

美国能源部地热钻井技术研发最新部署及干热岩开发示范创新实践

张 炜^{1,2}, 王海华^{1,2}, 翁 炜³, 姚树青^{1,2}, 邵明娟^{1,2}

(1. 中国地质调查局地质文献中心, 北京 100083; 2. 中国地质图书馆, 北京 100083;

3. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 与其他主要的可再生能源相比, 地热能是唯一能够提供基本负载电力的能源。干热岩是指不含原生水或含少量水的高温深部岩体, 可通过水力刺激改造形成增强型地热系统储层, 从而提取数量可观的地热能。干热岩型地热资源的开发面临两方面主要技术挑战, 一是花岗岩和玄武岩等极坚硬岩石对机械钻速的限制, 二是钻井所处地层温度超过随钻测量和旋转导向等工具电子设备的运行温度上限。近年来, 美国能源部资助的 FORGE 计划犹他州项目为测试新的钻头技术和优化钻井作业流程提供了机会, 以逐步提升机械钻速并降低钻井成本。本文综述了美国能源部地热技术办公室近年发展规划中对地热钻井技术研发的部署, 重点分析了犹他州项目在钻井实践过程中对基于物理限制因素重新设计的工作流程的应用, 总结了美国能源部围绕地热钻井技术开展的多次规划编制以及部署实施的相关项目涉及的主要领域, 以及犹他州项目在探索和实践钻井作业流程优化方面取得的认识。

关键词: 干热岩型地热资源; 增强型地热系统; 地热能前沿瞭望台研究计划; 机械比能; 钻压; 转速; PDC 钻头
中图分类号: TE249:P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)03-0001-08

The latest deployment of the U.S. Department of Energy's geothermal drilling technology R&D and innovative practices in the demonstration of hot dry rock development

ZHANG Wei^{1,2}, WANG Haihua^{1,2}, WENG Wei³, YAO Shuqing^{1,2}, SHAO Mingjuan^{1,2}

(1. GEO-Documentation Center, CGS, Beijing 100083, China; 2. China Geological Library, Beijing 100083, China;

3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Geothermal energy is the only base load power among the major renewable energy sources. Hot dry rock (HDR) is a high temperature rock mass buried in the deep earth without connate water or with a little water, which can form an enhanced geothermal system reservoir through hydraulic stimulation, and a considerable amount of geothermal energy can be extracted. There are two main technological challenges associated with the development of HDR geothermal resource, i.e., very hard rock, such as granite or basalt limits the rate of penetration (ROP), and the temperature of the drilling system exceeds the operational limits of electronic tools like measurement while drilling (MWD) and steerable rotary tools. In recent years, the Utah FORGE project funded by the U.S. Department of Energy (DOE) provided an opportunity to test new drill bit technology and optimize drilling procedures to deliver a step change in ROP performance and drilling cost reduction. In this paper, the deployment of geothermal drilling technology R&D in the recent development plan of DOE Geothermal Technology Office is reviewed, the application of the redesign workflows based on physical limits in the drilling practice of the Utah project is selective analyzed, and the

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-11-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.001

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地球科学文献知识服务与决策支撑”(编号: DD20230139)、“清洁能源情报跟踪与研究”(编号: DD20230602)

第一作者: 张炜, 男, 汉族, 1981年生, 正高级工程师, 主要从事地质科技战略情报研究工作, 北京市海淀区学院路29号, zhgwei@mail.cgs.gov.cn.

引用格式: 张炜, 王海华, 翁炜, 等. 美国能源部地热钻井技术研发最新部署及干热岩开发示范创新实践[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 1-8.

ZHANG Wei, WANG Haihua, WENG Wei, et al. The latest deployment of the U.S. Department of Energy's geothermal drilling technology R&D and innovative practices in the demonstration of hot dry rock development[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 1-8.

main areas covered by the multiple plans and projects funded by DOE in terms of geothermal drilling technology as well as the lessons learned from the Utah project in exploring and practicing drilling operation optimization are summarized.

Key words: HDR geothermal resources; enhanced geothermal energy (EGS); Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE); mechanical specific energy (MSE); weight on bit (WOB); revolutions per minute (RPM); polycrystalline diamond compact (PDC) bit

0 引言

地热能是一种清洁、可靠、空间分布广泛且相对可用的能源来源^[1]。与其他主要的可再生能源相比,地热能是唯一能够提供基本负载电力的能源。干热岩型地热资源是指赋存于不含原生水或含少量水的高温(180°C以上)深部岩体内资源潜力巨大的热能^[2-4],采用增强型地热系统(EGS)方法进行开发,即通过某些形式的刺激改造作业将两口井或多口井连通起来,流体被注入到高温岩体中,通过天然裂缝和诱发裂缝形成的网络在井之间进行传热,并将热量输送到地面系统用于发电^[5-6]。为了建造EGS井,必须使用专用的井筒轨迹方向控制器具及设备进行垂直和定向井钻进。美国是世界上最早提出EGS这一地热能开发概念及最早实施干热岩开发示范项目的国家^[7-8]。

