

· 岩土工程 ·



## 高含水率疏浚淤泥排水板滤膜淤堵机理\*

王永平<sup>1</sup>, 王 婧<sup>1,2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 真空预压加固高含水率疏浚淤泥通常存在排水板滤膜的淤堵问题。通过开展4种排水板滤膜的物理力学性能测试, 以及环境扫描电子显微镜观测滤膜的孔洞结构规则, 对比分析滤膜淤堵试验中梯度比大小规律的本质因素。总结提出滤膜的淤堵机理, 并建立防淤堵准则。

**关键词:** 疏浚淤泥; 滤膜; 淤堵; 微观

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0006-06

### Clogging mechanism of PVD filter membrane used for reinforcing dredged clay

WANG Yong-ping<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,  
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
2. Civil and Transportation Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Filter membrane clogging problem of prefabricated vertical drains (PVD) usually presents in dredged clays by vacuum preloading. For four kinds of drainage plate membrane, the physical and mechanical tests were carried out. The environmental scanning electron microscope used to observe membrane pore structure rules. The essential factors of gradient ratio were comparative analyzed by filter clogging test. The filter membrane clogging mechanism was proposed in summary, and the anti-clogging criterion was established. It should be reference for future engineering.

**Keywords:** dredger clay; filter membrane; clogging; microcosmic

中国内陆河湖的清淤以及港口、航道的建设工程, 每年都要产生大量的疏浚淤泥。由于疏浚淤泥往往具有含水率高、细颗粒含量高、排水性能差等特点, 淤泥在固结过程中要长时间占用大量的土地资源。因而, 如何对疏浚淤泥进行快速固结处理成为实际工程迫切需要解决的问题<sup>[1]</sup>。由于沉积环境的原因, 高含水率疏浚淤泥中黏粒含量高, 且存在一定的有机质。颗粒粒径小, 表面带有大量负电荷, 粒间有很强的静电作用,

使其容易形成絮凝状或蜂窝状的结构, 在自重下难以固结压密<sup>[2]</sup>。此种特性导致土抗剪强度低及承载力低, 一般难以直接于其上进行工程构筑。

真空预压加固高含水率疏浚淤泥, 在真空吸力的作用下, 土中一部分细颗粒会通过排水板滤膜进入芯板, 在芯板内逐渐累积产生淤堵, 影响芯板的通水能力; 而另一部分细颗粒会滞留于滤膜表面或吸附于内部, 降低排水板的渗透性, 使

收稿日期: 2014-12-18

\*基金项目: 中交交通基础工程环保与安全重点实验室科研资助项目 (Y2013D27)

作者简介: 王永平 (1965—), 男, 教授级高工, 从事港航、岩土工程方面的研究。

得土中水向排水板内渗流速度减慢<sup>[3-4]</sup>。这两者的共同作用显著影响疏浚淤泥的加固效果, 使其不能快速达到加固后的力学性能标准。更甚者只在排水板周围小范围内形成“土柱”, 而“土柱”外的土体则严重缺乏加固。这使得工程达不到设计的目标, 而二次加固则增加了工程的费用和工期, 不仅制约了真空预压法的使用, 也减缓了社会建设发展的进程<sup>[5-6]</sup>。

本文针对真空预压地基处理中常见的排水板淤堵问题, 通过室内梯度比试验和单井模型试验, 模拟排水板滤膜在抽真空过程中产生的淤堵行为; 采用不同物理力学性质的排水板滤膜进行试验, 探究滤膜淤堵行为的主要影响因素及指标; 利用环境扫描显微镜观察淤堵后的滤膜, 探究在渗透过程中土颗粒在滤膜中发生淤堵的积累规律及微观机理。

## 1 排水板滤膜物理力学性能

### 1.1 滤膜的物理性能

试验中选取了4种不同类型的土工织物滤膜进行研究比较, 分别为大孔径编织尼龙网(DBN), 中孔径编织尼龙网(ZBN), 小孔径常规热轧无纺布(XCW)及小孔径防淤堵热轧无纺布(XFW), 物理性能如表1所示。

