

夏季间歇运行工况下相变温度对相变回填地埋管 换热器传热性能的影响

王 畅, 曹晓玲, 袁艳平, 余南阳, 赵 娟

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

摘 要: 为探究相变温度对相变材料回填地埋管换热器传热性能的影响,建立管内流体换热、回填区域相变换热及土壤换热的三维耦合传热数值模型,利用焓-多孔介质模型对相变区域相变问题进行处理,研究夏季间歇运行工况下不同相变温度回填材料对埋管换热器传热性能的影响。结果表明:添加PCM,可有效提高换热量,短期内缓解埋管周围热积聚,利用相变温度 18 ℃的 PCM 回填,单位井深换热量至少比普通材料回填提高 49.54%;在间歇运行初期,换热量随相变温度的升高逐渐减小,低相变温度的 PCM 可明显改善埋管换热量,但随着时间的进行,较高相变温度 PCM 回填对换热器换热量的改善效果优于前期低相变温度。此外,在运行期间,不同相变温度的 PCM 表现出不同的熔化、凝固特性,当 PCM 的熔化、凝固过程交替进行时,可减缓土壤温度在运行期间内波动幅度。

关键词: 地埋管换热器; 相变; 相变温度; 熔化传热; 数值模拟

中图分类号: TU83

文献标志码: A

0 引 言

近年来,地热能作为新兴清洁能源被广泛应用于地热发电及供暖领域,其中地源热泵以其环保性得到推广。地埋管换热器是地源热泵技术的重要应用基础,其传热特性直接影响地源热泵的效率。在传热过程中,土壤温度随着机组运行持续升高或降低,地埋管换热器的蓄能性能衰减。因此,通过改变其换热性能以降低对周围土壤温度的影响程度,是地源热泵长期稳定高效运行的关键^[1]。由于土壤热物性参数不易改变,而回填材料介于地埋管换热器与土壤之间,是流体与周围土壤的传热介质,因此,回填材料对保证埋管换热器换热性能有重要意义。近年来,有学者提出采用合适的相变材料(phase change material, PCM)作为钻孔回填物的一部分来提高地埋管换热器的传热效率^[1],鉴于相变材料在发生相变过程中吸收或释放巨大潜热而自身温度近乎不变等特点,可利用相变材料回填改善换热器与土壤换热,缓解短期内地源热泵系统对土壤温度的影响区域,有利于系统的稳定运行,提高系统节能潜力。

Lenarduzzi 等^[2]研究表明,选用合适的回填材料不仅可提高换热器换热能力,而且可防止地埋管因温度过低产生变形而导致工质溢出。Rabin 等^[3]从理论上分析相变材料在地热能储存系统中应用的可行性,结果表明:在保证有同样导热性的前提下,加入相变材料可显著提高地下热能储存系统的储热性能。吴越超^[4]通过试验测试,结合理论分析,得出相变材料回填的地源热泵可以显著提高地源热泵的单井出热量。Benli 等^[5]搭建温室用地源热泵+相变储能试验装置,并对系统进行试验测试,结果表明:地源热泵及系统 COP 分别为 2.3~3.8 与 2.0~3.5。李启宇^[6]模拟分析相变回填和普通回填两者的传热特性,结果显示,相变回填材料可有效减少热短路作用。刘静侃^[7]通过建立数值模型结合相变回填 U 型埋管换热器传热研究试验台进行研究分析,结果表明:定型相变材料回填较之普通材料回填单位井深换热量提高 15.01%~49.53%。杨卫波等^[1]建立传热数学模型,利用显热容法对相变材料的相变问题进行处理,研究表明同样条件下夏季工况采用低相变温度、冬季采用高相变温度的相变材料可明显改善其换热效

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 建筑环境与能源高效利用四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0015); 四川省科技支撑计划(2016GZ0320)

通信作者: 曹晓玲(1984—), 女, 博士、高级工程师, 主要从事相变储能与能源高效利用、可再生能源建筑与地下空间热湿环境控制方面的研究。xlcao@home.swjtu.edu.cn

