

## · 综合 ·



# 渤海湾海洋疏浚泥的药剂絮凝与固结特性 \*

李运红<sup>1</sup>, 戚庆学<sup>1</sup>, 王彦军<sup>1</sup>, 武亚军<sup>2</sup>, 陈国公<sup>2</sup>, 许嘉乐<sup>2</sup>

(1. 中国冶金地质总局青岛地质勘查院, 山东 青岛 266109; 2. 上海大学 土木工程系, 上海 200444)

**摘要:** 海洋疏浚泥一般具有颗粒细、含水率高、渗透性差等特点, 药剂真空预压法能够大幅提高海洋疏浚的加固效果, 但是, 目前关于渤海湾海洋疏浚泥的药剂絮凝与固结特性不甚清楚。为此, 基于东营吹填土的矿物成分与物理性质, 对经过 CaO 与 APAM 两种絮凝药剂预处理后海洋吹填土的絮凝特性与固结特性进行研究。研究结果表明: 该地区疏浚泥为淤泥质粉质黏土, 矿物成分以石英、碳酸钙为主, 且含有一定量的白云母、绿泥石等黏土矿物; 加入有机絮凝剂 APAM 后絮凝速率非常快, 添加量在 100~300 g/m<sup>3</sup>范围内, 只需约 5 min 即可完成固液分离, 并能排出大量的上清液, 最终上清液的体积比不加絮凝剂的将增加 1/4~1/3; 无机絮凝剂 CaO 的加入同样能加快固液分离, 但是上清液的体积比不添加絮凝剂的少, 这一点与有机絮凝剂完全不同; 加入絮凝剂后疏浚泥的固结系数均会有不同程度的增加: 有机絮凝剂添加量越多固结系数越大; 无机絮凝剂则不同, 随着添加量的增加, 固结系数呈先增加后减小的变化规律。为了取得最佳的固结效果, 应该采用最优添加量。研究成果对于渤海湾海洋疏浚泥的药剂真空预压处理工程实践具有理论指导意义。

**关键词:** 海洋疏浚泥; 有机絮凝剂; 无机絮凝剂; 絮凝特性; 固结特性

中图分类号: TV 851; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0001-06

## Flocculation and consolidation characteristics of marine dredged slurry from Bohai Bay

LI Yun-hong<sup>1</sup>, QI Qing-xue<sup>1</sup>, WANG Yan-jun<sup>1</sup>, WU Ya-jun<sup>2</sup>, CHEN Guo-gong<sup>2</sup>, XU Jia-le<sup>2</sup>

(1.Qingdao Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, China;

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

**Abstract:** Marine dredged slurry generally features fine particles, high moisture content, and poor permeability. The flocculant vacuum preloading method can increase the reinforcement effect of marine dredging significantly. However, at present, the flocculation and consolidation characteristics of marine dredged slurry in Bohai Bay are unclear. This paper investigates the flocculation and consolidation characteristics of marine dredged slurry after pre-treatment with CaO and APAM based on the mineral composition and physical properties of the Dongying reclamation soil. The results show that the dredged slurry in the area is silty and clay, with quartz and calcium carbonate as the primary mineral components and some clay minerals such as muscovite and chlorite. The flocculation rate is speedy after adding organic flocculant APAM with an amount between 100 and 300 g/m<sup>3</sup>. It only takes about 5 minutes to complete the solid-liquid separation and discharge an extensive amount of supernatant. The volume of the final supernatant increases by 1/4-1/3 compared with that without flocculant. The addition of inorganic flocculant CaO also speeds up solid-liquid separation. However, the volume of supernatant is less than that without adding flocculant, which differs entirely from the organic flocculant. The consolidation coefficient of the dredged slurry will increase to different degrees after adding flocculants: The consolidation coefficient rises as the organic flocculants are constantly added to the dredged slurry. However, the inorganic flocculants are different:

收稿日期: 2021-06-10

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(41772303)

作者简介: 李运红(1982—), 男, 高级工程师, 注册一级建造师, 研究方向为岩土工程勘察、设计及施工。

The consolidation coefficient increases first and then decreases with the increase in the added amount. The optimal added amount should be adopted to get the best consolidation effect. The research results are of great theoretical significance for vacuum preloading treatment of marine dredged slurry in Bohai Bay.

