

引用格式:张召峰.肯尼亚高温地热钻井技术在中国干热岩资源开发中的应用前景[J].油气藏评价与开发,2022,12(6):833-842.

ZHANG Zhaofeng. Application prospects of Kenya's high-temperature geothermal resources drilling technology in China's dry hot rock resources[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 833-842.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.06.001

肯尼亚高温地热钻井技术在中国干热岩资源 开发中的应用前景

张召峰

(中国石油长城钻探工程有限公司,北京 100101)

摘要:为了促进中国干热岩资源的开发和利用,以肯尼亚Olkaria地热田为研究对象,对肯尼亚高温地热资源勘探评估、开发和利用的整个过程进行了系统介绍,同时归纳总结了中国石油长城钻探工程有限公司在高温地热资源开发和利用过程中形成的8项钻井关键技术,并列举了详细的工程实例。通过总结、对比肯尼亚地热资源和中国干热岩资源的物理特征以及开发和利用过程中遇到的困难和挑战,梳理了共性和差异性,并有针对性地给出了解决方案,提出了以建立干热岩试验基地为核心,研发并验证新技术、打造新设备以及形成新技术规范的攻关方向,指出了以实现干热岩的经济开发、效益开发、规模开发为目标,以加强基础科学研究工作为手段,依靠国家政策的扶持和加强人才培养的研究思路,为中国的干热岩资源经济高效开发提供了理论和实践指导。

关键词:地热资源;高温钻井;空气泡沫钻井;PDC钻头;干热岩

中图分类号:TE249

文献标识码:A

Application prospects of Kenya's high-temperature geothermal resources drilling technology in China's dry hot rock resources

ZHANG Zhaofeng

(CNPC Great Wall Drilling Company, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to promote the development and utilization of dry hot rock resources in China, we take Kenya OLKARIA block as an example, and introduce the exploration, evaluation, development and utilization process of high temperature geothermal resources in Kenya in detail. At the same time, eight key drilling technologies formed during the development and utilization of high-temperature geothermal resources of the CNPC Great Wall Drilling Company are summarized and detailed engineering examples are listed. At last, the difficulties and challenges encountered in the development and utilization of Kenya's geothermal resources and China's dry hot rock resources are summarized and compared, the similarities and difference between countries are sorted out, and the solutions are put forward. With the establishment of a test base as the core, and with the developing and verifying new technologies and new equipment and forming new technical standards as the research direction, to point out that with the goal of realizing economical, profitable and large-scale development of dry hot rock, to strength basic scientific research work as a means, by the research idea of relying on the support of national policies and strengthen personnel training as the driving force, to provide theoretical and practical guidance for the efficient and economical development of dry hot rock resources in China.

Keywords: geothermal resource; high-temperature drilling; air foam drilling; PDC drilling bit; dry hot rock

收稿日期:2022-08-02。

作者简介:张召峰(1969—),男,正高级工程师,主要从事钻井、新能源开发等研究工作。地址:北京市朝阳区安立路101号名人大厦,邮政编码:100101。E-mail:zhangzf.gwde@cnpc.com.cn

基金项目:中国石油集团科研项目“可再生能源技术开发与应用研究”子课题“肯尼亚地热开发技术研究与应用”(2016A-4801)。

地热资源作为一种可再生能源越来越多地被世界各国重点开发和利用。这种十分宝贵的综合性矿产资源,功能多且用途广,不仅是一种可供发电、采暖等利用的洁净能源,而且还是一种可供提取溴、碘等工业原料的天然资源。全球地热资源的分布是不均衡的,全球性的地热带主要有下列4个:

1) 环太平洋地热带——太平洋板块与美洲、欧亚、印度板块的碰撞边界。如美国的盖瑟尔斯、长谷,墨西哥的塞罗,新西兰的怀腊开,中国台湾的大屯、马槽,日本的松川等。

2) 地中海—喜马拉雅地热带——欧亚板块与非洲板块、印度板块的碰撞边界。世界第一座地热发电站——意大利的拉德瑞罗地热电站就位于这个地热带中,中国的西藏羊八井及云南腾冲地热田也在这个地热带中。

3) 大西洋中脊地热带——大西洋海洋板块开裂部位。纳马菲亚尔和亚速尔群岛等地热田就位于这个地热带。

4) 红海—亚丁湾—东非裂谷地热带主要包括埃塞俄比亚、肯尼亚等国的地热田。

肯尼亚位于非洲东部,赤道横贯其中部,拥有红海—亚丁湾—东非裂谷地热带唯一位于板块内的全球性地热带,贯穿肯尼亚的大裂谷是东非大裂谷东部的一部分,裂谷从北部的Tukana湖延伸到靠近坦桑尼亚北部的Natron湖。肯尼亚依靠伴生的火山活动形成了大量的地热资源,包括Olkaria, Suswa, Longonot, Eburru, Menengai, Korosi, Paka, Silali, Emuruangogolak 和 Barrier 等 14 个主要地热远景区,理论地热潜力为 7 000 ~ 10 000 MW,其中Olkaria地热田被商业化开发和利用。

1 肯尼亚地热资源的利用

肯尼亚是东非经济社会发展最具活力的国家之一,近几年来电力需求量以年均 6.4% 的速度递增,然而电力供应短缺、电价过高成为制约其国民经济发展的主要瓶颈之一。为了弥补电力不足和控制发电成本,肯尼亚政府主要通过建立地热电站来替代燃油发电。

依据肯尼亚在 2015 年制定的能源政策,要在 2030 年达到地热发电总装机容量 5 500 MW 的目标。截至 2018 年 6 月,肯尼亚地热发电总装机容量

683.9 MW,其中,肯尼亚发电公司地热发电装机容量 533.9 MW,占比 78.1%,独立发电商地热发电装机容量 150 MW,占比 21.9%。

2 肯尼亚地热资源勘探

作为唯一商业化开发的肯尼亚Olkaria地热田位于肯尼亚裂谷谷底中部以南,局部及周边的构造情况如图1所示,Olkaria地热田整体面积大约 100 km²,已探明资源面积大约 40 km²。

