

文章编号: 1000-7598 (2013) 11-3249-05

水源热泵井回灌堵塞颗粒迁移模型的建立

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: 以地下水源热泵井回灌中的物理堵塞问题作为研究背景, 建立基于质量平衡方程来模拟多孔介质中颗粒的迁移方程和颗粒的沉积造成孔隙损伤的数学模型。该模型充分考虑了颗粒流动速度修正系数、孔隙率修正系数以及颗粒在孔隙里发生捕获率 3 个因素; 模型的建立考虑孔隙率变化的情况, 在物质的迁移和堵塞的过程中, 孔隙率的变化往往也是个动态的变化过程; 与传统的过滤模型相比, 考虑了速度折减系数和流量折减系数后新建模型更加系统、全面。该模型为解决回灌井物理堵塞的室内外试验研究提供理论依据。

关 键 词: 水源热泵; 速度修正系数; 颗粒迁移; 孔隙率修正系数; 颗粒沉积

中图分类号: TU 201.5

文献标识码: A

Establishment of particle transport model in water source heat pump of physical clogging reinjection well

ZHAO Jun^{1,2}, LIU Quan-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: Taking the physical clogging of water source heat pump (WSHP) as research background, based on mass balance equation, a migration equation of particles in porous media and a mathematical model of porosity damage due to particle deposition are established. The proposed model considers the velocity correction parameter, the porosity correction parameter and the probability of capture of particles. The porosity change is dynamic in the process of material migration and plugging by considering the change of porosity. Compared with the traditional filtering model, the proposed model is more systematic and comprehensive with the consideration of the speed reduction factor and flow reduction factor. It provides theoretical basis for solving the physical clogging of reinjection well in laboratory and field tests.

Key words: water source heat pump (WSHP); velocity correction parameter; particle transport; porosity correction parameter; particle deposition

1 引 言

地下水源热泵是极具潜力的一项绿色节能技术, 2005 年被中国建设部列为建筑业十项新技术之一, 其在建筑物中的推广应用被国家列为节约资源的重点之一, 同时许多地区都把发展地源热泵作为发展本地经济的一个契机。例如, 北京市自 1999 年起以北京工业大学为基地, 进行地热供暖示范工程及低温地热能梯级利用技术研究, 同时将地源热泵中央空调作为 2008 年北京奥运会指定选用的空

调形式。

地下水源热泵技术 (ground source heat pump, 简称 GSHP), 是一种采集浅层低温地能 (地下水), 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如图 1 所示。地源热泵的研究从 1912 年开始, 并且 20 世纪 50 年代在欧洲和美国经历了研究的第一次热潮, 但直到 20 世纪 70 年代, 世界石油危机使得人们关注节能、高效用能, 地源热泵的推广应用才得以迅速展开。它不仅利用了大自然的可再生能源, 大幅度节约传统的高品位建筑

收稿日期: 2010-10-26

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); 安徽理工大学博士人才引进科研项目 (No. 11147)。

第一作者简介: 赵军, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下空间工程支护、地源热泵工程等方面的研究。E-mail: jzhao_rsm@163.com

用能,还可以真正实现供暖制冷无污染的绿色居住环境。国内外专家均认为,采集大自然低温可再生能特别是浅层地能是 21 世纪取代传统供暖制冷方式最为现实、最有前途的技术措施。但地下水的大量采集如果没有进行及时地回灌会造成地表沉降,从而影响到建筑物的使用安全,因此,对采集后的地下水(利用后的地下水)进行回灌是很有必要的。但对地下水的回灌并不像采集那么轻松,尤其引出回灌过程中困难的问题,造成回灌困难的机制一般为物理堵塞、化学堵塞以及微生物堵塞这 3 大类。本文仅着眼于物理堵塞的问题,从悬浮颗粒的迁移和沉积着手进行研究,图 2 为物理堵塞的示意图。

在国外,Iwasaki^[1]首先提出了颗粒捕获和渗透的现象模型,模型假定颗粒沉积符合线性动力学方程,模型的数值解与试验结果吻合较好,因此,该模型对到由于岩石渗透性下降引起注水井注水效率降低是有所帮助的,但该模型并没有考虑颗粒的迁移机制,只是假定了单一的线性关系。随后,不同的学者在微观节点模型上进行了大量的研究,比如 MILLARD^[2]、NICOLAS^[3]、STEPHEN^[4-5]、BARTELD^[6]等,在研究中都涉及到颗粒沉积的力学机制。



