

循环单井在不同水文地质条件下的运行特性

倪 龙¹ 姜益强¹ 姚 杨¹ 那 威² 马最良¹

(1. 哈尔滨工业大学 热泵空调技术研究所, 150090 哈尔滨, nilonggn@163.com;

2. 北京建筑工程学院 北京市暖燃重点实验室, 100044 北京)

摘 要: 为研究含水层水文地质条件对循环单井的影响, 通过大量算例模拟分析了循环单井在不同水文地质参数下的运行特性. 结果表明: 水平渗透系数较大的含水层提高了原水交换比, 减轻了抽水温度的变化; 对于渗透性能较好的含水层, 含水层滞止导热系数对循环单井的影响不大, 而对于渗透性能较差的含水层, 抽水温度随着含水层滞止导热系数的增大而迅速提高. 这说明含水层渗透系数是一个重要参数, 直接决定循环单井抽水温度的变化幅度.

关键词: 循环单井; 水文地质条件; 运行特性; 原水交换

中图分类号: TK529

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)04-0047-05

Characteristics of standing column well operating at different hydro geological conditions

NI Long¹, JIANG Yi-qiang¹, YAO Yang¹, NA Wei², MA Zui-liang¹

(1. Institute of Heat Pump and Air Conditioning Technology, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China,

nilonggn@163.com; 2. Beijing Municipality Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning

Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 100044 Beijing, China)

Abstract: To study the effect of aquifer's hydro geological conditions on standing column well (SCW), the operating characteristics of SCW under different hydro geological parameters were analyzed through large numbers of calculation cases. The results show that the aquifer with larger horizontal permeability coefficient enhances the ratio of original groundwater exchange and lightens the change of pumping temperature. The aquifer stagnant thermal conductivity has little effect on pumping temperature if SCW is in the aquifer with good permeability, however, if with poor permeability, the pumping temperature would be rapidly increased with the increase of the aquifer stagnant thermal conductivity. The permeability coefficient is a key parameter to influence the change extent of pumping temperature obviously.

Key words: standing column well; hydro geological conditions; operating characteristics; original groundwater exchange

循环单井 20 世纪 70 年代中开始在美国使用, 全美大约安装有 1000 个循环单井^[1], 韩国的地源热泵工程中近 30% 采用了循环单井^[2]. 与闭

式地下换热器(如 U 形管、套管等)相比, 循环单井直接采用基岩中的裸井, 地下水一部分直接在井孔内循环; 另一部分进出井孔, 与含水层进行质量交换, 有时也称其为一种半开式系统^[3]. 但也正因为循环单井与含水层之间的原水交换, 使得循环单井的运行特性较封闭式地下换热器更易受到含水层水文地质条件的影响. 而这方面的研究还较缺乏, 为此, 针对从现场试验中提炼出的水文地质条件, 分析了渗透系数、热物性参数等对循环单

收稿日期: 2009-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41002085);

北京市暖燃重点实验室项目(KF201011).

作者简介: 倪 龙(1979—), 男, 博士, 讲师;

姜益强(1973—), 男, 教授, 博士生导师;

姚 杨(1963—), 女, 教授, 博士生导师;

马最良(1940—), 男, 教授, 博士生导师.

井运行特性的影响.

1 循环单井的运行特性

图 1 给出了循环单井的原理图. 循环单井直接采用基岩中的裸井, 抽水管从井孔下部取水, 换热后的地下水再回到井孔的上部. 为了防止井孔的坍塌, 循环单井一般安装在强岩层中^[4].

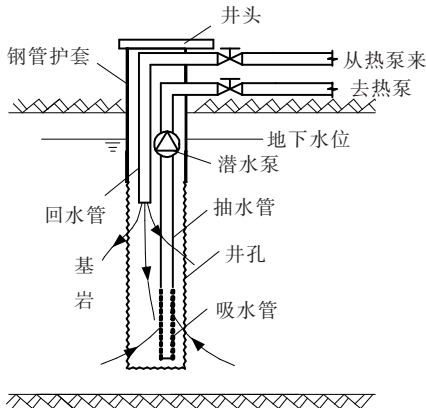


图 1 循环单井

对于循环单井的运行特性, 较为关注的是它的热响应特征和水动力特征, 即抽水温度和地下水的流动阻力. 为此, 笔者建立了循环单井地下水流动和传热的数学模型, 该模型分为 2 部分: 依据质量守恒、地下水动力学方程建立的地下水流动数学模型^[5]和依据能量守恒等建立的井管-井孔-含水层传热耦合数学模型^[6]. 初始条件即含水层自然地温梯度场, 远边界条件为未受影响的含水层边界, 同时可根据水源热泵机组特性计算出负荷边界条件. 采用该数学模型对宾夕法尼亚

州立大学校园内循环单井现场试验^[7]进行了数值模拟. 模拟结果显示出, 抽水温度的模拟结果与实测值吻合良好, 误差在 10% 以内, 这表明所建立的数学模型是正确的^[5-6].

