

新形势下地热井高质量钻井施工技术剖析

封优生, 刘旭, 谢建军, 王龙平

(河北伟业地热新能源科技有限公司, 河北邯郸 057650)

摘要: 地热钻探施工是一项非常严谨的工程, 其专业性较强, 设备和工艺器具配套是施工顺利进行的保证。提高队伍的专业素质和单位的技术力量, 在新形势下采用先进的工艺技术, 是地热井高质量钻井的关键。加之我国的地热市场正在向地层深部拓展, 施工难度也会加大, 施工单位只要拥有自己独特的施工技术和特点, 就能够在市场上立足, 保持自身发展的势头, 发挥竞争优势。本文针对地热井施工的一些具体问题进行了剖析, 指出多工艺空气钻进技术是优质、高效开发深部地热和地下水资源的有效方法。

关键词: 地热井; 钻探设备选择; 工艺器具配套; 钻井技术; 多工艺空气钻进; 高质量钻井

中图分类号: TE249; P634.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0349-05

Analysis of high-quality drilling construction technology for geothermal wells under the new situation

FENG Yousheng, LIU Xu, XIE Jianjun, WANG Longping

(Hebei Weiye Geothermal New Energy Technology Co., Ltd., Handan Hebei 057650, China)

Abstract: Geothermal drilling construction is a rigorous work with high professional requirements, and the matched equipment and process tools are the guarantee for the smooth progress of construction. It is critical to improve the professional quality of the team and the technical capacity of the unit, as well as adopting advanced technology under the new situation. In addition, China's geothermal market is expanding toward the deep strata, which brings increasing construction difficulties. Construction enterprises with proprietary construction technologies and characteristics can maintain development momentum and gain competitive advantages in the market. This paper analyzes some specific problems in geothermal well construction, and points out that multi-process air drilling is an effective method for high-quality and efficient exploitation of deep geothermal and groundwater resources.

Key words: geothermal wells; drilling equipment selection; matched process tools; drilling technology; multi-process air drilling; high-quality drilling

0 引言

随着国家低碳经济、可持续发展战略的推进, 地热资源作为一种清洁能源, 受到越来越多的关注。通过地热井可以提取地下热水和地热蒸汽等热能资源, 具有高效、环保、可持续利用的特点。在加速发展绿色能源的大背景下, 充分利用地热资源已备受重视, 商业开发热潮迅速兴起, 尤其是房地产开发项

目对地热温泉的需求日趋旺盛, 地热井的钻井数量和投资逐年递增。目前地热能正以强劲势头向规模化、产业化方向健康发展, 特别在人口密集的大、中城市, 对地热的采暖、保健、疗养等方面的需求更为迫切, 这也是国内地热市场日益兴旺的根本^[1-2]。地热井钻探技术是开采与利用地热资源的关键, 近年来随着地热地质、地球化学等地热勘查方法的改进

收稿日期: 2026-06-24; 修回日期: 2026-07-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.046

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目(编号: 235A4601D)

第一作者: 封优生, 男, 汉族, 1990年生, 副总经理, 工程师, 石油与天然气地质勘探专业, 从事钻探技术开发和管理工作, 河北省邯郸市广平县金广源路91号, fengyousheng0428@163.com。

引用格式: 封优生, 刘旭, 谢建军, 等. 新形势下地热井高质量钻井施工技术剖析[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 349-353.

FENG Yousheng, LIU Xu, XIE Jianjun, et al. Analysis of high-quality drilling construction technology for geothermal wells under the new situation[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 349-353.

