

## 准饱和细砂在圈闭气体溶解过程中渗透系数的变化

程东会, 兰盈伯, 袁靖, 项琳, 杨晓婷, 乔晓英, 邓林, 王梓林, 王庆

## The response of hydraulic conductivity to air-trapped saturation in a dissolution process of trapped-air in quasi-saturated fine sands media

CHENG Donghui, LAN Yingbo, YUAN Jing, XIANG Lin, YANG Xiaoting, QIAO Xiaoying, DENG Lin, WANG Zilin, and WANG Qing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401015>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究

An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess  
张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 苑康泽, 潘登丽, 刘魁 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 97-104

#### 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

#### 基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm  
胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160-168

#### 空间链接器式多维通用饱和-非饱和流模型研究

A generalized multi-dimensional saturated-unsaturated flow model based on spatial linkers  
杨海, 姜月华, 周权平, 杨辉, 刘林 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 31-42

#### 上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting  
荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

#### 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil  
丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401015

程东会, 兰盈伯, 袁靖, 等. 准饱和细砂在圈闭气体溶解过程中渗透系数的变化 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 1-7.  
CHENG Donghui, LAN Yingbo, YUAN Jing, et al. The response of hydraulic conductivity to air-trapped saturation in a dissolution process of trapped-air in quasi-saturated fine sands media[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 1-7.

## 准饱和细砂在圈闭气体溶解过程中渗透系数的变化

程东会<sup>1,2</sup>, 兰盈伯<sup>1,2</sup>, 袁靖<sup>1,2</sup>, 项琳<sup>1,2</sup>, 杨晓婷<sup>1,2</sup>, 乔晓英<sup>1,2</sup>, 邓林<sup>1,2</sup>, 王梓林<sup>1,2</sup>, 王庆<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西西安 710054;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054)

**摘要:** 准饱和含水层的渗透系数会随着圈闭气体饱和度的增大而变小, 但受限于试验操作和测量精度, 通过传统驱替试验很难获得大量连续的圈闭气体饱和度数据, 因此限制了小圈闭气体饱和度及其对应的准饱和渗透系数之间关系的准确刻画。研究设计了一个以氧气代替天然圈闭过程中空气的准饱和细砂圈闭气体溶解试验, 通过精确测量溶解过程中水中可溶性氧和相应的渗透系数得到了大量连续的圈闭气体饱和度及其准饱和渗透系数的数据。试验结果表明, 在小于 5% 圈闭气体饱和度的区间, 圈闭气体进入到无效孔隙中, 因此不影响渗透系数的大小; 圈闭气体饱和度在 5% ~ 6% 时会形成孔喉阻塞效应, 对渗透系数的影响加剧。在此基础上, 构建了预测准饱和渗透系数的 van Genuchten 模型。与传统 Faybishenko 幂律模型相比, 新构建的模型很好地表征了小圈闭气体饱和度对渗透系数影响不大的特征; 在其他圈闭气体饱和度时, 新模型与传统模型的预测性能相当。新构建的准饱和和渗透系数模型为深入研究准饱和水流和溶质运移奠定了基础。

**关键词:** 准饱和和细砂介质; 圈闭气体饱和度; 渗透系数; van Genuchten 模型; Faybishenko 幂律模型

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0001-07

## The response of hydraulic conductivity to air-trapped saturation in a dissolution process of trapped-air in quasi-saturated fine sands media

CHENG Donghui<sup>1,2</sup>, LAN Yingbo<sup>1,2</sup>, YUAN Jing<sup>1,2</sup>, XIANG Lin<sup>1,2</sup>, YANG Xiaoting<sup>1,2</sup>,

QIAO Xiaoying<sup>1,2</sup>, DENG Lin<sup>1,2</sup>, WANG Zilin<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>1,2</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region,

Chang'an University, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The hydraulic conductivity of a quasi-saturated aquifer decreases with the increase of air-trapped saturation, but it is difficult to obtain a continuous data on air-trapped saturation through the traditional displacement experiments due to limitations in experimental operations and measurement accuracy. It limits the accurate characterization of the relationship between small air-trapped saturation and the corresponding quasi-saturated hydraulic conductivity. This study designed an oxygen-trapped dissolution experiment in quasi-saturated

