

影响砂岩型热储回灌因素的分析与认识

齐恭¹, 李杨¹, 高鹏举², 董向宇^{*2}

(1. 河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队, 河北衡水 053000;

2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:通过分析地下水分层测试获取的数据, 认识到含水层由于受泥质含量、孔隙度、渗透率等因素影响显示各储层的压力有一定差异, 指出同一地热井不同含水层之间具有越层补给的现象。分析了越层补给、洗井工艺及钻井液侵入储层因素对回灌产生的影响, 提出了实行分层抽采回灌、地热井钻完井及成井工艺精细化作业的建议。

关键词:地热; 砂岩型热储; 回灌; 洗井; 钻井液; 越层补给

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)06-0107-06

Analysis and understanding of factors affecting sandstone-type thermal storage recharge

QI Gong¹, LI Yang¹, GAO Pengju², DONG Xiangyu^{*2}

(1. No.3 Hydrology Engineering Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral

Resources Exploration, Hengshui Hebei 053000, China;

2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: By analyzing the data obtained from groundwater stratification tests, it was realized that the pressure of different reservoirs varies due to the influence of mud content, porosity, permeability and other factors, indicating the phenomenon of cross layer recharge between different aquifers in the same geothermal well. This paper analyzed the impact of factors such as cross layer supply, well flushing process, and drilling fluid invasion into the reservoir on reinjection, and proposed suggestions for implementing layered pumping reinjection, geothermal well drilling and completion, and fine technology on well formation.

Key words: geothermal energy; sandstone type thermal storage; recharge; well flushing; drilling fluid; cross layer supply

0 引言

地热是世界公认的极具应用价值的新型绿色清洁能源, 具有分布范围广、储量大的特点。开发利用地热资源是实现“碳达峰、碳中和”目标任务、治理大气污染的重要途径之一^[1-3]。其中砂岩热储埋藏相对较浅, 是地热开发利用的主要层位, 但是随着粗放性的开采, 地热热储层压力逐年下降, 有些开采井已经出现了抽空、提水困难现象。同时

地下水含硫、铁、氯等矿物质, 矿化度高, 地热水直接排放不仅造成资源浪费, 而且对周边生态环境产生比较大的影响。因此, 高效无害化利用砂岩热储成为亟待解决的问题。高效可持续的回灌技术是解决砂岩热储地热水水位大幅度下降问题以及保护生态环境的有效技术手段^[4-6]。

1 存在问题

我国沉积岩中砂岩热储分布广泛, 开发利用程

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.014

第一作者: 齐恭, 男, 汉族, 1971年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事水文水井钻探工作, 河北省衡水市红旗大街808号, 57006594@qq.com。

通信作者: 董向宇, 男, 汉族, 1970年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 从事水文水井钻探、小口径岩心钻探、非开挖技术等工作, 河北省廊坊市金光道77号, 13932678511@163.com。

引用格式: 齐恭, 李杨, 高鹏举, 等. 影响砂岩型热储回灌因素的分析与认识[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 107-112.

QI Gong, LI Yang, GAO Pengju, et al. Analysis and understanding of factors affecting sandstone-type thermal storage recharge[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 107-112.

度较高,但是回灌率低的问题成为制约其可持续发展的瓶颈。为此,全国各地进行了大量的不同技术手段的回灌试验^[7-12]。目前采用大孔径填砾、储层射孔、同径止水等方法探索和研究砂岩热储的高效回灌,这些技术手段尚未从根本上解决砂岩热储可持续回灌问题,从而导致砂岩热储的开发利用在很多地区受限,甚至被禁止。因此,系统地开展砂岩热储层物理形态、化学性质的研究,分析钻完井、洗井等施工工艺,对解决砂岩热储回灌问题具有现实意义。其中测试砂岩热储层的水头压力揭示含水层间内部循环形态及规律对回灌的影响,制定相应的工艺技术以提高回灌量。

