

高温地热发电钻井技术进展

查永进¹, 冯晓炜², 葛云华¹, 陈志学^{1,2}

1. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

摘要 超高温钻井技术是高温地热发电的关键技术, 钻井技术的突破将有力地促进中国深层高温地热发电产业快速发展。本文分析了高温地热钻井的主要技术难点, 包括高温井控、超高温钻井液、高温固井与成井、高温钻井工具与仪器、高温井眼轨道测量与控制、高温条件下破岩效率等。针对这些难点, 国内外形成的技术对策包括高温井钻井安全控制、抗高温固井水泥浆、抗高温井下工具、井眼轨道监测与控制、抗高温钻头技术与提高钻速等, 最后简单叙述了肯尼亚深层超高温地热钻井实例。

关键词 高温地热; 地热钻井; 地热发电; 高温岩体; 超高温

中图分类号 TE2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.007

Advances in the Drilling Technologies for High Temperature Geothermal Power

ZHA Yongjin¹, FENG Xiaowei², GE Yunhua¹, CHEN Zhixue^{1,2}

1. China National Petroleum Corporation Drilling Research Institute, Beijing 100195, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Ultra high temperature drilling is the key technology of high temperature geothermal power generation, the breakthrough of which will enhance the development of the deep high-temperature geothermal power generation industry. We analyze the major technical problems of high temperature geothermal drilling, which include high-temperature well control, ultra high temperature drilling mud, high-temperature well cementing and completion, tools and instruments that suit for the high temperature condition, high temperature well trajectory measurements and control, rock-breaking efficiency in high temperature condition, and so on. As for those problems, the experts both at home and abroad have developed many technological responses, such as, the safety well control of the high temperature geothermal drilling, anti-high-temperature cement, anti-high-temperature down-hole tools, well trajectory monitor and control, anti-high-temperature drill bits and drilling rate, and so on. It is also provided an example of the deep high-temperature geothermal drilling in Kenya at last.

Keywords high temperature geothermal; geothermal drilling; geothermal power; hot dry rock; ultra high temperature

0 引言

化石能源越来越受到碳减排的制约, 发展清洁能源成为各国加快发展的关键, 2011年日本地震福岛核电站事故, 又使核电发展在全球降温。中国国民经济的高速发展下碳排放已居世界第一, 继续增大碳排放量, 国际压力势必越来越大。美国能源部可再生能源和能源效率办公室在《地热系统技术的评估》(2008)一书的封面上对地热能作了如下评述: “地热

将你带到洁净、丰富、可靠、经济能源的繁荣未来”。因此, 发展地热等清洁能源是中国未来能源保障的必然选择^[1-4]。

地热发电需要在超高温地层温度条件下钻成采热井眼, 而中国目前在深层高温地热钻井方面尚没有相关的技术储备。本文对深层高温地热钻井的问题进行了初步分析, 并提出深层高温地热钻井需采用的关键技术, 旨在推动中国深层高温地热发电钻井技术的发展。

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-10-25

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05021)

作者简介: 查永进, 高级工程师, 研究方向为油气井工程, 电子信箱: zhayongjindri@cnpc.com.cn

1 高温地热电力资源特点

地热发电可以分为中低温地热发电与高温地热发电。中低温地热取自浅表水动力系统,埋深较浅,对钻井技术的要求相对较低。高温地热取自深层水动力系统,发电效率高,是世界上大多数地热电站的热源。

高温地热因发电热利用率较高,是一种较高效的利用方式。早期普遍尝试采用浅层高温地热发电,在世界一些地热田,钻数百米的浅井,就可以获得 200℃ 以上的水(汽),从而实现高温地热发电。其基本特征是采出热水属地表浅层地下水动力系统,补给路径短。实践发现,这类地热发电存在的问题是:(1) 地热能不稳定,出水量与温度变化较大,因此发出电量稳定性也较差,不利于电网运行;(2) 地下水在热源处经过的路径短,因此采出量与采出水温度都会较快衰减,发电难以持久。

