

· 综 合 ·



# 电化学脱水干化技术 在环保疏浚底泥中的应用

曹 凯, 朱文泉, 程 瑾, 吴玉涛

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

**摘要:** 针对环保疏浚底泥含水率高、压缩性大、脱水时间长、纳泥场地供给不足等技术难题, 进行电化学脱水干化方法的研究。将场区分成4个单元, 即单向真空、单向电化学、双向真空和双向电化学单元, 开展现场平行对比试验。结果表明, 电化学单元较真空预压单元脱水效果明显, 考虑到电能功耗和脱水效果, 中电压(30~60 V)是最优外加电压值。双向排水结构对电化学脱水干化技术起到很好的加强作用, 可实现多批次高效固定场地的异位脱水处理, 对土地资源有限的城区具有一定的工程推广意义。

**关键词:** 电化学; 疏浚底泥; 双向排水; 异位脱水

**中图分类号:** U 616

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2023)S2-0001-05

## Application of electrochemical dehydration drying technology in environmental dredging sediment

CAO Kai, ZHU Wen-quan, CHENG Jin, WU Yu-tao

(CCCC Tianjin Ecological & Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

**Abstract:** Regarding the technical problems of high-water content, high compressibility, long dehydration time and insufficient supply of slime field in environmental dredging sediment, we study the electrochemical dehydration drying technology. The field area is divided into four units, namely the unidirectional vacuum, the unidirectional electrochemical, the double direction vacuum and the double direction vacuum electrochemical units, and the parallel comparison test is carried out. The results show that the dehydration effect of the electrochemical unit is more obvious than that of the vacuum preloading unit. Considering the power consumption and dehydration effect, the medium voltage(30 V to 60 V) is the optimal applied voltage value. In addition, the bidirectional drainage structure plays a good role in strengthening the electrochemical dehydration drying technology, which can realize the ectopic and efficient dehydration of multiple batches at fixed sites, and has certain engineering promotion significance for the urban areas with limited land resources.

**Keywords:** electrochemical technique; dredging sediment; double direction drainage; ectopic dehydration

目前, 城区内江河湖库底泥淤积严重, 内源污染的现象不容忽视, 且大部分国内较发达城市及其周边区域用于存放环保疏浚污染底泥的堆场面积有限, 现有脱水技术并不能满足在短时间内对底泥一次性大规模脱水干化的需求。

近些年, 各种改进和创新的底泥脱水干化技

术发展迅速, 其中电化学技术就是其中的典型代表。电化学技术是在土体中插入直流电极, 使土中的部分孔隙水在电场作用下从阳极向阴极移动, 实现土的排水固结的方法, 其特点是对土颗粒大小不敏感。将真空预压与电化学技术相结合, 可以发挥各自的优势, 弥补各自的不足, 是处理细

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 曹凯(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事软土地基处理及岩土工程勘察与设计。

颗粒、低渗透性土的一种有效方法<sup>[1-4]</sup>。在一定含水率的土中施加电场后，不仅会引起电渗、电泳、电迁移等一系列电动现象，同时还会引起复杂的物理化学反应和过程，包括电极的腐蚀、水的电解、离子交换、离子扩散和运移等<sup>[5-6]</sup>，这些反应和过程会进一步提高土体强度，此为化学加固机理。但是，电化学技术需要消耗较多的电能，脱水成本相比常规真空预压增加较多，且大面积的脱水工程施工工序相对复杂，底泥脱水效果难以保证。

为了解决以上难题，可在疏浚区附近寻找面积适当的坑塘，采用带有底部排水结构的电化学脱水处理，将单批次处理完成的底泥转运或资源化利用后，再循环进行吹填→脱水→转运的处置流程，实现多批次高效固定场地的异位脱水处理。既可以解决疏浚底泥脱水困难的问题，也可以解决城区纳泥场地供给不足的难题。对土地资源有限的地区具有一定的工程推广意义。另外，底部

排水结构可重复利用，保证脱水效果的同时，节省工程造价。

1 方案设计

现场中试的坑底面积为 288 m<sup>2</sup>，分为 A1、A2、B1、B2 共 4 个平行对比试验单元，其中 A1、A2 单元设计采用单向(垂直向)排水，B1、B2 单元设计采用双向(水平向、垂直向)排水；A1、B2 单元设计采用常规真空预压脱水技术；A2、B1 单元设计采用电化学脱水技术。试验单元面积为 72 m<sup>2</sup>，现场中试的试验单元见图 1，断面结构见图 2。

