

# 添加隔热板对竖直U型地埋管换热器热短路的影响

罗 朗,余跃进,郑丽鹏,夏 雯

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

**[摘要]** 采用 FLUENT 模拟软件,建立起 U 型地埋管换热器三维传热模型. 分别模拟了有、无添加隔热板时的工况,对热短路进行数值模拟,分析了对地埋管换热器性能的影响. 通过对比两种工况下的温度云图和出口温度监测图,证明了两支管间热短路现象严重,而且添加隔热板后,进出口温差变大可达 3.94 ℃,可使单位井深换热量提升 6.13%.

**[关键词]** U 型地埋管,隔热板,数值模拟,换热性能

**[中图分类号]** TK01+8 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0066-06

## Influence of Adding the Insulation Board on Hot Short Circuit of the Vertical U-Tube Ground Heat Exchanger

Luo Lang, Yu Yuejin, Zheng Lipeng, Xia Wen

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The paper simulates with FLUENT software to build three-dimensional heat transfer model of U-tube buried tube heat exchanger. When adding insulation panels are simulated with and without conditions, to simulate the thermal circuit, the influence of the performance of ground heat exchanger is analyzed. By comparing the two kinds of working conditions of temperature and outlet temperature monitoring diagram, simulation proves that the hot short circuit phenomenon is serious between the two branch pipe, and after adding insulation board, the import and export temperature difference can reach 3.94 ℃, and the unit well depth in heat can be made to improve 6.13%.

**Key words:** U-type buried tube, insulation board, numerical simulation, heat exchange performance

地源热泵是一种利用地下浅层资源(包括地下水、土壤、地表水等)的高效节能空调系统<sup>[1]</sup>. 系统通过输入少量的高品位能(如电能),利用管内的循环流体与回填材料和土壤进行换热,从而实现制冷和供热. 地源热泵较好地实现了冬季供热储冷、夏季供冷储热,而且还可以供应生活用水,可谓是一举三得.

地埋管换热器是地源热泵系统的关键组成部分,是土壤源热泵设计的核心内容<sup>[2]</sup>. 而地埋管系统研究的重点和难点是地埋管换热器的换热性能,钻井内的“热短路”现象直接影响着换热器的换热性能,影响着地源热泵系统的工作效率. 所以研究地埋管的热短路对地源热泵的更好的推广和应用具有积极意义.

## 1 热短路现象

由于受钻孔尺寸的限制(约为 110 mm~150 mm),U 型管的两个支管间距较小且存在温差,两个支管间填充着导热系数较大的回填材料,使两支管必然发生热量回流,即热短路现象<sup>[3]</sup>. 两支管间发生热短路现象时,在制热工况下,出水温度低于理想出口温度(模拟两支管足够远,不发生热短路现象),即进出口温差变低;在制冷工况下,受热短路的影响,出水温度高于理想温度,进出口温差变小,从而影响到换热器

收稿日期:2015-11-19.

通讯联系人:余跃进,教授,研究方向:空调系统优化、地源热泵技术、建筑物通风技术. E-mail:dlkj@njnu.edu.cn

换热效果。

为了抑制或缓解“热短路”现象的发生,国内学者提出了在两支管的中垂线添加距离地表面一定深度适当厚度的隔热板或在回水管段敷设保温层(或涂保温材料)的两种抑制措施。本研究采用 FLUENT 模拟软件,建立起 U 型地埋管换热器三维传热模型,分别模拟了有、无添加隔热板时的工况,对热短路进行研究,分析了对地埋管换热器性能的影响。

## 2 地埋管换热器数值模拟

### 2.1 相关 CFD 软件介绍

计算流体力学 CFD(Computation Fluid Dynamics)是通过计算机进行数值模拟,分析流体流动和传热等物理现象的技术。CFD 模拟能帮助理解流体力学问题,为实际工程提供指导,为设计提供参考,从而节省人力、物力和时间。

采用 CFD 解决地埋管换热器换热传热模型这一实际问题分为三步:前处理(Gambit)、求解(Fluent)、后处理(Tecplot)。Gambit 能简单而直接地建立模型、网格化模型、指定模型区域大小等基本步骤,其中网格化模型是指生成四面体、六面体、棱锥和棱柱形的结构化网格和非结构化网格。Fluent 是用于计算流体流动和传热问题的程序,它提供的非结构化网格生成程序对于复杂的几何结构网格生成非常有效。Fluent 还可以根据计算结果调整网格,这种自适应性和调整对于精确求解有较大梯度的流场有很实际的作用。Tecplot 是绘图和数据分析的通用软件,是进行数据模拟和数据分析的理想工具,作为功能强大的数据显示工具,能绘制 XY、2-D 和 3-D 数据图以显示工程和科学数据。

