

共和盆地干热岩 GH-05 井钻井关键技术

李 宽, 施山山, 张恒春, 尹 浩, 王 文*, 吴纪修, 高鹏举, 王跃伟

(中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399)

摘要: GH-05井是青海共和盆地干热岩试采工程部署的一口增效井, 设计井深4000 m, 为双靶点定向井。在邻井施工经验基础上, 增加了表层套管与技术套管下入深度, 降低了长裸眼段掉块卡钻风险, 提高了生产套管固井质量。钻具组合增加减震推力器与随钻震击器, 有效降低了剧烈震动对井下工具的不良影响, 马达寿命提高35%, 未出现牙轮脱落、轴承失效、断钻具等事故, 及时处理了刮卡, 实现了安全钻进。基于岩石破碎比能理论, 兼顾碎岩效率和牙轮寿命, 满足岩屑上返的需要, $\Phi 311.2$ mm 口径选择钻压203~291 kN、转速120~180 r/min、排量43.3~51.4 L/s, $\Phi 215.9$ mm 口径选择钻压131~186 kN、转速180~270 r/min、排量33~38.5 L/s, 强化钻井参数使花岗岩地层机械钻速提高了34%~47%, 钻井周期缩短了20%以上, 创造了 $\Phi 311.2$ mm 钻头207.51 m和 $\Phi 215.9$ mm 钻头183.42 m的花岗岩钻进纪录, 基本实现“机械钻速4 m/h、钻头寿命200 m”的经济指标。研发并应用耐温220 °C复合有机盐钻井液体系, 降低了热储层近井污染, 有效降低定向托压, 泥浆维护成本降低40%以上。

关键词: 干热岩钻井; 双靶点定向井; 井身结构; 钻具组合; 钻井参数; 高温钻井液; 共和盆地

中图分类号: TE249; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0131-09

Key technologies of Well GH-05 drilling for hot dry rock in Gonghe Basin

LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Hengchun, YIN Hao, WANG Wen*, WU Jixiu, GAO Pengju, WANG Yuewei
(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China)

Abstract: Well GH-05 is an efficiency-enhancing well deployed for the hot dry rock pilot production project in the Gonghe Basin, Qinghai Province. It is a dual-target directional well with a designed depth of 4000 m. Based on the construction experience of adjacent wells, the running depth of the surface casing and technical casing was increased, the risk of block falling and sticking in the long open hole section was reduced, and the cementing quality of the production casing was improved. In addition, a shock-absorbing thruster and a drilling jar were added in the bottom hole assembly, which effectively reduced the adverse effects of severe vibrations on downhole tools. The service life of the motor was increased by 35%, and no accidents happened such as cone dropout, bearing failure, and drill string breakage, achieving safe drilling. Based on the theory of specific energy of rock fragmentation, taking both the rock fragmentation efficiency and roller cone bit life into account, meeting the upward return of cuttings, for the borehole diameter of $\Phi 311.2$ and $\Phi 215.9$ mm, the weights on bit were selected to be 203~291 and 131~186 kN respectively, the rotational speeds were 120~180 and 180~270 r/min respectively, and the displacements were 43.3~51.4 and 33~38.5 L/s respectively. Furthermore, strengthening the drilling parameters increased the rate of penetration (ROP) in the granite formation by 34%~47%, and the drilling cycle was shortened by over 20%. It has created the drilling records of 207.51 m with a $\Phi 311.2$ mm bit and 183.42 m with a $\Phi 215.9$ mm bit in the granite formation, basically achieving the economic indicators of “ROP of 4 m/h and bit life of 200 m”. Finally, a composite organic salt drilling

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-05-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.015

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“紧缺战略性矿产高效勘查智能化钻探技术支撑”(编号: DD20240121)

第一作者: 李宽, 男, 汉族, 1987年生, 正高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事非常规能源钻采技术研究工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, lkuan@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 王文, 女, 汉族, 1990年生, 工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探工程技术研发、施工与管理工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, 771843979@qq.com。

引用格式: 李宽, 施山山, 张恒春, 等. 共和盆地干热岩 GH-05 井钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 131-139.

LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Hengchun, et al. Key technologies of Well GH-05 drilling for hot dry rock in Gonghe Basin[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 131-139.

fluid system with a temperature resistance of 220 °C was developed and applied, reducing the near-wellbore pollution in the geothermal reservoir, effectively reducing the directional sticking pressure, and cutting the drilling fluid maintenance costs by over 40%.

