

基于微水试验的北京大兴隐伏岩溶裂隙 渗透系数求取方法

李星宇¹, 南天¹, 王新娟², 李鹏², 谢振华², 邵景力¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 微水试验是进行岩土体渗透性测试的重要技术手段与方法。选取北京大兴隐伏奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层作为目标层, 依据现场条件选择生产井, 利用水位自动监测装置记录停泵水位恢复法, HSZK 振荡试验法与注水试验法进行微水试验应用研究, 发现获得的目标层渗透系数小于传统抽水试验结果。分析认为造成这种差异的原因在于不同试验方法的影响半径不同, 而微水试验结果更能体现试验点岩土体的渗透性。此外, 在裂隙与岩溶介质中运用微水试验要尽量减小、避免皮肤效应的影响, 选择试验方法时要保证水位瞬时变化的实现, 对于主裂隙, 可以借助栓塞进行分段试验。

关键词: 微水试验; 裂隙与岩溶介质; 渗透系数; 影响半径; 皮肤效应

中图分类号: P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0156-05

Determination of Permeability Coefficient of Concealed Karst Fractures Using Slug Test in Daxing of Beijing

LI Xing yu¹, NAN Tian¹, WANG Xin juan², LI Peng², XIE Zhen hua², SHAO Jing li¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: Slug test is an important method to determine the permeability of rock and soil masses. In this paper, the permeability of the concealed Ordovician karst fractured limestone aquifer in Daxing of Beijing was estimated. The production wells were selected according to the in situ conditions, and the slug test design included the pump off water level recovery method recorded by auto monitoring system, HSZK oscillation method, and injection method. The results showed that the permeability obtained from the slug test is less than that determined by the conventional pumping test. The discrepancy was mainly due to the difference of influence radius in different test methods, and slug test can reflect the permeability at the local scale more accurately. Additionally, it is necessary to reduce or avoid the well skin effect while performing the slug test in the fracture and karst medium. The realization of instantaneous water level change needs to be conducted when designing the slug test and the plug sealing sectional test can be used in the main fractures.

Key words: slug test; fracture and karst medium; permeability coefficient; influence radius; well skin effect

含水层水文地质参数的获取是进行区域水文地质调查、水资源规划与评价、地下水污染防治的重要内容, 目前常用的方法有室内试验法、经验参数法、野外现场试验法(抽水试验法、微水试验法)、基于数值模拟的水文地质参数识别法等。其中, 微水试验作为岩土体渗透性测试的重要技术手段与方法, 与抽水试验相比具有周期短、操作简单、灵活等特点, 试验基本原理为在静止水位条件下, 使钻孔内水位发生

瞬时快速的变化, 观测水位-时间响应数据, 与标准曲线拟合确定钻孔附近水文地质参数。自1951年Hvorslev率先将微水试验应用于水文地质参数的现场测量以来, 各国学者对微水试验进行了大量的研究, 其应用范围也已从最初的孔隙介质扩展到裂隙与岩溶介质。

裂隙与岩溶介质在空间分布上的非均质性与各向异性是其区别于孔隙介质的最大特点。因此在裂隙与岩溶介质

收稿日期: 2013-11-12 修回日期: 2014-03-06 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 北京岩溶水资源勘查评价工程(专题类第一项: 数值模拟)(BJYRS-ZT-01-01)

作者简介: 李星宇(1990), 女, 山东滕州人, 主要从事地下水科学与工程方面研究。E-mail: farcome@163.com

通讯作者: 邵景力(1959), 男, 山东滕州人, 教授, 主要从事水文地质专业教学与科研工作。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

的微水试验研究过程中,需要解决两方面问题:一是适用性理论模型的推导,原因是传统的微水试验理论模型均建立在均质、同性、连续的孔隙介质基础之上,并不适合裂隙介质;二是对试验影响因素的准确分析,因为裂隙与岩溶介质微水试验结果影响因素较复杂,除了试验井孔结构与成井过程之外,还包括试验段裂隙走向、发育规模等因素。