收稿日期: 2024-01-14; 修订日期: 2024-03-08

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972248, 42372291); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-146); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-03)

第一作者: 程东会(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质有关的教学和研究。E-mail: [chdhbsh@chd.edu.cn](mailto:chdhbsh@chd.edu.cn)

fine sands media, instead of air-trapped, in which the soluble oxygen in water and the corresponding hydraulic conductivity can be accurately measured. Then a large amount of continuous data on air-trapped saturation and its quasi-saturated hydraulic conductivity were obtained. The experimental results show that when the air-trapped saturation is less than 5%, trapped gas may enter the ineffective pores and thus has a little effect on the value of the hydraulic conductivity. However, when the trapped gas saturation is between 5%—6%, it forms a pore throat block effect, which intensifies the influence on the hydraulic conductivity. Furthermore, a new model, i.e., van Genuchten model, was constructed to predict the quasi-saturated hydraulic conductivity. This model overcomes the shortcomings of the traditional power-law model and well characterized the feature that the small air-trapped saturation has little effect on the hydraulic conductivity. At high air-trapped saturation, the performance of van Genuchten model is comparable to the traditional model. The proposed model in this study can provide foundation for studying quasi-saturated water flow and solute transport.

**Keywords:** quasi-saturated fine sands media; air-trapped saturation; hydraulic conductivity; van Genuchten model; Faybishenko model

饱和含水层在其水位上升或其他水文过程中会圈闭一些孤立、不能流动的非混溶相气体(气泡)而形成所谓的准饱和含水层<sup>[1-2]</sup>。与完全饱和含水层相比,准饱和含水层具有一些独特的水力学性质,其中最重要的是其渗透系数,亦称为准饱和渗透系数,会随着圈闭气体饱和度的增大而变小。由于圈闭气体饱和度会因为气体溶解等作用而变化,因此准饱和含水层渗透系数具有时变性。准确认识准饱和渗透系数与圈闭气体饱和度的关系,是构建准饱和水流模型和溶质运移模型的基础。

很多野外和室内试验开展了准饱和渗透系数与圈闭气体饱和度关系研究<sup>[3-6]</sup>,在此基础上构建准饱和渗透系数的幂律模型即 Faybishenko 模型<sup>[7]</sup>:

$$K_q = K_0 + (K_s - K_0) \left( 1 - \frac{S_q}{S_{\max}} \right)^m \quad (1)$$

式中:  $K_q$ ——准饱和渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$K_s$ ——完全饱和渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$K_0$ ——圈闭气体含量达到最大时的渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$S_q$ ——圈闭气体饱和度/%;

$S_{\max}$ ——最大圈闭气体饱和度/%;

$m$ ——拟合参数。

程东会等<sup>[8]</sup>研究得到了负相关的线性模型或对数模型,但只能表征一定圈闭气体饱和度范围内渗透系数的变化,即这些模型只是 Faybishenko 模型中的一部分。Beckwit 等<sup>[9]</sup>研究表明,在圈闭气体饱和度较小时, Faybishenko 模型会出现一些误差。李爽<sup>[10]</sup>试图用基于孔隙度的 Kozeny-Carman 渗透系数方程表征圈闭气体对渗透系数的影响,但由于该模型中参数太多,

预测效果误差较大。另外,在传统驱替试验中,受限于试验操作和测量精度,很难得到圈闭气体饱和度与准饱和渗透系数的大量数据。这也限制了小圈闭气体饱和度及其对应的准饱和渗透系数之间关系的研究。

本文设计了一个准饱和细砂中圈闭气体溶解试验,以氧气代替天然圈闭过程中的空气以便精确测量水中可溶性氧和相应的渗透系数,得到大量连续的圈闭气体饱和度及其准饱和渗透系数的数据,旨在精确刻画准渗透系数与圈闭气体饱和度的关系,建立适用性更广的准饱和渗透系数模型,以便更深刻地理解准饱和含水层的水力学性质,为构建准饱和水流模型和溶质运移模型奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置和样品

