

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.005

高含水率疏浚淤泥透气真空防淤堵模型

吉 锋^{1,2}, 邓东升¹, 洪振舜¹, 李 辉³, 别学清³, 丁建文²

(1. 南水北调东线江苏水源有限公司, 南京 210029; 2. 东南大学 交通学院, 南京 210096;
3. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225002)

摘 要: 透气真空技术解决了传统真空处理高含水率疏浚淤泥存在的淤堵问题, 但其防淤堵控制尚缺乏有效分析方法。利用 Ruth 滤水理论建立了高含水率疏浚淤泥径向排水模型, 采用透气真空抽水模型的试验结果验证了模型的有效性。同时, 明确了反映淤泥排水层滤水性能的径向平均比阻 α_{rav} 在抽水过程中的变化规律: 传统真空抽水形成的淤泥排水层有一个被压密的过程, 孔隙结构不稳定, 排水管道易发生淤堵; 而采用透气真空抽水可以使淤泥排水层形成相对稳定的孔隙结构, 有效地防止淤堵现象的发生。

关键词: 透气真空; 防淤堵; 淤泥排水层; 孔隙结构; 径向平均比阻

中图分类号: TU471.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)01-0026-06

Anti-clogging Model of Dredged Clays Dewatering with Ventilating Vacuum Method

Ji Feng^{1,2}, Deng Dongsheng¹, Hong Zhenshun¹, Li Hui³, Bie Xueqing³, Ding Jianwen²

(1. Jiangsu Water Source Company Ltd. of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210029, P. R. China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China;
3. Jiangsu Engineering Investigation Institute Co., Yangzhou 225006, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Ventilating vacuum method can overcome the clogging problem which often occurs on the traditional vacuum method dewatering dredged clays with high initial water contents. However, how to analyze the anti-clogging behavior of ventilating vacuum method is an important issue in practical engineering. A radial drainage model was established based on the filtration theory developed by Ruth. The validity of the model was verified using the test results of ventilating vacuum, and the change law in average radial dewatering resistance of dewatering layer which reflects the filtration performance was investigated during the dewatering process. It is indicated that the dewatered layer is compacted by traditional vacuum method during the dewatering process. Its corresponding pore structure is unstable, thus the drainage pipeline often clogs. While the technique of ventilating vacuum provides a powerful way to overcome the clogging problem, and the pore structure is stable during the dewatering process.

Key words: ventilating vacuum; anti-clogging; dewatered layer; pore structure; average radial dewatering resistance

中国内陆河湖的清淤以及港口、航道的建设工程中, 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, 疏浚淤泥在固结过程中要长时间占用大量的

收稿日期: 2012-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51178107, 41172240)

作者简介: 吉锋(1983-), 男, 博士生, 主要从事废弃疏浚淤泥处理与数值计算研究, (E-mail) jifeng@seu.edu.cn。

土地资源^[1-3]。因而,如何对疏浚淤泥进行快速固结处理成为实际工程的迫切需要解决的问题。

由于疏浚淤泥强度低,传统的堆载预压处理方法的荷载难以施加,目前针对疏浚淤泥这种超软土地基主要采用真空加载的方式进行处理,然而淤堵问题一直以来是真空方法处理高含水率疏浚淤泥的主要技术障碍。如在温州新近吹填淤泥真空预压处理过程中,发生了排水板淤堵,具体表现为在排水板周围形成一个个 10~20 cm 土柱,土柱内强度较高,而土柱外几乎为稀泥状^[4];在天津、连云港及温州等地区的真空预压处理新近吹填淤泥的工程实践中,加固场地均出现了土柱现象,导致排水板周围土体强度很不均匀^[5]。为了解决淤堵问题,国内外学者从不同方面进行了研究,目前多数学者致力于研究具有高效滤水性能的土工织物来克服滤水通道的淤堵问题^[6-9],为此很多学者提出了土工织物反滤设计的准则。据 Palmeira^[9]的统计,仅 1972 年~1999 年不同学者提出的反滤准则就高达近 30 种,由此可见,通过土工织物防淤堵目前并没有明确的统一认识。此外,还有学者从修复淤堵层的角度来探寻解决淤堵问题的途径,如在杭州西湖疏浚底泥的真空排水工程实践中,工程人员试图通过反复抽真空和吸气的方式来冲开滤水管道的淤堵层,但是效果并不理想^[10];Koerner 等^[11]研究了反复用水冲洗的方法来修复淤堵层,但是这种方法仅在初期起到短暂的促进排水效果,长期防堵效果并不显著。

