

小口径反循环清淤设备集成系统研发及应用

凌波, 卿启斌*, 王英蓉, 陈婉君, 肖尧, 罗兰, 熊勇

(湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南长沙 412000)

摘要:在“十四五”期间,全国针对“双源”清单及地下水环境监测,布设了大量小口径PVC地下水监测井,以监测潜水层地下水水环境质量。地下水监测井的井底及内壁常因泥沙、杂质等沉积造成堵塞。本文聚焦小口径地下水监测井维护、清淤难题,设计研发了集成气举反循环清淤工艺的便携式装备,阐述了便携式清淤设备系统组成及工艺原理等。欧拉三相流简化模型的模拟分析以及针对不同深度监测井、不同类型淤积物的清淤效果统计数据表明,研发的设备系统对不同深度的监测井清淤效果显著,监测井的淤积速度与地下水中土颗粒的性质呈显性相关;数值模拟分析的预测结果与工程实践的实测数据整体趋势基本一致,实际工程效果优于预测结果。该设备集成系统解决了生态环境领域小口径地下水监测井维护、清淤难题,显著延长了监测井使用寿命,经济效益显著。

关键词:小口径地下水监测井;便携式清淤设备;气举反循环;仿真模拟;淤积速度

中图分类号:P634;X832 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)01-0104-07

Research and application of the integrated system for small-diameter reverse circulation dredging equipment

LING Bo, QING Qibin*, WANG Yingrong, CHENG Wanjun, XIAO Yao, LUO Lan, XIONG Yong

(Survey and Monitoring Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Hunan Province, Changsha Hunan 412000, China)

Abstract: During the 14th Five-Year Plan period, a large number of small-diameter PVC groundwater monitoring wells have been deployed nationwide to monitor the environmental quality of groundwater in unconfined aquifers, as part of efforts targeting the "dual-source" inventory and groundwater environmental monitoring. The bottoms and inner walls of these groundwater monitoring wells often become clogged due to sediment and impurity deposition. This paper focuses on the challenges of maintaining and clearing silt in small-diameter groundwater monitoring wells. A portable equipment integrated with air lift reverse circulation dredging technology was designed and developed, and the system composition and technical principles of the portable dredging equipment were elaborated. Simulation analysis results based on a simplified Euler's three-phase flow model and statistical data on the dredging effectiveness of the equipment system for monitoring wells of different depths and various types of sediment indicated that the developed system significantly improves dredging efficiency for wells of varying depths. The sedimentation rate in monitoring wells is significantly correlated with the properties of soil particles in the groundwater. The predicted outcomes from numerical simulations are generally consistent with the measured data from engineering practices in terms of overall trends, with actual engineering results outperforming the predictions. This integrated equipment system addresses the challenges of maintaining and dredging small-diameter groundwater monitoring wells in the ecological and environmental sector, significantly extends the service life of monitoring wells, and delivers notable economic benefits.

收稿日期:2025-10-23; 修回日期:2025-12-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.016

基金项目:湖南省自然资源厅科学基金青年项目(编号:HBZ20240135);湖南省地质院基金项目(编号:HNGSTP202441)

第一作者:凌波,男,汉族,1987年生,高级工程师,主要研究方向为水工环地质、水土污染调查监测,湖南省长沙市长沙县东六路100号, 252778318@qq.com。

通信作者:卿启斌,男,汉族,1970年生,正高级工程师,从事工程技术研究和管理工作,湖南省长沙市长沙县东六路100号,swd1014@163.com。

引用格式:凌波,卿启斌,王英蓉,等.小口径反循环清淤设备集成系统研发及应用[J].钻探工程,2026,53(1):104-110.

LING Bo, QING Qibin, WANG Yingrong, et al. Research and application of the integrated system for small-diameter reverse circulation dredging equipment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1):104-110.

