

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.03.09

利用电导率测井与压水试验联合评价 岩体渗透性的方法

张必昌¹, 胡 成², 陈 刚², 张 脩¹, 段丹丹¹

(1. 山西省交通科技研发公司, 山西 太原 030006;

2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 进行地下水封洞库的水封条件分析评价必须获得准确可靠的建库岩体渗透性参数, 而获取岩体渗透系数常用的传统水文地质试验方法存在明显的不足。为了试验数据的精确性, 文章基于广义径向流 (GRF) 理论, 依托烟台某地下水封洞工程, 以丙烷洞库交通巷道钻孔为例, 开展压水试验并采用非稳定流理论的 GRF 模型优化解析试验数据, 结合电导率测井试验确定导水裂隙位置并求出裂隙范围内的渗透系数。试验结果表明: GRF 模型比稳定流模型解析结果大 1~2 倍。原因在于裂隙岩体进行分段压水时, 各段水流维度不一, 传统稳定流理论假设水流维度只有二维流, 而 GRF 模型为空间 n 维裂隙流用压水过程全部数据进行拟合, 不同时段在相应维度下进行计算, 因此其求算的渗透系数 K 更接近于试验段真值, 具有更好的兼容性和实用性。同时利用电导率测井试验计算长度 (导水裂隙范围) 远远小于压水试验段计算长度的特点, 可将 GRF 模型解析得出的分段渗透系数做进一步细化平均以提高压水试验解析结果的精度, 为水封洞库效果评价、洞库涌水量预测提供更加科学可靠的数据基础。

关键词: 裂隙岩体; 渗透系数; 压水试验; 电导率; 测井; 地下水封洞库

中图分类号: P641.2; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)03-0062-08

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

ZHANG Bichang¹, HU Cheng², CHEN Gang², ZHANG Xiao¹, DUAN Dandan¹

(1. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: It is necessary to obtain accurate and reliable permeability parameters of the rock mass in the analysis and evaluation of the water-sealed conditions of the underground water-sealed cavern, while the commonly used hydrogeological test methods for obtaining the rock mass permeability coefficient exist obvious deficiencies. In order to keep accuracy of the data, relying on a certain groundwater sealing reservoir project in Yantai, the paper took the propane cavern traffic tunnel drilling as an example, carried out the water pressure test and used the theory of unsteady flow of GRF model to optimize the analytical test data based on the generalized radial flow theory. The water-conducting fracture location was confirmed by the flowing fluid electrical conductivity logging test and the permeability coefficient within the fracture range is obtained. The test results show that the analytical results of GRF model is 1–2 times larger than that of steady flow model. The reason is that when the fractured rock mass is subjected to sectional water pressure, the water flow

收稿日期: 2018-06-28; 修订日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41401539); 山西省交通厅建设科技项目(17-2-03); 山西省交通厅科技项目(2017-1-16); 山西省重点研发计划项目(201603D321118)

第一作者: 张必昌(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地质、工程地质。E-mail: 1300723029@qq.com

通讯作者: 胡成(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事 3S 技术及水文地质、工程地质的教学及研究工作。E-mail: hu_cheng@cug.edu.cn

dimensions of each section are different. The traditional steady flow theory assumes that the water flow dimension has only two-dimensional flow, while the GRF model fits all the data of the pressurized n-dimensional fracture flow with the pressure water process. The time period is calculated under the corresponding dimension. Therefore, the calculated permeability coefficient K is closer to the true value of the test section, which is more compatibility and practicality. The use of flowing fluid electrical conductivity logging test will further refine the average permeability coefficient obtained from the GRF model analysis, and provide a more scientific and reliable data base for the evaluation of the effect of the water-sealed cavern.

Keywords: fractured rock mass; permeability coefficient; packer test; flowing fluid electrical conductivity; logging; groundwater sealing reservoir

现场水力学试验方法是最直接、最有效获得含水介质渗透参数的方法。目前使用较多的方法有 Lugeon(压水)试验、Slug(微水)试验、抽水试验以及单环、双环渗水试验等。