Olkaria地热田的勘探工作始于 1950 年,通过地质特征分析、地球化学研究、地球物理勘探等技术,揭示了地下岩石和流体的相关属性,以及储层和渗透性通道的位置和展布,为钻井提供有利信息,并在 1970 年取得了突破性进展,在区块内成功完钻了温度达 300 °C 的地热井。

2.1 地质特征分析

Olkaria地热田是一个被南北走向的正断层切割的火山岩复合体(图2),地下可划分为4个主要地层,包括:Mau凝灰岩层,Plateau粗面岩层,Olkaria玄武岩层及上Olkaria火山岩层。Olkaria系统内的水主要来自于大气降水,北东东走向的Olkaria断层区是

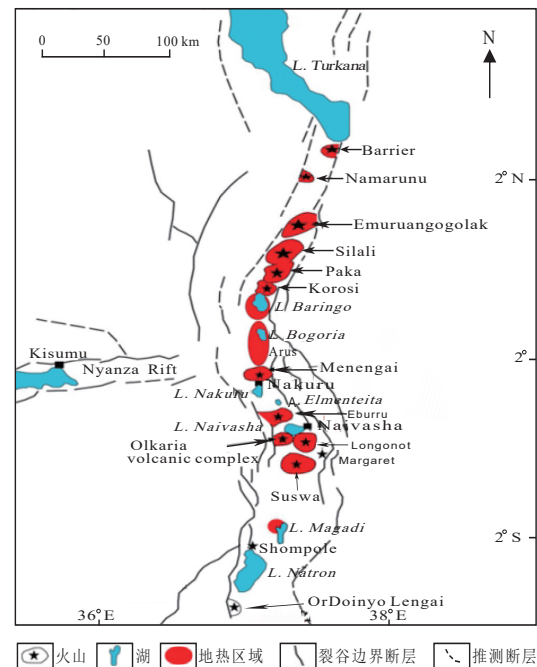


图1 Olkaria及周边地热田在东非大裂谷中的位置
Fig. 1 Location of Olkaria and the surrounding geothermal fields in the Great Rift Valley

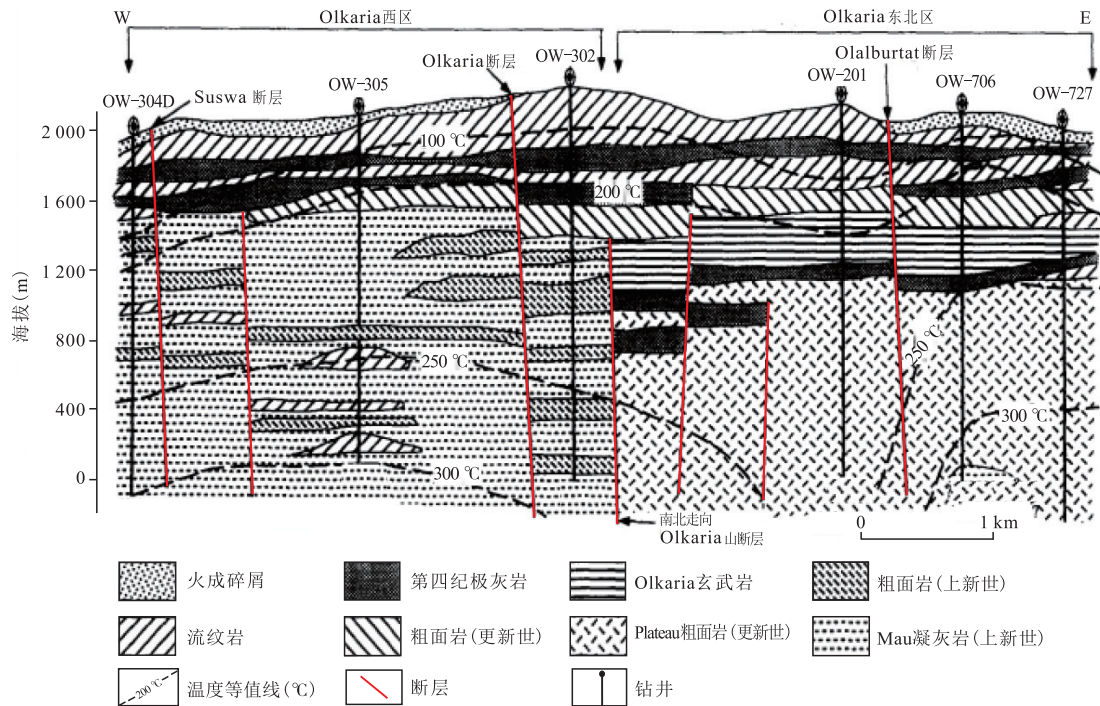


图2 Olkaria地热田岩性及温度剖面(W-E)
Fig. 2 Olkaria geology and temperature section (W-E)

整个Olkaria地热田最重要的渗透构造,该断层经过东北和西部区块,形成了系统内最高产的部分和一个水文上的划分。断层北部的地热储层以液体为主,不含气层;断层南部储层则是以液体为主的两相系统,液体在下,上覆蒸汽。

2.2 地球物理勘探

1) 微地震监测

Olkaria地热田的地热资源高产区与地震活动分布有明显的相关性,在地热田南部、中部地区以及东部和东北部生产区的边缘也记录到一些微地震活动,如图3所示,区块中心温度较高的位置地震活动更为密集,但规模较小且深度较浅。

2) 大地电磁及瞬态电磁

根据大地电磁及瞬态电磁测量得出的Olkaria地热田Domes地区海拔0 m电阻率分布(图4),可以看出,位于低阻层之下的高阻地区,呈现向东南方向延伸的趋势。

3) 电阻率测量(直流)

