

# 地源热泵系统中钻孔回填材料研究进展

张 玟, 郝斌尧, 王 胜\*, 张 洁

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 当今社会快速发展, 能源需求与环境问题逐渐加剧, 利用地源热泵系统采取浅层地温这一清洁能源, 可以实现节能减排与充分利用资源的目标。而在地源热泵技术中影响地温能开采效率的重要因素即为回填材料的研发与应用。该文对地源热泵技术中回填材料的力学性能、导热性能和施工性能及其当前存在的问题及发展趋势进行综述, 指出了当前回填材料的导热性能的研发虽能使其达到较高的导热效率, 但其往往会影响材料的力学强度等物理特性, 增加其施工难度, 而相变材料可能是解决回填材料性能缺陷的关键。此外, 随着科技的发展, 将数值模拟与试验相结合, 可以对理论创新与工程效益起到很大的提升作用。

**关键词:** 地源热泵; 回填材料; 导热性能; 相变材料; 数值模拟

**中图分类号:** TK523; P634    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0096-07

## Research progress on borehole backfill materials in ground source heat pump systems

ZHANG Wen, HAO Binyao, WANG Sheng\*, ZHANG Jie

(School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** With the rapid development of modern society, energy demand and environmental problems are gradually aggravating, ground source heat pump systems can be used to extract shallow ground temperature—a clean energy source to achieve the goals of energy conservation, emission reduction and full utilization of resources. An important factor affecting the efficiency of geothermal energy extraction in ground source heat pump technology is the development and application of backfill materials. This article reviews the thermal conductivity, mechanical properties and construction performance of backfill materials in ground source heat pump technology, as well as their current problems and development trends. It points out that the current research and development of thermal conductivity of backfill materials can achieve higher thermal conduction efficiency, but it often affects the mechanical strength and other physical properties of the materials, and increases its construction difficulty. Phase change materials may be the key to solving the performance defects of backfill materials; in addition, with the development of science and technology, the combination of numerical simulation and experimentation can greatly improve theoretical innovation and engineering benefits.

**Key words:** ground source heat pump; backfill materials; thermal conductivity; phase change material; numerical simulation

### 1 研究背景

随着城市化的不断发展, 城市建设和发展对于

能源需求不断增加, 但是目前, 不可再生能源的使用逐渐受到限制, 且国家大力支持发展清洁能源。

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2021-04-12    DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.08.015

基金项目: 国家重点实验室基金“青藏高原地热能钻采高温护壁堵漏材料的制备、性能与机理”(编号: SKLGP2019Z006)

作者简介: 张玟, 女, 汉族, 2000年生, 从事钻掘工程相关方向研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 1823821053@qq.com。

通信作者: 王胜, 男, 土家族, 1982年生, 教授, 博士, 主要从事矿业钻井工程材料研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 158588951@qq.com。

引用格式: 张玟, 郝斌尧, 王胜, 等. 地源热泵系统中钻孔回填材料研究进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 96-102.

ZHANG Wen, HAO Binyao, WANG Sheng, et al. Research progress on borehole backfill materials in ground source heat pump systems[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 96-102.

而地热资源作为储量大、分布广、易于利用的可再生清洁能源,与可持续发展理念相结合,是新时代经济建设的重要支柱。因此,转而增强对于地热资源的利用变得尤为重要。在地球内部中,可被开发的,存在于各类流体与岩土体中的热能被称为地热资源。大量科学研究主要集中在浅层地热能的利用上。根据当前科技发展水平,地下深度<200 m的低温热能资源是我们主要开采的地热资源<sup>[1]</sup>。因地球内部200 m以内的恒温带中,有恒定的岩土体温度,受环境气候的影响极小,因此开发利用方便<sup>[2]</sup>。

地源热泵系统通过采取岩土体、地下水等低温热源来获取地热资源,由源热泵机组、能量交换系统等构成。我们需要对钻孔进行材料的回填,去防止地下水互相渗透或沉降,并且提高地源热泵系统的导热能力,提高热传导效率。其中,回填材料作为提高整个系统导热能力起到至关重要的作用。

因此,国内外学者对于地源热泵回填材料进行了深入研究,通过不同材料配比、添加剂的引入,以及各类复杂地层中的现场试验,从其导热性能、力学性能、施工性能3大主要特性展开大量研究课题。

