

DOI: 10.11779/CJGE202111018

一种基于持水曲线的市政污泥水分分布测试方法研究

占鑫杰^{1, 2}, 詹良通^{*3, 4}, 林伟岸^{3, 4}, 陈云敏^{3, 4}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 市政污泥的脱水特性与其水分分布特性密切相关, 对市政污泥的水分分布特性开展研究具有重要的理论意义。目前测试污泥水分分布曲线采用热重-差热分析方法, 该方法中试样量仅有 50 mg, 测试结果复现性较差。拟提出一种基于持水曲线的市政污泥水分分布测试方法, 并构建了新测试方法的理论框架。随后采用渗析法联合相对湿度法测试了市政污泥的水分分布曲线, 并与传统的热重差热试验结果进行对比分析。研究表明, 基于持水曲线的污泥水分分布测试方法具有如下特点: 试验量多; 测试过程中试样结构状态变化小; 测试的结合能范围更广泛。

关键词: 市政污泥; 水分分布特性; 水分结合能; 土水势; 持水曲线; 热重差热分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)11-2112-07

作者简介: 占鑫杰(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事地基处理、基础工程和环境岩土工程研究工作。E-mail: xjzhan@nhri.cn。

Moisture distribution in sewage sludge based on soil-water characteristic curve

ZHAN Xin-jie^{1, 2}, ZHAN Liang-tong^{3, 4}, LIN Wei-an^{3, 4}, CHEN Yun-min^{3, 4}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic

Engineering, Nanjing 210029, China; 3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geo-environmental Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou 310058, China; 4 Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The dewatering characteristic of sewage sludge is closely related to its moisture distribution. The researches on the moisture distribution characteristics in the sewage sludge are of important theoretical significance. Currently the measurement of moisture distribution curve of the sewage sludge mainly adopts the thermal gravimetry-differential thermal method, in which the amount of samples is only 50 mg, and the reproducibility of the tests is poor. A new method for measuring the moisture distribution in the sewage sludge based on the soil-water characteristic curve is proposed. Firstly based on the relationship between water potential and bond strength of moisture in the sewage sludge, the formula for bond strength of moisture and matric suction of the sewage sludge is derived. Accordingly the moisture distribution curve of the sewage sludge can be obtained by measuring its soil-water characteristic curve. The osmotic method and the relative humidity method are employed to obtain the moisture distribution curve of the sewage sludge. The results are compared with those based on the combined thermal gravimetry-differential thermal method. The proposed method for the moisture distribution in sewage sludge based on the soil-water characteristic curve has following features: the amount of samples is enough and representative, the change of structure of samples is small during measurement process, and the range of bond strength of measured moisture is wider.

Key words: sewage sludge; moisture distribution characteristic; water-solid bond strength; water potential; soil-water characteristic curve; combined thermal gravimetry-differential thermal method

0 引言

随着经济社会的快速发展, 中国每年的市政污泥产量高达几千万吨。市政污泥脱水技术的研发是工程界关注的焦点问题之一。而市政污泥的脱水特性与其水分赋存形式及分布特性密切相关^[1-2], 因此对污泥的水分分布特性开展深入研究具有重要的理论意义。

1 概述

1.1 污泥水分赋存形式

近年来, 众多学者^[1-4]所定义的污泥水分赋存形

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (Gk321002); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费重点项目 (Y320012)

收稿日期: 2021-03-08

***通信作者** (E-mail: zhanlt@zju.edu.cn)

式成为主流, 即按照污泥中固相与水分的束缚方式划分为自由水、间隙水、表面结合水和内部结合水 (图 1)。其中自由水不受固体颗粒约束, 间隙水存在于污泥颗粒间隙中, 表面结合水吸附在污泥颗粒表面, 内部 (化学) 结合水通过化学键结合于有机质内。上述 4 种水分与污泥颗粒的结合能力依次为内部结合水>表面结合水>间隙水>自由水。

