

文章编号: 1000-7598(2009)09-2599-06

工程岩体裂隙渗透性试验方法研究及应用

丁立丰, 郭啟良, 王成虎

(中国地震局 地壳应力研究所, 北京 100085)

摘 要: 现代水电、交通、矿山、能源及核废料处理等地下工程中, 洞室岩体原地承载能力以及在工程运行状态下洞室围岩的实际透水性状等岩体力学参数, 是地质勘测不可缺少的基础资料, 也是科学地优化工程设计的依据。由于传统的裂隙渗透性测试技术与方法如常规压水试验已不能满足工程建设发展的需要, 达不到有些复杂工程对岩体渗透性的特殊设计要求, 因此, 有必要进行多种形式的工程岩体裂隙渗透特性分析和研究, 从而针对特定工程, 选择合适的试验方法, 探明其确切渗透规律, 以保证工程设计的准确性和有效性。

关 键 词: 工程岩体; 裂隙; 渗透性; 试验方法

中图分类号: TU 459⁺.9

文献标识码: A

Research and application of testing methods for engineering rock mass fissure permeability

DING Li-feng, GUO Qi-liang, WANG Cheng-hu

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: With the development of present underground constructions such as hydropower projects, traffic engineerings, mining works, energy sources and nuclear waste treatments, the tunnels' surrounding rocks original carrying capacities and their actual permeabilities, etc. under project working states are the indispensable initial values of geological research; and these are also the reference for scientifically optimizing the engineering design. Because conventional measurement techniques and methods such as water pressure test do not adapt to the design requirement of rock masses permeability for complex engineering, it is necessary to carry out innovative and multiform fissure permeability tests. For a specific engineering, only using exact test method, the proper permeability can be mastered; and the accuracy and effectiveness of the engineering design can be ensured.

Key words: engineering rock mass; fracture; permeability; testing method

1 引 言

在许多岩土工程设计中需要了解岩体裂隙的渗透性能, 因其与防渗、岩体稳定、结构强度等有密切关系。但通常对裂隙岩体渗透性的研究较为单一, 因此, 有必要从多种形式和途径对其进行更加深入的试验、分析, 使之更加合乎工程的设计需要, 例如高压压水试验可真实模拟水电站大坝在实际水头压力作用下坝基岩体渗透情况。本文探讨了多种形式的工程岩体裂隙渗透性试验方法, 以供国内外各类相关工程参考。

2 常规渗透性试验方法和渗透类型

常规裂隙渗透性试验中, 一般采用对裂隙岩体试段以3个压力点(一般取0.3、0.6和1 MPa), 5个压力阶段进行施压, 即 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 (P_4 = P_2) \rightarrow P_5 (P_5 = P_1) (P_1 < P_2 < P_3)$, 记录测段压入的流量变化, 绘制出对应的压力-流量变化曲线。

由试验可以确定出裂隙岩体的透水率, 其单位为吕荣(Lu), 1 Lu的定义为当试段压力 P 为1.0 MPa时, 每米试段每分钟的压入流量 Q 为1 L/min, 一般取最大压力下的透水吕荣值作为该试段的透水

收稿日期: 2007-10-25

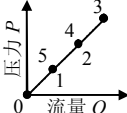
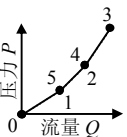
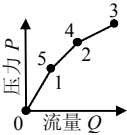
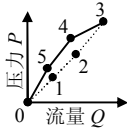
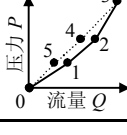
基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No.ZDJ2007-20、ZDJ2007-5)资助。

第一作者简介: 丁立丰, 男, 1974年生, 硕士, 副研究员, 主要从事岩土力学参数测量与研究。E-mail: dinglifeng@yahoo.cn

率。

《水利水电工程钻孔压水规程》^[1]中划定, P - Q 曲线有 5 种类型, 即 A (层流型)、 B (紊流型)、 C (扩张型)、 D (冲蚀型)、 E (充填型)。每种曲线代表一种渗流形式, 其标准曲线特点见表 1。

