Vol. 27 ,No. 6 Nov. 2012

文章编号: 1001 - 2060(2012) 06 - 0715 - 06

竖直 U 型地埋管换热器热短路抑制措施的分析

廖 全,周 超,崔文智

(重庆大学 动力工程学院 /低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室 /重庆 400030)

摘 要:建立了单U型地埋管换热器三维瞬态数值分析模型,对抑制地埋管换热器"热短路"的各种措施进行了数值 模拟。在不同载流体流速和回填料导热系数条件下,分别对 隔热板式、保温套式地埋管换热器和未采取任何"热短路" 抑制措施的普通地埋管换热器整体传热性能进行了研究,获 得了不同"热短路"抑制措施对埋管换热器整体传热性能的 影响规律;通过对影响埋管换热器整体传热性能"热短路" 抑制措施的对比分析,并结合地埋管换热器实际工程运行环 境,提出在工程实践中不必针对埋管换热器的"热短路"现 象采取任何额外的抑制措施的建议。

关键 词: 地埋管换热器; 热短路; 数值模拟

中图分类号: TK523; 0242 文献标识码: A

引 言

地源热泵是以大地中浅层土壤或岩石等低品位 能源作为热源(或冷源)的一种空气调节系统,它是 一种典型的清洁可再生能源利用系统^[1~5]。在地源 热泵系统中,地埋管换热器是实现载流体与土壤间 进行热量交换的关键传热器件。单U型地埋管换 热器以其结构简单、布置形式灵活等优点,在工程实 践中得到大量应用。然而,受到钻孔成本的制约,地 埋管换热器的钻孔孔径一般较小(约为110~150 mm),导致地埋管换热器下降管与上升管间的距离 非常有限,使得两管内的载流体可以通过埋管间回 填料直接进行热量交换,发生所谓的"热短路" 现象^[6~7]。

为了抑制或减缓"热短路"现象的发生,有学者 提出对距地表一定深度范围内的上升管外添加一定 厚度的绝热保温套^[8-12],或在距地表一定深度范围 内的下降管与上升管间布置适当厚度的隔热板,从 而增大下降管与上升管间直接传热的热阻来抑制 "热短路",促进载流体与土壤间的传热。

虽然上述各种地埋管换热器"热短路"抑制措

施在理论上会影响换热器的整体传热性能,但其对 传热性能究竟有多大影响,是否有必要在工程实践 中应用,目前还未见相关报道。鉴于此,本研究提出 采用 Fluent 软件,对单U型地埋管换热器进行三维 瞬态数值模拟,在不同载流体流速和回填料导热系 数条件下,对不同"热短路"抑制措施进行研究,分 析其对地埋管换热器传热性能的影响,为地埋管换 热器的设计和实际工程运行提供理论指导依据。

1 模型建立

在图1给出了典型单U型地埋管换热器结构。 载流体通过下降管进入埋管换热器,在其内通过回 填料实现与土壤间的热量交换,最后经过上升管出 口流出地埋管换热器,完成地埋管换热器的整个传 热过程。

在不考虑地下水渗流,并且地埋管换热器中土 壤、埋管和回填料等均为各向同性常物性材料时,载 流体在埋管换热器管内的流动与换热,以及钻孔内 回填料与管壁和土壤间的非稳态导热过程,其控制 微分方程均可以写成如下通用形式^[13-14]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U\varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \cdot \operatorname{grad}\varphi) + S_{\varphi}$$
(1)

式中: φ —速度和温度; Γ —速度和温度的通用扩散 系数; S_{ϕ} —源项。

为了定量地求解上述数学模型,其定解的初始 条件和边界条件需给定如下:

(1) 当 *t* = 0 时 ,土壤、回填料、埋管和载流体的温度均等于原始地温;

- (2) 埋管换热器下降管入口为给定流速边界;
- (3) 埋管换热器上升管出口为自由出流边界;
- (4) 分析模型的底部和四周均为绝热边界;

收稿日期:2012-02-13; 修订日期:2012-03-28 作者简介:廖 全(1977-) 男 重庆人 重庆大学副教授 博士.