图 1 地下水源热泵示意图
Fig.1 Sketch of WSHP

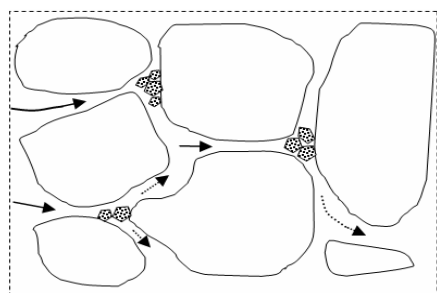


图 2 固体颗粒通道阻塞示意图
Fig.2 Sketch of physical clogging by solid particles

NORIO TENMA^[7]和 AHIR^[8]对多孔介质中悬浮颗粒迁移的平衡方程进行了推导,假定了孔隙的

大小是均匀分布,整个孔隙都可能有悬浮颗粒通过,并且颗粒的迁移是随着孔隙内水体的流动而进行,但假定多孔介质中孔隙的大小均匀分布是有缺陷的,因为在自然界中当悬浮颗粒经过比其直径小的孔隙时将堵塞在孔隙的入口处,当悬浮颗粒流经比其直径大的孔隙时才会孔隙中随着水体的流动而流动;Massi^[9]通过室内试验发现造成堵塞的颗粒受到尺寸效应的影响,从而打破了以前的一些单一假设。

在国内,何满潮等^[10-12]对地热水对井回灌渗流场中的渗透系数进行了研究,研究得出受地下水温度的影响,在井体周围产生物理堵塞,使得井体周围的渗透系数减小,从而增加了回灌的难度,并且得出了衰减方程。方肇洪等对单井回灌地源热泵承压含水层渗流给出了具体的解析解。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,但对因回灌困难带来的物理堵塞的机制研究是很少的,笔者本着简单的原则来推导物理堵塞理论公式。

本文在肯定了国内外学者的贡献基础上建立了多孔介质中颗粒的迁移方程和颗粒的沉积模型,同时在模型的建立过程中充分考虑了颗粒流动速度折减系数、孔隙率的变化以及颗粒在孔隙里发生捕获的概率 3 个因素,为解决地源热泵回灌井物理堵塞的室内外试验研究提供理论依据,以期为地下水源热泵技术的大范围推广提供坚实的理论基础。

2 多孔介质中颗粒迁移和沉积的数学模型的建立

基本假定:①悬浮颗粒为球体,其半径保持不变,大小为 r_s ;②多孔介质里的孔隙为圆柱体,半径为 r_p ,且服从正态分布;③流体为不可压缩的,均匀,并且只考虑一维情况下流体的流动。

2.1 传统深层过滤模型

1937 年 Iwasaki^[1]首先建立了深层过滤系统中颗粒迁移的数学模型,1970 年 Herzig 等在结合达西定律同时考虑颗粒质量平衡、颗粒捕获动力效应后得到的经典数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial c(X,T)}{\partial T} + \frac{\partial c(X,T)}{\partial X} &= -\frac{1}{n} \frac{\partial \sigma(X,T)}{\partial T} \\ \frac{\partial \sigma(X,T)}{\partial T} &= \lambda(\sigma) n c(X,T) \\ U &= -\frac{k_0 k(\sigma)}{\mu L} \frac{\partial P}{\partial X} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $c(X,T)$ 为悬浮颗粒的浓度; $\sigma(X,T)$ 为沉积

颗粒的浓度, 其大小等于单位体积内沉积在孔隙壁上的颗粒数的总和; $k(\sigma)$ 为由于颗粒的沉积渗透率能变化的函数; X 、 T 分别为坐标和时间的无量纲值; n 为孔隙率; μ 为水的黏度系数; U 为孔隙中水体的流动速度; k_0 为初始孔隙率; L 为流体流经长度; P 为水压力。

在适当的边界条件下式(1)可通过抛物线法得出具体的解析解, 事实上, 式(1)中前 2 个式子是相互独立的, 二者构成颗粒迁移和捕获的动力模型, 但式(1)中并未考虑悬浮颗粒速度折减系数、孔隙率的变化、流量折减系数以及悬浮颗粒捕获概率的影响, 可以说式(1)是不全面的, 因此, 本文的重点将放在考虑 3 个变化因素(速度折减系数、流量折减系数、捕获概率)上, 来推导多孔介质中悬浮颗粒的迁移和沉积的方程。

