

韩城地区中深层钻井取热供暖关键技术

俱养社, 张玉贵*

(陕西省一三一煤田地质有限公司, 陕西 韩城 715400)

摘要: 地热井钻取优质的地热水是采灌型地热能供暖系统的前提条件, 是影响整个水热型地热能项目经济效益的最敏感因素, 而钻井关键技术对地热井的成井质量具有重要意义, 对地区地热产业的发展有着举足轻重的作用。根据韩城地区地热资源赋存的地质特征及开发过程中遇到的难点, 在理论分析和试验研究的基础上, 研究了韩城地区地热钻井施工的关键技术问题, 提出韩城地区地热钻井取热供暖五大关键技术问题: 防塌高效钻井技术, 地热井止水工艺, 酸化增产增灌处理措施, 原位采灌工程优化布置, 梯级换热与回灌技术。通过对生产过程中遇到的技术难题进行理论分析, 提出解决问题的关键技术, 对五大关键技术进行了逐一阐述。这些关键技术对于韩城地区开发利用中深层地热资源具有重要的科学与工程意义, 也可为其它地区提供借鉴。

关键词: 韩城地区; 中深层钻井; 采灌型地热供暖; 止水工艺; 酸化增产增灌; 原位采灌

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)12-0079-07

Key technology for mid-deep drilling geothermal heat extraction in the Hancheng area

JU Yangshe, ZHANG Yugui*

(Shaanxi 131 Coal Coalfield Geology Co. Ltd, Hancheng Shaanxi 715400, China)

Abstract: Extraction of high-quality geothermal water with geothermal wells is a prerequisite for the extraction-reinjection geothermal heating system, and it is the most sensitive factor affecting the economic benefits of the entire hydrothermal geothermal energy project. The key drilling technology is of great significance to the well completion quality, and plays a decisive role in the development of the geothermal industry of Hancheng. In view of the geological characteristics of geothermal resources in the Hancheng area and the difficulties encountered in the development process, theoretical analysis and experimental research was conducted to investigate the key technical issues in geothermal drilling in the Hancheng with the five key technical aspects presented of local geothermal drilling heating extraction in Hancheng: anti-collapse and high-efficiency drilling, geothermal well sealing, acidization stimulation for productivity and reinjection improvement, in-situ extraction and reinjection optimization layout, cascade heat exchange and recharge. Through theoretical analysis of the technical problems encountered in the production process, the key technologies to solve the problems are proposed, and the five key aspects are explained in detail. They are of important scientific and engineering significance to the development and utilization of mid-deep geothermal resources in the Hancheng area, and can provide reference to other regions.

Key words: Hancheng area; mid-deep drilling; heating; sealing technology for geothermal well; acidization for production and reinjection improvement; in-situ extraction and reinjection

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-11-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.12.012

作者简介: 俱养社, 男, 汉族, 1967年生, 党委书记, 高级工程师, 探矿工程专业, 长期从事煤田钻探、地热钻探生产和技术研究工作, 陕西省韩城市象山山路, 463261804@qq.com。

通信作者: 张玉贵, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 资源勘查工程专业, 长期从事地质、地热技术研究工作, 陕西省韩城市象山山路, 463261804@qq.com。

引用格式: 俱养社, 张玉贵. 韩城地区中深层钻井取热供暖关键技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 79-85.

JU Yangshe, ZHANG Yugui. Key technology for mid-deep drilling geothermal heat extraction in the Hancheng area[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 79-85.

0 引言

韩城位于陕西省东部黄河西岸,是史学家司马迁的故乡、中国历史文化名城、中国花椒之乡、中国优秀旅游城市、中国西部重要的能源化工基地,陕西省唯一的计划单列试点市,总面积 1621 km²,人口 40 万。城区建筑总面积 1053 万 m²,城区居民居住面积 950 万 m²,城区公共建筑面积 103 万 m²,城区供热总面积 886.15 万 m²,居民居住供热面积 800 万 m²,公共建筑供热面积 86.15 万 m²。建筑物供暖以燃煤锅炉、天然气为主,由于近年来不断进行散煤治理及燃煤锅炉改造,城区供热存在 166.85 万 m² 缺口。随着新建建筑的不断增多及天然气供给短缺,供热缺口将越来越大。