建立微水试验理论模型的基础是模型概化。国外一些学者经过深入研究,提出了两种模型概化方法:一是等效孔隙介质模型,即对于裂隙率(溶隙率)高且裂隙(溶隙)与周围岩体没有水量交换的介质,可以等效为单孔隙介质,采用传统方法进行分析;二是替代模型,包括离散裂隙模型^[2]与双重介质模型^[3]。离散裂隙模型适用于裂隙率(溶隙率)低且裂隙(溶隙)与岩体没有水量交换的情况,双重介质模型则用于导水裂隙(溶隙)密度相对偏高且裂隙(溶隙)与岩体存在水量交换的介质。然而,Butler Jr^[4]与Lee^[5]指出,替代模型计算中所需要的一系列水文地质参数具有相关性,很难独立获得,并且不同的参数组合可以得到相近的试验结果,导致替代模型方法在实际运用上存在一定困难。由此,尽管裂隙与岩溶介质存在有一定的非均质性,在实践中,基于均质模型假设的方法仍然得到较广泛的应用。

近几年来,国外在裂隙与岩溶介质微水试验研究方面取得了一定的进展:Olivier Audouin等^[6]提出了基于均质假设的裂隙岩溶半解析解模型,选择代表性水文地质参数进行参数灵敏度分析;Cheng等^[7]运用三维有限元模型(FEHM)研究非均质裂隙发育对低渗透性含水层微水试验结果的影响;Quinn等^[8]开发了一套裂隙介质钻孔微水试验测试系统(versatile straddle packer),并进行了误差分析。在我国台湾地区,以陈家洵等^[9]为代表的一些学者,对含水层非均质性多级次微水试验的实现进行研究并取得了一定成果。而在我国大陆地区,微水试验的应用研究起步较晚,至今尚没有完善的操作程序和评价标准,有关微水试验特别是裂隙与岩溶含水层中的应用研究成果较少见到。本文选取北京市大兴隐伏岩溶裂隙发育区进行微水试验,计算试验所得目标层渗透系数并与传统抽水试验结果进行对比,为下一步微水试验研究的开展提供一定参考。

1 理论模型

根据已有钻孔资料及井下电视解译结果,研究区奥陶系灰岩含水层岩溶裂隙发育较均匀,符合我国北方岩溶的一般特点,故本次微水试验研究选取了基于均质假设的Kipp模型与CBP模型。Kipp模型与CBP模型均可用于承压完整井微水试验水文地质参数的求取。除此之外,Kipp模型在贮水系数较小渗透性较大的潜水含水层中也同样适用。

1.1 Kipp模型

Kipp基于含水层中地下水的非稳定流控制方程和井中水与含水层中地下水的动量平衡方程,导出了井中水位变化的微分方程,即振荡方程^[10]。Kipp模型的假设条件如下:含水层等厚,上顶板与下部边界隔水;含水层均质各向同性,压缩性一致;柱坐标系的原点为含水层顶面与井孔轴线的交点;完整井,含水层全厚度下花管;井孔100%有效;通过井

断面的平均速度可以近似认为不变;水头的摩擦损耗忽略不计;水流均匀分布于整个含水层系统;井孔中水流由径向流变为垂直流时,速度变化所引起的动量变化忽略不计。

运用Laplace变换求解水流振荡微分方程,得到一组标准曲线。通过实测曲线与标准曲线配线,确定标准曲线上的 ζ (阻尼系数)、 α (无量纲储水系数)值,在标准曲线上选取一匹配点,记录相应的 w' 和 t 以及实测曲线记录井水位变化值 w 与时间 t ,则贮水系数 S 、导水系数 T 以及渗透系数 K 为:

$$S = (r_c^2)/(2\alpha r_s^2) \quad (1)$$

$$L_e = (t/t')^2 g \quad (2)$$

$$\beta = [(\alpha \ln \beta)/8\zeta]^2 \quad (3)$$

$$T = [(\beta g)/L_e J^{1/2} r_s^2 S] \quad (4)$$

$$K = T/b \quad (5)$$

式中: L_e 为有效水柱长度; b 为含水层厚度; r_c 为套管半径; r_s 为过滤器半径; g 为重力加速度; β 为无量纲时间参数。

1.2 CBP模型

CBP模型是Cooper等于1967年提出的基于传导方程确定含水层参数的微水试验模型^[11]。其基本假定为:承压含水层均质、各向同性;含水层等厚、无限延伸;承压井为完整井;基准面取在含水层初始水头面上。