采用相似的水文地质条件, 应用该数学模型, 对循环单井的地下水流动和换热特性进行数值模拟. 含水层为卡斯特灰岩含水层, 无越流, 各向同性. 负荷边界条件所采用的模型建筑为北京某单层办公建筑. 抽水流量和回水流量相等, 均为 12 m³/h. 相关物性参数如表 1 所示.

表 1 含水层参数

参数	数值	参数	数值
埋深/m	30	厚度/m	300
比热容/ (kJ·m ⁻³ ·℃ ⁻¹)	2 600	热弥散度/ m	0.3
渗透系数/ (m·s ⁻¹)	2×10 ⁻⁵	初始温度/ ℃	13
储水系数/ m ⁻¹	1×10 ⁻⁶	地温梯度/ (℃·m ⁻¹)	0.01
导热系数/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	2.5	恒温层厚度/ m	30
建筑面积/ m ²	1 020	最大取热 负荷/kW	69
设计负荷/ kW	88	累积取热 负荷/GJ	316

循环单井的井结构参数和物性参数大多取自美国广泛使用的循环单井^[8], 如表 2 所示.

表 2 循环单井的几何尺寸和物性参数

设备	深度/m	直径/mm	壁厚/mm	粗糙度/mm	导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
井孔	320	152.4	—	1.5	—
抽水管	318	101.6	6.35	0.01 ^①	0.16 ^①
回水管	32	33.4	3.05	—	—
钢管护套	35	150.0	—	0.5	不考虑热阻

注: ① PVC 管常见值.

图 2 给出了循环单井运行 10 h 时含水层中的等降深图. 含水层上部降深 < 0, 上部 > 0. 表明井孔上部回水流向含水层, 产生回灌效应; 下部含水层中的地下水流向井孔, 产生抽水效应, 即井孔与含水层之间有地下水的交换. 但降深都不大, 也即是井孔与含水层间地下水的交换量不大, 大部分地下水在井孔内循环. 这也使得循环单井地下水的流动阻力损失(包括抽水地下水的降深、抽水管阻力损失、回灌水降深绝对值)不大, 对于该算例仅为 22 kPa.

图 3 给出了循环单井抽回水温度随时间的变化. 运行期间循环单井的最高抽水温度为 14.3℃, 最低抽水温度为 7.4℃, 变化量达 6.9℃, 变化剧烈. 其逐时抽水温度对抽水流量的加权平均值(简称抽水平均温度)为 10.4℃. 与逐时负荷(由于抽水流量不变, 逐时负荷即与图 3 中抽回水温度之差对应)对比可知, 抽水温度总体上随着负荷的变化而变化, 当负荷较大时, 抽水温度相等较低. 这是因为循环单井直接使用裸孔, 由于流动阻力的不同, 大部分地下水均在井孔内循环,

形成地下水短路,这样抽水温度随着负荷的变化而变化。

供热工况时,由于原水交换,部分回水从井孔流向含水层,井孔上部温度较低;一定量的地下水从含水层流向井孔,成为抽水的一部分,含水层下部温度较高。当抽回水流量相等时,流进含水层的水量和含水层流入井孔的水量也相等。虽然如此,由于流进、流出井孔地下水的温度不同,这给循环单井带来了热量,承担了部分负荷。采用原水交换比和原水交换负荷比来表征井孔与含水层之间的原水交换大小和这部分原水交换所能提供的热量占负荷的比例。其计算式为^[9]

$$r_{ow} = \left(1 - \frac{A_{hp} |u_{zmin}|}{Q_{wp}}\right) \times 100\%,$$
$$r_{ol} = - \frac{\int_{z_1}^{z_2} 2\pi r_h C_w u_{rha} (\theta_{ha} - \theta_r) dz}{Q_{wL}} \times 100\%.$$