本次试验通过砂柱完成,柱体为有机玻璃,壁厚 10 mm,内直径 110 mm,高度 620 mm。试验柱底端和上部设有进水孔和出水孔。在柱一侧上下各设置 1 个测量水头的孔,直径 20 mm。该装置类似测量渗透系数的达西仪,用来测量渗透系数。当进行圈闭气体溶解试验时,封闭出水口,并在柱口加盖,水从盖中心的导水管溢出,以避免水与空气的接触,防止空气中氧气对试验结果产生影响。试验装置见图 1。

试验样品为渭河河漫滩的细砂。样品的装柱高度为 51.2 cm,砂样干容重和孔隙度分别为  $1.66 \text{ kg/m}^3$  和 0.365,中值粒径 0.18 mm,砂粒密度为  $2.69 \text{ kg/m}^3$ 。

试验用到的氧气为西安长特气体有限责任公司的医用氧气,纯度为 99.99%。试验用溶解氧仪采用上

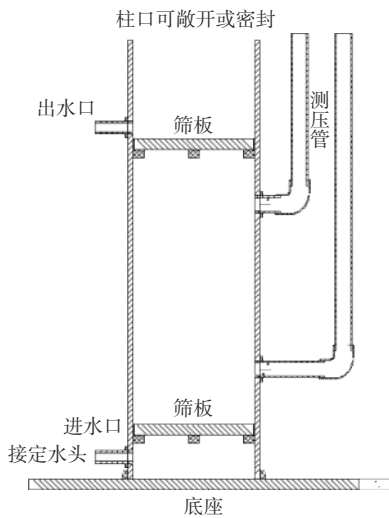


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experiments device

海雷磁 JPB-608A, 测量水中的溶解氧含量。试验过程中添加抑菌剂为牛蒡@PC-300, 以抑制试验柱中的生物生长。

## 1.2 试验方法

在装好砂的试验柱中先利用气动法测量样品的饱和和渗透系数, 然后连续进行气体圈闭和圈闭气体溶解试验。饱和和渗透系数采用气动法测量可以保证后续的气体圈闭和溶解过程在同一砂柱中进行, 避免样品重新装柱产生的饱和和渗透系数的误差。

### 1.2.1 饱和和渗透系数测量

如果利用水测饱和和渗透系数, 不但要满足苛刻的全饱和条件, 而且测完后需要更换样品进行后续的气体圈闭及溶解试验。为了避免以上两个问题带来的试验误差, 本研究中采用气动法测量砂柱中样品的渗透系数<sup>[11-12]</sup>。气体在多孔介质中的小流速流动满足达西定律:

$$K_g = \frac{QL}{A(\Delta H)} \quad (2)$$

式中:  $K_g$ ——气体作为流体时的渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );

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

$L$ ——气体通过多孔介质的长度/m;

$A$ ——多孔介质横截面积/ $\text{m}^2$ ;

$\Delta H$ ——气体通过多孔介质时的渗流气体的水头差/m。

利用实测的  $K_g$  计算样品的渗透率:

$$k = \frac{K_g \mu_g}{\rho g} \quad (3)$$

式中:  $k$ ——渗透率/ $\text{m}^2$ ;

$\mu_g$ ——空气的动力黏度系数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$\rho$ ——水的密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$g$ ——重力加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

将式(3)中空气的黏度系数用水的黏度系数  $\mu_w$  替换, 利用求得的渗透率, 计算得到水为流体时的渗透系数( $K_w$ )<sup>[13]</sup>。

气动法测量时采用小型空气压缩机提供压缩空气作为测试气体, 水头测量采用 U 型测压管, 空气和水的动力学黏度均采用试验温度下的黏度系数。分别在 2.0, 2.4, 3.6 L/min 三个雷诺数较小的流量下测量了渗透率, 满足达西定律。

### 1.2.2 气体圈闭

气动法完成全饱和和渗透系数测量后, 从砂柱底部进口持续注入氧气 2 h, 注气压强约为 130 kPa, 注气流量 2.5 L/h, 共注气约 5 L, 相当于柱内样品孔隙体积的 14~15 倍, 保证样品孔隙中的空气被氧气完全驱替。注气结束后, 立刻用小型蠕动泵从砂柱底部进自来水(溶解氧含量 6.8 mg/L), 控制进水流量使湿润锋上升速率保持在 0.70 mm/min 左右, 该速率可以获得较大的圈闭气体饱和度<sup>[14]</sup>。待水溢出上部的砂面时停止进水, 测量该过程用水量, 并用体积平衡法计算初始圈闭气体饱和度。

