

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

王刚, 宋佳, 王盼盼, 秦国强

(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)

摘要:地下水回灌是浅层地热能开发利用中不可缺少的环节,回灌井是实施回灌的关键设施,其施工技术是影响回灌效果的重要因素。选取郑州市东部新城区、西部新城区浅层地热能开发的回灌井为研究对象,分析不同区域地质条件的差异,通过回灌井结构分析地下水的回灌机理,论述影响回灌效果的因素。结合试验井施工情况,论述泥浆正循环钻进、泵吸反循环钻进、冲击钻进等不同钻进工艺的适用条件和施工中存在的问题,以及钢筋砼管、钢管和U-PVC管等不同成井管材对回灌效果的影响,探索提高单位回灌量的针对性措施,为今后郑州市及周边地区浅层地热能开发回灌井的施工提供参考。

关键词:浅层地热能;回灌井;回灌量;泵吸反循环钻进

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)06-0153-09

Drilling technology for recharge wells in shallow geothermal energy development—A case study of the new districts in the east and west of Zhengzhou

WANG Gang, SONG Jia, WANG Panpan, QIN Guoqiang

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

Abstract: Groundwater recharge is an unavoidable step in shallow geothermal development and utilization. The reinjection well is the key facility to carry out reinjection, and its drilling technology is an important factor affecting the effect of reinjection. Taking the recharge wells for shallow geothermal development in the new districts of eastern and western Zhengzhou as the research objects, the differences in geological conditions in different regions are analyzed. The mechanism of groundwater recharge is analyzed in the perspective of the recharge well structure. The factors affecting the effect of reinjection are discussed. With regard to test well construction, this paper discusses the applicable conditions and problems of different drilling techniques, such as mud positive circulation drilling, pump suction reverse circulation drilling and percussive drilling, as well as the impact of the reinforced concrete pipe, steel pipe and U-PVC pipe and other different well pipes on the reinjection effect. To explore the targeted measures to increase the rate of unit recharge. It provides a reference for the construction of shallow geothermal development recharge wells in Zhengzhou and its surrounding areas.

Key words: shallow geothermal energy; recharge well; construction technique; volume of recharge; pump suction reverse circulation

收稿日期:2022-04-20; 修回日期:2022-08-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.021

基金项目:郑州市财政项目“郑州市主城区、东部新城区、西部新城区浅层地热能调查评价”(编号:郑财招标采购—2020—439)

第一作者:王刚,男,汉族,1971年生,正高级工程师,研究方向为水文地质、工程地质、环境地质,河南省郑州市南阳路56号,617623706@qq.com。

引用格式: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.

0 引言

地热是一种清洁、可再生资源,因其社会效益、经济效益和环保效益显著而受到国内外的高度重视。地热资源根据埋藏深度可分为浅层地热能、中深层地热能 and 干热岩等类型^[1]。浅层地热能一般指200 m深度范围内的地热,也是最容易被开发利用的地热资源。在浅层地热能开发利用的过程中,地下水作为能量传递的介质,需要封闭式循环使用,即取热能完成的回水要同层回灌至地下含水层,利用地下热能而不消耗水资源。若不实施回灌,势必导致区域地下水位持续下降,造成资源枯竭,并引发一系列的地质环境问题。马忠平等^[2]提出地热回灌开发方式是资源可持续发展的重要途径,地热尾水回灌是资源持续开发的主要手段。李鑫等^[3]认为地下水回灌缓解了华北平原地区因地下水过度开采而导致的地下水位急剧下降、水资源枯竭、地面沉降等一系列的水资源与水环境问题。宋前进等^[4]认为封闭循环利用地热资源,取热后加压同层回灌的方式能有效降低热储层流场的漏斗效应。回灌井是实施地下水回灌的关键设施,其施工技术直接影响到井的回灌效果。曾梅香等^[5]通过研究天津市新近系回灌井的钻探工艺和回灌效果,得出回灌井与开采井的钻探工艺和成井方案相同会导致回灌率偏低的结论。

河南省中低温地热能资源分布广泛,地热资源热储面积为全省国土面积的25.2%^[6]。目前,浅层地热能开发利用主要有地下水源热泵和土壤源热泵等2种方式,其中地下水源热泵应用比较多。地下水源热泵系统换热效率高、占用地下空间少、投资造价低,其突出问题是在细颗粒地层回灌率低,对地质环境影响较大^[7]。本文以郑州市东部新城区、西部新城区浅层地热能开发的回灌井为研究对象,阐述不同区域地质条件的差异,通过回灌井的结构分析地下水的回灌机理。结合试验井实践论述几种钻进工艺的适用情况和施工中存在的问题,分析不同钻进工艺和成井管材对回灌效果的影响,探索提高回灌率的针对性措施,为今后郑州市及周边地区浅层地热开发中回灌井的施工提供参考。