式中: r_{ow} 、 r_{ol} 分别为原水交换比和原水交换负荷比,%; A_{hp} 为井孔净面积,等于井孔面积减去抽水管面积 m^2 ; u_{zmin} 为井孔内竖向分速度最小值, m/s ; Q_{wp} 为抽水流量 m^3/s ; r_h 为井孔半径 m ; C_w 为地下水的容积比热容 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; u_{rha} 为井孔与含水层结合界面上的地下水径向流速,流出为正, m/s ; θ_{ha} 为井孔壁温度, $^\circ\text{C}$; θ_r 为回水温度, $^\circ\text{C}$; Q_{wL} 为循环单井取热负荷 kW ; z_1, z_2 分别为井孔的起止深度 m 。

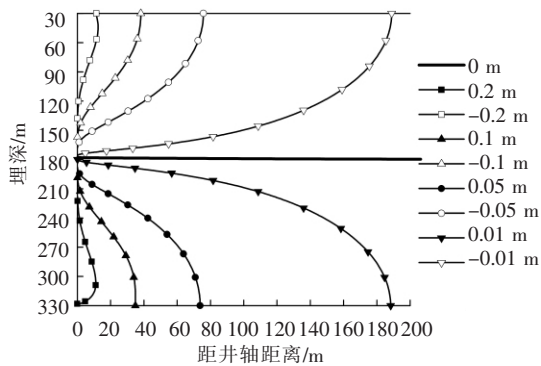


图 2 循环单井等降深图

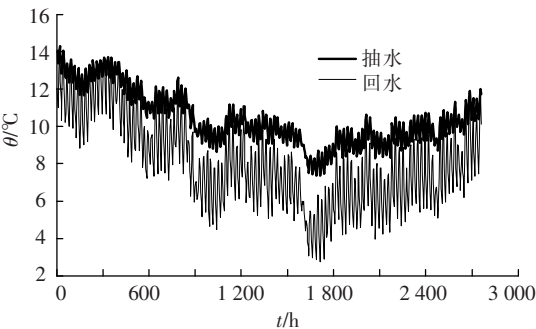


图 3 循环单井抽回水温度随时间的变化

对于本算例,原水交换比为 29.6%,原水交换负荷比为 23.4%。也即循环单井回水中有近 30% 的水量流向含水层,而抽出的地下水中有近 30% 的水量来自于含水层本身,这部分原水交换承担了近 1/4 的负荷。

2 渗透系数的影响

图 4 给出了水平渗透系数变化时,循环单井地下水的流动阻力和抽水温度的变化情况。由图 4 (a) 可知,流动阻力随着渗透系数的减小而增加,但都不大。这是因为,循环单井井孔内没有隔断,大部分地下水直接在井孔内循环,井孔内流动相对于含水层中的渗流阻力要小,因此,总体阻力损失并不大。但随着渗透系数的减小,含水层中渗流的阻力增加,更多的回水在井孔内流动,从而增加了流动阻力损失。但即使含水层完全不透水(渗透系数为 0),流动阻力损失也仅为 32 kPa,可以说不存在回灌问题。

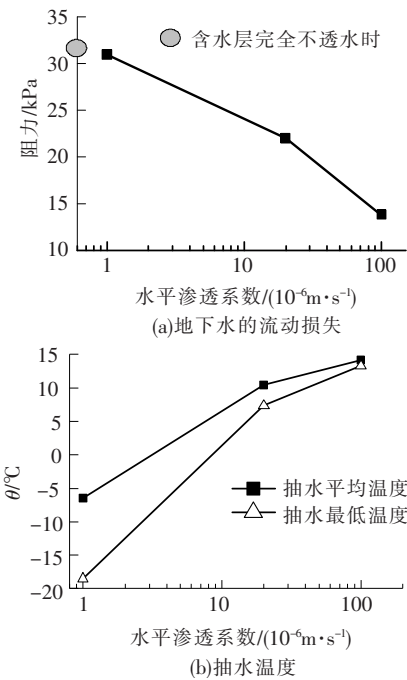


图 4 水平渗透系数对循环单井运行特性的影响

由图 4 (b) 可见,当满足负荷要求时,循环单井抽水平均温度和抽水最低温度随着水平渗透系数的减小而急剧降低。当水平渗透系数很小时,抽水温度很快降低到 0 $^\circ\text{C}$ 以下(如渗透系数为 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 时,不到 20 d 抽水温度就降到 0 $^\circ\text{C}$ 以下)。这是因为水平渗透系数很小时,原水交换比和原水交换负荷比相应很小,几乎全部的地下水都在井孔内循环,含水层中主要靠导热传热,传热效果差,热影响范围小,系统承担负荷的能力降低。如水平渗透系数为 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,原水交换比