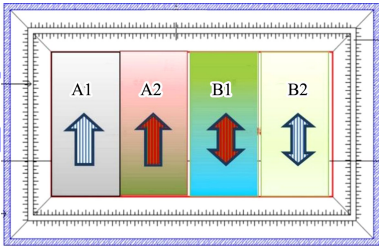


图 1 试验单元

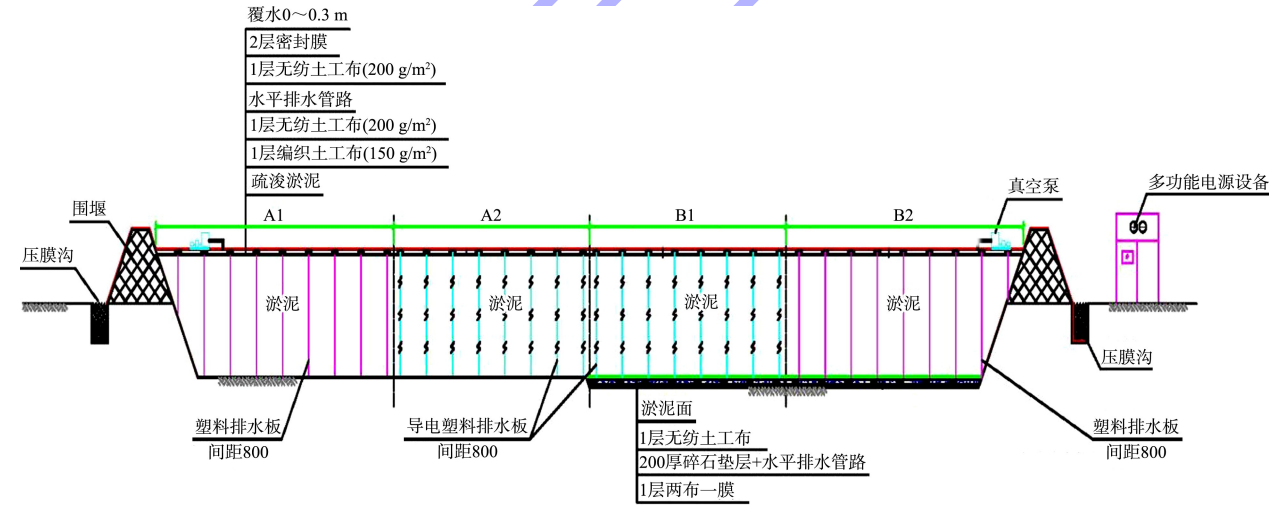


图 2 断面结构 (单位: mm)

2 底部排水的目的

本文提出一种带有底部排水结构的双向排水电化学脱水干化方法，该方法首先在土体底部预埋水平向排水体，其与竖向排水板和顶面水平向排水体实现双向综合排水系统，进行分批次的快速高效脱水处理。软基处理的过程中，保证真空压力相对均匀地作用于土层全深度范围，可保证深部土体的真空压力，缩短土体的渗流通道，从而达到较好的处理效果。双向排水结构下的电化

学脱水干化技术脱水效果更好、耗时更短、泥质环保，既可以解决高含水率底泥不方便运输的问题，也可以根据底泥处理后的技术指标进行合理的资源化利用，成本也会进一步降低。

具体做法是在 B1 和 B2 区坑底依次铺设 1 层无纺土工布、200 mm 厚碎石垫层，将直径 40 mm 的打孔波纹滤管以 1.6 m 间距埋入碎石垫层中，构建底部排水通道，见图 3。

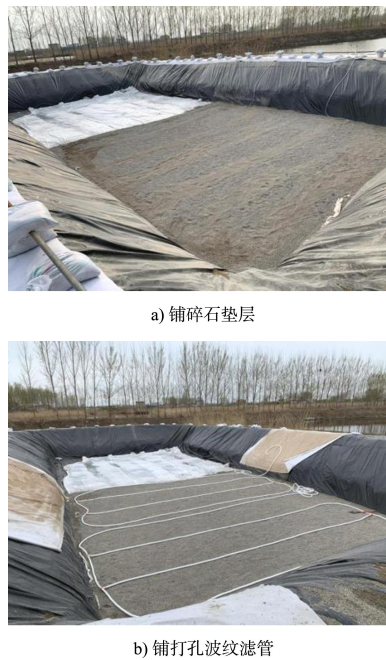


图 3 铺底部排水通道

3 试验工艺流程

现场中试真空加载 46 d, 其中电化学加载 26 d。前期准备时间耗时较多, 后续在合理工序安排和多批次处理的情况下, 平均单批次脱水工期小于 20 d, 试验工艺流程见图 4。