## 2 回填材料主要特性

### 2.1 导热性能

回填材料作为传热介质,其导热性能尤为关键,一种良好的回填材料具有优良的导热系数,可以降低热阻,提高传热性能,从而降低地源热泵所消耗的资源与成本<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.1 导热系数

回填材料的导热能力用换热孔内的热阻来表示,换热孔内回填材料的热阻随导热系数的增大而增大,随钻孔深度的增大而减小。因此,为提高回填材料的导热性能,就要增加其导热系数。热阻与导热系数及钻孔深度关系式如式(1)所示:

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln\left(\frac{d_b}{d_e}\right) \quad (1)$$

式中: $R_b$ ——换热孔内回填材料的热阻,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_b$ ——换热孔内回填材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $d_b$ ——钻孔直径, m;  $d_e$ ——U形管的当量直径, m。

从20世纪90年代到21世纪初,国外研究人员就开始对于回填材料的导热性能进行研究,通过加入不同原料及添加剂来增加其导热系数。PAHUD

D等<sup>[4]</sup>采用石英砂作为回填材料,所测得的钻孔热阻为 $0.04 W/(m \cdot K)$ ,最大减少了30%,传热效果优良。BORINAGA-TREVINO R等<sup>[5-6]</sup>分析了4种不同回填材料添加剂,分别为膨润土-石墨、碱性氧气转炉钢渣、石英砂、建筑垃圾。试验得出,膨润土-石墨回填材料热阻仅有 $0.07 W/(m \cdot K)$ ,而石英砂回填材料干燥导热系数可达 $1.1 W/(m \cdot K)$ 、饱和导热系数 $1.6 W/(m \cdot K)$ ,导热效果优良。ALRTIMI A A等<sup>[7]</sup>采用的回填材料是由水泥、平均密度在 $2.15 g/cm^3$ 的粉煤灰、粗砂、碎玻璃和萤石等组成成分混合而成,通过试验,由粉煤灰、萤石组成的回填材料,可以在饱和与干燥的环境中保证较好的导热系数。当此回填材料中的萤石含量从20%不断增加时,饱和导热系数从 $1.3 W/(m \cdot K)$ 增加到 $2.8 W/(m \cdot K)$ ,干燥导热系数从 $0.8 W/(m \cdot K)$ 增加到 $1.3 W/(m \cdot K)$ 。KAVANAUGH S P等<sup>[8]</sup>采用细硅石、铁屑、矾土、班脱土与金刚砂混合组成的回填材料,其导热系数可以提高至 $3.29 W/(m \cdot K)$ 。LEE CHULHO等<sup>[9]</sup>分析了含20%含量的膨润土、二氧化硅、石墨的回填材料添加剂,表明回填材料的导热系数都出现了增长。且若继续增加膨润土含量还能使得导热系数继续增加。Sanner B等<sup>[10]</sup>也通过实验证明为了增加地源热泵系统的换热效率,就要提高回填材料的导热系数。通过众多国外研究人员加入不同配比添加剂,回填材料的导热性能有了明显的改良。不同成分配比对于回填材料的导热性能改良如表1所示。

随后,国内研究者相对起步较晚,但其也对于回填材料的导热性能首先进行测试。包强等<sup>[11]</sup>发现高

表1 不同成分配比对于回填材料的导热性能改良

Table 1 Different component ratios for improvement of thermal conductivity of backfill materials

回填材料及配比	回填材料导热性能
	钻孔热阻最大减少了30%
石英砂代替粘土	饱和导热系数可达 $1.6 W/(m \cdot K)$ 干燥导热系数可达 $1.1 W/(m \cdot K)$
采用粉煤灰结合萤石,且萤石含量从20%~60%变化时	饱和导热系数可达 $2.8 W/(m \cdot K)$ 干燥导热系数可达 $1.3 W/(m \cdot K)$
采用矾土、细硅石、铁屑、班脱土与金刚砂	导热系数提高至 $1.7 \sim 3.29 W/(m \cdot K)$
采用20%含量的膨润土、二氧化硅、石墨	导热系数最高可达 $1.22 W/(m \cdot K)$