(5) 分析模型的顶部为第三类边界条件。



图 1 单 U 型地理管换热器结构示意图 Fig. 1 Schematic drawing of the structure of a single U-shaped embedded tube heat exchanger

2 热短路现象的分析

以地埋管换热器工作于制冷工况为例(其制热 工况时类似) 在任一平行于地表的水平截面上,埋 管内载流体与回填料及土壤间的传热过程如图2所 示。一方面,下降管和上升管内的载流体可以通过 埋管周围的回填料实现与土壤间的热量交换,完成 埋管换热器的基本传热功能;另一方面,下降管内高 温的载流体还可以通过埋管间的回填料与上升管内 低温的载流体进行热量交换,使其温度升高,不利于 埋管内载流体与土壤间的传热,导致埋管换热器整 体传热性能下降。



图 2 制冷工况时地埋管换热器 热短路现象示意图 Fig. 2 Schematic diagram of the thermal shortcut phenomenon of the embedded tube

heat exchanger when

正是由于下降管和上升管内的载流体可以通过 埋管间回填料直接进行热量传递,才导致所谓的地 埋管换热器"热短路"现象。从单U型地埋管换热 器的特殊布置结构如图1所示,"热短路"现象不可 能完全杜绝,但是有可能通过一定措施来增大两管 内载流体间的传热热阻,以减少其传热量,在一定程 度上实现对"热短路"的抑制,从而改善地埋管换热 器的整体传热性能。

3 模型的验证

为了验证单 U 型地埋管换热器物理数学模型 的正确性 根据一实际单 U 型地埋管换热器的几何 结构参数如表 1 所示,和热响应测试(TRT)获得的 物性参数如表 2 所示^[15] 建立埋管换热器热响应测 试的数值分析模型,按照实际 TRT 的输入参数加热 功率随时间的变化关系来对该数学模型进行求解; 通过对比埋管换热器 TRT 实验结果和数值模拟结 果,来验证本研究物理数学模型的合理性和所采用 数值求解方法的正确性。

表1 单U型地埋管换热器几何参数^[15]

Tab. 1 Geometric parameters of the single U-shaped

embedded tube heat exchanger

$L_{\rm pipe}/{\rm m}$	$L_{\rm soil}/{\rm m}$	$D_{\rm b}$ / mm	$D_{\rm p}$ / mm	δ/mm	S/mm
95.0	100.0	130.0	32.0	3.0	64.0

由于单U型地埋管换热器具有对称的几何结构,其数值分析模型只需沿对称面建立实体模型的 一半。数值模型中土壤水平截面求解域为半径3.5 m的半圆,模型沿竖直方向深度为100m。为了考虑边界条件对TRT数值模拟结果的影响,数值分析 模型的顶面设定为第三类边界,其平均对流换热系

数按大空间冷面朝上的自然对流实验关联式进行计 算^[16] 环境空气温度为 27.0℃。

廖

表2 埋管换热器热物性参数^[15~16]

Tab. 2 Thermophysical parameters of the single

U-shaped embedded tube heat exchanger

项目	密度/	比热/	导热系数/	初始温度
	kg • m $^{-3}$	J • (kg • K) ⁻¹	W \cdot (m \cdot K) $^{-1}$	/℃
土壤	1600	2250	2.55	20.17
回填料	1860	840	2.0	20.17
埋管	950	2300	0.44	20.17
载流体	998.2	4182	0.6	20.17

在图 3 中,给出了地埋管换热器钻孔内回填料 和埋管周围土壤水平截面上的网格图。



图 3 地理管换热器验证模型中网格划分 Fig. 3 Mesh division of the model for verifying the embedded tube heat exchanger

