

Application of Slug-Water Test Based on Hvorslev and CBP Model

Guo Mao

Beijing Oriental New Star Petrochemical Engineering Co., Ltd., Beijing
Email: 305460436@qq.com

Received: Aug. 30th, 2018; accepted: Sep. 19th, 2018; published: Sep. 26th, 2018

Abstract

Combined with a project example, the slug-water test is carried out in the low-permeability stratum, and the test results are compared with the traditional packer permeability test results. The results show that the slug-water test results are larger than the packer permeability test. The method is affected by temperature, pore storage effect and skin effect, and the required parameters can only reflect the permeability of the aquifer in the limited radius near the borehole. However, the slug-water test method has the advantages of short test period, low cost, simple equipment, stratified test and no pollution. It has a good prospect in engineering survey.

Keywords

Slug-Water Test, CBP Model, Hvorslev Model, Pressure Water Test, Permeability Coefficient

基于Hvorslev和CBP模型的微水试验应用

毛 果

北京东方新星石化工程股份有限公司, 北京
Email: 305460436@qq.com

收稿日期: 2018年8月30日; 录用日期: 2018年9月19日; 发布日期: 2018年9月26日

摘 要

结合某工程实例, 在低渗透地层开展微水试验, 并将试验结果与传统的压水试验结果对比, 分析表明微水试验结果较压水试验结果偏大, 该方法受温度效应、钻孔储存效应以及皮肤效应影响较大, 且所求参数仅能反映钻孔附近有限半径范围内含水层的渗透特性。但由于微水试验法具有试验周期短、成本低、设备简单、分层测试、无污染的特点, 在工程勘察中具有良好的运用前景。

关键词

微水试验, CBP模型, Hvorslev模型, 压水试验, 渗透系数

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微水试验是通过瞬间井孔内微小水量的增加(减少)而引起井孔水位随时间变化规律确定含水层水文地质参数的一种简易方法。有多种方式可以实现瞬间井孔内微小水量的增加(减少),如瞬间抽水、瞬间注水、固体棒瞬间落入井水中或从井水中取出、密闭井孔中充(吸)气(气压式)等,而气压式能真正意义上实现井孔内微小水量“瞬时”变化[1] [2] [3]。具有操作方便、试验时间短及对含水层扰动性低等优点,在国外已被广泛应用。该试验方法的适用性及精确性已经过外国学者多年的实际经验验证,但国内的实际应用仍然较少[4]。

该方法多见用于浅层孔隙介质中,在深层裂隙介质中的研究应用却较少见到。相对于疏松的孔隙含水层而言,裂隙岩体具有高度的非均质性和较低的渗透性,如何在低渗透性的裂隙介质中开展微水试验求算不同深度的渗透参数是一个值得探究的问题。同一次微水试验得到的水位随时间变化的数据可以基于不同的水流运动模型确定含水层参数[5] [6] [7]。国外一些学者对微水试验进行了研究,根据不同的水流运动模型提出了不同的控制方程,主要有传导方程和震荡方程两种,基于水流运动振荡方程的 Kipp 模型又称为震荡试验法,而基于水流运动传导方程的 CBP 模型就是狭义上的微水试验法, Hvorslev 针对承压完整和非完整井的过阻尼微水试验提出一种半解析的方法,这几种模型在工程实践中用以求取地层水文地质参数得到广泛应用。

根据前人的工程实际经验,在渗透系数相对较低的含水层中(以 $K < 5 \times 10^{-4}$ m/s 为界),微水试验数据呈现非振荡特征,因此,在裂隙介质中开展微水试验时,可采用 CBP 模型及 Hvorslev 模型推算裂隙岩体渗透参数。本文采用这两种模型分别计算裂隙含水层的渗透系数与贮水率,并且与双塞压水试验法所获取的实验结果对比。通过传统单一模型计算出来地层参数无法得到印证,采用 CBP 模型及 Hvorslev 模型与压水试验对比,可得到 CBP 模型及 Hvorslev 模型应用于裂隙介质所取得的地层参数较实际地层参数差距,为在裂隙介质中展开微水试验求参提供工程经验。

2. 原理简介

2.1. CBP 模型基本原理

CBP 模型是基于传导方程确定含水层参数的微水试验模型[8],模型基本假定:承压含水层是均质、各向同性;含水层等厚、无限延伸;承压井为完整井;在井孔工作段的井壁上或滤管的壁面上,任何時候含水层中的水头与井中水位度都是相等的;基准面取在含水层初始水头而上;通过试验井壁流入含水层的流量等于井中水体减少的速率(图 1)。在上述假设条件下,可以得到井流问题的数学模型:

1) 水流运动方程

$$\alpha \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (1)$$

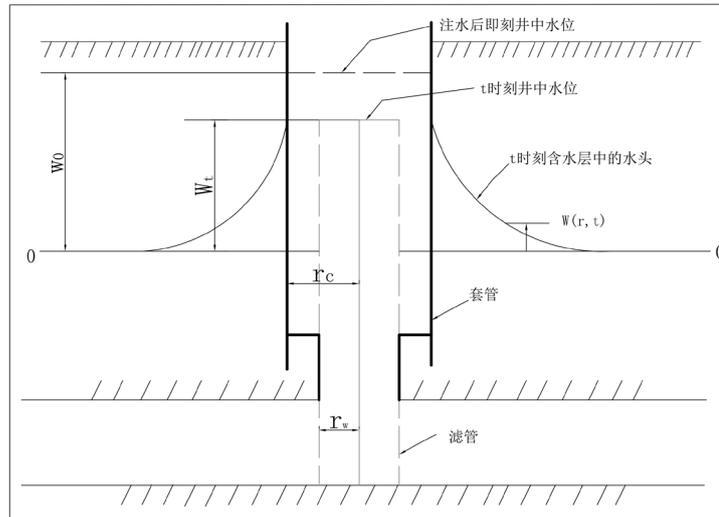


Figure 1. Schematic diagram of the CBP model
图 1. CBP 模型示意图

初始条件: $\omega(r, 0) = \omega_0$

边界条件: $\omega(0) = \omega_0; \omega(\infty, t) = 0; \omega(r_w, t) = \omega(t);$

$$2\pi r_w T \frac{\partial \omega(r_w, t)}{\partial t} = \pi r_c^2 \frac{\partial \omega(t)}{\partial t}$$

2) Cooper 等(1967)导出水头变化关系式:

$$\omega = \omega_0 F(\alpha, \beta)$$

其中, $\alpha = \frac{r_w^2 S}{r_c^2}; \beta = \frac{Tt}{r_c^2}; \omega_0 = \frac{V}{\pi r_c^2};$

$$F(\alpha, \beta) = \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp(-\beta u^2 / \alpha)}{u f(u, \alpha)} du \quad (2)$$

而: $u = \frac{r^2 S}{4Tt}; f(u, \alpha) = [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2uY_1(u)]^2$

实际工作中, 先测含水层天然静止水位值后再进行微水试验, 瞬时向井中注入或抽取一定量的水体积 V , 在试验段放入压力探头, 测不同时刻试验井中的水位变化值(与初值相比), 其中起始时刻水位变化最大值为 ω_0 , 将 $\omega/\omega_0 \sim t$ 记录在半对数纸上, t 轴取对数, 在半对数纸上作 $\omega'/\omega_0' \sim Tt/r_c^2 (\beta)$ 标准曲线, $\beta = Tt/r_c^2$ 取对数坐标, 将实测曲线与标准曲线进行拟合, 选择一个匹配点, 使这个点在标准曲线上的数值 $\frac{Tt}{r_c^2} = 1$, 记录 $\omega/\omega_0 \sim t$ 曲线这点对应 t 的时间, 同时记录相应标准曲线的 α 值, 则可以求得这些水文地质参数。

$$T = \frac{\beta r_c^2}{t}; S = \frac{\alpha r_c^2}{r_w^2}$$

其中, ω : 瞬时抽(注)水之后, t 时刻井中水位变化值; ω_0 瞬时抽(注)水体积 V 之后, 即起始时刻水位变化最大值; r_w : 井孔工作段半径或过滤花管半径; r_c : 井孔水位升降段的套管半径; S : 贮水系数; T : 导水系数; J_0 和 J_1 为零阶和一阶第一类贝塞尔函数; Y_0 和 Y_1 为零阶和一阶第二类贝塞尔函数。

2.2. Hvorslev 模型原理

Hvorslev 在 1951 年通过大量试验后发现井内水位迅速变化后水位恢复的速度和时间成指数关系, 水位恢复的时间与地层的渗透系数有关, 恢复速率与井孔的结构有关。在此基础上, Hvorslev 针对承压完整和非完整井的过阻尼微水试验提出一种半解析的方法[4]。

针对承压含水层中的地下水, Hvorslev 发现当井孔中的地下水位瞬时改变后, 流出或流进井孔的水流量与井孔附近含水层渗透系数之间的关系可表示为:

$$q(t) = \pi r_c^2 \frac{dy}{dt} = FK_c (h_0 - y) \quad (3)$$

式中 r_c 套管半径;