美国2007年发布的《能源独立与安全法案》旨在推进可再生能源和能源效率的发展,是美国能源政策的重要里程碑,为未来能源政策的发展奠定了基础^[9]。这项法案包括的《先进地热研发法案》授权美国能源部牵头开展地热研究工作^[10]。此后,美国能源部成立了地热技术办公室,通过与工业界、学术界、美国能源部下属国家实验室等机构的合作正在开展以下领域的研发和示范工作:(1)提高EGS的商业可行性,重点是储层的表征、刺激改造和可持续生产;(2)改进水热型地热资源的勘探、地下表征和钻探技术,以降低整体地热部署及开发利用成本;(3)提高低温地热资源的生产效率,并通过地热储能等扩展其应用范围;(4)利用环境和资源评价、数据管理以及分析工具解决地热部署面临的非技术问题。地热技术办公室2019年发布的《GeoVision:开发地球深部的热量》报告表明,地热能发电的高容量系数(通常约90%)意味着地热电厂几乎可以以最大容量运行,从而使地热能发电可用于弥补风能和太阳能等间歇性能源的不足,进而使其成为美国可再生能源组合的重要组成部分。此外,该报告分析显示,到2050年,美国的地热能发电容量

将超过60 GW(占美国总发电量的8.5%),是目前地热能发电容量的26倍以上,相当于每年减排 5.16×10^8 t二氧化碳^[11]。

在2021年4月召开的领导人气候峰会上,美国承诺到2030年将美国温室气体排放量较2005年水平减少50%~52%,到2035年实现100%的无碳发电,到2050年实现净零碳排放^[12]。在此背景下,美国能源部启动了“地球能源攻关计划”,目的是在未来10年内大力推动清洁能源技术解决方案实现突破^[13]。其中,美国能源部于2022年9月发布的“增强型地热能源攻关计划”的目标是到2035年将EGS的成本降低90%至45美元/兆瓦时^[14]。

1 美国能源部地热技术办公室对地热钻井技术研发的部署

为了编制《GeoVision》报告,地热技术办公室组织相关机构开展了地热愿景研究,目的是根据当前和未来的地热勘探开发技术发展情况对未来的地热能利用增长进行分析。其中,由美国能源部桑迪亚国家实验室承担完成的储层维护与开发专项研究指出^[15],钻井成本占地热能发电项目总资本成本的50%以上,这使得降低钻井成本成为实现地热能开发利用经济可行性的最重要因素之一。影响油气行业钻井成本的可控因素包括钻井设计、资源深度和钻井效率,不可控因素包括油气价格、钻机可用性、以及融资成本和劳动力成本^[16-17]。相比于油气钻井,地热钻井通常面临更多的挑战,包括高温环境,具有磨蚀性、高基质强度的地层特性,腐蚀性地下水化学环境,以及较大的井径要求^[18]。

1.1 地热技术办公室五年项目规划

2022年2月,地热技术办公室发布了其五年项目规划,提出将通过6个研究领域的研发、示范和部署促进其战略目标的实现^[19]。其中,该规划指出用于地热能勘探开发的钻完井技术面临的挑战包括:(1)地层岩石硬度大、压力和温度高、裂缝发育且磨蚀性强;(2)地层常处于欠压状态,地层流体压力

低,易导致钻进过程中发生井漏;(3)较油气井所需井径更大;(4)地热资源的价值低于油气资源,限制了先进、高成本技术的应用。这些挑战会降低钻井效率、增加非生产时间、提高材料成本、造成钻井设

备损坏,因此需要在钻井时间和钻井材料两个方面实现性能提高和成本降低。表1总结了该规划针对钻完井技术提出的研发方向和路径。

表1 地热技术办公室五年项目规划针对钻完井技术提出的研发方向和路径

Table 1 R&D directions and paths for drilling and completion technologies proposed by the Geothermal Technology Office's five-year project plan

