

地埋管换热孔回填材料研究进展与展望

赵泓桥^{1,2} 赵宣善¹ 陈华洋¹ 陈博文¹ 贾玉贵^{1,2}

1. 河北建筑工程学院 河北张家口 075000

2. 河北省可再生能源供热工程研究中心 河北张家口 075000

摘要: 地源热泵 (GSHP) 系统作为一种高效清洁的可再生能源利用技术, 因其运行稳定、节能环保等优势在全球范围得到广泛推广。换热孔回填材料是影响其热性能与运行效率的关键因素之一, 其导热性能、力学稳定性与环境适应性对系统综合性能具有重要影响。本文系统梳理了当前国内外在地埋管换热孔回填材料方面的研究进展, 按材料类型将其分为膨润土类、水泥砂浆及其复合增强材料、相变材料 (PCM) 等类别, 重点分析了其热物理性能差异及导热系数提升策略。本文研究有助于指导地源热泵系统中高性能回填材料的设计与应用, 推动其在绿色建筑与可持续城市能源系统中的广泛部署。

关键词: 地源热泵; 换热孔; 回填材料;

引言

地源热泵 (Ground Source Heat Pump) 作为一种高效、节能、可再生的地热能利用技术, 近年来在全球范围内受到广泛关注。地埋管换热器为间壁式换热器, 换热器两侧的换热介质为流体与固体, 这与两侧均为流体的换热器存在本质的区别, 由于固体的导热能力远小于流体的对流换热能力, 故影响地埋管换热器换热能力的瓶颈是固体侧换热介质。固体侧传热能力取决于回填材料及土壤导热能力, 地埋管区域土壤导热能力取决于地质条件, 无法人为改变。因而换热孔中所填充的回填材料则对系统热响应性能起到决定性作用。

在传统 GSHP 系统中, 回填材料主要起到填充空隙、固定埋管、阻止地下水短路和提供热传导路径的功能。其中材料的导热系数、热稳定性、密实度和耐久性 etc 属性直接影响换热孔的总热阻^[1]。而热阻大小决定了单位深度埋管的换热效率, 从而影响系统整体能效比 (COP) 与运行成本。因此, 选择与优化高性能回填材料已成为 GSHP 研究的热点。

本综述旨在汇总近年来中英文文献中有关换热孔回填材料的研究成果, 涵盖常见材料分类、热性能增强方法与绿色低碳回填体系设计, 并在此基础上提出未来的发展方向与研究建议。

1 地源热泵系统与回填材料基础概念

地源热泵技术是一种利用地表浅层地热资源 (一般深度 30 - 300 米) 进行冷热调节的高效能源系统。与传统空调系统相比, GSHP 系统依赖地下恒温环境进行换热, 因而具

有更高的季节性能系数和更低的碳排放。在该系统中, 地下换热孔及其回填材料构成了系统性能的关键基础设施, 对其热效率与长期稳定性起决定性作用^{[2]-[3]}, 回填材料不仅应具备优良的导热性和施工适应性, 还需在干湿、冻融环境下保持稳定性能^[4]。

1.1 地源热泵系统基本组成与工作原理

典型的地源热泵系统由地埋管换热系统 (地下侧)、热泵主机 (室内侧)、以及室内空气调节装置组成。其中, 地下侧换热系统通过 U 型或双 U 型高密度聚乙烯管道将热泵与地下热环境连接。循环工质在管内循环流动, 实现地层与建筑物之间的热量交换, 冬季: 从地层吸热, 经热泵压缩后为建筑供暖; 夏季: 将建筑热量释放到地层, 实现制冷。

整个系统的运行效率极大程度依赖于地下换热单元的传热能力, 尤其是管道外部包覆的回填材料热性能^[1]。高导热性能的回填材料对于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。回填材料导热能力宜稍强于地下岩土体的导热能力^[5]。

1.2 换热孔结构与热阻构成

地源热泵的换热孔通常为竖直钻孔, 孔径一般为 110 - 200mm, 深度根据负荷需求可达几十至数百米。换热孔内结构主要由: 埋管 (U 型、螺旋型等); 循环流体; 回填材料; 孔壁与周围地层。