**Keywords:** marine dredged slurry; organic flocculant; inorganic flocculant; flocculation characteristic; consolidation characteristic

为解决沿海城市土地资源短缺的问题，围海吹填造陆已成为中国沿海地区最主要的造地方式。吹填泥沙主要来源于海洋、河流航道疏浚与整治，疏浚出来的泥沙通过输泥管排送到预定区域，经沉淀排水后形成大片疏浚泥场地<sup>[1]</sup>。一些地区的疏浚泥具有含水率高、颗粒粒径细、渗透性差等特点，吹填以后要经过很长时间才能完成自重固结<sup>[2]</sup>，为了满足工程建设需求必须进行地基处理以加快土体固结。

真空预压法作为处理高含水率吹填软土地基的有效方法，最早于 1952 年由瑞典的杰尔曼教授提出<sup>[3]</sup>，目前已被广泛应用到各类高含水率软土地基处理工程中。在实际工程应用中真空预压法面临种种问题，特别是塑料排水板的淤堵问题，即在真空预压处理软土过程中紧靠塑料排水板的周围会出现渗透性极低的“土柱”，这些“土柱”本身比周围的超软土具有更高的强度和密度，其形成和存在起到了类似砂井地基中的涂抹作用，阻碍了周围软土的排水固结，导致其强度极低<sup>[4-5]</sup>，在一定程度上阻碍了外围土中水向塑料排水板处的流动。为解决这一问题，许多学者进行了研究与探讨：沈宇鹏等<sup>[6]</sup>进行了增压式真空预压法软土处理试验，证明通过增加正向压力与负压进行迭加可以提高真空预压地基处理效率；刘松玉等<sup>[7]</sup>提出气压劈裂真空预压法，通过向地层中注入高压空气使土体产生裂隙并增加土体渗透性，减轻真空预压过程中的淤堵现象；王军等<sup>[8]</sup>采用防淤堵排水板对直排式真空预压技术进行了改进，整体式排水板滤膜为无凹凸结构亲水性材料，滤膜与芯材轧在一起能提高排水效率；雷华阳等<sup>[9-10]</sup>从微观角度探讨了增压式真空预压法的加固效果优于常规真空预压法的机理。

虽然这些方法均在防淤堵方面取得一定的效

果，但是仍然无法从根本上解决淤堵问题。武亚军等<sup>[11]</sup>提出药剂真空预压法取得了很好的防淤堵效果，该方法是先通过添加化学药剂对吹填高含水率土进行絮凝或调质，以增加土颗粒粒径、改变土体颗粒与孔隙的接触特征、改善土体的渗透与固结特性，再施加真空荷载，从而达到防止淤堵、增强真空预压处理效果的目的；蒲河夫等<sup>[12]</sup>提出一种絮凝沉积-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥，该研究显示絮凝剂的添加可以大幅提高疏浚淤泥的脱水效率。目前药剂真空预压法在高含水率软土及市政污泥处理中均取得很好的效果<sup>[13-14]</sup>。

受黄河与渤海海相两方面因素的影响，山东省东营地区软土兼具黄河三角洲和海洋沉积的特性，由吹填渤海海底泥沙形成的场地，部分地区含沙量很高，场地工程地质特性较好，但更多的场地疏浚泥颗粒细、含水率高，采用真空预压法地基处理会面临因淤堵导致的加固效果差、时间长等缺点。本文拟将药剂真空预压法引入东营地区吹填软土处理中，从东营港区吹填现场取样，测试疏浚泥样的各项物理指标与矿物组成成分。为了模拟疏浚泥的天然沉积过程与不同药剂絮凝过程进行沉降柱试验，并对不同药剂絮凝后的絮凝体进行固结试验，系统研究了疏浚泥的基本物理性质、药剂絮凝与固结特性，对进一步采用药剂真空预压法处理东营疏浚泥具有指导意义。

## 1 疏浚泥矿物组成与基本物理性质

### 1.1 疏浚泥样及其矿物成分

试验土样取自山东省东营市东营港区(图 1)。为尽量减少扰动土样，所有土样在现场及时用腊及胶带封存，保持其天然湿度和结构，并及时送回实验室进行试验。通过 X 射线衍射试验(XRD)和 X 射线荧光光谱试验(XRF)对东营地区疏浚泥