### 2.2 假设条件

地埋管换热器的传热过程实际上是一个复杂的三维非稳态传热过程,因此应采用非稳态传热过程来分析研究。整个传热过程可以分为六个部分:(1)管内循环流体和 U 型管管内壁的对流换热;(2)U 型管的内部导热;(3)地埋管外管壁和回填材料的传热;(4)回填材料内部的热传导和少量的热对流,回填料的热物性对换热器换热能力的大小有着重要的影响;(5)回填材料和土壤之间的传热;(6)土壤内部的热传导以及水渗流造成的对流换热。影响地埋管换热器换热效果因素较多,为方便理论分析,对传热模型做以下简化<sup>[4]</sup>:

- (1)假设土壤是均匀的,其物性参数不随温度改变而变化,即具有常物性。
- (2)忽略土壤中地下水渗流的影响,不考虑土壤中水迁移对热量传递的影响,即传热过程为单一热传导。
- (3)假设模型计算选取的水、回填材料、管壁和隔热板热物性参数恒定不变,与温度无关。
- (4)开始求解时,假设整个求解区域具有相同的初始温度,土壤温度不受深度影响,只在上表面受到空气对流作用的影响。
- (5)假设埋管内水平方向上温度、速度均匀一致。
- (6)忽略管壁与回填材料、土壤与回填材料、隔热板与回填材料之间的接触热阻。
- (7)只以单个钻井为研究对象,不考虑地埋管井与井之间的相互影响。

### 2.3 物理模型

模型由管内循环流体、U 型管、回填材料、土壤和隔热板组成。计算范围内的土壤和钻井近似看成圆柱形,为了划分网格方便,沿地埋管深度方向将模型划分为两部分,由于 U 型管两管脚中心线所在的平面两侧集合形状和流动及其传热情况均匀对称,故仅需要建立一半模型进行计算<sup>[5]</sup>,既保证了计算的精度,也简化了模型,节约了计算时间。

模拟的竖直单 U 型地埋管钻井深度为 120 m,隔热板的长度距离地表为 60 m,土壤影响半径取 3 m,钻孔直径为 150 mm,U 型管外径为 32 mm,内径为 26 mm,两支管间间距为 80 mm。隔热板的尺寸为 60 m×60 mm×10 mm。

该模型按照实际工程的尺寸进行模拟研究,但该模型属于细长型,为了更好地展示模型,图 1 分别给出了不添加隔热板模型、添加隔热板模型和简化后的模型。

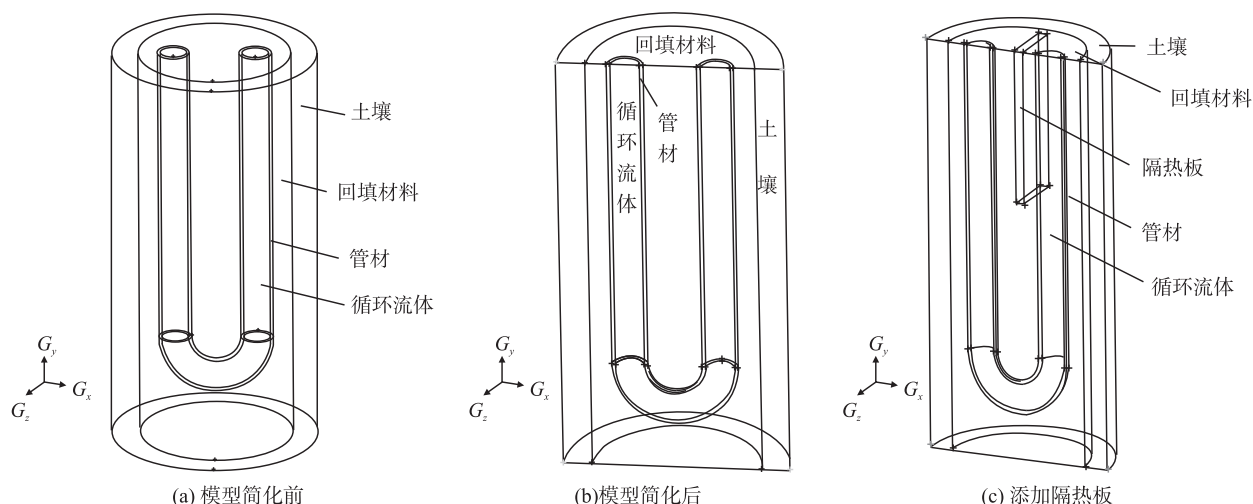


图1 模型示意

Fig.1 Model schematic

## 2.4 网格划分与边界设定

### 2.4.1 网格划分

采用 Gambit 直接建立地理管换热器的模型,并进行网格划分和边界设定.网格划分很重要,直接影响到模型建立的准确性以及运算的效率.

