

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.12.010

## 定形相变材料回填下的地埋管换热器实验

周琢<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 彭远玲<sup>1</sup>, 刘庆功<sup>1</sup>, 彭清元<sup>1,2</sup>, 曹聪<sup>2</sup>, 周庭正<sup>3</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市地勘局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121; 3. 中国三峡建工(集团)有限公司重庆南岸区广阳岛公司, 重庆 400060)

**摘要:**为研究定形相变材料(SSPCM)作为地埋管回填材料的传热特性,以 30 W 圆柱形发热棒作为线热源模拟地埋管换热器,用膨胀石墨吸附石蜡制成 SSPCM,并将其和普通回填沙以 3:7 的质量比混合制备成混合回填材料,分析在夏季间歇运行工况下,SSPCM 混合回填下的传热特性。结果表明,在短期实验运行模式下,相对普通沙回填,SSPCM 混合回填材料形成的温度场优势明显,温度波动较小,管壁附近过余温度差异可达到 10 °C;距离发热中心距离越近,减缓温度场变化的效果越明显;在 2 种回填条件下,恢复后稳定温度以及恢复所需时间无显著差异;在多周期间歇运行工况时,回填区域内温度明显低于连续运行状况;若运行时间导致的温升超过相变材料潜热利用阶段,SSPCM 无法发挥出相变储能的优势。该实验现象对 SSPCM 实际应用有一定参考价值。

**关键词:**地埋管换热器;定形相变材料;温度场;实验

中图分类号:TU83

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)12-106-08

## Experimental analysis of ground tube heat exchanger with shape-stabilize phase change material backfill

ZHOU Zhuo<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, PENG Yuanling<sup>1</sup>, LIU Qinggong<sup>1</sup>,  
PENG Qingyuan<sup>1,2</sup>, CAO Cong<sup>2</sup>, ZHOU Tingzheng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing 401121, P. R. China; 3. China Three Gorges Corporation Chongqing Nan'an District Guangyang Island Company, Chongqing 400060, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the heat transfer characteristics of a ground heat exchanger(GHE) with shape-stabilized phase change material(SSPCM) backfill, a 30 W cylindrical heating rod was used as a linear heat source in place of the GHE. Expanded graphite adsorbed paraffin was used to create SSPCM, which was then mixed with ordinary backfill sand at a mass ratio of 3:7 to prepare a mixed backfill material. The heat transfer characteristics of the SSPCM mixed backfill material were studied under intermittent operation during summer. The research results indicate that the temperature field formed by the SSPCM mixed backfill material had obvious advantages, with smaller temperature fluctuations. In short-term operation modes, the excess temperature difference near the pipe wall could reach about 10 °C when compared with ordinary sand backfill. The effect of alleviating

收稿日期:2023-03-16

基金项目:重庆浅层地温能野外科学观测研究站开放基金资助项目(GCZ-202112)。

Supported by Open Fund Project of Chongqing Shallow Geothermal Energy Field Scientific Observation and Research Station(GCZ-202112).

作者简介:周琢(1998-),男,硕士研究生,主要从事相变蓄能技术研究,(E-mail)kitsch2020@163.com。

通信作者:彭清元,男,教授级高工,(E-mail)594541403@qq.com。

temperature fluctuations became more prominent as the distance from the heating center decreased. There were no significant differences in stable temperature and recovery time after recovery under the two backfill conditions. During intermittent and multi-cycle operation, the temperature in the backfill area was lower than in continuous operation. If the temperature rise caused by running time exceeded the latent heat utilization stage of phase change materials, SSPCM could not fully utilize the advantages of phase change energy storage. These experimental results hold valuable insights for the practical application of SSPCM.