### 1.2.3 圈闭气体的溶解

气体圈闭完成后, 立刻开始气体溶解试验。供水经过沸腾和抽真空除气, 溶解氧含量控制在 1~2 mg/L, 同时在供水中添加 0.1% 抑菌剂防止试验过程中生物生长而造成耗氧。进水速率采用给定水头, 使达西流速固定为约 1 m/d。每天在固定时间用溶解氧仪测量进水口和出水口溶解氧含量, 同时测量出水体积和水温, 并测量渗透系数。在溶解试验的前 98 h, 溶解氧浓度快速下降, 渗透系数快速增大, 因此在试验的前 5 天测量频率 3 次/d, 尽可能捕捉变化信息。之后直至试验结束, 溶解氧和渗透系数变化缓慢, 测量频率减少为早晚各一次。气体溶解过程中的渗透系数采用传统的达西方法测量。溶解过程共进行了 17 d, 在测量的渗透系数稳定不变且圈闭气体饱和度很小时结束试验。

## 1.3 数据处理方法

### (1) 初始圈闭气体饱和度计算

圈闭气体饱和度采用水均衡法计算, 如式(4)。先计算孔隙体积与进水体积之差, 孔隙体积采用柱内样品的容重和密度计算。

$$S_q = \frac{V_g}{V_{\text{pore}}} \times 100\% = \frac{V_{\text{pore}} - V_w}{V_{\text{pore}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $V_g$ ——圈闭气体体积/ $\text{m}^3$ ;

$V_{\text{pore}}$ ——孔隙体积/ $\text{m}^3$ ;

$V_w$ ——孔隙中水的体积/ $\text{m}^3$ 。

### (2) 溶解过程中圈闭气体饱和度计算

假设  $t_1$  和  $t_2$  分别为第一次和第二次监测时间, 圈闭气体溶解试验中测量得到  $t_1 \sim t_2$  时间间隔内溶解氧含量和出水体积, 计算溶解氧的质量, 扣除进水的本底值后得到圈闭气体被溶解的质量及物质的量。然后利用理想气体的状态方程在对应的温度和压强下计算出溶解氧对应的体积及相应的气体饱和度(假定圈闭气体是等压溶解过程), 最后利用  $t_1$  时刻圈闭气体饱和度( $S_{q-1}$ )与溶解气体的饱和度( $S_{q-\text{dissolution}}$ )的差值计算  $t_2$  时刻圈闭气体饱和度( $S_{q-2}$ ):

$$V_{\text{dissolution}} = \frac{nRT}{P} \quad (5)$$

$$S_{q-\text{dissolution}} = \frac{V_{\text{dissolution}}}{V_{\text{pore}}} \quad (6)$$

$$S_{q-2} = S_{q-1} - S_{q-\text{dissolution}} \quad (7)$$

$$S_{q-2} = S_{q-1} \frac{T_2}{T_1}$$

式中:  $V_{\text{dissolution}}$ —— $t_1 \sim t_2$  时间间隔中溶解的气体体积/ $\text{m}^3$ ;

$S_{q-\text{dissolution}}$ —— $t_1 \sim t_2$  时间间隔中溶解的气体饱和度/%;

$n$ ——溶解气体的物质的量/mol, 通过溶解氧的质量计算;

$R$ ——气体常数/ $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , 取 8.314;

$T$ ——温度/K;

$S_{q-2}$ 、 $S_{q-1}$ —— $t_2$ 、 $t_1$  时刻的圈闭气体饱和度/%。

### (3) 渗透系数温度纠正

试验过程中水温在  $8 \sim 14^\circ\text{C}$  之间波动, 由于渗透系数受温度影响较大, 无法进行有效的比较, 因此按照渗透系数与黏度系数成反比的规律, 把不同温度下实测的渗透系数均校正到  $20^\circ\text{C}$  时的结果<sup>[15]</sup>:

$$K_T = K_{20} \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad (8)$$

式中:  $K_T$ 、 $K_{20}$ ——温度  $T$ 、 $20^\circ\text{C}$  下的渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ ;

$\mu_T$ 、 $\mu_{20}$ ——温度  $T$ 、 $20^\circ\text{C}$  下的黏度系数/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

