

文章编号: 1673-3363-(2015)04-0651-07

深部岩体在高压水头作用下的渗透性状况试验

黄震¹, 姜振泉¹, 孙晓倩¹, 曹丁涛², 王宗胜³, 辛斌³

(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鲍店煤矿, 山东 邹城 272100)

摘要 现场压水试验是揭示深部岩土工程中岩体渗透性能的可靠方法, 为探究深部煤层底板岩体的渗透性, 采用钻孔高压压水测试手段, 对兖州矿区某矿下组煤底板三段岩体进行了现场压水试验, 获得了大量压水测试数据。结合渗透系数计算公式, 对试验数据进行了分析, 获得了不同深度及不同岩性岩体的渗透系数值及渗透系数与压力关系的概化模式。研究表明: 岩体发生渗流时, 测试水压和流量会发生突变。岩体的渗透系数-压力关系曲线在几何形态表现出明显的分段性, 即可分为突变点前的平稳段和突变点后的线性变化段。压水结束后, 岩体裂隙会发生闭合, 但仍具有较强的抗渗性。

关键词 深部岩体; 压水试验; 渗透系数; 概化模式

中图分类号 TD 745 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.04.021

Experimental examination of permeability of deep rock mass under high water pressure

HUANG Zhen¹, JIANG Zhenquan¹, SUN Xiaoqian¹,
CAO Dingtao², WANG Zongsheng³, XIN Bin³

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. Yanzhou Coal Mining Co Ltd, Zoucheng, Shandong 273500, China;
3. Baodian Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Co Ltd, Zoucheng, Shandong 272100, China)

Abstract Water injection experiment is a particularly useful technique to determine the permeability of rock mass in deep geotechnical engineering. To probe the permeability of lower coal seam floor, high borehole pressure water injection experiment has been carried out to analyse the three segments of rock masses in one coal mine in Yanzhou, and numerous data have been obtained. Based on the formula of permeability coefficient as well as the analysis of the data, permeability coefficients of three segments of rock masses have been determined, and a generalized model has been established to describe the relationship between permeability coefficients and pressure. The results show that the test pressure and the water discharge will suddenly change when the hydraulic fracturing occurs. The curves of permeability coefficient and pressure are provided with a significant geometric segmentation, which is stable before mutation and linear after mutation. Fissures will restore to be closed after water injection experiment, and the rock masses still have strong anti-permeability.

Key words deep rock mass; water injection test; permeability coefficient; generalized model

收稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036003); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_1401)

作者简介: 黄震(1989—), 男, 江西省大余市人, 博士研究生, 从事煤矿水文地质与工程地质方面的研究。

E-mail: huangzhen075@163.com

Tel: 15896422172

在隧道施工和煤矿开采过程中,经常发生突水事故,造成重大的人身伤亡事故和经济损失,隧道和煤矿突水问题已逐渐成为岩土工程研究领域关注的焦点^[1-7]。随着煤矿开采规模和强度的不断加大,浅部煤炭资源储量急剧减少,深部开采的时代已经来临,但深部开采条件复杂,受到底板含水层的威胁,易发生底板突水事故。底板岩体对防止底板突水起着重要的作用,其渗透性可作为评价底板突水危险性的一个重要指标。因此,研究深部岩体渗透性具有重要的工程意义。

目前兖州矿区某矿主采 3 煤,随着 3 煤资源量的减少,该矿马上也面临深部下组煤开采的问题。由于下组煤底板近距离分布有太原组十四灰岩和奥陶系灰岩 2 个富水性较好的含水层,因此,下组煤开采受到底板承压含水层突水的威胁。钻孔压水试验是一种在钻孔中进行的原位渗透试验,作为获得岩体渗透性的可靠方法,其可为评价岩体的渗透性能提供基本的资料和依据^[8-10]。但由于该测试方法环节繁琐、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没有深部下组煤底板现场压水试验数据。为了获得该矿深部下组煤底板岩体的渗透性,为底板岩体阻渗能力提供评价依据,在该矿进行深部下组煤底板岩体现场压水试验,以期下组煤安全开采提供重要的参考依据。