压水试验方法是法国科学家 M. Lugeon 为研究岩体灌浆时透水性而提出的一种科学方法,一般采用三个压力五个阶段进行压水,能直观求得岩体透水性。后来由于计算水量的需要,国外学者用吸水量换算渗透系数。当单位吸水率较小时,国外学者基于对不同边界条件的假设,提出了不同计算公式,其中 Babushkin、美国垦务局、Richeter 和 Lillich 提出的公式得到了广泛的应用^[1]。这些公式都以地下水渗流服从达西定律为基本前提,且认为试验后期压水流量达到稳定。在实际压水过程中,地下水为非稳定流,在压水后期流量不一定能达到稳定,国外学者 Jacob 等^[2]、Enachescu 等^[3]、Hurst 等^[4]提出了基于非稳定渗流的解析公式。裂隙介质中节理裂隙发育具有强烈的非均质性,垂向上裂隙发育程度差异较大,从而导致不同深度地下水渗流情况可能不同。考虑上述情况, Barker^[5]提出“广义径向流”理论(generalized radial flow,简称 GRF),并推导了其在压水试验、抽水试验及微水试验中的渗流方程,在国外裂隙岩体渗透参数求解方面得到了广泛的应用。国内学者也对压水试验过程中地下水渗流情况进行了研究探讨,张祯武等^[6-7]、王旭升等^[8]、徐尚壁^[9]进行了研究探讨,得到了不同渗流模型下的非稳定压水试验解析公式。

上述压水试验理论方法均假定裂隙含水层各向同性,所求等效渗透系数为标量,无法确定反应岩体各向异性特点的渗透张量。Gringarten 等^[10]、Ozkan 等^[11]对裂隙岩体中发育各向异性单组裂隙非稳定压水的过程进行了研究,提出相应的数学模型和解析公式。还有一个非常有效的确定钻孔内导水裂隙位置并计算导

水系数的方法,即流体电导率(FFEC)测井方法, Tsang 等^[12]、Doughty 等^[13]、Moir 等^[14]都通过研究钻孔内流体电导率随时间变化的关系推导出相应计算导水裂隙附近渗透系数的公式。

本文针对传统稳定流理论解析压水试验数据的不足,运用非稳定流理论 GRF 模型优化解析压水试验数据。另外,由于通过压水试验所得数据在洞库涌水量数值模拟中精度不高,造成模拟值与实际涌水量偏差过大,故采用电导率测井试验对采用 GRF 模型优化解析后的压水试验数据进行精度提高,更好地运用于解决实际工程问题。

1 试验原理

1.1 电导率测井试验原理

本文引用一个新的试验方法即电导率测井试验(FFEC):首先,钻孔里的水被淡水或与原地层水含盐度不同的水所取代。然后,以定流量的方式抽取钻孔中的地下水,使得原地层地下水通过导水裂隙流入到钻孔中,钻孔水位下降一定深度后通过在孔内匀速提升三参探头测量钻孔水的电导率值。同时,利用压力传感器对钻孔内的水位下降进行监测。在抽水泵开始工作后的不同时间,可以通过分析钻孔内水的电导率与深度的剖面,从而获得导水裂隙发育深度以及该范围内的导水系数。电导率测井试验示意图见图 1。

一般情况下,钻孔内导水裂隙中的水化学成分和离子含量不同,因此具有不同的电导率。前人已经综述了在常温条件下离子浓度与流体电导率的关系,见式(1):

$$\sigma = \alpha C (\alpha = 1870) \quad (1)$$

式中: σ ——电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$;

C ——NaCl 的浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

假设井里的水首先被低电导率的水完全置换(钻孔内水的电导率下降至与替换的低电导率的水基本一

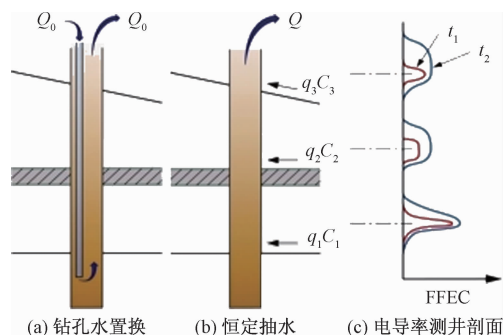


图 1 电导率测井试验示意图

Fig. 1 Schematic map illustrating the principle of the flowing fluid electrical conductivity (FFEC) logging method

致,可视为完全置换成功)。让井里的水以稳定的速率 Q 流出,三处导水裂隙就会出现图中 1 所示的情况。一般情况下井内不同部分的流速不同。

在给定时间 t 中测量的钻孔电导率剖面 $\sigma(x, t)$ 如图 1(c) 所示。于是可以简单地推算出其与 $q_i C_i$ 的关系:

$$\int_{x_1-\delta_1}^{x_1+\delta_2} \pi r_w^2 (\sigma(x, t) - \sigma_0) dx = \alpha (q_i C_i) t \quad (2)$$

式中: x_1 ——流入的位置点;

δ_1, δ_2 ——一个峰值区间内的合适距离;

r_w ——区间的半径/cm;

σ_0 ——初始电导率/ $(\mu S \cdot cm^{-1})$;

q_i ——流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$;