1 区域地质条件

1.1 地形地貌

郑州市位于华北平原的南部,黄河南岸,地貌单

元属于豫西黄土丘陵向豫东平原的过渡地带,总体地势是南西较高,向北东逐渐降低。西部黄土丘陵地形变化较大,地面高程150~259 m,坡度10%~15%,中部山前倾斜平原地形相对高差约130 m,坡度2%~3%,东北部地形平坦,标高110~150 m,相对高差30~50 m。郑州市西部新城区面积263.0 km²,地貌单元包括黄土丘陵和山前冲洪积倾斜平原。东部新城区面积459.0 km²,地貌单元为黄河冲积平原。

1.2 地层结构

郑州市属华北地区华北平原地层分区,因地质成因和地貌单元不同,西部新城区与东部新城区200 m深度范围内的地层结构和岩性特征有差异,地表出露地层情况见图1。

1.2.1 西部新城区

西部新城区200 m深度内地层由第四系和新近系的地层组成,自上而下分别为:

(1)上更新统(Qp³)。因沉积物来源不同西南部与东北部岩性有明显差异。西南部主要为黄色粉土、黄土状粉土,夹薄层细砂,含少量钙质结核;东北部砂层多,为黄色细砂、中细砂等,层厚20~50 m,底板埋深20~50 m。

(2)中更新统(Qp²)。黄棕色,岩性以粘土、粉质粘土、细中砂、粗中砂为主,底部有砂卵石层。自西向东、自西南向东北粒度由细变粗,砂层减少,夹有数层钙质结核,层厚50~100 m,底板埋深90~130 m。

(3)下更新统(Qp¹)。浅褐色、浅棕色,岩性以粘土为主,夹细中砂、含砾细中砂、砂质粘土及钙质结核层。砂层粒度自西、西南向东北由粗变细,泥质增加,厚度20~50 m,底板埋深70~170 m。

(4)新近系(N)。灰黄、淡棕色,岩性以细中砂、含砾细中砂及粘土为主,局部粘土较厚,揭露深度200 m。

1.2.2 东部新城区

东部新城区200 m深度范围内为第四系地层,自上而下分别为:

(1)全新统(Qh)。黄灰、灰色,岩性为黄河冲积形成的粉土、粉砂、细中砂、中粗砂等,自南向北颗粒由细变粗,厚度逐渐增大,厚度15~30 m。

(2)上更新统(Qp³)。上部为灰黄色粉土、灰褐色粉质粘土、粉细砂及粘土透镜体,下部为黄褐色粉



图1 项目区地质图

Fig.1 Geology in the project area

土、细中砂及中粗砂,自西、西南向东、东北粒度由粗变细,层厚40~60 m,底板埋深60~80 m。

(3)中更新统(Qp^2)。黄棕色,岩性以粘土、粉质粘土、粉细砂、中细砂、粗中砂为主。自西南向东北其粒度由粗变细,砂层减少,泥质增加,层厚40~70 m,底板埋深110~150 m。

(4)灰绿色、黄褐色,岩性以粉土、粉质粘土和砂为主。砂层粒度自西、西南向东、东北由粗变细,埋深由小到大,层厚30~80 m,揭露深度200 m。

1.3 水文地质条件

本区200 m以内地下水类型为松散岩类孔隙潜水,主要储存于第四系及新近系地层中。含水层岩性主要为粉土、细砂、细中砂、中粗砂等。地下水位埋深由西南向东北逐渐由深变浅,西部新城区最深超过50.0 m,东部新城区最浅不到5.0 m。地下水补给主要为大气降水、灌溉回渗及侧向径流,由西、西南向东及东北径流,排泄方式为开采、径流及越流等。区内200 m以浅的地下水多为混合开采,地下水漏斗区明显,不同深度含水层之间水力联系较密切。南水北调中线实施后,区内供水水源结构发生了变化,地下水水位均有恢复上升现象^[8],不同区域上升的程度不一,漏斗区也有变化。浅层地热能开发的地下水要有足够的水量和循环深度,从而形成一个从补给、径流、储存到排泄的地下水环流系统,在地下径流过程中逐渐被加热,形成中低温热水^[9]。

