



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202108122

中图分类号 X705

文献标识码 A

张云达, 徐杨, 武亚军, 等. 不同类型排水板对“冻融-真空预压”法原位处理填埋污泥工艺中污泥脱水效果的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3669-3676.

ZHANG Yunda, XU Yang, WU Yajun, et al. Comparative test on the effect of freeze-thaw vacuum preloading on landfill sludge under different types of plastic drainage boards[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3669-3676.

## 不同类型排水板对“冻融-真空预压”法原位处理 填埋污泥工艺中污泥脱水效果的影响

张云达<sup>1</sup>, 徐杨<sup>2</sup>, 武亚军<sup>2,✉</sup>, 张旭东<sup>2</sup>, 嵇佳伟<sup>1</sup>

1. 上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200331

2. 上海大学土木工程系, 上海 200444

第一作者: 张云达(1964—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 地基基础施工、地基处理、污染土壤修复。

E-mail: 837884018@qq.com

✉通信作者: 武亚军(1973—), 男, 博士, 教授。研究方向: 废弃物处理与资源化。E-mail: wyjldz@shu.edu.cn

**摘要** 针对药剂真空预压法处理填埋污泥通常存在污染的问题, 利用更加环保高效的冻融-真空预压法进行处理, 并采用室内模型箱实验, 探究了排水板类型(分离式和整体式)对冻融污泥真空固结效果的影响。结果表明, 当原始污泥含水率为 86%, 经冻融联合真空预压处理后, 含水率最低可降至 59.5%, 这一含水率可达到我国填埋污泥的规范要求; 整体式排水板与分离式排水板最终出水量差别不大, 但整体式排水板的含水率沿径向分布更均匀。整体式排水板与分离式排水板孔径分布差异明显, 分离式排水板主要以小孔分布为主, 而整体式排水板主要以微孔和介孔为主, 整体式排水板结构更加致密, 固结程度高; 整体式排水板的减量比为 63.6%, 分离式排水板的减量比为 61.9%, 总体上整体式排水板的减量比略优于分离式排水板。本研究结果可为冻融真空预压原位处理填埋污泥提供参考。

**关键词** 填埋污泥; 冻融真空预压; 排水板类型; 减量比

市政污泥是城市污水处理过程中不可避免的副产物, 其含水率高、有机质含量高、成分复杂, 并且含有大量的寄生虫卵、病原微生物和一定量的重金属<sup>[1]</sup>。近年来, 市政污泥的产量也在不断增加, 预计 2025 年我国污泥年产量将突破  $9 \times 10^7$  t, 污泥处理处置已成为一项亟待解决的难题<sup>[2]</sup>。污泥的主要处置方式包括卫生填埋、农业利用、干化焚烧、建筑材料利用等, 我国较大部分污泥采用填埋方式, 约占我国污泥总处置量的 65%<sup>[3]</sup>。

由于我国早期污水处理厂存在着“重水轻泥”的现象, 导致已填埋污泥的含水率过高, 力学性质较差。而填埋场的库容有限, 随着污泥产量的逐年增加, 目前国内许多城市的填埋场, 例如上海老港、成都长安、深圳下坪、杭州天子岭的填埋场的库容已经严重不足<sup>[4-5]</sup>, 为此, 许多填埋场要求将填埋污泥的含水率从 80% 降低至 60% 以下, 这样可以增加至少 50% 的填埋库容<sup>[6]</sup>。但是, 由于污泥有机质含量高、结合水含量高、亲水性强, 单一的机械处理很难将污泥含水率降低至

收稿日期: 2021-08-19; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772303); 上海市科学技术委员会资助项目(20DZ2250800)

60%以下,需结合一定的预处理方法将污泥的胞外聚合物(EPS)破解,释放出自由水后再进行脱水减量处理<sup>[7]</sup>。当前填埋污泥的深度脱水通常采用“化学调理+板框压滤”的方法<sup>[8]</sup>,该方法需将污泥从填埋库中挖出,运输到指定场地后再进行处理,存在着成本高、易对环境造成二次污染的问题,因此,需寻找一种高效、环保的污泥原位处理方法。