## 2 结果

### 2.1 圈闭气体饱和度在溶解过程中的变化

溶解试验初始圈闭气体饱和度为 14.76%, 试验结束时圈闭气体饱和度为 0.55%, 平均达西流速 0.42 m/d,

共进行了 418 h (约 17 d), 水的体积共 69.5 L, 相当于柱中样品孔隙体积的 39 倍。从供水和出水的溶解氧含量计算得到整个样品高度上的  $S_q$  值。由于 17 d 的溶解试验中每天的出水量有所变化, 因此采用孔隙体积的个数表征出水体积(砂柱中所有孔隙的体积称为 1 个体积)。溶解过程中  $S_q$  表现为非线性的降低, 如图 2。试验开始至 100 h 或者至出水 10 个孔隙体积是快速溶解过程, 近 66% 的圈闭气体已经被溶解,  $S_q$  从 14.75% 降至约 5.0%。此后, 至试验结束共 318 h, 出水 30 个孔隙体积,  $S_q$  降至 2.14%, 仅有约 20% 的圈闭气体溶解。根据相际传质方程和相间溶质对流-弥散方程, 气泡溶解速率的大小与水的流速、气泡的比表面积和给水的溶解氧含量等众多因素有关, 由于本试验中流速和给水溶解氧较为稳定, 因此最重要的因素是气泡的比表面积, 除此之外还与局部水流状态有关。圈闭气体的溶解不是本文重点研究的内容, 在此不做赘述, 本文强调的是, 气体溶解试验出现了小于 5% 的  $S_q$  的连续变化, 该数据在常规的驱替试验中是难以获取的, 这也是本研究设计溶解试验的目的之一。

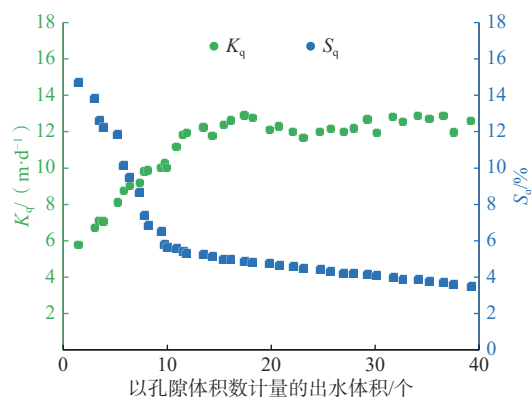


图 2 溶解试验过程中圈闭气体饱和度和渗透系数随出水量的变化

Fig. 2 Changes in  $S_q$  and  $K_q$  with oxygen-trapped dissolution process

### 2.2 溶解过程中渗透系数的变化及其与圈闭气体饱和度的关系

试验过程中随着圈闭气体饱和度的减小, 渗透系数逐渐增大(图 3)。在溶解试验刚开始时, 圈闭气体饱和度高达 14.76%, 渗透系数仅为 5.82 m/d, 是全饱和和渗透系数(12.78 m/d)的 0.46 倍; 溶解试验结束时, 尽管此时还有少量圈闭气体(2.14%)存在, 渗透系数增大为 12.64 m/d, 基本与全饱和渗透系数相当, 之间的差值为试验误差所致。

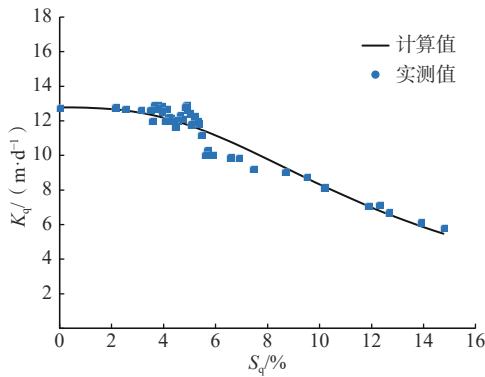


图3 Van Genuchten 模型的计算结果

Fig. 3 Calculated results from van Genuchten model

渗透系数与圈闭气体饱和度的连续实测数据还揭示了两者之间更复杂的关系(图3)。圈闭气体饱和度大于6%时,渗透系数与圈闭气体饱和度之间存在一个较小的斜率;圈闭气体饱和度在5%~6%时,该斜率突然变大,反映了圈闭气体对渗透系数的影响更加敏感;当圈闭气体小于5%时,虽然数据收敛性没有圈闭气体饱和度较大时好,但整体上表现为渗透系数不受圈闭气体的影响。这样的复杂关系可能与圈闭气泡的大小和在孔隙中的位置有密切的关系。

