

高温地热钻井的最佳实践

李亚琛,段晨阳,郑秀华

(中国地质大学(北京),北京 100083)

[摘要]地热开发的关键是地热钻井,高温地热钻井成本高,风险大。2008年,欧盟出版了“增强型地热系统最佳实践手册”;2010年,美国桑迪亚国家实验室出版了“地热钻井最佳实践手册”。本文参考这两本手册和世界主要高温地热钻井实践,分析了高温地热钻井的特点及主要潜在问题,介绍了高温地热钻井的成熟钻井技术和一些前瞻性的技术,以及不同地质条件下(火山岩、变质岩和花岗岩)适用的最佳钻井实践,旨在对我国高温地热钻井提供技术参考。

[关键词] 高温地热 钻井技术 最佳实践

[中图分类号] P634 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2016)01-0173-09

Li Ya-chen, Duan Chen-yang Zheng Xiu-hua. Best practices for high temperature geothermal drilling [J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(1): 0173-0181

0 前言

地热是地球内部的可再生清洁能源。地热资源以多种不同的形式存储于地下,现阶段实际开发的只是埋藏浅于4km且水量丰富和天然渗透性高的水热系统。其它被研究用于能源生产的地热系统有:a.地压型地热系统,水的温度稍高(高于正常地温梯度)但静液压力要远高于其正常深度的压力(Frederick *et al.*, 1979); b.岩浆型地热系统,温度为600~1400℃(Chu *et al.*, 1990); c.干热岩(HDR)系统,温度通常为200~350℃,但是岩石具有较低天然渗透性和少量的水。

2007年,美国麻省理工学院完成了《地热能的未来-21世纪增强型地热系统(EGS)对美国的影响》。研究报告提出,地热能在2050年将提供100GW的发电装机容量,这一数字是相当可观的。受该报告的影响,目前世界上已有越来越多的国家开展了对EGS的研究。我国虽然对中低温地热资源的直接利用居世界首位(多吉, 2013),但是对高温地热资源的发电利用重视不够。自2007年,我国

也开始了EGS的研究(郑克棫等, 2013)。

不可否认的是,不管何种类型的地热资源,要达到合理高效地开发利用都需要先进的地热钻井技术做支撑。本文在介绍地热钻井特点及问题的基础上,分析了地热钻井的优势技术及在未来可能应用的前瞻性钻井技术。同时也可以对我国的地热钻井开发提供技术参考。

1 地热钻井

1.1 地热钻井特点

地热钻井主要借鉴油气井钻井技术,由于热储岩石地质条件,诸如岩性、埋深以及产出流体性质不同,相比于油气钻井、地热钻井条件更为苛刻,还要针对地热井特有的高温和大口径进行新技术和新设备的改进与研发(Carpano, 1981; Finger *et al.*, 2010)。与油气钻井相比,地热钻井具有以下特点:

(1) 温度高,埋深变化大

内华达州的Steamboat Hills和加利福尼亚州的Mammoth Lakes,热储埋深仅为330m左右,热水温度约为200℃。加州的Geysers地热井,深通常深为

[收稿日期] 2014-12-12; **[修订日期]** 2015-12-17; **[责任编辑]** 陈英富。

[基金项目] 《世界主要国家干热岩资源勘探与开发现状及趋势研究》(隶属于中国地质图书馆承担的工作项目《国外地质文献集成服务与分析研究》)(编号:1212011220914)、《国家自然科学基金项目》(编号:41572361)和《高温地热资源开发利用战略研究》(编号:1212011120064)资助。

[第一作者] 李亚琛(1991年-),男,2013年毕业于长春工程学院,获学士学位,现为中国地质大学(北京)在读硕士,主要学习与研究方向为地热资源的勘探与开发。E-mail:13121919096@163.com。

2500~3000m,产出>240℃的干蒸汽;日本曾完成一口深3500m、井底温度500℃的勘探井(Saito *et al.*, 2000);夏威夷和冰岛试验孔钻至熔岩,温度>980℃。

(2) 岩石坚硬、研磨性强且地应力高

热储岩石多为火山岩和变质岩,与油气井的沉积岩石相比,具有坚硬、研磨性强和地应力高的特点,地层破碎而且常常不稳定。

(3) 裂隙高度发育,甚至存在厘米级裂缝;地层压力低,漏失严重。

(4) 地层中常含有腐蚀性流体,对钻柱、套管等具有腐蚀性。此时需要生产昂贵的钛合金套管和研制特殊水泥。

(5) 地热井直径大,所需套管程序多,固井水泥量大。

1.2 地热钻井的主要问题

上述特点意味着地热钻进是非常困难的。钻进速度和钻头寿命通常都比较低(Cacini *et al.*, 1994),腐蚀很常见,循环漏失频繁且严重。井内高温亦加剧了这些问题。

常见的地热系统几乎都含有溶解或游离的二氧化碳(CO₂)和硫化氢(H₂S)气体,这些气体会造成严重的腐蚀问题。H₂S的存在使地热钻井设备的选择更加单一,并且只能使用低强度钢套管,因为硫化物会使高强度钢产生应力腐蚀开裂。H₂S本身也是钻井过程中的重大安全隐患。应用材料的局限以及相关的安全隐患,增加了地热钻井的成本。

特别值得一提的是,循环漏失与热储损害不容忽视。一方面,漏失会带来巨大的经济损失,漏失成本通常占钻井成本的10%~20%,而且循环漏失往往是巨大的,甚至不上返。许多地热钻井报废是因为不能穿过漏失层(Mansure *et al.*, 2002),而且更多的井需要用设计之外的套管柱来解决漏失问题;另一方面,漏失是有害的。地热井中,生产层通常是漏失层,因此很难恢复漏失所造成的损害而保持其生产潜力。