Key words: hot dry rock drilling; dual-target directional well; casing program; bottom hole assembly; drilling parameters; high-temperature drilling fluid; Gonghe Basin

0 引言

干热岩一般指埋深大于 3000 m, 温度高于 180 °C, 不含或仅含少量流体, 其热能在当前技术经济条件下可以利用的高温岩体, 是一种非碳基清洁能源, 具有资源量大、高效稳定等优点, 成为国际公认的具有竞争力的替代能源^[1-2]。根据《中国地热能发展报告(2018)》数据, 我国大陆埋深在 3000~5500 m 的干热岩型地热资源基础资源量约为 3.1×10^{24} J (折合 106 万亿 t 标准煤), 按照可采资源量 2‰ 计算, 约为 2024 年我国能源消费总量 (59.7 亿 t 标准煤) 的 35 倍以上^[3-6]。

增强型地热系统 (Enhanced Geothermal System, EGS) 是干热岩开发的主要手段, 是通过钻完井和水力压裂等方法制造出一个人工热储, 将地面冷水注入地下, 从干热岩体缝网中提取热量的地热工程^[7-10]。钻完井是实现干热岩开发的关键环节, 成本占 EGS 工程的 35%~50%, 技术优劣直接影响干热岩产业化进程。自 20 世纪 70 年代以来, 美国、法国、澳大利亚等发达国家先后启动了 40 余个 EGS 工程的研究与试验, 并逐步提高钻完井与井间连通能力。1974 年美国率先启动了 Fenton Hill 项目, 通过在主井中侧钻分支井的方式提高井间连通能力, 可提取热功率达到 10 MW。1987~2013 年法国实施的 Soultz 项目采用定向钻井技术完成 3 口注采井, 井间距 550~650 m, 实现了兆瓦级商业发电^[11-12]。2015 年美国能源部启动了“地热能前沿瞭望台计划 (Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy, FORGE)”, 2016~2018 年基于油气钻井技术完成了 3 口勘探井施工, 采用“高效钻头+泥浆马达+MWD”钻具组合, 碎岩以牙轮钻头为主, 并试验了狮虎兽混合钻头, 机械钻速最高 4 m/h, 寿命 40~60 h; 2019 年至今完成了 2 口大斜度定向井和 2 口微震监测井, 应用了垂直钻井、旋转导向、高效碎岩、地表钻井液冷却、隔热阻热钻杆、防堵塞取心等关键技术, 最为成功的就是硬岩 PDC 钻头的研发应用和基于 MSE 理论的钻井参数强化, 钻

完井技术取得突破性进展, 花岗岩地层机械钻速超过 30 m/h, 钻头寿命超过 600 m, 单井钻井成本降低 500 万美元, 达到产业化开发水平^[13-14]。

2012 年以来, 我国在干热岩勘查开发方面陆续开展了理论研究、基础实验及干热岩资源调查评价工作。2017 年 9 月, 在青海共和盆地 3705 m 深度钻获温度超 200 °C 的高温干热岩体, 实现我国干热岩资源勘查的重大突破^[15]。为支撑国家能源结构调整和“双碳”目标实现, 2019 年中国地质调查局联合青海省人民政府, 在青海共和盆地启动了我国首个干热岩试验性开发工程, 部署了“1 眼直井+2 眼定向井”的开发井组, 如图 1 所示, 2021 年实施井间循环连通并成功实现了国内首例干热岩试验性发电并网^[16]。为进一步改善井间连通效果, 增大储层开发利用率, 提高采收率, 2022 年在青海共和恰卜恰开发场地新部署了 GH-04 和 GH-05 试采增效井, 其中, GH-05 井由中国地质科学院勘探技术研究所组织实施, 本文重点介绍该井钻完井关键技术与应用情况。



图 1 恰卜恰干热岩开发现场

Fig.1 The development site of hot dry rock at Qiabuqia

1 恰卜恰干热岩体钻完井工作基础

2016 年以来, 中国地质调查局、青海省自然资源厅在共和盆地恰卜恰干热岩体完成 4 口干热岩井施工, 分别为 GR1 井、GH-01 井、GH-02 井和 GH-03 井, 钻完井经验可为 GH-05 井施工提供参考。

1.1 GR1井

GR1井为勘探井,设计为直井,由山东省地矿局第二水文地质工程地质大队组织实施,完钻深度3705 m,完钻口径152.4 mm。花岗岩地层优选孕镶金刚石全面钻头,平均寿命143 m,机械钻速1.3 m/h。研发应用耐温240℃的聚合物防塌钻井液体系,具有优良的抗高温流变性,悬浮、携砂能力强。采用螺杆、扭冲等井下提速工具,平均机械钻速1.30 m/h^[17-19]。

1.2 GH-01井

GH-01井为试采注入井,设计为直井,由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心组织实施,完钻深度4002.88 m,完钻口径215.9 mm,井底最高温度209℃。GH-01井在1508~2256 m井段试验应用了空气钻井技术,配备的设备与气动锤如图2所示,其中:牙轮钻头空气钻进63 m,平均机械钻速1.64 m/h;气动锤钻进685 m,钻压10~20 kN,转速30 r/min,风量100 m³/min,平均机械钻速5.35 m/h,最高回次进尺206 m,大幅度提高了机械钻速和回次进尺。同时暴露出以下问题:易出现钻头掉齿、断齿情况,保径磨损严重造成小井眼,需要单独下入牙轮钻头进行扩划眼,增加了辅助时间^[20];受井底高温影响,出现气动锤逆止阀密封失效问题,气动锤不起振。



(a)设备 (b)器具

图2 空气钻井配套设备与器具

Fig.2 Equipment and tool for air drilling

1.3 GH-02井

GH-02井为试采采出井,设计为双靶点定向井,由中国地质科学院勘探技术研究所组织实施,完钻深度4013.89 m,完钻口径215.9 mm,AB靶点中靶精度分别为4.85、8.97 m。针对井下高温,从提高仪器耐温能力、抗震防腐能力、传输速率和解码质量等入手,开发了耐温175℃无线随钻测量仪器,在GH-02井下井使用时间超过1000 h,最高服役温度162℃,信号稳定。优选“强保径牙轮钻头+耐高