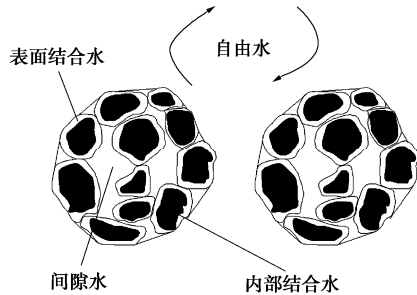


图 1 污泥中不同形式水分

Fig. 1 Forms of moisture in sewage sludge

通过实验准确区分以上 4 种形式水分的含量比较困难, 因此部分研究者仅将污泥中水分划分为“结合水”与“自由水”, 其中“结合水”由于与固体颗粒相互作用而表现出与“自由水”不同的焓值、蒸汽压、熵值、黏滞度和密度。基于以上特性, 研究者提出了不同的污泥结合水测试方法, 主要包括热干燥法、膨胀计法、离心沉降法、热重差热分析法、抽滤法、压滤法和水活度法等^[5-11]。Vaxelaire 等^[11]对上述各种测量方法的试验原理进行了详细描述, 并总结出各方法优缺点: 离心沉降法、膨胀计法、压滤法、抽滤法仅能得到污泥中自由水和结合水的含量, 同时测试过程中会损坏试样的结构; 低温干燥法、水活度法存在测试结果复现性差的问题。谢浩辉^[12]以中国典型市政污泥为研究对象, 分别采用热干燥法、膨胀计法、压滤法、抽滤法、水活度法和热重差热方法测试污泥的结合水含量, 不同方法的测试结果有较大差异, 主要原因是不同方法确定“结合水”的能量范围不同^[12-13]。

1.2 污泥水分分布及其测试方法

随着研究工作的深入, 部分学者通过构建污泥水分分布曲线 (moisture distribution curve) 来描述污泥在不同能量范围内的水分分布特征。污泥水分分布曲线表述的是污泥水分结合能与含水率的连续函数关系。构建污泥水分分布曲线的常用方法是热重差热分析法^[4, 8], 是热物理学科的常用研究手段。然而热重差热分析方法存在以下问题: ①热分析仪中试样量较少 (<50 mg), 平行试验结果有较大误差, 试验结果不具有代表性^[8]; ②污泥试样在水分蒸发过程中发生较大的收缩变形, 其结构状态发生较大改变, 进而导致污泥固相和水分的结合能发生较大变化。

因此需要提出一种新的污泥水分分布测试方法, 该方法具备以下条件: ①试样量足够, 具有一定代表性; ②测试过程中试样结构不能发生较大变化进而影响其水分赋存形式; ③污泥水分分布测试结果能够一定程度解释污泥的脱水特性^[13]。

本文拟采用土水势 (吸力) 来构建污泥的水分分布曲线, 据此提出一种基于持水曲线的水分分布测试方法的理论框架, 并从原理和测试结果两方面对这一方法进行了验证。

2 基于持水曲线的污泥水分分布测试方法的提出

(1) 污泥水分结合能

在热重差热分析中, 纯水蒸发的热焓值为 H_w , 污泥水分蒸发的热焓值为 H_s 。由于污泥颗粒与水分的结合作用, 污泥水分蒸发热焓值 H_s 高于纯水蒸发热焓值 H_w 。因此污泥与水分的结合能 ΔH , 可表述为污泥和纯水蒸发热焓的差值:

$$\Delta H = H_s - H_w, \quad (1)$$

式中, H_s , H_w , ΔH 的单位为 kJ/kg。根据式 (1) 可知, 污泥与水分的结合能 ΔH 越高, 需要的蒸发热焓值 H_s 越高。

(2) 污泥土水势

污泥土水势 ΔE , 是污泥中水分自由能 E_s 相对于纯水自由能 E_w 的降低值^[14-15]:

$$\Delta E = E_s - E_w. \quad (2)$$

(3) 污泥水分结合能、土水势、吸力的关系

污泥水分自由能降低是由于污泥水分与颗粒相结合的结果。因此从物理意义上, 污泥土水势 ΔE 与其水分结合能 ΔE 的关系为

$$\Delta E = -\Delta H. \quad (3)$$

根据热力学理论, 平衡状态下污泥土水势与吸力的关系为^[15-16]