C_i ——流入流体的浓度/ $(kg \cdot m^{-3})$ 。

α 是式(1)所给的系数,这个方程假设 q_i 和 C_i 都是随时间而定的。同时,左边的积分应该只在相对较早的时候进行评估,也就是说,在相邻的峰值重叠之前。

如果后期的结果是不可用的,我们可以用下面的方法从每个峰值处得到一个准确的流量 q_i 值。图 2 显示了一个井孔的示意图,其中有三个流入点,每个渗流点都有流量 q_i 、浓度 C_i 和位置 x_i 。井的总流量为 Q ,井中的初始盐度为 C_0 ,井底的流入量为 w ,图中所示的位置为地表以下的深度。

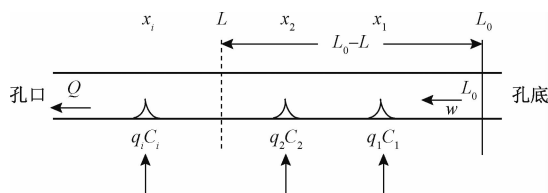


图 2 钻孔示意图

Fig. 2 Diagram of a drill hole

为了简化讨论而不失一般性,在接下来的分析中, w 将被假定为零。则有公式:

$$[(L_0 - L) \pi r_w^2] \bar{C}_L(t) = [(L_0 - L) \pi r_w^2] C_0 + t \sum_{L < x_i < L_0} q_i C_i - Q_L \int_0^t C(L, t) dt \quad (3)$$

式中: L_0 ——井底附近的参考点,在第一个裂隙流入点的上游/m;

L ——任意导水裂隙之间的一点/m;

Q_L ——点 L 处获得流入量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$ 。

在 L_0 中,电导率是恒定的,等于初始的电导率 σ_0 。 Q_L 等于 L_0 和 L 之间的所有 q 的总和加上 L_0 的井底的流入量 w 。

在这里 $(L_0 - L) \pi$ 是 L_0 到 L 之间的井孔容积,而 $C(L, t)$ 是位置 L 上随时间变化的盐度,右边的第一项表示井内的背景盐度。如果电导率与盐度呈线性相关,如式(1),则可以通过简单的代数运算得出以下结果:

$$Q_L = \frac{\alpha t \sum_{L < x_i < L_0} q_i C_i - [(L_0 - L) \pi r_w^2] [\bar{\sigma}_L(t) - \sigma_0]}{\int_0^t [\sigma(L, t) - \sigma_0] dt} \quad (4)$$

经变换式(4)还可写成:

$$Q_L = \left\{ \sum_{L < x_i < L_0} \int_{x_i-\delta_1}^{x_i+\delta_2} \pi r_w^2 [\sigma(x, t) - \sigma_0] dx - [(L_0 - L) \pi r^2] [\bar{\sigma}_L(t) - \sigma_0] \right\} / \left\{ \int_0^t [\sigma(L, t) - \sigma_0] dt \right\} \quad (5)$$

这里 $L(t) = \alpha \bar{C}_L(t)$, $\sigma(L, t) = \alpha C(L, t)$ 。式(5)的第一个项是由式(2)给出的,它可以应用于 2 个不同的时间(t_1 和 t_2),则每一个流入点可以得到:

$$\alpha q_i C_i = \frac{\int_{x_i-\delta_1}^{x_i+\delta_2} \pi r_w^2 [\sigma(x, t_2) - \sigma(x, t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

计算过程中,在钻孔中裂隙处的流量 q 和水位下降 h_D 可以被用于计算电导率峰值区的导水系数^[15]。泵的压力响应为零,而 h 是导水裂隙处的水头,每个导水裂隙处的 T 都可以由式(7)确定。

$$q = \frac{2\pi T}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{wb}}\right)} (h + h_D) \quad (7)$$

式中: q ——裂隙处的流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$;

T ——电导率峰值区的导水系数/ $(m^2 \cdot s^{-1})$;

h ——导水裂隙处的水头/m;

h_D ——水位下降/m;

r_{wb} ——钻孔半径/m;

r_{out} ——影响半径/m。

如果使用水泵分别造成地下水位下降为 h_{D1} 和 h_{D2} , 并且对 FFEC 测井分析分别给出了流量 q_1 和 q'_1 , 将两个测试值带入式(7)相减可得:

$$T = \frac{(q_1 - q'_1) \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{wb}}\right)}{(h_{D1} - h_{D2}) 2\pi} \quad (8)$$

1.2 GRF 模型基本原理

基于传统稳定流理论的压水试验^[16~17]将含水介质视为各项同性,没有考虑裂隙岩体的非均质各向异性,所得渗透系数仅代表岩体的平均渗透系数,且只在压水孔邻近有限范围内有效。当试段位于地下水位以下,透水性较小($q < 10 \text{ Lu}$),且曲线为 A 型(层流型)时,按式(9)计算岩体渗透系数:

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r_0} \quad (9)$$

式中: K ——岩体渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

Q ——压入流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

L ——试段长度/m;

H ——试验水头/m;

r_0 ——钻孔半径/m。

运用上述公式求算裂隙岩体等效渗透系数时,存在以下问题:在实际裂隙岩体中地下水渗流主要在裂隙网络中进行,岩体中裂隙发育具有高度的非均质性和各向异性,使得垂向上不同试验段地下水渗流情况有所不同,可能表现为一维沟槽流、二维柱状流或是三维球面流,对于同一段压水试验数据选择不同维度的渗流模型计算出渗透系数值大小差异可达到 1~2 个数量级;实际压水过程中,压入流量随时间不断减小,地下水为非稳定流,其达到相对稳定状态所需时间取决于试验段裂隙发育情况,用压水后期某时刻流量数据作为稳定流量数据计算的等效渗透系数存在一定误差。此外,若压水流量达到相对稳定所需时间较长,会增大施工成本不利于工程进度;稳定流理论计算公式为半解析半经验公式,为简化计算,前人用压水段长度替代试验“影响半径”,这一替代是否合理尚未得到论证。由于上述问题存在,基于稳定流理论与非稳定流理论的压水试验模型推算出的裂隙岩体渗透系数会存在差异,裂隙岩体渗透系数直接影响候选库区可行性评价以及洞库开挖涌水量预测。因此,基于非稳定流理论的压水试验模型研究对实践工程具有重要意义。

在进行分段压水试验过程中,我们无法预知试验

段内地下水渗流维度,而对于同一段压水试验数据选择不同维度的渗流模型计算出渗透系数值大小差异可达到 1~2 个数量级。因此,在利用压水试验数据求算渗透系数时,选择恰当的渗流维度模型非常重要。

为解决上述问题,Barker 针对裂隙介质提出了 n 维空间的“广义径向流”(generalized radial flow, GRF) 理论模型^[5]。其基本假定如下:

(1)裂隙水流为径向流,符合达西定律,其几何特征可用分数维 n 来表征;

(2)忽略钻孔井壁效应,将压水源看作 n 维几何体;

(3)裂隙含水层的天然水力坡度为 0;

(4)含水层侧向无限延伸;

(5)井中水头在 $t = 0$ 时刻瞬时上升至 h_{w0} 并保持不变;

(6)水头上升所引起的地下水弹性储存是瞬时完成的。

从几何意义上而言,水流维数反映了流场中过水断面的面积 A 与距源(汇)项距离 r 的方次关系。对一维、二维和三维流, A 与 r^0 , r^1 和 r^2 分别成正比关系,以此类推,对 n 维水流,则有:

$$A = \alpha_n r^{n-1} \quad (10)$$

式中: A ——流场中过水断面的面积/ m^2 ;

r ——与距源(汇)项距离/m;

α_n ——比例系数。

其中比例系数可表示为:

$$\alpha_n = \frac{2\pi^{n/2}}{\Gamma(n/2)} \quad (11)$$

其中, $\Gamma(z)$ 为以 z 为自变量的 gamma 函数,公式为:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt \quad (12)$$

基于 Barker 的基本假设条件,压水过程中会形成以井轴为对称轴的分维辐向水流,若将坐标原点放在井轴的含水层初始水头处(即以地下水初始水位线作为压力计算零线),可将压水试验条件下分数维裂隙水井流运动数学模型归纳为定解问题。

对定解问题求解可得到压水过程中含水层水头分布 $h(r, t)$,而在单井压水过程中,观测数据为试验井的压入耗水量随时间的变化。因此,结合式(10)~(12)可得 Laplace 空间下的流量解,通过等式变形转换两边取对数,可得:

$$\lg Q = \lg Q_D(t_D, n) + \lg h_{w0} K b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-2} \quad (13)$$

式中: Q ——压水耗水量/ m^3 ;

$Q_D(t_D, n)$ ——以无量纲时间 t_D 为自变量,以水流维度 n 为参变量的井函数;

h_{w0} ——试验井中从压力计算零线算起的恒定水头压力/MPa;

K ——含水层的渗透系数/($m \cdot d^{-1}$);

b ——含水层厚度/m;

r_w ——钻孔半径/m。

$$\lg t = \lg t_D + \lg \left(\frac{r_w^2}{a} \right) \quad (14)$$

式中: a ——含水层压力传导系数。

由式(11)和(12)可知,作标准曲线 $\lg Q_D(t_D, n) - \lg t_D$ 与试验时压入水量 Q 随时间 t 变化的实测曲线,在双对数坐标下只是横坐标相差常数,而形状相同。因此可利用标准曲线比拟法(配线法)求出裂隙水流维数 n 和裂隙含水层的水力学参数。