在图4中,给出了TRT 实验结果与数值模拟结 果的对比。由该图可见,数值模拟结果与实验测试 结果的吻合度非常好,从而验证了所采用的数值模 拟方法是正确性的,其结果是可靠的。



图 4 TRT 实验结果与数值模拟结果对比 Fig. 4 Contrast of the test results and the numerical simulation ones of the thermal response testing (TRT)

4 数值模拟结果及分析

为了详细地研究对上升管添加绝热保温套和在 下降管与上升管间布置隔热板等抑制"热短路"现 象的不同措施,对埋管换热器整体传热性能的影响, 根据表1和表2中地埋管换热器的几何及物性参 数,并结合表3和表4中给出的绝热保温套和隔热 板的几何及物性参数,建立地埋管换热器热短路抑 制措施可行性研究的数值分析模型。为了方便数据 处理和图表制作,在该分析模型中,埋管和土壤的深 度分别为 L_{pipe} = 100 m和 L_{soil} = 107 m。

在此基础上,分别对不采取任何措施来抑制 "热短路"现象的普通地埋管、对上升管采取绝热保 温套处理和在下降管与上升管间布置隔热板等三种 情况下的地埋管换热器进行数值模拟,对比分析在 相同进口载流体温度(35.0℃)和不同管内流速 (0.2~0.8 m/s)及回填料导热系数(1.0~3.0 W/ (m•K))条件下,地埋管换热器连续运行72 h 后, 管横截面载流体平均温度沿流动方向上的温度分 布; 然后,对这三种情况下的数值模拟结果按照式 (2)进行整理,得到埋管换热器单位延米换热量随 时间的变化曲线,即:

$$q = \frac{\rho c_{\rm p} \pi r^2 v (T_{\rm in} - T_{\rm out})}{L_{\rm pipe}}$$
(2)

式中: ρ —载流体密度,kg/m³; C_p —载流体比热,J/ (kg•K); r—管内径,m; v—载流体流速,m/s; T_{in} — 载流体在下降管进口的温度,K; T_{out} —载流体在上 升管出口的温度,K; L_{pipe} —钻孔深度,m。

表 3 绝热保温套及隔热板几何参数

Tab. 3 Geometric parameters of the adiabatic

temperature-holding sleeves and thermal insulation plates

纵向	保温套	隔热板	隔热板
深度/m	厚度/mm	厚度/mm	宽度/mm
30.0	5.0	5.0	65.0

表4 绝热保温套及隔热板物性参数^[17]

Tab. 4 Physical property parameters of the adiabatic temperature-holding sleeves

and thermal insulation plates

	密度 /kg•m ⁻³	比热/ J・(kg・K) ⁻¹	导热系数/ W・(m・K) ⁻¹	初始温度 /℃
保温套	950	2300	0.05	20.17
隔热板	950	2300	0.05	20.17

在图 5 中,分别给出了给上升管添加绝热保温 套和在下降管与上升管间布置隔热板后的钻孔内回 填料水平截面的网格示意图。





在图 6~图 8中,给出了不采取任何措施抑制 "热短路"现象的普通管、对上升管出口添加绝热保 温套和在下降管与上升管间布置隔热板后的三种地 埋管换热器,在载流体平均流速为 0.2、0.4 和 0.8 m/s,回填料导热系数分别为 1.0 和 3.0 W/(m•K) 且连续运行 72 h 后管横截面流体温度沿流向的分 布曲线。





Fig. 6 Temperature distribution of the fluid carrier in the embedded tube heat exchanger along the flow direction after a continuous operation for 72 hours ($V_{in} = 0.2 \text{ m/s}$)

从图 6~图 8 中可以看出,地埋管换热器进、出 口载流体的温差随流速的增大而迅速降低,随回填 料导热系数的增大而显著增加。由于在距地表 30 m 深度范围内,对埋管换热器分别实施了隔热板式 和保温套式"热短路"抑制措施,其载流体温度在上 升管距地表 30 m 范围内较普通埋管有明显变化。



