基于高压压水试验的岩体透水率变化研究*

黄 勇① 周志芳① 傅 胜② 胡大可② 李尚高②
(①河海大学地球科学与工程学院 南京 210098)
(②中国水电顾问集团中南勘测设计研究院 长沙 410014)

摘 要 在水利水电等地下工程的常规压水试验中,一般以1Lu(吕荣值)作为防渗灌浆结束的标准。近年来,随着科学技术水平的不断提高,我国的高水头抽水蓄能电站得到了迅速发展,也进行了相应的高压压水试验。对于高水头的水电工程,现场高压压水试验结果和常规压水试验结果对比发现,对于同一试验段,高压压水试验计算的岩体透水率反而比常规压水试验计算的透水率小,由此计算的岩体渗透系数也偏小,但在高压水作用下岩体渗透性会不同程度地增加。如果岩体透水率还用《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31-2003)中的公式计算,则由于压力的增加计算的Lu变小,防渗的标准会相应提高。针对规范中岩体透水率的适用性问题,提出了基于高压压水试验的"高压单位吸水量"的概念,即在直径75mm、试段长度约5m的孔内高压压水试验中,围岩在设计水头(≥2MPa)作用下,单位长度上的压入流量,用*DK*表示,单位为$L\cdot min^{-1}\cdot m^{-1}$。基于这一概念,应用数值模型计算了岩体试段的压入量,通过与某抽水蓄能电站高压压水试验的实际岩体试段的压入量进行的对比,获得了最大压力为4MPa时,岩体注浆结束标准为2*DK*(0.5Lu)。因此,对于不同的高水头水电工程,隧洞注浆结束标准(高压单位吸水量)要根据设计水头进行调整,而不能以常水头那样始终以1Lu作为防渗结束标准。

关键词 高压压水试验 岩体透水率 高压单位吸水量 试段压入量
中图分类号: P642.3 **文献标识码:** A

STUDY ON VARIATION OF ROCK MASS PERMEABILITY WITH HIGH PRESSURE PERMEABILITY TEST

HUANG Yong① ZHOU Zhifang① FU Sheng② FU Dake② LI Shanggao②
(①*School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098)
(②*Mid-south Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha* 410014)

Abstract Usually, 1Lu is considered to be the standard of terminating anti-seepage grouting in conventional pressure permeability test for the engineering of water conservancy and hydropower. With the development of science and technology, many pumped storage power stations have been or will be constructed. Test data show that permeability of rock mass is smaller using the high pressure test than that of conventional pressure permeability test. But for hydropower project with high hydraulic head, if permeability of rock mass is still calculated using《Water Resources and Hydropower Engineering Borehole Water Pressure Test Procedures》(SL31-2003), the standard of anti-seepage grouting can be improved due to the decrease of Lu values with the increase of water pressure. For the applicability of the formula under the condition of high hydraulic head, specific water absorption of high pressure is put forward. It is defined as the injection flux of unit length with the diameter of 75mm, test section length of 5m

* **收稿日期:** 2013－01－20; **收到修改稿日期:** 2013－08－20.
基金项目: 国家自然科学基金项目(51079043)和(41172204)资助.
第一作者简介: 黄勇,主要从事水文地质、工程地质和环境地质方面的研究. Email: hyong@hhu.edu.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and designed hydraulic head. It is expressed as *DK* with the dimension of $L \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$. Also, according to the numerical model, the injection flux of test sections for rocks is calculated. The comparison of calculated and measured injection flux is conducted in a pumped storage power station. The results show that when the high water pressure(designed hydraulic head) is 4MPa, the accepted standard of terminating anti-seepage grouting is 2*DK* which is correspondence to 0.5Lu. Therefore, for different hydropower projects, the standard of anti-seepage grouting needs to be changed according to the designed hydraulic head, instead of 1 Lu.

