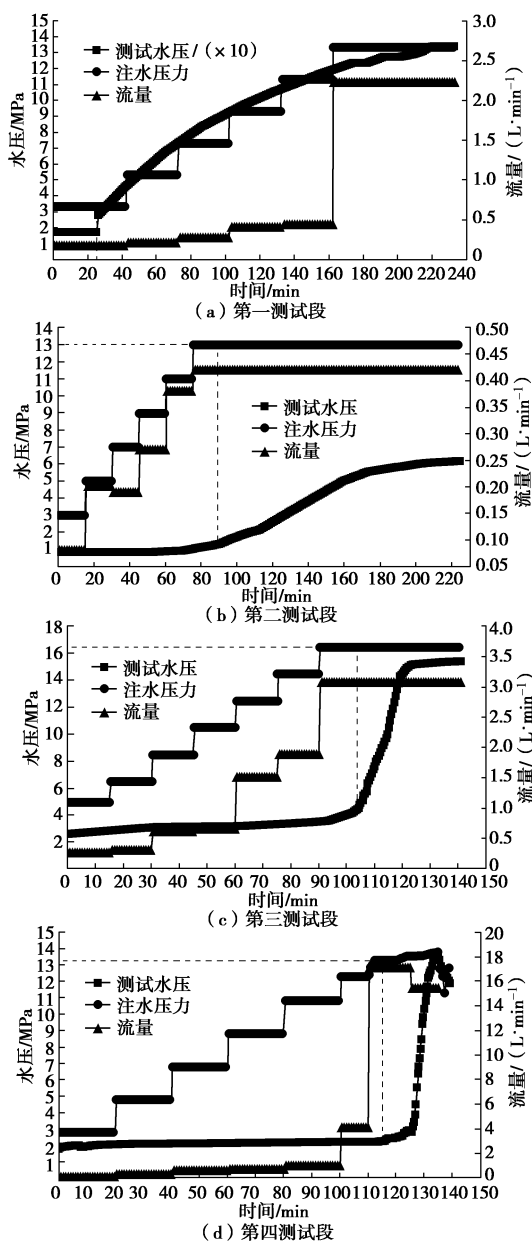


图 4 压水测试过程曲线

Fig. 4 Curves of water injection tests

从第三测试段(铝质泥岩、泥岩、煤互层)压水过程曲线来看(图 4(c)),测试水压、注水压力和流量随时间的变化过程曲线与第二段岩体类似,压水前期约 105 min 时段内,测试水压变化不显著(从 2.58 MPa 增大至 4.95 MPa);之后注水压力由 14.46 MPa 增大至 16.46 MPa 时,测试水压急剧增大至 15.2 MPa;压水后期,测试水压基本保持稳定。在整个压水过程

中,注水流量在试验进行到约 90 min 时出现了较明显的突增现象。

对于第四测试段(灰岩、泥岩互层)压水过程曲线(图 4(d)),在注水压力逐步增大至 11 MPa 下,测试水压基本保持在初始压力 2.35 MPa,表明测试岩体在原始状态下隔水性良好;当注水压力继续增大至 12.4 MPa 时,测试水压开始显现变化,随后随着注水压力的增大而急剧升高,在注水压力达到 13.8 MPa 时,测试水压达到 13.5 MPa,表明此时测试岩体已被压通,形成了很好的水流通道路。在试验进行到约 100 min 时流量出现了一次小幅度的突增,在约 110 min 时流量出现较大幅度增大的现象(由 4.06 L/min 增至 17.14 L/min)。

总体来看,4 个岩体测试段压水都经历了测试水压“稳定—增大—稳定”的过程,表明测试岩体在压水过程中经历了“隔水—导渗—稳渗”的过程。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 测试岩体阻水性分析

##### (1) 岩体起始导渗条件

为了量化评价测试岩体的起始导渗条件,取测试孔测试水压发生明显变化的点作为起始导渗的特征点,如图 4 所示,将该点对应的注水压力定义为起始导渗水压  $P_{w0}$ 。从渗流力学的角度分析,起始导渗水压是指岩土形成导渗条件的最低压力水头,对应于压水试验,起始导渗水压则可指导致测试岩体发生渗流的注水压力。抗渗阻力为起始导渗水压与两测试孔间距的比值。则可将起始导渗水压、渗透压差及抗渗阻力作为测试岩体原始状态阻水性评价的量化依据,此次压水试验得到的四段岩体起始导渗参数见表 2。