和钻探技术的发展,风险大幅降低,钻井成功率明显提升。最大程度地发挥了其作用,有效地推动了地热资源的合理开发利用。

1 地热钻探设备发展趋势及选择要求

1.1 我国地热钻探设备发展趋势

从我国水井、地热井以及新能源钻探设备的飞速发展看,通过设备的引进应用与研究,实现了自主创新。对于一些落后的机型,生产厂家已放弃生产,施工单位也趋于淘汰。学习国外先进的技术,研发高端钻探设备,已成为生产厂家和施工单位发展的方向。

地热井钻机的发展,驱动型式由机械、液力向电驱动方向发展,电驱动钻机由直流电向交流变频方向发展,且形成了混合驱动形式——液电、机电。目前钻机的主要技术有:液控盘式刹车,交流变频驱动,顶部驱动系统,液压驱动钻机。钻机的发展趋势为:数字化、信息化、自动化、智能化、高适应性、高经济性、高可靠性、高运移性和大型化。钻机控制系统由模拟式控制系统逐步转变为数字式控制技术,并朝着智能化、网络化、开放化方向发展。

1.2 钻探设备选择要求

钻探设备选择及工艺配套方面,首先把钻进工艺作为主要依据,这样既能最大程度发挥钻机的功能,同时适宜的工艺方法能提高钻进效率、节约钻探成本。设备选择时做到准确定位,根据工程设计,包括钻井直径、钻井深度、所钻地层、采取的钻进工艺等,确定钻机的提升能力、扭矩,满足多工艺施工要求,慎重衡量论证,使购置的钻探设备与钻进工艺配套,能够发挥更大的经济效益^[3-6]。

其次,地热钻探设备不同于常规水井钻探,与石油井钻探设备相近,常规选择以水源钻机、石油钻机以及大吨位全液压钻机为主,根据实际需求选择合适的钻探设备,钻机的各部件应整体化、拆装简便,提升能力大,质量轻,满足井控安装需求等。并且配套的泥浆泵泵量要大,因为排量大、上返速度快、携带岩屑能力强,井底较干净,可减少埋钻等井内事故,施工周期有保证。

2 地热井钻探相关技术问题

2.1 地热井钻进的特点

(1)温度高:地热水温度划分为高温、中温和低

温三类。高于150℃,以蒸汽形式存在的,属高温地热;温度在90~150℃之间,以水和蒸汽的混合物等形式存在,属中温地热;温度在25~90℃之间,属低温地热。需要注意的是,这些温度划分并不是绝对的,可能会根据不同地区和研究者的定义有所差异。在实际应用中,应根据具体情况和需求来确定地热水的温度范围。在高温下,普通泥浆易变质结块,钻具腐蚀加快,现场水雾很大,劳动环境差,容易发生烫伤事故等。这就要求使用抗高温泥浆,井口要安装安全可靠的井控装置。

(2)深度大:用作动力或工业目的的地热田勘探,钻井深度通常在2500~4000 m,最深地热科学钻探井已达5200 m,这就要求相应较大的设备。

(3)成井要求严格:从地热井应用方面看,在当前经济技术条件下,金属井管的腐蚀问题比较严重,随着土壤污染以及地下水污染的日趋恶化,使得井管腐蚀越来越严重,易出现破裂,而一旦井管破裂则容易导致地热水温下降、水质恶化以及井内涌砂等问题^[6-10]。因此,为减少地热井套管的腐蚀,对成井有以下要求:①井管必须具备良好的抗腐蚀性能,以适应地下热水的腐蚀性环境;②合理配置滤水管和止水层及回填材料,防止不同含水层串层污染,确保长期稳定出水;③建议每2~3年洗井一次,监测水质水温,以利于延长井体使用年限。总的来说,从前期的地质评估、合规审批,到成井结构设计、后期维护,都需要严格把控,以确保地热井的长期稳定运行。

2.2 地热钻井设计技术要点

针对地热井不同深度、地层和岩性,形成了适合不同热储类型的井身结构优化设计。在地热井设计时首先要整合地质资料,基于已有的地质、地球物理、地球化学勘查资料,选择具有代表性的地热资源开发地段,明确热储类型(水热型、传导型、地压型等)、埋藏深度、渗透性及流体质量,为钻井参数设计提供依据;其次控制井深与成本平衡,针对不同地热类型应设计合理钻深,如高温地热田钻井深度多在500~2000 m,低温传导型平均1800 m,地压型可深达6000 m;需综合考量钻井深度、地质构造复杂度、地理位置(设备运输难度)及钻机动力配置,平衡开发成本与资源利用率;最后优选适当的工艺方法,工艺方法的选择不仅能够有效提高钻进效率,且是地热井成井的基本前提,如在覆盖层较厚时可选用传统泥浆正循环钻进,在基岩地层可

