

文章编号:0253-4339(2025)04-0114-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.114

基于 COMSOL 三维海岸井气液两相渗流模型及相关参数研究

贾欣¹ 吴慎鑫¹ 宁野¹ 端木琳²

(1 大连大学建筑工程学院 大连 116622; 2 大连理工大学土木工程学院 大连 116024)

摘要 海岸井取海水可以减少生物附着和提高海水温度,是目前较为常用的一种海水源热泵系统取水形式。海岸井取水系统贯穿了地下饱和带和非饱和带,因此为了深入研究海岸井渗流取水机理,基于 COMSOL Multiphysics 软件,构建了一种三维多孔介质气-液两相非饱和渗流模型,研究了井的深度、压差、井布置、井距离等参数对渗流取水系统的影响。结果表明:井间距增大,井深增加,井流量增大,但单位井深流量减少;海岸井流量与海岸线和海岸井压力的平方差成正比;海岸线与海岸井压差为 5 m 时,井渗流速度影响半径约为 25 m,无论两井平行布置还是垂直布置,两井之间距离大于 50 m 时速度场互不影响。

关键词 海水源热泵;COMSOL;海岸井;气-液两相;渗流模型

中图分类号:TK172; P743.4; TU831

文献标识码: A

Study on the Three-Dimensional Coastal Well Gas-Liquid Two-Phase Seepage Model and Related Parameters Based on COMSOL

Jia Xin¹ Wu Shenxin¹ Ning Ye¹ Duanmu Lin²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian, 116622, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China)

Abstract Coastal wells are a commonly used intake method for seawater-source heat pump systems because they help mitigate biofouling and increase seawater temperatures. Coastal well water intake systems operate underground across both saturated and unsaturated zones. Therefore, a three-dimensional gas-liquid porous media seepage model of coastal wells was established based on COMSOL Multiphysics to conduct in-depth research on the seepage mechanisms and water intake behavior of coastal wells. The effects of parameters, such as well depth, pressure difference, well arrangement, and well spacing, on the seepage water intake system were studied. The results indicate that as the well spacing increases, the well depth and well flow rate increase, but the flow rate per unit well depth decreases. The flow rate of the coastal wells is directly proportional to the square difference between the coastline and coastal well porosity pressure. When the seawater hydrostatic porosity pressure difference between the coastline and coastal well was 5 m, the influence radius of the well seepage velocity was approximately 25 m. The velocity field was not affected when the distance between the two wells was greater than 50 m, regardless of whether the wells were arranged parallel or perpendicular to the coastline.

Keywords seawater-source heat pump; COMSOL; coastal well; gas-liquid; seepage model

海水源热泵利用海水中的热能进行热量的转移,实现建筑供暖、供冷的需求,具有节约能源、经济、环保等多方面的优势^[1-2]。与空气源热泵相比,海水源热泵机组能耗节约 26.3%^[3-4]。

目前海水源热泵系统根据源侧取热方式的不同主要分为开式系统和闭式系统^[5]。闭式系统有抛管式换热器^[6]和毛细管换热器^[7]作为海水源热泵系统源侧取热装置,将换热器放置于海水或地下海水中通过换热器从海水中取热,该系统需要具备布置较大面积换热器的场地条件。开式系统的取水方式包括直

接从海水中取水和海岸井取水,通过水泵将海水抽取至机房取热后排放至大海。直接从海水中取水是一种传统的海水源热泵系统取水方式,国内外运行项目较多^[8-12]。对比海岸井取水和直接取水方式,实测和理论研究表明,海岸井取水方式能够有效提高寒冷气候地区水源热泵系统的稳定性、可靠性和能效^[13-14]。

地下海水分为承压水和非承压水,王杨等^[15-16]通过实验和模拟相结合方法,对承压水含水层海岸井渗透取水系统性能进行了研究,渗流模型采用 Ansys Fluent 中标准质量守恒和动量守恒模型,其中动量模

基金项目:国家自然科学基金(51906025)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51906025).)

收稿日期:2024-03-29;修回日期:2024-05-16;录用日期:2024-05-17

型进行动量源项附加,近似满足达西定律。作者之前的研究成果对非承压含水层渗流问题进行了研究,基于势函数法直接建立了多井渗流解析模型,但仅研究了二维饱和带的饱和水区域,不含气相^[17]。浅层海水在垂直剖面上的分布可以按照空隙空间中含海水的相对比例划分为 2 个带:饱和带(海水液相饱和度为 1)和包气带及非饱和带(海水液相饱和度小于 1)。而非承压水海岸井取水系统贯穿了地下饱和带和非饱和带,因此为了更科学地研究非承压含水层海岸井渗流取水过程,首先要建立多孔介质气-液两相非饱和和渗流模型,模拟海岸井抽水或潮汐作用下,地下水水位的变化,该参数对海岸井深度及其水泵的设计至关重要,对结构沉降、海水倒灌等进行工程安全性评估也同样具有重要意义。