真空预压法具有施工工艺简单、成本低等优点,是软土地基原位处理的一种有效方法<sup>[9-11]</sup>。近年来,将化学预调理与真空预压相结合的工艺已逐渐被应用于填埋污泥原位处理<sup>[3,8,12-16]</sup>,该工艺在一定程度上能够实现污泥的原位减量,但是仍存在易产生臭气污染、难以保证药剂调理均匀等问题。为了寻找更加环保高效的填埋污泥原位处理方法,有研究者提出了冻融联合真空预压填埋污泥原位处理技术<sup>[17-18]</sup>。冻融的原理是污泥被冷冻时,冷冻过程中不断生长的冰晶会破坏污泥细胞膜的完整性,使细胞脱水、收缩或溶解,使胞外聚合物释放到上清液中<sup>[19]</sup>;同时,冻融后污泥中小颗粒团聚成大颗粒,能显著提高污泥的脱水性能,而且冻融循环可显著提高污泥的渗透系数<sup>[20-21]</sup>。

有研究表明,采用冻融联合真空预压法处理填埋污泥时,在出水量、出水速率、沉降量、减量比、含水率均优于药剂预调理方法<sup>[18]</sup>,但其在实验过程中并没有使用实际真空预压过程中的塑料排水板;塑料排水板作为真空预压的负压传递通道和排水通道,其性能对真空固结效率和效果有着显著影响<sup>[22]</sup>。根据芯板与滤膜的复合方式不同,目前工程界常采用分离式和整体式2种塑料排水板,在普通土体真空预压中,已有这2种排水板类型的对比研究<sup>[10,23-24]</sup>。但是,污泥作为一种胶体状生物固体,其工程性质显著不同于软土和吹填土,但目前鲜有考察不同排水板类型对填埋污泥真空固结效果的研究。

本研究开展了不同排水板类型填埋污泥冻融-真空对比研究。首先,对填埋污泥进行冻融预处理;随后进行室内真空预压模型实验,分别设置分离式排水板(SPVD)与整体式排水板(IPVD)对照组;最后,通过对比出水量、减量比、含水率等数据,探究该法处理填埋污泥的宏观效果,并且通过压汞、电镜扫描等微观实验,探究冻融后污泥在真空预压过程中微观结构变化特性。

## 1 实验方案

### 1.1 实验污泥

供试污泥取自上海市某污泥填埋库区,污泥填埋龄期约为12 a,占用了大量土地和地下空间,亟需对填埋库中的污泥进行原位脱水减量处理。填埋污泥的基本物理性质如表1所示。可以看出,填埋污泥含水率高,有机质含量比新鲜污泥(60%左右)有所降低。这是因为,填埋污泥受填埋龄期及厌氧消化影响,发生了一定程度的降解。填埋污泥的液塑限较大,按照细粒土的分类应为高液限有机质粉土。

采用Mastersize2000激光粒度仪对原状填埋污泥及冻融后污泥进行了粒度分布测试,粒径分布曲线如图1所示。原状污泥 $d_{90}$ 为169.5  $\mu\text{m}$ 、 $d_{50}$ 为47.28  $\mu\text{m}$ ,而冻融后污泥 $d_{90}$ 为241.6  $\mu\text{m}$ 、 $d_{50}$ 为65.68  $\mu\text{m}$ ,经冻融后,污泥颗粒粒径显著增大。这主要是因为:在冻结过程中,污泥中的小颗粒被不断生长的冰晶推挤压密,污泥小颗粒团聚为大颗粒,显著提高了其脱水沉降能力。

表1 污泥基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of sludge

比重	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/%	液限/%	塑限/%
1.8	86	1.13	40	184	111

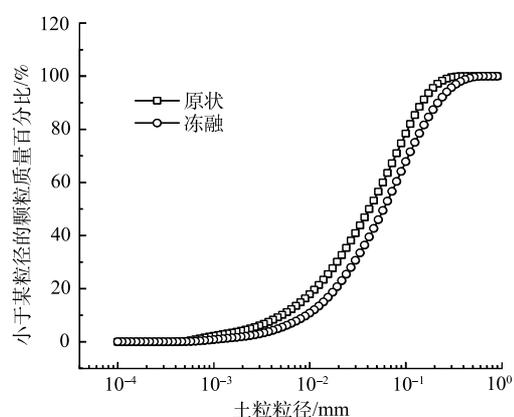


图1 原状污泥与冻融后污泥颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of original sludge and sludge after freeze-thaw

