

负压深井降水系统在地下水修复工程中的研究与应用

陈旭杭

上海同大科蓝环保科技有限公司, 上海

收稿日期: 2022年2月26日; 录用日期: 2022年3月18日; 发布日期: 2022年3月25日

摘要

降水技术是地下水修复工程中常用的一种辅助技术, 可通过对地下水进行抽提异位处理, 快速去除地下水中的污染物。但对于粘土层以及淤泥质粘土等, 由于其渗透性较差, 传统的降水技术往往效率较低, 而负压深井降水系统可以为管井提供一定的真空度, 加快了管井的降水速度, 提高了抽水速率。本文以某地下水修复项目为例, 采用负压深井降水技术, 实现了稳定高效的降水, 为后续地下水修复的顺利进行奠定了基础。

关键词

地下水修复, 粘土层, 负压深井降水, 真空度

Research and Application of Negative Pressure Deep Well Dewatering System in Groundwater Remediation Engineering

Xuhang Chen

Shanghai Tongda Clearon Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Feb. 26th, 2022; accepted: Mar. 18th, 2022; published: Mar. 25th, 2022

Abstract

Precipitation technology is an auxiliary technology commonly used in groundwater remediation projects. It can quickly remove pollutants in groundwater by extracting and *ex-situ* treatment of groundwater. However, for clay layers and silty clays, due to their poor permeability, traditional

dewatering techniques are often inefficient. The negative pressure deep well dewatering system can provide a certain degree of vacuum for tube wells, speed up the dewatering speed of tube wells, and improve the efficiency of dewatering pumping rate. Taking a groundwater restoration project as an example, this paper adopts negative pressure deep well dewatering technology to achieve stable and efficient precipitation, which lays the foundation for the smooth progress of subsequent groundwater restoration.

Keywords

Groundwater Remediation, Clay Layer, Negative Pressure Deep Well Dewatering, Vacuum Degree

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水是指在地面以下的岩土体中可流动的水体，是全球水资源的重要组成部分，对人类的生产和生活有着十分重要的作用[1]。随着我国工业化、城市化的进程不断加快，金属冶炼、石油化工、电子制造等快速发展，地下水环境受到了严重影响，因此，地下水污染修复刻不容缓。

在地下水修复技术中，地下水污染修复是指采用自然衰减、抽提降水、生物修复、渗透反应墙等技术使受污染的地下水恢复到原有水质[2]，其中抽提降水技术是地下水修复中最常用的辅助技术，它可以同时结合化学氧化等水处理技术，高效处理受污染的地下水[3]。

抽提降水技术是指通过物理手段将受污染的地下水抽出，以达到降低水位的目的，抽出的地下水可暂存在集水坑或蓄水池内，常用的抽提降水技术有轻型井点降水、管井井点降水、深井降水以及负压深井降水等[4]，各种技术的优缺点如表 1 所示。

Table 1. Characteristics of different types of extraction and precipitation techniques

表 1. 不同类型抽提降水技术的特点

类型	特征	适用性
轻型井点降水	施工简单、安全、经济，易出现倒流现象	适用于基坑面积不大，降低水位不深的场合
管井井点降水	出水量较大、降水深度较深	适用于渗透系数大的砂砾层，地下水丰富的地层，以及轻型井点不易解决的场合，一般用于潜水层降水
深井降水	排水量大，降水深度大，降水范围大，设备投资少	常用于降低承压水
负压深井降水	真空负压，降水半径大，降水深度深，投资少，操作方便	适用于抽取粘性土、砂质粉土等土层中的水

负压深井降水原理主要是在深井降水井管内增加真空度，在常规大口径管井降水井的基础上，利用地面安装的真空泵，通过管路连接使井管内产生负压，加快降水井的降水速度，利用井管内外压力差进

行抽吸，加快地下水的渗流流动速度，迫使降水区域内的地下水位快速下降，达到深井降水不能达到的效果。

我国南部及东南部沿海城市的地层多为淤泥质粘土或粘土，地层单一且渗透性差，传统的深井降水达不到预期效果，而负压深井降水能够很好的解决这个问题，实现高效稳定的降水效果[5][6]。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

上海某污染修复场地前期调查结果显示，该场地内地下水中存在有机物超标的情况，最大检出浓度超标倍数为 1.5，属于轻微污染，最大污染深度在 10 m。根据方案比选以及专家意见，该污染场地地下水修复采用“抽提降水 + 原地异位”修复技术。

