

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.01.13

引用格式: 张云,高亮,田增霞,等. 唐山马头营干热岩 M-2 井钻井工艺[J]. 中国地质调查,2023,10(1): 118-124. (Zhang Y, Gao L, Tian Z X, et al. Drilling technology of Well M-2 in Matouying dry hot rock of Tangshan[J]. Geological Survey of China, 2023,10(1): 118-124.)

唐山马头营干热岩 M-2 井钻井工艺

张云, 高亮, 田增霞, 宋玺权, 刘现川, 赵岩

(河北省煤田地质局第二地质队(河北省干热岩研究中心), 河北 邢台 054001)

摘要: M-2 井为马头营干热岩开采试验井组的采出井,为解决 M-2 井在钻进过程中新生界地层坍塌、钻头泥包、太古界花岗岩地层钻进效率低、溢流、掉块以及高温钻井液等施工难点,进行了钻井关键技术研究。通过增加钻井液比重、降低滤失量、提高黏度,维护了新生界井壁稳定性;采用双泵大排量、转盘高转速旋转,解决了钻遇新近系钻头泥包问题。在井深 3 880 m 处,通过提高泥浆比重,并加入随钻堵漏剂,有效遏制了溢流、大消耗和掉块;通过改进耐高温钻井液,提高了泥浆的流变性,降低了摩阻和转盘扭矩,保障了 M-2 井的顺利完井。通过更改钻具组合,采用大螺杆、大钻压、大排量、粗径钻具,使 M-2 井在太古界变质花岗岩地层中平均钻速达到 2.46 m/h,比 M-1 井同地层纯钻速提高了 69.7%,降低了钻探成本。旋锤机配合金刚石复合片(polycrystalline diamond compacts, PDC)钻头提速实验,证明了该方法可有效提高钻进效率,但变质花岗岩地层较硬、研磨性强,PDC 片易崩坏,钻头性能仍有待改进。相比而言,采用 $\phi 203$ mm 螺杆+牙轮钻头钻进整体效益更高,可作为后续施工中的优选方案。

关键词: 干热岩; M-2 井; 钻井工艺; 大直径螺杆复合钻进

中图分类号: TE242

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)01-0118-07

0 引言

干热岩是地热能中最具开发潜力的一种可再生清洁能源,具有稳定、高效、安全、运行成本低和绿色无污染等特点^[1-4]。目前,国内对干热岩的勘查开发利用,尚处于起步和探索阶段。近年来,国家及地方政府出台了一系列支持地热、干热岩勘查开发的政策,这将有力促进干热岩的开发利用^[3,5-9]。大力开发利用地热资源对于调整能源供应结构、缓解能源供应压力、保障能源供应安全以及促进地区经济发展具有重要作用^[10]。为改善河北省能源结构,服务“碳达峰、碳中和”目标,河北省煤田地质局一直致力于清洁能源的勘查开发工作,并于 2020 年,在唐山马头营 M-1 井探获了温度超过 150 °C 的干热岩体,实现了我国中东部地区干热岩重大勘查突破,省政府领导对此给予了“加快推

进本区干热岩勘查、开发工作”的重要批示。为进一步加快干热岩的开发利用,按井距 200 m 布置并施工了 M-2 井,构建了“一注一采”干热岩开采试验井组。本文依托 M-2 井,开展钻井工艺研究,旨在解决该井在钻进过程中新生界地层坍塌、钻头泥包、太古界花岗岩地层钻进效率低、溢流、掉块以及高温钻井液等施工难点,总结旋垂机+金刚石复合片(polycrystalline diamond compacts, PDC)钻头在变质花岗岩地层中的应用效果,对同地层区域实施干热岩井具有一定的借鉴和指导意义。