网格的划分主要包括结构化网格和非结构化网格.结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元.结构化网格有很多的优点:网格生成的速度快;网格生成的质量好;数据结构简单;区域光滑,与实际模型更容易接近.结构化网格的生成技术主要有代数网格生成法、主要应用参数化和插值的方法,对处理简单的求解区域十分有效.同结构化网格的定义相对应,非结构化网格是指网格区域的内部点不具有相同的毗邻单元.对于非结构化网格来说,每个点周围的数目是不同的.非结构化网格主要是处理一些不规则的几何体,采用非结构化网格划分时,网格数量多,生成网格速度较慢,如果设置不当,网格质量会很差,不利于计算的收敛,进而影响模拟的结果.

网格的划分主要包括进水管的划分、管壁的划分、回填材料的划分、土壤的划分和隔热板的划分.为了考虑到与实际工程相接近,比如对弯管段网格划分时,由于弯管段流体变换剧烈,需要对其进行加密处理,同理也要对弯管段的回填土进行加密处理.网格划分的效果图截取了几个代表性的部分,如图2所示.

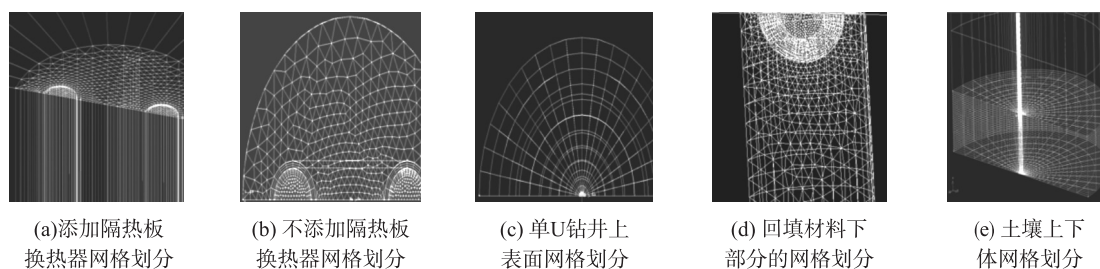


图2 网格划分

Fig.2 Mesh divisions

地理管换热器模型是按照实际工程尺寸建立的,是一个时间尺度长、空间跨度的复杂的三维导热模型.如果对模型网格划分太细,网格数量巨大,将对计算机的软硬件要求较高,所以在网格划分时,仅对变化剧烈的区域进行加密处理,其余网格尺寸选择适中以减少计算量.由于单U型地理管直管段、土壤和回填材料是规则的圆柱体,可采用结构化网格划分.对于U型管的弯管部分以及相邻回填材料的区域是不规则的,因而采用非结构化网格划分.

为了更好的模拟管内湍流流动,要考虑到边界层对管内循环流体在近壁面流动的影响,进而添加边界层的划分,使模拟更加准确.进口面和出口面采用三角形非结构化划分,进水管直管段和出水管直管段采用 Cooper 方法对其划分.由于直管段的直径和长度相差很明显,而且循环流体在直管段的温度和流动



状态变化不是很大,所以网格选择 1 m 作为间隔.弯管段尺寸很小,但是流体在此变化剧烈,将弯管段等分为 30 份进行加密处理,体网格划分仍采用 Cooper 方法.

考虑到回填材料越接近 U 型管,其温度变化越剧烈,因此对于回填材料进行 1.2 的倍率加密处理.回填材料的面网格采用三角形非结构化划分,体网格划分和 U 型管直管段相同,故不累述.回填材料的下部分,是不规则的体,故采用 T-grid 方法对体网格划分,竖直方向间隔为 25 mm.由于土壤的影响直径相对于钻井尺寸很大,钻井内部的换热对于土壤影响较慢,所以对土壤也进行 1.2 的倍率加密处理,水平面采用四边形结构化划分,体网格仍采用 Cooper 方法,上部分土壤体网格划分间距为 1 m,下部分为 25 mm.

