

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2279

高静水压力压实作用下疏松砂岩渗透特性演化及其机制

杨福见^{1,2}, 胡大伟^{1,2}, 田振保³, 周 辉^{1,2}, 卢景景^{1,2}, 罗宇杰^{1,2}, 桂树强⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 以江汉盆地水热型地热田疏松砂岩为研究对象, 施加静水压力至实测地层应力 (12.5 MPa), 待试样变形稳定后, 在恒定渗透流量下研究了疏松砂岩在高静水压力压实作用下渗透特性演化及其机制, 为水热型地热田现场尾水回灌过程设备参数的选择提供一些建议。研究结果表明: 在高静水压力压实作用下渗透流量 (0.5~3.0 mL/min) 影响试样达到稳定渗透率的时间, 但对最终的稳定渗透率不产生影响, 趋于常数 $4.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 试样两端压差呈非线性增加, 且非线性程度随渗透流速的增加而逐渐增大, 但最终趋于稳定。此外, 疏松砂岩试样沿渗流方向形成管状潜蚀通道, 延伸至试样的约 2/3 处; 基于颗粒运移停止时间及管状潜蚀通道在渗流方向的扩展、延伸长度, 定义了不同渗透流速下颗粒平均运移速度, 发现颗粒运移速度随渗透流速的增加呈指数形式增大, 而且单位时间内通过管状潜蚀通道运移的可移动微小颗粒 (小于 0.075 mm) 量随渗透流速的增加而逐渐增多; 试样两端压差超过静水压力约 1/2 时, 试样发生潜蚀破坏, 上游出现径缩现象。

关 键 词: 高静水压力; 疏松砂岩; 渗透率; 潜蚀作用; 颗粒运移

中图分类号: TU 411.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)01-0067-11

Evolution and mechanism of permeability of unconsolidated sandstone under high hydrostatic pressure compaction

YANG Fu-jian^{1,2}, HU Da-wei^{1,2}, TIAN Zhen-bao³, ZHOU Hui^{1,2},
LU Jing-jing^{1,2}, LUO Yu-jie^{1,2}, GUI Shu-qiang⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huadong Engineering Corporation Limited, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China 4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The unconsolidated sandstone in hydrothermal geothermal field in Jiangnan basin is taken as the research object. The hydrostatic pressure is applied to a geostress equal to 12.5 MPa. After the deformation of sample is stabilised, the evolution and mechanism of the permeability of unconsolidated sandstone under the compaction of high hydrostatic pressure are studied, which can provide some suggestions for the selection of equipment operating parameters for the tailwater recharge process in the hydrothermal geothermal field. The results indicate that under high hydrostatic pressure compaction, the permeability of unconsolidated sandstone samples tends to be a constant valued of $4.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ within the current range of 0.5 mL/min to 3.0 mL/min. The pressure difference between the two ends of the sample increases nonlinearly with time and the degree of nonlinearity gradually increases with the increase of flow rate, but eventually tends to be stabilised. In addition, the sample of unconsolidated sandstone forms a tubular erosion channel in the direction of penetration, extending to about 2/3 of the sample. Based on the stop time of particle transportation and the extension length of tubular erosion channel in the penetration direction, the average migration velocities of particles under different flow rates are determined. It is found that the particle migration velocity increases exponentially with the increase of flow rate, and the amount of microparticle migrated per unit time increases. When the pressure difference exceeds about 1/2 of the hydrostatic pressure, the sample presents erosion damage and upstream diameter shrinkage.

收稿日期: 2018-12-17

修回日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51479193, No.51779252); 湖北省技术创新专项重大项目 (No.2017AAA128); 率先行动“百人计划”项目(2015)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51479193, 51779252), the Major Program of Technological Innovation of Hubei Province (2017AAA128) and CAS Pioneer Hundred Talents Program (2015).

第一作者简介: 杨福见, 男, 1995 年生, 硕博连读研究生, 从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: fjYangUCAS@163.com

通讯作者: 胡大伟, 男, 1981 年生, 博士, 研究员, 主要从事地下工程多场耦合方面的研究工作。E-mail: dwhu@whrsm.ac.cn

Keywords: high hydrostatic pressure; unconsolidated sandstone; permeability; suffusion; particle migration

1 引言

水源热泵是一种高效、可循环、清洁的能源技术,其实质就是从温度相对稳定的中深部含水层(即水热型地热田)中提取热量用于冬季供暖,或吸收热量用于夏季降温^[1]。目前,水源热泵系统所利用的热源主要集中在地球表面浅层低、中温水源,深度在 1 000 m 以内,而所处地层大多为第四系或新近系形成的疏松砂岩,颗粒小、厚度大,只经历了早期成岩阶段的机械压实和胶结作用,且胶结程度普遍较差^[2-3]。为了保护生态,水源热泵遵循“取热不取水”原则,因此,需要将尾水通过回灌井全部回灌到同层地热田,回灌效率对于水源热泵系统的供热能力、经济效益显得至关重要。

目前,水源热泵现场回灌过程中由于堵塞引起回灌压力上升快、回灌效率低等问题已愈发严重^[4]。部分热储层在自然状态回灌下稳定回灌量仅为正常采水量的 1/3~1/5^[5],甚至有些回灌井因为堵塞出现回灌效率为 0 的现象,造成回灌井彻底报废^[6]。导致回灌堵塞的原因包括物理堵塞、化学堵塞、生物堵塞等,其中物理堵塞在地下水源热泵回灌过程中最为普遍,主要原因就是回灌水中携带的悬浮物在水动力、水化学作用下储热层内部产生的固体颗粒运移堵塞了砂层孔隙,导致储热层渗透率下降,回灌压力增加。此外,文献[7-9]研究了生物、化学作用对回灌堵塞的影响,认为微生物及钙、铁、锰离子等重金属离子是引起水源热泵生物、化学堵塞和介质渗透率下降的主要原因。