**Keywords:** ground heat exchanger; shape stabilize phase change materials; temperature field; experimental analysis

在当今能源紧缺的背景下,地热能作为可再生能源在多领域得到广泛应用,其中地源热泵系统由于节能高效的优点得以大面积推广。地理管换热器作为地源热泵的重要热交换装置,换热效率直接关系到地源热泵能否高效运行。但地理管换热器会随热泵机组持续运行导致周围岩土初始温度上升或下降,显著降低地源热泵的运行效率。原位固有地质条件难以改变,但处于地理管换热器和周围土壤中间的回填材料性能可以控制。回填材料作为地理管内流体和周围土壤的换热媒介,其热物参数对地源热泵的效率有显著的影响<sup>[1]</sup>。杨卫波等<sup>[2]</sup>提出采用相变材料(phase change material, PCM)作为回填物的一部分。利用 PCM 相变过程中吸收或者释放潜热而自身温度变化较小的特性,来缓解短时间内地理管换热器对周围环境温度的影响,保证地源热泵机组持续高效运行。吴越超<sup>[3]</sup>通过试验分析,发现了相变材料回填使地源热泵单井供冷(热)量提高了 62.4%,提出了相变材料作为地理管回填材料的实际可行性。Yang 等<sup>[4]</sup>通过建立垂直 U 型埋管试验台,分别利用癸酸-月桂酸和油酸作为夏季和冬季的回填材料,发现冬夏两季运行工况下整体热作用半径减小 15%。王畅等<sup>[5]</sup>利用数值模拟的方法,研究了夏季间歇运行工况下相变材料相变温度对回填地理管换热器传热性能的影响,结果表明夏季长期间歇运行情况下,较高相变温度 PCM 回填对换热器换热量的提升效果优于低相变温度。李启宇<sup>[6]</sup>通过数值模拟的方法对比了相变材料回填和普通回填材料的传热特性,结果发现,相变材料低热导率会导致单位井深换热热量减小,但可以减少一定土地使用面积。

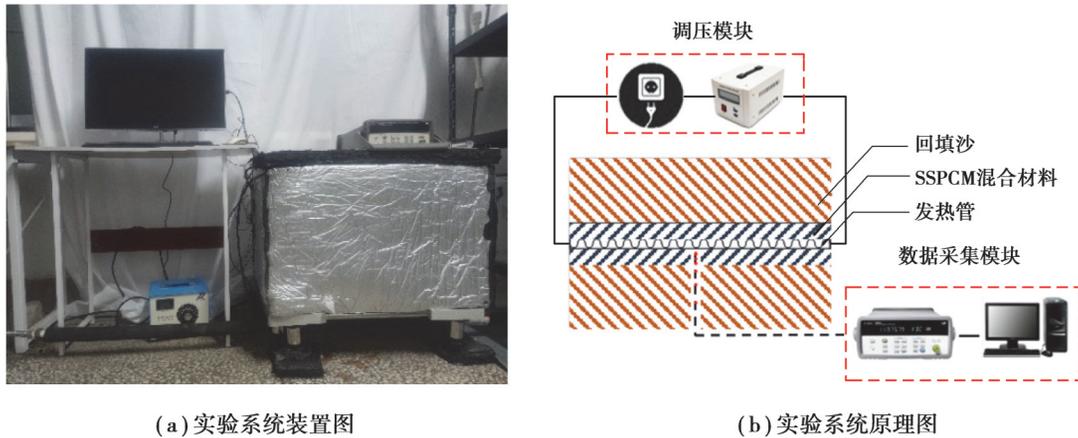
现有研究的地理管回填材料主要为纯相变材料。一方面,PCM 导热系数远低于普通回填材料,不利于地理管换热;另一方面,PCM 相变熔化容易造成泄漏,污染环境。基于以上问题,Li 等<sup>[7]</sup>制备了石墨吸附下的定形相变材料(shape-stabilize phase change material, SSPCM),研究了这种材料和碎石混凝土 2 种材料回填下的 U 形管换热器的传热性能,结果发现,SSPCM 回填换热量是碎石混凝土的 1.223 倍,热影响半径是碎石混凝土的 0.9 倍。Zhao 等<sup>[8]</sup>制备了石墨吸附下的 SSPCM,利用数值模拟方法,研究了 SSPCM 和普通膨润土体积混合比例以及间歇运行下地理管换热器的换热效果,研究发现,为保证 SSPCM 能够良好恢复,应利用较高的启停比用于较低的 SSPCM 体积比例,将较低的启停比用于较高的 SSPCM 体积比例。Bottarelli 等<sup>[9]</sup>用等效热容法研究了水平埋管回填材料中添加 PCM 的传热特性,结果表明,PCM 对于缓和换热器热影响半径效果明显。

