

雄安牛驼镇地热田岩溶热储层地热深井 井身结构优化设计

潘德元¹, 何计彬¹, 杨涛¹, 张振发²

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051;

2. 中煤地华盛水文地质勘察有限公司, 河北邯郸 056004)

摘要: 雄安新区牛驼镇地热田主要储层为岩溶热储型, 地层破碎、裂隙发育, 钻进时多失返性漏失。以往的开发主要集中在1800 m以浅, 岩溶热储段长为300~500 m, 裸眼段较短, 钻进施工较简单。为了加强对深部地热资源的探测, 满足雄安新区规划建设的需求, 开展了深部地热资源调查工作, 主要目的层为雾迷山组和高于庄组, 其存在的难点主要有岩溶热储层裸眼段长、地层破碎、长段漏失、上部地层稳定性差等。本文对地热深井施工过程中钻遇的问题及难点进行了深入的分析, 从一开下深、井径级配等方面提出了优化建议, 并总结了施工关键技术, 以提高地热深井的安全稳定性。

关键词: 地热井; 井身结构; 优化设计; 碳酸盐热储; 牛驼镇地热田

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)02-0078-07

Optimization design of the geothermal wellbore structure in karst reservoir

PAN Deyuan¹, HE Jibin¹, YANG Tao¹, ZHANG Zhenfa²

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding Hebei 071051, China;

2. China Coalfield Huasheng Hydrogeological Investigation Corporation Ltd., Handan Hebei 056004, China)

Abstract: The main geothermal reservoir is of a thermal karst type in the Niutuo geothermal field in Xiongan New District. In the past, the development was concentrated mainly at the depth less than 1800m, where the length of karst reservoir is 300 to 500m with short open hole section, hence simple drilling. In order to strengthen the exploration of deep geothermal resources and satisfy the needs of the planning and construction of Xiongan New District, investigation of deep geothermal resources was carried out with Wumishan Formation and Gaoyuzhuang Formation as the main targets. The main difficulties included the long open-hole section in the Karst Reservoir, broken formation, circulation loss over long well sections, poor stability of the upper strata. With analysis of drilling problems and difficulties encountered in drilling of the deep thermal exploration wells, the optimization suggestions are put forward for design of the well structure, and the key techniques for drilling in the karst thermal reservoir are summarized so as to effectively improve the safety and stability.

Key words: geothermal well; well structure; optimization design; carbonate reservoir; Niutuo geothermal field

雄安新区雄县牛驼镇地热田地热资源丰富, 已有多多个单位开展了地热资源勘查、开发研究等工作, 并取得了显著的成果, 打造了著名的“雄县模式”。

但是这些热储开发利用主要集中在深度1800 m以浅的蓟县系岩溶热储层^[1-3]。岩溶热储段长300~500 m, 裸眼段较短, 以满足地热开采为主要目的。

收稿日期: 2020-06-05; **修回日期:** 2020-10-21 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.02.011

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质调查标准化与标准制修订”(编号:DD20190471)、“雄安新区地热清洁能源调查评价(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心)”(编号:DD20189113)

作者简介: 潘德元, 男, 汉族, 1982年生, 硕士, 主要从事地热钻探方面研究工作, 河北省保定市七一中路1305号, pandyice@163.com。

引用格式: 潘德元, 何计彬, 杨涛, 等. 雄安牛驼镇地热田岩溶热储层地热深井井身结构优化设计[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 78-84.

PAN Deyuan, HE Jibin, YANG Tao, et al. Optimization design of the geothermal wellbore structure in karst reservoir[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 78-84.