的矿物成分和氧化物(含元素)进行测试分析, 分析结果见图2及表1、2。



图1 试验土样

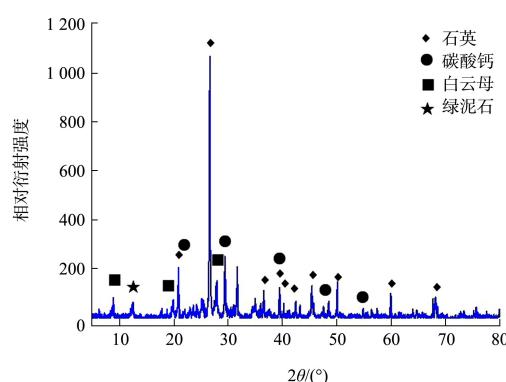


图2 土体中的矿物成分

表1 疏浚泥中的主要化合物及含量

名称	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Cl	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO
含量/%	41.60	20.75	13.09	12.08	3.41	2.70	2.61	2.14	0.88	0.38	0.35

表2 疏浚泥中的主要元素及含量

名称	O	Si	Fe	Ca	Al	K	Cl	Mg	Na	Ti	Mn	S
含量/%	30.02	22.25	18.14	11.24	7.19	3.37	3.07	1.81	1.75	0.65	0.34	0.18

由图2和表1可知, 东营疏浚泥氧化物以SiO<sub>2</sub>为主, 约占41.6%, CaCO<sub>3</sub>含量约占24.7%, 黏土矿物约占33.7%。

从表2可知, 该地区疏浚泥中主要的氧化物为SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 约占总量的90%; 元素主要以O、Ca、Fe、Al和Si为主, 约占总量的90%。同时, 这些氧化物和元素与矿物成分的

分析结果基本一致, 二者可以相互印证。

## 1.2 疏浚泥的基本物理性质

该地区的疏浚泥经过多年的自重沉积, 内部已经形成一定的结构强度, 该疏浚泥的基本物理指标见表3。根据含水率、液塑等各项指标可知该软土为淤泥质粉质黏土。

表3 疏浚泥的基本物理指标

初始含水率/%	比重	孔隙比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
43.7%	2.73	1.211	1.70	98.5	33	18.8	14.2

从表3可知, 泥的初始含水率为43.7%, 液限、塑限分别为33.0%、18.8%, 含水率大于液限, 孔隙比大于1.0。颗粒级配曲线见图3。从图3可知, 砂粒、粉粒、黏粒、胶粒分别占2%、69%、15%、14%; 东营疏浚泥的颗粒级配大部分是粉粒(占69%), 砂粒仅占2%, 黏粒与胶粒分别为15%与14%; 不均匀系数( $C_u$ )与曲率系数( $C_c$ )分别为8.87与1.26, 满足 $C_u \geq 5$ 和 $1 \leq C_c \leq 3$ 的条件, 表明疏浚泥级配较好, 渗透性相对较差。

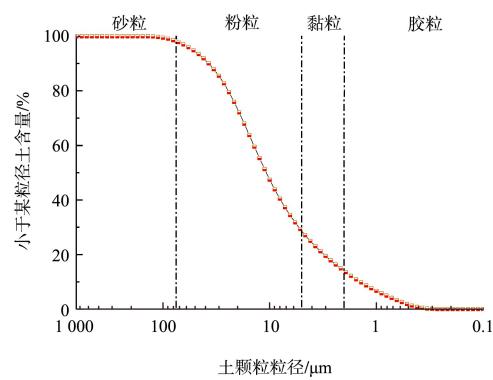


图3 土颗粒粒径累积分布曲线

## 2 疏浚泥的絮凝特性

### 2.1 絮凝剂与絮凝模拟方案

絮凝剂一般有无机絮凝剂(生石灰、熟石灰、氯化钙等)、有机絮凝剂(聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠、聚乙烯吡啶盐、聚乙烯亚胺等)、微生物絮凝剂和植物絮凝剂4种类型。微生物絮凝剂与植物絮凝剂研究刚刚起步,机理不清楚,基本没有工程应用,因此,本文采用生石灰(CaO)和有机絮凝剂(APAM)两种絮凝剂进行研究,其中CaO按照泥浆质量分数进行添加,分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%;APAM按照100、150、200、300 g/m<sup>3</sup>添加。