F : 形状因子, 取决于井孔滤水管形状和位置;

K_c : 影响半径内的含水层水平渗透系数;

h_0 : $t = 0$ 时静止水位到井孔水位间的距离;

y : 试验过程井孔水位的变化量;

$h_0 - y$: 试验过程中静止水位到井孔水位间的距离。

对(1)式分离变量, 得

$$\frac{\pi r_c^2}{FK_c} \frac{dy}{h_0 - y} = dt \quad (4)$$

对(2)式定积分

$$-\frac{\pi r_c^2}{FK_c} \ln(h_0 - y) \Big|_0^t = t \Rightarrow -\frac{\pi r_c^2}{FK_c (\ln(h_t) - \ln(h_0))} = t \Rightarrow -\frac{\pi r_c^2}{FK_c} \ln \frac{h_t}{h_0} = t$$

因此:

$$\ln \frac{h_t}{h_0} = -\frac{FK_c}{\pi r_c^2} t \quad (5)$$

从式(3)可以看出一个重要的特点: $\ln(h_t/h_0) \sim t$ 呈直线关系, 可通过计算直线的斜率求水平渗透系数。因为试验起点 $t = 0$ 时, $\ln(h_t/h_0) = 0$, 而当 $\ln(h_t/h_0) = 0.368$ 时, $\ln(h_t/h_0) \approx -1$, 此时对应的时间定义为基本时间间隔 T_L , 所以直线斜率为 $-1/T_L$ 。

此时式(3)可变为:

$$-\frac{FK_c}{\pi r_c^2} = -\frac{1}{T_L}$$

$$\text{水平渗透系数: } K_c = \frac{\pi r_c^2}{FT_L} \quad (6)$$

其中形状因子 F 根据试验段过滤管与含水层的相对位置可分为三种情况, 只要求得 F 就可以求的渗透系数。

CBP 模型以及 Hvorslev 模型均是针对承压含水层中开展的微水试验而提出, 在裂隙介质中, 试验段正好位于两隔水层之间的情况较难实现。在裂隙岩体中, 岩块的渗透性远小于裂隙网络, 地下水渗流主要在裂隙网络中进行, 应用双栓塞试验设备开展微水试验时, 钻孔内水流只能通过试验段花管进入含水层, 若试验段发育有裂隙而上下封塞段无裂隙发育, 则可将试验段概化为承压完整井; 若钻孔内某一段裂隙相对较发育, 试验长度小于裂隙发育段, 可将试验概化为承压非完整井。

双栓塞水文地质系统具有以下优点：能够获取裂隙岩体垂向上渗透参数的变化；能够直接测量试验段的压力，无需进行水头损失的折算；能通过三段压力特征判别双栓塞封隔效果和评价试验段与其他段水力联系特征；该系统通过了野外的反复检测，性能可靠。因此，该套设备在分层测定水文地质参数、分层抽水、分层取样以及分层地下水自动监测等方面具有广泛的用途。

3.3. 试验方法

研究区水平方向裂隙发育具有较强的非均质性，为研究水平不同分区裂隙岩体渗流特征，本次试验分别在裂隙微发育的 I 区和裂隙较发育的 II 区各选取一个钻孔进行，I 区选取钻孔 12，II 区选取钻孔 13。ZK12 进行了三段水文试验，试验段分别为 49~54 m、54~59 m、59~64 m，分别记为 12-1、12-2、12-3。ZK13 进行了两段水文试验，试段分别为 71~76 m、76~81 m，分别记为 13-1、13-2。

开始试验前需测量钻孔天然地下水水位，按照设计试验段长度连接双栓塞，下放试验设备前在地表检测双栓塞密封性并确保各仪器表能正常工作，检查无误后将试验设备下放在设计深度。试验设备下放后静置 10 min 左右，实时监测地下水水位，待水位恢复值初值后给双栓塞加压，观测栓塞压力表读数是否稳定，加压结束后静置数分钟，若栓塞压力值保持稳定即可开展试验。

