

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

基于微水试验求解高渗透性承压含水层水文地质参数

郭涵轩,王全荣,潘可欣,施文光

Inversion of hydraulic parameters of high permeability confined aquifer based on slug test

GUO Hanxuan, WANG Quanrong, PAN Kexin, and SHI Wenguang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311013

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log 张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62–62

基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography 赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 姬中奎, 曹祖宝 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 1–9

基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析

Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model 邓祺文,陈刚,郑可,施雯,胡成 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 17-23

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity 刘蓉,曹国亮,赵勇,陆垂裕,孙青言,严聆嘉,彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi–source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes 王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311013

郭涵轩,王全荣,潘可欣,等.基于微水试验求解高渗透性承压含水层水文地质参数 [J].水文地质工程地质,2024,51(4):108-116.

GUO Hanxuan, WANG Quanrong, PAN Kexin, et al. Inversion of hydraulic parameters of high permeability confined aquifer based on slug test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 108-116.

基于微水试验求解高渗透性承压含水层水文地质参数

郭涵轩,王全荣,潘可欣,施文光

(中国地质大学(武汉)环境学院,湖北武汉 430078)

摘要:为了提高高渗透性承压含水层渗透系数与储水率等水文地质参数的反演精度,科学解释并筒水位的非线性振荡现 象,本研究建立了考虑表皮效应和非达西流效应耦合惯性力作用的微水试验模型。模型中表皮效应采用 Robbin 边界条件 描述,非达西流效应采用 Forchheimer 方程刻画,惯性力作用采用动量平衡方程表达。利用 Laplace 变换法推导模型的解析 解,基于现场试验数据,分析 3 种因素对反演水文地质参数的影响。结果表明表皮效应、非达西流效应与惯性力作用对参 数反演结果的影响均不能忽视。无因次表皮因子(*S*_w)值、Forchheimer 系数(γ)值与瞬时注水后并筒水位与承压含水层 隔水顶板之间的垂直距离(*l*)3个值越大,并筒水位恢复速度越慢;*S*_w值越大,并筒水位振荡幅度越小,而γ值和*l*值越大, 并筒水位振荡幅度越大。忽略表皮效应、非达西流效应或惯性力作用均导致渗透系数与储水率的反演结果偏小。研究结 果为裂隙承压含水层中水文地质参数的反演提供了一种合理的理论基础和技术依据。 关键词:微水试验;表皮效应;非达西流效应;惯性力作用;渗透系数;储水率

中图分类号: P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)04-0108-09

Inversion of hydraulic parameters of high permeability confined aquifer based on slug test

GUO Hanxuan, WANG Quanrong, PAN Kexin, SHI Wenguang (School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China)

Abstract: To improve the accuracy of estimated hydraulic parameters such as hydraulic conductivity and specific storage in confined aquifers with high permeability, and provide a scientific explanation for the nonlinear oscillation phenomenon of test well water levels, this study established a slug test model that takes into account the skin and non-Darcy flow effects, as well as inertial force action. The skin effect was described by Robbin boundary conditions and the non-Darcy flow effect was explained by the Forchheimer equation; momentum balance equation expressed the inertial force action. The Laplace transform method was used to derive the analytical solution of this model. Then the impacts of three factors on estimating of hydraulic parameters were analyzed using field data. The results show that the influences of skin effect, non-Darcy flow effect, and inertia force action on the parameter estimation cannot be ignored. More specifically, the higher values of the dimensionless skin factor (S_w), the Forchheimer coefficient (γ), and the vertical distance (l) between the water level

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA0715900);湖北省自然科学基金杰出青年基金项目(2021CFA089)

第一作者: 郭涵轩(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: guohanxuan@cug.edu.cn

通讯作者: 王全荣(1984—), 男, 教授, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: wangqr@cug.edu.cn

in the well and the top of the confined aquifer after instantaneous water injection, the slower rate of water level recovery. As the value of S_w increases, the amplitude of water level oscillation decreases, whereas the amplitudes of water level oscillation increase with larger values of γ and l. Ignoring the skin effect, non-Darcy flow effect or inertia force will lead to underestimating hydraulic conductivity and specific storage. The results can provide theoretical guidance and technical support for the inversion of hydraulic parameters in fractured confined aquifers. **Keywords:** slug tests; skin effect; non-Darcian flow; inertial force action; hydraulic conductivity; specific storage