### 1.2 真空预压模型实验

真空预压实验装置由真空泵、抽滤瓶、排水板和模型箱组成，具体如图 2 所示。模型箱由有机玻璃桶及密封盖组成，玻璃桶高 500 mm、外径 320 mm、内径 300 mm，密封盖为 20 mm 厚的有机玻璃盖板。分别采用如图 3 所示的分离式排水板和整体式排水板，排水板通过土工布与排水管绑扎。分离式排水板属于分体式十字型塑料排水板，排水板滤膜包裹在塑料芯板的外侧，与芯板不黏接，滤膜被制作成略大于芯板尺寸的土工织布常套包裹于芯板四周，滤膜等效孔径为 75 μm；整体式排水板芯板与滤膜通过热合紧贴在一起，两者间不可作相对移动，滤膜等效孔径为 120 μm。

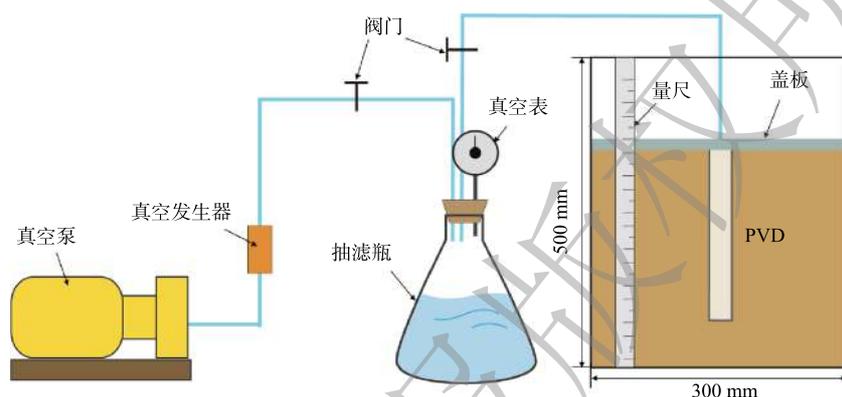


图 2 径向真空预压模型箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial vacuum preloading model box

采用冰柜对污泥进行冻融处理，冻结温度设置为 -15 ℃，待达到冻结温度后将污泥取出于室温 (22 ℃) 融化。每个模型箱污泥用量为约 16 kg。整个实验期间真空度保持在 85 kPa 左右，实验过程中对累计出水量、累计沉降量以及真空度进行监测记录，实验完成后对模型箱内污泥取样测定含水率及取样进行压汞、电镜扫描微观测试。

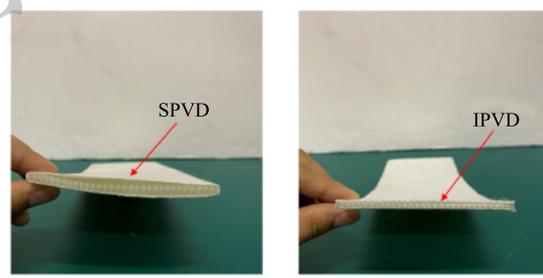


图 3 不同类型排水板实物图

Fig. 3 Physical drawing of different types of plastic drainage boards

## 2 实验结果及分析

### 2.1 累积出水量

由累计出水量变化曲线 (图 4) 可以看出，分离式排水板和整体式排水板两者最终出水量差别不大。整体式排水板的最终出水量为 8 830 mL，而分离式排水板的最终出水量为 8 640 mL，二者仅相差 190 mL。在实验初期，分离式排水板与整体式排水板的出水速率都很高，在前 4 h 的出水量可达总出水量的 70% 以上。这可能是因为污泥经冻融后，污泥细胞内外不断生长的冰晶使得污泥细胞破裂，导致污泥细胞膜的完整性被破坏，EPS 被破解，从而释放细胞内外的物质，导致污泥絮体结构被破