微水试验要求在天然静止水位条件下，瞬时激发钻孔内水头变化(激发时间一般控制在 5 s 内)。本次微水试验采用瞬时注水的方式激发水头，通过调节离心泵功率控制激发时间，试验时打开压水离心泵，激发 3~5 s，之后迅速停泵，关闭进水阀门，三个压力传感器自动进行采集各段压力数据。在孔隙介质中开展微水试验，水位恢复一般仅需几十秒至几分钟，考虑裂隙介质渗透性较低，水头恢复时间可能较长，本次试验数据采集时间为 10~15 min，采集频率设定为 10 s/次。在钻孔 12 三个试验段分别进行了微水试验，注水量为 5.8 升、15.2 升、10 升，激发水头分别为 4.6 m、12.1 m 和 8.0 m；在钻孔 13 中进行了两段微水试验，注水量分别为 17.2 升和 13.1 升，激发水头分别为 13.68 m 和 10.46 m。

每一段微水试验结束后，打开进水阀门，使钻孔内地下水水位回落至初值，即可开始定压力压水试验。压水过程中保持离心泵以恒定功率注水，地表压力与流量采集器为北京东方新星石化工程股份有限公司研发的钻孔智能压水测试仪，该仪器能自动监测、实时显示压水试验全过程的地表压力及注水平均流量，数据灵敏度高，精确可信。压水过程中观测流量历时变化，压水时长 45 min~1 h，待注入流量基本趋于稳定时(流量变化量小于 0.1 L/min)停止试验。

3.4. 结果分析

在裂隙岩体中开展分段水文试验时，确保双栓塞成功将试验段封隔是分段试验成功与否的关键，因此，试验过程中栓塞封隔效果的评价十分重要。试验开始前需对双栓塞加压，加压过程三段压力历时曲线如图 3、图 4 所示。

钻孔 12 中，试验段与封隔上下段出现稳定的微小水头差，说明栓塞成功将试验进行封隔，试验段与上下段无水力联系；钻孔 13 中，试验段与下段压力保持稳定，上段水头持续上升，栓塞封隔压力为 3.5 Mpa 且保持稳定，排除栓塞漏水的可能性，推断原因为钻孔 13 裂隙较发育，在栓塞加压过程中，受栓塞挤压，孔壁附近裂隙水进入井筒，使得井筒中水位上升。加压结束后，试验段压力保持恒定且与上下段存在水头差，由此可判定栓塞封隔效果良好，在此条件下，可开展现场水文试验。

分别用 CBP 模型与 Hvorslev 模型对微水试验数据进行解析，CBP 模型标准曲线由 Matlab 编程绘制。试验过程三段压力历时曲线及配线图如图 5~图 19 所示，计算结果见表 1。

由微水试验压力历时曲线可以看出：钻孔 12 试验过程中，试验段压力随时间逐渐减小，上段和下段压力始终保持恒定，说明栓塞封隔效果良好，且三段之间没有裂隙连通，不存在水力联系；钻孔 13 试验

过程中, 只有下段压力保持恒定, 上段压力表现出上升趋势, 排除双栓塞未正常封隔的可能, 结合钻孔电视成像解译结果, 钻孔 13 内裂隙整体较发育, 试验上部压力上升说明岩体内试验段与试验上段存在导通裂隙, 使两段之间有一定的水力联系; 在裂隙岩体中开展微水试验时, 试验段水位恢复速率缓慢, 一般试验历时无法使水位完全恢复, 因此, 在低渗透性裂隙介质中开展微水试验时, 钻孔水位的瞬时改变量宜大而不宜小, 且应增大数据采集频率, 多获取前期水位数据用于推算渗透系数。

Table 1. List of micro water test data analysis results

表 1. 微水试验数据解析结果一览表

钻孔编号	试段范围	CBP 模型		Hvorslev 模型	压水试验(10^{-4} m/d)
		渗透系数(10^{-4} m/d)	贮水系数(10^{-4})	渗透系数(10^{-3} m/d)	
ZK12	12-1	0.532	0.177	1.83	10.4
	12-2	24.7	0.0177	79.6	54.7
	12-3	0.301	17.7	3.72	0.943
ZK13	13-1	0.691	1.77	3.71	20.5
	13-2	1.82	1.77	9.30	51.6

