

振动直推多相抽提并在污染场地修复应用研究

孙 瑞^{1,2,3}, 向甲甲^{1,2,3}, 陈 晨^{1,2,3}

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.上海市市政工程设计科学研究所有限公司,上海市 200092; 3.上海市环境保护建设用地污染风险防控与修复技术工程中心,上海市 200092]

摘 要: 针对城市更新污染场地多相抽提效率受限、抽提井易塌陷堵塞及长期运行稳定性不足等问题,研究提出振动直推一体化预制多相抽提井构建方法。以上海市松江区某氯代烃污染场地为对象,从井体结构、耐腐蚀抗菌材料和振动直推工艺协同优化入手,开展中空螺旋钻、传统直推挤压和振动直推建井对比试验。结果表明,振动直推可减弱黏性土层“涂抹效应”,并与大口径成井通道共同改善井周水力连通性,抽提井影响半径达3.83 m;100 d运行监测结果显示:预制井筛缝通畅、沉积较少,在常规及连续高负荷抽提条件下仍保持有效真空响应。研究表明该技术可提高污染场地多相抽提成井质量和运行稳定性,为城市更新污染场地原位修复提供参考。

关键词: 城市更新;多相抽提井;振动直推;污染场地;原位修复

中图分类号: X5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0018-06

Application of Vibratory Direct-Push Multi-Phase Extraction Wells in Contaminated Site Remediation

SUN Rui^{1,2,3}, XIANG Jiajia^{1,2,3}, CHEN Chen^{1,2,3}

[1.Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design & Scientific Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3.Shanghai Engineering Research Center for Environmental Protection Technology of Construction Land Contamination Risk Control and Remediation, Shanghai 200092, China]

Abstract: To address the limited efficiency of multi-phase extraction, frequent well collapse and clogging, and insufficient long-term operational stability in contaminated urban renewal sites, a vibratory direct-push integrated prefabricated multi-phase extraction well construction method was proposed. A chlorinated hydrocarbon-contaminated site in Songjiang District, Shanghai, was selected as the study area. Through coordinated optimization of well structure, corrosion-resistant and antibacterial materials, and vibratory direct-push installation, comparative field tests were conducted among hollow-stem auger drilling, conventional direct-push, and vibratory direct-push construction methods. The results show that vibratory direct-push can mitigate the smearing effect in cohesive soils and, together with the large-diameter construction channel, improve hydraulic connectivity around the well. The radius of influence reached 3.83 m. A 100-day operation monitoring test showed that the prefabricated well maintained clean screen slots, limited sediment accumulation, and effective vacuum response under both routine and continuous high-load extraction conditions. This study indicates that the proposed technology can improve well construction quality and operational stability for multi-phase extraction in contaminated sites, providing a reference for in-situ remediation of contaminated urban renewal sites.

Keywords: urban renewal; multi-phase extraction well; vibratory direct-push; contaminated site; in-situ remediation

0 引 言

当前城市化进程不断加快,城市更新已由传统

老旧建筑改造逐步拓展至工业遗留用地等“棕地”再开发利用^[1-2]。这类场地普遍存在土壤和地下水污染问题^[3-4],成为制约土地再利用的重要因素。在城市核心区域,传统挖掘外运等异位修复技术虽应用广泛,但易产生扬尘、异味等二次污染,且对毛细带及包气带污染物去除效果有限。因此,施工扰动小、适应性强的原位修复技术逐渐成为主要技术路径之一^[5-6]。

多相抽提(multi-phase extraction, MPE)技术是一

收稿日期: 2026-04-30

基金项目: 上海市青年科技启明星项目(24QB2705600);上海市生态环境局项目(沪环科[2025]第13号)

作者简介: 孙瑞(1990—),男,博士,高级工程师,从事土壤地下水污染修复研究工作。

通信作者: 陈晨(1984—),男,硕士,高级工程师,从事土壤地下水污染修复研究工作。电子信箱: chenchen5@smedi.com

种典型原位修复方法,可在负压条件下同步抽提土壤气体、地下水及非水相液体污染物,并在地面进行分离处理^[7-8]。与单一修复技术相比,多相抽提能够同时兼顾土壤和地下水污染治理,还可通过降低地下水位扩大气相作用范围,从而提高污染物去除效果。