2 回灌井结构与回灌机理

2.1 回灌井结构与材料

回灌井的作用是将取热完成后的回水同层回灌进入地下含水层,一般情况下采取一径到底原则,即通孔同径。最初,回灌井是采用传统供水井的施工工艺和技术,成孔直径600~800 mm,下 $\varnothing 273\sim 315$ mm的管材,在含水层的层位设置滤水管,滤水管外包尼龙滤网。含水层段孔壁与井管之间环状间隙回填滤料,含水层上方采用粘土球止水。郑州西部新城区、东部新城区地质条件有差异,含水层厚度不一,设置滤水管的长度也不一致。

目前,浅层地热能利用中回灌井的井管有钢管、铸铁管、钢筋混凝土管、混凝土管及U-PVC管等。钢管采用焊接方式连接,铸铁管采用管箍丝扣连接方式,滤水管均采用钢(铸铁)管打孔后缠丝管,开孔为圆形,呈梅花形均匀布置。钢筋混凝土管和混凝土管的滤水管均为同材质滤水管。U-PVC管采用管箍丝扣连接方式,滤水管采用割缝管或打孔缠丝管。

2.2 地下水回灌机理

地下水回灌是将取热能完成的回水通过水泵排到回灌井内,在井内产生一定的水头高度,与地下水水位之间造成水压差 Δh ,见图2。

井水在水压差作用下通过滤水管和滤网进入井管四周的滤料层,再通过滤料层向四周砂层、粉土等

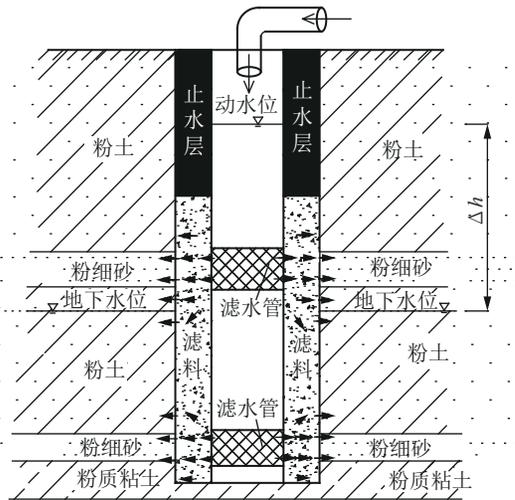


图2 地下水回灌机理示意

Fig.2 Groundwater recharge mechanism

含水层中渗透,进而逐步向远处扩散。水流在井四周形成既有径向流、又有竖向流的三维水流,经过一定长度的过渡,逐渐转化为以径向流为主的二维水平流^[10]。地下水回灌过程中,水要通过滤水管、滤料层、滤料与地层接触面等多个过水面才能向四周地层中渗透、扩散。因此,单井回灌量就受回灌压力和这些过水面透水状况的影响。在这些过水面中,滤水花管的过水断面最小,但孔隙度最大,过水效率最高。滤料层与地层接触面的面积最大,但透水性差,过水效率最低,对单井回灌量的影响也最大。由于不同钻进工艺所形成的井孔井壁状态不一样,也就是滤料层与地层接触面的透水状态不一样,从而导致回灌效果不一致。表面看地下水回灌是抽水的逆过程,但两者的机理和制约因素不同。由于抽水 and 回灌过程中水的径流途径和顺序不同,渗流过程中各种阻水因素发挥的作用不一样,以致单井出水量和单井回灌量可能不同,甚至差异较大。

3 回灌井施工工艺

3.1 钻进工艺

郑州市 200 m 深度范围内地层为第四系和新近系地层,岩性包括粉土、粉质粘土、粉细砂、细中砂等,局部钙质结核富集,甚至胶结成层。目前,回灌井成孔常采用的钻进工艺有:泥浆护壁正循环、泵吸反循环、冲击钻进等 3 种方式,需要根据场地地质条件、回灌井的工程特点等因素确定科学、合理、适用的钻进工艺。

3.1.1 泥浆护壁正循环

泥浆护壁正循环是最常采用的钻进工艺,对地层的适应性比较强。针对 200 m 深度的钻孔,一般采用 SPJ-300 型钻机配套 BW-280/30 型泥浆泵,钻具组合为: $\text{O}311 \text{ mm}$ 三牙轮钻头 + $\text{O}114 \text{ mm}$ 钻铤 + $\text{O}89 \text{ mm}$ 钻杆^[11]。成孔直径 311 mm,钻进到底后采用扩孔钻头扩孔至设计井径 800 mm。这种钻进工艺的优点是井孔垂直度好,对地层适应性强,在任何区域都可以顺利施工至 200 m 深度。缺点是钻进效率不高,一般情况下为 0.5~1 m/h;洗井时间长,而且冲孔、换浆、洗井等工序的质量对回灌效果影响大。