COMSOL Multiphysics 软件平台具有专业的多孔介质流模块和地下水流模块,可以灵活组合多个专业模块,提供丰富的多物理场仿真解决方案。该软件直接引用达西模型和气液 2 项储水模型,便于复杂物理模型的构建与求解^[18-19]。

本文基于 COMSOL Multiphysics 软件,构建了三维多孔介质气-液两相非饱和和渗流模型,基于该模型研究了井的深度、压差、井布置、井距离等参数对渗流取水系统的影响。模型考虑了气-液两相,与只考虑液相模型相比,能更准确反映三维取水井渗流机理,也为进一步对海岸井潮汐模拟研究奠定基础。

1 多孔介质非饱和和渗流模型的建立

通过连续性方程推导多孔介质气-液两相非饱和和渗流模型,水相非饱和和渗流方程:

$$(\theta_s - \theta_r) \frac{\partial Se_w}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_{int} k_{r,w}}{\mu_w} \nabla(p_w + \rho_w g \nabla D) \right] = 0 \quad (1)$$

气相非饱和和渗流方程:

$$(\theta_s - \theta_r) \frac{\partial Se_{nw}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_{int} k_{r,nw}}{\mu_{nw}} \nabla(p_{nw} + \rho_{nw} g \nabla D) \right] = 0 \quad (2)$$

式中: θ_s 为总孔隙度或饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; t 为时间; s ; Se_w 为液相饱和度; Se_{nw} 为气相饱和度; k_{int} 为渗透率, m^2 ; $k_{r,w}$ 为液相相对渗透率,与饱和度相关; $k_{r,nw}$ 为气相相对渗透率,与饱和度相关; μ_w μ_{nw} 分别为流体和气体动力黏度, $Pa \cdot s$; p_w 为水压, Pa ; p_{nw} 为气压, Pa ; ρ_w ρ_{nw} 分别为流体和气体密度; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为 (x, y, z) 坐标垂直高度。

为求解方程,构建本构关系:

基质吸力 p_c 表示为:

$$p_c = p_{nw} - p_w \quad (3)$$

饱和度关系:

$$Se_w + Se_{nw} = 1 \quad (4)$$

水相持水系数(Pa^{-1}):

$$C_{p,w} = -\xi \frac{\partial Se_w}{\partial p_c} = (\theta_r - \theta_s) \frac{\partial Se_w}{\partial p_c} \quad (5)$$

式中: ξ 为孔隙率, $\xi = \theta_s - \theta_r$, 该式将饱和度与压力联系在一起。

气相持水系数(Pa^{-1}):

$$C_{p,nw} = (\theta_r - \theta_s) \frac{\partial Se_{nw}}{\partial p_c} = (\theta_r - \theta_s) \frac{\partial(1 - Se_w)}{\partial p_c} = -C_{p,w} \quad (6)$$

得到:

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_w \left[\frac{-k_{int} k_{r,w}}{\mu_w} (\nabla p_w + \rho_w g \nabla D) \right] = \rho_w C_{p,w} \frac{\partial p_{nw}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\rho_{nw} C_{p,w} \frac{\partial p_{nw}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_{nw} \left[\frac{-k_{int} k_{r,nw}}{\mu_{nw}} (\nabla p_{nw} + \rho_{nw} g \nabla D) \right] = \rho_{nw} C_{p,w} \frac{\partial p_w}{\partial t} \quad (8)$$

式中未知量为: p_w 、 p_{nw} 、 $C_{p,w}$ 、 $k_{r,w}$ 、 $k_{r,nw}$, 引入 VG 滞留模型,减少未知量。

下面具体介绍水相 VG 滞留模型,水相体积含水率和饱和度之间的关系:

$$\theta_w = \begin{cases} \theta_{r,w} + Se_w(\theta_{s,w} - \theta_{r,w}), & p_c > 0 \\ \theta_{s,w}, & p_c \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

饱和度和基质吸力 H_c 的关系:

$$Se_w = \begin{cases} \frac{1}{\left[1 + \left| \alpha \frac{p_c}{\rho g} \right|^n \right]^m}, & p_c > 0 \\ 1, & p_c \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

水相持水系数与饱和度之间关系:

$$C_{p,w} = \begin{cases} \frac{\rho g \alpha m}{1-m} (\theta_{s,w} - \theta_{r,w}) Se_w^{\frac{1}{m}} (1 - Se_w^{\frac{1}{m}})^m, & p_c > 0 \\ 0, & p_c \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

液相对渗透率和饱和度之间关系:

当 $H_c > 0$,

$$k_{r,w} = \begin{cases} Se_w^L [1 - (1 - Se_w^{\frac{1}{m}})^m]^2, & p_c > 0 \\ 1, & p_c \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： α 、 n 、 m 、 L 均为本构关系常数。