地热能是一种绿色低碳的可再生能源,地热供暖不仅可以减少煤炭消耗,也降低了煤炭燃烧所产生的气体、烟尘对环境的污染,具有良好的社会、经济效益^[1-2]。韩城市碳酸盐岩热储因其出水量大、水温高、易于回灌的特点,成为了重点开发利用目标。通过对中深层(水热型)地热资源进行估算,碳酸盐岩岩溶裂隙类地热资源总量为 18.76×10^{18} J,相当于 6.40×10^8 t 标准煤。资源潜力巨大,具备发展水热型地热能的资源优势和基础^[3]。

地热井钻取优质的地热水是采灌型地热能供暖系统的前提条件,由于韩城市地热井施工深度大,工艺复杂,投资大,风险也高^[4-6]。钻井费用占整个采灌型地热开发项目投资总费用的 70% 以上,是影响整个水热型地热能项目经济效益的最敏感因素,而钻井关键技术对地热井的成井质量具有重要意义,对韩城地区地热产业的发展有着举足轻重的作用。

1 中深层钻井难点

韩城地区地层、构造条件复杂,施工中深层地热井难度较大,主要存在以下难点。

(1) 钻井深度较大,一般为 3000~4000 m,钻井深度的增加,对钻井工艺和设备要求较高。井壁围岩稳定性差,在高温高压且深度较大的岩体中施工,钻进过程中井壁围岩遇水极易产生热破裂及井眼扩大,脱落下来的岩石极易造成卡钻现象^[7]。下技术套管及固井过程中若泥浆性能控制不当,则容易造成卡套管及固井循环不通、套管挤毁断裂等事故。

(2) 韩城地区二开钻遇造浆性能好的孙家沟组棕色泥岩及膏泥岩层,该段泥岩可塑性强,极易吸

水,会产生缩径、阻卡及钻头泥包,影响钻井效率。

(3) 地热井成井交付使用后,需长期进行抽采地下水,因此需选择安全、可靠、稳定的止水工艺进行止水。

(4) 碳酸盐岩含水层具有富水性极不均匀的特点,很难预先查清深部地热储层的富水性和导水性,从而无法保证地热井出水量,采用常规洗井、爆破和常规酸化也影响地热井单井产能及回灌量。

(5) 在城区进行地热井施工,往往受到场地限制,需要高效利用钻井场地,合理布设地热井,在达到热储层最小井间距的前提下,设计最优的井身轨迹,实现原位采灌地热能开发利用系统布置。

2 防塌高效钻井技术

韩城地区孙家沟组上部岩性上段以棕红色—紫红色泥岩夹粉砂岩薄层为主,含钙质结核及石膏条带,下段以黄绿、暗紫色中—细粒砂岩为主,夹暗紫红色砂质泥岩(见图 1);厚度 150~320 m,平均 230 m。该段岩石泥岩单层厚度最大达 93.4 m,由于存在石膏夹层,岩石裂缝较发育,水敏性强,极易吸水膨胀。



图 1 某钻孔红色砂质泥岩岩心照片

Fig.1 Cores from a borehole

在某地热井钻进过程中,钻遇该段地层时,机械钻速由 18~54 m/h 下降至 2.25~9 m/h,出现上提钻具下放遇阻、划眼憋泵现象。更换泥浆后,反复划眼,仍无法遏制井壁坍塌,井壁坍塌范围不断扩大,导致无法继续钻进,最终选择侧钻钻进。针对井壁坍塌事故,通过查阅相关文献分析了影响井壁失稳的主要因素,分析造成井壁坍塌原因,从钻井井身结构及钻井液体系对施工方法进行优化,取得了良好的效果。