1 M-2 井概况

1.1 地质概况

M-2 井位于马头营凸起区,构造位置在南堡凹陷和石臼坨凹陷北侧,北邻乐亭凹陷(图 1)。凸起的平面形态呈牛轭形,走向 NEE,总面

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-12-08。

基金项目: 河北省科学技术厅“河北省唐山市马头营凸起区干热岩开发关键技术集成研究与示范(编号: 20374102D)”项目资助。

第一作者简介: 张云(1986—),男,工程师,主要从事大口径钻探施工技术与生产管理工作。Email: 654548440@qq.com。

通信作者简介: 高亮(1984—),男,高级工程师,主要从事矿产资源勘查、研究评价及钻探技术管理工作。Email: 112857313@qq.com。

积约 540 km²。中生代时期,该基岩块体开始抬升。古近纪时期曾接受沉积,处在南堡凹陷—石白坨凹陷北缘。东营组末期再次隆升,依次剥去古近系东营组 (Ed) 和沙河街组 (Es)、中生界 (Mz)、寒武系—奥陶系 (Є—O) 和太古界 (Ar),使太古界变质岩大面积裸露。上覆地层为新近系,仅在翼部存有古近系和中生界,新近系底深

1 200 ~ 4 400 m。控制凸起的边界断层为柏各庄、马北、红房子等断层 (图 1),是构造发育的同生断层,最大落差达 6 000 m,具有良好的热源通道条件。

M-2 井自下而上揭露地层为太古界白庙组 (Arb)、新近系馆陶组 (N₁g) 和明化镇组 (N₂m) 以及第四系 (Q),地层岩性特征的情况如表 1 所示。

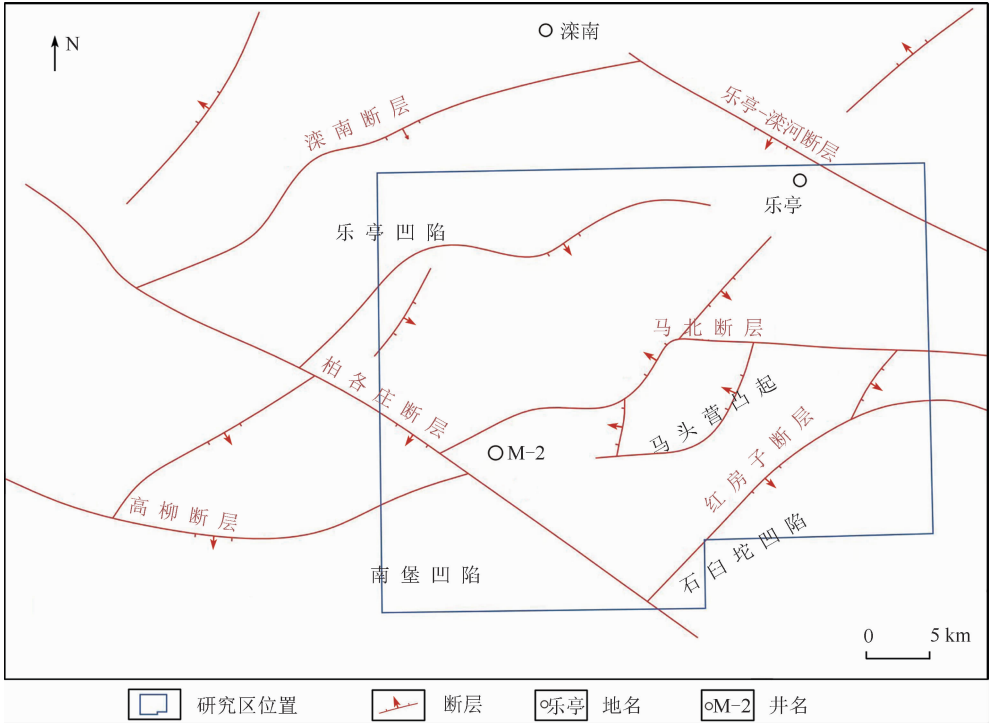


图 1 研究区构造位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of tectonic setting

表 1 M-2 井地层划分及岩性特征
Tab.1 Stratigraphic division and lithologic characteristics of Well M-2

界	系	统	组	地层代号	厚度/m	深度/m	岩性描述
新生界	新近系	中新统	馆陶组	N ₁ g	140	1 345	为一套浅灰色细砾岩,细砂岩和紫红色、绿色泥岩间互沉积的陆相碎屑岩岩石组合,底部发育灰白色砂砾岩
			明化镇组	N ₂ m	935	1 205	主要为一套土黄色、紫红色、灰绿色泥岩与泥岩夹粉砂岩组成的地层
	第四系			Q	270	270	为一套冲积相、湖沼相、海相混合类型沉积物,岩性以土黄色亚黏土和亚砂土为主,底部有一层底砾岩
太古界			白庙组	Arb	3 155	4 500	岩性以变质花岗闪长岩、变质英云闪长岩、变质角闪二长花岗岩、黑云斜长片麻岩为主,为变质岩体与后期火成岩体交叉地层,混合岩化明显