在实际工程应用中,多相抽提技术的实施效果,很大程度上取决于抽提井的构建质量。传统抽提井常出现井底塌陷、滤料填充不均、滤层堵塞、井内淤塞以及井管腐蚀^[9]、生物膜堵塞^[10]等问题,进而影响系统的稳定运行和抽提效率。现有研究多集中于抽提系统运行参数优化,而针对建井结构、材料性能与施工工艺协同作用的系统研究相对较少,尤其在城市更新复杂地层条件中的工程适用性仍有待进一步验证。本研究通过优化井体结构、选用耐腐蚀耐菌材料,并结合振动直推建井工艺,提高低渗透场地成井质量和运行稳定性,以期城市更新污染场地修复提供参考。

1 多相抽提井构建的关键问题

多相抽提(MPE)技术的运行效果在很大程度上取决于抽提井的构建质量及其与地层条件的适配性。对于城市更新污染场地而言,受限于工期紧张、地层复杂及环境敏感性高等因素,抽提井构建不仅需要满足水力学要求,还需兼顾施工效率与运行稳定性。因此,建井结构与施工工艺的合理匹配成为影响工程成效的关键。

1.1 城市更新场地对抽提井及施工机械的要求

城市更新项目通常具有明确的开发时序要求和较高的环境控制标准,抽提井构建需满足以下3方面的工程需求。

1.1.1 建井效率与工期控制

城市更新项目普遍存在“修复周期压缩”的特点,要求建井施工能够快速完成并尽早投入系统运行,因此施工设备需具备较高的作业效率与连续作业能力。

1.1.2 地层渗透性保持与防堵要求

在低渗透黏性土层中,建井过程中若对原状土体产生过度挤压,易引发孔隙结构破坏及渗流通道封闭^[11]。同时,井管结构及滤料层需保持完整,以避免后期运行过程中出现淤积堵塞问题,影响抽提系统稳定性。

1.1.3 大口径一体化预制井的施工适配

为提高抽提井使用寿命及抗压能力,井体结构

逐渐向一体化预制方向发展,但该类井管通常外径较大且自带滤料层,对施工设备的通道尺寸及下压力提出了更高要求。因此,施工机械需具备足够的推力及空间条件,以实现大直径预制井的顺利下放。

总体而言,城市更新场地对抽提井构建提出了“高效率、高渗透及高稳定性”的综合工程要求。

1.2 传统抽提井存在的主要问题

传统抽提井常采用螺旋钻进、冲击钻进、回转钻进及直推挤压等工艺进行施工,其中Geoprobe等中小型直推设备在工程中应用较为广泛^[12],但在复杂地层条件下,传统抽提井仍存在以下不足。

1.2.1 中空螺旋钻建井的结构稳定性不足

该工艺虽具有较大成孔直径,但在松软土层中拔出钻具时易引发孔壁塌陷,导致滤料填充不均,进而在运行过程中产生泥砂进入井内,降低抽提效率并加剧设备磨损,并且施工过程依赖人工配合拆卸钻杆,整体效率较低。

1.2.2 直推挤压建井的渗透性损失

传统中小型直推设备受限于推力不足,难以满足大口径预制井管的下放需求,并在黏性土层中易产生明显的“涂抹效应”。所谓“涂抹效应”,是指直推或钻具推进过程中孔壁附近细颗粒和高含水黏土被挤压、剪切并沿孔壁重排,形成低渗透薄层或堵塞滤水通道;其主要原因包括施工挤压导致孔隙压密、细颗粒迁移和泥皮附着,从而降低地下水渗流能力,限制抽提效果。

1.2.3 井管材料的腐蚀与生物淤塞

传统金属井管在地下环境中易发生电化学腐蚀及微生物腐蚀^[13-14];而部分非金属材料则易附着微生物形成生物膜^[10,15],导致滤水通道通透性下降,影响系统长期稳定运行。

传统抽提井在结构稳定性、地层适应性及运行耐久性等方面均存在不足,难以满足城市更新背景下污染场地原位修复对高效、稳定运行的工程需求。

2 多相抽提井构建方法

2.1 总体思路

针对复杂城市更新地层中传统抽提井易发生的底部塌陷、滤料填充不均、管材腐蚀及微生物淤塞等问题,本文提出一体化强化渗透成套预制多相抽提井的整体构建方法。该方法以提高成井质量、增强地层渗透性和延长系统稳定运行周期为目标,主要从结构一体化、材料功能化和施工工艺适配化3个