温单弯螺杆+耐高温MWD”钻具组合,如图3所示,采用“大钻压、大泵量、大扭矩、高转速、高泵压”三大两高钻井参数,花岗岩地层平均回次进尺118.64 m,最高进尺175.08 m,平均机械钻速2.22 m/h。开发了螺旋板式钻井液冷却装备,控制入井温度45~55℃,井底循环温度最高105℃,远低于MWD和螺杆钻具的耐温极限^[21]。



图3 GH-02井钻具组合

Fig.3 Bottom hole assembly of Well GH-02

1.4 GH-03井

GH-03井为试采采出井,设计为双靶点定向井,由北京探矿工程研究所组织实施,完钻深度4008.88 m,完钻口径215.9 mm,井底最高温度203℃。施工过程中,研发并试验耐高温涡轮钻具与长寿命金刚石钻头^[22];自主研发耐温240℃水基环保型钻井液体系,实现了全部耐高温材料国产化^[23]。

2 地质设计与施工难点

2.1 GH-05井地质设计

GH-05井设计为双靶点定向井,要求中靶精度控制在25 m内(球面半径),设计井深4000 m,井底温度超过200℃,完钻口径不低于215.9 mm。恰卜恰场地地层相对清晰,0~1350 m依次为第四系全新统-中更新统、共和组,以及新近系临夏组与咸水河组,1350 m以下地层为三叠系印支晚期花岗岩体,岩性为灰白色中粗粒花岗岩,主要矿物成分为斜长石、石英和黑云母^[24-25]。

2.2 钻完井技术难点

(1) 花岗岩致密坚硬, 研磨性强。花岗岩地层莫氏硬度6~7, 石英含量高, 可钻性极差, 机械钻速低; 地层研磨性强, 牙轮镶齿和保径齿加速磨损, 钻头寿命短, 扩眼辅助作业时间长; 碎岩过程中跳钻剧烈, 容易发生牙轮脱落和断钻具事故^[26], 螺杆马达轴承寿命明显降低。

(2) 地层温度高。给操作人员造成高温烫伤的风险, 钻井泥浆泵故障率高, MWD、螺杆马达等井下工具面临高温考验, 钻井液处理剂加速降解、失效, 围岩易出现热破裂现象造成井壁失稳。

(3) 压裂井段井壁稳定性差、漏失风险高。在大规模储层改造的基础上实施新增试采井, 目标层位地层极为破碎, 井壁稳定性差, 发生掉块卡钻风险高; 裂隙发育, 地层承压能力低, 地层压力与地层漏失压力窗口窄, 导致钻井和固井作业过程中易发生漏失。

(4) 热储层保护要求高。在前期“一注两采”井组储层改造过程中, 相比于GH-01井压裂, GH-02井和GH-03井井口压力升高10~15 MPa, 现场技术人员分析可能的原因之一是钻井和固井施工过程中惰性堵漏材料进入地层, 封堵了循环通道。

3 钻完井关键技术

在前期技术攻关与钻完井施工基础上, 项目组从井身结构、钻具组合、钻井参数、钻井液体系等方面进行优化与改进, 以进一步提高机械钻速、缩短钻井周期。

3.1 井身结构优化

GH-05井设计为三开井身结构, 如图4所示, 相比于邻井, 增加了表层套管和技术套管的入下深度, 优势在于以下几个方面。

(1) 有效封隔浅部复杂地层。钻穿表土层、松散破碎层以及新近系不稳定泥岩、砂岩与三叠系风化壳后, 下入表层套管, 可有效封隔上部松散易坍塌缩径地层, 为二开安全钻进创造有利条件。

(2) 提高井壁稳定性。裸眼段越长, 围岩暴露时间越长、面积越大, 受地层压力、岩石特性等因素影响, 越容易出现坍塌、掉块、缩径等问题, 技术套管下至2400 m, 裸眼段长度由2500 m降至1600 m, 可大幅度降低井壁失稳风险。