这几层结构共同组成了换热路径, 其中回填材料位于管道外壁与钻孔壁之间的环状空间, 不仅起到机械固定与密

封作用,更直接影响换热孔单位深度的热阻。

根据研究,换热孔的热阻可以表示为以下复合模型:

$$R_b = R_{pipe} + R_{grout} + R_{contact} + R_{ground}$$

其中 R_{grout} 受回填材料导热系数、注浆密实度、含水率、均匀性等因素影响最显著,是系统热阻优化的重点对象^[6]。

1.3 回填材料的作用机制与性能指标

理想的换热孔回填材料应同时具备以下几个功能:高导热性:降低埋管至地层的热阻,提升系统换热效率;良好流变性能:满足泵送、注浆、施工工艺要求;稳定性与兼容性:在地层环境中长期稳定、与管道及地层无化学反应;环保经济性:材料来源可持续、施工成本适中。

在热工性能方面,材料的导热系数是衡量其热传导能力的核心指标,通常单位为 $W/(m \cdot K)$ 。为满足 GSHP 工程需求,材料导热系数应不低于 $1.0 W/(m \cdot K)$ 。此外,还需考虑材料的热容量(比热容)、密度与耐久性,尤其是在换热强度变化较大或地质条件复杂的地区^[7]。

2 材料分类与热性能对比

2.1 膨润土类回填材料

膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的天然层状硅酸盐矿物,具有良好的吸水性、可注浆性和一定的膨胀性。在早期的地源热泵工程中,膨润土因其低成本、良好的流动性和便于施工等优点,被广泛用作换热孔的回填材料。

然而,从热性能角度来看,膨润土存在显著不足。其导热系数通常仅在 $0.4 - 0.6 W/(m \cdot K)$ 左右,远低于水泥砂浆类或增强复合材料。这种较低的导热能力会导致换热孔热阻偏高,限制地源热泵系统的热响应效率与长期运行性能^[3]。

此外,膨润土在吸水膨胀后形成的密实结构虽然在防止地下水短路方面具有一定优势,但也可能在干湿交替过程中产生结构松散、热接触不良等现象,影响其长期稳定性。Jiang 等指出,在某些热响应测试项目中,使用膨润土填充的 BHE 孔洞出现热阻增加趋势,其原因可能与材料的孔隙率、含水率波动密切相关^[8]。从环境角度看,膨润土属天然矿物材料,开采过程中对生态破坏相对较小,且本身具有较好的可降解性与环境兼容性。然而,考虑其在提高系统能效方面的局限性,当前正逐步将其作为复合材料基体,通过混合其他高导热颗粒(如石英粉、石墨、金属氧化物)来提升其综合性能。例如, Han 等将膨润土与工业固废粉体复配制成注浆材料,测试显示其导热系数最高可达 $1.5 W/$

$(m \cdot K)$,且满足泵送流变性能要求^[7]。LEE CHULHO 等分析了含 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^[9]。BORINAGA-TREVIÑO R 等分析了 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^[10-11]。

综上所述,膨润土作为回填材料具有施工简便、资源丰富和环境友好的优势,但受限于其本征热性能,在现代 GSHP 系统中越来越多地被复合型热增强浆料所替代。未来其应用趋势主要集中于与其他导热增强组分的协同设计,提升其在经济性与性能之间的综合性价比。

2.2 水泥砂浆与复合改性材料

随着地源热泵系统对热效率要求的不断提升,传统导热性能较低的膨润土类材料已难以满足高效换热的需求。在此背景下,水泥砂浆因其较高的导热性、力学强度及良好的流变性能,逐步成为现代换热孔回填材料的主流选择之一。

2.2.1 常规水泥砂浆材料性能

普通水泥砂浆回填材料主要由水泥、水和骨料组成,部分配方中加入适量石英粉、砂或其他矿物填料以调节流动性与初始热导率。其导热系数通常可达 $0.8 - 1.2 W/(m \cdot K)$,显著高于膨润土的热导水平^[12]。此外,水泥砂浆具有优良的填隙能力与硬化后结构稳定性,有助于形成连续均匀的热传导路径,从而降低埋管周围的热阻。例如:庄迎春等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 $0.45^{[13]-[14]}$ 。刘玉旺等通过研究发现, P. 0.42.5 水泥的导热系数较 P.0.32.5 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^[15]。