Key words High pressure permeability test, Permeability of rock mass, Specific water absorption of high pressure, Injection flux of test section

1 引 言

在水利水电、交通、矿山以及核废料处理等各类地下工程中,岩体透水率的确定是一项不可缺少的勘测内容,主要通过钻孔压水试验来实现,即在钻孔中进行岩体原位渗透试验,借用水柱自重压力或使用机械(泵)压力,将水压入到钻孔内岩壁四周的裂隙中,然后在一定条件下测定单位时间内压入水量的多少来衡量岩体的渗透性。对于高水头水电站,岩体承受较高的压力,岩体中的节理、裂隙等各种软弱结构面可能会张开或扩展,从而改变了岩体的透水性[1]。此时常规压水试验已不能准确反映实际水头压力作用下岩体的渗透特性,而应进行高压压水试验。高压压水试验在真实反映裂隙岩体渗透特性的同时,还可以评价各类结构面抵抗水力劈裂破坏的临界压力值大小,为地下工程灌浆处理裂隙岩体时提供依据[2,3]。近年来,我国的抽水蓄能电站得到迅速的发展,抽水蓄能电站的最大特点是电站设计水头较高,静水头一般达到 400 ~ 600m[4]。为了掌握岩体在高水压作用下的渗透性,许多在建和已建抽水蓄能电站或相似工程都对岩体在高压水作用下的特性进行了现场试验研究,因此在一些高水头的水利水电工程中,高压压水试验相当普遍[5,6]。

利用高压压水试验的结果,通过解析法和数值法可以获得岩体的渗透系数。张新敏等[7]和蒋中明等[8]通过对高压压水试验孔周围岩体中的水流形态分析,推导了利用压水孔压力、流量以及附近渗压孔的水压力计算岩体渗透系数的公式,并对推导的渗透系数计算公式和现行压水试验规程中推荐的公式进行了对比研究。王锦国等[9,10]采用 R/S 分析方法对钻孔压水试验资料进行了分析,给出了能反映岩体透水性特征的分维数。通过对不同水电工程中压水试验的分析,探讨了不同岩性、构造条件下裂隙岩体透水性的分形特征和渗透系数参数的取值。魏宁等[11]从理论上讨论了高压水作用下岩体的渗透特性,建立考虑紊流、层流、扩张、劈裂、冲蚀和淤堵现象的应力场与渗流场耦合的连续介质模型和应力场耦合 Oda 渗透张量模型。结合黑麋峰抽水蓄能电站岩体高压压水试验的渗压及变形测试成果,采用多孔连续介质全耦合理论,建立了岩体水-岩耦合数值模型,分析了岩体在高压水作用下的渗透稳定性[12]。

因此,来自于现场高压压水试验的岩体透水率是计算岩体渗透系数的重要参数。在《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL25-92 和 SL31-2003)中,岩体透水率计算公式为[13,14]

$$q = \frac{Q}{LP} \tag{1}$$

式中,q 为透水率(Lu);Q 为试段压入流量($L \cdot min^{-1}$);P 为试验压力(MPa);L 为试验长度(m)。

式(1)一般适用于常规压水试验的岩体透水率计算,且适用于透水率较小(<10Lu)的层流型和紊流型 $P-Q$ 流量关系曲线下的岩体渗透系数计算。然而,在高压压水条件下,现行压水试验规程推荐的透水率计算公式是否适用需要进一步研究。

现场高压压水试验结果和常规压水试验结果对比发现,对于同一试验段,高压压水试验计算的岩体透水率反而比常规压水试验计算的透水率小,对于高压压水试验本身而言,随着压力的增加,所计算的岩体透水率也会降低。某抽水蓄能电站压水试验的资料显示,水泥灌浆后,部分试验段用高压压水试验数据计算的岩体透水率比常规压水试验数据计算的要小,如 G2-5 和 G5-12 试验段,常规和高压压水试验计算的透水率分别为 0.22Lu、0.02Lu 和 0.04Lu、0.01Lu。蒲石河抽水蓄能电站 6 段高压压水和常规压水对比试验的透水率表明[15],有 4 段高压压水 Lu 值低于常规压水 Lu 值,约占总试验段的 66.7%。溪洛渡水电站坝基岩体也进行了常规压水试验和高

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压压水试验[6]，计算结果表明高压压水时的 Lu 值普遍低于常规压水时的 Lu 值。66 段常规压水与高压压水对比试验表明，每试验段的常规压水与高压压水的 Lu 值均不相等，有 56 段高压压水 Lu 值低于常规压水 Lu 值，约占总试验段的 85%，表明高压压水的 Lu 值普遍低于常规压水的 Lu 值。

高压压水试验时，当水压力增加到某一数值时，如果水压力再增加，则岩体的透水率反而会减小。岩体透水率从高到低可以推测岩体在透水率最大时发生了水力劈裂，当岩体发生水力劈裂后，随着水压力的增加，一些细小的颗粒将随水流移动，将部分裂隙通道堵塞，导致压入流量减小，但此时压力很高，因此用式(1)计算的岩体透水率减小，本文试图提出高压单位吸水量这个概念来解决高压水条件下岩体防渗结束标准的问题。