2.2. 水文地质

根据地勘调查结果显示，调查场地所在区域地貌类型属滨海平原地貌，区内地势平坦，场地内浅层地下水属潜水类型，场地内自上而下的地层构成大致为：

1) 人工填土层：以杂填土为主，局部表层为水泥地坪，上部由碎石、砖块、砼块、煤灰渣等建筑垃圾组成，下部以下以粘性土为主。

2) 淤泥：主要以江滩淤泥为主，含较多黑色有机质，下部夹较多淤泥质粉质粘土、淤泥质粘土及少量粘质粉土。

3) 粘质粉土(江滩土)：属近代江河漫滩沉积土层，含云母、有机质、腐植质、贝壳、朽木等，上部夹较多淤泥质粉质粘土。

4) 淤泥质粘土：呈灰色，含云母、有机质、贝壳碎屑，夹少量薄层粉砂，土质均匀。

各层地基土的分布状况详见表 2。

Table 2. Characteristics of foundation soil layers

表 2. 地基土层特性表

土层号	土层名称	厚度	颜色	土层描述
① 1	杂填土	1.20~4.20	杂	表层为水泥地坪，上部由碎石、砖块、砼块、煤灰渣等建筑垃圾组成，下部以下以粘性土为主
① 2	淤泥	0.80~4.70	灰	主要以江滩淤泥为主，含较多黑色有机质，下部夹较多淤泥质粉质粘土、淤泥质粘土及少量粘质粉土
① 3	粉质粘土	3.60~10.60	灰	含云母、有机质、腐植质、贝壳、朽木等，上部夹较多淤泥质粉质粘土
④	淤泥质粘土	5.0~9.0	灰	含云母、有机质、贝壳碎屑等，夹少量薄层粉砂，摇振无反应，有光泽

根据地层构成以及表 2 分析可知，施工范围内工程地质较为复杂，钻及深度内土层分布主要为杂填土、粘质粉土、淤泥质粘土，以粘土为主要介质的饱水带型相对含水层，在调查区块范围内分布较广，区域内潜水含水层中相对不透水层较厚，潜水水平及垂向运移极慢，场内浅部潜水与深部承压水无直接

水力联系，该土层段地下水渗透性差，采用传统的深井降水法效率低、损耗大、工期长，严重影响施工目标的完成；因此，根据水文地质条件及工程设计要求，结合专家意见拟定施工方案，为保证稳定高效的将地下水抽提至地面处理，最终采用“负压深井降水”技术。

3. 负压深井降水

3.1. 降水井设计

为避免周围地下水对污染施工区域的影响，在区域四周进行全封闭垂直阻隔，阻断区域内地下水与区域外地下水的水力联系。根据施工方案设计，本项目共设计抽提井 40 口，单井覆盖面积约 200 m²，单井深度 12 m，覆盖了地下水污染最大深度，整体采用管径 400 mm 的无砂混凝土管和管径 273 mm 的钢制滤水管，滤水管采用桥式滤水管，其长度根据含水层厚度、透水层的渗透速度及降水速度的快慢确定为 9.5 m，滤水管外侧包扎 2 层 80 目纱网以阻止地层细颗粒土的流失；沉淀管长度为 1.0 m，底口封堵以防止底部沉砂影响进水作用；井口高于地面 0.3 m，以防止地面污水进入井内。降水井管剖面图如图 1 所示。