通过相关调查资料显示,我国在一些采用热储集中供暖区域,主力热储层形成水位降落漏斗,热储压力下降形势严峻^[4],而根据近年来在雄安新区开展的相关地热资源调查工作,其主力热储层的热储压力下降比较明显。减少浅层热储集中开采,通过深浅多储层联动开采回灌,可缓解浅层热储开采造成的环境影响,确保可持续发展。

中国地质调查局实施的雄安新区地热清洁能源勘查以中深部碳酸盐岩溶热储为目标,重点查明蓟县系雾迷山组和高于庄组碳酸盐岩热储的地质结构和空间分布,根据目的层埋深分布情况,井深设计主要是 2500~4000 m,在基岩热储中钻进长度达 1500 m 以上,地层裂隙发育,漏失严重,井壁稳定性差,钻进施工难度大,井下复杂情况多发。

本文对雄安新区某岩溶热储地热深井施工中钻遇的难点进行分析总结,提出井身结构优化建议。

1 牛驼镇地热田地层概况

牛驼镇地热田位于华北盆地内的冀中凹陷的

北部,区域内新生界随突起和凹陷的分布呈披盖式沉积,第四系松散层和上第三系砂岩、砾岩和泥岩近乎水平,下第三系砂岩、砾岩和泥岩倾角平缓。下伏地层为白垩系、侏罗系、二叠系、石炭系、奥陶系、寒武系、青白口系、蓟县系和长城系,以及太古宇变质岩。

雄县大部分范围属于牛驼镇凸起西南部,热储类型主要是新近系砂岩孔隙热储和蓟县系岩溶裂隙热储。(1)新近系热储层埋藏浅,分布范围较小、水温较低、水量较小,且砂岩热储不利于回灌,目前主要用于温泉浴疗。(2)蓟县系雾迷山组热储层分布广、埋藏较浅易开采、温度高、储量大、易回灌,是当前雄县地热供暖利用的主力热储层,且雾迷山组厚度大,当前的开发利用主要集中于上段地层中。(3)蓟县系高于庄组热储层埋藏于雾迷山组之下,埋藏较深,目前开发利用较少,有可能成为未来地热开发的第二空间。图 1 为前辈学者建立的牛驼镇地热系统热储概念模型^[1-3],较明确地划分了牛驼镇的热储深部分布情况。牛驼镇地热田地层岩性如表 1 所示。

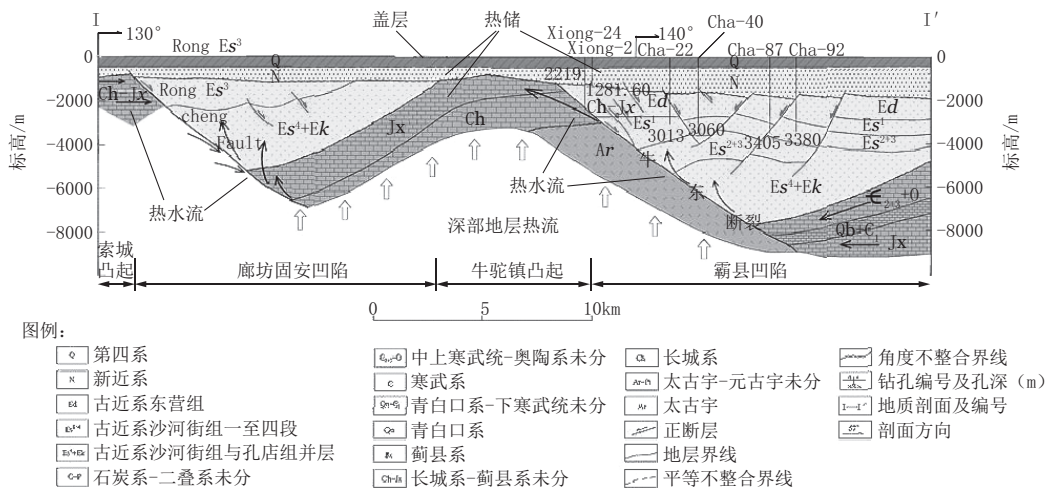


图 1 牛驼镇地热系统热储概念模型

Fig.1 Conceptual model of thermal storage in the Niutuo geothermal system

受地质构造影响,该区域内地层及厚度变化较大。全区分布有第四系、明化镇组、雾迷山组和高于庄组,其他地层局部分布。第四系粘土、砂质粘土和明化镇组胶结不完全的砂泥岩较松散易垮塌,白云岩地层裂隙发育,尤其在雾迷山组顶部风化壳段地层破碎、漏失严重,是钻井工程的重点和难点。