考虑到吹填初期场地内土体的含水率极高(约500%),为了模拟海洋土从吹填到自重固结的整个沉积过程,试验前将取回的土样统一加水配制成含水率为500%的泥浆,使用该泥浆进行沉降柱试验。沉降柱为横截面积12.56 cm<sup>2</sup>、容积500 mL的玻璃量筒,外壁的刻度线精度为5 mm。首先将计算好质量的疏浚泥样与水倒入1 000 mL的大量筒内,分别配制成体积约为450 mL的试验泥浆,再加入相应的CaO或者APAM,采用玻璃棒搅拌使絮凝剂与泥浆充分混合均匀,配置成450 mL疏浚泥泥浆混合液。分别取400 mL混合液倒入500 mL量筒内进行沉降柱试验,为防止蒸发带来的误差,使用保鲜膜封顶,试验过程中采用便携式无线摄像机进行实时跟踪记录,得到任意时刻各个沉降柱内泥水混液面随时间的连续变化情况(图4)。



图4 絮凝试验装置

### 2.2 疏浚泥的絮凝特性

通过沉降柱试验探究不同添加量的CaO与APAM对絮凝速度和絮凝后泥浆含水率的影响,通过综合评价确定适合工程实际的药剂类型与添加量。

沉降柱试验的沉降过程见图5。从图5可以看出

出:1)加入不同量的APAM后絮凝沉降速度大大加快,比原状泥浆的絮凝速度均有较大幅度的提升;2)加入不同量的APAM絮凝沉降速度不同,速度随着添加量的增加而加快,添加量为300 g/m<sup>3</sup>时速度最快,基本在5 min内能完成沉降,之后趋于稳定;3)不同添加量絮凝剂得到的最终混液面高度相当,基本接近最优添加量。

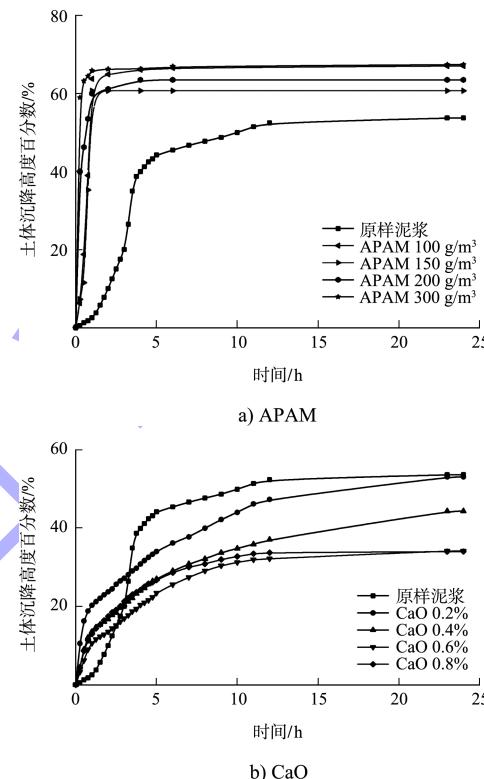


图5 不同絮凝剂的沉降柱试验

在加入不同掺量CaO的泥浆中,可以看到加入药剂后絮凝速度明显低于原状泥浆的絮凝速度,且随着添加量的增加泥浆絮凝速度先减小后增加,最终的混液面高度也出现了较大差别,随着CaO添加量的增加混液面高度逐渐增加,但添加量较大时高度保持一致。

图6为不加絮凝剂、添加CaO与APAM时,沉降柱试验进行到25 h排出上清液后下部絮凝体的含水率分布。从图6可以看出:不加絮凝剂时,前期絮凝速度最慢,但3~5 h沉降速率增加很快,25 h絮凝体的含水率最低,为145.9%;添加APAM后,泥浆的絮凝速度非常快,絮凝体的含水率随添加量的增加显示出先减小后增加的规律:在添加量为150 g/m<sup>3</sup>时含水率最低,为145.6%;

