

深部地热钻探钻井工艺研究

林圣明*,杨忠彦

(天津地热勘查开发设计院,天津 300250)

摘要:在地热能源的开采过程中,钻井质量的好坏将直接影响地热能开发的效益。在实际工程中,由于地质条件复杂,地热能的开发结果往往难以达到预期目标。因此,以实际工程为基础,在地层较硬、破碎较多、漏失严重地区使用气动潜孔锤联合气举反循环钻井工艺,结果显示:气动潜孔锤钻井工艺钻进速度可达到1m/h以上,但深度超过200m后钻进速度快速下降,气举反循环钻井工艺可以在整个钻井过程中都保持较高的钻进速度,效率约为常规钻井工艺的1.5~3倍。

关键词:地热钻井;气动潜孔锤;气举反循环;复杂地层

中图分类号:TE242 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-5716(2025)03-0061-04

地热是一种清洁、可再生的能源,深部地热能的开发对于实现低碳经济、应对气候变化具有极其重要的意义。地热能的开发需要深部地热钻探技术的支持,而深部地热钻探钻井工艺的研究是深部地热能开发的关键技术之一。

我国开发利用地热资源已有50余年,共有数百个城市满足开发地热能的条件^[1]。刘伟莉等^[2]对于热岩地热能钻井开发过程中容易遇到的多种问题进行详细分析,提出了适用于我国的干热岩钻井技术;申云飞等^[3]率先在工程中使用了分段水力压裂工艺,结果表明,该钻井工艺可以使山区缺水地区的地热井出水量提高3倍;宋继伟等^[4]对贵州喀斯特地貌的地热钻探技术进行研究,解决了螺杆钻井和气动钻井技术在喀斯特地区应用困难的问题;李勇等^[5]同样针对贵州岩溶发达,地热钻井施工难度大的问题进行研究,分析了硫化沥青的护壁机理,提出了适合贵州地质的钻井液配方;马晓东^[6]以水热型地热能钻井为研究对象,通过对地质条

件、断层特征、含水层分布特点的分析,选出了最优的钻井位置。

现有的研究中,钻井的手段单一,效率较低;因此,本文以我国某典型地热资源含量丰富的山区为研究对象,开展了地热能钻井技术研究,提出新的钻井施工工艺,提高施工效率,为类似工程提供技术支撑。

1 工程概况

本文以我国某一地热资源蕴含量丰富的山区作为试验场地。该区域储能岩层主要有两种类型:裂隙岩溶型和裂隙型,其中前者的地热能储藏深度变化较大,顶板埋深范围为350~2100m,底板埋深范围为1300~5000m,该岩层中地质构造变化较大,钻井容易吸水膨胀,导致成井难度大;后者地层较为简单,主要为第四系和新近系。该区域具体的地层分类情况如表1所示。

2 气举反循环钻井工艺

在我国,地热钻探钻井的深度通常为1000~4000m,在裂隙、岩溶等地质构造较为复杂的地层中,传统的钻

表1 地层分类表

类型	松散地层	水敏地层	岩溶地层	裂隙地层
地层形成因素	通常由构造破碎带发育而来	地层岩土在水的作用下,发生膨胀、分散和运移现象,致使岩体渗透率下降	由溶蚀力较强的水溶蚀而成	通常由构造带断裂形成
地层特征	主要包括含风化层、流砂层和破碎带	地层通常包含黏土层、胶结层和各类泥岩	通常以溶洞的形式出现,包含各类碳酸盐、硫酸盐等岩体	地层表面往往出现断层和节理
备注	钻孔出现涌水、垮塌现象,钻孔孔径过大	钻孔内壁岩体脱落、钻孔孔径过大,内部泥浆稠度过高	地层易出现坍塌、涌水现象	地层出现坍塌、涌水现象

* 收稿日期:2023-06-20 修回日期:2023-06-29

第一作者简介:林圣明(1985-),男(汉族),天津人,工程师,现从事地热钻探工作。

井技术成井的难度较大,所耗费的资源也较多,在遇到漏失地层时还容易发生卡钻、埋钻等事故。而气举反循环钻井工艺可有效解决上述问题。该工艺是将压缩过的气动通过特定管道输送到钻孔内部并使之与钻井液充分混合,从而使钻井液的比重降低。此时的钻井液在钻井工具的内外液面处形成了压力差,钻井液就可以沿钻杆返回地面,然后在地面沉淀池中除去钻井液中的固体之后使其再次流入钻井内,以此形成一个反循环。