在实际运用中,测得静止水位之后,瞬时向试验井中注入(抽取)一定体积水 V ,观测不同时刻水位变化值 w ,取起始时刻最大水位变化值 w_0 ,做 $w/w_0 \sim t$ 曲线,与标准曲线($w'/w'_0 \sim \beta$)进行拟合,选择 $\beta=1$ 作为匹配点,记录实测曲线对应的时间及相应标准曲线 α 值,则可得导水系数 T 与贮水系数 S :

$$T = \frac{\beta r_c^2}{t} \quad (6)$$

$$S = \frac{\alpha r_c^2}{r_s^2} \quad (7)$$

式中: r_c 为井孔水位升降段的套管半径; r_s 为井孔工作段半径或过滤器半径; β 为无量纲时间参数; α 为无量纲储水系数。

2 试验条件及试验方法

2.1 试验条件

本次研究开展微水试验的目标含水层为北京市大兴区奥陶系灰岩岩溶裂隙含水岩组。该含水岩组直接隐伏在厚约60~90m的新生界第四系之下,平均岩层厚度为400m,岩性以白云质灰岩为主,夹有灰岩、白云岩,水平裂隙岩溶发育。奥陶系岩溶裂隙含水层单位涌水量为42.11~282.86 m³/(d·m),为北京市大兴区及通州区水源地主要供水层之一^[12-14]。

根据场地限制条件以及实地调查结果,共选取了3眼生产井作为试验井,其井孔分布位置、井身结构及参数分别见图1、图2、表1。

2.2 试验方法

微水试验方法的选择主要由试验井井身条件与场地条件决定。由图2可知,本次研究选取的试验井取水段均在奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层中,而且取水段较长(48.84~400.00m),可概化为承压完整井。本研究采用了三种试验方法分别针对3眼试验井(S1、S2、S3)进行测试,即利用水

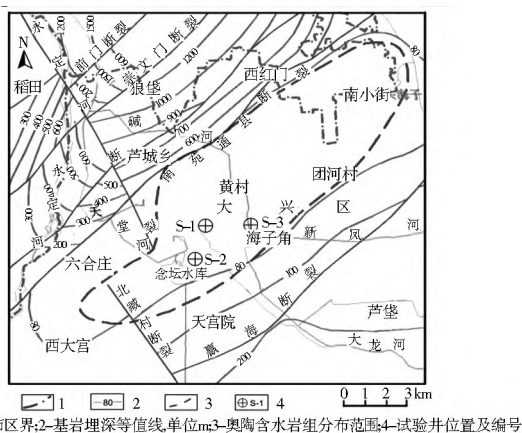


图 1 试验井分布位置

Fig. 1 Schematic diagram of distribution of test wells

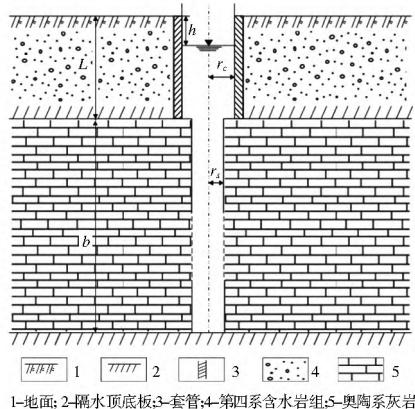


图 2 试验井井身结构

Fig. 2 Schematic diagram of test well structure

表 1 试验井结构参数

Table 1 Parameters of test well structure

试验# 编号	r_c/m	r_s/m	b/m	L/m	H/m
S 1	0.170	0.128	400.00	80.00	38.40
S 2	0.170	0.128	400.00	80.00	37.00
S 3	0.175	0.076	48.840	75.00	38.26