2 高温地热钻井技术

2.1 钻井计划

钻井作业的关键是钻井计划。它不仅可以降低成本,而且可以减少突发事件对钻井产生的危害以及财产损失。一个详细的钻井计划应当列出完成这口井所需要的所有工作(地表条件、钻井、完井、固井、测井等),并且包括完成这些工作所需的成本和时间,对每个单独任务进行充分说明,并明确它们完成的先后顺序。

2.2 钻机选择

地热井通常包括勘探井和生产井(包括注入井)。

钻小口径井,使用岩心钻机可以节约成本。因为岩心钻机只需要小的套管、工具(钻头、铰刀等)和少量的水泥,还有能力钻穿全漏失地层。

如果需要钻大口径井,那么通常采用常规转盘式钻机。多年以来,传统的钻机都是靠机台上的转盘来带动钻杆旋转。但是目前“顶部驱动”技术业已成熟,它改善了以往随着钻进每次只能加一根钻杆的情形。这种钻机可以带动一组(两到三根)钻杆,节省了连接时间,而且在下钻时可以旋转和循环。这种边钻进边循环的方式对于地热井来说尤为重要,因为它可以在钻进过程中保护对温度敏感的工具。虽然顶部驱动的钻机日常的成本比较高,但它往往更划算。

2.3 钻井设计和套管程序

钻井设计通常是从井底到套管顶部。就是说,预计的生产层深度和流量决定钻井的井身结构,并且大多数设备也由这些条件确定。由于地热井产出的热水或蒸汽(相比于石油或天然气)价值较低,所以流量要很高。而且地热流体的生产是直接来自储层流到套管,如果存在两相流,大口径套管可显著降低蒸汽的流动压降,提高生产率(Combs *et al.*, 2000)。此外,许多低温地热井不能自流,必须使用泵,要么在地表采用长轴泵驱动,要么采用潜水泵(钻井设计必须满足泵的移动)。所有这些因素导致地热井比同样深度的油气井的口径要大—生产层的套管直径一般在20~34cm(Finger *et al.*, 2010)。

2.4 水泥固井

套管是通过水泥固定的。首先向套管中注入计算好的水泥浆量,在水泥的顶部放一个活动塞,然后在活动塞上部注入泥浆并向下推动活动塞,这就迫使水泥从套管底部流出,从套管与井壁的环空上返。在多数石油和天然气井中,套管只是在井底固定,但是地热井从上到下必须有完整的水泥环(Nelson *et al.*, 1981)。这种水泥具有两种非常重要的功能:在生产与关井期间强烈的热循环下,给予套管机械支撑;保护套管不受地层流体腐蚀。

2.5 完井

除了需要在套管四周覆盖完整水泥,影响完井设计的因素还包括:盐水化学成分、钻井分支的完井、生产层的完整性,即:判断是否允许裸完井眼或必须使用内衬套管。

盐水的化学成分不仅具腐蚀性,还会在生产地层和套管内产生结垢,这是所有的地热井都面临的问题(Ocampo-Díaz *et al.*, 2004),它会导致频繁的修井。在严重的情况下,未经处理的结垢会导致套管的流通面积在一个月内大幅度减少。结垢有时可以通过高压射流解决(Hurtado *et al.*, 1990),但是当生产地层堵塞时,就必须用钻头钻开(需要可膨胀的钻头伸到套管底部,通常钻头直径要大于套管内径)。

最后,需要判断生产地层是否足够稳定可以支持裸孔,还是必须使用割缝衬管防止地层岩石脱落或崩塌落入井内。这些可以从钻井获得的地质样品中判断,如果允许的话也可以通过测井成像技术,但是根据同一地区地热井钻井经验判断是比较常见的。

2.6 钻井液

历史上看,大多数地热钻井泥浆都是淡水和膨润土的简单混合物,也可加入聚合物(Zilch *et al.*, 1991)。充气泥浆或者充气液,通常是将空气加入到液体中使其密度变小,但有时因为腐蚀严重会使用氮气;在漏失严重的地层,广泛使用充气泥浆。上世纪70年代早期充气钻井液就在国际上得到广泛使用,并显示出诸多优势。使用空气钻进也相对常见,因为它的机械钻速高于泥浆或充气泥浆。

有时采用清水或无固相钻井液也是相当可取的,特别在生产地层,传统的泥浆会对储层造成伤害。通常在漏失严重的地层也会使用这种方式,但这会导致水泥套管固井变得复杂,因此需要特殊的水泥固井技术,例如泡沫水泥技术或冲洗回填技术。无液体上返需要大量的水供应,在缺水地区无法实现,但是,这种技术在印度尼西亚、新西兰、菲律宾、冰岛和墨西哥等地区(Jaimes-Maldonado *et al.*, 2006)成功应用。

3 先进技术

地热钻井运用的较成熟的技术是控压钻井技术、定向钻井技术等;最近针对地热钻井的特殊钻井液的研制也取得了重大进展;可膨胀套管技术及跟管钻进技术尚处研究阶段,但已表现出巨大的应用潜力。

3.1 控压钻井技术

控压钻井起源于欠平衡钻井,通过对井口套管压力、流体密度、水力摩阻等的综合控制,根据钻井要求和地层特点,调整井内液柱压力与地层压力之

间的关系,钻进过程中的压力控制流程见图1(伊明等,2010)。地热钻井中应用控压钻井技术表现出两点突出优势:a.该技术能有效减少循环钻井液的漏失,避免了应堵漏而消耗的钻井液用量,从而缩短钻井周期,节约成本;b.避免了过量钻井液向地层内流失,减轻了钻井液对热储的损害,从而保证了热储产能。