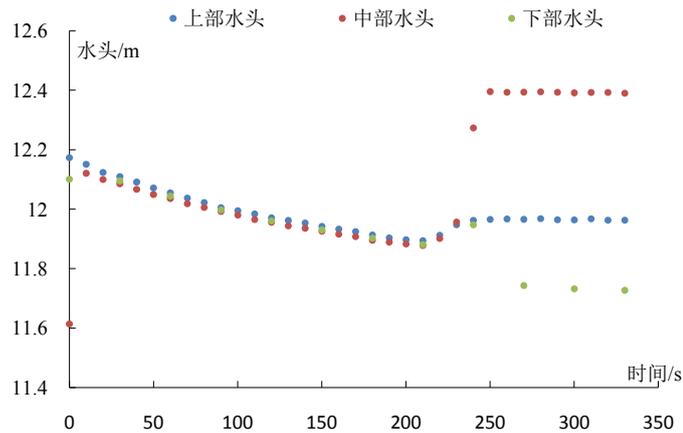


Figure 3. Pressure duration curve of borehole 12 compression process

图 3. 钻孔 12 栓塞加压过程压力历时曲线

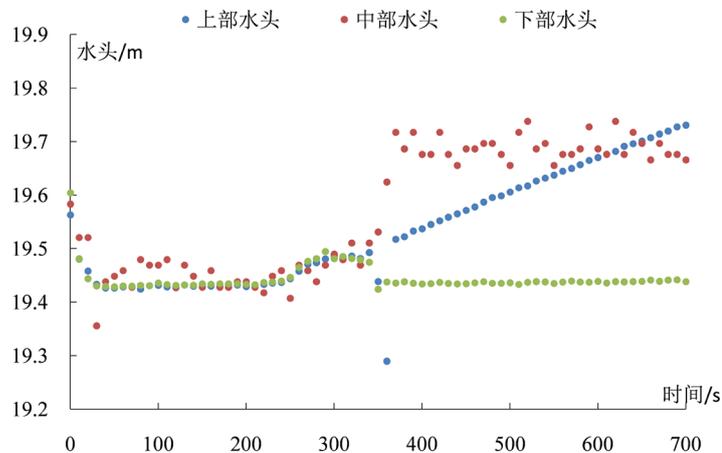


Figure 4. Pressure duration curve of bore 13 compression process

图 4. 钻孔 13 栓塞加压过程压力历时曲线

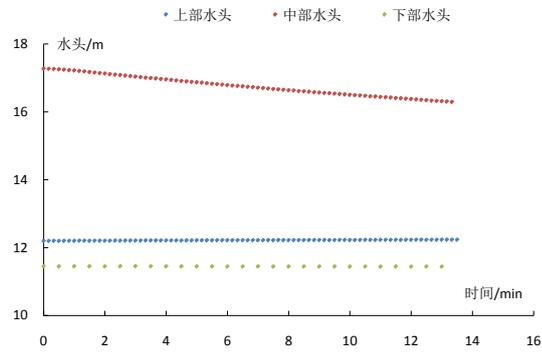


Figure 5. 12-1 micro-water test pressure duration curve
图 5. 12-1 段微水试验压力历时曲线图

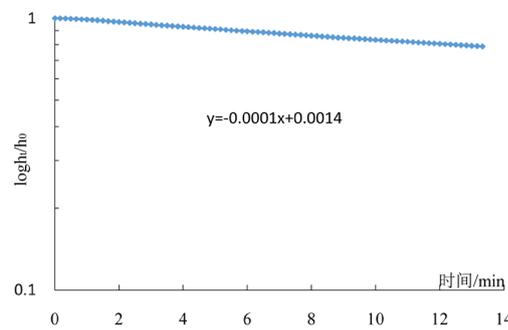


Figure 6. Straight-line fitting of the Hvorslev model in section 12-1
图 6. 12-1 段 Hvorslev 模型直线拟合图