然而,普通水泥砂浆的导热能力仍不足以充分满足高能换热系统的需求,因此,研究者开始尝试将各种热增强填料引入水泥基体系,形成复合改性材料,以进一步提升其热性能。

2.2.2 热增强复合材料研究进展

目前常见的热增强填料包括:石墨、石英粉、硅砂、

金属氧化物（如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ）、纳米材料（如石墨烯、碳纳米管）等。这些填料通过增强基体导热网络，提高了材料的整体热传输能力。Moya-Rico 等研究表明，在普通水泥浆中加入质量分数为 5% 的石墨烯纳米片可将导热系数由 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 提升至 $2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，同时保持可接受的流变与泵送性能^[16]

此外，王皓宇等研究了 PHC 能源桩中石墨体积分数对 PCM 换热性能的影响，发现石墨掺量提高可显著增加进出口温差，加快材料相变速率，桩身温度沿轴向变化更为均匀，强化了传热稳定性^[17]。Han 等进一步提出，结合工业副产品如粉煤灰、钢渣与传统水泥，可制备出兼具环保性和高热性能的新型绿色浆料。其中一种石英粉-钢渣-硅灰复配体系在实验中实现了 $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的稳定导热性能，并具备良好的耐久性和抗化学腐蚀能力^[7]。KAVANAUGH S P 等采用细硅石、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 $3.29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[18]。ALRTIMI A A 等采用的回填材料是由水泥、平均密度在 $2.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ 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 $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加到 $2.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，干燥导热系数从 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加到 $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[19]。杨珍等通过现场热响应试验和数值模拟，对四种典型回填材料（中细砂、中细砂+水泥、中细砂+膨润土、原浆）在郑州示范工程中的导热差异进行实证分析，结果表明中细砂在取热与排热状态下均表现出卓越的导热性能，单位深度换热量最大（分别为 $47.38 \text{ W}/\text{m}$ 和 $48.52 \text{ W}/\text{m}$ ），且其热影响半径最小，验证了高导热性填料的工程实用性^[20]。

2.3 相变材料回填材料

随着地源热泵系统在建筑节能与可再生能源利用中的广泛应用，研究者对换热孔回填材料的功能性提出了更高的要求。除了提升导热性外，材料的热稳定性、储热能力与智能响应特性也逐渐成为研究焦点。在此背景下，相变材料作为新一代热增强机制，被逐步引入到回填材料体系中。

相较于传统填料，PCM 具有在相变过程中吸收或释放大潜热的特性，可用于实现地热能“热缓冲”与“能量平衡”，特别适用于建筑热负荷变化显著的地区；针对不同

季节选择适宜相变温度的 PCM，可优化换热效果；具有高潜热的 PCM 可增强热蓄能力，对减小热影响半径与维持换热效率尤为有效。当环境温度高于 PCM 的熔点时，它吸热熔化，从而抑制热峰值；而在低温时释放储存热量，有助于地层热量的再生^{[21]-[22]}。

何伟等人提出并制备了癸酸-月桂酸/膨胀石墨复合相变材料，并通过数值模拟得出膨胀石墨与脂肪酸的最佳质量比为 10:100，有效提高了埋管换热，其中含有 50% 相变材料的回填系统提高了 11.07% 的换热量^[23]。杨晶晶通过研究得出混合酸与油酸按不同配比作为相变回填材料可显著提升埋管换热器的蓄热性能，优化换热效率，减小热影响范围^[24]。陈仪侠进一步从相变复合材料（如 CA-LA/EG）角度出发，通过砂箱实验与现场热响应试验结合研究发现，高导热率 PCM 不仅能降低孔内温度波动，提升热响应能力，还能在多周期运行中避免“热堆积”问题，验证其在长周期运行中的能效优势^[25]。

总的来说相变材料由于具备较高的储热能力、热稳定性和良好的温度均匀性，被认为是最具潜力的灌浆材料。然而，其主要问题在于热导率偏低。因此，建议采用复合型相变材料以提升其热导性能，并提高热能的储存与释放速率^[26]。