$$\Delta E = -u / \rho_w, \quad (4)$$

式中, ΔE 为污泥土水势 (kJ/kg), u 为吸力 (MPa), ρ_w 为纯水密度 (kg/m³)。

综合式 (3), (4), 得到污泥水分结合能与其吸力的关系为

$$\Delta H = u / \rho_w, \quad (5)$$

式中, ΔH 为污泥的水分结合能 (kJ/kg)。

对式 (5) 进行量纲分析, 验证了以上关系式的合理性。根据式 (5) 可知, 污泥的水分结合能可通过其吸力间接得到, 因此可通过测试污泥的持水曲线 (SWCC) 来研究其水分分布特性。如图 2 所示, 为污泥的持水曲线、水分分布曲线及其对应关系; 当污

泥在 1 MPa 吸力作用下平衡后,对应的水分结合能为 1 kJ/kg。

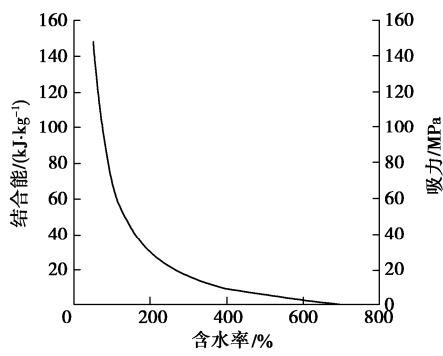


图2 污泥水分结合能、吸力与含水率的关系

Fig. 2 Relationship among water-solid bound strength, matrix pressure and residual moisture content

3 基于持水曲线的污泥水分分布测试方法的验证

为验证基于持水曲线的污泥水分分布测试方法,分别采用渗析法(相对湿度法)和传统的热重差热方法构建了污泥的水分分布曲线,并将两者的试验结果进行了比较。

3.1 试验材料

污泥试样取自成都长安填埋场污泥库。该污泥经带式压滤脱水后,运至成都填埋库进行填埋,填埋后污泥库直接暴露于降雨和大气中。取样污泥的填埋龄期为 2 a 左右,取样后放在塑料桶中进行密封。

采用土工试验方法标准(GB/T 50123)^[17]测试了污泥试样的基本性质。试样含水率测试采用烘干法,测试温度控制在 65℃。试样有机质含量测试采用灼烧法。试样相对质量密度测试采用相对质量密度瓶法,测试液体采用煤油,并采用抽真空排气。试样密度测试采用环刀法。试样的 pH 值测试依据 CJ/T221—2005^[18]。试样的颗粒粒径采用 Beckman Coulter 激光散射仪测定。试样的 zeta 电位测试采用马尔文激光粒度分析仪。测试得到污泥试样基本性质指标如表 1 所示。

表1 污泥试样的基本性质

Table 1 Basic properties of sewage sludge

含水率 /%	有机质 含量 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	相对质 量密度	pH	粒径 /μm	Zeta 电位 /mV
860	40	1.05	1.8	8.2	0.6~ 677	-22.5

3.2 持水曲线测试方法

为验证第 2 节基于持水曲线的市政污泥水分分布测试方法,拟开展市政污泥的持水曲线(SWCC)测

试工作。本次试验中,污泥持水曲线测试拟联合采用渗析法和相对湿度法,其中渗析法测试吸力范围为 0.033~4.2 MPa;相对湿度法测试吸力范围为 3.3~150 MPa,结合两种方法可测试一条完整的持水曲线。

(1) 渗析法

渗析法的原理是采用半透膜将测试试样与大分子量溶液隔开,半透膜只允许水分子和小的盐离子通过,大分子量的溶质分子无法通过。水分子由于浓度差在试样和高分子溶液间运移,直到试样中吸力与高分子溶液渗透吸力达到平衡,因此半透膜两侧的溶液浓度差决定了吸力的大小^[19]。本次试验中高分子溶液采用聚乙二醇(PEG20000)溶液,PEG20000 溶液浓度与施加吸力的关系为^[19]

$$s=11c^2 \quad (6)$$

式中, s 为施加吸力(MPa), c 为 PEG 20000 溶液的浓度(PEG 溶质质量与水质量的比值)。

渗析法试验装置如图 3 所示。该装置由磁力搅拌器、密闭试样室、RC 半透膜和装有 PEG 溶液的烧杯组成。试验中采用 6 种不同比例的 PEG20000 和去离子水配置溶液,控制吸力值如表 2 所示。从表 2 中可知,吸力控制范围为 0.033~4.2 MPa。