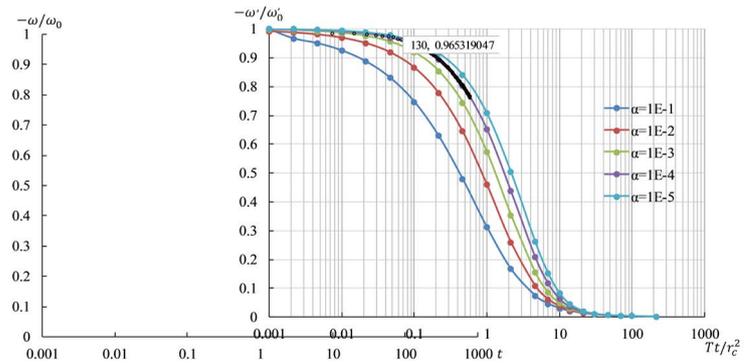


Figure 7. Figure 12-1 CBP model fitting curve
图 7. 12-1 段 CBP 模型拟合曲线图

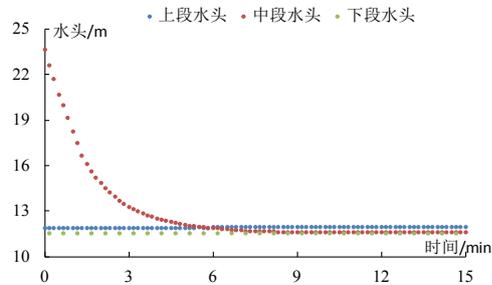


Figure 8. 12-2 micro-water test pressure duration curve
图 8. 12-2 段微水试验压力历时曲线图

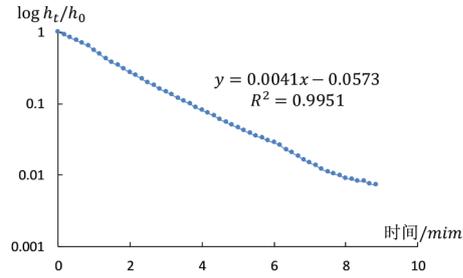


Figure 9. Straight-line fitting of the Hvorslev model in section 12-2
 图 9. 12-2 段 Hvorslev 模型直线拟合图

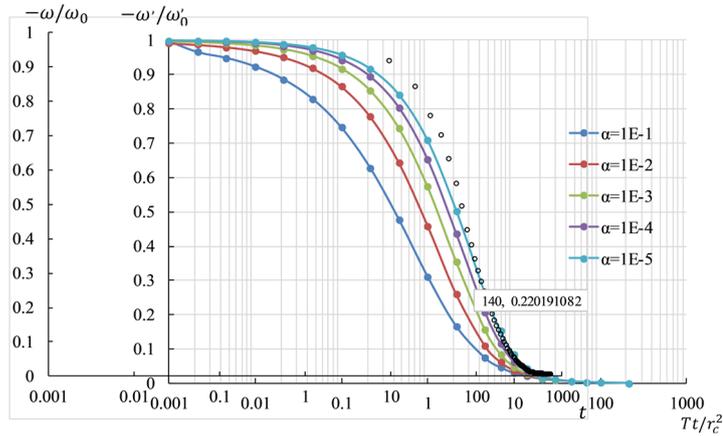


Figure 10. 12-2 CBP model fitting curve
 图 10. 12-2 段 CBP 模型拟合曲线图

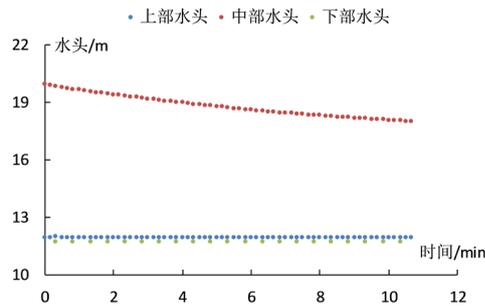


Figure 11. 12-3 micro-water test pressure duration curve
 图 11. 12-3 段微水试验压力历时曲线图

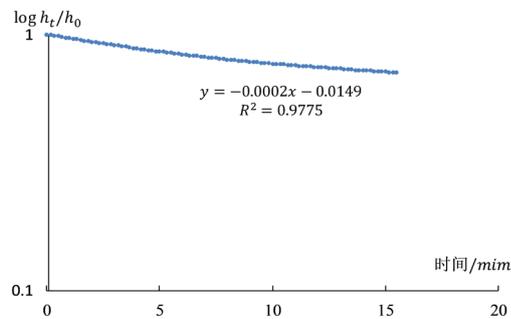


Figure 12. Straight-line fitting of the Hvorslev model in section 12-3
 图 12. 12-3 段 Hvorslev 模型直线拟合图

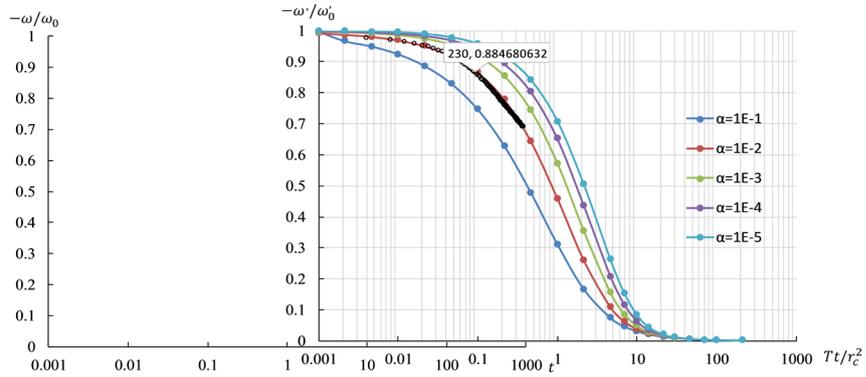


Figure 13. Figure 12-3 CBP model fitting curve
 图 13. 12-3 段 CBP 模型拟合曲线

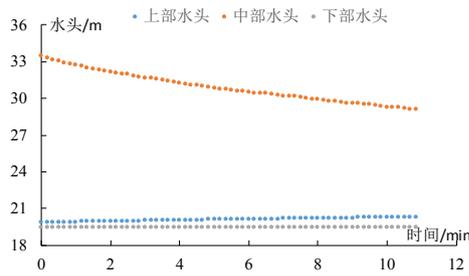


Figure 14. 13-1 micro-water test pressure duration curve
 图 14. 13-1 段微水试验压力历时曲线图