具体介绍气相 VG 滞留模型，气相体积含水量与其它参数之间的关系：

$$\theta_{nw} = \theta_{s,w} - \theta_w \quad (13)$$

饱和度与其它参数之间的关系：

$$Se_{nw} = 1 - Se_w \quad (14)$$

持水系数与其它参数之间的关系：

$$C_{p,nw} = -C_{p,w} \quad (15)$$

气相对渗透率和饱和度之间关系：

$$k_{r,nw} = (1 - Se_w)^L (1 - Se_w^{\frac{1}{m}})^{2m} \quad (16)$$

将水相与气相 VG 滞留模型带入式 (7) 和式 (8) 中，便可求解多孔介质气-液两相非饱和渗流模型中的压力参数 p_w 和 p_{nw} 以及饱和度 Se_w 等。

得到岩土渗透海水水头分布后，利用达西公式计算渗流速度场：

$$v = -\frac{k_{int} k_{r,w}}{\mu_w} \nabla(p_w + \rho_w g \nabla D) \quad (17)$$

2 模型的验证

为消除实际工程潮汐等不确定性因素的影响，在实验室内构建海岸井渗流取水系统实验台，实验台系统原理如图 1 所示，砂箱尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ，内含 9 口海岸井，当其中 1 口为抽水井时其它井为观测井，测点的具体布置如图 2 所示。选择实验室专用的微流量蠕动水泵，水泵流量范围为 $0 \sim 1\,930 \text{ mL/min}$ ，流量采用秒表及量杯进行精准测量，含水层厚度采用直尺进行测量。数据采集仪采用美国 NI 数据采集仪，数据采集精度为 $0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ （标准工况 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ），温度传感器采用 Pt100 高精度温度传感器，精度为 $0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ，反应时间为 0.3 s 。对实验工况进行模拟验证^[17]，2 号井为抽水井，抽水流量为 300 mL/min ，渗透系数为 $2.10 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，初始含水层厚度为 52 cm 。模拟结果与实验结果对比如图 3 所示，实验值与模拟值相对误差小于 1.8% ，验证了模型的准确性。

3 三维海岸井渗流场研究

根据实际工程项目一般井深小于 100 m ，井距离海岸线距离约为 $100 \sim 1\,000 \text{ m}$ ，初步研究为了缩小研究区域，同时为了保证地块长宽高比例适中，便于网格划分和提高网格质量，选择井距离海岸线距离为

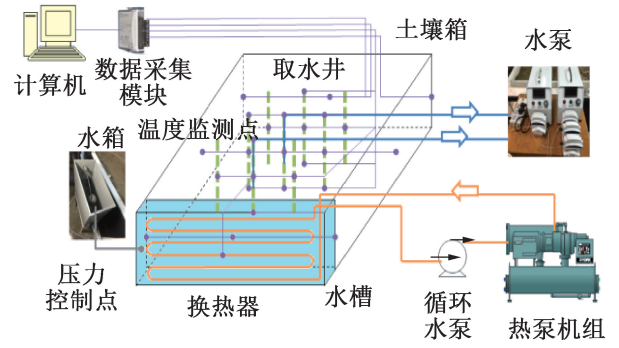


图 1 海岸井取水系统实验台原理

Fig.1 Principle of the experimental platform for coastal well water intake systems

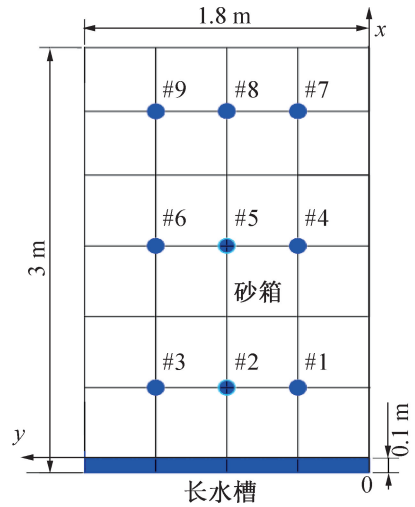


图 2 砂箱测点布置

Fig.2 Layout of measurement points in the sandbox

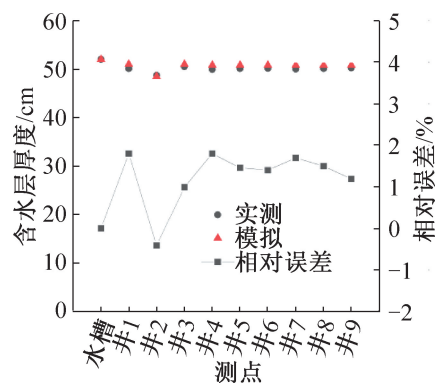


图 3 实验数据与模拟数据对比

Fig.3 Comparison of experimental data and simulated data

100 m 作为本文研究对象。参考海岸井影响区域大小的研究^[20]，基于 COMSOL Multiphysics 软件构建一个深度为 100 m ，长度和宽度均为 200 m 的三维地块进行研究。设置横坐标 $x=0$ 的面为海岸海水渗流入口，在 $x=100, y=100$ 位置布置 40 m 深海岸井作为海水渗流出口，根据工程实测结果设置进出口水压分