圈闭气体饱和度小于5%时,气泡半径变小增加了其流动性,因此易进入到一些微小的死孔隙中,通常认为这些无效孔隙并不影响介质的渗透系数。因为独立的驱替试验难以获得很小的圈闭气体饱和度,因此以往的研究中均未揭示小圈闭气体饱和度不影响渗透系数的规律。

圈闭气体饱和度在5%~6%时,对渗透系数的影响变大,可能的原因是圈闭气泡虽小,但阻塞了水流路径,最典型的情况是气泡存在于孔喉中。这种现象在细粒介质中出现的较多<sup>[16]</sup>。

圈闭气体饱和度大于6%时对渗透系数的影响与多数研究者的结果吻合,包括早期一些经典的试验<sup>[1,4-7]</sup>,刻画了赋存于孔隙的气泡对渗透系数的影响,可以用圈闭气体饱和度减小造成的等量孔隙度减小的原理定量描述<sup>[10]</sup>。

### 2.3 渗透系数与圈闭气体饱和度的经验模型

从圈闭气体饱和度与渗透系数的实测数据可以看出,两者之间的关系与非饱和土壤中基质势与含水率之间的关系非常相似,因此本研究中参照基质势-含水率的 van Genuchten 两参数模型刻画圈闭气体饱和度与渗透系数之间的关系<sup>[17-18]</sup>。模型中用渗透系数( $K_q$ )和饱和渗透系数( $K_s$ )分别取代了非饱和土壤模

型的含水率和饱和含水率,用圈闭气体饱和度( $S_q$ )取代基质势,替换变量后的模型为:

$$K_q = K_s \left( \frac{1}{1 + (\alpha S_q)^r} \right)^{1 - \frac{1}{r}} \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 、 $r$ ——拟合参数。

用 van Genuchten 模型拟合,结果见图3。全饱和渗透系数取实测值为 12.78 m/d,拟合参数  $\alpha$  为 1.32,  $r$  为 2.73。结果表明, van Genuchten 模型很好地拟合了实测数据,决定系数高达 0.95,特别是 van Genuchten 模型可以很好地表征圈闭气体饱和度小于 5% 时的渗透系数,明显优于 Faybishenko 模型;但与 Faybishenko 模型一样, van Genuchten 模型在圈闭气体饱和度 5%~6% 之间的系统性误差仍然存在。

## 3 讨论

在准饱和渗透系数计算时, Faybishenko 模型被广泛应用,如式(1)。Faybishenko 模型中要求已知  $S_{\max}$  及其对应的  $K_0$ ,但选用不同的  $S_{\max}$  及其对应的  $K_0$  就会得到不同的  $m$  值。因为在实际测试中很难判断局部最大圈闭气体饱和度及其对应的渗透系数是否代表系统中最大饱和度及其对应的渗透系数,所以该模型预测的结果可能存在误差。为了改进这个不足,本研究考虑了一个理想的情况,即无论在什么条件下均会出现最大圈闭气体饱和度 100%,此刻假设气体不能流动,仍处于圈闭状态,因此对应的渗透系数为零。该假设在实际情况下并不存在,因为圈闭气体饱和度和较大时,圈闭气体会相互连通,准饱和会转化为非饱和,但理论上仍然可以进行这样的假设。由于极端条件假设,原模型中  $S_{\max}$  及其对应的  $K_0$  两个参数在任何条件下都已变成了已知量,大大提高了模型的应用范围和准确性。在该假设条件下式(1)可简化为:

$$K_q = K_s \left( 1 - \frac{S_q}{100} \right)^m \quad (10)$$

由于 Faybishenko 模型及其简化形式是一个幂律模型,无法模拟本次试验圈闭气体饱和度小于 5% 时渗透系数保持不变这一特征。另外,要对圈闭气体饱和度大于 5% 区间进行最好的拟合,需要把原模型中定值  $K_s$  设为拟合参数,否则拟合结果会出现不能接受的误差。按照上述条件利用式(10)对圈闭气体饱和度大于 5% 以上的数据进行拟合,结果见图4。拟合参数  $K_s$  为 16.15 m/d,显然大于实测值 12.78 m/d,另一个拟合参数  $m$  为 6.49。另外,虽然决定系数( $r^2$ )高达

