

DOI:10.11918/202003051

冻融预处理填埋污泥的室内真空脱水试验

武亚军¹,何心妍¹,张旭东¹,张云达²,嵇佳伟²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200072)

摘要: 为了对填埋污泥进行进一步原位减量处理, 研究冻融联合真空预压工艺的减量效果。从上海某填埋场取样, 首先设定 0、-6、-11、-14.5 和 -18.5 °C 5 种不同冷冻温度对污泥进行冻融处理, 分析冷冻温度对污泥的比阻和界限含水率的影响; 然后进行冻融联合真空预压小型模型试验, 通过与单纯真空预压试验进行对比, 研究不同工况下排水量、排水速度、沉降量、减容比、含水率和无侧限抗压强度的变化规律。结果表明: 冻融处理可以有效降低污泥比阻, 从而改善其脱水性能, 并在 -11 °C 时达到最优处理效果; 经冻融预处理的污泥在真空预压试验过程中表现出很好的排水固结效果, 最优处理温度与污泥比阻试验结果一致, 处理后污泥含水率最低可降至 54.0%, 无侧限抗压强度最高可达 42.84 kPa, 最大减容比为 40%, 达到了填埋污泥减量的目的。

关键词: 冻融法; 真空预压法; 填埋污泥; 比阻; 含水率

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)11-0154-08

Experimental study on vacuum dehydration of sludge in landfill by freeze-thaw pretreatment

WU Yajun¹, HE Xinyan¹, ZHANG Xudong¹, ZHANG Yunda², JI Jiawei²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Geological Construction Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: For the in situ reduction of landfill sludge, the reduction effect of freeze-thaw process combined with vacuum preloading was studied. Samples were taken from a landfill in Shanghai. First, five freezing temperatures (0, -6, -11, -14.5, and -18.5 °C) were set during the freeze-thaw treatment of sludge to analyze the effects of freezing temperature on specific resistance of sludge and critical water content. Then, a model test was conducted to investigate the variation of displacement, dewatering rate, settlement, volume reduction ratio, water content, and unconfined compressive strength under different working conditions by comparing single vacuum preloading with freeze-thaw treatment combined with vacuum preloading. Results show that the freeze-thaw treatment could effectively reduce the specific resistance of sludge and improve its dehydration performance, and the optimum freezing temperature was -11 °C. The sludge after freeze-thaw treatment showed a good drainage consolidation effect in the process of vacuum preloading, and the optimum treatment temperature was consistent with the results of sludge specific resistance test. The minimum water content of the treated sludge reached 54.0%, the unconfined compressive strength was up to 42.84 kPa, and the maximum reduction ratio was 40%, which achieved the purpose of sludge reduction.

Keywords: freeze-thaw method; vacuum preloading method; sludge in landfill; specific resistance; water content

市政污泥是城市污水处理过程中不可避免的副产物。近年来,随着城市生活用水量的不断增加,污水处理量大幅度上升,污泥生成量也随之加剧,污泥的处置已成为一项亟待解决的难题。污泥卫生填埋处置方式由于具有费用低、操作简单、技术成熟等优点,目前仍是中国最主要的污泥处置手段,但是随之带来的是土地资源的紧缺与生态环境的破坏。随着

“十三五”规划中提出的减量化处置要求,对填埋污泥进一步进行深度脱水减少污泥体积已成为污泥处理的趋势。

国内外学者对污泥深度脱水作了大量的探索和研究。在物理冷冻处理技术上,Clements 等^[1]采用冷冻法成功使得处理后的胶羽粒子沉降快速且沉积物体积变小,污泥的脱水性能得到一定的改善; Vesilind 等^[2]通过理论研究指出污泥的处理效果受冷冻温度、速度和时间的影响,较高冷冻温度、较低的冷冻速度和较长的冷冻时间都有利于提高污泥的冷冻效果;单连斌^[3]采用冻融法对含水率高达 90%

收稿日期: 2020-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(41772303);上海市自然科学基金(17ZR1410100);上海市扬帆人才计划(19YF1415500)

作者简介: 武亚军(1973—),男,教授,博士生导师

通信作者: 张旭东,xdzhang@shu.edu.cn

的污泥进行脱水预处理,经冻融处理后的污泥过滤性显著提高,并且处理效果优于化学药剂消石灰;Gao 等^[4]通过对污泥毛细吸水时间(CST)、污泥比阻(SRF)和沉降性能等指标的测定,发现冷冻大大增加了颗粒的体积,显著改善了污泥的脱水性。以上研究表明冷冻具有污泥预处理的强大潜力。

目前,将真空预压法运用于埋填区污泥原位处理是新兴的污泥处理手段,但是该方面的研究主要集中在化学药剂预处理与真空预压联合处理污泥方面。占鑫杰等^[5]首次将真空预压法与 FeCl₃ 结合用于埋填区污泥的处置,处理效果优异,污泥体积减量超 40%;詹良通等^[6]加入无机药剂(CaO、FeCl₃、粉煤灰)和有机药剂(CPAM、壳聚糖)调质并通过真空预压处理试验测取了抽滤液总量、含固量及抽滤速度,发现采用无机药剂三者组合调理剂整体排水效果最好;武亚军等^[7-9]采用 CaO、FeCl₃、芬顿药剂联合真空预压法开展室内模型试验,从污泥脱水性能和真空排水固结特性方面进行了定量分析,最终预压后的污泥含水率最低降至 66.7%,体积降为原泥的 51.92%,无侧限抗压强度最高可提高至 55 kPa。以上研究均表明药剂与真空预压联合对于污泥处理效果十分优异。

