

# 污水源热泵污水侧流化除垢与强化换热性能

毕海洋<sup>1a,2</sup>, 端木琳<sup>1b</sup>

(1. 大连理工大学 a. 机械工程与材料能源学部; b. 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:**由小尺度污物引起的污垢等问题成为污水源热泵推广应用的瓶颈, 该文首先探讨污水取水换热过程中污垢的形成机理; 进而将液固循环流化床技术引入污水源热泵污水侧的防、除垢应用中, 考虑碰撞应力以接触面中心呈对称分布的特点, 对已有碰撞应力模型进行修正, 并以垢层所受到的剥离力(液固两相流对垢层的剪应力与固体粒子对垢层的碰撞应力)来探讨液固循环流化床的防、除垢机理; 最后进行液固循环流化床换热器防、除垢特性的实验研究。研究结果表明循环流化床换热技术可有效解决污水中小尺度污物所引起的污垢等问题。

**关键词:**污水源热泵; 流化除垢; 换热

**中图分类号:** TU83    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0080-05

## Performance of Fouling Fluidized-Removing and Heat Transfer Enhancement on Sewage Side of Sewage-Source Heat Pump System

BI Hai-yang<sup>1a,2</sup>, DUAN Mu-lin<sup>1b</sup>

(1a. Faculty of Mechanical Engineering, Materials Energy; 1b. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian

University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 2. Civil and Architectural Engineering

College, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** High thermal resistance resulted by fouling in heat exchanger restricts the application of sewage source heat pump (SSHP) system. The fouling forming mechanism was applied with solid-liquid fluidized bed technique for fouling prevention and removing of SSHP system. Shearing stress model of solid-liquid fluidized bed heat-exchanger is analyzed, and collision stress model is modified. Preventing and removing fouling mechanisms of solid-liquid fluidized bed technique by shearing stress and collision stress was explained. An experimental study on how to solve the fouling problem (such as fouling prevention and removing, heat transfer enhancement, etc) is discussed. The results of theory and experiment show that solid-liquid fluidized bed technique can be used not only to increase convection coefficient, but also to restrict fouling growing, it can effectively solve the fouling problem in SSHP system.

**Key words:** sewage source heat pump; fouling fluidized-removing; heat transfer

城市污水、江河水、湖水、地下水、海水等是理想的低位冷热源,但其水质极不稳定,不能满足换热设备运行要求,取水换热过程是利用这些水源的关键问题<sup>[1-2]</sup>。这些水源以城市污水水质最差,污水源热

泵系统在实际工程遇到的问题最为突出,城市污水含有各种大型污物及小尺度悬浮固体及溶解性化合物,为经济可行地利用污水冷热源,只能对污水作过滤预处理,但污水源热泵系统取水换热中的污水仍

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108051)

作者简介: 毕海洋(1978-),男,博士后,主要从事低位能源利用与建筑节能研究, (E-mail) bocean19@sohu.com。

端木琳(通讯作者),女,教授,博士生导师, (E-mail) duanmulin@sina.com。

含有大量小尺度污物,导致换热管内高热阻的软垢形成与设备换热性能低下等问题<sup>[3-4]</sup>,严重影响了热泵系统的正常运行。要实现污水冷热量的有效传递与转换,必须克服污物引起的污垢问题,目前还没有成熟的研究成果,由小尺度污物引起的污垢问题仍然是限制污水源热泵系统推广应用的瓶颈问题。

循环流化床换热技术有着清除污垢与强化换热的双重功能,属于主动除污方式,由于固体粒子与换热面的不断接触、颗粒对壁面的碰撞等作用,可有效除去换热面上沉积的污垢,即使有污垢产生,其厚度也能得到有效控制,使换热器的传热系数维持在一个可接受的范围内操作而不需清垢,同时固体粒子在随流体的运动中不断穿过流动边界层,换热也能得到强化。目前该方面的研究主要集中在气固与气液固方面<sup>[5-6]</sup>,污水源热泵系统污水侧出现的污垢不同于其他行业所出现的硬质污垢,以软垢为主<sup>[7-8]</sup>,循环流化床换热技术在不同运行参数下特性是不同的,有必要将循环流化床换热技术引入污水源热泵系统污水侧的防、除垢应用中,进行理论与实验研究。