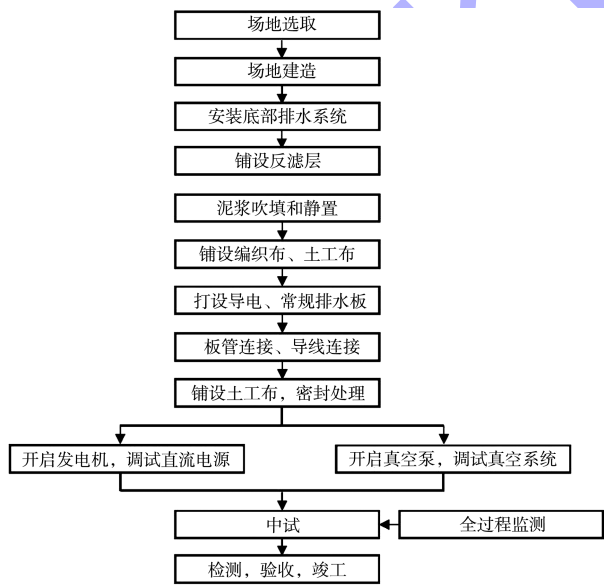


图 4 试验工艺流程

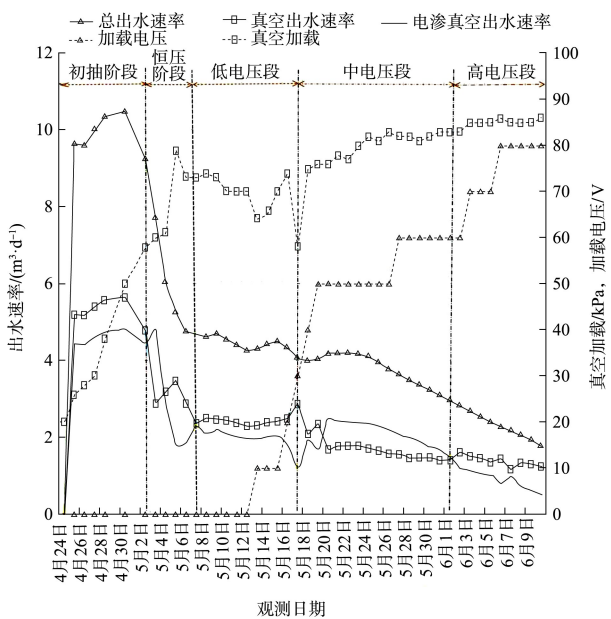
4 试验结果与分析

4.1 排水量

现场中试设置 2 台真空泵, 1 台泵连接电化学区, 即 A2 和 B1 单元; 1 台泵连接真空预压区,

即 A1 和 B2 单元。故排水量分析仅对真空和电化学效果进行分析。

现场试验分 5 个阶段, 出水速率-真空加载时程关系曲线见图 5。其中: 1) 初抽阶段(真空负压 30~60 kPa)。随着真空负压的增加, 试验前期出水速率持续增大, 抽水效果明显, 土体中的大部分自由水被排出, 由于导电板和普通排水板的材料构造略有差异, 电化学区的出水量略小于真空区, 在抽真空第 8 d 时, 出水速率的大小达到一致, 总出水量相对稳定, 维持在 9.893 m<sup>3</sup>/d; 2) 恒压阶段(60~80 kPa)。随着土体中自由水被大量排除, 结合水脱水相对困难, 造成出水量急剧减小, 至 5 月 7 日, 电化学区和真空区的出水量达到一致, 约 2.3 m<sup>3</sup>/d; 3) 低电压段(电压 <30 V、真空恒压 ≥80 kPa)。由图 5 可看出, 低电压段对脱水效果影响较小, 未见出水量明显增加, 出水量保持稳定; 4) 中电压段(电压 <60 V、真空恒压 ≥80 kPa)。中电压段初期, 电化学区出水量增大 110%, 效果明显, 后期缓慢减小, 而真空区的出水量则在持续下降; 5) 高电压段(电压 ≥60 V、真空恒压 ≥80 kPa)。此阶段为整个试验的尾声, 高电压阶段, 排水效果不明显, 出水量持续下降, 达到新低。综上, 排水量在中电压段体现了其优势, 排除了土中大部分的弱结合水。



