

河南兰考地区地热回灌影响因素分析及对策

陈莹¹, 王攀科², 吴焯³, 马青坡⁴, 于丽², 上官锐¹

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053;

2. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053;

3. 河南工程学院, 河南 郑州 451191; 4. 河南省地质职工学校, 河南 郑州 450053)

摘要: 地热回灌是保障地热资源可持续开发利用的关键环节之一。本文结合河南兰考地区热储层地质条件、水质特点、地热井井管材质, 开展了室内腐蚀观察实验和 PHREEQC 地球化学模拟软件分析, 从化学沉淀趋势、地热水腐蚀性和钻井成井工艺方面分析了回灌效果的影响因素, 并从地热水水质处理、地热井井管材料选择、钻井与成井工艺优化、回灌温度、项目选址等方面提出提高回灌效果的建议。

关键词: 地热资源; 馆陶组; 地热井; 回灌; 兰考地区

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)06-0146-07

Analysis and countermeasures on influencing factors of geothermal well reinjection in Lankao, Henan province

CHEN Ying¹, WANG Panke², WU Ye³, MA Qingpo⁴, YU Li², SHANGGUAN Rui¹

(1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China;

2. No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China;

3. Henan University of Engineering, Zhengzhou Henan 451191, China;

4. Geological Vocational School of Henan Province, Zhengzhou Henan 450053, China)

Abstract: Geothermal well reinjection is one of the key steps to ensure the sustainable development and utilization of geothermal resources. This paper, in reference to the geological conditions of thermal reservoir, water quality characteristics and geothermal well pipe material in Lankao, Henan province, presents the indoor corrosion observation experiment and PHREEQC geochemical simulation software. The influencing factors of reinjection effect are analyzed from the aspects of chemical precipitation trend, corrosiveness of geothermal water, drilling and well completion technology. Suggestions are put forward to improve geothermal reinjection effect in terms of geothermal water quality treatment, geothermal well pipe material selection, drilling and well completion technology optimization, reinjection temperature, site selection.

Key words: geothermal resources; Guantao formation; geothermal well; reinjection; Lankao region

0 引言

地热资源具有清洁环保、储量巨大等特点。因地制宜开发利用地热资源对改善能源结构具有积极意义,也是助力实现“碳达峰”、“碳中和”目标的具体举措。截止2021年底,我国中深层地热供暖建

筑面积 5.82 亿 m²[1]。回灌是保障水热型地热资源可持续开发利用的关键环节之一,影响回灌的因素有多种,包括地质条件(裂隙通道、地下水运移通道顺畅程度等)、地热水水质、回灌井成井工艺[2]、井管腐蚀结垢、回灌堵塞(物理、化学、微生物、气体)

收稿日期:2021-09-26; 修回日期:2022-04-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.020

基金项目:河南省地矿局青年科技创新项目“地热回灌过程中化学沉淀堵塞与腐蚀问题的研究”(任务书编号:豫地矿青科创[2020]10号)

第一作者:陈莹,女,汉族,1981年生,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事地热资源勘探开发等工作,河南省郑州市金水区南阳路56号,chenying-1001@163.com。

引用格式: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.

等^[3-4]。本文结合兰考地区地热水质特点、井管材质,室内腐蚀观察实验和PHREEQC地球化学模拟软件分析,从地热井回灌的化学沉淀堵塞和腐蚀、钻井与成井工艺等方面,分析了兰考地区地热回灌影响因素和对策。

1 地质及地热回灌概况

兰考县位于河南省东北部,是国家能源局批复的全国首个农村能源革命试点建设示范县,也是河南省地热能清洁供暖规模化利用试点地区之一。兰考地区主要断裂为新乡—商丘大断裂(F3)、聊兰断裂的次级断裂(F6)及推测断层(F7、F8)(如图1)。自2000年起,兰考地区早期建设的井深1000m左右、以洗浴为主要用途的地热井逐步关停^[5]。目前,兰考地区中深层水热型地热资源开发深度为1500~2200 m,主要利用新近系馆陶组孔隙热储层,热储岩性上部为浅棕色砂砾岩、灰色粉砂质泥岩与棕红色泥岩呈不等厚互层,下部为杂色砂砾岩与棕红色泥岩呈不等厚互层含水层。井口出水温70℃左右,水量一般为80~120 m³/h,主要用途为地热供暖。