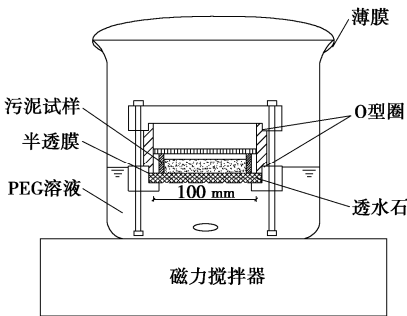


图3 渗析法试样装置

Fig. 3 Test apparatus of osmotic method on sewage sludge

表2 PEG20000 溶液的浓度及其对应的吸力

Table 2 Concentrations of PEG 20000 solution and corresponding osmotic suction pressures

吸力/MPa	4.2	1	0.625	0.3162	0.1	0.033
浓度 c	0.618	0.301	0.238	0.169	0.095	0.055

试验前将 RC 半透膜(截留分子量 MWCO 为 12000~14000)放入去离子水中浸泡 1 h,以消除半透膜保护层对试验的影响。将半透膜直接放置于透水石上,均匀装入 40 g 污泥试样。将试样室放入烧杯中,溶液通过试样室底部透水石、半透膜与污泥试样接触进而实现水分交换。试验过程中维持室温在 20℃左右,将烧杯放入到磁力搅拌器中搅拌以保证溶液均匀。试验过程中,每间隔 4~5 d 将试样室从 PEG 溶液中取出,拆开试样室,更换半透膜,并称量污泥重量,

以获得不同平衡时间污泥试样的含水率。试验过程中, 随着污泥样收缩变硬, 在污泥样表面施加一个薄板, 以保持半透膜和试样紧密接触。

(2) 相对湿度法

相对湿度法的原理是通过改变土体湿度来控制非饱和土的总吸力。首先在一个热力学封闭环境中放置溶液和土样, 一段时间后封闭环境中溶液会产生一定湿度, 土样与溶液通过水蒸气传输逐渐达到平衡。该方法可使用盐溶液、酸溶液等来进行湿度控制^[19]。相对湿度与吸力关系由开尔文公式表述为

$$s = u_a - u_w = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{P}{P_0} \quad , \quad (7)$$

式中, s 为吸力, R 为气体常数 ($8.3143 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T 为温度, M 为水分子量, g 为重力加速度, P/P_0 为相对湿度, 其值为空气中水汽压与饱和水汽压比值。

相对湿度法的试验装置如图 4 所示, 该装置由玻璃干燥器、磁力搅拌器等组成。试验采用 7 种过饱和盐溶液, 不同盐溶液控制吸力值如表 3 所示^[19-20]。由表 3 可知, 相对湿度法控制湿度值为 97.6%~33.1%, 对应的吸力值为 3.3~149.5 MPa (温度为 20℃)。

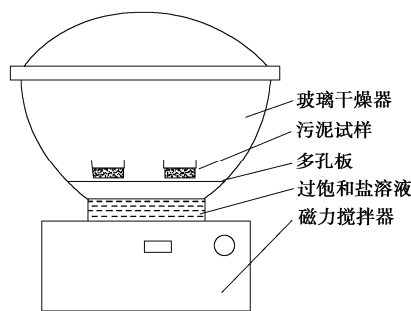


图 4 相对湿度法试验装置

Fig. 4 Test apparatus of relative humidity method on sewage sludge

表 3 相对湿度法中饱和盐溶液及控制吸力值

Table 3 Salt solutions and corresponding suction pressures in relative humidity method