优选气动潜孔锤与气举反循环钻进技术等。

目前我国开发地热资源的深度主要取决于热储层的埋藏深度以及开采技术水平。温度在40~100℃之间的地热液体,地热井深度通常在1000~4000 m之间,而这个深度范围在施工过程中先后要经过第四系、新近系、古近系、三叠系、二叠系、石炭系以及奥陶系等地层。井身结构一般在二开至四开,若地层不复杂,井深在1000~2500 m时,多采用二开、三开^[11]。技术套管与石油套管相同,套管钢级多选择J55或N80。地热井典型井身结构设计见图1,地热井常用口径序列见表1。

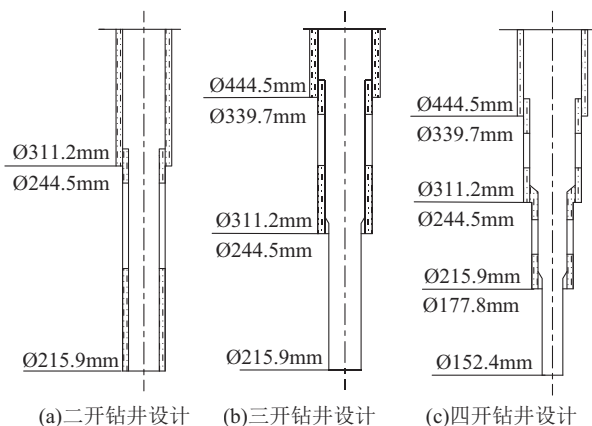


图1 典型地热井井身结构设计示意

表1 地热井常用口径序列

序号	井径/mm	套管直径/mm
1	152.4	114
2	190.5	140
3	200.0	168
4	215.9	178
5	244.5	194
6	279.0	219
7	311.2	245
8	346.1	273
9	406.4	298
10	444.5	340

2.3 钻具选择的基本原则

(1)转盘钻机方钻杆由于受到的扭矩和拉力最大,在允许的情况下,应尽量选用大尺寸。

(2)钻机提升能力许可时,选择大尺寸钻杆,优点如下:大尺寸钻杆强度大,水眼大,钻井液流动阻力小;而且井壁环空较小,钻井液上返速度快,携带

岩屑能力强,钻进效率高。入井的钻柱结构要力求简单,便于起下钻,保证钻进过程中安全可靠。

(3)为保证所钻井眼能顺利下入套管或套铣筒,除钻头尺寸需与套管尺寸相匹配外,钻铤尺寸大小和数量直接决定着井眼的有效直径。当钻铤柱中采用了稳定器,可以适当选用稍小外径的钻铤,确保钻孔的垂直度;当钻铤柱中选用较大外径钻铤时,首先要考虑打捞作业中套铣筒能顺利套铣整个钻铤柱中最大尺寸的钻铤。另外,在 $>\text{Ø}241.3\text{ mm}$ 的井眼中,应采用塔式复合钻铤结构,但相邻两段钻铤的外径一般以不超过25.4 mm比较理想。

(4)钻铤的作用是给钻头提供钻压,使钻杆处于受拉状态,并以其较大的刚度扶正钻头,保持井眼的垂直度。钻铤有普通型、螺旋型、带有吊卡槽和卡瓦槽、方钻铤等,可根据实际需要选配,目前在地热井中使用最多的为普通型。

2.4 钻探技术难点

(1)黏钻及缩径。地热井钻进较厚的古近系、新近系泥岩地层及页岩夹层时,因泥页岩为水敏性地层,易膨胀,在钻井中常遇到不同程度的遇阻、卡钻、缩径、钻头泥包等情况。如三牙轮钻头钻进泥页岩时,岩屑常存于牙齿之间,形成“泥包”。其主要原因是:泵量小,造浆作用使井底泥浆黏度较大,牙轮自转不灵活。克服黏钻和缩径的措施有:选用大排量泥浆泵加大泵量,选用优质泥浆等。

