

中深层地热能钻井技术施工中存在的常见问题

党 崑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] 由于地质条件复杂、地层温度高、压力大, 中深层地热能钻井施工中经常遇到井壁不稳定、钻井液失效、钻头磨损过快以及设备故障等问题。这些问题不仅增加了钻井难度, 还导致施工周期延长和成本上升。此外, 施工过程中的安全隐患和环保问题也对项目的顺利推进构成挑战。论文分析了这些问题的原因, 并提出了措施, 旨在提高钻井效率、降低风险, 并确保施工安全和环境保护。

[关键词] 中深层; 地热能; 钻井技术; 施工问题; 措施

DOI: 10.33142/ect.v3i3.15707

中图分类号: P634

文献标识码: A

Common Problems in the Construction of Mid to Deep Geothermal Energy Drilling Technology

DANG Wei¹, YANG Yue², LI Bo³

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

Abstract: Due to the complex geological conditions, high formation temperature, and high pressure, problems such as unstable wellbore, drilling fluid failure, rapid drill bit wear, and equipment failure are often encountered in the construction of mid to deep geothermal energy drilling. These issues not only increase the difficulty of drilling, but also lead to longer construction periods and higher costs. In addition, safety hazards and environmental issues during the construction process also pose challenges to the smooth progress of the project. The paper analyzes the causes of these problems and proposes measures aimed at improving drilling efficiency, reducing risks, and ensuring construction safety and environmental protection.

Keywords: mid to deep level; geothermal energy; drilling technology; construction problems; measures

引言

中深层地热能钻井技术在开发深层地热资源及实现可持续能源利用中扮演着重要角色。然而, 由于地层条件复杂且钻井环境极为严苛, 施工过程中常常面临一系列技术与工程难题。这些问题不仅可能影响施工进度, 还可能对安全性、经济性以及环境保护带来一定挑战。常见的困难包括: 地层复杂性导致的井壁稳定性差、钻井技术的不适应性、设备与材料的可靠性问题, 以及施工过程中存在的安全与环保隐患。特别是在钻探中深层地热井时, 往往需要穿越高温高压地层及坚硬岩石, 这对钻井技术与设备性能提出了严峻考验。此外, 钻井液的配方、钻头的选择及施工工艺的优化等因素, 都会直接影响整个钻井过程。因此, 深入研究这些常见问题, 并提出相应的技术对策, 不仅有助于提高钻井施工效率与成功率, 也能在降低工程成本的同时, 确保施工安全与环境的可持续发展。本文旨在分析中深层地热能钻井施工过程中遇到的问题, 探讨解决方案, 并为进一步优化地热能开发提供理论依据与技术指导。

1 地热能供热

1.1 地热间接供热

地热间接供热技术通过热交换设备将地热资源中的热能传递给供热系统。具体过程是, 地热水通过深井被提取, 经过热交换器与供热循环水进行热量交换, 从而加热水或空气, 用于供暖或热水供应。在这一系统中, 地热水与供热循环水并不直接接触, 而是通过换热器完成热量的传递。这种方式有效地避免了直接利用地热水可能引发的污染与腐蚀问题。随着热量的传递, 地热水的温度会逐渐下降, 通常需要经过二级换热器进一步调节, 以确保系统的高效与稳定运行。与直接供热系统相比, 地热间接供热在热能控制与利用效率方面具有明显的优势, 能够根据需求灵活调节温度, 同时减少对地热水的依赖。此项技术不仅适用于住宅及商业建筑等区域的集中供热, 还能与热泵系统相结合, 从而提升整体系统的效率与稳定性。在冬季采暖需求较为集中的地区, 地热间接供热被视为一种环保且可持续的能源利用方式。

1.2 地热+热泵机组

地热+热泵机组供热系统通过深井潜水泵从开采井提

取地热水,并通过地热管线将其输送至一级直供换热器。在一级换热器中,地热水与供热循环水进行热交换,将热量传递给供热水,温度下降后的地热水再通过管线送至二级换热器进行二次换热,将热量传递给二级板换与热泵蒸发器侧之间的循环水,为热泵机组提供热源。经过二级换热器后,温度降低的地热水通过输水管线回灌至回灌井。与此同时,经过一级换热器换热和热泵机组制热后的供热循环水温度升高,通过供热管线输送至热用户。供热用户使用后,温度降低的供热水再返回供热管线,送至一级换热器和热泵机组冷凝器侧,再次进行热交换、提高温度,完成整个循环。该系统工艺较为复杂,造价和生产运营成本较高。尽管热泵机组在调峰时承担热负荷的能力有限,但其高效的地热能利用率是该系统的一大优势。