1.2 M-2 井钻探施工概况

1.2.1 设备选型

M-2 井设计深度为 4 500 m。根据本井地质任务及设备提升能力,结合前期 M-1 井施工经验

和 M-2 井井深结构数据,得出钻杆重量和套管重量等指标 (表 2)。选用宝鸡石油装备有限公司生产的 ZJ40 钻机,此钻机可满足施工需要,ZJ40 钻机配套设备型号及性能参数见表 3。

表 2 M-2 井钻杆重量和套管重量指标

Tab. 2 Drill pipe weight and casing weight of Well M-2

项目	型号 (API)	长度/ m	米重/ (kg·m ⁻¹)	质量/ t	浮力/ t	安全 系数	最大 勾载/t
127 钻杆	127 * 9.19	4 500	29.00	131	19	1.3	146
508 套管	508 * 11.13	501	139.89	70	10	1.3	78
339.7 套管	339.7 * 10.92	1 024	90.78	93	15	1.3	101
177.8 套管	177.8 * 10.36	4 500	43.20	194	28	1.3	216

注：浮力计算时，泥浆密度取值为 1.15 g·cm⁻³。

表 3 主要钻探设备及性能参数

Tab. 3 Main drilling equipment and performance parameters

设备名称	型 号	性能参数
井 架	JJ225/45-K	225 t
泥 浆 泵	F-1300	1 300 hp
循环系统	泥 浆 泵	F-1300
	钻 井 液 罐	250 m ³
动力系统	电动机 1#	YKK450-8/380V 400 kW
	电动机 2#	YKK450-8/380V 400 kW
	电动机 3#	YKK450-8/380V 400 kW
	节能发电机	G12V190PZLD-2 475KVA
	柴油发电机组	CDVS-400/B 400 kW
	柴油发电机组	CDVS-400/B 400 kW
固控系统	振动筛 1#	2ZS4.2-280
	振动筛 2#	2ZS4.2-280
	除 砂 器	NCS300×2 2.5 m ³ /min
	除 泥 器	SB6×8 2.5 m ³ /min
	离 心 机	LW600-1019N 0.95 m ³ /min
	除 气 器	HZQ 1/4 1.5 m ³ /min
井控系统	环形防喷器	FH35-35 35 MPa
	双闸板防喷器	2FZ35-35 35 MPa

1.2.2 井身结构

M-2 井一开使用 $\phi 660.4$ mm 钻头扩孔钻进至 502 m,0~501.58 m 下入 $\phi 508$ mm 套管隔离上部松散层;二开使用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻进至 1 420.06 m,392.14~1417 m 下入 $\phi 339.7$ mm 石油套管,采用 XG-Y 型 20“ $\times 13\frac{3}{8}$ ”液压尾管悬挂器悬挂;三开使用 $\phi 241.3$ mm 钻头钻进至4 500.82 m,0~4 500.82 m 下入 $\phi 177.8$ mm 套管,其中为便于后期压裂,4 186.50 m 以深套管设计为滤水管。M-2井井身结构如图 2 所示。