2 含水层压力监测

自2020年开始在唐山市国家级一孔多层地下水监测示范井地下水监测试验测试示范项目中,针对多含水层进行了分层监测,见图1。将浅层砂岩热储的5个含水层分别建成了5个观测井,由于不同含水层的泥质含量、孔隙率、渗透系数等因素具有差异,监测显示,各井的稳态水位是相对独立的,因而显示不同层位的地下水压力不相同。详见表1。

表1 含水层分层监测参数

Table 1 Monitoring parameters for aquifer stratification

项目	井深/ m	下入井 管/m	含水层 埋深/m	滤水管 位置/m	水 位/m
第五级	147	147.8	133.7~137.6、 140.9~142.4	133.14~143.1	42.55
第四级	106.2	107.0	88.0~109.9	90.06~102.2	53.0
第三级	86.2	87.0	66.6~69.3、 71.0~84.0	66.49~82.6	52.75
第二级	54.0	54.8	44.6~50.2	44.02~50.1	26.4
第一级	40.9	41.7	29.4~36.5	29.18~37.16	24.25

通过试验测试可以看出,不同的含水层具有不同的水位,显示含水层的地层压力是有差异的。当打开多个含水层进行综合取水时,不同的含水层的贡献也大不相同。

3 影响回灌的因素分析

导致砂岩热储地下水回灌困难的主要表象是:与储层矿物组成、成岩机理、以及回灌过程中的水-岩石相互作用导致的悬浮物、化学沉淀和气泡堵塞

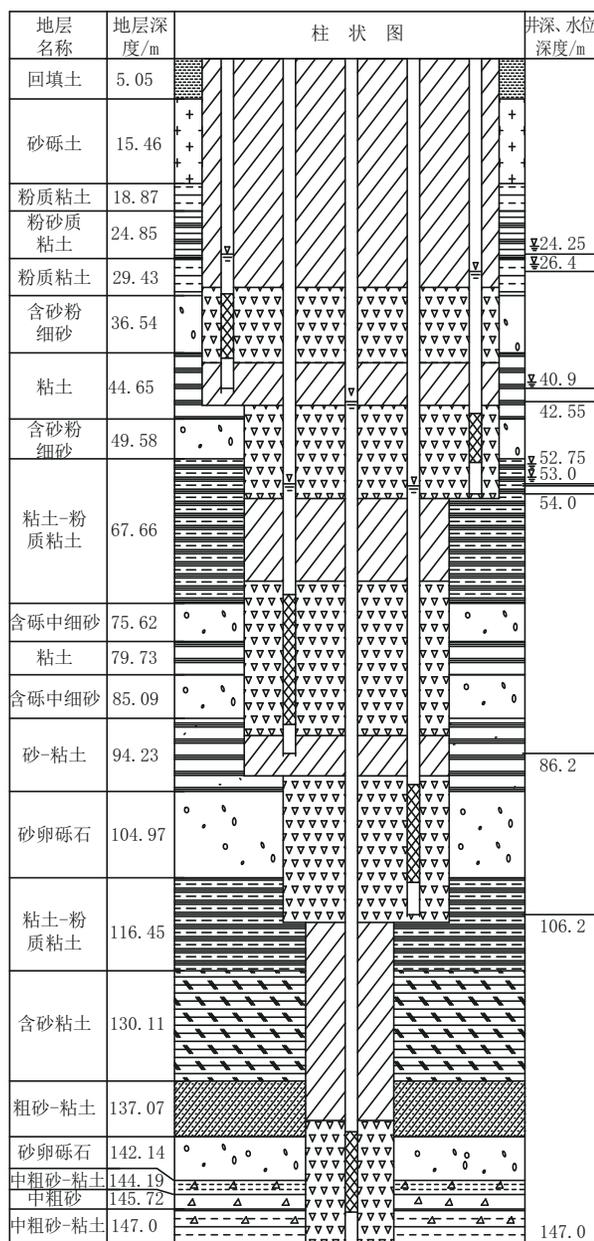


图1 多层地下水观测井综合柱状图

Fig.1 Comprehensive bar chart of multi-layer groundwater observation wells

有关的地热井含水层孔隙堵塞、钻完井工艺中的泥皮或固井水泥等对含水层段井壁的封堵、以及空压机活塞洗井工艺产生的负压对含水层井段的有效影响效果等。新近系砂岩热储回灌井回灌能量存在较大差异,针对华北区域的砂岩热储,相关的统计数据显示,一般平均回灌量 $<50\text{ m}^3/\text{h}$,甚至局部区域回灌量 $<20\text{ m}^3/\text{h}$ 。回灌成了制约砂岩热储开采利用的瓶颈。地热井回灌量大小既有地质方面的原因又有钻探成井原因^[13-15],下面分别从地质方面及钻探