注:表中各参数含义同图 2。

位自动监测装置记录停泵水位恢复法(S 1)、HSZK 振荡试验法(S 2)与注水试验法(S 1)。选用基于均质概化的 Kipp 模型与 CBP 模型对试验数据进行分析。

2.2.1 利用水位自动监测装置记录停泵水位恢复法

试验井 S 1 位于研究区一水厂内,配有水位自动监测装置,可以实时显示并记录井内水位埋深值变化(图 3)。试验操作流程如下:首先关闭抽水泵,观察数据显示面板,直至水位埋深恢复至一稳定值(本试验测定为 -36.33 m),静置十分钟;打开抽水泵,井内水位出现一定降深(-38.40 m),迅速关泵,即瞬时抽取一定体积水量;观察记录停泵后水位恢复变化,直至达稳定状态(-36.36 m)。

利用水位自动监测装置记录停泵水位恢复法可充分利用现有设备,无额外经济成本;通过水泵实现快速抽水,试验周期短,操作简单,数据采集方便。

2.2.2 HSZK 振荡试验法

本文采用河海大学土木工程学院基于单井内水流运动

振荡原理开发的岩土体渗透性参数现场快速测试系统^[15-16](HSZK, 专利申请号 CN 200820030980. X) 对试验井 S 2 进行测试。测试系统由水头激发系统、传感器系统和数据采集系统组成,见图 4。HSZK 振荡试验采用压气式方法,在试验前要求将试验井与气密装置进行密封,通过空气压缩泵将试验井水位加压至选定深度,停止加压,关闭进气阀并迅速打开空气释放阀激发振荡,通过传感器采集数据直至恢复到静态水位。

HSZK 振荡试验完成一次测试不超过 10 min,设备便携,采集数据准确,可以实现经济、快速、高效的现场测试,但试验必须在密封条件下完成,要求试验井符合密封条件。

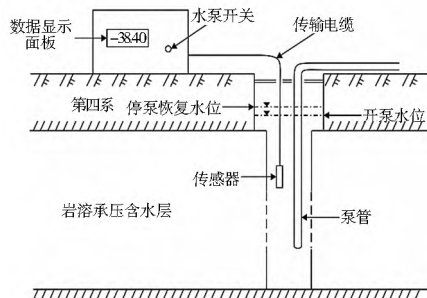


图 3 水位自动监测装置

Fig. 3 Schematic diagram of auto monitoring system of water level

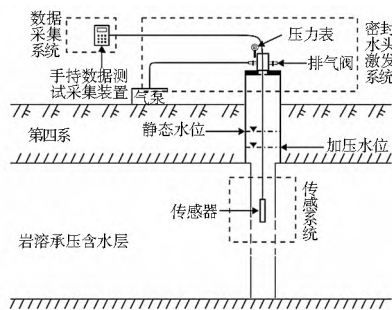


图 4 HSZK 振荡试验测试系统

Fig. 4 Schematic diagram of HSZK oscillation system

2.2.3 注水试验法

试验井 S 3 为奥陶系含水层地下水位监测井,含水层厚度较薄,在这里选用传统的注水试验法。试验一次性注入水量 48 L,采用传感器进行数据采集。

3 结果分析

3.1 试验结果

对于 3 眼试验井得到的数据,均使用 Kipp 模型与 CBP 模型进行配线,其中前一模型对于水位自动监测装置记录停泵水位恢复法与 HSZK 振荡试验法所得试验数据的拟合效果较好见图 5-图 6,而后一模型对于注水试验法所得数据的拟合效果较好见图 7。根据配线结果计算得到本次微水试验结果,见表 2。