上述两种优点已在实际应用中有充分体现。如在肯尼亚OLKARIA地区钻地热井,由于该区域自上到下裂缝和溶洞非常发育,从地表至热储的任何一点都有可能发生漏失,漏失段或漏点无普遍规律可寻。依据地热井的生产特性,也不允许堵漏,采用空气泡沫钻井很好地解决了井漏和井眼清洁的问题(郑术生,2012)。澳大利亚的EGS井Habanero1井由于泥浆漏失遭到破坏,对Habanero2井进行了几次侧钻,又因高温和高比重泥浆在井内作业困难而最终放弃了,Habanero3井采用控压钻井没有泥浆漏失,节约了钻井成本,且热储主裂缝的生产能力和注入能力都表现良好。国内如西藏羊易地区地热井,中深部是高温低压地层,钻井过程中出现上喷下漏的复杂现象,因地制宜地选用清水平衡钻进,通过大小循环控制清水温度,既保证安全钻井也充分保护了热储(郑秀华等,2013);我国在60年代就开始了空气钻进技术的研究,但受限于当时的技术水平及设备能力,发展较缓慢(郑秀华等,1992)，“七五”以来在配套钻具及钻进工艺方面取得了一定进展,针对地热钻井采用空气钻井技术也有成功的案例,腾冲火山地热构造带地层破碎、漏失、缺水严重,传统的钻井液循环体系建立需要大量工程用水,为了降低钻井成本,提高钻井效率,针对项目区地层和环境条件进行了空气钻探试验,并取得了良好的实际效果(吴焯等,2013)。

3.2 轻质防腐水泥(固井和堵漏)

为了提供机械支撑和保护套管不受腐蚀,除了精细的固井技术外,固井水泥应低渗并与套管有较高的粘结强度,而且当泥浆轻质时优势更明显。低比重泥浆在处理漏失问题时是非常重要的,假如地层孔隙压力不能承受钻井液柱压力,是不可能将正常比重的水泥举升到地表的,采用发泡水泥可以解决这一问题。与向钻井液中注入气体相同,把气体注入水泥形成轻质泡沫水泥。加利福尼亚(Bour *et al.*, 2003)和夏威夷(Spielman *et al.*, 2006)地热钻井表明,反循环发泡水泥固井具有诸多优势。

传统石油钻井中用的水泥不仅仅比重大,而且

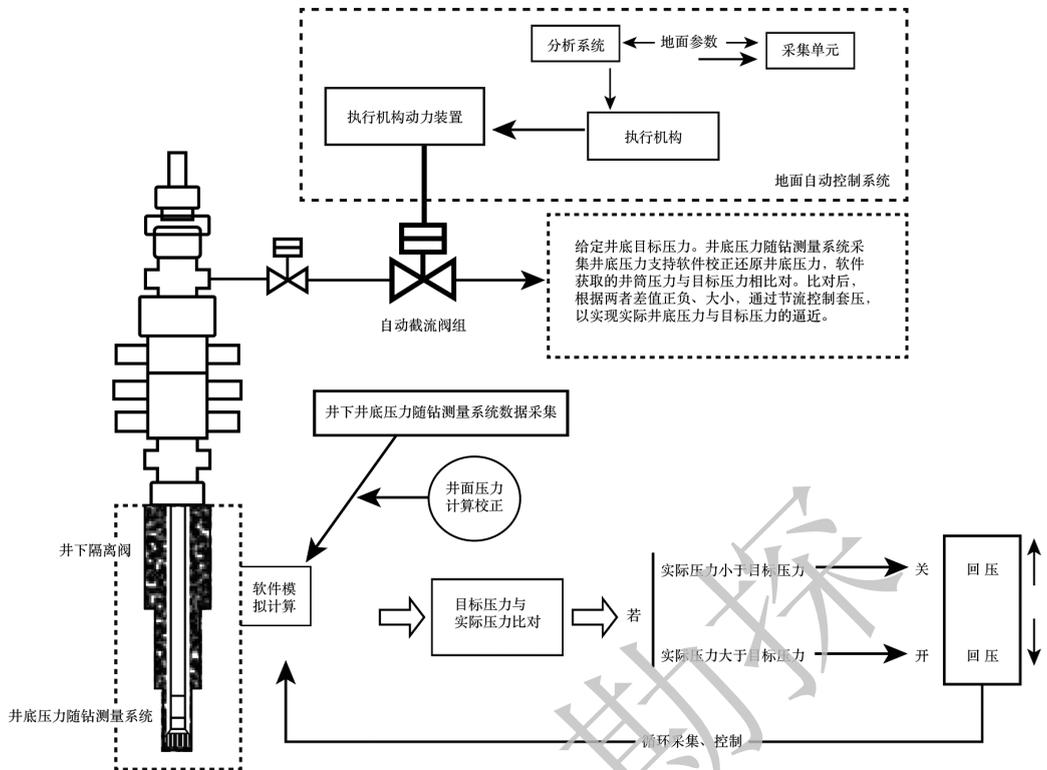


图1 钻进工况下的压力控制流程

Fig.1 Flow chart of pressure control in the case of drilling

容易受到地热层中常有的酸和二氧化碳的腐蚀,从而导致水泥的强度和防水性能降低。为了适应地热井需要,对波特兰水泥的主要改进是向 API G 级水泥中添加缓蚀剂(Koons *et al.*, 1993)和大约40%或更多的硅粉,但这也并不能解决容易受到酸和二氧化碳侵蚀的问题。布鲁克文国家实验室(BNL)对地热井水泥进行了大量的研究,包括地热环境下的水泥特性(Curtice, 1979),提高水泥的耐受温度(Curtice *et al.*, 1979),开发新的材料例如磷酸盐水泥、聚合物水泥、以及其它新成分(Zeldin *et al.*, 1980)。

