

中深层地热能干热岩技术及应用研究

高玉辉¹ 杨悦² 李波³

1. 陕西西咸新区创拓新能源发展有限公司, 陕西 咸阳 712000
2. 西咸新区盛源裕能科技发展有限公司, 陕西 咸阳 712000
3. 西咸新区城市设施管理有限公司, 陕西 咸阳 712000

[摘要]中深层地热能干热岩技术作为一种新兴的可再生能源技术,近年来在全球能源领域受到了广泛关注。干热岩指埋藏在地下深处且具有较高温度的岩层,通过适当的热能提取技术,能够提供稳定、高效的能源供应。与传统地热能相比,干热岩资源不受地理位置和地表热源的限制,具有广阔的应用前景。文中通过综合分析并认为,干热岩技术具有广泛的应用潜力,但其商业化进程仍需克服技术与经济方面的挑战,未来有望成为全球能源结构中重要的组成部分。

[关键词]中深层地热能;干热岩技术;技术应用

DOI: 10.33142/aem.v7i3.15965

中图分类号: TK529

文献标识码: A

Research on the Technology and Application of Middle Deep Geothermal Energy Capable Hot Rock

GAO Yuhui¹, YANG Yue², LI Bo³

1. Shaanxi Xixian New Area Chuangtuo New Energy Development Co., Ltd., Xixian, Shaanxi, 712000, China
2. Xixian New Area Shengyuan Yuneng Technology Development Co., Ltd., Xixian, Shaanxi, 712000, China
3. Xixian New Area Urban Facilities Management Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 712000, China

Abstract: As an emerging renewable energy technology, deep geothermal energy can generate hot rock, which has received widespread attention in the global energy field in recent years. Dry hot rock refers to rock layers buried deep underground with high temperatures, which can provide stable and efficient energy supply through appropriate thermal energy extraction techniques. Compared with traditional geothermal energy, hot dry rock resources are not limited by geographical location and surface heat sources, and have broad application prospects. Through comprehensive analysis, it is believed that hot dry rock technology has broad application potential, but its commercialization process still needs to overcome technical and economic challenges, and it is expected to become an important component of the global energy structure in the future.

Keywords: deep geothermal energy; dry hot rock technology; technical application

引言

中深层地热能干热岩技术,作为一种新兴的清洁可再生能源,近年来在全球范围内受到了广泛关注。干热岩,指埋藏在地下深处、温度较高的岩层,其蕴藏的热能具有巨大的储量,并能提供长期稳定的能源供应。与传统地热能相比,干热岩资源不受地理位置和地表热源的限制,具备了更广泛的利用潜力,尤其是在地表地热资源匮乏或难以开采的地区,表现出了极大的优势。随着全球能源危机的加剧以及环保意识的不断提升,干热岩技术作为一种清洁、高效、可持续的能源解决方案,展现出了前所未有的应用前景。然而,尽管干热岩技术具备显著的优势,其开发与应用仍然面临着诸多技术难题。目前,深层钻探技术的复杂性、高温环境下的钻井与热能提取方式的优化,以及地下水循环问题,都被认为是干热岩技术推广过程中的关键瓶颈。此外,干热岩的环境影响及其经济性评估,已成为推广过程中亟待解决的挑战。为了充分释放干热岩的潜力,在资源评估、技术创新、经济可行性与环境保护等

多个领域,深入的研究与探索被认为是不可或缺的。本文将探讨中深层地热能干热岩技术的核心理论与应用技术,并分析其在发电、供暖、工业加热等领域的实际应用,同时对其经济性与可持续性进行全面的评估。

1 换热原理与模拟模型

1.1 换热原理

该技术主要通过在钻井内安装同轴套管,并在套管外壁与周围地层之间注入水泥砂浆,以确保套管与岩层之间良好的接触和热传导效果。液体和气体与固体之间的热传递不仅包括对流传热,还常伴随热传导。在外套管中注入的冷水,随着下降过程被周围地层加热升温。当热水到达套管底部后,它通过内管向上流动,进而用于建筑末端供暖。供热后的冷却水进入地下换热系统,形成闭路循环,并通过大温差热泵机组系统继续提供末端供热。