0.93, 但在圈闭气体饱和度 5% ~ 6% 之间仍出现了一些偏高或偏低的系统性误差。综合拟合结果, 可以认为 Faybishenko 模型在圈闭气体饱和度小于 6% 的范围内不能进行很好的拟合, 拟合的全饱和渗透系数明显大于实际值, 因此需要发展新模型来表征圈闭气体饱和度与渗透系数之间的复杂关系。

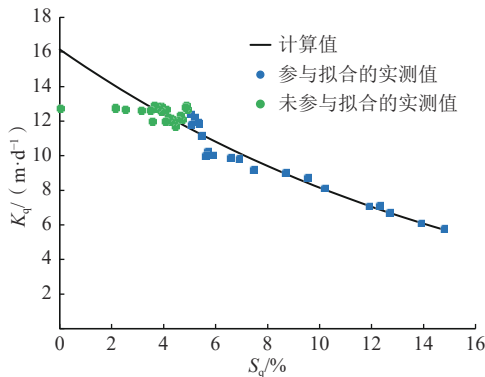


图 4 简化的 Faybishenko 模型计算的结果

Fig. 4 Calculated results from simplified Faybishenko model

为了论证 van Genuchten 模型在较高圈闭气体饱和度时的性能, 本研究用前面得到的模型参数, 将饱和度延伸至 100% 进行了 van Genuchten 模型和 Faybishenko 模型渗透系数的全段计算, 计算结果见图 5。可以看出, 在高饱和度渗透系数预测中, 两个模型的预测趋势一致, 但在圈闭气体饱和度大于 30% 后, van Genuchten 模型渗透系数计算值略大于 Faybishenko 模型。在天然气圈闭条件下, 圈闭气体饱和度一般都小于 30%<sup>[19-20]</sup>。综上所述在圈闭气体高饱和度区间, 两个模型的预测性能接近。

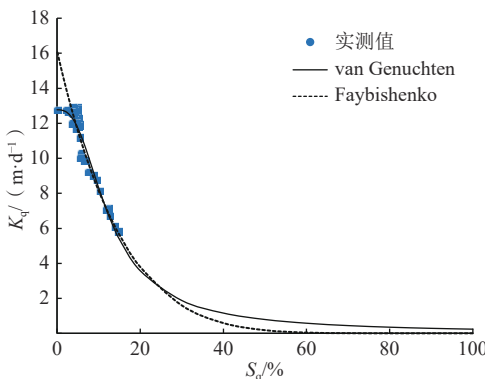


图 5 在圈闭气体饱和度全段范围内 (0 ~ 100%) Faybishenko 模型与 van Genuchten 模型的计算结果

Fig. 5 Calculated results from the van Genuchten model and simplified Faybishenko model in the full range of air-trapped saturation (0-100%)

注: 模型参数分别与图 3 和图 4 中的相同。

## 4 结论

(1) 针对准饱和多孔介质, 通过圈闭气体的溶解试验可以获得大量圈闭气体饱和度及对应的准饱和和渗透系数的数据, 特别是在小于 5% 圈闭气体饱和度的区间。这在传统研究准饱和和渗透系数的驱替试验中是无法获得的。

(2) 准饱和细砂介质中圈闭气体饱和度及对应的准饱和和渗透系数之间出现了明显的 3 个不同的规律: 圈闭气体饱和度小于 5% 时, 圈闭气体进入到无效孔隙中, 因此不影响渗透系数的大小; 圈闭气体饱和度在 5% ~ 6% 时, 圈闭气泡可能赋存在孔喉中, 对渗透系数的影响较大; 圈闭气体饱和度大于 6% 时表现了与多数研究者结果吻合的正常结果。

(3) 新建的反映圈闭气体饱和度与准饱和渗透系数的 van Genuchten 模型, 克服了传统 Faybishenko 幂律模型的缺点, 可以很好地表征小圈闭气体饱和度对渗透系数影响不大的特征, 而且在大圈闭气体饱和度时, 新模型与 Faybishenko 模型的性能相当。但是传统模型和新建模型均不能很好地预测圈闭气体饱和度在 5% ~ 6% 之间的渗透系数, 会出现偏大或偏小的系统性误差。

## 参考文献 (References) :

[ 1 ] GONÇALVES R D, TERAMOTO E H, ENGELBRECHT B Z, et al. Quasi-saturated layer: Implications for estimating recharge and groundwater modeling[J]. *Groundwater*, 2020, 58(3): 432 - 440.