Erden 等^[10]通过研究经化学处理和冻融处理后污泥的脱水性能,发现两种预处理方法在改善脱水性能方面没有显著差异。但是化学药剂存在不可忽视的二次污染风险,物理冻融法虽具有处理周期过长的缺点但是其在环境方面更为洁净和安全。

本研究基于课题组前期真空预压的研究成果,开展了冻融联合真空预压法对埋填污泥原位处理的室内模型试验研究。首先从冷冻温度角度采用比阻试验考察了冻融对污泥脱水性能的影响。然后采用真空预压固结模型试验,对原状污泥和经冻融预处理后污泥的固结特性进行对比分析,并通过试验后污泥无侧限抗压强度、泥饼含水率和减容比等指标的对比,探讨了该方法应用于埋填污泥减容的可行性。

1 污泥基本物化性质

污泥试样取自上海某填埋场,对埋填区污泥的各项物理指标进行测试。依据《土工试验与原理》^[11],采用烘干法测定含水率,环刀法测定密度,灼烧法测定有机质含量。将该污泥称为原状污泥(原泥),污泥特性指标如表 1 所示。可以看出,原状污泥的液塑限分别为 220.62% 和 67.73%,属于高液塑限土。

表 1 污泥特性指标						
Tab. 1 Characteristics of sludge						
含水率/ %	密度/ (g · cm ⁻³)	比重	有机质质 量分数/%	液限/ %	塑限/ %	液性 指数
72.0	1.2	1.87	40.9	220.62	67.73	1.24

2 冻融试验

通常将污泥比阻(SRF)作为一项评价污泥过滤性能的综合性指标,可以反应污泥脱水性能的好坏。污泥比阻表示单位质量的污泥在一定压力下过滤时单位过滤面积上的阻力,比阻愈小表明污泥脱水性能愈好。本节研究了埋填污泥经冻融处理后比阻的变化。

2.1 试验方案

2.1.1 冻融处理

首先取 200 g 污泥置于 300 mL 的烧杯中,若直接采用原泥(含水率为 72%)会导致后续真空抽滤过程中出水量过少,记录的抽滤时间和相应抽滤体积的数据点过少,污泥比阻计算不准确。因此,通过改变含水率来应对这种状况,污泥比阻的大小与污泥中有机物含量及其成分有关,加入纯水仅提高污泥自由水含水量,不会影响比阻的计算结果,故通过加入纯水将含水率调节至 78%。在调制好后的试样中心插入温度传感器,采用防水探头温度传感器(图 1(a)),精度可达 0.1 ℃,能对温度进行精确的测量,保证实验的准确性。同时,为阻止外界水分的进入造成测量误差过大,采用防水塑料膜对杯口进行密封(图 1(b)),完成初始试样的制备。

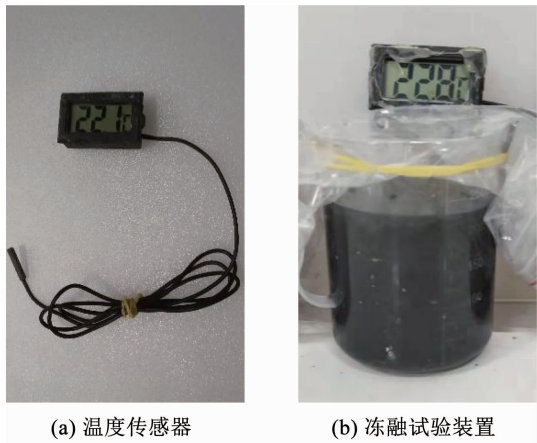


图 1 试验装置

Fig. 1 Test devices

采用定制的冷冻箱对初始试样在不同档位下进行冷冻处理(总共 5 个档位,冷冻温度分别可达 0、-6、-11、-14.5、-18.5 ℃),精度为 0.1 ℃,完成试样的初次处理。将初次处理后的试样放置在室温

(约 25 ℃)下 12 h 进行融解完成二次处理。

2.1.2 比阻测定

污泥比阻的测定采用布氏漏斗法,试验装备如图 2、3 所示。取二次处理后的污泥放于布氏漏斗中,采用 40~50 kPa 真空度,停止抽滤判定标准为:(a)真空破坏时停止抽滤;(b)若真空长时间不破坏,则抽滤 10 min 后停止。通过烘干法测得抽滤前后的含水率并绘制抽滤量随时间的变化曲线,根据式(1)得出污泥比阻^[12]。

$$r = \frac{2pA^2b}{\mu m}$$

(1)

式中: p 为过滤压力, A 为截滤面积, μ 为动力黏度, m 为滤过单位体积的滤液在过滤介质上截留的干固体质量, b 为线性方程 $t/V = bV + a$ 的斜率(t 为过滤时间, V 为滤液体积)。

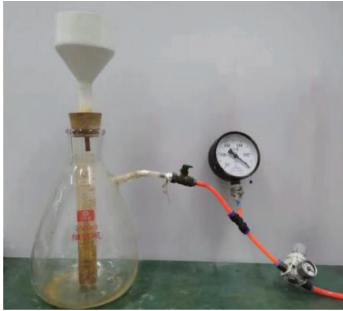


图 2 抽滤装置实物图

Fig. 2 Photo of vacuum filtration test device

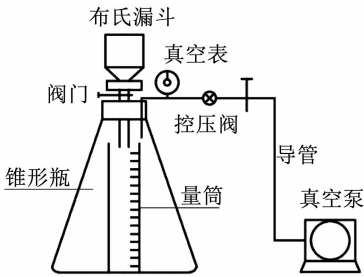


图 3 抽滤试验装置简图

Fig. 3 Diagram of vacuum filtration test device

2.2 结果分析

2.2.1 污泥冷冻曲线

观察冻融过程中污泥内部温度随时间变化的规律,结果如图 4 所示。可以看出,在冷冻的初始阶段,污泥温度随时间变化下降迅速。当降至略低于 0 ℃ 时,污泥处于固液混合状态,污泥温度在该阶段维持较长时间不变或轻微浮动。当污泥完全冷冻后,污泥温度下降速度变快,直至达到最低温度后维持不变。融解过程规律相似。