#### 2.4.2 边界设定

Fluent 软件进行模拟计算,我们在开始设置计算前需要对导入的 Gambit 生成的文件进行网格检查,如果网格检查无误方可才能进行模拟计算.由于地埋管换热器的直径与其长度尺寸相差很大,模型属于细长型,因而采用三维双精度(3 ddp)求解.地埋管换热的研究是三维非稳态传热问题,因而选用非稳态(unsteady)计算模式,也需激活能量方程.对于管内流体流动模型的选择,选用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型,管内近壁面的修正采用壁面函数法.

在完成网格划分之后还要进行边界层的定义,主要包括边界类型和体类型的定义.模型中一共有循环流体、U 型管、回填料、隔热板和土壤五个体.循环流体名称设置为“FLUID”,U 型管、回填材料、隔热板和土壤设置为“SOLID”.

模型中主要定义流体进出口面,埋管壁面,钻井和土壤的上下表面,钻井与埋管的相交面,钻井与土壤的相交面,土壤的侧面,隔热板与回填材料的相交面.流体进口边界定义为速度入口,即 VELOCITY INLET;出口边界由于条件不确定,直接设为 OUTFLOW;模型的轴对称面定义为 SYMMETRY,其余前面提及的面都定义为 WALL.

#### 2.5 边界条件

该模型模拟了连续运行 10 天的夏季制冷工况,模型的进口温度设定为 308 K,流速为 0.8 m/s,分别模拟了不添加隔热板和添加了 60 m 隔热板的地埋管化换热模型.模型中土壤最外侧、土壤下侧,回填材料下侧定义为恒温 290 K 的壁面.钻进和土壤上表面考虑到空气的对流换热的影响,所以夏季对流换热系数为 2.005 W/(m $\cdot$ K).循环流体、管材、回填材料、隔热板及土壤分别取下表的物性参数即可.

表 1 物性参数

Table 1 Physical parameters

模型	材料	密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	比热 $C_p$ /(J/kg $\cdot$ K)	导热系数 $\lambda$ /(W/(m $\cdot$ K))
循环流体	水	998.2	4 182	0.600
U 型管	HDPE	1 860.0	840	0.440
回填材料	回填土	1 989.0	820	2.700
单 U 土壤	土壤	2 082.0	837	2.500
隔热板	聚氨酯	350.0	800	0.025

### 3 研究结果及分析

在连续运行 10 天的工况下,分别模拟了不添加隔热板和添加了 60 m 隔热板的地埋管换热两种工况,得出了有、无隔热板是地埋管换热器内的 XZ 面温度云图,并通过绘制出口温度的监测图,对比分析了有、无添加隔热板对地埋管换热器性能的影响.

#### 3.1 有、无隔热板地埋管温度云图

计算地埋管换热器管内循环流体和回填材料以及土壤进行热交换的温度场时,通常采用非耦合隐式求解方法求解,将产生大量的数据,对这些数据进行可视化显示是十分必要的.彩色云图即温度云图通过颜色的变化反应数据的变化,具有至关、美观的特点,是一种重要的可视化工具.

通过 FLUENT 软件模拟了有、无添加隔热板连续 10 天运行的工况,并且截取了距离地表面 20 m、60 m 和 100 m 的 XZ 面截面温度云图(图中左边为进水管,右边为出水管或回水管).

##### 3.1.1 无隔热板地埋管温度云图

图 3 给出了不添加隔热板地埋管换热器钻孔内模型的 20 m 深处、60 m 深处和 100 m 深处的 XZ 面

温度云图.从图中可以明显的看出:进水管的温度随着埋管深度的增加而变小;出水管越接近地表,出水温度越低;随着埋管深度的增加,进水管和回水管水温温差逐渐降低,在100 m深处两支管间温差最小,温度云图基本对称热短路现象比较轻缓;在20 m深处,进出口温差最大,热量回流明显,也就是热短路现象最严重的.进出水管在不添加隔热板的情况下,不同埋管深度的温差大概为:20 m深处温差为3.37℃,60 m深处为2.26℃,100米深处为1.05℃.