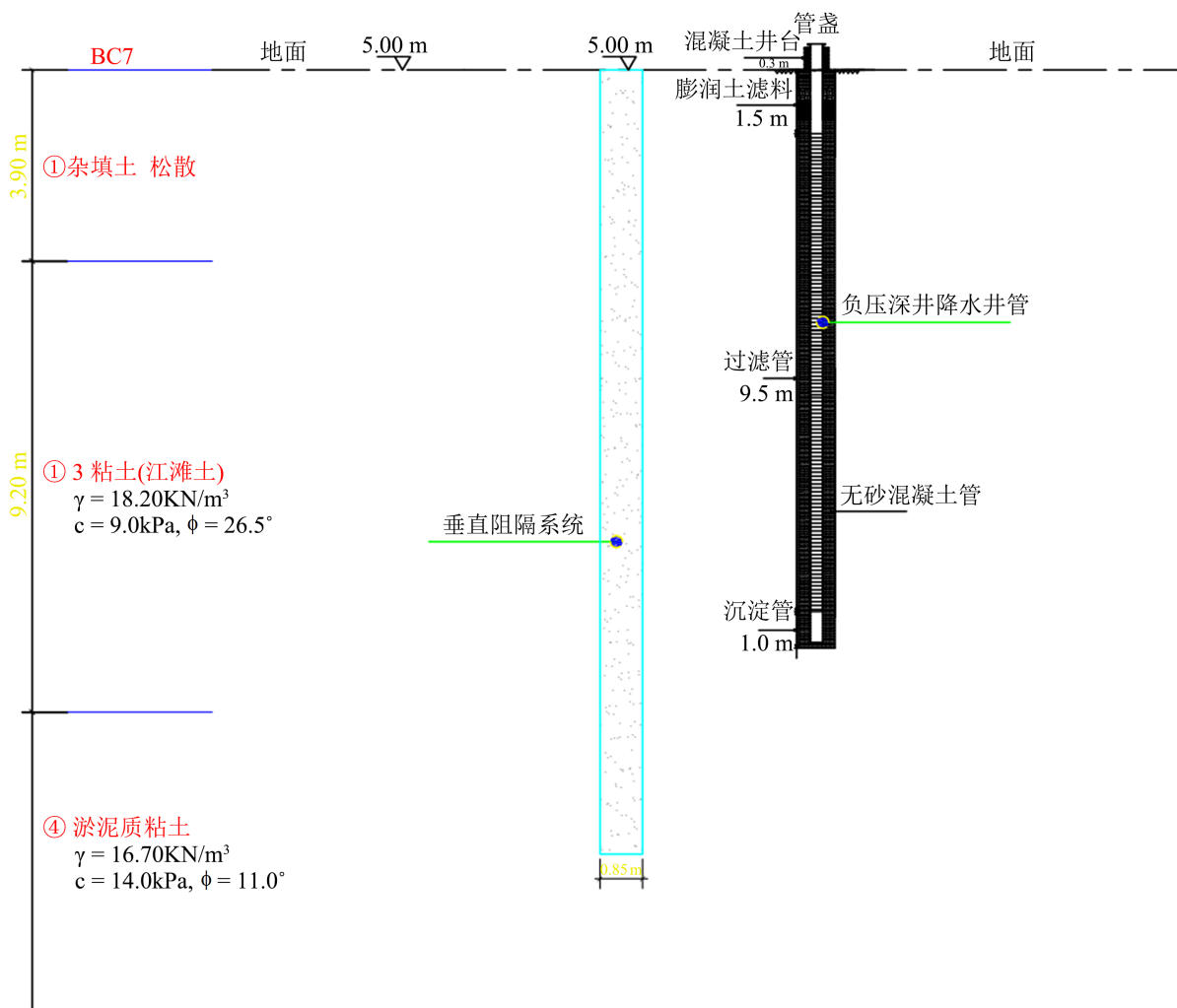


Figure 1. Schematic diagram of well pipe section of negative pressure dewatering well
图 1. 负压降水井井管剖面示意图

3.2. 工艺流程及实施要点

按照本项目施工要求，成孔施工机械采用 GXYL 型钻机及其配套设备，采用正循环回转钻进，清水钻进自然造浆的成孔工艺，以及下井壁管、滤水管、填料等成井工艺[7]。成井施工工艺流程图如图 2 所示。

