

U型地源热泵系统热-流-力学耦合模型研究

赵军^{1,2}, 刘泉声², 张程远²

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 地下水源热泵井 (ground source heat pump, 简称 GSHP) 是一种新型的浅层能源利用技术。基于能量守恒方程和质量守恒方程, 建立单井热泵系统的热传递方程、渗流方程、连续性方程以及 THM (thermo-hydro-mechanical) 耦合本构方程。通过 COMSOL 软件, 对单井系统周围区域进行流动模拟, 得到井体的整体热位移变形图和破坏准则图。研究表明, (1) 水压力梯度随着井体半径的增加而变大, 最终趋于一个稳定的值; (2) 热传递模型的理论计算结果和工程现场的实测值具有较好的吻合性, 证明该模型的合理性和有效性。

关键词: 地源热泵; 热-流-力学耦合; 数值模拟; 渗流; 破坏准则

中图分类号: TE 766

文献标识码: A

Study of thermo-hydro-mechanical coupling model in U-shaped GSHP

ZHAO Jun^{1,2}, LIU Quang-sheng², ZHANG Cheng-yuan²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Ground source heat pump (GSHP) is a new type technology for the use of the superficial layer energy. According to the law of conservation of energy and the law of conservation of mass, the equation of heat transfer, the equation of seepage, the equation of continuity and the constitutive equation of thermo-hydro-mechanical (THM) are established respectively. The whole displacement and deformation diagram of single-well and the failure criterion are obtained through simulating the flow zone with software COMSOL. The results indicate that: (1) The pressure gradient increases with elevated distance from the well, and trends to a steady value eventually. (2) The goodness of fit is good by comparing the result obtained from the heat transfer model and actual engineering measurement, which shows the reasonability and validity of the thermo-hydro-mechanical coupling model.

Key words: ground source heat pump; thermo-hydro-mechanical coupling; numerical simulation; seepage; failure criterion

1 研究背景

地下水源热泵技术是一种采集浅层低温地能, 同时满足供暖和制冷的需求, 并且实现零污染排放的能源利用方式。2005年该技术被中国建设部列为建筑业十项新技术之一, 在建筑物中的推广应用是国家列为节约资源节约工作重点之一, 同时, 许多地方都把发展地下水源热泵作为发展本地经济的一个契机, 对“节能减排”和“两型社会”建设具有建设性的意义。在地下水源丰富的地区, 如大江大河流域, 地下水源热泵是可以普遍采用的一种地源热泵形式。地下水源热泵利用了地下水, 必须涉及

取用水的回灌, 不回灌可以避免地下热积累对热泵系统效能的影响, 但是, 只取水不进行有效回灌或回灌不慎, 都会造成地面沉降和已有地下管线的破坏。当前水资源税的开征, 表明国家正着力改变长期以来实行资源与环境无价制度导致资源与环境恶化的现状, 通过征收资源与环境税, 体现资源和环境的价值。

关于单井系统 (见图 1), 国内外不少专家和学者^[1-8]有相当多的贡献。在渗流场研究方面, 李旻等^[9]对单井回灌的含水层渗流场给出了解析解, 为数值模拟分析奠定了基础。何满潮等^[10-12]针对地热水, 对井回灌渗流场中的渗透系数进行了研究, 得

收稿日期: 2002-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40772161); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室前沿探索性项目(No. SKLQ009)。第一作者简介: 赵军, 男, 1982年生, 博士, 主要从事隧道及地下空间工程方面的研究。E-mail: jzhao_rsm@163.com

出受地下水温度的影响,井体周围产生的物理堵塞,使得井体周围的渗透系数减小,增加了回灌的难度,并得出 $K = K_0 e^{-\lambda t}$ (K_0 为初始孔隙系数; t 为时间变量; λ 为常数) 这一衰减方程。虽然国内的不少学者在地源热泵井的回灌问题上做了大量的工作,但关于地下水源热泵系统热-温度-力全耦合研究文献鲜见,仅有少量以将热泵井群与含水层作为一个整体系统研究其整体储热性能这样的理念为基础的