表 1 P - Q 曲线类型及曲线特点
Table 1 P - Q curve types and their characters

类型名称	P - Q 曲线	曲线特点
A (层流) 型		升压曲线为通过原点的直线, 降压曲线与升压曲线基本重合
B (紊流) 型		升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合
C (扩张) 型		升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合
D (冲蚀) 型		升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈顺时针环状
E (充填) 型		升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈逆时针环状

常规的压水试验方法可以粗略确定裂隙岩体在较低压力作用下的流量变化情况, 可以初步判定裂隙特性, 对于大多数工程而言, 其测量结果具有重要意义。但对于具有特定环境条件要求的工程, 仅有常规裂隙试验结果是不全面的, 需更深入研究岩体裂隙的渗透特性及其影响因素。

目前国内外学者通过多角度如应力^[2-3]、埋深^[4]、结构面力学参数^[5]和多途径如网络模拟^[6]、尺度效应^[7]、渗流模型^[8]等对之进行了深入研究, 获得了一些有关渗透性的新成果与新理论。不过由于真实岩体裂隙渗流场的复杂性, 没有哪种方法能确切解释并预测某工程岩体的渗透参数, 最可靠、最直接的方式, 依然是对具体的工程裂隙岩体进行实地测量。本团队多年从事岩体裂隙渗透性测量与研究, 开展过多种符合特定工程要求的特殊渗透性试验, 下面介绍几种经常采用的方法供类似工程参考。

3 特殊形式裂隙岩体渗透性试验及工程应用

3.1 高压裂隙岩体渗透试验

在一般情况下, 岩石的透水量随压力的增大而增大, 一些在低压下不渗透或透水率很低的岩石, 在高压下出现透水或透水量明显增大。在高坝和高水头电站往往都具有几百米水头, 岩石承受较高的压力, 其透水率资料对防渗设计很重要。而传统压水试验压力值多偏低 (最大为 1 MPa), 试验结果难以确切地反映岩石在真实水头压力下的渗透特性, 这主要是由于在高压作用下岩体中的微裂隙或节理等软弱结构面可能张开或扩展, 从而改变了岩体的原始透水特性, 因此, 只有按照岩体实际承受的压力进行压水测试^[9], 才能得到高水头作用下岩体透水性的可靠资料。

图 1 为福建某抽水蓄能电站地下厂房 DK1 孔 57.20~62.20 m 试验段裂隙岩体在 5 个压力点 (2、3、4、6、7.5 MPa) 下的高压压水 P - Q 曲线, 由试验情况可以看出, 该试段在压力 0~2 MPa 时根本不漏水, 在 2 MPa 以后开始有渗流量, 并且随着压力的增大, 渗流量也随之增大, 在最高压力 7.5 MPa 下, 流量为 4 L/min, 计算其透水吕荣值为 0.11 Lu。可想而知, 若采用常规的压水试验方法, 最大压力 1 MPa 时, 试段不漏水, 因此, 对于将来要承受 700 多米水头的地下厂房位置岩体来说, 模拟实际水头作用下裂隙岩体的高压渗透性测试, 对地下厂房位置高压引水管道衬砌方式的选择, 以及确定水头压力下岩体的渗漏特性具有重要意义, 这是常规压水试验方法所不能实现的。

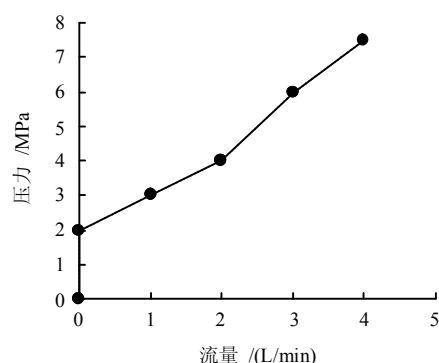


图 1 福建某抽水蓄能电站测段高压压水 P - Q 曲线
Fig.1 P - Q curve of high water pressure test at a pumped storage power station in Fujian Province