图7 地理管换热器连续运行72h后载 流体沿流向温度分布(入口流速0.4m/s)

Fig. 7 Temperature distribution of the fluid carrier in the embedded tube heat exchanger along the flow direction after a continuous operation

for 72 hours ($V_{in} = 0.4 \text{ m/s}$)



图 8 地理管换热器连续运行 72 h 后载 流体沿流向温度分布(入口流速 0.8 m/s) Fig. 8 Temperature distribution of the fluid carrier in the embedded tube heat exchanger along the flow direction after a continuous operation for 72 hours (V_{in} = 0.8 m/s)

一方面,由于保温套的添加在增大两管内载流体传热热阻的同时也增大了上升管内载流体与周围 土壤间的热阻,从而导致保温套式埋管换热器总传 热性能较普通管有所下降,如图2所示。在相同条 件下,保温套式埋管换热器进、出口载流体温差较普 通管的要小,并且其差异随回填料导热系数的增加 而减小,如图6~图8所示;另一方面,在两管间布 置抑制"热短路"的隔热板仅仅增大了两管间的传 热热阻,对抑制"热短路"有正面影响的同时,不会 对两管与周围土壤间的传热热阻有任何影响。因 此,隔热板式埋管换热器总传热性能较普通管的要 好,其进、出口载流体温差较普通管的要大,如图 6 所示。然而,随着载流体流速的逐渐增加,隔热板对 抑制"热短路"的正面影响逐渐降低,使得隔热板式 埋管换热器整体传热性能与普通管几乎相同,其进、 出口载流体温差与普通管的没有明显差异,如图 7 ~图 8 所示。

为了定量地分析抑制"热短路"的不同措施对 地埋管换热器整体传热性能的影响,对图 6~图 8 中 3 种地埋管换热器的数值模拟结果按照式(2)进 行整理,得到埋管换热器单位延米换热量随时间的 变化关系如图 9~图 11 所示。



图 9 地理管换热器单位延米换热量随连续 运行时间的变化关系(入口流速 0.2 m/s) Fig. 9 Variation relationship between the heat exchange quantity of each unit extension meter of the embedded tube heat exchanger and its continuous operation time duration (V_{in} = 0.2 m/s)

从图中可以看出,埋管换热器单位延米换热量 随运行时间的增加而逐渐降低,最后趋近于一恒定 值。在相同条件下,换热器单位延米换热量随载流 体流速和回填料导热系数的增加而显著增大;按单 位延米换热量由大至小进行排序,这3种换热器依 次为:隔热板式、普通管和保温套式地埋管换热器。 然而,随着载流体流速的增大,隔热板式埋管换热器 单位延米换热量与普通管间的差异逐渐减少,且均 大于保温套式地埋管换热器。当流速较低时(如 0.2 m/s),埋管换热器下降管与上升管内载流体温 差较大,隔热板对抑制"热短路"效果显著,导致隔 热板式地埋管换热器单位延米换热量较普通管和保 温套式的都要高,如图9所示。然而,随着载流体流 速的增加,埋管换热器下降管与上升管内载流体的 温差变小,隔热板对抑制"热短路"效果减弱,导致 隔热板式与普通埋管换热器单位延米换热量间的差 异逐渐减少,甚至消失,如图10~图11所示,其结 论与图7~图8中的一致,即:随载流体流速的增 加,隔热板式与普通地埋管换热器的总体传热性能 相当,均大于保温套式埋管换热器。



图 10 地理管换热器单位延米换热量随连续 运行时间的变化关系(入口流速0.4 m/s) Fig. 10 Variation relationship between the heat exchange quantity of each unit extension meter of the embedded tube heat exchanger and its continuous operation time duration (V_{in} = 0.4 m/s)