(3) 降低钻井风险。技术套管可有效封隔

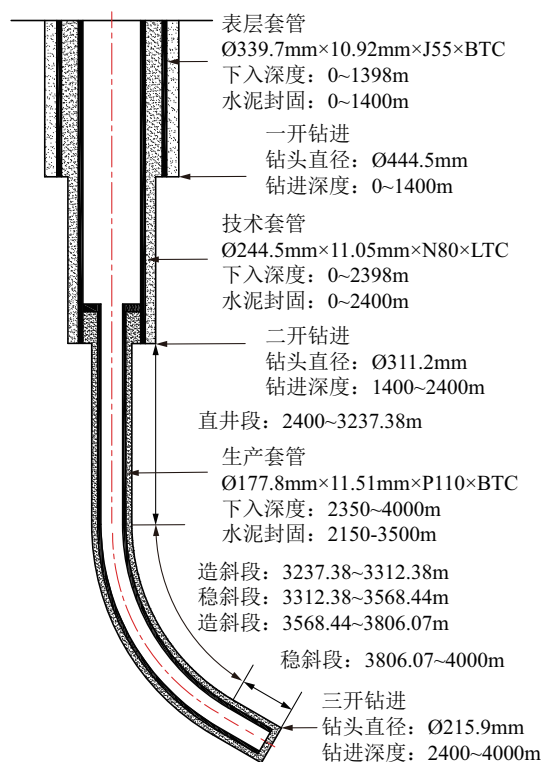


图4 GH-05井设计井身结构

Fig.4 Designed casing program of Well GH-05

1686~1695、2037~2072和2150~2180 m的3个水层, 避免三开钻井过程中出现“上漏-下塌”问题, 提高钻井作业效率和安全性。

(4) 提高生产套管固井质量。生产尾管注水泥浆长度减少900 m, 注水泥浆过程中3500 m以下目标储层液柱压力降低5 MPa以上, 可有效降低泥浆漏失引起的水泥浆下沉风险, 提高固井质量、降低储层污染。

3.2 钻具组合优化

GH-02井和GH-03井采用“牙轮钻头+单弯螺杆+MWD”钻具组合取得了良好的提速效果, 为降低有害震动对井下工具、仪器与钻柱的不良影响, 提高事故预防与处理能力, GH-05井在原有钻具组合基础上增加了减震推力器和随钻震击器。

3.2.1 减震推力器

花岗岩地层钻进过程中钻头钻具要承受各向震动, 呈现跳动、摆动或涡动状态, 轴向瞬间冲击力可到正常钻压的1.6~3.3倍, 瞬间转速可到正常转速的2倍左右^[27]。牙轮钻头在井底为滚动状态, 相比于PDC剪切碎岩, 转速波动对牙轮切削齿的损害相对较小, 轴向振动是影响井下工具和钻柱的主要

因素。机械式减震器一般采用碟簧作为储能机构,碟簧快速伸长容易造成钻头快速触碰井底,产生二次弹跳对钻头造成损坏。因此,综合考虑工况适应性和工具可靠性,GH-05 井使用带有流变阻尼功能的轴向液压式减震推力器。

减震推力器结构如图 5 所示,主要由上接头、压

力显示机构、多级活塞机构、密封系统、花键芯轴等组成。钻进过程中遇到跳钻时,钻头会驱动花键芯轴上行,芯轴带动活塞运动,活塞腔依靠液力产生阻尼作用,吸收井底有害震动,有效缓解跳钻,保护井下工具^[28]。GH-05 井三开井段选用 DTT172 型减震推力器,耐温 150℃,3 级活塞,最大工作行程 350 mm。

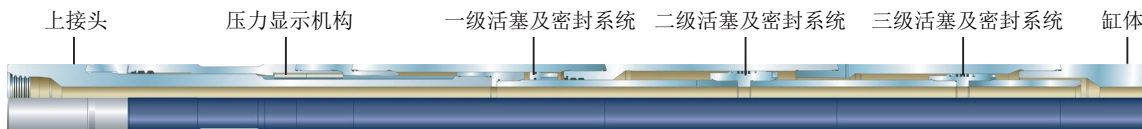


图 5 减震推力器结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of shock absorber thruster

3.2.2 随钻震击器

为预防或及时处理 GH-05 井下部井段钻进、起钻、下钻、划眼过程中可能出现的卡钻事故,随钻柱下入震击器。根据工作原理,随钻震击器分为机械式和液压式,机械式的特点是密封性能要求不高,对介质和温度适应性强,液压式的特点是性能稳定,可以调整震击吨位,产生的震击力更大^[29-30]。根据 GH-02 井施工经验,掉块卡钻为主要风险,为硬卡,强大的震击力是成功解卡的关键。此外,钻井液冷却装备可将井底温度控制在 105℃ 以内,因此选择液压式随钻震击器。

液压式随钻震击器结构如图 6 所示,主要由连

接机构、机械锁紧机构、液压阻尼机构、扭矩传递机构、震击机构和密封机构等组成。当需要上击作业时,上提钻柱给工具施加向上的提拉力,上击液压阻尼机构随之上行,液压油受压并憋压,实现钻柱蓄能;当上行达到一定行程时,油压瞬间卸载,钻柱蓄能释放产生向上的震击力。当需要下击作业时,通过下放钻柱施加向下的力,钻柱蓄能的过程与上击相同,最终钻柱蓄能释放产生向下的震击力。GH-05 井三开井段选用 QYSZ178 型随钻震击器,该震击器采用合金密封设计,最高耐温 150℃,上击载荷可达 400 kN,下击载荷可达 240 kN,震击延时 30~180 s。

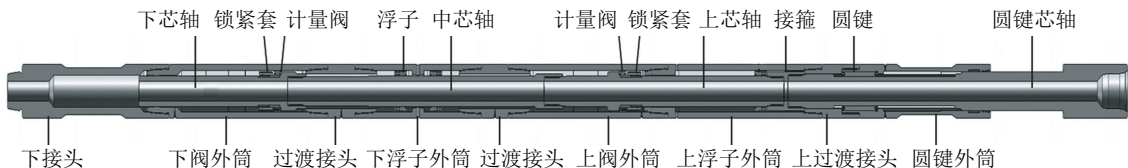


图 6 液压式随钻震击器结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of hydraulic drilling jar