沉没系数的大小将直接决定着钻井内外液面压力差的形成,因此,选择一个适宜的沉没系数,对建立循环至关重要。在其他条件允许的情况下,沉没系数越大越好,通常情况下不应小于0.5。其计算方法按下式

进行:

$$a=h_{sj}(h_d+h_s)\geqslant 0.5 \tag{1}$$

式中: h_d ——液面以上的钻杆长度;
 h_s ——液面以下的钻杆长度。

气举反循环钻井工艺并不适用于水敏性地层和漏失严重的地层。当钻探区域地层主要为水敏性较强的岩土体时,钻井过程中产生的泥土容易聚集在钻杆内部且不易排出井外,此时容易造成通道堵塞;在漏失严重的地层中,钻井液的损失会有大幅度的上升,导致钻渣难以排出,从而导致坍塌、卡钻、埋钻等危险情况的发生。气举反循环钻井工艺应用过程中常见的问题及解决办法如表2所示。

表2 气举反循环钻井工艺常见的问题及解决办法

常见问题	问题原因	解决办法
反循环不畅	吸渣口过小或过大、裙板离空地太高或太低	调整吸渣口截面大小;调整导流裙板至孔底的距离
反循环中断、只出气、不排渣、供气压力降低 水少气多,工程压力明显降低	钻头吸渣口、尾杆部分通道堵塞 双壁钻杆内管漏气或沉没比偏小	监测并清理钻头吸渣口、尾杆内堵塞物 对双壁钻杆内管试压检查,更换漏气的内管或破损的密封圈;调整沉没系数
钻杆外冒气泡,液面上升	钻杆外管漏气	提钻对钻杆外管试压检查,更换漏气的钻杆
供气压力骤然增高	送气管路至气水混合器之间气路堵塞或气、水混合器以上内管至排渣管严重堵塞	分析判断最可能发生堵塞的部位,依次检查,找出清理堵塞物

3 气动潜孔锤钻井工艺

试验场地中,0~25m地层范围内岩土体的水敏性较强,钻井过程中产生的钻渣难以排出井外;在地热能的主要开采地层中(300m以下),地质构造比较发育,地质破碎现象也较为明显,对循环的建立有不利影

响。因此,本文采用气动潜孔锤联合气举反循环工艺,首先使用气动潜孔锤,利用高压空气在岩体进行成孔操作,该方法能够有效降低浅层钻井中反循环钻井的应用难度,当钻井深度达到240m左右时换用气举反循环钻井工艺,具体的联合钻井流程如表3所示。

表3 联合钻井工艺流程

钻探深度	方法	工具	地层分布	速度(m/h)
0~250m	气动潜孔锤	采用330mm锤头和立杆的组合形式	泥岩、安山岩	1.5
240~300m	气举反循环	采用325mm的回转式钻头加立轴的组合形式	安山岩、斜长石和部分石英颗粒	0.61
300~700m	气举反循环	采用220mm回转式钻头加立轴的组合形式		0.76
700m以上	气举反循环	采用146mm回转式钻头加立轴的组合形式	团状石英、安山岩	0.52

3.1 气动潜孔锤钻井效果

为了能够将钻渣带到井外,气动的流速需要保持在15~25m/s范围内,钻井过程中的进风量计算方法为:

$$Q\geqslant 47K_1K_2(D^2-d^2)v \tag{2}$$

式中: Q ——进风量(m/min);
 K_1 ——钻孔深度修正系数;
 K_2 ——出水量修正系数;

D ——钻孔直径,m;
 d ——钻杆直径,m;
 v ——气动流速,m/s。

试验过程中,随着钻孔深度的增加,在气动压缩机功率恒定的情况下,气动流速会呈现衰减现象。钻孔中实际的气动流速值如表4所示。

图1为气动潜孔锤钻井过程中钻进速度与钻进深

表4 钻井气动流速值

编号	钻孔深度(m)	钻孔直径(m)	取粉管直径(m)	修正系数 K_1 、 K_2	实际进风量($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	实际气动流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	评价
1	0~200	0.35	0.325	1.08、1.3	23.3	21.2	满足
2	200~240	0.35	0.325	1.12、1.5	23.3	16.4	满足

