

斯拉格试验技术与理论研究综述

苏 锐, 王 驹, 郭永海, 周 佳

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要：斯拉格试验是一项成本低、简单、试验历时短、无需抽出或注入大量水的现场水文地质试验技术，在国外已有多年的发展历史。其发展分为现场试验技术的发展和理论模型的发展。斯拉格试验技术包括简单斯拉格试验技术、栓塞斯拉格试验技术和闭合 - 斯拉格试验技术。斯拉格试验理论模型包括指数衰减模型、欠阻尼衰减模型和非线性模型。斯拉格试验广泛应用于地下水污染水文地质、近地表农田水文地质、供水水文地质及石油和煤层气等诸多领域，估算含水层(岩体)的渗透参数。由于斯拉格试验技术本身固有的局限性，其影响范围较小。近年来，斯拉格试验发展成为一项评价含水层渗透参数空间变化特征以及低渗透性和极低渗透性岩体渗透特征的重要的水文地质试验技术方法，应用于核废物地质处置场址水文地质特性评价研究。利用闭合 - 斯拉格试验技术可以在野外测量渗透系数小于 10^{-13} m/s 的岩体渗透性。

关键词：水文地质；斯拉格试验；水文地质试验；低渗透性；渗透系数

中图分类号：P 641

文献标识码：A

文章编号：1000 - 6915(2007)增 2 - 3882 - 09

AN OVERVIEW OF TEST TECHNIQUE AND THEORY STUDY OF SLUG TEST

SU Rui, WANG Ju, GUO Yonghai, ZHOU Jia

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract : Slug test is an important hydraulic test technique to evaluate the local hydraulic properties of formation. Slug test has become such a frequently used technique as a result of its considerable logistical and economic advantages such as relatively low cost, simplicity, short duration of test, no water actually removed from or added to the well. There are more than fifty years of development history of this test in foreign countries ; and its development is summarized as technique development and theoretical model development. Slug test technique can be divided into simple slug test, packer slug test and shut-in slug test. The theoretical models for slug test include exponential decay model, underdamped model and nonlinear model. The parameters obtained from slug test have been widely used in a variety of aspects, such as contamination hydrogeology, water supply investigations, near-surface agricultural hydrogeology, petroleum and coalbed-methane. The influential range of slug test is very small ; and it is only possible to determine the characteristics of small volume of aquifer material surrounding the well due to intrinsic limitation of this technique. Recently, slug test is considered as an important technique to evaluate the spatial variations of aquifer seepage parameters and seepage characteristics of rock mass with low, even extremely low permeability. Shut-in slug test technique is utilized to in-situ measurement of rock mass permeability with permeability coefficient lower than 10^{-13} m/s.

Key words : hydrological geology ; slug test ; hydrogeological test ; low permeability ; permeability coefficient

收稿日期：2007 - 03 - 07；**修回日期：**2007 - 03 - 30

作者简介：苏 锐(1973 -)，男，1997年毕业于华东地质学院地球科学系水文地质专业，现为博士研究生，主要从事核废物深地质处置方面的研究工作。E-mail：su_rui@vip.tom.com

1 引 言

在国外, 斯拉格试验(slug test)已有 50 多年的发展历史, 被广泛应用于诸多领域, 特别是在环境地质领域, 估算含水层的渗透参数。近年来, 斯拉格试验应用于核废物深地质处置研究中低渗透岩体的渗透性研究。国外有专著论述斯拉格试验的设计、实施和数据解释、分析^[1]。20 世纪 50 年代初, Hvorslev 等学者首次应用这项技术进行水文地质参数现场测量, 并开发了相应的数学模型。经过 50 多年的发展, 斯拉格试验成为研究低渗透岩体渗透性的很重要的野外试验技术和方法。

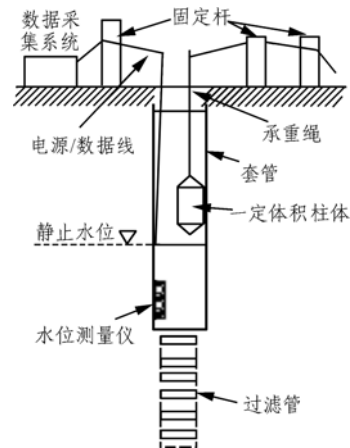
在我国大陆地区, 作为一种现场水文地质试验技术, 斯拉格试验技术鲜有应用, 更没有相关的操作程序和标准, 有关斯拉格试验的应用研究报告和论文很少。斯拉格的译名各异, 如井孔响应试验、重锤试验、冲击试验、定容积瞬时抽水或注水试验、上升试验、下降试验、微水试验(台湾省)或者 slug 测试法。这些译名有些容易混淆, 有些太冗长, 有些不确切, 因而笔者在本文暂译为“斯拉格试验”。

本文的主要目的是系统介绍斯拉格试验技术和理论, 全面评述斯拉格试验技术 50 多年的发展过程及其应用, 总结其优缺点, 以便国内同行对其有全面的了解和认识, 以利于这项技术在国内的推广和应用。

