

回填料对埋管换热器性能的影响

李隆键, 鲍建镇, 廖 全, 崔文智

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 采用了埋管换热器三维非稳态耦合传热的物理数学模型, 针对实际的埋管结构和热响应测试工况进行了相应的数值模拟。将模拟计算结果与 TRT 热响应测试结果进行了比较, 验证了所建模型的正确性。在此基础上, 考察了埋管换热器回填料导热系数及比热等物性参数对埋管换热器性能的影响关系, 为热响应测试以及工程设计提供有益的理论指导。

关键词: 埋管换热器; 回填料; 数值模拟; 热响应测试

中图分类号: TU111.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)05-0090-05

Influence of Backfill on Performance of Ground Heat Exchanger

LI Long-jian, BAO Jian-zhen, LIAO Quan, CUI Wen-zhi

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The physical and mathematical model of three dimensional unsteady coupled heat transfer in the ground heat exchanger is proposed, and corresponding numerical simulations for actual ground heat exchanger and operation condition are carried out. The computed results are compared with those of the thermal resistance test of the ground heat exchanger, which proves the correctness of the model and corresponding numerical methods. Then, the effects of thermal conductivity and specific heat of the ground backfill material on the ground heat exchanger are investigated, which provides theoretical guidance for the thermal response test and the engineering design of the ground heat exchanger.

Key words: ground heat exchanger; backfill; numerical simulation; thermal response test

现场岩土热物性测试是合理设计埋管换热器的基础^[1-2], 现在国际通用的岩土热物性测试方法是恒热流法, 恒热流法最先由 C. Eklof 等^[3]于 1996 年提出, 是 IGSHPA 的标准和美国采暖制冷与空调工程师学会 (ASHRAE) 手册所推荐的方法。恒热流法热响应测试 (Thermal Response Test, TRT) 方法中的数据处理的基于线热源模型^[4], 它是埋管换热器传热分析的基础, 但是现有的线源法模型将管子周围的大地土壤连同回填料部分看作是一个无限大的实体, 不能考虑回填料热物性对土壤当量导热

系数的影响。

另一方面, 埋管换热器钻孔埋管后回填是地源热泵工程的重要环节, 回填料的选择和施工对地下岩土导热系数有重要影响^[5-6]。即使同一种岩石或地质成分, 如果回填料的物性差别较大, 测得的土壤当量导热系数相差也比较大。S. P. Kavanaugh^[7]研究表明, 地下岩土导热系数 10% 的偏差会造成地下埋管换热器长度 (或钻孔深度) 4.5%~5.8% 的偏差, 直接影响埋管换热器性能及系统的运行费用与初投资。然而, 回填料对岩土

收稿日期: 2011-02-10

基金项目: 重庆市科委自然科学基金 (CSTC2009BB6045)

作者简介: 李隆键 (1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事传热传质及其强化、计算传热学、新能源技术及应用研究, (E-mail) longjian@cqu.edu.cn.

当量导热系数影响的定量分析至今还很少,缺乏对工程施工的理论指导。

数值模拟是研究埋管换热器性能的有效方法,通过实验的验证具有较高的精度^[8-9]。本文针对实际埋管换热器建立土壤和冷却介质耦合传热的三维瞬态模型,通过数值分析考察回填料物性参数对岩土当量导热系数的影响。

1 物理数学模型

1.1 假设条件

由于埋管换热器传热过程的复杂性,还有地下水的影响,难以建立能反映所有实际情况的模型并求解。为简化起见,须作以下假设:

- 1) 土壤是均匀的,而且在整个传热过程中土壤的热物性不变。
- 2) 忽略土壤中水分迁移的影响。
- 3) 忽略 U 型管壁与回填材料、回填材料与土壤之间的接触热阻。
- 4) 忽略地表温度波动以及埋管深度对土壤温度的影响,认为土壤初始温度均匀一致,初始阶段为当地的年平均气温。

1.2 物理模型

对于单 U 形管结构,假定埋管换热器内流动与传热都是相对于上升和下降管轴心线所在竖直面面对称的,因此只取整个换热器结构一半作为计算区域。埋管管钻孔深度 100 m,土壤半径 3 m,U 型管是外径 32 mm,壁厚 3 mm,内径是 26 mm 的高密度聚乙烯管,U 型管上升和下降管中心距为 64 mm,钻孔直径为 130 mm,U 型弯底端再延伸 3 m 作为外层边界。简化模型示意图如图 1 所示。很显然,在 TRT 测试中埋管换热器内是一个三维非稳态对流-导热耦合传热过程。