Key words: small-diameter groundwater monitoring well; portable dredging equipment; air lift reverse circulation; simulation; sedimentation rate

0 引言

自2019年生态环境部等九部委联合下发《关于印发地下水污染防治实施方案的通知》(环土壤[2019] 25号),湖南省建设了大量浅层地下水环境质量监测井^[1]。湖南省地下水环境监测井依据功能不同,分为省级及国家级监测点、单个污染源周边监测点,其中省级及以上监测点位409个,垃圾填埋场、重点监管企业、化工园区等“双源”周边监测点超过4000个。上述监测点位的监测井有很多采用PVC管壁,管径一般不超过75 mm,井深大多在20 m以内,监测含水层以第四系松散浅层地下水为主。然而,受地层泥沙沉积、滤水装置安装不当、滤料粒径级配不合理、PVC井管破碎等因素影响,监测井普遍淤积,影响水样采集,导致监测井报废或使用寿命不高。

传统的钻机平台下钻捞渣和空压机高压冲洗等清淤方法,在PVC管护壁的小口径监测井中并不适用,易损坏管壁,且因监测井位置和场地空间受限,大型设备难以进出和安装。在此背景下,研发一套便携、可靠、安全、高效、低成本的清淤设备意义重大。本文在深入分析监测井淤积过程及原理、影响因素的基础上,基于气举反循环工艺原

理^[2-4],设计研发一款集成于皮卡车的便携式反循环清淤设备集成系统,数值模拟分析及工程实际应用效果表明,该集成系统能够为小口径监测井维护、清淤提供可靠的技术支撑。

1 浅层地下水监测井淤积过程及影响因子

1.1 监测井淤积过程

监测井的淤积是一个复杂的过程(如图1所示),淤积速度主要受淤积物颗粒特性(如粒径、形状、密度和成分等)和水动力条件的影响,淤积固体物质的来源包括物理颗粒运移、化学沉淀析出、生物膜生长在监测井周围的含水层中,天然存在着由砂、粉粒、黏粒等组成的土壤细颗粒。当水位波动时,水流携带细颗粒进入井管内部后,井管内部的流速远低于在含水层孔隙中的流速。水流速度骤降,其携带能力减弱,在重力作用下,这些细颗粒不能再保持悬浮状态,开始缓慢下沉。根据土的颗粒成分和塑性特性,分为黏性土颗粒及非黏性土颗粒两大类。黏性泥沙中,颗粒聚合主要依赖于颗粒间的物理化学吸附作用,其聚合力远大于重力,这种特殊的受力状态使得黏性泥沙主要受絮凝作用控制,具有较强的吸附能力。非黏性的颗粒直径一般较大,主要以推移作用为主,基本不具备吸附能力。