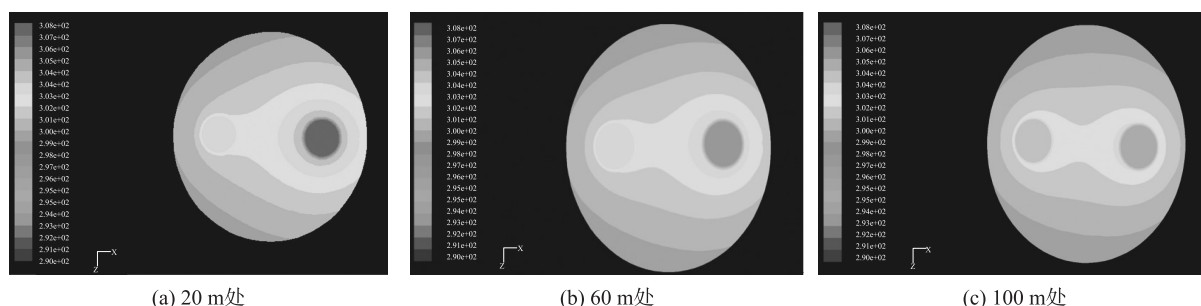


图3 XZ面温度云图

Fig.3 XZ plane temperature images

### 3.1.2 添加隔热板地埋管温度云图

图4给出了添加隔热板地埋管换热器钻孔内模型的20 m深处、60 m深处和100 m深处的XZ面温度云图.在20 m深处,进出水管之间的温差最大,由于在两支管间添加个导热系数较小的隔热板,有效的抑制了热短路现象,但是支管间的热短路仍然存在.这说明了添加隔热板能有效的阻隔温差很大的两个支管间的热量回流,即减少了热短路的损失,但是并不能完全消除热短路损失.进出水管在添加隔热板的情况下,不同埋管深度的温差大概为:20 m深处温差为3.65℃,60 m深处为2.47℃,100 m深处为1.12℃.

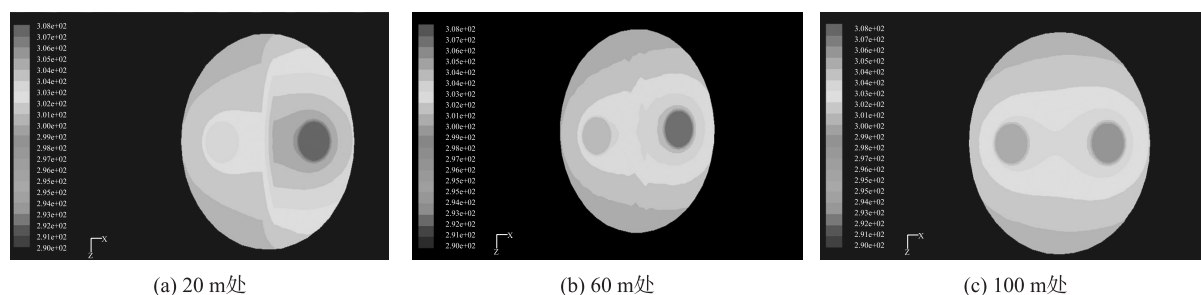


图4 XZ面温度云图

Fig.4 XZ plane temperature images

### 3.1.3 小结

XZ面的截面温度云图证明了在钻井中确实存在着热短路现象,而且月接近近地表面处,热短路现象越严重.隔热板把钻井分成两个独立的部分,隔热板两侧的支管几乎不受热短路的影响,便可以有效的抑制热短路现象,但如短路损失仍然存在.

## 3.2 有、无隔热板地埋管出口温度的监测图

对地埋管的出口温度进行实时监测,对研究地埋管的换热性能研究有着重要的意义.对地埋管的性能的衡量指标主要有换热器效能、热短路损失系数和单位井深换热量,其中换热器效率 and 单位井深换热量运用较多.

模拟主要是通过出口温度的监测图得到稳定时的出口温度,求出进出口温差,进而求出单口井的换热量以及单位井深换热量,然后对有、无添加隔热板的两种工况进行对比分析.

由实验可知,不添加隔热板工况下,当系统运行稳定时,出口温度稳定在304.30 K,进出口温差为3.70℃,计算可得换热器的总换热量为6555.63 W,单位井深换热量为54.63 W/m.添加隔热板工况下,当系统运行稳定时,出口温度稳定在304.06 K,进出口温差为3.94℃,计算可得换热器的总换热量为6983.52 W,单位井深换热量58.20 W/m.添加隔热板可以使U型地埋管换热器的单位井深换热量提高6.13%,提高了换热器的换热性能.