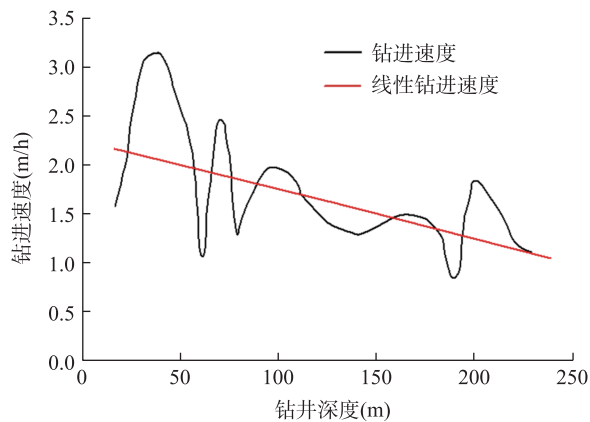


图1 气动潜孔锤钻井工艺的钻井速度与钻井深度间的关系

度之间的关系曲线,从图中可以看出,在0~100m深度内,钻进的平均速度为2.04m/h;在100~240m深度范围内,钻进的平均速度为1.38m/h,整体的钻进速度较为可观。和常规钻井施工技术相比,该技术的钻进效率提升了2倍。但随着深度的增加,岩石更加坚硬,所以钻进速度会逐渐下降,在深度达到230m附近时,钻井的经济效益下降明显。

3.2 气举反循环钻井效果

本试验中气举反循环钻井共分为三个阶段,第一阶段为240~300m深度范围,第二阶段为300~700m深度范围,第三阶段为700~1200m深度范围。

图2展示了第一阶段和第三阶段钻井速度与钻井深度间的关系曲线。从图中可以看出,在采用气举反循环钻井技术后,第一阶段的平均钻进速度为0.59m/h,整个过程中钻速的变化较平缓,变化幅度也较小。在第三阶段的平均钻进速度为0.63m/h,与第一阶段的平均速度较为接近,但第三阶段的变化幅度较为明显,稳定性较差。

同时,根据第二阶段每个钻头的使用时间和钻进距离统计出钻进速度与钻头使用时间之间的关系,如图3所示。从图中可以看出,初期钻进速度较低,但整体上呈现出逐渐上升的趋势,直到钻头无法使用。在钻头可使用时间段内,钻速共经历了四个阶段:上升、达到峰值、保持稳定、下降。其中最经济的时间段在0~80h内。

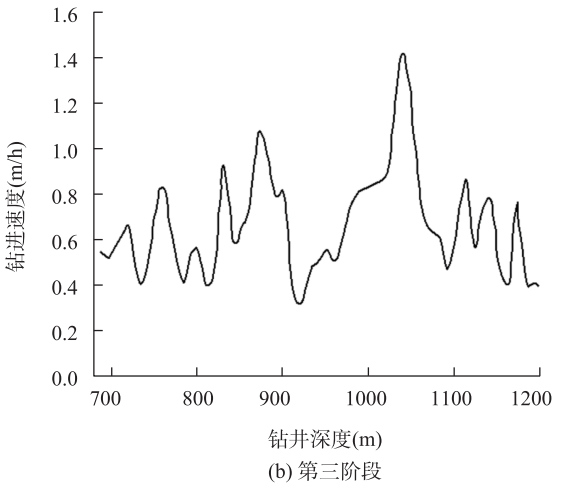
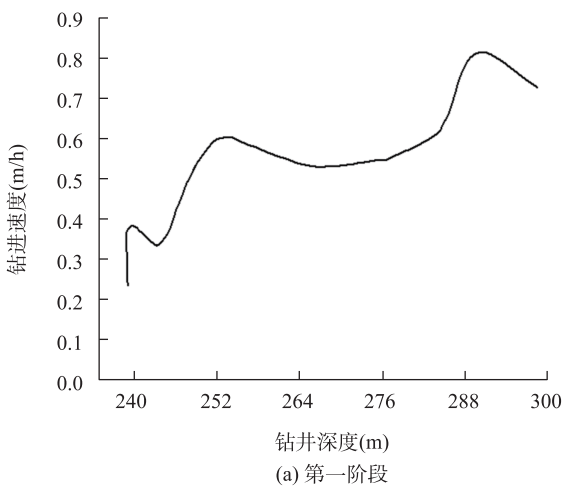