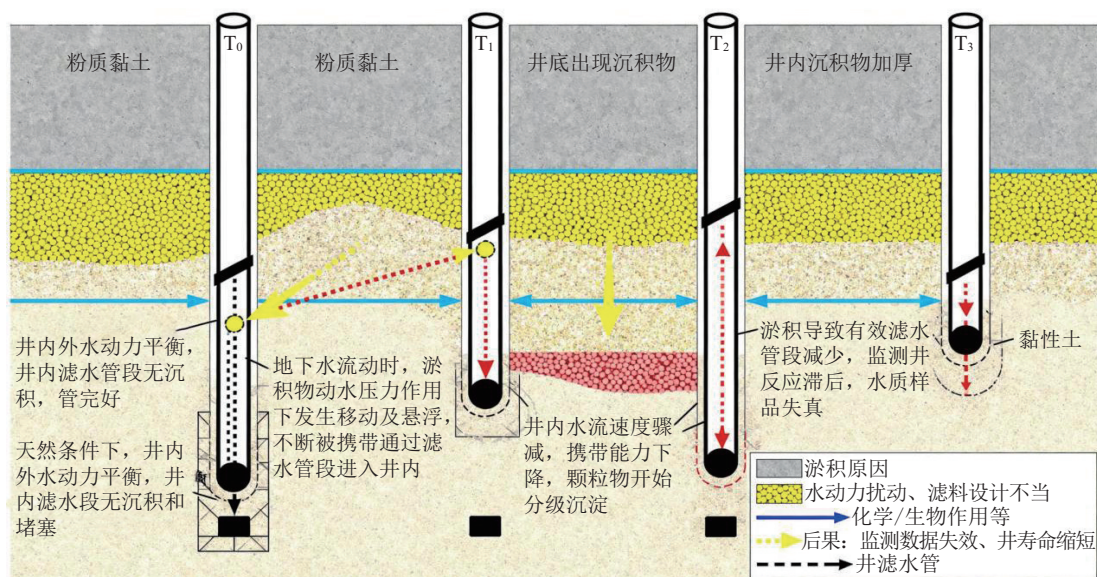


图1 监测井含水层淤积概念图

Fig.1 Conceptual diagram of sedimentation in the monitoring well aquifers

1.2 监测井淤积影响因素

沉积速度或单位时间内进入底床单位面积上的物质通量 D ,按若干级别的沉积通量之和计算^[5]:

$$D = \sum_i P_i W_{si} S_{bi} \quad (1)$$

式中: P_i ——第 i 级的沉积概率; W_{si} ——第 i 级的沉降速度; S_{bi} ——地下水中底部附近第 i 级含沙量。

式(1)是监测井中颗粒大小、流速与泥沙沉积一再悬浮过程的主要理论。Graf(1971)进一步阐述了泥沙侵蚀、输运、沉积过程所需的流速与粒径条件关系(图2)。我们在实践中,洞庭湖湖区等平原地区流速较缓,泥沙直径较小,主要以黏性土为主,易发生沉降,野外实际淤积统计结果与理论分析整体一致;与之对应的基岩山区,地下水流速较快,泥沙主要为非黏性泥沙,不易发生淤积。

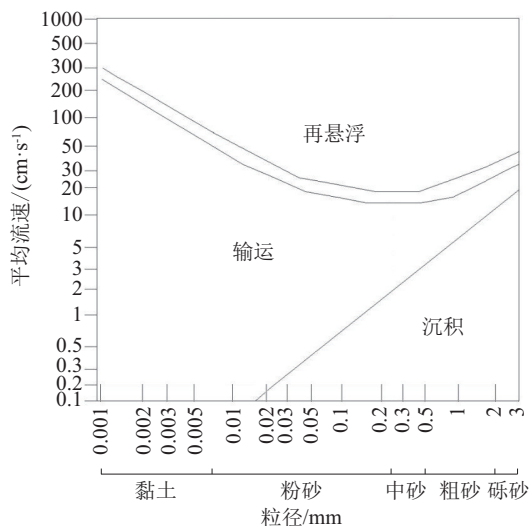


图2 泥沙发生侵蚀、运输、沉积所需的流速和粒径条件
Fig.2 The flow velocity and particle size conditions required for sediment erosion, transport, and deposition

2 反循环清淤设备集成系统研发

2.1 工艺原理

反循环清淤工艺采用高压气管、排渣管双管加混合器,空压机将压缩空气经高压气管送入气液混合器并形成气液混合物,由于混合物的密度比水小,在持续气流的作用下从排渣管排出,此时气液混合器及返出管中呈负压状态,淤积物在外部液柱压力作用下与井内井水混合通过吸渣管进入混合器,经排渣管带出井口进入沉淀分离器,从而达到清淤的目的。采取气举反循环清淤工艺,井口的沉

淀分离器能将淤积物与井水的混合物分离为泥沙与净水,净水可视监测井内来水效率情况进行回灌,或用作周边植物灌溉,有效避免外部水源对监测井水质的扰动,减少了周边环境的污染^[5-11]。

2.2 系统组成

反循环清淤设备集成系统主要部件包括:空压机、手动卷扬机、小型三脚架、高压气管、排渣管、气液混合器、冲洗吸渣管、沉淀分离器等。

空压机为W-3.2/7型(配S1115型柴油机),其额定排气压力0.7 MPa,排气量3.2 m³/min,体积为长×宽×高=1200 mm×500 mm×1000 mm,能整体集成在常规皮卡车货箱上。