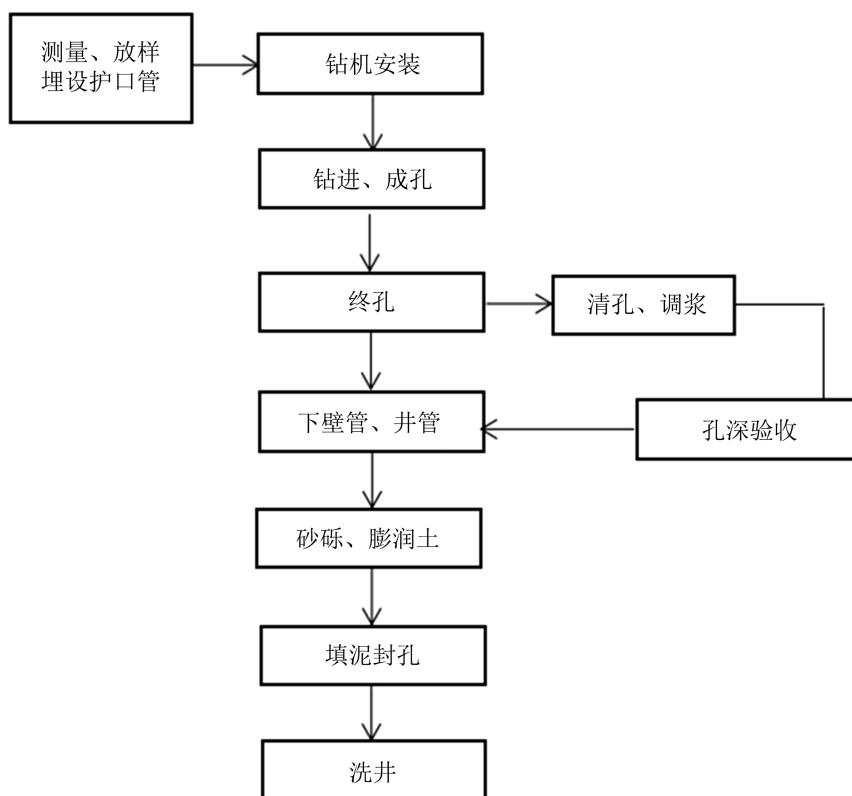


Figure 2. Process flow chart of well completion construction
图 2. 成井施工工艺流程图

- 1) 测量放线：根据井位平面布置示意图测放井位，井位具体位置可根据现场施工微调；
- 2) 埋设护口管：护口管插入土层中，露出地面 0.3 m，防止建井时管外返浆；
- 3) 安装钻机：机台安装水平稳定，钻头、转盘、孔中心三点一线；
- 4) 钻进成孔：降水井开孔孔径 $\phi 600$ mm，钻进过程中保持钻机水平，钻孔达到设计深度时宜多钻 0.3~0.5 m，成孔施工采用自然造浆；
- 5) 清孔调浆：钻至设计标高后，在提升钻具前，将钻杆提升 0.5 m，进行冲孔，清除孔内杂物，同时调整泥浆密度，保证返出的泥浆不含泥块；
- 6) 下井管：下井管前需测量孔深，整个过程连续进行；
- 7) 下砂砾、膨润土：下滤料时也需要连续进行，直至下入预定位置为止，最终投入的滤料量不应少于计算量的 95%；
- 8) 洗井：清除管壁的泥皮，洗净井筒内的泥浆杂质。现场钻井施工图如图 3。

成井施工均完成后，安装真空负压系统，井内配有潜水泵，井口使用密封圈密封，井外连接空压机，采用一空一泵、一泵一井的连接方式。具体连接方式如图 4 所示。



Figure 3. Drilling construction drawing
图 3. 钻井施工图

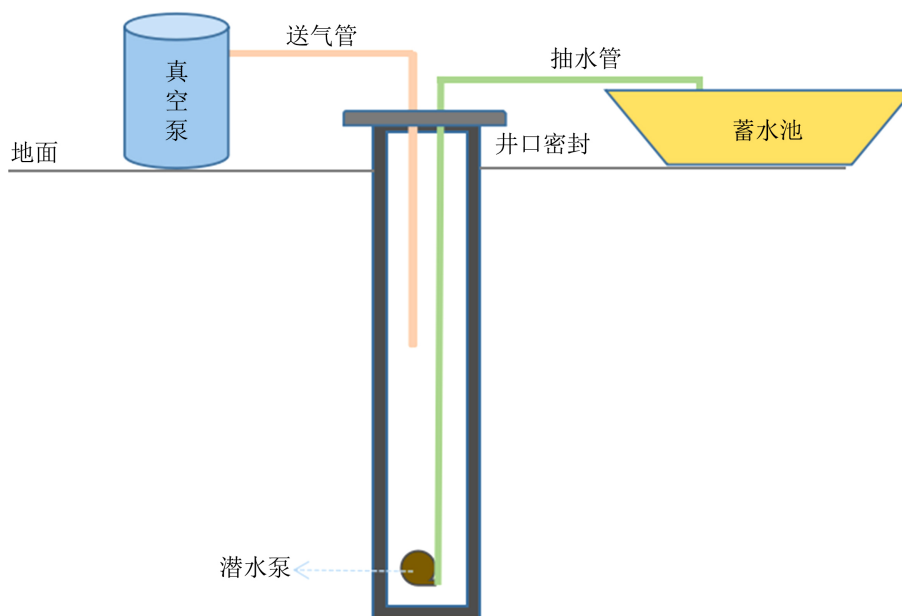


Figure 4. Schematic diagram of negative pressure precipitation system
图 4. 负压降水系统示意图