4.2 沉降

试验前的泥面高程为 7.9 m，试验结束后，使用水准仪对场区内地面高程进行边长为 1 m 的网格测量，各区平均高程见图 6，对平均泥面高程进行统计，见表 1，得到 A1 区(7.135 m) > B2 区(7.034 m) > A2 区(7.022 m) > B1 区(6.965 m)。A2 区比 A1 区沉降增加了 113 mm，沉降增加幅度为 14.8%；B1 区比 B2 区沉降增加了 69 mm，沉降增加幅度为 7.86%。B2 区比 A1 区平均多沉降 101 mm，沉降增加幅度为 13.2%；B1 区比 A2 区

平均多沉降了 57 mm，沉降增加幅度为 6.5%。沉降最大位置发生在 B1 区与 B2 区交界的地方。

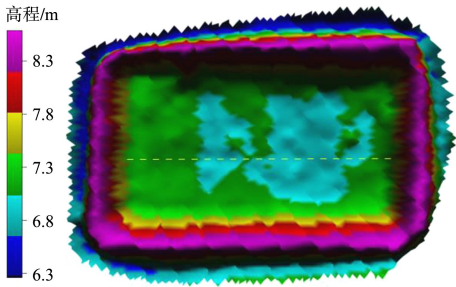


图 6 试验后场地顶高程云图

表 1 各试验单元竖向压缩率

单元	方法	开始时顶高程/m	结束时顶高程/m	初始厚度/m	沉降量/m	剩余厚度/m	竖向压缩率/%
A1	单向真空法	7.900	7.135	2.000	0.765	1.235	38.3
A2	单向电化学法	7.900	7.022	2.000	0.878	1.122	43.9
B1	双向电化学法	7.900	6.965	1.950	0.935	1.015	47.9
B2	双向真空法	7.900	7.034	1.950	0.866	1.084	44.4

中试的吹泥口位于 B2 单元。在吹填的过程中，B2 单元靠近围堰的土体反复冲击压缩，造成土体密实程度明显高于其他 3 个单元，影响了最终沉降效果，倘若在土质相对均匀的情况下，B2 单元的最终沉降量会介于 A2 和 B1 单元之间。

以单向排水真空预压沉降为基准，对比其他各区，计算增益性真空预压的提高效果，见图 7。可以看出，双向排水真空预压较单向排水真空预压效率提高 7.5%，单向排水电化学较单向排水真空预压效率提高 18.6%，双向排水电化学较单向排水真空预压效率提高 29.2%。