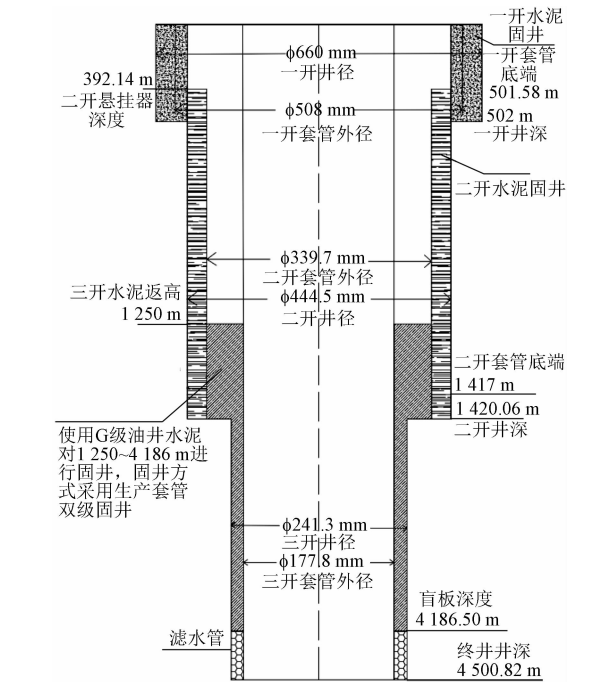


图 2 M-2 井井身结构

Fig. 2 Depth structure of Well M-2

2 钻井施工工艺

本井施工工艺流程见图 3。

(1)一开井段。钻具组合： $\phi 444.5$ mm 牙轮钻头 + $\phi 241$ mm 钻铤 2 立柱 + $\phi 203$ mm 钻铤 2 立柱 + $\phi 178$ mm 钻铤 1 立柱 + $\phi 127$ mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。

扩孔钻具组合： $\phi 660.4$ mm 牙轮钻头 + $\phi 241$ mm钻铤 2 立柱 + $\phi 203$ mm 钻铤 2 立柱 + $\phi 178$ mm 钻铤 1 立柱 + $\phi 127$ mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。

钻进参数：转速 40~60 r/min, 钻压 20~80 kN,排量 2 200~3 500 L/min,泵压 0~5 MPa。

钻井液性能：黏度 40~50 s, 比重 1.1~1.18 g/cm³,API 失水量 10~15 ml/30 min,pH 值 8~9,泥皮厚度<1 mm,含沙量<1%。

一开下入 501.58 m 护壁管(壁厚 11.13 mm, 钢级 J55),防止上部松散地层坍塌的同时,预留了足够的泵室段,便于井组后期下泵循环试验。本阶段采用插入式固井,固井过程中采用双泵大量替浆,尽量实现紊流顶替,将水泥顶替至井口,保证了固井质量。

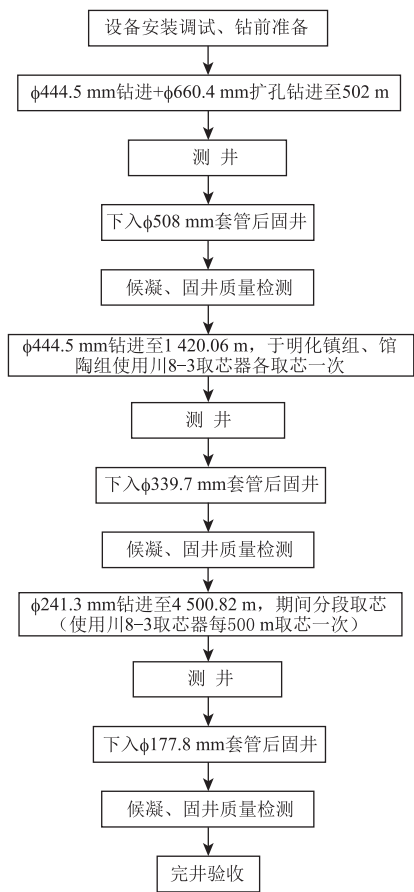


图 3 施工工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of construction process

(2)二开井段。钻具组合：φ444.5 mm 牙轮钻头 + φ241 mm 钻铤 2 立柱 + φ203 mm 钻铤 2 立柱 + φ178 mm 钻铤 1 立柱 + φ127 mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。

钻进参数：转速 60 ~ 100 r/min，钻压 50 ~ 80 kN，排量 2 200 ~ 3 500 L/min，泵压 5 ~ 10 MPa。

钻井液性能：黏度 35 ~ 50 s，比重 1.1 ~ 1.15 g/cm³，API 失水量 10 ~ 12 ml/30 min，pH 值 8 ~ 9，泥皮厚度 < 1 mm，含沙量 < 1%。

二开完钻原则是钻穿馆陶组。该井段地层岩性以泥岩、粉砂岩、细砂岩为主，钻进时采用大泵量、小钻压吊打钻进工艺^[11]。二开完钻后下入 1 024 m 石油套管（壁厚 10.92 mm，钢级 J55），固井采用油井 G 级水泥。

(3)三开井段。钻具组合（方案一）：φ241.3 mm 牙轮钻头 + φ203 mm 螺杆 + φ203 mm 钻铤 4 立柱 + φ178 mm 钻铤 1 立柱 + φ127 mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。