仅为 2.5% ,原水交换负荷比仅为 2.3% ;而水平渗透系数为 1×10^{-4} m/s ,含水层流动阻力变小 ,可以和粗糙井孔中的流动阻力相比拟 ,再加上渗透边界长达近 300 m ,使得原水交换比高达 64% ,承担了近一半的负荷. 没有地下水时 ,循环单井亦能工作 ,但此时传热效果更差 ,系统承担负荷的能力更低. 当水平渗透系数为 0 时 ,5 d 时抽水温度就降到 0℃ 以下 ,仅当系统承担原有负荷的 1/5 时 ,抽水温度才与水平渗透系数为 2×10^{-5} m/s 相当(此时抽水平均温度和最低抽水温度分别为 9.42℃ 和 6.50℃) . 实际运行时 ,随抽水温度的降低 ,机组的制热量及制热性能随之下降 ,并最终平衡于某一运行工况 ,但此时热泵机组的供热量达不到负荷要求.

循环单井的热影响范围也随着渗透系数的减小而急剧减小. 当水平渗透系数为 1×10^{-4} m/s 时 ,热影响范围为 15.5 m ,而当含水层不透水时 ,热影响范围仅为 9.4 m. 热影响范围的减小 ,换热的减弱使得循环单井的抽水温度快速降低.

可见 ,由于井结构的特殊性 ,渗透系数的变化虽然对流动阻力的影响不大 ,但对抽水温度的影响却尤为显著. 渗透性好的含水层能够显著的提高抽水温度 ,增强系统承担负荷的能力 ,提高热泵机组的效率. 故循环单井宜用于渗透性能较好的含水层中.

当水平渗透系数为 2×10^{-5} m/s ,而渗透系数比变化时 ,循环单井流动阻力和抽水温度的变化如图 5 所示. 渗透系数比增大时 ,循环单井流动阻力有所增加 ,抽水平均温度和最低温度均有所降低 ,但变化都不明显 ,尤其是流动阻力. 渗透系数比从 1 增加到 10 时 ,流动阻力仅增加了 0.8 kPa ,抽水平均温度也仅降低了 0.6℃ ,热影响范围基本没有变化. 这是因为 ,当渗透系数比增加时 ,含水层中竖向渗透系数减小 ,增加了含水层中地下水竖向流动阻力 ,井孔与含水层之间的原水交换比有所减低 ,从而降低了抽水温度. 但循环单井地下水大部分在井孔内循环 ,小部分在含水层中

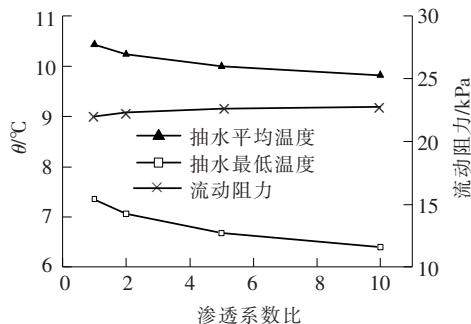


图 5 渗透系数比对循环单井运行特性的影响

流动的地下水也以水平流动为主 ,竖向分速度很小 ,因此竖向渗透系数的减小对循环单井流动阻力和抽水温度的影响有限.

3 含水层热物性参数的影响

对于土壤源热泵而言 ,较为关注的是地下岩层的导热系数和热容量. 而对于循环单井 ,由于多孔介质含水层中有渗流 ,含水层的热物性参数除了导热系数、热容量外 ,还应包括渗流多孔介质中特有的热弥散度. 热弥散效应是为了描述多孔介质能量守恒方程从孔隙尺度向宏观数学模型粗化过程中 ,被掩盖的孔隙速度脉动在固体骨架周围引起的微尺度对流而导致的传热增强. 热弥散传递的热量可能很大 ,尤其是在近井附近^[10] . 热弥散效应与流体在孔隙通道内的流速、固体骨架和流体的物性以及多孔通道的结构等因素有关. 忽略热弥散效应会导致某些传热计算结果的不准确^[11] .

现阶段一般用热弥散系数表示热弥散效应的强弱. 然后将热弥散系数和含水层的导热系数组合在一起 ,称为含水层的有效导热系数. 含水层有效导热系数由 2 部分组成^[12] ,即

$$\lambda_A = \lambda_a + \alpha C_w |q|$$

式中: λ_A 为含水层有效导热系数 ,W/(m·℃) ; λ_a 为含水层的滞止导热系数 ,指地下水不流动时的含水层导热系数 ,W/(m·℃) ; α 为热弥散度 ,m; q 为地下水的渗流速度 ,m/s.