需要指出的是, 高压压水试验过程中的最大压力数值是根据工程实际需要而选取的, 通常会接

近或略高于在工程运行时岩体承受的实际压力,由于试验可实时监测测段在各压力下流量的变化过程,从而模拟判断将来实际承压过程中岩体裂隙的逐渐扩张和渗流情况,况且试验过程由测试者控制,因此该“高压”是必须的,也是安全的。

3.2 逐级加压至岩体裂隙劈裂张开渗透试验

该种类型的试验,就是逐级升高试验段内的压力,使原生裂隙由其闭合状态逐渐张开的试验过程。裂隙岩体的张开压力与节理裂隙的空间展布及原地应力直接相关。试验一般选择在含有裂隙的岩体中进行,在试验过程中首先向测段施加较低压力,在得到稳定流量值后,压力再升高一个台阶,并重复上一过程,依此类推,得到一系列稳定压力下的稳定流量值,也就得到了测段压力与流量的关系曲线。

在开始阶段,压力与流量呈线性关系,裂隙岩体未被水压力张开,渗流速率主要受控于水头压力并遵循达西定律。直至达到某压力时,原生裂隙承受不住水力作用被迫张开、扩展,这时流量将急剧增大,在压力-流量曲线上可确切得到压力-流量曲线突变的拐点,该拐点所对应的压力值就是该裂隙的劈裂压力,它标志着该层段岩体抗御水头压力的能力,该试验方法又称水力劈裂试验^[10]。

图2所示为四川大渡河流域某水电站一平孔内进行的水力劈裂试验,由图可见,该试段在0~3 MPa压力不漏水,当压力由3 MPa逐步增加至6 MPa时,试段稳定渗透量也逐步由0 L/min增加至3 L/min,继续对试段增压至6.5 MPa时,试段渗透量突然增加到8 L/min,表明6 MPa是该试段岩体裂隙能承受的最大水头压力,再增压就会导致试段岩体裂隙被突然张裂并与周边裂隙贯通,使流量猛然增大。当压力为6.8 MPa时,渗透量更是增加到14 L/min。由此可以认定,该试段岩体裂隙能抵御的水头压力为6 MPa,亦即测段的水力劈裂值。

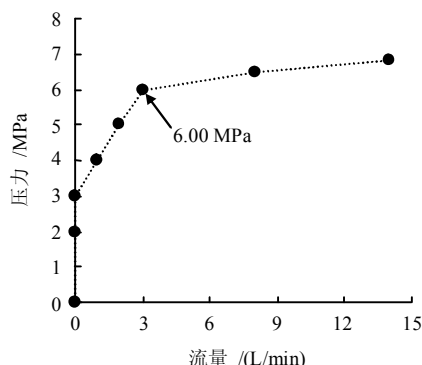


图2 四川某电站平孔试段水力劈裂试验 P - Q 曲线
Fig.2 P - Q curve of hydraulic fracture test in a plain hole at a hydropower station in Sichuan Province

该种类型的试验,主要应用于一些高水头电站,其坝址、调压井及输水隧洞的围岩长期承受高压水头作用,预检测裂隙岩体在高水头压力作用下是否张开,研判其承载高水头压力的能力,直接关系到围岩的稳定性和电站工程运行的安全。

3.3 裂隙岩体单压力点长时间渗透试验

高水头电站,抽水蓄能电站竖井、岔管、输水隧道的围岩在长时间、高水头压力下透水率如何变化,围岩是否会产生水力劈裂,对衬砌设计和围岩稳定性研究有重要意义^[11]。该类岩体很有必要进行单压力点长时间的渗透试验,其目的是模拟围岩在实际水头压力长时间作用下测量其透水率变化,了解测点附近岩体结构的完整性和裂隙的连通性。

图3是北京某抽水蓄能电站花岗岩高压输水隧洞围岩连续480 min的观测结果。电站水头压力(包括水锤)为5.62 MPa,试验钻孔在勘探洞内,试验段位于孔深61.30~66.23 m处,水泵流量为30 L/min。

