

地热能应用中的灌浆材料综述

蔡文豪, 杨永贵, 王章东, 杨宇

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月10日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

本文系统综述地热能应用中灌浆材料的研究进展。随着地热能作为稳定可再生能源的重要性日益凸显, 灌浆材料成为决定地热能系统性能的关键。传统膨润土和水泥基材料虽应用广泛, 但存在导热系数低、体积收缩等问题; 新型材料如地聚物水泥注浆料、工业废弃物基材料及添加石墨、铝屑等改性材料展现出优化潜力。水分含量、饱和度等因素显著影响灌浆材料热传导和力学性能, 高饱和度还可能引发冻结风险。当前研究聚焦材料性能优化、新型材料开发及工艺改进, 但仍面临高温高压适应性差、地质条件适配不足和环保要求高等挑战。未来需深化材料微观结构研究, 融合智能技术, 加强长期性能监测, 并推动环保型材料研发, 以支撑地热能产业可持续发展。

关键词

地热能, 地埋管换热器, 灌浆材料, 灌浆, 钻孔式换热器, 回填材料

A Review of Grout Materials in Geothermal Energy Applications

Wenhao Cai, Yonggui Yang, Zhangdong Wang, Yu Yang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 10th, 2025; accepted: Jun. 3rd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

This paper systematically reviews the research progress of grouting materials in geothermal energy applications. With the increasing importance of geothermal energy as a stable renewable energy source, grouting materials have become crucial in determining the performance of geothermal energy systems. Although traditional bentonite and cement-based materials are widely used, they have problems such as low thermal conductivity and volume shrinkage. New materials, such as geopolymers, cement grouting materials, industrial waste-based materials, and modified materials

with additives like graphite and aluminum chips, show the potential for optimization. Factors such as moisture content and saturation significantly affect the thermal conduction and mechanical properties of grouting materials, and high saturation may also pose a freezing risk. Current research focuses on optimizing material performance, developing new materials, and improving processes, but still faces challenges such as poor adaptability to high temperature and high pressure, insufficient adaptability to geological conditions, and high environmental protection requirements. In the future, it is necessary to deepen the research on the microstructure of materials, integrate intelligent technologies, strengthen the long-term performance monitoring, and promote the research and development of environmentally friendly materials to support the sustainable development of the geothermal energy industry.

Keywords

Geothermal Energy, Ground Heat Exchanger, Grouting Materials, Grouting, Borehole Heat Exchanger, Backfill Materials

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今,开发包含可再生能源的系统是一个不断发展的研究领域,旨在减少因燃烧化石燃料而产生的污染。最近,地热能(GE)因其与风能和太阳能等其他能源相比具有稳定性,被认为是最具吸引力的可再生能源之一。后两者具有随机性和间歇性的特点,而地热能几乎不受环境变化的影响。这种能源可用于在能源相关系统中吸收和释放热量。

地热能的开发利用形式多样,涵盖浅层地热能供暖制冷、中深层地热发电、地热温泉旅游等多个领域。在浅层地热能供暖制冷系统中,地埋管换热器通过与地下土壤进行热量交换,实现建筑物的冬季供热和夏季制冷;中深层地热发电则利用地下高温热水或蒸汽驱动汽轮机发电,为社会提供清洁电力;地热温泉旅游更是凭借独特的地热资源,吸引大量游客,带动地方经济发展。然而,无论是何种形式的地热能开发,都离不开一系列关键的工程技术环节,其中灌浆作业便是地热能开发过程中至关重要的一环。

灌浆材料作为地热能开发工程的核心组成部分,其性能优劣直接决定着地热能系统的运行效果、稳定性和使用寿命。在地埋管换热器系统中,灌浆材料填充于埋管与钻孔壁之间,其热传导性能直接影响地下土壤与埋管内流体之间的热量交换效率[1]。若灌浆材料热导率较低,会增加热阻,降低换热效果,进而影响整个供暖制冷系统的能效。在地热井建设过程中,灌浆材料用于固井作业,需填充井壁与套管之间的环形空间,良好的流动性和填充性可确保灌浆材料充分填充,增强井壁稳定性,防止井内流体泄漏;同时,其高强度与耐久性能够承受地层压力、机械振动以及高温高压等复杂环境的考验,保障地热井长期安全运行。此外,在其他地热能相关设施的构建中,灌浆材料的低收缩性、良好粘结性能、化学稳定性和环保性等特性,对于维持系统结构完整性、保护地下生态环境同样起着不可或缺的作用[2]。