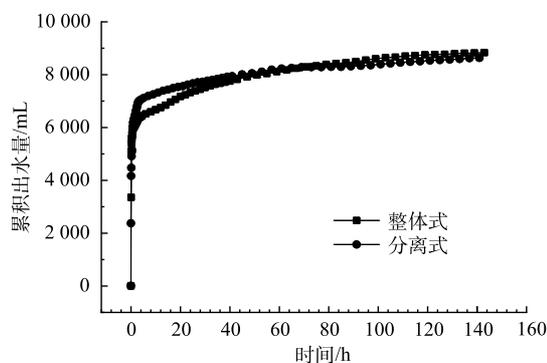


图 4 不同排水板类型累积出水量变化曲线

Fig. 4 Change curve of cumulative water discharge of different PVD types

坏, 释放出大量的结合水和间隙水, 进而大幅提高了污泥的脱水性能<sup>[19]</sup>。冻融后污泥中含有大量的自由水, 这导致前期出水速率及出水量都很高。

在前4 h, 分离式排水板的累计出水量达7 050 mL, 占总出水量的81.5%, 而后出水速率突然变缓, 后139 h的出水量仅为1 590 mL; 而整体式排水板在前4 h累计出水量为6 410 mL, 后139 h的出水量为2 420 mL。造成后期出水量差异的可能原因为, 分离式排水板的等效滤膜孔径为75  $\mu\text{m}$ , 而整体式排水板的滤膜孔径为120  $\mu\text{m}$ , 在真空排水固结前期, 渗流通道尚未形成, 污泥颗粒在真空负压及孔隙水压力的作用下不断向排水板附近运移, 由于分离式排水板等效滤膜孔径过小, 部分细小颗粒未能穿过滤膜, 从而影响排水板附近的渗流通道的通畅性, 造成一定的淤堵。这也与已有研究<sup>[10, 25]</sup>的结果一致。但由于冻融后污泥颗粒粒径增大, 小颗粒含量少, 只造成部分淤堵, 大部分排水通道仍保持通畅, 所以二者最终出水量差异不大。

## 2.2 累计沉降量与减量比

由累计沉降量变化曲线(图5)可以看出, 冻融污泥原始高度为20.5 cm, 分离式排水板的最终高度为7.8 cm, 整体式排水板的最终高度为8.55 cm, 二者均下降50%以上。污泥在冻融时, 污泥颗粒被不断生长的冰晶推挤压密, 污泥小颗粒得以团聚为大颗粒, 并显著提高了大中孔隙的分布, 在真空预压固结时显著提高了其渗透固结性, 从而提高了污泥的固结度。与分离式排水板相比, 整体式排水板的高度变化却相对较小。这可能是因为: 本次实验高度测量仅取实验模型箱两侧高度变化平均值记录, 而取样后发现, 整体式排水板处理后污泥在侧壁附近发生了1 cm左右的径向收缩, 若考

考虑径向收缩的变化来计算实验后污泥体积, 则分离式排水板污泥的最终体积为5 510  $\text{cm}^3$ , 而整体式排水板最终体积为5 262  $\text{cm}^3$ , 相比分离式排水板体积变化更大, 这也与累计出水量变化规律相互印证。而整体式排水板最终出现了径向收缩现象, 径向收缩是因为在真空排水固结过程中, 在排水板远端的土颗粒在水力梯度的作用下不断向排水板中心处运移<sup>[26]</sup>。这也说明采用整体式排水板后冻融污泥整体的排水固结效果较好, 整体渗流通道顺畅, 真空负压影响范围可覆盖到远端土体, 污泥整体固结度较好。

经计算, 两种不同类型排水板的最终减量比均在60%以上, 整体式排水板的减量比为63.6%, 分离式排水板的减量比为61.9%。这表明整体式排水板减量比略优于分离式排水板, 冻融联合真空预压法可有效实现填埋污泥的原位减量。

## 2.3 含水率

实验结束后, 从排水板中心处开始, 沿径向在0、15、30 cm处取污泥上、中、下3个位置, 每个位置取3个样对照, 测定不同位置处的含水率, 结果如图6所示。

1) 原始污泥含水率为86%, 经冻融联合真空预压处理后, 其含水率大幅度下降, 含水率最低可降至59.5%。

2) 沿半径方向污泥整体含水率分布呈现出逐渐增加的变化规律。径向上的差异主要是由于: 离开排水板中心的距离和水力梯度的差异, 排水板附近水力梯度大, 水更容易渗流排出, 而距离排水板较远处水力梯度小, 水不易排出, 所以靠近排水板中心处含水率更低。