| 研发方向 | 研发目的 | 研发路径 |
|------|----------------|---|
| 钻井时间 | 提高钻井效率,减少无进尺时间 | 采用钻进速率更快、使用寿命更长的PDC钻头以及冲击锤钻井技术;提升马达、导向系统、随钻测井/随钻测量工具等井底钻具组合部件(密封件、电子元器件、动力元件)的耐高温性能 |
| | 优化改进钻井过程中的决策 | 基于数字技术从地面和井下获取的钻井数据(如机械比能)诊断钻井效率并采取应对措施 |
| | 管理和控制井漏 | 开发井漏预测和控制技术;加强钻井液的设计和采用先进的钻井液管理系统(如控压钻井) |
| | 减少下套管和水泥浆固井的时间 | 评价相关方法(如随钻下套管)的有效性、减少所用套管柱的数量 |
| 钻井材料 | 降低套管和水泥浆成本 | 加强套管设计,减少材料用量和套管柱数量,减小套管与岩石之间的环空(如可膨胀套管),缩短与下套管和水泥浆固井作业相关的无进尺时间;开展耐化学腐蚀、耐高温、自愈合水泥浆的研发 |
| 赋能技术 | 推动材料和制造方法的发展 | 重点改进高温、恶劣条件下地热能开发过程中目前使用性能差的关键部件的材料,同时在不降低性能的情况下减少性能优异的材料成本。应当优先研究的3个领域是弹性体、成本更低的高性能套管以及成本更低的高性能水泥浆 |

1.2 地热技术办公室正在资助实施的钻完井技术领域项目

2022年5月,地热技术办公室组织70名专家对美国能源部资助的5个技术领域的61个在研项目进行了同行评议,这五个领域包括数据、建模和分析,勘探和表征,资源量最大化,地下可及性,以及地下强化和可持续。地热能的勘探、表征和开发需要利用钻完井作业实现地下可及性^[20]。“地下可及性”领域相关项目的“技术评价”部分的评分结果见表2。

2 基于物理限制因素重新设计的工作流程的概述

机械比能是用于评价钻井系统钻进效率的参数,可衡量破碎移除单位体积岩石所消耗的能量^[21]。机械比能的计算方程包含输入钻井系统的相关钻井参数(钻压、转速和扭矩),以建立机械比能与特定系统的性能输出(机械钻速)的关系^[22-23]。理论上,机械比能越低,钻井系统破岩效率越高,除破岩外其他因素消耗的能量越少,但钻井功能障碍的出现可能导致机械钻速减小或钻头/井底钻具组合损坏^[24]。因此,为了识别功能障碍,必须在各种深度和参数组合下对机械比能进行持续监测^[25]。

如表2所示,在美国能源部资助的在研项目中,由得克萨斯农工大学牵头承担的“利用基于物理的钻井参数选择、工作流程实施和培训以减少非生产时间和增加机械钻速”项目是“地下可及性”领域唯一取得“技术成果与进展”部分评分满分的项目。该项目开始于2020年,目的是借鉴油气行业经验为地热行业建立基于物理限制因素重新设计的钻井作业实践。

基于物理限制因素重新设计的工作流程是围绕钻头性能的物理工作模式构建的。Dupriest等^[21]指出,如果钻头有效运行,则机械钻速由钻压、转速、井下岩石强度和钻头攻击性决定(图1a)。然而,钻压或转速的增加可能导致钻头功能障碍的发生,从而使机械钻速与钻压或转速之间呈非线性响应(图1b),其实质是与钻头性能无关的功能障碍会导致切削深度小于给定钻压下应有的深度,从而影响机械钻速。这意味着,要想获得更高的机械钻速,需要通过实时工作流程来识别钻井过程中遇到的钻头功能障碍,并改变响应实践或设计方法,以确保钻头在更高钻压下的高效钻进^[21]。需要注意的是,除了图1(b)所示的5类钻头功能障碍,钻压还

表2 “地下可及性”领域相关项目的“技术评价”部分评分结果

Table 2 Score results of the “technical evaluation” of the projects related to the field of “underground accessibility”