1 现场压水试验

1.1 压水试验区域选择

选择该矿南翼胶带暗斜井与十四采区轨道巷交叉部位进行现场压水试验,该区域为十四采区轨道巷与十六采区轨道巷连接部位,整体呈梯形状,其中十四采区轨道巷正在开拓。鲍店煤矿下组煤底板近距离发育有十四灰岩和奥陶系灰岩 2 个富水性较好的含水层:十四灰厚 6.95~10.60 m,平均 9.03 m,为乳白色至浅灰色石灰岩,下部含有紫色铁质泥岩和铝土岩,属裂隙承压水。根据井田内钻孔抽水试验可知十四灰单位涌水量 0.000 060 1~0.024 4 L/(s·m)。奥陶系灰岩为灰白色至青灰色石灰岩,块状、致密、质纯、性脆,顶部夹灰绿色铝质泥岩薄层,洞穴比较发育,主要含水带在顶界面以下 50 m,属裂隙岩溶水。据井田内钻孔抽水试验资料,奥灰单位涌水量 0.001 72~0.197 1 L/(s·m),水质类型属 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水。奥灰是区域性强含水层,厚度大,水压高。

1.2 试验方法介绍

采用一个钻孔压水、一个钻孔测试的方法进行压水测试,如图 1 所示,在测试孔中测试段深度位置安装水压力传感器,通过电缆与水压检测仪连接,并在孔口安装压力表辅助记录;在压水孔接入压水泵、流量计、压力表。钻孔施工时进入到测试岩层一定深度,测试岩层以上安装套管,孔口采用法兰盘密封,这样往压水孔中压水时水流只能作用在测试岩层上。压水泵采用 2ZBQ-3/21 高压气动注浆系统,额定泵压可达 22 MPa。现场压水孔与测试孔图片见图 2。

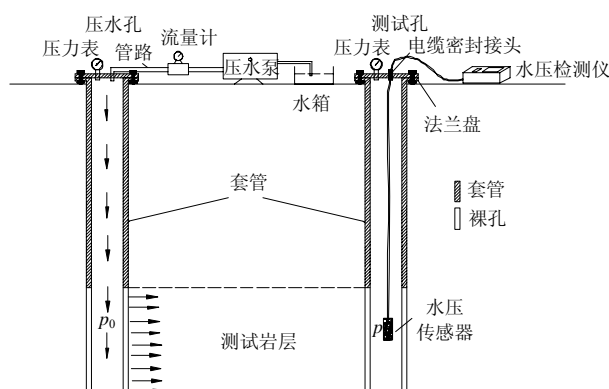


图 1 压水试验装置示意图

Fig.1 Schematic system diagram of water injection experiment method

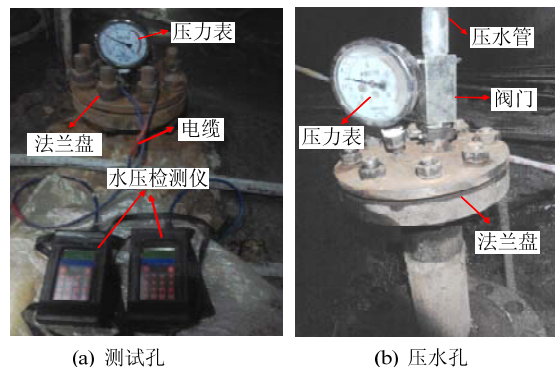


图 2 现场压水试验图

Fig.2 Diagram of water injection experiment

本次压水试验采用定压力和定流量 2 种不同的方法进行压水,其中定压力方法通过调节压水泵使压水孔压力在这一级压力级别时间内保持稳定;定流量方法直接通过压水泵调节流量。每一级压力/流量压水 15 min 左右,数据采集仪 30 s 采集 1 次数据。

1.3 测试段划分

根据与测试点相近的钻孔资料,该矿下组煤底板主要由砂岩、泥岩、灰岩组成。其中十四灰含水

层距离 17 煤在 55~65 m 左右。为此针对 17 煤与十四灰含水层的间隔层位岩体进行现场压水试验，以灰岩标志层为界，将下组煤底板分成 3 个测试层段：第 1 测试段以 18 煤底板至十二灰顶面的铝质泥岩和粉细砂岩为主；第 2 测试段主要为十二灰和十三灰的灰岩层段；第 3 测试段主要为十三灰与十四灰之间的铝质泥岩、泥岩和细砂岩。故本次压水试验共布设 4 个钻孔，如图 3 所示，其中 Z1, Z2, Z3 钻孔用于压水，C4 钻孔用于测试，测试孔和压水孔间距均为 3 m，钻孔设计参数见表 1。