布鲁克文国家实验室(BNL)与合作公司合力研究了一种轻质水泥,并能在320℃下有效抵抗盐水中酸和二氧化碳的腐蚀。BNL也成功合成两种新型水泥:磷铝酸盐水泥(CaP)和钠硅酸盐活性水泥(SSAS)。CaP型水泥具有较好的抗二氧化碳侵蚀能力,用于轻度酸性(PH值在5左右)并含有较多二氧化碳地层环境中;而SSAS型水泥主要用于抵抗酸的侵蚀,用于含有较多的酸和二氧化碳含量不高的地层环境。这两种水泥都很廉价,因为它们的原料是煤燃烧和钢铁制造的副产物。

3.3 定向钻井

对于地热钻井来说,尽可能多的穿过地层裂隙

是非常关键的,定向钻井可以实现这一目标。定向钻进技术相对复杂,钻进斜井有很多方式,最常见的是用孔底马达而不需要旋转钻柱驱动钻头。弯接头位于马达之上,相对于钻柱轴线以一个较小的角度指向马达与钻头,因为没有旋转,钻头会持续沿预设方向钻进。当前的工具在靠近钻头的马达外罩上设有弯曲点,它具有类似弯接头的功能,但在定向钻进中允许设备旋转以进行垂直钻进或定向滑动。在地热井中实施定向钻进的难度很大,原因是用于控制和测量井眼轨迹的电子设备和马达的弹性部件更易受到高温影响。除了温度的限制,孔底马达有时还受限于一一些钻进参数,例如钻压和水力学条件影响。马达也可能成为孔底钻具组合的机械弱点,这一点在钻进复杂地层时很重要。

无论是正排量马达或是随钻测量工具(MWD),都不能在高温条件下稳定的工作,所以大部分修正都是在地层温度低于175℃的深度进行。如果造斜器可以响应高温条件,那么就能够在高温地层设立造斜点。已经证明高温涡轮机是可行的,一些服务公司最近开始提供高温容积式马达(PDM)。这项技术是相对较新的,但对地热钻井可能是重大突破。如果马达在钻进时有适度的泥浆钻液漏失,新泥浆

的加入有时能够使钻头在高温井中继续工作直至达到其寿命。

随着定向钻井的工作变得更加广泛,钻杆也将经受更大的扭矩和阻力,这可能会严重影响井的深度。今天的定向钻进主要应用的是带有弯壳体的泥浆马达,能承受更大的扭矩和阻力。当岩石硬度变化、地层交替或者利用水代替泥浆作为钻井液引起润滑性的下降,都会产生外的阻力。为使钻井工作顺利,安装了连续校正钻井工具。它们最初是用于石油、天然气等资源,要比弯壳体马达设备更为昂贵,但是似乎更加适用于地热井,尤其在周边地热井曾出现严重问题的地区。

3.4 其它

无论钻井研究和 EGS 未来将如何发展,大部分的地热钻井的技术革新将由石油行业所使用的技术派生而来,因为相比于油气市场,地热钻井的市场会是很小的。

(1) 膨胀套管技术

如前所述,随着钻孔的加深,要在生产层保证足够的直径,就需要在井口加大套管的直径。然而,较大的套管尺寸和顶部固井作业是非常昂贵的,钻直径较大的井通常比小直径的孔要慢。一种相对较新的技术(初次现场试验在 1998 年)使得运行正常间隙的套管然后扩展内柱直径使两套管柱间隙变得很小成为可能。使用可膨胀管材意味着连续套管柱的间隙要小的多,因此,靠上的套管应比给定的生产层的传统套管的直径要小,可膨胀管材及膨胀套管与传统套管的套管直径比较见图 2(Tabbs *et al.*, 2006;Finger *et al.*, 2010)。

当考虑将此系统应用于地热钻井时,至少需要注意两个潜在的安全隐患:可膨胀管材需要弹性密封,应用于地热井时,即便它抗高温等级很高,套管的热膨胀和收缩也会破坏弹性密封件。套管之间有水会导致内套管的破坏,因此,地热钻井需要依靠水泥固井,在高温条件下,水泥固井系统需要有一个很长的凝固时间,因为扩管需要一定的时间。此外,套管内部有一个专有涂层,使膨胀锥能够更容易的穿过套管。这种涂层是否会受到高温的影响目前尚不清楚。

使用可膨胀套管还可以修复或减缓循环漏失。膨胀管材可在套管外即裸孔处膨胀;假如裸孔部分被套管密封,必然会减少钻孔直径。由于没有水泥可用于这类修复,因此套管对区域的密封完全依赖于自身外部弹性部件,从而使弹性部件在这一工序

中显得尤为重要。如果能够证明所用膨胀管材的部件可以经受住高温,那么膨胀管材在地热钻井中是具有重大实用价值的。目前,使用这种系统最大的障碍还是成本偏高。此外,膨胀套管连接螺纹的设计、加工也是实施膨胀套管技术的重点和难点之一。

(2) 套管钻井(DWC)

套管可以作为钻杆柱使用,同钻头一起旋转使钻孔变得更深,以使当钻孔到达指定深度时套管同时安放到位。套管必须由顶驱装置带动旋转,并在套管顶部通过螺丝连接或通过固定装置连接到套管顶部,再连接到顶驱装置上,并锁定和密封其内径。顶驱装置钻井液有套管内循环进入钻孔内,从套管外部返回地表,与钻杆相同。在常规使用中,顶部驱动也可以连续地进行循环,这对于地热钻井中对高温敏感的孔底设备来说是非常重要的。