尽管地热能开发前景广阔,但目前在灌浆材料的应用方面仍面临诸多挑战。不同地区地热能开发的地质条件、地下流体成分差异巨大,对灌浆材料的适应性提出了更高要求;高温、高压、高化学活性的复杂地热环境[3],也对灌浆材料的长期稳定性和耐久性形成严峻考验。因此,深入研究地热能应用中的灌浆材料,全面了解其性能特点、适用范围以及发展趋势,对于推动地热能高效开发利用、提升地热能产业竞争力具有重要的理论和现实意义。本文将围绕地热能应用中灌浆材料的性能要求、常见类型、研

究现状及未来发展趋势等方面展开综述，以期为地热能开发领域的相关研究和工程实践提供有益参考。

2. 灌浆

在地埋管换热器的安装施工中，管道与钻孔壁之间不可避免会产生间隙，这就需要回填材料对钻孔内部空间进行填充。回填材料的功能并非局限于填补空隙，它同时承担着构建高效传热通道、保护管道免受外力损伤的关键作用。作为连接管道与土壤的热传导媒介，回填材料的性能直接影响着地埋管换热器的换热效率与使用寿命[4]。

从传热性能优化角度来看，选择小颗粒材料作为回填介质能够有效增加材料与管道、土壤的接触面积，从而提升整体热容量。然而，颗粒粒径的减小必须在不牺牲材料导热系数的前提下进行[5]，因为导热系数是决定热量传递效率的核心参数。一旦因过度追求颗粒细化导致材料内部孔隙率增加或结构松散，反而会形成热阻，削弱传热效果[6]。

在实际工程应用中，粘土、粉砂和粗粒土是较为常用的回填材料类型。这些材料因颗粒级配与物理特性的差异，在传热性能、力学强度和施工适应性方面各有优劣[7]。例如，粘土颗粒细小，能够紧密填充间隙，但导热系数相对较低；粗粒土虽然导热性能较好，但可能因颗粒间空隙较大影响填充密实度。因此，根据地质条件与工程需求精准选择回填材料粒径至关重要。这不仅关系到回填材料的传热性能，还会直接影响钻孔式换热器的设计长度——合理的粒径选择能够优化传热效率[8]，减少因传热不足而额外增加钻孔深度的需求，从而有效控制工程成本与施工周期。

2.1. 常规灌浆材料

在地埋管换热器工程实践中，膨润土与水泥是两类最常用的传统灌浆材料，其热工性能差异显著且受多重因素影响。研究表明，荷载大小、垫片设置及灌浆层厚度均会改变材料的导热系数与热阻参数，工程设计时需综合考量这些变量对系统传热效率的影响[9]。

膨润土基灌浆材料以其独特的物理化学性质，在密封防渗领域展现出突出优势。钠基、钙基和钾基膨润土凭借低渗透性，常被用作地热能与水井系统的流体屏障。然而，其固有导热系数较低的缺陷限制了换热性能，工程中通常将其与水泥、石英砂、石墨等添加剂复配成混合灌浆材料。帕胡德和马蒂通过在六个钻孔中安装双U型地埋管换热器开展热响应测试，结果显示：在膨润土、水泥和石英等材料的对比中，石英砂与膨润土的混合物热阻最低[10]。膨润土的热性能对盐度变化极为敏感，高盐环境会引发膨润土显著体积收缩，导致钻孔填充不密实，进而降低地埋管换热器的整体传热效率。此外，材料密度与粘度差异也会影响回填施工的密实度，是实际工程中需重点把控的参数。

水泥基灌浆材料以波特兰水泥最为常用。崔和大冈的对比实验表明，由水泥与20%硅砂组成的灌浆材料，相较于粒径8~15毫米的砾石骨料，呈现出更高的钻孔热阻，且回填施工耗时更长[11]。值得注意的是，热注入速率对系统性能的影响更为关键——当热注入速率在45 W/m至90 W/m区间变化时，水泥和砾石灌浆的地埋管换热器热性能分别提升8.7%和9.8%。博里纳加-特雷维尼奥团队则系统研究了多种水泥基灌浆材料与骨料的性能差异，结果显示：硅砂作为骨料时，水泥基灌浆材料导热系数最高，显著优于石灰石砂、电弧炉渣等再生骨料[12]。该研究还探讨了水泥替代膨润土的可行性，通过对比不同砂浆(水、水泥、塑化剂)与骨料(建筑废料、电弧炉渣等)组合，为优化水泥基灌浆材料配比提供了理论依据。