导热性能的回填材料对于地下换热器的换热能力有较大提升,随导热系数的增大,换热器与岩土体的热交换量增大。但是要控制回填材料导热系数,其导热能力宜稍强于地下岩土体的导热能力。马志强<sup>[12]</sup>表明若想使导热系数更高,就要选择粒径大、均匀性好的回填材料,建议选择0.5~2 mm的颗粒砂。除此之外,还表明回填材料的导热性能与钻孔的深度关系较小。刘玉旺等<sup>[13]</sup>通过研究发现,P.O.42.5水泥的导热系数较P.O.32.5的导热系数更高。随着砂粒尺寸的增加,回填材料的热导率增加。随着膨润土含量的增加,回填材料的热导率先升高后降低。随着膨润土含量的增加,回填材料的流动性降低。连小鑫等<sup>[14]</sup>通过试验证明换热孔深度与换热器换热量成反比,而与换热孔填料导热系数和U形管内循环水流速成正比。

### 2.1.2 回填材料的配比优化

在进行导热性能研究的同时,研究者对于回填材料固定配方中膨润土、水泥等的性能进行了分别的测试。司刚平<sup>[15]</sup>通过试验表明膨润土基回填材料的热传导性能良好,因其强度较高且热传导系数较低,换热孔孔身结构可以被很好地保护。郑秀华等<sup>[16]</sup>也同样发现在以岩石基为主要成分的地区中,水泥基回填材料更适合,其主要通过调节水灰比来改变导热系数。

在基于膨润土、水泥、石英砂等材料的情况下,国内研究者对于回填材料的配比进行进一步室内试验与现场研究。王雯璐等<sup>[17]</sup>对回填材料添加剂的配比进行了试验,研究结果表明,为了保证材料导热性能良好的前提下,使回填材料具有较好的流动性和膨胀性,增加其换热能力,最优配比为水:水泥:膨润土:石英砂:膨胀剂:减水剂=0.55:1:0.01:2:0.06:0.014。同时结合室内试验发现,其主要影响因素依次为骨料量、干密度和孔隙程度。王冲等<sup>[18]</sup>同样发现骨料含量、干密度和孔隙程度共同决定回填材料的导热系数。庄迎春等<sup>[19-20]</sup>研究发现为了获得热传导能力较强的回填材料,应使其含砂量达到80%,水灰比为0.45。研究者通过对于两种不同粒径的砂粒进行传热性能测试,试验指出中粗砂换热孔填料的换热量在制热工况下比粉细砂填料更高<sup>[21]</sup>。刘湘云等<sup>[22]</sup>对粘土和沙子作为不同回填土时进行测试。证明了在相同含水率条件下,混凝土的导热系数最大,粘土的导热系数最小。用沙子比粘土作为

回填土的换热量更大。刘冬生等<sup>[23]</sup>指出由于地下水的迁移,更有利于在富水地层中的热交换,膨润土基、水泥基回填材料的热导率随含砂量的增加而增加。

此外,学者们尝试加入废钢渣来提高回填材料的导热性能。费一超等<sup>[24]</sup>通过添加废钢渣来改善回填材料的施工性能,最大增幅可达81.9%,并且可以大幅提升回填材料的物理力学性能,但会降低其传热性能。邹玲等<sup>[25]</sup>也选用废钢渣作为回填材料添加剂进行研究。研究指出当按一定比例控制粗钢渣代砂率、钢渣粉代水泥率时,回填材料表现出的综合性能优良。

综上所述,水泥、膨润土与石英砂为控制回填材料导热性能的重要因素。不同水灰比、骨料粒径及含量对于干密度、孔隙率、含水率和环境温度等因素影响很明显。回填材料中水泥的水灰比越高,导热性能越差,较优的水灰比配比为0.45;随着膨润土的增加,回填材料的导热性能先增加后降低;砂的导热性能往往优于粘土,含砂量越高或砂粒径越大,且砂的均匀性越好,其导热系数越高。但导热系数并不是越高越好,因U形管支管之间产生的热干扰,过高的导热系数可能会导致钻孔土壤发生热短路,影响整个系统的导热能力。因此,采用与周围地层相近且导热系数略高于周围地层的材料为更优的选择,当导热系数为2~4 W/(m·K)时最为合理。

### 2.2 力学性能

回填材料的除有导热作用外,另一重要作用是密封钻孔,所以回填材料自身要有足够的强度。第二,为了防止地下水被污染,还要求材料在回填后具有良好的密封性。最后,具有一定的膨胀性对于回填材料也很必要,其可以使回填材料与埋管结合效果良好<sup>[3]</sup>。所以在回填材料有优良的导热性能下,应同时具备一定的物理力学性能。