深层高温地热的特征是地下水通过地质断裂向下补充到热储层,再沿裂缝达到可采层位,其钻井深度通常超过 1000m。

这类地热的特点是:(1) 采出热水温度高,通常高达 300℃ 以上,发电效率高;(2) 单井采出的热能多,单井发电量可达数兆瓦以上;(3) 稳定采出热水时间长,可稳定发电达 30a 以上;(4) 可以在浅层回灌,对环境影响较小。

目前世界上建成的地热电站,大部分都是高温深层地热电站。如肯尼亚,虽然早期曾尝试过浅层高温地热发电,但后来规模化商业应用的却是深层高温地热发电,其钻井深度一般超过 2800m。

2 高温地热发电钻井技术难点

高温地热发电需要解决钻井超高温的钻井技术问题,世界钻井承包商协会(IADC)将 150℃ 以上地层温度钻井称为高温钻井,将 175℃ 以上地层温度钻井称为超高温钻井,将 220℃ 以上地层温度钻井称为极高温钻井(图 1),深层高温地热钻井的地层温度显然远高于极高温钻井。

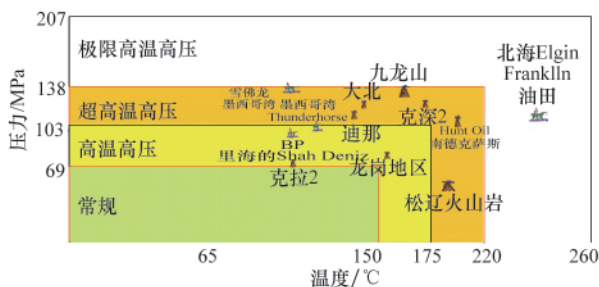


图 1 高温高压钻井划分

Fig. 1 Division between high temperature and high pressure drilling

极高的地层温度以及地层可能大量产水给钻井技术带来了许多挑战。

2.1 高温井控问题

地热开发必须在能产出大量超高温热水的地区钻井,才能获得高的发电能力。地层裂缝发育是这类地区的典型特点,钻井时往往要钻遇裂缝发育带,这种情况下高温热蒸汽会喷出。当发生井漏时,上部钻井液返出速度变慢,地层对循环流体加热作用增强,可能导致上部循环流体汽化喷出。而当发生地下热水涌向井筒的情况时,如果循环冷却液体量没有足够大,会导致循环流体汽化喷出。地下热蒸汽一旦喷出,不仅生产难以进行,还可能危及井队员工安全。

2.2 高温钻井液问题

常规钻井液中蒙脱石在 150℃ 以上温度范围内,进入地层后会形成一种低标号的水泥,蒙脱石颗粒随时间增长继续固化,造成地层裂缝堵塞,完井后没有产水能力^[9]。因此常规钻井液体系不适合于高温地热钻井。高温地热钻井时,由于不能使用蒙脱土,使携带岩屑、井筒降温等难度增大。

2.3 高温固井与成井问题

高温将导致埋入井内套管产生较大的热应力,同时管材强度下降,如图 2 所示(中国石油管材研究院)。对于固井施工来说,高温导致固井水泥的浆凝固时间难以控制,并可能导致固井失败。固井后,水泥石在高温的情况下强度持续衰退,随着生产的进行,套管不断产生热胀冷缩,伴随着管柱的震动,水泥石会逐渐粉化。而套管也会在高温情况下产生强度衰退,使得套管难以达到设计的性能^[6],产生大量的套管损坏问题^[7]。

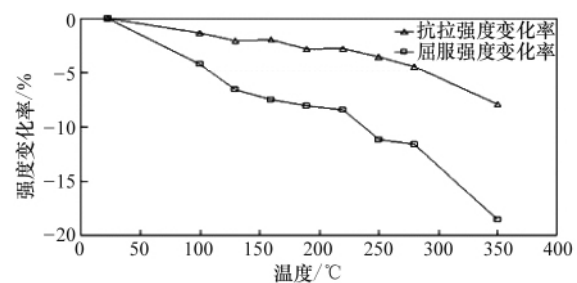


图 2 V140 强度随温度变化曲线

Fig. 2 Curve of V140 strength changing with the temperature

2.4 高温钻井工具、仪器问题

由于聚晶金刚石(PDC)钻头切削刃还不能适应坚硬的火成岩地层,因此高温地热井钻井深部只能使用牙轮钻头。而牙轮钻头受密封件耐高温性能的影响,在超高温条件下寿命极低。钻井常用的工具仪器耐温也有限,常规螺杆等井下工具中橡胶件耐高温通常仅 120℃,不适合用于高温地热钻井的环境。