2 高压单位吸水量的提出

在高压条件下(如水压力为 3.0MPa)，或者岩体已经发生了水力劈裂后，水压力继续增加的情况下，能否用式(1)来计算岩体的透水率是值得研究的问题。因为在高压条件下，岩体的压入水量可能增加，但其增量小于水压力的增量，从而导致计算的岩体透水率偏小，由于透水率反映了水流透过岩体的能力，我们可能误认为此时岩体的渗透性较小，而实际上岩体的透水性在高压条件下是比较大的。另外，对于实际的水利水电工程，常常需要进行灌浆来增加防渗能力，为了检验灌浆后的防渗效果，需要做高压压水试验，如果还是用透水率的计算式(1)来判断，可能灌浆之前都能满足小于 1Lu 的标准，如某抽水蓄能电站 D 区灌浆前，高压压水试验计算第三试验段(5～10m)的透水率共 9 段，其中有 6 段小于 1Lu，占总试段的 66.7%。灌浆后除了有 3 段介于 0.5～1Lu 之外，其余的透水率都小于 0.5Lu。因此，在高压压水条件下，需要提出新的注浆结束标准。

实际工程表明，对于大坝坝高小于 200m 的水电工程，常压条件下(最大压力 1MPa)的吕荣值可以作为灌浆防渗结束的标准。但随着技术的发展和实际的需要，200～400m 的大坝也随处可见，特别是抽水蓄能电站工程，电站水头差甚至会超过 600m，这么高的水头压力下如果还用原来常压下的防渗标准，则计算出来的吕荣值更小，防渗标准可能过于严格。在这种背景下，结合某抽水蓄能工程的高压灌浆试验，我们提出了“高压单位吸水量”的概念。作为岩体的一项新的透水性指标。高压单位吸水量的定义为：在直径 75mm、试段长度约 5m 的孔内高压压水试验中，围岩在设计水头(≥2MPa)作用下，单位长度上的压入流量，可用 DK 表示，读作“大可”，单位为 $L\cdot min^{-1}\cdot m^{-1}$，可表示为：

$$DK = Q/L \tag{2}$$

式中，DK 为高压单位吸水量；Q 为压入试段的最大流量($L\cdot min^{-1}$)；L 为试段长度(m)。

式(2)与式(1)的区别在于式(2)中没有直接把压力表示出来，但考虑了设计水头，对于水利水电工程而言，设计水头一般是确定的，因此可以用 DK 来判断防渗灌浆接受标准，而不是传统意义的 1Lu 来判断。

3 岩体试段压入流量计算

式(2)表明，为了获得岩体高压单位吸水量 DK，要先通过试验或计算得到压入试段的最大流量 Q。本节主要采用图 1 所示的模型来探讨高压压水试验条件下最大压力与岩体压入流量的关系。高压压水试验和抽水试验一样，也存在一个影响半径(范围)问题，超出这个影响半径，则水压力减为 0，在这个影响半径内，水压力从压水试验孔中心向周围逐渐衰减，直至水压力降为 0。假定岩体均质各向同性，则影响范围为以压水试验孔为中心的一系列同心圆，同时某抽水蓄能电站的压水试验结果显示，当水压力为 4MPa 时，影响半径约 30m，因此我

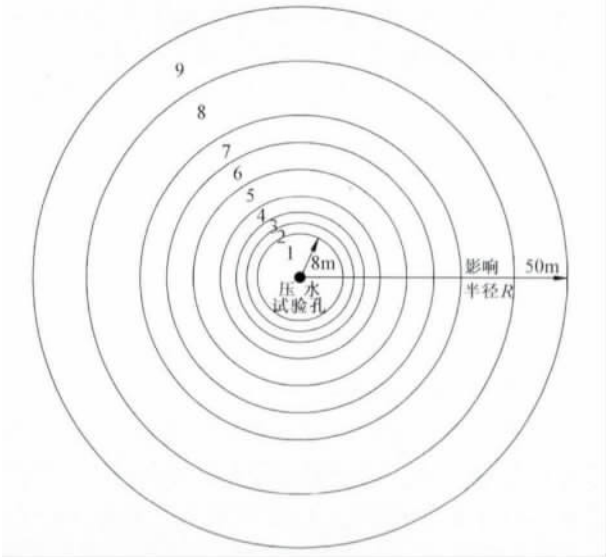

图 1 压水试验及其影响范围示意图

Fig. 1 Diagram of pressure permeability test and its influence scopes

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

们设计了不同压水试验的影响半径和压力。本研究设计了9种不同的影响半径,分别为8m、10m、12m、15m、20m、25m、30m、40m和50m,压力取7个等级,分别为2MPa、3MPa、4MPa、5MPa、6MPa、7MPa和8MPa(图1)。