图5为根据直流法测量得出的Olkaria地热田和Akiira地区在海拔1 000 m平面上的电阻率分布,低

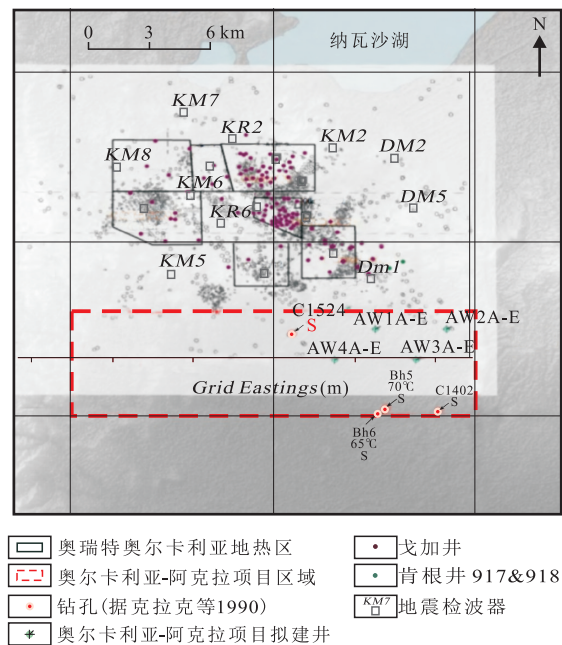


图3 Olkaria-Akiira地热田微地震事件分布
Fig. 3 Distribution of microseismic in Olkaria-Akiira

电阻率分布区与200 °C及以上的地层等温线分布具有相关性(图6)。

2.3 地热资源压力及温度

Olkaria 火山的岩浆活动发生在晚更新世, 铁镁质岩浆侵入一处较浅的岩浆囊, 该岩浆囊位于 6 km 深, 直径大约 10 km。根据地热井底部的传导型梯度估算得到的该地区的地温梯度大于 200 °C/km, 这是裂谷区最高的热流值之一。

3 高温地热钻井

地热开发中所用的钻井技术基本上是由石油

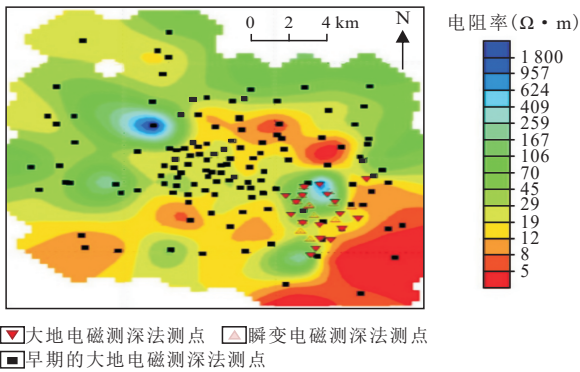


图4 Olkaria 地热田 Domes 地区基于瞬变电磁和大地电磁的海拔 0 m 电阻率分布

Fig. 4 Resistivity distribution at elevation of 0 meter in Domes of Olkaria based on TEM and MT

钻井技术派生出来的。为了适应高温环境下的工作要求, 对石油钻井的关键技术, 例如泥浆钻井, 进行了改进, 所使用的材料和设备, 不仅需要满足高温作业要求, 还必须能适应在坚硬、断裂的岩层构造中和高含盐、有腐蚀作用的液体环境中工作, 因此, 在钻探行业中已形成了专门从事地热开发的分支行业^[1-2]。