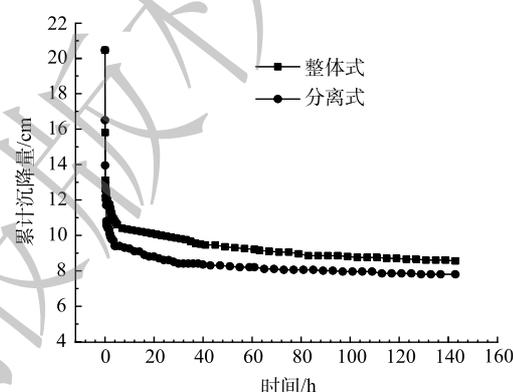


图5 不同排水板类型累积沉降量变化曲线

Fig. 5 Variation curve of cumulative settlement of different PVD types

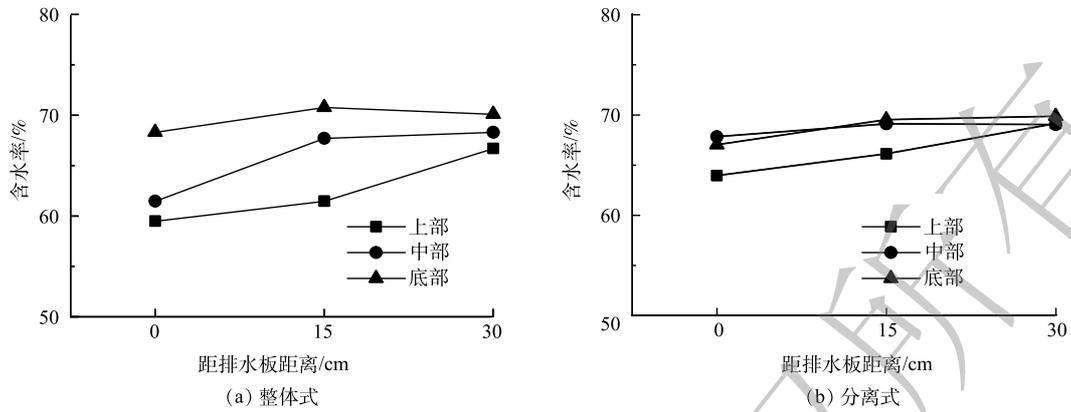


图 6 不同排水板类型含水率变化

Fig. 6 Change of water content of different PVD types

3) 沿深度方向呈现出上部含水率低、底部含水率高的分布规律。这是因为：真空负压强度沿着排水板衰减，排水板周围土体水力梯度逐渐减小，对排水板的影响范围逐渐减小，影响范围沿着排水板呈现出倒锥形逐渐减小的趋势<sup>[24]</sup>，这导致上部由于真空负压强度高，水力梯度大，水容易排出，而底部由于真空强度衰减，水力梯度减小，故形成底部含水率高、上部含水率低的分布规律。

4) 整体式排水板上部含水率在 60% 左右分布，中部在 65% 左右分布，底部在 70% 左右分布；而分离式排水板的上、中、下部均在 65%~70% 左右分布。可见，整体式排水板的整体处理效果更好，且靠近上、中部含水率明显优于分离式排水板。这可能是因为：一方面，分离式排水板滤膜孔径较小，易造成小颗粒淤堵，从而影响排水固结效果；另一方面，由于分离式排水板芯板是内包于滤膜的，在土体压力下不可避免地出现滤膜“陷入”排水通道的情况，从而减少排水面积，而整体式排水板滤膜是胶结于芯板竖齿上的，滤膜始终是“紧绷”状态，在土体压力下变形较小<sup>[27]</sup>，从而造成含水率分布的差异。

### 2.4 压汞实验

实验结束后，分别在整体式排水板、分离式排水板模型箱中心位置处取样进行压汞 (MIP) 实验，分析不同冻结条件下冻融污泥径向真空排水的固结孔径的大小分布规律，结果如图 7、图 8 所示。