从冷冻速度来看,污泥温度达到 -6 ℃ 时,需要 19.5 h,污泥温度达到 -18.5 ℃ 时,仅需要 12 h。根据传热学中的牛顿冷却定理可知,当物体表面与周

围存在温度差时,单位时间从单位面积散失的热量与温度差成正比,因此,在冷冻过程所处的环境温度会影响污泥的冷冻速度,控温箱所施加冷冻温度越低,与污泥表面的温差越大,实际冷冻速度越快。

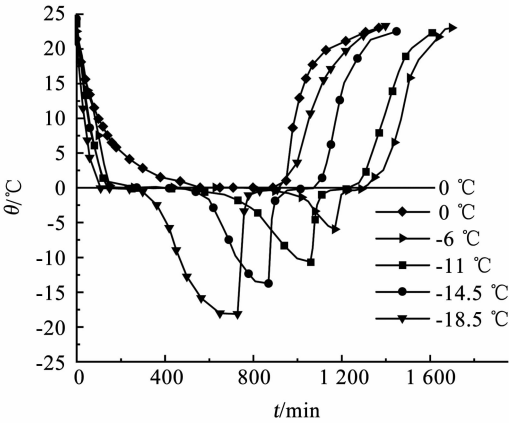


图 4 污泥温度随时间的变化

Fig. 4 Variation of sludge temperature with time

2.2.2 污泥比阻

图 5 为污泥冷冻温度与比阻的关系,可以看出,在不同的冷冻温度下,未经任何处理的原状污泥的比阻最大,为 9.46×10^{12} m/kg,而经冻融处理后,污泥的比阻较原始污泥减小了 14.3%~76.5%,大大改善了污泥的脱水性能。污泥冷冻温度为 -6 ℃ 时,污泥比阻下降至 3.82×10^{12} m/kg。这是由于在冷冻期间,污泥中的自由水冻结形成冰晶,在温度梯度的引导下,污泥颗粒间未冻状态的间隙水会不断向冰晶冻结锋面迁移,致使污泥絮体网状结构遭受破坏。与此同时,污泥颗粒受到冻胀力的挤压团聚形成更大的颗粒,从而利于脱水^[13]。

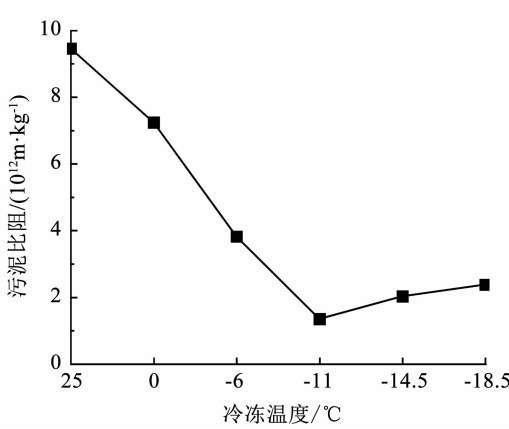


图 5 污泥比阻随冷冻温度的变化

Fig. 5 Variation of specific resistance of sludge with freezing temperature

此外,污泥冷冻温度为 -11 ℃ 时,污泥比阻降至最低,为 1.35×10^{12} m/kg,说明当污泥冷冻温度高于 -11 ℃ 时,随着温度的降低,污泥比阻会快速

减小,脱水性能不断改善。但是随着温度继续下降,污泥比阻没有进一步降低,反而有所增大,由此看出当低于 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这个界限时,脱水性能反而开始下降,这说明一味地降低温度并不会无休止地改善脱水性能。同时,根据图 4 的冷冻曲线以及前文物理冷冻速度分析,污泥比阻还与冷冻速度有关。对这一现象分析认为:1)随着温度降低,冷冻速度增大,冰晶的生长速度加快,污泥内的分凝冰层加厚加密,而分凝冰是冻胀量的内在体现,分凝冰量的多少决定着冻胀量的大小^[14]。所以,分凝冰层的加厚加密意味着污泥冻胀量增大,污泥颗粒团聚性增加,污泥的脱水性能进一步改善。2)当冷冻速度超过一定数值后,由于冰晶生长的速度过快,水分来不及迁移,分凝冰层减薄,污泥的冻胀量随之减小,污泥颗粒受到的挤压力减小,粒径的增长幅度有限,影响污泥颗粒的凝集效果^[13]。

基于污泥比阻测试结果,冻融法在处理填埋污泥上存在最优冷冻温度。本试验中冷冻至 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,是改善污泥脱水性能最优冷冻温度。

2.2.3 颗粒粒径分布

为了证实冷冻会带来颗粒直径的变大,用激光粒度仪对冷冻前后的污泥粒径进行测定。图 6 为污泥中各粒度的占比,原泥中小于 0.005 mm 的污泥颗粒占比为 38.61% ,经冻融(冷冻温度为 0 、 -6 、 -11 、 -14.5 、 $-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)处理后的污泥占比为 $25.58\% \sim 35.58\%$ 。对于粒径为 $0.005 \sim 0.075\text{ mm}$ (粉粒组)的污泥颗粒,原泥占比为 57.34% ,而经冻融处理后,污泥粒径整体增长较为明显,其中经冷冻温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理后的污泥粒径增长最为显著,处于 $0.005 \sim 0.075\text{ mm}$ 的污泥颗粒占比为 67.45% 。试验表明,冻融处理后污泥颗粒在一定程度上增大,小颗粒质量分数减小。