果。Bottarelli 等^[8]利用等效热容法分析水平埋管换热器回填材料中添加相变材料的传热性能,结果表明:相变材料可减轻土壤温度波动幅度。雷海燕^[9]基于套管式换热器模拟系统的理论分析,探究钻孔相变回填后融化时间与恢复时间及热影响半径,结果表明,采用相变回填材料可有效减小埋管吸放热时的热影响半径,减小埋管间距。目前,关于地埋管换热器间歇运行模式的研究已有较多文献报道,文献[10-11]研究间歇运行模式对地埋管换热能力及土壤温度场恢复的影响,表明间歇运行可加快土壤热扩散,是系统优化的重要因素。

然而,上述研究主要集中于添加相变材料后对埋管换热器传热性能的影响,并未讨论不同相变温度回填材料在间歇运行模式下对埋管换热器换热性能的影响。为此,本文采用数值模拟的方法,结合单位井深换热量、平均储热速率以及相变区域的温度分布探究夏季间歇运行工况下相变温度对传热的影响,为改善地埋管换热器传热特性提供参考。

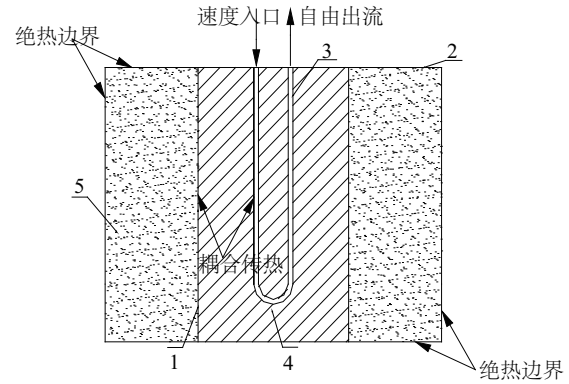
1 模型描述

1.1 物理模型及模型假设

由于垂直 U 型埋管换热器几何形状的特殊性,及带有相变材料的多孔土壤传热的复杂性,使得埋管与周围土壤之间的传热是一个复杂的三维非稳态问题,以现有技术,建立精确的实际模型并求解,几乎不能完成。为简化其蓄能传热模型,做如下假设:

- 1) 土壤及回填用相变材料是均匀的、各向同性介质,在传热过程中,土壤的热物性参数均一不变;
- 2) 不考虑水分迁移对热量传递的影响;
- 3) 忽略单 U 型管管壁与回填材料、回填材料与土壤之间的接触热阻;
- 4) 管内同一截面的流体温度、速度相同;
- 5) 钻井间距足够大,忽略钻井之间传热影响;
- 6) 采用 Boussinesq 假设,即材料各相物性视为常数,仅考虑浮升力影响时才计及流体密度的变化。

基于上述假设,本文建立管内流体换热、相变回填材料换热与土壤换热的耦合模型,为下一步全面分析地埋管换热器管外温度场模拟,建立合理的简化传热模型,进行相关的地埋管换热器传热研究奠定基础。建立的埋管换热器物理模型如图 1 所示,图中埋管换热器竖直接管段长度为 30 m,钻井半径为 0.11 m,埋管两支管间中心距为 0.08 m,土壤半径为 4 m,换热器竖直接段底部距离土壤底部为 0.5 m。



1. 钻孔壁 2. 土壤表面 3. 埋管外壁 4. 回填材料 5. 土壤

图1 埋管换热器物理模型

Fig. 1 Physical model of ground heat exchanger

1.2 数学模型

计算采用焓-多孔介质模型,其主要思路是将热焓和温度作为待求函数,在整个区域(包括液相、固相和两相界面)建立一个统一的能量方程,利用数值方法求出热焓分布,然后确定两相界面。

焓-多孔介质模型的控制方程可表示为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_i \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_i) - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_e \quad (3)$$

式中, \vec{v} ——相变材料液相速度, m/s; v_i —— i 方向速度分量, m/s; ρ ——相变材料密度, kg/m³; g ——重力加速度, m/s²; H ——相变材料的焓值, kJ/kg; μ ——液相粘度, Pa·s; S_i ——动量方程源项; S_e ——能量方程源项。