3.1.2 泵吸反循环

泵吸反循环是松散层施工水井常用的钻进工艺,工作原理是利用砂石泵(离心泵)在钻杆内腔造成负压产生抽吸作用,使钻杆内腔液体进行反循环的钻进工艺。设备选取 GF-200 型钻机或 ZJ-80 型钻机,钻具组合为:刮刀钻头 + $\text{O}168 \text{ mm}$ 钻杆,一径成孔。由于这种钻进工艺是靠离心泵的作用排渣,井径太大或井深较大时排渣困难,成孔直径、钻进深度都受到一定程度的制约。这种钻进工艺的优点是:清水钻进,成井效率高,钻进速度可达到 10 m/h。钻进时钻头压入土体并回转,地层一经搅动,钻渣就很快被循环介质携带出孔外,因此井壁几乎没有泥皮,便于洗井。缺点是钻进深度受限制,而且不适用在坚硬的地层中施工。

3.1.3 冲击钻进

在钙质结核富集的地层或卵石层需要采用冲击钻进工艺,稠泥浆护壁,利用捞渣筒捞渣。设备选用 GZ-2000 型冲击钻机和配套捞渣筒。这种钻进工艺解决了软硬不均匀地层的钻进问题,适用于郑州西部新城钙质结核发育地层的钻进,而且施工设备和工艺简单。钻进效率不高,一般情况下钻进速度为 0.5~0.8 m/h。为防止井壁坍塌,钻进过程中需要稠泥浆护壁,成孔后井壁有较厚的泥皮存在,对回灌效果影响较大。

3.2 成井工艺与管材

回灌井成井工艺是钻进成孔之后的主要工艺,包括扫孔(扫去井壁泥皮)、冲孔(冲净井内泥砂岩屑)、换浆(把井内浓泥浆稀释)、下管、填砾、止水、洗井等工序。除止水外,这些工序对回灌井的回灌效果均会造成不同程度的影响,不同成孔钻进工艺对

后续成井工艺的要求也有差别。成井管材可采用钢管、铸铁管、钢筋混凝土管、混凝土管、U-PVC塑料管等几种,滤水管也是相应的材质。受管材材料强度的限制,滤水管的开孔率各不相同^[12],见表1。

表1 各类井管滤水管的开孔率

Table 1 Openness rate of all kinds of screen pipes

管材类型	钢管	铸铁管	钢筋混 凝土管	混凝 土管	塑料管
开孔率/%	25~30	20~25	5~15	5~10	5~10

通过以上对比可以看出,钢管开孔率最大,滤水管相同长度的情况下过水效果最好。混凝土管、塑料管的开孔率最小,单位长度过水效果也最差。在抗腐蚀性能方面,钢管的抗腐蚀性最差,铸铁管是弱抗腐蚀性,钢筋混凝土管、混凝土管的抗腐蚀性强,地下水对塑料管则基本没有腐蚀性。对于200 m深度的回灌井,铸铁管质量大,不利于施工,很少被采用。普通混凝土管的强度满足不了100 m管自身重力的要求,深度>100 m时需要用钢筋混凝土管,管节之间采用焊接方式连接。U-PVC塑料管抗腐蚀性强,据调查其最大成井深度可达400 m,只是滤水管的开孔率偏小,下管时还需要采取有效抗浮措施。

3.3 不同钻进工艺施工中存在问题

泥浆护壁正循环是利用钻头转动破碎岩土体,通过泥浆循环将破碎物排出井外,钻进深度可以通过调整钻机、泥浆泵的功率完成,井深基本不受限制。井径800 mm、深度200 m的回灌井在任何地层条件下都可以顺利完成。由于在钻进过程中为保持孔壁稳定需要泥浆护壁,一般泥浆密度 <1.25 g/L,成孔后需要进行换浆,将稠泥浆置换成稀泥浆,泥浆密度 >1.15 g/L时才能下管。下管后要反复冲孔,确保井壁、井底的泥块和沉渣被清除后,才能实施投滤料等后续工序。

泵吸反循环是靠离心泵的作用实施排渣。在郑州市东部新城区,井径800 mm的回灌井140 m深度范围内钻进效率非常高,24 h即可完成。钻至140 m后受泵吸工作原理的制约,泵吸方式排渣非常困难,井底部土层扰动严重,进尺缓慢,而且经常出现井壁坍塌现象。根据统计,泵吸反循环在东部新城区的最大钻进深度为195 m,最佳钻进深度是140 m。西部新城区50 m以深地层局部钙质结核富集,