为了解决淤堵问题,课题组经过多年研究提出了一种新的真空处理技术——透气真空技术^[12],该技术的处理效果和防淤堵的有效性已经得到系列模型试验的验证^[13-14],新技术的提出为真空方法更有效的应用于高含水率疏浚泥的加固处理奠定了基础。目前对透气真空防堵的认识更多的是建立在试验的抽水效果的分析之上,然而抽水效果不可避免的要受到试验条件的影响,如排水管道布置密度、试验尺度等因素,因此高含水率疏浚淤泥透气真空排水技术需要对应的理论作为支撑。为了给透气真空防淤堵控制提供理论上的分析方法,进而为实际工程中的防堵设计提供理论依据,本文在 Ruth 滤水理论的基础上推导了高含水率疏浚淤泥径向排水模型,并借助透气真空抽水试验结果验证了模型用于高含水率淤泥透气真空抽水防堵分析的有效性。

1 Ruth 滤水理论

高含水率淤泥在排水过程中,淤泥中的水分在压差作用下向滤水通道处流动,形成的水流将悬浮

于淤泥中的土颗粒拖拽至滤水通道表面,并在表面逐渐形成一层淤泥排水层(如图 1 所示)。在排水过程中淤泥排水层的边界逐渐向远处扩展,淤泥排水层的厚度不断增大,进而逐步实现对高含水率淤泥由近及远的排水。在整个排水过程中,淤泥排水层一方面是泥水分离的产物,更重要的是,它同时也扮演着外围悬浮泥浆排水滤层的角色。因此,其孔隙结构、渗透性能等物理力学性质是关系到整个排水系统是否有效的关键。然而通过试验手段很难获取淤泥排水层的性质在整个试验过程中的变化规律。Ruth^[15]基于达西定律提出了著名的 Ruth 模型(如式(1)所示),为研究淤泥排水层的性质提供了一个很好的途径,通过分析模型参数平均比阻 α_{av} 在抽水过程中的变化,可以了解在整个抽水过程中淤泥排水层滤水性能的变化。Ruth 平均比阻的概念长期以来一直是固液分离理论和试验工作的发展以及相关的工程设计等的理论基础^[16-19],在 Ruth 理论之后 Tosun 等^[20]又提出了多相过滤理论,但相比较而言,Ruth 理论的分析方法更为简单实用,实际应用也最为广泛。

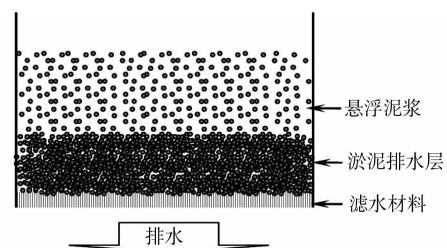


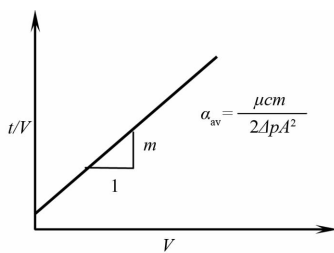
图 1 高含水率疏浚淤泥排水示意图

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu c \alpha_{av}}{2PA^2} V + \frac{\mu R_m}{PA} \quad (1)$$

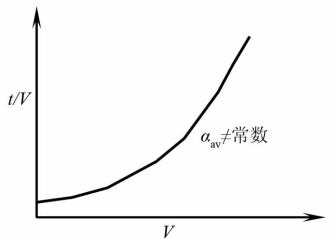
式中: P 为施加的排水压力; V 为排出水的体积; t 为排水时间; A 为排水面的面积; μ 为淤泥中水的粘滞系数; c 为初始淤泥中单位体积的水含有的干土质量; R_m 为滤材渗流阻力; $\alpha_{av} = \frac{1}{k\rho_s C}$ 为淤泥排水层平均比阻, ρ_s 为土颗粒的相对体积质量, k 为淤泥排水层渗透系数, C 为淤泥排水层干土体积和总体积之比。