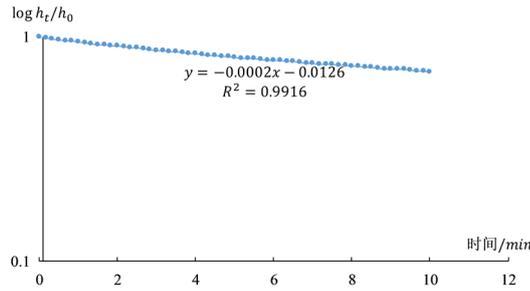


Figure 15. Straight-line fitting of the Hvorslev model in section 13-1
 图 15. 13-1 段 Hvorslev 模型直线拟合图

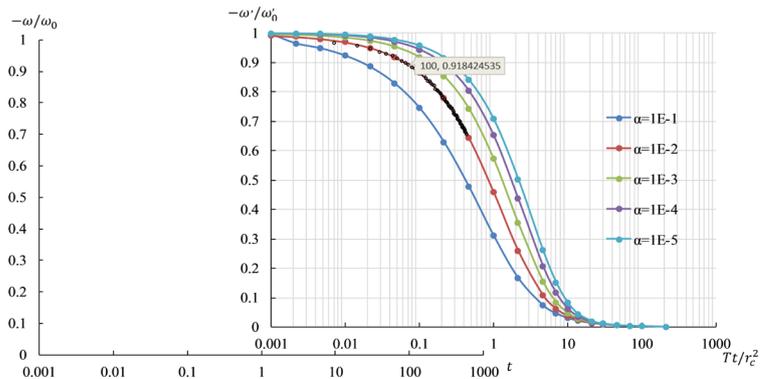


Figure 16. Figure 13-1 CBP model fitting curve
 图 16. 13-1 段 CBP 模型拟合曲线图

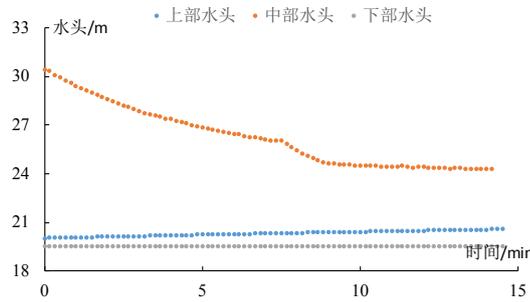


Figure 17. 13-2 micro-water test pressure duration curve
图 17. 13-2 段微水试验压力历时曲线图

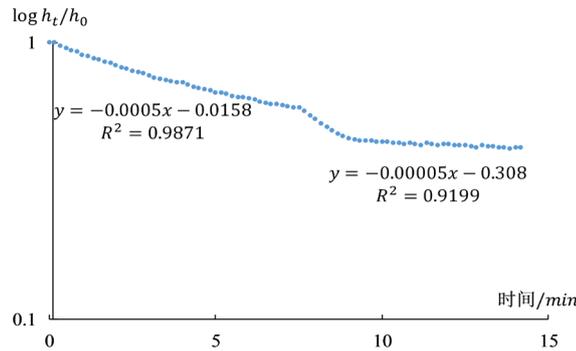


Figure 18. Straight-line fitting of the Hvorslev model in section 13-2
图 18. 13-2 段 Hvorslev 模型直线拟合图