## 1 污垢形成机理探讨

通常认为污垢是 2 个过程同时发生的过程:污垢的沉积过程和剥离过程的净结果<sup>[9-11]</sup>。如图 1 所示,净结垢速率  $m_f$  可以用污垢沉积速率  $\dot{m}_d$  与污垢在换热面的剥蚀速率  $\dot{m}_r$  来表示,见式 1。沉积在换热壁面上的污垢主要受附着力和流体作用力的作用,附着力是使污垢附着于表面上的力,流体作用力是使污垢剥离的力,污垢能够粘附在表面是附着力大于剥离力的缘故。

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (1)$$

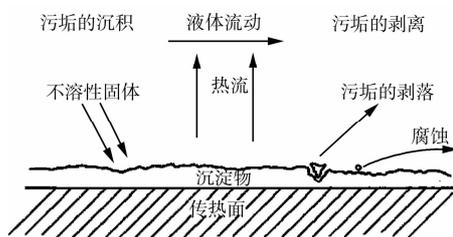


图 1 结垢过程示意图

城市污水冷热源只是经过简单的物理过滤后就进入到换热设备中,水体中含有大量的悬浮物质与微生物,水质较差;并且污水源热泵系统取水换热中的温度适合微生物的繁殖与生长,因此实际工程中污水源热泵系统污水侧极易形成污垢。要想彻底解决污垢问题的关键是在换热壁面上形成剥离力大于附着力的状态,这样污垢将无法粘附在壁面上。

## 2 流化固体粒子防、除垢理论分析

在污水源热泵系统取水换热中,对流化固体粒子防、除垢机理起作用的剥离力主要是液固两相流对垢层的剪应力与固体粒子对垢层的碰撞应力。

### 2.1 液固两相流对垢层的剪应力模型

循环流化床中液固两相流对垢层的剪应力  $\tau_m$  可采用均匀流动模型来计算,

$$\tau_m = \frac{1}{8} \lambda_m \rho_f u_f^2 \quad (2)$$

式中:  $\rho_f$  是液固两相流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 按均匀流动模型计算;  $u_f$  是液固两相流体的平均流速,  $\text{m}/\text{s}$ , 按式 3 计算;  $\lambda_m$  为循环流化床床层与垢层间的阻力系数, 计及固体粒子的体积效应, 按式 4 计算<sup>[12]</sup>。

$$u_f = \frac{V_1(1+\xi)}{A} \quad (3)$$

式中:  $V_1$  为液体的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A$  为流道的截面积,  $\text{m}^2$ 。

$$\lambda_m = \lambda_f \left\{ 1 + k \xi \left[ \frac{u_f^2}{g d_i} \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \sqrt{C_D} \right]^{-1} \right\} \quad (4)$$

式中:  $\lambda_f$  为污水与垢层间的阻力系数, 按式 5 计算;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $k$  为常数, 取值为 6.06;  $d_i$  为管径,  $\text{m}$ ;  $C_D$  为固体粒子的阻力系数;  $\rho_s$  和  $\rho_f$  分别为固体粒子和城市污水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\xi$  为固体粒子体积分率, %。