2.2 模型的建立

在解决问题前, 首先引入悬浮颗粒、捕获颗粒以及孔隙半径的分布,

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\infty f_s(r_s, x, t) dr_s &= 1 \\ \int_0^\infty f_c(r_s, x, t) dr_s &= 1 \\ \int_0^\infty f_p(r_p, x, t) dr_p &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $f_s(r_s, x, t)$ 为半径为 r_s 的悬浮颗粒的分布函数; $f_c(r_s, x, t)$ 为捕获颗粒的分布函数; $f_p(r_p, x, t)$ 为孔隙的分布函数。

同时引入悬浮颗粒沉积浓度的表达式,

$$C(r_s, x, t) dr_s = c(x, t) f_s(r_s, x, t) dr_s \quad (3)$$

式中: $C(r_s, x, t) dr_s$ 为单位孔隙体积中半径处于 $[r_s, r_s + dr_s]$ 内的悬浮颗粒数; $c(x, t)$ 为单位孔隙体积内颗粒数的总和。

将式(3)代入式(2)的第 1 个表达式后得,

$$\int_0^\infty C(r_s, x, t) dr_s = c(x, t) \quad (4)$$

$$\Sigma(r_s, r_p, x, t) dr_p dr_s = \sigma(x, t) f_c(r_s, r_p, x, t) dr_p dr_s \quad (5)$$

式中: $\Sigma(r_s, r_p, x, t) dr_p dr$ 为单位孔隙体积中孔隙半径为 $[r_p, r_p + dr_p]$ 内沉积的半径处于 $[r_s, r_s + dr_s]$ 范围内的悬浮颗粒总数; $\sigma(x, t)$ 为在单一孔隙中悬浮颗粒沉积在孔隙壁的颗粒浓度。

在考虑尺寸排除效应时, 当悬浮颗粒半径小于孔隙半径时有 $\Sigma(r_s, r_p, x, t) = 0$, 当颗粒半径大于孔隙半径时, 颗粒将沉积在孔隙壁, 得

$$f_c(r_s, x, t) dr_s = \int_0^\infty f_c(r_s, r_p, x, t) dr_p dr_p \quad (6)$$

积分式(5)代入式(6)后得,

$$\int_0^\infty \Sigma(r_s, r_p, x, t) dr_p dr_s = \Sigma(r_s, x, t) dr_s \quad (7)$$

对式(7)中的 r_s 从 0 到 ∞ 积分并结合式(1)得,

$$\int_0^\infty \Sigma(r_s, x, t) dr_s = \sigma(x, t) \quad (8)$$

式(4)和式(8)分别表述了悬浮颗粒在单一孔隙里的浓度数总和和悬浮颗粒在孔隙里发生堵塞时的沉积浓度。

下面建立孔隙内悬浮颗粒在孔隙里发生堵塞的方程。悬浮颗粒半径为 r_s 的颗粒在孔隙范围为 $[r_p, r_p + dr_p]$ 内的颗粒浓度为

$$V(r_p, r_s, x, t) dr_p = v(x, t) f_p(r_p, x, t) dr_p \quad (9)$$

式中: $v(x, t)$ 为在某一时刻孔隙大小。

对式(9)进行积分并结合式(1)得,

$$\int_0^\infty V(r_p, x, t) dr_p = v(x, t) \quad (10)$$

实际上孔隙内悬浮颗粒的浓度应等于初始悬浮颗粒的浓度减去由于孔隙尺寸排除效应的影响沉积在孔隙入口处的浓度, 即

$$V(r_p, x, t) dr_p = V(r_p, x, t=0) dr_p - \int_0^\infty \Sigma(r_s, x, t) dr_s dr_p \quad (11)$$

式(11)是关于时间 t 的函数, 可对式(11)进行积分,

$$\frac{\partial V(r_p, x, t)}{\partial t} + \int_r^\infty \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} dr_s = 0 \quad (12)$$

式(12)的物理意义为: 孔隙入口处颗粒的沉积是大于孔隙半径的悬浮颗粒引起的, 即通常所假定的一个颗粒能阻塞一个孔隙; 反之亦然。

接下来推导悬浮颗粒和捕获颗粒的平衡方程。首先定义半径为 r_s 的颗粒通过半径为 r_p 的孔隙时的单位流量为 $Q(r_s, r_p, x, t)$, 事实上, 当 $r_s > r_p$ 时, $Q(r_s, r_p, x, t) = 0$, 当 $r_s < r_p$ 时, 通过孔隙半径在 $[r_p, r_p + dr_p]$ 内的流体总流量为

$$Q(r_s, x, t) = \int_0^\infty Q(r_s, r_p, x, t) dr_p dr_p \quad (13)$$

$$Q(r_s, r_p, x, t) = UC(r_s, x, t) n(r_s, r_p) v(r_s, r_p) V(r_s, r_p, x, t) \quad (14)$$