H 可表示为显热焓 h 和潜热焓 ΔH 的和,其表达式为:

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

式中, h_{ref} ——参考焓值, kJ/kg ; T_{ref} ——参考温度, K ;
 c_p ——定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; L ——相变潜热, J/kg ;
 T_s ——凝固温度, K ; T_l ——熔化温度, K 。

以上述模型为基础, 利用商用软件 Fluent 6.3 进行模拟求解, 其管内流体的连续性方程、动量方程、能量方程及周围土壤换热方程详见文献[12]。

1.3 网格划分及求解方法

利用 Fluent 进行网格划分时数值模型几何形状见图 2。由于埋管换热器传热的对称性, 在建模时, 将几何模型沿中心线切开, 取其一半进行计算。进行网格划分时, 由于 U 型埋管结构较为复杂, 为实现不同区域不同网格类型的划分, 将模拟区域分为管内流体区、管壁、回填区域及土壤等部分。埋管模型的网格由结构化网格和非结构化网格混合组成, 由于管内流体处于紊流状态, 为准确模拟流动, 在贴近管内壁面的流体区域采用边界层进行网格划分, 管壁为六面体结构化网格, 钻孔内的回填区域采用三棱柱网格划分, U 型管附近进行加密处理, 周围土壤采用六面体网格划分, 钻孔壁附近同样加密处理。由于网格密度较密, 在此不再给出网格划分示意图。网格独立解通过试算获得, 经多次试验, 最终选用模型的网格数量为 1360918。

基于上述假设, 管内流体选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型作为计算模型, 能量及动量方程均采用二阶迎风格式进行离散, 采用 PRESTO 进行压力校正, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。

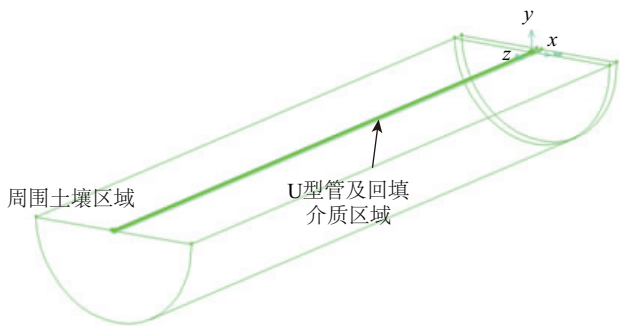


图2 模型的几何模型示意图
Fig. 2 Geometric model of model

1.4 初始条件及边界条件

针对埋管换热器换热问题, 取图 1 为计算区域, 边界条件及初始条件设置如下:

1) 进出口边界条件: 在研究换热器传热性能时, 假定进口温度为恒定温度 T_{in} (305 K)。U 型管入口为速

度入口边界条件, 入口流速为 0.2 m/s , 出口为自由出流。

2) 壁面条件: 土壤远边界及土壤与空气接触表面被定义为绝热边界。其余接触壁面为耦合传热壁面。

3) 初始条件: 初始时刻, 认为管壁、回填材料、土壤温度一致, 均为初始温度 T_0 (290.15 K)。

1.5 物性参数

回填材料按照相变材料处理。且对于不同相变材料, 仅考虑相变温度 (T_m) 的差异 (取值范围为 $18\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$), 其他物性参数相同, 具体物性参数见表 1, 计算条件见表 2。

表1 PCM热物性参数
Table 1 Thermophysical properties of PCM

物性参数	PCM取值
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	885.8
比热容/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	1200
导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	2.2
热膨胀系数/ $10^{-4}/\text{K}^{-1}$	9.84
熔化潜热/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	140

表2 计算参数
Table 2 Thermophysical properties

项目	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
流体	998.2	4182	0.6
埋管	950	2300	0.45
普通回填材料	885.8	1200	2.2
土壤	1600	1645	1.8

2 数值模拟结果分析与讨论

本文模拟工况为夏季放热工况, 讨论 PCM 在间歇运行工况下熔化、凝固对换热器换热量的影响。为直观观测回填区域及土壤区域的温度分布, 选取 $H=15\text{ m}$ 平面的 7 个测点作为分析测点, 其分布示意图如图 3 所示, 测点位置如表 3 所示。