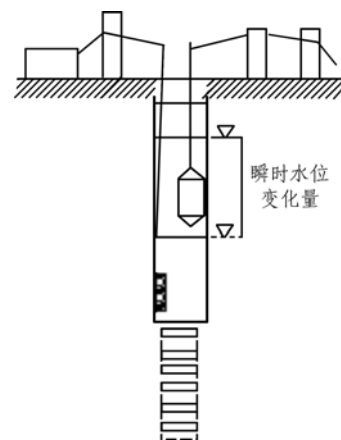
2 基本概念和原理

在静止水位条件下, 若钻孔中的水位发生瞬时变化, 在水头差的作用下, 钻孔中水位将逐渐恢复到静止状态, 测量水位随时间的变化, 可获得水位-时间响应数据, 利用响应数据即可估算含水层的渗透系数。在特定条件下, 利用斯拉格试验可以估算含水层的储水系数, 这一过程即为斯拉格试验, 如图 1(a), (b)所示。图 1(c)为斯拉格试验水位-时间响应曲线。

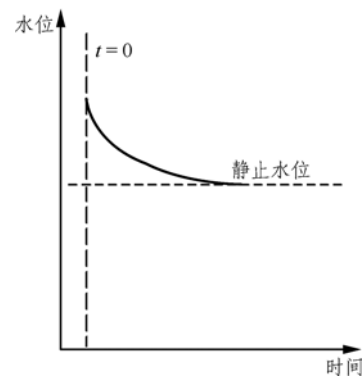
上述定义表明, 斯拉格试验包括 3 个主要过程: 首先, 使钻孔的水位发生瞬时改变。最常用的方法是从钻孔中快速抽出一定体积的柱体, 然后测量水位随时间的变化, 即获得响应数据。最后, 依据相关理论模型, 利用响应数据估算含水层的渗透系数, 甚或储水系数。



(a) 斯拉格试验开始前



(b) 斯拉格试验开始后



(b) 水位变化曲线

图 1 斯拉格试验原理及其水位-时间响应曲线
Fig.1 Principle of slug test and response curve of water table-time

3 斯拉格试验技术和理论发展

自 20 世纪 50 年代初 Hvorslev 等学者成功开发了第一个斯拉格试验理论模型以来, 作为一项简单、容易操作、耗费低、试验历时短的水文地质试验技术, 斯拉格试验被广泛应用于估算含水层(岩体)的渗

透参数。纵观斯拉格试验 50 多年的发展历史,有两条主线贯穿始终,即现场试验技术的发展和理论模型的发展。两者是一种辩证统一的关系:试验技术的发展推动了理论模型的建立与发展,而理论模型的发展和应用促进了试验技术的革新和进步。

3.1 斯拉格试验技术发展

(1) 简单斯拉格试验

简单斯拉格试验又称为传统斯拉格试验,其试验设备安装和试验过程如图 1 所示。主要过程是:在静止水位条件下,从(或向)钻孔中快速抽出(或插入)一定体积的柱体,使钻孔水位发生瞬时改变,然后测量水位随时间的变化。根据 C. D. McElwee^[2]的研究,10 s 就可以完成一个试验。除了水位扰动装置(如定体积柱体)和水位测量设备外,试验无需其他任何设备和仪器。该试验技术特点是:设备简单、易操作、试验历时短、耗费低廉。适用于中等渗透性和强渗透性(如 $10^{-8} \text{ m/s} \leq K \leq 10^{-5} \text{ m/s}$)的单个含水层的参数估计。

(2) 栓塞-斯拉格试验

对于中等渗透性及低渗透性的含水岩层,完成一个斯拉格试验仍然需要较长的时间。通过对理论模型的分析发现,试验历时与过滤器的有效长度成反比,同套管的有效半径的平方成正比^[1]。根据这一原理,缩小套管直径可以有效缩短试验历时,栓塞-斯拉格试验技术能满足这一要求。

该试验技术的组成和过程如图 2 所示。栓塞的目的在于:将试验段和其他含水层隔离,便于安装合适直径的竖管(相当于改变套管的直径),缩短试验历时。

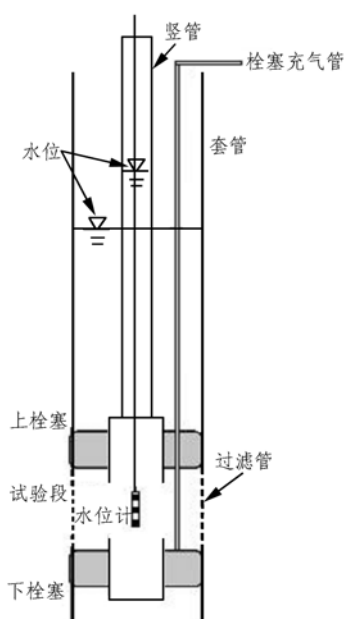


图2 双栓塞试验安装结构

Fig.2 Installation structure of a double-packer down-hole test

技术特点:通过栓塞的隔离,可以获得特定含水岩层的特定参数值而不是各个含水层参数的平均值;通过改变栓塞上部竖管的直径达到改变套管直径而缩短试验时间的目的;需要比传统斯拉格试验更多的设备和仪器,更复杂。适用于中等渗透性及低渗透性的多个含水层(如 $10^{-8} \text{ m/s} \leq K \leq 10^{-5} \text{ m/s}$)的分层参数估计。