(2)钻井漏失。在热水层中钻进时,会遇到漏失情况,有时漏失严重不返浆。堵漏方法较多,可根据地层和生产实践经验灵活选择^[12]。热水储层为白云岩、灰岩、砂岩时,井壁稳定性较好,可采用清水顶漏钻进。在取水目的层以浅钻进时,对于小漏失,可以在泥浆中加锯末或堵漏剂进行堵漏;漏失严重时可向井内投入黏土球或用水泥堵漏;难以堵住的大漏失,可采用气举反循环钻进或泡沫泥浆钻进,也可下管封隔。

2.5 影响地热井钻进效率的原因

(1)钻井工艺技术相对落后。许多单位还不具备多工艺钻进技术条件,无法根据地层情况及时变换工艺方法(如气动潜孔锤钻进技术、气举反循环钻进技术、空气泡沫钻进技术)。普遍采用的是泥浆正循环钻进技术,且井壁与钻杆之间的环状间隙大,泥浆上返速度极慢,携带岩屑的能力差,重复破碎,施工周期长,井内事故多,成本高。

(2) 钻井设备不配套。为了降低钻井成本,有些单位选用的钻机设备功率小,再加之所配泥浆泵排量也小,不利于岩屑的排出,不利于大直径钻具的配套,关键时刻提升能力小,处理井内事故的能力差。对井径、井深和钻机以及泥浆泵的配套关系认识不清楚,严重影响钻进效率。尤其所配设备不能满足多工艺钻进技术要求,高效钻进技术发挥不了作用。

3 新形势下地热井高效钻井技术

目前从事地热井钻探领域施工的单位较多,其技术水平及施工质量也存在许多差异,具体反映在设备的选型及钻进工艺方法上。在市场竞争中,具有先进设备和高效钻进工艺的单位优势明显。近年来钻进工艺方法已得到日益重视,目前地热钻井领域主要采用的钻进工艺方法有:泥浆正循环钻进技术,气动潜孔锤与气举反循环组合钻进技术,螺杆复合钻进技术。钻进过程中可根据地层情况及钻井要求灵活变换。

3.1 泥浆正循环钻进技术

虽然在地热井施工中工艺方法较多,但目前市场上还是以正循环钻进为主,其特点是“进小排大”,进小是指泵入的环空截面较小,而排大是指排粉的环流断面较大,因而形成的介质流速是“进快排慢”,这就非常不利于钻井的清洗和排屑,导致钻进效率极低,施工周期长,成本高。另外采用泥浆正循环到了一定深度后,钻遇地层复杂,漏失严重,经常无法正常钻进,极大增加钻井成本,降低施工效率^[13]。

3.2 螺杆复合钻进技术

螺杆复合钻进技术即螺杆加PDC钻头钻井技术。该技术在油气钻井中被广泛采用,其原因是:(1) 高效PDC钻头对某些地层的优势明显大于牙轮钻头;(2) 近年来螺杆钻具的质量不断提高,寿命大大延长,与PDC钻头匹配可充分发挥PDC钻头的效能;(3) 在深井、小井眼中常规钻井的动力损耗很大,并且容易出现套管磨损及钻杆疲劳破坏,而螺杆复合钻进技术是利用井底马达直接驱动钻头,动力损耗很小,改善了钻具在井下的工况,从而提高了钻井的安全性^[14-17]。