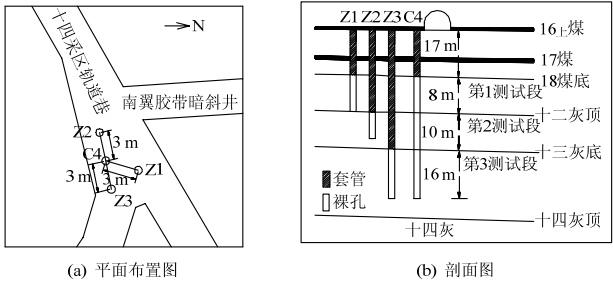


图 3 钻孔布置及测试层段划分示意图
Fig.3 Schematic diagram of borehole and dipartition of test layer groups

表 1 测试孔设计参数
Table 1 Design parameters of borehole monitoring

钻孔号	开孔直径/mm	套管直径/mm	钻孔 倾角/(°)	岩层 真倾角/(°)	孔深/m
	深度/m	长度/m			
Z1	127/17.0	89/17.0	-90	2	25.0
Z2	127/27.0	89/27.0	-90	2	37.0
Z3	127/40.0	89/40.0	-90	2	51.0
C4	150/17.0	108/17.0	-90	2	51.0

1.4 压水试验步骤

1) 按照设计方案进行钻进。其中 Z1 孔孔深 25 m，套管长度 17 m；Z2 孔孔深 37 m，套管长度 27 m；Z3 孔孔深 51 m，套管长度 40 m；C4 孔孔深 51 m，套管长度 17 m。

2) 在 C4 孔中安装水压探头并通过导线穿过法兰盘与水压检测仪进行连接，用法兰盘将套管口封住。

3) 第 1 段岩体压水测试：用法兰盘将 Z1 孔密封，并在法兰盘上安装压力表，用高压管连接 Z1 孔和压水泵。启动压水泵，定压力压水时调节压水流量使压水压力在这一级上保持稳定，定流量时直接调节压水流量。在压水过程中连续记录压水孔压力、流量和测试孔探头水压。当测试孔水压发生明显变化时在增加一级压力或流量即可关泵结束此次压水(如第 1 段岩体第 1 次压水压力级别变化为

5.21 → 6.21 → 7.71 → 8.71 → 9.71 → 10.71 → 11.96 MPa)。

4) 关泵后等待压水孔和测试孔中压力稳定时再进行下一次压水试验。

5) 重复 3), 4)步骤 3 次，即对第 1 段岩体进行 3 次重复压水试验。

6) 第 2 段和第 3 段岩体测试即是 将压水泵连接 Z2 和 Z3 孔，重复 3), 4), 5)步骤。

2 两孔压水渗透系数计算公式

假设岩体为各向同性，则压水过程中水流将是以压水孔为中心由高压区向低压区逐步扩散的过程，在压水孔四周形成水流扩散圈，随着压水的进行逐步向外扩展，当水流渗透到测试孔时，两孔相互联通，此时测试孔检测的水压会发生明显的变化，如图 4 所示。当岩体发生渗流时，由于裂隙已相互贯通，压水流量会明显增大。

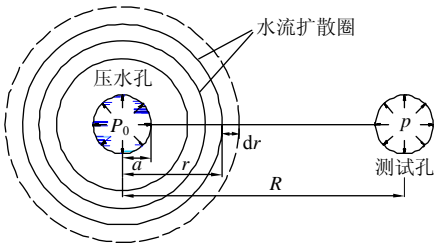


图 4 压水试验水流扩散分析
Fig. 4 Analytical diagram of water flow of water injection experiment

《水利水电工程钻孔压水试验规程》^[11]给出了一个当压水测试得到的透水率较小，且压力与流量的关系曲线为层流时的计算公式。但实际压水试验结果大都不满足此条件。由于本次压水试验在测试孔中埋设了水压力传感器，因此可以利用压水流量达到稳定状态时压水孔压力和测试孔水压的关系来计算岩层的渗透系数^[12]。