自 2007 年起, 在中国石油集团公司的支持下, 中

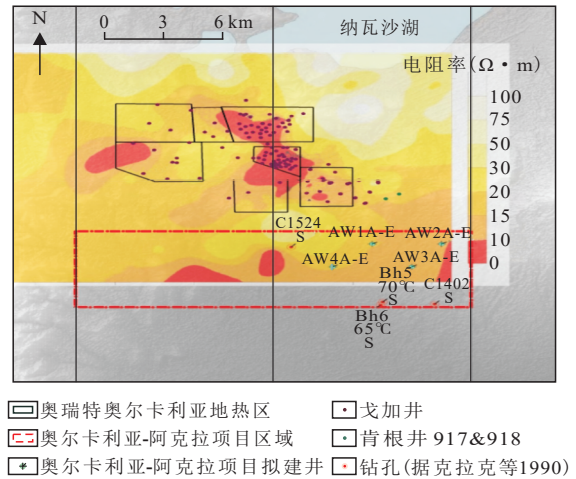


图5 Olkaria 地热田 Akiira 地区海拔 1 000 m 深度电阻率分布

Fig. 5 Resistivity distribution at elevation of 1 000 meter in Akiira of Olkaria

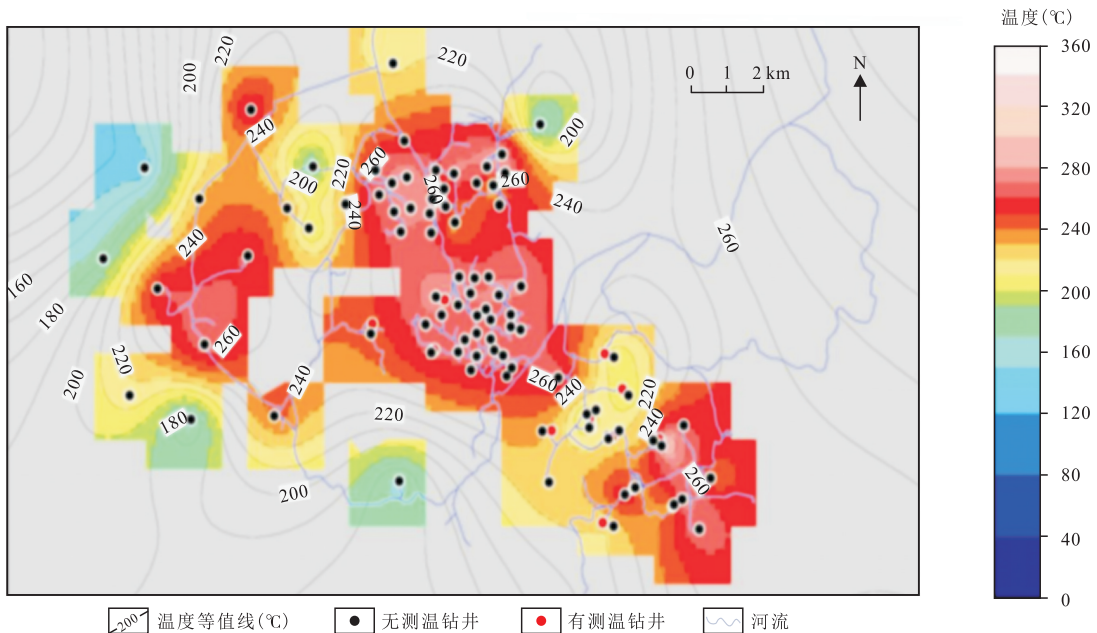


图6 Olkaria 地热田海拔 1 000 m 深度温度等值线

Fig. 6 Temperature contour at elevation of 1 000 m in Olkaria

国石油长城钻探工程有限公司在肯尼亚开展了高温地热资源钻井工作。

3.1 地热井钻井难点

1) 控制井筒温度

地热井和油气井有很大的区别。在油气井钻井时,地层温度都有规律可循,钻井过程中考虑更多的是如何完成钻井任务及在钻井过程中不伤害油气层。而地热井则不同,首先表现在地温梯度无规律可循,且地层温度远远高于油气井的温度,地热井水蒸气的最高产出温度近400℃,图7是肯尼亚地热井OW-49井完井12周后测试得到的温度变化曲线。由测试结果可知,该井的温度由井口的40.998℃变化为井底(3 622.1 m)的392.174℃,最高温度为392.584℃。

钻井过程中井口返出温度高,对循环介质的抗高温性能提出了挑战,同时对钻井安全和井控工作亦是一个威胁。特别是当几百度的水蒸气一旦涌出地面,其控制程序完全不同于油气的控制,首先是油气井钻井的相关控制设备在高温下都有可能失效,需要在地热井钻井时避免地层中的水蒸气喷到地面上来。

2) 钻井过程中存在较大的摩阻

由于地热井井筒内温度高,因此,大部分时间使用空气泡沫循环液等冷却循环液体作为钻井液,井壁没有泥饼,起钻过程中也没有泥浆充当润滑剂,再加上定向井井身轨迹不规则,导致摩阻变大,正常情况下,井深2 800 m起钻时,悬重达到180 t左右。

3) 钻井液的循环和盲钻

肯尼亚地层从地表至目的层均由火山喷发岩组成,整个井眼裂缝非常发育,漏失严重,部分时间是在盲钻,没有任何流体返出井口,这在油气井钻井中

是不可想象的,而由于地层的特点及构造,在盲钻过程中钻井液将岩屑带入漏层及裂缝,保证了井底的清洁,从而也保证了正常作业;其次,由于热交换的原理,循环钻井液的温度随着时间的推移温度持续升高特性下降。

4) 井眼的清洁问题

肯尼亚地热井所钻地层除表层外,基本上都是火山喷发岩,从实钻情况来看,多数后期都遇到了严重的井眼不稳定问题,因此,解决井眼清洁问题尤为重要。

5) 抗高温钻井液研制

在上部地层漏失不严重的情况下,地热井高温的特点对使用的钻井液有其特殊的要求:①地层流体矿化度高,其化学作用对钻井液体系造成一系列的严重化学危害并对钻具产生腐蚀;②要求泥浆密度较低;③钻井液抗高温能力要强,一般要求达到180~200℃。

目前,国内外除了研发抗高温的钻井液外,解决超深井抗高温难题的另一种钻井液体系为高温泡沫钻井液体系。在配制和维护过程中,通过抗高温发泡剂和抗高温保护剂,提高泡沫在高温条件下的稳定性,采用常规泡沫钻井技术实现高效钻进。

6) 高温固完井问题

在高温环境中,水泥浆的封固能力、套管腐蚀性、套管强度以及地层蠕变对套管的挤压作用都影响着固井质量。哈里伯顿公司的高温缓凝剂与硼酸(盐)复配,最高适用的循环温度为316℃;斯伦贝谢公司的UNIFSET缓凝剂适用温度小于232℃;国内水泥浆体系及添加剂仍以循环温度200℃以下为主,性能参数和稳定性难以满足200℃以上地层的固井要求。

7) 高效破岩问题

地热钻井常用的是牙轮钻头,部分情况下使用PDC(人造聚晶金刚石复合片)钻头钻井。肯尼亚地层主要由坚硬的火山岩组成,几乎无泥砂岩,地层研磨性强,机械钻速非常低。通常地热井钻头要钻高研磨性的变质岩、火成岩层,通常它们都属于基岩。对于牙轮钻头,钻进时的主要问题是钻头寿命短,牙轮钻头的轴承损坏和牙轮锥边径齿圈的过度磨损都是损坏的主要形式。轴承和径齿圈的磨损有直接的关系,一种磨损将导致另一种磨损,因此,在地热钻进中,为了延长轴承寿命会要求降低钻压,而低钻压导致低钻速,其后果往往使地热钻进更糟。

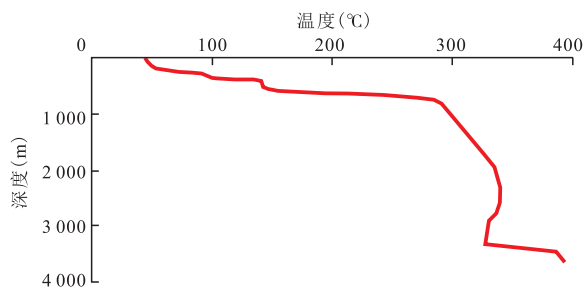


图7 OW-49井温度剖面曲线(2014-12-22)

Fig. 7 Temperature profile curve of Well-OW-49 in
December 22, 2014

PDC钻头用于石油钻井已有近60 a的历史。随着切削齿材料技术和钻头设计技术的不断进步,其独特的钻井安全性、结构形式的灵活性以及剪切破岩的高效切削性,使PDC钻头在油气钻井工程中的地层适应范围越来越广,据统计目前在世界范围内钻井总进尺数的80%都是由PDC钻头完成的,占有绝对的重要地位。