饱和盐溶液	相对湿度/%	对应吸力/MPa
MgCl ₂ ·6H ₂ O	33.1	149.51
K ₂ CO ₃	43.2	113.50
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	55.0	82.00
NaCl	75.5	38.00
(NH ₄) ₂ SO ₄	81.0	24.90
NaSO ₃ ·7H ₂ O	90.9	12.90
K ₂ SO ₄	97.6	3.29

试验中控制室温为 20℃左右, 将过饱和盐溶液和磁子放置于玻璃干燥器底部, 取 10 g 污泥试样置于多孔板上进行吸力平衡, 然后将玻璃干燥器放置于磁力搅拌器上以加速蒸汽平衡。试样平衡 7 d 后, 每隔 4~7 d 称量污泥试样质量, 当连续两次称土样重量差值小于 0.05 g 时, 认为土样中吸力与过饱和盐溶液蒸汽达

到平衡。每个玻璃干燥器中放入两个污泥试样进行平行试验。

3.3 热重差热分析方法

在热重差热分析方法中, 仪器同步测试纯水和污泥试样在蒸发过程中的质量变化和样品-参照温度差, 根据记录数据处理得到的污泥试样水分热焓与纯水热焓之差即为污泥试样的水分结合能^[8,10,12]。采用热重差热分析方法可以构建污泥试样的水分分布曲线。

热重差热分析试验采用德国耐驰综合热分析仪。取污泥试样约 10~13 mg 置于试样室坩埚内, 试验温度从室内温度 (25℃) 开始, 并以 10℃/min 的升温速率上升至 60℃, 随后维持不变。试样室内充满氮气, 流速为 40 mL/min。试验过程中, 热分析仪记录试样在蒸发过程中质量变化、样品-参照样温度差等参数, 当 TGA 曲线 (质量变化曲线) 维持不变量时即可停机。为验证试验结果的重复性, 污泥试样进行 2 组平行试验。在相同工况下以纯水替代湿污泥样进行试验, 以确定对流换热系数, 其它试验控制方法与污泥试样相同。

4 试验结果及分析

4.1 持水曲线方法

(1) 渗析法试验结果

如图 5 所示, 为渗析法不同吸力作用下 (0.033~4.2 MPa) 污泥试样含水率随时间的变化曲线。从图中可以发现: 吸力越大, 试样含水率降低越快; 所有试样在 19 d 后基本达到平衡。通过图 5 可知, 污泥在最小测试渗透吸力 (0.033 MPa) 作用下, 其含水率降低为 640%。

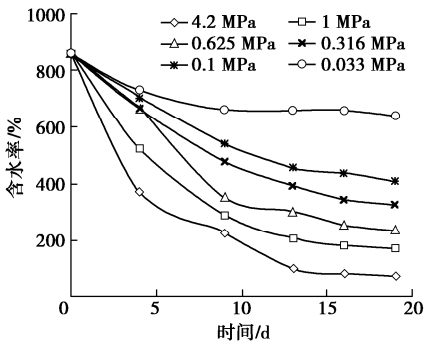


图 5 渗析法不同吸力作用下污泥试样含水率变化曲线

Fig. 5 Residual moisture content versus time under different suction pressures in osmotic method

(2) 相对湿度法试验结果

如图 6 所示, 为相对湿度法不同吸力 (4.2~149.5 MPa) 作用下污泥试样含水率随时间的变化曲线。由于相对湿度法施加吸力较大, 为加快平衡速度, 污泥试样均经过预处理使其含水率降至 600%。根据试验

结果可知：吸力越大，平衡的时间越短；吸力为 149.5 MPa 时，试样 10 d 达到平衡；当吸力为 3.3 MPa 时，试样 90 d 才能达到平衡。与渗析法相比，相对湿度法平衡较慢，其主要原因是相对湿度法试验平衡过程是气体交换，而渗析法平衡过程是水分交换；气体交换速度比水分交换速度慢^[21]。

