

地下水源热泵水井泵砂与堵塞原因分析

王永军¹, 段新胜², 刘朝阳³

(1. 中石化新星湖北新能源开发有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 湖北省地质局武汉水文地质工程地质队, 湖北 武汉 430000)

摘要:地下水源热泵系统常会出现抽水井泵砂、抽水井和回灌井堵塞等问题,影响系统的正常运行或系统效率。以湖北省荆州市某地下水源热泵工程为例,分析了江汉平原广泛分布的卵砾石夹细砂含水层中成孔方法选择、滤料及过滤管设计中存在的问题;指出了目前在过滤管外包不锈钢丝网是防止在细砂层中水井泵砂的有效手段之一,但宜与泥浆密度轻、对地层污染小的反循环成孔工艺配合使用,且仍要根据含水层的颗粒级配曲线选择滤料,发挥滤料的过滤作用,避免过滤压力转移到包网过滤管,以减少抽水井堵塞。

关键词:地下水源热泵;钻井方法;水井堵塞;泵砂;井损

中图分类号:P641.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)04-0037-05

Analysis of sand entry and clogging in wells in the ground source heat pump system

WANG Yongjun¹, DUAN Xinsheng², LIU Chaoyang³

(1. Sinopec Xinxing Hubei New Energy Development Co., Ltd., Wuhan Hubei 430040, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3. Wuhan Hydrogeology Engineering Geology Institute, Hubei Geological Bureau, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: Sand entry and well clogging in the groundwater heat pump system often affect the operation and efficiency of the system. Taking a project in Jingzhou City as an example, analysis is made of selection of the water well drilling method in gravel with fine sand aquifer occurring widely in Jianghan Plain and the problems with pack material and the screen design. It is pointed out that one of the effective means to prevent sand entry from the fine sand layer is to wrap the stainless steel wire mesh around the screen pipe at present; anyhow it's better to be used in conjunction with the reverse circulation drilling method, and the pack material should be selected according to the gradation curve of the aquifer to avoid the transfer of the filtration pressure to the screen pipe, thus reducing well clogging.

Key words: ground source heat pump system; drilling method; well clogging; sand entry; well damage

0 引言

地下水源热泵系统的最大特点是,如果抽水井和回灌井之间不发生热短路(或称为热贯通),则抽取的地下水温度接近于土壤初始平均温度(该温度一般比项目所在地年平均气温高 1~4 °C^[1]),夏天明显低于环境空气温度,冬天明显高于环境空气温度,是理想的冷热源,地下水源热泵系统的能效比(制冷量或制热量与所耗电能之比)一般可达 4.5~

6.0^[2],高于埋管地源热泵系统,而且初投资还可节省 29%左右^[3],因此在地下水资源较丰富的地区,往往首选地下水源热泵系统。

但实际应用时,地下水源热泵系统常出现如下主要问题:(1)水井出水量逐年减小(即水井降深逐年增大)且含砂量超标;(2)回灌难,普遍存在将回水管与城市地下水排污管道相连,既浪费地下水资源,又会引起地下水位下降,同时污染地表水等。为了

收稿日期:2018-06-30; 修回日期:2019-02-25 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.04.007

基金项目:中石化集团新星石油有限责任公司项目“浅层地热能及地下水源热泵关键技术研究”(编号:10500000-16-ZC0607-0002)

作者简介:王永军,男,汉族,1973年生,高级工程师,主要从事钻井及地热能开发利用工作,湖北省武汉市东湖新技术开发区华工园一楼5号,1471577395@qq.com。

引用格式:王永军,段新胜,刘朝阳.地下水源热泵水井泵砂与堵塞原因分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):37-41.

WANG Yongjun, DUAN Xinsheng, LIU Chaoyang. Analysis of sand entry and clogging in wells in the ground source heat pump system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):37-41.

进一步推广应用具有较大节能潜力的地下水热泵技术,需要对目前存在的问题进行分析研究。

1 水井泵砂与堵塞原因分析

综合已有研究成果,水井泵砂与堵塞的主要原因可归纳如下。

(1)水文地质勘察时,对含水层位置和厚度确定不准,造成过滤管长度偏差或相对于地层层位竖向安装位置错位^[4],产生水井泵砂事故。

(2)过滤管类型及滤料的选用与含水层不匹配。如果过滤管和滤料通道尺寸太大,则不能有效地过滤地下水造成泵砂事故;反之如果过滤管和滤料通道尺寸太小,则会造成过滤管堵塞,水井的井损过大^[5],增大水泵功耗。