研究者加入不同类型的石墨材料来提高回填材料的导热性能,但会降低其力学强度。INDACOE-CHEA-VEGA I等<sup>[26]</sup>采用的回填材料由不同比例的水泥、膨润土、石英砂、石墨构成,试验指出因加入石墨作为添加剂,回填材料的导热系数增加,但抗压强度降低,且过高的水灰比会使得回填材料导热系数与抗压强度降低。

后有研究者对于石墨的选取与配比进行了深入试验,力图改善石墨对于回填材料力学性能的影响。

响。EROL S等<sup>[27]</sup>研究了不同类型石墨材料对回填材料力学性能的影响情况,结果表明,选取粒径为150  $\mu\text{m}$ 的人造石墨可以改善回填材料的力学性能,并且提高抗压强度。

因此,加入石墨等添加剂虽然会对回填材料的导热性能有所提高,但有时却大幅降低了其力学强度,降低了抗渗性能,可能造成地面沉降与孔内安全事故。

### 2.3 工程特性

为了保证回填材料在拌合、施工等技术条件下,同样可以保持优良的性能,对于其施工性能也要严格控制。同时,要填充钻孔间空隙,并且使换热器与地层接触良好,增强导热能力,就要选择流动性与保水性同样优良的回填材料<sup>[3]</sup>。

回填材料在满足导热性能的前提下,同样要保证施工过程的简便与安全,保证回填材料的流动性、稠度与保水性。若加入粉煤灰为添加剂,虽然改善了回填材料的流动性,但对其强度会产生影响。陈卫翠等<sup>[28]</sup>选用粉煤灰作为回填材料添加剂进行研究。研究表明,40%以内含量的粉煤灰可以较好地改善回填材料的流动性,但随着粉煤灰含量的不断增加,可能会一定程度上降低回填材料的力学强度。

通过软件计算,回填材料对换热孔总长的影响是有限的。因此工程应用中,不是导热系数越高越好,还要考虑经济性<sup>[12]</sup>。

王向岩等<sup>[29]</sup>利用超强吸水树脂作为回填材料的添加材料,通过试验证明该回填材料在某些干旱等特定条件下可以大幅提高土壤的导热系数,且可以提高单位管长的换热量。陈燕民等<sup>[30]</sup>指出地下岩土体物理化学性质与采用的回填材料适配性也尤为重要。在地下土层含水量较高的地区通常使用砂石类回填材料,而在地下土层含水量较低地区多用膨润土基回填材料。

## 3 回填材料存在的问题及未来发展的趋势

### 3.1 现存的问题

虽然回填材料导热系数越高,换热效果越好,但是“热短路”现象产生的原因正是回填材料有过高的导热系数。在回填材料导热系数约为周围土壤导热系数2倍时,提高回填材料的导热系数对于换热量几乎没有提升且成本控制问题凸显<sup>[31]</sup>。

在地源热泵的回填材料中,虽然通过一系列的

配方的改进或添加剂引入可以较大幅度提升其导热系数,但是过高的导热系数会造成热短路现象,并带来力学性能与施工性能大幅降低等一系列不良后果。同时,大量添加剂的引入导致成本控制困难,经济效益降低。因此,在控制回填材料的导热系数的同时,保证其各方面性能的优良,并且取得较高的经济效益成为了在回填材料研究时面对的重要问题。

### 3.2 未来发展的趋势

通过模拟计算,为了提高地源热泵的工作效率,采用高潜热的相变材料作为回填材料是一种提高工程效率的潜在且有效的方法。在温度较低的地区可以采用相变温度较高的回填材料,反之相变温度低的材料在温度较高的地区更适用<sup>[32]</sup>。

相变材料(PCM——Phase Change Material)是一种能在恒温条件下改变物质状态并提供潜热的材料。因为当此类相变材料的物理状态发生变化时,材料本身可以吸收或释放相当大的潜热,同时可以使温度几乎保持不变。因此,相变材料作为目前最有前途的储能方法之一,可以在满足能源供应的基础上,提高能源利用率。