102 lg=1.0 W/(m·K) 普通管 λg=1.0 W/(m·K) 隔热板 λg=1.0 W/(m·K) 保温套 86.: .п. λg=3.0 W/(m·K) 普通管 λg=3.0 W/(m·K) 隔热板 延米换热量/W 3.0 W/(m·K) 保温套 7 55 40∟ 0 18 36 54 72 时间/h

图 11 地理管换热器单位延米换热量随连续运行时间的变化关系(入口流速0.8 m/s)
Fig. 11 Variation relationship between the heat exchange quantity of each unit extension meter of the embedded tube heat exchanger and its continuous operation time duration (V_{in} = 0.8 m/s)

在地埋管换热器的实际工程应用过程中,回填

料导热系数约为1.0~3.0 W/(m·K),并且为了保证载流体在管内的流动处于旺盛紊流区,其管内流速均大于0.2 m/s,为0.4~0.8 m/s。在此范围内, 根据上述讨论结果可见:隔热板式与普通埋管换热器的整体传热性能没有显著差异,均优于保温套式地埋管换热器。因此,建议在实际工程应用过程中, 不必对地埋管换热器采取任何"热短路"的抑制措施。

5 结 论

在不考虑地下水渗流条件下,对单 U 型地埋管 换热器抑制"热短路"的不同措施进行了数值模拟, 讨论了载流体流速及回填料导热系数对换热器整体 传热性能的影响,可以得到以下结论:

(1)对地埋管换热器上升管采用绝热保温套不 仅不能有效抑制"热短路"现象,反而会恶化地埋管 换热器的整体传热性能。

(2)当埋管换热器管内载流体流速很低(如 0.2 m/s)时对下降管与上升管间布置隔热板才能 有效减缓"热短路"现象的发生。

(3) 在管内流速为 0.4~0.8 m/s,回填料导热 系数为 1.0~3.0 W/(m•K) 条件下 隔热板式和普 通地埋管换热器的整体传热性能无显著差异,建议 在工程实践中不必针对埋管换热器"热短路"现象 采取任何措施。

参考文献:

[1] 李 琼. 地源热泵及其优越性[J]. 山西建筑,2010(7):170 -171.

LI Qiong. Geothermal heat pumps and their advantages [J]. Shanxi Architecture 2010(7):170 - 171.

[2] 法智彤 褚晓丽. 浅谈土壤源热泵系统的发展及其应用 [J]. 山 西建筑 2010(3):195-196.

FA Zhi-tong ,CHU Xiao-li. Exploratory study of the development of soil source heat pump systems and their applications [J]. Shanxi Architecture 2010(3):195-196.

- [3] 袁艳平,曹晓玲,雷 波,等.中国地区土壤源热泵系统研究进展评述[J].四川建筑科学研究 2010(4):252-257.
 YUAN Yan-ping ,CAO Xiao-ling ,LEI Bo ,et al. Review of the advances in the study of soil source heat pump systems in China [J].
 Sichuan Architectural Science Research 2010(4): 252-257.
- [4] 杨 爱,刘圣春.我国地源热泵的研究现状及展望[J].制冷与

空调 2009(8):1-6.

YANG Ai ,LIU Sheng-chun. Status quo of the study of geothermal heat pumps in China and its prospects [J]. Refrigeration and Air Conditioning 2009(8):1-6.