在高研磨性地层中钻进时,常规PDC钻头的切削齿磨损速度快,钻头的工作寿命很短。同时,高抗压强度的岩层使PDC钻头难以有效地吃入地层,PDC钻头的应用受到很大限制。

肯尼亚地热钻井所使用的牙轮钻头典型的失效形式主要有2类:其一,在高研磨性地层中钻进时导致的牙齿脱落、断裂;其二,牙齿快速磨损及其所导致的缩径问题(图8、图9),这也是一种在2 000 m以下频繁出现的失效形式,此时牙轮钻头的工作寿命一般都较短(多介于15~40 h),说明深部井段的地层研磨性很强。上述2种失效形式在钻头外排和次外排齿表现得最突出,外排齿的脱落或磨损导致钻头严重缩径的现象频繁发生。

通过上述牙轮钻头应用现状及失效分析,总结如下:①在井深2 600 m以下井段,地层的硬度高、研磨性强、温度高,从钻头使用情况看,随着温度的升高,牙轮齿孔膨胀量大于硬质合金齿,造成牙齿和齿孔的实际过盈量小于设计过盈量,降低了牙齿的固紧力,造成钻头掉齿,且牙齿磨损严重,钻头使用寿命明显下降;②齿形技术、固齿技术以及钻头保径技术是高温地热井钻头必须攻克的关键技术。



图8 三牙轮钻头缩径与牙齿磨损

Fig. 8 Bit shrinkage and tooth wear of tricone bit



图9 外排齿脱落或严重磨损导致的钻头缩径

Fig. 9 Bit shrinkage due by tooth shedding or severe tooth wear

8) 空气钻井技术问题

肯尼亚地热田地层自上到下裂缝和溶洞非常发育,从实际的工况来看,全井从地表至目的层中的任何一点都有可能发生漏失,而每一次发生的漏失几乎都是完全漏失,无漏层或漏点规律可循,常规的油井钻井堵漏技术在此无用武之地。

依据地热井的生产特性,生产层也不允许堵漏,空气泡沫钻井的目的是为了解决井眼的漏失问题,所以低密度气基流体钻井技术在此是不可缺少的钻井技术之一。空气钻井是以空气代替常规钻井液作为循环介质,通过空气设备为载体实现的钻井工艺^[3-4]。

同时,由于泡沫流体的应用,制约了MWD(无线随钻)和有线随钻的使用,因此,该地区只能采用单点定向,存在火山岩地层可钻性差和空气泡沫定向螺杆效率低的问题。

目前,中国石油长城钻探工程有限公司在肯尼亚使用的是充气泡沫液钻井技术,在钻井时将一定量的气体(如空气)注入含一定量起泡剂的液体中,发泡剂在气体的作用下产生一定量的泡沫,使整个流体形成多相组合,从而提高流体的切力,降低环空液柱压力,减小漏失的发生,增加环空返速,更好地起到携带岩屑清洗井底的作用。

3.2 高温地热钻井技术突破

中国石油长城钻探工程有限公司目前在高温钻井技术方面进行了多年的技术攻关,积累了大量的相关经验,形成了4 000 m深度,400 °C高温下地热井钻完井技术体系,在高温地热钻井开发方面取得了以下突破:

1) 攻克了PDC钻头切削齿冷却技术和耐磨复合片技术这两个技术难题,研发出世界上第一套高温地热钻井专用PDC钻头系列产品,钻头技术性能不仅大幅超越长期使用的国内外牙轮钻头产品,而且明显超过国外知名钻头厂商的PDC钻头产品。

截至2016年6月18日,共使用41只PDC钻头,应用了36口井。累计入井次数55次。累计完成进尺55 092.02 m,累计钻井时间6 712.24 h,平均机械钻速8.21 m/h。其中有9口井是仅使用1只PDC钻头钻完四开进尺,单只PDC钻头最高累计进尺记录为3 098 m,单只PDC钻头累计最长钻井时间368 h,单井最高平均机械钻速记录为18.47 m/h。现场专用PDC钻头创下多个肯尼亚地热钻井新纪录。

①单只钻头最大进尺记录。1只GW506 O-1型钻头(钻头序号:619339)先后2次入井,累计进尺达3 098 m。此钻头在OW-901B井第一次入井试验,入井井段为828 m至3 000 m,共计钻进2 172 m;第二次入井在OW-923C井试验,入井井段为939 m至1 865 m,累计纯钻时间286.3 h,平均机械钻速10.82 m/h。

②单井单只钻头最高平均机械钻速记录。在OWA-45A井使用1只GW 506 O-1井型钻头(钻头序号:1619763),入井井段为960 m至3 000 m,纯钻时间141 h,进尺2 040 m,平均机械钻速达14.47 m/h。

③单只钻头最长进尺记录。2 000 m以下井段单只钻头最长进尺纪录1 077 m(同等进尺长度如果采用牙轮钻头钻进,最少要用7只钻头)。在OW-710C井,使用1只GW 605 O-1型钻头(钻头序号:1714190),钻进井段为2 069 m至3 146 m,纯钻时间186.2 h,平均机械钻速5.78 m/h。深部井段下最长进尺纪录703 m和最大井深记录3 650 m。在OW-49井,使用1只GW 506 O-1型钻头(钻头序号:1714191)入井井段2 947 m至3 650 m,纯钻时间161.9 h,平均机械钻速4.34 m/h。该钻头同样创造了肯尼亚地热钻井的钻头钻进最大井深记录3 650 m。

④最短建井周期记录。OW-901B井在四开井段应用1只GW 506 O-1型钻头,打完该四开井段,建井周期为38.77 d,其他同类井使用牙轮钻头平均需要62 d才能实现钻完井(图10)。

专用PDC钻头在缩短钻井周期、节约钻井成本方面成效显著。分析结果表明:每只新型钻头可缩短钻井时间约4~6 d,同井段使用钻头数量减少5~8只。PDC钻头的应用及PDC钻头性能的卓越表现,肯尼亚项目所执行的80口井合同,最终完成了