首先,很多欧洲研究者对于相变材料做出相应的试验研究。Lane A<sup>[33]</sup>研究出潜热大的新型相变材料,为此类材料研发提供了很多理论基础;K K<sup>[34]</sup>通过试验得出了最适合做相变材料为在较低温度下的石蜡、水合盐类和包合盐;Feldman D等<sup>[35]</sup>研制出了一种新的相变储能石膏板;Neeper D A<sup>[36]</sup>将脂肪酸和石蜡作为相变材料并通过实验测试其温度的变化情况。Huanpei Zheng等<sup>[37]</sup>通过可视化实验对比研究石蜡在泡沫铜和无泡沫铜的熔化行为,得出了泡沫铜可以降低石蜡内部热阻,显著增强泡沫铜/石蜡相变材料温度分布的均匀性。John A. Nöel等<sup>[38]</sup>通过利用氧化铝等多种不同的基质和聚己基共聚物制备各种形状稳定的相变材料,发现了虽然基体对相变材料的熔点没有明显的影响,但却控制了相变材料的填充量、导热系数和力学性能。

此外,国内研究人员也对相变材料做出了深入研究。吴越超<sup>[39]</sup>制备了潜热为172 J/g的相变材料;张鸿声等<sup>[40]</sup>则认为纳米粉末虽不会降低相变材料温度,却会一定程度上降低其潜热,因此其在石蜡相变材料中加入纳米铜粉,制备了稳定的NC-PCM,DSC测试验证了此项结论。在将相变材料作为回填材料的研究领域中,薛彦超等<sup>[41]</sup>认为相变材料具

有明显的导热性能优势,其导热性能与目前新兴的PE-RTII预制直埋保温管相当。吴越超<sup>[39]</sup>相变材料回填在地源热泵可行性分析实验结果表明,在使用相变材料进行回填之后,周期内单井供热量有所提高,并且土壤温度可以在一定时间内快速恢复,不会影响下一周期的运行。但是由于相变材料导热系数比较小,会影响地源热泵的换热能力,因此为了选择合适适量的相变材料,必须综合考虑优化传热和蓄能,找出最佳的配比<sup>[42]</sup>。杨卫波等<sup>[43]</sup>通过建立PCM回填埋管换热器相变传热数学模型,发现土壤温度与土壤热响应特性受PCM的导热性影响较大,并且PCM的回填可以有效地提高土壤温度恢复率。李启宇<sup>[44]</sup>对比了相变回填与普通回填材料,发现相变回填可以减少热短路作用和热影响半径,其低热导率可使单位井深的换热量减少,因此回填材料在地源热泵中的使用具有一定的优势。

笔者认为在未来的工程领域中,利用相变材料可能会成为解决回填材料在导热性能优良时,力学性能降低的重要方法。另外,虽然目前的相变材料相比于其他类型回填材料已经在导热系数、提供潜热方面有明显优势,但由于目前国内外对于此材料研究尚少,其仍存在导热系数低、稳定性差以及成本较高等普遍问题,因此未来需要根据不同的目的制备出具有适宜的相变温度、相变潜热、低成本且化学性质较稳定的相变材料,以实现相变材料在各个领域的研究与应用。最后,由于近年来信息技术的快速发展,数值模拟软件应用越来越广泛,在一定条件下,若能提前对于相变材料进行数值模拟分析,找出影响其性能的关键因素,同时与室内试验与现场应用紧密结合,必然会对于相变材料的研发与未来工程的应用起到显著作用<sup>[45-46]</sup>。

#### 4 结语

本文综述了地源热泵系统中的回填材料的研究,因其应用范围广、针对性突出、对热能采取起到关键作用而受到众多学者的广泛关注。针对当前进展,做出如下总结与建议:

(1)针对地源热泵的回填材料的导热性能,已有大量多内外学者做出研究并尝试使用不同材料与添加剂,使其导热系数有较大幅度提高。在此基础上,又对回填材料及其添加剂的配比进行了大量试验,认为水泥的水灰比越高,导热性能越差,较优的水灰比

配比为0.45;随着膨润土的增加,回填材料的导热性能先增加后降低;砂的导热性能往往优于粘土,含水量越高或砂粒径越大,且砂的均匀性越好,其导热系数越高。

(2)在对回填材料的力学性能与施工性能的研究中,若过于强调回填材料的导热性,可能会导致其强度、流动性、稠度及保水性的降低。此外,过高的导热系数会使U形管产生热短路,导致整个地源热泵系统效率降低,所以研发回填材料时,在考虑其导热性能的同时,也要兼顾其优良的力学及施工性能,保证施工安全与便捷。