Ruth 研究发现,泥浆在排水过程中的排水速率是研究排水系统排水性能的重要依据,它主要受到形成的淤泥排水层的平均比阻 α_{av} 的影响。同时,由于 α_{av} 大小主要决定于淤泥排水层孔隙的大小,因此, α_{av} 的变化也从侧面反映了淤泥排水层孔隙结构的变化。 α_{av} 值的大小可以通过时间与排水量的比值 t/V 和排水量 V 的曲线关系的斜率来确定,如图 2

所示,当通过试验得到的 t/V 和 V 的关系具有线性关系时,则表明排水过程中的 α_{av} 没有发生变化,淤泥排水层孔隙结构较为稳定;若 t/V 和 V 的曲线关系的斜率不断增大,则说明排水过程中的淤泥排水层孔隙结构逐渐被压密,淤泥排水层的滤水性能降低。由于淤泥排水层的平均比阻不受试验尺度的影响,通过试验获得的 α_{av} 可以直接为实际工程的提供设计依据。虽然 Ruth 的平均比阻是一个平均概念,没有阐明淤泥排水层内部结构在不同位置处的变化,但是它提供了一个从理论上研究淤泥排水层滤水性能的有效途径。



(a) α_{av} = 常数、淤泥排水层形成稳定孔隙结构的特征



(b) α_{av} ≠ 常数、淤泥排水层不能形成稳定孔隙结构的特征曲线

图 2 平均比阻 α_{av} 的确定方法和物理意义^[15]

2 径向排水模型

需要指出的是,Ruth 理论及后来对其发展的理论研究主要基于平面排水条件^[16,21],即排水系统是一个平面,因此其理论更多的是一维排水理论,而透气真空的排水系统则是滤水管道(如排水板,滤管等)排水,属于径向排水,因此,研究透气真空淤泥排水层滤水性能,需要将 Ruth 理论发展成径向排水理论。

图 3 为高含水率疏浚淤泥透气真空排水示意图,依据达西定律有:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PA}{\mu} \left(\frac{1}{\frac{L}{k} + R_m} \right) \quad (2)$$

式中:排水面的面积 $A = 2\pi rB$, B 为管道长度, r 为滤水管道的半径; k 为淤泥排水层的渗透系数; L 为排水淤泥的厚度。

设排出水体积 V 和淤泥排水层体积 V' 具有如下关系:

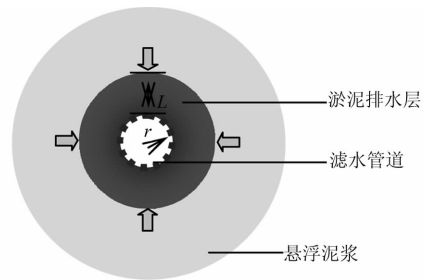


图 3 高含水率疏浚淤泥透气真空排水示意图

$$V' = \beta V \quad (3)$$

$$V' = 2\pi(r + L/2)LB \quad (4)$$

这里的 $r + L/2$ 为排水淤泥的中间半径,因此,式(4)可以写成:

$$V' = 2\pi(r + L/2)LB = A'L \quad (5)$$

式中 A' 为淤泥排水层的中间面积。

将式(3)、(5)代入式(2)得到:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PA}{\mu} \left(\frac{1}{\frac{L}{A'} \frac{1}{k} + R_m} \right) \quad (6)$$

式(6)的积分形式:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu\beta}{PAk} \int_0^V \frac{V}{A'} dV + \frac{\mu R_m}{PA} \int_0^V dV \quad (7)$$

由式(3)和(5)可得:

$$A' = \frac{A + \sqrt{A^2 + 4nV}}{2} \quad (8)$$

式(8)中 $n = \beta\pi B$ 。

将式(8)代入式(7)得:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu\beta}{PAk} \int_0^V \frac{2V}{A + \sqrt{A^2 + 4nV}} dV + \frac{\mu R_m}{PA} \int_0^V dV \quad (9)$$

式(9)计算结果:

$$t = \frac{\mu\beta}{PAk} \frac{1}{4n^2} \left(\frac{(A^2 + 4nV)^{1.5}}{3} - \frac{(A^2 + 4nV)A}{2} - \frac{A^3}{6} \right) + \frac{\mu R_m V}{PA} \quad (10)$$

令 $\sqrt{nv} = bA$, 则,式(10)右边括号项可表示为:

$$D = A^3 \left[\frac{(1 + 4b^2)^{1.5}}{3} - \frac{(1 + 4b^2)}{2} - \frac{1}{6} \right] \quad (11)$$