此项技术有几个优势:1)节约成本、时间以及减少钻杆脱扣的相关问题-用于起下钻杆和处理常规钻井钻具组合的时间在钻井中占相当大的部分(Pooley *et al.*, 2009),许多的井控和钻孔稳定性问题都与起下钻杆相关;2)减少循环漏失-DWC 系统可以在遇到钻孔漏失情况下持续钻进。钻屑被冲入裂隙区或渗透区,与使用堵漏材料一样有效。相对较窄的环空区意味着在相同孔径下,比常规钻孔有更小的钻井液流速;3)增加套管的埋置深度-钻透漏失区或者软弱地层的能力意味着相对于常规钻井套管能达到一个更深的深度。对一些钻井设计和地层而言,可以重新设计套管程序,减少一层套管的使用,这将是一项很大的节省;4)提高安全性-处理钻杆极易导致钻井事故,避免这项工作意味着钻井操作人员将会减少许多危险。

虽然这项技术已在数百个油气井中得到应用,但在地热钻井中应用仍然有限,在新西兰曾成功钻穿不稳定地层。

可回收钻井设备包含很多弹性元件,钻进硬岩层时效率很低。对于大部分 DWC 钻头的切削结构使用的是 PDC 刀具,但是在地热层中使用这些刀具还不是非常常见。然而,最近在新西兰的经验和一些油气井硬岩钻进的现场试验表明合理的使用牙轮钻头和 PDC 刀具是可行的(Tessari *et al.*, 2003)。特别需要注意的一点是,不能使用常规的 API 套管连接方式,因为他们不能够传递力矩。所需求的连接方式需要较高的费用,尽管仍然有许多问题有待解决,但这项专门致力应用于地热钻进技术有很大的潜力值得进一步研究。

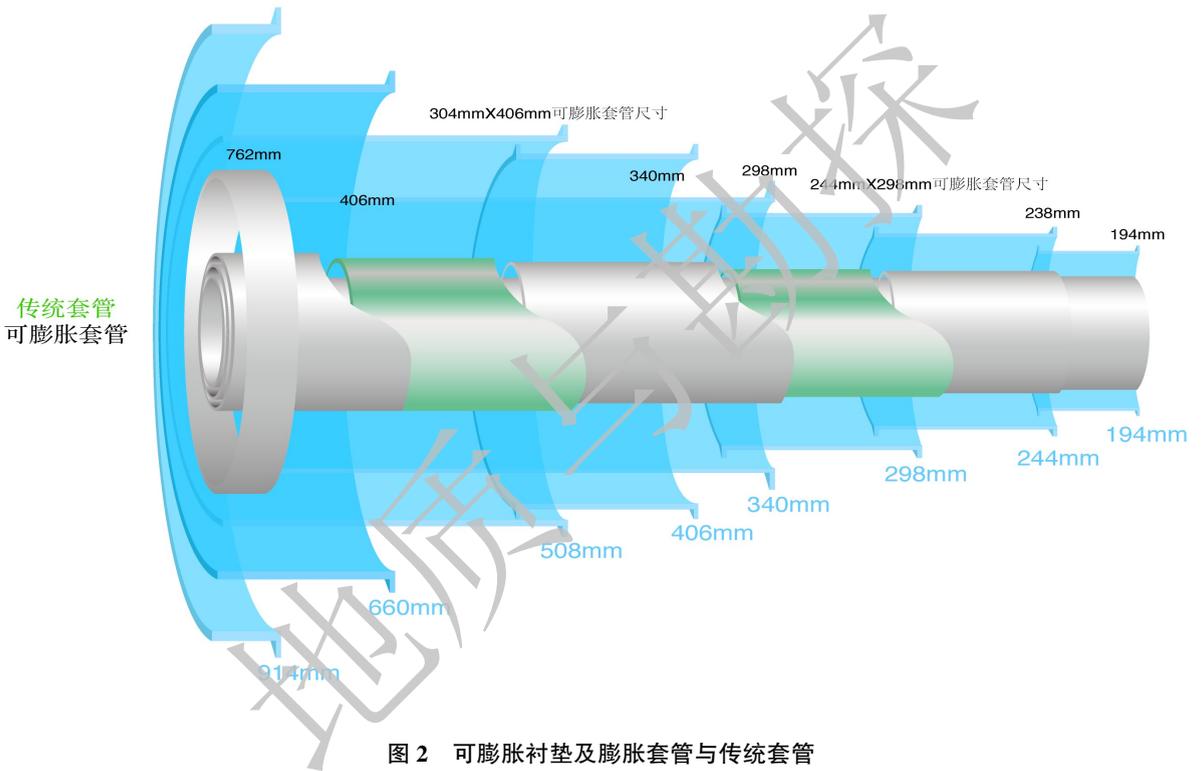
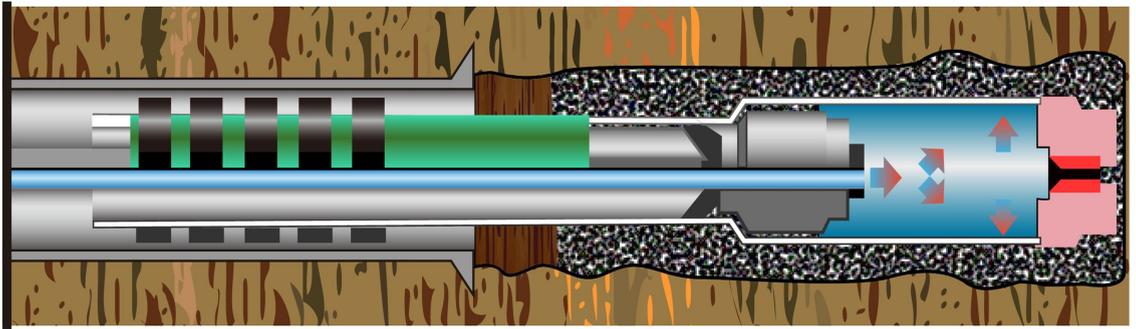