目前,螺杆复合钻进技术在地热井中主要用于:(1) 中深部地层的快速钻进;(2) 大倾角易斜地层中的防斜快打;(3) 定向井中造斜完成后原钻具

的直接稳斜钻进;(4) 深井、小井眼中的高效钻进。这种快速钻进技术已得到施工单位的认可。

3.3 多工艺空气钻进技术

随着多工艺空气钻进技术的大力推广,在钻探界已被公认为是一种高效钻进技术,同时也是衡量一个单位钻探技术水平高低的重要标志。所谓多工艺空气钻进技术,就是根据地层条件,分别采用气动潜孔锤钻进、气举反循环钻进、空气泡沫钻进,而这些技术均为通过生产检验的成熟技术,只需在现有设备机具条件下进行配套,就可迅速投入施工应用。与常规钻探技术方法相比,气动潜孔锤钻进效率可提高十几倍,气举反循环钻进与空气泡沫钻进效率可提高2~3倍,钻探成本可降低50%以上,完全能满足提高钻效、降低施工成本、缩短施工周期、迅速完成工程任务的要求^[18-19]。

3.3.1 气动潜孔锤钻进技术

气动潜孔锤钻进作为多工艺空气钻进技术方法之一,受到高度重视并快速发展。我国于20世纪80年代初期,在基岩水井施工中开始应用这一技术。经过几十年的科研开发和推广应用,技术应用领域不断拓宽。在提高钻井效率方面,气动潜孔锤钻进技术在地热钻井中优势凸显,已得到广泛应用。但在应用中也存在一些问题和不足,必须在原有基础上不断加以完善,有针对性地予以解决,以便加深对潜孔锤钻进工艺的理解并合理运用,促进此种技术的横向拓宽和纵向发展^[20-22]。

(1) 正循环气动潜孔锤钻进技术。对于转盘钻机正循环气动潜孔锤钻进常用钻具配套为:水龙头+主动钻杆+单壁钻杆+钻铤+潜孔锤;若用全液压动力头钻机,动力头直接取代水龙头和主动钻杆,下部钻具相同。钻进时整个钻具随同钻机的回转机构一起转动。当冲击器活塞不断地冲击钻头时,就能够改变钻头每次破碎岩石的位置。所以钻头在孔底回转是连续的,冲击是间断的。正循环钻进对钻井直径和钻具匹配有一定要求,若达不到要求,往往会出现井内事故,严重影响钻进效率。

(2) 反循环气动潜孔锤钻进技术。钻遇裂隙发育、气体难以形成循环的复杂地层,尤其是钻遇采空区以及大口径钻井,可采用反循环气动潜孔锤钻进技术,克服正循环气动潜孔锤钻进存在的一些技术难题。转盘钻机可配气水龙头和气盒子、双壁主动钻杆,全液压钻机采用双通道动力头以及动力头

下配气盒子。其工作原理是:压缩空气从气水龙头或气盒子进入双壁主动钻杆、双壁钻杆,经由环状间隙进入反循环气动潜孔锤工作,岩屑进入内管中空通道返回地表。此种钻进工艺最大的优点是:排渣断面小,不受井径限制;上返风速高,排渣干净,不重复碎岩,钻进效率高,钻头寿命长;节约供风量,减少功率消耗和设备数量。同时也能有效地解决粉尘对环境 and 人员设备的危害。

3.3.2 气举反循环钻进技术

气举反循环钻进工艺由于循环液上返速度快、携带岩屑能力强,具有钻进效率高,钻头寿命长,成井质量好,在复杂地层中钻进安全可靠、钻探成本低、孔内事故少、节省辅助时间、减轻劳动强度以及对钻探设备适应性强等优点。多年来在地热井施工中大力推广应用,生产实践证明采用气举反循环钻进工艺比用常规钻进工艺施工钻效提高30%左右,成本降低1/3左右。特别是对于漏失地层和少水地区,气举反循环可以实现顶漏钻进,大大节约了施工用水,提高了钻进效率。另外,由于井底岩屑从钻杆内腔抽吸排出,储层中部分裂隙中的堵塞物也易被排出,有利于地热井通道的疏通,更有利于增大地热水的出水量。而且主要用清水钻进,节约了泥浆材料费,钻进过程又是洗井过程,故在钻井结束后可直接下泵抽水。很好地克服了常规钻井工艺对地热井施工所带来的危害。