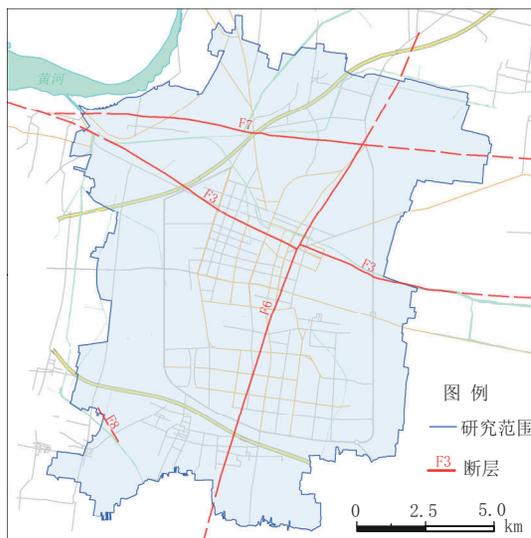


图1 兰考城区主要断裂分布

Fig.1 Distribution of main faults in Lancao

根据资料收集和现场调查,兰考地热供暖项目中抽水井与回灌井的比例一般为1:1、1:2或1:3^[6],地热供暖项目开采井与回灌井深度基本相同,满足同层回灌的要求^[7]。在自然回灌条件下,兰考地区新近系馆陶组热储地热井单井回灌量20~115 m³/h

不等。位于F6断裂东侧与F3断裂结合处附近的地热供暖系统,开采井及回灌井都位于F6断裂东侧即下盘位置,在自然回灌条件下,回灌效果不理想;位于F6断裂西侧即上盘位置的地热供暖项目回灌效果较好,有实例表明,此区域内单井回灌量达114.8 m³/h,加压回灌量可达到170 m³/h。

2 回灌影响因素分析

2.1 流体特征及化学沉淀

根据兰考地区现场取样化验和以往收集到的地热水水质分析结果,该地区地热水化学类型分别为:新近系明化镇组上部(约300~800 m)以HCO₃·Cl-Na型为主;新近系明化镇组下部(约800~1300 m)以HCO₃·Cl-Na型为主,还有少数HCO₃·SO₄·Cl-Na型;新近系馆陶组(约1300~2200 m)以Cl-Na型为主。通过对23组地表水、浅层地下水及地热水水质的汇总分析,主要指标的垂向水化学类型特征变化趋势为(图2):随埋深增加,Cl⁻、Na⁺、溶解性总固体TDS呈增大趋势,2000 m以深处呈小幅波动状态;Ca²⁺、Mg²⁺含量先降低后增加,2000 m以深小幅波动;微量元素F⁻的含量浅层地下水含量较高,随深度增加呈降低趋势。

根据地下水中化学平衡反应的质量作用定律和质量守恒原理,运用PHREEQC地球化学模拟软件,对于馆陶组的回灌水能采用的有地表水、浅层水、明化镇组上部、明化镇组下部和馆陶组同层水源,选取的“可能矿物相”,计算各水样点矿物的饱和指数及浅层地下水到深层地热水路径上矿物(气体)的溶解(沉淀)量及溶解沉淀趋势,选择石英、钠长石、钙长石、钾长石、钙蒙脱石、方解石、白云石、石膏、萤石、岩盐、高岭石和伊利石为水文地球化学反应可能的矿物相。在不考虑不同含水层相互污染的情况下,计算采用不同回灌水源混合后,回灌地层中主要矿物成分的饱和指数SI。饱和指数是水文地球化学研究中应用最多的一个指标,它研究的是矿物在地下水的饱和状态。饱和指数反应了矿物组分与地下水之间的相对状态,即地下水化学组分溶解—沉淀的趋势以及内在的水动力和化学条件。当SI=0时,矿物在水溶液中处于平衡状态;当SI<0时,表明矿物在水溶液中未达到饱和状态;当SI>0时,表示该矿物相对水溶液处于饱和状态,矿物将发生沉淀。由计算结果绘制图3。