表1 排水板滤膜的物理性能

滤膜类型	纤维原料	处理方式	纤维密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	单位质量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	厚度/ mm
DBN	PA, 单丝	平织	1.14	28.2	0.118
ZBN	PA, 单丝	平织	1.14	39.4	0.111
XCW	PET, 长纤	热轧	1.38	90.8	0.357
XFW	PET, 长纤	热轧	1.38	74.3	0.339

### 1.2 滤膜的力学性能

在打入排水板进行真空预压加固时, 地层的水平应力及真空负压将会使滤膜紧贴芯板。质量差、延伸率较大的滤膜在加固过程中, 很可能会陷入排水通道中, 减小过水通道, 导致不良的加固效果。因此, 对滤膜进行湿态、干态拉伸试验, 试验结果见表2。

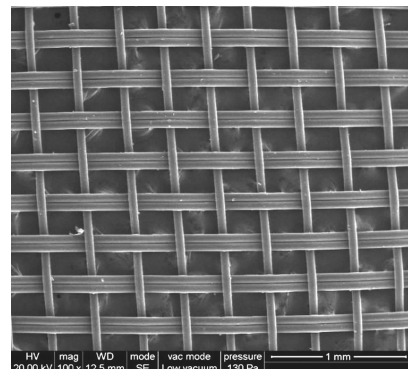
表2 排水板滤膜的力学性能

样品编号	试验条件	定应变负荷/N		最大力/ N	断裂 伸长率/%
		10%	15%		
XCW	干态	151.75	170.25	176.50	16.50
	湿态	94.64	95.51	102.38	14.09
XFW	干态	166.50	189.59	275.46	35.47
	湿态	125.43	142.28	181.19	31.74
DBN	干态	80.56	137.94	408.57	45.06
ZBN	干态	51.23	86.24	311.53	41.62

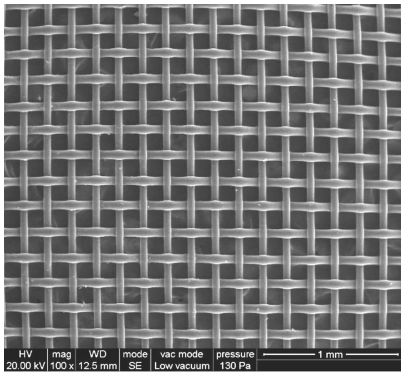
从表2可以看出, 常规热轧无纺布的最大力及断裂伸长率在各类型滤膜中偏低, 说明其延伸性能较差, 可承受最大力较小; 相对于热轧无纺布, 尼龙网在较小力的情况下, 较易达到10%的伸长率; 从干态、湿态拉伸对比来看, 在滤膜完全湿润的情况下, 其拉伸强度、断裂伸长度均有一定程度的下降; 两种无纺布横向对比, 对于拉伸强度、伸长率和定应变时负荷值, 防淤堵无纺布均要优于常规无纺布, 说明在实际真空预压过程中, 防淤堵式滤膜更不易出现松弛或变形。

### 1.3 滤膜的孔洞及渗透性能

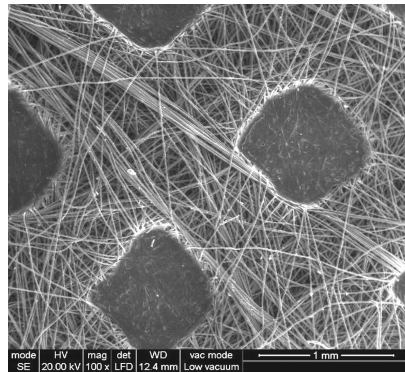
为了更精确地测量滤膜样本的孔径, 同时观察样本的孔洞形状, 环境扫描电子显微镜被应用于观察样本在放大100倍后的情况, 其中编织布的孔径在放大后的图像中用软件按比例量测得出, 如图1所示。在2种无纺布的图像中(图1c)、1d)), 黑色块状物为纤维后处理时的热轧熔点, 由纤维高密度熔合粘结而成, 为不透水层; 其余部分则为纤网起主要作用的透水部分。防淤堵无纺布的纤维排列显得更为规整及有条理, 说明防淤堵无纺布比常规无纺布拥有更规则的孔洞, 在渗透滤水方面显示更佳的性能。