2.2. 添加剂

钻孔式换热器的热性能与管道、灌浆材料、土壤三大核心组件紧密相关，各组件间存在复杂的交互作用机制。其中，灌浆材料作为土壤与管道间的热传导媒介，其性能的微小改变都会通过热阻传递效应对整体系统产生连锁反应。例如，当土壤含水量较低时，土壤自身导热能力下降，此时必须依赖高导热

系数的灌浆材料作为补偿,以确保热量能够高效地从土壤传递至埋管换热器。然而,传统常规灌浆材料受限于自身成分与结构,难以满足极端工况下的导热需求,这使得开发新型灌浆混合物成为提升系统能效的关键突破口。

从热阻理论角度分析,灌浆材料的导热系数与钻孔热阻呈现显著的负相关关系。随着灌浆材料导热系数的提升,热量传递的阻力减小,钻孔式换热器的整体热性能得以优化。基于这一原理,近年来众多科研团队聚焦于新型灌浆混合物的开发,通过引入特殊添加剂或优化材料配比,系统性地探索提升灌浆材料导热性能的技术路径。

以布拉斯克斯团队的研究为例,他们重点探究了铝屑和硫酸铝水泥对砂基灌浆材料的改性效果[13]。实验数据显示,铝屑的高导热金属特性与硫酸铝水泥的优异胶凝性能相结合,不仅大幅提升了混合物的导热系数,还同步增强了材料的机械强度。经过多组对照实验验证,饱和砂-铝屑和铝水泥-砂两种配比在测试样本中展现出最优导热性能;而以膨润土和高效减水剂为主要成分的灌浆混合物,因材料本身的低热传导特性,在热传递效率上明显逊色[14]。这些研究成果进一步证实,通过合理选择粒径细小、分散性佳的功能性材料作为添加剂,能够实现灌浆材料内部均匀的热传导网络构建,为钻孔式换热器的性能优化提供了切实可行的技术方案。

石墨是最常用的添加剂之一,由于其碳含量稳定,常被添加到常规灌浆材料中以提高热性能。石墨更适合作为添加剂引入,而不是作为基础灌浆材料,因为使用纯石墨会降低钻孔式换热器的性能。此外,大量石墨的存在会对灌浆材料的流动性和强度产生负面影响。因此,研究发现 5% 的石墨添加量是最佳比例,能最大程度地提高灌浆材料的性能。德拉勒进一步研究了石墨含量对提高灌浆材料导热系数的影响[15]。该研究旨在使用压缩天然石墨,添加比例低于 10%。结果表明,当混合物中石墨含量为 5% 时,整体传热可提高 1.5 倍[16]。石墨通常有两种不同的形式:鳞片石墨和膨胀石墨。它们都含有高比例的天然石墨,前者 and 后者的天然石墨含量分别高于 94% 和 99%。膨胀石墨比鳞片石墨更常被用作灌浆添加剂,因为它具有高表面积和密封性能。膨胀石墨是通过氧化反应和膨胀过程制成的,膨胀比可达 200~300。此外,石墨不溶于水,这一重要特性使其成为良好的添加剂。

另一种常用的添加剂是沙子,它经常用于增强传统灌浆材料的性能。布拉斯克斯研究了铝屑含量对砂基灌浆材料导热系数的影响。当铝屑含量低于 2.5% 时,灌浆材料的导热系数与铝屑含量成正比,而当铝屑含量较高时,这种关系则相反。因此,当使用大量铝屑时,孔隙数量会增加,导致灌浆材料的热阻增加。预计在不同含水量条件下,这些结果会有所不同。

2.3. 白云石

白云石来源广泛、储量丰富,在全球多地均有分布,这使得其开采与获取相对容易,市场供应充足,价格较为低廉。与混凝土和膨润土-石英相比,使用白云石钻屑的成本降低显著,分别降低了 14.87% 和 17.16%。相较于一些特殊合成的回填材料,白云石在采购成本上具有明显优势,大幅减少了材料购置费用。同时,白云石具备良好的物理化学性能,它硬度适中,易于加工破碎成适合回填的颗粒状,施工过程简单便捷,无需复杂的施工工艺和特殊设备,从而节省了施工时间和人力成本。