布,入口压力设置为 $-9\ 800(z+2.5)$ Pa,出口压力设置为 $-9\ 800(z+7.5)$ Pa,进出口压力水头差为 5 m。 $x=200$ 、 $y=0$ 、 $y=200$ 和 $z=-100$ 平面设置为不透水边界, $z=0$ 设置为自由水面。根据大连某工程项目地质情况,海水动力黏度为 0.829×10^{-3} Pa·s,多孔基体孔隙率为 0.3,渗透系数为 7×10^{-4} m/s。对构建的三维模型进行网格划分如图 4 所示,求解建立的多孔介质气-液两相非饱和渗流模型,得到孔压力和流线场、渗流速度场和非饱和状态饱和度场,如图 5~图 7 所示。非饱和状态饱和度场模拟结果可以直观反映海岸井抽水作用下或潮汐作用下地下水位的变化。海水的潮汐作用可引起约 4 m 的地下水位周期性波动,而海岸井抽水导致的地下水位降幅受抽水量及渗透系数等地质条件影响,通常不超过 5 m。当潮汐作用与抽水效应叠加时,在极端工况下可能产生约 9 m 的水位降幅,致使该区域地下水完全疏干并形成气相带。典型海水含水层厚度介于 20~100 m,本研究基于工程最大钻井深度 100 m 进行计算分析。在此条件下,气相带空间占比相对有限;但对于厚度仅为 20 m 的薄层含水层而言,相同水位降幅将导致气相带占比显著增大,从而对含水层的渗流产生更显著影响。

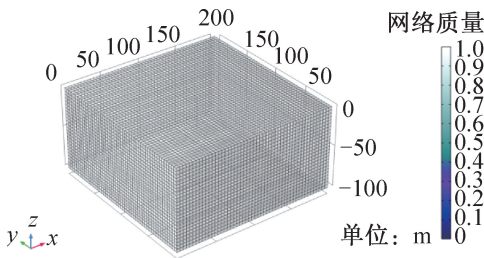


图 4 海岸井三维模型网格划分

Fig.4 Mesh generation of the 3D coastal well model

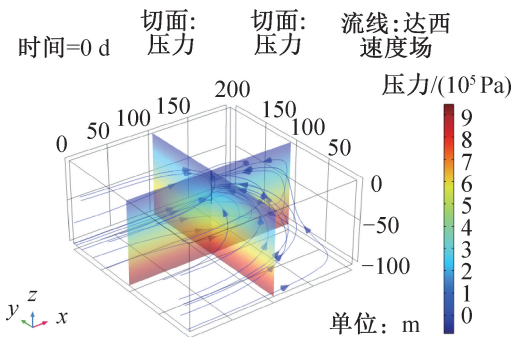


图 5 孔压力场和流线(井深 40 m,压差 5 m)

Fig.5 Porosity pressure field and streamline

(well depth=40 m; pressure difference=5 m)

3.1 井深影响研究

针对不同井深对渗流场的影响进行研究,分别建立井深为 20、40、60、80 m 的井,模拟结果如图 8~

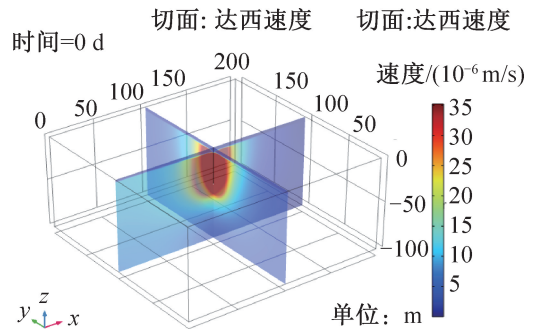


图 6 渗流速度场(井深 40 m,压差 5 m)

Fig.6 Seepage velocity field

(well depth=40 m; pressure difference=5 m)

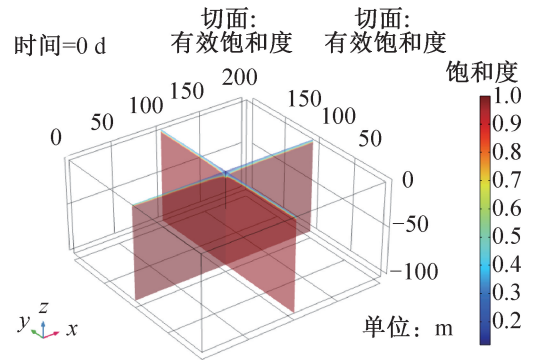


图 7 非饱和状态饱和度场(井深 40 m,压差 5 m)

Fig.7 Saturated field of unsaturated porous media

(well depth=40 m; pressure difference=5 m)