上述方法多集中在研究纯 PCM 作为回填材料或者以数值模拟的方法研究 SSPCM 回填下的换热效果。针对 SSPCM 增强换热和缓解温度波动两方面的实际效果,尚需要开展大量工作。文中采用搭建实验台实验的方法,研究 SSPCM 混合回填情况下的换热特性。

## 1 实验系统介绍

### 1.1 实验台介绍

实验系统装置图和系统原理,如图 1 所示,实验系统由 3 部分构成:地下埋管实验沙箱,发热管调压模块,数据采集模块。其中,实验沙箱用 20 mm 厚度的木板制成,整体实验木箱纵向截面 400 mm×400 mm,长度为 600 mm,内部回填区域截面尺寸为 120 mm×120 mm。沿实验木箱横向放置一直径为 10 mm,长度为 600 mm 的圆柱形石英电加热管,代替地理管作为换热热源。



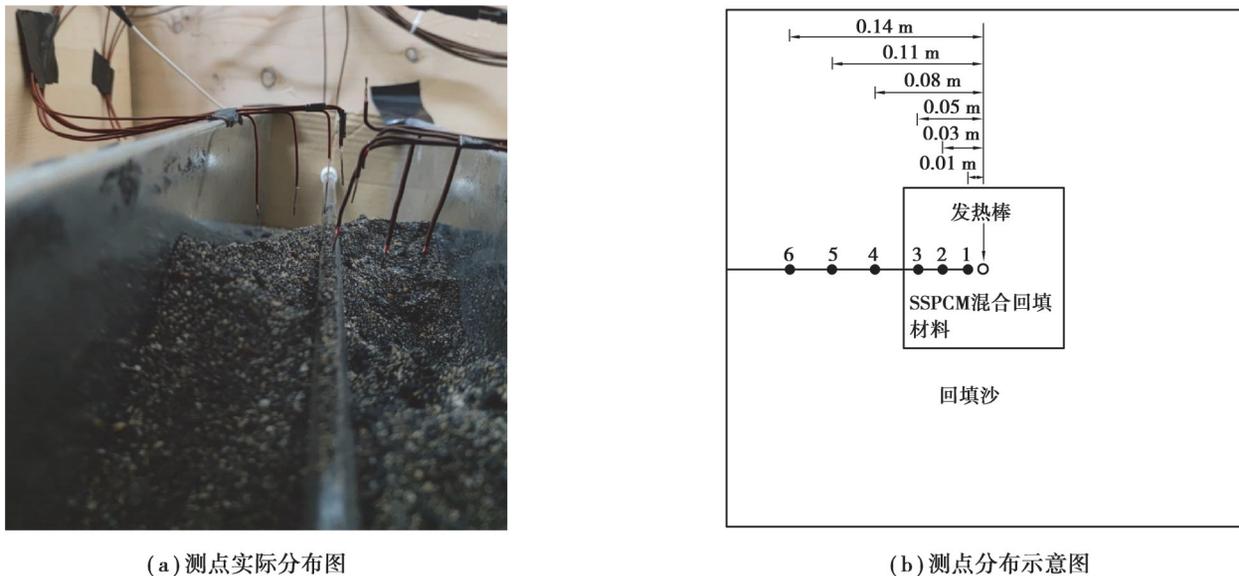
(a) 实验系统装置图

(b) 实验系统原理图

图1 实验系统图和系统原理图

Fig. 1 Experimental system diagram and system principle diagram

为避免环境温度对实验造成较大影响,木箱6个面均用70 mm厚橡塑隔热材料进行保温从而模拟恒定原边界。在实验沙箱300 mm中间截面处,沿发热棒径向共布置6个T型铜-康铜热电偶(测量精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )测点,实际分布和示意如图2所示,其中,1#~3#布置在内部回填材料区域,4#~6#布置在回填区域外侧。实验系统通过调节调压模块电压大小来调整电加热管功率,可模拟不同负荷情况下的地埋管换热情况。实验过程中用安捷伦34901A巡检仪配合一体式计算机作为数据采集模块进行温度数据采集工作。