从表 2 可知,第一段岩体的起始渗透条件与其它三段岩体差异较大,第一段岩体的起始导渗水压仅为 3.32 MPa,而其它三段岩体均高于 12 MPa,且第一段岩体抗渗阻力远低于其它三段岩体,但从整个压水过程来看,第一段岩体渗透压差一直较大,因此第一段岩体原始状态下表现出了低阻弱渗的特点,结合钻孔取芯情况,分析其原因,第一段岩体为厚层泥岩,局部岩芯破碎,且发育有较多细微裂隙,因此在水压作用下岩体中虽能发生渗流但却不通畅;与第一段岩体相比,其它三段岩体起始导渗水压较大、抗渗能力较强(均大于 2.5 MPa/m),直至岩体压裂导通才开始发生渗流,因此这三段岩体表现出了高阻弱渗的特点,结合岩芯结构情况,主要归结于测试岩体原始状态裂隙不发育,岩体内的渗流是由高压致裂引起。

表 2 测试岩体起始导渗条件参数表

测试段	水压/MPa			抗渗阻力 /(MPa·m <sup>-1</sup> )
	导渗水压	测孔水压	渗透压差	
第一段	3.32	0.50	2.82	0.66
第二段	12.98	1.04	11.94	2.59
第三段	16.46	4.95	11.51	3.29
第四段	13.35	3.15	10.20	2.67

(2) 岩体稳态渗流过程

由前文分析可知,除第四段岩体不显著外,其它三段岩体压水后期当注水压力在一高值保持稳定时,测试水压会基本维持稳定。因此,可将压水试验后期测试水压稳定过程考虑为稳态渗流过程,对应的注水压力定义为稳态水压。同理,可将稳态水压、渗透压差及抗渗阻力作为测试岩体稳态渗流过程阻水性的评价依据,结果如表 3 所示。

从表 3 可知,稳态压渗过程中,四段岩体注水压力均较大,其中第三段岩体稳态水压达到 16.46 MPa; 4 个测试段岩体在稳态渗流过程的抗渗阻力均较大(均大于 2.59 MPa/m);除第一段外,其它岩体稳态渗流过程的渗透压差较起始导渗状态低,但第一段岩体此时的测试水压较初始有所增大,说明稳态渗流过程中裂隙较初始有所扩张;但厚层泥岩和厚层砂岩在此过程中渗透压差明显高于互层段,分析原因可能是厚层泥岩和砂岩渗流通道主要为原有裂隙,高压压水仅使裂隙连通性提高,而互层在高水压作用下裂隙进一步扩展形成了较好的渗流通道。

表 3 测试岩体稳态导渗参数表

测试段	水压/MPa			抗渗阻力 /(MPa·m <sup>-1</sup> )
	稳态水压	测孔水压	渗透压差	
第一段	13.32	1.34	11.98	2.66
第二段	12.98	6.19	6.79	2.59
第三段	16.46	15.40	1.06	3.29
第四段	13.80	13.40	0.40	2.76

3.2 注水压力 - 流量关系分析

正确认识压水试验过程中注水压力与流量的关系曲线有助于更加清楚地理解和分析岩体的高压渗透特性<sup>[22]</sup>。文献[23]指出常规压水试验的压力 - 流量曲线可分为层流型、紊流型、扩展型、冲蚀型和充填型 5 种类型;文献[24]指出在不同压力下裂隙内的渗流状态是不同的并指出高压压水试验压力 - 流量曲线可分为开裂型、扩张型和透水层型 3 种,其中开裂型一旦水压超过临界值,流量就会急剧增大;扩张型不存在明显的临界压力,且流量随水压的增加而增加,随水压的减小而减小。