### 3.3 有、无隔热板地埋管近地表温度云图

图 5 给出了有、无隔热板的地表层的温度分布曲线云图(热短路现象主要发生在钻井内部,故只显示了钻进内部的温度云图)。其中图 5(a)表示了不添加隔热板时的温度曲线云图,图 5(b)可以清晰的看到隔热板的位置。在相同的进口条件下,进口温度和速度都相同,在 U 型管两个直管间添加隔热板能够得到更低的出水温度。

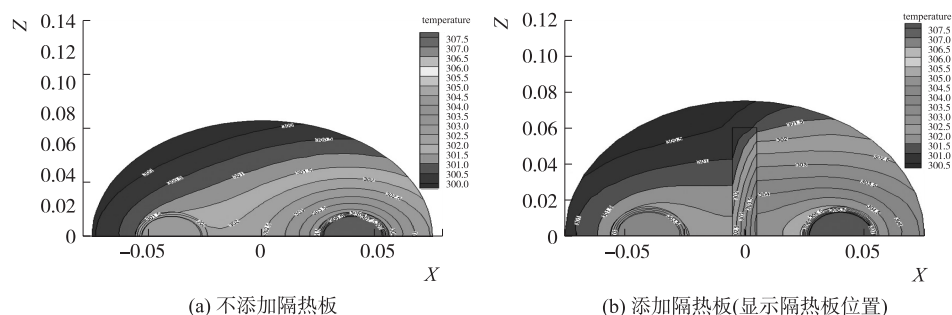


图 5 有、无隔热板时地表层的温度分布曲线云图

Fig.5 With And without heat insulation board surface temperature distribution curves of images

在实际工程中,在钻井内添加回填材料后会使用 U 型地埋管两个直管间距变小,添加了隔热板不仅可以增加两支管间的传热热阻,阻止两支管间的热量回填,还可以将两支管分开,对于抑制热短路现象起到了良好的作用<sup>[6]</sup>。但以现在的回填工艺水平而言,在钻井内添加隔热板比较困难,在实际工程中还会遇到其他的问题,这些存在的问题还需要在后续工作中进行进一步研究。

## 4 结论

通过采用相关 CFD 软件,建立起 U 型地埋管换热器三维传热模型,分别模拟了有、无添加隔热板时的工况。通过数值模拟,得到以下的结论:

(1)添加隔热板增加了两支管间的传热热阻,减少了两支管间得热量回流,即有效的抑制了地埋管换热器的热短路现象。

(2)在 U 型地埋管两支管间添加隔热板,可以使换热器的换热性能有所提高,在夏季制冷工况下,近出口温差可达 3.94 °C,使单位井深换热量可以提高 6.13%。

### [参考文献](References)

- [1] 杨卫国,王京. 地源热泵系统热短路分析[J]. 建筑节能,2008,36(2):12-14.  
YANG W G, WANG J. Thermal circuit analysis of ground source heat pump system[J]. Building energy-saving, 2008, 36(2): 12-14. (in Chinese)
- [2] 姚奇志,刘秋新,石文,等. 地源热泵地埋管热短路问题的研究[J]. 制冷与空调(四川),2012(6):536-540.  
YAO Q Z, LIU Q X, SHI W, et al. Ground heat exchanger of ground source heat pump heat short-circuit problem[J]. Refrigeration and air conditioning(Sichuan), 2012(6): 536-540. (in Chinese)
- [3] 吴金星,郭桂宏,李俊超,等. U 型埋管换热器管间热短路性能数值分析[J]. 制冷与空调(四川),2014,(1):16-21.  
WU J X, GUO G H, LI J C, et al. U-type buried tube heat exchanger tube numerical analysis of short-circuit characteristics[J]. Refrigeration and air conditioning(Sichuan), 2014(1):16-21. (in Chinese)
- [4] CENK Y, JEFFREY D S. Field validation of a short time step model for vertical ground-loop heat exchangers/Discussion[J]. Atlanta: a SHRAE transactions, 2001(9):617.
- [5] 杨正武,秦萍,刘宇,等. U 型地埋管换热器热短路特性研究[J]. 制冷与空调(四川),2009,23(3):59-63.  
YANG Z W, QING P, LIU Y. U-tube buried tube heat exchanger heat short-circuit characteristics[J]. Refrigeration and air conditioning(Sichuan), 2009, 23(3):59-63. (in Chinese)
- [6] 沈国民,张虹. 竖直 U 型埋管地热换热器热短路现象的影响参数分析[J]. 太阳能学报,2007,28(6):604-607.  
SHEN G M, ZHANG H. Vertical U-tube geothermal heat exchangers heat effect of a short circuit parameter analysis[J]. Journal of solar energy, 2007, 28(6):604-607. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]