水文地质参数如渗透系数(K)、储水率(S_s) 等是研究地下水运动的重要参数,也是开展地下水资 源评价、地下水数值模拟等的关键参数[1-4]。由于野 外含水层中的这些参数无法直接测得,需通过现场试 验获得。微水试验是一种快捷测定水文地质参数的 现场试验方法,与抽水试验相比,因其成本低且耗时 短备受青睐¹⁰。国内外学者对微水试验理论模型展开 了大量的研究^[7-10]。Hvorslev^[11]与 Bouwer 等^[12]分别 针对承压含水层和潜水含水层,提出微水试验模型, 但是假定地下水运动为稳定流。Cooper等^[13]推导了 承压含水层完整井微水试验的非稳定流模型。然而, 这些模型均忽略了井筒水流的惯性力作用,导致计算 出的井筒水位恢复曲线为指数衰减型。事实上,在裂 隙承压含水层中进行微水试验时,通常观察到井筒水 位恢复曲线呈现出非线性振荡的特征[14-17],因此,忽 略惯性力作用的模型不再适用。

为了确保井筒的安全性,需要在井筒滤水管周围充 填滤料,叠加泥浆入侵以及生物化学堵塞等因素,井筒 井管附近区域的渗透系数等发生变化,称之为表皮效 应^[18]。井筒套管周围水流的水力梯度和流速较大,会 产生非达西流效应^[19]。Lin等^[20]忽略因水位变化引起 的惯性力作用,构建了一个完整井条件下耦合表皮效 应和非达西流效应的微水试验理论模型,该模型用于 解释井筒水位恢复时产生的非线性现象。在渗透性 相对较高的裂隙承压含水层中^[21],井筒水位恢复速度 相对较快,由于惯性力作用井筒水位会产生振荡现象。 现有的微水试验理论模型尚未综合考虑表皮效应、非 达西流效应与惯性力作用,而这些因素在井筒水位恢 复曲线呈现非线性振荡现象时具有关键作用。

在本研究中,将综合考虑表皮效应、非达西流效 应和惯性力作用,建立新的微水试验理论模型,其中 表皮效应采用 Robbin 边界条件描述,非达西流效应采 用 Forchheimer 方程刻画,惯性力作用采用动量平衡方 程表达。采用 Laplace 变换方法得到模型的解析解。 通过理论分析和现场试验数据分析,研究无因次表皮 因子(*S*_w)值、Forchheimer系数(γ)值以及瞬时注 水后井筒水位与承压含水层隔水顶板之间的垂直距 离(*l*)值对于水文地质参数反演的影响,为裂隙承压 含水层中水文地质参数的反演提供一种合理的理论 基础和技术依据。

1 模型的建立及求解

1.1 模型的建立

微水试验中,使用一定激发手段使井筒水位发生 瞬时变化,通过观测和记录井筒水位-时间的动态变化 数据,并与相应理论模型的标准曲线拟合,进而计算 井筒附近水文地质参数的单井水力试验^[22-23]。本研 究在 Lin 等^[20]的微水试验理论模型的基础上,建立考 虑表皮效应与非达西流效应耦合惯性力作用的裂隙 承压含水层微水试验理论模型。模型示意图如图 1。 假设在厚度为b且水平分布的裂隙承压含水层中进行 微水试验。r_w为井筒井径,r_c为连接管管径。含水层 初始水头为 0。瞬时注水后,井筒水位迅速上升至H₀, 即井筒初始水位位移为H₀,此时井筒水位与承压含水 层隔水顶板之间的垂直距离为*l*。井筒为完整井。记 录瞬时注水后井筒水位(H)随时间(t)的变化,用



建立的微水试验理论模型反演水文地质参数。

本研究建立的理论模型综合考虑井筒附近存在 表皮效应、含水层内地下水流动为非达西流动、井筒 中的水位恢复速度相对较快,存在惯性力作用。

承压含水层中地下水为径向流动,其控制方程可 以表达为:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) \tag{1}$$

式中: S_s——储水率/m⁻¹;

K——渗透系数/(m·s⁻¹)。

初始条件与边界条件分别为:

$$h(r) = 0, t = 0$$
 (2)

$$\lim h = 0 \tag{3}$$

井筒与含水层之间的水量交换满足质量守恒定律:

$$C_{\rm w} \frac{\partial H}{\partial t} \bigg|_{r=r_{\rm w}} = -Aq \tag{4}$$

$$C_{\rm w} = \pi r_{\rm c}^2 \tag{5}$$

$$A = 2\pi r_{\rm w} b \tag{6}$$

式中: C_w——井筒横截面面积/m²;

r.——井筒井径/m;

- H-----井筒水位/m;
- A——连接管与含水层接触面积/m²;