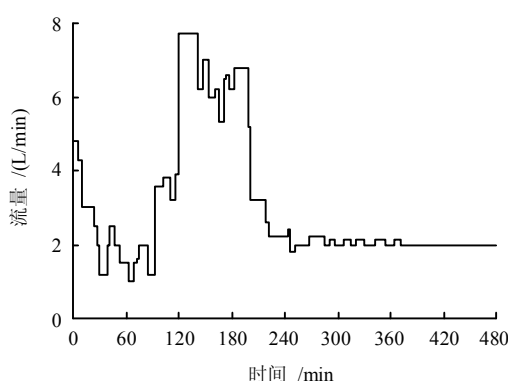


图3 北京某抽水蓄能电站高压输水隧洞连续观测结果
Fig.3 Continuous observation values in convey tunnel of a pumped storage power station in Beijing

由图3可见,在恒定水头压力5.62 MPa下,测段在1~8 min稳定流量为5 L/min;然后逐渐下降,至15 min流量为3 L/min;15~85 min期间流量在1~3 L/min内摆动;85~120 min流量为4 L/min左右;120 min后流量突然增大至8 L/min;120~190 min在5~7 L/min摆动;190~210 min流量下降至2.5 L/min左右;210~240 min逐渐下降至2 L/min;240~480 min流量一直稳定在2 L/min。

上述观测结果表明,高压输水隧洞花岗岩围岩在连续120 min的高压下,裂隙岩体逐渐趋于饱和,微裂隙开始张开,透水率增大并逐渐趋于新的饱和状态。由于花岗岩内裂隙的发育规模较小,连通性较差,所以在实际水头压力下虽然有所张开,但延

伸的规模较小并很快趋于新的饱和状态, 在后面的连续观测中流量逐渐减小并趋于稳定。分析认为, 该电站高压输水隧洞围岩有较强的承压能力, 即使在不衬砌情况下, 在 5.62 MPa 压力下运行也不会产生较大规模的水力劈裂。由于试段最终流量稳定在 2 L/min, 吕荣值没有太大变化, 说明裂隙岩体具有高压低透水性, 其水力劈裂值要大于 5.62 MPa。

该类试验对于准确测定某些易与周边裂隙贯通但在饱和后不产生劈裂的岩体裂隙的渗透率有很好的效果, 与短时间试验相比, 能较确切地得到裂隙本身的稳定渗透量。

3.4 岩体裂隙劈裂后稳定流量下压力随时间变化的渗透试验

岩体裂隙在一定水头压力作用下发生劈裂后, 由于与周边裂隙连通, 在稳定流量下, 其压力必然会下降。通过观察压力的下降速率, 可以判断岩体裂隙周边的连通性与整体泄漏性, 这对研究具有较大承载压力、易产生水力劈裂的洞室岩体的渗透特性具有实际意义。

观察裂隙岩体在劈裂后稳定流量下的压力变化规律, 可研判将来工程岩体的可靠承载强度, 若在劈裂后压力略有下降, 但稳定值仍足以抵御最大水头压力, 则表明工程岩体自身的抗渗透性足以保证实际运行时的安全。反之若压力随时间呈现明显下降趋势, 则表明在该流量持续作用下, 岩体裂隙的渗透性逐渐增强, 吕荣值增大, 流体向周边迅速渗透, 试段密封性能降低, 需对工程岩体进行一定处理。

如云南某水电站 ZK532 孔 178.36~181.46 m 深度试段即进行了上述试验, 孔段岩性为花岗岩, 微风化, 镶嵌碎裂结构, 裂面普遍有钙质薄膜, 光滑。

试验段在 5.72 MPa 压力下发生水力劈裂, 其后关闭测段的回水开关, 以 15 L/min 的恒定流量向试验段注水, 并开始计时, 试段压力开始逐渐下降, 第 1 min 末降至 4 MPa, 第 4 min 末降至 3.8 MPa, 第 12 min 末降至 3.65 MPa, 至第 22 min 末压力降至 3.55 MPa, 并在此后一直保持稳定, 连续观测至 30 min, 压力稳定在 3.55 MPa。图 4 即为该试段劈裂后 15 L/min 流量下的压力随时间衰减趋势图。