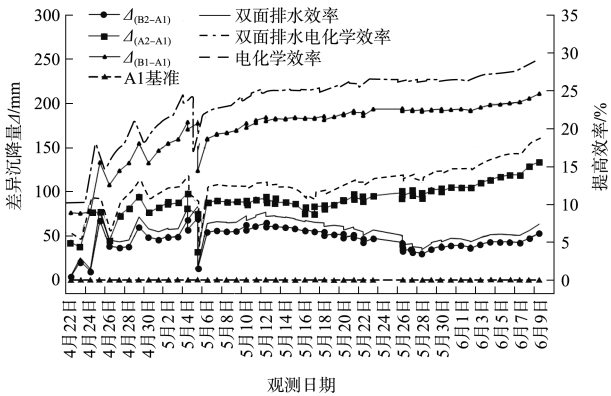


图 7 基于 A1 单元的各区差异沉降量关系

4.3 含水率

试验前，疏浚底泥的平均含水率 180%，试验后，4 个试验单元采用相同的取样方式，建立分单

元、分层含水率变化关系和分区平均含水率变化关系，见图 8、9。

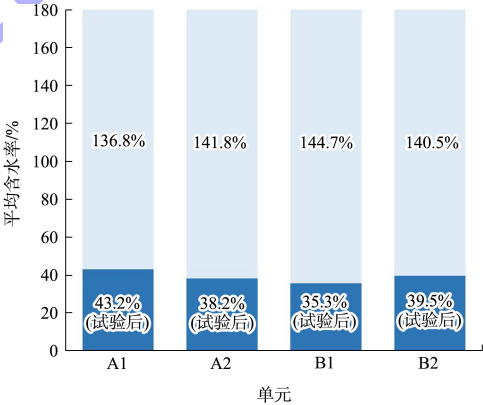


图 8 各分区平均含水率变化关系

	A1单元				A2单元				B1单元				B2单元			
	上层	中层	下层	试验后	上层	中层	下层	试验后	上层	中层	下层	试验后	上层	中层	下层	试验后
含水率/%	137.1%	135.0%	138.4%	42.9%	141.7%	141.4%	142.3%	38.3%	141.9%	144.3%	147.7%	38.1%	138.2%	136.9%	146.5%	41.9%
试验后	42.9%	45.0%	41.6%	38.3%	38.6%	35.7%	37.7%	35.3%	41.9%	43.1%	33.5%	32.3%	41.9%	43.1%	33.5%	33.5%

图 9 分单元分层含水率变化关系



4.3.1 双向排水效果对比分析

在双向真空压力的作用下, 平均含水率 B2 单元较 A1 单元低 3.7%, 底部含水率低 8.1%; 平均含水率 B1 单元比 A2 单元低 2.9%, 底部含水率低 5.4%。可以看出, 底部排水差异的出水效果较为明显, 上下土层含水量也比较均匀。由于试验区面积有限, 下部排水试验单元的处理效果受限, 可以预料, 如果进行较大面积的施工, 土层在双向真空负压的压力下, 脱水的效果会更为明显。

4.3.2 电化学排水效果分析

平均含水率 B1 单元比 A1 单元低 7.9%, A2 单元比 A1 单元低 5.0%, 电化学效果较为明显, 尤其是在真空负压将土层中大部分自由水排出后, 通过电化学技术的电解作用可排除土体中的部分弱结合水。

4.3.3 电化学和双向排水效果分析

B1 单元含水率比 A1 单元低 7.9%, 其中电化学降低 4.5%, 双向排水降低 3.4%, 即电化学贡献度为 57%, 双向排水贡献度为 43%。考虑到本次中试的疏浚吹泥口位于 B2 区, 造成吹填土质存在一定的不均匀性, 含水率偏高, 可以预想, 在同样的边界条件、同样土质的情况下, 双向排水的效果可能比电化学效果更佳。

5 结论

1)4 个平行对比试验单元中, 双向电化学技术脱水效果最好、土质垂直向含水量降低均匀,

竖向压缩率达到 47.9%, 含水率从 180% 降至 35.3%, 且中电压是最优外加电压值。

2)通过增加底部排水结构, 可极大程度地解决底部土体处理效果差的问题, 以常规真空预压土体平均含水量为基准, 双向电化学真空预压技术脱水效果增加 7.9%, 电化学贡献度为 57%, 双向排水贡献度为 43%。

3)双向排水结构对电化学脱水干化技术起到很好的加强作用, 可实现多批次高效固定场地的异位脱水处理, 对土地资源有限的城区具有一定的工程推广意义。另外, 底部排水结构可重复利用, 保证脱水效果的同时, 节省工程造价。

参考文献:

[1] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils [J]. Géotechnique, 1949, 1(3): 159-177.

[2] CASAGRANDE I L. Stabilization of soils by means of electroosmotic state-of-art[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineering, 1983, 69(3): 255-302.

[3] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等.真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 169-175.

[4] 吴辉.软土地基电渗加固方法研究[D].北京: 清华大学, 2015.

[5] 洪何清.土中电现象及粘土电渗试验研究[D].北京: 清华大学, 2007.

[6] 吴伟令.软粘土电渗固结理论模型和数值模拟[D].北京: 清华大学, 2009.

(本文编辑 王璁)

· 消 息 ·

国内首条双向 8 车道内河沉管隧道正式开工

近日, 一航局承建广东佛山顺德区潭洲隧道工程正式开工。这是国内首条双向 8 车道内河沉管隧道, 也是我国目前最大最宽的内河沉管隧道。该项目采用一级公路标准兼顾城市道路功能建设, 起点位于顺德区横一路附近, 终点与顺德区横五路衔接, 路线总长 2.23 km, 其中沉管段长 316 m。

该项目由中交集团参建的又一重大沉管隧道工程, 展示了中交集团在沉管隧道施工领域的技术和装备实力, 对实现沉管隧道预制、浮运、安装全产业链技术由外海到内河的拓展延伸具有重要意义。