89口井,为甲方降低钻井成本目标作出了贡献。最小钻井周期为25.42 d,施工井成功率100%。

2)形成了高温地热钻完井相关配套技术,开发了地热井专用划眼工具、地热井高效携岩工具、非旋转稳定器、多级螺旋形携岩划眼工具、耐高温滚轮扶正器、三棱刚性防斜工具等6大类24套地热井专用配套工具。

3)形成了高温泡沫钻井液体系,开发了适合于肯尼亚高温地热井的抗高温泡沫钻井液体系。具备低密度、高黏度优点,密度范围0.036~0.424 g/cm³,发泡剂的临界温度从180℃提高到240℃,并具有良好的抗Cl⁻和Ca²⁺污染能力,完成海外多个高温泡沫钻井合同(表1)。

4)研发了地热井高温测试井下仪器,OW-909A井深2 960 m,井下环空实测温度达到227℃。高温完井测试仪器,井下实测温度392℃(图11a)。井口压力大约为2.5 MPa,井底大约为19 MPa(图11b)。

5)明确了高温地热固井密封机理,形成了高温地热井固井回填工艺,优化设计出1.10~1.30 g/cm³的低密度水泥浆体系,大幅提高了一次封固质量。

6)应用了适用于火成岩地层个性化空气锤,克服了肯尼亚Olkaria地热田二开部分井段极硬流纹岩地层机械钻速慢的难题,流纹岩地层平均机械钻速为4.32 m/h,较邻井最大提高12.7倍,钻井周期分布由25 d缩短至7 d,最多节省88.6万美元。

目前,长城钻探公司在肯尼亚完钻地热井累计超过150口,完钻井累计产能700 MW,为肯尼亚全国地热电站提供了75%的地热蒸汽,已建成装机280 MW地热电站一座,为肯尼亚电网增加了50%的发电能力,大幅降低了肯尼亚国内用电价格。

由于高温钻井技术的突破,大幅提高了单井产能,平均单井产能达到8 MW,与美国及肯尼亚先期完钻同类井相比产能提高了3倍,地热田储量提高2倍以上,其中,地热井最大井深3 650 m,最高温度392℃,单井最高产能30 MW,是世界第三高产地热井。

同时,中国石油长城钻探工程公司也开展了干热岩EGS(增强地热系统)的先导性试验,2014年3月至9月期间,施工完成了OW-49地热井,设计井深3 000 m,四开完钻后,中国石油长城钻探工程有限公司肯尼亚项目部联合肯尼亚业主,依靠先进的钻井技术,向深部寻找更高温度的热源,将钻井深度由3 000 m加深到3 650 m,井底温度达到了392℃,

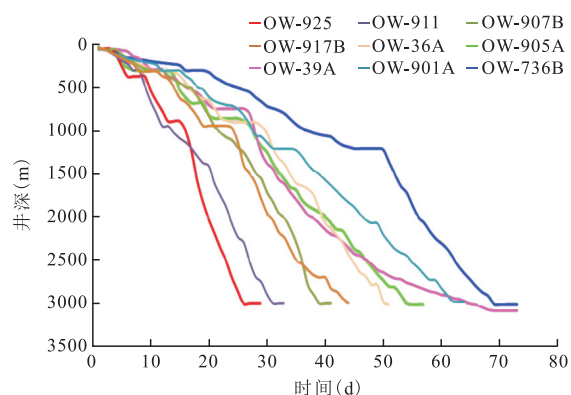


图10 PDC钻头与其他牙轮钻头钻井周期对比
Fig. 10 Drilling cycle comparison of PDC bit with other bits

表1 施工经历
Table 1 Construction experience

地点	项目描述	客户	项目结束时间	完井数
伊朗	空气泡沫钻井	PEDEC 和 NIDC	2002年	30
肯尼亚	空气泡沫地热井项目	肯尼亚国家电力公司	2008年	15
肯尼亚	空气泡沫地热井项目	肯尼亚国家电力公司	2009年	6
肯尼亚	空气泡沫地热井项目	肯尼亚国家电力公司	2010年	10
肯尼亚	空气泡沫地热井项目	肯尼亚能源部	2012年	26
卢旺达	空气泡沫地热井项目	Mininfra	2014年	2
肯尼亚	空气泡沫地热井项目	肯尼亚国家电力公司	2016年	89