2 压水试验开展与数据解析

2.1 现场水文试验

本次试验在洞库交通巷道周边选取 2 个钻孔(XD02、XD05)进行现场试验。2 个钻孔均采用清水钻井,开孔直径 110 mm,钻进至中风化层变径为 95 mm,终孔直径 95 mm,XD02 孔深 89 m,XD05 孔深 118 m。钻孔内残积土层及强风化层下套管,套管管角灌入堵漏王进行封闭,之后钻井均为裸井。钻井结束后

采用清水洗孔,静置 3 d 后进行钻孔电视成像与钻孔岩芯编录,记录钻孔内深大裂隙和节理破碎带位置,之后开展现场水文试验,试验目标段均处于钻孔裸井部分。具体试验方法和步骤中除观测及记录以外的工作请适应性参照现行的《水利水电工程钻孔压水试验规程(SL 31-2003)》^[18] 进行。

2.2 试验参数求解

分别用稳定流半解析公式和 GRF 模型对压水试验数据进行解析,由于每段处理方法一致,本节只任意选取 XD02 孔第二段 XD02-2 进行演示。GRF 模型标准曲线由 Matlab 编程绘制^[19]。试验过程配线图如图 3 所示,参数计算结果见表 1。

选择匹配点,可得 $n = 1.2, t = 1\ 770\ s, Q = 1.283\ 7\ L/min, t_D = 407\ 10, Q_D = 0.006\ 93$

$\alpha_{1.2} = 2.669, h_{w0} = 0.8\ MPa = 0.8 \times 101.29 = 81.032\ m, b = 10, r_w = 0.047\ 5\ m$

$$K = \frac{Q}{Q_D h_{w0} b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-2}} = 1.32 \times 10^{-3}\ m/d$$

$$S_s = \frac{Kt}{r_w^2 t_D} = 1.45 \times 10^{-2}$$

由 GRF 模型拟合曲线可知,在裂隙岩体中进行垂向分段压水试验时,各分段水流维度不一,反映了不同试验段裂隙渗流情况。XD02-1、XD02-2、XD02-3 试验段与 XD05-1、XD05-2 试验段最终试验结果见表 1。

表 1 水文试验数据解析结果

Table 1 Analytical results of hydrological test data

钻孔编号	试段范围	压水试验				
		稳定流理论		GRF 模型		
		渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)		裂隙维度 n	渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	贮水率/ m^{-1}
		15 min	30 min			
XD02	XD02-1	7.84×10^{-4}	2.84×10^{-4}	1.2	1.18×10^{-3}	1.36×10^{-2}
	XD02-2	5.21×10^{-4}	1.71×10^{-4}	1.2	1.32×10^{-3}	1.45×10^{-2}
	XD02-3	8.30×10^{-4}	2.25×10^{-4}	1.8	2.47×10^{-4}	5.15×10^{-3}
XD05	XD05-1	3.47×10^{-4}	2.69×10^{-3}	2.5	3.05×10^{-3}	1.46×10^{-2}
	XD05-2	8.96×10^{-4}	—	2.8	1.89×10^{-3}	2.51×10^{-1}
		—	7.35×10^{-4}	2.0	8.27×10^{-4}	2.35×10^{-2}

从表 1 中可以看出,对于同一试验段,稳定流理论第 15 min 试验数据计算结果均大于第 30 min 试验数据计算结果。这是因为在稳定流理论渗透系数计算公式中,裂隙岩体等效渗透系数 K 与压水流量 Q 成正比关系,而在实际压水过程,地下水流尚未达到稳定状态,压水流量仍有减小趋势,因此后期数据计算结果必然变小,但两者数量级全部一致,计算结果相差不大。

对比同一段压水数据两种模型解析结果,GRF 模

型比稳定流模型大 1~2 倍。稳定流理论物理模型为承压完整井流,GRF 理论模型为空间 n 维裂隙流,当 $n=2$ 时,二者物理模型一致,其计算结果基本一致,当 n 趋向 1 或者 3 时,二者计算结果差异较大。不同于稳定流理论采用压水过程某一时刻数据计算渗透系数,GRF 模型用压水过程全部数据进行拟合,因此其求算的渗透系数 K 更接近试验段裂隙岩体渗透系数的真值,且其水流维度 n 能反映试验段裂隙渗流情况,GRF 模型具有更好的兼容性和实用性。