1.3 控制方程

由于埋管换热器中流体的流动一般都处于湍流状态,因此在进行 CFD 模拟时,选用了 κ - ϵ 双方程模型^[10]来解得 U 型管中水的湍流流动和传热,并将管内对流换热与回填土和土壤中的导热过程耦合起来。管内湍流流动的控制微分方程,包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程以及湍流耗散方程依次为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \times \mathbf{u}) - \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) = \nabla p + \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u})^T \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} h) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_T}) \nabla h] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} k) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_T}) \nabla k] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \epsilon) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_T}) \nabla \epsilon] + \frac{\epsilon}{k} (c_{\epsilon 1} G_k - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (5)$$

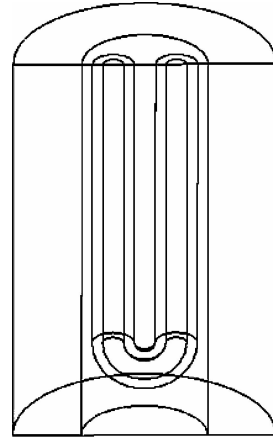


图 1 几何模型示意图

回填土和土壤传热的控制方程:

$$\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (6)$$

式中: ρ 为流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \mathbf{u} 为速度矢量; μ_{eff} 为有效黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为流体的压力, Pa ; h 为流体的焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为湍流脉动动能, μ 为流体的黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ϵ 为湍流脉动动能耗散率; σ_T 、 σ_k 、 σ_ϵ 、 $\sigma_{\epsilon 1}$ 、 $\sigma_{\epsilon 2}$ 为常数; ρ_s 为回填土或土壤密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为回填土或土壤的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为回填土或土壤温度, K ; λ 为回填土或土壤的热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

1.4 数值求解

对上述非稳态流固耦合传热问题,采用控制容积有限元方法(CVFEM)进行求解,控制方程中的对流项全部采用二阶迎风差分离散。为了保证计算良好的收敛性,压力和动量采用欠松弛的迭代法。

在划分网格时,在流体的近壁面处加边界层,在 U 形管下部的弯管处,由于流场变化剧烈,且曲度较大,所以要对该部分网格加密,避免网格有较大的倾斜角,整个模型均用六面体网格。在 U 型管进口处定义为 VELOCITY_INLET 边界类型,出口处为 OUTFLOW 边界类型。用恒温流法做 TRT 热响应测试时,水是在一个封闭的系统中流动,当水从 U 型管的出口出来时,会经过一个加热器,使水有一个

ΔT 的温升,为了实现此功能在 U 型管的进出口用 UDF 编一个周期性边界条件。由于模型的长宽比较大,所以选择双精度的求解器。

2 模拟结果及分析

2.1 模型的验证

目前,土壤导热系数最主要的测试方式是现场热响应实验测试法^[11]。该实验法要求测试的钻孔结构尽量与工程实际一致,循环工质、导管尺寸、回填料、井孔的深度与半径等都要按照工程设计要求确定。近年来,瑞典、德国和美国等分别研制出了移动的地下热响应实验测量设备^[12-13]。笔者参照热响应测试系统和方法,开发出岩土热物性现场测试仪^[14]。测量仪主要部件由加热器、循环水泵、流量测量装置、温度测量装置、信号变送装置、微机控制与处理装置等构成。测量仪中的管路与地埋管换热器地下回路相接,循环水泵驱动流体在回路中循环流动,流体经过加热器加热后流经地下回路与地下岩土进行换热。为了检验数值分析模型及其数值计算方法的正确性,针对某地埋管换热器实验测试工况进行了相应的计算,计算所需材料物性参数见表 1。

表 1 材料物性参数表

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ [$\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	导热系数/ [$\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]
水	998.2	4182	0.6
回填土	1 989	120~3 620	0.4~4
管材	1 860	840	0.44
土壤	2 082	837	2.2, 2.7