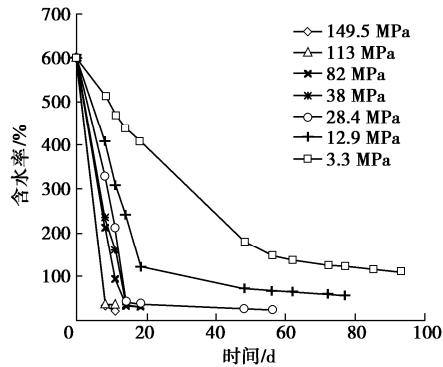


图 6 相对湿度法不同吸力作用下污泥试样含水率变化曲线

Fig. 6 Residual moisture content versus time under different suction pressures in relative humidity method

4.2 热重差热分析法

如图 7 所示，为纯水试样的热重差热分析试验结果：其中 T_{cell} 曲线记录样品的温度变化 ($^{\circ}\text{C}$)；TGA 曲线为纯水试样的重量变化 (%)；DTG 曲线为 TGA 曲线的一阶微分 (mg/min)；DTA 曲线为温度差的热偶输出电压信号 (μV)，负值表示吸热，即样品温度低于参照样温度。

从图 7 可知，纯水的热重差热试验结果可分为 3 个阶段：①温度上升阶段（见图 7 中 I 阶段）；②恒速蒸发阶段（见图 7 中 II 阶段），这一阶段样品温度维持常量，纯水蒸发速度（DTG 值）维持常量，同时试样室与参照环境的温差（DTA 值）也维持为常量，表明这一阶段流入试样室的能量全部用于水分蒸发；③陡降阶段（见图 7 中 III 阶段），随着水分蒸发结束，试样迅速进入这一阶段。

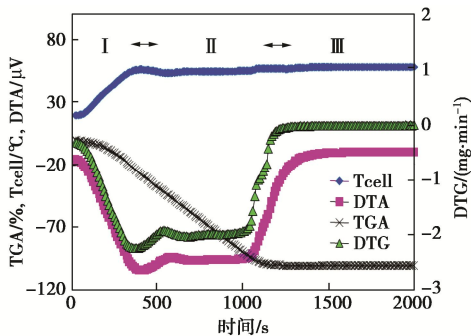


图 7 纯水的热重差热试验结果

Fig. 7 Results of combined TGA/DTA tests for pure water

如图 8 所示，为污泥试样的热重差热分析试验结

果。从图中可知，在污泥蒸发的 II 阶段，DTG 维持为常量的时间非常短，随后 DTG 值开始下降，表明在蒸发阶段污泥水分结合能要高于纯水。图 7，8 中，污泥和纯水的热重差热结果变化趋势与 Chen 等报道的结果变化趋势基本一致^[8]，说明测试结果基本可靠。

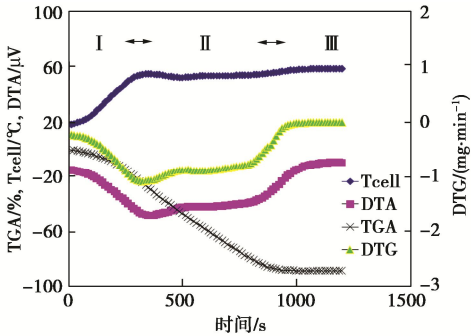


图 8 污泥试样的热重差热试验结果

Fig. 8 Results of combined TGA/DTA tests for sewage sludge

试样（污泥、纯水）在蒸发过程中，流入样品室的热流量为

$$Q_m = A_e h (T_{ref} - T_{cell}) = A_e h a DTA \quad (8)$$

式中， Q_m 为流入样品室的热流量， A_e 为有效传热面积， h 为表面平均对流换热系数， T_{ref} 为参照温度， T_{cell} 为样品温度，DTA 为差热， T_{ref} ， T_{cell} 之差可表示为 a 和 DTA 的乘积。 $A_e h a$ 单独求解比较困难，但其值可以通过纯水试验结果得到。