方面进行优化。

2.1.1 结构一体化设计。

将传统建井中分散实施的井管下放、滤料填充和止水封隔等环节进行集成,形成由滤料层、止水层、保护层和井管组成的一体化预制结构。通过分段模块化设计,可根据污染层埋深和厚度灵活组合滤水段与止水段,减少现场填砾不均及底部塌孔对成井质量的影响。

2.1.2 材料功能化优化

针对抽提井长期运行中可能面临的腐蚀和微生物附着问题,优选耐腐蚀、抗压性能较好的管材,并结合抗菌覆层或功能性材料改性,提高井管耐久性和抗生物膜堵塞能力,从而保障滤水通道长期畅通。

2.1.3 施工工艺适配化

针对大口径预制井管下放困难及传统直推挤压工艺易造成地层“涂抹效应”的问题,引入大型打桩机振动直推工艺。利用其较大的下压力和高频振动作用,实现预制井管快速下放,同时改善井周土体孔隙连通性,提升低渗透地层中的抽提效果。

2.2 一体化预制井设计

结合长三角地区城市更新污染场地水文地质条件及多相抽提运行需求,对预制井的结构尺寸、滤料层及连接方式进行设计。预制井内部井管直径不小于80 mm^[16],内部滤水段采用缝宽0.2 mm的割缝式滤水管,外部设置粒径为0.3~0.6 mm的石英砂滤料层,外管开筛缝宽0.7 mm,并通过尼龙网袋或不锈钢密网进行包覆固定,如图1所示。

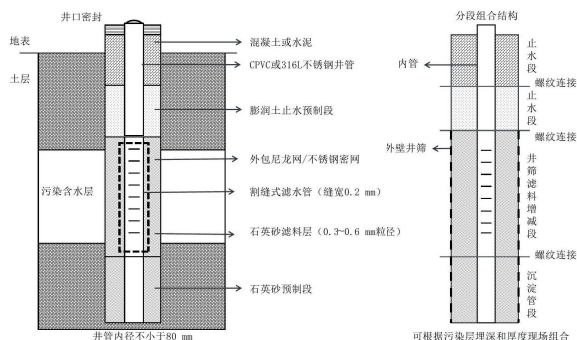


图1 组合式分段成套预制井示意图

为提高现场适应性,预制井采用分段组合式结构,主要包括标准长度为1 m的石英砂滤料预制井段和膨润土止水预制井段。各功能井段之间采用螺纹连接,可根据污染层埋深、厚度及地下水位条件进行现场组合。该结构能够减少传统现场填砾施工的不确定性,并提高滤水段与污染层的匹配精度。

在材料选择方面,针对氯代有机物及石油烃等

复合污染环境,优选CPVC和316L不锈钢作为井管材料。模拟浸泡试验结果表明,该类材料在卤代有机物和复杂地下水环境中具有较好的抗变形和耐腐蚀性能。为降低微生物附着造成的生物淤塞风险,可采用季铵盐^[17]或纳米银离子^[18]等抗菌组分,并通过水性环氧涂层喷涂或管材成型掺混方式赋予井管抗菌功能,从而提高抽提井长期运行稳定性。

2.3 振动建井工艺

针对大口径成套预制井自带滤料层、整体外径较大,传统中空螺旋钻易造成孔壁塌陷,而中小型直推设备推力不足的问题,建井可采用打桩机振动直推工艺。该工艺主要包括临时通道下压、预制井管下放和钢制通道撤出3个步骤。

2.3.1 临时通道下压

采用打桩机高频振动头夹持定制钢制长管,并在钢管底部设置挡泥板。通过下压力和高频振动作用,将钢管压入目标深度,形成洁净的临时下管通道。

2.3.2 挡泥板结构优化

为防止振动下压过程中深层土体进入钢管内部,将底端挡泥板直径设置为略大于钢管外径。该结构可在钢管下压过程中有效阻挡外部泥土进入通道,为后续预制井管顺利下放创造条件,如图2所示。