2.1 相变回填与普通回填对埋管换热器传热性能的影响

埋管换热器运行模式为: 运行 12 h 后停机 12 h 。为探究相变回填与普通回填对埋管换热器传热性能的影响, 选取 $T_m=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 进行回填, 并与普通

回填进行对比分析。

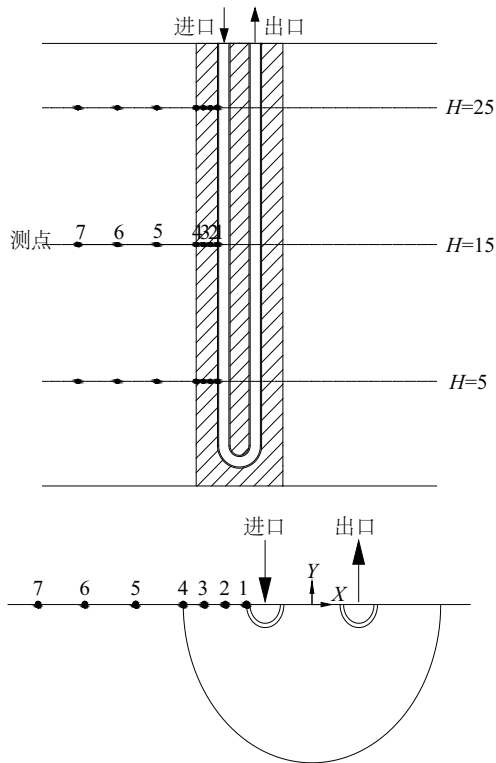


图3 测点分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of points distribution

表3 $H=15$ 平面测点距钻孔中心距

Table 3 Points of $H=15$ at distance from drilling center

测点 标号	距钻孔 中心距/m	测点 标号	距钻孔 中心距/m
1	0.056	5	0.210
2	0.074	6	0.310
3	0.092	7	0.410
4	0.110	—	—

注:测点1为外管壁;测点4为钻孔壁。

本文以单位井深换热量作为评价埋管换热器换热性能的指标,图4所示为普通回填与 $T_m=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的PCM回填工况下换热量随时间的变化情况。从图4中可看出,添加相变材料可显著提高埋管换热器储热性能,改善埋管换热器换热效果。由图4可知,单位井深换热量随运行时间的延续而逐渐衰减,衰减趋势有所减缓。运行初期,流体进出口温差较大,单位井深换热量高,随着时间的增加,流体进出口温差逐渐减小,换热量逐渐降低。由于在运行期间,流体将热量不断传递给PCM,回填区域的PCM温度逐渐升高,达到 T_m 后,

PCM熔化,储存潜热,换热量增加,可强化埋管换热器换热效果。进一步分析可得,利用普通材料回填时,经过12h运行,单位井深换热量从 41.08 W/m 下降至 30.66 W/m ;而对于 $T_m=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的PCM回填,单位井深换热量从 68.89 W/m 下降至 45.85 W/m 。因而,利用相变温度 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的PCM回填,单位井深换热量至少比普通材料回填提高 49.54% 。因此,相变回填可有效改善埋管蓄能特性。