1.3 地热+热泵机组+调峰锅炉

地热+热泵机组+调峰锅炉系统是一种集地热能、热泵技术及传统锅炉优势于一体的复合型供热方案,能够有效应对不同季节及负荷变化所带来的供热需求。该系统通过深井提取地热水,借助热泵机组将地热水中的热量传递给供热循环水,随后通过一级换热器调节供热水的温度,从而在高效利用地热能的同时,确保稳定的供热效果。在高负荷需求高峰期,调峰锅炉作为辅助设备被启用,提供额外的热源,保障供热系统的稳定性与可靠性。热泵机组能够在低温条件下高效运行,而调峰锅炉则能够灵活应对需求波动,特别是在极端寒冷的天气条件下,确保供热系统的持续运行。该系统不仅提升了地热能的利用效率,减少了能源消耗,还通过降低对化石燃料的依赖,减少了碳排放,展现了良好的环保与节能特性。

2 中深层地热能钻井施工中常见问题

中深层地热能钻井施工面临诸多挑战,其中地层问题被认为是影响施工效率及钻井安全的关键因素。地热井通常需要穿越多种地层,包括松散的沉积层、硬岩层以及可能存在的断层带,地层的不稳定性往往导致井塌、井漏、掉块等问题。在高温高压环境下,地层裂隙的渗透性变化可能进一步加剧井漏的风险,从而给施工带来更大的困难。此外,某些地区的地层中可能富含高压气体或含水层,这增加了井控管理的难度,要求采取特殊的钻井策略以防止井涌或井喷现象的发生。除了地层问题外,钻井技术问题同样是施工中的难点之一。中深层地热井的井深通常较大,钻头的磨损严重,钻进速度逐渐下降,这直接影响施工的进度。钻井液的性能对井壁稳定性、岩屑携带效率以及钻具冷却效果至关重要,但在高温地热井环境下,钻井液容易发生降解、失水或变质,导致作业异常。复杂的井眼轨迹和大倾角井的施工也使定向控制变得更加困难,尤其是在硬岩地层中,轨迹调整的误差可能导致钻头偏离预定目标,从而影响钻井的成功率。设备与材料问题也同样影响施工质量与效率。地热井的施工环境极端,高温高压可能

使钻机、钻具、套管及固井材料的性能下降,甚至发生早期失效。例如,在高温环境下,钻头的磨损加剧,导致钻井周期延长,而传统固井材料在高温下可能出现水泥环裂缝、套管变形等问题,进而影响井身结构的长期稳定性。此外,地热井往往需要使用特殊合金材料的套管以及耐高温、耐腐蚀的固井材料,这增加了施工成本及设备维护的复杂度。在施工过程中,安全与环保问题同样不可忽视。由于地热井处于高温高压环境,井下条件复杂,井喷、井漏、钻具卡阻等突发事件的风险较高,因此必须采取严格的井控管理及完善的应急预案,以确保施工安全。

3 解决中深层地热能钻井施工问题的技术措施

3.1 针对复杂地层的钻井优化方案

针对复杂地层的钻井优化方案,需综合考虑地质勘探、先进钻井技术以及合理的施工工艺,以提高钻进效率、降低地层风险,并确保井壁稳定。在施工前,必须进行全面的地质勘查与地层分析,准确掌握地层岩性、断裂构造、地下水分布、温度与压力条件等关键因素,以便制定适合的钻井参数及工艺方案。在松散地层中,低密度钻井液的使用以及优化井壁稳定措施的采取,可有效降低井塌风险;而在硬岩地层中,高效的PDC(聚晶金刚石)钻头或滚刀钻头的选用,则能提升钻进速度,减少钻头磨损。在裂隙发育地层,容易发生井漏的情况下,钻井过程中应采用分级密封技术,合理设计套管程序并应用定点固井方法,以最大限度地减少漏失风险。此外,配合高性能堵漏材料与可调密度钻井液的使用,可有效控制地层渗透性,防止井漏或流体侵入。对于压力变化较大的地层,井径的合理设计与井眼轨迹的优化至关重要。通过调整井斜角度、控制钻压与转速,可以有效减少地层破裂压力变化引发的井控风险。在高温高压区域,钻井液系统的配方需进行优化,以保证其在高温下的稳定性,同时采用耐高温、耐磨的钻具,以延长钻头使用寿命并减少因高温导致的设备故障。智能化钻井技术的引入,如随钻测量(MWD)与随钻地层评价(LWD)技术,能够实时监控井下参数,优化钻井轨迹,并根据实际情况调整钻井参数,从而提高复杂地层条件下的钻井成功率。

