

文章编号: 1673-3363-(2016)02-0324-05

# 高压压水试验渗透系数的求取

梁德贤<sup>1</sup>, 姜振泉<sup>1</sup>, 曹丁涛<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 兖矿集团兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500)

**摘要** 从紊流非达西流角度出发, 利用压水孔水压、压水段长度、观测孔水压和流量等参数, 推导出高水压条件下岩体渗透系数计算公式。结合某矿下组煤底板压水试验成果, 分析了不同水流状态下计算的渗透系数的差异性, 得出水流状态对岩体渗透系数计算的结果影响巨大, 水压的变化引起岩体渗透性的剧烈变化。本文建议的渗透系数计算公式为裂隙岩体紊流状态下的非达西流渗透系数的计算提供了一种有效的方法。

**关键词** 高压压水试验; 紊流; 非达西流; 渗透系数

**中图分类号** TD 324 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.02.021

## Calculation of hydraulic conductivity in high water-pressure test

LIANG Dexian<sup>1</sup>, JIANG Zhenquan<sup>1</sup>, CAO Dingtao<sup>2</sup>

(1. School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Yanzhou Coal Mining Company, Yanzhou Coal Mining Co Ltd, Zoucheng, Shandong 273500, China)

**Abstract** Based on turbulent flow and non-Darcy flow, the hydraulic conductivity calculating formula was derived by using hydraulic pressure in water injection borehole, length of the water injection part, hydraulic pressure and discharge in monitor borehole. With the test results of coal seam floor's water-pressure in a mine, the difference of hydraulic conductivities under different flow status were analyzed, and it shows that the calculating result of hydraulic conductivity is greatly influenced by flow patterns, and the rock masses' permeability can be changed greatly by hydraulic pressure. The paper provides an effective method for calculation of non-Darcy flow hydraulic conductivity in fracture rocks under turbulent flow conditions.

**Key words** high water-pressure test; turbulent flow; non-Darcy flow; hydraulic conductivity

渗透系数是反映岩体渗透性大小的物理指标, 是对矿井(或工作面)涌水预测的关键参数之一。为了获取裂隙岩体渗透系数, 通常采用抽水(注水)试验来获取<sup>[1-3]</sup>。岩体的渗透性不但与岩体连通的裂隙(空隙)率有关, 而且与岩体应力有关。在采动条件下, 岩体应力是不断变化的, 会使裂隙岩体中部分不连通的裂隙连通或裂隙宽度大幅增加, 亦或者是

部分连通的裂隙闭合或者宽度降低, 从而影响着岩体的渗透性。抽水(注水)试验采用低压方法, 显然采用它来研究受采动影响的岩体渗透性是不合理的<sup>[4-11]</sup>。深埋硐室或岩体往往承受高水头的压力, 此时采用常规压水方法已无法正确反映实际水头下岩体的渗流变化情况, 此时应进行高压压水试验, 而在真实反映岩体渗流变化情况的同时, 亦能

收稿日期: 2014-10-27

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036000)

作者简介: 梁德贤(1986—), 男, 山东省济南市人, 博士, 从事煤矿工程地质方面的研究。

E-mail: tomyleung1986@qq.com

Tel: 13641538896

评价岩体各软弱结构所能抵抗水力劈裂的能力。因此,对于深埋的煤层围岩而言,宜采用高压压水方法进行测试。高水压条件下,特别是岩体发生水力劈裂现象后,岩体裂隙中的水流速度远远大于低压条件下的流速<sup>[12]</sup>,因此可以推断高压压水试验中岩体裂隙水流雷诺数会比文献[13]中的室内试验得到的雷诺数更大,进而可以推断高压压水试验条件下裂隙岩体中的水流处于紊流流态。在紊流状态下,如按线性达西流考虑进行计算,则会引起岩体内计算水头和流量的较大误差<sup>[12]</sup>,而现行渗透系数计算公式多数只适用于低压条件下的岩体渗透系数的计算<sup>[11,14]</sup>。为此,在高压条件下的渗透系数的计算还需要进一步研究。

## 1 高压条件下渗流规律

岩体中水的流动状态问题的复杂性给渗流规律的认识带来了相当大的困难。岩体中水的流动状态有层流和紊流两种。目前对岩体渗流的分析多采用基于层流假定的理论,而现行渗透系数的计算更是假定层流中的达西流条件下的计算<sup>[14]</sup>。然而高水压条件下的裂隙岩体水流状态已不再是层流或达西流,而是紊流状态<sup>[13,15-17]</sup>。因此,对高水压条件下裂隙岩体进行渗流分析不能按达西流进行考虑,而按紊流考虑将更为合理。