图 2 可膨胀衬垫及膨胀套管与传统套管的套管直径的比较

Fig.2 Comparison of diameters in expandable casing pipe and traditional casing pipe

4 地热钻井最佳实践

2008 年,欧盟出版的“增强型地热系统最佳实践手册”介绍了冰岛在火山岩以及意大利和菲律宾在变质岩的高温地热钻井,同时还介绍了目前最为成功的法国 EGS 项目在花岗岩中钻进的最佳实践 (ENGINE Coordination Action, 2008)。

4.1 冰岛在火山岩中地热钻进

火山系统以某种方式与火山活动相关,在火山系统中,热源是热侵入体或岩浆,它们通常位于火山杂岩(如破火山口和扩张中心)的内部或附近,可透

水的裂缝或断裂带控制水的流动。

冰岛多数高温地热井钻进深度是 1500 ~ 3000m,且有许多井是定向井,选择定向井是考虑环境的因素,而且近垂直结构比较容易实现,通常钻进 300~600m 开始造斜,偏角 30~45°,最终的水平位移一般是 700~800m。定向钻井需要泥浆马达,不同于在 Soultz 钻进花岗岩时的情形,在冰岛使用泥浆马达大大提高了机械钻速(ROP)。泥浆马达的弹性部件(橡胶定子)不能承受高温,通过钻井泥浆循环的冷却作用解决了该问题,这一措施很有效,在 2000m 处即使地层温度超过 300°C,井筒温度仍可

维持在 100℃ 以下,有效的冷却效果也使得随钻测量(MWD)工具能够在深井工作。

钻机选用油井钻机,起吊载荷能力 200~450t,并配备有转盘驱动,现在也有很多钻机使用顶部驱动。

装有滑动轴承和硬质合金的钻头的寿命在稳步提高,虽然这些钻头比较昂贵,但是它们通常可以钻进几百米甚至 1000m 不用更换。有一些聚晶复合片金刚石钻头也用于地热井中,即使没有泥浆马达,也可以钻的很快,但是转矩较大,寿命比好的三牙轮钻头短。

从结垢化学的角度讲,火山系统中的地热流体是相容的,因此只要温度和流量得到满足。生产的流体可以来自任何深度,这就意味着地热井的裸眼部分通常超过 1000m,允许任意流体进入井内。对于渗透性非常好的井,沸点在已固井的套管内,就可以采用“裸眼”完井。当钻进浅的蒸汽层时,在 100~300m 的井段最易发生“井涌”,对于这样的井,很难下入割缝衬管,因此,裸眼完井也是浅部蒸汽层地热井的完井方式。

生产层泥浆漏失严重时首选清水钻进,偶尔可添加聚合物或者泥浆丸清理岩屑。清水对热储的损害较小,同时水比泥浆廉价,可以顶漏钻进。最近,为避免损害储层,采用所谓的“平衡钻井”。此类方法中泵入井内的水力与常规钻井类似,同时压入空气,压缩空气与水混合,大大降低了钻井液密度,使井内液柱压力小于各个储层段的地层压力,从而避免了钻井液或岩屑漏失到地层中。当钻进蒸汽为主的储层时,首选方法是空气钻进。渗透率相比正常回转钻进显著增加,平均而言,同一个热田这些井的产量是常规井产量的两倍(Hole, 2006)。

G 级水泥(API 标准)添加 40% 石英粉能有效的承受高温和化学环境,从而得到广泛应用。缓凝剂、降滤失剂、降阻剂、消泡剂等添加剂,根据预期的温度、井身尺寸和钻井时间等选择使用。在冰岛,膨胀珍珠岩可有效减小泥浆密度,同时也降低了井喷发生的几率。

4.2 意大利 Larderello 和菲律宾在变质岩的地热钻井

Larderello 地热钻井存在的困难包括:超过 300℃ 的高温地层、强腐蚀性储层流体、卡钻导致钻柱故障、遇到高渗透性断裂带时循环钻井液完全漏失以及固井和套管维护的问题(Lazarotto *et al.*, 2005)。

钻至高温地层时,通过冷却作业控制钻井液的温度,包括注入泥浆排出岩屑以及在钻柱与套管间的环形间隙注入清水达到降温目的。

无论是在油气或地热钻井作业中,腐蚀一直是钻井的主要问题之一。如果不能正确处理由于物理和化学作用引起的不同类型的腐蚀,最终会影响钻井的性能。在处理腐蚀问题时,应密切观察井下参数的变化,并始终遵循开发指南。这种方法可能会增加井的成本,但是能避免因额外问题带来的额外花费。

卡钻导致钻柱故障。解决钻柱故障的常用方法是增大钻柱直径以减小钻柱上的单位应力,但是钻柱的选用要严格。另外,使用顶驱钻井系统大大降低了卡钻风险,也因此避免了昂贵的修井作业。

钻井过程中遇到高渗透性断裂带时,循环液可能完全漏失,此时常规的堵漏方法作用不大,只能采用清水钻进,在有条件的情况下,可以使用附近发电厂利用后的冷凝蒸汽水。

生产井投入生产后,套管需承受非常高的温度,需要保证整段套管良好的水泥胶结条件以防套管损坏,但是在断裂密集区水泥胶结非常困难,注入催化剂可加速水泥胶结封堵漏失层;若堵漏无效,且断裂带很深,可采用柴油水泥膨润土堵漏技术,此法可同时避免清水的污染。