2.1 钻井井身结构优化

为防止井壁坍塌造成卡钻、套管粘卡事故,井身结构设计时,对井身结构进行优化(见图2、表1)。

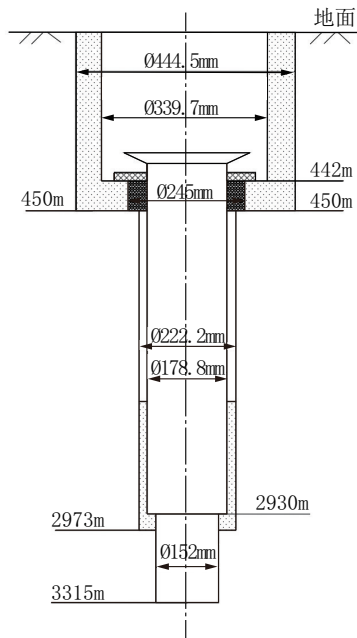


图2 井身结构

Fig.2 Well bore structure

表1 井身结构优化前后对照

Table 1 Comparison of wellbore structures before and after optimization

开钻程序	钻 头			套 管	
	原始直径/mm	优化直径/mm	井深/m	直径/mm	井深/m
一开	444.5	444.5	500	339.7	500
二开	215.9~222.2	241.3	2800	177.8	2915
三开	152.0	152.0	3450		

增大环状空隙,可有效防止因泥岩遇水膨胀或泥饼过厚粘、卡钻事故,防止下套管过程中粘卡套管事故发生,同时满足一开及三开井径要求。采用的钻具组合:Ø241.3 mm 钻头+Ø172 mm 螺杆马达(1.25°)+浮阀+Ø172 mm 定向接头+Ø172 mm 无磁钻铤+127 mm 钻杆,避免钻具连接时出现过多的台阶,降低起下钻摩阻和卡钻风险。同时采用螺杆+钻头进行低钻压、高转速、大泵量钻进,提高钻井效率,减少钻进时间。

2.2 防塌钻井液体系

该段地层水敏性较强,容易造浆,使得井眼内的泥质和固相含量增加,高固相泥浆会使泥饼质量变差,使得钻井液滤失量增加,钻井液滤失量的增加又加速了粘土的水化,从而形成一种水化滤失的恶性循环^[9]。随着滤失量的增加,泥饼不断变厚,造成卡钻事故。因此,在配置钻井液的同时要精确计算钻井液的密度,有效平衡地应力与热应力。严格控制钻井液滤失量,减小液体向井壁岩石的渗透,保证井壁的稳定。

二开施工时,钻遇该地层前,在聚合物泥浆体系下,放掉部分原浆,替入如下钻井液:

原井浆:水(8:2)+1.0%~1.5% G319-FTJ+0.1%~0.2% PHP+0.3%~0.8% GPX+1.5%~3% FRH+2%~3% KHm+2%~0.5% LVCMC0. +0.1%~0.15% NaOH+BaSO₄至合适密度。

随井深增加,逐渐加入 RST 和 HTX,提高钻井液抗高温和抗钙能力。该钻井液体系机理不同于传统的抑制型钻井液,它是依靠有机胺独特的分子结构能使得抑制剂很好地吸附在粘土层间,并使得粘土层紧密结合在一起,降低了粘土吸收水分的趋势,不仅具有更强的抑制水化膨胀分散的能力,更具有成膜作用。为防止钻井液粘度、切力上升较快,应采取多种手段尽可能降低钻屑含量和含砂量,将膨润土含量控制在 30~50 g/L,降低粘度至 40 s 左右再实施加重。实践证明,优化后的钻井液配方具有良好的抗污染能力、抗温能力和良好的流变性。能有效防止井壁坍塌事故。

3 地热井止水工艺

止水工艺是地热井成井必不可少的环节。目前地热井止水所采用的方法主要有3种。第一种是在套管及其交错部位与下端采用止水材料,然后用铁丝进行绑扎,放入到止水层段,材料遇水后将发生膨胀,实现封闭止水,该种止水方法广泛应用于水文水井及煤田水文钻孔施工中。第二种方法是采用封水止水器止水,通过异径止水,在两板间设置硅胶板或者橡胶板,借助其遇水后膨胀的特性,起到封堵、阻隔地层水的作用。该止水装置能从根本上克服传统止水材料局限性,目前已经能广泛用在地热井及水文井的施工中。第三种方法是采用水泥固井进行止水^[10],该止水方法可与其它方法组合使用,对固井