3.3 规程参数优选

GH-05 井花岗岩地层采用牙轮钻头钻进,Ø 311.2 mm 井段使用江钻 MD637 牙轮钻头,Ø 215.9 mm 井段使用江钻 SMD637HDY 牙轮钻头。为进一步提高机械钻速和钻头寿命,本项目对钻压、转速和泵量进行了研究与计算,以提高钻头与地层适应性。

3.3.1 钻压

牙轮钻头通过牙齿压碎岩石,再辅以冲击和剪切的方式破碎地层。钻压不同,碎岩呈现出表面破

碎、疲劳破碎和体积破碎等形式,只有当钻压使岩石受力超过其抗压强度时,碎岩才能够呈现体积破碎,达到更高的钻进效率。

牙轮钻头钻进时,牙齿接触岩石时主要受两种力,一是上部钻具施加的静压力;二是由钻头自转引起的对岩石的冲击力,冲击力与钻具重量、冲击速度、冲击时间等有关。因牙轮钻头中心部位的牙齿速度较低,冲击力较小,为保证全面碎岩,上部钻具静压力应超过岩石抗压强度。

根据岩石破碎比能理论,建立钻压与岩石单轴

抗压强度的关系^[31]。一般认为,钻压与岩石单轴抗压强度成正比关系,可通过下式估算:

$$P = k\sigma_c D^2 \quad (1)$$

式中: P ——钻压,N; k ——经验系数,取决于地层和钻头类型,取值范围0.01~0.03,本井钻进地层为花岗岩, $\Phi 311.2$ mm钻头为常规布齿,取0.015, $\Phi 215.9$ mm钻头进行了加密布齿,取0.020; σ_c ——岩石单轴抗压强度,根据邻井取心和岩石力学测试结果,取140~200 MPa^[32]; D ——钻头直径,mm。

通过计算, $\Phi 311.2$ mm钻头钻压以203~291 kN为宜, $\Phi 215.9$ mm钻头钻压以131~186 kN为宜。

3.3.2 转速

牙轮钻头的转速直接影响牙齿接触岩石的速度、对岩石的冲击力和齿间交替纵振频率,转速过低会影响碎岩效率,转速过高则会增加纵向振动,导致牙轮的轴承、密封及锁定装置加速失效,因此钻头转速应兼顾碎岩效率和牙轮寿命。在实际钻进中,冲击力很难准确计算,一般选用2~3 m/h的最优线速度, $\Phi 311.2$ mm钻头转速控制在120~180 r/min, $\Phi 215.9$ mm钻头转速控制在180~270 r/min。

3.3.3 泵量

钻井液泵量的选取主要考虑两个因素:(1)应满足岩屑上返需求。为提高井底清洁程度、避免重复破碎, $\Phi 311.2$ 、 $\Phi 215.9$ mm口径的环空上返流速分别按照0.60、0.85 m/s计算,得到钻井液泵量不低于43.3、25.6 L/s。(2) $\Phi 311.2$ 、 $\Phi 215.9$ mm口径均采用螺杆马达作为井底动力,泵量的选取应与钻头转速匹配。 $\Phi 311.2$ mm口径以复合钻进为主,转盘转速60 r/min,马达转速控制在60~120 r/min,选取的 $\Phi 216$ mm马达每转排量为25.7 L,所需钻井液泵量为25.7~51.4 L/s,为满足上返需求,泵量控制在43.3~51.4 L/s; $\Phi 215.9$ mm口径应同时满足滑动定向和复合钻进,转盘转速60 r/min,马达转速应控制在180~210 r/min,选取的 $\Phi 172$ mm马达每转排量为11 L,所需钻井液泵量为33~38.5 L/s,可满足岩屑上返需求。

花岗岩井段钻井参数见表1。

3.4 复合有机盐钻井液体系

高温高压环境下钻井液性能显著恶化,主要表现为钻井液流变性差、滤失量大、泥皮质量差等,容易造成井塌、井漏、卡钻、井壁失稳、固化、胶凝等复

表1 花岗岩井段钻井参数

Table 1 Drilling parameters for granite formations

钻头直径/mm	钻头型号	选取依据	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·s ⁻¹)
311.2	MD637	计算	203~291	120~180	43.3~51.4
		厂家推荐	155~310	50~200	
215.9	SMD637 HDY	计算	131~186	180~270	33~38.5
		厂家推荐	97~194	150~450	

杂情况。针对钻井液流动困难、循环阻力大、激动压力高等问题,通常采用高温稀释剂或稀胶液处理,降低黏度以恢复较好的流动性。然而降低黏度的同时,破坏了钻井液对加重剂颗粒的悬浮能力,重晶石等加重剂在重力作用下开始下沉,聚集在井底附近形成局部高压区,给井壁稳定带来新挑战。为了维持井下压力平衡,只能再次“加重”,陷入“加重-增稠-降黏-沉降-密度降低-再加重”的恶性循环。因此,高温钻井液流变性与沉降稳定性已成为高温深井、地热井钻井的关键技术难点。