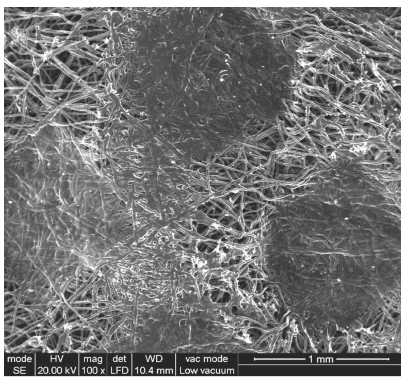
a) DBN



b) ZBN



d) XFW



c) XCW

图 1 样本放大 100 倍后图像

防淤堵无纺布的渗透系数为常规无纺布的 2.8 倍。渗透系数一般随滤膜的孔径及孔隙率而增大(表 3)。防淤堵无纺布的平均孔径及孔隙率分别比常规无纺布约大 4.3% 和 4.6%。此外, 2 种无纺布的孔洞结构差异也是渗透系数的重要影响因素, 当无纺布中的排水通道曲折或沿程发生较大的直径变化时, 其在曲折处或直径变化处会产生一个较大的水头损失, 从而导致整体渗透性下降。

表 3 滤膜的孔洞特征及渗透性能

样本编号	纤维直径 $d_f/\mu\text{m}$	纤维层数 $m$	等效孔径 $O_{95}/\text{mm}$	孔隙率 $n_g/\%$	透水率 $\Psi/\text{s}^{-1}$	渗透系数 $k_g/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
DBN	63(竖)/127(横)	1	0.18 × 0.25(矩形)	45.73	3.859	0.045 5
ZBN	54(竖)/61(横)	1	0.12 × 0.12(矩形)	42.79	3.236	0.035 9
XCW	14.2	12	0.047(等效圆形)	76.30	0.248	0.008 9
XFW	11.5	14	0.049(等效圆形)	79.80	0.738	0.025 0