与清水相比城市污水的流动性能有着显著差异, 吴荣华<sup>[13]</sup>将城市污水流动看成均质非牛顿幂律流, 探讨了其湍流流动特性, 城市原生污水的流动阻力特性与清水有很大差异, 当流速达到  $1 \text{ m}/\text{s}$  以上时其阻力系数始终维持为清水的 3 倍以上, 取污水阻力系数为清水阻力系数的 3 倍。

$$\lambda_f = 0.949 2 Re_q^{-0.25} \quad (5)$$

式中,  $Re_q$  为清水的雷诺数。

固体粒子的阻力系数  $C_D$  由城市污水的雷诺数  $Re$  来确定<sup>[14]</sup>,

$$\begin{aligned} Re < 1 & C_D = 24/Re \\ Re = 10 \sim 10^3 & C_D \approx 13/\sqrt{Re} \\ Re = 10^3 \sim 3 \times 10^5 & C_D = 0.47 \end{aligned} \quad (6)$$

采用 Delphi 软件编程分析液固两相流对垢层的剪应力在不同运行参数下的变化情况, 图 2 给出了在无粒子和 5% 固体粒子工况下液固两相流对垢层的剪应力与循环流速的变化关系。可看出液固两相流对垢层的剪应力随循环流速的增加而增大, 并且循环流化床中加入钢球后液固两相流对垢层的剪应力较加入沙粒后的剪应力为大, 这主要是由于钢

球的密度较大的缘故。紧贴换热壁面的黏膜层所能承受的最大破坏应力超过 100 Pa<sup>[15]</sup>,而从图 2 中可以看出液固两相流对垢层的剪应力均维持在 100 Pa 以下,即使循环流速高达 2.5 m/s,液固两相流对垢层的剪应力也仅达到 70 Pa 左右,因而由液固两相流对垢层的剪应力分析可知,仅仅靠增大流速(剪应力)无法在换热壁面上形成剥离力大于附着力的状态。

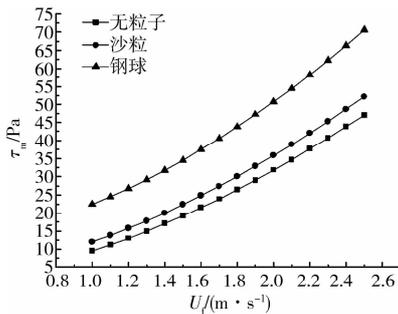


图 2 液固两相流剪应力与循环流速的关系 ( $\xi = 5\%$ )

## 2.2 固体粒子对垢层的碰撞应力模型

2 个物体接触时在接触面上的局部压强分布问题称为 Hertz 问题<sup>[16]</sup>,基于弹性碰撞理论,张少峰提出固体粒子对垢层的碰撞应力模型<sup>[17]</sup>为,

$$S_{\max} = \frac{p_{\max}}{A_c} \quad (7)$$

式中:  $S_{\max}$  为固体粒子对垢层的碰撞应力, Pa;  $p_{\max}$  为固体粒子对垢层的最大碰撞力, N;  $A_c$  为固体粒子与垢层碰撞时的最大接触面积,  $m^2$ 。

针对 Hertz 问题的研究可以发现,当 2 球接触时接触面的碰撞应力是以接触面中心成对称分布,由于愈靠近接触面中心变形愈大,在接触面的边缘上变形为零,因而接触面中心处的碰撞应力最大,边缘上的碰撞应力为零,即在接触面上不同点的碰撞应力是不相等的。张少峰提出固体粒子对垢层的碰撞应力模型是采用平均碰撞应力来计算,明显与实际情况不符,对其碰撞应力模型进行修正,得到循环流化床中固体粒子对垢层的碰撞应力模型<sup>[18]</sup>,

$$S_{\max} = \frac{3p_{\max}}{2A_c} = \left[ \frac{6p_{\max}(R_i - R_p)^2}{\pi^5 R_i^2 R_p^2 (\theta_1 + \theta_2)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中:  $S_{\max}$  为颗粒对垢层的碰撞应力, Pa;  $p_{\max}$  为颗粒对垢层的最大碰撞力, N;  $A_c$  为颗粒与垢层碰撞时的最大接触面积,  $m^2$ 。  $R_p$  为固体粒子的曲率半径, m;  $R_i$  为垢层的曲率半径, m, 近似等于加热管的内半径;  $\theta_1$  与  $\theta_2$  用式 9 表示<sup>[16]</sup>,

$$\theta_1 = \frac{\lambda_p + 2\mu_p}{4\pi\mu_p(\lambda_p + \mu_p)}, \theta_2 = \frac{\lambda_i + 2\mu_i}{4\pi\mu_i(\lambda_i + \mu_i)} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_p$ 、 $\mu_p$ 、 $\lambda_i$ 、 $\mu_i$  为固体粒子与垢层的拉梅常数。