P.Forchheimer 提出渗流速度与水力梯度的非线性公式:

$$J=av+bv^2 \quad (1)$$

式中:  $J$  为水力梯度;  $v$  为渗流速度;  $a$ ,  $b$  为系数,它们取决于岩体中水流的流动状态。当渗流为达西流时,  $b=0$ ,  $J=av$ , 即满足线性的达西定律;  $a \neq 0$ ,  $b \neq 0$  时, 即为不满足达西流的层流向紊流过渡状态; 当渗流为紊流时,  $a=0$ ,  $J=bv^2$ 。

地下水呈紊流状态的渗流运动 Chezy 公式为

$$v=KJ^{1/2} \quad (2)$$

式中  $K$  为渗透系数。

由上可知,在紊流状态下式(1)与式(2)一致。

## 2 高压压水试验渗透系数推导

高压压水试验设置压水孔和观测孔,当压水达到相对稳定状态时,岩层中的水流可以作稳定流来考虑。此时可以利用压水孔中的水压力、观测孔中的水压力与压入流量计算岩体的渗透系数。假定岩体为各向同性介质,采用含水层整段压水时,岩体中的水流可近似地作为径向流来处理,如图1所示。

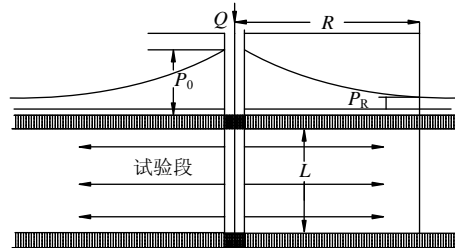


图1 试验孔周围水流示意

Fig.1 Sketch of water flowing in rock mass near a water pressure bore hole

在压水过程中流量和压力达到相对稳定的情况下,任意的过水断面上的流量均相等。设通过任意断面的流量为  $Q$ , 根据紊流的渗透定律得

$$Q=2\pi rKLJ^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $r$  为过水圆柱断面的半径,即断面离压水孔中心的距离;  $K$  为岩体的渗透系数;  $J$  为  $r$  处的水力梯度;  $L$  为试验段长度。

水力梯度  $J = -\frac{dp}{dr}$ , 与式(3)联立可得

$$dp = -\left(\frac{Q}{2\pi rKL}\right)^2 \frac{dr}{r^2} \quad (4)$$

对式(4)两边积分:

$$\int_{P_0}^{P_R} dp = -\int_{R_0}^R \left(\frac{Q}{2\pi rKL}\right)^2 \frac{dr}{r^2} \quad (5)$$

$$P_R - P_0 = \left(\frac{Q}{2\pi KL}\right)^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}\right) \quad (6)$$

整理可得

$$K = \frac{Q}{2\pi L} \left[ \frac{R - R_0}{(P_0 - P_R)RR_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $K$  为岩体的渗透系数;  $Q$  为压水孔流量;  $L$  为试验段长度;  $R$  为压水孔与测渗孔间距;  $R_0$  为压水孔半径;  $P_0$  为压水孔水压;  $P_R$  为测试孔渗压。

## 3 实例分析

本次测试采用双孔压渗法,基本原理如图2,2个钻孔分别用于压水、测渗。压水钻孔要求打到试验层段后,将试验层段以上部位用套管与周围岩层隔离,并在试验层段两端安置封堵器,用以控制压水水流经测试段向外流动,控制其物理边界。

测试压水过程的注水压力、流量及观测孔水压等数据。所需测试设备包括测渗设备及压水设备两部分。观测孔的水压由安装在钻孔一定深度上的水压力传感器测试获得,所用水压传感器为竖式振弦式水压力传感器,该传感器计数精度高,测调幅度

大,与之配套使用的数据采集仪可直接显示水压数据,并可存储数据,体积小、集成化程度高,测试精度高,易于携带,另外在孔口法兰盘上也安装有水压力表与水压力传感器协同校核;压水孔水压由安装在孔口法兰盘上的水压力表测试,并通过换算到压水层段的水压力来确定。压水设备主要包括高压注水泵、流量计及稳压系统构成,高压注水泵为气动压水型,额定可提供稳定泵压 22 MPa;流量计为电磁式数字流量计,精度高,可准确提供瞬时流量数据;采用稳压阀与压水泵无级变速调节法协同稳定某一梯度水压力。