简单斯拉格试验和栓塞-斯拉格试验在野外的主要操作步骤如下:

① 试验设计和准备;

② 设备安装到试验设计位置,等待水位恢复到静止状态;

③ 使试验段含水层的水头瞬时上升或下降一定值;

④ 随时间变化,连续测量水头;

⑤ 待水位恢复到静止状态,试验结束。

(3) 闭合-斯拉格试验(shut-inslug test)

在野外实践中,缩小竖管的直径总是有限的。对于极低渗透岩体,如 $K < 10^{-9} \text{ m/s}$,即使竖管的直径很小,完成一个斯拉格试验仍需很长时间。J. D. Bredehoeft 和 S. S. Papadopoulos^[3]通过理论分析计算得到,对于极低渗透岩体,如 $K = 10^{-12} \text{ m/s}$,要求竖管的直径是 0.000 78 m,这在野外试验中是不可能达到的。因此,对于这类岩体就不能用前面两种斯拉格试验技术来估算其渗透参数,相比而言,闭合-斯拉格试验技术更合适。

闭合-斯拉格试验最早是由石油部门发展起来的一项用于估算储油层的天然压力的技术。20 世纪 90 年代,这一技术逐渐用于地下水水文地质调查、核废物地质处置等领域,用于估算低渗透性和极低渗透性岩体的渗透参数。图 3 为闭合-斯拉格试验安装结构和试验原理图。闭合-斯拉格试验同其他斯拉格试验技术的最大差别在于:是否安装管状试验阀门,如图 3 所示。闭合-斯拉格试验过程中,关闭阀门后试验段的水头变化和竖管中水位变化无关,而其他斯拉格试验过程中,水头变化和套管(或竖管)中水位变化一致。

技术特点:用双栓塞将试验段和其他含水层隔离,将钻孔分为上、中、下 3 段;3 个压力传感器分别对这 3 段进行压力监测,有利于检测栓塞的隔离效果和评价试验段同其他含水层的水力联系;水位瞬时改变后,使用可地面控制的井下管状阀门切断试验段同竖管的水力联系,试验段的水头变化和

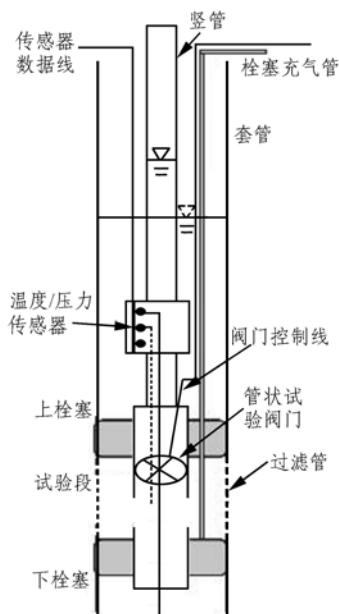


图 3 闭合-斯拉格试验安装结构和试验原理

Fig.3 Installation structure and principle of shut-in slug test

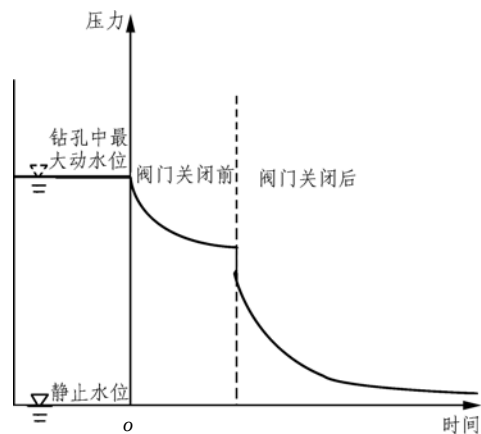
竖管中的水位变化无关；瞬时改变水位的方式除了传统斯拉格试验的方式外，还可以通过竖管加压或抽真空等方式实现水位的瞬时改变；需要设备较多，操作复杂。