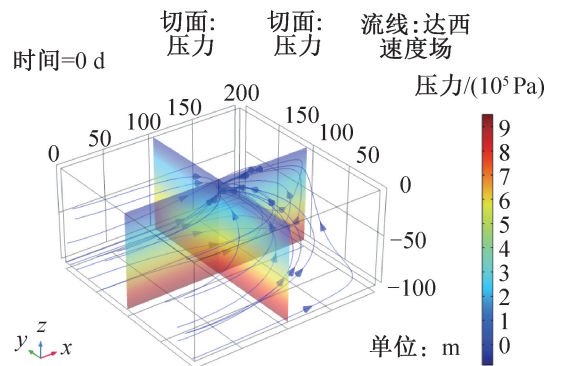


图 8 孔压力场和流线(井深 20 m,压差 5 m)

Fig.8 Porosity pressure field and streamline

(well depth=20 m; pressure difference=5 m)

图 13 所示。通过孔压力场模拟结果图 5、图 8、图 10 和图 12 可知,孔压力场随着深度的增加而增加,孔压力场不受井深变化影响,但流线场受井深度变化影响,井越深流线越水平,即在一个水平面上,水平面研究可以近似用二维表示,反之亦然。由图 3、图 6、图 8 和图 10 的渗流速度场模拟结果可知,渗流速度井前侧(靠近海岸处)大于井后侧,井周围渗流速度明显偏大,井速度影响半径约为 25 m。定压差下,井越深速度场影响越大。

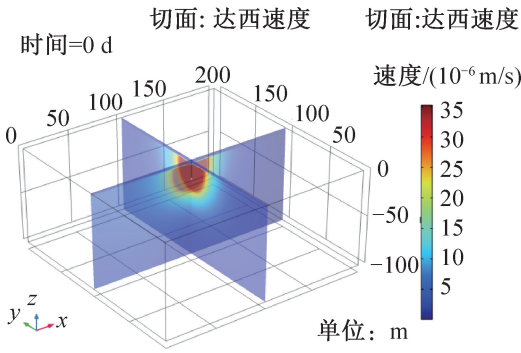


图 9 渗流速度场 (井深 20 m, 压差 5 m)
Fig.9 Seepage velocity field
(well depth=20 m; pressure difference=5 m)

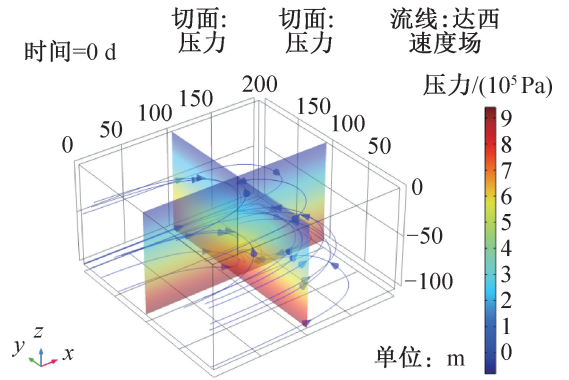


图 12 孔压力场和流线 (井深 80 m, 压差 5 m)
Fig.12 Porosity pressure field and streamline
(well depth=80 m; pressure difference=5 m)

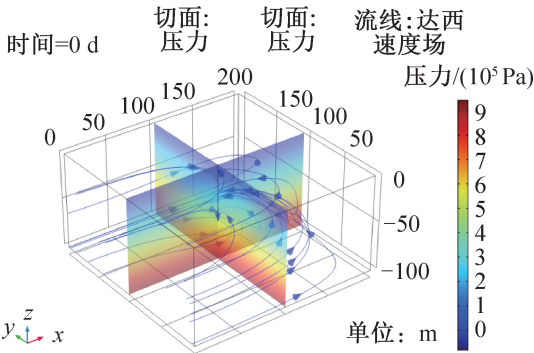


图 10 孔压力场和流线 (井深 60 m, 压差 5 m)
Fig.10 Porosity pressure field and streamline
(well depth=60 m; pressure difference=5 m)

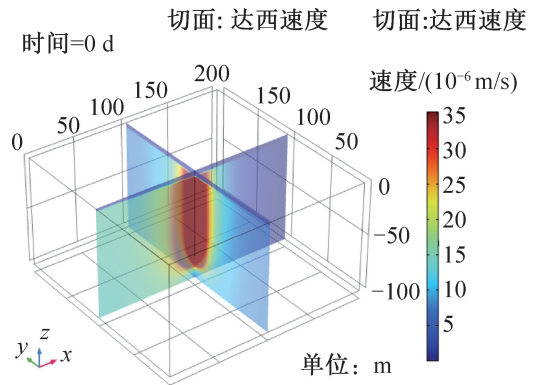


图 13 渗流速度场 (井深 80 m, 压差 5 m)
Fig.13 Seepage velocity field (well depth=80 m;
pressure difference=5 m)