(3)如果抽水井的井损不断增大,即抽水井降深不断增大,当深井潜水泵吸入口在井内水位以下淹没深度减小到一定程度后,则抽取地下水时就可能吸入空气,换热后将含有空气的水通过回灌井回灌到含水层;如果在回灌井的井口采用倾注式回灌,或者回灌管路中出现负压吸入空气,也会造成将带有空气的水回灌到地下含水层。空气进入地下含水层可能造成3个问题:一是氧化地下水中含量较高的铁、锰元素生成不溶性、粘性氢氧化物沉淀,造成回灌井堵塞;二是促进细菌的滋生和繁衍,造成回灌井堵塞;三是产生气泡堵塞含水层,造成回灌困难^[6]。

(4)抽水—换热—回灌回路不是一个密封的回路或者回灌管口插入回灌井水位以下深度不足,造成地下水中浓度较高的二氧化碳脱气,形成小气泡,堵塞回灌井周围含水层孔隙空间;同时当二氧化碳从地下水中脱气后,地下水的碱性增大,会造成溶解于地下水中的碳酸盐和氢氧化物沉淀,导致回灌井结垢和堵塞^[7]。

(5)部分用户设备系统不配套(如无精滤装置),不能在地表进一步过滤抽水井过滤管没能过滤的细小颗粒,造成回灌井堵塞^[8]。

(6)没有使用钻速快、泥浆密度小、对含水层影响小的反循环钻进方法,没有针对钻进方法、井管和滤料类型及地层条件选择洗井方法^[9-11]。

(7)抽水井与回灌井没有分别设计。文献[3]和我国的《管井技术规范》(GB 50296—2014)^[12]推荐的抽水井过滤管槽缝进水流速最大值均为0.03 m/s,而文献[3]还推荐回灌井过滤管槽缝出水流速最

大值为0.015 m/s,这就意味着回灌井的设计要有别于抽水井,其过滤管直径或长度要比抽水井大。或者回灌井的数量要比抽水井多。此外,由于回灌井中水位波动幅度较大(需回灌和回扬处理),井管在干湿交替环境下很容易腐蚀生锈。在回灌过程中锈蚀颗粒脱落可能会导致过滤管或含水层堵塞,因此,回灌井的套管、过滤管甚至井口管件需要选用耐腐蚀的材料,如PVC管、环氧涂层钢管、不锈钢管和玻璃纤维等^[7]。

本文基于中石化新星湖北新能源开发有限公司在湖北荆州的地下水热泵工程项目,探讨上述因素对地下水热泵抽水井的影响。对于抽水井来说,影响因素主要是上述第(1)、(2)和(6)等因素。

2 实例分析

2.1 项目概况

荆州市地处湖北省中南部,江汉平原腹地,长江自西向东横贯全市,流经长度483 km。年平均气温15.9~16.6℃,多数年份的年降雨量在1100~1300 mm,地表及地下水丰富^[13],有使用地下水热泵系统的有利条件。该市某项目采用地下水热泵系统为面积约21000 m²的办公区供热制冷,配备有螺杆式水源热泵机组,夏季用户侧的供回水温度为7~12℃,冬季用户侧的供回水温度为45~40℃。该项目的地源侧设计了2口抽水井和4口回灌井,钻孔直径600 mm,井管(含井壁管、过滤管和沉淀管)外径为273 mm,钻孔深度62 m。抽水井与回灌井的井身结构相同。场区地下水类型有上层滞水和承压水,上层滞水赋存于上部杂填土中,承压水赋存于粉细砂及卵砾石夹细砂层中,取水层为承压含水层。地层及井身结构见图1。

为避免该地区其他水井较普遍存在的水井泵砂问题,在钢质缠丝过滤管外面包裹了双层80目不锈钢丝网(网眼直径为0.2 mm)。滤料没有按含水层颗粒分析试验结果设计而是按经验选定,粉细砂层中滤料粒径3~4 mm,卵砾石夹细砂层中为3~8 mm。上部杂填土、粉质粘土和粉土层用干粘土球止水。静止水位(从孔口计)3.10 m,粉细砂层渗透系数3~5 m/d,卵砾石夹细砂层渗透系数13~15 m/d。由于抽水井的过滤管外包了两层80目的不锈钢丝网,地下水抽到地表后又经过进一步过滤,抽水—除砂—换热—回灌回路为密闭回路,回灌方式为