对于渗透系数 $10^{-11} \text{ m/s} < K < 10^{-8} \text{ m/s}$ 的试验段，进行该试验的主要操作步骤如下：

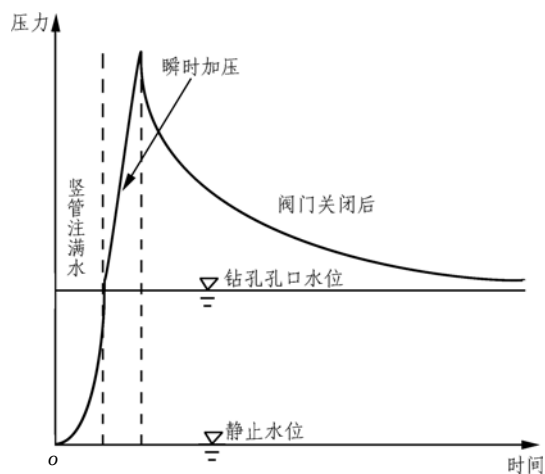
- ① 试验设计和准备；
- ② 设备安装到试验设计位置，给栓塞充气，将试验段和其他含水层隔离；
- ③ 关闭井下管状阀门，等待水位恢复到静止状态；
- ④ 使竖管中的水位上升或下降一定值；
- ⑤ 打开井下管状阀门，然后迅速关闭阀门；
- ⑥ 随时间变化，连续测量试验段的水头；
- ⑦ 待水位恢复到静止状态，试验结束。压力随时间的变化曲线形如图 4(a)所示。

对于渗透系数 $K < 10^{-11} \text{ m/s}$ 的试验段，试验步骤如下：

- ① 试验设计和准备；
- ② 设备安装到试验设计位置，给栓塞充气，将试验段和其他含水层隔离；
- ③ 使井下管状阀门处于开启状态，将竖管注满水，水位上升至孔口；
- ④ 给竖管瞬时加压到一定值，迅速关闭阀门；
- ⑤ 随时间变化，连续测量试验段的水头；
- ⑥ 待水位恢复到静止状态，试验结束。压力随时间的变化曲线形如图 4(b)所示。



(a) 低渗透性试验段



(b) 极低渗透性试验段

图 4 压力随时间的变化曲线

Fig.4 Change curves of pressure vs. time

3.2 斯拉格试验理论模型的发展

纵观斯拉格试验理论模型的发展历史，其理论模型可分为 2 类：线性模型和非线性模型。

3.2.1 线性模型

线性模型的特点是忽略非线性摩擦损失及由于水头瞬时变化而产生的惯性效应；地下水的流动为达西流；不考虑套管的变径对试验的影响等。线性模型所描述的水位响应曲线呈指数衰减(又称为过阻尼衰减)或者欠阻尼衰减，如图 5 所示。主要有以下几种常用模型。

(1) 指数衰减模型

① Hvorslev 模型

Hvorslev 模型由 Hvorslev 等学者于 20 世纪 50 年代初建立和发展起来的^[1]。其假设条件是：承压完整井；均质多孔介质含水层；地下水流动为达西稳定流；忽略含水介质的弹性储水效应，即 $S_e = 0$ 。

Hvorslev 等学者给出了如下形式的解析解，利用直线图解法求参数：

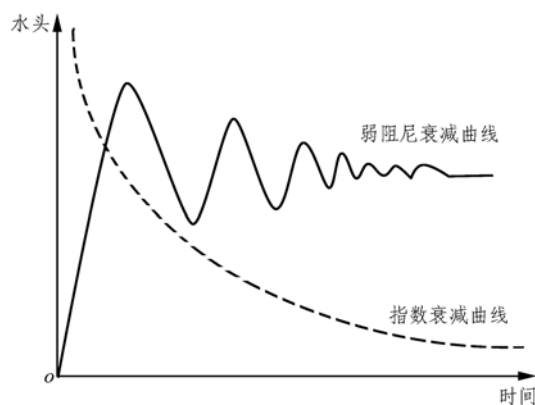


图5 斯拉格试验线性模型水位-时间响应曲线

Fig.5 Response curves of water level vs. time obtained by linear model of slug test

$$\ln \left[\frac{H(t)}{H_0} \right] = - \frac{2K_r B t}{r_c^2 \ln(R_e / r_w)} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2B T_0} \quad (2)$$

式中： H_0 为钻孔中的初始水头(m)； $H(t)$ 为钻孔中的水头变化(m)； t 为时间(s)； R_e 为斯拉格试验的影响半径(m)； r_w 为过滤管半径(m)； r_c 为钻孔套管半径(m)； K_r 为含水层径向渗透系数(m/s)； B 为含水层厚度(m)； T_0 为滞后时间(s)，即当动水头与初始水头的比值等于 0.368 时所对应的时间。

模型的特点：模型较简单；用直线图解法求参，容易操作；试验初始时刻无要求水位瞬时改变。

模型的缺点：忽略含水介质的弹性储水效应；当水位响应曲线不是直线时，给参数估计带来一定的不确定性；在实践中，对于非完整井，径向渗透系数与垂向渗透系数比值选择有一定不确定性；对于完整井，影响半径是一个经验参数，给参数估计带来一定的不确定性。

② Cooper 模型

Cooper 模型是由 H. H. Cooper 等^[4]于 20 世纪 60 年代建立和发展起来的。其适用条件是：承压完整井；均质各向同性多孔介质；无限平面水平含水层；含水介质的弹性储水效应不可忽略。