成井方面进行分析。

3.1 地质方面

以往的研究中往往把砂岩热储中的所有砂岩层拟合概化成一个大的含水层,但是实际上砂岩热储的水层多由层厚不一的砂岩和泥岩组合构成的一套热储地层。其中每层砂岩的岩性、压力、热物性、水动力等特征均存在一定的差异,其对地热井出水和回灌的贡献也不能一概而论。如图 2(a)所示,在地下水静止的时候含水层 A、B、C 共同维持着静止水位 h 。

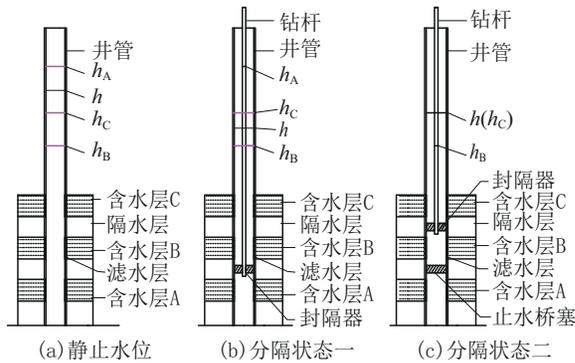


图 2 水位与含水层关系示意

Fig.2 Relationship between water level and aquifer

新钻成的砂岩热储地热井可在射孔时分层射孔,从而分别确定各含水层的压力。可以采用图 2(b)的方法,在地热井含水层 A、含水层 B、含水层 C 之间的白管内下入与钻杆相连的封隔器及止水桥塞,在钻杆内单独测量含水层 A 的水位为 h_A ,同理测得含水层 B 和 C 的水位为 h_B 、 h_C 。通过监测同一含水组不同含水层不同的液柱高度,可以推断出热储地下水在含水层混合利用情况下处于越层补给状态。这种检测方法适用于射孔成井的砂岩热储地热井,对于投砾成井和同径止水地热井也可以借鉴。

下面用 $Q_{A出}$ 、 $Q_{B出}$ 和 $Q_{C出}$ 表示含水层 A、B 和 C 的出水量, $Q_{A灌}$ 、 $Q_{B灌}$ 和 $Q_{C灌}$ 表示含水层 A、B 和 C 的回灌量, $Q_{B补}$ 和 $Q_{C补}$ 表示含水层 B、C 的层间补水量,在不同状态下有以下的情况。

(1)井内不抽水水位静止状态下,含水层 A、B、C 处于稳定的层间补水状态, $Q_{A出} = Q_{B补} + Q_{C补}$ 。同时由于 h_C 高于 h_B ,所以 $Q_{B补} > Q_{C补}$,如图 3(a)。