2 地热井井身结构设计方法

2.1 地热井井身结构特点

由于地热钻探发展较晚,尚未形成比较完整的设计体系,且地热井深度与石油钻井相比较浅,钻遇地层年代较老^[5-6],地层压力变化较小,井身结构设计时考虑的地层压力参数较少,设计较为简单。

表1 雄县区域牛驼镇地热田地层岩性^[1-3]

Table 1 Stratigraphy in the Niutuo geothermal field

地层代号		厚度/m	岩性简述
组	代号		
平原组	Q	250~450	灰、灰黄、棕黄、棕红色粘土、亚粘土与灰黄、灰绿色细砂、粉砂组成,呈不等厚互层,结构松散
明化镇组	Nm	400~600	浅紫红、紫红、棕红、棕褐色泥岩、砂质泥岩与灰绿、浅灰、灰黄色细砂岩、粉砂岩、中细砂岩、粉砂岩不等厚互层,泥质胶结,疏松
馆陶组	Ng	0~500	杂色砂岩、泥岩交互沉积,底部发育砾岩
东营组	Ed	0~200	紫红色泥岩,浅灰、灰绿、棕红色泥岩,灰绿色泥岩与浅灰色含砂砾岩
孔店组	Ek	0~200	棕红色砂岩、泥岩交互沉积,底部发育砾岩
雾迷山组	Jxw	1000~1600	灰、灰褐色含燧石条带白云岩和泥质白云岩
杨庄组	Jxy	50~100	紫红色含粉砂质泥晶白云岩、白云岩、燧石白云岩、白云质灰岩及沥青白云岩
高于庄组	Jxg	200~2000	灰色中至厚层白云岩为主,夹少量灰质砂岩、粘土质白云岩

注:为部分区域地层分布情况。

常规地热井设计中主要考虑地热资源的开采效率,在井身结构设计中一般将一开作为泵室段用于地热资源开采,终孔为热储目的层段,以及中间过渡井段。中间过渡井段开次设计依据地层稳定性及钻探经济性进行综合考虑,套管程序选择需要留有余地,以保证完成钻探目的。

2.2 常用地热井井身结构

根据相关地热井钻探规范及调研资料,地热井井身结构采用的井径/套管规格主要为一开 $\Phi 444.5$ mm/ $\Phi 339.7$ mm+二开 $\Phi 311.2$ mm/ $\Phi 244.5$ mm+三开 $\Phi 215.9$ mm/ $\Phi 177.8$ mm+四开 $\Phi 152.4$ mm/ $\Phi 127$ mm。各开次套管与前一开次套管底重叠30~50 m。各开次井段、成井工艺设计需要依据热储层岩石物性、钻遇地层稳定性等情况,各开次套管重叠段一般采用水泥、止水橡胶等工艺止水^[7-14]。

浅层砂岩热储由于埋藏浅,储层胶结较松散,通常采用水文水井成井方式,对热储段进行填砾成井工艺,热储段与泵室段套管跨级配合,增大储层环空间隙,方便填砾作业。较深的砂岩地热井地层较稳定,且填砾难度大,通常使用过滤器或缠丝包网滤水管等成井工艺。在确保泵室段内径后,下部井段选择余地较大,可采用常规井径级配或非常规级配,保障井下安全及热储流量。

深部热储层通常为基岩热储,热储稳定,一般采用裸眼或滤水管完井,根据钻遇地层复杂情况,采用三开或四开井身结构。

根据相关资料显示以及以往施工经验,地热井成井最小井径 ≤ 152.4 mm,泵室段套管外径通常不

大于339.7 mm,可有效保障钻探施工顺利。

2.3 牛驼镇地热田常用井身结构

根据地质调查资料显示,雄县牛驼镇地热田基岩地热井分为开采井和回灌井,主要目的层位为蓟县系雾迷山组上部地层。通常采用三段式设计,一开采用 $\Phi 444.5$ mm井眼,下入 $\Phi 339.7$ mm套管,钻进深度通常为300~400 m,封固上部松散地层,并形成泵室段;二开采用 $\Phi 311.2$ mm井眼,下入 $\Phi 244.5$ mm套管,设计钻至雾迷山组顶部完成二开井段,封隔上部地层及含水层,通常井深为800~1200 m;三开采用 $\Phi 215.9$ mm井眼,钻至设计井深完钻,通常选择裸眼成井,井深1500~1800 m,雾迷山组井段长400~700 m(部分为定向井)^[10],如图2所示。