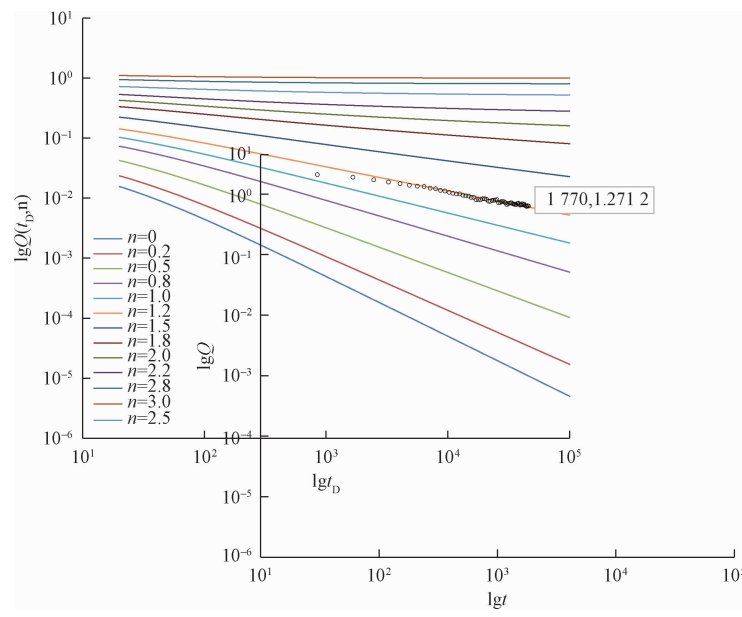


图 3 XD02-2 段 GRF 模型拟合曲线图

Fig. 3 Curve showing the GRF model fitting in section XD02-2

3 电导率测井试验开展与数据解析

3.1 现场水文试验

本次试验依然选取钻孔 XD02、XD05 进行现场试验。具体现场操作步骤:①进行钻孔水置换,采用与原地层水电导率差异较大的外来水替换钻孔中的水,本次试验采用市政自来水,试验之前用探头测得当地自来水电导率为 304 $\mu\text{S}/\text{cm}$,而钻孔内地下水的电导率大致为 700 ~ 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相差巨大,符合试验要求。自来水通过下入钻孔底部的水文管以恒定低速率注入到钻孔中,同时上部的泵以同样的速度抽出钻孔水。在这种情况下,孔内的水被注入的水所代替,而没有使孔内的水头发生较大的变化,造成扰动,影响测井数据的准确性。电导率的监测数值通过探头实时记录,直到达到一个较低稳定的电导率值。②置换后没抽水前进行 FFEC 测井,作为基线。③使用不同的抽水量和水位下降(泵和压力传感器被放置在水位较低的浅部,低于预期的水位下降)完成测试 1 和测试 2,完成如图 1 FFEC 剖面。

3.2 试验数据解析

根据以上步骤完成试验后得到如图 4 所示 XD05 的电导率随钻孔深度变化的曲线,分别为 15 min 一测,30 min 二测。由图可清晰地看出曲线有 3 个峰值,这表示钻孔内有 3 个或 3 组比较大的导水裂隙。从钻孔最深部的峰值开始记作 $x_1 = 79.8 \text{ m}$, $x_2 = 55.1 \text{ m}$, $x_3 = 35.8 \text{ m}$ 。

首先运用 graphpad 软件并利用式(6)计算每一个独立峰值的 $q_i C_i$ 。在这里将式(5)给出的 L_0 - L 划定为

峰值 x_i 的范围,那么此时等式左边的 Q_L 就等于 q_i (第一个导水裂隙的流量)。则此时的 C_i 就可以通过分离式(7)求得的 $q_i C_i$ 获得。

两次分别使水位降深 10 m 后的试验实测曲线见图 4。

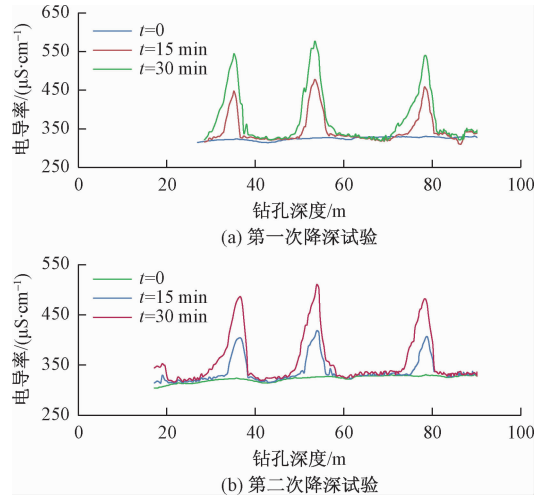


图 4 电导率测井两次降深试验

Fig. 4 Two dip tests of conductivity logging

由第 1 节介绍的计算公式求出 q_i 、 C_i 、 q'_i 、 C'_i 数据,见表 2。接下来,将试验计算得出的 q 值用于式(8)计算导水系数 T ,在 T 计算中, $r_{wb} = 0.0475 \text{ m}$ (对应井孔直径为 9.5 cm), $r_{out} = 47.5 \text{ m}$,这是 Tsang 等使用的估计值。式(8)对 r_{out} 没有太大的敏感性,所以在没有关于压力响应程度的实际信息的情况下,使用 $r_{out} = 1000 r_{wb}$ 是