表 3 给出了含水层容积比热容和滞止导热系数的变化对循环单井热力特性的影响. 容积比热容增加时 ,循环单井的抽水温度有所提高 ,但变化不大 ,然而其热影响范围减小较多. 实际含水层的容积比热容的变化(1 800 ~ 3 000 kJ/(m³·℃)) 不大 ,因此 ,可以认为容积比热容对循环单井的抽水温度影响不大.

对含水层滞止导热系数而言 ,如表 3 所示 ,当渗透系数为 2×10^{-5} m/s 时 ,循环单井的抽水温度随着含水层滞止导热系数的增加而增加 ,但变化幅度较小. 相对来说对抽水最低温度的影响更为大些. 但这并不是说明含水层滞止导热系数对循环单井的影响较小. 事实上 ,对循环单井来说 ,热量的传递方式为对流和导热. 当渗透系数较大时 ,对流换热较强烈 ,导热作用被弱化 ,其影响也就不显著;而当渗透系数较小时 ,导热作为主要的传热方式 ,导热系数的影响不可忽视.

图 6 即给出了水平渗透系数为 1×10^{-6} m/s、承担 1/4 的负荷和水平渗透系数为 2×10^{-5} m/s、

承担 1 倍的负荷时,循环单井抽水平均温度和最低温度随含水层滞止导热系数的变化. 图中 K_r 、 T_m 、 T_{\min} 分别表示水平渗透系数、抽水平均温度和抽水最低温度. 由图 6 可知,当渗透系数较小时,抽水温度对于滞止导热系数的变化非常敏感. 随着滞止导热系数的增加,抽水平均温度和最低温度迅速增加,此时对流换热不显著(原水交换负荷

比小于 1%) ,热弥散效应也较小,导热作为热量传递的主要方式,含水层滞止导热系数起关键作用. 当含水层不透水时,含水层滞止导热系数对循环单井抽水温度的影响更为重大. 而当水平渗透系数较大(如 2×10^{-5} m/s) 时,抽水温度虽随着含水层滞止导热系数的增加而增加,但不显著.

表 3 含水层容积比热容和滞止导热系数变化对循环单井热力特性的影响

热力特性	容积比热容/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)			滞止导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)		
	1 500	2 600	4 000	1. 5	2. 5	4. 0
抽水平均温度/ $^\circ\text{C}$	10. 32	10. 43	10. 54	10. 18	10. 43	10. 81
热影响范围/m	18. 3	14. 2	11. 5	13. 2	14. 2	15. 2
原水交换负荷比/%	23. 5	23. 4	23. 2	23. 4	23. 4	23. 3

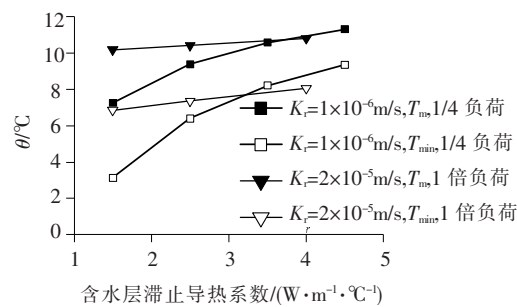


图 6 抽水温度随含水层滞止导热系数的变化

当渗透系数为 2×10^{-5} m/s 时,图 7 给出了热弥散度变化时循环单井的抽水温度. 由图 7 可知,循环单井的抽水温度随着热弥散度的增加而增加,尤其是抽水最低温度. 热弥散度增加时,靠近热源井的地方含水层的有效导热系数显著加强,热量的平均化作用更强,从而减缓温度的变化.

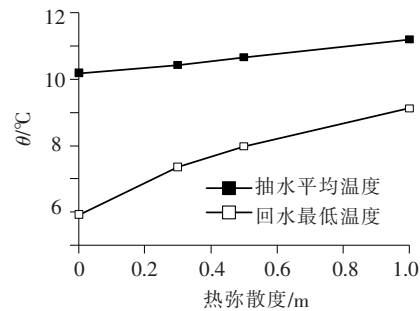


图 7 抽水温度随热弥散度的变化

但现在对热弥散的描述还很不成熟,参数的取值还与具体实例有关,因此本文中基本算例是根据文献[6]中试验验证结果来对循环单井的热弥散度取值的.