添加量为  $300 \text{ g/m}^3$  时含水率最高, 为 177.8%, 可以认为  $150 \text{ g/m}^3$  为最优添加量。添加 CaO 后的含水率均比不加絮凝剂时的高, 同时, 添加量越高含水率越高, 结合絮凝沉降曲线, 说明加入 CaO 会缩短了絮凝沉降过程, 但是絮凝过程中絮体颗粒会包裹部分水同时沉降。另外, CaO 与水反应生成  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  与土颗粒发生离子交换和火山灰反应, 所形成的结晶水化物具有一定的结构强度, 起到了固化作用, 不利于絮凝体体积的减小。以上 APAM 与 CaO 絮凝剂的含水率变化规律与沉降变化规律是一致的, 即絮凝体体积小、含水率低。

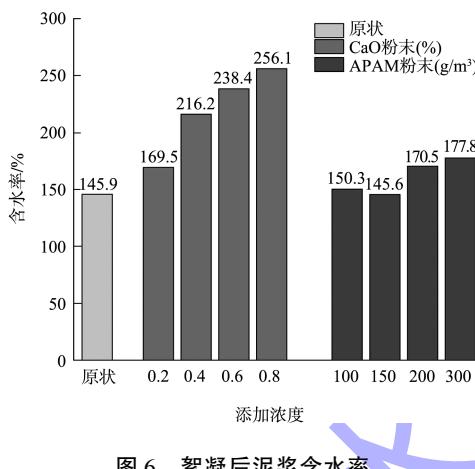


图 6 絯凝后泥浆含水率

### 3 疏浚泥的固结特性

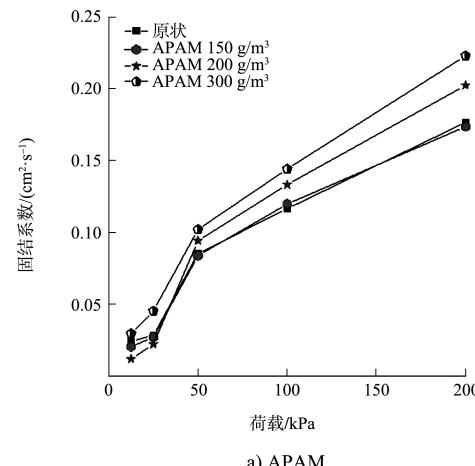
为探究 APAM 与 CaO 絯凝作用对疏浚泥固结特性的影响, 进行室内固结试验, 以确定疏浚泥的固结系数, 再利用饱和土一维固结微分方程反推其渗透系数。

从絮凝试验可知, 过高含水率(500%)的泥浆不加絮凝剂时已能很快固结分离, 考虑到固结试验需要一定的时间, 施加初级荷载时可能已经发生固液分离, 如果采用 500% 含水率的泥浆进行固结试验无法反映真实情况, 根据经验, 过高含水率疏浚泥泥浆在固结仪中会发生浆液挤出而影响结果的现象。基于这两点考虑, 本文在固结试验时确定采用含水率为 200% 的泥浆。

试验器材主要包括烧杯、搅拌棒、烘箱、GJZ-2 双联中压固结仪(采用 4 cm 高的环刀)、精度 0.01 g 的电子天平。试验时, 先用烧杯取一定

量的泥浆, 调制成含水率 200%, 在其中加入絮凝剂。其中 CaO 分别按照质量分数 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、APAM 按照 150、200、300  $\text{g/m}^3$  添加。然后分层填入 4 cm 环刀中, 固结试验初级荷载为 12.5 kPa, 加荷率为 1, 最大荷载为 200 kPa, 试验按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[15]</sup> 中的方法进行。

采用时间平方根法计算固结系数, 结果见图 7。从图 7 可以看出, 随着荷载的增加, 泥浆的固结系数逐渐增加, 且在前期的加载中固结系数增加更为明显, 随着荷载增大固结系数增长变缓。在加入 CaO 药剂的泥浆中, 其固结系数均比原状固结系数大。在 0.2%~0.6% 添加量范围内, 固结系数随着药剂添加量的增加而显著增加; 在添加 0.6% 的 CaO 时, 固结系数比于原状泥浆增大 2~3 倍, 能够大幅度提高泥浆固结沉降速度; 但在加入 0.8% 的 CaO 时泥浆的固结系数反而下降。这是因为  $\text{Ca(OH)}_2$  电离出的  $\text{Ca}^{2+}$  置换土颗粒表面低价阳离子, 土颗粒表面双电层变薄, 同时  $\text{Ca(OH)}_2$  具有桥连作用, 小颗粒聚集形成排水通道, 孔隙水易于排出, 土体渗透系数增加。但当添加过量时, 反而使小颗粒无法聚集从而渗透性下降, 固结系数降低。总体来说, 添加 CaO 能够提高泥浆渗透性 2~3 倍, 且荷载在 12.5~100 kPa 时显著提高, 在大于 100 kPa 时提高并不明显。实际真空预压处理吹填泥浆时, 真空荷载一般约为 80 kPa, 因此添加 CaO 能够显著提高泥浆渗透性, 从而提高真空预压处理吹填场地的效果和效率。