此外,关于储油层疏松砂岩或松散砂砾渗透特性也得到了广泛研究。罗玉龙等^[10]利用自行研制的渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验装置,研究了松散砂砾在不同应力状态下管涌临界坡降,发现在等向受压状态下管涌临界坡降远高于无围压时的结果,略高于三轴受压状态下的临界坡降。静水压力、孔隙水压综合影响疏松砂岩层的渗透特性,而且在恒定静水压力作用下,随孔隙压力的增加,渗透率会出现不可逆下降^[11-13]。蒸汽驱动型疏松砂岩层重油开采过程中,蒸汽及浓缩液的颗粒运移作用及水热反应导致疏松砂岩层渗透率不可逆地降低^[14-17]。Schutjens^[18]、Houseknecht^[19]、Alhomadhi^[20]等研究了围压压实作用、胶结类型、粒径大小对疏松砂岩渗透特性的影响,其中 Alhomadhi^[20]还获得了渗透率、孔隙度与上述因素之间的新型关系。Huo^[21]、

Zhang^[22]等研究了温度对疏松砂岩层渗透特性的影响,试验结果表明,相同含水率下疏松砂岩的渗透率随温度增加而增加。此外,应力路径、黏土矿物类型及含量也会对疏松砂岩层的渗透特性产生一定影响^[23-25]。

以上研究表明,水热型地热田疏松砂岩层在回灌过程中由于堵塞引起的回灌压力上升快、回灌效率低等问题已愈发严重,疏松砂岩的渗透特性受多种因素影响。但在目前研究中,疏松砂岩试样施加的围压偏小,所处的应力状态与实际取砂地层的上覆地层压力差别较大;此外,关于疏松砂岩渗透特性随时间演化的相关研究还较少,演化机制还不明确。因此,本文以水热型地热田疏松砂岩尾水回灌为研究背景,根据取砂地层含水率及密度压制标准试样,挑选出与取砂地层孔隙度接近的试样作为研究对象,施加静水压力至实测上覆地层应力,待试样变形稳定后,在不同回灌流量下研究在高围压压实作用下疏松砂岩渗透率演化规律及其机制,为水热型地热田现场回灌过程设备参数的选择提供一些的建议。

2 试验概况

2.1 试样准备

试样取自江汉油田矿区的水热型地热田,是华中地区目前最大的水源热泵项目。取砂岩层为新近系广华寺组,上覆第四系沉积层,埋深为 600~700 m,胶结程度差。储热地层孔隙度为 24.9%~43.8%,平均孔隙度为 36.5%,压力系数(指地层原始孔隙压力与同一深度地层水静水柱压力的比值)为 1.0 左右,属于正常压力系统。

疏松砂岩主要由石英(59.25%)、长石(14.48%)及黏土矿物(26.27%)组成,胶结类型为泥质胶结,胶结程度为疏松级别,取出的砂岩大多呈疏松状(如图 1 所示),粒径分布见图 2。根据现场地质资料及砂岩基本物理特性,利用现场取出的松散砂岩压制与取砂地层相同密度、相同含水率的标准圆柱体试样(如图 3(a)所示),尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ (直径 $\times$ 高度)。将重塑试样放入真空泵中饱和 24 h,在饱和过程中,为防止试样遇水松散,在试样外面套上一层热缩管(见图 3(b))。地层性质及砂岩基本物理性质见表 1。

2.2 试验设备

试验仪器采用中国科学院武汉岩土力学研究所



图 1 疏松试样

Fig.1 Unconsolidated sandstone

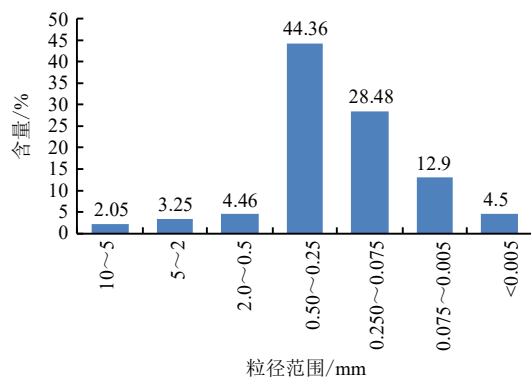


图 2 疏松砂岩粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of unconsolidated sandstone



(a) 未包裹热缩管

(b) 包裹热缩管

图 3 标准试样

Fig.3 Standard sample

表 1 取砂地层及砂岩基本物理性质

Table 1 Physical properties of sandstone layers and sandstones

上覆地层压力 /MPa	颗粒密度 /(g · cm ⁻³)	饱和含水率 /%	饱和密度 /(g · cm ⁻³)	孔隙度 /%
12.5	2.7	16.5	2.2	36.5

自主研发的岩芯夹持器，该仪器由三部分组成：静水压力室、静水压力加载及采集系统、孔压加载及采集系统。其中孔压加载系统可分别采用恒压和恒流方式施加孔压，最大孔压可施加至 45 MPa，最大静水压力下可加载至 60 MPa。图 4 为试验设备示意图。

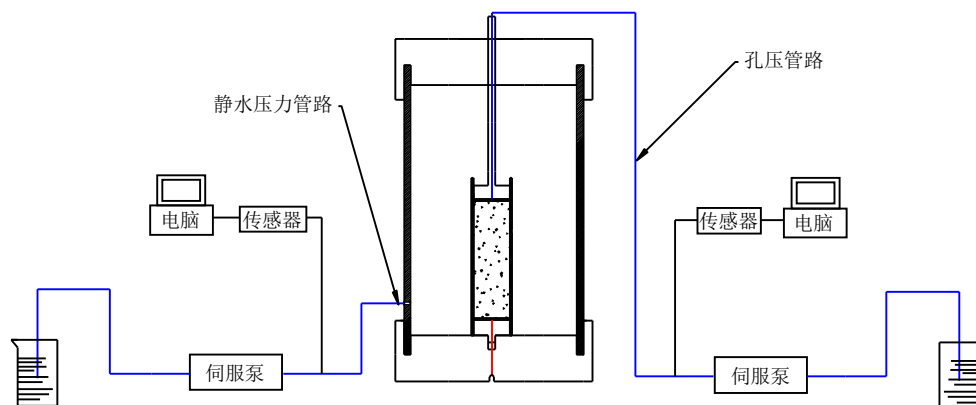


图 4 试验设备示意图

Fig.4 Schematic diagram of experimental equipment

2.3 试验过程及原理

为测试在高围压压实作用下疏松砂岩在渗透率随时间的演化规律及机制，设计了如下的试验过程：

(1) 利用现场取出的原状松散砂岩配置与取砂岩层的饱和含水率、密度相同的标准试样，挑选出与取砂岩层孔隙度接近的试样，放入真空泵中饱和 24 h。物理参数见表 2。