在性能表现方面,白云石的热传导性能虽不及部分高端回填材料,但能满足地热能系统的基本热传递需求,保证热量在地下与系统之间的有效交换。并且,白云石化学性质稳定,在地下复杂环境中不易与其他物质发生剧烈反应,能够长期保持结构稳定,减少了因材料性能下降而导致的系统维护和修复成本。此外,白云石作为天然矿物,无毒无害,对地下水资源和生态环境友好,符合绿色环保的发展理念,避免了因环保问题可能产生的额外成本。将白云石用作钻孔回填材料,在保障地热能系统性能的同时,显著降低了安装资金成本,为地热能的大规模推广应用提供了经济可行的解决方案。

2.4. 相变材料

热能储存系统主要有两种类型：显热储存和潜热储存。有多种显热储存材料可用于储存、释放热量，如水、岩石、油、碳酸盐、钢和混凝土。这些材料分别通过升高和降低温度来储存和释放热量。然而，潜热储存材料通过改变相态来储存/释放能量，其形式有无机、有机和共晶物。最常用的相变材料是石蜡，已被应用于多种领域。由于与显热材料相比具有多种优势，相变材料的使用近年来显著增加。潜热 TES 系统的最重要特征是高比热容和稳定性[17]。相变材料的高储能能力有助于减小所需的 TES 储罐体积。这些材料几乎在恒定温度下运行，可使能量系统更加稳定，而相变温度必须根据系统的运行条件精确选择。相变材料在增强热回收技术以及改造现有能源相关系统方面也发挥着重要作用。这类材料的主要问题是与其他储存材料相比导热系数较低，因此它们大多用于长期储存应用。

3. 新型灌浆材料

3.1. 地聚物水泥注浆料

地聚物水泥注浆料以硅酸盐水泥为主体，并辅以高分子聚合物、微膨胀剂、矿物掺合料等材料加工而成。它继承了水泥基材料的诸多优点，如收缩补偿、界面加强、防腐抗渗、流动性好以及粘结力强等特性。地聚物水泥注浆料特别适用于混凝土建筑结构地基注浆加固，在一些地热建筑物的基础加固工程中表现出良好的性能。其快速凝固、高强度、耐久性好等特点，能够有效地提高建筑物的承载能力和使用寿命，确保地热建筑物在复杂地质和热环境下的稳定性。

3.2. 以工业废弃物为原料的灌浆材料

为了实现资源的综合利用和降低成本，一些研究尝试利用工业废弃物制备灌浆材料。例如，将工业尾矿、粉煤灰等废弃物进行处理后，作为骨料或掺合料加入到灌浆材料中。这些废弃物来源广泛、价格低廉，不仅可以减少固体废弃物的排放，降低对环境的污染，还能在一定程度上改善灌浆材料的性能。如利用石墨、工业尾矿、改性膨胀珍珠岩、秸秆等制备的地源热泵地埋管灌浆材料[18]，具有良好的传热性能，且成本较低，为地热能应用中的灌浆材料选择提供了新的思路 and 方向。

4. 水分含量

饱和度作为衡量灌浆材料水分含量的关键指标，是影响其传热速率的核心因素。研究表明，灌浆材料中的水分含量变化会显著改变其导热系数与比热容。水分在材料内部形成连续的导热通道，随着饱和度提升，材料内部的水分含量增加，能够更高效地传递热量，进而提升导热性能；同时，水分的存在也使材料容纳热量的能力增强，导致比热容增大。实验数据显示，灌浆材料的饱和度与其导热系数、比热容呈显著的正相关关系，即饱和度越高，材料的导热系数和比热容越大，这一特性直接影响着地热能系统的换热效率与运行性能。研究发现，在达到饱和程度后，这种关系将发生逆转[19]。这意味着灌浆中的水量在高饱和度时不得增加。一些重要因素可能会改变饱和效应的程度，例如混合比和基质吸力。后者表示干燥材料对周围环境施加的压力，以使含水量相等。