冲洗喷头上设置5个出气孔,1个为90°方向直喷孔,其余4个为135°反向斜喷孔。

气液混合器作为气举反循环工艺中的重要组成部件,由上下封闭的空心圆钢筒、可替换式芯管、高压气管连接接头3部分组成,整体规格最大为 $\Phi 61$ mm,可满足小口径洗井要求^[1]。空心圆钢筒外径61 mm,内径58 mm,长度200 mm,上端面偏中心线两侧各布置一个 $\Phi 28$ mm的锥形孔和一个 $\Phi 10$ mm的螺纹孔,下端面在上端面锥形孔同心轴线上设有一个 $\Phi 34$ mm螺纹孔;可替换式芯管可从下往上通过丝扣安装在空心圆钢筒上,其管体上部为 $\Phi 28$ mm环形圈,用于连接排渣管;下部设置 $\Phi 32$ mm镀锌管母螺纹,用于连接抽吸管($\Phi 32$ mm镀锌管);高压气管连接接头,一端设置15 mm公螺纹连接高压进气管,另一端设置10 mm公螺纹安装在空心圆钢筒上^[1]。

反循环便携式清淤设备工作原理见图3,实物见图4。

3 仿真模拟研究

3.1 欧拉多相流模型

欧拉多相流模型可以处理气、液、固多相流问题。该模型假设多相流中各相之间存在瞬时平衡状态,即各相的速度和温度是相同的。通过求解质量守恒、动量守恒、能量守恒和物质平衡方程,可以计算各相的运动状态和相互作用。该模型适用于多相流中各相浓度相对较低的情况,如气体固体流动、气泡流^[12]。在小口径浅层地下水监测井清淤模拟中,利用该模型可以有效描述压缩空气、井水和淤积物之间的复杂流动特性,包括气液混合、固体

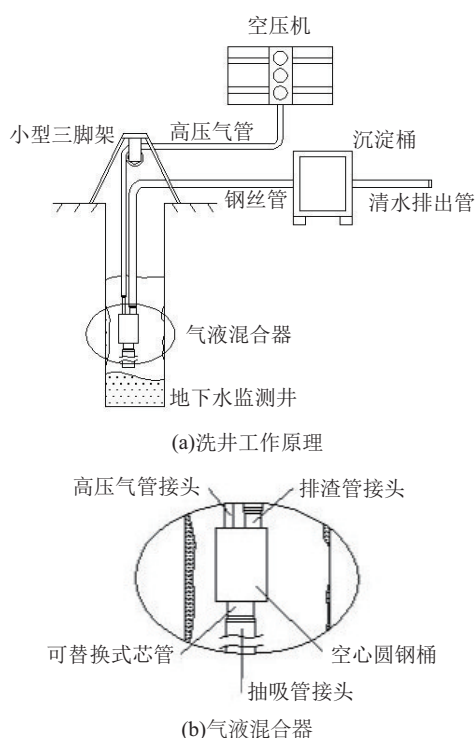


图3 反循环清淤设备集成系统示意

Fig.3 Schematic diagram of the integrated system for reverse circulation dredging equipment



图4 反循环清淤设备集成系统实物

Fig.4 Physical image of the integrated system for reverse circulation dredging equipment

颗粒的悬浮和输送等现象,为准确模拟清淤过程提供了有力的工具^[13-17]。

3.2 数值模型构建

根据浅层地下水监测井常见的结构尺寸,建立三维数值模型。三相流体与模型如图5所示,监测井井深25 m,监测井滤水管深度0~20 m,滤水管选用孔径5 mm筛管,按最极端情况分析,井内淤积的体积分数按最严重40%模拟(砂土密度为 2.05 g/cm^3 ,颗粒度为0.25 mm;黏土密度为 1.95 g/cm^3 ,颗粒度为0.0075 mm),水位20 m处。利用ICEM软件对

反循环清淤系统简化三维模型进行建模与网格划分,网格数量为2161074,节点数量为11356564。

基于Fluent软件,采用欧拉多相流模型对系统内气液固三相流动开展三维数值模拟研究。0~20 m范围内为水,市场主流空压机配备下,分析砂土或黏土在整个流体内的体积分数,模拟对黏性土、砂性土清淤效果。