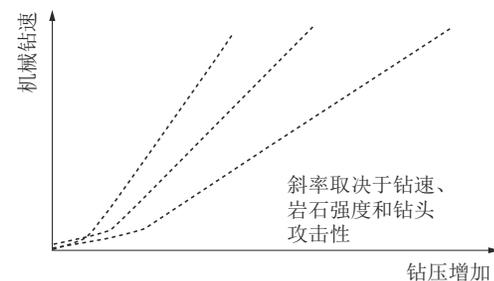
| 项目名称 | 牵头机构 | “技术评价”部分评分 | | | 总权重 平均分 |
|--|------------|------------|-------------|---------------|------------|
| | | 方法 | 技术成果 与进展 | 技术进展与 数据发布 | |
| 高温定向钻井的旋转活塞式马达 | 桑迪亚国家实验室 | 5.00 | 5.00 | 4.67 | 4.93 |
| 先进钻头材料的开发以增加地热钻井机械钻速 | 阿贡国家实验室 | 4.50 | 4.25 | 4.00 | 4.29 |
| 可持续地热井水泥浆以应对热-力条件面临的挑战 | 布鲁克海文国家实验室 | 4.67 | 4.67 | 4.33 | 4.60 |
| Ceramicrete®强有效地热井水泥浆的示范 | 阿贡国家实验室 | 3.33 | 3.33 | 3.33 | 3.33 |
| 用于地热井、采热井和碳封存井的可持续钻井水泥浆 | 布鲁克海文国家实验室 | 3.67 | 4.00 | 4.33 | 3.95 |
| 钻井技术评价 | 桑迪亚国家实验室 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 耐频繁热循环的先进隔热轻质抗热冲击水泥浆 | 布鲁克海文国家实验室 | 4.33 | 4.67 | 4.67 | 4.55 |
| 用于自动化断层响应和钻井优化的井下遥测和事件驱动 传感器融合 | 桑迪亚国家实验室 | 3.67 | 3.67 | 3.67 | 3.67 |
| 微孔钻井——低钻压技术的应用 | 桑迪亚国家实验室 | 4.33 | 4.33 | 4.33 | 4.33 |
| 开发针对地热井的先进阻漏方法和智能化井筒强化材料 | 俄克拉荷马大学 | 4.67 | 4.67 | 4.67 | 4.67 |
| 提高地热钻井总机械钻速和降低单位进尺成本的实时钻 井优化系统 | 俄克拉荷马州立大学 | 4.33 | 4.33 | 3.67 | 4.20 |
| 将能量集中于诱导微裂纹的产生以减小切削能和增加机 械钻速 | 得克萨斯农工大学 | 5.00 | 4.67 | 5.00 | 4.85 |
| 深度机器学习和基于云的数据聚合支持下的地热钻井优 化国际研究合作网络 | 俄勒冈州立大学 | 3.67 | 3.67 | 3.00 | 3.53 |
| 利用基于物理的钻井参数选择、工作流程实施和培训以 减少非生产时间和增加机械钻速 | 得克萨斯农工大学 | 4.67 | 5.00 | 4.67 | 4.82 |
| 针对近井筒地热储层应力评估的定向冷却诱导压裂技术 | RESPEC公司 | 3.67 | 3.67 | 4.00 | 3.73 |

可能受到非钻头因素的限制。总的来说,基于物理限制因素重新设计的工作流程是一个简单的“计划—执行—分析”过程,即通过钻压/转速阶跃测试,使钻压/转速逐渐增加直到观察到限制因素(钻头功能障碍或非钻头限制因素)为止,然后改变实践或重新设计以克服该限制因素,最后通过上述过程的重复使钻头达到其结构极限,从而实现更高钻压下的高效钻进。

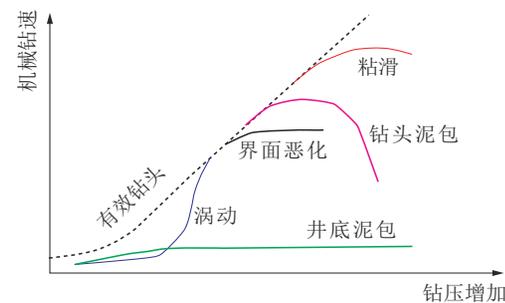
3 美国能源部干热岩示范项目钻井作业流程优化的创新实践

2014年,美国能源部宣布启动“地热能前沿瞭望台研究计划”(FORGE),旨在建立一个现场实验室来开展EGS的前沿研究、钻探和储层改造等技术的研发和示范、以及井间连通性和流动循环等方面的测试,以形成可降低工业开发风险和促进干热岩型地热资源产业化开发的严谨、可复制的方法^[26-28]。

从2017年至2021年,FORGE计划犹他州项目



(a) 理论上机械钻速与钻压的线性关系



(b) 钻头功能障碍影响下机械钻速与钻压的非线性关系

图1 机械钻速与钻压的关系^[21]

Fig.1 Relationship between the ROP and WOB

共钻进4口井,按先后顺序分别为58-32井、16(A)78-32井、56-32井和78B-32井。58-32井主要采用滚动轴承牙轮钻头钻进,但也尝试采用了PDC固定切削刃和滚动轴承牙轮/PDC复合钻头。测试结果表明滚动轴承牙轮钻头的性能优于其他类型的钻头。随着PDC钻头和金刚石切削刃技术的发展,犹他州项目在后续井的钻进中采用了新的钻头技术^[25]。图2示出了16(A)78-32井、56-32井和78B-32井纯钻进小时数与钻进深度的关系,表明尽管各井花岗岩的顶板垂深依钻井顺序逐渐变浅(即需要钻进的花岗岩厚度依顺序增大),但78B-32井需要的纯钻井小时数相比于56-32井和16(A)78-32井各减少了47%和62%^[25]。

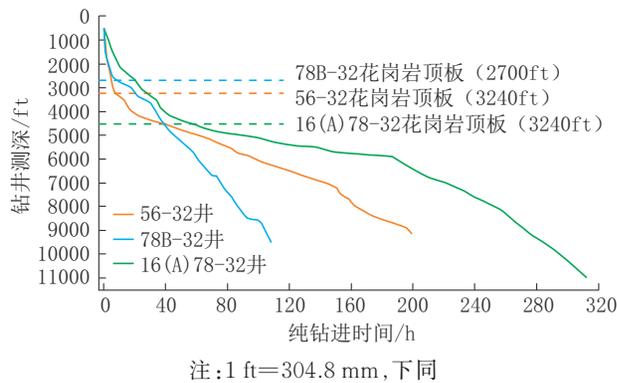


图2 犹他州项目纯钻进小时数与钻进深度的关系^[25]