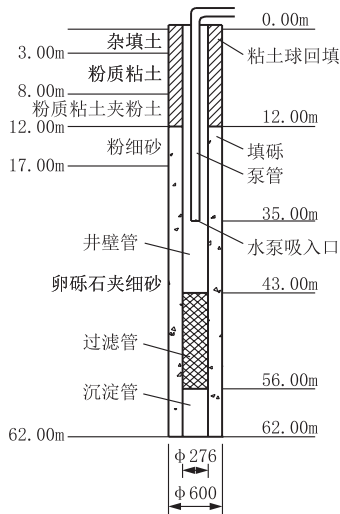


图 1 地层及井身结构示意图

Fig.1 Geological column and well structure

压力回灌,排除了空气进入回灌井的可能性。系统经过 2 年多的运转,回灌井仍表现良好,但抽水井出现了井损过大的问题,在承压含水层静止水位仍为 3.10 m 的情况下,水井中的水位降深由初始的 13.0 m 增大到了 27.0 m,增大了 1 倍多,影响了地下水热泵系统效率的发挥。

2.2 成孔工艺方法选择与分析

在卵砾石厚度达 45 m 的情况下钻进直径为 600 mm、深度为 62 m 的水井,若使用正循环回转钻进,存在钻机和泥浆池占地面积大、钻速低、洗井困难等问题;旋挖钻进设备庞大,钻井数量较少时运输费占比太大;气动潜孔锤钻进方法适合于在基岩裂隙含水层中钻进;人工挖孔施工适合于大直径的浅井。故本项目钻进方法可在钢丝绳冲击钻进和反循环回转钻进两种方法中选择。由于场地面积有限,实际施工中选择了设备占地面积小、用水量小、地层适应范围广,目前我国仍广泛使用的钢丝绳冲击钻进方法。

然而钢丝绳冲击钻进过程中孔内的浓泥浆会严重堵塞含水层的孔隙通道,增大洗井难度,而洗井这道工序是在下放井管和填砾之后进行的,为了防止泵砂,本工程在缠丝过滤管外包了两层 80 目的不锈钢丝网,洗井过程中浓泥浆中的粘土颗粒及含水层中的细小砂粒,会在不锈钢丝网外积聚,逐步降低过滤管的透水性,造成井损不断增大。

将正循环回转钻进和钢丝绳冲击钻进方法称为传统成井工艺,将反循环回转钻进称为新工艺,在郑

注新区以中砂和细砂为主含水层中新工艺施工的水井单位涌水量从传统工艺的 $8.98 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 提高到了 $26.59 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,单位回灌量则从 $5.31 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 提高到了 $25.62 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,成井速度较正循环回转钻进提高了 6 倍^[9]。因此,实例工程如果是使用泵吸反循环钻进方法(其特点是泥浆密度小,泥浆对含水层的污染小),在钻进过程中由于砂石泵的抽吸作用,含水层中的部分细小砂粒在钻进过程中会被抽出,井壁周围含水层的透水性在钻进过程中不但不会受损还会有所增加,则包网过滤管的透水性随时间的降低就不会像钢丝绳冲击钻进那么明显。

2.3 滤料与过滤管设计问题

设计滤料颗粒级配和过滤管槽缝宽度前,应对含水层进行取样,获得含水层样品的颗粒级配曲线,据此再进行滤料和过滤管槽缝宽度设计。

不同的研究者提出的滤料设计方法稍有不同,但都牵涉到含水层和滤料的颗粒级配。这些设计方法的主要原则是选择一定的颗粒级配的滤料,只允许在洗井过程中含水层中的泥浆和粒径较小的泥砂颗粒进入水井后被排出。

在对滤料过滤理论作系统总结的基础上,Houben 等人指出,当滤料的粒径与含水层的粒径的比值 < 4 时,虽然可起到过滤作用,但会降低滤料的渗透性,增大井损(地下水流经滤料所引起的水头损失);当滤料的粒径与含水层的粒径的比值超过 6 时,含水层颗粒可以进入滤料层(又称填砾层)中并堵塞滤料的孔隙空间,也会降低滤料的渗透性;如果比值 > 12 ,含水层颗粒将会穿过滤料,滤料不能发挥其过滤功能^[14]。因此,4~6 倍含水层颗粒粒径的滤料既可避免泵砂又可避免不必要地降低滤料的渗透性。

如果用 D_{10} 、 D_{40} 、 D_{50} 、 D_{85} 分别表示滤料筛分样的颗粒组成中,过筛质量累计为 10%、40%、50% 和 85% 时的最大颗粒直径,用 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{60} 分别表示含水层筛分样的颗粒组成中,过筛质量累计为 10%、50% 和 60% 时的最大颗粒直径,Driscoll 建议过滤管的槽缝宽度为滤料的 D_{10} ^[15],Bakiewicz 等人认为,过滤管的槽缝宽度应为滤料的 D_{85} 的 1/2,其近似值为 D_{40} ^[16]。在总结前人研究成果的基础上,Missteer B. 等建议滤料的颗粒级配应类似于被过滤的含水层,并且滤料平均粒径 D_{50} 应为含水层平