表 2 配置试样物理参数

Table 2 Physical parameters of rock samples

试样名称	直径 /mm	高度 /mm	密度 / (g · cm ⁻³)	饱和含水率 /%	孔隙度 /%
A	50.06	100.03	2.18	17.02	32.56
B	50.12	100.85	2.16	16.54	37.41
C	50.20	100.25	2.21	16.87	35.26
D	50.08	100.06	2.20	17.05	33.21
E	50.14	100.12	2.23	16.97	38.97

(2) 将饱和试样放入岩芯夹持器中。渗透过程中在试样上下游两端放置径向导向的渗透板, 见图 5。孔压上游的水溶液到达渗透板中心时, 水溶液沿径向导向槽向四周流动, 流速逐渐降低, 之后通过槽内的渗流孔沿轴向渗透。施加静水压力至 12.5 MPa 后保持恒压状态, 待试样变形稳定, 以恒流量 (0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 mL/min) 方式进行渗透, 并实时记录渗透全过程中试样上下游压力差的变化, 待试验结束后, 将每个孔压差值分别代入渗透率计算公式, 就可以得出渗透全过程中渗透率的演化规律。为保证渗流在试样内处于稳定状态, 岩芯夹持器出水口水滴均匀流出后, 开始记录孔压差值, 之后每隔一定时间记录一次孔压差值。其中选定的渗透流量是为了保证现场实际回灌过程中尾水在疏松砂岩层的渗透流速与试验中渗透流速处于同一数量级。试验方案见表 3。渗透率的测量与渗透同步进行, 测量原理为达西定律^[10], 测量原理图见图 6, 计算公式为

$$K = \frac{Q\mu L}{\Delta P A} \quad (1)$$

式中: K 为试样渗透率 (μm^2); Q 为渗流流量 (mL/min); μ 为流体的动力黏滞系数 ($1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$); ΔP 为试样上、下游孔压差值 (MPa); A 为试样截面面积 (cm^2)。

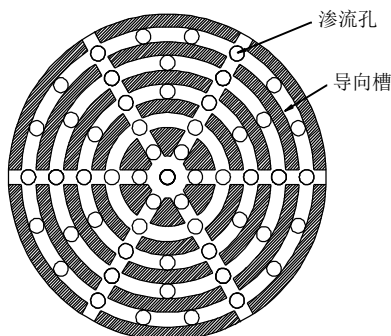


图 5 渗透板
Fig.5 Permeation plate

表 3 试验方案
Table 3 Test plans

试样名称	渗透流量/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	静水压力/MPa
A	0.5	12.5
B	1.0	12.5
C	2.0	12.5
D	2.5	12.5
E	3.0	12.5

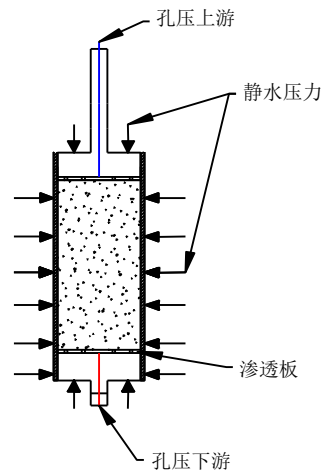


图 6 渗透率测量原理图
Fig.6 Mechanism diagram of permeability

3 试验结果与分析

3.1 渗透率演化规律

疏松砂岩层在高地应力作用下的渗透能力直接影响水热型地热田供热能力及回灌量。因此, 充分了解在高围压压实作用下疏松砂岩渗透全过程中渗透特性演化规律及其机制显得至关重要。本文根据现场实际情况, 恢复疏松砂岩的原始上覆地层应力 (12.5 MPa), 采用不同流量 (0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL/min) 进行渗透, 测试疏松砂岩渗透率随时间的演化特性, 试验结果见图 7。

由试验结果可得: ①疏松砂岩渗透率在不同渗透流量下, 随时间增加均呈非线性下降, 但最终均趋于稳定, 且各渗透流速下的稳定渗透率趋于常数 $4.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 见图 7、8; 疏松砂岩渗透率达到稳定值的时间随渗透流速的增加逐渐缩短, 近似呈线性下降, 见图 9, 这表明在当前研究的渗透流量范围内, 渗透流量影响疏松砂岩层达到稳定渗透率的时间, 但对最终的稳定渗透率不产生影响; ②疏松砂岩在渗透过程中, 试样两端压差呈非线性增加, 且非线性程度随渗透流速的增加逐渐增大, 压差随时间最终趋于稳定值(除试样 E 在压差达到 6.55 MPa 时发生破坏, 未达到稳定压差), 随渗透流速的增加近似呈线性增加, 符合达西定律, 见图 9。

从图 8 还可以看出, 高静水压力压实作用下, 试样渗透率稳定时所承受的渗透坡降高达 $104 \sim 655 \text{ kPa}/\text{cm}$, 这远高于通常所认知的一般黏性土所能承受的渗透坡降^[26-27]。而且在如此高的渗透坡降下, 除试样 E 在坡降为 $649 \text{ kPa}/\text{cm}$ 时发生破坏, 其余试样均保持完整状态。出现这种现象可能是由两方面的原因造成的: 一方面, 在目前研究黏性土或