压水过程中注水压力 - 流量关系曲线如图 5 所示。从 4 个测试段岩体的注水压力 - 流量关系曲线上可以看出,注水压力与流量均具有很好的指数关系(相

关系系数  $R^2$  大于 0.95)。除第二测试段外,其余三测试段的注水压力 - 流量关系曲线上均出现了明显的突变点,此突变点将曲线分为两阶段 - 突变点前流量稳定阶段及突变点后流量突增阶段。说明第一、三、四段岩体压水属于开裂型,从注水压力 - 流量关系曲线上的突变点可以读出岩体的临界抗水压值的大小,分别为 11.32, 10.46, 10.8 MPa; 而第二测试段岩体压水属于扩张型,说明该测试段岩体相对完整,岩体所含的裂隙较少。此外,本次压水试验的 4 个测试岩体段均采用较小的流量就能达到较大的注水压力(如第一测试段流量为 0.44 L/min 时,注水压力能达到 11.32 MPa),说明四段岩体的完整性均较好,因此原始状态下具有较好的阻水性。

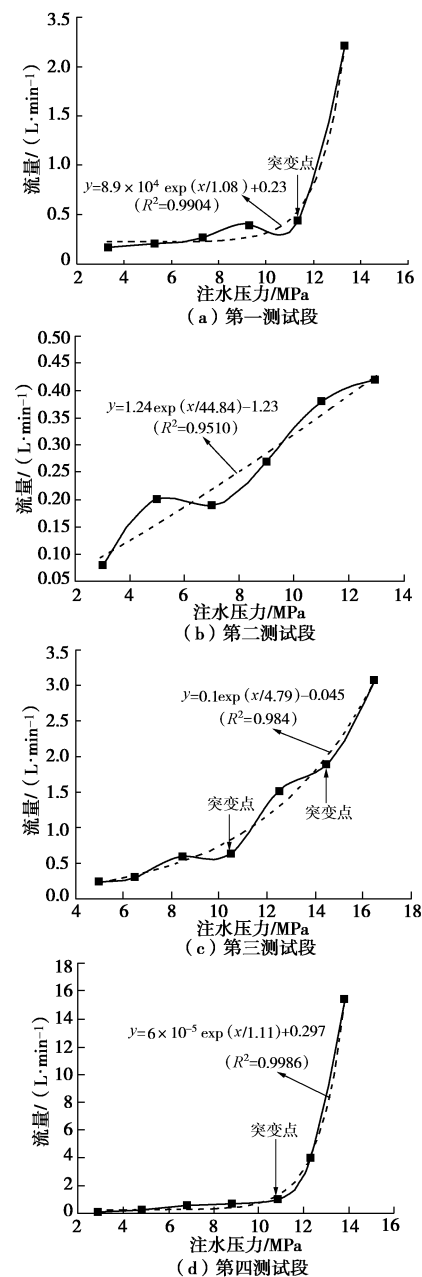


图 5 压水测试过程注水压力 - 流量关系曲线

Fig. 5 Relationship between injection pressure and flow rate during tests

### 3.3 岩体裂隙宽度的确定

水流的主要运动通道是岩体中的裂隙,而天然岩体中的裂隙形态相当复杂,往往构成复杂的裂隙网络。单裂隙面是构成岩体裂隙网络的基本元素,因此研究单裂隙的渗透特性是研究裂隙岩体水流运动规律的基础,而其中裂隙宽度的确定是节理岩体渗透性研究中必不可少并且相当困难的课题<sup>[25-28]</sup>。Lomize<sup>[29]</sup>、Romm<sup>[30]</sup>、Louis<sup>[31]</sup>针对单裂隙面的渗流特性进行了平行板裂隙水流试验,其在假定裂隙是由光滑、平直、无限长的平行板构成,平行板间无充填介质,水流为粘性不可压缩流且为定常层流(如图6所示)的基础上提出了裂隙岩体渗流的立方定律,其表达式为

$$q = \frac{gb^3}{12\mu} J \quad (1)$$

式中  $q$  为流量;  $g$  为重力加速度;  $b$  为裂隙宽度,为了应用于天然裂隙,可简化为等效裂隙宽度;  $\mu$  为水流动力粘滞系数,水温为 15℃ 时,  $\mu = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $J$  为沿裂隙面方向的水力坡降。