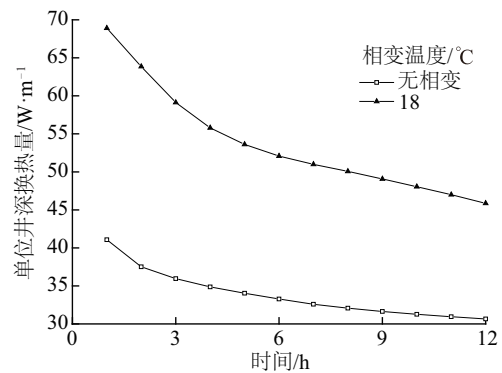


图4 添加PCM后对单位井深换热量的影响

Fig. 4 Effects of phase change on heat exchange quantity of per well depth

图5分别展示普通回填与 $T_m=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的PCM回填工况下测点温度随时间变化情况。从图6中可看出,换热器运行时期,随着取热过程的进行,距钻孔中心不同距离的测点温度均呈现不同程度的升高趋势。对于普通回填,随着时间的推移,回填区域温度随时间的变化率逐渐减小。这是由于流体与回填区域之间温差减小,换热量逐渐降低,流入回填材料的净热流量减小,导致温升速率减缓。而对于PCM回填,测点温度变化趋势总体上与普通回填较为相似,但某些时刻出现转折点。这是因为管内流体不断向PCM传递热量,回填区域温度逐渐升高,当回填区域测点温度升至 T_m 时,PCM吸热熔化的潜热,储存大量潜热,而PCM相变结束时刻,蓄热方式由潜热蓄热转变为显热蓄热,导致短时间内测点温升速率增大。在停机期间,由于运行结束时刻,回填区域及土壤沿径向存在温度梯度,在温度梯度的作用下,热量逐渐向外扩散,回填区域温度逐渐降低。对于PCM回填,可看到回填区域PCM温度几乎同时降至相变温度以下,PCM发生凝固,形成明显的温度平台。对比图5a和图5b,可发现对于同一测点,PCM回填的温度均低于普通回填,由此说明,添加PCM可有效改善埋管周围热积聚,缓解周围土壤温度的热影响。

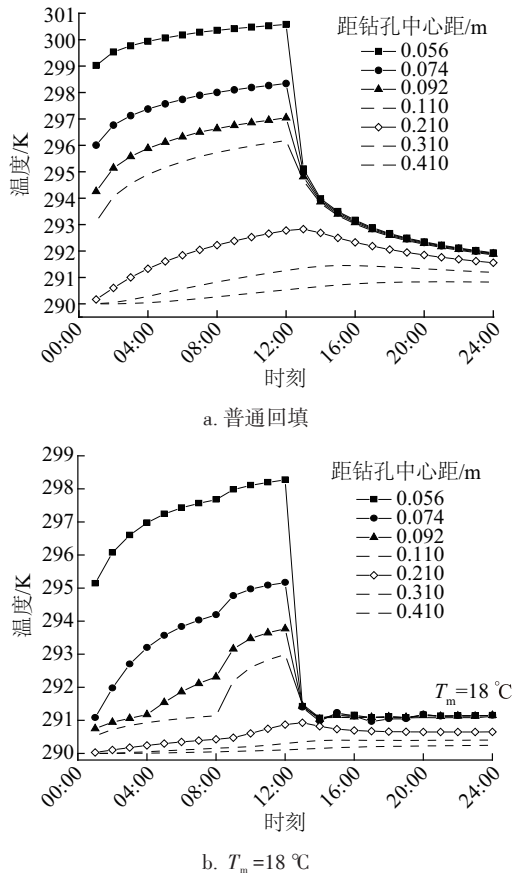


图5 不同回填工况下测点温度的变化

Fig. 5 Change on temperature measuring points under different working condition of backfill

2.2 间歇运行工况下相变温度对埋管换热器传热性能的影响

由 2.1 节可知,采用 PCM 回填可有效改善埋管换热器换热效果,提高单井储热量。给定埋管换热器在间歇运行模式(12 h+12 h)下运行 72 h,即 3 个运行周期,探究不同相变温度对埋管换热器传热性能的影响。

图 6 给出不同相变温度的 PCM 在第 1 个运行周期内对单位井深换热量的影响。由图 6 可知,随着相变温度的升高,埋管换热量逐渐减小。这是由于随着相变温度的升高,同一时刻达到 T_m 的 PCM 质量越少,即 PCM 所储存的潜热量逐渐减少,故换热器换热量逐渐降低。在此以平均储热速率来讨论相变温度对换热器换热量的影响,计算得埋管换热器平均储热速率如图 7 所示。由图 7 可知,相变温度对平均储热速率影响较大,且平均储热速率随相变温度的升高呈线性下降趋势。其中,普通回填平均储热速率为 2029.67 J/s;