1.2 几何模型

几何模型在换热原理的研究中发挥着至关重要的作用,尤其是在模拟与计算的过程中。作为一种数学工具,

几何模型被用来表示实际物理系统的形状与结构,从而帮助研究人员理解流体与固体之间的热交换机制。在干热岩技术的研究中,几何模型通常涉及地下岩层、孔隙结构以及热流体的流动路径等内容,热交换区域以及介质的特性被精确地描述。通过建立精确的几何模型,温度场、流速场等换热过程中的关键参数能够被详细模拟,为优化系统设计及提升热能提取效率提供了理论支持。几何模型的复杂度与尺度,会根据研究对象的不同而有所调整。从简单的二维模型到复杂的三维模型,均可以根据具体需求进行修改与优化。

1.3 网格划分

网格划分在换热模拟中扮演着至关重要的角色,它将实际的物理系统转化为可计算的离散化模型。在热交换过程的数值模拟中,几何模型需要被分割成多个小单元,这些单元在计算中被称为网格。网格的精细程度直接决定了计算结果的准确性与效率。在中深层地热能干热岩的研究中,热流体的流动路径、热传递过程以及岩层的物理特性,应当通过网格划分精确地描述。因此,网格的设计需要根据系统的复杂性与计算要求进行合理规划^[1]。对于较为简单的几何模型,可以使用较粗的网格;而对于结构较为复杂的模型,则需采用更为精细的网格。此外,网格的质量,也是影响模拟结果的关键因素。均匀的网格能提高模拟结果的稳定性,而不规则或过于粗糙的网格,则可能引发较大的计算误差,降低模拟的可靠性。

1.4 边界条件

边界条件在数值模拟中起着至关重要的作用,它决定了计算域外部与内部物理量的分布情况。在中深层地热能干热岩的换热模拟中,边界条件的选择,必须依据实际物理环境及研究目标进行合理设定。边界条件通常涉及温度、压力、流速等参数的指定,这些因素将直接影响热交换过程的模拟结果。常见的边界条件类型,包括定值边界、对流边界与辐射边界等。在干热岩开发的过程中,边界条件的设定,需考虑地表与地下岩层之间的热传导与热对流特性。例如,地表温度可通过环境温度或季节变化来设定,而深层岩层的温度,则可能受到地下热流与热传递过程的影响。同时,流体的流动方向与速度,也需通过对流边界条件来描述,这对于地下水流与热交换效果的预测,尤为关键。

1.5 收敛设定

收敛设定在换热模拟过程中至关重要,它直接影响数值计算的顺利进行以及结果的准确性。在中深层地热能干热岩的换热模拟中,收敛设定的主要目标是确保模拟过程中各物理量的变化逐步减小,最终达到稳定状态,从而保证结果的可靠性。收敛标准通常依据残差大小来判断,即每次迭代时计算变量的误差。当残差达到预定的精度要求时,模拟过程才会被视为收敛。对于换热模拟,常用的收敛标准包括温度场、流场以及压力场等物理量的变化幅度。

为了提高计算效率与精度,收敛标准与迭代步长的合理选择至关重要。若收敛速度过慢,计算时间可能过长;而若设定过于严格,则可能导致无法收敛的情况。因此,收敛标准和设置的合理调整,对于确保模拟结果的准确性与高效性,起着决定性作用。

2 干热岩开发技术

干热岩开发技术是中深层地热能利用的关键技术之一,旨在通过人工手段提高干热岩的热导性能,从而实现对深层地热能的高效开采。干热岩通常埋藏在地下几千米的深处,虽然其温度较高,但由于热导率较低,热能的利用效率较低,若直接开采。因此,为了提高其热能采集效率,干热岩的开发通常需要借助水力压裂等技术,以改善岩层的渗透性,形成人工裂隙网络,从而促进热流的有效传导。通过向干热岩注入高压水或其他流体,热交换可以在岩石中进行,将岩石中的热量带至地表。为了进一步提升开发效率,干热岩的开发还需结合先进的热交换系统,如闭环换热器系统,这些系统能够有效地在深层岩石与地表之间传递热量,减少热能的流失。在实际开发过程中,精确的地质勘探与监测至关重要,确保水力压裂过程的安全性及稳定性^[2]。注水量也需要根据地下水流动的具体情况进行调控,以实现热交换效率的最大化。干热岩开发技术,不仅为地热发电提供了稳定的能源来源,还可应用于供暖、制冷等多个领域,在推动清洁能源的利用方面,具有重要的现实意义。