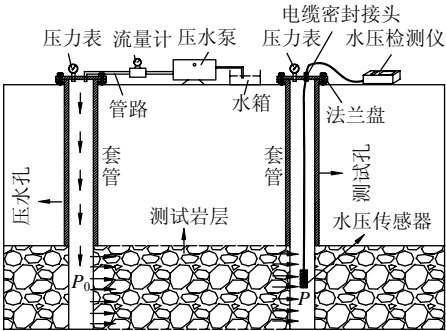


图 2 测试方法示意图  
Fig.2 Schematic of testing method

具体测试的步骤为:从孔口进行压水,选择不同梯度稳定压力压水的方法。每一压力梯度压水持续时间 20 min 左右,20 min 之内连续记录压水的流量及两个测渗孔的压力变化;如果某一压力梯度下测试孔检测到明显的压力响应,则再增高测试一压力梯度即可停止试验。

16<sub>上</sub>煤到十三灰的隔水层对阻止十三灰、十四灰水与奥灰水的涌入起到重要作用。为研究 16<sub>上</sub>煤到十三灰之间岩层的渗透特性,对间隔断岩层进行了分段高压压水试验。测试位置煤层倾向 5°,考虑到顺层方向渗透比较好,而垂直层位方向渗透性比较差的原因,故采用钻孔倾角-30°。第一测试段为 16<sub>上</sub>煤底到 17 煤顶的泥岩段,由于压水历时时间较短,水对泥岩的软化作用微弱,故本次试验忽略水对岩石的软化作用;第二测试段为 17 煤底板岩层

段,由砂岩、灰岩等岩石组成。  
第一段:对 16<sub>上</sub>煤底到 17 煤顶的泥岩段进行高压压水实验。图 3 为压水试验过程中流量和压水压力、观测孔渗压随时间变化的结果图。压水过程采用不同流量梯度压水的方法,观测岩体的渗透情况。从图 3 可以看出,压水压力与渗压都比较小,说明岩体处于破碎带。压水压力与渗压差值不大,说明裂隙岩体裂隙连通性较好。随着流量的增大,压水压力与渗压也随之增大,说明部分不连通的裂隙连通,裂隙宽度变大,渗透性增强。在压水后期,流量不断减小的情况下,压水压力与渗压却变化不大,表明随着压水流量的减少,岩体内部已连通裂隙在不断闭合,导致渗透性变差。

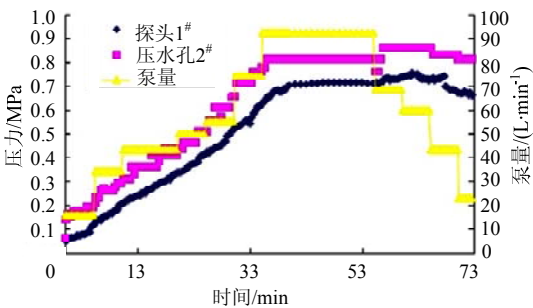


图 3 渗压、压水压力和流量与时间关系图  
Fig.3 Time variations of rock pore pressure, borehole water pressure and bore hole discharge

从图 3 中可以看出,试验孔压力、流量与观测孔渗压基本同步,但在流量减小阶段,试验孔压力与渗压变化缓慢,推断是由于裂隙闭合导致渗透性下降的原因。在压水流量稳定在 92 L/min 时,压水压力维持在 0.81 MPa 左右,渗压维持在 0.77 MPa 左右,说明此时岩体中的渗流处于相对稳定状态,可以认为此时在压水孔与观测孔之间的水流为稳定流,满足前面推导公式的条件。

本次试验采用直径 0.11 m 的压水孔压水,压水孔压水段 8.0 m。表 1 为依据本文推导公式计算的裂隙岩体渗透系数,表中也给出依据文献[11]和压水试验规程<sup>[12]</sup>所给定的计算公式计算的渗透系数。

表 1 渗透系数计算表  
Table 1 Calculated values of hydraulic conductivity cm/s

压水孔压力/MPa	0.14	0.16	0.18	0.21	0.51	0.61	0.71	0.81
本文推导公式/ $\times 10^{-4}$	7.59	7.23	6.83	16.50	19.80	23.30	28.10	39.80
文献[11]建议公式/ $\times 10^{-4}$	2.59	2.36	2.10	5.76	5.62	7.05	7.65	12.4
压水试验规程 <sup>[12]</sup> 公式/ $\times 10^{-4}$	1.89	1.65	1.47	2.70	1.63	1.50	1.73	1.89