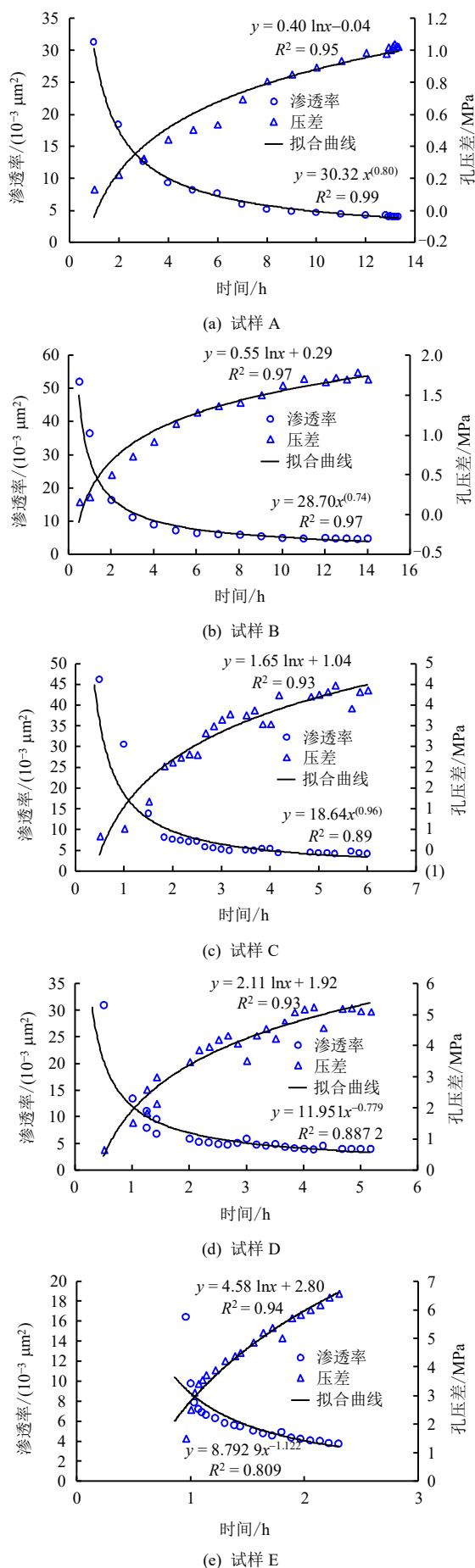


图7 试样渗透率演化

Fig.7 Evolution of sample permeability

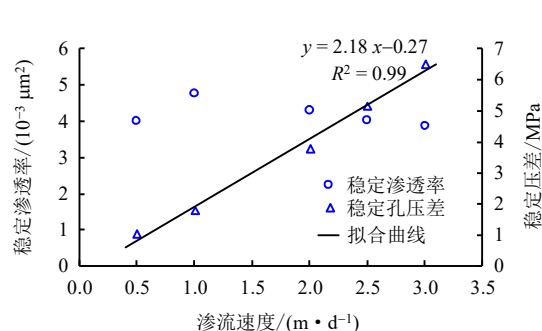


图8 疏松砂岩稳定渗透率及稳定压差演化规律

Fig.8 Evolution of stable permeability and stable pressure difference of unconsolidated sandstone

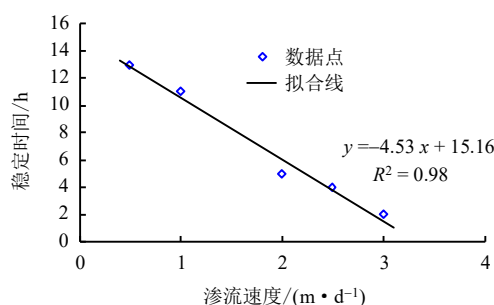


图9 疏松砂岩渗透率稳定时间演化规律

Fig.9 Time evolution of permeability stability of unconsolidated sandstone

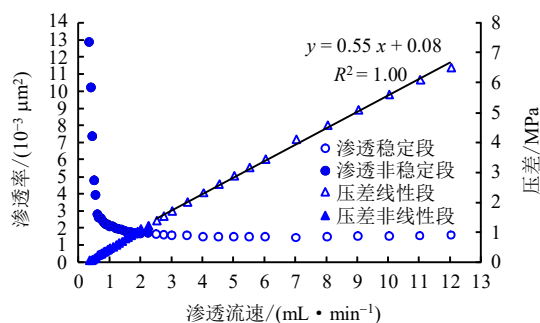
砂砾石土渗透坡降时, 试样并未施加围压或施加围压很小, 而文献[27-28]研究结果均表明, 在施加围压后试样渗透坡降显著提高。本文对试样施加了 12.5 MPa 的静水压力, 因此, 渗透坡降会显著增大, 而且在静水压力的压实作用下, 试样在高渗透坡降下仍能保持完整。此外, Xiong 等^[12]研究疏松砂岩储油层在压实作用下渗透特性演化过程中, 试样施加静水压力至 30 MPa 并保持稳定, 在流体渗流过程中试样两端压差达 5~15 MPa, 渗透坡降高达 796~2 388 kPa/cm, 但试样仍保持完整状态; 另一方面, 本文是模拟水热型地热田在回灌过程中疏松砂岩层的渗透特性的演化, 回灌堵塞是目前尾水回灌过程中不可避免的现象^[29-30], 回灌压力上升快、回灌效率低等在实际工程中也是常出现的问题^[4]。不过在实际工程中, 当压力上升到一定程度后, 会采取洗井、酸化等措施来降低回灌压力。例如, 在文献[4]研究胜利油田水热型地热田砂岩层尾水回灌过程中, 最大回灌压力达 3.7 MPa, 经过酸化后回灌压力降至 0.6 MPa。但本文在模拟尾水回灌过程中, 为探明疏松砂岩试样在回灌全过程中渗透演化特性及其机制, 在回灌压力达到一定程度后, 并未停止试验, 因此渗透坡降才会出现高达 104~655 kPa/cm 的现象。

此外,在如此高的渗透坡降及静水压力综合作用下,试样渗透率的计算能否采用线性达西 Darcy 定律以及计算渗透率时是否满足稳态条件也成为关键性问题。因此,在上述研究基础之上,采用条件相似的试样 F 和 G (见表 4),施加相同的静水压力 12.5 MPa,进行不同渗透流量下渗透特性的研究,试验结果见图 10。

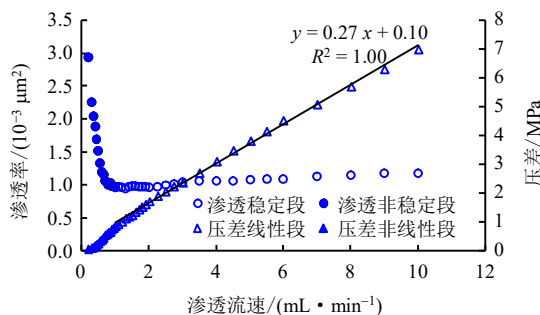
表 4 配置试样物理参数

Table 4 Physical parameters of rock samples

试样 名称	直径 /mm	高度 /mm	密度 /(g · cm ⁻³)	饱和含水率 /%	孔隙度 /%
F	50.16	100.21	2.19	17.00	36.25
G	50.09	100.17	2.21	16.80	35.85