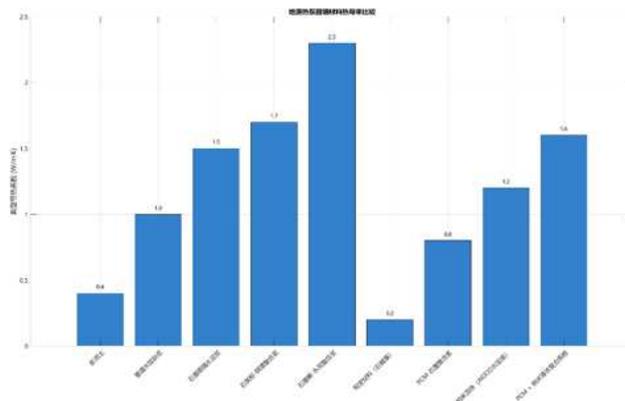


图 1 地源热泵回填材料热导率比较

3 未来研究趋势与展望

随着“双碳”战略深入实施和清洁建筑技术日益发展，地源热泵系统作为浅层地热能的典型应用形式，未来将在城市绿色能源系统中占据重要地位。作为系统热效能的关键组成部分，换热孔回填材料的性能水平将直接决定系统运行的经济性、能效性与可持续性。因此，未来的研究将不仅局限于提升导热系数，而将进一步拓展到功能集成、多尺度建模、环境智能响应等多维方向。

3.1 多功能复合回填材料开发

目前大多数回填材料仍以热性能提升为主目标, 尚未充分整合多功能需求。未来应着力开发“导热+储能+生态+监测”一体化的复合回填材料, 重点包括: 热-储能一体化材料: 将高导热骨料与相变材料(PCM)复合, 实现换热与短周期热储功能协同。自愈合与防渗功能: 通过添加水凝胶、自愈合微胶囊等成分, 在材料微裂纹产生时实现自动闭合, 保障长期密封性与结构稳定性。

3.2 标准体系与产业化路径探索

目前回填材料的性能评价缺乏统一标准, 阻碍了新材料在工程中的应用。未来应建立基于以下要素的综合评估指标体系: 热性能指标: 导热率、热容、热扩散率; 生态环保指标: 碳排放系数、可再生资源占比; 施工兼容性指标: 泵送性、凝结时间、化学稳定性; 生命周期成本指标: 初投资、运行节能、回收价值^[27]。Han 等建议构建以“性能-成本-环境”三维坐标为基础的回填材料设计空间图谱, 以便实现高性能材料的智能筛选与参数推荐^[7]。

3.3 总结性展望

回顾当前研究进展, 地源热泵换热孔回填材料正从“热增强”单一目标向“多性能协同+系统适配”方向快速发展。未来, 材料研究与数值模拟、系统优化之间的融合将日益紧密。随着政策、标准与工程技术的逐步完善, 高导热、低碳、高智能的回填材料将成为推动地源热泵系统高质量发展的核心力量之一。

4 结论

地源热泵作为实现“双碳目标”的重要绿色节能技术, 其系统效率在很大程度上依赖于地下换热孔的热响应性能。回填材料作为换热孔与地层之间的热桥, 其物理与化学性能对系统换热效率、施工可行性与环境影响具有直接而深远的影响。因此, 系统梳理与深入分析回填材料的发展现状、性能对比与未来趋势, 对推动 GSHP 技术工程化与高质量发展具有重要意义。

本综述从材料类型、导热性能增强策略、实验研究与建模方法、环境与经济性考量等角度, 对近年来国内外地源热泵换热孔回填材料的研究进展进行了系统归纳与分析。具体结论如下:

材料多样化趋势明显: 从传统的膨润土和水泥砂浆, 逐渐发展为包括石墨增强浆料、石英粉-钢渣复合材料、

相变材料(PCM)等在内的多功能复合材料体系, 导热系数显著提升, 最高可达 $2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 有效降低换热孔热阻。

热性能提升手段不断深化: 材料导热性能的提升不仅依赖填料种类, 还与粒径分布、界面结构、复合方式等因素密切相关。石墨烯、碳纳米管等高性能纳米材料展现出良好前景, 但其成本与施工兼容性仍需优化。