(a) 测点实际分布图

(b) 测点分布示意图

图2 测点实际分布图及示意图

Fig. 2 Actual distribution and schematic diagram of thermocouple

## 1.2 材料选取与制备

### 1.2.1 材料选取

相变材料由于其结构和组成不同,会表现出不同的物化性质,在不同场合需要针对使用场景选取不同的相变材料。在以地埋管换热器换热效果作为优先考虑目标时,相变材料导热系数,相变潜热和比热容大小是影响最大的3个指标。理想情况下,选取的相变材料应有较合适的相变温度,较大的比热容和相变潜热。但实际情况下,很难同时满足这些条件,只能考虑在合适相变温度下选取比热容和潜热尽可能大的材料。

重庆地区地下100 m年平均温度为 $19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>,在此条件下,重庆夏季运行时可作为回填材料的PCM相变温度在 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。基于此条件,实验选取夏季相变材料为文献[11]所使用到的石蜡,该种材料相变

温度为 22 °C,符合重庆地区实际运行的温度范围,同时,该材料相变潜热和比热容较大,分别为 200 kJ/kg 和 2 400 J/kg。

### 1.2.2 材料制备过程

由于石蜡为固液相变过程,融化后会渗入周围岩土层,污染周围土壤环境,可利用膨胀石墨多孔结构特性,吸附石蜡定形,避免环境污染。同时,膨胀石墨吸附也可有效提升回填材料导热系数,提高地埋管换热效果。实验所用石墨膨胀后 80 目,膨胀率 200~300,纯度 99%,制备定形相变材料过程中所用的仪器设备如表 1 所示。

表 1 制备 SSPCM 所用仪器设备  
Table 1 Equipment used for preparing SSPCM

使用仪器	仪器规格	主要用途
HH-ZK600 恒温水箱	范围:室温~99.9 °C,波动:±1 °C	加热融化石蜡
DZF-6020 真空干燥箱	温度:50~200 °C,真空度<267 Pa	干燥/真空吸附
2XZ-1 旋片真空泵	抽气速度:1 L/s 极限压力:0.06 Pa	抽取真空

实验采用的 SSPCM 制备方法为真空浸渍法,制备步骤参考文献[12]进行,具体操作为:1)称取一定质量的膨胀石墨(EG)放入 1 000 mL/2 000 mL 烧杯中,烧杯作出标记并放置进真空干燥箱中进行干燥处理,设定真空干燥箱为 130 °C,持续 12 h,使膨胀石墨完全干燥膨胀成可吸附状态;2)将一定质量的石蜡放入 2 000 mL 烧杯中,再将烧杯放置入恒温水箱融化,水箱设定温度为 50 °C,待石蜡完全融化后,按照石蜡和膨胀石墨为 100:10 的质量比例将石蜡加入装有膨胀石墨的烧杯中,并用玻璃棒进行充分搅拌,使得石蜡溶液和膨胀石墨能够完全混合;3)将混合完毕的石蜡和膨胀石墨放置进真空干燥箱中,设定温度为 50 °C,抽取真空度为 0.08 MPa,在此环境下进行真空吸附,其中,每隔 2 h 取出搅拌 5 min,此过程共持续 8 h,取出即可得到石蜡和膨胀石墨质量比例为 100:10 的 SSPCM。

制备出材料样本,如图 3 所示。制备之后的定形相变材料 DSC 测试结果,如图 4 所示。可以看出,PCM 在熔化和凝固 2 个过程中的相变区间有所不同,升温时相变范围约为 20~24 °C,降温时相变温度范围约为 16~20 °C。