甚至胶结成层,泵吸反循环施工进尺缓慢,需要采用冲击或其他方式破碎钙质结核层。在没有钻探进尺情况下的反复抽吸,易造成钙质结核层上部的软地层坍塌。泵吸反循环施工直径800 m的回灌井深度可以达到120 m左右,效率非常低,并需要辅助冲击钻进的组合式钻进工艺才能顺利完成。

冲击钻进是依靠冲击破碎岩土成孔,施工中冲击振动会影响井壁的稳定性。在易坍塌的砂层钻进时,要按照1:1投入粘土,用冲击锥以小冲程(500 mm)反复冲击,使井壁形成均匀的泥膏层,发挥护壁作用。遇到流沙或厚层砂卵石层时,需要增加粘土用量,加大泥浆浓度,以保证井壁稳定。在实施刷孔、换浆、冲孔过程中,经常会出现井壁坍塌现象。为保证回灌效果,下管前需要刷孔以破除井壁的泥皮,并实施换浆、冲孔等工序,成井后需要采用空压机震荡、深井泵等多种方法联合洗井。井壁泥皮不易排出时,还要采用活塞洗井、化学洗井等其他方法联合进行^[11],在西部新城区钙质结核富集的地层条件下,可以钻进施工至200 m,但整体钻进效率低,200 m深度需要15~20 d。这种工艺在郑州东部新城区软土层施工时则经常遇到井壁坍塌现象,甚至会出现钻机整体下陷到地面下的严重事故,施工效率低。

4 效果分析

4.1 地质条件和施工工艺的影响

在郑州市西部新城区、东部新城区同一场地分别施工2眼抽水/回灌试验井,同一区域的井径、深度及井身结构均相同,分别采用泥浆护壁正循环和泵吸反循环2种工艺施工。试验井深度西部新城区为150 m,东部新城区为120 m;其余成井参数相同,孔径700 mm、下 \varnothing 360 mm钢管,滤水管长度45 m,滤料为1~3 mm的优质石英砂,成井完成、洗井达到水清砂净的标准后,分别进行抽水、回灌试验,结果见表2。

通过对比试验结果可以看出:郑州东部新城区与西部新城区试验井的单位出水量、单位灌水量差别非常大,而且采用不同施工工艺的单位出水量、单位灌水量差别也较大。如图3所示,采用泥浆护壁正循环时,东部新城区井的单位出水量、单井回灌量分别是西部新城区的7.8倍和14.2倍;采用泵吸反循环时,东部新城区井的单位出水量、单井回灌量分

表2 钻进工艺试验井试验结果
Table 2 Test results of drilling test wells

场 地	施工 工艺	井深/ m	含水层		静水 位/m	抽水试验		回灌试验		单位出水 量/[m ³ ·(h· m) ⁻¹]	单位灌水 量/[m ³ ·(h· m) ⁻¹]
			岩性	厚度/ m		水位变 幅/m	出水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水位变 幅/m	回灌量/ (m ³ ·h ⁻¹)		
西部新城区	正循环	150	细砂、粉砂	52.0	45.1	25.0	50.0	-42.7	-31.0	2.00	0.73
	反循环					13.2	55.0	-39.5	-38.0	4.17	0.96
东部新城区	正循环	120	细砂、中粗砂	50.0	5.6	4.71	73.4	-5.5	-57.1	15.59	10.39
	反循环					2.15	57.1	-2.9	-73.4	26.59	25.62

别是西部新城区的6.4倍和26.7倍。在郑州东部新城区泵吸反循环试验井的单位出水量、回灌量分别是泥浆护壁正循环试验井的1.71倍和2.47倍,西部新城区泵吸反循环试验井的单位出水量、回灌量分别是泥浆护壁正循环试验井的2.09倍和1.32倍。还发现单位出水量与单位回灌量不是简单的正比关系,不同地质条件下单位出水量与单位回灌量的差值也不同。结合地质条件综合分析,含水层颗粒越粗,越有利于回灌,粗砂、中砂含水层的单位回灌量为单位出水量的40%~70%,中细砂含水层的单位回灌量为单位出水量的30%~50%,细砂、粉砂含水层中单位回灌量小于单位出水量的30%^[13]。