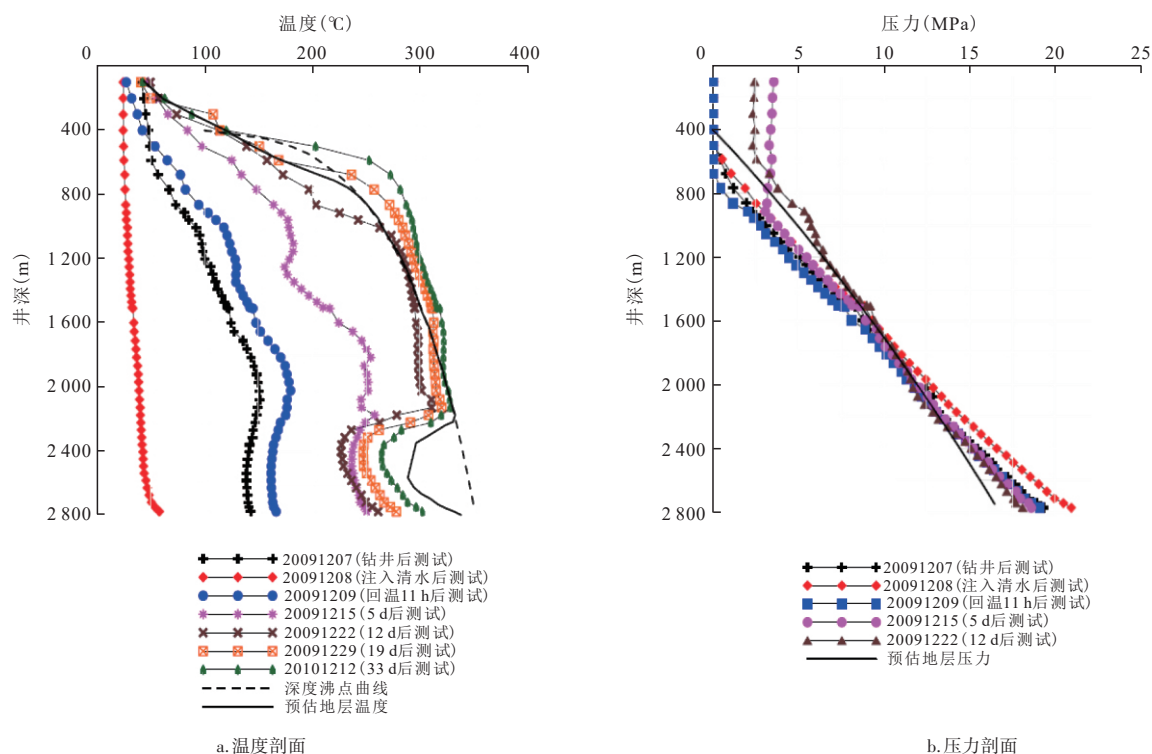


图11 OW-909A井温度剖面与压力剖面

Fig. 11 Temperature and pressure profile of Well-OW-909A

最终该井的发电装机容量相比邻井的6 MW提高到9 MW,增加了50%,同时大幅提高了该地热田的潜在发电能力^[5-6]。

4 中国干热岩资源的开发和利用

根据国内外目前对于干热岩的定义及研究现状,干热岩资源基本是在水热型地热资源勘探的基础上逐步发展起来的,影响干热岩资源赋存的指标包括温度、酸性岩体分布、大地热流值、居里面埋深和活动构造分布等。

中国地区干热岩资源的赋存类型将中国地热资源划分为隆起断裂型、沉降盆地型以及岩浆活动型3种基本类型,且分别具有不同的现代地貌类型^[7-8]:

1) 隆起断裂型:分为山间盆地型和山前过渡型。主要分布在地壳隆起区古老褶皱山系、山间盆地及隆起区向平原地区的过渡地带,活动性断裂发育,地形地貌类型以河谷平原、丘陵为主,地温梯度约2~3 °C/hm,以河北平山、福建福州等地为代表。

2) 沉降盆地型:分为沉积断陷盆地型和沉积拗陷盆地型。地温梯度3~4 °C/hm,最高达6~8 °C/hm,以北京、天津及西安、昆明等热水盆地为代表。

3) 岩浆活动型:分为近代火山型与近期岩浆型2类,主要受新构造运动控制。热储温度多在150℃以上,最高可达330℃,地温梯度10~30℃/hm以上,以云南腾冲、中国台湾大屯、吉林长白山等地为代表,为第四纪火山型地貌;近期岩浆型主要处在新生代构造活动区,以西藏羊八井为代表。

我国大陆地区干热岩资源的赋存类型主要是以第三类岩浆活动为特征的近代火山型,岩性多为花岗岩,岩体致密,其资源的类型与分布和肯尼亚地热资源的高温、岩性等具有非常相似的特点,且面临相同的挑战(表2)^[9-10]。

1) 干热岩钻井环境温度高,使得井下工具与钻井液的工作性能受到很大限制,不论是钻头、钻井液,还是各种井下工具都难以适应这样的高温,同时由于钻井环境的温度较高,钻井液及处理剂容易降解失效,难以发挥正常功能,对干热岩钻井带来严峻的挑战。

2) 干热岩钻井深度大,一般为3~6 km,岩石硬度大。由于干热岩主要岩性为各种变质岩和结晶岩,硬度较大,可钻性极差,井身结构复杂,给钻完井施工等带来很大的挑战。

3) 井壁围岩稳定性差,在钻井过程中,围岩会发生热破裂现象,形成大量裂纹,造成掉块、卡钻等事故,而且因为储层中裂缝和断层的影响,钻井过程中容易发生井壁坍塌^[11-12]。

目前中国干热岩勘探技术仍处于探索实践阶段,应该结合国内外实际情况,优选地质靶区,加快干热岩钻探开发示范工程建设,制定全国干热岩资源勘查和开发的标准和规范,尽快形成适合中国干热岩开发需求的配套技术方案。

干热岩地热地质勘查、深部钻探、储层建造、场

地的模型建立与多场耦合数值模拟等,是整个EGS开发中的难点和关键问题,也是高效开发干热岩资源的关键所在。这些关键问题的突破,对降低开发成本、减少环境影响和增加开发安全性、进而推动EGS的发展和商业化开发具有重要意义。从资源的勘探到工程钻井,中国石油长城钻探工程有限公司在肯尼亚高温地热资源开发中形成的关键技术可以有效解决我国干热岩资源开发过程中遇到的技术难题^[13-14]。

1) 实现经济开发,效益开发,规模开发

在干热岩开发过程中可以借鉴石油、化工行业的相关技术,如中国石油长城钻探工程有限公司在肯尼亚高温地热井开发过程中形成的关键技术,通过技术的革新、工艺升级,缩短钻井周期、实现干热岩产业商业化运作、大幅降低干热岩勘探开发利用成本,形成干热岩开发的产业化和规模化。

2) 建立试验场,加强基础科学研究工作

干热岩的开发和利用的核心技术主要是:资源选取和评价、特殊工艺和工具的设计和研制。通过建立国家级EGS现场试验基地,形成干热岩开发的核心技术系列。例如:我国目前已经在共和盆地建立干热岩示范工程,有必要借鉴包括肯尼亚东非裂谷高温地热勘探、钻探和开采的经验教训,通过试验基地逐步完善和形成干热岩资源评价、干热岩热能开发、干热岩综合利用三大关键技术。

3) 争取国家支持并制定长远的发展规划,加大资金投入和人才培养

干热岩资源的开发是一个多学科的技术融合,需要国家制定长远发展规划,解决在开展干热岩工程初期由于效益低等问题,只能通过政府引导和持续稳定的经费投入,才能有效促进相关技术研发和