H. H. Cooper 等^[4]给出了如下形式的解析解，利用标准曲线配线法求参数：

$$\frac{H(t)}{H_0} = f \left(\frac{K_r B t}{r_c^2}, \frac{r_w^2 S_s B}{r_c^2} \right) \quad (3)$$

式中： S_s 为储水率(m^{-1})。

模型的特点：模型较简单；用标准配线法求参；

可以估算含水介质的弹性储水率；试验初始时刻，要求水位瞬时改变。

模型的缺点：由于标准曲线形态相似，给参数估计带来一定的不确定性，特别是对含水层储水系数的估算影响较大；在实践中，对于强渗透性含水介质来说，要求水位瞬时改变较难。

③ Bouwer 和 Rice 模型

Bouwer 和 Rice 模型由 H. Bouwer 和 R. C. Rice^[5]建立和发展起来的。其适用条件是：非承压含水层；均质各向异性多孔介质；定水头有限直径圆岛形边界条件；忽略含水介质的弹性储水效应。Bouwer 和 Rice 几何模型如图 6 所示。

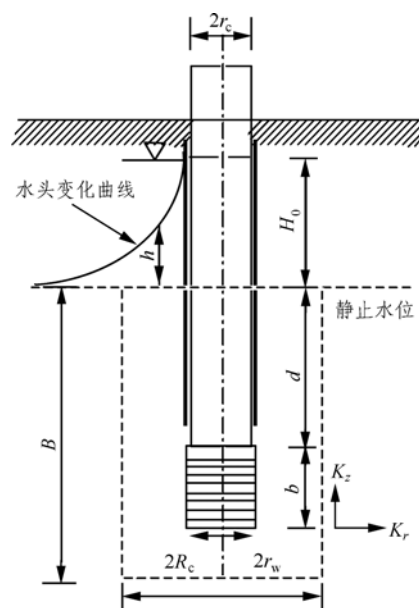


图6 Bouwer 和 Rice 几何模型

Fig.6 Bouwer and Rice geometrical model

H. Bouwer 等^[5~7]给出了如下形式的解析解：

$$\ln \left(\frac{H(t)}{H_0} \right) = - \frac{2K_r b t}{r_c^2 \ln(R_e / r_w^e)} \quad (4a)$$

其中，

$$r_w^e = r_w (K_z / K_r)^{0.5} \quad (4)$$

利用直线图解法求得渗透系数为

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w^e)}{2b T_0} \quad (5)$$

式中： b 为过滤器的长度(m)； K_z 为垂向渗透系数(m/s)； T_0 为直线段的斜率。对于 $\ln(R_e / r_w^e)$ 的计算，H. Bouwer 和 R. C. Rice^[5]给出了相应的经验公式。

模型的特点：模型较简单；用直线图解法求参，容易操作；试验初始时刻，无要求水位瞬时改变；

在试验过程中, 潜水含水层的饱和厚度不变, 即潜水面位置不变。

模型的缺点: 当水位响应曲线不是直线时, 给参数估计带来一定的不确定性; 在实践中, 径向渗透系数与垂向渗透系数比值的不确定性, 使参数估计有一定的偏差; 在实践中, 影响半径是一个经验参数, 给参数估计带来一定的不确定性。

④ KGS 模型

KGS 模型是由 Z. Hyder 等^[8]建立和发展起来的。该模型充分利用了 Hvorslev 模型、Cooper 模型及 Bouwer 和 Rice 模型的优点, 克服了它们的缺点, 既考虑了弹性释水效应, 又减小了参数估计对径向渗透系数与垂向渗透系数比值(K_r/K_z)的依赖所产生的不确定性, 适用范围更广泛。

Z. Hyder 等^[8]给出了如下形式的解析解:

$$H(t)/H_0 = f(\beta, \alpha, \varphi, d/b, B) \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} \beta &= K_r B t / r_c^2 \\ \alpha &= (2r_w^2 S_s b) / r_c^2 \\ \varphi &= r_w (K_z / K_r)^{0.5} / b \end{aligned}$$

利用配线法求参, 求参过程较复杂, Z. Hyder 等^[8]开发了相应的计算程序, 在 AQTTEST 等商用软件中也有 KGS 模型的分析模块。

(2) 欠阻尼衰减模型

在强渗透性的均质各向同性多孔介质含水层中进行斯拉格试验时, 水头-时间响应曲线往往不是呈指数衰减而是呈欠阻尼衰减, 如图 5 所示。前面所述的模型都不能描述这一变化过程, 许多学者基于欠阻尼振动理论建立了相关的数学模型并推导出解析解, 其中比较有代表性的模型是 Van der Kamp 模型。