## 2 排水板滤膜的淤堵试验

分别对 DBN, ZBN, XCW 及 XFW 不同类型

的滤膜在水力梯度  $i=1, i=2.5, i=5$  及  $i=7.5$  的情况下进行梯度比试验。试验装置如图 2 所示。

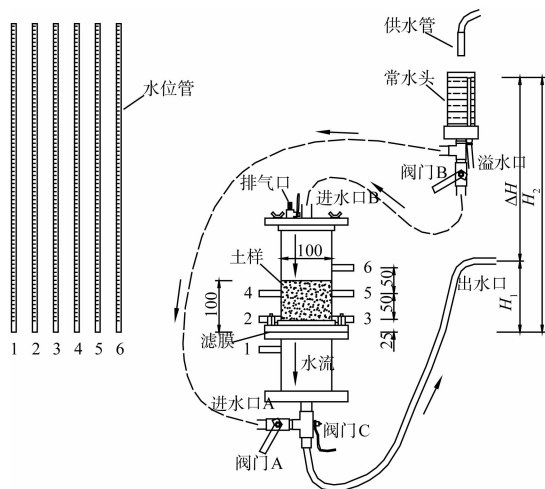


图 2 梯度比试验装置

4 种滤膜样本在不同水力梯度下梯度比  $GR$  值随时间的变化曲线如图 3 所示。

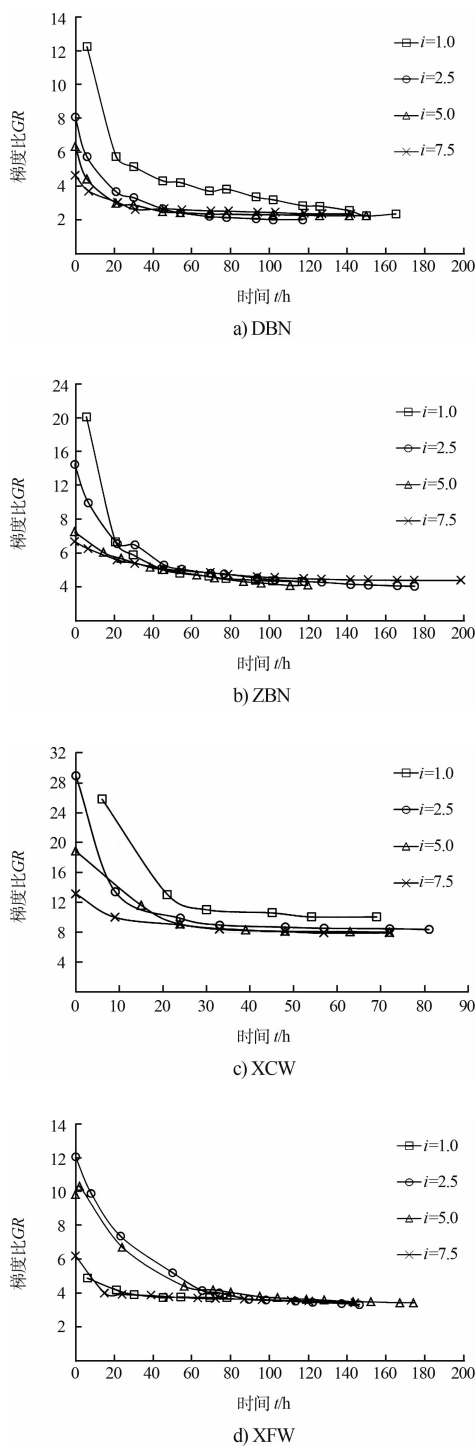


图 3 4 种滤膜在不同水力梯度下梯度比随时间的变化曲线

由图 3 可以看出, 滤膜的梯度比均大于 1, 表明在一定程度上出现了淤堵。大孔径滤膜 (DBN) 与中孔径滤膜 (ZBN) 稳定后的梯度比分别约为 2 和 4, 后者为前者的 2 倍, 在两者孔隙率及孔洞

特征相近的情况下, 可见孔径大小对梯度比有显著影响。两种编织布在试验初期出现了一定程度上的土颗粒持续流失, 随后一段时间内土体趋于稳定, 现象消失。两种滤膜的孔径均允许 95% 以上的土颗粒通过, 由大颗粒堵塞滤膜孔洞出现淤堵的可能性很小, 更可能是黏粒在纤维上的吸附或纤维表面的遮蔽作用引起的。

常规无纺布 (XCW) 及防淤堵无纺布 (XFW) 的梯度比分别约为 8 和 3.4, 前者的梯度比远大于后者, 为 4 种滤膜中数值最大的。可见, 除孔径大小外, 孔洞结构也是影响梯度比大小的重要因素。复杂不规则的孔洞结构有使梯度比数值明显增大的趋势。

防淤堵无纺布与中孔径尼龙网的梯度比在数值上接近。中孔径尼龙网孔径约为防淤堵无纺布的 2.5 倍; 而后者的孔隙率比前者约高出 47%, 约为 2 倍。孔隙率在一定程度上反映了滤膜内排水通道的多寡, 可见除孔径大小, 孔洞特征以外, 滤膜的孔隙率也是影响梯度比大小的重要因素。

### 3 滤膜淤堵的机理

#### 3.1 滤膜的淤堵机理

排水板在抽真空过程中, 滤膜处会发生淤堵 (图 4)。在渗流作用下发生的土颗粒迁移, 部分可能通过滤膜随水流排走, 部分则可能滞留在滤膜的表面或滤膜中的排水通道里。即使选用的滤膜初始具有很高的渗透性, 随着滤膜处发生的淤堵, 纤维间的排水通道截面逐渐变小, 其渗透性能可能会大幅度降低, 甚至完全丧失排水作用。因此渗透性高的滤膜不一定能保证排水的高效性, 还跟它在排水过程中的防淤堵性能有很大关系。