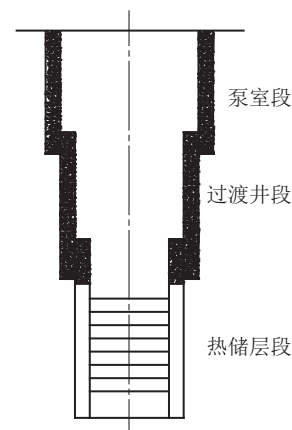


图2 地热井井身结构示意图

Fig.2 The wellbore structure

该种井身结构设计简单,目的明确,一开井段用于封固上部第四系和明化镇组上部松散地层,并形成泵室段,其井深通常根据地层胶结强度及泵室段要求确定;二开通常钻至基岩热储顶部完钻,其目的是封隔上部地层水;三开井段为基岩热储目的层,用于地热水的开采或回灌。

但是由于地热井在设计过程中缺少准确地层压力参数,设计理论依据不足,如一开设计井深通常依靠该区域常用深度设计,有时未完全封隔松散层,在二开底部揭开目的热储层风化壳时发生严重漏失,井筒压力发生变化导致二开上部地层发生掉块垮塌等复杂情况^[10]。

3 地热勘探深井

中国地质调查局实施的雄安新区地热清洁能源勘查以中深部碳酸盐岩溶热储为目标,重点查明蓟县系雾迷山组和高于庄组碳酸盐岩热储的地质

结构和空间分布,根据目的层埋深分布情况,井深设计主要是2500~4000 m。

3.1 地热勘探深井井身结构设计思路

地调局部署的某地热勘探深井设计主要依据项目任务目标及钻遇地层预测,一开主要是封隔上部第四系和明化镇组上部较松散地层,并形成泵室段,二开选择地层较稳定井段,钻至雾迷山组顶部完钻,三开依据项目目标钻至杨庄完钻,雾迷山组热储层单独作为一开,四开为高于庄组,钻至设计井深完钻。

由于钻遇地层中热储覆盖层压力正常,而基岩热储层裂隙发育,地层压力较低,因此在设计中考虑地层防塌为主,未考虑地层井涌、压差卡钻、井漏等。

表2为该眼井井身结构设计。该井位于牛驼镇凸起中部,为该区域基岩热储埋藏深度最浅区域,埋深为600~800 m,古近系地层基本缺失。

表2 某地热勘探深井井身结构设计

Table 2 Well structure design of a geothermal well

开钻程序	钻进程序		套管程序		备注
	井眼尺寸/mm	完钻深度/m	尺寸/mm	下入井段/m	
一开	444.5	400	339.7	0~400	以本区域常规设计深度
二开	311.1	600	244.5	375~600	进入雾迷山组顶界面
三开	215.9	1850	177.8	575~1850	进入高于庄组顶界面
四开	152.4	2500	127.0	1825~2500	出水段为滤水管,终孔

3.2 地层特点及复杂情况预测

根据牛驼镇地热田的勘查报告及该井的勘探目标任务,在岩溶热储层中钻进井段长度通常达到1800 m以上。

根据已有地热井测井资料显示,雾迷山组上段地层白云岩岩溶裂隙发育段厚度有31%左右^[1-3]。白云岩地层性硬质脆、可钻性差、裂隙发育厚度大,而上部风化壳段极易发生失返性漏失,且雾迷山组上部地层漏失严重,井下钻遇情况复杂,对下部井段施工存在很大的难度。