(2)地热井抽水状态时,潜水泵抽取地下水的量 $Q_{泵}$ 直接影响动水位 h 的高度,含水层对于水井的渗水会呈现不同的状态。

当动水位 h 高于 h_C 水位时, $Q_{泵} =$

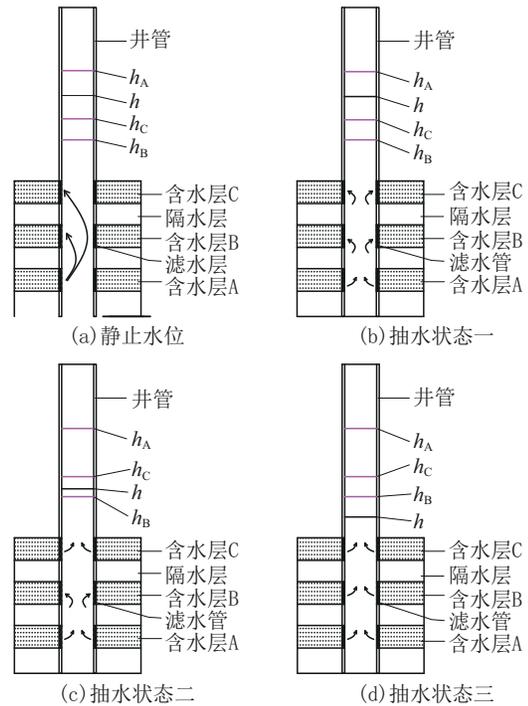


图 3 含水层越层补给示意

Fig.3 Schematic diagram of aquifer cross layer supply

$Q_{A出} - Q_{B补} - Q_{C补}$ 含水层 B、C 处于含水层 A 的补给状态,如图 3(b)所示。

当动水位 h 高于 h_B 水位,低于 h_C 水位时, $Q_{泵} = Q_{A出} + Q_{C出} - Q_{B补}$ 含水层 B 处于含水层 A 和 C 的补给状态,如图 3(c)所示。

当动水位 h 低于 h_B 水位时, $Q_{泵} = Q_{A出} + Q_{B出} + Q_{C出}$,如图 3(d)所示。

(3)地热井进行回灌时,由于回灌量不同,含水层回灌状况也不同,如图 4。

当回灌水位低于 h_A 时, $Q_{总灌} = Q_{B灌} + Q_{C灌}$,含水层 A 因回灌压力没达到本身地层压力,处于对地层 B、C 补给状态,变相的降低了 $Q_{总灌}$ 的量,如图 4(a)所示。

当回灌水位高于 h_A 时, $Q_{总灌} = Q_{A灌} + Q_{B灌} + Q_{C灌}$,含水层 A 因回灌压力大,回灌量最小,其关系为 $Q_{C灌} > Q_{B灌} > Q_{A灌}$,如图 4(b)所示。

3.2 成井工艺方面

在平原丘陵沉积地层砂岩热储开发利用过程中,有一个现象:相邻 100 多米的砂岩型热储地热井,测井结果大致相同、成井利用出水段相同、成井工艺相同(射孔成井)情况下,地热水涌水量也相差不大,但回灌量却差异很大。为此对回灌量小的地

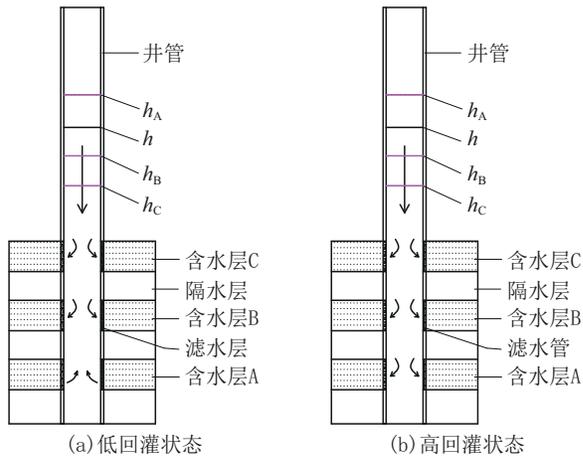


图4 回灌压力与层间补水关系示意

Fig.4 Relationship between recharge pressure and cross layer supply

热井成井段进行了二次射孔,确保钻遇的所有含水层全部被打通,反复充分的洗井作业后行回灌量测试,回灌量并没有明显的增加,究其原因分析如下。

3.2.1 钻井液影响

钻井液的作用是携带钻屑、稳定井壁、平衡钻孔地层压力、冷却钻头钻具、润滑钻头钻具、传递水动力等作用^[16-19]。在施工时,为了保证钻孔不坍塌,钻井液对地层压力大于地层自身压力,往往不可避免地侵入井壁一定深度,钻井液中固相颗粒及滤液气泡侵入热储层后,在砂岩孔隙发生堵塞架桥现象。为保证钻井安全,钻井液密度按地层压力大的含水层配置,这也就导致了压力大的含水层由于自身水压大,受泥浆侵入少,洗井时极易洗开;而地层压力小的地层,泥浆侵入多,渗透远,洗井时很难清洗干净,导致地层压力小的含水层堵塞。