表2 肯尼亚地热资源和干热岩开发利用的特点对比

Table 2 Comparison of characteristics of geothermal resources in Kenya and exploitation and utilization of hot dry rocks

项目序号	肯尼亚地热资源	干热岩
1	地热井水蒸气的最高产出温度为350℃,井口返出温度高	干热岩地层温度最高可达650℃,地温梯度达到了6.4℃/hm
2	该地区地层从地表至目的层均由火山喷发岩组成,整个井眼裂缝非常发育,漏失严重	干热岩资源埋深大、地层条件复杂,局部裂隙发育,容易发生钻井事故,井壁容易产生破裂形成裂缝,严重时会发生坍塌掉块卡钻和憋钻事故
3	该地区主要由坚硬的火山岩组成,几乎无砂泥岩,地层研磨性强,机械钻速非常低	地层为片麻岩或花岗岩,硬度高,研磨性强,可钻性差
4	地层高温和泡沫流体的应用,制约了MWD和有缆随钻的使用,现场采用单点定向	干热岩地层温度高,使得油气井钻井工具不再完全满足干热岩钻井的需求,在高温环境下钻头、井下动力工具、随钻测量系统、钻井液的寿命都会受到很大影响。

技术体系的建立,建议持续增加科研投入,尽快突破关键技术^[15-16]。

5 结论

肯尼亚高温地热资源开发和利用与中国干热岩开发利用有相似的地质特点——新生代火山裂谷高温使得勘探、钻井面临诸多挑战。国内干热岩开发技术仍处于探索起步阶段,应该结合国内、外工程实例,促进我国干热岩勘探开发示范工程建设,形成适合我国干热岩资源的地质调查、地球物理探测、钻探等关键技术,为大规模开发利用干热岩地热资源奠定基础。

参考文献

- [1] 张杰,赵萌,牛世伟.干热岩EGS关键技术进展与发展趋势[J].区域供热,2021,(2):79-84.
ZHANG Jie, ZHAO Meng, NIU Shiwei. Key technology progress and development trend of engineered geothermal system for dry hot rock[J]. District Heating, 2021, (2): 79-84.
- [2] 荆铁亚,赵文韬,郜时旺,等.干热岩地热开发实践及技术可行性研究[J].中外能源,2018,23(11):17-22.
JING Tieya, ZHAO Wentao, GAO Shiwang, et al. Practice and technical feasibility study of hot dry rock geothermal development[J]. Sino-Global Energy, 2018, 23(11): 17-22.
- [3] 朱桥,张加蓉,周宇彬.干热岩开发及发电技术应用概述[J].中外能源,2019,24(9):19-27.
ZHU Qiao, ZHANG Jiarong, ZHOU Yubin. Application of HDR development and power generation technology[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(9): 19-27.
- [4] 何森,龚武镇,许明标,等.干热岩开发技术研究现状与展望分析[J].可再生能源,2021,39(11):1447-1454.
HE Miao, GONG Wuzhen, XU Mingbiao, et al. Research status and prospect analysis of hot dry rock development technology[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11): 1447-1454.
- [5] 李瑞霞,黄劲,张英,等.干热岩开发利用现状及发展趋势分析[J].当代石油石化,2019,27(3):47-52.
LI Ruixia, HUANG Jin, ZHANG Ying, et al. Development status and trend of HDR geothermal resources[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2019, 27(3): 47-52.
- [6] 窦凤珂.干热岩勘查及开发利用的关键技术[J].化工设计通讯,2020,46(10):157-158.
DOU Fengke. Key technologies for exploration and exploitation of dry hot rock[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(10): 157-158.
- [7] 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.
- [8] 陈作,许国庆,蒋漫旗.国内外干热岩压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2019,47(6):1-8.
CHEN Zuo, XU Guoqing, JIANG Manqi. The current status and development recommendations for dry hot rock fracturing technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 1-8.
- [9] 齐晓飞,上官拴通,张国斌,等.河北省乐亭县马头营区干热岩资源孔位选址及开发前景分析[J].地学前缘,2020,27(1):94-102.
QI Xiaofei, SHANGGUAN Shuantong, ZHANG Guobin, et al. Site selection and developmental prospect of a hot dry rock resource project in the Matouying Uplift, Hebei Province[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 94-102.
- [10] 杨建锋,王尧,马腾,等.美国干热岩地热资源勘查开发现状、战略与启示[J].国土资源情报,2019,20(6):8-14.
YANG Jianfeng, WANG Yao, MA Teng, et al. Current status and strategies of exploration and development of hot dry rock geothermal energy in the United States and implications for China[J]. Natural Resources Information, 2019, 20(6): 8-14.
- [11] 谢文苹,路睿,张盛生,等.青海共和盆地干热岩勘查进展及开发技术探讨[J].石油钻探技术,2020,48(3):77-84.
XIE Wenping, LU Rui, ZHANG Shengsheng, et al. Progress in hot dry rock exploration and a discussion on development technology in the Gonghe Basin of Qinghai[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 77-84.
- [12] 毛翔,国殿斌,罗璐,等.世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J].地质论评,2019,65(6):1462-1472.
MAO Xiang, GUO Dianbin, LUO Lu, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. Geological Review, 2019, 65(6): 1462-1472.
- [13] 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.
- [14] 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,2022,23(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, 23(5): 36-42.
- [15] 郭盼,吴波,李朋,等.增强型地热系统储层建造及其评价[J].资源环境与工程,2020,34(2):256-261.
GUO Pan, WU Bo, LI Peng, et al. Research progress on hydrofracture and evaluation of enhanced geothermal system[J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(2): 256-261.
- [16] 肖鹏,闫飞飞,窦斌,等.增强型地热系统水平井平行多裂隙换热过程数值模拟[J].可再生能源,2019,37(7):1091-1099.
XIAO Peng, YAN Feifei, DOU Bin, et al. Numerical simulation on the heat transfer process of parallel multi-fractures in enhanced geothermal system horizontal well[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1091-1099.

(编辑 李颖洁)