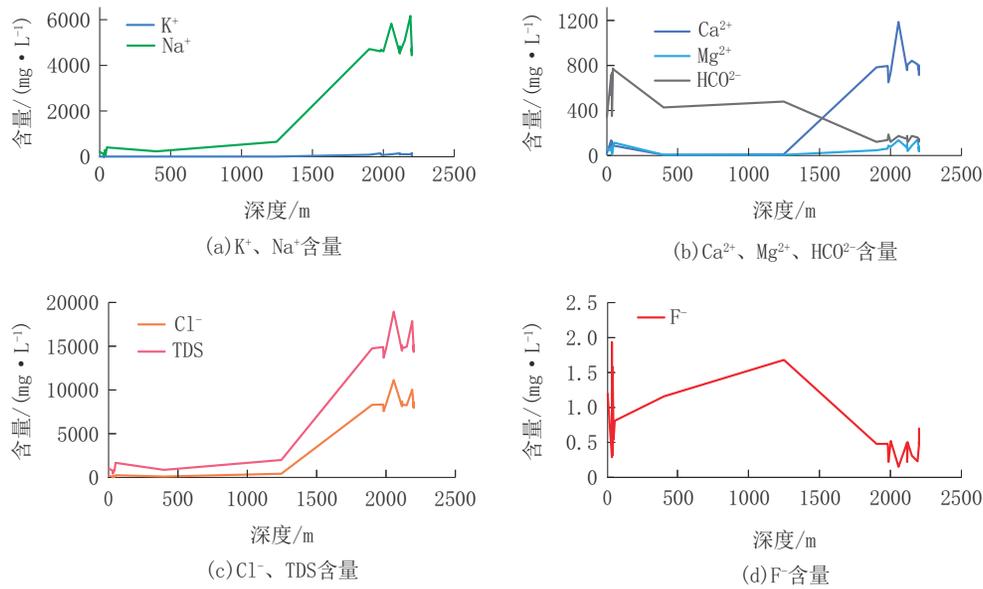


图2 兰考地区地热流体主要组分含量

Fig.2 Main components of geothermal fluids in Lankao

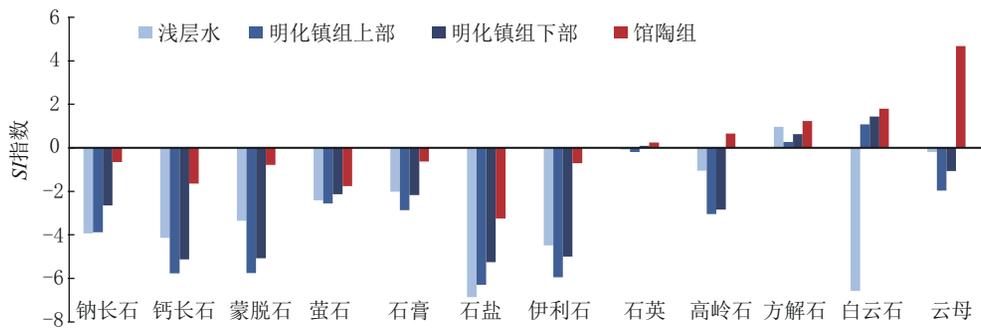


图3 不同热储层中主要矿物的饱和指数SI

Fig.3 Saturation index(SI) of main minerals in different geothermal reservoirs

通过模拟,在浅层水中,钠长石、钙长石、蒙脱石、白云石、萤石、石膏、石盐、伊利石、高岭石、云母、石英的饱和指数 $SI < 0$,在水溶液中未达到饱和状态;方解石的饱和指数 $SI > 0$,在水溶液中处于饱和状态,将发生沉淀。

明化镇组上部和下部地热水中,钠长石、钙长石、蒙脱石、萤石、石膏、石盐、伊利石、云母、高岭石的饱和指数 $SI < 0$,在水溶液中未达到饱和状态;石英的饱和指数 SI 上部为 -0.19 、下部为 0.09 ,在水溶液中处于基本平衡状态;方解石、白云石的饱和指数 $SI > 0$,在水溶液中处于饱和状态,矿物将发生沉淀。

馆陶组地热水中,钠长石、钙长石、蒙脱石、萤石、石膏、石盐、伊利石的饱和指数 $SI < 0$,在水溶液中未达到饱和状态;高岭石、石英、方解石、白云石、

云母的饱和指数 $SI > 0$,在水溶液中处于饱和状态,矿物将发生沉淀。

2.2 井管的腐蚀性

兰考地区新近系馆陶组热储地热流体的水化学类型为 $Cl-Na$ 型,抽取的5个水质化验结果中 Cl^- 、溶解性总固体含量分别为 $7569 \sim 11131$ 、 $13669 \sim 18954$ mg/L,地热水具有矿化度高、硬度大、 Cl^- 含量很高、水质较差、腐蚀性强等特点。长期在这种水质条件下,在地热井的变径及以上部位、井管接口、水泵等处存在腐蚀现象,如图4所示。