假定高压压水试验是在一个标准试段内进行的,即试段长度取5m。计算过程中,内边界(压水试验孔处)为压力水头边界,外边界为0压力水头边界。

采用GeoStudio2004软件中的SEEPW模块来进行分析,断面流量可以通过水头和渗透系数等参数计算,即稳定流的有限元方程可以表示为:

$$[G]\{H\} = \{Q\} \tag{3}$$

式中,$[G]$为总导水矩阵;$\{H\}$为总水头列阵;$\{Q\}$为总流量列阵。

以区域中的一个单元为例(图2),来计算其断面的流量,总流量为所有单元流量之和。一个四边形单元的有限元方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

式中,$[c]$为单元导水矩阵;$\{H_1, H_2, H_3, H_4\}$为单元4个节点水头;$\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$为单元4个节点流量。

由Darcy定律,两节点之间的流量可以表示为:

$$Q = KA \cdot \frac{\Delta H}{L} \tag{5}$$

因此,式(4)中的系数c可以用式(5)中的KA/L表示,故从节点i到节点j的流量为:

$$Q_{ij} = c_{ij}(H_i - H_j) \tag{6}$$

因此,通过一个单元断面的总流量为:

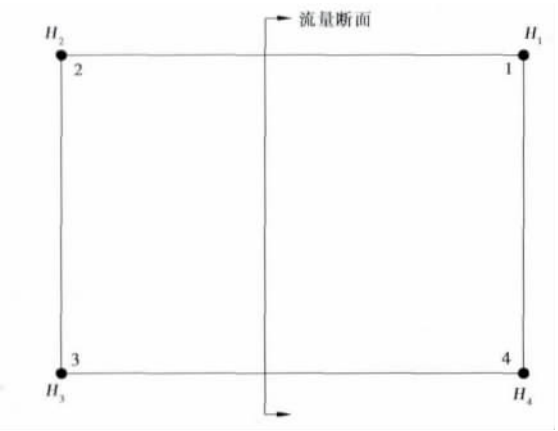

图2　一个单元的流量断面示意图

Fig. 2　Cross section of flux for one element

$$Q = Q_{21} + Q_{24} + Q_{31} + Q_{34} \tag{7}$$

此外,压入流量还与岩体的渗透系数有关,假定岩体的渗透系数为1×10^{-5} cm·s^{-1},分别计算了压水试验各影响半径在不同高压压力增量和岩体渗透系数条件下的试段最大压入流量Q(表1)。

表1列出了渗透系数为1×10^{-5}cm·s^{-1}的岩体最大压入流量。由于渗透系数与试段最大压入流量成正比,因此其他渗透系数时的试段最大压入流量可以通过两渗透系数的比值得到。在实际工程应用时,需要先确定岩体的渗透系数以及压水试验的影响半径。根据表1的计算结果制作一张类似的表格,高压检测孔试验时,对于每一试段,可以根据最大压力增量确定此时的试段最大压入流量,并与实际的最大压力增量下试段的最大压入流量进行对比,如果实际的压入流量小于计算的压入流量,则岩体高压灌浆达到了预期的防渗标准。

某抽水蓄能电站高压压水试验的压力增量为4MPa,影响半径约30m,渗透系数在水泥灌浆后为$(0.61 \sim 2.75) \times 10^{-6}$cm·s^{-1},化学灌浆后渗透系数

表1　渗透系数$K = 1 \times 10^{-5}$cm·s^{-1}时高压压水试验的压入量Q(L·min^{-1})

Table 1　Injection flux of high pressure permeability test when $K = 1 \times 10^{-5}$cm·s^{-1}