4 结 论

1) 循环单井运行时,存在着井孔与含水层的原水交换现象,原水交换承担了部分负荷. 原水交换比例的大小直接决定了循环单井抽水温度的变

化幅度和系统承担负荷的能力.

2) 循环单井没有回灌困难的问题,含水层渗透系数对流动阻力的影响不大,但对循环单井的抽水温度而言却是一个关键性参数. 水平渗透系数较大的含水层极大的减轻了抽水温度的变化,提高了原水交换比,但渗透系数比(水平/竖直)对抽水温度的影响较小. 循环单井宜用于渗透性能较好的含水层中.

3) 对于渗透性能较好的含水层,含水层滞止导热系数对循环单井的影响不大;而对于渗透性能较差的含水层,抽水温度随着含水层滞止导热系数的增大而迅速提高.

4) 循环单井的抽水温度随着热弥散度的增加而增加,尤其是抽水最低温度. 但容积比热容对循环单井抽水温度的影响不大.

参考文献:

[1] O' NEILL Z D , SPITLER J D , REES S J. Performance analysis of standing column well ground heat exchanger systems [J]. ASHRAE Transactions ,2006 , 112 (2) : 633 - 643.

[2] LEE J Y. Current status of ground source heat pumps in Korea [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009 , 13 (6/7) : 1560 - 1568.

[3] YAVUZTURK C , CHIASSON A D. Performance analysis of U-tube , concentric tube , and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach [J]. ASHRAE Transactions ,2002 , 108 (1) : 925 - 938.

[4] COLLINS P A , ORIO C , SMIRIGLIO S. Geothermal heat pump manual [M]. New York: New York City Department of Design and Construction (DDC) 2002.

(下转第 62 页)

- [7] ENOKIZONO M , TANABE H. Numerical analysis of high-frequency induction heating including temperature dependence of material characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics , 1995 , 31 (4) : 2438 – 2444.
- [8] DISSADO L A , ZADEH S , FOTHERGILL J C , *et al.* Temperature dependence of charge packet velocity in XLPE cable peelings [C]//2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc , 2007: 425 – 428.
- [9] DIN E S T E , GILANY M , AZIZ M M A , *et al.* An PMU double ended fault location scheme for aged power cables [C]//2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc , 2005: 80 – 86.
- [10] DUBICKAS V , EDIN H. On-line time domain reflectometry measurements of temperature variations of an XLPE power cable [C]//2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc , 2006: 47 – 50.
- [11] LIN C Y O , CURILLA J P. Temperature-related changes in dielectric constant and dissipation factor of insulations increase attenuation in data cables used in building plenums [C]//1991 Local Computer Networks Proceedings. Minneapolis: IEEE Computer Society Press , 1991: 74 – 79.
- (编辑 赵丽莹)

(上接第 51 页)

- [5] 倪龙,余延顺,姜益强,等. 循环单井地下水多流态流动特性 [J]. 南京理工大学学报 ,2010 , 34 (3) : 367 – 371.
- [6] 倪龙,姜益强,姚杨,等. 循环单井井管 – 井孔 – 含水层传热模型 [J]. 哈尔滨工程大学学报 ,2009 , 30 (11) : 1228 – 1233.
- [7] MIKLER V. A theoretical and experimental study of the " energy well " performance [D]. Penn State: Pennsylvania State University ,1993.
- [8] ORIO C D , JOHNSON C N , REES S J , *et al.* A survey of standing column well installations in North America [J]. ASHRAE Transactions , 2005 , 111 (2) : 109 – 121.
- [9] 倪龙,姜益强,姚杨,等. 循环单井与含水层的原水交换 [J]. 太阳能学报 ,2010 , 31 (6) : 743 – 748.
- [10] XUE Y , XIE C , LI Q. Aquifer Thermal energy storage: a numerical simulation of field experiments in China [J]. Water Resources Research , 1990 , 26 (10) : 2365 – 2375.
- [11] ALAZMI B , VAFAI K. Analysis of variable porosity , thermal dispersion , and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media [J]. Journal of Heat Transfer , 2004 , 126 (6) : 389 – 399.
- [12] CHEVALIER S , BANTON O. Modeling of heat transfer with the random walk method. part 1. application to thermal energy storage in porous aquifers [J]. Journal of Hydrology , 1999 , 222 (1/2/3/4) : 129 – 139.
- (编辑 赵丽莹)