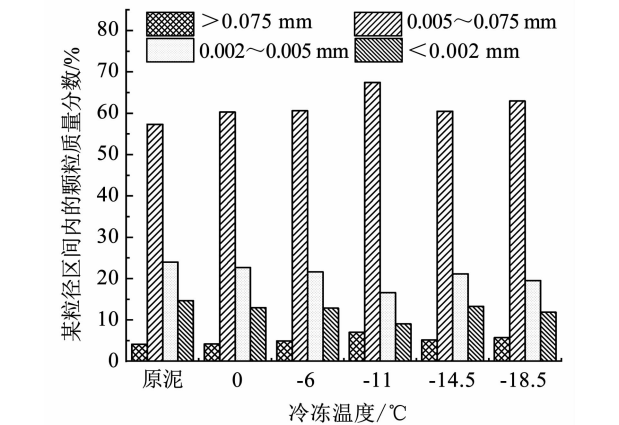


图 6 不同冷冻温度下的污泥粒度占比
Fig. 6 Proportion of sludge particle size at different freezing temperatures

由图 7 可以看出,经冻融处理后,污泥颗粒主要分布的峰值向左移动,原泥和经冷冻温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理后的污泥粒径所占比重的最大峰值分别出现在 $0.005 \sim 0.01\text{ mm}$ 和 $0.02 \sim 0.04\text{ mm}$,污泥颗粒中所占最大比重的粒径增大。此外,经冻融(冷冻温度为 -11 、 -14.5 、 $-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)处理后的污泥,出现了明显的“双峰”现象,说明污泥经冻融处理后,小颗粒团聚形成大颗粒。

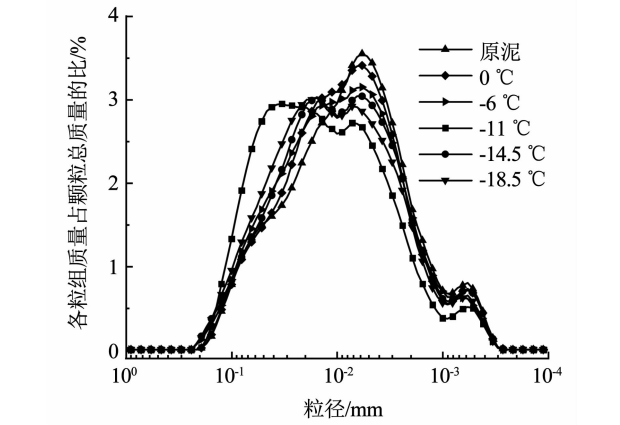


图 7 不同冷冻温度下的各粒组质量变化
Fig. 7 Variation of mass of each particle group at different freezing temperatures

2.2.4 界限含水率

根据《土工试验与原理》,采用液塑限联合测定仪,选取图 5 上原泥以及 0 、 -11 、 $-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标志性温度进行界限含水率测定以进一步分析造成污泥脱水性能改善的原因。

冻融前后的界限含水率变化如图 8 所示。经冻融处理后的污泥塑限均较原始污泥呈上升趋势,液限呈下降趋势。塑性指数的大小取决于液限与塑限之差,反映了土粒与水的相互作用,在一定程度上表明了土中黏粒的含量^[15]。

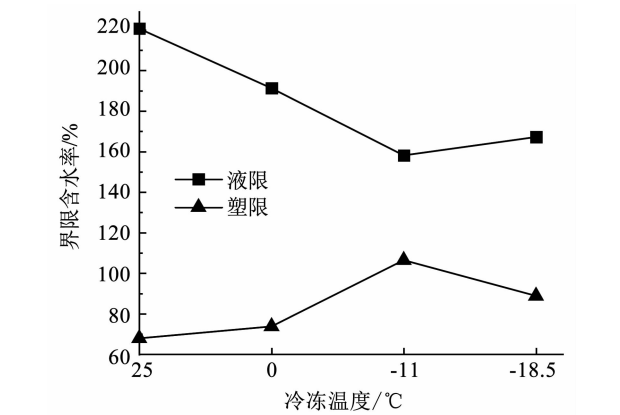


图 8 冻融前后污泥界限含水率曲线
Fig. 8 Curves of critical water content of sludge before and after freeze-thaw treatment

图 8 中数据走势趋近表明污泥颗粒处于塑态的含水率变化范围减小,其与水结合的能力下降。污泥可塑性降低,一方面说明经冻融处理,吸附于污泥颗粒周围的水膜变薄,小颗粒更容易团聚形成大颗粒,污泥脱水性能改善。另一方面说明经冻融处理后,污泥黏粒含量降低,污泥黏度降低,污泥与水间结合力减弱,污泥脱水性能改善^[16]。

此外,由表 2 可以看出,污泥冻融前后液性指数均大于 1,污泥处于流塑状态。污泥在各冷冻温度下的液性指数存在明显差异。随着温度降低,液性指数呈先上升后下降趋势,这与污泥比阻随冷冻温度的变化特征相一致。