(3)当前地源热泵系统的回填材料发展迅速,众多科研机构、公司等都已进行了很多关于回填材料的研发,并取得了大量成果。但回填材料在应用过程中还存在着一些问题,不能实现很高的热交换率与较低的成本控制的平衡。因已有较多机构对于相变材料进行了深入探究,所以研究将相变材料作为回填材料,并结合数值模拟与现场勘测相结合的方式,不论是在导热性能还是在经济建设中,在本领域都有较好的发展前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 陶庆法,胡杰.浅层地热能开发利用现状、发展趋势与对策[C]//全国地热(浅层地热能)开发利用现场经验交流论文集.2006. TAO Qingfa, HU Jie. The current situation, development trend and countermeasures of shallow geothermal energy development and utilization [C]//Proceedings of the National Geothermal (Shallow Geothermal Energy) Development and Utilization Field Experience Exchange Meeting. 2006.
- [2] 王冲.地源热泵回填材料优化集成及导热特性研究[D].绵阳:西南科技大学,2014. WANG Chong. Research on optimization integration and thermal conductivity of backfill materials for ground source heat pumps [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2014.
- [3] 王松松,刘光远,杨卫波.地源热泵钻孔回填材料的特点及其研究进展[J].能源技术,2010,31(6):343-346,350. WANG Songsong, LIU Guangyuan, YANG Weibo. Characteristics and research progress of borehole backfill materials for ground source heat pumps [J]. Energy Technology, 2010, 31 (6):343-346,350.
- [4] PAHUD D, MATTHEY B. Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ[J]. Energy and Building, 2001, 33 (5):503-507.
- [5] BORINAGA-TREVIÑO R, PASCUAL-MUÑOZ P, CASTRO-FRESNO D, et al. Borehole thermal response and ther-