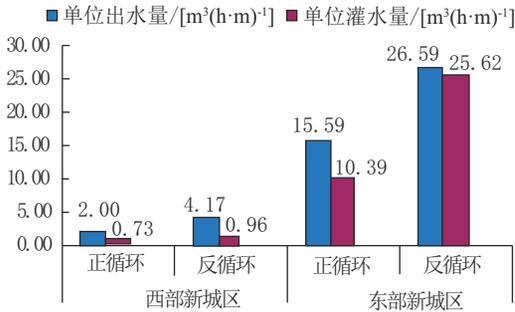


图3 不同施工方法的出水量、灌水量对比

Fig.3 Comparison of yield and recharge between various drilling processes

4.2 成井管材的影响

由于不同成井管材滤水管的开孔率不同,造成成井的回灌效果差异也比较大。在西部新城区采用冲击钻进施工3眼深度202m的试验井,分别采用钢筋砼管、钢管和U-PVC管等3种管材,除管材外其他成井工艺和辅助材料均一样。在东部新城区采用泵吸反循环工艺施工3眼深度160m的试验井,分别采用钢筋砼管、钢管和U-PVC管,除管材外其

他成井工艺和辅助材料一样。洗井完成后进行抽水和回灌试验,试验结果见图4、表3。

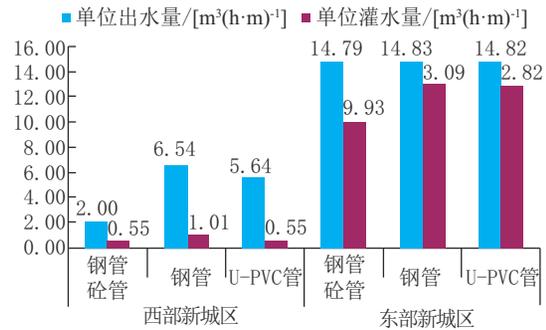


图4 不同井管管材的的出水量、灌水量对比

Fig.4 Comparison of yield and recharge between various pipe materials

试验结果和对比可以看出:在郑州西部新城区采用冲击钻成井工艺时,钢管井的单位出水量值最大,分别是U-PVC管井的1.16倍、钢筋砼管井的3.27倍。钢管井的单位回灌量也最大,是U-PVC管井和钢筋砼管井的1.84倍。U-PVC管试验井单位出水量是钢筋砼管井的2.82倍,而两者的单位回灌量却相同,分析是由于U-PVC管在回灌过程中比抽水过程的阻水效应更强所致。

在郑州东部新城区采用泵吸反循环成井工艺时,钢管井、钢筋砼管井和U-PVC管的单位出水量接近,但钢管井的单位回灌量分别是U-PVC管井、钢筋砼管井的1.02倍和1.31倍。

4.3 施工效率分析

采用不同钻进工艺的施工效率不同^[14],成孔后其他后续成井工艺的效率也差别较大,选择具有代表性的不同施工工艺的试验井各3眼,单井成井工序的施工时间和洗井方式见表4。

表3 管材试验井试验结果

Table 3 Test results of pipe test wells

场 地	管材类型	井深/ m	含水层		静水 位/m	抽水试验		回灌试验		单位出水 量/[m ³ ·(h· m) ⁻¹]	单位灌水 量/[m ³ ·(h· m) ⁻¹]
			岩性	厚度/m		水位变 幅/m	出水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水位变 幅/m	回灌量/ (m ³ ·h ⁻¹)		
西部新城区	钢筋砼管	202	细砂、中	42.1	35.7	7.0	46.6	-32.7	-17.9	2.00	0.55
	钢管	202	砂、砂	50.8	34.9	7.0	44.8	-31.9	-32.1	6.54	1.01
	U-PVC管	202	卵石	42.5	35.4	7.0	35.6	-34.2	-18.9	5.64	0.55
东部新城区	钢筋砼管	160	粉砂、细	65.9	8.16	5.2	76.9	-6.0	-59.6	14.79	9.93
	钢管	160	砂、中	60.3	8.75	5.2	77.3	-4.7	-61.5	14.83	13.09
	U-PVC管	160	砂	56.2	8.21	5.2	77.1	-6.0	-76.9	14.82	12.82

表4 不同成井工艺试验井的施工时间

Table 4 Construction time of test wells with different completion technology

编号	井深/m	成孔工艺	管材	施工时间/h						洗井方式
				成孔	刷孔壁	换浆冲孔	下管	洗井	总历时	
C2	116.0			144		16	5	42	207	空压机、深井泵组合式 洗井
C4	70.0	正循环钻进	钢筋砼管	48		8	3	36	95	
C5	70.0			48		8	3	36	95	
K7	160.0		钢筋砼管	48			7	10	65	深井泵洗井
K8	161.0	反循环钻进	U-PVC管	46			7	10	63	
K10	164.0		钢管	50			6	10	66	
K1	202.0		钢筋砼管	432	24	24	8	72	560	化学洗井、空压机、深 井泵组合式洗井
K2	201.7	冲击钻进	钢管	420	24	24	7	72	547	
K4	203.0		U-PVC管	480	24	24	8	72	608	