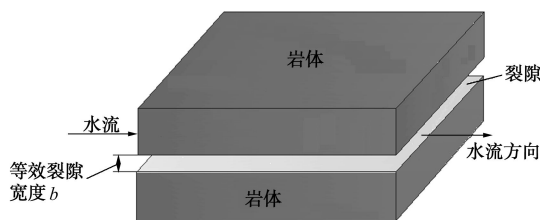


图6 等效裂隙宽度示意图<sup>[27-28]</sup>

Fig. 6 Photo of equivalent fracture width<sup>[27-28]</sup>

由前文可知,在压水过程中流量存在一突变点,文献[32]认为流量发生重大改变的原因主要是岩体中裂隙宽度的变化所致,裂隙宽度  $b$  在一定的注水压力作用下突然增大,使水流通道增大,以致流量增加。压水过程中  $b$  可表示为

$$b = b_0 + \Delta b \quad (2)$$

式中,  $b_0$  为天然状态下裂隙的原始宽度,  $\Delta b$  为裂隙宽度的变化量。一些学者利用已有的法向变形经验公式,建立裂隙宽度随应力变化的关系式,得出裂隙宽度与应力具有指数关系<sup>[32-33]</sup>。且由前文可知,注水压力和流量间具有较好的指数关系,因此可知注水压力和裂隙宽度间也应具有指数关系。则对应于现场压水试验,  $\Delta b$  可通过下式来表示:

$$\Delta b = c_1 \exp \left\{ \frac{c_2 (P - \sigma)}{K_n} \right\} \quad (3)$$

式中,  $P$  为压水试验中注水压力,  $\sigma$  为岩体的临界抗压强度,  $K_n$  为岩体裂隙刚度,  $c_1$ ,  $c_2$  为常数。

由以上可知,当  $b > b_0$ , 即  $\Delta b > 0$  时,流量  $q$  会发生突变。根据式(1)可反算出岩体的裂隙宽度:

$$b = \left( \frac{q 12\mu}{J g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

则

$$\Delta b = \left( \frac{q 12\mu}{J g} \right)^{1/3} - b_0 \quad (5)$$

因此发生水压劈裂、岩体渗透性明显增强及发生明显渗流的必要条件是:

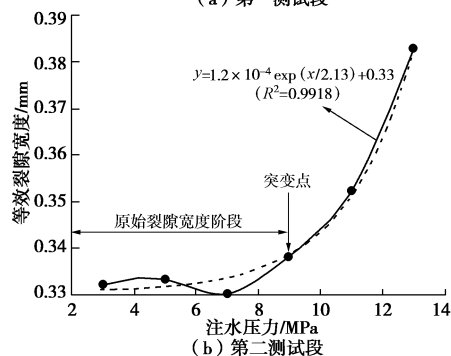
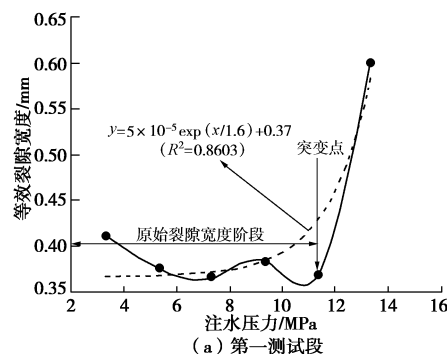
$$\Delta b > 0 \quad (6)$$

即要求注水压力  $P$  大于岩体的临界抗压强度  $\sigma$ 。

本文在压水试验数据的基础上,根据式(4)计算出了各个注水压力级别下的等效裂隙宽度定量值,绘制了注水压力与等效裂隙宽度的关系曲线并对曲线进行拟合分析(图7)。由图7可知,注水压力-等效裂隙宽度具有较好的指数关系(四测试段相关系数  $R^2$  分别为 0.8603, 0.9918, 0.9751 及 0.9959),验证了前文中提出的二者具有指数关系的说法,结合式(2)、(3),注水压力与等效裂隙宽度之间具有如下的关系:

$$b = b_0 + c_1 \exp \left\{ \frac{c_2 (P - \sigma)}{K_n} \right\} \quad (7)$$

此外,随着压水试验的进行,等效裂隙宽度随着注水压力的增大表现出了明显的分段性,等效裂隙宽度在压水过程中存在一个明显的突变点:在突变点前等效裂隙宽度基本保持稳定,此时的裂隙宽度即为原始裂隙宽度  $b_0$ ,则可知 4 个测试段岩体的原始裂隙宽度分别为 0.37 mm (厚层泥岩)、0.33 mm (厚层砂岩)、0.49 mm (泥岩互层) 和 0.5 mm (灰岩互层),此阶段注水压力未达到岩体的抗压强度;突变点后等效裂隙宽度快速增大,  $\Delta b > 0$ ,此阶段水流通道扩大,流量增加,岩体中形成了较好的渗流通道。