如图5所示,地层压力 $A > C > B$,在钻孔1内钻井液密度一致时,泥浆渗透距离 $L_B > L_C > L_A$ 。

3.2.2 洗井工艺的影响

洗井是地热井成井工艺中极为重要的一道工序。尤其是砂岩热储地热井,洗井的好坏对地热井出水量有很大的影响。

砂岩地热井成井后,洗井的方法基本上可分为机械洗井和化学洗井两大类。对于泥皮、泥沙淤积堵塞过滤器等,均可采用机械洗井方法处理。机械洗井法的原理是:通过洗井设备在井中产生的强大抽、压作用和冲击振荡作用,加大井内外的水压力差和加快地下水流速,从而破除井壁泥皮、带出阻塞于

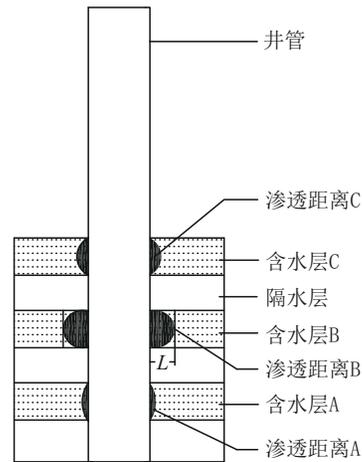


图5 钻井液井壁渗透状态示意

Fig.5 Schematic diagram of wellbore permeating state of drilling fluid

含水层空隙与过滤器中的细粒物质,以达到疏通含水层、增加水井出水量的目的。目前常用的洗井方法有:喷射洗井、潜水泵、活塞洗井法、空压机洗井法等^[20]。

现在使用洗井方法多为潜水泵、空压机全井段综合洗井。活塞洗井虽然能做到逐层段进行洗井,但由于地热井成井一般较深,为保证施工安全,活塞洗井只是在泵室管段进行往复抽吸^[21]。这就导致了低压力含水层以及泥浆渗透影响区较大的含水层过水通道不能够得到充分疏通。再有就是压力大的含水层抽水时已能够满足取水设备的最大流量,且降深还没达到压力低含水层的静止水位,压力低含水层处于受水状态,导致在回灌时处于泥浆堵塞状态。

新施工的馆陶组地热井进行分层洗井,可以采用止水桥塞和封隔器联合的工艺方法,分隔各个含水层的水力联系,分层洗井。采用射孔工艺打开最下面一个含水回灌层,然后进行洗井工作,彻底疏通打开的含水层;在上方相邻的回灌层底部下入止水桥塞,分隔上下两个层位,然后对上面一层实施射孔作业,并洗井,使该层彻底疏通;重复以上的工作步骤,直至最上面的一个回灌层彻底疏通。其它砂岩热储地热井采用止水桥塞和封隔器从地热井最下一层滤水管位置进行分层洗井。

4 问题及建议

以往针对地热回灌开展了大量的试验工作,普

普遍认为地热井出水量越大回灌量就越大,含水层越厚回灌量越大,井径越大回灌量越大,射孔成井回灌量大。但是砂岩热储可持续回灌以及回灌量不稳定问题没有从根本上解决。热储孔隙度是回灌不可或缺的条件,但热储层含水层地下水压力也是取决回灌量大小的条件。在静止水位状态下,通过流量测井、井下电视等进行观察,可以明显地看到具有压力差的含水层之间有稳定的层间流场。对于混层开发的地热井,在进行热储回灌时,由于含水层压力差的存在,回灌的水能够进入哪个含水层也会有差异的。