由表 1 中可以看出,无论使用哪种计算公式进行计算,其计算结果均表明在压水压力较小,未发生水力劈裂前,渗透系数较小;随着压水压力的增大,岩体的渗透系数随之增加。表 1 同时表明,岩体的渗透系数随压水压力的增大基本同步变大。

表 2 为使用文献[11]和压水试验规程<sup>[12]</sup>推荐的计算公式所计算的渗透系数相对于本文推导的计算公式的差值百分比。由表 2 可以看出文献[11]所给出的计算公式与本文计算公式所得结果相差-69%(-65.81%~72.76%)左右,而压水试验规程所给

出的计算公式相差更大,在-75.13%到-95.26%之间,且差值基本上随压水压力的增大而变得更大。由于压水试验规程只适用于透水率较小的层流型和紊流型  $P-Q$  流量关系曲线下的岩体渗透系数,而高压压水条件下的岩体透水率较高,故压水试验规程给出的计算公式不适用于高压压水情况;文献[11]是基于达西流下的达西定律计算岩体渗透系数,而高压压水情况下的水流流态为紊流,故文献[11]不适用于高压压水条件下渗透系数的求取。由此可知,渗流流态对渗透系数的估算影响很大。

表 2 渗透系数差异估算表  
Table 2 Estimated difference in hydraulic conductivity

压水孔压力/MPa	0.14	0.16	0.18	0.21	0.51	0.61	0.71	0.81
文献[11]建议公式与本文公式计算结果差值/%	-65.81	-67.40	-69.21	-65.20	-71.62	-69.73	-72.76	-68.98
压水试验规程 <sup>[12]</sup> 公式与本文公式计算结果差值/%	-75.13	-77.18	-78.52	-83.71	-91.78	-93.55	-93.84	-95.26

第二段:对 17 煤底板岩层进行高压压水试验。图 4 为 17 煤底板岩层的高压压水试验过程中测试孔渗压、压水水压和压水流量随时间的变化过程。压水过程采用不同流量梯度压水的方法,观测岩体的渗透情况。

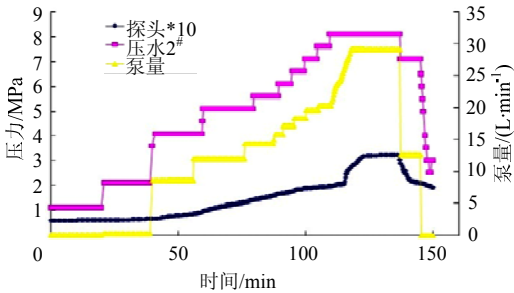


图 4 渗压、压水压力和流量与时间关系图  
Fig 4 Time variations of rock pore pressure, bore hole water pressure and bore hole discharge

从图中可看出,压水伊始,在流量保持一个梯度不变的情况下,压水压力与渗压却不断增大,裂隙连通性较差。随着流量的增大,压水压力与渗压也随之增大,说明裂隙岩体原有裂隙不断被扩展连通,渗透性变好。压水压力与渗压差值较大,说明

岩体较完整,裂隙发育较少,且连通性较差,在高压水的不断作用下发生劈裂,从而改变原岩的渗透性。在压水压力达到 8.2 MPa 左右,渗压与流量产生陡升,且出现相对一致的压力变化,说明此压力条件下原岩基本遭到破坏,裂隙连通过达到一定程度,形成了稳定的渗流通道。在压水后期,流量不断减小的情况下,压水压力与渗压也随之减小,进一步证明岩体内部结构产生不可逆的破坏,渗流通道业已形成。从图 4 中还可看出,试验孔压力、流量与观测孔渗压基本同步。在压水压力维持在 8.2 MPa 左右,压水流量稳定在 29 L/min 左右时,渗压维持在 0.23 MPa 左右,说明此时岩体中的渗流处于相对稳定状态,可以认为此时在压水孔与观测孔之间的水流为稳定流,满足前面推导公式的条件。

本次试验采用直径 7.5 cm 的压水孔压水,压水孔压水段 7.0 m。表 3 为依据本文推导公式计算的裂隙岩体渗透系数,表中同时给出依据文献[11]和压水试验规程<sup>[12]</sup>所给定的计算公式计算的渗透系数。