4.3 法国 Soultz 增强型地热系统的花岗岩的地热钻井

为了优化钻井成本,提高钻井效率,采用回转钻进,仅在定向钻井时使用井底泥浆马达进行造斜和增斜。造斜时使用陀螺测斜仪,使用随钻测量工具监测井眼轨迹。

由于岩石颗粒粒度变化频繁以及裂缝方向和数量的变化,不使用 PDC 钻头,应用光杆满眼或钟摆井下钻具组合。

条件允许的情况下,使用天然盐(氯化钠)作为无固相加重剂。氯化钠是一种廉价的加重剂,易溶且无毒。使用氢氧化钠提升 pH 值及减轻腐蚀。如果需要,使用膨润土作为稠化剂以携带岩屑。沉淀池和聚合物用来分离液体和岩屑。加入岩屑和水泥稠化泥浆以便处理废浆。

安装了“自由浮动”套管,由井底裸眼套管铜镍封隔器支撑,并用小段水泥粘结。考虑到套管的膨胀和收缩,套管在井口是“自由”的,使用抗高温含氟橡胶密封圈保证套管在井口的“灵活性”。由于技术的限制,自由套管完井深度可达 5km。

波特兰水泥和高炉矿渣混合而制成的一种轻型高镁水泥能够抵抗高温盐水的腐蚀,它们不仅对多种氯化物表现出较低活性,也极少与氯酸发生反应。

使用水泥胶结测井-声波变密度测井工具和超声波成像仪检测水泥固井、套管厚度、结垢、腐蚀和成椭圆形的情况。

5 结论

(1) 与油气钻井相比,地热井直径大,地热钻进地层温度高、硬度大、研磨性强、裂隙发育,且地层常含腐蚀性流体,这些特点使地热钻井面临钻井腐蚀、循环漏失、套管程序复杂、固井作业困难的严峻形势。

(2) 目前在世界范围内,控压钻井技术在地热钻井中仍占主导地位,相比常规钻井,其在处理循环漏失、减轻热储损害方面表现出了巨大的优势;

(3) 可膨胀套管系统和跟管钻井技术在抗高温弹性密封件及套管连接方式等关键技术上还未取得革命性的突破,其它相关的关键技术均在积极的研究试验中,但是其在地热钻井未来的发展方向中已表现出巨大的应用前景。

[References]

Bour D L, Hernandez R. 2003. CO₂ Resistance, improved mechanical durability, and successful placement in a problematic lost-circulation interval Achieved: Reverse circulation of foamed calcium aluminate cement in a geothermal well [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 27: 163-167

Cacini P, Mesini E. 1994. Rock-bit wear in ultra-hot holes [C]. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, Delft, Netherlands: 223-230

Carpano L E. 1981. Commonly used technology of geothermal drilling (volume one) [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, (4): 56-58 (in Chinese with English abstract)

Chu T Y, Dunn J C, Finger J T, Rundle J B, Westrich H R. 1990. The magma energy program [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 14: 567-577

Combs J, Garg S K, Livesay B J. 2000. Maximum discharge of geothermal fluids from slim holes by optimizing casing designs [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 24: 61-65

Curtice D K. 1979. High-temperature materials for use in the cementing of geothermal wells [R]. BNL-50943, Upton, New York: Brookhaven National Laboratory: 109-119

Curtice D K, Mallow W A. 1979. Hydrothermal cements for use in the completion of geothermal wells [R]. BNL-51183, Upton, New York: Southwest Research Institute: 1-51

Duo Ji. 2013. Study on the strategy of development and utilization of geothermal resources in China [A]. Zheng Ke-yan, Duo Ji, Tian Ting-shan, Pang Zhong-he. *Exploration and development of high temperature geothermal in China-Symposium on high temperature geothermal*

resources in GanZi state, Sichuan province [C]. Beijing: Geological Publishing House: 33-35 (in Chinese with English abstract)

ENGINE Coordination Action. 2008. Best practice handbook for the development of unconventional geothermal resources with a focus on Enhanced Geothermal System [M]. Orleans: BRGM Editions: 1-97

Finger J, Blankenship D. 2010. Handbook of best practices for geothermal drilling [M]. The United States of America: Sandia National Laboratories: 1-83

Frederick D O, Prestwood D, Roberts K D, Vanston J H Jr. 1979. Geopressured geothermal commercialization: Four mid-term cameos [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 3: 229-232

Hole H. 2006. Geothermal drilling and direct uses [R]. Reports 2006 Number 3, Reykjavik, Iceland: United Nations University, Geothermal Training Programme: 1-12

Hurtado R, Mercado S. 1990. Scale control studies at the Cerro Prieto Geothermal Plant [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 14 Part II: 1603-1610

Jaimes-Maldonado J C, Cornejo-Castro S. 2006. Case study: Underbalanced or mud drilling fluids at Tres Virgenes Geothermal Field [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 30: 265-270

Koons P E, Free D L, Frederick A F. 1993. New design guidelines for geothermal cement slurries [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 17: 43-51

Lazzarotto A, Sabatelli F. 2005. Technological developments in deep drilling in the Larderello area [J]. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, 2005: 2513-2518

Li Zuo-hui. 2004. Study on expandable tubular technology-key points and first application [J]. *Oil drilling & production technology*, 26(3): 17-19 (in Chinese with English abstract)

Mansure A J. 2002. Polyurethane grouting geothermal lost circulation zones [C]. IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas. The United States of America: 2002: 1-11

Nelson E B, Eilers L H, Spangle L B. 1981. Evaluation and development of cement systems for geothermal wells [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas. The United States of America: 1981: 1-13

Ocampo-Díaz J, Rojas-Bribiesca M. 2004. Production problems review of Las Tres Virgenes geothermal field, Mexico [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 28: 499-502