3.2 钻井液优化与智能控制技术

在中深层地热能钻井施工中,钻井液优化与智能控制技术发挥着至关重要的作用,主要用于维持井壁稳定、冷却与润滑钻头、携带岩屑、防止井漏及井喷,并应对高温高压等复杂工况。由于地热井施工面临的极端环境,高温常常导致常规钻井液的降解、稠化、失水甚至失效,这要求钻井液体系必须经过优化,具备优良的热稳定性、润滑性、携岩能力以及低损失特性。在高温环境下,耐高温聚合物钻井液、高温盐水钻井液或油基钻井液可被采用,以增强钻井液的热稳定性,并降低流变性变化,从而提升井壁的支撑能力。为了减少井漏及地层渗透性对施工的影响,

纳米封堵材料或膨胀型堵漏剂可被加入,增强钻井液的封堵效果,从而防止钻井过程中出现严重漏失现象。此外,智能控制技术应用于提高钻井液性能与施工效率提供了有效手段。通过实时监测系统(如随钻测量 MWD、随钻地层评价 LWD),能够连续监测井下的温度、压力、钻速及钻井液的性能等参数。结合智能算法与自动控制系统,钻井液的密度、黏度、流速及成分可被动态调整,确保其始终维持在最佳状态,减少因地层变化引发的风险。智能控制技术还可以通过集成远程监控平台,自动调节钻井液的循环、优化固相控制,并高效管理井控风险,从而降低人为操作误差,提升施工安全性。配合智能流变测试设备,钻井液的性能能够实时优化,使其适应不同地层的需求,进一步提高钻井效率并延长钻具使用寿命。

3.3 先进钻头材料与耐磨技术

在中深层地热能钻井施工中,先进钻头材料与耐磨技术起着关键作用,显著提高钻进效率、减少钻头磨损,并延长使用寿命,从而有效降低施工成本,增强作业安全性和稳定性。地热钻探通常面临高温、高压以及复杂地层的挑战,传统钻头因高温软化、剧烈摩擦或岩石冲击而容易迅速磨损甚至失效,因此亟需采用高强度、耐磨性强的钻头材料及表面强化技术以提升钻头的性能。当前,聚晶金刚石复合片(PDC)钻头、高性能硬质合金钻头与金刚石增强钻头在地热钻探中得到了广泛应用。特别是 PDC 钻头,其卓越的耐磨性、高硬度和优良的热稳定性,使其在硬岩钻进中展现出显著优势,钻进效率得以提升,同时更换钻头的频率也得以减少。进一步地,纳米陶瓷涂层、高强度碳化钨涂层或金刚石镀层技术的采用,有效增强了钻头的耐磨性和抗冲击性,确保钻头在极端工况下仍能保持稳定的切削性能,从而降低了因材料疲劳或涂层剥落引发的钻头失效风险。在钻井过程中,为了更精准地优化操作,智能钻头技术已逐渐得到应用。通过集成传感器与数据分析系统,井下的温度、压力、扭矩及钻头磨损状况可被实时监控,结合随钻测量(MWD)与随钻地层评价(LWD)技术,钻头参数得以动态调整,从而进一步提高钻进稳定性,减少非计划停工的时间。此外,为降低钻头磨损的程度,钻井参数的优化同样至关重要。合理控制钻压、转速与排量,减少不必要的摩擦与振动,同时配合高效润滑的钻井液体系,有助于降低井底摩擦阻力,从而确保钻进过程更加平稳。

3.4 井壁稳定性控制措施

在中深层地热能钻井施工中,井壁稳定性控制措施至关重要,直接影响钻井作业的安全性、施工进度以及井筒的整体结构完整性。地热井通常穿越多种复杂地层,包括松散沉积层、裂隙发育层以及高温高压地层等,这些地层在钻进过程中易引发井塌、掉块、井漏乃至井喷等问题,从而严重影响施工效率及安全。为确保井壁的稳定性,钻前地层勘察显得尤为关键,必须通过精准评估地层结构、