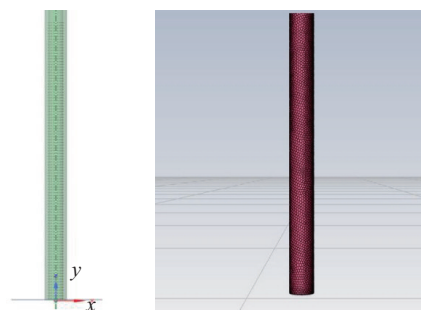


图5 监测井气举反循环清淤模型构建

Fig5 Construction of air lift reverse circulation dredging model for monitoring wells

3.3 不同气压数值模拟计算结果及分析

首先,压力与清淤效果正相关,高压显著提升流体动能,破坏颗粒间作用力,降低剩余体积分数,提升清淤效果;其次,颗粒度影响清除效率,在相同的压力下,砂土剩余体积分数相对黏土较大,这主要受颗粒间力学性质差异影响,饱和状态下砂土主要受颗粒间摩擦力影响,黏土主要受黏聚力和摩擦力影响;最后,砂土颗粒由于粒径大沉降速度快,需要较高的流体动力才能被有效悬浮和清除。

如图6所示,初始状态,在1 MPa气压下,接近40%淤积率的直径0.075 mm的黏性土颗粒,随着气液混合液剪切作用影响,颗粒间的聚合力受到破坏,稳定沉积的淤积物分层被再悬浮;随着气液混合液通过管道被输送至外部,接近30%淤积率的黏性土再悬浮及沉积速度处于阶段性平衡;随着时间的推移,黏性土再悬浮速度远超沉积的速度,监测井内剩余黏性土的体积不断减少,剩余体积3%时再次形成平衡,清淤效果接近极限。初始状态下直径0.25 mm的砂性土主要受重力作用,随着气液混合液的输入,砂性土发生再悬浮及沉积作用,剩余体积15.4%时砂性土的再悬浮速度与沉积速度形成最终的平衡,清淤效果接近极限。

如图7所示,在0.6 MPa气压持续工况下,黏土

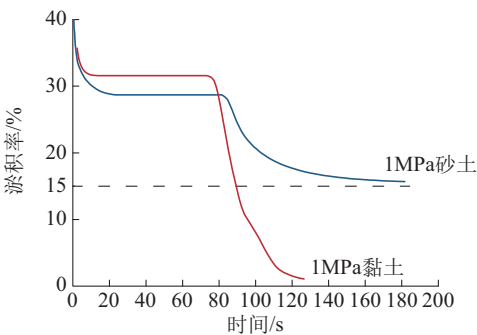


图6 1.0 MPa气压下颗粒体积曲线
Fig.6 Volume curve of 1.0 MPa pressure

剩余体积分数为14%，黏性土颗粒的再悬浮与沉积速度基本处于动态平衡过程；在0.1 MPa气压持续工况下，监测井内砂土和黏土均表现出较差的清除效果，流体动能极低（入口压力0.1 MPa），仅能扰动表层松散砂粒，深层砂土因沉降速度快无法悬浮。流体剪切力不足，无法破坏砂土絮凝结构；黏土颗粒保持团聚状态，难以迁移。监测井内淤积物体积分数初始为40%，黏土稳定后剩余体积分数29.2%。

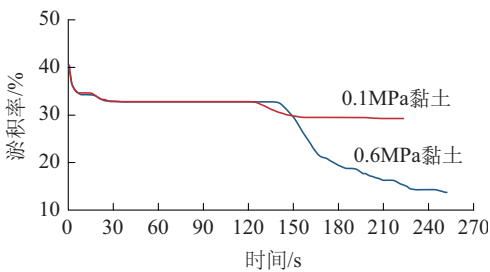


图7 不同气压下黏土体积曲线
Fig.7 Volume curve of different pressure of clay

4 工程验证及应用

2023年项目研发团队采用气举反循环清淤设备集成系统先后在湖南省生态环境监测中心监测井维护项目多口监测井及衡阳重点监管企业周边3口监测井验证，部分实测统计数据详见表1。监测井最深52.28 m，最大淤积率43.89%，最大淤积深度9.44 m。实践验证过程中，除部分井内水位较深的监测井和干枯监测井外，均完成了淤积物清理，淤积率均低于5%，达到了监测井相关要求，实现了清淤目的。设备应用现场情况如图8所示，清理出的部分淤积物如图9所示。