- mal resistance of four different grouting materials measured with a TRT[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53(1):13-20.
- [6] BORINAGA-TREVIÑO R, PASCUAL-MUÑOZ P, CASTRO-FRESNO D, et al. Study of different grouting materials used in vertical geothermal closed-loop heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1):159-167.
- [7] ALRTIMI A A, ROUAINIA M, MANNING D A C. Thermal enhancement of PFA-based grout for geothermal heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(2):559-564.
- [8] KAVANAUGH S P, ALLAN M L. Testing of thermally enhance cement ground heat exchanger grouts [J]. *ASHARE Trans*, 2000, 106(2):446-450.
- [9] LEE CHULHO, LEE KANGJA. Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea[J]. *Technological Sciences*, 2010, 1(3):123-128.
- [10] Sanner B, Mands E, Sauer M K. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany[J]. *Geothermics*, 2003, 32(4/6): 589-602.
- [11] 包强, 邓启红, 牛润卓. 回填材料对土壤热泵U型埋管换热器性能的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2007, 26(4):64-67.  
BAO Qiang, DENG Qihong, NIU Runzhuo. The influence of backfill materials on the performance of U-shaped buried tube heat exchanger of soil heat pump[J]. *Building Thermal Ventilation and Air Conditioning*, 2007, 26(4):64-67.
- [12] 马志强. 埋管地源热泵系统垂直井孔回填材料研究[J]. *工程勘察*, 2010(S1):802-808.  
MA Zhiqiang. Research on the backfill material for the vertical wellbore of the ground-source heat pump system with underground pipes[J]. *Engineering Investigation*, 2010(S1): 802-808.
- [13] 刘玉旺, 于明志, 王淑香, 等. 埋管换热器回填材料导热系数实验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2009, 24(5):449-453.  
LIU Yuwang, YU Mingzhi, WANG Shuxiang, et al. Experimental research on thermal conductivity of backfill material for underground heat exchanger [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2009, 24(5):449-453.
- [14] 连小鑫, 刘金祥, 陈晓春. 土壤源热泵垂直U型埋管换热的数值模拟[J]. *建筑热能通风空调*, 2009, 28(4):45-47, 66.  
LIAN Xiaoxin, LIU Jinxiang, CHEN Xiaochun. Numerical simulation of heat transfer of ground source heat pump vertical U-shaped buried pipe[J]. *Building Thermal Ventilation and Air Conditioning*, 2009, 28(4):45-47, 66.
- [15] 司刚平. 地源热泵回填料的导热性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
SI Gangping. Research on thermal conductivity of backfill for ground source heat pump [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [16] 郑秀华, 司刚平, 周复宗, 等. 地源热泵换热孔灌浆材料导热性能实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6):101-103.  
ZHENG Xiuhua, SI Gangping, ZHOU Fuzong, et al. Experimental study on thermal conductivity of grouting materials for heat exchange holes of ground source heat pumps[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, 33(6):101-103.
- [17] 王雯璐, 吴焯, 陈莹, 等. 地源热泵回填材料配比优选室内试验研究[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(6):141-144.  
WANG Wenlu, WU Ye, CHEN Ying, et al. Laboratory test study on optimization of backfill material ratio of ground source heat pump[J]. *Hydropower Energy Science*, 2014, 32(6):141-144.
- [18] 王冲, 易发成, 吴利. 垂直埋管地源热泵膨润土基钻孔回填材料导热特性研究[J]. *中国建材科技*, 2014, 23(1):48-50.  
WANG Chong, YI Facheng, WU Li. Study on the thermal conductivity of bentonite-based drilling backfill material for vertical underground pipe ground-source heat pump [J]. *China Building Materials Science and Technology*, 2014, 23(1):48-50.
- [19] 庄迎春, 孙友宏, 谢康和. 直埋闭式地源热泵回填土性能研究[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(2):216-220.  
ZHUANG Yingchun, SUN Youhong, XIE Kanghe. Research on backfill performance of directly buried closed ground source heat pump[J]. *Acta Energia Sinica*, 2004, 25(2):216-220.
- [20] 庄迎春, 谢康和, 孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(2):261-269.  
ZHUANG Yingchun, XIE Kanghe, SUN Youhong. Experimental study on the thermal conductivity of sand-soil mixed materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2):261-269.
- [21] 齐承英, 王华军, 王恩宇. 不同回填材料下埋管换热器性能的实验研究[J]. *暖通空调*, 2010, 40(3):79-82.  
QI Chengying, WANG Huajun, WANG Enyu. Experimental research on the performance of geothermal heat exchangers for different backfill materials [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2010, 40(3):79-82.
- [22] 刘湘云, 陈颖, 赖康平, 等. 地源热泵埋地换热器回填土的实验研究[J]. *流体机械*, 2007(8):60-62.  
LIU Xiangyun, CHEN Ying, LAI Kangping, et al. Experimental research on backfilling soil of ground source heat pump buried heat exchanger[J]. *Fluid Machinery*, 2007(8):60-62.
- [23] 刘冬生, 孙友宏, 庄迎春. 增强地源热泵垂直埋管地下换热器换热性能的研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(4):648-652.  
LIU Dongsheng, SUN Youhong, ZHUANG Yingchun. Study on enhancing the heat transfer performance of ground-source heat pump vertical buried underground heat exchanger[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(4):648-652.
- [24] 费一超, 周亚素, 赵灵运, 等. 复合添加剂对埋管回填材料综合性能的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(6):966-972.  
FEI Yichao, ZHOU Yasu, ZHAO Lingyun, et al. Effects of composite additives on the comprehensive performance of buried pipe backfill materials [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2018, 44(6):966-972.
- [25] 邹玲, 王伟山, 郑柏存, 等. 地源热泵系统中水泥基灌浆材料性能优化[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(4):134-138.  
ZOU Ling, WANG Weishan, ZHENG Bocun, et al. Performance optimization of cement-based grouting materials in ground source heat pump systems [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2013, 40(4):134-138.