质量要求较高,尤其在多级钻井井身结构中,需严格控制水泥上返高度,水泥上返高度不足时,难以保证悬挂处止水质量,水泥上返较多时,卸压后存在凝固入井管柱串的风险。

在韩城地区某地热井施工时采用“穿鞋戴帽”的止水工艺,即上部 $\text{O}339.7\text{ mm}$ 套管与 $\text{O}177.8\text{ mm}$ 套管连接处(442~450 m)采用膨胀橡胶压缩止水, $\text{O}177.8\text{ mm}$ 技术套管下部采用水泥浆固井止水,水泥浆上返高度在开采段顶部300 m以上,即井深2630~2930 m为水泥固井段。但在地热井开采过程中,由于技术套管上部未进行水泥固井,开采过程中技术套管在高温条件下产生热胀冷缩,套管上行;加之膨胀橡胶在高温条件下老化分解,使得膨胀橡胶止水失效。上部含水层低温地层水涌入井内,给生产带来影响。

对事故原因进行分析后,通过多种处理方案比选,选择利用 $\text{O}177.8\text{ mm}$ 套管上部的正反口丢手接头,加接1根 $\text{O}177.8\text{ mm}$ 套管,套管外部与 $\text{O}339.7\text{ mm}$ 套管的环状间隙用水泥浆封固,进行上部2次止水(见图3),达到止水目的。

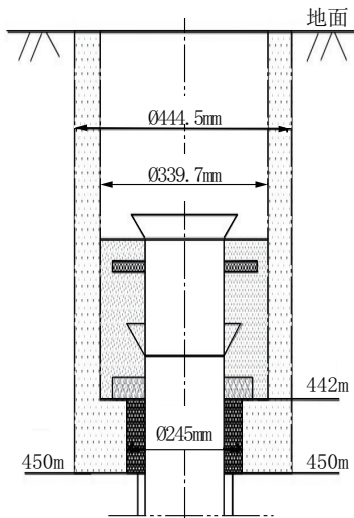


图3 事故处理(上部2次止水)示意

Fig.3 Treatment of downhole incidents

为达到地热井长期开采利用的目的,避免出现同类止水失效事故,在其它地热井施工时,技术套管止水采用全井段尾管注水泥固井止水,水泥浆采用低密度+高密度水泥浆体系,既能在施工前、施工中、候凝中压稳地层,又能保证止水效果。上部悬挂

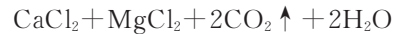
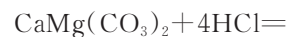
处在 $\text{O}339.7\text{ mm}$ 套管底部加接 $\text{O}245\text{ mm}$ 套管50 m,与技术套管形成环状空隙,控制水泥上返高度,保证水泥上返至 $\text{O}245\text{ mm}$ 套管与技术套管重叠环状空隙处,水泥浆上返至悬挂器顶部。通过抽水试验及供暖时抽采地热水运行监测,证明该止水方法有效地阻止了浅层低温水从套管搭接部位或其它部位渗入目的层热水,止水方法可靠,质量良好。此外,技术套管采用水泥浆全部封固后,既可以起到隔热保温作用,还可以保护技术套管,同时避免了地下含水层在技术套管外相互串通,破坏地下含水层。建议后续地热井施工采用水泥固井止水工艺。

4 酸化增产增灌处理措施

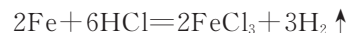
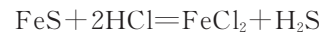
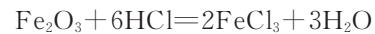
酸化技术是油气层改造常用的技术之一,在石油天然气行业已进行了多年的研究与实践,技术已相对成熟^[11]。在碳酸盐岩饮用水及工业用水水井施工中,部分水井产量不达标,采用常规酸洗工艺进行洗井,即将高浓度盐酸从井口直接注入井内,盐酸与井筒表皮的灰岩、白云岩反应后,下入潜水泵将反应残液排出,从而达到含水层表皮解堵的目的。

近年来,酸化技术也逐渐应用到地热井施工领域,在咸阳、渭南等地取得了一定的成果,但由于酸化是一个复杂的酸岩反应过程,酸与岩石的反应是发生在多孔介质中的多相反应,加之每种矿物与酸的反应速度不一致,导致酸化技术的复杂性。地热井酸化施工技术有待于进一步研究。