设 P_0 为压水孔水压， p 为测试孔水压， H_P 为压力水头高度， H_{P_0} 为压水孔内的水头高度， H_p 为测试孔内的水头高度， Q 为流量， R 为压水孔与测试孔间距， a 为压水孔半径， L 为测试段长度(图 4)。则当压水流量和压力达到一个相对稳定的情况下时，在任意过水断面上的总流量均相等，则距离压水孔 r 和 R 两处位置上流量有 $Q_r=Q_R$ ， I_r 和 I_R 分别为距离压水孔 r 和 R 两处位置的水头梯度，根据达西定律：

$$2\pi rkI_rL=2\pi RkI_RL$$

(1)

$$I_r = \frac{R}{r} I_R \quad (2)$$

距离压水孔 r 处的水头增量为

$$dH_p = I_r dr \quad (3)$$

对于压水孔和测试孔之间有

$$\int_{H_p}^{H_0} dH_p = \int_a^R I_r dr \quad (4)$$

将式(2)代入上式得到

$$\int_{H_p}^{H_0} dH_p = \int_a^R \frac{R}{r} I_R dr \quad (5)$$

$$H_{p_0} - H_p = R I_R (\ln R - \ln a) \quad (6)$$

则可得到 I_R 的计算公式

$$I_R = \frac{H_{p_0} - H_p}{R(\ln R - \ln a)} \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)整理有

$$Q_R = 2\pi R k I_R L = 2\pi k L \frac{(H_{p_0} - H_p)}{(\ln R - \ln a)} \quad (8)$$

则可求得渗透系数的计算公式($Q_R=Q$):

$$k = \frac{Q(\ln R - \ln a)}{2\pi L(H_{p_0} - H_p)} \quad (9)$$

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

现场压水试验自 2013 年 4 月 15 日开始, 至 4 月 21 日结束, 采用定压力和定流量的方法分别对 Z1, Z2, Z3 孔重复压水 3 次。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段中间位置的压力值, 其中测试孔自然水压 1.35 MPa。限于篇幅, 本文只列出 Z2 孔压水试验过程曲线, 如图 5 所示。由于测试孔中水压数据较压水孔压水压力小很多, 为便于显示和分析其变化过程, 作图时将测试孔探头监测到的水压放大 10 倍。

图 5 为 Z2 孔压水试验过程曲线, 其中前 2 次压水采用定压力的方法, 第 3 次压水采用定流量的方法。由图 5 可看出, 调节压水流量, 压水孔压力会随之发生变化, 整个压水过程测试孔水压随着流量的增加而升高, 随着流量的减小而降低, 流量、压水压力、测试水压表现出较好的同步性。

从定压力压水的过程曲线(图 5a, b)来看: 压水前期, 流量增加较少就能达到增加一级压水压力的效果; 压水压力增加到较大数值后, 再要增加一级压力, 流量增加幅度较之前显著(第 1 次压水 7.32

→8.32 MPa, 第 2 次压水 6.82→7.82 MPa), 这时的流量发生了突变, 说明此时岩体已发生渗流。另外, 流量发生突变时, 测试孔水压也发生明显变化, 进一步说明岩体在水压作用下裂隙已相互贯通。

从定流量压水的过程曲线(图 5c)来看: 第 3 次压水时, 无论增加和减小流量, 压水压力变化较平缓(渗流过程可以看作准稳态渗流); 而测试水压随着流量的增加和减小有明显的上升和下降的过程。