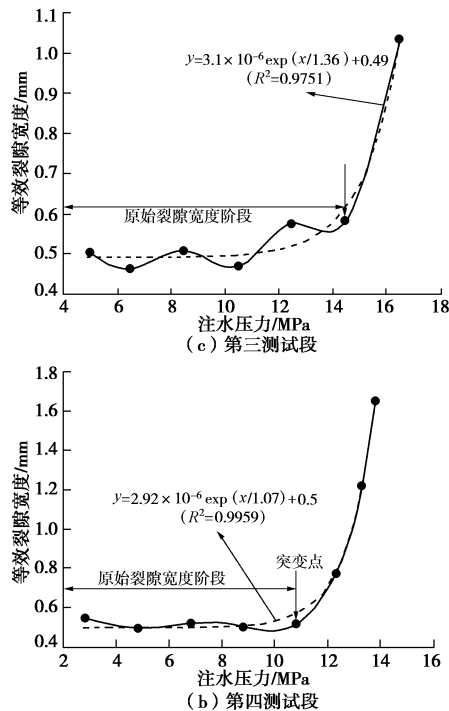


图7 注水压力-等效裂隙宽度关系曲线

Fig. 7 Relationship between injection pressure and fracture width

## 4 结 论

(1)深部四段岩体高压压水试验过程都经历了测试水压“稳定—增大—稳定”的过程,对应岩体在压水过程中经历了“隔水—导渗—稳渗”的过程。

(2)可将起始导渗水压、渗透压差和抗渗阻力作为岩体原始状态阻水性能的评价依据。通过分析可知,厚层泥岩具有低阻弱渗的特点,渗流通道以细微裂隙为主,但渗流不畅;厚层砂岩、泥岩互层和灰岩互层具有高阻弱渗的特点,原始裂隙不发育。

(3)可将稳态水压、渗透压差和抗渗阻力作为岩体稳态渗流过程阻水性能的评价依据。结果表明,稳态渗流过程厚层泥岩和厚层砂岩的渗透压差明显高于互层,高压压水使厚层泥岩和砂岩原有裂隙的连通性提高,而互层在高压水作用下裂隙进一步扩展形成了较好的渗流通道。

(4)注水压力与流量间具有很好的指数关系,在压水过程中,厚层泥岩和互层的流量随注水压力的关系可分为明显的2个阶段,厚层砂岩的分段性不明显;四段测试岩体在原始状态下具有较好的阻水性。