地热勘探深井的难点主要有:基岩热储段长,持续存在漏失现象,井壁稳定性差等。因此需要合理的设计井身结构,优选钻进工艺,保障井下施工安全。

3.3 施工概况

该井一开采用 $\varnothing 444.5$ mm钻头开钻,钻至设计井深400 m完钻,进入明化镇组砂泥岩地层,下入 \varnothing

339.7 mm套管,固井水泥浆返出地面。

二开井径311.2 mm,钻至井深621.43 m发生失返性漏失,现场根据岩屑判断揭开雾迷山组,决定二开完钻,下入 $\varnothing 244.5$ mm套管全井段固井。

三开井径215.9 mm,钻遇地层为蓟县系白云岩地层,钻进过程中全程失返,采用清水顶漏钻进,未能通过岩屑判断地层,钻至井深1900 m完钻,下入 $\varnothing 177.8$ mm套管“穿鞋带帽”固井。

四开井径152.4 mm,轻微漏失,采用随钻堵漏后钻井液循环正常,钻至2510 m全井完钻。

由于该井在设计中取心回次较多,且处理复杂情况耗费过多时间,于2018年8月份开钻,至2019年3月份完钻,本井钻进周期超过了200天。

3.4 二开井壁失稳情况

本井二开揭开雾迷山组风化壳段后,于井深621.43 m处发生失返性漏失,钻井液只进不出,井

筒内液面下降至120 m左右,导致地层压力不平衡,井内液柱压力低于地层坍塌压力,上部松散地层发生坍塌,钻具上提遇阻,采用倒划眼方式起钻。

由于井壁坍塌物落入井底形成堵塞,井底漏失速度降低,井内可建立循环。现场在钻井液中加入护壁堵漏材料扫孔至井深619 m处,然后对井底进行承压堵漏,确保井内安全后进行测井。

井径曲线见图3,二开井壁坍塌失稳主要发生在400~480 m井段,井径最大达450 mm左右,扩大率达到44.6%,主要是由于该段井筒内液柱压力低于地层坍塌压力,导致松散地层坍塌。现场根据井下情况及时处理,避免了复杂情况进一步恶化。

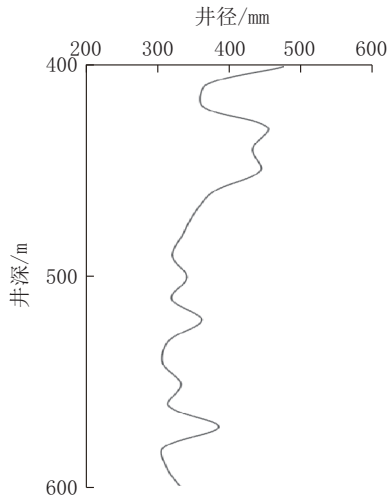


图3 二开井段井径曲线

Fig.3 Caliper logging curve of the second drilling section

3.5 三开复杂情况

三开钻进在出套管20余米后钻井液再次失返,尝试采用水泥浆水玻璃等材料堵漏,下钻未探到塞面,考虑到该地层为持续漏失段,即使继续注入堵漏材料完成堵漏后,钻开新井眼将继续漏失,现场决定采用清水顶漏钻进,将岩屑携带入地层裂隙中。

清水顶漏钻至井深755.61~772.87 m处发现转盘憋车,扭矩增大,上提钻具阻力增大,活动钻具后阻力减小,转盘扭矩恢复正常,继续钻进后再次异常,且上提钻具后下钻遇阻。

现场判断为上部破碎地层掉块引起的卡阻现象,主要原因是雾迷山组上段地层裂隙发育、稳定性差,钻开地层后由于清水的冲刷及钻具旋转的扰动,引起井壁失稳,继而发生掉块。

现场多次注入水泥及复合堵漏材料(稻壳、贝壳、锯末、棉籽壳等),由于地层漏失严重,堵漏效果不明显,但是井壁稳定性有所加强,掉块现象引起的憋、卡现象减少。

由于前期地层掉块及岩屑等沉淀在井底,下钻探得沉淀厚度达40~50 m,钻井液失返,无法依靠钻井液循环将井底沉淀携带出井口,且掉块及岩屑粒径颗粒较大,无法排入地层裂隙中,导致钻进困难。