管内流体、管壁、回填土、土壤的初始温度均为 18°C 。由 TRT 热响应测试实验测得,在加热功率为 6 kW ,流速为 0.48 m/s 下,测得土壤的导热系数为 $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,由此在模型中设土壤和回填土的导热系数均为 $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,在定加热功率 6 kW 、流速为 0.48 m/s 的条件下,流体进入加热器后会有一个 ΔT 的温升,由计算得到为 5.57°C ,可以通过 FLUENT 的 UDF 来实现此功能。在实验和模拟的情况下,地埋管换热器连续运行 76 h ,U 型管进出口算术平均水温随时间的变化曲线如图 2 所示。

由于实验时每 10 s 记录一次数据,数据量较大,所以在图上呈上下震荡的曲线,而模拟的数据 400 s 记录一下数据,呈现出比较规律的曲线。由图 2 可以看出,模拟结果与实验结果基本吻合,进出口平均温度最大相对误差为 2.6% 。由此可见,数值计算可以再现 TRT 测试的整个过程,证明了所建立的

模型及其数值计算方法是正确的。

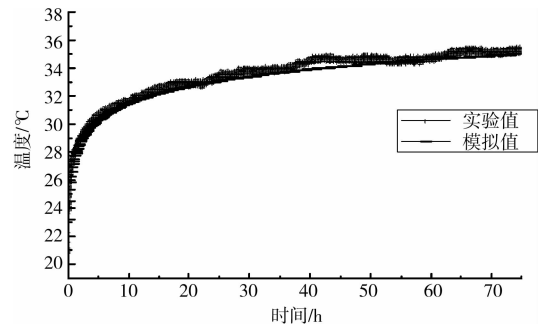


图 2 U 型管进出口平均水温模拟值与实验值的比较

2.2 回填土导热系数的影响

描述回填材料热物理性质的基本参数有导热系数、密度、比热容等,除地质条件中地下水对换热器性能影响重大外,其中导热系数是最关键的,也是决定系统效率高低的主要因素。图 3 为地埋管换热器连续运行 70 h ,土壤导热系数为 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,回填土导热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时钻孔内部 50 m 深度的温度分布。从图中可以看出,在不同导热系数下,管内流体的温度相差 4°C ,可见回填土导热系数对地埋管换热器的影响还是比较大。

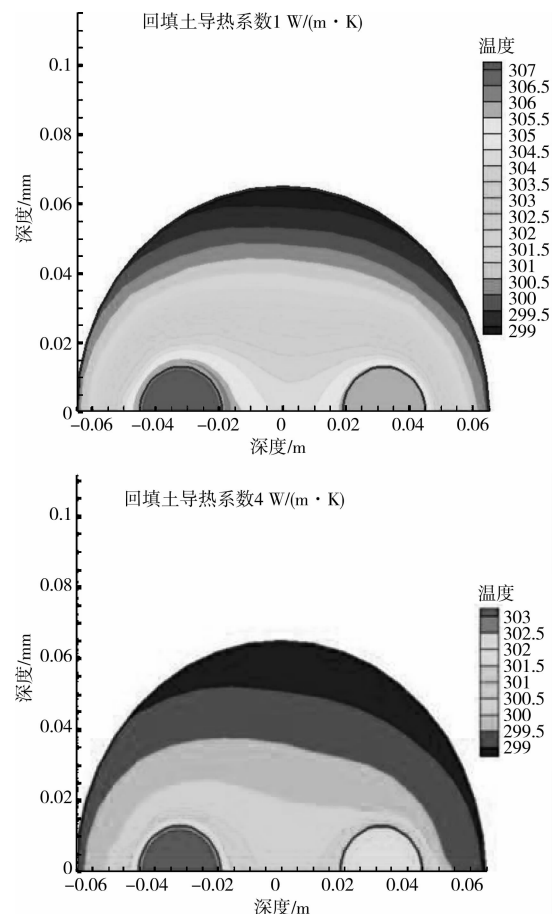


图 3 回填土导热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时 50 m 深度的温度分布

为了考察回填料导热系数对 TRT 当量导热系数的影响,取不同的回填料导热系数进行热响应测试过程的数值模拟,然后根据数值模拟计算结果按照 TRT 测试的数据处理方法得到土壤当量导热系数。图 4 为土壤导热系数分别为 $2.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,土壤当量导热系数随回填料导热系数的变化曲线。由图可见,当回填料导热系数小于土壤导热系数时,TRT 得到的当量导热系数受回填料导热系数的影响非常显著。此时,随着回填料导热系数的减小,当量导热系数呈指数规律递减。当回填料导热系数为 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,计算所得土壤当量导热系数比土壤的真实导热系数 $2.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 分别要小 10.5% 和 8% 。