Fig.2 Relationship between the pure drilling time and drilling depth of the Utah project

3.1 旨在优化机械比能的参数阶跃测试

在提升总体钻井效率的过程中,犹他州项目钻井团队进行了参数阶跃测试,以确保尽量减少故障和最大限度地提高效率^[25]。进行阶跃测试的方法是,在测试时逐步改变某项参数,以观察机械比能的变化。在阶跃测试过程中,改变的参数包括顶驱钻机的转速或钻压。如果改变参数后机械比能减小,则钻井系统开始以更高的效率钻进。因此,与原有的数值相比,应该首选新的参数值。如果改变参数后机械比能增大,则钻井系统正在以更低的效率钻进。因此,应该将参数改回原数值,或者再次调整参数进行进一步测试,直至得到最优参数。

3.2 钻头技术的改进

用于钻井作业流程优化实践的第一口井16(A)78-32井的钻头选择首先根据供应商的经验和模型

预测,其后根据起出钻头所遇功能障碍从现有库存中找到适用的钻头。16(A)78-32井中起出的大部分钻头在外肩处都表现出较高的磨损,这是由于在此半径范围内的切削齿滑动距离更大,以及定向工具的作业限制而降低钻压从而产生的涡动。对于第二口井56-32井,供应商能够根据16(A)78-32井的经验制造专门设计用于进一步降低肩部磨损率的钻头。主要变化是增加了V形切削齿的数量,这些切削齿增加了切削深度,并进一步减少了单位进尺的切削齿滑动距离。第三口井78B-32井较前两口井显著增加了钻压(从约200 kN增加至约300 kN),不仅没有出现钻头功能障碍或非钻头限制因素,还在井径增大47%(从222 mm增加至269.9 mm)的情况下提高了机械钻速和切削深度,从而减少了单位进尺的切削齿滑动距离和磨损,进而延长了钻头使用寿命(使犹他州项目的单趟钻井进尺从16(A)78-32井的336 m(平均机械钻速16 m/h)增加至78B-32井的643 m(平均机械钻速23 m/h))^[24]。

3.3 钻井实践

16A(78)-32大斜度注入井于2020年10月30日开钻并于2021年1月12日完钻,总垂深为2608.8 m,总测深为3348.8 m,实际钻井天数较设计周期提前了60多天(图3)^[29]。该井突显了深部地热能开发面临的技术挑战,包括在温度高达230℃的硬质花岗岩中精确钻取约1430 m垂直段(倾斜度 $<2^\circ$,以减少后续各段的套管磨损)、曲线段和约1100 m(偏斜 65°)切线段^[30]。通过对钻井作业流程优化的创新实践,使该井垂直段、曲线段和切线段的机械钻速得到不断提升,其中垂直段机械钻速平均值为3.9 m/h,曲线段平均值为10 m/h,切线段平均值为14.3 m/h。16A(78)-32井的快速、高效和安全完钻实现了油气钻井优化技术在深部地热能开发中的成功应用,包括分析嵌入在导向马达和垂直钻具中的钻井动态传感器获取的数据,地面监测机械比能,编制钻井参数路线图来提高钻井效率,在长切线段使用减摩工具,持续改进钻头设计,以及最大限度地减少钻井功能障碍和设备损坏。

56-32垂直监测井于2021年2月8日开钻并于2021年3月9日完钻。该井在钻至2286 m完井深度后,将地震光纤电缆下至2286 m,但在139.7 mm套管的固井过程中因拉伸作用损坏。在将222 mm井孔钻至完井深度后,两次尝试使用冲击锤进行钻

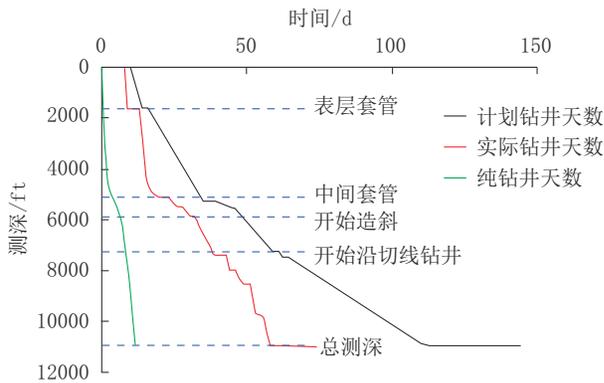


图3 16A(78)-32井的钻井天数与钻井深度的对比关系^[31]