而 $T_m = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 平均储热速率最大,为 3221.94 J/s,埋管换热器平均储热速率提升达 58.74%; $T_m = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 平均储热速率最小,为 2104.84 J/s,平均储热速率仅提升 3.7%。

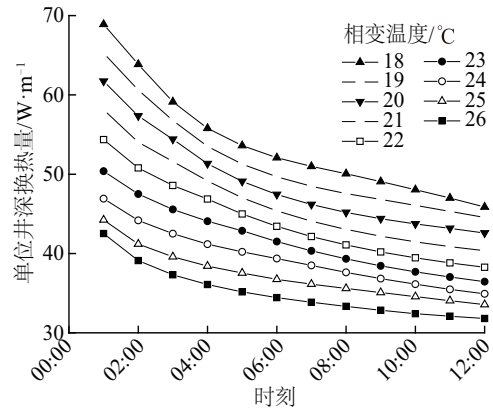


图6 相变温度对单位井深换热量的影响

Fig. 6 Effects of phase change temperature on heat exchange quantity of per well depth

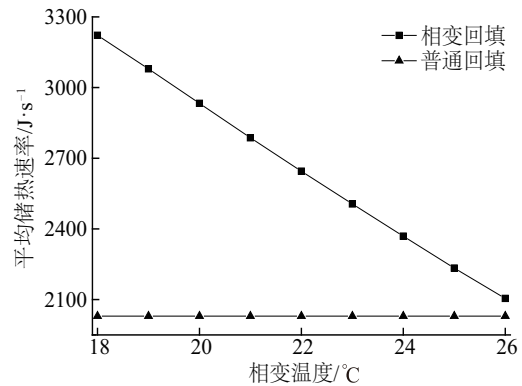


图7 平均储热速率随相变温度的变化

Fig. 7 Average heat storage rate varies with phase change temperature

为进一步分析 PCM 在间歇运行工况下多次熔化、凝固对埋管换热器传热性能的影响,选取相变温度为 18、23、26 $^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填加以说明。图 8 所示为不同相变温度的 PCM 回填工况下平均储热速率随运行周期数的变化情况。从图 8 中可看出,当间歇运行比一定时,平均储热速率随间歇运行周期数的增加总体呈衰减趋势,衰减趋势有所减缓。其中, $T_m = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填平均储热速率从 3221.94 J/s 下降至 2058.00 J/s,降幅达 36.13%;同理,相变温度 23、26 $^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填埋管换热量减幅分别达 9.75%、8.6%。数据表明, $T_m = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填的储热速率衰减最剧。这是由于第 1 周期

PCM 未完全凝固,导致凝固不充分,直接影响第 2 周期 PCM 运行阶段吸热熔化,致使储存潜热量减少。图 9 亦可证明。由图 9 可知,夏季间歇运行工况下,系统运行初期,低相变温度的 PCM 可明显改善埋管换热量,但是随着时间的进行,较高相变温度 PCM 回填对换热量的改善效果优于前期低相变温度。

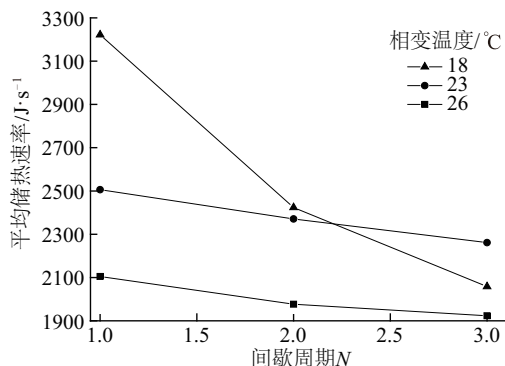


图8 间歇运行工况平均储热速率随时间的变化

Fig. 8 Average heat storage rate varies with intermittent operating condition

图 9 分别给出距钻孔中心 0.074、0.092 m 处 PCM 及 0.21 m 处土壤温度的变化情况。由图 9 可知,在此运行周期内,不同相变温度的 PCM 表现出不同的熔化、凝固特性。具体描述如下:

1) PCM 未发生相变,如图中 $T_m=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填。由于相变温度较高,在传热过程中,回填区域测点温度未达到其 T_m , PCM 未发生相变,并未储存潜热,导致换热器换热效果不甚明显。

2) PCM 正在进行相变,熔化、凝固交替进行,如图中 $T_m=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填。此时,由于 PCM 在换热器运行阶段储存大量潜热,强化换热器换热效果,同时缓解周围土壤的热积聚。而在停机阶段,PCM 凝固释放潜热,热量传递至周围土壤中,造成周围土壤热响应程度增大。且由图 9 可看出,随间歇周期数的增加,PCM 所需凝固时间逐渐延长。这是由于随着间歇运行周期数的增加,回填区域沿径向的温差逐渐减小,凝固过程进行缓慢,所需凝固时间逐渐增加。

3) PCM 多数已完成相变,如图中 $T_m=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填。由图 9 可知,由于在第 1 周期停机阶段,PCM 未充分凝固,当运行至第 2 周期时,PCM 已不再发生熔化、凝固,造成换热量急剧下降。

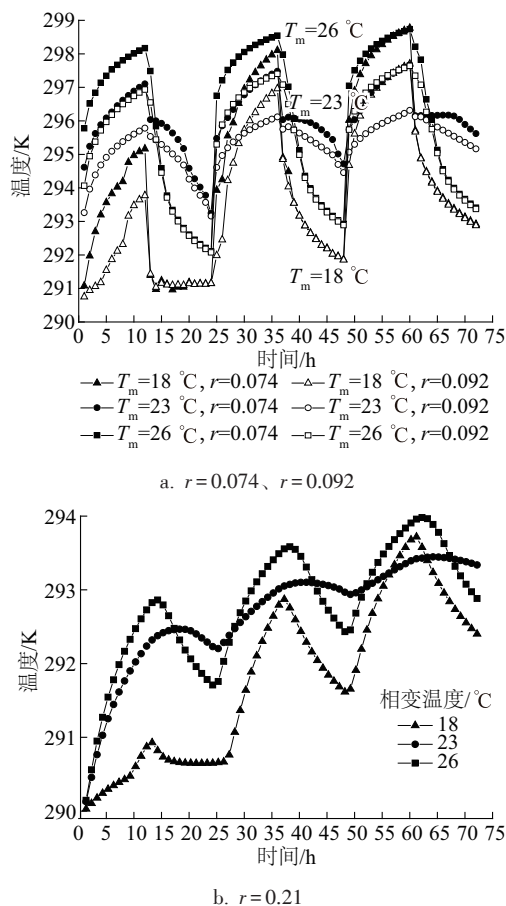


图9 距钻孔中心不同距离处测点温度随时间的变化

Fig. 9 Variations of soil temperature at distance from center with time

3 结 论

通过改变相变温度大小,对夏季间歇运行工况下单 U 型埋管换热器相变回填的熔化传热特性进行数值模拟分析,得到不同相变温度下传热影响变化规律,结果总结如下:

1) 添加 PCM 后可显著提高埋管换热器储热性能,改善埋管换热器换热效果,改善埋管周围热积聚,缓解周围土壤温度的热影响幅度。在本文计算条件下,利用相变温度 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 回填,单位井深换热量至少比普通材料回填提高 49.54%。

2) 夏季间歇运行工况下,在间歇运行前期,换热量随相变温度的升高逐渐减小,换热器平均储热速率随相变温度的升高呈线性下降趋势,低相变温度的 PCM 可明显改善埋管换热量,但随着时间的推移,较高相变温度 PCM 回填对换热器换热量的改善效果优于前期低相变温度。

3)在运行期间内,不同相变温度的 PCM 表现出不同的熔化、凝固特性。其中,当 PCM 处于熔化、凝固交替进行阶段时,PCM 在系统运行期间储存潜热,缓解周围土壤温度变化,而在停机期间释放潜热,造成土壤热响应程度增大,使得土壤温度在完整间歇运行周期内波动幅度较缓。

[参考文献]