岩石力学性质、孔隙压力及地应力分布,为制定合理的井壁稳定方案提供必要的数据支持。在钻进过程中,钻井液体系的优化作为保证井壁稳定性的关键措施之一,至关重要。通过选择适当的钻井液密度、流变性能与封堵材料,能够有效平衡井壁所承受的地层压力,从而降低井漏及地层流体侵入的风险。尤其在高温地层中,钻井液需要具备较高的热稳定性,以避免因温度升高导致钻井液的失效、稠化或降解,从而影响井壁的支撑能力。除此之外,井眼轨迹的设计与套管程序的优化,同样是提升井壁稳定性的关键措施。针对复杂地层,采用分级扩孔、调整井斜角度等手段,能够有效减少井壁受到的应力集中,从而降低井塌的风险。合理的套管下入深度以及固井质量控制,也能够有效提高井壁的长期稳定性,防止在后期运行过程中出现井筒结构失效的情况。

3.5 设备维护与智能监测技术

设备维护与智能监测技术在中深层地热能钻井施工中的作用至关重要,不仅能够提升设备的工作效率,还能显著降低故障发生的频率,确保钻井作业的安全与稳定。地热钻井施工常面临高温、高压以及复杂地质条件的挑战,设备的性能与可靠性直接影响作业的进展与安全。传统钻井作业中,设备故障和维护不足往往导致停工、损失甚至严重事故的发生。因此,结合定期维护与智能监控技术,不仅能提前识别设备潜在问题,还能延长设备使用寿命,防止因故障引起的钻井停滞。通过在关键设备上安装传感器,智能监测技术实时监控如钻机、钻头、泵、马达等设备的运行状态,包括温度、压力、振动及功率消耗等参数,并将数据传输至监控平台。利用大数据分析机器学习算法,监测系统能够精准预测设备可能出现的故障情况,如超负荷运行、磨损加剧或润滑不足等,从而采取维修或更换措施,在设备出现问题之前避免因设备故障导致的意外停工和施工延期。此外,设备的运行参数还可以通过智能监测系统进行优化,例如根据地质条件调整钻机转速与钻压,从而提高作业效率、降低能源消耗。在设备维护方面,基于条件的预防性维护通过结合设备的使用周期与工作负荷实施,能够确保设备始终处于最佳工作状态,减少不必要的维修开支,并提升钻井作业的整体可靠性。

3.6 绿色施工与环保措施

绿色施工与环保措施在中深层地热能钻井施工中的重要性不可忽视,特别是在资源开发与生态保护之间有效平衡的过程中。尽管地热能开发具有低碳排放和可持续性等优势,如果忽视了施工过程中的环保措施,仍可能对环境产生负面影响。钻井液的使用与处理是其中的一个关键问题,传统钻井液中的化学成分有可能对土壤和地下水造成污染。因此,应选用环保型或水基钻井液,并在钻井结束后进行有效的废弃钻井液回收与处理,以避免其直接排放至环境中。此外,回灌过程的监管必须严格进行,以防

止回灌水引发地层沉降、地下水污染,甚至诱发地震等潜在问题。为降低施工对周围生态系统的干扰,控制施工噪声、粉尘排放及废气污染的措施同样不可忽视,尤其在城市或其他敏感区域施工时。低噪音钻机及封闭式作业设备的选择,能够有效减少对周围居民及环境的影响。在废弃物的处理方面,所有钻井过程中产生的固体废弃物,如岩屑与废弃材料,需按照环保标准进行分类收集与处置,避免随意丢弃或不当处理,以保障施工的环境友好性。

4 结语

中深层地热能钻井施工中所面临的常见问题,主要是由复杂的地质条件、设备性能的局限以及施工中的安全和环保挑战引起的。为应对这些问题,通过优化钻井液体系、采用高性能钻头材料、提升设备管理与维护水平,并应用智能监测技术等手段,钻井效率得以有效提升,施工成本得以降低,施工过程中的风险也得以减少。此外,确保施工过程的安全性、环保要求得到满足,这些措施同样发挥了重要作用。随着技术的不断进步与创新,预计这些问题将逐步得到解决,从而为中深层地热能的高效开发提供更加稳定的技术支持,推动地热能资源的可持续利用,并促进

能源结构的优化与环保事业的进一步发展。

[参考文献]

- [1]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.
- [2]张家云.我国中深层地热能供暖现状及问题研究分析[J].科技创新导报,2017,14(36):44-45.
- [3]李文静,姚海清,张文科,等.中深层地热能利用技术的研究与发展[J].区域供热,2021(4):50-59.
- [4]任虎俊.中深层地热能开发利用技术进展及展望[J].中国煤炭地质,2020,31(1):9-11.

作者简介:党崑(1990.12—),毕业院校:华北电力大学科技学院,所学专业:热能与动力工程,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。