*r*_w──连接管管径/m;

q——单宽流量/(m·s⁻¹)。

考虑到非达西流效应的影响,采用 Forchheimer 方 程刻画单宽流量:

$$q + \gamma q^2 = -K \left. \frac{\partial h}{\partial r} \right|_{r=r_{\rm w}} \tag{7}$$

式中: γ ——Forchheimer 系数/($s \cdot m^{-1}$)。

采用 Robbin 边界条件描述表皮效应:

$$h_{\rm w}(t) = \left(h - S_{\rm w} r_{\rm w} \frac{\partial h}{\partial r}\right)\Big|_{r=r_{\rm w}}$$
(8)

式中: h_w——井边含水层水位的圆周平均值/m;

*S*_w——无因次表皮因子。

井筒中水位恢复速度较快,存在惯性力作用,利 用动量守恒方程将*h*w与*H*(*t*)联系起来:

$$\frac{d^2 H(t)}{dt^2} + \frac{8vL}{r_{\rm c}^2 L_{\rm e}} \frac{dH(t)}{dt} + \frac{g}{L_{\rm e}} H(t) = \frac{g}{L_{\rm e}} h_{\rm w}(t)$$
(9)

$$L = l + \frac{b}{2} \left(\frac{r_{\rm c}}{r_{\rm w}}\right)^4$$
$$L_{\rm e} = l + \frac{b}{2} \left(\frac{r_{\rm c}}{r_{\rm w}}\right)^2 + \frac{b}{2} \left(\frac{r_{\rm c}}{r_{\rm w}}\right)^4 \tag{10}$$

式中: v——水动力黏滞系数/(m²·s⁻¹),取值为 1.2× 10⁻⁶ m²/s;

g----重力加速度/(m·s⁻²),取值为 9.8 m/s²;

L。——井筒有效井长/m,参考文献 [7] 给出;

1——瞬时注水后井筒水位与承压含水层隔水顶 板之间的垂直距离/m,参考文献[24]给出。

试验开始时井筒初始水位位移为H₀,故井筒内水 位初始条件为:

$$H(t) = H_0, \ t = 0 \tag{11}$$

式中:H₀——井筒初始水位位移/m。

试验开始时的瞬间,井筒内水位没有回升,即水 位回升速度为0,该初始条件设为:

$$\frac{\mathrm{d}H(t=0)}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{12}$$

1.2 模型的解

式(1)—(12)组成微水试验的完整数学模型,根据 所得控制方程配合相应的初始条件和边界条件,用适 当的无因次参数对整个模型进行无因次转换,运用 Laplace 变换及 Stehfest 数值逆变换求解建立的数学模 型。经 Laplace 变换后的数学模型为:

$$\omega p \overline{h_{\rm D}} = \frac{\mathrm{d}^2 \overline{h_{\rm D}}}{\mathrm{d} r_{\rm D}^2} + \frac{1}{r_{\rm D}} \frac{\partial \overline{h_{\rm D}}}{\partial r_{\rm D}} \tag{13}$$

$$\lim_{r_{\rm D}\to\infty} \overline{h_{\rm D}} = 0 \tag{14}$$

$$p\overline{H}_{\rm D} - H_{\rm 0D} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4p\gamma_{\rm D}} \frac{\partial\overline{h}_{\rm D}}{\partial r_{\rm D}}\Big|_{r_{\rm D}=1}}{2p\gamma_{\rm D}}$$
(15)

$$\overline{h}_{\rm wD}(p) = \left(\overline{h}_{\rm D} - S_{\rm w} \frac{\partial \overline{h}_{\rm D}}{\partial r_{\rm D}}\right)\Big|_{r_{\rm D}=1}$$
(16)

 $\overline{h_{\text{wD}}}(p) =$

$$\beta p^{2} \overline{H_{D}}(p) - \beta p H_{0D} + \omega F_{1} p \overline{H_{D}}(p) - \omega F_{1} H_{0D} + \overline{H_{D}}(p)$$
(17)
式(13)—(17)中的变量可由下列各式计算得到:

$$h_{\rm D} = \frac{h}{H_0} \tag{18}$$

$$H_{\rm D} = \frac{H}{H_0} \tag{19}$$

$$H_{0D} = \frac{H_0}{H_0} = 1$$
 (20)

$$r_{\rm D} = \frac{r}{r_{\rm w}} \tag{22}$$

$$\omega = \frac{Ar_{\rm w}S_{\rm s}}{C_{\rm w}} \tag{23}$$

$$\gamma_{\rm D} = \frac{H_0 K \gamma}{r_{\rm w}} \tag{24}$$

$$\beta = \frac{L_{\rm e}}{g} \left(\frac{KA}{r_{\rm w} C_{\rm w}} \right)^2 \tag{25}$$

$$F_1 = \frac{8vLK}{r_D^2 g r_w^2 S_s}$$
(26)

$$q_{\rm D} = \frac{r_{\rm w}q}{H_0K} \tag{27}$$

式中:"[¬]"——Laplace 域中的函数;

p——Laplace转换变量;