在纯水恒速蒸发区，流入样品室的热流量与水分蒸发热完全相等，即得

$$Q_m = Q_v = DTG \cdot H_{T_{cell}} \quad (9)$$

式中， Q_v 为水分蒸发热，DTG 为热重微商， $H_{T_{cell}}$ 为纯水蒸发比焓（温度为 T_{cell} ）。

式（8）建立了流入样品室热流量与差热的关系；式（9）建立了热流量与物质损失的关系。结合式（8），（9）可得

$$A_e h_m a = \frac{DTG(\text{水分恒速蒸发区})}{DTA(\text{水分恒速蒸发区})} H_{T_{cell}} \quad (10)$$

根据图 7 II 阶段纯水恒速蒸发的试验结果，得到其 DTG-DTA 的关系（图 9）。由图 9 可知：纯水恒速蒸发时，DTG 与 DTA 基本呈直线关系。根据式（10）可知， $A_e h_m a$ 是一个常量。污泥和纯水在蒸发过程中的有效传热面积和 $A_e h_m a$ 值相同，进而污泥水分结合能可表示为

$$E = \frac{Q_m}{DTG} - H_{T_{cell}} = H_{T_{cell}} \left(K_T \frac{DTA}{DTG} - 1 \right) \quad (11)$$

式中， E 为污泥与水分结合能， Q_m/DTG 为污泥中水分的蒸发焓， $H_{T_{cell}}$ 为纯水的蒸发焓，温度为 60°C 时，其值为 $2357 \text{ kJ}/\text{kg}$ ， K_T 为纯水恒速蒸发时 DTG 与 DTA

之比, DTA, DTG 为污泥恒温蒸发时的差热、热重微商。

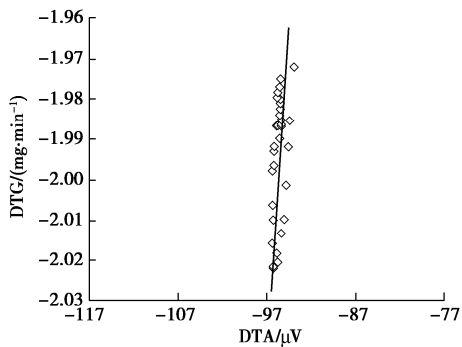


图 9 纯水恒速蒸发过程中 DTG-DTA 关系

Fig. 9 Relationship between mass loss rate and voltage difference data in pure water tests

根据式 (11) 以及污泥试样的热重变化试验结果可以得到污泥水分结合能与含水率的关系曲线。

图 10 为热重差热分析得到的两个污泥试样的水分分布曲线, 可以发现: ①平行试验结果有较大差异; ②试验结果中缺少高含水率(低结合能)范围的数据。Chen 等采用热重差热分析方法对活性污泥进行测试, 发现平行试验结果中污泥水分结合能的误差在 30 kJ/kg 左右^[8]。试验结果出现较大差异的原因是: ①热分析仪中坩埚容量有限, 污泥试样量较少 (mg 量级); ②污泥试样在快速蒸发过程中发生较大收缩变形, 水分与污泥颗粒的结合状态在短时间内发生较大改变。

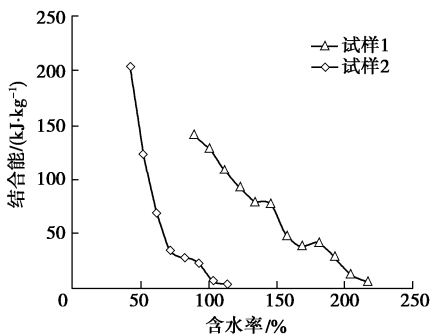


图 10 热重差热分析得到的污泥水分结合能 - 含水率关系

Fig. 10 Solid-water bound strength versus residual water content by combined thermal gravimetry analysis and differential thermal analysis

4.3 不同测试方法结果比较分析

如图 11 所示, 分别为持水曲线方法、热重差热方法得到的污泥水分分布曲线。热重差热方法测试的结合能范围为 10~100 kJ/kg, 而持水曲线方法测试的结合能范围为 0.033~100 kJ/kg。