盐酸可以溶解碳酸盐岩,反应产物可溶于水并生成二氧化碳气体,利于反应残液返排。化学反应式如下:



同时,盐酸也可以溶解地热井套管、钻杆等金属,因此给酸化施工带来不便,经常会造成仪器故障、井柱泄漏及断裂等事故,其化学反应式如下:



通过对岩心、岩屑进行了匹配实验,确定韩城地区碳酸盐岩热储合适的酸液配方为:60%(31% HCl)+2%酸化缓蚀剂+3%铁离子稳定剂+2%防膨稳砂剂+0.5%助排剂+0.05%消泡剂,根

据数值模拟结果,酸液最优用量 90 m^3 。

具体施工过程如下:

(1)连接现场设备(见图4),将钻杆下至主要含水层,封闭井口,并安装带高压阀门的注酸口与放喷口,使注酸口阀门处于打开状态,放喷口阀门处于完全关闭状态;

(2)将清水从注酸口注入,观察并记录压力变化,确保井口、压力管线、水龙带等密封效果良好;

(3)待泵压及井口压力稳定后,且密封效果良好

的情况下,将洗井酸液由注酸口缓慢压入井中;

(4)全部酸液注完后,继续向井中压入清水(将钻杆中的酸液完全顶入井中),之后完全关闭注酸口阀门,断开高压泵与注酸口的连接,并保持注酸口与放喷口同时关闭,观察井口压力,使盐酸与地层充分反应;

(5)待井口压力释放后,拆卸井口装置,提取钻杆,下入水泵抽洗。

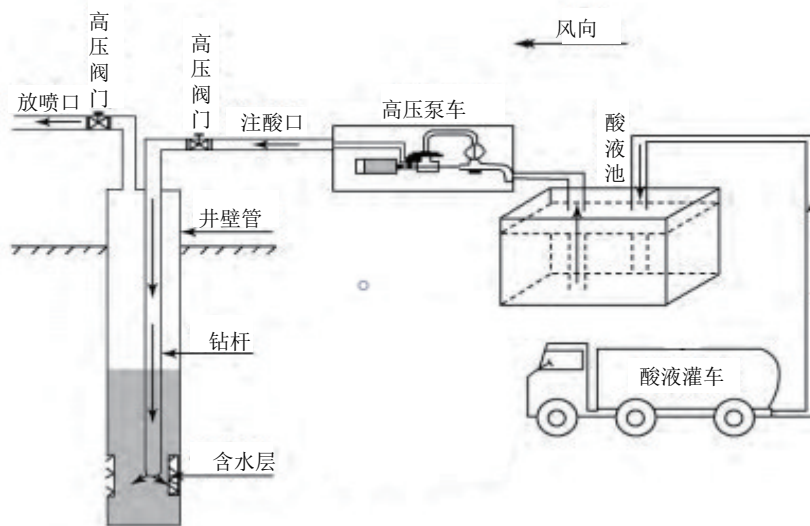


图4 施工工艺流程示意

Fig.4 Construction process flowchart

5 原位采灌工程优化布置

在城区施工地热井受地面条件限制,为充分利用场地,地热丛式定向井的应用越来越广泛^[12-13]。地热井不同于油田丛式定向井的地方在于,地热丛式井的布置需在考虑回灌井与开采井不产生热突破的前提下,能够精准命中富水靶区。多口井从一个平台打到不同的富水靶区,这时既要考虑本平台邻井的防碰问题,又要保证下部目的层段能够命中富水靶区。根据韩城地区地热钻井实践,借鉴油田丛式井施工方法,总结地热井原位采灌工程布置技术要点为:

(1)防碰绕障技术。在设计时,充分考虑邻井情况,通过井眼轨道类型、造斜点、造斜率等的优化设计,尽量避开老井,必要时进行绕障设计。利用软件进行防碰扫描和防碰距离计算。在施工时,做好现

场井眼轨迹的监控和防碰绕障。

(2)物探地质综合预测技术。利用地震、磁法、电法等不同方法组合,研究热储物性特征和地质构造要素,同时,利用地质手段研究地热地质背景特征,评价地热主控因素及资源状况。综合物探、地质手段建立热储模型,精准模拟热储富水特征,找到富水靶区,为钻井提供依据。通过地热丛式井的施工,同台多井,节约了大量土地,井口管道及设备集中后,修井、起下泵方便,易维护,同时,通过物探及地质条件综合分析,优化井眼布置,达到地热井高产、高灌,实现经济效益最大化。