压力/MPa	高压压水试验的影响半径R/m								
	8	10	12	15	20	25	30	40	50
2	9.73	9.20	8.81	8.37	7.87	7.52	7.26	6.87	6.61
3	14.59	13.80	13.21	12.56	11.81	11.28	10.89	10.31	9.91
4	19.46	18.40	17.62	16.74	15.74	15.04	14.51	13.75	13.21
5	24.32	23.00	22.02	20.93	19.68	18.80	18.14	17.19	16.52
6	29.19	27.60	26.42	25.12	23.62	22.56	21.77	20.62	19.82
7	34.05	32.20	30.83	29.30	27.55	26.31	25.40	24.06	23.12
8	38.92	36.80	35.23	33.49	31.49	30.08	29.03	27.50	26.43

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同渗透系数对应的高压单位吸水量 DK($L \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$)

Table 2 Specific water absorption of high pressure for different permeability coefficient

渗透系数 /cm·s^{-1}	高压压水试验的影响半径 R/m								
	8	10	12	15	20	25	30	40	50
1×10^{-5}	4.850	4.600	4.400	4.200	3.950	3.750	3.650	3.450	3.300
5×10^{-6}	2.430	2.300	2.200	2.095	1.970	1.880	1.815	1.720	1.650
2×10^{-6}	0.975	0.920	0.880	0.835	0.785	0.750	0.725	0.685	0.660
1×10^{-6}	0.485	0.460	0.440	0.420	0.395	0.375	0.365	0.345	0.330
5×10^{-7}	0.245	0.230	0.220	0.210	0.195	0.190	0.180	0.170	0.165
1×10^{-7}	0.050	0.045	0.045	0.040	0.040	0.040	0.035	0.035	0.035

表 3 高压压水试验成果统计表

Table 3 Statistical data of pressure permeability test

取值范围		实测			预测		
		水泥灌浆前	水泥灌浆后、化学灌浆前	化学灌浆后	水泥灌浆前	水泥灌浆后、化学灌浆前	化学灌浆后
		试验段数	试验段数	试验段数	试验段数	试验段数	试验段数
最大流量 L·min^{-1}	<1.0	1	6	20	1	9	22
	1~2	1	5	2	1	3	1
	2~5	2	5	2	2	4	2
	5~10	2	2	2	2	2	1
	10~30	1	0	0	2	0	0
	≥30	2	0	0	1	0	0
	合计	9	18	26	9	18	26

为(0.36~1) $\times10^{-6}$ cm·s^{-1},据表 1 计算的试段最大压入流量分别为 0.89~3.98L·min^{-1}和 0.52~1.45 L·min^{-1},与实际的试段最大压入流量控制在 2L·min^{-1} 基本吻合。同时根据高压单位吸水量的定义计算了不同渗透系数条件下的高压单位吸水量(表 2)。

4 试验和计算的最大压入流量对比

为了验证计算的高压条件下的流量是否合理,选取某抽水蓄能电站区高压压水的试验结果进行分析。现场高压压水试验结果显示:根据洞壁渗水点和 2#试验孔压水段直线距离约 30m,估计断层岩体和裂隙岩体裂隙扩展连通时渗透水力坡降为 13~15。水泥灌浆前,断层带出现渗水的最大压力(水力劈裂压力)4.0~4.5MPa,影响半径约为 30m。根据水泥灌浆前 9 个试段的压水资料可以计算出每个试段的渗透系数,据表 1 获得各个试段在最大压力为 4.0MPa 和 4.5MPa 时的最大流量(图 3a),同时也计算了这 9 个试段在实测最大压力(介于 2.25~3.5MPa,其中有一段大于 4MPa)下的最大流量。计算结果表明,预测最大流量与实测最大流量的误差大多数在 10%内,个别试段在 20%左右。同理计算了水泥灌浆后,化学灌浆前,以及化学灌浆后的最大流量(图 3b,图 3c),此时仍旧保持水力坡降为 13~15,由于实测最大压力增加,因此其影响半径有所增加,但一般不超过 30m。灌浆后围岩的渗透系数明显减小,因此计算的最大流量也减小。当试段的流量较大时,预测的流量比实测的流量要大,但用实测最大压力计算的流量与实测流量的偏差较小。计算结果表明,无论是灌浆前还是灌浆后,超过 80%以上试段的预测流量与实测流量的误差都小于 10%,个别压水试段误差达 20%左右。

某抽水蓄能电站上水库与厂房的水头差约 380m(3.8MPa),高压压水试验时,以 4MPa 作为岩体试段的最大压力,根据公式(2)如果以 $2DK$ 作为注浆结束标准,则相当于公式(1)中 0.5Lu。现场高压试验的岩体透水率计算结果表明,水泥灌浆前有 3 段透水率大于 0.5Lu,水泥灌浆后化学灌浆前有 1 段透水率大于 0.5Lu,化学灌浆后全部试段的透水