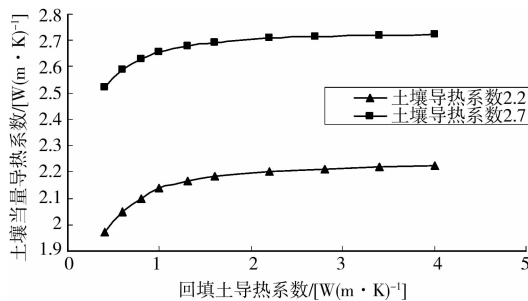


图 4 土壤当量导热系数随回填料导热系数的变化曲线

当回填料导热系数大于土壤导热系数时,TRT 测试的当量导热系数已非常接近土壤导热系数。理论上分析,随着回填料导热系数的增大,计算所得结果应该分别逐渐趋近于土壤的导热系数。这是因为当回填料导热系数增大时,钻孔热阻减小,当导热系数无限大时,钻孔热阻就会无限小,此时就可以认为整个地埋管换热器的热阻只有土壤部分起作用,而导热系数就趋近于土壤的导热系数。为了在 TRT 热响应测试中能够得到更真实的土壤的导热系数,应该尽可能增大回填土的导热系数,但是当回填土的导热系数超过土壤导热系数的时候,得到的土壤当量导热系数基本不变,所以也不能一味的增大其导热系数。

2.3 回填料比热的影响

回填料比热也是影响 TRT 热响应测试结果的重要因素,比热是单位质量物质的热容量,比热越大,对热的容量越大,热惯性越大,对土壤和冷却介质之间传热的阻滞作用越大。图 5 为地埋管换热器连续运行 70 h,土壤导热系数为 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 回填料比热为 $620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $3620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时 50 m 深度的温度分布,从图中可以看出回填料比热较大时管内水的温度相对较高。

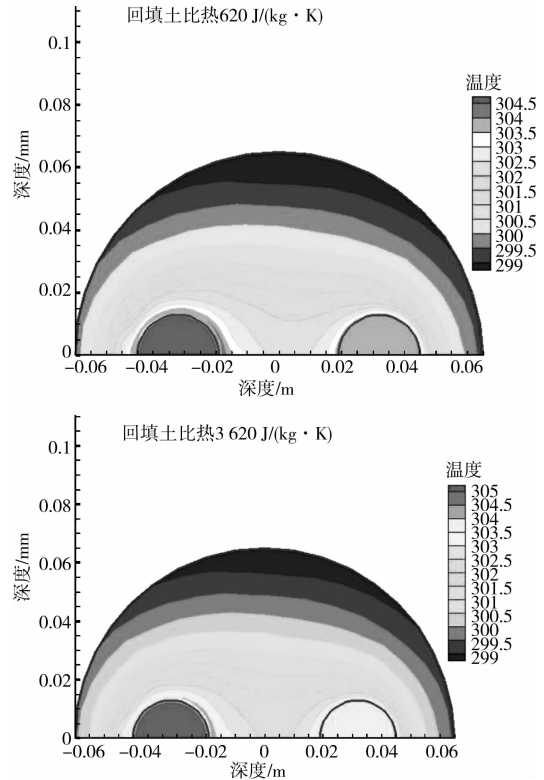


图 5 回填料比热为 $620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $3620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时 50m 深度的温度分布

从文献[15]可知,回填料比热与钻孔热阻有很强的正相关性,即回填料比热越大,相当于钻孔热阻越大,反之,回填料比热越小,钻孔热阻越小。从图 6 可以看出,土壤导热系数分别取 $2.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,回填料比热大于 $1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时,计算得到的土壤的当量导热系数是随着回填料比热的增大线性减小的,且下降幅度基本一致,当回填料比热小于 $1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时,随着回填料比热的减小,土壤的当量导热系数逐渐趋近于土壤的真实导热系数 $2.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在土壤的 2 种导热系数下,当回填料比热为 $3620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时,计算所得土壤当量导热系数比土壤的真实导热系数分别要小 8% 和 7% ,可见回填料比热对 TRT 热响应测试结果还是有一定影响的。