(a) 试样 F



(b) 试样 G

图 10 不同渗透流量下试样渗透率演化
Figs.10 Evolution of sample permeability at different flow rates

由图 10 可得,试样 F、G 在静水压为 12.5 MPa 作用下,试样渗透坡降分别达到 648、699 kPa/cm 后发生破坏。除试验初期渗流状态不稳定外,渗透流量和试样两端的压差近似符合线性关系,而且渗透率随后趋于稳定值 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,这就表明,本文所涉及的疏松砂岩试样在高渗透坡降及静水压力综合作用下仍符合线性达西 Darcy 定律,同时也满足 Darcy 定律渗透稳态条件。此外,根据石京平^[31]在研究低渗透油田油水两相低速非达西渗流规律时,发现单相水流动产生非达西渗流的渗透率界限为 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而且在以单相水流量为 0.25 mL/min

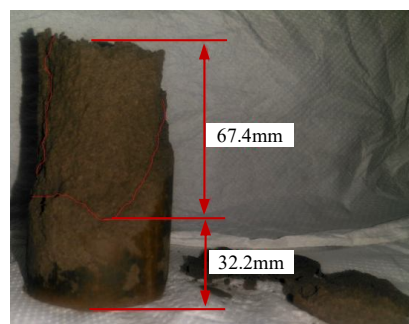
驱替下,最大渗透坡降达 1 000 kPa/cm,这也进一步验证了本文所研究的疏松砂岩试样在高渗透坡降及静水压力综合作用下仍符合线性达西 Darcy 定律。

3.2 渗透率演化机制分析

试验结束后,观察到疏松砂岩试样在渗流方向上形成管状潜蚀通道,见图 11(a)。将潜蚀通道外侧薄层剥下后,观察到渗流潜蚀通道一直贯通至试样 2/3 处,见图 11(b)。这表明疏松砂岩试样在渗透作用下,细颗粒通过孔道、喉道集中运移,形成管状潜蚀通道^[32],大部分流体及微小颗粒会优先通过管状潜蚀通道渗流、运移,潜蚀通道发生扩展、延伸。



(a) 环向潜蚀通道



(b) 轴向潜蚀通道

图 11 潜蚀通道图
Fig.11 Erosion channel

为进一步了解颗粒运移情况,沿轴向方向将形成潜蚀通道的试样平均分成上、中、下三段,进行粒径分析。粒径分析结果显示(见图 12),小于 0.075 mm 的颗粒含量从试样上部到下部逐渐增加,而其余颗粒没有明显运移规律可寻;试样上部小于 0.075 mm 颗粒含量低于取砂岩层中的颗粒含量,试样中部小于 0.075 mm 颗粒含量接近取砂岩层中的颗粒含量,而试样下部小于 0.075 mm 颗粒含量高于取砂岩层中的颗粒含量;不同渗透速度下试样的相同部位小于 0.075 mm 颗粒含量接近,这一现象与张冬梅等^[33]研究地下管线破损引起的渗流侵蚀试验结束后,对不同高度土层进行粒径分析后得出

的结论相同。这表明,在目前所研究的渗透流量范围内,小于 0.075 mm 的颗粒会通过潜蚀通道及孔道、喉道由试样上部向底部发生运移,最终淤积在试样的底部,且可移动颗粒运移总量不受渗透流量的影响。

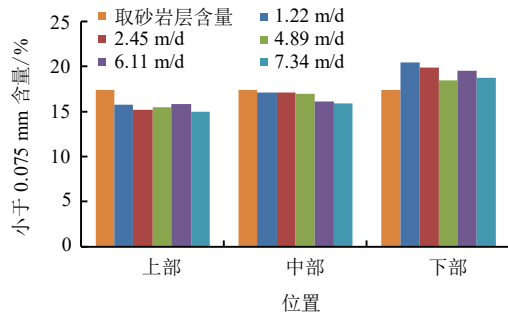


图 12 不同部位粒径分析图

Fig.12 Analysis of particle size in different parts of sample

通过上述分析可知,疏松砂岩在流体渗流过程中,试样两端压差逐渐增大,达到微小颗粒的临界水头梯度后^[34-37],小于 0.075 mm 颗粒会通过孔隙通道发生运移,沿渗流方向形成管状潜蚀通道,随渗流过程的进行而逐渐扩展、延伸。在静水压力作用下潜蚀通道在延伸、扩展的同时,也会被进一步压实,颗粒在运移过程中会逐渐被滞留在潜蚀通道内,逐渐堵塞管状潜蚀通道,流体渗流阻力增大,渗透率会逐渐降低,试样两端压差逐渐增大,一直到颗粒运移到试样底部。由于底部边界条件的限制,微小颗粒无法从试样底部流出,发生淤积现象,堵塞孔隙通道,导致渗透率降低、试样两端压差增大。随着大部分可移动微小颗粒淤积在试样底部,停止运移后,渗透率及试样两端压差会逐渐稳定,Moghadasi 等^[38]在对水驱动型疏松砂岩层颗粒运移规律研究中也观察到了相同的现象。3.1 节所述的渗透率随时间逐渐降低及压差逐渐增加,并最终趋于稳定,其实质就是试样内部的颗粒在渗流过程中逐渐运移,堵塞潜蚀通道并最终淤积在试样底部,这也是导致试样两端渗透坡降高达 104~655 kPa/cm 的原因之一。

由上述分析可知,疏松砂岩在渗流过程中颗粒沿渗流方向发生运移,因此了解颗粒在不同渗透流速下的运移速度有助于进一步了解渗透特性演化机制。当大部分可移动微小颗粒停止运移后,渗透率会逐渐趋于稳定。因此,在这里把颗粒运移停止的时间定义为渗透率趋于稳定的时间。在本文中,当前渗透率与后面所有渗透率平均值相差在 5% 以内,