表 3 渗透系数计算表  
Table 3 Calculated values of hydraulic conductivity

压水孔压力/MPa	1.1	2.1	3.6	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
本文推导公式/ $\times 10^{-6}$	0.954 0	3.590	88.80	117.00	125.00	137.00	145.00	204.00
文献[11]建议公式/ $\times 10^{-6}$	0.084 9	0.228	4.29	5.29	5.10	5.10	5.01	6.63
压水试验规程 <sup>[12]</sup> 公式/ $\times 10^{-6}$	0.090 1	0.248	4.72	5.80	5.55	5.55	5.46	7.13

由表 3 中可以看出, 无论使用哪种计算公式进行计算, 其计算结果均表明在压水压力较小, 未发生水力劈裂前, 渗透系数较小; 随着压水压力的增大直至形成稳定的渗流通道, 岩体的渗透系数大幅度增加。表 3 同时表明, 岩体的渗透系数随压水压力的增大基本同步变大, 符合岩体水力压裂规律。

表 4 为使用文献[11]和压水试验规程<sup>[12]</sup>推荐的计算公式所计算的渗透系数相对于本文推导的计算公式的差值百分比。由表 4 可看出文献[11]所给

出的计算公式与本文计算公式所得结果相差很大, 比值在 11.42~30.70 之间, 而与压水试验规程给定公式的计算结果比值在 10.59~28.55 之间。由表 4 中可以看出, 比值随着压水压力的增大而增大, 分析认为随着压力的增大, 裂隙连通性增强, 宽度变大, 紊流状态更显著, 而相对于达西流计算的渗透系数差值会明显增大。由此可知, 渗流流态对渗透系数的估算影响很大。

表 4 渗透系数差异估算表  
Table 4 Estimated difference in hydraulic conductivity

压水孔压力/MPa	1.1	2.1	3.6	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
与文献[11]建议公式比值	11.24	15.72	20.69	22.05	24.51	26.80	28.93	30.70
与压水试验规程 <sup>[12]</sup> 公式比值	10.59	14.45	18.82	20.12	22.51	24.62	26.55	28.55

4 结 论

- 1) 高压压水试验压水孔周围水流状态为紊流, 应用紊流定律来描述裂隙岩体高水压下的水流更为合适。
- 2) 高水压引起的裂隙岩体渗透性的变化剧烈, 对水流状态的判别尤为重要, 用紊流定律来计算其渗透系数更符合实际情况。
- 3) 本文建议的渗透系数计算公式为裂隙岩体紊流状态下的非达西流渗透系数的计算提供了一种有效的方法。

参考文献:

[1] 郭启良, 安其美, 丁立丰. 高水头电站钻孔高压压水的作用和意义[C]// 地壳构造与地壳应力文集. 北京: 地震出版社, 2000: 148-154.

[2] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞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): 2318-2322.

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.

[3] 郭启良, 王海忠, 张志国. 小天都水电站气垫调压室洞壁围岩的高压透水性测量研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 102-106.

GUO Qiliang, WANG Haizhong, ZHANG Zhiguo. Study of permeability character under high water pressure in the surrounding rock of the air-cushion surge tank in Xiaotiandu hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric

Engineering, 2005, 24(1): 102-106.

[4] LI Ping, LU Wenxi, LONG Yuqiao, et al. Seepage analysis in a fractured rock mass: the upper reservoir of Pushihe pumped-storage power station in China[J]. Engineering Geology, 2007, 97(1): 53-62.

[5] BULUT F, BOYNUKALM S, TARHAN F, et al. A new approach to the evaluation of water-pressure test results obtained in bedrock by the US Bureau of Reclamation Method[J]. Engineering Geology, 1996, 44(1): 235-243.

[6] LEE S H, KIM S H, KIM Y H, et al. Water-pressure test and determination of welding-throat-depth for welded built-up square cfst column[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(7): 1065-1077.

[7] ABDELAZIZ R, MERKEL B J. Analytical and numerical modeling of flow in a fractured gneiss aquifer[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2012, 4(8): 657-662.

[8] MOON J S. Representativeness of jointed rock mass hydraulic conductivity obtained from packer tests for tunnel inflow rate estimate[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(5): 836-844.

[9] WANG M, KULATILAKE P H S W, UM J, et al. Estimation of rev size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(7): 887-904.

[10] QUINN P, CHERRY J A, PARKER B L. Hydraulic testing using a versatile straddle packer system for improved transmissivity estimation in fractured-rock boreholes[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(8): 1529-1547.