图 3 定形相变材料样本图

Fig. 3 Sample diagram of SSPCM

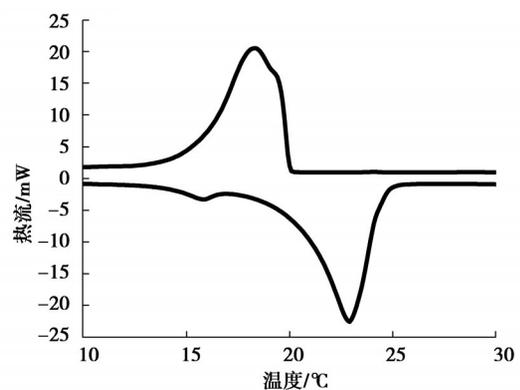


图 4 定形相变材料 DSC 测试图

Fig. 4 DSC curves of SSPCM

## 2 实验结果与分析

实验分为混合回填和普通回填 2 种情况。普通回填时,整个实验沙箱均充满实验用回填沙;混合回填时,以发热棒为中心,布置截面大小为 120 mm×120 mm 的回填材料。Zhao<sup>[8]</sup>研究过程中,采用的定形相变材

料体积比例,考虑实际工程中采用质量比例更为直观,文中采用质量比例材料回填标准,体积比例范围为30%~70%,该结果为CFD计算结果,没有实验作为支撑。文中拟通过初选一定质量比例的定形相变材料进行初期研究,观测其热物理性能,获得实验结果,为后期实验条件下的CFD模型验证提供基础数据,寻找最佳的混合比例。选取SSPCM和回填沙质量比为3:7的混合材料进行初期实验。实验模拟工况为夏季工况,发热棒控制发热量为30 W,对应单位长度发热量为50 W/m。由于实验台尺寸较小,长时间运行下受环境干扰严重,所以整体实验周期较短。其中,A,B对比实验选取原则为3 h运行后回填内部3个测点位置SSPCM分别处于已熔化、熔化和未熔化3个特殊状态,具有代表性。C,D以短周期循环代替实际地源热泵长周期循环,E为间歇工况对照实验。文中所用回填材料热物参数如表2所示,具体实验运行模式如表3所示。

表2 材料参数表

Table 2 Material properties.

材料	导热系数/ (W·(m·°C) <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/ (J·(kg·°C) <sup>-1</sup> )	相变潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	相变温度/ °C
回填沙	0.8	1 640	1 200	—	—
SSPCM	2.2	700	2 300	200	22

表3 运行模式

Table 3 Operating mode

运行模式	回填情况	运行方式	发热功率/W
A	普通回填	运行3 h,停机9 h	30
B	混合回填	运行3 h,停机9 h	
C	混合回填	运行1 h,停机1 h	
D	混合回填	运行1 h,停机2 h	
E	混合回填	连续运行	

## 2.1 SSPCM 回填对回填区域温度的影响

图5分别给出了A和B运行模式下的回填区域内部测点温度随时间变化情况。由图5可知,同样工况运行3 h时,混合回填情况下各测点温度均低于普通回填,距离发热棒越近,这种特性表现越明显。 $r=0.01$  m处测点混合回填比普通回填情况下低10 °C, $r=0.03$  m处低6 °C, $r=0.05$  m处低5 °C,均可以和热源保持较大换热温差,表现出较强的换热效果。这主要是由于回填材料中SSPCM部分存在恒温相变过程,在这一过程中SSPCM会吸收很大一部分热量且温度保持恒定,并将这部分热量以潜热相变而非显热升温的形式储存下来。SSPCM所具有的这种特性可以有效降低回填区域内部的温度升高幅度,增大实际使用过程中埋管换热器的换热温差,进而改善埋管的换热效果。同时,由于越远离发热中心时,SSPCM作用效果就越不明显,即SSPCM回填存在一个有效作用半径,在工程中应根据实际埋管设计尺寸和运行模式来考虑回填材料的回填半径。