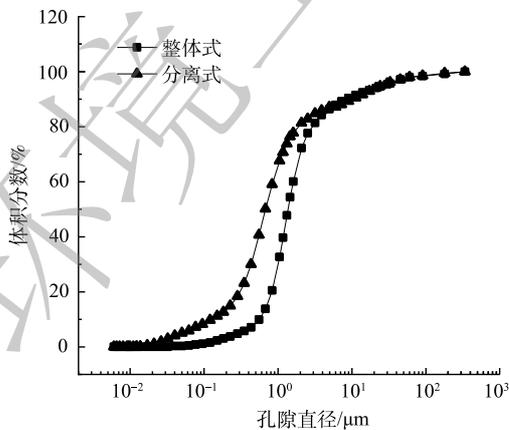


图 7 不同排水板类型孔径分布变化曲线

Fig. 7 Pore size distribution curves of different PVD types

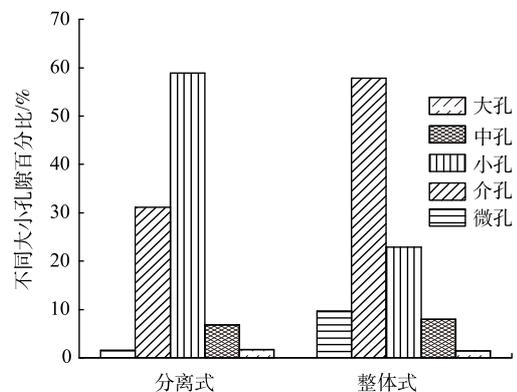


图 8 不同排水板类型孔径大小变化

Fig. 8 Percentage change of pores with different sizes under different PVD types

整体式排水板与分离式排水板孔径分布有明显差异：分离式排水板主要以小孔分布为主，即以团粒内孔隙分布为主；而整体式排水板主要以微孔和介孔分布为主，即以颗粒间孔隙为主。其原因是，在真空预压过程中，真空度不断向污泥深度处传递，并以排水板为中心的径向上形成真空负压梯度，在该真空负压梯度的作用下形成真空渗流场<sup>[28]</sup>。排板周围土体首先开始渗流出水，孔隙水在负压的作用下不断向排水板方向渗流，而此时污泥中的细小颗粒也在渗流力的作用下不断向排水板中心运移，使得排水板附近土体渗透系数不断降低，使排水板中心处的土体首先发生径向固结，土体发生压缩。

污泥经冻融后，污泥大中孔隙数量分布大幅度提高，小、微孔隙数量减少；而在真空排水固结时，较大孔隙先被压缩成较小孔隙，较小孔隙后被压缩<sup>[29]</sup>。整体式排水板由于不易淤堵，在真空排水固结时渗流通道顺畅，固结程度高，大、中孔隙先不断被压缩为小孔隙，而后小孔隙被压缩为更小的介孔；而分离式排水板由于发生了部分淤堵，从而导致排水板中心处污泥固结程度对比整体式排水板低，主要以大、中孔隙压缩为小孔为主。这也与含水率分布规律互相印证，即整体式排水板由于固结程度高，在贴近排水板处污泥含水率低于分离式排水板。

## 2.5 电镜扫描

实验完成后，对不同排水板径向真空排水固结后靠近排水管中心处的污泥取微观样进行电镜扫描实验(SEM)，观察其微观结构特性，如图9所示。可以看出，整体式排水板与分离式排水板真空排水固结后污泥整体结构致密均匀，呈现出有规律的网状结构。但整体式排水板对比分离式排水板结构更加致密，固结程度高，以颗粒间孔隙分布为主；而分离式排水板固结程度低，孔径相对更大，以团粒内孔隙为主。这也与MIP实验结果相印证。