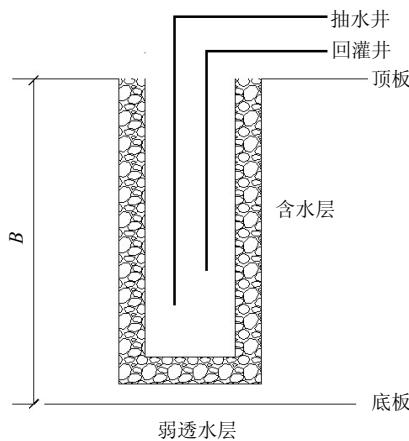


图1 单井回灌系统简示意图
Fig.1 Sketch of standing well system

本文从能量守恒定理、质量守恒定理等原理出发,分别建立热传递方程、渗流方程、连续性方程以及 THM 耦合本构方程,将水源热泵单井和地下水环境作为整个系统来进行多场的耦合分析研究,利用数值软件对 THM 耦合模型给出定性的评价方法。

基本假定:①岩(砂)体是均质的,各向同性材料;②地下水流动服从 Brinkman 方程, Darcy 定律;③岩体的变形为小变形,连续。

2 控制方程的建立

2.1 热传递方程的建立

单井热泵系统是利用地下水和地表温差提取能量。在夏季,由于地下水水温低于地表水,可以利用它来降温,而冬季则恰好相反。被利用过的冷(热)水往往都是要回灌到地下,它与原有地下水一般来说存在着温度差异,将引起地下水形成温度峰面,势必对再次抽取地下水将产生影响。

引出参数有效热传导率 k_{eff} 用以定性的描述热传递过程:

$$k_{\text{eff}} = nk_1 + (1-n)k_s \quad (1)$$

式中: n 为岩体的孔隙率; k_1 、 k_s 分别为流体和固

体的热传导率。控制体的能量平衡方程为

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 C_1 v_x T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 C_1 v_y T) + \rho_1 C_1 v_x T + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1 C_1 v_z T) \right] dx dy dz - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz = Q dx dy dz - \frac{\partial T}{\partial t} [n \rho_1 C_1 + (1-n) \rho_s C_s] dx dy dz \quad (2)$$

式中: ρ_1 为流体的密度; C_1 为流体的比热容; C_s 为固体的比热容; T 为温度; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向的流体速度。

以 M 和 N 来分别替代等式(2)左端系数,即

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 C_1 v_x T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 C_1 v_y T) + \rho_1 C_1 v_x T + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1 C_1 v_z T) \\ N &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

简化可得

$$M dx dy dz - N dx dy dz = Q dx dy dz - [n \rho_1 C_1 + (1-n) \rho_s C_s] \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (4)$$

式中: Q 为汇源项。

利用坐标矢量关系后可进一步简化为

$$[n \rho_1 C_1 + (1-n) \rho_s C_s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 C_1 V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = Q + k_{\text{eff}} \nabla^2 x_i \quad (5)$$

在单井系统中,往往更多的时候是关心径向的热传递,由于考虑了岩体的各向同性,式(5)可进一步简化为

$$[n \rho_1 C_1 + (1-n) \rho_s C_s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 C_1 V \frac{\partial T}{\partial x} = Q + k_{\text{eff}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

式中: ρ_s 为固体骨架的密度; V 为流体的速度。

式(6)就是单井系统中热传递的能量表达式。

2.2 流动方程

2.2.1 区域流动方程

在利用水源热泵井的过程中,抽取的地下水的流动速度的快慢对利用能量的过程起到关键的作用,接近井体壁处,流体速度较大,而远离井体处流体的速度相对较小,因此,对井壁处和远离井壁处分别建立不同的流动方程加以描述:

$$\left[-\nabla \cdot \frac{\eta}{n}(u_{i,j} + u_{j,i})\right] - \left(\frac{\eta}{k}u_i + \nabla p\right) = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{K \Delta P}{\eta \Delta x} \quad (8)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子; η 为黏度系数 (kg/(ms)); \mathbf{u} 为流体对固体颗粒的相对速度矢量 (m/s); $u_{i,j}$ 、 $u_{j,i}$ 分别为 I 、 j 向的位移分量; k 为渗透率 (m^2); p 为水压力 (kPa)。

2.2.2 连续性方程

地下水运动的连续性方程可以从质量守恒原理出发来考虑, 即渗流场中水在某一单元体内的增减速率等于进出该单元流量速率之差, 分别得到流体和固体的质量守恒方程^[13-14]为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (\rho_f n s v_f) + \frac{\partial (\rho_f n s)}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot [(1-n)\rho_s v_s] + \frac{\partial [(1-n)\rho_s]}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: s 为饱和度; ρ_f 为流体密度; v_f 为流体速度, 其他符号意义同前。