通过对比可以看出:泵吸反循环的钻进效率最高,不需要刷井壁、换浆等工序,只需要冲孔清除井底沉渣,而且洗井方式简单,效率高,用时少。据统计,采用泵吸反循环24 h内可钻进至195 m,但140 m深度后钻进效率迅速降低,140~195 m需要钻进240 h,甚至更长时间。在西部新城区有多层钙质结核胶结成层,泵吸反循环要冲击等其他钻进工艺辅助才能顺利完成。采用泥浆护壁正循环工艺时,冲孔、换浆是必不可少的工序,而且洗井工艺复杂,经历时间较长。采用冲击钻进时不仅要冲孔、换浆,还要充分刷孔,破除井壁的泥皮,洗井工艺更复杂,经历时间更长。

5 针对性措施

影响回灌井回灌效果的主要因素包括含水层透水性、滤料层渗透性、钻进工艺、管材和成井质量。碎石滤料层渗透系数比含水砂层的渗透系数大得

多^[15],而含水层透水性是没有办法改变的,为提高单井回灌量可以通过优化钻进工艺和井身结构、科学选择管材、提高成井质量等方法。泵吸反循环是提高回灌率的最佳钻进工艺,其制约因素是地层条件和钻进深度。在郑州市东部新城区,回灌井首选采用泵吸反循环钻进工艺,设计深度140 m。为提高单井回灌量,将井径扩大到800~1000 mm,采用钢管井管,滤料采用1~3 mm的优质石英砂,回灌效果明显提高。针对郑州西部新城区的坚硬地层与钙质结核层,可先采用正循环钻进预成孔,然后再采用泵吸反循环成井孔,洗井方式选用深井泵洗井。采用冲击钻进时必须充分刷孔、破除井壁泥皮,并采用空压机震荡、活塞及深井泵等组合式洗井工艺。西部新城区为黄土丘陵、山前冲洪积倾斜平原区,含水层为第四系和新近系的砂砾岩,局部钙质胶结成层,而岩性特征和孔隙率是影响回灌效果的主要因素^[16]。西部新城区浅层地温属于层状热储,地热回

灌^[17]效果不好,建议回灌井井深也不宜超过180 m,成孔工艺也可以考虑采用气举反循环^[18],并合理确定成井工艺每个环节^[19]。浅层地热能开发利用中回灌井还应根据场区的地质条件、岩土的物理性质等选择合适的钻进工艺及参数^[20],还要对地下水实施长期监测,以了解地热开发对区域地下水流场造成的影响^[21]。

6 结论

(1)郑州市西部新城区、东部新城区的地质条件差异较大,回灌井的单位回灌量差别也较大。采用正循环钻进工艺情况下,东部新城区井单位出水量、单井回灌量分别是西部新城区的7.8倍和14.2倍;采用泵吸反循环工艺情况下,东部新城区井单位出水量、单井回灌量分别是西部新城区的6.4倍和26.7倍。从实施地下水回灌方面考虑,东部新城区开发利用浅层地热能的条件优于西部新城区。

(2)钻进工艺对回灌井的单位出水量和回灌量影响较大。东部新城区泵吸反循环施工井的单位出水量、回灌量分别是泥浆护壁正循环施工井的1.71倍和2.47倍,西部新城区泵吸反循环施工井的单位出水量、回灌量分别是泥浆护壁正循环施工井的2.09倍和1.32倍。东部新城区的回灌井应首选采用泵吸反循环钻进工艺,合理成井深度为140 m。西部新城区的回灌井深度宜确定为180 m,采用正循环预成孔,再采用泵吸反循环方式成孔。

(3)成井管材对回灌井的单位出水量和回灌量有影响。钢管井的单位出水量值最大,分别是U-PVC管井的1.16倍、钢筋砼管井的3.27倍。钢管井的单位回灌量也最大,是U-PVC管井和钢筋砼管井的1.84倍。回灌井应优先选用钢管材质。地下水回灌不是简单的抽水逆过程,单位出水量与单位回灌量有差异,尤其是采用冲击钻进工艺、U-PVC管时差异很大,分析是由于U-PVC管在回灌过程中比抽水过程的阻水效应更强所致,各种管材的阻水效应有待进一步研究。

(4)为提高回灌井的单井回灌量,可以将井径扩大到800~1000 mm,并采用1~3 mm的优质石英砂作为滤料。必要时采取化学洗井、空压机震荡及深井泵等组合式洗井方式,确保洗井效果。

参考文献(References):