2.5 高温井眼轨道测量与控制问题

高效开发地热资源需要采用定向井技术,井眼轨道测量非常关键。轨道测量需要用到的随钻测量(MWD)等仪器的电子元件耐高温极限为 175℃,这显然不适应于干热岩钻井的需

要。在泡沫钻井条件下,由于泡沫的隔热能力,采用单点测斜方式,可以满足测斜仪器下入与工作要求。但对于钻井液钻井可能就难以满足要求。

2.6 高温条件下破岩效率问题

由于高温地热钻井一般钻遇的都是极硬的火成岩,地层硬度级别高,面临可钻性差、对钻压敏感、没有足够钻压时钻速极慢的问题。目前,PDC 钻头以及涡轮钻具配金刚石钻头在该类地层提速并没有取得突破,提高速度难度大。另外高温地层钻进时跳钻严重,对钻具损害大。

3 高温地热钻井技术

针对以上难题,国内外经过实践探索,初步形成了以下高温地热井钻井技术。

3.1 高温井钻井安全控制技术

对于 300℃以上温度,国内外应用较成功的是采用泡沫钻井液体系,中国石油钻井工程技术研究院与长城钻探工程公司合作,曾在肯尼亚成功钻出一口地热井,地层温度达 350℃,证明在地层温度达 350℃情况下泡沫钻井流体可适应高温要求^[9]。该井钻井过程中交替采用了泡沫循环与注水冷却措施,防止循环流体过热导致液体汽化。该技术每采用清水钻进一段时间后,就打入一段泡沫,解决岩屑携带问题。安排专人监测返出钻井液的流量与温度,如果温度超过设定的警戒值,则立即关井,从环空与钻具内同时入清水冷却。安装完善的井口压力控制装置,一旦发现蒸汽喷出,能立即关井。安装完备的节流与压管汇系统,能实施节流排出蒸汽与返向灌入清水。

此技术要求泡沫可以回收利用,需准备一个较大的水池,将返出泡沫灌入池中,待泡沫自行消泡后可以重复使用。泡沫必须能抗高温,必须有适中的自行消泡时间,必须准备空气压缩机、增压机等设备。

3.2 抗高温固井水泥浆技术

固井水泥石的抗温能力是保证水泥环长期有效封隔的关键。目前在稠油开发中已应用成功的加砂水泥可以大幅度提高水泥石的抗温能力。一般水泥中加砂量在 30%—40%,可以适应稠油热采井采用 300℃过热蒸汽进行吞吐开采的要求,但仍不能满足高温地热水(汽)开采要求,需进一步采用以下技术:(1) 采用加砂(硅粉)水泥、紧密堆集水泥浆技术可以提高水泥石抗温能力;(2) 加入空心玻璃微珠不仅可以降低水泥浆密度,减少固井时漏失,还可以大幅度提高水泥环的保温能力,有利于提高采出水温度;(3) 采用抗高温缓凝剂控制高温情况下水泥浆凝固时间;(4) 采用正注、间歇反挤法保证在固井漏失情况下套管外完整充填,即使水泥已粉化,仍能实现套管外的可靠封隔。