4. 现场试验

为了检验负压深井降水系统形成的真空度大小及其真空度的保持性能，现场专门进行了单井抽气试验、负压抽水试验和非负压抽水试验，测试负压降水系统的真空度、稳定性、单井降水量及其变化规律等。主要试验如下。

4.1. 抽气试验

试验一：现场随机选取了 8 口井管(井管编号分别是 J-5、J-10、J-15、J-20、J-25、J-30、J-35、J-40)进行了抽气试验。试验为单井抽气，开启真空泵，连续抽气 3 h 后暂停 0.5 h，采用精密真空表进行测量，循环三次计算平均值。检测结果如下表 3：

Table 3. The results of the pumping test

表 3. 抽气试验结果

井位编号	J-5	J-10	J-15	J-20	J-25	J-30	J-35	J-40
真空度(10^{-2} Mpa)	2.6	2.9	2.8	3.2	2.7	2.9	3.1	3.0

如图所示(图 5)，随机抽取的 8 口管井，抽气试验结果表明其真空度在 2.6~3.2 之间，均达到设计要求，可以为深井降水提供合适的负压条件。

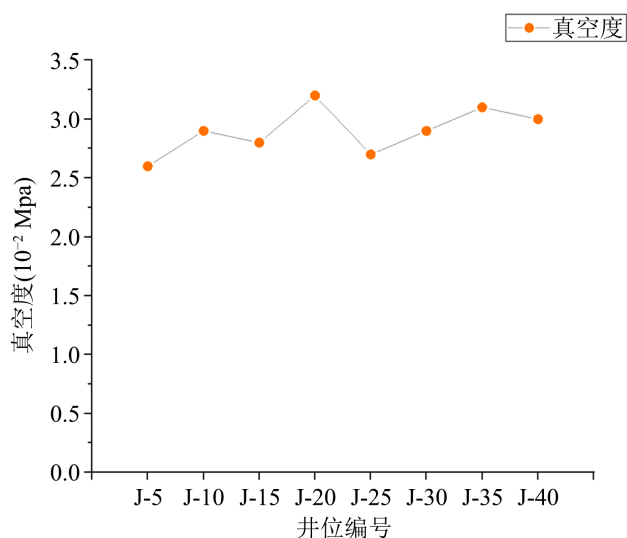


Figure 5. Schematic diagram of the results of the pumping test

图 5. 抽气试验结果示意图

试验二：现场随机选取了 1 口井管(井管编号为 J-16)进行抽气试验，试验为单井抽气，开启真空泵，连续抽气 3 h 后暂停 0.5 h，采用精密真空表进行测量，连续测试一周，每天循环三次计算平均值。单井持续抽气试验结果如下表 4：

Table 4. Results of single well continuous pumping test

表 4. 单井持续抽气试验结果

时间(d)	1	2	3	4	5	6	7
真空度(10^{-2} Mpa)	2.6	2.8	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0

如图所示(图 6)，随机抽取的单口管井，抽气试验持续一周结果表明其真空度变化不大，说明该负压降水系统维持真空度的性能较好。

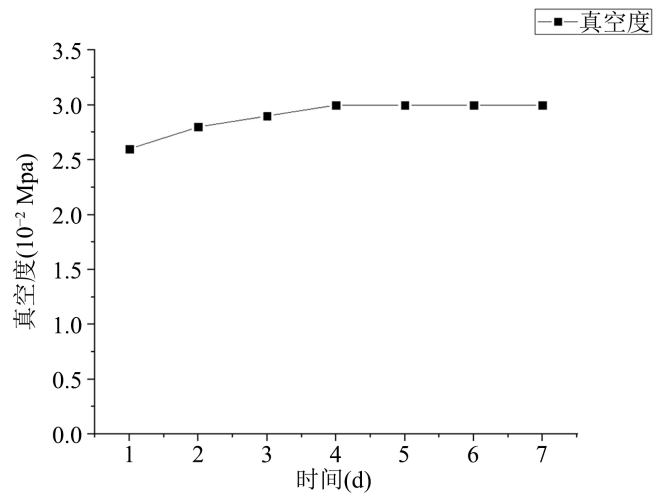


Figure 6. Schematic diagram of single well continuous pumping test results
图 6. 单井持续抽气试验结果示意图