3 干热岩的应用研究

3.1 中深层地热能发电中的应用

中深层地热能发电中的应用,主要依赖于干热岩资源的开发。干热岩位于地下深层,具有较高的温度和丰富的热能储备,适合用作长期、稳定的能源来源。与传统地热资源不同,干热岩不依赖天然热水流动,而是通过水力压裂技术在岩层中创造裂缝,使热能能够通过水或其他流体进行有效的热交换,进而被带到地表。加热后的流体,通过被引出地下,并通过地面的热交换装置与发电机组进行热能转化,从而实现电力的生产。中深层地热能发电中的应用,具备显著的优势。干热岩发电不受天气和季节变化的影响,其提供的热能稳定且持续,这对于需要全天候可靠供电的电网系统至关重要。同时,作为一种可再生能源,干热岩发电对环境友好,不会产生温室气体或其他污染物排放,相较于传统的燃煤或天然气发电,其环保优势显而易见。尽管干热岩发电的初期成本较高,主要由于涉及水力压裂、深井建设等复杂技术操作,但随着技术的持续进步和应用规模的扩大,其经济性正在逐步提高。当前,干热岩发电方面,已在一些国家和地区取得突破性进展。例如,冰岛、美国加利福尼亚州和新西兰等地,在探索和应用干热岩发电技术方面,已取得了初步成功。随着钻井技术、热交换技术和水力压裂技术的不断完善,干热

岩在发电领域的应用前景非常广阔,尤其是在地热资源丰富而地下水资源匮乏的地区,干热岩资源的开发与利用,势必将成为未来能源结构转型的重要组成部分。

3.2 干热岩在供暖与冷却系统中的应用

干热岩在供暖与冷却系统中的应用,展现出巨大的潜力,尤其是在寒冷地区或对可持续能源需求日益增长的地方。干热岩资源提供的高温,能够为建筑物或工业设施提供稳定的供暖,相较于传统的天然气或电力供暖系统,其在环保性和能效方面,具有显著优势。供暖时,通常通过在干热岩层中钻井,借助地热流体进行热交换,将深层的热量传递到地表系统。在供暖季节,热流体通过地面换热器或热泵系统,将地下热能转化为室内暖气,确保室内温度的稳定性与舒适度。

除了供暖,干热岩还可以在冷却系统中发挥重要作用。在夏季或气温较高的地区,干热岩的稳定温度,能够为空调系统提供额外的冷源^[3]。利用热交换技术,冷却流体将建筑内部的热量带走并释放到地下,从而提高空调系统的效率,减少对外部能源的依赖,同时降低电力消耗及温室气体排放。这种方式不仅能够充分利用地下的热储量,还能实现建筑能源的可持续管理,符合现代低碳经济的要求。此外,干热岩供暖与冷却系统的稳定性与长期性,为在城市或工业区的大规模应用,提供了可行性。在一些地热资源丰富的地区,已经开始建立基于干热岩的供热网络,形成闭环系统,通过管网将热能输送至居民区或商业设施。这种系统的应用,为实现能源高效利用及环境保护,提供了有效的解决方案。

3.3 干热岩在工业过程中的应用

干热岩在工业过程中的应用,为许多高能耗行业提供了可持续的能源解决方案,尤其是在需要稳定且高温热源的生产环境中。例如,冶金、化工、食品加工等行业对热能的需求量大且持续。传统上,这些行业依赖化石燃料,如煤和天然气,来满足热量需求,这不仅导致能源成本的上升,还带来了环境污染及碳排放等问题。通过利用地下储存的高温热能,干热岩技术,为这些问题提供了有效的解决途径,能够减少对传统能源的依赖,并显著降低温室气体排放。在工业过程中,干热岩通过地热井系统,将深层的热量提取到地表,并利用热交换系统将其转化为高温热源,进而满足工业加热、蒸汽生产、热风循环等需求。例如,在冶金行业,干热岩的热量可用于冶炼炉加热或金属熔化过程。稳定且高效的热能供应,显著提升了生产效率,并减少了能源浪费。在化工行业中,许多化学反应和合成过程要求持续的高温环境,干热岩能够为这些过程提供清洁热源,从而避免了依赖化石燃料带来的环境影响。此外,干热岩还可以广泛应用于工业冷却系统的热水供应。许多工业设施需要进行大规模的冷却操作,而干热岩,能够为这些冷却系统提供高效且低成本的热源。通过地热交换