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

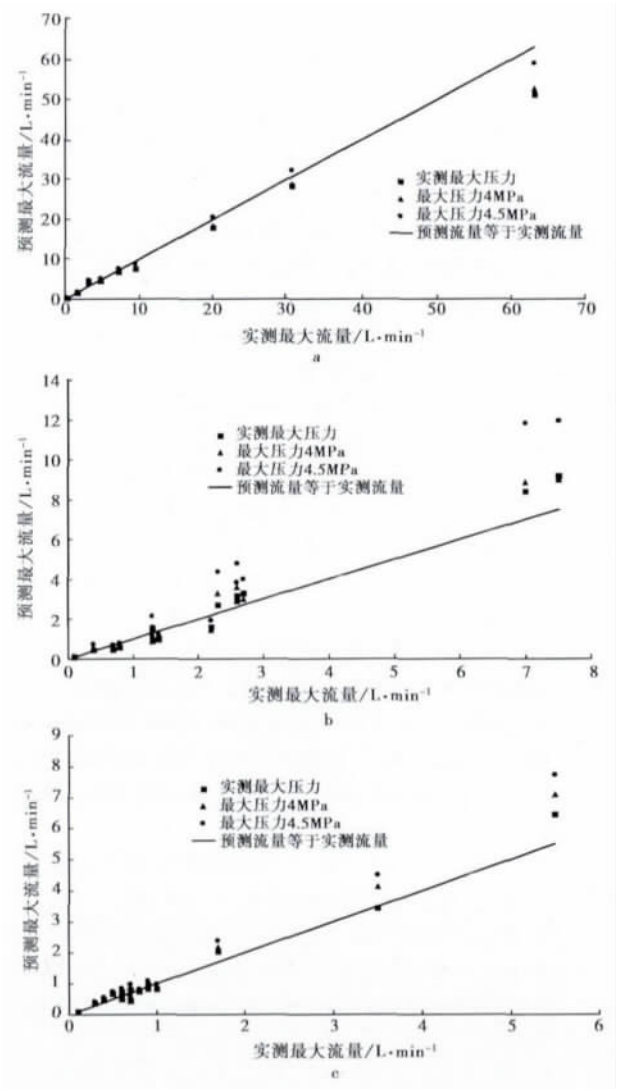

图3　高压条件下实测最大流量与预测最大流量对比

Fig. 3　Comparison of calculated and measured maximum flux under high pressure

b. 水泥灌浆后化学灌浆前; a. 水泥灌浆前; c. 化学灌浆后

率小于0.5Lu,表明灌浆后,高压水条件下计算的岩体透水率比较容易达到小于0.5Lu(2*DK*)的要求,满足注浆结束标准。表3给出了高压水条件下按流量大小统计的试段数,从表中可以看出当最大流量小于10L·min^{-1}时,实测和预测流量在此范围内统计的试段数相同,即灌浆前都为6段,占总试段数的66.7%; 灌浆后分别为18段和26段,占总试段数的100%。

可见,如果在高压压水试验条件下,还是按照公式(1)中透水率小于1Lu来判断作为注浆结束处理标准,对于本抽水蓄能电站,则这个标准显得过于严格。因为按照前面的分析,1Lu则相当于4*DK*,且两次充水试验表明水道内渗漏量较小,以2*DK*(0.5Lu)作为注浆结束标准可以满足防渗要求。

5　结　论

(1)针对现行规范《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31-2003))计算岩体透水率存在的问题,提出了基于高压压水试验的"高压单位吸水量"的概念,定义为在直径75mm和试段长度约5m的孔内高压压水试验中,围岩在设计水头(≥2MPa)作用下,单位长度上的压入流量,用*DK*表示,单位为L·min^{-1}·m^{-1}。

(2)某抽水蓄能电站的防渗灌浆试验结果表明,所有试段岩体透水率都小于0.5Lu,即相当于高压单位吸水量为2*DK*,且2次充水试验表明水道内渗漏量较小,以2*DK*(0.5Lu)作为注浆结束标准可以满足防渗要求。

(3)对于不同的高水头水电工程,隧洞注浆结束标准(高压单位吸水量)要根据设计水头进行调整,而不能以常水头那样始终以1Lu作为防渗结束标准。

参　考　文　献

[1] 张飞,徐光黎,郭淋,等. 裂隙岩体渗透结构类型分析[J]. 工程地质学报,2012,**20**(2): 296~303.
Zhang Fei, Xu Guangli, Guo Lin, et al. Analysis of fractured rock mass permeability structure types. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(2): 296~303.