- [5] 廉 翔. 地源热泵空调系统对地下水资源的影响及对策[J]. 华北水利水电学院学报 2004(3):41-43.
 LIAN Xiang. Influence of geothermal heat pump air conditioning systems on the underground water resources and countermeasures
 [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power 2004(3):41-43.
- [6] 陈昌富,吴晓寒,王陈栋. 地埋管地源热泵系统及存在问题分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程) 2009(10):42-48. CHEN Chang-fu,WU Xiao-han,WANG Chen-dong. Embedded tube geothermal heat pump systems and analysis of their existing problems[J]. Prospecting Engineering (Rock and Soil Drilling & Excavation Engineering) 2009(10): 42-48.
- [7] 肖 婷. 地源热泵土壤源换热器热短路问题的研究[D]. 武 汉: 华中科技大学 2008.
 XIAO Ting. Study of the thermal shortcut problem of geothermal heat pump-based soil source heat exchangers [D]. Wuhan: Central China University of Science and Technology 2008.
- [8] Thermally exposed centrally insulated geothermal heat exchange unit [R]. United States Patent ,Patent No.: US 6789608 B1, 2004.
- [9] Geothermal heat exchange unit [R]. United States Patent ,Patent No.: 5816314 ,1998.
- [10] Advanced in ground/in water heat exchange unit [R]. United States Patent Patent No.: 5623986 ,1997.
- [11] Underground heat exchanging apparatus [R]. United States Patent ,Patent No.: 4741388 ,1988.
- [12] Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: validation and sensitivity analysis [J]. Int J of Energy Res ,1998 22:965 - 979.
- [13] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社 2001. TAO Wen-quan. Numerical heat transfer [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press 2001.
- [14] Suhas V Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. Carifornia: Hemisphere Pub Corp ,1980.
- [15] Wenzhi Cui ,Quan Liao. In-situ thermal response test for ground source heat pump application [C]//Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011 ,Denver ,Colorado 2011.
- [16] 杨世铭. 传热学[M]. 高等教育出版社,1987.YANG Shi-ming. Heat Transfer[M]. Higher Education Press, 1987.
- [17] 地源热泵系统工程技术规范 GB50366-2005 [S]. Technical specification for geothermal heat pump system projects, GB50366-2005 [S].

(陈 滨 编辑)

tem. Within each control periods the error index was based to first determine whether or not it is necessary for the network to learn. If it is not necessary to learn the PID parameters of the last control period can be used directly for control. The simulation test results obtained by using the model for main steam temperatures of thermal power plants show that the improved neural network PID control system is obviously superior to the traditional one in terms of both dynamic performance and static one. Furthermore the training frequency of the network decreased from 7000 times before the improvement to 1732 times Jowering by more than 70%. In addition the robustness of the improved control system has not yet been affected. **Key words**: neural network PID (Proportional Integral and Differential), learning weight value main steam temperature

竖直 U 型地埋管换热器热短路抑制措施的分析 = Analysis of the Measures to Prevent the Thermal Shortcut of a Vertical U-shaped Embedded Tube Heat Exchanger [刊 汉]/LIAO Quan ZHOU Chao ,CUI Wen-zhi (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems ,College of Power Engineering ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(6). -715~720

Established was a three-dimensional transient numerical model for analyzing a single U-shaped embedded tube heat exchanger and numerically simulated were various measures to prevent the "thermal short-cut" of the embedded tube heat exchanger. Under various flow carrier speeds and heat conductivity coefficients of the backfill material the overall heat transfer performance of a heat isolation plate type and a heat isolation sleeve type embedded tube heat exchanger as well as a common embedded tube heat exchanger for which no measures was taken to prevent any thermal short-cut were studied respectively. The law governing the influence of different "thermal short-cut" prevention measures on the overall heat transfer performance of the embedded tube heat exchangers was obtained. Through a contrast analysis and comparison of the "thermal short-cut" prevention measures ,which influence the overall heat transfer performance of the embedded tube heat exchangers, and in combination with the operating environment of actual embedded tube heat exchanger projects the authors proposed that in practical engineering projects *i*t is not necessary to take any additional measures to prevent any thermal short-cuts of embedded tube heat exchangers. **Key words**: embedded tube heat exchanger thermal short-cut numerical simulation

基于递归模糊神经网络的 PEMFC 温度控制研究 = Study of the Temperature Control of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Based on a Regressive Fuzzy Neural Network [刊,汉]/LI Chun-hua (Col-