3.3 抗高温井下工具

中国石油钻井工程技术研究院研制出抗高温橡胶,制成 C5LZ172X7.0-G 耐高温螺杆钻具系列。涡轮钻具可以耐更高温度(图 3)。

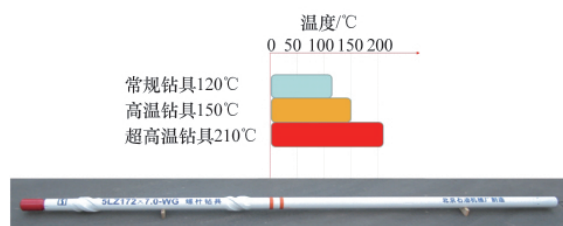


图 3 C5LZ172X7.0-G 耐高温螺杆钻具

Fig. 3 C5LZ172X7.0-G high temperature screwdrill

3.4 井眼轨道监测与控制技术

对于钻定向井与水平井来说,由于地层温度太高,仪器的抗高温性能实现难度很大,即使在技术上可行,其成本也太高。采用单点测斜是唯一可用的测斜方式。在这种情况下,需要发展与单点测斜相适应的井眼轨道控制技术。在满足高温地热定向井对于井眼轨道控制精度并不是太高的情况下,采用单次测量取代连续测量,可以解决井眼轨迹测量与控制问题。

采用自浮式单点测斜方式,开泵将测斜仪器送到井底,并保持循环到测斜结束后停泵,可让测斜仪上浮。仪器采用保温筒结构,可提高仪器短时间抗温能力,满足测量需要。

3.5 抗高温钻头技术与提高钻速技术

定向钻进等需要采用井下动力钻具,国内耐高温螺杆钻具可以耐 210℃高温,基本适应地热定向钻井的需求。更高温度的钻进需要采用涡轮钻具,该类钻具可以没有橡胶密封件,因此理论上可以适应更高的地层温度。

针对常规钻头密封件中橡胶不能抗高温,导致钻头寿命太低的问题,采用金属密封代替橡胶密封,可以提高抗温能力(图 4)。

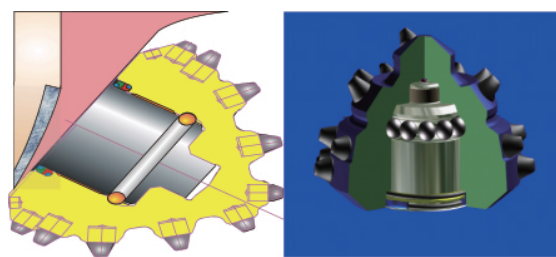


图 4 HJ 系列钻头

Fig. 4 Bit of HJ series

为提高钻速,需要增加钻铤尺寸与数量,增大钻压,使钻头产生高效率的体积破碎;采用高性能钻具接头,特别是钻铤丝扣应有应力减轻槽;也可以在钻具中加装减震器,试验采用液力冲击器等技术。

3.6 高温地热井成井与测试技术

因为地热井大多是火成岩,稳定性较好,高温地热井通常采用裸眼完井^[9-11]。井口装置安装在表层套管上,技术套管下完固井水泥浆返到地面,并采浮动结构,防止采蒸汽时技术套管热胀冷缩损坏井口。通过技术套管进行电测,完井不电测,直接进行生产测试。

3.7 肯尼亚高温地热井钻井实例

中国石油长城钻探工程公司在肯尼亚曾成功钻过地层温度达 350℃ 的地热井,初步形成了地热井的钻井技术,OW904 井泡沫钻井。其关键技术包括:(1)抗高温泡沫钻井流体技术(抗地层温度 350℃);(2)间断注水冷却技术,降低井筒温度;(3)采用加砂水泥、紧密堆积的高温固井技术;(4)井口安全保护技术。

4 结论

(1) 高温地热发电是地热发电中效率最高的方式,但是开发利用水平受高温地热钻井技术的制约。

(2) 深层超高温地热钻井属于温度超过国际钻井承包协会极高温条件的钻井,主要的技术难点包括高温井控、超高温钻井液、高温固井与成井、高温钻井工具与仪器、高温井眼轨道测量与控制、高温条件下破岩效率等^[12]。

(3) 解决超高温钻井难题需要采用的技术对策,包括高温井控与安全控制、抗高温固井水泥浆、抗高温井下工具、井眼轨道监测与控制、抗高温钻头技术与提高钻速等技术。

(4) 中国石油集团公司经过在肯尼亚的高温地热钻井项目实践,初步形成了一套深层超高温地热井钻井技术。对这些技术持续探索,形成了一套适合中国特点的深层超高温地热钻井配套技术,将有力促进中国深层高温地热发电产业快速发展。