GH-05井高温井段研发应用了耐温220℃复合有机盐钻井液体系,具有“三低两强”(低黏、低切、低固相、强抑制、强封堵)的优良特性,配方为:8%~10% 甲酸盐+10%~15% 抑制剂(NaCl)+2%~3% 抗高温降失水剂+0.5%~1% 聚胺抑制剂+0.8%~1.2% 抗高温增黏降失水剂+3%~4% 抗高温封堵防塌剂+3%~5% 细目碳酸钙+极压润滑剂(根据井下情况)+球形石墨(根据井下情况)+2%~3% 纯碱+碳酸钙(根据需要)+烧碱(根据需要)。控制泥浆性能为:密度1.25~1.35 g/cm³,漏斗黏度50~70 s,PH值9.5,表观黏度20~30 mPa·s,初切1~4 Pa,终切4~18 Pa,动切力8~15 Pa,塑性黏度40~60 mPa·s,API滤失量≤4 mL,高温高压滤失量≤12 mL,泥饼厚度≤1 mm,润滑系数≤0.05,含砂量≤0.5%。满足了GH-05井高温井段对钻井液性能的需求。

4 钻完井关键技术应用

4.1 钻完井完成情况

GH-05井采用三开三完井身结构:一开(56.5~1383 m)使用 $\Phi 444.5$ mm钻头钻进2个回次,使用PDC钻头1只、牙轮钻头1只,1370 m进入稳定花岗岩,下入 $\Phi 339.7$ mm表层套管,常规固井,水泥浆返

至地面;二开(1383~2456.78 m)使用 $\varnothing 311.2$ mm钻头钻进10个回次,使用牙轮钻头8只、螺杆马达3根,下入 $\varnothing 244.5$ mm技术套管,常规固井,水泥浆返至地面;三开(2456.78~4002 m)使用 $\varnothing 215.9$ mm钻头钻进13个回次,使用牙轮钻头13只、螺杆马达4根,2350~3530 m井段尾管固井。GH-05井花岗岩井段钻进情况见表2,完钻深度4002 m,垂深3941.63 m,最大井斜 28.21° ,井底位移189.34 m,闭合方位 293.94° ,钻井周期119天,分别在井深3513.79 m(垂深3482.10 m)和井深3957.70 m(垂深3902.10 m)中AB靶点,井眼轨迹距离靶心分别为11.15、9.75 m。

表2 GH-05井花岗岩井段钻进统计
Table 2 Drilling statistics of Well GH-05

趟次	钻进深度/m		进尺/m	纯钻进时间/h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
	自	至			
1	1383.00	1534.86	151.86	55.00	2.76
2	1534.86	1735.86	201.00	54.33	3.70
3	1735.86	1762.35	26.49	4.82	5.50
4	1762.35	1969.86	207.51	64.26	3.23
5	1969.86	2060.98	91.12	23.76	3.84
6	2060.98	2092.98	32.00	9.79	3.27
7	2092.98	2220.00	127.02	42.72	2.97
8	2220.00	2352.00	132.00	38.43	3.44
9	2352.00	2394.00	42.00	14.31	2.93
10	2394.00	2456.78	62.78	24.91	2.52
11	2456.78	2559.00	102.22	38.02	2.69
12	2559.00	2686.15	127.15	46.99	2.71
13	2686.15	2781.02	94.87	29.97	3.17
14	2781.02	2886.02	105.00	40.73	2.58
15	2886.02	3036.36	150.34	53.29	2.82
16	3036.36	3115.54	79.18	28.73	2.76
17	3115.54	3270.34	154.80	55.69	2.78
18	3270.34	3407.74	137.40	46.13	2.98
19	3407.74	3591.16	183.42	59.34	3.09
20	3591.16	3725.40	134.24	41.32	3.25
21	3725.40	3833.98	108.58	34.42	3.15
22	3833.98	3938.08	104.10	34.17	3.05
23	3938.08	4002.00	63.92	17.14	3.73

4.2 应用效果

(1)增加了技术套管下入深度, $\varnothing 215.9$ mm井段裸眼时间减少30天以上,井壁失稳风险降低,起

下钻较为顺畅,因掉块引起的刮卡事故得到控制,未发生恶性卡钻事故;解决了生产套管固井下部地层漏失问题,2608.8~3095.8 m有487 m连续优质井段,满足储层改造和长周期试采要求。

(2)经钻井参数优化,机械钻速明显提高,花岗岩地层共钻进23个回次,平均机械钻速3.05 m/h,其中: $\varnothing 311.2$ mm钻头平均机械钻速3.23 m/h, $\varnothing 215.9$ mm钻头平均机械钻速2.94 m/h,相比于GH-02井(2.2 m/h)提速34%~47%,钻井周期缩短至119天。

(3)减震推力器显著降低了井底震动, $\varnothing 311.2$ mm钻头平均寿命134.22 m,最长寿命207.51 m,创造了花岗岩地层单只钻头使用纪录; $\varnothing 215.9$ mm钻头平均寿命118.86 m,最长寿命183.42 m; $\varnothing 311.2$ 、 $\varnothing 215.9$ mm钻头均未出现牙轮脱落的问题。 $\varnothing 215.9$ mm井段共使用螺杆马达4根,平均寿命131.49 h,相比于GH-02井(平均97.38 h)提高了35%,未出现轴承失效起钻问题。GH-05井全井未出现断钻具事故。