Fig.3 Relationship between the drilling time and drilling depth of the 16A(78)-32 Well

进,未获成功,因此决定采用PDC钻头完成钻进。此外,该井通过密切监测机械比能以及根据需要调整钻井参数,将机械比能保持在约480 MPa^[32]。

78B-32垂直监测井钻深为2895.6 m英尺,在约820 m深度钻遇花岗岩顶板。该井在钻至2895.6 m完井深度后,将地震光纤电缆下至2593.2 m,但通过连通测试确定1198.8 m至2593.2 m的电缆发生损坏。此外,78B-32井通过对PDC钻头的改进和设计、对机械比能的更深入认识和实时监测、以及基于限制因素的重新设计,相比于16A(78)-32井和56-32井,将机械钻速提高约100%,从而将钻至2743.2 m测深(同56-32井完井测深)的纯钻井时间减少了约45%^[33]。

4 结论与认识

简单来看,基于EGS方法的干热岩型地热资源开发与非常规油气资源开发非常类似,都是将流体从渗透率非常低的岩层转移至井筒^[34]。然而,两者在开发机理上具有显著区别,致密沉积岩为目标储层的非常规油气开发是通过钻井的水力压裂改造形成油气流向井筒的裂缝网络通道,而高温花岗岩为目标储层的EGS开发是通过两口井或多口井的刺激改造(水力压裂/水力剪切)形成井间裂缝网络通道,以便利用工质流体(如水、二氧化碳)在通道内的循环流动实现对高温岩体的换热。

相比于储层改造,将油气钻完井技术用于地热领域是比较容易的。然而,以干热岩型地热资源为代表的深部地热能的钻完井技术面临的主要挑战包括^[35-38]:(1)地层岩石硬度大、单轴抗压强度高、研

磨性强、裂缝发育、可钻性差;(2)地层压力和温度高;(3)地层常处于欠压状态;(4)钻井深度大、钻柱长;(5)较油气井所需井径更大。因此,美国能源部围绕地热钻完井技术开展了多次规划编制并部署实施了多个项目,涉及的主要领域包括^[15,19-20,39-42]:

(1)提升破岩效率:提高固定切削刃PDC钻头以及压缩空气或水力驱动冲击锤钻井技术在地热环境下的适用性;研究PDC钻头切削齿与不同类型岩石的相互作用;设计和合成新型钻头材料并评估其破岩性能;探索采用化学强化、喷射辅助、激光强化等钻井技术;提升马达、导向系统、随钻测井/随钻测量工具等井底钻具组合部件的耐高温性能。

(2)优化钻井过程决策:建立基于物理限制因素重新设计的钻井作业流程;现有基于机械钻速的钻井过程控制(如地面机械比能监测)能够较好地把控整体性能,但对钻井功能障碍的指示性较差且响应较慢,因此应开发针对钻压、转速和扭矩等参数的井下测量系统;开发可整合多项钻井效率分析(如钻杆振动、机械比能、机械钻速、切削齿温度场、钻头磨损)的实时钻井过程优化系统;引入机器学习和人工智能方法。

(3)管理井漏和钻井液:开发井漏预测和控制技术;改进堵漏材料的设计(如高性能形状记忆聚合物);建立适用于地热环境的井壁强化方法和堵漏材料有效放置技术;加强地热井钻井液设计和开发耐高温添加剂;采用先进的钻井液管理系统(如控压钻井)。

(4)改进套管和水泥浆固井:通过套管设计在减少材料用量以及缩短与套管和水泥浆固井作业相关的无进尺时间的同时确保井的长期安全使用;开发耐化学腐蚀、耐高温、自愈水泥浆。

FORGE计划犹他州项目作为美国能源部实现降低工业开发风险和促进干热岩型地热资源产业化开发的旗舰项目,其在实施过程中对优化钻井作业流程的探索和实践表明^[21,31,43]:

(1)泥浆冷却系统可使井底钻具组合在16A(78)-32井井趾处的温度保持在110℃以下,使得较低成本的低额定温度(如150℃)油气井钻具能够用于钻进地热井。

(2)在16A(78)-32井垂直段的钻进过程中,Ø311 mm和Ø171 mm垂直段采用低速马达(0.15 r/gal)(1 gal=3.8 L,下同)辅助的机械式垂直钻具进

行钻进,将井斜控制在 2° 以内;在花岗岩内,13 mm 切削齿的破岩效果优于16 mm 切削齿;V形切削齿的破岩效果优于脊形金刚石切削齿或锥形切削齿。

(3)在16A(78)-32井曲线段的钻进过程中,在倾角超过 43° 后,为了与造斜点形成适当角度,不需要使用扭矩控制单元(切削深度限制器);0.24 r/gal 马达(曲线段和水平段)的效率优于0.15 r/gal 马达(垂直段);弯壳体马达(0.24 r/gal)组件的性能优于马达辅助(0.15 r/gal)的垂直钻具。