便认为试样渗透率已经稳定;而颗粒运移的距离可根据管状潜蚀通道在渗流方向的扩展、延伸长度来确定。因此,基于颗粒运移停止时间及颗粒运移距离,定义了不同渗透流速下可移动微小颗粒平均运移速度(图 12):

$$v_k = \frac{L_H}{T_w} \quad (2)$$

式中: v_k 为颗粒平均运移速度 (m/d); L_H 为管状潜蚀通道在渗流方向上延伸的长度 (m); T_w 为颗粒运移停止时间,即渗透率稳定时间 (d)。

渗透流速的演化规律见图 13,其计算公式采用石油天然气行业标准中推荐的计算公式^[39]:

$$v = \frac{14.4Q}{A\phi} \quad (3)$$

式中: v 为渗透流速 (m/d); ϕ 为试样孔隙度 (%)。

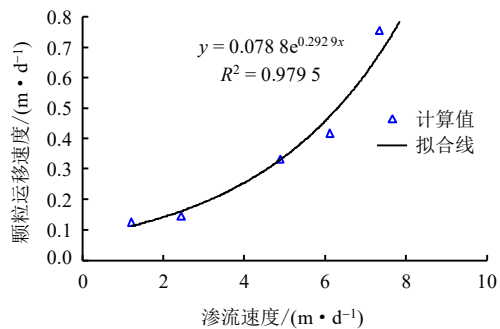


图 13 不同渗透流速下颗粒运移速度

Fig.13 Particle migration velocity at different flow rates

由图 13 可知,随渗透流速的增加,疏松砂岩颗粒运移速度呈指数形式增加。此外,由试样不同部位粒径分析可知,可移动颗粒运移总量不受渗透流速的影响,这表明随渗透流速的增加,除颗粒运移速度增加外,在单位时间内微小颗粒运移量也会增加,导致渗流通道堵塞现象更加严重,渗流阻力也会增大。这就能很好地解释渗透率达到稳定值的时间随渗透流量的增加而逐渐缩短(见图 9),但稳定渗透率值基本不变(见图 8),以及试样两端稳定压力差随渗流流量的增加而逐渐增大的现象(见图 8)。

3.3 试样破坏形态

试样 E 在渗透流量为 3.0 mL/min 渗透下,当试样上下游压力差达到 6.55 MPa 时发生破坏,而其他较小渗透流量的试样均未发生破坏。为此,又进行了渗透流量为 3.0 mL/min 的渗透试验——试样 E-1 和 E-2。结果表明,试样 E-1 及 E-2 分别在上、下游压差达到 6.58、6.67 MPa 时发生破坏,试样上游

同样发生径缩现象,破坏形态见图 14。此外,在进行不同渗透流量下疏松砂岩试样 F、G 渗透特性的研究时,发现试样 F、G 上下游压差达 6.48、6.99 MPa 时分别发生径缩破坏。对此,总结了高静水压力 12.5 MPa 压实作用下不同试样破坏时的临界压差,见图 15。

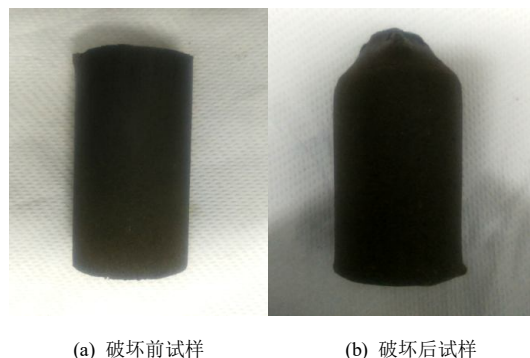


图 14 试样破坏形态
Fig.14 Failure mode of sample

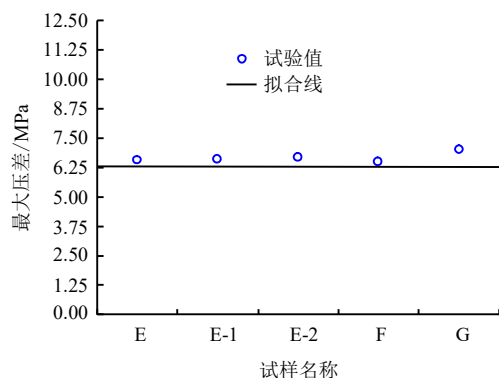


图 15 试样破坏时的最大孔压差
Fig.15 Maximum pressure difference at sample failure

由图 15 可得,天然粒径颗粒组成的疏松砂岩试样,在相同的静水压力 12.5 MPa 作用下,破坏时的最大压差均集中在 6.48~6.99 MPa 范围内,这表明在试样上下游压差约超过静水压力的 1/2 时,试样试样将发生破坏,上游出现径缩现象。试样上部出现“径缩现象”的主要原因由 3 部分组成:其一,在试样上下游渗透压差的作用之下,试样发生渗透压密现象^[32],试样上部原本充填在骨架结构之间的微小颗粒发生运移,淤积在试样底部,使上部骨架结构间出现空隙,抗变形能力减弱^[40],而底部骨架结构间微小颗粒更加密实,抵抗变形能力增强;其二,试样内部孔压急剧增加,在较大孔压的作用下试样上部骨架结构颗粒发生形变、错位;其三,就是所施加静水压力的压缩作用。因此,在骨架结构出现空隙、骨架颗粒发生形变、错位^[41]以及静水压力的

综合作用之下,试样上部产生了压缩变形、径缩现象。

4 结 论

本文对江汉盆地水热型地热田现场取回的疏松砂岩,按照取砂地层的饱和含水率、密度及孔隙率重新配置标准试样,施加高静水压力至实际上覆地层压力为 12.5 MPa,研究了高静水压力压实作用下疏松砂岩的渗透特性及演化机制。详情如下:

(1) 高静水压力压实作用下,疏松砂岩渗透率及试样两端压差随时间均呈非线性变化并最终趋于稳定,其中稳定渗透率趋于常数 $4.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而稳定压差随渗透流速的增加近似线性增大,符合达西定律。

(2) 基于颗粒运移停止时间及管状潜蚀通道在渗流方向的扩展、延伸长度,定义了不同渗透流速下颗粒平均运移速度,发现颗粒运移速度随渗透流速的增加呈指数形式增大。结合试样不同部位粒径分析可知,可移动颗粒运移总量不受渗透流速的影响,但单位时间内微小颗粒运移量会增加。这里需要指出的是,本文定义的颗粒运移平均速度是指所有可移动微小颗粒运移速度的一个平均值,尤其是颗粒运移停止的时间并不是实际测量的物理量,而是颗粒运移堵塞与渗透率之间的相关性所估算出来的,具有一定的误差,缺乏微观实时监测手段的佐证。但不可否认本文定义颗粒运移速度的方法具有一定的科学依据,而且有助于进一步了解疏松砂岩渗透特性演化机制。