2.3 应力本构方程的建立

2.3.1 有效应力原理

岩体中饱和-非饱和岩体的有效应力原理^[8]可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ij} &= \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij}; \quad \sigma'_{ij} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p - \boldsymbol{\varepsilon}_w) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_p &= -\mathbf{m} \frac{p}{3K_s}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_w = -\mathbf{m} \beta_w s \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 为孔隙水压力引起的应变; $\boldsymbol{\varepsilon}_w$ 为岩体裂隙吸水后膨胀引起的应变; β_s 为固相线热膨胀系数; β_w 为吸水线膨胀系数; p 为孔隙水压力和空气压力 (kPa); \mathbf{C} 为岩体的弹性刚度张量; \mathbf{m} 为法向应力单位矩阵; K_s 为固相的压缩系数。

2.3.2 几何方程

根据假定③可得几何方程和体积应变:

$$2\varepsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i}; \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{kk} \quad (11)$$

式中: u 为岩体骨架的位移量; ε_v 为体应变。

2.3.3 岩/砂体中力学平衡方程

单井回灌系统中, 由于冷(热)水的抽取和回灌都将对岩体的内部应力 (F_i) 状态产生影响, 而对其主要贡献的是水头压力的变化和温度的变化。

$$\sigma_{ji,j} + F_j = 0 \quad (12)$$

将式 (10) 中第二、三式代入式 (12) 可得

$$\nabla \left[\mathbf{C} \left(\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{m} \frac{p}{3K_s} + \mathbf{m} \beta_w s \right) - \alpha p \boldsymbol{\delta}_{ij} \right] = -F_i \quad (13)$$

因孔隙水压力是时间的函数, 对其求偏微分可得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = s \frac{\partial p_k}{\partial t} \quad (14)$$

对式 (14) 取对时间的偏微分, 忽略饱和度对时间变化的影响:

$$\nabla \left[\mathbf{C} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\mathbf{m}}{3K_s} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} \boldsymbol{\delta}_{ij} \right] = -\frac{\partial F_i}{\partial t} \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15), 可得

$$\nabla \left[\left(\mathbf{C} \frac{\mathbf{m}}{3K_s} s + \alpha s \boldsymbol{\delta}_{ij} \right) \frac{\partial p_k}{\partial t} + \mathbf{C} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} \right] = -\frac{\partial F_i}{\partial t} \quad (16)$$

$$p_k = \rho_w g h (1 + \gamma c) \quad (17)$$

式中: h 为水头高度; γ 为流体重度; c 为常变量; p_k 为孔隙水压力盒空气压力 (kPa)。

对式 (17) 求关于时间 t 的偏微分:

$$\frac{\partial p_k}{\partial t} = \rho_w g (1 + \gamma c) \frac{\partial h}{\partial t} + g (1 + \gamma c) h \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \quad (18)$$

根据假定③可得

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial \rho_w}{\partial p_k} \frac{\partial p_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_w}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\rho_{w0}}{k_1} \frac{\partial p_k}{\partial t} - \rho_{w0} \beta_1 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

式中: β_1 为热膨胀系数。

将式 (17) 代入式 (19), 可得

$$\frac{\partial p_k}{\partial t} = \frac{\rho_w g (1 + \gamma c) \frac{\partial h}{\partial t} - g \rho_{w0} \beta_1 h (1 + \gamma c) \frac{\partial T}{\partial t}}{\left[(1 - g (1 + \gamma c) \frac{\rho_{w0}}{k_1} h) \right]} \quad (20)$$

再将式 (20) 代入式 (16), 经过组合整理后, 可得

$$\nabla \left\{ B \left[\rho_w g (1 + \gamma c) \frac{\partial h}{\partial t} - g \rho_{w0} \beta_1 h (1 + \gamma c) \frac{\partial T}{\partial t} \right] + \right. \quad (21)$$

$$\left. \frac{1}{2} \mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right\} = -\frac{\partial F_i}{\partial t}$$