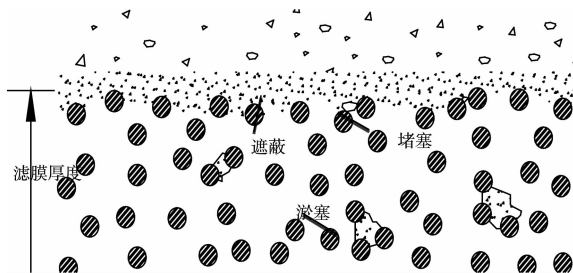


图 4 滤膜淤堵的 3 种形式

根据淤堵形式的不同,淤堵一般可分为淤塞、堵塞、遮蔽3种不同情况。

1) 淤塞是指小于等于滤膜孔径的土颗粒,在随水流通过滤膜时,滞留于滤膜孔洞内。常见于无纺布孔洞直径变小处。对于黏粒含量高的土样,黏粒则由于电化学作用经常吸附于滤膜纤维表面,经过土颗粒间的絮凝作用也可能发展为淤塞整个通道截面的絮凝体。当滤膜中的孔洞被淤塞后,原本流经通道的水流到达此处时,将会改变流向至相邻通道或停滞于死胡同处。

2) 堵塞是指大于滤膜孔径的土颗粒被截留于滤膜表面,从而造成滤膜排水通道在入口处封闭。堵塞是编织布主要的淤堵形式,也会出现在无纺布中。

3) 遮蔽是指土中的极细颗粒随水流流至滤膜表面,由于吸附作用滞留于纤维表层,逐渐形成一层渗透性极低的细颗粒滤层。区别于桥式结构中形成的泥饼,遮蔽较常发生于间断级配土中,因为土层缺乏中间粒径颗粒阻挡细颗粒流向滤膜表面。

淤堵作用除了与滤膜的性质有关系外,不同类别的土在同一滤膜下也会表现出不同的淤堵行为。一般而言,无黏性土颗粒与滤膜间的电化学作用较弱,在滤膜中通常只会发生淤塞跟堵塞,属于机械淤堵行为;黏性土的粒间力较无黏性土复杂得多,除了会发生机械淤堵外,也会发生由电化学作用引起的遮蔽。当黏土矿物中的含有一定量游离金属离子时,在渗流过程中还可能在滤膜表面形成氧化层,产生化学淤堵作用。此外,富含有机质的海相淤泥中,有机质或生物藻可能会被水流带至滤膜,形成生物淤堵。

### 3.2 滤膜的防淤堵准则

滤膜发生淤堵行为的主要因素为滤膜的孔径,孔隙率以及内部的孔洞结构特征,防止发生严重淤堵行为的基本原则是在保留土样大颗粒不能流失的同时,可以允许小颗粒顺利通过滤膜。

对于编织布,由于其规则的孔洞结构,土颗

粒一般不会在孔洞内部产生淤堵,那么对其淤堵行为的控制主要是保证其孔隙率不能过低。从梯度比试验结果可知,黏性土土颗粒在滤膜纤维上的吸附与积累是难以避免的,比较适当的办法是使其保证足够孔径的同时,拥有一个较高的孔隙率。根据2种编织布的梯度比试验结果,其防淤堵准则可设定为:

$$\begin{cases} n_g > 30\% \sim 40\% \\ GR < 4 \end{cases} \quad (1)$$

考虑到梯度比试验中的超孔压较真空预压工况时低,土颗粒更容易吸附于滤膜纤维上,式(1)对梯度比的试验结果进行了一定程度上的折减。

对于无纺布,由梯度比试验可见,即使2种滤膜的孔径、孔隙率大致相同,两者孔洞结构间的差异也会显著影响。孔洞结构属于微观方面的差异,且无纺布的孔洞具有随机性,目前还难以利用相关物理性质建立准则。为此,对于无纺布,其防淤堵准则可设立为:

$$\begin{cases} n_g > 75\% \\ GR < 4 \\ O_{15}/D_{15} > 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)3条分别对应滤膜的孔隙率、孔洞结构及孔径而建立,其中考虑到梯度比试验中黏性土可能出现的不稳定情况。