考虑到兰考地区水质情况,特别是其 Cl^- 、溶解性总固体等指标偏高,为初步观察兰考地区地热水在不同情境下的腐蚀与沉淀情况,分别采用普通铁丝缠绕在试片(铁片)上的方式浸泡在不同温度条件



(a)井管接口处 (b)水泵接口处

图4 井管腐蚀情况

Fig.4 Corrosion on well pipes

下的兰考地区采集的地热水和原水(自来水)中进行实验对比,并分别记录了30、60、90 d的变化情况,不

同的组合条件见表1。

表1 腐蚀观察实验分组情况

Table 1 Grouping of corrosion observation experiments

编号	第一组(普通铁丝)	第二组(不锈钢铁丝)
1	兰考地热水, 70 °C	兰考地热水, 70 °C
2	兰考地热水, 50 °C	兰考地热水, 50 °C
3	兰考地热水, 常温	兰考地热水, 常温
4	自来水, 常温	自来水, 常温

根据室内观察实验过程,温度越高,烧杯内的沉淀物越多,铁片和铁丝的腐蚀情况也越严重。普通铁丝和不锈钢铁丝在不同温度条件下的地热水或自来水环境中的变化情况见图5、图6和表2。



(a)兰考地热水, 70 °C (b)兰考地热水, 50 °C (c)兰考地热水, 常温 (d)自来水, 常温

图5 普通铁丝在不同条件下的的室内观察实验情况(90 d)

Fig.5 Indoor observation experiment of common iron wire in different situations(90d)



(a)兰考地热水, 70 °C (b)兰考地热水, 50 °C (c)兰考地热水, 常温 (d)自来水, 常温

图6 不锈钢铁丝在不同条件下的的室内观察实验情况(90 d)

Fig.6 Indoor observation experiment of stainless steel wire in different situations(90d)

表2 不同材质铁丝在兰考地热水中的腐蚀变化情况(90 d)

Table 2 Corrosion of iron wires of different materials in Lankao geothermal water(90d)

实验条件	普通铁丝	不锈钢铁丝
兰考地热水, 70 °C	不再具有金属光泽,表面被锈斑完全覆盖	被锈块覆盖,仍然具有金属光泽
兰考地热水, 50 °C	腐蚀严重,完全被锈斑覆盖	颜色加深,不再光亮,受腐蚀影响较大
兰考地热水, 常温	完全被腐蚀,腐蚀较为严重	腐蚀程度明显增加,不再具有金属光泽
自来水, 常温	被锈斑覆盖,出现点状锈块,完全被腐蚀	表面覆盖铁锈,较普通铁丝腐蚀程度较慢,但金属光泽不明显

通过对腐蚀产物进行了X射线衍射和衍射图谱的分析(如图7~9),其中兰考地热水、普通铁丝组中,主要产物分别为:70℃实验条件下为NaCl,50℃条件下为CaCO₃、Fe₆(OH)₁₂CO₃、Fe₂(OH)CO₃、Fe(OH)₃,常温实验条件下为CaCO₃、FeOOH。兰考地热水、不锈钢铁丝组中,主要产物分别为:70℃实验条件下为NaCl或铁-硅-氧-金属化合物,50℃实验条件下为Fe₆(OH)₁₂CO₃、Fe₂(OH)CO₃、Fe(OH)₃,常温实验条件下为Fe₆(OH)₁₂CO₃、Fe₂(OH)CO₃、Fe(OH)₃、CaSi₂O₇F₂、CaPO₃(OH)·2H₂O、FeOOH。不同温度条件下,兰考地热水中产生的腐蚀主要沉淀物不同,初步分析,由于温度不同,腐蚀沉淀生成物也不尽相同,地热水回灌过程中,由于回灌水温度降低,一些沉淀物随着温度的变化溶解度降低而产生。

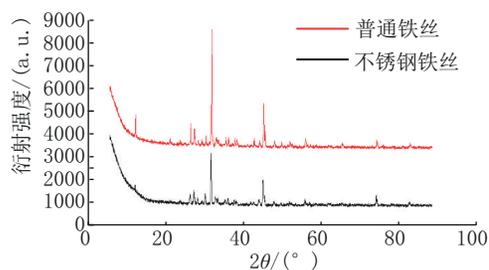


图7 70℃兰考地热水腐蚀产物XRD衍射图谱

Fig.7 XRD diffraction pattern of corrosion products in Lankao geothermal water at 70℃