试验结果表明, 该试段孔壁围岩中的裂隙连通性不是很好, 水力劈裂后以 15 L/min 的恒定流量注水, 约 20 min 后, 试段压力仍能稳定于 3.55 MPa, 这为岩体裂隙在劈裂后的强度设计提供了参数。

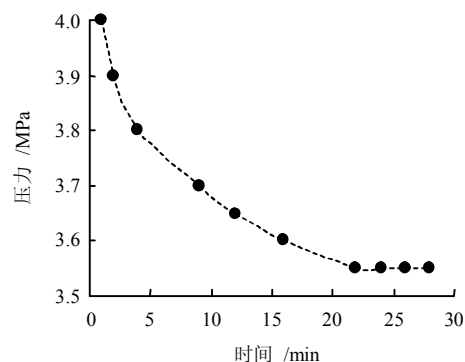


图 4 云南某水电站钻孔 15 L/min 流量下压力随时间衰减图

Fig.4 Pressure declining with time under flow 15 L/min in a borehole at a hydropower station in Yunnan Province

3.5 瞬时加压密封后压力随时间变化渗透试验

对于有些完整致密岩体, 由于其裂隙渗透性较弱, 用其他方法如常规压水不易得到有效的观测数据, 可以采用瞬时加压密封后压力随时间变化渗透试验, 该方法又称压力脉冲试验 (Pressure pulse test) [12], 它通过对试验段瞬时加压后, 记录试验段水压随时间的衰减曲线, 通过偏微分方程解, 来确定岩石的渗透系数, 具有试验时间短、测试精度高等特点, 在国外得到较普遍应用。

试验一般采用图解法求解渗透系数, 即绘制 H/H_0 随时间的对数坐标衰减曲线图, 再与压力脉冲试验标准曲线形态 (图 5) 进行比较。

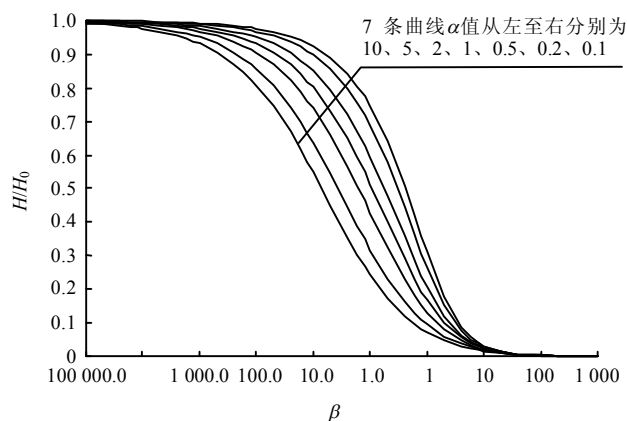


图 5 压力脉冲试验标准曲线

Fig.5 Curves of pressure pulse test

图 5 中, H 为试验过程中记录的压强, H_0 为试段初始压强, α 为一组给定的常数值如 0.2、0.5、1、2 等, $\beta = T\pi / (V_w C_w \rho_w g)$, 其中 T 为测段导水系数 (m^2/s), t 为试验时间 (s), V_w 为记录压入水的体积 (m^3), C_w 为水的压缩系数 (m^2/N), ρ_w 为水

的密度 (g/cm^3), g 为重力加速度 (m/s^2)。

数据处理时, 横向移动实测曲线, 并与标准曲线相比较, 直到与某 α 值曲线较为吻合, 再由 $\beta=1$ 线确定出实测曲线中的测试时间值 t_m , 进而确定导水系数 T , 从而得到测段渗透系数 $K=T/l$ 。