式中:

$$B = \frac{\left(\mathbf{C} \frac{\mathbf{m}}{3K_s} s + \alpha s \boldsymbol{\delta}_{ij} \right)}{\left[(1 - g (1 + \gamma c) (h - z) \frac{\rho_{w0}}{k_1}) \right]} \quad (22)$$

式 (21) 中只含有温度 T 、水头压力 h 和位移分量 u 以及内力 F_i 的本构方程。

为便于说明数值模拟的需求, 下面给出单井系统岩土体破坏准则, 考虑到实际工程, 特给出三维状态下的库仑破坏准则:

$$fail = (\sigma_3 + p) - Q(\sigma_1 + p) + N \left(1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \right) \quad (23)$$

式 (23) 中 N 和 Q 可分别用下式来表达:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ N &= \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} s_0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: s_0 、 φ 分别为黏聚力和内摩擦角。

通过式 (23) 可以看出, 破坏准则是通过 $fail$ 来表达的, 具体的判断准则可表述为: 当 $fail = 0$ 时, 单井周围的岩体开始破坏; 当 $fail > 0$ 时, 单井周围岩体处于稳定的状态; 当 $fail < 0$ 时, 单井周围岩体处于破坏状态。

3 工程实例

以武汉某小区作为工程为例, 施工前对场地的地质状况进行了解, 特别注意是否有地下管线及其准确位置。对地面进行清理, 铲除地面杂草、杂物和浮土, 平整地面, 确定钻孔的具体位置, 图 2、3 分别为现场钻井图和测试井管道连接示意图。整理现场监测到的数据后, 得到地下水温与时间的变化关系, 图 4 为理论值与实测值的关系。从图 4 可以得出, 理论值和实测值的误差控制在 10% 内, 说明文中所提出的传热模型对预测水源热泵井的井周温度场的变化是有效的。

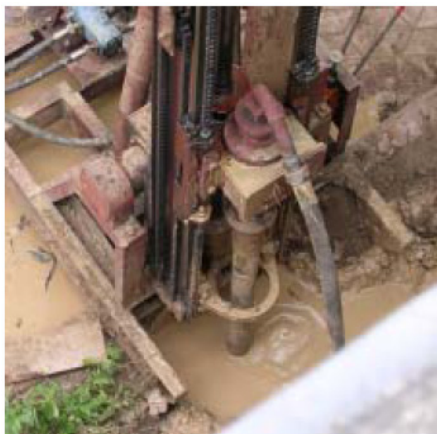


图 2 钻孔
Fig.2 Drill hole

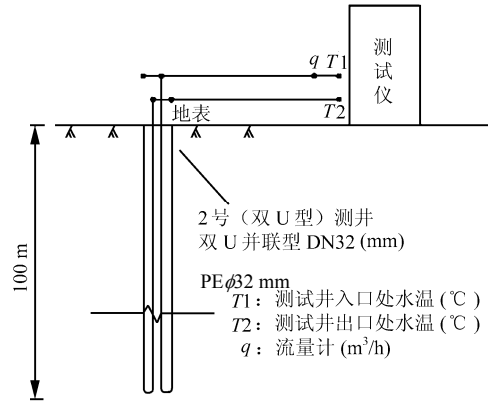


图 3 测试管道连接示意图
Fig.3 Sketch of test tube

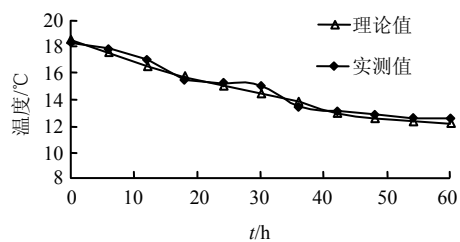


图 4 理论值与实测值的比较
Fig.4 Comparison between theoretical values and actual measurement values

4 数值模拟

数值模拟前, 先对地质资料图进行适当的简化, 经过简化后的地址柱状图依次为①杂填土层, 厚 6 m; ②黏土层, 厚 24 m; ③细砂层, 厚 45 m; ④粗砂砾层, 厚 25 m; 地下稳定水位位于 6 m 水头处。建立在第四系地层上, 呈砂、砂砾石层的交互叠置, 为了便于模型的模拟, 取图 5 的模型, 厚 4 m, 长 5 m, 宽 1 m, 为完全饱和和砂土, 各向同性弹性材料, 井体贯穿地层 100 m, 井体半径为 0.25 m, 材料的力学参数见表 1。