Van der Kamp 模型由 Van der Damp 等学者建立和发展起来的^[9]。其适用条件是: 强渗透性的均质各向同性多孔介质; 完整承压井。

其解析解形式如下:

$$h_e(t_e) = e^{-(C_e/2)t_e} \cos(\omega_e t_e) \quad (7)$$

式中: h_e , t_e , C_e , ω_e 均为量纲一的参数, 其表达式分别如下:

$$h_e = h / H_0 \quad (8)$$

$$t_e = (g / L_e)^{0.5} t \quad (9)$$

$$\omega_e = 2\omega(4\omega^2 + C^2)^{-0.5} \quad (10)$$

$$L_e = g / [\omega^2 + (C/2)^2] \quad (11)$$

$$C_e = \sqrt{g / L_e} \frac{r_c^2 \ln[(1.27 / r_w^2)(L_e / g)^{0.5}(K_r / S_s)]}{8K_r B} \quad (12)$$

式中: C , ω 分别为阻尼系数和阻尼震荡频率。

模型的特点: 水位响应曲线呈欠阻尼衰减, 这和传统的指数形式衰减完全不同, 如图 5 所示。参数估算过程较复杂; 储水率和钻孔结构特征参数的不确定性对参数 K_r 估算影响较小; 水位瞬时改变量宜小不宜大, 建议小于 10 cm, 其不确定性对参数 K_r 估算影响较小; 不考虑内摩阻力效应。

模型的缺点: 如果试验段的埋深较大, 套管直径较大, 则水位振动衰减很慢, 内摩阻力效应明显。

3.2.2 非线性模型

在野外实践中, 对数水头-时间曲线经常不是直线而是下凹曲线, 如果利用直线图解法(如 Hvorslev 模型及 Bouwer 和 Rice 模型)分析这类试验数据, 必然给参数估计带来较大的不确定性。C. D. McElwee 和 M. A. Zenner^[10]认为, 不能用线性模型来描述上述问题, 应该建立非线性模型来解决上述问题, 即试验过程中非线性摩擦水头损失不可忽略, 同时由于水头瞬时变化而产生的惯性效应不可忽略, 还需考虑非达西流和套管的变径对试验的影响。基于这一思想, C. D. McElwee 和 M. A. Zenner^[10]推导出 Hvorslev 模型的水位变化控制方程如下:

$$\begin{aligned} (h + z_0 + b + \beta) \frac{d^2 h}{dt^2} + A \left| \frac{dh}{dt} \right| \frac{dh}{dt} + \\ \frac{g \pi r_c^2}{FK} \left(\frac{dh}{dt} \right) + gh = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: h 为钻孔中水位变化(m), z_0 为过滤器顶端到静止水位的距离(m), β 为与管径变化有关的参数, A 为与非线性水头损失有关的参数, g 为重力加速度, F 为 Hvorslev 形状因子, K 为渗透系数(m/s)。

C. D. McElwee 和 M. A. Zenner^[10]利用该模型解决了一些实际问题, 并进一步指出在强渗透性含水层中的斯拉格试验非线性效应非常明显。

但是从上述控制方程可以看出, 该模型的缺点是: 模型太复杂; 没有解析解, 利用数值法求参; 参数估算过程繁琐。

3.2.3 其他模型

尽管斯拉格试验的理论模型(包括改进模型)超过 50 种, 但是比较有代表性的、被普遍接受并广泛应用的模型主要有上述几种。这些模型都有一个共

同的假设条件,即均质多孔介质含水层。对于非均质裂隙含水介质,上述模型受到限制。针对裂隙介质中的斯拉格试验,K. Karasaki 等^[11]建立了离散裂隙模型,J. A. Barker 等^[12, 13]建立了双重介质模型。这些模型具有一定的理论价值,但是其参数估算过程较繁锁。在野外实践中,特别是在处理非均质问题时,更多采用一些技术手段和等效多孔介质方法来处理这类问题,如利用双栓塞将此裂隙带和彼裂隙带隔离开,然后运用多孔介质模型分析试验数据。上述各类模型的适用范围和优缺点列于表 1。

4 斯拉格试验技术特点

斯拉格试验具有以下显著特点:

- (1) 既无需从含水层抽出大量的地下水也无需向含水层注入大量的水,因而既不必考虑对抽出的地下水进行储存和处理的问题,也不必担心注水可能造成含水层污染的问题。在环境水文地质调查中,抽水试验抽出的大量地下水的储存和处理是一个非常费时、费力、费钱的问题,在干旱缺水地区开展注水试验需要对水源特别计划。而斯拉格试验很好地解决了这些问题。
- (2) 试验简单。如前所述,水位瞬时改变后,

仅仅需要记录水位随时间的变化。

- (3) 试验历时相对较短。无论对于高渗透性含水层还是低渗透性含水层,相对于其他现场水文地质试验,斯拉格试验历时较短。特别是对于低渗透性或极低渗透性岩体,斯拉格试验具有更显著的优越性。

- (4) 试验成本较低。斯拉格试验需要的设备(压力测量设备和定体积圆柱体等)和人力(1 个或 2 个人)较少,因而成本极低。尽管闭合-拉格试验需要更复杂的设备,但是对于低渗透性岩体来说,斯拉格试验具有历时较短,无地下水需要处理,估算的参数较实验室测量更具代表性等优点,因此,其成本仍然相对较低。