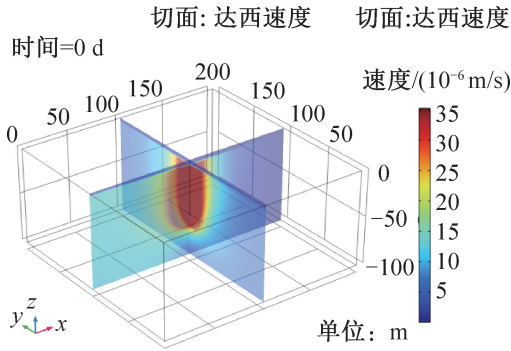


图 11 渗流速度场 (井深 60 m, 压差 5 m)
Fig.11 Seepage velocity field
(well depth=60 m; pressure difference=5 m)

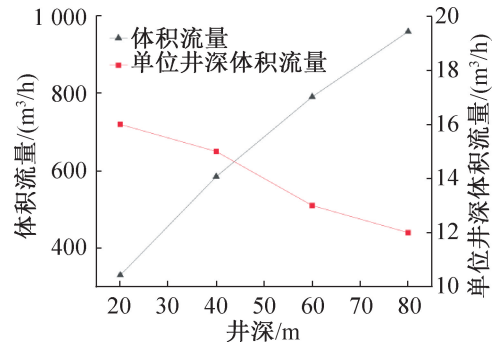


图 14 井深与井流量的变化 (压差 5 m)
Fig.14 Variation of well depth and flow rate
(pressure difference=5 m)

井深与井流量的变化如图 14 所示,井流量随井深的增加而增加,但单位井深流量减少。这也是因为随着井深增加,井渗流场受到底部不透水边界的影响和限制。

3.2 井压差研究

随着海岸井与海岸线压差的增加,井流量增加,模拟计算结果如图 15 所示,但井流量并非随着压差等比例增加,而是满足以下关系式:

$$G = a + b(h_{sh}^2 - h_w^2) \quad (18)$$

式中: G 为井流量,kg/s; $a=0.60$; $b=0.17$; h_{sh} 为海岸线含水层厚度,m; h_w 为海岸井含水层厚度,m。

式(18)井流量与压差的关系与非承压含水层势函数法得到的理论模型结果一致^[17]。当井取水流量大于井渗流量时,井内水位下降,海岸线与海岸井压差变大,渗流流量增加;当取水流量小于井渗流量时,井内水位上升,海岸线与海岸井压差变小,渗流流量减小。

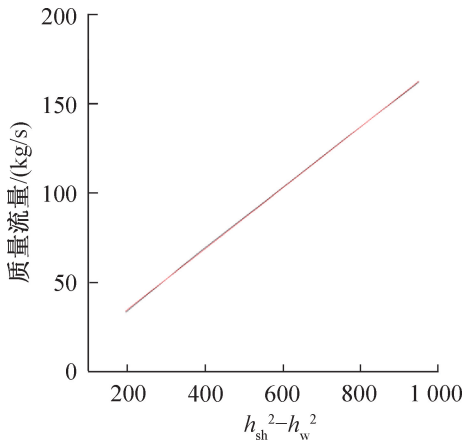


图 15 压差与井流量的变化

Fig.15 Variation of pressure difference and well flow rate

3.3 双井布置研究

两井均距离海岸线 100 m,井深 40 m,海岸井与海岸线水头压力差为 5 m,两口海岸井距离设置为 50 m,分别沿着平行于海岸线方向和垂直于海岸线布置 2 口井,模拟结果如图 16~图 19 所示,可知无论两井平行布置还是垂直布置,两井之间距离大于 50 m 时均互不影响。

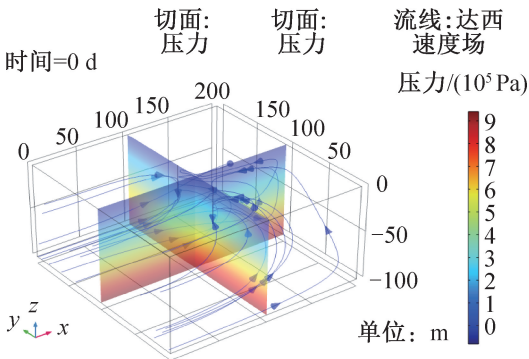


图 16 孔压力场和流线(平行方向布置井间距 50 m)

Fig.16 Porosity pressure field and streamline
(50 m well spacing in parallel arrangement)

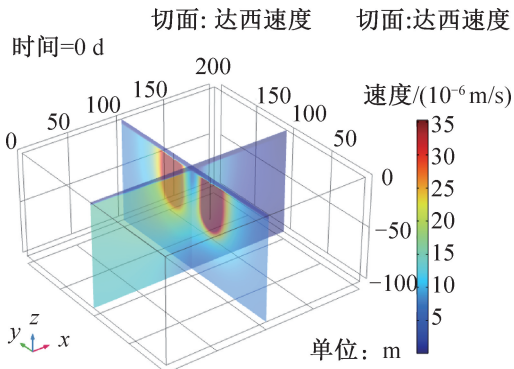


图 17 渗流速度场(平行方向布置井间距 50 m)