下标 D——无因次。

式(13)的通解为:

$$\overline{h_{\rm D}} = \mathbf{I}_0 \left(\sqrt{wp} r_{\rm D} \right) C_1 + \mathbf{K}_0 \left(\sqrt{wp} r_{\rm D} \right) C_2$$
(28)

经过计算得到:

 $C_1 = 0$

$$C_2 = \frac{X + 2YM \pm \sqrt{4XYM + X^2 + 4M^2}}{2M^2}$$
(29)

$$X = 4p\gamma_{\rm D} \mathbf{K}_{\rm I} \left(\sqrt{wp}\right) \sqrt{wp} \tag{30}$$

$$Y = 1 + \frac{2\gamma_{\rm D}p}{\beta p^2 + \omega p F_1 + 1} \tag{31}$$

$$M = \frac{2\gamma_{\rm D} p^2 \left(K_0 \left(\sqrt{wp} \right) + S_w K_1 \left(\sqrt{wp} \right) \sqrt{wp} \right)}{\beta p^2 + \omega p F_1 + 1}$$
(32)

含水层水位与井筒水位在 Laplace 域的解为:

$$\overline{h_{\rm D}} = C_2 N \tag{33}$$

$$\overline{H_{\rm D}} = \frac{E - S_{\rm w}F + [\beta p + \omega F_{\rm l}]}{[\beta p^2 + \omega F_{\rm l}p + 1]}$$
(34)

$$N = \mathbf{K}_0 \left(\sqrt{wp} r_{\rm D} \right) \tag{35}$$

$$E = \mathbf{K}_0(\sqrt{wp})C_2 \tag{36}$$

$$F = -\mathbf{K}_1(\sqrt{wp})\sqrt{wp}C_2 \tag{37}$$

式中: I₀——0 阶第一类修正贝塞尔函数;

 K_0 、 K_1 ——0级、1级第二类修正贝赛尔函数。

式(33)(34)为模型在 Laplace 域的解析解,该解包 含 Bessel 函数,无法利用解析逆变换的方法进行求 解,本研究利用 Stehfest 数值逆变换方法得到模型在 实数空间下的解。

1.3 模型特点

本文提出的模型在特殊条件下能够还原为前人的模型。在渗透性相对较低的承压含水层中进行微水试验,并筒水位恢复速度较慢,在这种情况下,惯性力作用可以被忽略,近似认为*H*(*t*)瞬间等于*h*_w(*t*),此时本研究建立的理论模型还原为Lin等^[20]建立的耦合表皮效应与非达西流效应的承压含水层微水试验理论模型。当不考虑表皮效应与非达西流效应、忽略惯性力作用,本研究建立的理论模型还原为Cooper等^[13]建立的完整并条件下承压含水层微水试验的非稳定流模型。

2 模型的验证

本研究以 Lin 等^[20]的解析模型为标准, 验证式(33) (34)的推导过程以及 Stehfest 数值逆变换的精度。假 设在该微水试验中井筒井径及连接管管径相同, 即 $r_c = r_w = 0.05 \text{ m}, 忽略惯性力作用, 式(10)为H(t) = h_w(t),$ 其他参数见表 1。表 1 中的参数值源于文献 [25]。

表 1 模型参数 Table 1 Parameters used in this study

参数	取值
承压含水层厚度/m	1.5
井筒初始水位位移/m	0.35
储水率/m⁻¹	5.0×10 ⁻⁶
渗透系数/(m·s ⁻¹)	9.1×10 ⁻⁴
连接管管径/m	5.0×10 ⁻²
井筒井径/m	5.0×10 ⁻²
无因次表皮因子	2.8
Forchheimer 系数/(s·m ⁻¹)	1.0×10^{3}
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.8
地下水运动黏滞系数/(m²·s-1)	1.2×10 ⁻⁶
瞬时注水后井筒水位与承压含水层隔水顶板之间的垂直距离/m	5.0