参考文献 (References)

- [1] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-14.
Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, Kang Jianrong. An introduction to hot dry rock(HDR) geothermal exploitation[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-14.
- [2] 万志军, 赵阳升, 康建荣. 高温岩体地热开发的技术经济评价[J]. 能源工程, 2004(4): 30-32.
Wan Zhijun, Zhao Yangsheng, Kang Jianrong. Energy Engineering, 2004

- (4): 30-34.
- [3] Matsunaga I. Recent progress of hot dry rock geothermal energy development projects in Japan [J]. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 1995(2): 62-64.
- [4] 彭第, 孙友宏, 潘殿琦. 地热发电技术及其应用前景 [J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 106-110.
Peng Di, Sun Youhong, Pan Dianqi. *Renewable Energy Resources*, 2008, 26(6): 106-110.
- [5] 赖晓晴, 楼一珊, 屈沅治, 等. 超高温地热井泡沫钻井流体技术 [J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 37-38.
Lai Xiaoping, Lou Yishan, Qu Yuanzhi, et al. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2009, 26(2): 37-38.
- [6] 王建军, 冯耀荣, 闫相祯, 等. 高温下高强度套管柱设计中的强度折减系数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 883-887.
Wang Jianjun, Feng Yaorong, Yan Xiangzhen, et al. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(7): 883-887.
- [7] 陈勇, 练章华, 乐彬, 等. 考虑地应力耦合的热采井套管损坏分析[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5): 13-16.
Chen Yong, Lian Zhanghua, Yue Bin, et al. *Drilling & Production Technology*, 2007, 30(5): 13-16.
- [8] 沈炎, 刘俊, 程晓年, 等. 泡沫流体钻井技术在肯尼亚 OW904 超高温地热井的应用[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2009, 11(4): 16-18.
Shen Yan, Liu Jun, Cheng Xiaonian, et al. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 11(4): 16-18.
- [9] Kanoglu M, Dincer I, Rosen M A. Geothermal energy use in hydrogen liquefaction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007 (32): 4250-4257.
- [10] Saito S. Recent geothermal well drilling technologies in Kakkonda and Matsukaw[J]. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 1991(7): 166-174.
- [11] Michio K, Norio T. Development of hot dry rock technology at the Hijiori test site[J]. *Geothermics*, 1999(28): 627-636.
- [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 Baoping, Zhao Jinchang, Zhao Yangsheng, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2234-2243.

(责任编辑 岳臣)

· 科学共同体介绍 ·

中国仪器仪表学会

中国仪器仪表学会 (China Instrument and Control Society) 成立于 1979 年 3 月 29 日, 是中国仪器仪表与测量控制科学技术工作者自愿组成并依法登记成立的学术性、公益性、非营利性社团法人, 是党和国家联系仪器仪表与测量控制科技工作者的桥梁和纽带, 是发展中国仪器仪表与测量控制科学技术事业的重要社会力量。

中国仪器仪表学会目前拥有个人会员 35781 名, 其中高级会员 2000 余名, 团体

会员 1416 个; 下属专业分会 41 个, 联系指导地方学会 29 个, 另有特设工作委员会 10 个。学会的业务范围包括: 会员服务、学术会议与展览、媒体与出版、教育培训、技术咨询、市场调研、信息网络、科技评价、科技奖励。

中国仪器仪表学会先后与美国、英国、日本、法国、德国、新加坡、韩国等国家以及港、澳、台地区相关专业组织正式建立了双边及多边友好关系。学会 2012

年 5 月获中华人民共和国民政部授予的中国社会组织评估等级 5A 级科技社团。学会设立中国仪器仪表技术奖、发明奖、奖学金; 主办《仪器仪表学报》、《自动化仪表》等 7 种仪器仪表及测量控制学术、技术类期刊。

中国仪器仪表学会现历第七届理事会, 王大珩、包叙定任名誉理事长, 庄松林任理事长, 吴幼华任代秘书长。

(责任编辑 秦政)