经过9 h恢复后,普通回填情况下回填区域内测点平均温度为13 °C,而混合回填情况下测点平均温度为12.2 °C,分别为实验初场温度的127.5%和127.6%,可以看出,在启停时间比为1:3的实验运行工况下,混合回填和普通回填恢复情况并无差异。

从图5(b)中 $r=0.01$  m处测点温度曲线可以发现,测点温度升高过程和下降过程的斜率均有明显变化,由初始的急速上升或者下降到后来变得平缓。这主要是由于在升温或者降温初期,温度尚未达到SSPCM相变温度范围,SSPCM以显热的形式吸收或释放热量,由于混合回填材料导热系数较大,热量传输迅速,该过程温度变化较为剧烈;而达到SSPCM相变范围时,SSPCM开始相变,此过程SSPCM以潜热的形式吸收或释放热量,温度变化不明显,温度变化的斜率开始变缓。

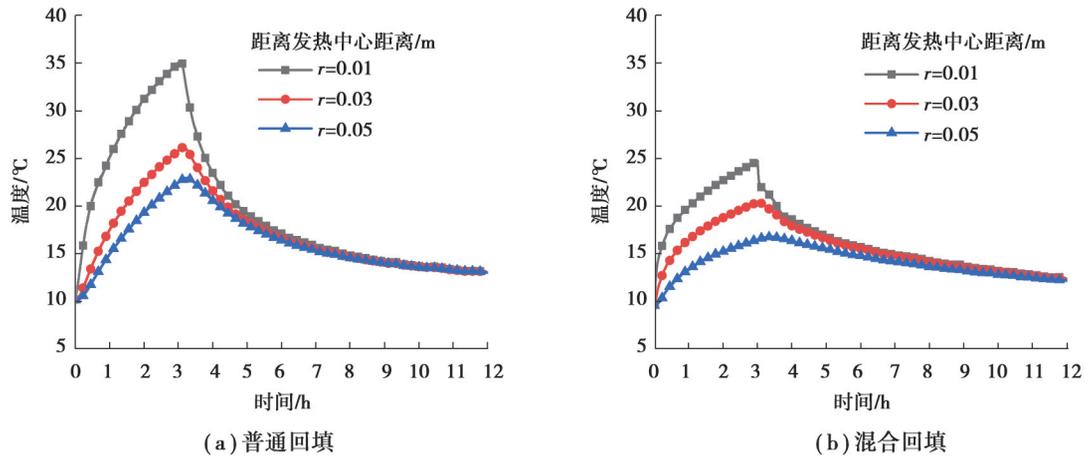


图 5 回填区域内部温度变化

Fig. 5 Temperature variations inside backfill area

2.2 SSPCM 回填对回填区域外部温度的影响

图 6 分别给出了 A 和 B 运行模式下,  $r=0.08\text{ m}$ ,  $r=0.11\text{ m}$  和  $r=0.14\text{ m}$  3 处回填区域外部测点的过剩温度随时间变化曲线。可以看出,不同回填情况下测点的过剩温度变化趋势表现大致相同:3 h 运行期间随时间逐渐上升;3~5 h 时处于系统停止运行的初始阶段,回填区域内部仍保持较高温度,向外传热温差大,所以回填区域外过剩温度仍然呈现上升趋势;5 h 后回填区域内部温度下降,向外传热速率变缓,外部区域过剩温度开始下降。在 5 h 升温阶段结束后,普通回填情况下 0.08 m、0.11 m 和 0.14 m 3 处测点过剩温度分别为 3.81°C、3.01°C、1.87°C;混合回填情况下分别为 3.15°C、2.25°C 和 1.23°C,明显低于普通回填。