6 梯级换热与回灌系统

对于中深层水热型地热资源的利用,回灌开发是国内外专家公认的地热开发的良性循环模式^[14-15]。在地热能开发利用中必须遵循采用抽灌井

组进行地热能的开发利用,严格遵循“同层原水回灌”、“以灌定采”原则。回灌有以下主要优点:补充热储可开采量,变静态储量为动态储量;回灌水在地下经地层加热后,重新开采,可更多地利用地热能,缓解由于大量开采地热水可能诱发的地质灾害。

地热井成井后通过潜水泵抽采地下热水,地热水通过管道从各地热井引出和接入于地下直埋敷设

管道直至热泵机房内,作为建筑物提供冬季供热热媒。地热水第一级采用高效板式换热器提取地热井中热量,直接用于建筑物冬季供暖,第二级采用水源热泵机组,间接提取板式换热器一次侧回水中的热量,作为建筑的冬季供暖热媒。经过两级换热后的地热尾水通过回灌加压系统由回灌井注入到地下开采层(见图5)。

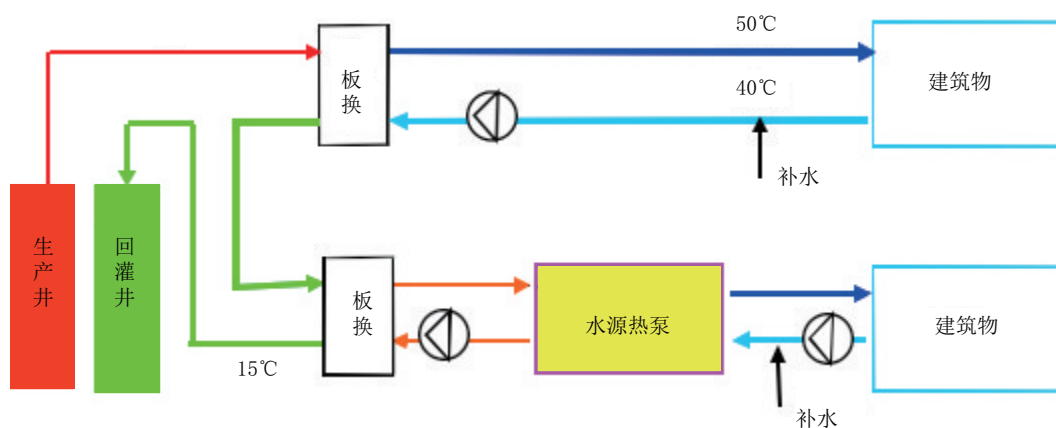


图5 地热水梯级利用供暖系统原理示意

Fig.5 Schematic diagram of the geothermal water cascade utilization heating system

通过梯级换热与回灌后,既可以使地热水达到充分利用,又能保证不破坏地下含水层,实现地热能的可持续开发利用。

7 结论

根据韩城地区地热资源赋存的地质特征及开发过程中遇到的难点,在试验研究、理论分析和数值模拟研究的基础上,研究了韩城地区地热钻井施工的关键技术问题,得到以下主要结论:

(1)总结分析了韩城市开发地热资源的必要性及可行性,提出韩城地区地热资源赋存的地质特征及开发过程中遇到的难点;

(2)提出通过优化钻井井身结构与防塌钻井液体系相结合的办法实现泥岩地层防塌高效钻井技术;

(3)通过对止水案例的分析,建议在地热井施工中,止水套管要用水泥浆全部封固,以免发生止水失效事故;

(4)根据韩城地区地热储层岩性及测井解释成果,提出了合理的酸液配方及酸化施工工艺流程,该施工工艺能显著增加地热井出水量,对韩城地区地

热井增产处理施工具有重要的指导意义;

(5)通过原位采灌工程优化布置,实现节约土地、高产、高灌,实现经济效益最大化;

(6)分析了梯级换热与回灌技术,实现地热能的可持续开发利用;