- [1] 杨卫波,孙露露,吴珏.相变材料回填地埋管换热器蓄能传热特性[J].农业工程学报,2014,30(24):193-199.
YANG W B, SUN L L, WU X. Energy storage and heat transfer characteristics of ground heat exchanger with phase change backfill materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 193-199.
- [2] LENARDUZZI F J, CRAGG C B, RADHAKRISHNA H S. The importance of grouting to enhance the performance of earth energy systems[J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106(1): 451-457.
- [3] rabin y, korin e. Incorporation of phase- change materials into a ground thermal energy storage system: theoretical study[J]. Journal of energy resources technology, 1996, 118(3): 237-241.
- [4] 吴越超.相变材料回填的地源热泵可行性分析[D].天津:天津大学,2008.
WU Y C. Feasibility analysis of the ground source heat pump backfilled with phase change materials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [5] BENLI H, DURMUS A. Evaluation of ground- source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating [J]. Energy and buildings, 2009, 41(2): 220-228.
- [6] 李启宇.相变材料回填的地埋管的传热特性研究[D].上海:东华大学,2014.
LI Q Y. Study on the heat transfer characteristic of ground heat exchanger with phase change backfill materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [7] 刘靓侃.定型相变材料回填的U型埋管换热器性能研究[D].大连:大连理工大学,2015.
LIU J K. Research on the performance of U-tube heat exchanger with shape-stabilized PCM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [8] BOTTARELLI M, BORTOLONI M, SU Y H, et al. Numerical analysis of a novel ground heat exchanger coupled with phase change materials [J]. Applied thermal engineering, 2015, 88: 369-375.
- [9] 雷海燕.地埋管相变回填材料的理论分析与实验研究[D].天津:天津大学,2011.
LEI H Y. Analytical and experimental study of phase change materials used as backfill material for borehole heat exchanger[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [10] CUI P, YANG H X, FANG Z H. Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes[J]. Energy and buildings, 2008, 40(6): 1060-1066.
- [11] GAO Q, LI M, YU M. Experiment and simulation of temperature characteristics of intermittently controlled ground heat exchanges[J]. Renewable energy, 2010, 35(6): 1169-1174.
- [12] 宋小飞,温治,司俊龙.地源热泵U型管地下换热器的CFD数值模拟[J].北京科技大学学报,2007,29(3): 329-333.
SONG X F, WEN Z, SI J L. CFD numerical simulation of a U-tube ground heat exchanger used in ground source heat pumps[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(3): 329-333.

STUDY ON THERMAL PERFORMANCE OF GROUND HEAT EXCHANGER BACKFILLED WITH PHASE CHANGE MATERIAL UNDER INTERMITTENT OPERATION IN SUMMER

Wang Chang, Cao Xiaoling, Yuan Yanping, Yu Nanyang, Zhao Juan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate the phase transition temperature on the heat transfer performance of the backfill ground heat exchanger with phase change material, the three-dimensional numerical model of coupled heat transfer with fluid in pipe heat exchanger, backfilling region phase change heat transfer and soil heat transfer was established. By using enthalpy porous medium model to deal with the phase change problem in phase transition region, heat transfer performance of buried tube heat exchanger with different phase change temperature backfill materials is studied under intermittent operation in summer. The results show that buried tube heat exchanger adding PCM can effectively improve the heat transfer performance, which can relief heat accumulation around the pipe in the short term. By using the phase transformation temperature of 18 °C PCM backfill, the heat transfer in unit well depth is at least 49.54% higher than that of ordinary backfill material. At the beginning of the intermittent operation, the heat transfer decreases gradually with increasing temperature of phase change temperatures. The lower phase transition temperature of the PCM can obviously improve the heat exchange. But with operation time being longer, the higher transition temperature of PCM backfill heat exchanger is better than previous lower temperature. In addition, during the period of running, different phase transition temperature of the PCM show different melting and solidification characteristics. When melting and solidification alternates, buried tube heat exchanger with PCM can slow down the soil temperature fluctuation during the operation period.

Keywords: buried tube heat exchanger; phase change; phase change temperature; melting heat transfer; numerical simulation