选取3个不同位置, r=r_w=0.05 m、r=1 m和r= 5 m, 作为观测点, 对比本研究与 Lin 等^[20] 模型的结 果, 如图2所示。本研究的解与前人模型结果拟合效 果较好, 表明新模型的推导过程无误, 数值逆变换的 精度可以接受。

3 结果

表皮效应、非达西流效应和惯性力作用如何影响 井筒内水位变化,进而影响水文地质参数的反演,是 模型理论分析的重点。要了解3种因素对水文地质 参数反演的影响,首先要探究井筒水位在不同水文地 质参数条件下的变化规律。本文分别设置不同的K、







S_s、S_w、γ与*l*值展开5组数值模拟,探究井筒水位在 3种因素影响下的变化规律。

本研究首先采用构建的模型测试不同的 $K \pi S_s$ 值 对井筒内水位恢复的影响,测试结果见图 3。其中,K值取值范围为5.1×10⁻⁴~9.1×10⁻⁴ m/s, S_s 值取值范围 为5×10⁻⁶~5×10⁻⁴ m⁻¹, $K = S_s$ 值的选取源于 Dausse 等^[25] 的研究,其他模型参数见表 1。





基于本研究建立的模型,分别采用4组不同的 S_w 值,分别为0,1,2,3,研究表皮效应对井筒水位恢复 的影响,其中 S_w =0表明含水层内无表皮效应;采用 4组不同的 γ 值,分别为0,1000,2000,3000 s/m,研 究非达西流效应对井筒水位恢复的影响,其中 γ =0表 明含水层内地下水运动满足达西定律;采用3组不同 的l值,分别为5,50,100 m,研究惯性力作用对井筒水 位恢复的影响,由于 Lin 等^[20]的模型没有考虑惯性力 作用,增加1组 Lin 等^[20]的模型进行对比研究。

图 4 为不同S_w、γ及l值下井筒中的非线性振荡响应。



Fig. 4 The variations of water level in the wellbore for different $S_{w,\gamma}\gamma$ and l

结果表明选取合适的S_w、γ与l值对反演高渗透性 承压含水层的水文地质参数是必要的。

4 讨论

渗透系数与储水率是描述含水层性质的主要水 文地质参数,如图3所示,在其他参数均相同的情况 下,渗透系数与储水率越大井筒内水位恢复得越快, 试验井水位呈现出非线性振荡的特征越明显。

4.1 表皮效应与非达西流效应对井筒水位恢复的影响

无因次表皮因子 (S_w) 是描述表皮效应的主要 参数, Forchheimer 系数 (γ) 是描述非达西流效应的 主要参数。

Lin 等^[20]的研究结果表明,表皮效应与非达西流 效应对井筒水位的恢复速度均有影响,在井筒水位恢 复初期, *S*_w值和γ值越大,水位恢复速度越慢。

本研究结果与Lin等^[20]的研究得出的结论一致。 图 4 表示井筒水位在不同S_w值和γ值下的非线性振荡 响应,可以用于预测表皮效应与非达西流效应是否会 影响井内水位变化继而影响水文地质参数的反演。 表皮效应与非达西流效应对微水试验结果影响显 著。对于井筒水位恢复速度,两者共同表现为:当S_w 值和γ值越大,水位恢复速度越慢。对于井筒水位恢 复的振荡幅度,两者又有所区别:S_w值越大,水位的振 荡幅度越小,而γ值越大,水位的振荡幅度越大。

4.2 惯性力作用对并筒水位恢复的影响

对于渗透性相对较高的裂隙承压含水层,连接管 中水位恢复相对较快,由于惯性力作用,H(t)是振荡 的。瞬时注水后井筒水位与承压含水层隔水顶板之 间的垂直距离(l)是描述惯性力作用的主要参数,可 以用于预测惯性力作用是否会影响井内水位变化继 而影响水文地质参数的反演。

图 4结果表明,瞬时注水后井筒水位与承压含水 层隔水顶板之间的垂直距离对微水试验的结果影响 显著。因此,在微水试验过程中惯性力作用不能忽 视。对比发现/值越大,井筒水位恢复速度越慢,水位 的振荡幅度越明显。

5 实例分析

美国南达科他州(South Dakota)的斯皮尔菲什市 (Spearfish)地区附近的明尼卢萨(Minnelusa)含水层, 厚度约为152.4 m。该含水层中存在许多构造裂隙, 对地下水运动产生着深远的影响。Greene 等^[26]采用 Cooper 等^[13] 的解析解对水文地质参数 *K*和*S*。进行反 演, 但在其分析中未考虑到由表皮效应和非达西流效 应引起的水头损失。相比之下, Lin 等^[20] 在反演 *K*和 *S*。时考虑了表皮效应和非达西流效应导致的水头损 失。然而, 上述的研究都忽略了惯性力作用在试验中 起到的关键作用。针对这一点, 仍需进一步的研究和 分析。