[ 2 ] SAKAGUCHI A, NISHIMURA T, KATO M. The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, 4(1): 139 - 144.

[ 3 ] 程东会, 李慧, 王军, 等. 准饱和多孔介质中地下水驱替速率、圈闭气体饱和度和准饱和渗透系数的关系 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 256 - 262. [ CHENG Donghui, LI Hui, WANG Jun, et al. The relationship between groundwater displacement rate, air-entrapped saturation, and quasi-saturated hydraulic conductivity in quasi-saturated porous media[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 256 - 262. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] SUN D, ZANG Y, PING F, et al. Quasi-saturated zones induced by rainfall infiltration[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 112: 77 - 104.

- [ 5 ] FAYER M, HILLEL D. Air encapsulation. I: Measurement in a field soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 568 – 572.
- [ 6 ] CHRISTIANSEN J E. Effect of entrapped air upon the permeability of soils[J]. *Soil Science*, 1944, 58(5): 355 – 366.
- [ 7 ] FAYBISHENKO B A. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(10): 2421 – 2435.
- [ 8 ] 程东会, 李爽, 于丹, 等. 准饱和和多孔介质中圈闭气体对渗透系数的影响 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 691 – 698. [ CHENG Donghui, LI Shuang, YU Dan, et al. Effect of entrapped air on hydraulic conductivity in quasi-saturated porous media[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 691 – 698. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] BECKWITH C W, BAIRD A J. Effect of biogenic gas bubbles on water flow through poorly decomposed blanket peat[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 551 – 558.
- [ 10 ] 李爽. 准饱和和多孔介质的有效孔隙度、水力曲率和渗透系数模型研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [ LI Shuang. Research on effective porosity, hydraulic curvature, and hydraulic conductivity models of quasi-saturated porous media[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] CHOONG C E, WONG K T, JANG S B, et al. Soil permeability enhancement using pneumatic fracturing coupled by vacuum extraction for *in situ* remediation: Pilot-scale tests with an artificial neural network model[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 107075.
- [ 12 ] BAEHR A L, HULT M F. Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(10): 2605 – 2617.
- [ 13 ] LOLL P, MOLDRUP P, SCHJØNNING P, et al. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(8): 2387 – 2400.
- [ 14 ] 王军. 驱替速率对准饱和土壤圈闭气体饱和度的影响及气体圈闭和逃逸的力学机制 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [ WANG Jun. Effect of displacement rate on gas saturation of quasi-saturated soil trap and mechanical mechanism of gas trap and escape[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] JARSJÖ J, DESTOUNI G, YARON B. On the relation between viscosity and hydraulic conductivity for volatile organic liquid mixtures in soils[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1997, 25(1/2): 113 – 127.
- [ 16 ] FRY V A, SELKER J S, GORELICK S M. Experimental investigations for trapping oxygen gas in saturated porous media for *in situ* bioremediation[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2687 – 2696.
- [ 17 ] 陈卫金, 程东会, 陶伟. van Genuchten 模型参数的物理意义 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 147 – 153. [ CHEN Weijin, CHENG Donghui, TAO Wei. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147 – 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 刘青灵, 简文彬, 许旭堂, 等. 基于可靠度方法的全基质吸力段土-水特征模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 92 – 100. [ LIU Qingling, JIAN Wenbin, XU Xutang, et al. A study of the soil-water reliability model in the whole matric suction range[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 92 – 100. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] KLUMP S, TOMONAGA Y, KIENZLER P, et al. Field experiments yield new insights into gas exchange and excess air formation in natural porous media[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6): 1385 – 1397.
- [ 20 ] STONESTROM D A, RUBIN J. Air permeability and trapped-air content in two soils[J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(9): 1959 – 1969.

编辑: 张若琳