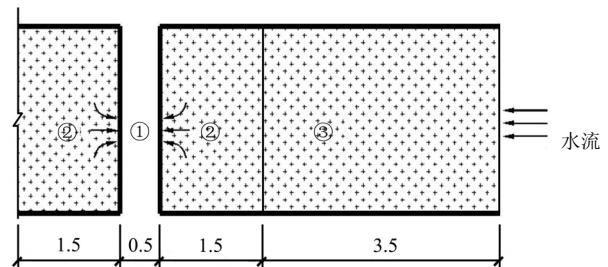


图 5 井体模型 (单位: m)
Fig.5 The model of well (unit: m)

表 1 井体材料参数
Table 1 Parameters of well

泊松比 ν	黏聚力 s_0 /kPa	内摩擦角 φ /%	弹性模量 E /MPa	初始水压力 P_0 /kPa
0.20	0.75	26	500	0.12

经过参数取值后, 首先得到井体的水压力梯度同轴向距离的关系图, 如图 6 所示。从图中可以看出, 当井体半径 $r > 3$ 时, 曲线较平缓; 当 $0.5 < r < 1.5$ 时, 曲线将发生较大的变化, 此时可以用 Darcy-Brinkman 方程来描述; 当 $0 < r < 0.5$ 时, 曲线呈“陡峭”型, 可以用 N-S 方程来描述; 水压力随着井体半径的增加而增加, 直至达到一个稳定的值。因此, 本文所提到的流动耦合方程是适合本模型的。

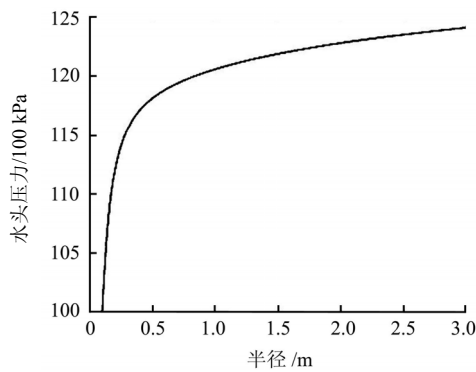


图 6 水压力与井体半径关系图
Fig.6 Relationship between r and P

在实际工程中必须要考虑到井体成形后井体的整体变形图, 为了便于说明问题, 得到了单井的整体位移图, 如图 7 所示, 图中 x 、 y 、 z 分别为模拟整体位移图, 单位为 m 。

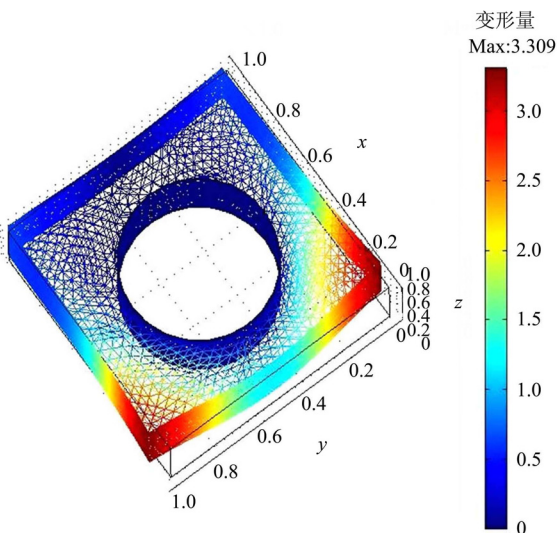


图 7 单井整体位移及变形图
Fig.7 The whole displacement and deformation diagram of single-well

模型在计算过程中只考虑了半对称结构, 从图 7 可以看出, 井体的最大位移发生在井体的边缘处,

最大变形量达到 $3.309 \times 10^{-3} m$, 在井壁处变形量接近为 0。

现在对井体的破坏准则进行讨论, 利用式 (23) 作为理论依据, 对 $fail$ 取不同的值后得到结果如图 8 所示, 为无量纲。从图中可以看出, 考虑到模型的对称性, 因此只得出井体的两个角处产生了热位移, 随着 $fail$ 值越来越小, 破坏影响范围将越大, 施工前对岩体的性质了解对井体是否失效起到关键作用。