图2 挡泥板结构优化

2.3.3 预制井管下放与撤管

钢制通道达到设计深度后,将组装完成的预制多相抽提井管由管内下放至目标位置。随后利用打桩机向上提拉撤出钢管,预制井管在自重及周围土体约束作用下保持原位,底部挡泥板留置孔底自然打开,完成成井作业。该工艺利用高频振动对井周土体产生扰动作用,可在一定程度上降低黏性土层直推过程中形成的“涂抹效应”,改善井周土体孔隙连通性。与传统建井方式相比,振动直推工艺在提高施工效率的同时,有利于增强低渗透地层中抽提井的水力响应能力。综上,本文提出的多相抽提井构建方法通过“结构一体化、材料功能化、工艺振动化”的协同优化,实现了成井质量、运行耐久性和抽

提效率的同步提升。

3 工程应用

3.1 场地概况

为验证振动直推多相抽提井构建技术的工程适用性,选取上海市松江区某城市更新地块开展应用试验。该场地原为小作坊生产用地,现状地面建筑已拆除,规划为居住用地。

在水文地质条件方面,钻探深度 20.0 m 范围内主要由填土层、粉质黏土层及灰色淤泥质粉质黏土层组成。其中填土层厚度约 0.4~1.0 m,粉质黏土层厚度约 2.6~3.0 m,深部淤泥质粉质黏土层厚度约 3.5 m 以上。场地浅层地下水稳定水位为吴淞高程 2.26~2.97 m,整体呈东南向西北径流,并与周边地表水存在一定水力联系。

在污染特征方面,场地地下水主要受氯代有机物污染,特征污染物包括氯乙烯、1,2-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯。其中 1,2-二氯乙烯和四氯乙烯最高浓度分别为 3.974 mg/L 和 4.130 mg/L。污染主要分布于地下 8~10 m 范围内的粉质黏土层。

3.2 抽提井布设与试验

3.2.1 建井结构与工艺优化

在现场实施环节,针对振动直推建井工艺特点,对预制井结构进行了适配优化。相比人工开孔圆孔管,预制割缝式滤水管由于受力均匀,抗弯性能更好,能够适应振动直推过程中复杂应力条件。为进一步提高防堵性能,在滤管外侧包覆 100 目细纱,有效阻止细颗粒进入井内。

同时,对临时钢管底端挡泥板结构进行优化,将其直径调整为略大于钢管外径,从而在振动下压过程中有效阻止外部土体进入管内,保证下管通道的完整性。

3.2.2 不同建井工艺对比试验

为评价不同建井工艺对抽提效果的影响,在场内地布设 3 口抽提井(P1、P2、P3)及对应监测井 JC-1 和 JC-2,开展影响半径(ROI)试验,如图 3 所示。

中空螺旋钻建井(P1 井):井管外径 63 mm,抽提过程中真空度最高约 0.04 MPa,抽出水呈淡黄色,影响半径约为 3.52 m。

传统直推挤压建井(P2 井):井管外径 60 mm,最高真空度约 0.05 MPa,但抽出水呈黄褐色泥浆状,监测井水位变化不明显,影响半径约为 3.10 m,表明地层渗透性受到明显影响。

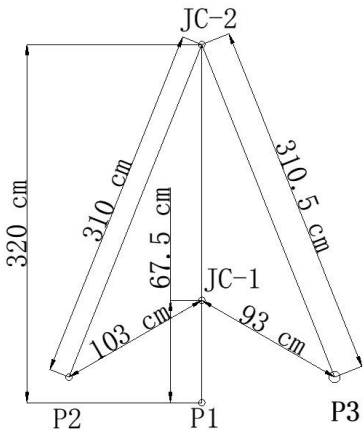


图 3 不同建井工艺对比试验实际建井测量图

振动直推建井(P3 井):按不小于 80 mm 的大口径预制井适配要求,现场采用外径 110 mm 的临时钢制通道下放井管,抽提过程中真空度最高可达 0.06 MPa,抽出水清澈无色,地下水位降深明显,影响半径最大,达到 3.83 m。抽提试验记录详见表 1。

表 1 抽提试验数据记录表

井号	建井方式	JC-1	JC-2
		地下水降深/cm	地下水降深/cm
P1	中空螺旋钻建井	9	1
P2	传统直推挤压建井	12	0
P3	振动直推建井	4	1