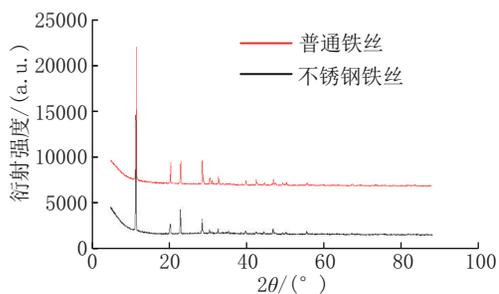


图8 50℃兰考地热水腐蚀产物XRD衍射图谱

Fig.8 XRD diffraction pattern of corrosion products in Lankao geothermal water at 50℃

2.3 钻井与成井工艺的影响

钻井与成井过程中钻井液、孔内事故、过滤器(直径、类型、材质、位置、长度等)、砾料规格及厚度、洗井等都会对未来使用过程中的地热回灌效率产生影响。兰考地区地热井钻井工艺以泥浆正循环钻进

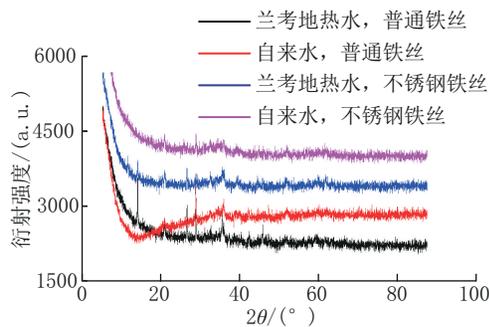


图9 常温实验条件下腐蚀产物XRD衍射图谱

Fig.9 XRD diffraction pattern of corrosion products at room temperature

为主,长时间的钻进过程形成的泥皮容易堵塞地热储层,若成井过程中泥皮清除不彻底,就会对回灌效率产生负面影响。在该地区工程实践中,普通膨润土钻井液体系在兰考地区地热井钻井过程中易发生卡钻事故,通过采用低固相高润滑双聚钻井液体系能够较好地解决上述问题^[8]。有案例表明,兰考地区已建成的地热回灌井通过洗井可以提高回灌量,但其持续时间和回灌效果还有待通过项目的持续运行进一步验证和总结。

3 提高地热回灌效果的对策

鉴于兰考地区地热水水质Cl⁻、溶解性总固体含量高的特点,随着地热回灌井使用时间的增加,井管内腐蚀结垢现象有极大可能会对回灌产生影响。结合兰考地区地热资源开发利用情况、地热水水质的分析以及室内腐蚀观察实验,提高兰考地区地热回灌效果可从以下几个方面着手。

3.1 地热水的处理

通过PHREEQC软件模拟,兰考地区明化镇组地热水可能发生化学沉淀堵塞的矿物是白云石和方解石;馆陶组地热水可能发生化学沉淀堵塞的矿物是云母、白云石、方解石、高岭石和石英。通过室内腐蚀观察实验中沉淀物的XRD衍射分析,不同温度条件下,主要腐蚀沉淀产物包括铁化合物、NaCl、CaCO₃、CaSi₂O₇F₂、CaPO₃(OH)·2H₂O中的一种或几种。建议兰考地区地热水回灌前过滤沉淀物、堵塞物,针对上述化学沉淀或腐蚀沉淀产物选择环保型的阻垢剂、除垢剂等,有效去除井管材料的腐蚀产物,降低化学沉淀堵塞的发生,提高回灌效率。

3.2 井管材料选择

与其他地区地热水水质相比,兰考地区水质 Cl^- 、溶解性总固体、 Na^+ 含量高,属于盐水,具有较高的腐蚀性。耐腐蚀是该地区井管材料选择的重点之一,建议选择耐腐蚀、耐高温的管材,就目前的主流成井管材,推荐使用J55石油套管,不宜使用螺旋钢管、无缝钢管作为成井管材。考虑电偶腐蚀作用^[9],并结合本次兰考地热水腐蚀观察实验中,铁片上捆绑不锈钢铁丝时其铁片的腐蚀速率均高于或基本相当于铁片上捆绑普通铁丝(见图10),尽量避免使用不同材质或材质差别过大的井管和过滤管作为成井材料,否则易形成局部电势差,加快电偶腐蚀。