以钢球与沙粒为例,采用 Delphi 软件编程计算液固循环流化床中固体粒子对垢层的碰撞应力在不同运行参数下的变化情况,见图 3,对比图 2,可看出碰撞应力明显大于剪切应力 3 个数量级以上。同时碰撞应力的分析是基于单个固体粒子的,在循环流化床内不断有固体粒子随机碰撞垢层,虽然收集到的垢层物性中尚缺乏垢层所能承受的最小碰撞应力等可靠实验数据,但如此大的碰撞应力且大量的固体粒子频繁碰撞,将足以导致垢层破裂与脱落,达到除垢目的;同时固体粒子对垢层的碰撞将有效地阻止垢层的产生,因为初始沉积到壁面上的污垢物质与壁面的结合强度是非常微弱的。

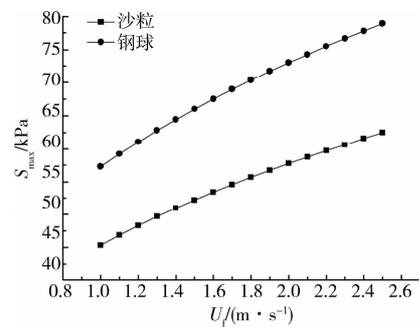
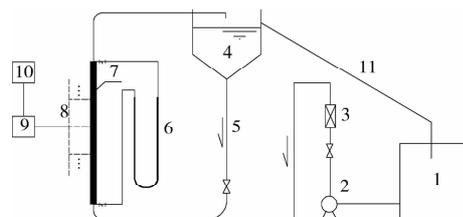


图 3 碰撞应力与液体循环速度的关系

## 3 实验研究

为验证循环流化床换热器技术在污水源热泵系统中应用的有效性,搭建单管式液固循环流化床换热器实验系统,进行液固循环流化床污水换热器防、除垢特性的实验研究。液固流化床换热器实验台示意图见图 4,测试管段采用长 1.8 m、内径为 0.027 m 的铜管;固液分离器尺寸为 0.5 m 高,内径为 0.5 m。流体从蓄水箱被水泵吸出而流经流量计与下降管底部进入到测试管段,进而再进入固液分离器进行固液分离,然后依靠溢流管而回到蓄水箱完成循环;固体粒子依靠重力沉降与下降管底部喷嘴共同作用下分离出来而进行循环利用。



1. 水箱; 2. 水泵; 3. 转子流量计; 4. 固液分离器; 5. 下降管;  
6. 压力计; 7. 测试管段; 8. 热电偶; 9. A/D 转换器; 10. 计算机。

图 4 液固流化床换热器实验台示意图

测试管段在不同运行参数下传热系数变化曲线

见图 5,污垢热阻变化曲线见图 6。由图 5 可看出:无粒子工况下测试管段的传热系数随运行时间逐渐下降,虽然流速增大引起传热系数有所加大,但随着运行时间的增长,传热系数仍然逐渐下降,即实验表明采用高流速的方法也无法抑制污垢的生成;随着固体粒子的加入,测试管段的传热系数最终能维持到一定水平。由图 6 可看出:实验所进行的 3 种流化床防、除垢工况下的最终污垢系数均小于常规换热设备设计所取用的污垢系数  $0.086 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$ ,从而表明加入  $3\% \Phi 2.5 \text{ mm}$  的钢球与加入  $3\%$  直径范围为  $2 \sim 3 \text{ mm}$  的沙粒均可有效抑制污垢的增长并实现在线清洗。与常规换热器相比,含有  $3\%$  固体粒子的液固流化床换热器有着明显的强化换热功效,可有效抑制污垢增长并实现在线清洗,钢球的效果好于沙粒的效果。