(4)复合有机盐钻井液体系具有良好的高温流变性和沉降稳定性,有效解决了储层改造井段“塌-漏”同层问题,降低了热储层近井污染,有效降低定向托压,泥浆维护成本降低40%以上。施工过程中无明显井壁剥落、掉块现象,下钻过程中两次遇到掉块卡钻问题,随钻震击器及时处理,避免了事故进一步恶化。

5 结论与建议

5.1 结论

在邻井施工经验基础上,GH-05井采取了增加表层套管与技术套管下入深度、钻具组合增加减震器与随钻震击器、根据岩石抗压强度与钻头类型优化钻井参数、研发耐温220℃复合有机盐钻井液体系等技术手段,取得了显著的应用效果。

相比GH-02井,花岗岩地层平均机械钻速提高了34%~47%,螺杆马达寿命提高了35%,井下工具和钻柱稳定性明显提高,未出现牙轮脱落、轴承失效、断钻具等事故。钻井液体系有效维持了井壁稳定,降低了近井污染。GH-05井完钻深度4002 m,实现了双靶点准确中靶,钻井周期119天,缩短20%以上,并创造同区块 $\varnothing 311.2$ mm钻头207.51 m和 $\varnothing 215.9$ mm钻头183.42 m的使用纪录。

5.2 建议

经优化钻井,牙轮钻头钻进基本能够达到“机械钻速 4 m/h、钻头寿命 200 m”的经济指标,但是距离“机械钻速 8 m/h、钻头寿命 300 m”的高效指标尚有差距,受制于牙轮钻头的碎岩方式和切削齿耐磨性,牙轮钻进实现高效钻进指标难度极大。提高机械钻速和钻头寿命是钻井工程师永恒的命题,建议从下面两个方面入手。

(1)气动锤钻进属于冲击回转钻进,且井内处于欠平衡状态,是目前硬岩地层提高机械钻速最有效、最可行的技术之一,可从球齿耐磨性强化、气动锤金属密封等方面进行优化和完善,提高保径能力、高温适用性和使用寿命。

(2)依托于美国能源部 FORGE 项目,NOV、桑迪亚国家实验室等联合研发了适用于硬岩地层的 PDC 钻头,机械钻速超过 30 m/h,钻头寿命超过 640 m,大幅领先于世界其他地区的火成岩钻进指标,国内钻头研究机构与生产厂家应尽快研发适用于高温硬岩地层的低成本、长寿命 PDC 钻头,以提高机械钻速、降低钻井成本,更好的推进干热岩产业化。

参考文献(References):

- [1] 余毅,马艺媛.中国干热岩资源赋存类型与开发利用[J].自然资源情报,2022(5):36-42.
YU Yi, MA Yiyuan. Research on occurrence types and development of hot dry rock resources in China[J]. Natural Resources Information, 2022(5):36-42.
- [2] 蒯文静,王贵玲,邵景力,等.我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J].地质学报,2021,95(5):1366-1381.
LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366-1381.
- [3] 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.
LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343-364.
- [4] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].中国地质大学:北京;北京大学,2020,27(1):1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [5] 张盛生,张磊,蔡敬寿,等.共和盆地恰卜恰地区干热岩资源量初步估算及评价[J].青海大学学报,2018,36(4):75-78,85.
ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, CAI Jingshou, et al. Preliminary estimation and evaluation of hot dry rock resources in Qiabuchia area of Gonghe basin[J]. Journal of Qinghai University, 2018, 36(4): 75-78, 85.
- [6] 王丹凤,程剑峰.“双碳”背景下我国干热岩资源勘查技术现状及展望[J].中国煤炭地质,2023,35(4):43-49.
WANG Danfeng, CHENG Jianfeng. China's dry-hot rock resources present situation and prospect of exploration technology under Carbon peaking and Carbon neutrality background[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(4): 43-49.
- [7] 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.
LI Yang, HE Guohua, ZHANG Xu, et al. Research on dry hot rock technology and application of middle-deep geothermal energy[J]. Scientific and Technological Innovation information, 2023 (26): 108-111.
- [8] 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 Chunan, LI Yingchun, et al. Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1767-1777.
- [9] 荀杨,苏博,翟梁皓,等.干热岩储层改造技术研究进展[J].长春工程学院学报(自然科学版),2023,24(3):81-86.
XUN Yang, SU Bo, ZHAI Lianghao, et al. Progress in research on modification technology of hot dry rock reservoir[J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2023, 24(3): 81-86.
- [10] 巩亮,韩东旭,陈峥,等.增强型地热系统关键技术研究现状及发展趋势[J].天然气工业,2022,42(7):135-159.
GONG Liang, HAN Dongxu, CHEN Zheng, et al. Research status and development trend of key technologies for an enhanced geothermal system[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42 (7): 135-159.
- [11] 翟海珍,苏正,吴能友.苏尔士增强型地热系统的开发经验及对我国地热开发的启示[J].新能源进展,2014,2(4):286-294.
ZHAI Haizhen, SU Zheng, WU Nengyou. Development experiences of the soultz enhanced geothermal systems and inspirations for geothermal development of China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(4): 286-294.
- [12] 王晓星,吴能友,苏正,等.增强型地热系统的开发——以法国苏尔土地热田为例[J].热能动力工程,2012,27(6):631-636.
WANG Xiaoxing, WU Nengyou, SU Zheng, et al. Development of enhanced geothermal systems(EGS): With soultz geothermal farm in France serving as an example[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27 (6) : 631-636.
- [13] 张伟,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.
- [14] 张伟,金显鹏,王海华,等.美国FORGE计划犹他州干热岩开发示范项目进展综述[J].世界科技研究与发展,2024,46(2):