- (5) 适用于低渗透性岩体渗透参数的估计。闭合-拉格试验技术较好地克服了在低渗透性岩体中进行渗透试验历时较长的缺点,具有历时较短、参数精度高等特点。

但是,斯拉格试验估算的渗透参数仅代表钻孔周围很有限半径范围内含水层的参数,即斯拉格试验的影响半径很小,视具体的地质条件而定,十几米、几米或更小。通常认为,斯拉格试验的影响半径是试验段过滤器半径的 100 倍。另外,成井工艺和钻孔安装等活动对斯拉格试验的参数估计有重

表 1 斯拉格试验理论模型及其优缺点
Table 1 Theoretical models for slug test and their merits and faults

模型名称	适用条件	优点	缺点
Hvorslev 模型	承压完整井;均质多孔介质含水层;达西稳定流;忽略弹性储水效应	模型较简单;用直线图解法求参,容易操作;试验初始时刻,无需求水位瞬时改变	忽略弹性储水效应;参数估计有一定的不确定性;径向与垂向渗透系数比值选择有一定不确定性,影响半径是一个经验参数
Cooper 模型	承压完整井,均质各向同性多孔介质;无限平面水平含水层;弹性储水效应不可忽略	模型较简单;用标准配线法求参;可以估算含水介质的储水系数	参数估计有一定的不确定性,特别是对含水层储水系数的估算影响较大;对于强渗透性含水介质来说,要求水位瞬时改变较难
Bouwer 和 Rice 模型	非承压含水层;均质各向异性多孔介质;定水头有限直径圆形边界条件;忽略弹性储水效应;在试验过程中,潜水面位置不变	模型较简单;用直线图解法求参,容易操作;试验初始时刻,无需求水位瞬时改变	当水位响应曲线不是直线时,给参数估计带来一定的不确定性;径向与垂向渗透系数比值的不确定性,使参数估计有一定的偏差;影响半径是一个经验参数,给参数估计带来一定的不确定性
KGS 模型	适用于上述 3 种模型的条件,考虑了弹性释水效应,适用范围更广泛	相对于上述 3 种模型而言,减小了参数估计对径向与垂向渗透系数比值(K_r/K_v)的依赖所产生的不确定性。	利用配线法求参,求参过程较复杂
Van der Kamp 模型	强渗透性的均质各向同性多孔介质;承压完整井	水位响应曲线呈欠阻尼衰减;储水系数和钻孔结构特征参数的不确定性对参数 K 估算影响较小;不考虑内摩阻力效应	如果试验段的埋深较大,套管直径较大,则水位震动衰减很慢,内摩阻力效应明显
非线性模型	中低渗透性多孔介质;承压完整井	考虑了非线性摩擦水头损失效应和非达西流与套管的变径对试验的影响	模型太复杂;没有解析解,利用数值法求参;参数估算过程繁琐

要影响。特别是在强渗透性含水层, 如松散沉积岩地区, 成井后需要安装套管、过滤层和过滤网等以确保孔壁稳定。如节 3.2 所述, 渗透系数的计算与钻孔、套管、竖管的半径有关, 与过滤器的安装位置和半径有关, 与洗井质量有关。因而, 成井工艺和钻孔安装等活动对斯拉格试验的参数估计有很大的影响。

基于斯拉格试验技术的这些不足和局限性, 许多国家针对这一技术制定了专门的技术标准和规范, 对试验的设计、现场实施和数据分析等过程进行严格的规范和控制。同时, 一些学者^[14, 15]从理论和技术等方面也提出了解决这些问题的建议和措施。

5 斯拉格试验技术应用

斯拉格试验技术广泛应用于诸多领域, 估算含水层的渗透参数。斯拉格试验获得的参数应用于地下水污染物运移预测、预报和制定地下水修复计划。在农田水文地质应用方面, 斯拉格试验获得的参数用于降低浅层地下水位的排水系统设计; 在供水水文地质野外调查活动中, 斯拉格试验获得的参数可用于大规模长时间抽水试验设计。在石油和煤层气领域, 斯拉格试验获得的参数用于评价某一特定的产油或产气层潜在的经济开采能力。近年来, 斯拉格试验在以下两个方面的应用体现了这项试验技术的重要性和先进性。

(1) 评价渗透系数在空间上的变化特征

在地下水污染场地野外水文地质调查过程中, 获得含水层横向和垂向渗透系数是野外调查的重要内容。通常, 通过在研究区至少布置 2 个钻孔并开展抽水试验的技术来获得含水层横向和垂向渗透系数。显然这一技术具有成本高的特点, 而且需要储存和处理抽出来的地下水。利用多层斯拉格试验技术^[16, 17]就克服了这些困难。多层斯拉格试验技术的核心就是前一节提到的双栓塞斯拉格试验。