(4)在16A(78)-32井切线段的钻进过程中,在长切线井段应用的减摩工具改善了钻压传递、机械钻速以及对工具面的控制;使用双扶正器导向马达改善井底钻具组合居中度;不需要使用扭矩控制单元来缓解切削结构的损坏;增大后倾角和增加倒角长度可以在不损失机械钻速的情况下提高钻具的耐用性。

(5)在16A(78)-32井使用的大多数钻头中,机械钻速刚开始较高,通常在钻进一段距离后机械钻速急剧下降并保持在稳定值,直到再次出现机械钻速下降和机械比能增加,这表明此时钻井效率非常低,需要更换钻头。

(6)以10 r/min的增量进行转速阶跃测试,利用机械比能或井下横向振动测量可以识别应避免的钻柱共振频率。即使没有更换井底钻具组合,也应该在每次钻进后进行该测试。以约22 kN的增量进行钻压阶跃测试,当机械比能和其他数据显示异常时,停止增加钻压。钻压不要超过钻头供应商指定的结构强度极限。必须定期重复钻压阶跃测试(4~5次),因为造成功能障碍的钻井条件可能会发生变化,尤其是随着岩性和钻柱长度的变化。

(7)钻压的增加不会加快钻头的磨损,因为更高的钻压增加了切削深度,从而减少了单位进尺的滑动距离和磨损。此外,在高磨蚀性硬岩地层中,钻头正常摩擦磨损的最终状态是在长时间运行后突然发生热失效,并且切削齿磨损很小。

参考文献(References):

[1] 许天福,袁益龙,姜振蛟,等.干热岩资源和增强型地热工程:国际经验和我国展望[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(4):1139-1152.
XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth

Science Edition), 2016, 46(4): 1139-1152.
[2] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质量报,2018,92(9):1936-1947.
XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936-1947.
[3] 王文,吴纪修,施山山,等.探秘“能源新星”——干热岩[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):88-93.
WANG Wen, WU Jixiu, SHI Shanshan, et al. Probe a new energy-hot dry rock[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(3): 88-93.
[4] 谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 110-117.
[5] 谭现锋,刘肖,马哲民,等.干热岩储层裂缝准确识别关键技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):47-56.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, MA Zheming, et al. Discussion on the key technology for fracture identification in hot dry rock reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 47-56.
[6] 郑君,樊涛,窦斌,等.二氧化碳爆破储层改造近炮孔处岩石性质变化及温度分布规律研究[J].钻探工程,2022,49(3):13-22.
ZHENG Jun, FAN Tao, DOU Bin, et al. Rock property change and temperature distribution near blasting holes in carbon dioxide blasting reservoir treatment[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 13-22.
[7] Li S, Wang S, Tang H. Stimulation mechanism and design of enhanced geothermal systems: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111914.
[8] 王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展[J].地质与资源,2023,32(1):85-95,126.
WANG Guiling, LU Chuan. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target[J]. Geology and Resource, 2023, 32(1): 85-95, 126.
[9] Department of Energy, U. S. Energy saver history timeline: Geothermal energy[EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/energysaver/energy-saver-history-timeline-geothermal-energy#2001>.
[10] Congress.gov. H. R. 2304-110th Congress (2007-2008). Advanced geothermal energy research and development act of 2007[EB/OL]. (2007-05-17) [2023-10-11]. <https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/2304>.
[11] Department of Energy, U. S. GeoVision[EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geovision>.
[12] Department of Energy, U. S. Energy earthshots frequently asked questions[EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/earthshot/energy-earthshots-frequently-asked-questions>.
[13] Department of Energy, U. S. Energy earthshots initiative[EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/energy-earthshots-initiative>.
[14] Department of Energy, U. S. Enhanced Geothermal Shot[EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-shot>.
[15] Lowry T S, Finger J T, Carrigan C R, et al. GeoVision analysis supporting task force report: Reservoir maintenance and development[R/OL]. (2017-09-01) [2023-10-11]. <https://doi.org/10.2172/1394062>.