根据式(11)的关系,图 4 显示了 D/A^3 和 b 的关系,由图可知,式(12)可以简化成:

$$D = 1.6A^3 b^{3.2} \quad (12)$$

将式(12)代入(11)得:

$$t = \frac{2}{5} \frac{\mu r^{0.4}}{PAk} \left(\frac{\beta V}{A} \right)^{0.6} V + \frac{\mu R_m V}{PA} \quad (13)$$

淤泥排水层的干土质量具有下面的等式关系:

$$\beta V \rho_s C = cV \quad (14)$$

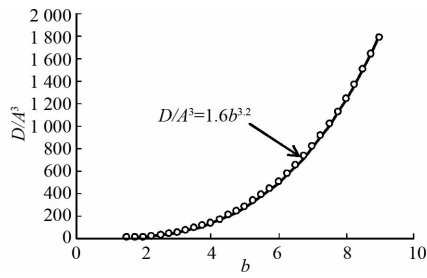


图 4 D/A^3 和 b 的简化关系

将式(14)代入式(13),则有

$$t = \frac{2}{5} \frac{\mu r^{0.4}}{PA} \left(\frac{cV}{A}\right)^{0.6} \frac{1}{k(\rho_s C)^{0.6}} V + \frac{\mu R_m}{PA} V \quad (15)$$

令 $\alpha_{rav} = \frac{1}{[k(\rho_s C)^{0.6}]}$, 并带入式(15), 可得:

$$\frac{t}{V} = \frac{2}{5} \frac{\mu r^{0.4} c^{0.6} \alpha_{rav} V^{0.6}}{PA^{1.6}} + \frac{\mu R_m}{PA} \quad (16)$$

式(16)即为高含水率淤泥径向排水模型。对比分析 Ruth 一维平面排水理论中的淤泥排水层平均比阻 $\alpha_{av} = \frac{1}{(k\rho_s C)}$ 可以看到, α_{rav} 和 α_{av} 的影响因子相同, 并且主体表达形式也一致, 因此 α_{rav} 和 α_{av} 反映的物理意义是相同的, 均是表征淤泥排水层滤水性能的参数。可以称之为淤泥排水层径向平均比阻。通过试验获得 t/V 和 $V^{0.6}$ 曲线关系, 就可以分析 α_{rav} 的变化规律及其影响因素, 进而了解在径向排水条件下淤泥排水层的滤水性能的变化。

3 透气真空淤泥排水层滤水性能分析

为了分析透气真空下淤泥排水层的滤水性能, 本文选取了课题组的 2 组真空抽水模型试验数据。模型试验示意图如图 5 所示, 基本情况如表 1 所示, 模型试验一组为传统真空抽水试验, 另一组为透气真空抽水试验。在传统真空抽水试验中, 排水系统处于完全密闭条件下, 试验中的真空抽水压力为 95 kPa; 透气真空抽水试验中, 排水系统内的透气真空压力可以通过透气阀门控制在 0~100 kPa 范围内的任意一个压力值, 本文选择了透气真空压力为 40 kPa 这组具有代表性的试验结果进行分析。2 组模型试验的排水系统以及试验用泥情况均完全一致。

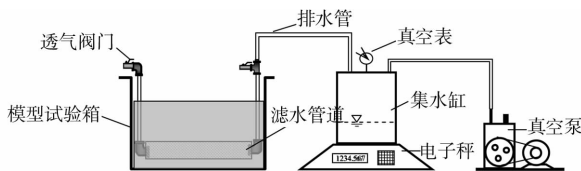


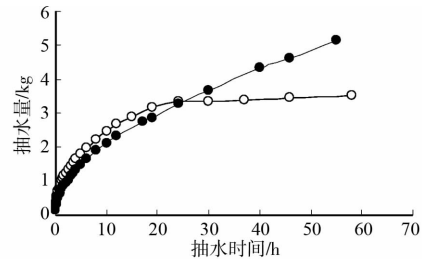
图 5 透气真空抽水模型试验示意图

表 1 模型试验基本情况

排水条件基本情况		试验用泥基本情况	
透气真空压力	40 kPa	淤泥初始含水率	300%
传统真空压力	95 kPa	初始体积	30.2 L
滤水管道长度	41 cm	淤泥液限	75%
滤水管道半径	8 cm	比重	2.65