[2] 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.
Yin Liming, Yang Chunhe, Luo Chaowen, et al. Application of high water-pressure test to deep borehole. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1692~1694.

[3] 王胜,黄润秋,陈礼仪. 锦屏一级水电站深部裂缝控制性灌浆技术研究[J]. 工程地质学报,2012,**20**(2): 276~282.
Wang Sheng, Huang Runqiu, Chen Liyi. Analysis on grouting technology for controlling deep rock cracks at Jinping Ⅰ Hydropower. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(2): 276~282.

[4] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2005.
Zhang Youtian. Rock Hydraulics and Engineering. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005.

[5] 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): 2318~2323.
Jiang Zhongming, Fu Sheng, Li Shanggao, et al. High pressure permeability test on hydraulic tunnel with steep obliquity faults under high pressure. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engi-

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

neering, 2007, **26**(11): 2318 ~ 2323.

[6] **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 masses of Xiluodu hydroelectric station. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 385 ~ 387.

[7] **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): 115 ~ 159.
Zhang Xinmin, Jiang Zhongming, Feng Shurong, et al. Study on the determination of permeability coefficient of fractured rock mass under high pressure test condition. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, **30**(1): 115 ~ 159.

[8] **蒋中明, 冯树荣, 傅胜, 等. 某水工隧洞裂隙岩体高水头作用下的渗透性试验研究** [J]. **岩土力学**, 2010, **31**(3): 673 ~ 676.
Jiang Zhongming, Feng Shurong, Fu Sheng, et al. Test study of osmotic behavior of fractured rock mass of water tunnel under high water pressure. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 673 ~ 676.

[9] **王锦国, 周志芳, 黄勇. 基于压水试验资料的岩体透水性分形特征研究** [J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, **22**(4): 562 ~ 565.
Wang Jinguo, Zhou Zhifang, Huang Yong. Study on permeability of rock mass based on water pressure test data by using fractal theory. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 562 ~ 565.

[10] **王锦国, 周志芳, 陈松峰. 观音岩水电站坝址区右岸岩体溶蚀发育机理研究** [J]. **工程地质学报**, 2011, **19**(3): 409 ~ 416.
Wang Jinguo, Zhou Zhifang, Chen Songfeng. Corrosion mechanism of rock mass at dam site left bank of Guanyinyan hydropower station. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(3): 409 ~ 416.

[11] **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**, 2006, **25**(5): 1037 ~ 1042.
Wei Ning, Li Jindu, Fu Xudong. Numerical simulation of high-pressure injection experiment. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 1037 ~ 1042.

[12] **蒋中明, 冯树荣, 陈胜宏, 等. 裂隙岩体高压压水试验水 - 岩耦合过程数值模拟** [J]. **岩土力学**, 2011, **32**(8): 2500 ~ 2506.
Jiang Zhongming, Feng Shurong, Chen Shenghong, et al. Numerical simulation of hydro-mechanical coupling process of fractured rock mass during high pressure permeability test. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(8): 2500 ~ 2506.

[13] **中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程钻孔压水试验规程**(SL25-92) [S]. **北京: 水利电力出版社**, 1992.
Compilation Group of People's Republic of Industry Standards. Water Resources and Hydropower Engineering Borehole Water Pressure Test Procedures (SL25-92). Beijing: Water Power Press, 1992.

[14] **中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程钻孔压水试验规程**(SL31-2003) [S]. **北京: 水利电力出版社**, 2003.
Compilation Group of People's Republic of Industry Standards. Water Resources and Hydropower Engineering Borehole Water Pressure Test Procedures (SL31-2003). Beijing: Water Power Press, 2003.

[15] **孙政, 田作印, 任向宇. 高压压水试验在蒲石河抽水蓄能电站中的应用** [J]. **东北水利水电**, 2009, (9): 50 ~ 52.
Sun Zheng, Tian Zuoyin, Ren Xiangyu. Application of high-pressure water test in Pushihe pumped storage power station. Northeast China Water Conservancy and Hydropower, 2009, (9): 50 ~ 52.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net