- [16] Lukawski M Z, Anderson B J, Augustine C, et al. Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 118:1-14.
- [17] Yost K, Valentin A, Einstein H H. Estimating cost and time of wellbore drilling for engineered geothermal systems (EGS) -Considering uncertainties[J]. *Geothermics*, 2015, 53:85-99.
- [18] Finger J T, Blankenship D A. Handbook of best practices for geothermal drilling [R/OL]. (2012-02-01) [2023-10-11]. <https://doi.org/10.2172/1325261>.
- [19] Porse S, Winick J, Tasca C, et al. Geothermal Technologies Office multi-year program plan[R/OL]. (2022-02-01) [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/GTO%20Multi-Year%20Program%20Plan%20FY%202022-2026.pdf>.
- [20] Department of Energy, U.S. Geothermal Technologies Office 2022 peer review report [R/OL]. (2022-10-01) [2023-10-11]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/GTO%202022%20Peer%20Review%20Final%20Report_Updated%20October%202022.pdf.
- [21] Dupriest F, Noynaert S. Drilling practices and workflows for geothermal operations [C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2022.
- [22] Dupriest F, Pastusek P, Lai, S, et al. Standardization of mechanical specific energy equations and nomenclature [C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2022.
- [23] 高德利,刘维,万绪新,等. PDC钻头钻井提速关键影响因素研究[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4):20-34.
GAO Deli, LIU Wei, WAN Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4):20-34.
- [24] Watson W, Dupriest F, Witt-Doerring Y, et al. IADC code upgrade: Data collection and workflow required to conduct bit forensics and create effective changes in practices or design [C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2022.
- [25] Samuel A, Rickard W M, Rivas E, et al. Improvement in rate of penetration in FORGE drilling through real time MSE analysis and improved PDC technology [C]//47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA, 2022.
- [26] Department of Energy, U.S. FORGE [EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/forge>.
- [27] 亢方超,唐春安,李迎春,等. 增强地热系统研究现状:挑战与机遇[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(10):1767-1777.
KANG Fangchao, TANG Chun'an, LI Yingchun, et al. Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10):1767-1777.
- [28] 解经宇,王丹,李宁,等. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3):321-329.
XIE Jingyu, WANG Dan, LI Ning, et al. Development status and suggestions of hot dry rock hydraulic fracturing for building geothermal reservoirs [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3):321-329.
- [29] Energy and Geoscience Institute at the University of Utah. Utah FORGE: Well 16A(78)-32: Summary of drilling activities [R/OL]. (2021-04-13) [2023-10-11]. <https://gdr.openei.org/submissions/1296>.
- [30] Pink A, Patterson A, Thoresen K E. Building a system to solve the challenges of drilling hot hard rock for geothermal and oil and gas [C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, Stavanger, Norway, 2023.
- [31] Sugiura J, Lopez R, Borjas S, et al. Oil and gas drilling optimization technologies applied successfully to unconventional geothermal well drilling [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dubai, UAE, 2021.
- [32] Energy and Geoscience Institute at the University of Utah. Utah FORGE: Well 56-32 drilling data and logs [R/OL]. (2022-10-31) [2023-10-11]. <https://dx.doi.org/10.15121/1777170>.
- [33] Energy and Geoscience Institute at the University of Utah. Utah FORGE well 78B-32 daily drilling reports and logs [R/OL]. (2023-04-28) [2023-10-11]. <https://dx.doi.org/10.15121/1814488>.
- [34] AltaRock Energy. Moving technology from oil and gas to super-hot EGS [C]//47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, USA., 2022.
- [35] 王志刚,胡志兴,李宽,等. 干热岩钻井的挑战及技术展望[J]. *科技导报*, 2019, 37(19):58-65.
WANG Zhigang, HU Zhixing, LI Kuan, et al. Challenges and technical prospects of dry hot rock drilling and completion [J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(19):58-65.
- [36] 思娜,叶海超,牛新明,等. 油气钻井技术在干热岩开发中的适应性分析[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(4):35-40.
SI Na, YE Haichao, NIU Xinming, et al. Analysis on the adaptability of oil and gas drilling technologies in development for hot dry rocks [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(4):35-40.
- [37] 季科,郭健翔,毕学军,等. 高温干热岩采热系统钻探技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28):11900-11909.
JI Ke, GUO Jianxiang, BI Xuejun, et al. Research progress on drilling technology of high-temperature hot dry rock mining heat system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28):11900-11909.
- [38] 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.
HE David, YANG Xiongwen, GAO Yan, et al. North America geothermal high temperature hard rock drilling technology [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(1):79-87.
- [39] Department of Energy, U.S. Geothermal Technologies Office 2015 peer review report [R/OL]. (2015-12-01) [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/articles/2015-gto-peer-review>.
- [40] Department of Energy, U.S. Geothermal Technologies Office 2017 peer review report [R/OL]. (2018-04-01) [2023-10-11]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/articles/2017-peer-review-report-geothermal-technologies-office>.
- [41] Visser C F, Eustes III A W, Baker W, et al. Geothermal drilling and completions: Petroleum practices technology transfer [R/OL]. (2019-01-09) [2023-10-11]. <https://doi.org/10.2172/1490999>.
- [42] Chatterjee K, Dick A, Macpherson J. High temperature 300°C directional drilling system [R/OL]. (2015-07-31) [2023-10-11]. <https://doi.org/10.2172/1208637>.
- [43] Energy and Geoscience Institute at the University of Utah. Utah FORGE phase 3A, year 2, annual report [R/OL]. (2022-09-19) [2023-10-11]. <https://gdr.openei.org/submissions/1401>.