(5)在压水试验过程中,岩体等效裂隙宽度随着注水压力的增大表现出较好的指数关系并具有明显的分段性—突变点前的稳定阶段及突变点后的突增阶段;可通过 $\Delta b > 0$ 作为判断岩体发生明显渗流的判据。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J C. Investigations of water inrushes from aquifers under coal seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2005, **42**(2): 350 - 360.
- [2] 葛颜慧, 李术才, 张庆松. 高风险岩溶隧道突水预警防灾体系研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, **39**(3): 122 - 128. (GE Yan-hui, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song. Study on early warning and disaster prevention system of water inrush into high risk karst tunnels[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, **39**(3): 122 - 128. (in Chinese))
- [3] 张民庆, 曾强运, 杨兵. 岩溶隧道溶洞泄水机理及工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1543 - 1550. (ZHANG Min-qing, ZENG Qiang-yun, YANG Bing. Water release mechanism of caverns of karst tunnels and case studies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1543 - 1550. (in Chinese))
- [4] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1396 - 1404. (XU Zhen-hao, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Cause, disaster prevention and controlling of a typical kind of water inrush and lining fracturing in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1396 - 1404. (in Chinese))
- [5] 乔伟, 李文平, 孙如华, 等. 煤矿特大动力突水动力冲破带形成机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1726 - 1733. (QIAO Wei, LI Wen-ping, SUN Ru-hua, et al. Formation mechanism of dynamic impact failure zone of super dynamic water inrush in coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1726 - 1733. (in Chinese))
- [6] 刘斌, 聂利超, 李术才, 等. 隧道突水灾害电阻率层析成像法实时监测数值模拟与试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 2026 - 2035. (LIU Bin, NIE Li-chao, LI Shu-cai, et al. Numerical forward and model tests of water inrush real-time monitoring in tunnels based on electrical resistivity tomography method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 2026 - 2035. (in Chinese))
- [7] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 488 - 498. (NI Shao-hu, HE Shi-hai, WANG Xiao-gang, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2012, **31**(3): 488 - 498. (in Chinese))
- [8] 李利平, 李术才, 李树忱, 等. 松散承压含水层下采煤的流固耦合模型试验与数值分析研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 679 - 690. (LI Li-ping, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Numerical analysis and fluid-solid coupling model tests of coal mining under loose confined aquifer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 679 - 690. (in Chinese))
- [9] 徐智敏, 孙亚军, 巩思园, 等. 高承压水上采煤底板突水通道形成的监测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1698 - 1704. (XU Zhi-min, SUN Ya-jun, GONG Si-yuan, et al. Monitoring and numerical simulation of formation of water inrush pathway caused by coal mining above confined water with high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1698 - 1704. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 左如松, 朱岩华, 姜振泉. 岩石临界抗渗强度的测定及其在工程中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, **30**(6): 38 - 40. (ZUO Ru-song, ZHU Yan-hua, JIANG Zhen-quan. The acquisition of critical anti-permeability strength of rock and its application in engineering[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, **30**(6): 38 - 40. (in Chinese))
- [12] 黄伟, 陈占清, 靳向红, 等. 圆板状岩样破坏过程中的渗透特性试验研究[J]. 实验力学, 2010, **25**(4): 420 - 424. (HUANG Wei, CHEN Zhan-qing, JIN Xiang-hong, et al. Experimental research on permeability of round slice rock specimen in its failure process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, **25**(4): 420 - 424. (in Chinese))
- [13] ZHANG R, JIANG Z Q, SUN Q, et al. The relationship between the deformation mechanism and permeability on brittle rock[J]. Nat Hazards, 2013, **66**: 1179 - 1187.
- [14] 盛金昌, 许孝臣, 姚德生, 等. 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(7): 996 - 1006. (SHENG Jin-chang, XU Xiao-chen, YAO De-sheng, et al. Advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(7): 996 - 1006. (in Chinese))
- [15] 杨建平, 陈卫忠, 吴月秀, 等. 裂隙岩体等效渗透系数张量数值法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1183 - 1188. (YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, WU Yue-xiu, et al. Numerical study on equivalent permeability tensor of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1183 - 1188. (in Chinese))
- [16] 吴基文, 樊成. 煤层底板岩体阻水能力原位测试研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 67 - 70. (WU Ji-wen, FAN Cheng. Study on in-situ measurement of water-resisting ability of coal seam floor rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 67 - 70. (in Chinese))
- [17] HAMM S Y, KIM M, CHENG J Y, et al. Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer test and borehole data in a fracture granite[J]. Engineering Geology, 2007, **92**: 73 - 87.
- [18] MUKAI A, FUJIMORI K. Secular change of permeability in the fracture zone near the Nojima fault estimated using strain changes due to water injection experiments[J]. Tectonophysics, 2007, **443**: 193 - 199.
- [19] BARBARA A, TOMAS M, JESUS AU, et al. Hydraulic conductivity characterization of a karst recharge area using water injection test and electrical resistivity logging[J]. Engineering Geology, 2010, **117**: 90 - 96.
- [20] 张世殊. 溪洛渡水电站坝基岩体钻孔常规压水与高压压水试验成果比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 385 - 387. (ZHANG Shi-shu. Comparison of results of conventional and high pressure water-pressure tests on the dam foundation rock mass of Xiluodu Hydroelectric Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 385 - 387. (in Chinese))
- [21] 魏宁, 李金都, 傅旭东. 钻孔高压压水试验的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **25**(5): 1037 - 1042. (WEI Ning, LI Jin-du, FU Xu-dong. Numerical simulation of high-pressure injection experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **25**(5): 1037 - 1042. (in Chinese))
- [22] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧道陡倾角断层岩体高压压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2318 - 2323. (JIANG Zhong-ming, FU Sheng, LI Shang-gao, et al. High pressure permeability test on hydraulic tunnel with steep obliquity faults under high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(11): 2318 - 2323. (in Chinese))
- [23] 张蔚榛. 地下水与土壤水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (ZHANG Yu-zhen. Dynamics of