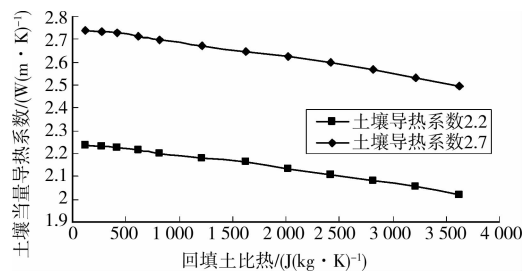


图 6 土壤当量导热系数随回填料比热的变化曲线

因为当回填料比热增大时,热惯性增大,相当于

钻孔热阻增加,相应的土壤的当量导热系数减小,所以为了在 TRT 热响应测试中能够得到更真实的土壤的导热系数,应该尽可能减小回填土的比热。

3 结 论

应用埋管换热器三维非稳态耦合传热的物理数学模型,分析了回填土导热系数和比热对 TRT 热响应测试得到的土壤当量导热系数的影响,得出了如下结论:

1)埋管换热器中当回填料导热系数小于土壤导热系数时,土壤当量导热系数随回填料导热系数的减小呈指数规律减小。当回填料导热系数大于土壤导热系数时,土壤当量导热系数几乎不再变化;设计或施工过程中选择回填料的导热系数至少不得低于土壤导热系数。

2)土壤的当量导热系数随着回填土比热的增大而线性减小。在其它条件相同的情况下,当回填土比热范围从 $620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 增大到 $3620 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 时,土壤当量导热系数减小 $7\% \sim 8\%$;实际 TRT 测试和工程施工中测试中,应尽量减小回填料比热。

参考文献:

- [1] NINA MATTSSON, GILBERT STEINMANN, LYESSE LALOUL. Advanced compact device for the in situ determination of geothermal characteristics of soils[J]. Energy and Buildings, 2008,40: 1344-1352.
- [2] 方亮,张方方. 关于埋管换热器热响应试验的讨论[J]. 建筑热能通风空调,2009,28(4):48-51.
FANG LIANG, ZHANG FANG-FANG. Comments on the thermal response test of the ground heat exchangers[J]. Building Energy & Environment, 2009, 28(4):48-51.
- [3] ESEN H, INALLI M. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in elazi {dotless} g, Turkey[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(4):395-401.
- [4] KAVANAUGH S P. Field tests for ground thermal properties In methods and impact on ground source heat pump design[J]. ASHRAE Transactions, 1992, 98(2): 607-615.
- [5] 高青,余传辉,马纯强,等. 地下土壤导热系数确定中影响因素分析[J]. 太阳能学报,2008 29(5):581-585.
GAO QING, YU CHUAN-HUI, MA CHUAN-QIANG, et al. Analysis of influence factors on determining the ground thermal conductivity[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(5):581-585.
- [6] 赵进,王景刚. 地源热泵土壤热物性测试与分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(1):58-60.
ZHAO JIN, WANG JING-GANG. Testing and analysis on the soil thermal properties by ground source heat pump[J]. Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition, 2010, 27(1):58-60.
- [7] KAVANAUGH S P. Field test s for ground thermal properties methods and impact on ground-source heat pumps[J]. ASHRAE Trans, 1998, 104 (2) :347-355.
- [8] HAKAN DEMIR, AHMET KOYUN, GALIP TEMIR. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3):224-233
- [9] SHARQAWY M H, MOKHEIMER E M, HABIB M A. Energy, exergy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger[J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(6): 582-592.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安交通大学出版社, 2001:333-385.
- [11] 朱瑞琪,张健明. 热响应试验方法与机理[J]. 西部制冷空调与供暖,2004,24(2):1-3.
ZHU RUI-QI, ZHANG JIAN-MING. Method and mechanism of thermal response test [J]. Western Refrigeration, Air Conditioning and Heating, 2004, 24 (2):1-3.
- [12] MOGENSEN P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages[C]//Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, 1983.
- [13] SIGNHILD GEHLIN. Thermal response test-in situ measurements of thermal properties in hard tock[D]. Hdea University of Technology, Sweden, 1998.
- [14] 彭清元,常桂钦,崔文智,等. 基于线热源理论的岩土热响应测试研究现状[J]. 节能,2010,(8):15-19.
PENG QING-YUAN, CHANG GUI-QIN, CUI WEN-ZHI, et al. Recent status of in-situ thermal response test based on line-source theory[J]. Energy Conservation, 2010(8):15-19.
- [15] MARCOTTE D, PASQUIER P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test [J]. Renewable Energy, 2008(33):2407-2415.

(编辑 王秀玲)