P1 井与 P2 井外径分别为 63 mm 和 60 mm,尺寸接近,二者影响半径差异主要受建井扰动方式影响;P3 井通道外径显著大于 P1、P2,较大的成井通道可增加井周水力接触面积和滤料层有效厚度,因此会对影响半径产生正向贡献。故本研究将 P3 影响半径提升理解为“大口径通道+高频振动减弱涂抹效应”的综合结果。

对比分析表明,不同建井工艺对地层结构扰动方式存在显著差异。传统挤压工艺易导致土体压密及孔隙封闭,而振动直推工艺通过高频扰动使土体结构松散,改善孔隙连通性,从而提升地下水渗流能力及抽提效率。抽提水量方面,本次对比试验未配置单井独立流量计,无法直接获得各井累计出水量,故以抽出水状态、监测井降深及影响半径作为抽水响应的对比指标。P2 井虽 JC-1 降深为 12 cm,但 JC-2 无明显降深且抽出水呈黄褐色泥浆状,表明抽水范围有限并伴随细颗粒迁移;P1 井 JC-1、JC-2 降深分别为 9 cm 和 1 cm,影响半径约 3.52 m;P3 井两处监测井均有水位响应,出水清澈,影响半径达 3.83 m,说明其抽水响应范围更大、出水稳定性更好。后续工程宜在单井出水管设置流量计,以进一步量化出水水量差异。

3.2.3 抽提井长期运行稳定性

为评价系统运行耐久性,在污染核心区布设传统螺旋钻井(W1井)和振动直推预制井(N1井),开展为期100 d的运行监测。

井下电视检测结果表明,N1井内部滤网及筛缝结构完整、通畅,底部仅有少量沉积物,显示出较好的成井质量。与N1井相比,W1井采用中空螺旋钻成孔和现场填砾,孔径较大、初期涌水量较大,常规运行真空度较稳定,但成井质量受孔壁稳定性和滤料填充均匀性影响更明显,存在泥砂涌入和滤层失效风险。由于W1井投入运行后需保持井口气密性,未拆井开展同条件井下电视复测,研究主要结合N1井井下电视、W1/N1真空度监测和出水情况进行对比。运行监测结果表明,在常规抽提工况(每日运行50~120 min)下,两类井均可维持稳定真空度。在第100天进行连续6 h高负荷抽提条件下,N1井真空度略有下降,主要受限于试验阶段滤料层厚度较小,但仍处于有效抽提范围。

4 应用成果分析

4.1 成井质量

成井质量是影响多相抽提系统运行效果的基础。通过井下电视检测对比不同建井方式的成井情况可见,传统建井工艺易出现孔壁塌陷、滤料分布不

均及井内泥砂淤积等问题,进而影响滤水通道通畅性。

本研究采用振动直推工艺结合一体化预制井结构构建的试验井(N1井)表现出良好的结构完整性。井内滤网及筛缝保持清洁,未见明显泥砂侵入及结构变形,底部沉积物较少,表明该建井方式能够有效减少施工过程中外部土体进入井内的风险。同时,一体化预制滤层结构保证了滤料分布均匀性,提高了井周水力连接条件。结果表明,该构建技术在复杂地层条件下能够显著提高成井质量,为后续稳定运行提供基础保障。

4.2 运行稳定性

抽提井的运行稳定性主要体现在真空度维持能力、抽水响应及抗堵塞性能。现场自2022年6月起对W1井和N1井连续监测100 d,每20 d读取一次当日真空度:前60 d每日运行50 min,第60~100 d每日运行120 min,第100天连续运行6 h。由图4各图可知,常规运行时两井真空度均保持相对稳定,说明两种工艺均可满足短时抽提;在连续6 h高负荷工况下,N1井因试验阶段钢制通道直径和滤料层厚度偏小出现真空度下降,但仍处于有效抽提范围。相同总真空度(0.06 MPa)下,W1井涌水量较大、排水通透性较好,但这与其孔径较大、现场填料量较多有关;N1井井内筛缝洁净、底部仅少量沉积,长期抗淤积能力较好。