一种合理的方法。由此可得 $T_1 = 2.33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 2.63 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_3 = 2.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

由于 $K(\text{渗透系数}) = T/M(\text{含水层厚度})$, 由钻孔

成像可以看出每个电导率峰值处的一组基岩裂隙或多组基岩裂隙 $\leq 5 \text{ m}$, 因此为方便计算取含水层厚度为 5 m 。最终试验成果见表 2。

表 2 电导率测井试验计算结果

Table 2 Calculation results of conductivity logging test

峰值号	x_i/m	第一次降深试验		第二次降深试验		综合分析计算	
		$q_i/(10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$q'_i/(10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$C'_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$T/(10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$K/(10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1})$
1	79.8	2.77	0.26	4.89	0.38	2.33	4.03
2	55.1	3.94	0.33	6.33	0.49	2.63	4.54
3	35.8	2.25	0.24	4.47	0.35	2.44	4.22

3.3 钻孔垂向渗透系数连续性变化计算

这里必须要说明的一点是基于 GRF 模型理论解析的压水试验数据与电导率测井试验数据二者并不存在相互影响或关联的问题,两种试验为相互独立、补充计算的关系。而将两种试验结合运用是因为笔者在前期研究学习中考虑到压水试验在计算裂隙岩体渗透系数的不足,选择用 GRF 模型解析压水试验数据而摒弃传统的基于稳定流理论解析压水试验数据的思路,以此来优化压水试验数据。同时利用电导率测井试验计算长度(导水裂隙范围)远远小于压水试验段计算长度的特点可以很好地提高压水试验数据的分辨率也就是精度。

结合前两节所得试验数据可以做出图 5~6,表示钻孔 XD05 传统稳定流理论计算渗透系数与 GRF 模型解析结合电导率测井数据综合计算后的渗透系数对比情况。

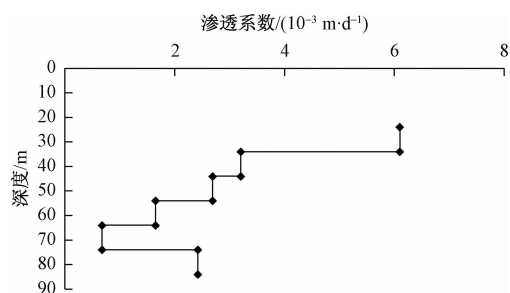


图 5 XD05 传统稳定流理论计算渗透系数结果

Fig. 5 Penetration coefficient results of traditional steady flow theory calculation by XD05

由图 6 可清晰地看出采用传统稳定流理论计算得出的钻孔渗透系数比采用 GRF 模型解析计算得出的渗透系数整体偏小,前文已对其进行分析,并且文章最后采用将 GRF 模型解析结果与电导率测井中得出的导水裂隙附近区域的渗透系数综合计算的方法,得到比采用传统稳定流理论方法更加精细的垂向上的渗透系数的变化曲线。研究成果对水封洞库效果评价、洞库涌水量预测及洞库营运期间渗流场特征及水封性风险评估更具实际参考价值。

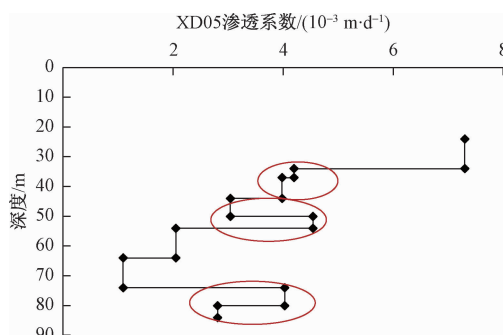


图 6 XD05 GRF 模型解析结合电导率测井数据综合计算后的渗透系数结果

Fig. 6 Penetration coefficient results after comprehensive calculation of XD05 GRF model and conductivity logging data

4 结论

(1)分段压水试验过程中,注入流量随时间有减小的趋势,减小幅度与试验段裂隙发育特征相关。采用稳定流理论计算裂隙岩体渗透参数时,等效渗透系数 K 与压水后期流量 Q 成正比例关系,压水持续一段时间(15 min)后,虽注水流量仍有减小趋势,但求算渗透系数差异很小,均在同一个数量级。水流维度 n 在一定程度上能反映试验段优势渗流裂隙组数,本次试验渗透系数计算结果比稳定流模型大 1~2 倍,广义径向流 (GRF)理论模型求参具有更高的正确性与完整性。