现场采用一根 $\varnothing 177.8$ mm套管加工成捞砂筒,通过反复连续不间断的捞砂工作,共捞取29筒,清理干净井底。处理该复杂情况耗时约50天,导致钻进工期延长。如图4所示,井底打捞的井壁掉块粒径达3~5 cm。

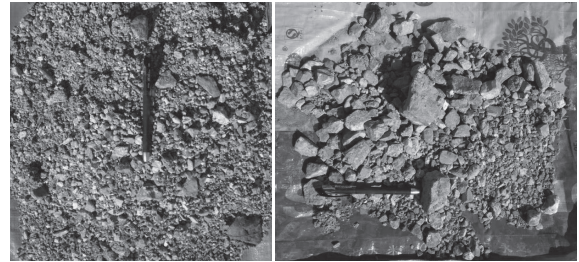


图4 打捞出的井壁掉块

Fig.4 Falling stones fished out

在下部井段钻进过程中,采用低参数钻进,减少钻进过程中对井壁的扰动,同时减少钻头碎岩产生的岩屑粒径。在井底沉砂逐渐增多后,通过注入稠泥浆携带岩屑至裂隙发育段进入地层。

三开井段由于清水钻进,没有护壁效果,井壁稳定性差,井下风险较大。井径曲线如图5所示。在620~780 m井段及下部部分井段,井壁掉块极为严重,导致钻进难度大,耗费时间较长。随着井深加大,地层中泥质含量增加,下部地层稳定性逐渐增强,在井深1200 m以下已经基本稳定。因此,雾迷山组上段地层是地热勘探并在钻进过程中需要重点关注的节点。

4 井身结构优化方案

在石油钻探中,井身结构设计需要在有效保护目的层的前提下最大限度地保证裸眼井段的安全钻进。需要依据地层特性剖面、地层孔隙压力剖面、地层破裂压力剖面、地区井身结构设计系数以及已有钻井等资料,根据裸眼井段防井涌、压差卡

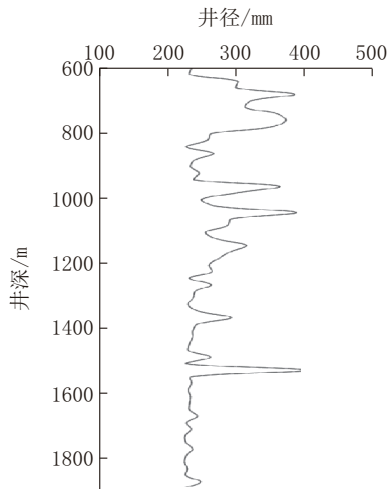


图5 三开井段井径曲线

Fig.5 Caliper logging curve of the third drilling section

钻、防漏、防坍塌等力学平衡关系进行设计,避免钻进过程中发生漏、喷、塌、卡事故,确保钻井施工安全,顺利钻达目的层^[6-8]。

通过对雄安新区部署的中深地热井施工以及已有地热开采回灌井调查情况分析,部分区域雾迷山组上段地层岩性破碎、漏失严重。存在失返性漏失现象的地热井有1/4~1/3,常规地热井只需采用顶漏钻进工艺完成储层井段,达到地热资源开采或回灌需求即可完成任务要求。但是深部地热井则需对漏失层进行处理,因此需要对井身结构进行优化。

4.1 一开井身优化方案

地层坍塌压力是衡量钻井过程中是否井壁稳定的钻井液液柱压力值,对钻井结构设计、钻井液参数设计以及钻进施工具有重要的指导意义。

由于地热井在设计过程中缺少准确地层压力参数,设计中理论依据不足,在一开设计井深通常依靠该区域常用深度设计,有时未完全封隔松散层,而在二开底部揭开目的热储层风化壳时发生严重漏失,井内钻井液无法平衡地层压力,易形成上塌下漏的复杂情况,严重时导致井眼垮塌。因此对第四系和明化镇组的地层坍塌压力进行计算,找准一开井段的必封点是十分必要的。