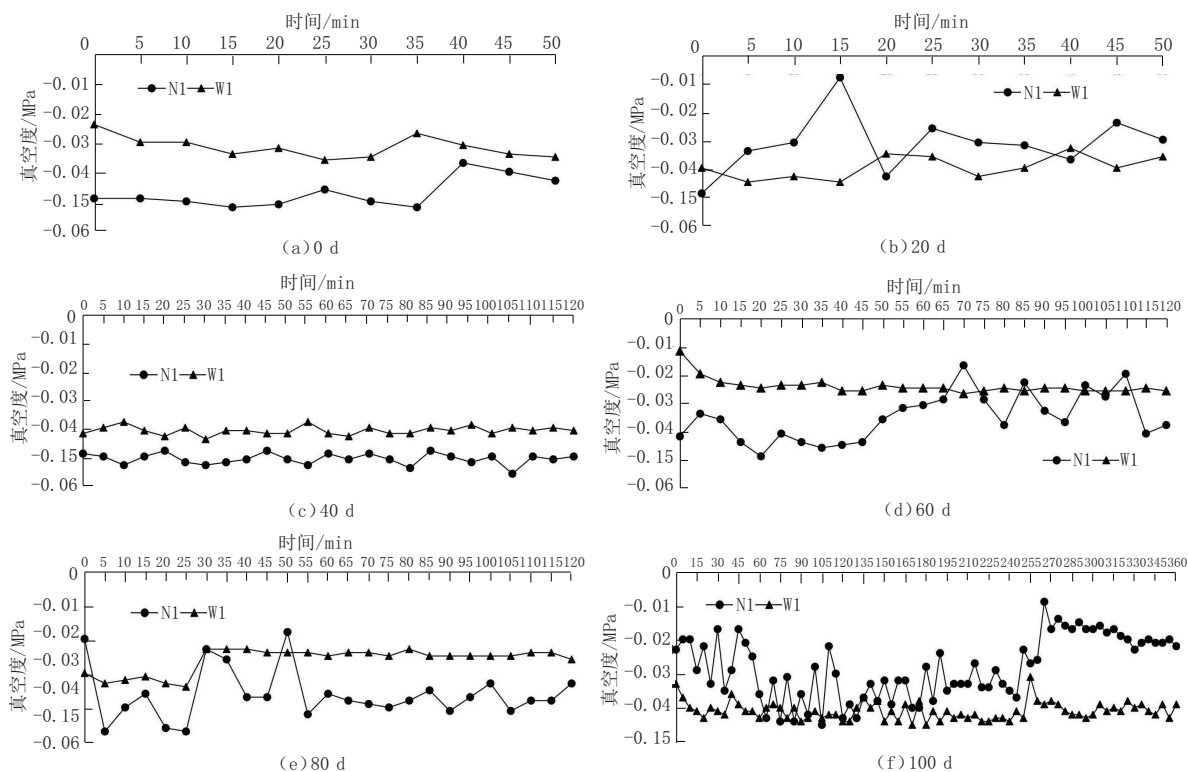


图4 W1和N1井真空度变化

从长期运行趋势来看,100 d监测结果表明N1井在每日50~120 min运行制度下可稳定运行至少100 d,并在高负荷连续运行后保持有效抽提响应。因此,一体化预制井结构结合抗菌材料设计,有助于降低井内堵塞风险,延长系统稳定运行周期;但在连续高负荷抽提工况下,仍应通过增大钢制通道直径、保证滤料层厚度和配置单井流量计进一步优化。

4.3 抽提效果

抽提效果主要通过井头真空度及影响半径(ROI)进行评价。试验结果表明,不同建井工艺对抽提性能具有显著影响。

传统直推挤压建井(P2井)对地层产生压密作用,导致孔隙结构受损,地下水渗流能力降低,影响半径仅约3.10 m。中空螺旋钻建井(P1井)虽能形成较大孔径,但存在孔壁稳定性不足问题,其影响半径约为3.52 m。

相比之下,振动直推建井(P3井)通过高频振动作用改善土体结构,使孔隙连通性增强,从而提高地下水渗流能力,其影响半径达到3.83 m,表现出最佳抽提效果。

P3井通道外径大于P1、P2,影响半径提升还包含井径扩大带来的水力接触面积增加和滤料层厚度改善效应。P1与P2外径接近,可用于比较中空螺旋钻与传统直推挤压扰动差异;P3则反映大口径通道与振动直推的协同作用。