技术,生产过程中产生的余热能够被回收并有效利用,从而进一步提高整体能源的利用效率。这种方式,不仅优化了能源使用,还为工业领域的可持续发展,提供了可靠的支持。

3.4 干热岩与其他可再生能源的联合应用

干热岩与其他可再生能源的联合应用,为能源的综合利用提供了新的思路,极大地有助于提高能源系统的整体效率。通过结合风能、太阳能及地热能等多种能源形式,不仅能够实现能源之间的互补,还能最大限度地发挥各类能源的优势,减少对单一能源的依赖,增强系统的稳定性与可靠性。在这种综合应用模式下,干热岩作为稳定的热源,可以与波动较大的可再生能源,如风能与太阳能,形成互补关系,从而提高能源供应的持续性和可靠性。与太阳能和风能等可再生能源不同,干热岩的热能提取不受气候条件影响,能够在任何时段提供稳定的热源,这对于解决间歇性能源供给的问题尤为重要。太阳能与风能虽然清洁,但其生产能力易受到天气、季节等外部因素的影响,造成供电不稳定。而干热岩的优势在于,持续稳定的热能能够提供,当其他能源供应不足时,能够补充需求。具体而言,干热岩可与太阳能发电系统联合使用,通过地热辅助太阳能热发电系统提升发电效率。在日照不足时,干热岩系统能够稳定提供热量,确保发电设施在各种气候条件下都能持续运行^[4]。类似地,干热岩与风能的结合,也可通过智能化能源管理系统,结合风电波动性,灵活调度热能的提取与储存,从而实现更高效的能源调配。这种灵活的能源组合,不仅提升了可再生能源的可靠性,还推动了能源系统的优化与可持续发展。

3.5 干热岩的经济性与可持续性分析

干热岩的经济性与可持续性,是评估其作为长期可再生能源应用潜力的关键因素。尽管在干热岩资源的初期开发阶段,需要进行大量投资,特别是在钻探技术、地下热储开发、热交换系统建设及环境监测等方面,但在长期运行中的优势则显而易见。基础设施建设一旦完成,干热岩的运营成本便相对较低,且由于其资源的可持续性,能够在数十年甚至更长时间内持续稳定供应热能,避免了化石能源枯竭的风险。与传统化石能源相比,干热岩不仅能够减少对外部能源的依赖,还大幅度降低了碳排放,有助于推动绿色发展,并实现可持续发展的目标。随着技术的不断进步,尤其是在深井钻探、热交换技术及能效提升方面的创新,干热岩的经济性和可持续性将得到进一步加强。在一些能源紧缺的地区,干热岩能够成为可靠的补充能源,降低能源成本并确保供应的稳定性。更重要的是,干热岩在满足工业、供暖等多领域需求的同时,还能避免对环境造成污染,提供持续的热能支持,促进社会经济的可持续发展。因此,干热岩不仅被视为一种具有较高经济效益的能源选项,还在可持续性方面展现出巨大的优势,为未来能源结构转型及绿色能源的推广提供了重要的支持。

4 结语

中深层地热能干热岩技术,作为一种新兴的可再生能源技术,展现了巨大的潜力与广泛的应用前景。通过开发和利用干热岩,不仅能有效减轻对传统能源的依赖,还有助于推动环境保护与可持续发展。尽管当前该技术在钻探技术的瓶颈、热能传输效率等方面仍面临一些挑战,但随着不断的技术进步与创新,干热岩在未来能源领域的作用将愈加显著。随着政策支持的加强、研究的不断深入以及相关设备的逐步完善,干热岩技术有望在发电、供暖、工业过程等多个领域得到更为广泛的应用,成为推动低碳经济与清洁能源发展的核心力量。对中深层地热能干热岩技术的研究与应用,若进一步深入开展,将为全球能源结构转型与可持续发展做出重要贡献。

[参考文献]

- [1] 李阳,贺国华,张旭,等. 中深层地热能干热岩技术及应用研究[J]. 科学技术创新,2023(26):108-111.
- [2] 常宽,张钱江,蒋奇云,等. 我国中深层地热能探测技术研究现状[J]. 地球物理学进展,2025,40(1):54-69.
- [3] 许天福,文冬光,袁益龙. 干热岩地热能开发技术挑战与发展战略[J]. 地球科学,2024,49(6):2131-2147.
- [4] 李根生,武晓光,宋先知,等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J]. 石油科学通报,2022,7(3):343-364.
- 作者简介:高玉辉(1982.9—),毕业院校:中南林业科技大学,所学专业:道路与桥梁,当前就职单位:陕西西咸新区创拓新能源发展有限公司,职称级别:工程师;杨悦(1990.1—),毕业院校:西安理工大学高科学院,所学专业:工程管理,当前就职单位:西咸新区盛源裕能科技发展有限公司,职称级别:工程师;李波(1985.11—),毕业院校:长安大学,所学专业:环境工程,当前就职单位:西咸新区城市设施管理有限公司,职称级别:工程师。