表 2 冻融前后污泥液性指数

Tab. 2 Liquid indices of sludge before and after freeze-thaw treatment

冷冻温度/℃	25	0	-11	-18.5
液性指数	1.24	1.56	2.92	2.15

3 真空脱水试验

在通过冻融试验得出最优冷冻温度的基础上,采用真空预压技术对污泥进一步排水固结,验证冻融与真空预压联合处理的可行性。

3.1 试验方案

本试验所采用的试验设备主要包括自制的模型箱、抽滤瓶、真空泵和真空表等(见图 9),自制模型箱分为有机玻璃桶和密封盖,有机玻璃桶为内径 10 cm、高度 40 cm 的圆柱体,密封盖采用 2 cm 厚的硬质有机玻璃板,四周围有密封圈。模型箱上下开孔,上下均铺有无纺土工,采用双面排水。当排水速度小于 10 ~ 15 mL/h 时,停止试验。



图 9 模型试验装置实物照片

Fig. 9 Photo of model test device

试验过程中采用与比阻试验相同的污泥和冷冻温度,单一改变污泥的用量,污泥用量取 1 800 g,置于冻箱内冷冻至相应温度(共 5 组,分别为 0、-6、-11、-14.5、-18.5 ℃)后取出,融解至室温进行

真空脱水试验,并设置一组未经任何处理的原泥采用普通真空预压试验作为空白对照。试验前,检查模型箱的密封性,防止出现漏气现象,试验过程中记下不同时间对应的真空度、出水量以及泥面刻度。试验结束后,取样进行含水率以及无侧限抗压强度试验。

3.2 结果分析

3.2.1 真空度

抽滤过程中真空度变化如图 10 所示,经冷冻温度为 -18.5 ℃ 预处理后的这组污泥在抽真空初始阶段模型箱内出现漏气现象,真空度降至 70 kPa 以下,采取密封堵漏措施后,真空度恢复正常。其余污泥组在整个抽真空过程中真空度(瓶内真空度)均稳定在 75 kPa 以上,为试验创造了良好的条件。

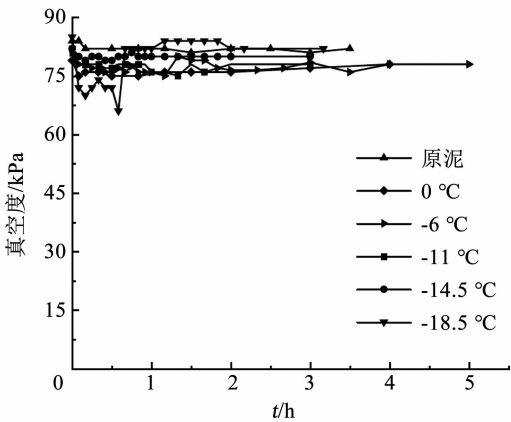


图 10 真空度变化曲线

Fig. 10 Variation of vacuum degree

3.2.2 排水量及排水速度

固结过程是土体中的孔隙水不断排出的过程。整个试验过程中,通过抽滤瓶对试验污泥排水量进行采集和测量,建立排水量以及排水速度随抽真空时间的变化曲线,分别如图 11、12 所示。

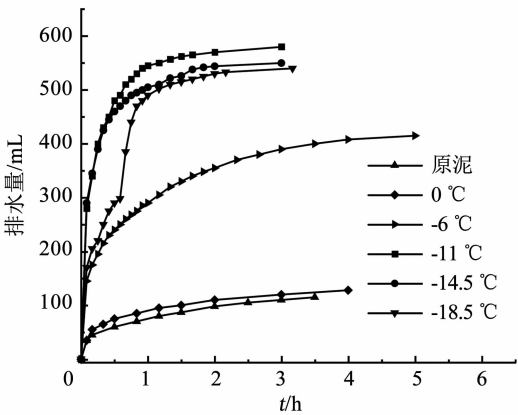


图 11 排水量随时间变化

Fig. 11 Variation of displacement with time

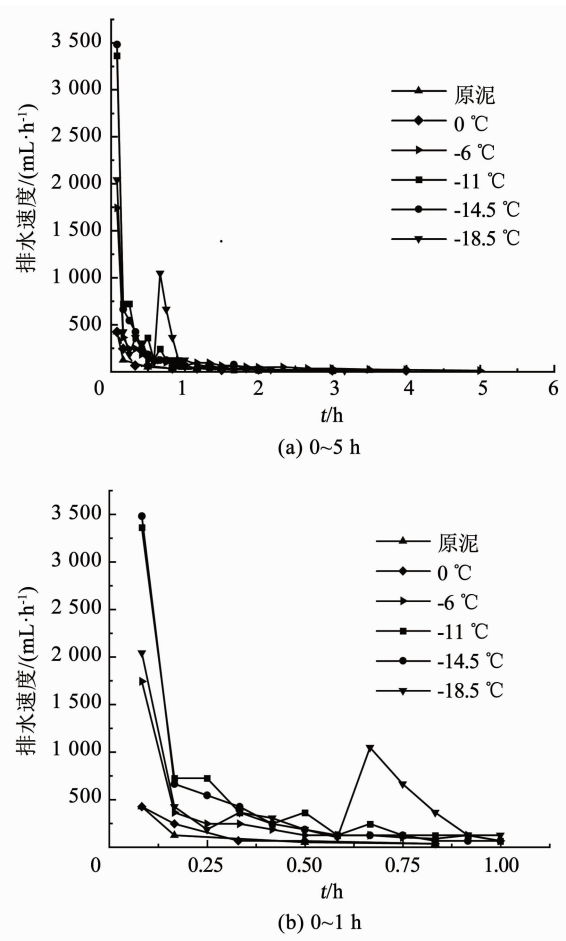


图 12 排水速度随时间变化

Fig. 12 Variation of dewatering rate with time

由图 11、12 可以看出,经冻融处理的污泥的排水量明显多于普通真空预压,说明冻融与真空预压联合处理的效果优于普通真空预压。但是经冷冻温度为 0 °C 处理后的污泥最终排水量为 128 mL,仅比原泥最终排水量多 13 mL,这是由于污泥中含有大量污泥颗粒,水的冰点低于 0 °C,当污泥冷冻温度达到 0 °C 时,污泥溶液中并没有冰晶生成,由于“热缩冷胀”现象的存在,促使部分颗粒的团聚,少量间隙水的释放,进而导致排水量的少量增加。