- [26] INDACOECHEA-VEGA I, PASCUAL-MUÑOZ P, CASTRO-FRESNO D, et al. Experimental characterization and performance evaluation of geothermal grouting materials subjected to heating-cooling cycles[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98(1):583-592.
- [27] EROL S, FRANÇOIS B. Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1):788-799.
- [28] 陈卫翠,刘巧玲,贾立群,等.高性能地埋管换热器钻孔回填材料的实验研究[J].暖通空调,2006,36(9):1-6.  
CHEN Weicui, LIU Qiaoling, JIA Liqun, et al. Experimental research on drilling and backfilling materials for high-performance underground heat exchangers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(9):1-6.
- [29] 王向岩,马伟斌,黄远峰,等.超强吸水树脂与源土混合作为地源热泵供热系统回填材料的实验研究[J].太阳能学报,2007, 28(1):23-27.  
WANG Xiangyan, MA Weibin, HUANG Yuanfeng, et al. Experimental study of super absorbent resin mixed with source soil as backfill material for ground source heat pump heating system[J]. Acta Energetica Sinica, 2007, 28(1):23-27.
- [30] 陈燕民,张文秀,王吉标,等.浅析地源热泵空调系统之土壤换热器[J].工程建设与设计,2007(1):14-18.  
CHEN Yanmin, ZHANG Wenxiu, WANG Jibiao, et al. Analysis on the soil heat exchanger of ground source heat pump air conditioning system[J]. Engineering Construction and Design, 2007(1):14-18.
- [31] 朱声浩,王鹏,王寿川,等.回填材料导热性能对地埋管性能的影响研究[J].家电科技,2016(S1):192-196.  
ZHU Shenghao, WANG Peng, WANG Shouchuan, et al. Study on the effect of thermal conductivity of backfill material on the performance of buried pipe[J]. Home Appliance Technology, 2016(S1):192-196.
- [32] 杨卫波,孙露露,吴暄.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 Weibo, SUN Lulu, WU Xuan. Energy storage and heat transfer characteristics of buried pipe heat exchanger backfilled with phase change materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24):193-199.
- [33] Lane A. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling [J]. Solar Energy Materials Solar Cells, 1992, 27(2):135-160.
- [34] K K. Eigenschaften und Anwendungen Möglichkeiten von Latentwärmespeicher [R]. Berghausen: Institut fuer Chemie Fer Treib-Exple-und-, 1979.
- [35] Feldman D, Banu D, Hawes D. Low chain esters of stearic acid as phase change materials fo thermal energy storage in buildings [J]. Solar Energy Materials Solar Cells, 1995, 36(3):311-322.
- [36] Neeper D A. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage[J]. Solar Energy, 2000, 68(5):393-403.
- [37] Huanpei Zheng, Changhong Wang, Qingming Liu, et al. Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2018(157):372-381.
- [38] John A. Noël, Marry Anne White. Freeze-cast form-stable phase change materials for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials & Cells, 223(2021)110956.
- [39] 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 Yuechao. Feasibility analysis of the ground source heat pump backfilling with phase change materials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [40] 张鸿声,汪南,朱冬生,等.纳米铜粉/石蜡复合相变储能材料的性能研究[J].材料导报,2011,25(S1):173-176,189.  
ZHANG Hongsheng, WANG Nan, ZHU Dongsheng, et al. Study on performance of nano-copper/paraffin wax composite phase change material[J]. Materials Reports, 2011, 25(S1):173-176, 189.
- [41] 薛彦超,贾生廷,王保强.PE-RT II型耐热塑料保温管技术性及应用[J].煤气与热力,2015,35(11):25-27.  
XUE Yanchao, JIA Shengting, WANG Baoqiang. Technical characteristics and application of PE-RT II type heat-resistant plastic insulation pipe[J]. Gas & Heat, 2015, 35(11):25-27.
- [42] FJ Lenarduzzi, CBH Cragg, HS Radhakrishna. The importance of grouting to enhance the performance of earth energy systems[R]. Toronto, Ontario: Ontario Power Technologies, 2000.
- [43] 杨卫波,徐瑞,杨晶晶,等.相变材料回填地埋管换热器热响应特性的数值模拟及试验验证[J].流体机械,2019,47(7):72-79,60.  
YANG Weibo, XU Rui, YANG Jingjing, et al. Numerical simulation and experimental validation of the thermal response characteristics of ground heat exchanger with PCM backfill[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(7):72-79, 60.
- [44] 李启宇.相变材料回填的埋管的热传特性研究[D].上海:东华大学,2014.  
LI Qiyu. Study on heat transfer characteristics of phase change material backfilling ground source heat pump [D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [45] 孟祥瑞,孙友宏,王庆华,等.大广高速公路双辽服务区地源热泵系统地层热物性原位测试[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(1):47-50.  
MENG Xiangrui, SUN Youhong, WANG Qinghua, et al. In-situ testing of thermophysical properties of ground thermal pump in Shuangliao Highway Service Station[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(1):47-50.
- [46] 陈浩,赵华宣,贾玉川,等.贵州岩溶疏干区浅层地热能地埋管施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):170-177.  
CHEN Hao, ZHAO Huaxuan, JIA Yuchuan, et al. Placement of shallow geothermal heat pipes in the dewatered karst area of Guizhou province [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):170-177.