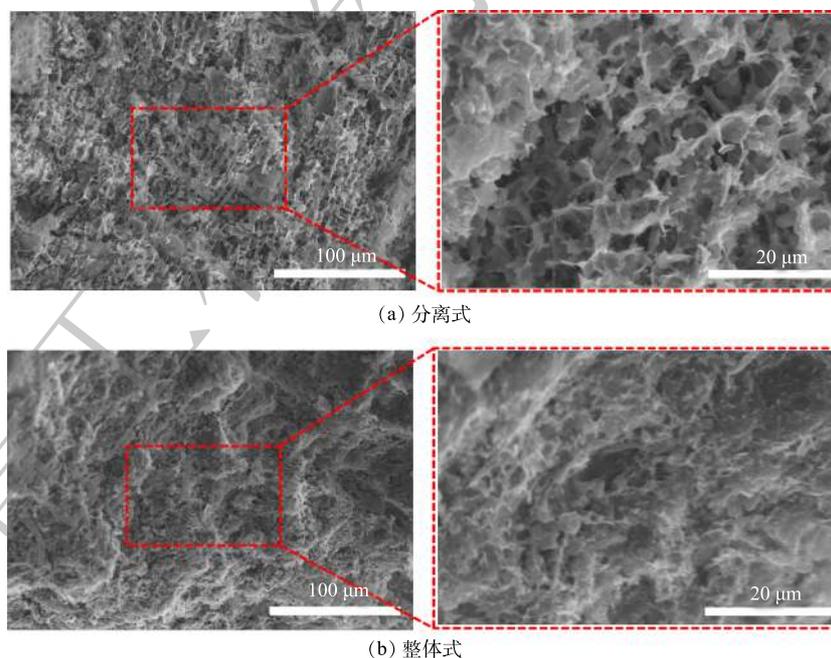


图9 不同排水板类型电镜扫描图

Fig. 9 SEM diagram of different PVD types

## 3 结论

1) 分离式排水板和整体式排水板两者的最终出水量差别不大。两种不同类型排水板的最终减量比均在60%以上，整体式排水板的减量比为63.6%，分离式排水板的减量比为61.9%，整体式排

水板减量比略优于分离式排水板。

2) 原始污泥含水率为 86%, 经冻融联合真空预压处理后, 其含水率大幅度下降, 含水率最低可降至 59.5%, 符合我国填埋污泥的规范要求; 其中, 整体式排水板的整体处理效果更好。沿半径方向, 污泥整体含水率分布呈现出逐渐增加的变化规律; 沿深度方向, 呈现出上部含水率低, 底部含水率高的分布规律。

3) 整体式排水板与分离式排水板孔径分布具有明显差异。分离式排水板主要以小孔分布为主, 即以团粒内孔隙分布为主; 而整体式排水板主要以微孔和介孔分布为主, 即以颗粒间孔隙分布为主。整体式排水板对比分离式排水板结构更加致密, 固结程度高, 以颗粒间孔隙分布为主; 而分离式排水板固结程度低, 孔径相对更大, 以团粒内孔隙为主。