(2)在电导率测井试验中准确地定位到了垂直钻孔中大的导水裂隙的位置,求出导水系数并结合钻孔成像确定含水层厚度,其结果可应用于渗透系数 K 值的计算中。将压水试验通过 GRF 模型数据解析得出的每 10 m 段的渗透系数做进一步细化平均,得到比传统稳定流理论计算的垂向上的渗透系数更加合理并且更加细化能够体现非均质性的渗透系数值。

参考文献:

- [1] 范波,罗平平. 钻孔压水试验理论研究现状及展

- 望[J]. 煤炭工程, 2010, 1(1):91-94. [FAN B, LUO P P. Present status and outlook of theoretical study on borehole water pressurized test [J]. Coal Engineering, 2010, 1(1):91-94. (in Chinese)]
- [2] JACOB C E, LOHMAN S W. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer[J]. Transactions American Geophysical Union, 1952, 33(4):559-569.
- [3] ENACHESCU C, RAHM N. Hydraulic characterisation of the Stuttgart formation at the pilot test site for CO storage, Ketzin, Germany [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(6):960-971.
- [4] HURST W, CLARK J D, BRAUER E B. The skin effect in producing wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(11):1483-1489.
- [5] BARKER J A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock[J]. Water Resources Research, 1988, 24(24):1796-1804.
- [6] 张祯武, 秦刚. 利用定流量非稳定流压水试验求水文地质参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):344-347. [ZHANG Z W, QIN G. Determination of hydro-geological parameters by water pressure test of non-stationary flow with constant discharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):344-347. (in Chinese)]
- [7] 张祯武, 李兴成, 徐光祥. 利用定压力非稳定流压水试验求水文地质参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15):2543-2546. [ZHANG Z W, LI X C, XU G X. Determination of hydrogeological parameters by water pressure test of steady-pressure and non-stationary flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2543-2546. (in Chinese)]
- [8] 王旭升, 万力. 单组裂隙压水试验的一个非稳定渗流模型[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10):35-38. [WANG X S, WAN L. Non-steady flow model of water injecting tests on a group of fracture[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10):35-38. (in Chinese)]
- [9] 徐尚壁. 压水试验求测渗透系数的射渗理论与方法[J]. 水利水运科学研究, 1996(1):24-33. [XU S B. Spouting permeation theory and method for determing permeability coefficient by pressure water test[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(1):24-33. (in Chinese)]
- [10] GRINGARTEN A C, RAMEY H J. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horisontal fracture, partial penetration or restricted entry[J]. Society of Petroleum Engineers, 1974, 4(3):413-426.
- [11] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some new solutions to solve problems in well test analysis: part 2 [J]. Computational Considerations and Applications, 1988, 6(3):359-368.
- [12] TSANG C F, HUFSCHMIED P, HALE F V. Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method[J]. Water Resources Research, 1990, 26(4):561-578.
- [13] DOUGHTY C, TSANG C F, ROSBERG J E, *et al.* Flowing fluid electrical conductivity logging of a deep borehole during and following drilling: estimation of transmissivity, water salinity and hydraulic head of conductive zones [J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25:1-17.
- [14] MOIR R S, PARKER A H, BOWN R T. A simple inverse method for the interpretation of pumped flowing fluid electrical conductivity logs[J]. Water Resources Research, 2014, 50(8):6466-6478.
- [15] DOUGHTY C, TSANG C F. Signatures in flowing fluid electric conductivity logs [J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1):157-180.
- [16] 丁立丰, 郭啟良, 王成虎, 等. 某石油储备库吕荣压水试验与水力摩阻[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6):35-38. [DING L F, GUO Q L, WANG C H, *et al.* Lugeon water pressure test and its hydraulic friction in an oil reserve library project [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6):35-38. (in Chinese)]
- [17] 王新峰, 梁杏, 孙蓉琳, 等. 一种层状岩体压水试验成果计算分析渗透性的新方法[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1):46-52. [WANG X F, LIANG X, SUN R L, *et al.* A new method of hydraulic conductivity calculating and analysis by water pressure test in layered rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1):46-52. (in Chinese)]
- [18] 水利水电工程钻孔压水试验规程: SL31-2003 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. [Code of water pressure test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL31-2003 [S]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese)]
- [19] 乔婷婷. 基于 Matlab 的颤振自激力时域化[J]. 山西交通科技, 2011(2):62-63. [QIAO T T. The time domain of flutter self-excited forces based on Matlab [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2011(2):62-63. (in Chinese)]