3.2 分析与讨论

3.2.1 微水试验与抽水试验结果对比分析

根据收集到的研究区已有水文地质勘察报告,该区奥陶系含水岩组历史抽水试验所得导水系数(T)为 $7\ 722\ m^2/d$,

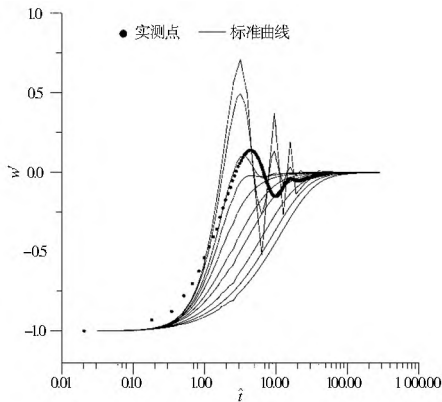


图5 水位自动监测装置记录停泵水位恢复法 Kipp 模型标准曲线拟合

Fig. 5 Fitting curve of the pump off water level recovery method recorded by auto monitoring system based on Kipp model

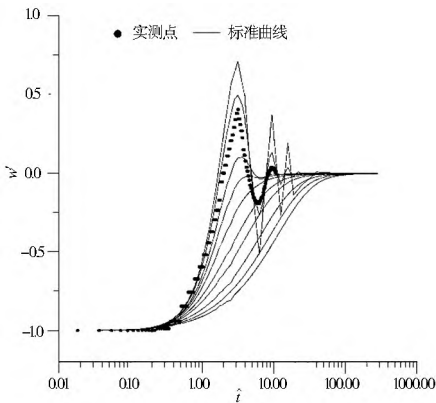


图6 HSZK 振荡试验法 Kipp 模型标准曲线拟合
Fig. 6 Fitting curve of HSZK oscillation method based on Kipp model

渗透系数(K)为 15.48 m/d。除了运用水位自动监测装置记录停泵水位恢复法计算所得渗透系数(3.81 m/d)差别较大

表2 微水试验结果

Table 2 Slug test results

# 编号	试验方法	ζ	α	β	w'	γ	w	t/s	$T/(m^2 \cdot d^{-1})$	$K/(m \cdot d^{-1})$
S 1	停泵法	0.5	49 940	10^{11}	0.00	2.6	0.00	13.5	1 523	3.81
S 2	HSZK 法	0.2	19 976	10^{11}	-0.52	1.0	-0.55	5.6	3 529	8.82
S 3	注水法	/	$1e5$	1	/	/	/	6.6	400.91	8.21

另外,国内外学者普遍认为,在钻探成井过程中由于对井壁周围岩土体的扰动而在一定程度上破坏了井孔周围含水层的性质,导致其渗透系数发生变化,称为皮肤效应^[18]。可见,除试验影响半径不同以外,皮肤效应也是导致微水试验与抽水试验结果存在一定误差的原因之一。

目前,大多数微水试验理论模型均没有考虑皮肤效应,致使试验结果与实际地层参数相比存在一定误差,虽然也有学者提出了一些基于皮肤效应的计算模型,但由于其模型假设条件很难满足而难以应用于生产实践当中。通用的解决办法为在成井钻探过程中尽量减少对周围岩体的扰动并充分洗井,将皮肤效应降到最低。