- 263-276.
- ZHANG Wei, JIN Xianpeng, WANG Haihua, et al. Review on progress of the Utah FORGE project for demonstration of hot dry rock development[J]. World Sci-Tech R & D, 2024, 46(2):263-276.
- [15] 张森琦,严维德,黎敦朋,等.青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J].中国地质,2018,45(6):1087-1102.
- ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunceng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1087-1102.
- [16] 文冬光,张二勇,王贵玲,等.干热岩勘查开发进展及展望[J].水文地质工程地质,2023,50(4):1-13.
- WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2023, 50(4):1-13.
- [17] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
- ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot dry rock of Gonghe, Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [18] 谭观锋,王景广,郭新强,等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):49-53.
- TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Application of PDM drilling technology in Well-GR1 drilling in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):49-53.
- [19] 谭观锋,战启帅,张强,等.扭力冲击器复合钻进工艺在干热岩钻井中的试验应用[J].钻探工程,2023,50(1):94-101.
- TAN Xianfeng, ZHAN Qishuai, ZHANG Qiang, et al. Test of compound drilling with the torsional impactor in hot dry rock geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 94-101.
- [20] 罗宏保,李俊萍,吴金生.高温硬岩空气潜孔锤钻头设计[J].钻探工程,2021,48(4):60-65.
- LUO Hongbao, LI Junping, WU Jinsheng. Development of the air DTH hammer drilling bit for high temperature hard rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):60-65.
- [21] 李宽,施山山,张新刚,等.干热岩定向钻井关键技术研究与应用[J].钻采工艺,2024,47(5):7-14.
- LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Xingang, et al. Research and application of key technology of directional drilling for hot dry rock[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(5):7-14.
- [22] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与进展[J].地质与勘探,2022,58(5):1082-1090.
- ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(5):1082-1090.
- [23] 李晓东,熊正强,邹志飞.高温环保钻井液研究及其干热岩钻探应用[J].地质评论,2024,70(S1):311-312.
- LI Xiaodong, XIONG Zhengqiang, ZOU Zhifei. Research on high temperature and environmentally friendly drilling fluid and its application in HDR drilling[J]. Geological Review, 2024, 70(S1):311-312.
- [24] 张盛生,张磊,田成成,等.青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J].地质力学学报,2019,25(4):501-508.
- ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, TIAN Chengcheng, et al. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe basin[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4):501-508.
- [25] 唐显春,王贵玲,马岩,等.青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J].地质学报,2020,94(7):2052-2065.
- TANG Xianchun, WANG Guiling, MA Yan, et al. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2052-2065.
- [26] 谭观锋,张强,赵长亮,等.侧钻绕障技术在干热岩HDR-1井中的应用[J].钻探工程,2023,50(3):83-91.
- TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAO Changliang, et al. Application of sidetracking to obstacle bypassing in hot dry rock Well HDR-1[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):83-91.
- [27] 梁德阳.钻头破岩与钻柱振动之间的相互影响机制研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2022.
- LIANG Deyang. Study on the interaction mechanism between drill bit rock breaking and drill string vibration[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2022.
- [28] 王建龙,孙曜广,刘学松,等.地面可视可控减震器的设计与试验[J].石油机械,2018,46(7):27-30.
- WANG Jianlong, SUN Yaoguang, LIU Xuesong, et al. Design and test of a ground visible controllable shock absorber[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(7):27-30.
- [29] 王虎,胡永,朱迪斯.新疆尼勒克地区煤层气井钻井复杂处理技术——以HDCS-2井为例[J].钻探工程,2025,52(2):20-27.
- WANG Hu, HU Yong, ZHU Disi. Complex processing technology for coalbed methane wells in Nileke area, Xinjiang: Taking Well HDCS-2 as an example[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2):20-27.
- [30] 朱迪斯,孟祥龙,王胜建,等.新苏地2井长裸眼段长浸泡地层加深钻井技术[J].钻探工程,2025,52(1):129-137.
- ZHU Disi, MENG Xianglong, WANG Shengjian, et al. Long open hole and long-immersion formation deepen drilling technology in Well Xinsudi-2[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1):129-137.
- [31] 李玮,郑浩然,开月,等.基于单齿侵入理论的牙轮钻头钻速方程[J].东北石油大学学报,2013,37(1):85-90.
- LI Wei, ZHENG Haoran, YueKAI, et al. Drilling rate equation of cone bit based on single tooth intrusive theory[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1):85-90.
- [32] 邵保平,吴阳春,王帅,等.青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):69-83.
- XI Baoping, WU Yangchun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe basin, Qinghai province after high temperature thermal damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1):69-83.