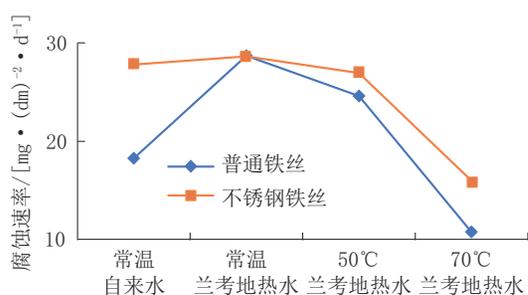


图10 捆绑不同材质铁丝时试片的腐蚀速率

Fig.10 corrosion rate of iron sheet wound with steel wire of different materials

3.3 优化钻井与成井工艺

兰考地区地热供暖发展较快,在地热钻井之前应做好当地水文地质、地热井现状的技术资料收集,吸取此前地热井建井过程的经验,掌握更为详尽的区域地热地质资料。采用钻井液回转钻进工艺时,建议结合兰考地区使用膨润土钻井液体系钻进时在1200 m处发生粘附卡钻事故及其处理经验,提前做好预案,及时调整钻井液体系。目前,气举反循环钻进工艺在河南、北京、辽宁、贵州、天津等地区的地热井钻井中都有成功应用^[10-14],气举反循环钻进工艺较钻井液回转钻进工艺具有更强的携带岩屑能力,对孔壁的堵塞作用小,有助于提高回灌效率。石油钻井工艺的理念是利用大排量、高压、适当的环空间隙,使岩石呈体积破碎并以较高的速度上返,避免岩屑重复破碎、保持井底干净,实现高效率的钻井的目的。在钻井工艺优化方面,建议探索气举反循环、石油钻井工艺在该地区地热钻井中的应用。

地热井成井目的层井径、砾料类型和填充厚度、

洗井是否充分等均会对回灌产生影响。充分的洗井是保障回灌效果的基础。借鉴国内砂岩热储回灌的研究,大口径填砾成井工艺不易造成热储孔隙的堵塞,可以保证回灌的长期正常运行^[15]。

3.4 回灌温度的平衡

目前,兰考地区地热供暖项目的回灌温度在40℃左右。通过初步的室内腐蚀观察实验,结合兰考地区地热回灌调查情况,在分析兰考地区地热水水质、结垢趋势、腐蚀性评价等基础上,温度越高腐蚀速度越缓慢、腐蚀产物越少,有助于提高回灌率。回灌温度通过改变回灌压力对回灌量产生影响,理论上温度越低回灌效果越佳^[16]。建议在实际工作中,优化地热供暖运行过程,找到最优的回灌温度,保证回灌效果。需要结合兰考地区地热水水质情况,做好前期工作,如有针对性的进行回灌水水质的处理,将低温对回灌的影响降至最低,保证回灌效率。

3.5 项目做好选址

结合兰考地区主要断裂带分布情况以及现有地热井回灌情况,在项目可行性研究阶段,应结合地热开发利用情况前期做好勘查工作,尽可能地充分利用主要断裂带进行项目选址,场地条件不允许时,可采用定向井方式,从地质设计上提高回灌效果。

4 结论

通过兰考地区地热水水质分析、室内观察实验、软件模拟等方式,兰考地区地热水腐蚀结垢趋势、回灌影响因素及对策总结如下:

(1)兰考地区地热水 Cl^- 、溶解性总固体含量高,腐蚀性高。通过PHREEQC地球化学模拟软件,明化镇组地热水中方解石、白云石等矿物易发生化学沉淀;馆陶组地热水中高岭石、石英、方解石、白云石、云母等矿物易发生化学沉淀。

(2)兰考地区地热回灌效果的影响因素主要包括:地热水水质的高腐蚀性、地热水化学沉淀产物,钻井过程中钻井液材料对含水层堵塞,洗井不彻底,回灌温度、回灌井选址等。

(3)提高兰考地区地热回灌效果,建议通过化学、物理方式进行阻垢除垢、减少腐蚀结垢产物对回灌井的堵塞作用;选择如J55石油套管等耐腐蚀成井材料,降低腐蚀堵塞产物对回灌效果的影响;采用钻井液回转钻进时,及时调整钻井液体系,探索气举

反循环、石油钻井工艺等钻井工艺的应用,减少钻井过程泥皮对含水层的堵塞,保证回灌效果。

参考文献(References):