钻具组合（方案二）：φ241.3 mm 牙轮钻头 + φ197 mm 螺杆 + φ178 mm 钻铤 3 立柱 + φ165 mm 钻铤 2 立柱 + φ127 mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。

钻进参数：转速 20 ~ 40 r/min，钻压 165 ~ 175 kN，排量 1 700 ~ 2 200 L/min，泵压 9 ~ 16 MPa。

钻井液性能：黏度 40 ~ 50 s，比重 1.12 ~ 1.18 g/cm³，API 失水量 8 ~ 10 ml/30 min，pH 值 8 ~ 9，泥皮厚度 < 1 mm，含沙量 < 0.5%。

三开井段 1 420 ~ 4 200 m 钻具组合中下部采用 φ203 mm 大直径钻铤钻具钻进，提高了钻进效率；4 200 ~ 4 500 m 采用小径钻铤组合，钻进负荷较小，钻进时转盘扭矩较小，有效降低了摩阻。完钻后，下 4 500 m 石油套管（壁厚 11.51 mm，钢级 P110），考虑后期 M-1 井与 M-2 井压裂连通，便于下部储层改造，底部 308 m 下入滤水管。使用 G 级油井水泥对 1 250 ~ 4 186 m 进行固井，固井方式采用生产套管双级固井。

3 M-2 井施工的关键技术

3.1 一开井壁的稳定方法

一开井径大，裸眼段长，岩屑上返困难，且上部第四系亚砂土、亚黏土易坍塌。开钻前，在井口埋入 2 m 护壁管（φ800 mm），防止井口坍塌。

双泵钻进有效地解决了岩屑上返问题。采用低固相、钾基不分散聚合物泥浆，提钻时及时向井内回灌泥浆，保证井内一直处于满浆状态，同时保证振动筛和除沙除泥一体机 100% 运转，离心机 40 ~ 80% 运转，将钻井液中的固相含量降低，这些工艺较好地维护了井壁的稳定。

钻井液基浆配方为清水 + 5% 膨润土 + 0.5% 纯碱 + 0.5% 羧甲基纤维素钠，补充胶液配方为清水 + 0.5% 聚丙烯酸钾 + 1% 腐植酸钾。钻井液黏度为 40 ~ 42 s，比重为 1.15 g/cm³，滤失量控制在 15 ml/30 min 以内。

3.2 钻头泥包的处理办法

二开井钻遇新近系地层岩性主要为泥岩，造浆严重，并出现钻头泥包和井径缩径现象。

为抑制泥岩造浆，钻井液补充的胶液采用钾基不分散聚合物，并将钻井液黏度控制在 38s 内，保证振动筛和除砂除泥一体机 100% 运行，离心机 50% 运行，将钻井液中的有害固相降低。针对钻头

泥包问题,停钻并将转盘转速提高到 100 ~ 120 r/min,快速下放串动钻具,同时增大泥浆泵的排量,利用钻头的离心力和钻井液的高速冲刷力将泥包物去除。钻进过程中,每钻完一单根,划眼 2 次,每进尺 300 ~ 400 m,短起下钻一次,将井壁上的虚厚泥皮和岩屑及时清除,保证井眼规则,可有效抑制井径缩径。

3.3 耐高温钻井液

高温岩体地热井对所用的钻井液要求更高,耐高温钻井液除要能保持井眼的稳定性和有效携带岩屑外,还必须具有良好的抗高温性能^[1,3,8,12-17]。

M-2 井 3 000 m 以深温度逐步大于 120 ℃,为保障钻井液性能,本井在钻井液中加入高温保护剂。钻井液配方为 3% 钠膨润土 + 0.3% Na_2CO_3 + 0.1% NaOH + 0.2% GHFV-I + 1% GHFA + 0.4% PAC + 0.2% PHP + 0.5% 高温保护剂,滤失量控制在 8 mL/30 min 以内。3 500 m 以深,上下钻具摩阻增大,转盘扭矩增加,通过向钻井液中加入润滑剂,可改变泥浆的流变性,从而降低摩阻和转盘扭矩。

井深 3 880 m 处,出现溢流、掉块现象,岩屑携带困难。溢流后,钻井液比重降低到 1.07 g/cm³,钻井液消耗量增加至 6 ~ 8 m³/h。针对这一问题,将钻井液黏度提高至 50 ~ 55 s,比重提高至 1.17 g/cm³,同时加入随钻堵漏剂和高黏防塌剂,这样钻井液的消耗量可逐步降低至正常消耗(1 ~ 2 m³/h)。