(3) 疏松砂岩试样在高静水压力 12.5 MPa 压实作用下,破坏时的最大压差均集中在 6.48~6.99 MPa 范围内,这表明试样上下游压差约超过静水压力的 1/2 时,试样在渗流压密、孔压及静水压力共同作用下将发生破坏,上游出现径缩现象。

需要指出的是,由于从现场取回的样品本身就呈松散状,本文所使用的疏松砂岩试样均是重塑的,虽然按照实际储热地层的密度、含水率和孔隙率来配置的,但孔隙结构、胶结程度等特征与实际储热地层还有一定的差别。此外,由于与工程实际条件的差别,试验渗流流态与实际流态存在着些许不同,这是室内试验模拟工程现场不可避免的问题。因此,由于与实际工程条件的差别,本文得出的结论不能直接应用于现场。但可以根据试验中发现的现象对水热型地热田现场回灌过程参数的选择提供一些的建议。例如,在本文研究的渗透流量范围内,疏松砂岩试样在高静水压力压实作用下的稳定渗透率不

受渗透流量的影响, 但试样孔隙压力会增加。当孔隙压力增加到一定数值后, 试样便会发生破坏。因此, 建议江汉油田水热型地热田在实际尾水回灌过程中, 不要盲目追求大流量回灌, 否则地热储层孔隙压力会急剧增加, 发生潜蚀现象, 颗粒在远端淤积堵塞, 导致尾水回灌效率降低, 严重时可能会导致地表发生变形、沉陷; 在回灌过程中出现尾水回灌压力过大时, 应立刻采取有效措施降低回灌压力, 以保证回灌井能长期、有效地利用。

参考文献

- [1] OMER A M. Ground-source heat pumps systems and applications[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2008(12): 344-371.
- [2] 谢一婷. 疏松砂岩油藏适度出砂井近井地层渗透率变化规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
XIE Yi-ting. Research on change of in-situ permeability near wellbore in unconsolidated sandstone reservoir with sand management[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [3] 刘洪战, 田源, 杨坡. 细颗粒沉积物分布区地下水热源泵抽灌井施工工艺探讨[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 36-40+56.
LIU Hong-zhan, TIAN Yuan, YANG Po. A discussion of the construction technology of pumping and injection wells in the fine particle sediment distribution area[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2017, 44(1): 36-40+56.
- [4] 戴群, 王聪, 罗杨, 等. 砂岩地热储层回灌堵塞机理研究及治理对策[J]. 精细石油化工进展, 2017, 18(6): 10-13.
DAI Qun, WANG Cong, LUO Yang, et al. Research on sandstone geothermal reservoir reinjection plugging mechanism and measures against it[J]. **Advances in Fine Petrochemicals**, 2017, 18(6): 10-13.
- [5] 林建旺, 赵苏民. 天津地区馆陶组热储回灌量衰减原因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 133-136.
LIN Jian-wang, ZHAO Su-min. An analysis of the reinjection attenuation of the Guantao group geothermal reservoir in the Tianjin area[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(5): 133-136.
- [6] 王迪, 魏伟. 水源热泵回灌中微生物堵塞机理研究现状[J]. 建筑与预算, 2018(10): 29-31.
WANG Di, WEI Wei. Research on microbial blockage mechanism in water source heat pump recharge[J]. **Construction and Budget**, 2010, 37(5): 133-136.
- [7] SUN Y, MIAO L W. Current situation investigation and prospect analysis of artificial recharge of ground water in Beijing city[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2001(1): 21-23.
- [8] ALBRECHTSEN H J, WINDING A. Microbial biomass and activity in subsurface sediment from Vejen, Denmark[J]. **Microbial Ecology**, 1992, 23(3): 303-317.
- [9] 亢涵, 李玲, 潘俊, 等. 悬浮物颗粒导致的地下水热源泵回灌堵塞研究现状及展望[J]. 建筑与预算, 2018(5): 61-63.
KANG Han, LI Ling, PAN Jun, et al. Research and prospects of groundwater source heat pump recharge blockage caused by suspended particles[J]. **Construction and Budget**, 2018(5): 61-63.
- [10] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验装置的研制及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2108-2114.
LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Development of seepage-erosion-stress coupling piping test apparatus and its primary application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(10): 2108-2114.
- [11] XIONG Y, XU H, WANG Y, et al. The variation mechanism of petrophysical properties and the effect of compaction on the relative permeability of an unconsolidated sandstone reservoir[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2018(92): 754-763.
- [12] XIONG Y, XU H, WANG Y, et al. Fluid flow with compaction and sand production in unconsolidated sandstone reservoir[J]. **Petroleum**, 2018, 4(3): 358-363.
- [13] 周文胜, 熊钰, 徐宏光, 等. 疏松砂岩再压实作用下的物性及渗流特性[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 118-123.
ZHOU Wen-sheng, XIONG Yu, XU Hong-guang, et al. Physical property and seepage characteristics of unsolidated sandstone under re-compact[J]. **Petroleum Drilling Technology**, 2015, 43(4): 118-123.
- [14] BAGCI S, KOK M V, TURKSOY U. Determination of formation damage in limestone reservoirs and its effect on production[J]. **Petroleum Science and Engineering**, 2000, 28(1): 1-12.
- [15] DIABIRA I, CASTANIER L M, KOVSCEK A R. Porosity and permeability evolution accompanying hot fluid injection into diatomite[J]. **Petroleum Science and Technology**, 2001(19): 1167-1185.
- [16] SCHEMBRE J M, KOVSCEK A R. Thermally induced fines mobilization: its relationship to wettability and formation damage[C]//Proceedings of Soft of SPE. Bakersfield: [s. n.], 2004: 1-16.