- [1] 尤伟静,刘延锋,郭明晶. 地热资源开发利用过程中的主要环境问题[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 24-28, 34.
YOU Weijing, LIU Yanfeng, GUO Mingjing. Environmental issues in the development and utilization of geothermal resources [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(2) 24-28, 34.
- [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] 李鑫,孙亚军,陈歌,等. 高矿化度矿井水深度转移存储介质条件及影响机制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 17-28.
LI Xin, SUN Yajun, CHEN Ge, et al. Medium conditions and influence mechanism of high salinity mine water transfer and storage by deep well recharge [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 17-28.
- [4] 宋前进,王刚,许一川,等. 深层地热能开发及其对地热水流场的影响——以兰考县深层地热能开发为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 184-193.
SONG Qianjin, WANG Gang, XU Yichuan, et al. Development of deep geothermal energy and its influence on geothermal water flow field: Taking the development of deep geothermal energy in Lankao county for an example [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 184-193.
- [5] 曾梅香,李会娟,石建军,等. 新近系热储层回灌井钻探工艺探索[J]. 地质与勘探, 2007, 43(2): 88-92.
ZENG Meixiang, LI Huijuan, SHI Jianjun, et al. The study on drilling technique of tertiary reservoir reinjection well [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(2): 88-92.
- [6] 卢予北,张古彬,陈莹. 河南省地热资源开发利用现状与问题研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 35-39.
LU Yubei, ZHANG Gubin, CHEN Ying. Current situation of development and utilization of geothermal resources in Henan and the issue study [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10): 35-39.
- [7] 卢玮,尚永升,申云飞. 浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计——以郑州市浅层地热能示范工程为例[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 146-153.
LU Wei, SHANG Yongsheng, SHEN Yunfei. Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system—Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 146-153.
- [8] 焦珣,高淑琴,张岩,等. 南水北调中线工程对河南平原第四系地下水资源的影响[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 193-200.

- JIAO Xun, GAO Shuqin, ZHANG Yan, et al. Influences of the mid-route of the south-north water diversion project on quaternary ground-water resources in the henan plain[J]. Quaternary Sciences, 2010,30(1):193-200.
- [9] 罗文行,孙国强,房艳国,等.景洪市嘎栋地热井特征及成井工艺总结分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):257-260.
- LUO Wenxing, SUN Guoqiang, FANG Yanguo, et al. The features of geothermal well in Gadong of Jinghong city and the well completion technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):257-260.
- [10] 毛永熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,2003:9-199.
- MAO Yongxi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003:9-199.
- [11] 王刚,王烁,赵建粮,等.地下水监测井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):51-56.
- WANG Gang, WANG Shuo, ZHAO Jianliang, et al. Ground-water monitoring wells drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):51-56.
- [12] GB/T 50296—2014,管井技术规范[S].
- GB/T 50296—2014, Technical code for tube well[S].
- [13] 河南省地质调查院.郑州市浅层地温能调查评价报告[R].郑州,2019.
- Henan Geological Survey Institute. Report on investigation and evaluation of shallow geothermal energy in Zhengzhou [R]. Zhengzhou, 2009.
- [14] 王刚,李莹,黄烜,等.郑州市地面沉降监测基岩标施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):82-86.
- WANG Gang, LI Ying, HUANG Xuan, et al. Construction technology of bedrock mark for ground subsidence monitoring in Zhengzhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(4):82-86.
- [15] 李旺林,束龙仓,李砚阁,等.承压含水层非完整反滤回灌井的稳定流计算[J].水文地质工程地质,2007,34(2):67-70.
- LI Wanglin, SHU Longcang, LI Yange, et al. Calculation of steady state flow of a partially penetrating recharge well with a filter layer in a confined aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,34(2):67-70.
- [16] 高宝珠,曾梅香.地热对井运行系统中回灌井堵塞原因浅析及预防措施[J].水文地质工程地质,2007,34(2):75-80.
- GAO Baozhu, ZENG Meixiang. Causes and prevention measure of clogging in the reinjection well of a geothermal double-well system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,34(2):75-80.
- [17] GB/T 11615—2010,地热资源地质勘查规范[S].
- GB/T 11615—2010, Geologic exploration standard of geothermal resources[S].
- [18] 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.
- [19] 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, ZHEN Shulou, WANG Zhenfu. Discussion on deep geothermal well completion technology in central Shaanxi area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(5):36-39.
- [20] DB41/T 1005—2015,浅层地热能钻探技术规范[S].
- DB41/T 1005—2015, Technical code for shallow geothermal energy drilling[S].
- [21] GB/T 51040—2014,地下水监测工程技术规范[S].
- GB/T 51040—2014, Technical code for groundwater monitoring[S].

(编辑 李艺)