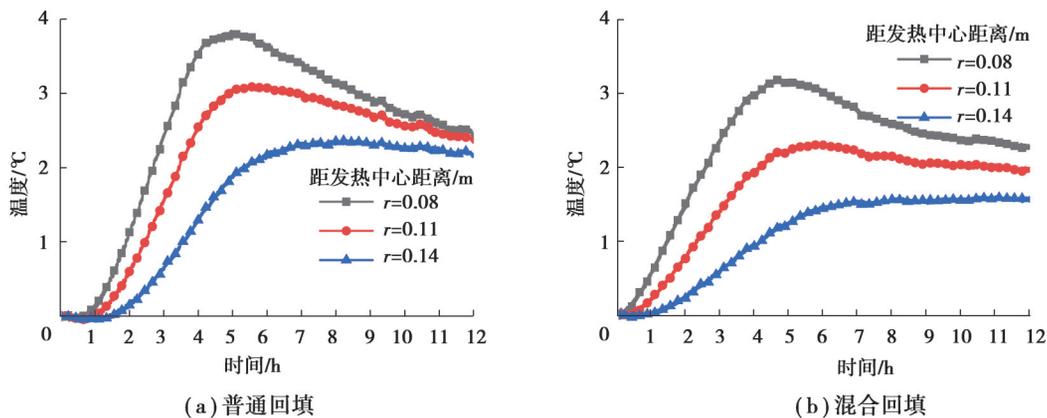


图 6 回填区域外部温度变化

Fig. 6 Excess temperature change outside backfill area

系统停止运行 9 h 后,普通回填情况下 0.08 m、0.11 m 和 0.14 m 3 处测点过剩温度分别下降至 2.43°C、2.33°C 和 2.14°C;混合回填情况下分别为 2.29°C、1.98°C 和 1.58°C,最大温度差异分别达到 35%。显示了利用 SSPCM 作为回填材料的情况下,能够有效降低地理管对周围温度场的热影响。若在多埋管设计时,利用 SSPCM,可以起到减小排管间距的优势。

2.3 间歇运行工况下换热特性分析

图 7 分别给出了 C、D 和 E 3 种运行模式下距离发热中心 0.03 m 处测点温度变化。可以看出,E 模式即连续运行状况下,发热中心内部持续升温,在 15 h 时已经达到 30°C,换热效果极差,随后继续运行下的地理管换热器效率也会随着换热温差的降低持续降低。这是因为在连续运行工况下,相变潜热利用完后,SSPCM 将以显热的形式持续升温,已经无法发挥其性能优势。间歇运行可以很好地改善这种现象,在 C(启停比 1:

1)和D(启停比1:2)模式下15 h处的恢复时刻温度分别为21 °C和20 °C,均可发挥出强于E模式的换热效果。实际应用对象存在大量间歇运行工况,如何优化布置SSPCM,自适应系统启停时间比是实际应用中的一个关键问题。

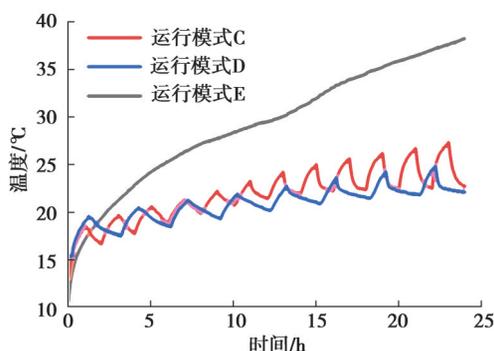


图7 不同运行模式下 $r=0.03$  m处测点温度变化

Fig. 7 Temperature variation of at  $r=0.03$  m different operation modes

同时,也可以明显看出D模式下温升明显小于C模式,在15~25 h时表现较为明显。这是因为在此区间内,C运行模式下1 h的恢复时间已经无法使SSPCM恢复到相变温度以下的未熔化状态,SSPCM无法完全发挥出相变储能效果,大部分热量以显热的形式储存,D运行模式下,其启停比为1:2,相对与C模式,有较长的间歇期。因此,SSPCM有足够的恢复时间,从而保证定形相变材料性能的循环使用。所以,D模式下温升较小,可以发挥出强于C模式的换热效果。由D运行模式下测点温度变化可以推测,随着运行周期继续进行,2 h恢复时间也会使SSPCM温度无法恢复到相变温度以下,此时,SSPCM不能发挥储能效果。如需要SSPCM再次恢复相变储能效果,则需较长的恢复时间。在实际工程中,如办公、商业等建筑为典型的运行-间歇周期,有利于定形相变材料的性能恢复。在后期的研究中,需要通过建筑负荷特性、运行周期、相变材料性能(相变温度、比热容、混合比例、相变潜热)等因素进行综合分析。