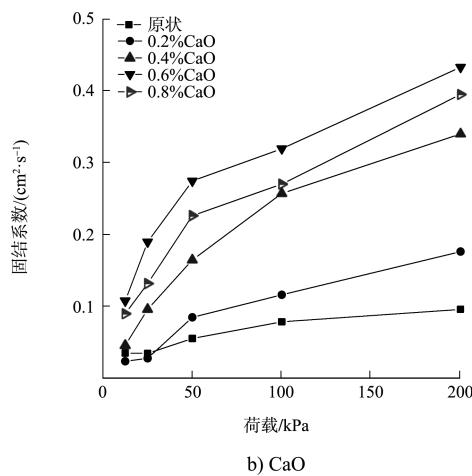


图 7 絮凝疏浚泥的固结系数-荷载曲线

在加入 APAM 药剂的泥浆中，随着荷载的增加泥浆的固结系数逐渐增大，与添加 CaO 药剂的规律相似。在添加不同量的 APAM 时，泥浆固结系数随着添加量的增加而增大，且在 50~200 kPa 时变化较为明显，比原状泥浆固结系数有所提升，但是相比于添加 CaO 药剂的泥浆，添加 APAM 药剂后固结系数变化并不显著，最大只有 1.5 倍，远小于添加 CaO 药剂后固结系数的变化幅度。

#### 4 结论

1) 该地区疏浚泥矿物成分以石英、碳酸钙为主，且含有一定量的白云母、绿泥石等黏土矿物，物理性质较差，排水固结较慢。

2) 加入有机絮凝剂 APAM 可大大提高固液分离速率，并能排出大量的上清液，最终上清液的体积比不加絮凝剂的约增加 1/4~1/3；同时，加入有机絮凝剂会增大疏浚泥的固结系数，并且添加量越多固结系数越大。

3) 无机絮凝剂 CaO 的加入同样能加快固液分离，但是上清液的体积比不添加絮凝剂的少，这一点与有机絮凝剂完全不同；加入无机絮凝剂后，固结系数随着添加量的增加，呈先增加后减小的变化规律，因此，为了取得最佳的固结效果，应该按照最优添加量添加。

4) 在本研究基础上，为了探讨药剂真空预压法处理的可行性，还需要进一步开展真空固结研究工作。

#### 参考文献：

- [1] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1681-1686.
- [2] 刘莹, 王清. 水泥与生石灰处理吹填土对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2006(3): 424-429.
- [3] KJELLMAN W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure[C]// Proceedings of a Conference on Soil Stabilization, Lambrige M A: Massachusetts Institute of Technology, 1952: 258-263.
- [4] 唐彤芝, 黄家青, 关云飞, 等. 真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J]. 水运工程, 2010(4): 115-122.
- [5] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1073-1080.
- [6] 沈宇鹏, 余江, 刘辉, 等. 增压式真空预压处理站场软基效果试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 97-103.
- [7] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 剪裂真空法加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 591-599.
- [8] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1257-1268.
- [9] 雷华阳, 胡垚, 雷尚华, 等. 增压式真空预压加固吹填超软土微观结构特征分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 32-40.
- [10] 雷华阳, 李宸元, 刘景锦, 等. 交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2112-2125.
- [11] 武亚军, 陆逸天, 骆嘉成, 等. 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 525-533.
- [12] 蒲河夫, 潘友富, KHOTEJA D, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502-1509.
- [13] 武亚军, 唐欣, 崔春义, 等. 城市生活污泥真固结特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版) 2018, 48(4): 772-780.
- [14] 武亚军, 林哲鑫, 胡挺, 等. 芬顿试剂改性市政污泥真固结模型试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版) 2019, 49(4): 796-803.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.