均粒径 d_{50} 的 4~6 倍,过滤管槽缝宽度 δ 应在滤料的 D_{10} 到 D_{40} 之间^[7],即:

$$D_{50} = (4 \sim 6)d_{50} \quad (1)$$

$$\delta = D_{10} \sim D_{40} \quad (2)$$

我国的《管井技术规范》(GB 50296—2014)则推荐过滤管的槽缝宽度为填砾的 D_{10} ,而填砾的平均粒径为含水层颗粒平均粒径的 6~8 倍^[12],即:

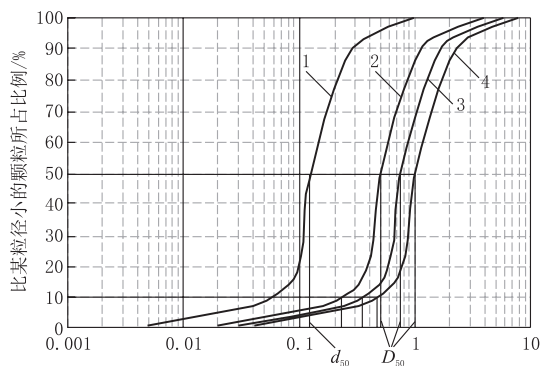
$$D_{50} = (6 \sim 8)d_{50} \quad (3)$$

$$\delta = D_{10} \quad (4)$$

在实例项目的卵砾石夹细砂含水层中采取了细砂样品,其颗粒级配曲线见图 2 曲线 1,它的平均粒径均用 d_{50} 表示(约为 0.15 mm);而图中的曲线 2、3、4 分别为粒径为细砂颗粒粒径的 4 倍、6 倍和 8 倍且颗粒级配曲线形状与细砂相同的拟采用的滤料颗粒级配包络线。

根据文献^[7]的建议,滤料的平均粒径 D_{50} 的范围为图 2 中曲线 2 的 D_{50} 到曲线 3 的 D_{50} ,即为 0.50~0.75 mm;过滤管槽缝宽度为图 2 中曲线 2 的 D_{10} 到曲线 3 的 D_{40} ,即为 0.25~0.70 mm。

根据我国的《管井技术规范》(GB 50296—2014),滤料的平均粒径 D_{50} 的范围为图 2 中曲线 3 的 D_{50} 到曲线 4 的 D_{50} ,即为 0.75~1.0 mm;过滤管槽缝宽度范围为图 2 中曲线 3 的 D_{10} 到曲线 4 的 D_{10} ,即为 0.40~0.50 mm。以上结果整理在表 1 中。



曲线 1—土样颗粒级配曲线,曲线 2、3、4—粒径分别为土样粒径 4 倍、6 倍、8 倍的滤料颗粒级配包络线

图 2 细砂样品的颗粒级配曲线及其填砾颗粒级配包络线
Fig.2 Grain grading curves of fine sand sample and grading envelop curves of the pack materials

对于图 1 所示的地层剖面,当开采的含水层卵砾石层中存在细砂夹层且不能有效用套管或封孔材料隔离这些夹层时,为防止泵砂和减小井损,滤料的

粒径和过滤管的槽缝宽度需要按表 1 设计。滤料的平均粒径为 0.6 mm 时,可同时满足文献^[7]和《管井技术规范》(GB 50296—2014)的要求。

表 1 滤料粒径与过滤管槽缝宽度计算结果 mm
Table 1 Calculation results of pack particle size and screen slot width

含水层	依据	滤料平均粒径	过滤管槽缝宽度
细砂	参考文献 ^[7]	0.50~0.74	0.25~0.70
细砂	管井技术规范	0.75~1.00	0.40~0.50

实例工程在卵砾石夹细砂含水层中却采用了粒径为 3~8 mm 的滤料(这也是荆州市目前的通用做法),显著大于同时满足文献^[7]和《管井技术规范》(GB 50296—2014)0.6 mm,也大于含水层颗粒平均粒径 d_{50} (约为 0.15 mm)的 12 倍,不能有效地过滤细砂夹层,过滤的压力全部转移到了过滤管上的外包滤网,故随着时间的推移,细颗粒在滤网面上集聚造成滤网堵塞,增大井损。