Fig.17 Seepage velocity field

(50 m well spacing in parallel arrangement)

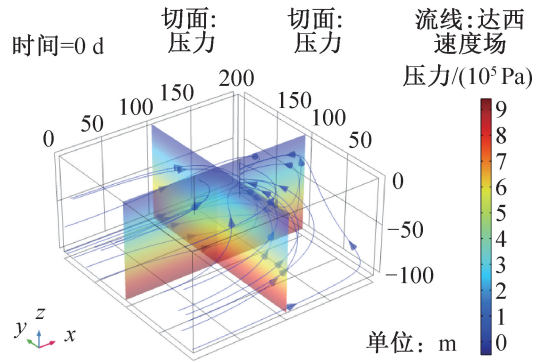


图 18 孔压力场和流线(垂直方向布置井间距 50 m)

Fig.18 Porosity pressure field and streamline
(50 m well spacing in perpendicular arrangement)

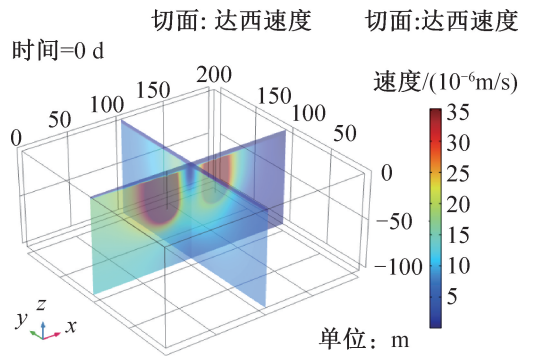


图 19 渗流速度场(垂直方向布置井间距 50 m)

Fig.19 Seepage velocity field
(50 m well spacing in perpendicular arrangement)

由图 20 可知,垂直方向布置两井时井流量大于平行方向布置,井流量随井间距的增大而增大。

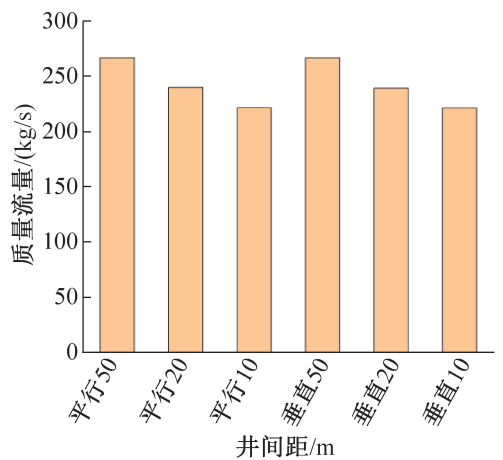


图 20 井间距与井流量变化

Fig.20 Well spacing and well flow variation

4 结论

本文针对海岸井渗流取水问题构建了多孔介质气-液两相非饱和渗流三维模型,基于该模型模拟研

究了井的深度、压差、井布置等对渗流取水系统的影响,得到如下结论:

1) 井深越接近含水层厚度,流线越水平,即流线在一个水平面上,可以近似为二维,反之亦然。

2) 渗流速度井前侧(靠近海岸处)大于井后侧,井周围渗流速度明显偏大,海岸线与海岸井压差为5 m时,井速度影响半径约为25 m。

3) 井流量随井深的增加而增加,但单位井深流量减少。

4) 随着海岸井与海岸线压差的增加,井流量增加,流量与海岸线和海岸井压力的平方差成正比。

5) 海岸线与海岸井压差为5 m时,无论两井平行布置还是垂直布置,两井间距离大于50 m时互不影响,因此多井布置距离建议大于50 m。垂直方向布置井流量大于平行方向布置,井间距增大,井流量增大。

参考文献

[1] 郭汇江. 海水源热泵技术海上设施应用概述[J]. 节能, 2020, 39(12): 108-109. (GUO Huijiang. Overview of seawater source heat pump for offshore installations[J]. Energy Conservation, 2020, 39(12): 108-109.)

[2] 李国庆. 浅谈海水源热泵技术的优缺点[J]. 建材与装饰, 2017(19): 137-138. (LI Guoqing. Advantages and disadvantages of seawater-source heat pump technology [J]. Construction Materials & Decoration, 2017(19): 137-138.)

[3] 郭友明, 黄虎, 陆春林. 江苏地区海水源热泵与传统空调系统能耗与环境影响比较[J]. 建筑科学, 2009, 25(12): 75-79. (GUO Youming, HUANG Hu, LU Chunlin. Comparison of energy consumption and environmental impact between seawater-source heat pump and traditional air-conditioning system in Jiangsu [J]. Building Science, 2009, 25(12): 75-79.)