根据岩石力学分析,当井壁围岩受到的剪切应力超过抗剪强度时,将形成剪切破坏,极限平衡状态下井壁受到的液柱压力即为地层坍塌压力,在未发生渗流作用时,直井可采用Mohr-Coulomb准则,对井壁坍塌压力进行计算^[15-17]。

由于在地热井钻探中对地层各项参数准确获取未得到重视,对第四系和明化镇砂岩的各项岩石力学参数未进行测试,根据一些学者对临近区域相似地层的正常孔隙压力作用下井壁坍塌压力研究^[15],未发生渗流时地层坍塌压力钻井液当量密度为0.9~1.10 g/cm³。由于砂岩地层砂岩的弹性模量和泊松比为0.25 GPa和0.31^[17],为松软岩石,且砂层含有地下水渗流,因此按地层坍塌压力取当量密度0.9 g/cm³计算。

根据牛驼镇地热田地层调查及施工情况,部分区块揭开雾迷山组地层发生失返性漏失,井内液面通常下降至地面以下120 m左右,井内钻井液密度取1.15 g/cm³,计算得一开下深最少要到550 m。因此在井身结构设计时需要充分收集邻井的资料,在易发生失返漏失区域合理设计一开井身结构。

4.2 井径级配的优化方案

地热井中井眼与套管尺寸之间间隙选择采用常规级配方式,由于中深地热井地层不确定性大,需要多次变径,但是为保障热储开发,热储目的层井径宜大不宜小。

综合考虑各项因素,针对雄县牛驼镇地热田中深地热井提出以下井身结构优化方案:

一开 $\varnothing 444.5$ mm井径($\varnothing 339.7$ mm套管泵室段)+二开 $\varnothing 311.2$ mm井径($\varnothing 273.1$ mm套管)+三开 $\varnothing 241.3$ mm井径($\varnothing 193.7$ mm套管,雾迷山组中段中完)+四开 $\varnothing 165.1$ mm井径终孔。该种方案增加了三、四开热储段井径,有利于地热资源的开采与回灌,相关套管市场也很成熟^[17]。

5 结论及建议

(1)由于牛驼镇地热田雾迷山组岩溶热储裂隙发育,地层压力低,在揭开该层热储时普遍发生漏失,对上部松散地层稳定性产生较大影响,因此在地热井一开及泵室段设计时需充分考虑地层稳定性因素,计算其必封点,保障井下安全。结合该井测井曲线,建议对风化壳严重漏失区域一开深度达到500 m以深。

(2)进入雾迷山组时,由于风化壳地层破碎严重,对下部井段施工会产生很大的影响,建议在上部地层稳定无坍塌风险的情况下钻至稳定基岩。

(3)进入失返性地层后,堵漏难度极大,采用欠平衡钻进时可能会加剧井壁失稳,建议顶漏钻进至

地层趋于稳定时,及时下入套管封隔该段地层,采用合理的固井方式,以方便下部井段继续钻进施工,在本井施工中可将三开井深调整至1400~1500 m。

(4)针对失返地层顶漏钻进产生的井底沉渣,应采取稠浆顶替、打捞等工艺及时处理。

(5)地热井常规井径级配在深井中应用受到较大限制,上部井筒钻井液上返速度低,不利于正常钻进,同时终孔井径对地热资源开采存在一定影响,建议采用优化井径的井身结构。

参考文献(References):