表1 部分地下水监测井清淤情况

Table 1 Sediment removal status of partial groundwater monitoring wells

序号	监测井编号	钻井深度/m	井内水位/m	洗井前井深/m	洗井后井深/m	清淤深度/m	洗井前淤积率/%	洗井后淤积率/%	淤积物	初始最大沉没比
1	HNDX12-ST05-GW01	14.85	5.2	13.7	14.65	0.95	7.74	1.35	黏性土	0.59
2	HNDX04-WR05-GW01	16.97	3.45	15.84	16.2	0.36	6.66	4.54	砂性土	0.78
3	HNDX04-ST03-GW01	19.45	6.48	17.34	19.45	2.11	10.85	0.00	黏性土	0.56
4	4309DYY009-001-NJ01	20.7	12.1	13.52	15.95	2.43	34.69	22.95	砂性土	0.30
5	4313DYY016-NJ01	20.8	9.2	14.4	14.6	0.2	30.77	29.81	砂性土	
6	HNDX04-WR01-GW01	40.05	9.25	29.23	40.05	10.82	27.02	0.00	黏性土	0.50
7	HNDX11-WR02-GW01	40.2	16.5	36.59	39.8	3.21	8.98	1.00	黏性土	0.51
8	HNDX11-WR02-GW04	64	16.1	58.05	59.1	1.05	9.30	7.66	砂性土	0.73
9	HNDX06-ST05-GW01	52.28	4.38	47.4	50.19	2.79	9.33	4.00	砂性土	0.86
10	HNDX06-ST05-GW02	39.28	1.0	36.54	38.88	2.34	6.98	1.02	砂性土	0.91
11	HNDX06-ST05-GW03	40.48	1.2	35.32	40.2	4.88	12.75	0.69	砂性土	0.85
12	HNHY-J01	32.14	9.22	22.54	31.98	9.44	29.87	0.50	黏性土	0.42
13	HNHY-J02	18.75	5.56	10.52	18.7	8.18	43.89	0.27	黏性土	0.27
14	HNHY-J05	22.15	6.58	18.24	22.1	3.86	17.65	0.23	黏性土	0.53

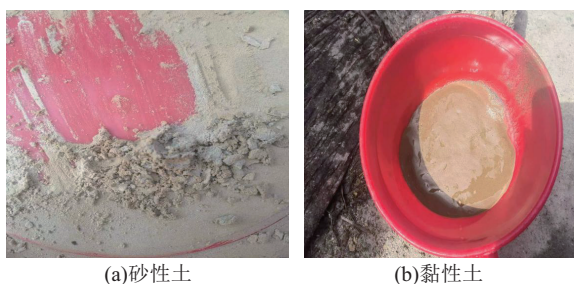
注：序号1~11数据来源于湖南省生态环境监测中心监测井维护项目，12~14数据来源于衡阳监管企业调查。

根据项目实际工作中统计的14个监测井实测数据分析，监测井淤积程度与土的颗粒性质有明显关联性。按照Graf(1971)阐述的泥沙侵蚀、输运、沉积过程所需的流速与粒径条件关系，黏性土由于



图8 清淤设备工作情况

Fig.8 Working condition of dredging equipment



(a)砂性土

(b)黏性土

图9 清理出的淤积物

Fig.9 The removed sediment

颗粒较小,相同流速下由于地下水系统的不稳定,极易导致监测井淤积,部分监测井2~3年黏性土淤积率超过40%。在相同参数清淤状态下,监测井清淤效果受淤积物的颗粒性质的影响明显,黏性土清淤效果更加明显,如图10所示。

监测井的清淤效果不仅受压力和淤积物颗粒性质影响,还受清淤作业中沉没比的稳定程度制约。如图11所示,在样本数据中,4号和5号监测井的清淤效果均较差:4号井因水位埋深较深,初始沉没比仅0.3,导致清淤效果不佳;5号井则因井内无水,无法进行有效清淤。根据现场经验,沉没比 >0.5 时,清淤作业通常稳定且效果良好。沉没比衡量了清淤工具在可携带介质中的淹没程度,比值越高,工具周围介质的连续性越强,越易形成稳定高效的固液两相上升流,当沉没比 >0.5 时,能提供充