## 参 考 文 献

- [1] DONG B, LIU X, DAI L, et al. Changes of heavy metal speciation during high-solid anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 152-158.
- [2] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. *科学*, 2020, 72(6): 5.
- [3] LIN W, ZHAN X, ZHAN T L, et al. Effect of FeCl<sub>3</sub>-conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan landfill, China[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2014, 42(3): 181-190.
- [4] ZHAN X J, LIN W A, ZHAN L T, et al. Field implementation of FeCl<sub>3</sub>-conditioning and vacuum preloading for sewage sludge disposed in a sludge lagoon: A case study[J]. *Geosynthetics International*, 2015, 22(4): 327-338.
- [5] ZHAN T L, ZHAN X, LIN W, et al. Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China[J]. *Engineering Geology*, 2014, 170: 24-32.
- [6] WU W, ZHOU Z, YANG J, et al. Insights into conditioning of landfill sludge by FeCl<sub>3</sub> and lime[J]. *Water Research*, 2019, 160: 167-177.
- [7] WU Y J, XU Y, ZHANG X D, et al. Experimental study on vacuum preloading consolidation of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent under varying filter pore size[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 109-121.
- [8] 武亚军, 唐欣, 崔春义, 等. 城市生活污水真空固结特性实验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(4): 772-780.
- [9] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 201-225.
- [10] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1257-1268.
- [11] 武亚军, 陆逸天, 牛坤, 等. 药剂真空预压法处理工程废浆实验[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1365-1373.
- [12] 武亚军, 林哲鑫, 胡挺, 等. 芬顿试剂改性市政污泥真空固结模型实验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 796-803.
- [13] 占鑫杰, 林伟岸, 詹良通, 等. 市政污泥真空预压模型实验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(S1): 88-96.
- [14] 鲍树峰, 娄炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1350-1359.
- [15] 林珊伊, 孙德安, 朱明瑞, 等. 芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的力学特性[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2813-2822.
- [16] 陈广, 武亚军, 林哲鑫. 暂存库填埋调质污泥的压缩与固结特性[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 1059-1066.
- [17] 武亚军, 何心妍, 张旭东, 等. 冻融预处理填埋污泥的室内真空脱水实验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 53(11): 154-165.
- [18] WU Y J, XU Y, ZHANG X D, et al. Experimental study on treating landfill sludge by preconditioning combined with vacuum preloading: Effects of freeze-thaw and FeCl<sub>3</sub> preconditioning[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141092.
- [19] GAO W, LEUNG K, HAWDON N. Freezing Inactivation of *Escherichia Coli* and *Enterococcus Faecalis* in water: Response of different strains[J]. *Water Environment Research A Research Publication of the Water Environment Federation*, 2009, 81(8): 824.
- [20] CARRASCO M, GAO W. Sludge particle size and correlation with soluble organic matter and conditioning characteristics after freezing treatments[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2019, 230(54): 1-9.
- [21] MOO-YOUNG H K, ZIMMIE T F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1996, 122(9): 370-372.
- [22] 郑爱荣, 尹自强, 王世宁. 软基加固后塑料排水板性能研究[J]. *中国港湾建设*, 2019, 39(4): 33-36.
- [23] 刘爱民, 梁爱华, 尹长权. 整体式塑料排水板与普通塑料排水板加固效果对比实验[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(S1): 130-133.
- [24] CAI Y Q. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading[J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 10-19.
- [25] 乐超, 徐超, 吴雪峰, 等. 两种塑料排水板滤膜淤堵特性实验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2529-2534.
- [26] 陈雷, 张福海, 李治朋, 等. 排水板周围土体径向固结室内模型实验研

- 究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 169-174. [29] 苑晓青, 王清, 孙铁, 等. 分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 169-176.
- [27] 王婧, 李涛. 塑料排水板芯板及滤膜物理力学性能研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 125-129. (责任编辑: 金曙光)
- [28] 颜永国. 真空荷载下不同颗粒级配软土真空度传递规律实验研究[J].

## Comparative test on the effect of freeze-thaw vacuum preloading on landfill sludge under different types of plastic drainage boards

ZHANG Yunda<sup>1</sup>, XU Yang<sup>2</sup>, WU Yajun<sup>2,\*</sup>, ZHANG Xudong<sup>2</sup>, JI Jiawei<sup>1</sup>

1. Shanghai Geological Construction Co. Ltd., Shanghai 200331, China

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

\*Corresponding author, E-mail: wyjldz@shu.edu.cn

**Abstract** Many cities in China are facing severe problems of in-situ sludge reduction from landfills. In view of the shortage of chemical preconditioning combined with vacuum preloading method in treating landfill sludge, a more environmental friendly and efficient freeze-thaw vacuum preloading method was proposed, and the indoor model box test was used to explore the influence of plastic drainage plate type (separate type and integral type) on the vacuum consolidation effect of freeze-thawed sludge. The results showed that the water content of the original sludge was 86%, after freeze-thaw combined with vacuum preloading treatment, the water content was reduced to 59.5%, which meets the requirements of China's landfill sludge specification. The final water discharge of the integral plastic drainage board (IPVD) and the separate plastic drainage board (SPVD) had little difference, but the water content of the IPVD was more evenly distributed along the radial direction. The pore size distribution of the IPVD was significantly different from that of the SPVD. The pore size distribution of the SPVD was mainly small pores, while the IPVD was mainly micropores and mesoporous. The structure of the IPVD was more compact and had a higher degree of consolidation. The volume reduction ratio of IPVD was 63.6%, and that of SPVD was 61.9%. On the whole, the volume reduction ratio of IPVD was slightly better than that of SPVD. The research results had certain guiding significance for in-situ treatment of landfill sludge by freeze-thaw combined with vacuum preloading.

**Keywords** landfill sludge; freeze-thaw vacuum preloading; types of plastic drainage boards; volume reduction ratio