式中: $n(r_s, r_p)$ 为孔隙率修正系数, 它往往与颗粒半径和孔隙半径有关, 根据假定①可设 $n(r_s, r_p) = (1 - r_s/r_p)^2$; $v(r_s, r_p)$ 为悬浮颗粒在孔隙里流动的速度折减系数, 同孔隙修正系数一样, 其值与颗粒半径和孔隙半径有关。

将式 (14) 代入 (13) 得,

$$Q(r_s, x, t) = \int_0^\infty UC(r_s, x, t)n(r_s, r_p)v(r_s, r_p)V(r_s, r_p, x, t)dr_s dr_p \quad (15)$$

式中: U 为单位截面的流体速度, 下面将对其具体表达式进行个简单的推导。

首先引入流经单一圆柱形孔隙里的流速表达式, 见式 (16),

$$q(r_p) = -\frac{k_0(r_p)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (16)$$

即可得到单位截面的流体速度 U 的表达式为

$$U = \int_0^\infty q(r_p)V(r_p, x, t)dr_p \quad (17)$$

根据假定②可得,

$$k_0(r_p) = \frac{\pi r_p^4}{8} \quad (18)$$

颗粒流动方程的建立: 当颗粒流经大于其半径的新的孔隙前并不能保证所有的悬浮颗粒都能进入孔隙中, 因此, 引入参数进入系数 $\gamma(r_s, x, t)$, 应用质量守恒定律, 得到如下的平衡方程:

$$n \frac{\partial [\gamma(r_s, x, t)C(r_s, x, t)]}{\partial t} + \frac{\partial Q(r_s, x, t)}{\partial x} + \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

将式 (15) 代入式 (19) 得,

$$\begin{aligned} n \frac{\partial [\gamma(r_s, x, t)C(r_s, x, t)]}{\partial t} - \frac{\pi}{8\mu} \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^\infty r_p^4 \frac{\partial P}{\partial x} V(r_p, x, t)dr_p \cdot \right. \\ \left. \int_0^\infty C(r_s, x, t)n(r_s, r_p)v(r_s, r_p)V(r_s, r_p, x, t)dr_s dr_p \right] + \\ \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式 (20) 为所求悬浮颗粒整体平衡方程, 同式 (1) 的第 1 个式子相比较后, 在引入了流量折减系数、孔隙率折减系数和速度折减系数后表达式变得更加完善, 当然式子的形式变得更复杂, 这样给求解问题带来很大困难。

式中 U 是关于坐标的函数, 并非时间的函数, 因此不可以把 U 从式 (17) 中拿出。

封闭系统中的控制方程: 此处的封闭系统指颗粒进入孔隙后在孔隙内的迁移、沉积以及捕获的过程。研究的重点将放在颗粒捕获率和孔隙堵塞动力方程上。

悬浮颗粒的捕获率可定义为单位时间内半径 $[r_s, r_s + dr_s]$ 悬浮颗粒在孔隙半径 $[r_p, r_p + dr_p]$ 内被捕获的颗粒数同初始颗粒数的比值, 其在孔隙里颗粒

被捕获的概率和比例系数有关, 即

$$\frac{\partial \Sigma(r_s, r_p, x, t)}{\partial t} = \lambda(r_s, r_p)P \quad (21)$$

在式 (19) 中概率 P 已被 Herzig 等^[13]提出,

$$P = UC(r_s, x, t) \frac{V(r_p, x, t)dr_p}{\int_0^\infty r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p} r_p^4 \quad (22)$$

当颗粒半径小于孔隙半径时, 即没有颗粒在孔隙壁里沉积, 此时 $\lambda(r_s, r_p) = 0$ 。对式 (21) 进行从 $(0, \infty)$ 积分后得到颗粒在孔隙里捕获率为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} = \\ \frac{UC(r_s, x, t)}{\int_0^\infty r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p} \int_0^{r_s} \lambda(r_s, r_p)r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p \end{aligned} \quad (23)$$

将式 (21) 代入式 (12) 后得到孔隙堵塞动力方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(r_p, x, t)}{\partial t} = \\ - \frac{UV(r_p, x, t)r_p^4}{\int_0^\infty r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p} \int_{r_s}^\infty \lambda(r_s, r_p)C(r_s, x, t)dr_s \end{aligned} \quad (24)$$