3.4 大直径螺杆复合钻进技术

M-2 井钻遇的变质花岗岩成分主要为钾长石、斜长石、石英、角闪石,硬度可参照花岗岩硬度。以往研究表明,干热岩储层(片麻岩或花岗岩)单轴抗压强度可达到 200 MPa 以上^[18-19]。该井 1 345 ~ 4 500 m 为太古界变质花岗岩,地层厚度大、硬度大、研磨性高、可钻性差,导致机械钻速低,钻探成本上升^[20]。

M-1 井钻遇该套地层时,钻压 110 ~ 120 kN,排量 1 300 ~ 1 800 L/min,钻具组合为 $\phi 241.3$ mm 牙轮钻头 + $\phi 172$ mm 螺杆(选用 5 级、5:6 头,最大工作钻压为 170 kN) + $\phi 178$ mm 钻铤 4 立柱 + $\phi 165$ mm 钻铤 1 立柱 + $\phi 127$ mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆,整体选用的钻井参数和钻具组合较保守。基于 M-1 井施工经验,考虑较大钻压可以更好

地冲击破碎变质花岗岩,从而提高钻进效率,故 M-2 井采用大螺杆、大钻压、大排量、粗径钻具,钻压 165 ~ 175 kN,排量 1 500 ~ 2 200 L/min,钻具组合为 $\phi 241.3$ mm 牙轮钻头 + $\phi 203$ mm 螺杆(选用 5 级、5:6 头,最大工作钻压为 250 kN) + $\phi 203$ mm 钻铤 4 立柱 + $\phi 178$ mm 钻铤 1 立柱 + $\phi 127$ mm 加重钻杆 + $\phi 127$ mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆。该工艺使 M-2 井在太古界变质花岗岩地层平均钻速达到 2.46 m/h,相比 M-1 井纯钻速提高了 69.7%,证明了大直径螺杆复合钻进技术在本区的可行性。

此外,当钻头直径一定时,钻铤直径越大,环形间隙越小,越容易钻直^[21]。M-2 井选择的钻压(158 kN)略大于 $\phi 203$ mm 钻铤的二次弯曲点,钻进至终孔井斜 1.2°,最大井斜处不超过 5°,满足设计要求。

3.5 旋垂机的应用

旋锤机主要由螺杆钻具和冲击发生机构总成两部分组成。螺杆钻具通过上方的转子驱动冲击发生机构总成输出轴同步旋转,控制钻井液过流面积的周期性变化,从而产生轴向冲击力,以实现钻头高速旋转条件下的旋转冲击钻井,达到提高钻井速度的目的。本井在井深 3 013 m ~ 3 124 m 变质花岗岩地层进行旋锤机提速实验,钻具组合为 $\phi 241.3$ mm PDC 钻头 + $\phi 185$ mm 旋垂机 + $\phi 178$ mm 钻铤 4 立柱 + $\phi 127$ mm 钻杆 + 133 mm 方钻杆,钻压控制在 30 ~ 80 kN 之间,起始钻效 3 ~ 4 m/h。钻进至 3 073 m 后,钻效逐渐降低至牙轮钻头的钻进水平。钻进至 3 120 m 后,钻速下降至 1.7 m/h。钻进至 3 124 m 时提钻,PDC 钻头磨损严重并出现崩片掉片现象,钻头直径约 $\phi 234$ mm,因孔径变小,下入牙轮钻头扫孔 58 m。对比 $\phi 185$ mm 旋垂机 + PDC 钻头和 $\phi 203$ mm 螺杆 + 牙轮钻头发发现,一个 PDC 钻头可进尺 111 m,而牙轮钻头可进尺 250 ~ 300 m,使用寿命比 PDC 钻头长 82 h,整体效益更高。

4 结 论

(1) 通过增加钻井液比重、降低滤失量、提高黏度,维护了新生界井壁稳定;采用双泵大排量、转盘高转速旋转,解决了钻遇新近系地层钻头泥

包问题。

(2)在井深 3 880 m 处,提高泥浆比重,并加入随钻堵漏剂,可有效遏制溢流、大消耗和掉块;通过改进耐高温钻井液,提高了泥浆的流变性,降低了摩阻和转盘扭矩,保障了 M-2 井的顺利完井。