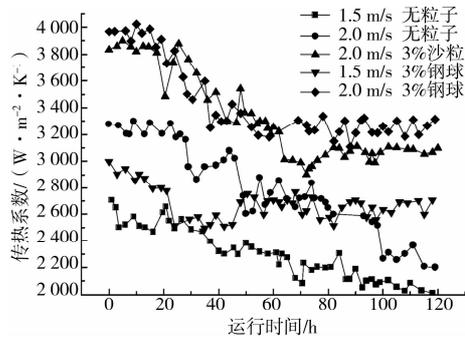


图 5 不同参数下传热系数变化曲线图

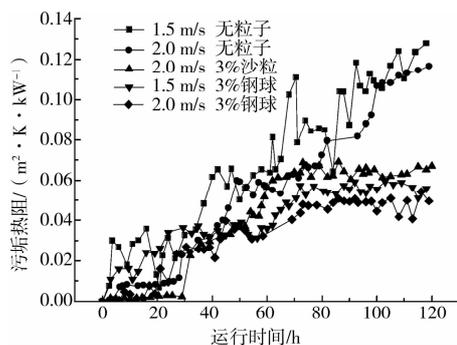


图 6 不同参数下污垢热阻变化曲线图

## 4 结论

将循环流化床换热技术引入污水源热泵系统取水换热过程的防、除垢应用中,进行了理论分析与实验研究,主要结论如下:

1) 污水源热泵系统污水侧出现的污垢可看成污垢的沉积过程和剥离过程的净结果,沉积在表面上的污垢主要受附着力和流体作用力的作用,彻底解决污水源热泵系统取水换热中污垢问题的关键是在换热壁面上形成剥离力大于附着力的状态,污水源

热泵系统取水换热过程中液固循环流化床防、除垢主要作用力为剪应力与碰撞应力。

2) 液固两相相对垢层的剪应力随着循环流速与固体粒子的体积分率增大而增大;固体粒子对垢层的碰撞应力随着固体粒子径向速度和密度的增大而增大;加入固体粒子后的液固两相流剪应力的数量级是 Pa,而固体粒子对垢层的碰撞应力数量级在 kPa 以上。污水源热泵污水侧液固循环流化床的换热壁面上形成了剥离力大于附着力的状态,阻止了污物沉积到壁面以及污垢在壁面上的生长。

3) 单管式液固流化床换热器防、除垢特性实验表明:在无粒子工况下测试管段传热系数随运行时间逐渐下降,即污垢呈逐渐增长趋势;即使采用高流速方法也无法抑制污垢生成;在循环流速为  $1.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$  范围内,加入  $3\% \Phi 2.5 \text{ mm}$  的钢球与加入  $3\%$  直径范围为  $2 \sim 3 \text{ mm}$  的沙粒均可以有效抑制污垢增长并实现在线清洗;采用液固循环流化床换热技术可有效解决污水源热泵系统污水侧出现的污垢严重与换热性能低下等问题,液固循环流化床换热技术在低位冷热源利用中有着广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] YOSHII T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8): 696-706.
- [2] YIN JUN, CHEN LEI, WANG HE-LI. Resource Regeneration of City Sewage and Utilization of Sewage Heat Energy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [3] BI HAI-YANG, LIN DUAN-MU, ZHU YING-XI. Key problems to be solved in utilization of once-through water source and relative research development[J]. Journal of HVAC, 2007, 37(7): 27-30.
- [4] WU RONG-HUA, SUN DE-XING, ZHANG CHENG-HU, et al. Application and progress of urban wastewater as a cool and heat source[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1326-1329.
- [5] 贾原媛. 三相循环流化床麦草浆黑液蒸发器防、除垢和强化传热研究[D]. 天津:天津大学, 2003.
- [6] 于志家. 气液固三相流载气蒸发的抗垢性能[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 807-809.  
YU ZHI-JIA. Scale inhibition of gas-liquid-solid three-phase gas carrying evaporation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 807-809.
- [7] WU RONG-HUA, SUN DE-XING, ZHANG CHENG-HU, et al. Research on the soft-dirt characteristic of