Polsky Y, Mansure A J, Blankenship D, Swanson R J, Capuano L E Jr. 2009. Enhanced Geothermal Systems (EGS) well construction technology evaluation synopsis [J]. *Proceedings: Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 34: 224-234

Saito S, Sakuma S. 2000. Frontier geothermal drilling operations successful at 500°C BHST [J]. *SPE Drilling & Completion*, 15(3): 152-161

Spielman P, Hernandez R, Nguyen H. 2006. Reverse circulation of foamed cement in geothermal wells [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 30: 303-308

Tessari R M, Warren T. 2003. Casing drilling reduces lost circulation problems [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 27: 189-195

Tubbs D M, Wallace J. 2006. Slimming the wellbore design enhances drilling economics in Field development [C]. SPE Annual Conference

- and Exhibition, San Antonio, Texas. The United States: 2006: 1-6
- Wu Ye, Lu Yu-bei, Chen Ying. 2013. Research on the air drilling test in the Tengchong volcano-geothermal-tectonic zone [J]. *Geology and Exploration*, 49(3): 0528-0533 (in Chinese with English abstract)
- Yi Ming, Chen Ruo-ming, Yang Gang. 2010. Technical research of Managed Pressure Drilling [J]. *Xinjiang Oil&Gas*, 6(4): 32-37, 51 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Ke-yan, Dong Ying. 2013. Geothermal development comparison between China and the world [A]. Zheng Ke-yan, Duo Ji, Tian Ting-shan, Pang Zhong-he. *Exploration and development of high temperature geothermal in China-Symposium on high temperature geothermal resources in GanZi state, Sichuan province* [C]. Beijing: Geological Publishing House: 37-41 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Shu-sheng. 2012. Air foam drilling technology of geothermal well in Kenya [J]. *Geothermal energy*, (5): 23-25 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Xiu-hua, Hu Mao-yan. 1992. Technological development of air drilling in China: A general survey [J]. *Geology and Exploration*, 28(1): 59-61 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Xiu-hua, Ye Yu-hong, Bai Zhan-xue, Liu Hai-yang, Feng Jian-yue, Duan Chen-yang, Yan Fu-chang, Sui Xin-yan. 2013. Balanced-Drilling and its application on the drilling ZK212 high temperature geothermal well of Yangyi in Tibet [A]. Zheng Ke-yan, Duo Ji, Tian Ting-shan, Pang Zhong-he. *Exploration and development of high temperature geothermal in China-Symposium on high temperature geothermal resources in GanZi state, Sichuan province* [C]. Beijing: Geological Publishing House: 159-167 (in Chinese with English abstract)
- Zeldin A N, Kukacka K E, Carciello N. 1980. Polymer cement geothermal well-completion materials, final report [R]. BNL 51287, Upton, New York; Brookhaven National Laboratory: 1-79
- Zilch H E, Otto M J, Pye D S. 1991. The evolution of geothermal drilling fluid in the Imperial Valley [C]. SPE Western Regional Meeting, Long Beach, California. The United States of America: 347-360
- [附中文参考文献]
- L.E.卡帕诺. 1981. 地热钻探常用技术(上) [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, (4): 56-58
- 多吉. 2013. 我国地热资源开发利用战略研究 [A]. 郑克棧, 多吉, 田廷山, 庞忠何. *中国高温地热勘查开发-四川省甘孜族自治州高温地热资源专题研讨会论文集* [C]. 北京: 地质出版社: 33-35
- 李作会. 2004. 膨胀管关键技术研究及首次应用 [J]. *石油钻采工艺*, 26(3): 17-19
- 吴焯, 卢若北, 陈莹. 2013. 腾冲火山地热构造带空气钻探试验研究 [J]. *地质与勘探*, 49(3): 0528-0533
- 伊明, 陈若铭, 杨刚. 2010. 控压钻井技术研究 [J]. *新疆石油天然气*, 6(4): 32-37, 51
- 郑克棧, 董颖. 2013. 中国地热开发与世界的对比 [A]. 郑克棧, 多吉, 田廷山, 庞忠何. *中国高温地热勘查开发-四川省甘孜族自治州高温地热资源专题研讨会论文集* [C]. 北京: 地质出版社: 37-41
- 郑术生. 2012. 肯尼亚地热井空气泡沫钻井技术 [J]. *地热能*, (5): 23-25
- 郑秀华, 胡茂焱. 1992. 我国空气钻进技术发展概况 [J]. *地质与勘探*, 28(1): 59-61
- 郑秀华, 叶宏宇, 白占学, 刘海洋, 冯建月, 段晨阳, 严付长, 隋欣彦. 2013. 平衡钻井及其在西藏羊易高温地热深井钻进中的应用 [A]. 郑克棧, 多吉, 田廷山, 庞忠何. *中国高温地热勘查开发-四川省甘孜族自治州高温地热资源专题研讨会论文集* [C]. 北京: 地质出版社: 159-167

Best Practices for High-Temperature Geothermal Drilling

LI Ya-chen, DUAN Chen-yang, ZHENG Xiu-hua

(China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083)

Abstract: Geothermal drilling is crucial to geothermal development. The cost is high and the risk is big in for high-temperature geothermal drilling. The European Union published "BEST PRACTICE HANDBOOK for the development of unconventional Geothermal Resources with a focus on ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM" in 2008, and Sandia National Laboratories published the "Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling" in 2010. Referring to these two handbooks and some primary high temperature geothermal drilling practices, this paper analyzes the characteristics and main potential problems of high temperature geothermal drilling, and introduces its mature drilling technology and some prospective technologies, as well as the best practices of drilling in for different formation conditions (e.g. volcanic, metamorphic, granite), which can be used as a technical reference. It may be good value for high-temperature drilling of geothermal wells in China.

Key words: high temperature geothermal, drilling technology, best practices