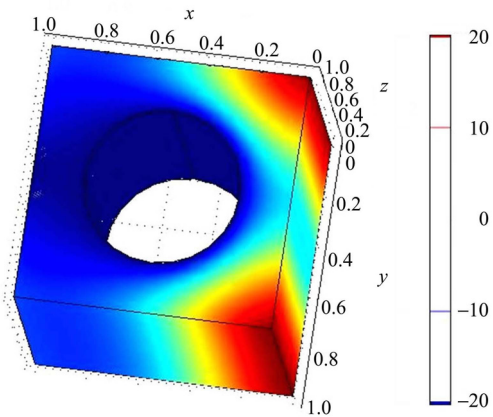


图 8 井体破坏准则模型图 (单位: m)
Fig.8 The model of the failure criterion for well (unit: m)

5 结 论

- (1) 通过井体的破坏准则可以得出, 井体随着破坏值的变化而变化, 在实际工程中应充分了解岩体的性质后才能施工。
- (2) 单井系统中水压力随着井体半径的增加而增加, 直至达到一个稳定的值。
- (3) 现场温度实测值和理论值具有较好的吻合性, 本文的模型对预测水源热泵井温度的变化是有效的。

参 考 文 献

[1] MILLARD A, REJIB A, CHIJIMATSU M, et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository—BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 2: Effects of THM coupling in continuous and homogeneous rocks[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2005, 42: 731—744.

[2] MASSEI N, LACROIX M, WANG H Q, et al. Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer

- parameters[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2002, 57: 21—39.
- [3] STEPHEN E S. Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: influence of physical structure of the medium[J]. **Journal of Hydrology**, 1995, 167: 79—98.
- [4] STEPHEN E S. The importance of the third dimension on transport through saturated porous media: case study based on transport of particles[J]. **Journal of Hydrology**, 1996, 179: 181—195.
- [5] AHFIR N D, BENAMAR A, ALEMA, et al. Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: a laboratory study[J]. **Transport Porous Media**, 2009, 76: 589—307.
- [6] BARTELDIS G A, BRUINING J., AND MOLENAAR J. The modeling of velocity enhancement in polymer flooding[J]. **Transport Porous Media**, 1997, 26: 75—88.
- [7] NORIO T, KASUMI Y, GEORGE Z. Model study of the thermal storage system[J]. **Geothermics**, 2003, 32: 603—607.
- [8] MASSEI N, LACROIX M, WANG H Q, et al. Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: Comparison of the transfer parameters[J]. **Journal of Contaminat Hydrology**, 2002, 57: 21—39.
- [9] 李旻, 刁乃仁, 方肇洪. 单井回灌地源热泵承压含水层渗流解析[J]. **山东建筑工程学院学报**, 2006, 21(1): 1—5.
LI Min, DIAO Nai-ren, FANG Zhao-hong. Analytical solution of seepage flow in a confined aquifer with a standing column well[J]. **Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering**, 2006, 21(1): 1—5.
- [10] 何满潮, 李启民. 地热资源在移民小区可持续发展应用研究[J]. **太阳能学报**, 2005, 25(2): 223—226.
HE Man-chao, LI Qi-ming. Reserch of sustainable development of geothermal resources in immigrant communities[J]. **Acta Energiæ Solaris Sinica**, 2005, 25(2): 223—226
- [11] 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 a round geothermal production-reinfection doublets wells[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(3): 245—248.
- [12] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. **吉林大学学报(自然科学版)**, 2002, 32(4): 374—377.
HE Man-chao, LIU Bin, YAO Lei-hua, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. **Journal of Jilin University(Earth Science Edition)**, 2002, 32(4): 374—377.
- [13] 孔祥言, 李道伦, 徐献芝, 等. 热-流-固耦合渗流的数学模型研究[J]. **水动力学研究与进展**, 2005, 20(2): 270—275.
KONG Xiang-yan, LI Dao-lun, XU Xiang-zhi, et al. Study on the mathematical models of coupled therma hydrological mechanical process[J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2005, 20(2): 270—275.
- [14] 张强林, 王媛. 岩体 THM 耦合模型控制方程建立[J]. **西安石油大学学报**[J]. 2007, 22(2): 139—145.
ZHANG Qiang-lin, WANG Yuan. Establishment of THM coupling governing equations in rock masses[J]. **Journal of Xi'an Shiyou University**, 2007, 22(3): 139—145.