- [17] PANG Z X, LIU H Q. The study on permeability reduction during steam injection in unconsolidated porous media[J]. **Petroleum Science and Engineering**, 2013(106): 77-84.
- [18] SCHUTJENS P M T M, SAYERS C, WHITWORTH J H. Production-induced compaction of the Brent field: an experimental approach[J]. **SPE Formation Evaluation**, 1996, 11(2): 99-107.
- [19] HOUSEKNECHT D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 1989, 71(6): 633-642.
- [20] ALHOMADHI E S. New correlations of permeability and porosity versus confining pressure, cementation, and grain size and new quantitatively correlation relates permeability to porosity[J]. **American Journal of Geosciences**, 2014(7): 2871-2879.
- [21] HUO D, BENSON S M. Experimental investigation of stress-dependency of relative permeability in rock fractures[J]. **Transport Porous Media**, 2016, 113(3): 567-590.
- [22] ZHANG L H, TONG J, XIONG Y, et al. Effect of temperature on the oil-water relative permeability for sandstone reservoirs[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017: 535-548.
- [23] NGUYEN V H, GLAND N, DAUTRIAT J. Compaction permeability evolution and stress path effects in unconsolidated sand and weakly consolidated sandstone[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014(67): 226-239.
- [24] MONFARED A K, ROTHENBURG L. Poro-elasto-plastic response of an unconsolidated formation confined with stiff seal rocks under radial injection[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(13): 1799-1826.
- [25] KIM C, LEE J. Experimental study on the variation of relative permeability due to clay minerals in low salinity water-flooding[J]. **Petroleum Science and Engineering**, 2017(151): 292-304.
- [26] 吴梦喜, 高桂云, 杨家修, 等. 砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法[J]. **岩土力学**, 2019, 40(3): 861-870.
- WU Meng-xi, GAO Gui-yun, YANG Jia-xiu, et al. Research on prediction method of critical gradient for piping of sand and gravel soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 861-870.
- [27] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(增刊 1): 73-78.
- LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Suppl.1): 73-78.
- [28] 杨加智, 刘星星, 盛金昌. 围压对砂砾石地基管涌影响的试验研究[J]. **华北水利水电大学学报(自然科学版)**, 2014, 35(5): 16-19.
- YANG Jia-zhi, LIU Xing-xing, SHENG Jin-chang. Experimental investigation of the influence of confining pressure on piping in sandy gravel foundation[J]. **Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)**, 2014, 35(5): 16-19.
- [29] 赵军, 刘泉声, 张程远. 水源热泵井回灌堵塞颗粒迁移模型的建立[J]. **岩土力学**, 2013, 34(11): 3249-3253.
- ZHAO Jun, LIU Quan-sheng, ZHANG Cheng-yuan. Experimental study of particles clogging in ground source heat pump[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3249-3253.
- [30] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地热水对井回灌渗流场理论研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2004, 33(3): 245-248.
- HE Man-chao, LIU Bin, YAO Lei-hua, et al. Study on theory of seepage field around geothermal production-reinfection doublets wells[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(3): 245-248.
- [31] 石京平. 低渗透油田油水两相低速非达西渗流规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- SHI Jing-ping. Study on oil-water two-phase low-speed non-Darcy flow in low permeability oilfield[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [32] 李喜安, 陈文军, 邓亚虹, 等. 渗流潜蚀作用临界发生条件的推导[J]. **水土保持研究**, 2010, 17(5): 217-221.
- LI Xi-an, CHEN Wen-jun, DENG Ya-hong, et al. Formula derivation of the critical condition of sub-ground erosion[J]. **Research of Soil and Water Conservation**, 2010, 17(5): 217-221.
- [33] 张冬梅, 杜伟伟, 高程鹏. 间断级配砂土中管线破损引起的渗流侵蚀模型试验[J]. **岩土工程学报**, 2018, 40(11): 2129-2135.
- ZHANG Dong-mei, DU Wei-wei, GAO Cheng-peng. Model test of seepage erosion caused by pipeline damage in gap grading sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(11): 2129-2135.
- [34] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无黏性土中管涌的毛管模型

- 及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3871-3876.
- LIU Zhong-yu, LE Jin-chao, MIAO Tian-de. Capillary-tube model for piping in non-cohesive soils and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3871-3876.
- [35] 刘忠玉. 无黏性土中管涌的临界水头梯度研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(4): 67-71.
- LIU Zhong-yu. Critical hydraulic gradient for piping in noncohesive soils[J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2003, 24(4): 67-71.
- [36] 毛昶熙, 段祥宝, 吴良骥. 砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3705-3709.
- MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, WU Liang-ji. Study of critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3705-3709.
- [37] 陶高梁, 李进, 庄心善, 等. 地下水管泄漏所致砂土渗流破坏试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 97-102.
- TAO Gao-liang, LI Jin, ZHUANG Xin-shan, et al. Seepage failure experiment of sandy soil caused by leakage of underground water pipe[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2018, 16(1): 97-102.
- [38] MOGHADASI J, MÜLLER-STEINHAGEN H, JAMIALAHMADI M. Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2004, 43(3): 163-181.
- [39] 国家能源局. SY/T 5358-2010 储层敏感性流动实验评价方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- National Energy Administration of China. SY/T 5358-2010 Formation damage evaluation by flow test[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [40] MARI S, REIKO K. Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness[J]. **Soils and Foundations**, 2018, 58(3): 547-562.
- [41] 于子望. 多相多组分 THCM 耦合过程机理研究及其应用[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- YU Zi-wang. Research on multiphase-multicomponent THCM coupling mechanism and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
-
- 上接第 66 页
- [19] JIANG Y, XIAO J, TANABASHI Y, et al. Development of an automated servo controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(2): 275-286.
- [20] SHRIVASTAVA A K, RAO K S. Shear behaviour of rock joints under CNL and CNS boundary conditions[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2015, 33(5): 1205-1220.
- [21] LI B, JIANG Y, KOYAMA T, et al. Experimental study of the hydro-mechanical behavior of rock joints using a parallel-plate model containing contact areas and artificial fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(3): 362-375.
- [22] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253-2259.
- JIANG Yu-jing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experiment study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2253-2259.
- [23] 尹立明, 陈军涛. 渗透水压对节理应力-渗流耦合特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013(9): 2563-2568.
- YIN Li-ming, CHEN Jun-tao. Experimental study of influence of seepage pressure on joint stress-seepage coupling characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2563-2568.
- [24] 夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 16-28.
- XIA Cai-chu, QIAN Xin, GUI Yang, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2253-2259.
- [25] 夏才初, 王伟, 丁增志. TJXW-3D 型岩石表面三维形貌仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1285-1291.
- XIA Cai-chu, WANG Wei, DING Zeng-zhi. Development of three dimensional TJX-3D-typed portable rock surface topography[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1285-1291.
- [26] COOK N G W. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1992, 29(3): 198-223.