(2) 评价低渗透性和极低渗透性岩体的渗透特征

近年来, 斯拉格试验技术广泛应用于核废物深地质处置低渗透性($K < 10^{-9}$ m/s)岩体渗透参数野外测量研究中。在我国水利水电和岩土工程领域, 主要采用常规压水试验和三段压水试验技术现场测量

低渗透性岩体的渗透参数。这两种试验都需要额外注入水, 需要准确测量注入流量, 在干旱缺水地区受到限制, 而且对于极低渗透性岩体($K < 10^{-12}$ m/s)准确测量注入流量比较困难。三段压水试验需要至少 2 钻孔, 成本较高。如前所述, 闭合-斯拉格试验技术很好地服了这些困难, 试验成本较低。根据 J. D. Bredehoeft 和 S. S. Papadopoulos^[3]的研究, 利用闭合-拉格试验技术可以在野外测量渗透系数小于 10^{-13} m/s 的岩体。

6 结 论

斯拉格试验是一种应用较广泛的现场获取岩体渗透参数的重要手段。由于斯拉格试验技术具有操作简单、需要试验设备相对较少、不存在水的储存和处理问题、试验历时较短、成本较低等优点, 被广泛应用于诸多领域, 估算含水层的渗透参数。经过 50 多年的发展, 斯拉格试验发展成为技术成熟、体系完备的水文地质试验技术。其技术体系包括: (1) 简单斯拉格试验技术, 适用于中等渗透性和强渗透性介质, 埋深不大的单一含水层渗透特征评价; (2) 栓塞斯拉格试验技术, 适用于中等渗透性和低渗透性介质, 多重含水层系统分层进行渗透特征评价; (3) 闭合-斯拉格试验技术, 适用于低渗透性和极低渗透性岩体渗透特征评价。完备的理论体系解决了在承压与潜水含水层、完整井与非完整井、均质各向同性与各向异性介质中斯拉格试验数据分析问题。近年来, 斯拉格试验技术在评价渗透系数在空间上的变化特征和低渗透性及极渗透性岩体的渗透特征等方面的应用表明, 斯格试验技术是一项重要的、先进的现场水文地质试验技术。

但是, 对于非均质裂隙介质, 相应的理论模型仍需要完善。在野外实践中, 更多采用一些技术手段和等效多孔介质方法来解决介质的非均质性问题。在评价极低渗透性岩体的渗透特征时, 由于斯拉格试验历时相对较长, 温度的变化、试验设备的非线性压缩对试验的影响等问题还需进一步研究。

参考文献(References):

- [1] BUTLER JR J J. The design, performance, and analysis of slug tests[M]. New York: Lewis Publishers, 1997: 133-136.

- [2] MCELWEE C D. Application of a nonlinear slug test model[J]. Ground Water, 2001, 39(5) : 737 – 744.
- [3] 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.
- [4] COOPER H H, BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS I S. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water[J]. Water Resources Research, 1967, 3(1) : 263 – 269.
- [5] BOUWER H, RICE R C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3) : 423 – 428.
- [6] ZLOTNIK V A. Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers[J]. Ground Water, 1994, 32(5) : 761 – 766.
- [7] HYDER Z, BUTLER JR J J. Slug tests in unconfined formations : an assessment of the Bouwer and Rice technique[J]. Ground Water, 1995, 33(1) : 16 – 22.
- [8] HYDER Z, BUTLER JR J J, MCELWEE C D, et al. Slug tests in partially penetrating wells[J]. Water Resources Research, 1994, 30(11) : 2 945 – 2 958.
- [9] KRUSEMAN G P, DE RIDDER N A. Analysis and evaluation of pumping test data[M]. Netherlands : International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1991 : 238 – 246.
- [10] MCELWEE C D, ZENNER M A. A nonlinear model for analysis of slug test data[J]. Water Resources Research, 1998, 34(1) : 55 – 66.
- [11] KARASAKI K, LONG J C S, WITHERSPOON P A. Analytical models of slug tests[J]. Water Resources Research, 1988, 24(1) : 115 – 126.
- [12] BARKER J A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock[J]. Water Resources Research, 1988, 24(10) : 1 796 – 1 804.
- [13] BARKER J A, BLACK J H. Slug tests in fissured aquifers[J]. Water Resources Research, 1983, 19(6) : 1 558 – 1 564.
- [14] BUTLER JR J J, MCELWEE C D, LIU W. Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests[J]. Ground Water, 1996, 34(3) : 480 – 490.
- [15] MCELWEE C D. Improving the analysis of slug tests[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(3/4) : 122 – 133.
- [16] ZLOTNIK V A, MCGUIRE V L. Multi-level slug tests in highly permeable formations : 1. modification of the Springer-Gelhar(SG) model[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/4) : 271 – 282.
- [17] ZLOTNIK V A, MCGUIRE V L. Multi-level slug tests in highly permeable formations : 2. hydraulic conductivity identification, method verification and field applications[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/4) : 283 – 296.