刚开始试验时,经冻融处理后的污泥的排水速度很快,最高达 3 625 mL/h,接近总排水量的 52.73%,这是由于污泥静置沉降析出的大量上清液在真空压力的作用下经排水管快速排出,而普通真空预压处理的污泥初期的出水速度远低于冻融与真空预压联合处理的污泥,说明经冻融处理后,污泥的固液分离性能更好。在随后试验过程中,原始污泥排水量随时间增长幅度十分缓慢,在 30 min 后几乎不再排水,3.5 h 时排水速度为 10 mL/h,此时试验停止,处理效果差。经冷冻温度为 -6 °C 处理后的这组排水量增长速度较原泥已明显加快,但是耗时过长,5 h 后排水固结结束。经冷冻温度为 -11、

-14.5 和 -18.5 °C 处理后的污泥排水曲线比较接近,排水量前期增长迅速,1 h 后随着泥饼压缩,部分排水通道被堵塞,排水速度趋于平稳,但排水速率仍有 60 mL/h 左右,整个过程仅需 3 h,相比较冷冻温度为 -6 °C,土体排水固结明显加快,加固时间大大缩短。

试验结束后,较其他 5 组试验,当冷冻温度达 -11 °C 这组的累计排水量最大,达 580 mL,且冷冻温度高于 -11 °C 工况(-6、0 °C 和原泥)时,试验最终排水量随温度降低而增多,低于 -11 °C 工况(-14.5 和 -18.5 °C)时,试验最终排水量反而随温度降低而减少,该试验结果与污泥比阻试验结果具有一致性。

值得注意的是,经冷冻温度为 -18.5 °C 处理后的这组污泥初始排水速度仅为 2 125 mL/h,略高于冷冻温度为 -6 °C 的污泥,造成这一现象的原因是冷冻温度为 -18.5 °C 这组污泥在试验初始阶段,模型箱出现漏气现象,真空度降至 70 kPa 以下。并且该组试验进行到 40 min 时排水速度突增突降,这是由于在 40 min 时,关闭真空泵采取密封堵漏措施,真空度迅速减小,密封盖与污泥泥饼分开,滤水通道重新形成。恢复正常抽气后,排水量迅速增加,排水速度剧增。

3.2.3 沉降量和减容比

图 13 为真空预压期间污泥沉降量与时间的关系曲线,可以看出,原始污泥在试验初期下降趋势就比较缓慢,30 min 后沉降量几乎不再下降,压缩性差。经冻融(冷冻温度为 -6、-11、-14.5、-18.5 °C)处理后的污泥前期沉降较快,后期随着排水速度降低,沉降逐渐趋于平缓。整个试验过程中,经冻融处理后的污泥沉降量下降趋势明显大于原泥,说明冻融处理可以有效地加快真空预压的排水固结。此外,沉降量随时间的变化趋势与排水量规律大致相同。

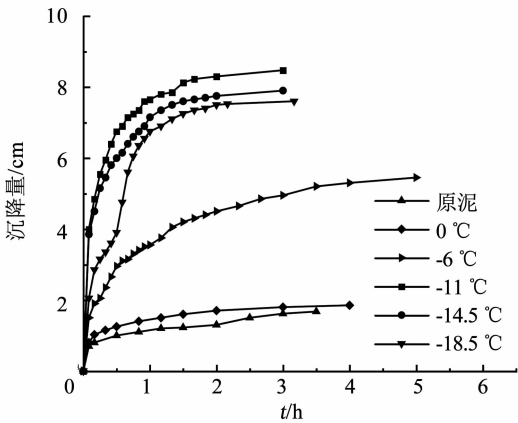


图 13 沉降量随时间变化

Fig. 13 Variation of settlement with time

抽真空结束后,6 组污泥均有一定程度的变形,最终沉降量分别达 1.7~8.5 cm,占初始高度的(减容比) 7.9%~40.0%。其中,污泥冷冻温度为-11℃这组试验,由于污泥经处理后比阻以及塑性指数较原泥大大降低,污泥内部结合水转换成自由水,污泥的黏性降低,水更容易被排出,整个沉降过程仅持续 3 h,比原泥处理时间缩短了 0.5 h,但污泥的最终累计沉降变形量最大,累计沉降量是原泥的 5 倍,减容比是原污泥的 5.3 倍。试验表明,冻融真空预压联合处理污泥减容减量效果十分显著。

3.2.4 含水率及无侧限强度

为了更直观地说明经冻融处理后的真空预压脱水效果优越性,对比了经真空预压处理后 6 组污泥泥饼的含水率和无侧限抗压强度。

泥饼含水率的取样位置距离真空预压处理后污泥表层向下 2 cm 处,采用烘干法测得,烘箱温度设为 70℃。由图 14 可以看出,原状污泥含水率为 72.0%,经真空预压处理后,空白组污泥泥饼含水率降至 69.8%,与真空处理前十分接近。经冻融处理的污泥真空预压后的泥饼含水率明显下降,随着冷冻温度的降低,泥饼含水率呈现先减小后增大的趋势。其中,当冷冻温度为-11℃时,污泥泥饼含水率降至最低,可至 54.9%,该趋势与污泥比阻试验结果一致。此外,冻融真空预压联合处理后的污泥含水率可以满足城市污泥混合填埋含水率低于 60%的要求^[17]。