本研究选取了 LA-87B、LA-88B 和 LA-88A 井共 计 5 组的观测数据作为分析对象(观测数据来自文 献 [26] 的表 7-9), LA-87B 井的气压(*p*_a)为 44.81 kPa, LA-88B 井的气压分别为 206.84, 82.74, 34.47 kPa, LA-88A 井的气压为 34.47 kPa。井筒井径*r*_c与连接管管 径*r*_w均为 0.061 m。每组试验数据分别使用 Case1 ~ Case4 四种模型进行拟合。其中, Case1 对应考虑非达 西流效应与惯性力作用的模型; Case2 对应考虑表皮效应 与非达西流效应的模型; Case4 对应考虑表皮效应、非 达西流效应与惯性力作用的模型。

在试验数据拟合前,首先需要对观测到的实际数据H(t)做无因次处理,即用观测数据H(t)除以初始水位位移。此外在数据分析时,将 S_w 值与 γ 值作为拟合参数。通过与井筒观测数据进行拟合,确定了Minnelusa含水层的水文地质参数。反演的水文地质参数已列于表 2 中,拟合结果见图 5 – 7。

王全荣等^[27]依据雷诺数(*Re*)判定地下水在承压 含水层中的非达西流动状态:

$$Re = \frac{D_{\rm p}q_{\rm l}}{v} \tag{38}$$

式中: Dp---介质颗粒直径/m;

 q_1 ——地下水平均流速/(m·s⁻¹);

v——地下水运动黏滞系数/(m²·s⁻¹)。

针对 Minnelusa 含水层,设置参数求取临界地下水 平均流速 q_1 : Re = 10, $D_p = 1.05 \times 10^{-3}$ m, $v = 1.2 \times 10^{-6}$ m²/s。 根据式(38),得到 q_1 值为 1.14×10^{-2} m/s。通过q值与 q_1 值进行对比,5组微水试验均存在非达西流。

选取均方根误差(root mean squared error, RMSE) 衡量理论模型计算数据与实际观测数据的拟合情况:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (H_1 - H_s)}$$
(39)

式中: *σ*——均方根误差;

N——井筒水位观测点个数;

Table 2 Tatanice estimation for wers LA-67B, LA-66B, and LA-66A								
	$K/(\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}^{-1})$	$S_{ m s}/{ m s}^{-1}$	$S_{ m w}$	$\gamma/(\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}^{-1})$	<i>l</i> /m	均方根误差		
		L	A-87B, $p_a = 44.81$ kP	a				
Case 1	2.38×10 ⁻⁸	5.20×10 ⁻³	_	1.49×10^{2}	10	4.50×10^{-2}		
Case 2	2.72×10 ⁻⁸	5.20×10 ⁻³	0.10	_	10	6.21×10^{-2}		
Case 3	9.32×10 ⁻⁸	4.65×10 ⁻²	0.09	1.49×10^{2}	_	6.01×10^{-2}		
Case 4	1.19×10 ⁻⁸	4.65×10 ⁻²	0.07	1.49×10^{2}	10	2.30×10^{-2}		
		L	A-88B, $p_a = 206.84$ kl	Pa				
Case 1	1.48×10 ⁻⁷	4.08×10^{-10}	-	4.07×10 ⁵	10	1.21×10^{-1}		
Case 2	1.46×10 ⁻⁷	4.65×10 ⁻¹⁰	0.10	-	10	1.04×10^{-2}		
Case 3	6.25×10 ⁻⁷	6.69×10 ⁻¹¹	34.80	4.07×10 ⁵	_	5.09×10^{-2}		
Case 4	1.38×10 ⁻⁷	6.95×10 ⁻⁷	1.67	4.07×10^{6}	10	4.39×10 ⁻²		
		L	A-88B, $p_a = 82.74$ kP	a				
Case 1	2.26×10 ⁻⁷	1.10×10^{-10}	-	2.63×10 ⁵	10	1.96×10 ⁻¹		
Case 2	1.10×10^{-6}	1.10×10 ⁻⁹	59.70	-	10	8.37×10^{-2}		
Case 3	1.52×10^{-6}	1.70×10^{-10}	59.70	2.63×10 ⁵	_	1.18×10^{-1}		
Case 4	2.17×10^{-6}	3.67×10 ⁻¹⁰	49.70	4.07×10 ⁵	10	1.91×10^{-2}		
		L	A-88B, $p_a = 34.47$ kP	a				
Case 1	3.24×10 ⁻⁷	2.87×10^{-10}	_	7.70×10 ⁴	10	1.37×10^{-1}		
Case 2	7.74×10 ⁻⁷	3.03×10 ⁻⁷	20.30	-	10	8.24×10^{-2}		
Case 3	1.93×10 ⁻⁶	4.25×10^{-10}	11.45	7.70×10 ⁶	_	3.99×10 ⁻²		
Case 4	3.24×10 ⁻⁶	3.94×10^{-10}	28.45	7.70×10 ⁶	10	4.38×10 ⁻²		
		L	A-88A, $p_a = 34.47$ kP	a				
Case 1	5.54×10 ⁻⁷	5.54×10 ⁻¹¹	_	9.13×10 ¹	10	3.42×10 ⁻²		
Case 2	1.34×10 ⁻⁶	4.16×10 ⁻⁸	19.90	_	10	9.10×10 ⁻³		
Case 3	5.27×10^{-7}	5.12×10 ⁻¹¹	0.41	9.13×10 ¹	-	4.37×10^{-2}		
Case 4	5.27×10 ⁻⁷	5.12×10 ⁻¹¹	0.41	9.13×101	10	2.05×10^{-2}		