例如对东北一工程钻孔 110~120 m 测段进行压力脉冲试验, 初始加压为 8 MPa, 至观测结束时的压入水量为 1 L, 期间记录压力随时间变化见表 2。

表 2 东北某钻孔压力脉冲试验压力随时间变化数据
Table 2 Variation of pressure with time at a borehole's pressure pulse test in Northeast China

时间 /s	压力 /MPa	时间 /s	压力 /MPa
0	8	210	3.5
15	6.5	240	3.2
30	6.2	270	3
45	5.9	300	2.8
60	5.5	360	2.5
75	5.1	420	2.3
90	4.8	480	2.1
105	4.6	540	1.9
120	4.3	600	1.75
150	4	660	1.6
180	3.7	720	1.55

由表 2 数据, 作图 6 得到试验曲线与 $\alpha=0.1$ 标准曲线较吻合, 并求得 $t_m=355$ s, 故测段导水系数 $T=4.042 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, 渗透系数 $K=4.042 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 。

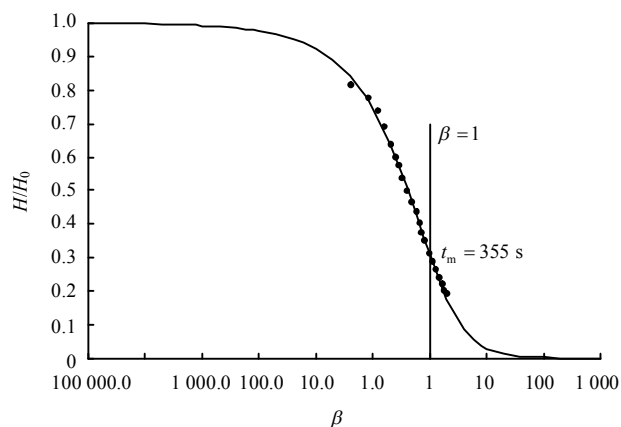


图 6 东北一工程压力脉冲试验求解实例
Fig.6 A typical example of pressure pulse test at an engineering in Northeast China

3.6 长时间高压多循环渗透试验

针对有些工程关注多次加压对围岩渗透性的影响, 可以采用长时间高压多循环方式的渗透试验。该试验从低压力到高压依次观察裂隙岩体的

渗漏情况, 各压力阶段视工程情况决定注压时间, 重要压力如超过电站水头压力可适当加长时间, 升压试验完成后, 再进行降压试验, 完成第 1 个循环; 然后继续第 2 循环, 压力点与观察时间可与第 1 循环相同或变化, 如此可进行多个循环。

根据测试段在每个循环各压力阶段的渗透变化情况, 判断裂隙岩体在多次受压后的渗透耐受程度, 从而预测将来在实际运行压力不断变化状态下裂隙岩体的渗透变化规律。

表 3 列出的是在东北某抽水蓄能电站高压岔管部位 1 个 486 m 深钻孔中进行的长时间高压 4 循环渗透试验所采用的试验格式。

表 3 东北某抽水蓄能电站长时间高压 4 循环渗透试验格式
Table 3 Long time and high pressure 4-cycle permeability test format in a pumped storage power station in Northeast China

循环	压力 /MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	升压 /min	5	5	5	5	5	30	10	30	10	30
	降压 /min	10				10					
2	升压 /min		5		5		30		30		30
	降压 /min	10				10					
3	升压 /min		5		5		30		30		30
	降压 /min	10				10					
4	升压 /min		5		5		30		30		30
	降压 /min	5	5	5	5	5	30	10	30	10	30

按照上述试验要求, 在 422.00~427.20 m 深度试验结果表明, 第 1 循环在 0~6 MPa 升压过程中均不漏水, 其后在 7、8、9、10 MPa 压力下, 测段漏水量分别为 2、3、4、7 L/min; 第 2 循环时 6、8、10 MPa 压力下漏水量分别为 0、2、5 L/min; 第 3 循环同样压力下测段漏水量分别为 0、1、4 L/min; 第 4 循环与第 3 循环相比无变化。试验结果表明, 随着升降压循环次数的增加, 测段孔壁岩石的渗流逐渐减小, 并在第 4 循环阶段趋于稳定, 该测段渗透变化特性对将来工程岩体可能需要反复加载情况下的防渗设计是有利的。