- heat-exchanging pipe in using urban original wastewater as cool and heat source[J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(1): 59-62.
- [8] 崔福义, 李晓明, 周红. 污水换热器污垢热阻特性研究[J]. *煤气与热力*, 2005, 25(6): 9-12.  
CUI FU-YI, LI XIAO-MING, ZHOU HONG. Study on fouling heat resistance performance of sewage heat exchanger[J]. *Gas and Heat*, 2005, 25(6): 9-12.
- [9] EPSTEIN N. Fouling in Heat Exchangers[C]//*Heat Transfer 1978-Pro 6th IHTC*, 1979:235-253.
- [10] KUPPAN T, 钱颂文, 廖景娉, 等. 换热器设计手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [11] KERN D Q, SEATON R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. *Chem. Eng. Prog.*, 1959(4): 258-262.
- [12] ZANDI I. *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application* [M]. Pergamon Press, New York, 1971.
- [13] WU RONG-HUA, ZHANG CHENG-HU, SUN DE-XIN. Research on turbulent flow characteristic of urban wastewater as non-newtonian exponential homogeneous fluid[J]. *Journal of Hydrodynamic*, 2005, 20(6): 708-713.
- [14] 屠大燕. 流体力学与流体机械[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [15] DUDDRIDGE J E, KENT C A, LAWS J F. Effect of surface shear stress on the attachment of pseudomonas fluorescents to stainless steel under defined flow conditions [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1982, 24(1): 153-164.
- [16] 钱伟长, 叶开沅. 弹性力学[M]. 北京: 科学出版社, 1956.
- [17] 张少峰. 三相循环流化床蒸发器防除垢和强化传热的研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [18] 毕海洋. 污水源热泵系统取水换热过程流化除垢与强化换热方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

(编辑 胡英奎)

(上接第 70 页)

- [7] ROBERT M QUIGLEYF, EDERICOFE RNANDEZA, KERRYR OW N D R. Clayey barrier assessment for impoundment of domestic waste leachate (southern Ontario) including clay-leachate compatibility by hydraulic conductivity testing[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988, 25(2): 574-581.
- [8] CALVELLO M, CASCINI L, SORBINO, G. A numerical procedure for predicting rainfall-induced movements of active landslides along pre-existing slip surfaces [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 32(4): 327-351.
- [9] 廖红建, 姬建. 深基坑开挖中饱和-非饱和土体渗流-沉降的耦合分析[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(4): 637-640.  
LIAO HONG-JIAN, JI JIAN. Coupled analysis of seepage-settlement for saturated-unsaturated soil in deep foundation pit excavation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(4): 637-640.
- [10] DACUNTO B, PARENTE F, URCIUOLI G. Numerical models for 2D free boundary analysis of groundwater in slopes stabilized by drain trenches[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2007, 53(10): 1615-1626.
- [11] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(5): 575-587.
- [12] 骆祖江, 李朗, 姚天强. 松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 1947-1651.  
LUO ZU-JIANG, LI LANG, YAO TIAN-QIANG. Coupling model of three dimensional seepage and land-subsidence for dewatering of deep foundation pit in loose confined aquifers[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1947-1651.
- [13] 李筱艳. 基于位移反分析的深基坑渗流场与应力场完全耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1269-1274.  
LI XIAO-YAN. Fully coupling analysis of seepage and stress for deep foundation pit based on displacement back analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1269-1274.
- [14] 王君连. 工程地下水计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

(编辑 胡玲)