(1)在含水层组孔隙度相似的情况下,基于含水层压力,在同一含水组中不同压力的含水层共同维持地热井的静水位,静止状态下,由于各含水层压力不同,地下水始终处于运动状态,也就是压力大的补给压力小的。因此,对于抽水状态,含水层孔隙度相近似,压力大的含水层是出水的主要层位。对于回灌状态,水头压力低于含水层的最大地层压力时,将不能抑制储层水之间的层间补给,从而显示回灌水量低的现象。含水层孔隙度相近似的条件下,压力小的含水层是回灌的主要层位。

(2)对于回灌井,改变利用含水层越多越好的思路,利用压力小渗透系数好的含水层作为回灌层位,有效控制含水层之间的补给,又降低静水位增加了回灌的自然压力,可以大幅度提高回灌量。

(3)对于新施工的抽灌井,改变现有的全孔段混合洗井方法,由下向上依次分层射孔,实施分层洗井,彻底疏通含水层。基于以上思路,采用含水层分层处理技术,还可以改造已有封停的砂岩热储型地热井,实现封停井再利用,盘活废弃资产的目的。

5 结语

提高回灌量解决可持续回灌问题,对于砂岩热储地热开发利用具有重要意义。通过监测不同含水层储层的压力,揭示了储层间的层间补水现象,提出了回灌压力与回灌效果具有一定的相关性的认识,建议将低水头压力高孔渗储层作为回灌的主力层位,对于较高水头压力低孔渗层位需要进行储层改造,扩大连通性。综合回灌层位的水头压力,采用适宜的回灌压力,尽量减少层间补水情况,较大幅度的提高回灌量。另外对地热井钻完井及成井工艺实施过程的优化及精细化的控制,减少对含水层原状物理状态的破坏,确保井筒及含水层储层的通道畅通,对于

实现高效可持续的储层回灌同样具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 王贵玲,李郡,吴爱民,等.河北容城凸起区热储层新层系——高于庄组热储特征研究[J].地球学报,2018,39(7):533-541.
WANG Guiling, LI Jun, WU Aimin, et al. A Study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang Formation, a new layer system of thermal reservoir in Rongcheng Uplift Area of Hebei Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(7): 533-541.
- [2] 马峰,王贵玲,张薇,等.雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J].地质学报,2020,94(7):1981-1990.
MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng Geothermal Field in Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1981-1990.
- [3] 赵佳怡,张薇,马峰,等.雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J].地质学报,2020,94(7):1991-2001.
ZHAO Jiayi, ZHANG Wei, MA Feng, et al. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng Geothermal Field, Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1991-2001.
- [4] 王刚,宋佳,王盼盼,等.浅层地热能开发回灌井施工技术研究——以郑州市东,西部新城区为例[J].钻探工程,2022,49(6):153-161.
WANG Gang, SONG Jia, WANG Panpan, et al. Drilling technology for recharge wells in shallow geothermal energy development: A case study of the new districts in the east and west of Zhengzhou [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 153-161.
- [5] 赵苏民,程万庆,张伟.新近系砂岩热储地热回灌堵塞问题的剖析[J].地热能,2013(6):6.
ZHAO Sumin, CHENG Wanqing, ZHANG Wei. Analysis of geothermal recharge blockage in the Neogene sandstone thermal storage [J]. Geothermal Energy, 2013(6): 6.
- [6] 张平平,王秀芹.回灌水温对砂岩热储回灌效果的影响分析——以德州市地热田馆陶组热储为例[J].山东国土资源,2015,31(6):4.
ZHANG Pingping, WANG Xiuqin. Analysis of the influence of reinjection water temperature on the reinjection effect of sandstone thermal storage: Taking the Guantao formation thermal storage in the geothermal field of Dezhou City as an example [J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(6): 4.
- [7] 贺森,张乐,袁一鸣,等.东营市南展区砂岩热储地热回灌量与温度的关系探讨[J].山东国土资源,2018,34(1):5.
HE Miao, ZHANG Le, YUAN Yiming, et al. Discussion on the relationship between geothermal recharge volume and temperature of sandstone thermal storage in Nanzhan District, Dongying City [J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(1): 5.
- [8] 云钊,汤勇,陈国富,等.黄骅市新近系砂岩热储回灌能力分析