4.2. 抽水试验

为了检验负压深井降水系统抽水效果，现场选取了 7 口井管(井管编号分别是 J-1、J-2、J-3、J-4、J-5、J-6、J-7)进行了抽水试验。试验为单井抽水，抽水时间为 24 h，分两组进行，一组为使用负压系统，另一组为不适用负压系统，试验过程中采用精密流量计进行测量出水量，同时对地面沉降进行监测。检测结果如下表 5：

Table 5. Pumping test results
表 5. 抽水试验结果

井位编号	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7
非负压时流量(m ³)	16.8	15.2	15.8	13.7	14.9	16.1	15.3
负压时流量(m ³)	42.6	39.5	41.2	41.7	40.1	39.2	40.5

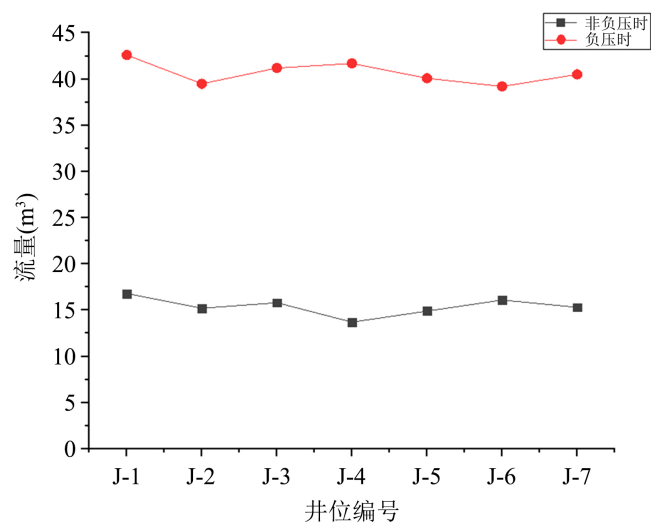


Figure 7. Schematic diagram of the results of the pumping test
图 7. 抽水试验结果示意图

如图所示(图 7), 抽取的 J-1~J-7 的 7 口管井, 抽水试验结果表明, 不采用负压系统时, 24 h 抽水量在 15.0 m^3 左右, 采用负压系统时, 24 h 抽水量在 40.0 m^3 左右, 负压深井降水系统降水效率是普通深井降水效率的 2 倍以上, 表明粘土层渗水性较差, 负压深井降水的降水效率比普通深井降水的效率高很多, 可提高效率、缩短工期, 满足施工目标要求。

5. 结论

负压深井降水在地下水修复工程中应用广泛, 本文结合工程实例, 总结了相关应用经验, 主要得到以下结论:

- 1) 该负压深井降水系统井身结构密闭设计可行, 真空负压设备选择合理, 在施工过程中提供了稳定的真空度;
- 2) 负压深井降水系统单井降水量是普通管井的 2 倍以上;
- 3) 负压深井降水系统适用于解决粘性土、淤泥质粘土中的降水问题, 该系统克服了传统深井降水依靠重力自流效率低、难以在短时间内快速降水的缺点, 缩短施工工期, 具有良好的经济效益;
- 4) 该工艺对于地下水修复以及其他建筑基坑降水项目具有很好的借鉴意义。

参考文献

- [1] 陈慧敏, 仵彦卿. 地下水污染修复技术的研究进展[J]. 净水技术, 2010, 29(6): 5-8+89.
- [2] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 卢丽, 樊连杰, 林永生. 土壤与地下水污染修复主要技术研究进展[J]. 中国矿业, 2021, 30(S2): 221-227.
- [3] 万鹏. 污染地下水抽出—处理技术的抽水方案优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2013.
- [4] 吴锦波. 基坑开挖深井降水法应用[J]. 建材与装饰, 2017(23): 168-169.
- [5] 潘秀明. 真空管井复合降水技术应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [6] 李春林, 李朋斌. 真空深井井点在深基降水中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2015(13): 52-53.
- [7] 徐少华, 徐凯, 王少黄, 胡孝林, 叶秋阳. 双套管自流深井降水施工技术[J]. 建筑施工, 2021, 43(8): 1442-1444.