注:表中仅给出本文分析所需的模型试验基本情况, 详细内容见文献[22]

图 6 给出了 2 组模型试验抽水质量随时间变化。图中可以看到, 相比透气真空抽水, 采用传统真空抽水方法在初期的抽水速率较快, 但是抽水速率持续性较差, 在 1 d 后基本不再有明显出水, 发生了淤堵现象; 而透气真空抽水速率较为均匀, 抽水持续性较好, 在 1 d 之后的抽水量就超过了传统真空的抽水量, 仅抽水 2 d, 抽水量达到传统真空抽水量的 1.5 倍。说明了在透气真空抽水条件下, 排水系统的出水效率得到了显著提高, 淤堵问题得到了有效的克服。



注: ○—传统真空压力95 kPa ●—透气真空压力40 kPa

图 6 模型试验抽水量随时间的关系

图 7、8 分别给出 2 组模型试验的抽水时间和抽水量之比 t/V 与抽水量 $V^{0.6}$ 的关系。从图 7 可以看到, 采用 95 kPa 的传统真空压力抽水时, t/V 与 $V^{0.6}$ 关系曲线的斜率一直处于一个不断增大的过程, 这意味着抽水过程中形成的淤泥排水层的平均比阻 α_{rav} 在不断增大(见图 9), 表明了采用传统真空压力抽水时, 淤泥排水层的孔隙结构很不稳定, 在抽水过程中不断地被压密, 淤泥排水层的滤水性能显著降低, 导致淤泥排水层外围悬浮泥浆的水分难以透过淤泥排水层。这就解释了传统真空在处理高含水率淤泥发生淤堵的原因。

然而从图 8 可以看到, 透气真空压力为 40 kPa 的条件下, t/V 与 $V^{0.6}$ 具有良好的线性关系, 在抽水过程中淤泥排水层的径向平均比阻没有发生显著变化(见图 9), 其形成的孔隙结构较为稳定, 没有出现被显著压密的现象。这说明了在透气真空压力为 40 kPa 的条件下, 排水系统没有发生淤堵。因此合理的真空控制方法应该是能够使淤泥排水层形成较

为稳定的孔隙结构为依据。

通过上述的分析可以看到,基于高含水率淤泥径向排水模型可以用于透气真空排水过程中的防淤堵分析,同时由于模型分析的关键参数 a_{rav} 不受试验尺度的影响,在实际应用中,针对工程中要处理的淤泥,通过一些较小的模型试验就分析得出防淤堵的主要控制因素,如真空压力的控制、透气速率的控制等,进而做出相应的防堵设计。

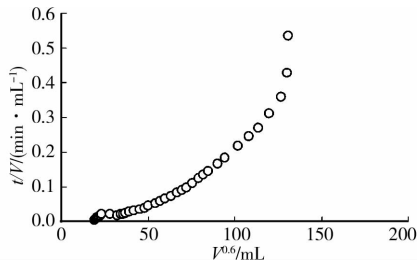


图 7 传统真空压力 95 kPa 时的 t/V 和 $V^{0.6}$ 之间的关系

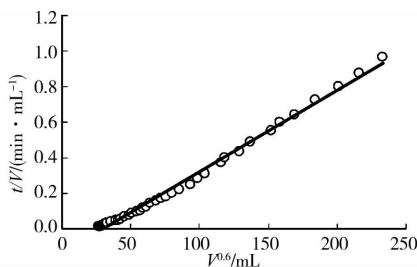


图 8 透气真空压力为 40 kPa 下的 t/V 和 $V^{0.6}$ 之间的关系

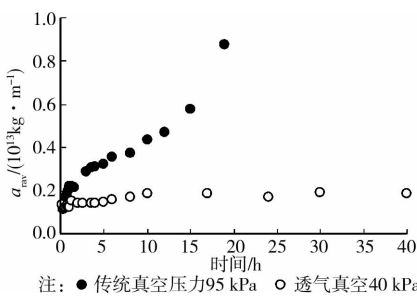


图 9 淤泥排水层径向平均比阻 a_{rav} 随时间的变化

4 结论

1) 在 Ruth 滤水理论的基础上推导了高含水率疏浚淤泥径向排水模型,为透气真空的防堵控制提供了一个有效的分析方法。

2) 借助高含水率疏浚淤泥径向排水模型,通过抽水时间和抽水量之比 t/V 与抽水量 $V^{0.6}$ 的关系曲线可以分析反映淤泥排水层滤水性能的径向平均比阻 a_{rav} 在抽水过程中的变化规律。