[4] 胡松涛, 陈茂科, 郭潇潇, 等. 青岛帆船中心媒体中心海水源热泵空调系统能耗分析[J]. 中国建设信息: 供热制冷, 2008(8): 38-40. (HU Songtao, CHEN Maoke, GUO Xiaoxiao, et al. Energy consumption analysis of seawater source heat pump air conditioning system in Qingdao Olympic sailing center media center [J]. China Construction Heating & Refrigeration, 2008(8): 38-40.)

[5] 姜坤. 海水源热泵运行特性实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018. (JIANG Kun. Experimental study on operation characteristics of seawater source heat pump [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.)

[6] 俞洁. 用于海水源热泵系统的抛管式换热器优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (YU Jie. An optimization research on casted heat exchanger used in seawater source

heat pump system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)

[7] 周彭. 毛细管海水源热泵系统运行特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016. (ZHOU Peng. Study on operation characteristics of capillary seawater source heat pump system [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.)

[8] 贾欣, 端木琳, 舒海文, 等. 黄海北部海水源热泵供热和免费供冷系统实测[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 42-46. (JIA Xin, DUANMU Lin, SHU Haiwen, et al. Field measurement on a seawater source heat pump system for heating of buildings and a free cooling system in coastal area of the northern Yellow Sea [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 42-46.)

[9] 康熙, 康侍民. 海水源热泵系统夏季工况实测及相关问题分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(5): 6-7. (KANG Xi, KANG Shimin. Actual measurement and related problems analysis of seawater source heat pump system in summer working condition [J]. Gas & Heat, 2013, 33(5): 6-7.)

[10] ROPSTEN F V. The largest seawater heat pump facility worldwide, with 6 Unitop 50FY and 180 MW total capacity [EB/OL]. (2017-01-17) [2017-08-02]. http://www.friotherm.com/webautor-data/41/vaertan_e008_uk.pdf.

[11] VAN DE VEN H. Large energy system ; an international overview [J]. IEA Heat Pump Center Newsletter, 1998, 16:10-15.

[12] SONG Y H, AKASHI Y, YEE J J. Effects of utilizing seawater as a cooling source system in a commercial complex [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(10): 1080-1087.

[13] 吴君华. 渗滤取水技术在海水源热泵系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (WU Junhua. Application of infiltration intake technology in seawater source heat pump system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.)

[14] JIA Xin, DUANMU Lin, SHU Haiwen. Effect of seawater intake methods on the performance of seawater source heat pump systems in cold climate areas [J]. Energy and Buildings, 2017, 153: 317-324.

[15] 王杨. 海水源热泵渗滤取水热源换热性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017. (WANG Yang. Study on heat transfer performance of seepage water source in seawater source heat pump [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.)

[16] WU Junhua, LI Haishan, WANG Fuchang. Experimental study of seawater seepage and heat transfer in a laboratory vertical beach well [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 403-409.

- [17] 贾欣. 海水源热泵多井取水系统渗流换热特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (JIA Xin. Study on seepage and heat transfer of multi-well infiltration intake system for seawater source heat pump[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.)
- [18] 周丹坤, 李晓昭, 常晓军. COMSOL 平台在城市地下多种资源相互影响分析中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 526-532. (ZHOU Dankun, LI Xiaozhao, CHANG Xiaojun. Application of COMSOL platform in analysis of interaction of urban underground multiple resources[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 526-532.)
- [19] 张彬, 李卫明, 封帆, 等. 基于 COMSOL 的地下水封油库围岩流固耦合特征模拟研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 789-795. (ZHANG Bin, LI Weiming, FENG Fan, et al. Numerical simulation for fluid-solid coupling characteristics in surrounding rock of underground

water-sealed oil storage based[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 789-795.)

- [20] JIA Xin, DUANMU Lin. Performance study on the seepage and heat transfer in a bench-scale multi-well infiltration intake system for seawater source heat pump [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102268.

通信作者简介

贾欣, 女, 博士, 副教授, 大连大学建筑工程学院, 13390004838, E-mail: jiaxin851018@163.com。研究方向: 热泵及可再生能源在建筑中的利用。

About the corresponding author

Jia Xin, female, Ph. D., associate professor, College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 86-13390004838, E-mail: jiaxin851018@163.com. Research fields: heat pump and the application of renewable energy in buildings.

(上接第 113 页)

44(7): 63-68. (FU Chaobo, SONG Pengyun. Discussion on critical Reynolds number of fluid film flow state between the non-contact mechanical seal faces[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(7): 63-68.)

通信作者简介

王晓春, 男, 博士, 苏州科技大学环境科学与工程学院,

18505127962, E-mail: sprdawn@163.com。研究方向: 冰浆流动特性。

About the corresponding author

Wang Xiaochun, male, Ph. D., School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 86-18505127962, E-mail: sprdawn@163.com. Research fields: flow characteristics of ice slurry.