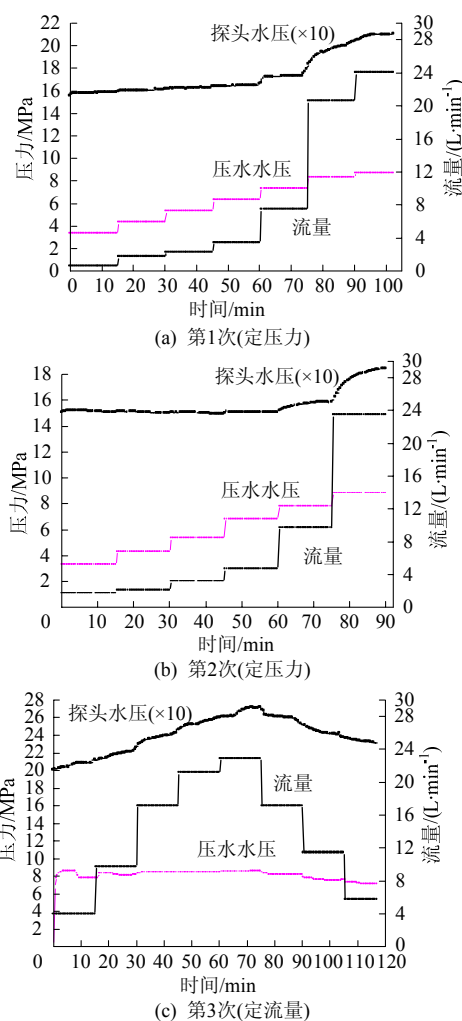


图 5 Z2 孔压水测试过程曲线

Fig.5 Result curves of the water injection experiment of Z2 borehole

此外, 第 1 次压水岩体发生渗流后再次压水, 测试孔水压前期是一个缓慢变化的过程、后期出现突变, 说明第 1 次压水后产生的裂隙重新闭合。第 3 次压水测试水压变化一直较明显, 说明多次重复压水后, 岩体产生的裂隙无法完全闭合, 多次重复压水能导致岩体产生相互贯通的裂隙。

3.2 试验结果分析

根据现场压水情况, 已知钻孔直径 0.089 m,

第 1 压水段长度 8 m，第 2 压水段长度 10 m，第 3 压水段长度 16 m，压水孔和测试孔间距为 3 m，其他参数根据压水数据获得。由于本次压水采用定压力和定流量 2 种压水方法，为了反映整个压水过程中岩体渗透系数的变化情况，利用式(9)计算了每级压力/流量压水下岩体的渗透系数，结果见表 2~4。

表 2 第 1 段岩体渗透系数计算结果
Table 2 Calculated values of permeability coefficient of the first segment of rock mass

岩层	次数	$Q/(L\cdot min^{-1})$	P_0/MPa	p/MPa	$K/(\times 10^{-6}cm\cdot s^{-1})$
第 1 段岩体 (铝质泥岩、泥岩、细砂岩)	第 1 次 (定压力)	0.57	5.21	1.44	0.211
		1.15	6.21	1.44	0.335
		1.43	7.71	1.43	0.318
		1.43	8.71	1.43	0.274
		1.72	9.71	1.41	0.289
		2.88	10.71	1.28	0.426
		17.72	11.96	1.16	2.291
	第 2 次 (定流量)	1.00	8.21	1.25	0.201
		2.15	8.71	1.26	0.402
		2.15	9.21	1.27	0.377
		3.15	9.71	1.28	0.521
		4.86	10.01	1.18	0.768
		4.38	10.21	1.11	0.672
		3.72	10.01	1.12	0.584
	第 3 次 (定流量)	1.72	8.00	1.64	0.377
		4.57	10.90	1.63	0.689
		8.57	11.20	1.52	1.237
		11.43	11.40	1.37	1.592
		14.29	11.60	1.31	1.939
		12.57	11.40	1.23	1.727
		7.43	11.20	1.23	1.041

表 3 第 2 段岩体渗透系数计算结果
Table3 Calculated values of permeability coefficient of the second segment of rock mass

岩层	次数	$Q/(L\cdot min^{-1})$	P_0/MPa	p/MPa	$K/(\times 10^{-6}cm\cdot s^{-1})$
第 2 段岩体 (十二灰、十三灰及间隔铝质泥岩)	第 1 次 (定压力)	0.57	3.32	1.58	0.366
		1.72	4.32	1.60	0.705
		2.29	5.32	1.62	0.690
		3.43	6.32	1.65	0.821
		7.43	7.32	1.73	1.485
		20.57	8.32	1.99	3.632
		24.00	8.72	2.10	4.051
	第 2 次 (定压力)	1.72	3.32	1.51	1.059
		2.10	4.32	1.50	0.832
		3.16	5.32	1.49	0.922
		4.69	6.82	1.51	0.986
		9.72	7.82	1.58	1.740
		23.43	8.81	1.84	3.757
	第 3 次 (定流量)	4.00	7.90	2.08	0.768
		9.72	8.20	2.19	1.806
		17.15	8.40	2.39	3.188
		21.15	8.50	2.54	3.965
		22.86	8.50	2.61	4.337
		17.15	8.22	2.60	3.409
		11.43	7.50	2.41	2.510

表 4 第 3 段岩体渗透系数计算结果
Table 4 Calculated values of permeability coefficient of the third segment of rock mass