表 2 LA-87B、LA-88B、LA-88A 井参数估计

Table 2 Parameter estimation for wells LA-87B, LA-88B, and LA-88A







H1——理论模型计算的井筒水位/m;

H_s——实际观测的井筒水位/m。

从表 2 的均方根误差结果看,同时考虑表皮效 应、非达西流效应与惯性力作用的 Case4 模型准确度 高且更稳定。同时, Case4 模型在井筒水位恢复末期, 可以很好地拟合水位恢复速度过快时由于惯性力作用引起的振荡响应。

6 结论

(1)在微水试验过程中,表皮效应、非达西流效 应与惯性力作用对结果的影响不能忽视,当S_w值、γ 值与*l*值越大,水位恢复速度均越慢。对于井筒水位 恢复的振荡幅度,三者又有所区别,S_w值越大,水位 的振荡幅度越小,而γ值和*l*值越大,水位的振荡幅度 越大。

(2)在其他参数相同的条件下,忽略表皮效应
 (S_w=0)、非达西流效应(γ=0)或惯性力作用,会
 低估渗透系数与储水率的反演结果。

(3)在裂隙承压含水层中进行微水试验,井筒水 位通常呈现出非线性振荡的特征。在解释具有非线 性振荡特征的微水试验数据时,需要综合考量S_w值、 y值与l值对井筒水位振荡幅度的影响。





different pressures of 206.84, 82.74, and 34.47 kPa





参考文献(References):

- [1] LIN Jingjing, MA Rui, SUN Ziyong, et al. Assessing the connectivity of a regional fractured aquifer based on a hydraulic conductivity field reversed by multi-well pumping tests and numerical groundwater flow modeling[J]. Journal of Earth Science, 2023, 34(6): 1926-1939.
- [2] 吴延浩,江思珉,吴自军.地下水污染强度及渗透系数场的反演识别研究[J].水文地质工程地质,2023,50(4):193-203.[WU Yanhao, JIANG Simin, WU Zijun. Identification of groundwater pollution intensity and hydraulic conductivity field[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4):193-203. (in Chinese with English abstract)]
- [3] MARIOS C K. Assessment of porous aquifer hydrogeological parameters using automated groundwater level measurements in Greece [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2021, 9(4): 269 – 278.
- 【4】 张俊,刘天罡,董佳秋,等. 含水层层状非均质对地下水流系统的影响[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1715 1725. [ZHANG Jun, LIU Tiangang, DONG Jiaqiu, WANG Xiaoyong, ZHA Yuanyuan, TANG Xiaoping, YIN Lihe, Andrew J. Love. The impact of aquifer layered heterogeneity on groundwater flow system[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1715 1725. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王旭东,韩鹏飞,张锁,等.基于 HYDRUS模拟的 ABCD模型变量及参数物理基础研究[J].水文地质 工程地质,2023,50(5):20-27. [WANG Xudong, HAN Pengfei, ZHANG Suo, et al. Research on the physical basis of variables and parameters of ABCD model based on HYDRUS simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5):20-27. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 万伟锋,李清波,蔡金龙,等.多孔均质含水层中激发强度对微水试验结果的影响[J].水文地质工程地质,2018,45(6):1-6. [WAN Weifeng, LI Qingbo, CAI Jinlong, et al. Research on the influence of the excitation intensity on slug test results in a homogeneous porous aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6):1-6. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KIPP K L J. 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.
- [8] 刘颖, 邵景力. 双重孔隙介质微水试验模型在倾斜裂