3) 通过传统真空和透气真空抽水模型试验结果验证了提出的径向排水模型用于高含水率淤泥透气

真空抽水防堵分析的有效性。在传统真空抽水过程中淤泥排水层的 a_{rav} 不断增大,淤泥排水层的孔隙结构被显著压密;而透气真空抽水可以使淤泥排水层的 a_{rav} 不发生明显变化,形成较为稳定的淤泥排水层孔隙结构。

参考文献:

- [1] Huanh Y H, Zhu W, Qian X D, et al. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials [J]. *Engineering Geology*, 2011, 119(3/4): 112-119.
- [2] Xu G Z, Gao Y F, Hong Z S, et al. Sedimentation behavior of four dredged slurries in China [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2012, 30(2): 143-156.
- [3] 张和庆, 谢健, 朱伟. 疏浚物倾倒现状与转化为再生资源的研究—中国海洋倾废面临的困难和对策[J]. *海洋通报*, 2004, 23(12): 54-60.
Zhang H Q, Xie J, Zhu W. Present situation of dredged materials dumping and the study of transforming dredged mud into regenerative resources: Difficulties of refuses dumping in China seas and countermeasures to deal with these problems [J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(6): 54-60.
- [4] 程万钊. 吹填淤泥真空预压快速处理技术研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [5] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. *水运工程*, 2012, 462(1): 158-163.
Chen P S, Dong Z L, Zhang G X. Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2012, 462(1): 158-163.
- [6] Huang C C, Luo S Y. Dewatering of reservoir sediment slurry using woven geotextiles. Part I: Experimental results [J]. *Geosynthetics International*, 2007, 14(5): 253-263.
- [7] Benson C H, Kucukkirca I E, Scalia J. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(6): 536-546.
- [8] Quaranta J D, Tolikonda R. Design of non-woven geotextiles for coal refuse filtration [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(6): 557-566.
- [9] Palmeira E M, Gardoni M G. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, 20(2): 97-115.

- [10] 俞亚南,张仪萍. 杭州西湖疏浚底泥工程性质试验研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 579-582.
Yu Y N, Zhang Y P. Test study on engineering properties of dredging soil of West lake in Hangzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 579-582.
- [11] Koerner G R, Koerner R M. Leachate flow rate behavior through geotextile and soil filters and possible remediation methods [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11(4/5/6): 401-430.
- [12] 邓东升,洪振舜,朱伟,等. 高含水率疏浚淤泥堆场透气真空快速泥水分离方法. 中国, ZL200710132092. 9[P]. 2007-10-13.
- [13] 邓东升,洪振舜,刘传俊,等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 31(2): 250-253.
Deng D S, Hong Z S, Liu C J, et al. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 31(2): 250-253.
- [14] 周源,刘传俊,吉锋,等. 透气真空快速泥水分离技术室内模型试验研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(2): 215-220.
Zhou Y, Liu C J, Ji F, et al. Lab simulation of rapid vacuum consolidated draining of aerated sludge [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30(2): 215-220.
- [15] Ruth B F. Studies in filtration, III derivation of general filtration equations [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1935(27): 708-723.
- [16] Rushton A, Ward A S, Holdich R G. Solid-Liquid filtration and separation technology [M]. [S. l.]: VCH Publishers Inc., 1996.
- [17] Ying Q, Khagendra B, Andrew F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties-a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171: 373-384.
- [18] Arunangshu M. Pulse-jet filtration: an effective way to control industrial pollution Part II: process characterization and evaluation of filter media [J]. Textile Progress, 2010, 42(1): 1-97.
- [19] Bao N, Chulho L, Jeehee L, et al Hydraulic characteristics of bentonite cake fabricated on cutoff walls [J]. Clay Mineral Society, 2012, 60(1): 40-51.
- [20] Tosun I, Willis M S. Making the case for the multiphase filtration theory [J]. Filtration and Separation, 1989, 26(4): 295-299.
- [21] Lee D J, Wang C H Theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering [J]. Water Research, 2000, 34(1): 1-20.
- [22] 刘传俊. 白马湖疏浚淤泥透气真空快速泥水分离试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.

(编辑 罗 敏)