(3)采用大螺杆、大钻压、大排量、粗径钻具, M-2 井在太古界变质花岗岩地层中平均钻速可达 2.46 m/h,比 M-1 井同地层纯钻速提高了 69.7%,有效提高了钻进效率,降低了 M-2 井的钻探成本。

(4)旋锤机配合 PDC 钻头提速实验,证明了该方法可以有效提高钻进效率,但变质花岗岩地层较硬、研磨性强,PDC 片易崩坏,且 PDC 钻头保径性能差,钻头性能仍有待改进。相比而言,采用 $\phi 203$ mm 螺杆+牙轮钻头钻进整体效益更高,可作为后续施工中的优选方案。

参考文献(References):

- [1] 李德威,王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.
Li D W, Wang Y X. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Sci: J China Univ of Geosci, 2015, 40(11): 1858-1869.
- [2] 付亚荣,李明磊,王树义,等. 干热岩勘探开发现状及前景[J]. 石油钻采工艺,2018,40(4):526-540.
Fu Y R, Li M L, Wang S Y, et al. Present situation and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Oil Drill Prod Technol, 2018, 40(4): 526-540.
- [3] 曾义金. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术,2015,43(2):1-7.
Zeng Y J. Technical progress and thinking for development of hot dry rock (HDR) geothermal resources[J]. Pet Drill Tech, 2015, 43(2): 1-7.
- [4] 叶顺友,杨灿,王海斌,等. 海南福山凹陷花东 1R 井干热岩钻井关键技术[J]. 石油钻探技术,2019,47(4):10-16.
Ye S Y, Yang C, Wang H B, et al. Key drilling technologies for hot dry rock in well HD-1R in the Hainan Fushan Sag[J]. Pet Drill Tech, 2019, 47(4): 10-16.
- [5] 杨吉龙,胡克. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. 世界地质,2001,20(1):43-51.
Yang J L, Hu K. A review of hot dry rock (HDR) research and development in the world[J]. World Geol, 2001, 20(1): 43-51.
- [6] 闫小利,郑树楼,王振福. 陕西关中地区深层地热井成井工艺探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):36-39.
Yan X L, Zheng S L, Wang Z F. Discussion on deep geothermal well completion technology in central Shaanxi Area[J]. Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling), 2010, 37(5): 36-39.
- [7] 冉恒谦,冯起赠. 我国干热岩勘查的有关技术问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.
Ran H Q, Feng Q Z. Some technical issues on hot dry rock exploration in China[J]. Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling), 2010, 37(10): 17-21.
- [8] 李亚琛,段晨阳,郑秀华. 高温地热钻井的最佳实践[J]. 地质与勘探,2016,51(1):173-181.
Li Y C, Duan C Y, Zheng X H. Best practices for high-temperature geothermal drilling[J]. Geol Explor, 2016, 51(1): 173-181.
- [9] 光新军,王敏生. 高温地热高效开发钻井关键技术[J]. 地质与勘探,2016,52(4):718-724.
Guang X J, Wang M S. Key drilling technologies for efficient development of high-temperature geothermal resources[J]. Geol Explor, 2016, 52(4): 718-724.
- [10] 王贵玲,张薇,蒯文静,等. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J]. 中国地质调查,2018,5(2):1-7.
Wang G L, Zhang W, Lin W J, et al. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource[J]. Geol Surv China, 2018, 5(2): 1-7.
- [11] 狄勤丰,沈双平. 防斜打快技术的研究与发展[J]. 自然杂志,2004,26(2):111-115.
Di Q F, Shen S P. Research and development of the vertical and fast drilling technology[J]. Chin J Nat, 2004, 26(2): 111-115.
- [12] 邵保平,赵金昌,赵阳升,等. 高温岩体地热钻井施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11):2234-2243.
Xi B P, Zhao J C, Zhao Y S, et al. Key technologies of hot dry rock drilling during construction[J]. Chin J Rock Mech Eng, 2011, 30(11): 2234-2243.
- [13] 张所邦,宋鸿,陈兵,等. 中国干热岩开发与钻井关键技术[J]. 资源环境与工程,2017,31(2):202-207.
Zhang S B, Song H, Chen B, et al. The development and key drilling technology of Hot Dry Rock in China[J]. Resour Environ Eng, 2017, 31(2): 202-207.
- [14] 杨丽,孙占学,高柏. 干热岩资源特征及开发利用研究进展[J]. 中国矿业,2016,25(2):16-20.
Yang L, Sun Z X, Gao B. A review on geothermal resources characteristics and development potential for hot dry rock[J]. China Min Magazine, 2016, 25(2): 16-20.
- [15] 苏长寿,阴文行,冯红喜,等. 液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):14-16,26.
Su C S, Yin W H, Feng H X, et al. Feasibility study on application of hydraulic hammer technology in hot dry rock drilling[J]. Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling), 2017, 44(3): 14-16, 26.
- [16] 赵福森,张凯. 青海贵德 ZR1 干热岩井钻进工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):18-23,35.
Zhao F S, Zhang K. Research on hot dry rock well drilling technol-