- [1] 王俞文,牛海瑞,王茜,等.中深层砂岩热储高效回灌研究[J].石油石化绿色低碳,2022,7(1):65-71.
WANG Yuwen, NIU Hairui, WANG Xi, et al. Study on efficient recharge of middle and deep sandstone geothermal reservoir [J]. Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry, 2022, 7(1):65-71.
- [2] 马忠平,王艳宏,沈健,等.天津馆陶组地热回灌井钻井和射孔工艺探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(8):36-39.
MA Zhongping, WANG Yanhong, SHEN Jian, et al. Discussion on drilling and perforating technologies for geothermal recirculation well in Guantao Formation of Tianjin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(8):36-39.
- [3] 刘雪玲,朱家玲.新近系砂岩地热回灌堵塞问题的探讨[J].水文地质工程地质,2009,36(5):138-141.
LIU Xueling, ZHU Jialing. A study of clogging in geothermal re-injection wells in the Neogene sandstone aquifer [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(5):138-141.
- [4] 马致远,侯晨,席临平,等.超深层孔隙型热储地热尾水回灌堵塞机理[J].水文地质工程地质,2013,40(5):133-139.
MA Zhiyuan, HOU Chen, XI Linping, et al. Reinjection clogging mechanism of used geothermal water in a super-deep-porous reservoir [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(5):133-139.
- [5] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院.河南省兰考县城市规划区地热资源开发利用地质环境影响安全评估报告[R].郑州,2019.
No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Safety assessment report on geo-environmental impact of geothermal resources development and utilization in urban planning area of Lankao county, Henan province [R]. Zhengzhou, 2019.
- [6] 刘婷,王志娟.中原油田兰考六社区利用地热供暖的分析与研究[J].河南水利与南水北调,2015(18):67-69.
LIU Ting, WANG Zhijuan. Analysis and research on geothermal heating for No. 6 community of Zhongyuan Oilfield in Lankao [J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2015, (18):67-69.
- [7] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院.河南省兰考县城市规划区及其周边地热资源调查报告[R].郑州,2019.
No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Investigation report on geothermal resources in the planning area of Lankao county, Henan province [R]. Zhengzhou, 2019.
- [8] 李亚刚.低固相高润滑双聚钻井液体系在地热井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):51-55.
LI Yagang. Application of a low solid phase, high lubricating and double polymer drilling fluid system in geothermal well drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11):51-55.
- [9] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the new era [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3):1-8.
- [10] 河南省地热能开发利用有限公司.多工艺钻井技术在地热资源勘查中应用研究[R].郑州,2014.
Henan Geothermal Energy Development and Utilization Co., Ltd. Application research on multi-process drilling technology in geothermal exploration [R]. Zhengzhou, 2014.
- [11] 王玉国,肖海龙,谢连生.气举反循环钻进工艺在3512 m深的京热164号井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):9-11.
WANG Yuguo, XIAO Hailong, XIE Liansheng. Application of airlift reverse circulation drilling in Jingre 164# well of 3512 m depth [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(2):9-11.
- [12] 郑伯乐,郑秀华,段晨阳,等.气举反循环钻进井壁稳定及适用性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):13-18.
ZHENG Bole, ZHENG Xiuhua, DUAN Chenyang, et al. Discussion on stability and applicability of gas lift reverse circulation drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6):13-18.
- [13] 王剑,王虎,李勇,等.气举反循环钻进工艺在贵州地热井中的推广应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):18-23.
WANG Jian, WANG Hu, LI Yong, et al. Popularization and application of air-lift reverse circulation drilling technology in Guizhou geothermal deep wells [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12):18-23.
- [14] 杨忠彦,贾志,安振营,等.悬挂式独立内管气举反循环在地热钻井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):34-38.
YANG Zhongyan, JIA Zhi, AN Zhenying, et al. Application of air-lifting reverse circulation system with suspension type independent inner pipe in geothermal well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(1):34-38.
- [15] 王仁忠.成井工艺对砂岩热储地热尾水回灌的影响[J].城市建设理论研究(电子版),2017(26):173.
WANG Renzhong. Influence of well completion technology on geothermal reinjection in sandstone geothermal reservoir [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2017(26):173.
- [16] 贺淼,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):44-48.
HE Miao, ZHANG Le, YUAN Yiming, et al. Study on the relationship between re-injection volume and temperature of sandstone geothermal reservoir in Nanzhan area of Dongying city [J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(1):44-48.