岩层	次数	$Q/(L\cdot min^{-1})$	P_0/MPa	p/MPa	$K/(\times 10^{-6}cm\cdot s^{-1})$
第 3 段岩体 (铝质泥岩、泥岩、细砂岩)	第 1 次 (定压力)	0.57	3.45	1.51	0.205
		1.43	4.45	1.52	0.341
		2.10	5.45	1.54	0.374
		3.20	6.95	1.57	0.415
		20.57	7.95	1.65	2.281
		22.86	8.45	1.76	2.386
	第 2 次 (定压力)	0.29	4.45	1.49	0.067
		0.72	5.45	1.50	0.127
		1.15	6.45	1.51	0.162
		6.86	7.45	1.53	0.809
		21.15	8.45	1.67	2.178
	第 3 次 (定流量)	2.86	8.45	1.61	0.292
		7.43	8.95	1.65	0.711
		27.43	9.45	1.83	2.514
		17.15	9.55	1.84	1.553
		12.57	9.45	1.83	1.152
		4.57	9.35	1.83	0.424

图 6 为压水过程 3 段岩体的渗透系数-压力关系曲线。

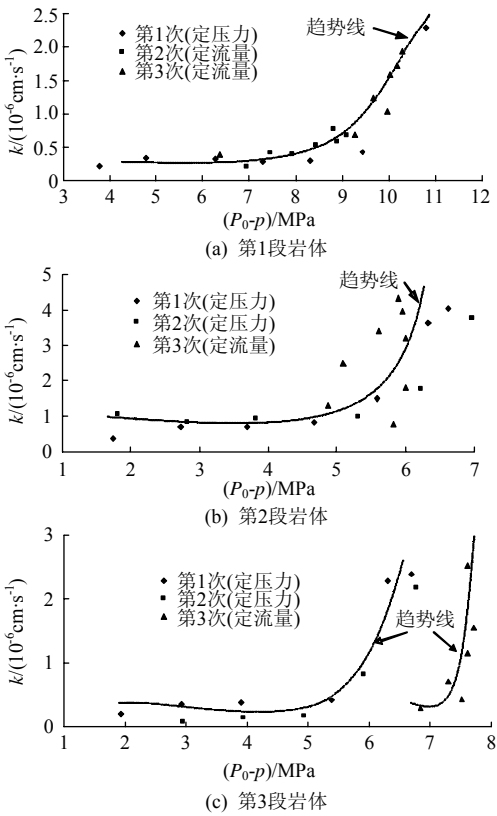


图 6 压水过程渗透系数-压力关系曲线
Fig.6 The relational curves of permeability coefficient and pressure

从表 2~4 及图 6 可作如下分析:

1) 在整个压水过程中,第 1 段岩体的渗透系数在 $(0.2\sim 2.3)\times 10^{-6}\text{cm/s}$ 范围内变化;第 2 段岩体渗透系数变化范围为 $(0.3\sim 4.4)\times 10^{-6}\text{cm/s}$;第 3 段岩体渗透系数在 $(0.2\sim 2.5)\times 10^{-6}\text{cm/s}$ 范围内变化。第 1 段和第 3 段岩体的渗透系数计算结果十分相近,第 2 段岩体渗透系数计算结果较其他 2 段大,主要由于第 1 段和第 3 段岩体都主要以泥岩、粉细砂岩为主,第 2 段岩体以灰岩为主,灰岩的渗透性较泥岩、粉细砂岩好。

2) 从 3 段岩体在压水过程中的渗透系数-压力关系曲线的变化形态上来看,尽管压水测试段岩体的工程地质性质具有较大的差异,但渗透系数-压力关系曲线在几何形态上具有相似性,其差异主要存在于数值关系上^[13]。从图中标出的趋势线可看出,渗透性随压力的增大表现出明显的分段性,压水过程中渗透系数存在一明显的突变点:该突变点前渗透系数基本稳定,近似于平行横轴的直线;该突变点后曲线斜率发生显著变化,但近似于线性关系。

为此,渗透系数与压力二者的几何关系可以概化为如图 7 所示的一般模式。如图所示,在突变点前渗透系数-压力关系曲线为近似平行于横轴的直线,此时的渗透系数 k_0 为岩体的原始渗透系数;突变点后渗透系数-压力关系曲线可近似为具有一定斜率的直线,突变点所对应的渗透系数 k_s 为岩体发生渗透破坏的临界渗透系数。其中 (P_s, k_s) , (P_m, k_m) 为 2 个重要的特征点:当 $(P_0-p) < P_s$ 时,此时岩层的渗透系数为原始渗透系数 k_0 ,此阶段水压未达到岩体的抗压强度,岩体渗透性较小;当 $P_s < (P_0-p) < P_m$ 时,此时水压导致岩体产生拉张裂隙,两孔间裂隙开始产生联通,此时的压差 P_s 为使此段岩体发生渗流的临界压力; $(P_0-p) \geq P_m$ 时,岩体渗透系数达到峰值,此时两孔已相互联通并形成稳定渗流。