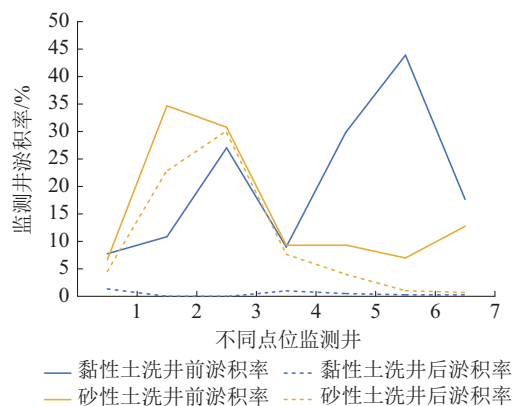


图10 不同土颗粒的淤积率与清淤效果

Fig.10 Sedimentation rate and dredging effect of different soil particles

足的“吸入压头”和稳定流态,有效扰动淤积物并促使其进入上升流。4号井沉没比0.3,冲洗喷头在泥浆混合物中的深度较浅,导致吸入负压不足,难以充分搅动和吸取底部致密淤泥,气-液-固三相流在工具附近易失稳,现场清淤中气体易“短路”直接上窜,降低携带效率,同时作业过程波动大,常出现间歇性出浆现象。

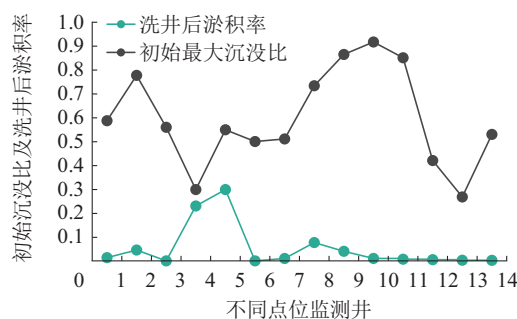


图11 监测井沉没比与清淤效果对比

Fig.11 Comparison of sinking ratio and dredging effect of the monitoring wells

5 结论

本文以生态环境领域小口径浅层地下水监测井淤堵问题为导向,研发了一款基于气举反循环工艺的集成式清淤设备。通过 Fluent 仿真模拟与工程实践数据统计分析,得出结论如下:

(1)基于气举循环钻探原理,结合生态环境领域浅层小口径监测井特点,完成了小口径清淤集成设备的研发设计及实物组装,有效解决了小口径监测井淤积物的清理难题,极大地延长了监测井使用寿命。

(2)小口径清淤集成设备的工程效果在工程实践中得到充分验证,14口监测井清淤实测数据表明设备对淤积物的清理成效显著,与数值模拟预测整体趋势基本一致,实际工程效果优于数值模拟预测;由于颗粒力学性质的差异性,在相同设备参数下,黏性土清淤效果较砂性土整体效果更好。

(3)淤积物的颗粒性质和稳定沉没比是影响设备清淤的重要因素,设备作业时沉没比 >0.5 时,清淤作业通常稳定且效果较好。

(4)集成设备研发设计充分考虑不同气压条件,Fluent 仿真模拟结果表明,压力与清淤效果显著正相关。

参考文献(References):