(7)韩城地区地热能开发利用正处于起步阶段,对韩城地区地热钻井关键技术的研究,具有重要的科学与工程意义。

参考文献(References):

- [1] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.我国地热资源开发利用及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):1-5.
XU Liuwan, WU Xiaolong, WANG Yanli. Development and utilization of geothermal resource in china and the drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2013,40(4):1-5.
- [2] 饶松,姜光政,高雅洁,等.渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J].地球物理学报,2016,59(6):2176-2190.
RAO Song, JIANG Guangzheng, GAO Yajie, et al. The thermal structure of lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016,59(6) 2176-2190.
- [3] 薛超,柴宏有,葛毓,等.韩城地区中深层岩溶地热资源热储特

- 征及潜力评价[J].陕西煤炭,2021,40(1):18-21.
- XUE Chao, CHAI Hongyou, GE Yu, et al. Thermal reservoir characteristics and potential evaluation of karst geothermal resources in Hancheng area[J]. Shaanxi Coal, 2021,40(1):18-21.
- [4] 黄方,何丽娟,吴庆举.鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示[J].地球物理学报,2015,58(10):3671-3686.
- HUANG Fang, HE Lijuan, WU Qingju. Lithospheric thermal structure of the Ordos Basin and its implications to destruction of the North China Craton [J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2015,58(10):3671-3686.
- [5] 刘建生.对地热井成井工艺技术的探讨与认识[J].工程勘察,2010,38(10):37-40.
- LIU Jiansheng. Exploration and cognitive on the processing technology for geothermal wells [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010,38(10):37-40.
- [6] 闫小利,郑树楼,王振福.陕西关中地区深层地热井成井工艺探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):36-39.
- YAN Xiaoli, ZHENG Shulou, WANG Zhenfu. Discussion on deep geothermal well completion technology in central Shaanxi area[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2010,37(5):36-39.
- [7] 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. Key technologies of hot dry rock drilling during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(11):2234-2243.
- [8] 陈建兵,王振福.关中盆地地热钻井施工常见问题预防及处理方法探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):21-27.
- CHEN Jianbing, WANG Zhenfu. Prevention and treatment of common problems in geothermal drilling in Guanzhong Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2019,46(7):21-27.
- [9] 邵保平,赵阳升.600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):892-898.
- XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(5):892-898.
- [10] 胡晋军,和国磊,耿志山,等.天津CGSD-01地热调查井固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):26-30.
- HU Jinjun, HE Guolei, GENG Zhishan, et al. Cementing technology for Tianjin CGSD-01 geothermal survey well[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2020,47(1):26-30.
- [11] 李砚智,田京振.酸化洗井在河北牛驼镇地热田两口井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(6):16-18.
- LI Yanzhi, TIAN Jingzhen. Application of acid well flushing in 2 wells of Niutuo Geothermal Field in Hebei[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2009,36(6):16-18.
- [12] 浦静怡,张晓宏,陈粤强.关中地区中深层地热钻井开发与展趋势[J].陕西煤炭,2020,39(5):108-111.
- PU Jingyi, ZHANG Xiaohong, CHEN Yueqiang. Exploitation and development trend of middle deep geothermal in Guanzhong area [J]. Shaanxi Coal, 2020,39(5):108-111.
- [13] 侯岳,刘春生,刘聃.地热连通井热交换隔离开采技术研究综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):41-46.
- HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan. Review of research on isolated heat exchange technology with connected geothermal [J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2020,47(7):41-46.
- [14] 王光辉,赵娜,赵苏民,等.天津地区新近系地热回灌井不同完井工艺应用效果对比[J].地质找矿论丛,2013,28(3):481-485.
- WANG Guanghui, ZHAO Na, ZHAO Sumin, et al. Reinjection effect study of different geothermal well completion in Neogene System [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013,28(3):481-485.
- [15] 张永春,赵海滨,常洪华,等.威海地区3000m深部地热钻探关键技术的应用与分析[J].钻探工程,2021,48(S1):111-119.
- ZHANG Yongchun, ZHAO Haibin, CHANG Honghua, et al. Key technology for 3000m-deep small diameter geothermal drilling in the Weihai area of Shandong province [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):111-119.

(编辑 李艺)