### 3 结论

文中通过建立埋管换热器实验台,分别进行了普通回填下的实验和定形相变材料(SSPCM)混合回填下的间歇实验,得到了不同运行条件下,实验台温度场分布情况,根据实验结果可得到以下主要结论:

1)使用SSPCM混合普通回填沙进行回填,可明显改善埋管换热器周围土壤热堆积情况,降低换热器周围回填材料温度波动。在文中实验模式下,相比普通回填,混合回填下距离发热中心0.01 m处测点低10 °C左右,0.03 m处低6 °C左右,0.05 m处低5 °C左右,可较大程度提高埋管换热温差。

2)在实验条件下,越远离发热中心距离,SSPCM混合回填缓和温度波动的效果越差。即SSPCM回填存在一个有效作用半径,在工程中需根据实际埋管设计尺寸和运行模式来考虑回填材料的回填半径。

3)实验条件下连续运行到后期,SSPCM以显热的形式升温,已经无法发挥其性能优势。而间歇运行可以较好恢复SSPCM性能,使埋管换热器较长时间保持大换热温差,保持地源热泵系统较高的运行效率。实际应用时,应考虑SSPCM恢复情况来设置停机时间长度,这对保持SSPCM回填下地源热泵高换热效率有关键作用。

4)在以间歇模式连续运行状况下,SSPCM回填区域仍然会有一定的热堆积,在恢复时间后回填区域温度仍高于SSPCM相变温度范围时,SSPCM回填就不能发挥出相变储能的效果,只能视为有较大导热系数和比热容的普通回填材料。在后期研究中,应综合考虑建筑负荷特性、运行周期、相变材料性能等多方面因素综合分析。

## 参考文献

- [ 1 ] Han C J, Yu X. Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system[J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 148-160.
- [ 2 ] 杨卫波, 孙露露, 吴暄. 相变材料回填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.(in Chinese)
- [ 3 ] 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 ground source heat pump backfilled with phase change materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [ 4 ] Yang W B, Xu R, Yang B B, et al. Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfill[J]. *Energy*, 2019, 174: 216-235.
- [ 5 ] 王畅, 曹晓玲, 袁艳平, 等. 夏季间歇运行工况下相变温度对相变回填埋管换热器传热性能的影响[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(3): 234-241.  
Wang C, Cao X L, Yuan Y P, et al. Study on thermal performance of ground heat exchanger backfilled with phase change material under intermittent operation in summer[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(3): 234-241.(in Chinese)
- [ 6 ] 李启宇. 相变材料回填的埋管的传热特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.  
Li Q Y. Study on heat transfer characteristics of buried pipes backfilled with phase change materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese)
- [ 7 ] Li X L, Tong C, Duanmu L, et al. Study of a U-tube heat exchanger using a shape-stabilized phase change backfill material[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2017, 23(3): 430-440.
- [ 8 ] Zhao W F, Hu Z T, He W, et al. Intermittent mode analysis of a borehole ground heat exchanger with novel phase change backfill materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: 116716.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 赵双龙. 重庆地区地源热泵系统运行特性监测与模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
Zhao S L. Monitoring and simulation of operation characteristics of ground source heat pump system in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [ 11 ] Ma Y, Tao Y, Shi L, et al. Investigations on the thermal performance of a novel thermal energy storage unit for poor solar conditions[J]. *Renewable Energy*, 2021, 180: 166-177.
- [ 12 ] 任学明. 膨胀石墨/石蜡定形相变储热材料的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
Ren X M. Preparation and properties of expanded graphite/paraffin shape-stabilized phase change thermal storage materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)