3.2.2 试验方法选择与注意事项

除了本次研究中运用的方法以外,常见的微水试验方法还有沉入重物法、栓塞试验法等。所有方法的共同特点是要

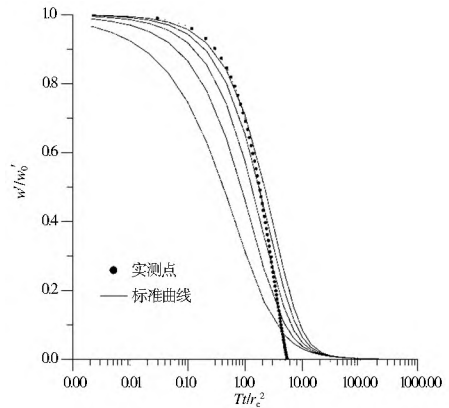


图7 注水试验法标准曲线 CBP 模型拟合

Fig. 7 Fitting curve of injection test based on CBP model

外,微水试验结果大致为传统抽水试验结果的 1/2。

造成这种差异的原因主要为两种试验方法的影响半径不同。在岩溶裂隙发育条件相同的情况下,微水试验的试验水位差小、试验历时短,其影响半径较小,一般在 10 m 左右^[17];而抽水试验的试验降深大,影响范围也大,且随着抽水的持续进行,可能激发含水层的越流补给,导致其测试所得渗透系数偏大。另一方面,微水试验结果反映的是试验孔周围局部岩土体的渗透性,因此其对于含水层非均质性研究以及水文地质参数分区细化具有十分重要的意义,同时也适用于分布范围小、没有大型补给源或者渗透系数很小难以实现抽水试验的岩体;而抽水试验结果代表的是含水层渗透性的平均值,反映了含水层在特定抽水量下的综合给水能力与持续供水能力。可见,微水试验更能准确反映试验点处岩土体的渗透性。

此外,3 眼试验井数据得到的试验结果为同一个数量级,但渗透系数大小不同,反映了目标层岩溶裂隙发育在空间分布上的非均质性。

尽量实现井内水位变化瞬时反应的效果,避免产生额外的水头扰动,同时有效采集水头变化值。各试验方法特点及适用性见表 3。

对于裂隙与岩溶介质,在进行微水试验之前要充分调查试验井裂隙发育情况、井身结构设计与取水段位置,对目标含水层渗透系数范围有一个大致的把握,综合确定试验方法。尤其要注意有无大型裂隙(岩溶通道)的发育,对于裂隙发育不均匀的情况,以及需要重点研究的取水段,可以运用栓塞分段试验法,获得试验井不同位置的渗透系数值。

4 结语

本文利用水位自动监测装置记录停泵水位恢复法、HSZK 振荡试验法与注水试验法进行微水试验,获得岩溶裂隙含水层渗透系数值约为传统抽水试验结果的 1/2,在一定

表 3 试验方法对比

Table 3 Comparison of different test methods

试验方法	方法特点
沉入重物法	操作简便,不需要复杂的仪器设备。容易对试验早期水头数据产生一定扰动,尤其对于渗透性较高的含水层,扰动影响较大,同时可能对试验井水质产生一定污染。
快速抽/注水法	可以通过抽取/注入水量计算出井内水位最大变化值。但是较难达到水位的瞬时变化,同时可能产生额外的水压效应,采用注水方法时要注意避免污染的引入。
压气式方法	可以实现井孔内水位的快速变化,不会造成污染,便于重复试验。要求试验井密封条件良好,并且对于渗透性较差的含水层,井内水位恢复到初始水平历时较长。
栓塞试验法	通过栓塞的隔离,可以获得特点取水段的参数值,缩短试验时间。需要的设备和仪器较多,操作相对复杂。
利用水位自动监测装置停泵法	可以依托已有的生产井实现微水试验的网络化布置,要求在水位自动监测及实时显示装置配备齐全的基础上进行。

程度上体现了试验点处岩溶裂隙含水层渗透系数的大小及其空间变化情况。其中水位自动监测装置记录停泵水位恢复法有效地利用了现有生产井布井条件,为微水试验的应用提供了新的思路,也为本区域隐伏岩溶发育非均质性调查研究提供了一定参考。

微水试验方法灵活、操作简单、能耗低、周期短,可以实现裂隙和岩溶介质渗透性的快速测试,同时由于其影响半径的限制及易受皮肤效应的影响而与抽水试验结果存在一定误差,在今后的工作中,应进一步加强理论模型特别是裂隙与岩溶介质模型的研究,扩大其适用范围。

参考文献(References):