气举反循环钻进技术与泥浆正循环钻进技术和潜孔锤空气钻进技术三者联合使用,形成了多工艺空气钻进技术优质、高效开发深部地热和地下水资源的有效方法^[23-25]。

4 结论

地热钻进从设备到工艺的飞速发展,已形成了地热钻探技术体系,具备大规模开发地热资源的能力,并朝着专业化、规模化方向发展。地热资源是一种无污染的清洁能源,正日益受到高度重视和政策支持。搞好地热资源开发利用,钻探工作是关键,发挥多工艺空气钻进技术的优势至关重要,相信在地热钻探界同仁的共同努力下,地热产业一定会蓬勃发展。

参考文献:

- [1] 赵福金. 地热井施工技术现状及使用问题研究[J]. 山西建筑, 2017, 43(33): 81-82.
- [2] 李鹏, 赵广慧, 贾宇喆, 等. 提高中深层地埋管取热能力的研究进展[J]. 太阳能学报, 2026, 47(2): 642-653.
- [3] 郝刚强, 王智慧, 姜亚东. 地热井施工流程及工程控制技术探讨[J]. 西部资源, 2015(1): 105-106.
- [4] 俞青山, 郭培合. 地热井施工工艺的研究与探讨[J]. 内蒙古煤炭经济, 2014(6): 115-116.
- [5] 何跃文, 杨雄文, 高雁, 等. 北美地热井高温硬岩钻井技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 79-87.
- [6] 冯红喜, 赖子威, 万振卓, 等. LQDR-1 地热温泉井钻井施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 309-315.
- [7] 陈论韬, 孙思平, 杨安虎, 等. 温米油田套管损坏原因分析及预防措施[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 118-121.
- [8] 费成俊. 八面河油田套管损坏原因分析及预防措施[J]. 江汉石油职工大学学报, 2013, 26(4): 24-27.
- [9] 王德良. 中原油田套管损坏原因分析及预防[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(2): 36-38.
- [10] 魏文忠, 赵金海, 范兆祥, 等. 胜利油田深井技术套管损坏原因分析及对策研究[J]. 石油钻采工艺, 2005, 23(4): 1-3.
- [11] 杨志彦, 任鸿飞, 林圣明, 等. 基于同井双目的层地热能勘探井身结构设计与实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 162-168.
- [12] 王培义, 张林洁, 张海雄, 等. 雄安新区岩溶热储地热井钻井技术难点及解决方案[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 153-159.
- [13] 张红红, 徐会文, 冯哲. 吉林省油页岩勘探中聚合物钻井液防塌机理的试验研究与应用[J]. 世界地质, 2006, 25(4): 445-449.
- [14] 王勇军, 刘刚, 佟铮, 等. 旋冲螺杆钻具在硬岩地热钻探中的应用研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 146-152.
- [15] 王勇军, 聂德久, 袁宝宏, 等. 天阳盆地高温硬岩地热钻探PDC钻头的应用研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 125-131.
- [16] 王勇军, 梁伟, 张涛, 等. 深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻头应用研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 92-98.
- [17] 封优生, 谢建军, 李海兴, 等. 多工艺空气高效钻进技术在地热井施工中的应用实践[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 353-357.
- [18] 程林, 满国祥, 孔令沪, 等. 多工艺空气钻进钻具配置研究[J]. 地质装备, 2021, 22(1): 17-21.
- [19] 何智敏, 隆威, 万步炎, 等. CJ-130型双向气动潜孔锤施工工艺初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(11): 65-68.
- [20] 石荆京, 张海林, 苏园园, 等. 空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 36-42.
- [21] 冯涛, 朱玉新. 浅谈钻进过程中空气潜孔锤的使用[J]. 中州煤炭, 2009(9): 81-83.
- [22] 袁新民. 潜孔锤钻进工艺及技术问题探讨[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(6): 76-78.
- [23] 伍晓龙, 冯钰琦, 杜垚森, 等. 气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 83-91.
- [24] 朱永宁. 气举反循环钻进在大厚度漂砾石地层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(5): 55, 61.
- [25] 岳松江, 彭冉冉. 气举反循环钻进技术应用[J]. 新疆地质, 2017, 35(S1): 202-205.

(编辑 王文)