这样就建立了在封闭系统中关于 3 个未知量 $(C(r_s, x, t), \Sigma(r_s, x, t), V(r_p, x, t))$ 的函数方程,

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\infty r_p^4 \frac{\partial P}{\partial x} V(r_p, x, t)dr_p \int_0^\infty C(r_s, x, t)n(r_s, r_p)v(r_s, r_p) \cdot \\ V(r_s, r_p, x, t)dr_s dr_p + \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial \Sigma(r_s, x, t)}{\partial t} = \\ \frac{UC(r_s, x, t)}{\int_0^\infty r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p} \int_0^{r_s} \lambda(r_s, r_p)r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p \\ \frac{\partial V(r_p, x, t)}{\partial t} = \\ - \frac{UV(r_p, x, t)r_p^4}{\int_0^\infty r_p^4 V(r_p, x, t)dr_p} \int_{r_s}^\infty \lambda(r_s, r_p)C(r_s, x, t)dr_s \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

2.3 边界条件

下面将对孔隙介质中边界条件的确立进行描述, 在确定边界条件时更多地是关心悬浮颗粒在入口处的浓度变化情况, 在初始阶段, 先假定一给定的颗粒浓度分布, 如式 (24) 所示, 多孔介质的入口处的横截面可以理解为一个多孔筛, 注入的细颗粒在水体作用下流经可利用的多孔介质的孔隙中, 对于那些未能利用的多孔介质的孔隙将发生沉积现

象, 久而久之, 将在孔隙壁形成沉积, 进而影响堵塞。式 (26)、(27) 为悬浮颗粒在注入的起始阶段的边界条件的表达式。

$$\left. \begin{aligned} x=0, C(r_s, x=0, t) &= C^0(r_s, t) \\ t=0, C(r_s, x, t=0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \Sigma(r_s, x, t=0) &= 0 \\ V(r_p, x, t=0) &= V^0(r_p, x) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

考虑到该数学表达式的复杂性, 给出具体的解析解相当困难, 在以后的工作中笔者将通过两个简单的例子对该模型进行验证。

3 结 论

文中的模型是建立在质量守恒定律的基础上, 在公式的推导过程中充分考虑了流量折减系数、速度折减系数等因素, 该模型对解决地源热泵回灌井回灌困难的问题提供了理论依据, 模型的建立将为后续的试验研究提供理论基础, 笔者在接下来的工作中将利用试验来验证该模型。

(1) 从模型中可以得到, 发生堵塞往往是由一个颗粒所引起的, 即一个颗粒堵塞一个孔隙, 反之亦然。

(2) 模型的建立考虑孔隙率变化的情况, 在物质的迁移和堵塞的过程中, 孔隙率的变化往往也是个动态的变化过程。

(3) 与传统的过滤模型相比, 考虑了速度折减系数和流量折减系数后模型显得更加全面。

参 考 文 献

- [1] IWASAKI T. Some notes on sand filtration [J]. **Journal of American Water Works Association**, 1937, 29(10): 1591—1602.
- [2] 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]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(5—6): 731—744.
- [3] NICOLAS M, MICHEL L, WANG HUA-QING, 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(1—2): 21—39.
- [4] STEPHEN E S. Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: Influence of physical structure of the medium[J]. **Journal of Hydrology**, 1995, 167(1—4): 79—98.
- [5] 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(1—4): 181—195.
- [6] BARTELD S G A, BRUINING J, MOLENAAR J. The modeling of velocity enhancement in polymer flooding[J]. **Transport in Porous Media**, 1997, 26(11): 75—88.
- [7] NORIO TENMA, KASUMI YASUKAWA, ZYVOLOSKI G. Model study of the thermal storage system[J]. **Geothermics**, 2003, 32(4—6): 603—607.
- [8] AHIR N D, BENAMAR A, ALEM A, et al. Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: A laboratory study[J]. **Transport in Porous Media**, 2009, 76(2): 289—307.
- [9] 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(1—2): 21—39.
- [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-min. 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 of theory of seepage field a round geothemal 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 of hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. **Journal of Jilin University(Earth Science Edition)**, 2002, 32(4): 374—377.
- [13] HERZIG J P, LECLERC D M, LE GOFF P. Flow of suspensions through porous media—application to deep filtration[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 1970, 65(5): 8—35.