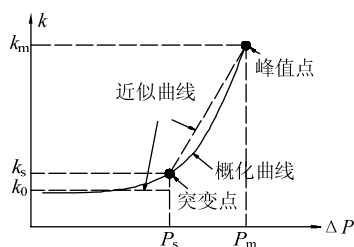


图 7 渗透系数-压力曲线概化模式

Fig.7 Generalized model of permeability coefficient-pressure

可知,泥岩、粉细砂岩、细砂岩(第 1, 3 段岩体)的原始渗透系数约为 $(0.2\sim 0.4)\times 10^{-6}\text{cm/s}$;灰岩段

(第 2 段岩体)的原始渗透约为 $(0.7\sim 1.0)\times 10^{-6}\text{cm/s}$ 。

3) 从定流量压水的渗透系数-压力关系曲线来看,渗透系数随着流量的增加和减小存在一个先升高再降低的过程,说明流量对岩体的渗透性影响较大,所以当有富水性较强、水量丰富的含水层作用在岩体时,岩体更易发生渗透破坏。

4) 由 3 段岩体重复压水的过程曲线可以看出,岩体在高水头压力作用下经历裂隙产生、扩展、延伸、最后贯通形成宏观的裂隙的过程,当停止压水后,张开的裂隙会在地应力的作用下重新闭合^[14]。

4 结 论

1) 岩体在高水头压力作用下裂隙扩展并相互贯通产生渗流,压水试验过程中水流是以压水孔为中心由高压区向低压区逐步扩散的过程,在压水孔四周形成水压扩散圈。

2) 在压水过程中,压水流量和测孔水压均存在明显的突变点,此点可作为判断岩体破坏的特征点。

3) 在压水过程中,岩体的渗透系数-压力关系曲线在几何形态具有相似性,其表现出明显的分段性:突变点前岩体渗透系数较小,变化平缓;突变点后岩体渗透系数迅速增大,渗透系数与压力近似呈线性关系。

4) 流量对岩体的渗透性影响较大,当富水性较强、水量丰富的含水层作用在岩体时,岩体更易发生渗透破坏。

5) 停止压水后,岩体产生的裂隙会发生闭合,多次重复压水后,岩体产生的裂隙无法完全闭合,会导致岩体产生相互贯通的裂隙。

参考文献:

- [1] 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 Shaohu, HE Shihai, WANG Xiaogang, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 488-498.
- [2] 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 Minqing, ZENG Qiangyun, YANG Bing. Water release mechanism of caverns of Karst tunnels and case studies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1543-1550.
- [3] ZHANG J C. Investigations of water inrush from aquifers

- under coal seam[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2005, 42(2): 350-360.
- [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 Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, 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.
- [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 Wenping, SUN Ruhua, 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.
- [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 Lichao, LI Shucai, 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.
- [7] 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 Liping, LI Shucai, LI Shuchen, 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.
- [8] 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 Shishu. 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.
- [9] 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 Jindu, FU Xudong. Numerical simulation of high-pressure injection experiment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 25(5): 1037-1042.
- [10] 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 Zhongming, FU Sheng, LI Shanggao, 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.
- [11] 中华人民共和国水利部. SL 31—2003 水利水电工程钻孔压水试验规程 [S]. 北京: 水利水电出版社, 2003.
- [12] 张新敏, 蒋中明, 冯树荣, 等. 岩体高压压水试验的渗透系数取值方法探讨[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(1): 155-159.
ZHANG Xinmin, JIANG Zhongming, FENG Shurong, et al. Study on the determination of permeability coefficient of fractured rock mass under pressure test condition[J]. *Journal of Hydroelectric Engineer*, 2011, 30(1): 155-159.
- [13] 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 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, 21(10): 1442-1446.
- [14] 闫铁, 李玮, 毕雪亮. 清水压裂裂缝闭合形态的力学分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 2): 3471-3476.
YAN Tie, LI Wei, BI Xueliang. Mechanical analysis of closing shape of crack induced by waterface treatment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup 2): 3471-3476.