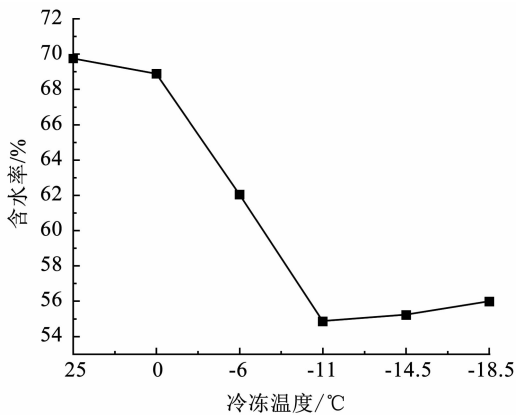


图 14 含水率随冷冻温度变化

Fig. 14 Variation of water content with freezing temperature

无侧限抗压强度在室温下采用无侧限抗压强度压缩仪进行测定,近污泥下表面取样,结果如表 3 所示。原状污泥和经冷冻温度为 0℃处理后的污泥仍较难脱水,经真空预压后,含水率较高,试样仍呈流塑状态,无法取样测定其无侧限抗压强度。通过冻融处理,污泥更易脱水,释放内部结合水,并联合真空预压,使得污泥含水率下降,污泥整体更加密实。经测定冷冻温度为-11℃时,污泥无侧限抗压强度

可达 42.84 kPa,可见经真空预压处理后的污泥强度有了很大的提升,效果显著。

表 3 试样的无侧限抗压强度
Tab. 3 Unconfined compressive strength of sample

冷冻温度/℃	25	0	-6	-11	-14.5	-18.5
无侧限抗压强度/kPa	—	—	28.58	42.84	40.30	40.14

注:“—”表示污泥强度过低,无法测得无侧限抗压值。

4 讨 论

1) 污泥是具有黏性的胶状物,具有含水率高、脱水难度大等特点。采用冻融处理可以明显改善污泥的脱水性能进而改善后续的真空预压效果。一方面经过冻融处理后,污泥中水的存在形式发生改变,部分结合水转换成自由水,导致真空预压过程中排水量以及排水速度增长;另一方面是水结冰时体积会增大,污泥颗粒在冻胀力的作用下团聚形成大颗粒,颗粒间空隙的增大,有利于在真空脱水过程中形成排水通道,同时大颗粒的形成大大降低了颗粒的表面能,使颗粒持水性减弱,加速了污泥的脱水过程。国内外有研究表明^[18-19],污泥颗粒对污泥脱水性能的改善程度具有很大的影响,当污泥颗粒以细小颗粒为主时,污泥的脱水性能不佳。本试验对污泥比阻和污泥颗粒平均粒径进行了拟合。如图 15 所示,二者之间拟合度为 0.978 7,呈现明显的负相关,即小颗粒污泥不利于脱水,大颗粒污泥比阻较小,拟合结果与上述观点一致。

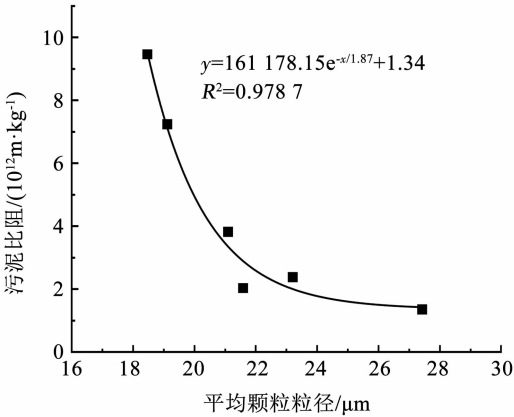


图 15 污泥比阻与污泥平均颗粒粒径的关系

Fig. 15 Relationship between specific resistance of sludge and average particle size of sludge

2) 未试验前污泥刺激性气味浓烈,试验后得到较大缓解,污泥恶臭的主要来源是微生物发酵污泥中有机物产生的硫化氢气体。推测恶臭味降低的原因是在冷冻条件下,微生物细胞内的游离水冷冻结冰并且体积增大,细胞膜胀破,对细胞造成不可逆的物理性伤害,致使微生物死亡,恶臭气味消散。

3) 本研究采用内径为 10 cm、高度为 40 cm 的椭圆形箱体进行一维真空固结试验,排水边界条件

较为单一,目的是初步探索冻融联合真空预压对填埋污泥具有减容减量的效果。在填埋现场实际真空预压操作过程中,需向填埋污泥中插入塑料排水板来增大加固范围和深度进而提高排水加固效果,后续将展开与实际工程更为接近的径向真空固结模型试验,进一步探究该技术应用于污泥填埋场减容减量的可行性。

4)冻融处理填埋污泥受地区气候特征的影响存在一定的局限性,需根据不同区域的气候特征进行针对性应用。在北方地区每年平均有 3 个月处于冷冻期,具有天然的气候优势,合理地利用自然冷能并结合真空预压法,可以充分节约能源且无二次污染。而在南方地区,因地处亚热带季风气候,无天然冷冻期,该技术的应用需在冬季低温的基础上采用人工制冷,更适合经济发达但土地资源紧缺、填埋空间严重不足的城市。

需要指出,本文得出的最优冷冻温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由于每个地区所产生的污泥性质具有较大的差异性, $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并不是一个特定温度,不同地区填埋场适合的冷冻温度需要进行试验来测定。