未来发展需多维突破: 下一阶段研究应聚焦于多功能复合材料设计、多尺度热响应建模、智能传感网络集成以及标准评价体系建设, 以实现回填材料从“导热增强”向“智能适配+绿色低碳+可视调控”的跨越。

综上, 地源热泵换热孔回填材料正处于从传统向智能、多维、高性能发展的关键阶段。通过持续的材料研发与工程应用反馈融合, 有望推动其在可持续建筑与城市能源系统中的更广泛应用, 助力构建清洁、高效、智慧的能源未来。

参考文献:

- [1] Erol S, François B. Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers[J]. Applied thermal engineering, 2014, 70(1): 788-799.
- [2] 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(08): 96-102.
- [3] 杨树彪, 周念清. 中国地源热泵发展历程分析[J]. 上海国土资源, 2017, 38(03): 57-61.
- [4] 王荣, 杨晨磊, 董世豪, 等. 回填材料热物性对地埋管换热器换热性能影响综述[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(04): 35-40.
- [5] 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, (04): 64-67.
- [6] Higashitani T, Ikegami T, Uemichi A, et al. Evaluation of residential power supply by photovoltaics and electric vehicles[J]. Renewable Energy, 2021, 178: 745-756.
- [7] Han N, Zhao Q, Huang T, et al. Analysis of the factors influencing the performance of medium - shallow borehole heat exchangers coupled with a ground source heat pump system[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2025, 44(3): e14614.
- [8] Xia X, Sun Y, Jiang S, et al. Strategic configuration of geothermal backfill materials using industrial solid waste for low-carbon building energy systems[J]. Journal of Building

Engineering, 2025, 99: 111628.

[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]BORINAGA-TREVIÑO R, PASCUAL-MUÑOZ P, CASTRO-FRESNO D, et al. Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53 (1): 13-20.

[11]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.

[12]Kaldal G S, Jonsson M T, Palsson H, et al. Structural modeling of the casings in the IDDP-1 well: Load history analysis[J]. Geothermics, 2016, 62: 1-11.

[13]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.

[14]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.

[15]刘玉旺, 于明志, 王淑香, 等. 地理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.

[16]Moya-Rico J D, Molina A E, Belmonte J F, et al. Experimental characterization of a double tube heat exchanger with inserted twisted tape elements[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115234.

[17]王皓宇, 张丹, 钱征宇. 相变回填材料中石墨体积分数对 PHC 能源桩换热性能的影响 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2024, 64 (05): 831-840.

[18]KAVANAUGH S P, ALLAN M L. Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts [J]. ASHARE Trans, 2000, 106 (2): 446-450.

[19]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.

[20]杨珍, 尚永升, 肖雄, 等. 基于实际工程的地理管地源热泵回填材料导热性能差异分析 [J]. 河南科学, 2024, 42 (05): 769-780.

[21]Calviño Barreiro U. Improvement of heat transfer and energy storage processes using nanoenhanced heat transfer fluids and PCMs[D]. Universidad de Vigo, 2025.

[22]杨卫波, 孙露露, 吴暄. 相变材料回填地理管换热器蓄能传热特性 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (24): 193-199.

[23]何伟, 赵万方, 郑晓宇. 新型相变材料回填的地理管传热特性研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40 (08): 18-24.

[24]杨晶晶, 杨卫波. 相变回填材料对比对地理管换热器蓄能传热特性影响研究 [J]. 建筑节能, 2020, 48 (01): 50-56.

[25]陈仪侠. 相变回填砂对地理管换热孔热学影响规律研究 [D]. 贵州大学, 2023. DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2023.001486.

[26]Mahmoud M, Ramadan M, Pullen K, et al. A review of grout materials in geothermal energy applications[J]. International Journal of Thermofluids, 2021, 10: 100070.

[27]Bulmez A M, Ciofoaia V, Năstase G, et al. An experimental work on the performance of a solar-assisted ground-coupled heat pump using a horizontal ground heat exchanger[J]. Renewable Energy, 2022, 183: 849-865.

作者简介: 赵泓桥 (2000—), 男, 汉, 在读硕士研究生, 主要从事可再生能源供热工程技术研究。