使用高饱和度的风险需要被视为一个重要因素，因为它对灌浆的冻结有显著影响，这可能会对地埋管换热器的管道和灌浆材料造成严重损坏。这可能是由于冰的形成导致体积膨胀引起的。这可能会在高热负荷下发生。在这种情况下，建议使用防冻混合物(低凝固点)。在一些应用中，地埋管换热器安装在建筑物下方可能增加冻结的风险，在一段时间后对建筑物的基础造成损害[20]。在没有热补偿的情况下，冻结可能在地下膨胀并造成严重损害。此外，一些其他因素，如土壤灌浆的渗透性和孔隙率，也可能影响冻结效应。

灌浆材料在地热能系统的性能方面起着至关重要的作用。必须在精确权衡其热性能和机械性能的基础上进行选择。灌浆材料是地面与地埋管换热器之间的中间介质，因此，它既要为传热提供便利条件，又要保护地埋管换热器在受到外部压力时不被损坏。膨润土和水泥一直被视为传统的灌浆材料，由于它们强度高、渗透性低，此前在许多钻孔式换热器的安装中都有应用。然而，它们也暴露出诸如导热系数低和体积收缩等关键问题。此外，它们在与水相互作用时，机械性能和热性能会发生变化。因此，新型的灌浆材料将不同的添加剂融入传统材料中。其中最常用的添加剂之一是石墨，它能显著提升灌浆材料的热性能。由于石墨不溶于水，还能避免发生化学反应[21]。

5. 地热能应用中灌浆材料的研究现状与挑战

目前，针对地热能应用中的灌浆材料研究主要集中在材料性能优化、新型材料开发以及施工工艺改进等方面。许多研究通过试验和模拟分析，深入探究不同材料成分、配合比以及制备工艺对灌浆材料性能的影响规律，旨在开发出性能更优异、更适应地热能开发环境的灌浆材料[22]。例如，通过在水泥基灌浆材料中添加纳米材料、碳纤维等增强材料，提高其强度、韧性和热传导性能；研究不同树脂基灌浆材料在高温高压环境下的性能变化，为其在地热井等高温场景中的应用提供理论依据。

然而，地热能应用中的灌浆材料研究仍面临诸多挑战。一方面，高温、高压、高化学活性的地热环境对灌浆材料的性能提出了极为严苛的要求，现有的灌浆材料在长期稳定性和耐久性方面还存在一定的不足，难以完全满足复杂地热条件下的长期运行需求。例如，部分灌浆材料在高温下可能会发生化学分解、热老化等现象，导致性能劣化。另一方面，地热能开发项目的地质条件复杂多样，不同地区的地层特性、地下流体成分差异较大，这就要求灌浆材料具有更强的适应性。如何研发出一种能够广泛适用于各种地质条件的通用型灌浆材料，或者建立针对不同地质条件的灌浆材料选择和设计方法，是当前亟待解决的问题。此外，灌浆材料的环保性和可持续性也是未来研究需要重点关注方向。随着环保法规的日益严格，开发无毒、无害、可降解且资源节约型的灌浆材料已成为必然趋势。

6. 结论与展望

综上所述，灌浆材料在地热能应用中起着举足轻重的作用，其性能直接关系到地热能系统的成败。目前，水泥基、树脂基、水泥-粘土复合等多种类型的灌浆材料在不同的地热能应用场景中得到了广泛应用，并且针对这些材料的研究也取得了一定的进展。然而，面对地热能开发中复杂的环境条件和不断提高的技术要求，灌浆材料仍面临诸多挑战。

在未来，地热能应用中灌浆材料的研究和发展方向主要包括以下几个方面：一是进一步深入研究材料的微观结构与性能之间的关系，通过优化材料配方和制备工艺，开发出具有更高热导率、更强耐久性、更好适应性以及更优环保性能的新型灌浆材料；二是加强对灌浆材料在实际地热能工程中的长期性能监测和评估，建立完善材料性能数据库和寿命预测模型，为工程设计和材料选择提供更具可靠的依据；三是结合人工智能、大数据等先进技术，实现灌浆材料的智能化设计和精准制备，提高材料的生产效率和质量稳定性；四是注重资源的综合利用和可持续发展，加大对以工业废弃物等为原料的环保型灌浆材料的研发和推广力度。相信随着相关研究的不断深入和技术的持续创新，地热能应用中的灌浆材料将不断完善和发展，为地热能产业的蓬勃发展提供坚实的支撑。

参考文献

- [1] 孙焕泉, 高楠安, 吴陈冰洁, 等. 中深层地热资源勘探开发技术与典型应用[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 230-241.
- [2] 方姚. 面向中深层地热井的固井复合材料性能研究与井下换热过程模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.