- [J]. 中国高新区, 2017(11X):2.
YUN Chuan, TANG Yong, CHEN Guofu, et al. Analysis of the thermal storage and recharge capacity of the Neogene sandstone in Huanghua City[J]. China High Tech Zone, 2017, (11X):2.
- [9] 冯守涛, 王成明, 杨亚宾, 等. 砂岩热储回灌对储层影响评价——以鲁西北坳陷地热区为例[J]. 地质学报, 2019(S1):10.
FENG Shoutao, WANG Chengming, YANG Yabin, et al. Evaluation of the impact of sandstone thermal reservoir recharge on reservoirs: Taking the geothermal region of the northwest Shandong Depression as an example[J]. Journal of Geology, 2019(S1):10.
- [10] 陈莹, 王攀科, 吴焯, 等. 河南兰考地区地热回灌影响因素分析及对策[J]. 钻探工程, 2022, 49(6):146-152.
CHEN Ying, WANG Panke, WU Ye, et al. Analysis and countermeasures on influencing factors of geothermal well reinjection in Lankao, Henan Province[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):146-152.
- [11] 肖鹏, 窦斌, 田红, 等. 地热储层单裂隙岩体渗流传热数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(2):16-28.
XIAO Peng, DOU Bin, TIAN Hong, et al. Numerical simulation of seepage and heat transfer in single fractured rock mass of geothermal reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):16-28.
- [12] 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.
- [13] 王磊. 中深层砂岩热储回灌井参数优化模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5):10.
WANG Lei. Optimization simulation of parameters for thermal storage and reinjection wells in mid to deep sandstone[J]. Science, Technology and Engineering, 2023, 23(5):10.
- [14] 高新智. 天津市孔隙型砂岩热储回灌能力评价模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
GAO Xinzhi. Research on the evaluation model of thermal storage and recharge capacity of porous sandstones in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [15] 丁亮, 赵彦涛, 刘小康. 移动式地热尾水回灌装置的研制与应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(3):124-129.
DING Liang, ZHAO Yantao, LIU Xiaokang. Development and application of mobile geothermal tail water reinjection device[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):124-129.
- [16] 乌效鸣, 蔡记华, 胡郁乐. 钻井液与岩土工程浆材[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
WU Xiaoming, CAI Jihua, HU Yule. Drilling Fluid and Geotechnical Engineering Grout[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [17] 李砚智, 张长茂. GYx 地热井钻井液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(1):61-66.
LI Yanzhi, ZHANG Changmao. Drilling fluid technology for geothermal well GYx[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1):61-66.
- [18] 胡童颖, 董向宇, 冉恒谦, 等. 地热井钻井液对井壁温度分布的影响研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1):20-25.
HU Tongying, DONG Xiangyu, RAN Hengqian, et al. Study on influence of drilling fluids on temperature distribution over the borehole wall in geothermal wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1):20-25.
- [19] 战启帅, 宋天培. YR1 地热井断层性漏失封堵技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(11):72-76.
ZHAN Qishuai, SONG Tianpei. Fault type circulation loss plugging technology for YR1 geothermal well[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11):72-76.
- [20] 齐恭, 李杨, 李珺, 等. 砂岩型出水地热井和回灌井施工方法: CN113153223.4[P]. 2021-03-23.
QI Gong, LI Yang, LI Jun, et al. Construction method for sandstone type geothermal and reinjection wells: CN113153223.4 [P]. 2021-03-23.
- [21] DZ/T 0260—2014, 地热钻探技术规程[S].
DZ/T 0260—2014, Technical regulations for geothermal drilling[S].

(编辑 王文)