5 结 论

1)冻融处理可以改变污泥内部水的存在形式,结合水转换成自由水,小颗粒凝集形成大颗粒,改善污泥的脱水性能。

2)经冻融处理污泥的冷冻温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,污泥比阻降至最低,真空预压排水量、沉降量升至最大,真空脱水试验与污泥比阻试验随温度的变化规律具有一致性。

3)冻融与真空预压联合脱水效果较普通真空预压明显提升,累计排水量最高达 580 mL,体积仅占原始污泥的 40.0%,减容减量效果显著。含水率最低降至 54.9%,满足城市污泥填埋含水率低于 60%的要求。

4)冻融联合真空预压预压处理使得污泥整体更加密实,污泥无侧限抗压强度得到显著提升,最高可达 42.84 kPa。

参考文献

- [1]简东升,朱敬平,李笃中,等.以天然气候进行污泥的冻融处理[J].应用基础与工程科学学报,2000(4):370
JIAN Dongsheng, ZHU Jingping, LI Duzhong, et al. Freezing and thawing treatment of sludge in natural climate[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000(4): 370. DOI: 10.16058/j. issn. 1005-0930. 2000. 04. 005
- [2]VESILIND P A, MARTEL C J. Freezing of water and wastewater sludges[J]. Journal of Environmental Engineering, 1990, 116(5): 854
- [3]单连斌.利用冻结融解法进行污泥脱水的研究[J].环境保护科学,1996,22(1):21
SHAN Lianbin. Study on sludge dewatering by freezing and thawing[J]. Environmental Protection Science, 1996, 22(1): 21. DOI: 10.16803/j. cnki. issn. 1004-6216. 1996. 01. 007
- [4]GAO W. Freezing as a combined wastewater sludge pretreatment and conditioning method[J]. Desalination, 2011, 268(1/2/3): 170.

- DOI: 10.1016/j. desal. 2010. 10. 014
- [5]占鑫杰,林伟岸,詹良通,等.市政污泥真空预压模型试验研究[J].岩土力学,2013,34(增刊1):88
ZHAN Xinjie, LIN Weian, ZHAN Liangtong, et al. Model test study of vacuum preloading on municipal sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 88. DOI: 10.16285/j. rsm. 2013. s1. 064
- [6]詹良通,张佩,占鑫杰,等.化学调理对市政污泥真空预压处理过程中低渗透层控制效果试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(增刊1):7
ZHAN Liangtong, ZHANG Pei, ZHAN Xinjie, et al. Experimental study on inhibition effect of chemical conditioning on low permeability sewage sludge layer under conditions of vacuum preloading[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(S1): 7
- [7]武亚军,唐欣,崔春义,等.城市生活污泥真空固结特性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(4):772
WU Yajun, TANG Xin, CUI Chunyi, et al. Experimental study on characteristics of vacuum consolidation of municipal sludge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 772
- [8]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试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(4):796
WU Yajun, LIN Zhexin, HU Ting, et al. Experimental study on vacuum consolidation model of municipal sludge modified by Fenton reagent[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 796
- [9]WU Yajun, LIN Zhexin, KONG Gangqiang, et al. Treatment of municipal sludge by Fenton oxidation combined vacuum preloading[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(16): 15900. DOI: 10.1007/s11356-018-1736-5
- [10]ERDEN G, FILIBELI A. Comparison of dewatering characteristics of chemically conditioned sludge and freeze/thawed sludge[J]. Pamukkale University Journal of Engineering Science, 2018, 24(6): 1157. DOI: 10.5505/pajes. 2017. 62443
- [11]袁聚云.土工试验与原理[M].上海:同济大学出版社,2003:22
YUAN Juyun. Geotechnical test and principle[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003: 22
- [12]俞庭康,刘涛,沈洪.污泥比阻实验中几个问题的探讨[J].实验室研究与探索,2009,28(1):68
YU Tingkan, LIU Tao, SHEN Hong. Discussion on problems of sludge specific resistance measurement experiment[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2009, 28(1): 68
- [13]徐敦祖,王家澄,张力新.冻土物理学[M].2版.北京:科学出版社,2010
XU Xiaozu, WANG Jiadeng, ZHANG Lixin. Permafrost physics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010
- [14]刘金鑫.冻土中分凝冰的试验研究[D].镇江:江苏大学,2017
LIU Jinxin. Experimental research on segregated ice in frozen soil[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017
- [15]唐大雄,刘佑荣,张文殊,等.工程岩土学[M].2版.北京:地质出版社,2005
TANG Daxiong, LIU Yourong, ZHANG Wenshu, et al. Engineering geotechnical[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2005
- [16]于晓,李衍博,张文哲,等.化学调理法改善污泥脱水的研究进展[J].工业水处理,2018,38(11):1
YU Xiao, LI Yanbo, ZHANG Wenzhe, et al. Research progress in the improvement of sludge dewatering by chemical conditioning method[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(11): 1
- [17]城镇污水处理厂污泥处置-混合填埋泥质:CJ/T 249—2007[S].北京:中国标准出版社,2007
- [18]KARR P R, KEINATH T M. Influence of particle size on sludge dewaterability[J]. Water Environment Federation, 1978, 50(8): 1911
- [19]马俊伟,刘杰伟,曹芮,等.芬顿试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究[J].环境科学,2013,34(9):3538
MA Junwei, LIU Jiewei, CAO Rui, et al. Sludge dewaterability with combined conditioning using Fenton's reagent and CPAM[J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3538. DOI: 10.13227/j. hjkx. 2013. 09. 010