3 结论

当地下水源热泵抽水井开采的含水层为细砂层或为卵砾石夹细砂夹层时,为防止泵砂,目前过滤管外包不锈钢丝网或尼龙网仍然是有效手段之一,但洗井工序是在下过滤管和填砾之后,含水层中粒径大于包网网孔直径的泥砂颗粒会在滤网面上集聚,造成滤网堵塞。故要优先采用泥浆密度轻、对地层污染小的反循环成孔工艺,以减小过滤管堵塞和井损增大的风险。

在细砂层中,虽然采用目数较大的包网过滤管可防止泵砂,但仍要根据含水层的颗粒级配曲线选择滤料,发挥滤料的过滤作用,避免过滤压力全部或大部分转移到了包网过滤管,造成过滤管堵塞和井损增大。

参考文献(References):

- [1] 陆肖, 嵇启春. 地下水源热泵优势及问题探讨[J]. 建筑节能, 2010, 38(9): 34—37.
LU Xiao, JI Qichun. Advantages and disadvantages of the ground water heat pump[J]. Construction Conserves Energy, 2010, 38(9): 34—37.
- [2] 胡海军, 李春晖. 浅议水源热泵系统中的地下水回灌[J]. 地下水, 2010, 32(2): 49—50.
HU Haijun, LI Chunhui. Discussion on the groundwater recharge of water source heat pump[J]. Ground Water, 2010, 32(2): 49—50.
- [3] Steve Kavanaugh, Kevin Rafferty. Geothermal heating and

- cooling design of ground-source heat pump systems [M]. ASHRAE, USA, 2014.
- [4] 姚文清,王文喜,杨颖.地下水源热泵系统的水文地质勘察[J].西部探矿工程,2010,22(10):152-154,157.
YAO Wenqin, WANG Wenxi, YANG Ying. Hydrogeological investigation of groundwater source heat pump system[J]. West-China Exploration Engineering, 2010,22(10):152-154, 157.
- [5] 罗新梅,蒋丹凤.地下水源热泵成井设计与施工的工程应用研究[J].建筑热能通风空调,2010,29(3):84-87.
LUO Xinmei, JIANG Danfeng. Research and analysis of groundwater heat pumps well construction[J]. Building Energy & Environment, 2010,29(3):84-87.
- [6] Banks, D. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling (second edition) [M]. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, UK, 2012.
- [7] Misstear B., Banks D., Clark L. Water wells and boreholes (second edition)[M]. John Wiley & Sons, Ltd., UK, 2017.
- [8] 王秉忱.我国浅层地热能开发现状与发展趋势(三)[J].供热与制冷,2012,(2):56-57.
WANG Bingchen. Current situation and development trend of shallow geothermal energy development in China(3)[J]. Heating and Refrigeration, 2012,(2):56-57.
- [9] 王献坤,赵云章,刘海风,等.郑汴新区中细砂含水层水源热泵井回灌新技术[J].水文地质工程地质,2013,40(3):136-140.
WANG Xiankun, ZHAO Yunzhang, LIU Haifeng, et al. The new injection technique of the water heat pump system in the medium-fine sand aquifer in the Zhengbian New Region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013,40(3):136-140.
- [10] 李任年.常见地热井堵塞类型及处理方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):38-41.
LI Rennian. Common geological well blockage and the processing methods[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(10):38-41.
- [11] 邵盛元,温得全,胡菲菲,等.中国援助柬埔寨乡村供水项目水井施工工艺及解决问题的措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):19-23.
SHAO Shengyuan, WEN Dequan, HU Feifei, et al. Water well construction technology of China-aided Cambodia rural water supply project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):19-23.
- [12] GB 50296-2014,管井技术规范[S].
GB 50296-2014, Technical code for tube well[S].
- [13] 张陵,胡祥胜,关义涛,等.江汉平原第四纪含水层系统特征[J].资源环境与工程,2016,30(6):895-898.
ZHANG Ling, HU Xiangsheng, GUAN Yitao, et al. System characteristics of quaternary aquifer in Jianghan Plain[J]. Resources Environment & Engineering, 2016,30(6):895-898.
- [14] Houben G., Treskatis C. Water well rehabilitation and reconstruction[M]. McGraw Hill, New York, 2007.
- [15] Driscoll F.G. Ground water and wells (second edition) [M]. Johnson Filtration Systems, St. Paul, Minnesota, 1986.
- [16] Bakiewicz W., Milne D.M., Pattle A.D. Development of public tube well designs in Pakistan[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1985,18:63-77.

(编辑 韩丽丽)