4 结 语

在水利水电、交通、矿山、核废料处理、抽水蓄能电站、气垫调压室等各工程中, 掌握岩体裂隙的渗透特性显得日益重要。大量工程实践表明, 岩体裂隙渗透性的常规测试方法和技术, 已不能满足许多压力洞室、高压管道设计的需要, 因此, 有必要针对工程特点及用途, 选择合适的裂隙渗透性试验方法, 确定其特定条件下的渗透特性, 真正做到“有的放矢、弹无虚发”, 这对于工程设计的准确

性、有效性有着显著的现实意义和经济意义。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. (SL25-92) 水利水电工程钻孔压水试验规程[S]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [2] 仵彦卿. 裂隙岩体应力与渗流关系研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 6: 30—35.
WU Yan-qing. Relation between stress and seepage in fractured rock mass[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1995, 6: 30—35.
- [3] 韦立德, 杨春和. 压剪应力条件下各向异性岩石损伤本构模型和渗流模型(I): 理论模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 428—435.
WEI Li-de, YANG Chun-he. Constitutive model and seepage model of anisotropic rock in compression with micromechanics(I): Theoretical models[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 428—435.
- [4] 邓广哲, 黄炳香, 王广地, 等. 圆孔孔壁裂隙水压扩张的压力参数理论分析[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(4): 361—364.
DENG Guang-zhe, HUANG Bing-xiang, WANG Guang-di, etc. Theoretical analysis of crack expanding under pore hydraulic pressure[J]. **Journal of Xi'an University of Science & Technology**, 2003, 23(4): 361—364.
- [5] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, 15(2): 7—12.
LIU Ji-shan. The coupled relationships between mechanical and hydraulic parameters of a structural surface and their applications[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1988, 15(2): 7—12.
- [6] 王贵宾, 杨春和. 岩体节理三维网络模拟技术及渗透率张量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3591—3594.
WANG Gui-bin, YANG Chun-he. 3D network simulation technique of joints in rock mass and permeability tensor analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3591—3594.
- [7] 尹尚先, 王尚旭. 不同尺度下岩层渗透性与地应力的关系及机理[J]. 中国科学 D 辑. 地球科学, 2006, 36(5): 472—480.
YIN Shang-xian, WANG Shang-xu. Effect and mechanism of stresses on rock permeability at different scales[J]. **Science in China (Series D:Earth Sciences)**, 2006, 36(5): 472—480.
- [8] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 范各庄矿井地下水系统广义多重介质渗流模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2319—2325.
YIN Shang-xian, WU Qiang, WANG Shang-xu. Generalized multiple porous media seepage model of groundwater system for fangezhuang mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2319—2325.
- [9] 沈怀至, 李振富. 高压压水试验在压力隧洞设计中的应用[J]. 四川水力发电, 2005, 24(1): 15—17.
SHEN Huai-zhi, LI Zhen-fu. Application of high pressure water pressure test in pressure tunnel design[J]. **Sichuan Water Power**, 2005, 24(1): 15—17.
- [10] 赵仕广, 郭启良, 侯砚和. 小天都水电站气垫调压室洞壁围岩原地承载力的水力劈裂测试[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 107—112.
ZHAO Shi-guang, GUO Qi-liang, HOU Yan-he. The hydraulic splitting test for the bearing capacity of surrounding rock of the air-cushion surge tank in Xiaotiandu hydropower station[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(1): 107—112.
- [11] 安其美, 赵仕广, 丁立丰, 等. 单回路双栓塞止水压力技术及其应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 50—53.
AN Qi-mei, ZHAO Shi-guang, DING Li-feng, etc. Technique of single-circuit and double-plug water-seal injection test and its application[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(5): 50—53.
- [12] BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS S S. A method for determining the hydraulic properties of tight formations[J]. **Water Resources Research**, 1980, 16(1): 233—238.