- [1] 王泽,张旭,李中明,等.小口径浅层地下水监测井便携式清淤设备的研发与应用[J].地质装备,2025,26(2):12-16.
WANG Ze, ZHANG Xu, LI Zhongming, et al. Development and application of portable desilting equipment for small diameter shallow groundwater monitoring wells[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2025,26(2):12-16.
- [2] 伍晓龙,冯钰琦,杜垚森,等.气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J].钻探工程,2022,49(3):83-91.
WU Xiaolong, FENG Yuqi, DU Yaosen, et al. Simulation analysis of the flow field of the air lift reverse circulation dual wall drill tool[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):83-91.
- [3] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.
CHEN Haowen, YU Yanjiang, WANG Yanli, et al. Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep-sea riserless mud recovery drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):9-15.
- [4] 谢灿祥.气举反循环法在重力式码头抛石基床清淤中的应用[J].珠江水运,2022(5):81-84.
XIE Canxiang. Application of air-lift reverse circulation method in dredging of gravity wharffill bed[J]. Pearl River Water Transport, 2022(5):81-84.
- [5] Graf W H. Hydraulics of Sediment Transport[M]. New York: McGraw-Hill, 1971.
- [6] 张庆平,杨军平,李学军.供水井清淤施工方法[J].西部探矿工程,2018,30(12):38-41.
ZHANG Qingping, YANG Junping, LI Xuejun. Construction method of dredging for water supply wells[J]. West-China Exploration Engineering, 2018,30(12):38-41.
- [7] 赵亮,祁利民,同立峰.反循环疏干浅井在轮斗连续系统效率提升方面的应用[J].露天采矿技术,2020,35(1):57-60.
ZHAO Liang, QI Limin, YAN Lifeng. Application of reverse circulation dewatering wells in efficiency improvement of bucket continuous system[J]. Opencast Mining Technology, 2020,35(1):57-60.
- [8] 董化标.钻探技术在矿山地质勘查工程中的应用实践研究[J].世界有色金属,2024(11):187-189.
DONG Huabiao. Research on the application practice of drilling technology in mining geological exploration engineering[J]. World Nonferrous Metals, 2024(11):187-189.
- [9] 祁世文.高效反循环捞砂技术在漏失垮塌井治理中的应用评价[J].化学工程与装备,2024(4):65-67.
QI Shiwen. Application evaluation of efficient reverse circulation sand-lifting technology in the treatment of leakage and collapse wells[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2024(4):65-67.
- [10] 张东方.气举反循环与正循环钻掘工艺在深部地热井施工中的应用[J].江西建材,2023(12):344-346.
ZHANG Dongfang. The application of air-lift reverse circulation and positive circulation drilling technology in deep geothermal well construction[J]. Jiangxi Building Materials, 2023(12):344-346.
- [11] 崔金龙,关彪,张克永.YGL-220RC型空气反循环取样钻机的研制及应用[J].钻探工程,2023,50(S1):424-430.
CUI Jinlong, GUAN Biao, ZHANG Keyong. Development and application of YGL-220RC air reverse circulation sampling drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):424-430.
- [12] 吴霜.空气-水气力提升泵流动特性三维数值模拟研究[D].西安:西安理工大学,2022.
WU Shuang. Three-dimensional numerical simulation of air-water pneumatic lifting pump flow characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [13] 左娟莉,吴霜,杨泓,等.变气量下空气-水气力提升系统水力特性数值模拟研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2021,36(4):575-590.
ZUO Juanli, WU Shuang, YANG Hong, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of air-water lifting pump in different intake ways[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021,36(4):575-590.
- [14] 黄泽.气力提升清淤系统多相流动特性实验及数值模拟研究[D].西安:西安理工大学,2023.
HUANG Ze. Experimental and numerical simulation study on multiphase flow characteristics of air-lift dredging system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [15] 林鹏,苏子泽,胡东,等.水射流强化疏浚用气力泵提升性能的试验研究[J].中国农村水利水电,2023(9):153-158,165.
LIN Peng, SU Zize, HU Dong, et al. Experimental research on enhancing the dredging performance of airlift pump aided by water jet[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(9):153-158,165.
- [16] 胡东,林安源,王霞光,等.螺旋进气增强气力清淤性能试验研究[J].流体机械,2022,50(10):16-22.
HU Dong, LIN Anyuan, WANG Xianguang, et al. Experimental study on performance enhancement of airlift dredging by swirl injection[J]. Fluid Machinery, 2022,50(10):16-22.
- [17] 胡东,林安源,王霞光,等.高效螺旋气力清淤实验研究[J].泥沙研究,2022,47(3):45-51.
HU Dong, LIN Anyuan, WANG Xianguang, et al. Experimental study on high efficiency airlift dredging by swirl injection[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(3):45-51.

(编辑 王文)