- groundwater and soil water[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [24] 殷黎明, 杨春和, 罗超文, 等. 高压压水试验在深钻孔中的应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(10): 1692 - 1694. (YING Li-ming, YANG Chun-he, LUO Chao-wen, et al. Application of high water-pressure test to deep borehole[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1692 - 1694. (in Chinese))
- [25] OLSSON A, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2001, **38**: 317 - 329.
- [26] 王媛, 速宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力裂隙宽[J]. 水科学进展, 2002, **13**(1): 61 - 68. (WANG Yuan, SU Bao-yu. Research on the behavior of fluid flow in a single fracture and its equivalent hydraulic aperture[J]. Advances in Water Science, 2002, **13**(1): 61 - 68. (in Chinese))
- [27] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 等. 裂隙岩体渗透性研究[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(增刊): 344 - 349. (LIU Xiao-li, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Study on permeability of fractured rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, **14**(S0): 344 - 349. (in Chinese))
- [28] 吴金花, 李守巨, 刘迎曦. 具有分形表面裂隙的渗流特性研究[J]. 武汉工业学院学报, 2009, **28**(3): 78 - 80. (WU Jin-hua, LI Shou-ju, LIU Ying-xi. Hydraulic characterization of fracture with fractal surface[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2009, **28**(3): 78 - 80. (in Chinese))
- [29] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks[M]. Moscow: Gesenergoizdat, 1951.
- [30] ROMM E S. Flow characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra, 1966.
- [31] LOUIS C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[R]. London: Rock Mechanics Research Report No. 10, Imperial College, 1966.
- [32] 蒋宇静, 李博, 王刚, 等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2377 - 2386. (JIANG Yu-jing, LI Bo, WANG Gang, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(12): 2377 - 2386. (in Chinese))
- [33] 张电吉, 白世伟, 杨春和. 裂隙岩体渗透性分析研究[J]. 勘察科学技术, 2003(1): 24 - 27. (ZHANG Dian-ji, BAI Shi-wei, YANG Chun-he. Analysis and study on permeability of fractured rock mass[J]. Site Investigation Science and Technology, 2003(1): 24 - 27. (in Chinese))

## 中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会 (第一号通知)

中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会将于2015年7月在上海举办。这次会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办, 上海交通大学、华东建筑设计研究院有限公司、同济大学、上海市力学学会岩土力学专业委员会、上海市土木工程学会土力学与岩土工程专业委员会等承办。第十二届学术大会的主题是岩土工程安全与创新, 并设有12个专题: ①土的基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价技术; ③基础工程与地基处理; ④地下工程及深基坑工程; ⑤岩土工程数值仿真与信息化技术; ⑥土动力学与岩土地震工程; ⑦土工构筑物与边坡工程; ⑧环境岩土工程及灾害效应; ⑨岩土工程中的新技术与新材料; ⑩地质灾害及预警与防治; ⑪重大岩土工程实录; ⑫岩土工程机械设备与施工技

术。热忱欢迎岩土工程勘察、设计、研究和施工领域的科技工作者踊跃投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未发表过的。投稿时须向会务组提交全文电子文件, 投稿前请登录学会网站 [www.geochina-cces.cn](http://www.geochina-cces.cn) 和大会网站 [csmge2015.sjtu.edu.cn](http://csmge2015.sjtu.edu.cn), 详细阅读论文投稿说明及要求。

2014年8月31日开始接受论文全文投稿; 2014年11月31日提交论文全文截止; 2015年1月31日通知论文是否录用; 2015年2月28日提交修改后论文; 2015年3月30日全文移交出版印刷; 2015年7月会议召开。联系人: 陈锦剑, 周香莲, 地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学土木工程系(200240), E-mail: [csmge2015@163.com](mailto:csmge2015@163.com), 电话: 021-34204833。

(大会组委会 供稿)