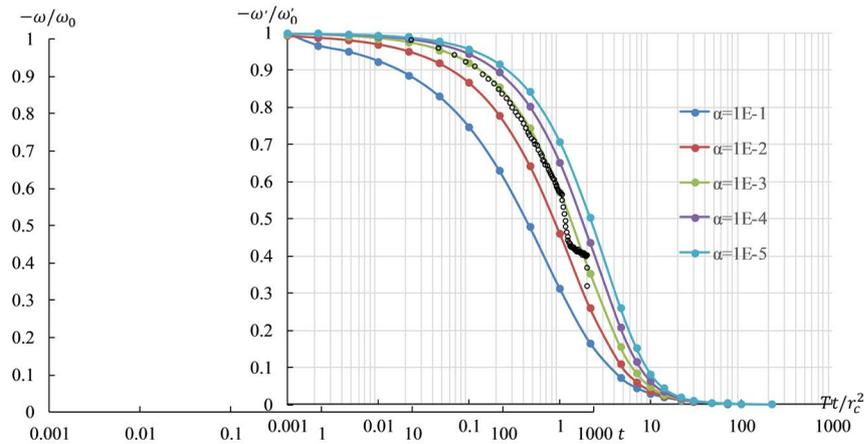


Figure 19. Figure 13-2 CBP model fitting curve
图 19. 13-2 段 CBP 模型拟合曲线图

由拟合曲线图及求参结果可以看出，CBP 模型曲线拟合效果较好，两种模型推算的渗透系数基本一致。Hvorslev 模型较简单，采用直线图解法求取参数，计算简便，但其忽略了含水介质弹性贮水效应，且影响半径为经验参数，因此求取参数具有一定的不确定性；CBP 模型采用标准曲线配线法求参，可以求算含水介质的贮水系数，但其标准曲线具有一定的相似性，曲线系数 α 对标准曲线的敏感性较差，其求得的含水层贮水系数精度不高。

对比同一试验段微水试验与常规压水试验求算渗透系数，微水试验求算结果为压水试验 3~45 倍，造成这种差异的原因主要有两点：① 两种试验方法影响范围不同。在试验段裂隙发育条件相同的情况下，

微水试验激发水位差小, 试验影响半径较小, 一般为 10 m 左右[9]; 定压力压水试验试段压力大, 压水时间长, 其影响范围也大。因此, 微水试验反映的是试验段钻孔附近局部岩体渗透特征, 压水试验是反映一定范围内试验段整体渗透特性。② 在钻探成井过程中, 井壁周围岩体遭受扰动在一定程度上破坏了井孔附近含水层性质, 导致其渗透特性发生变化, 这种现象称为皮肤效应, 微水试验受皮肤效应影响大而压水试验受影响较小。

4. 结论

1) 对于同一段微水试验数据, CBP 模型与 Hvorslev 模型求算的裂隙岩体渗透系数基本一致, 与压水试验所得岩体渗透系数相比, 结果偏大, 这是由于微水试验影响范围较小, 所求参数仅能反映钻孔附近有限范围内含水层的渗透特性, 但该方法操作方便、成本低且计算简单, 在快速定性获取裂隙介质中水文地质参数具有较好的应用前景。

2) 在低渗透性裂隙介质中开展微水试验时, 钻孔水位的瞬时改变量宜大而不宜小, 且应增大数据采集频率, 多获取前期水位数据用于推算渗透系数。

3) CBP 模型采用标准曲线配线法求参, 可以求算含水介质的贮水系数, 但其标准曲线具有一定的相似性, 曲线系数 α 对标准曲线的敏感性较差, 其求得的含水层贮水系数精度不高。

4) 与传统压水试验对比, 微水试验所求的渗透系数偏大, 微水试验反映的是试验段钻孔附近局部岩体渗透特征, 压水试验是反映一定范围内试验段整体渗透特性。

参考文献

- [1] McElwee, C.D. (2002) Improving the Analysis of Slug Tests. *Journal of Hydrology*, **269**, 122-133. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00214-7)
- [2] McElwee, C.D., Bohling, G.C. and Butler Jr., J.J. (1995) Sensitivity Analysis of Slug Tests. Part 1. The Slugged Well. *Journal of Hydrology*, **164**, 53-67. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02568-V](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02568-V)
- [3] McElwee, C.D., Butler Jr., J.J., Bohling, G.C. and Liu, W. (1995) Sensitivity Analysis of Slug Tests. Part 2. Observation Wells. *Journal of Hydrology*, **164**, 69-87. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02569-W](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02569-W)
- [4] 张昌新. 基于 Hvorslev 模型的微水试验应用[J]. 铁道勘察, 2016, 42(2): 16-20.
- [5] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1385-1388.
- [6] Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. (2002) Transport Phenomena. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [7] Kipp Jr., K.L. (1985) Type Curve Analysis of Inertial Effects in the Response of a Well to a Slug Test. *Water Resources Research*, **21**, 1397-1408. <https://doi.org/10.1029/WR021i009p01397>
- [8] Cooper Jr., H.H., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S. (1966) Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. *Water Resources Research*, **3**, 263-269.
- [9] 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, 37(7): 31-34.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org