## 4 结论

1) 滤膜样本中编织布相对于无纺布而言厚度较薄、质量较轻,力学性能表现上也明显劣于无纺布滤膜;无纺布样本中,防淤堵无纺布较常规无纺布厚度较薄,质量较轻,但其力学性能表现要优于后者。

2) 编织布样本的孔洞分布均匀、形状规则,其渗透性能总体上优于无纺布样本;无纺布样本的孔洞分布具有一定随机性,常规无纺布滤膜的纤维排列杂乱扭曲,纤维中的孔洞直径变化大,排水通道曲折,渗透性能明显劣于防淤堵无纺布滤膜。

3) 排水板滤膜的淤堵为滤膜表面土颗粒的积累及滤膜内部排水通道淤塞所导致, 其主要由土颗粒与滤膜纤维间电化学反应产生的吸附于土颗粒间凝聚所引起。

4) 针对试验土样及不同类型滤膜特性, 建立了防淤堵准则, 以避免排水板在使用过程中芯板的淤堵, 减缓滤膜中土颗粒的积聚。

#### 参考文献:

- [1] 董志良, 张功新, 陈平山, 等. 吹填造陆超软土地基加固理论与工艺技术创新[J]. 水运工程, 2011(11): 192-200.
- [2] Wang J, Dong Z L, Mo H H. Influence on microscopic pore characteristics of soft soil under permeation [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013(18): 3 547-3 560.
- [3] 毕平均. 高性能塑料排水板在软基处理工程中的应用[J]. 水运工程, 2012(2): 134-137.
- [4] 乐超, 徐超, 吴雪峰, 等. 两种塑料排水板滤膜淤堵特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014(9): 2 529-2 534.
- [5] 蔡晓光, 刘汉龙. 分离式与整体式塑料排水板性能比较试验研究[C]. 昆明: 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集, 2006: 715-717.
- [6] 朱耀庭, 尹长权, 陈举. 对塑料排水板板芯质量的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2008(5): 35-36.

(本文编辑 郭雪珍)

## · 消 息 ·

### 上航局北斗专项项目通过国家发改委验收

2月7日, 上航局承担的《基于北斗兼容系统的工程船舶智能位置服务平台研制与应用示范》项目, 顺利通过由国家发展改革委委托上海市发改委和中国交建专家组组织的专项验收。

专家组听取了上航局项目组的汇报, 审阅了项目工作报告、技术报告等相关材料, 检查了上航局调度指挥中心系统的运行状况, 经讨论认为该项目以北斗系统为依托, 完成了基于北斗系统的信息传输、智能位置服务技术研发, 研制了多卡北斗集成通信机等设备, 建立了工程船舶智能位置服务平台, 实现了工程船舶信息远程传输与实时远程管理。项目整体达到了国家批复的各项技术性能指标, 在多个工程项目建设中得到成功应用, 在国家重大海洋工程项目的生产调度、应急指挥、资源保障等方面发挥了积极作用。专家组一致同意该项目通过验收。

该项目是上航局于2013年初启动研发实施的综合性信息技术开发应用项目, 历时2年, 于2014年底完成并应用至工程船舶。

北斗卫星导航系统是我国自主研发的定位、导航、精确授时系统, 是继美国的GPS、俄罗斯的格洛纳斯之后, 世界第三大成熟的全球卫星导航系统。随着卫星导航与交通运输、智能终端和移动互联网的融合发展, 应用技术水平显著提高, 未来发展和应用前景愈加广阔。此次项目的成功验收, 为上航局今后继续开展“北斗”后续研发、应用奠定了良好基础, 也为中国交建在相关领域的科技创新增添了新的动力。

(摘编自《中国交通建设网》)