- [3] Egilegor, B., Jouhara, H., Zuazua, J., Al-Mansour, F., Plesnik, K., Montorsi, L., *et al.* (2020) ETEKINA: Analysis of the Potential for Waste Heat Recovery in Three Sectors: Aluminium Low Pressure Die Casting, Steel Sector and Ceramic Tiles Manufacturing Sector. *International Journal of Thermofluids*, **1**, Article 100002. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100002>
- [4] Fierro, J.J., Escudero-Atehortua, A., Nieto-Londoño, C., Giraldo, M., Jouhara, H. and Wrobel, L.C. (2020) Evaluation of Waste Heat Recovery Technologies for the Cement Industry. *International Journal of Thermofluids*, **7**, Article 100040. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100040>
- [5] 韩宇栋, 侯东旭, 李威, 等. 高强珊瑚砂灌浆材料制备与早期膨胀性能研究[J/OL]. 建筑材料学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20250430.1629.008.html>, 2025-05-14.
- [6] 赵迁乔, 徐君全. 水性环氧树脂增强灌浆复合混合料抗裂性能设计与评价[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(11): 4754-4760.
- [7] Pandis, P.K., Papaioannou, S., Siaperas, V., Terzopoulos, A. and Stathopoulos, V.N. (2020) Evaluation of Zn and Fe-Rich Organic Coatings for Corrosion Protection and Condensation Performance on Waste Heat Recovery Surfaces. *International Journal of Thermofluids*, **3**, Article 100025. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100025>
- [8] 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 523-532.
- [9] 丁栋. 地热井高导热水泥导热系数影响因素分析[J]. 建材发展导向, 2024, 22(16): 70-72.
- [10] Feili, M., Rostamzadeh, H. and Ghaebi, H. (2020) A New High-Efficient Cooling/Power Cogeneration System Based on a Double-Flash Geothermal Power Plant and a Novel Zeotropic Bi-Evaporator Ejector Refrigeration Cycle. *Renewable Energy*, **162**, 2126-2152. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.011>
- [11] 冯凯. 河北雄县地热井耐腐蚀保温水泥浆体系研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- [12] Jouhara, H., Serey, N., Khordehgah, N., Bennett, R., Almahmoud, S. and Lester, S.P. (2020) Investigation, Development and Experimental Analyses of a Heat Pipe Based Battery Thermal Management System. *International Journal of Thermofluids*, **1**, Article 100004. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100004>
- [13] 殷素红, 文梓芸. 白云质石灰岩-水玻璃灌浆材料的性能及其反应机理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 76-80.
- [14] Paneliya, S., Khanna, S., Patel, U., Prajapati, P. and Mukhopadhyay, I. (2020) Systematic Investigation on Fluid Flow and Heat Transfer Characteristic of a Tube Equipped with Variable Pitch Twisted Tape. *International Journal of Thermofluids*, **1**, Article 100005. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100005>
- [15] 张汝峰, 任冬生, 何小玲, 等. 新型盾构接收止水装置中堵漏材料的研发与应用[J]. 隧道与轨道交通, 2023(S1): 16-20.
- [16] 周红红, 刘军, 李瑶. 复杂水溶液环境下灌浆材料耐侵蚀性能的试验研究[J]. 混凝土, 2023(6): 10-14.
- [17] Olabi, A.G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M.A. and Al-Alami, A.H. (2021) Critical Review of Energy Storage Systems. *Energy*, **214**, Article 118987. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>
- [18] 袁安冬, 唐文龙, 汪丽娟, 等. 中深层地热井换热性能模拟研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30(4): 61-65+78.
- [19] 牛国庆. 中深层 U 型封闭式地热井热储强化途径及传热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [20] Brough, D. and Jouhara, H. (2020) The Aluminium Industry: A Review on State-of-the-Art Technologies, Environmental Impacts and Possibilities for Waste Heat Recovery. *International Journal of Thermofluids*, **1**, Article 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- [21] Mazumder, Q., Nallamothe, V.T. and Mazumder, F. (2020) Comparison of Characteristic Particle Velocities in Solid-Liquid Multiphase Flow in Elbow. *International Journal of Thermofluids*, **5**, Article 100032. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100032>
- [22] 杨清琨, 李明, 张弛, 等. 地热井固井用高导热水泥浆研究[J]. 水泥, 2025(5): 1-4.