- [1] 吴爱民,马峰,王贵玲,等.雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J].地球学报,2018,39(5):523-532.
WU Aimin, MA Feng, WANG Guiling, et al. A study of deep seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan new area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018,39(5):523-532.
- [2] 郭世炎,李小军.河北保定容城凸起地热田储层属性与资源潜力[J].地质科学,2013,48(3):922-931.
GUO Shiyang, LI Xiaojun. Reservoir stratum characteristics and geothermal resources potential of Rongcheng uplift geothermal field in Baoding, Hebei[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(3):922-931.
- [3] 牛树银,孙爱群,李红阳.华北地区地热特征及其成因机制[J].地学前缘,2001,8(1):112.
NIU Shuyin, SUN Aiqun, LI Hongyang. The characteristics of the geothermal field and formation mechanism in the north China[J]. Earth Science Frontiers, 2001,8(1):112.
- [4] 刘杰,宋美钰,于彦,等.天津市地热资源可持续利用管理模型研究[J].地质调查与研究,2017(4):315-320.
LIU Jie, SONG Meiyu, YU Yan, et al. Study on management model of sustainable utilization for geothermal resources in Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 2017(4):315-320.
- [5] 管志川,李春山,周广陈,等.深井和超深井钻井井身结构设计方法[J].石油大学学报(自然科学版),2001,25(6):42-44.
GUAN Zhichuan, LI Chunshan, ZHOU Guangchen, et al. A method for designing casing program in deep and super deep wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2001,25(6):42-44.
- [6] 管志川,邹德永.深井、超深井套管与钻头系列分析研究[J].石油钻探技术,2000,28(1):14-16.
GUAN Zhichuan, ZOU Deyong. Analytical research on casing and bit series in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000,28(1):14-16.
- [7] 胡郁乐,张慧.深部地热钻井与成井技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2013:78-80.
HU Yule, ZHANG Hui. Drilling and completion technology of deep geothermal well[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013:78-80.
- [8] 曹继飞,赵洪山,余广兴,等.土耳其高温地热钻井关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):34-36.
CAO Jifei, ZHAO Hongshan, YU Guangxing, et al. Key technology for high temperature geothermal drilling in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(9):34-36.
- [9] 王金磊,段云星,戴成林.干热岩地热井井身结构调研[J].新疆石油科技,2015,25(3):1-7.
WANG Jinlei, DUAN Yunxing, DAI Chenglin. Investigation on borehole structure of dry hot rock geothermal well[J]. Xinjiang Petroleum Science and Technology, 2015,25(3):1-7.
- [10] 许建民,关彪.河北雄县地热井施工工艺浅析[J].建筑施工,2016(1):285.
XU Jianmin, GUAN Biao. Construction technology of geothermal well in Xiongxian county, Hebei[J]. Building construction, 2016(1):285.
- [11] 和国磊,宋志彬,胡志兴,等.东丽湖地热钻探CGSD01井钻完井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):7-13.
HE Guolei, SONG Zhibin, HU Zhixing, et al. Summary of drilling and completion technology for Well CGSD01 in Dongli Lake geothermal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):7-13.
- [12] 宋继伟.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.
SONG Jiwei. Drilling technology of deep geothermal wells for complex strata in Guizhou province[J]. Geology and Exploration, 2018,54(5):1024-1037.
- [13] 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.
MA Xiaodong. Efficient exploration and drilling of sandstone-pore type geothermal resources[J]. Geology and Exploration, 2020,56(1):173-181.
- [14] 刘福东,鞠照亮,李子杲,等.地热井成井井身结构优化技术[J].河北地质,2012(4):39-41.
LIU Fudong, JU Zhaoliang, LI Zigao, et al. Optimization technology of well bore structure in geothermal well[J]. Hebei Geology, 2012(4):39-41.
- [15] 李劲松,翁昊阳,段飞飞,等.钻井液类型对井壁稳定的影响实例与防塌机理分析[J].科学技术与工程,2019,19(26):161-167.
LI Jinsong, WENG Haoyang, DUAN Feifei, et al. Cases of the influence of drilling fluid type on borehole stability and analysis of anti-collapse mechanism[J]. Science Technology and Engineering, 2019,19(26):161-167.
- [16] 邓金根,张洪生.钻井工程中井壁失稳的力学机理[M].北京:石油工业出版社,1998:21.
DENG Jingen, ZHANG Hongsheng. Mechanical mechanism of wellbore instability in drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998:21.
- [17] 李治衡,刘海龙,虞海洋,等.渤海浅部砂泥岩地层井壁蠕变缩径研究[J].石油机械,2019,47(12):44-49.
LI Zhiheng, LIU Hailong, TUO Haiyang, et al. Study on creep and shrinkage of borehole in shallow sandstone and mudstone formation in the Bohai Sea[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(12):44-49.

(编辑 荐华)