- [1] Wang J S Y, Narasimhan T N, Tsang C F, et al. A Transient Flow in Tight Fractures, in Proc. Invitational Well Testing Symp[J]. Lawrence Berkeley Lab, 1977: 103.
- [2] Karasaki K, Long J C S, Witherspoon P A. Analytical Models of Slug Tests[J]. Water Resour. Res., 1988, 24(1): 115.
- [3] Moench A F. Double porosity Models for a Fractured Groundwater Reservoir with Fracture Skin[J]. Water Resour. Res., 1984, 20(7): 831.
- [4] Butler Jr J J. The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests[J]. Lewis Publishers, 1997: 252.
- [5] Lee J Y, K K Lee. Analysis of the Quality of Parameter Estimates from Repeated Pumping and Slug Tests in a Fractured Porous Aquifer System in Wonju, Korea[J]. Ground Water, 1999, 37(5): 699-700.
- [6] Olivier Audouin, Jacques Bodin. Cross borehole Slug Test Analysis in a Fractured Limestone Aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2008(10): 510-523.
- [7] Cheng J T, Everett M E. Finite Element Modeling of Slug Tests in an Aquifer with Stratigraphical and Structural Heterogeneities[J]. Geofluids, 2009(9): 49-62.
- [8] Quinn P, Cherry JA, Parker BL. Hydraulic Testing Using a Versatile Straddle Packer System for Improved Transmissivity Estimation in Fractured rock Boreholes[J]. Hydrogeology Journal, 2012(20): 1529-1547.
- [9] Chen CS, Sie YC, Lin YT. A Review of the Multilevel Slug Test for Characterizing Aquifer Heterogeneity[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2012(23): 131-143.
- [10] Kipp Jr, Kenneth L. Type Curve Analysis of Inertial Effects in the Response of a Well to a Slug Test [J]. Water Resources Research, 1985, 21(9): 1397-1408.
- [11] Cooper Jr HH, Bredehoeft JD, Papadopoulos IS. Response of a Finite Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water [J]. Water Resources Research, 1967, 3(1): 263-269.
- [12] 北京市大兴县念坛水源地供水水文地质详查报告[R]. 北京市水文地质工程地质大队, 1993. (Detailed Report on Water supply Hydrogeology in Niantan Water Source, Daxing, Beijing[R]. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, 1993. (in Chinese))
- [13] 北京市大兴区隐伏基岩地下水普查[R]. 北京市水文地质工程地质大队, 1997. (Survey of Groundwater in Concealed Rock, Daxing, Beijing[R]. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, 1997. (in Chinese))
- [14] 北京市东南城郊隐伏基岩供水水文地质调查评价报告[R]. 北京市水文地质工程地质大队, 2001. (Evaluation Report on Water supply Hydrogeology of Concealed Rock in Southeast Suburb, Beijing[R]. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, 2001. (in Chinese))
- [15] 周志芳, 王仲夏, 曾新翔, 等. 岩土体渗透性参数现场快速测试系统开发[J]. 岩石力学与工程学报. 2008, 27(6): 1292-1296. (ZHOU Zhifang, WANG Zhongxia, ZENG Xuxiang, et al. Development of Rapid Field Test System for Determining Permeable Parameters of Rock and Soil Masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2008, 27(6): 1292-1296. (in Chinese))
- [16] 徐海洋, 周志芳. 岩土体渗透性参数现场快速测试系统应用[J]. 勘察科学技术. 2011, (5): 26-29. (XU Haiyang, ZHOU Zhifang. Application on Rapid Field Test System in Permeable Parameters of Rock and Soil Masses[J]. Site Investigation Science and Technology, 2011, (5): 26-29. (in Chinese))
- [17] 陈则连, 原国红, 赵丙君. 微水试验技术的应用研究[J]. 工程勘察, 2009, (7): 31-34. (CHEN Zerlian, YUAN Guohong, ZHAO Bingjun. A Study on Application of Slug Test[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, (7): 31-34. (in Chinese))
- [18] Faust C R, Merceer J W. Evaluation of Slug Tests in Wells Containing a Finite thickness Skin[J]. Water Resources Research, 1984, 20(4): 504-506.