结果表明,建井工艺对地层结构的扰动方式是影响多相抽提效率的重要控制因素。振动直推工艺能够在保证成井完整性的同时改善低渗透地层水力条件,从而显著提升抽提效果。

综上,本研究的多相抽提井构建技术在成井质量、运行稳定性及抽提效率方面均优于传统方法,能够满足城市更新污染场地原位修复的工程需求。

5 结 语

针对城市更新背景下低渗透污染场地多相抽提效率受限的问题,本文提出了一体化强化渗透成套预制多相抽提井构建技术,并通过工程应用进行了验证。主要结论如下。

(1)一体化预制结构可有效提升成井质量。通过将滤料层、止水层及井管结构进行集成设计,并采用分段组合方式,实现滤料层均匀分布,避免传统建井过程中塌孔及填砾不均问题,提高井周水力连接条件。

(2)功能化材料设计可增强系统运行稳定性。

采用耐腐蚀材料并引入抗菌组分,有效降低井管腐蚀及生物膜堵塞风险,使抽提系统在长期运行中保持较好的通水能力和稳定性。

(3)振动直推建井工艺可改善低渗透地层渗流条件。利用高频振动作用降低土体压密效应,增强孔隙连通性,克服传统直推工艺中“涂抹效应”导致的渗透性下降问题。

(4)工程应用结果表明,振动直推预制井影响半径达到3.83 m,该结果受高频振动减弱涂抹效应和较大井径增加水力接触面积的共同影响;在100 d运行监测中,系统在每日50~120 min运行制度下保持稳定,并在第100天连续6 h运行时仍保持有效抽提响应,可有效提升低渗透污染场地多相抽提效率。

参考文献:

- [1] Zhang S, Liu L, Fang X, et al. Barriers to the Renewal of Old Residential Communities in High-Density Urban Areas: Evidence from China[J]. Sustainability, 2025, 17(23): 10745.
- [2] 黄沈发,杨洁,吴健,等.城市再开发场地污染风险管控研究及实践[J].环境保护,2018,46(1):31-35.
- [3] 殷瑶,张祥.某在产企业土壤污染风险评估与风险管控研究[J].城市道桥与防洪,2025(8):337-341.
- [4] 王锦淮,顾春杰.多相抽提+原位化学氧化联合技术在有机污染场地的工程应用[J].上海化工,2017,42(12):20-24.
- [5] 王磊,龙涛,张峰,等.用于土壤及地下水修复的多相抽提技术研究进展[J].生态与农村环境学报,2014,30(2):137-145.
- [6] 王静,张峰,刘路.多相抽提技术的发展现状与展望[J].广州化工,2019,47(8):14-18.
- [7] Simon M, Saddington B, Zahiraleslamzadeh Z, et al. Multi-phase extraction: State-of-the-practice[R]. 1999.
- [8] 环境保护部.关于发布2014年污染场地修复技术目录(第一批)的公告[R].北京:环境保护部,2014.
- [9] 吴烨.河南鹤壁新区2号地热井存在问题分析与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006(12):45-47.
- [10] Smith S A, Comeskey A E. Sustainable wells: maintenance, problem prevention, and rehabilitation[M]. CRC Press, 2009.
- [11] 万利鹏,徐雷.建筑施工中井点降水及预防沉降的措施[J].建筑,2011(10):90-91.
- [12] 秦沛,李海明,刘春生.Geoprobe直推钻机在城市水土环境地质调查中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):1-8.
- [13] 卢予北.水井工程技术现状与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1999(2):40-43.
- [14] 陈兴伟,吴建华,王佳,等.电偶腐蚀影响因素研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(4):363-366.
- [15] Cullimore D R. Microbiology of well biofouling, 卷3[M]. CRC press, 1999.
- [16] DG/TJ 08-2295-2019 建设场地污染土壤与地下水土工处置技术标准[S].
- [17] Cavallaro A, Mierczynska A, Barton M, et al. Influence of immobilized quaternary ammonium group surface density on antimicrobial efficacy and cytotoxicity[J]. Biofouling, 2016, 32(1): 13-24.
- [18] 肖清华,李博文.载银无机抗菌剂的研究现状和发展趋势[J].中国非金属矿工业导刊,1999(6):5-7.