隙含水层中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2):1-8. [LIU Ying, SHAO Jingli. Application of a slug test model in the double porosity media to a sloping fractured formation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2):1-8. (in Chinese with English abstract)]

- [9] WANG Quanrong, ZHAN Hongbin, WANG Yanxin. Non-Darcian effect on slug test in a leaky confined aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 747 - 753.
- [10] LIANG Xiuyu, ZHAN Hongbin, ZHANG Youkuan, et al. Underdamped slug tests with unsaturated-saturated flows by considering effects of wellbore skins[J]. Hydrological Processes, 2018, 32: 968 – 980.
- [11] HVORSLEV M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations[M]. Mississippi: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Bulletin, 1951.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] BUTLER J J, ZHAN Xiaoyong. Hydraulic tests in highly permeable aquifers[J]. Water Resources Research, 2004, 40(12): W12402.
- [15] AUDOUIN O, BODIN J. Cross-borehole slug test analysis in a fractured limestone aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(3/4): 510 - 523.
- [16] CARDIFF M, BARRASH W, THOMA M, et al. Information content of slug tests for estimating hydraulic properties in realistic, high-conductivity aquifer scenarios
 [J]. Journal of Hydrology, 2011, 403(1/2): 66 - 82.
- [17] QUINN P M, KLAMMLER H, CHERRY J A, et al. Insights from unsteady flow analysis of underdamped slug tests in fractured rock[J]. Water Resources Research, 2018, 54(8): 5825 – 5840.
- [18] 文章,李旭.考虑表皮效应的径向溶质迁移模型以及 半解析解[J].地质科技通报,2020,39(1):60-66.
 [WEN Zhang, LI Xu. Semi-analytical solution for radial solute transport model with skin effect[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1):60 -66. (in Chinese with English abstract)]
- [19] WEN Zhang, HUANG Guanhua, ZHAN Hongbin. Non-Darcian flow to a well in a leaky aquifer using the

Forchheimer equation[J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(3): 563 – 572.

- [20] LIN Yingfan, YEH H D. A semi-analytical solution for slug test by considering near-well formation damage and nonlinear flow[J]. Water Resources Research, 2022, 58(3): e2021WR031368.
- [21] ZHANG Weishe, JIAO Yuyong, ZHANG Guohua, et al. Analysis of the mechanism of water inrush geohazards in deep-buried tunnels under the complex geological environment of karst cave-fractured zone[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(5): 1204 – 1218.
- [22] 赵燕容,周志芳.基于 Kipp 和 CBP 模型确定含水层 渗透性的现场微水试验对比研究 [J].工程勘察, 2012, 40(12): 32 38. [ZHAO Yanrong, ZHOU Zhifang. Comparative study on field slug tests to determine aquifer permeability based on Kipp model and CBP model[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(12): 32 38. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 秦宗浩.常州微水试验在确定含水层渗透系数应用对 比[J].山西建筑,2022,48(21):93-95. [QIN Zonghao. Comparison of application of slug test in determining permeability coefficient of aquifer in Changzhou[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(21):93-95. (in Chinese with English abstract)]
- [24] JR B J J. A simple correction for slug tests in smalldiameter wells[J]. Ground Water, 2002, 40(3): 303 – 307.
- [25] DAUSSE A, GUIHÉNEUF N, PARKER B L. Impact of flow geometry on parameter uncertainties for underdamped slug tests in fractured rocks[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125567.
- [26] GREENE E A, SHAPIRO, A M, CARTER J M. Hydrogeologic characterization of the Minnelusa and Madison aquifers near Spearfish, South Dakota (Vol. 98)
 [R]. Rapid: U. S. Dept. of the Interior, U. S. Geological Survey, 1999.
- [27] 王全荣, 唐仲华, 文章, 等. 越流含水层抽水井附近非 达西流与达西流区界面位置变化规律研究 [J]. 水利 学报, 2012, 43(10): 1171 – 1178. [WANG Quanrong, TANG Zhonghua, WEN Zhang, et al. Numeric simulation for flow to a pumping well with moving boundary of the non-Darcian flow region in a leaky aquifer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1171 – 1178. (in Chinese with English abstract)]