ogy of ZR1 in Guide of Qinghai[J]. Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling),2016,43(2):18-23,35.

[17] 白占学,郑秀华,于进洋. 碎裂钻井技术及其在地热钻井中的应用前景分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):81-84.

Bai Z X,Zheng X H,Yu J Y. Analysis on the spallation drilling technique and its application prospect in geothermal drilling[J]. Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling),2013,40(2):81-84.

[18] 梁文利. 干热岩钻井液技术新进展[J]. 钻井液与完井液,2018,35(4):7-13.

Liang W L. Progress on drilling fluid technology for hot dry rock drilling[J]. Drill Fluid Completion Fluid,2018,35(4):7-13.

[19] 张云,高亮,刘现川,等. 唐山马头营干热岩 M-1 井钻井工艺技术[J]. 地质与勘探,2022,58(1):176-186.

Zhang Y,Gao L,Liu X C,et al. Drilling technology of the M-1 well in hot dry rock of Matouying, Tangshan [J]. Geol Explor,2022,58(1):176-186.

[20] 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 Y X,Shan W J,Zhao C L,et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai Province[J]. Geol Explor,2018,54(5):1038-1045.

[21] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 2 版. 北京:石油工业出版社,2006:493.

Jiang X W. Drilling Accident and Accidental Accident[M]. 2nd ed. Beijing:Petroleum Industry Press,2006:493.

Drilling technology of Well M-2 in Matouying dry hot rock of Tangshan

ZHANG Yun, GAO Liang, TIAN Zengxia, SONG Xiquan, LIU Xianchuan, ZHAO Yan
(No. 2 Geological Team, Hebei Coal Geology Bureau (Hebei Dry Hot Rock Research Center), Hebei Xingtai 054001, China)

Abstract: Well M-2 is a production well of Matouying dry hot rock mining test well group, and the key techniques during drilling were studied to solve the problems of Cenozoic Formation collapse, bit balling, low drilling efficiency of Archaean granite formation, overflow, block falling and high temperature drilling fluid. The wellbore stability of Cenozoic Formation was maintained by increasing the specific gravity of drilling fluid, reducing fluid loss, and increasing viscosity. The problem of bit balling in Neogene Formation was solved by using double pumps with large displacement and high rotary speed. The overflow, large consumption and block loss were effectively prevented in the well depth of 3 880 m, through the increasement of mud gravity and the addition of plugging agent. By ameliorating the high-temperature resistant drilling fluid, the rheology property of sludge was improved and the friction and rotary torque were reduced, which guaranteed the success of Well M-2 completion. The average drilling speed of Well M-2 in Archaean metamorphic granite formation reached 2.46 m/h, which was 69.7% higher than that of Well M-1 in the same formation, and the drilling cost was reduced by changing the drilling assembly and using drilling tools with large screw, large drilling weight, large displacement and coarse diameter. This method can effectively improve the drilling efficiency by the rotary hammer and PDC bit speed increase experiment. However, the metamorphic granite formation is hard and abrasive, PDC pieces would easily collapse, hence the bit performance still needs to be improved. The overall benefit of assemblage of $\phi 203$ mm screw and roller cone bit was higher, which can be used as the optimal scheme in subsequent construction.

Keywords: hot dry rock; Well M-2; drilling technology; large diameter screw combination drilling
(责任编辑: 刘丹)