图2 气举反循环钻井工艺的钻进速度与钻井深度的关系

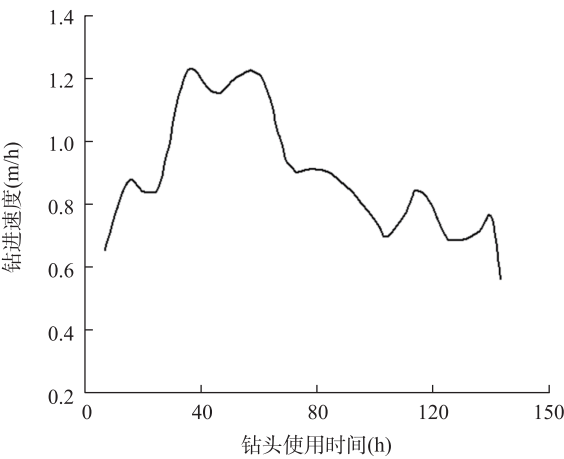


图3 钻进速度与钻头使用时间的关系

4 结论

本文介绍了气举反循环钻井工艺及其常见问题和解决办法,并以某典型地热资源含量丰富的山区为研究对象,对气动潜孔锤和气举反循环钻井工艺的钻井效果进行了研究,得到以下结论:

(1)对于质地较为坚硬和钻井过程中漏失情况较为严重的地层,气动潜孔钻井工艺均能够有效应对,且钻进速度也能够保持在1m/h以上;但在钻进深度超过200m之后,钻进速度下降较快,经济性能也开始降低。

(2)气举反循环钻井工艺适用于深孔钻井和复杂地层漏失的情况,能够弥补气动潜孔锤钻井工艺的不足。在地层较为坚硬的情况下,钻头的使用时间为80~100h,平均钻进速度为0.5~0.8m/h,是常规钻进工艺钻速的1.5~3倍,实际效果相对较好。

(3)气动潜孔锤联合气举反循环钻井工艺适用于浅层钻井地层坚硬或破碎分布较广、钻孔深度较大且

漏失较多的工程中,两者能够优势互补,使整个钻井的钻进过程保持在较高的施工效率。

参考文献:

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4): 449-450,134,451-459.
- [2] 刘伟莉,马庆涛,付怀刚.干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J].石油机械,2015,43(8):11-15.
- [3] 申云飞,卢玮,陈莹,等.水力压裂技术在豫西基岩地热井增产中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):253-256.
- [4] 宋继伟,蒋国盛,苏宁,等.贵州省复杂地层地热深井钻探工艺[J].地质与勘探,2018,54(5):1024-1037.
- [5] 李勇,陈怡,王虎,等.磺化沥青钻井液在贵州地热勘探井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):27-30.
- [6] 马晓东.砂岩孔隙型地热资源高效勘查成井[J].地质与勘探,2020,56(1):173-181.

(上接第60页)

分在高温下裂解、燃烧,注入的气体、重油裂解生成的轻质油、燃烧生成的气体以及水蒸汽驱动地层内的原油向生产井流动并采出的一种热力采油技术。火驱技术相比于蒸汽吞吐和蒸汽驱采油技术,具有适用油藏范围广、热利用率高、成本低、采收率高的优势。目前已完成了《古城油田BQ10区火驱提高采收率试验方案》的编制,方案采用不规则反七点井网,3口注入井、14口采油井,预计提高采收率25%。

6 结论与认识

(1)河南油田稠油开发经历了开发试验、注蒸汽热采工业化开发、井网加密、特薄层稠油开发、热化学辅助蒸汽吞吐及深薄层稠油开发和效益配产开发6个阶段,形成了具有河南油田油藏特点的开发技术系列,对类似油藏开发具有指导作用。

(2)河南油田稠油开发面临着未动用储量品位差、

老区采收率低和开发效益差等问题,开展科技铸剑工程《稠油效益开发技术攻关研究与应用》,明确了提高储量动用率、采收率和开发效益的攻关方向,部分成果在矿场应用取得了较好效果,对提高河南油田稠油油藏开发程度具有重要推动作用。

参考文献:

- [1] 张家焯,于兴河.稠油开发技术进展及未来展望[J].内蒙古石油化工,2019(5):79-80.
- [2] 杨勇.胜利油田稠油开发技术新进展及发展方向[J].油气地质与采收率,2021,28(6):3.
- [3] 李宾飞,张继国,等.超稠油HDCS高效开采技术研究[J].钻采工艺,2009(11):52.
- [4] 胡盛忠.石油工业新技术及标准规范手册[M].哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2004:1541.
- [5] 李长宏.泌124断块下层系普通稠油油藏聚合物驱实践与认识[J].石油地质与工程,2011,25(5):68.