通过比较可知, 在同一能量范围内, 持水曲线方法和热重差热方法的测试结果有一定差异。其主要原

因是: 污泥中水分结合能与其结构状态(水分结合形式)密切相关。热重差热分析方法中, 试样在蒸发过程中迅速发生收缩开裂, 其水分结合形式发生较大改变。采用持水曲线方法测试时, 污泥试样在不同吸力作用下缓慢脱水, 其结构状态变化相对较小。

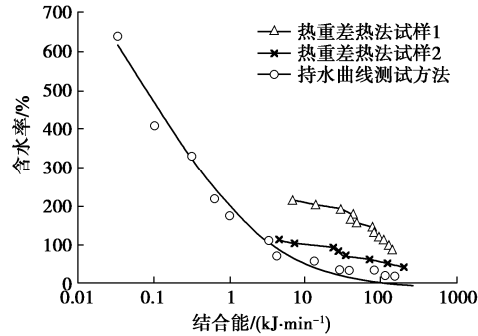


图 11 不同测试方法(持水曲线方法、热重差热法)测得的污泥水分分布曲线

Fig. 11 Continuous moisture distribution of sewage sludge by different methods

综合以上分析, 本文提出方法相对于传统的热重差热分析方法具有以下特点: ①测试过程中试样量较多, 更具代表性; ②测试过程中, 污泥的结构状态变化较小; ③土水势方法测试的结合能范围更广, 尤其是可以构建能量小于 1 kJ/kg 范围的水分分布曲线。

5 结 论

市政污泥的脱水特性与其水分分布特征密切相关, 因此对市政污泥水分分布特性开展研究具有重要的理论意义。本文根据土水势与水分结合能的关系, 推导得出污泥水分结合能与吸力的关系。以此为理论基础, 提出可通过测试污泥持水曲线(SWCC)来研究污泥的水分分布特征。联合采用渗析法和相对湿度法测试了污泥的持水曲线, 并与传统的热重差热分析结果进行了对比分析, 得到 3 点结论。

(1)水科学领域的污泥水分分布曲线与土壤科学领域的持水曲线具有一致性、等价性。污泥水分结合能可表述为污泥吸力与水分密度的函数。

(2)基于持水曲线的市政污泥水分分布测试方法相对于热重差热方法具有以下特点: 测试过程中试样量较多, 具有一定代表性; 测试过程中污泥结构状态变化较小; 测试的结合能范围更广, 可构建能量小于 1 kJ/kg 范围的水分分布曲线。

(3)根据热重差热法得到的市政污泥水分分布曲线只有含水率<250%的试验段, 其结合能范围在 5~200 kJ/kg。同时热重差热方法的平行试验结果有较大差异。

参考文献:

- [1] 荀 锐, 王 伟, 乔 玮. 水热改性污泥的水分布特征与脱水性能研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 851 - 856. (XUN Rui, WANG Wei, QIAO Wei. Water distribution and dewatering performance of the hydrothermal conditioned sludge[J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 851 - 856. (in Chinese))
- [2] 谢浩辉, 麻红磊, 池 涌, 等. 污泥结合水测量方法和水分分布特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, **46**(3): 503 - 508. (XIE Hao-hui, MA Hong-lei, CHI Yong, et al. Bound water measurement methods and moisture distribution within sewage sludge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, **46**(3): 503 - 508. (in Chinese))
- [3] DICK R I, DRAINVILLE M R. The role of water in sludge dewatering[J]. Water Environment Research, 1995, **67**(2): 251.
- [4] SMITH J K, VESILIND P A. Dilatometric measurement of bound water in wastewater sludge[J]. Water Research, 1995, **29**(12): 2621 - 2626.
- [5] SMOLLEN M. Categories of moisture content and dewatering characteristics of biological sludges[C]//Proceedings of the fourth World Filtration Congress, 1986, Ostend.
- [6] LEE D J. Measurement of bound water in waste activated sludge: use of the centrifugal settling method[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 1994, **61**(2): 139 - 144.
- [7] LEE D J, HSU Y H. Measurement of bound water in sludges: a comparative study[J]. Water Environment Research, 1995, **67**(3): 310 - 317.
- [8] CHEN G W, HUNG W T, CHANG I L, et al. Continuous classification of moisture content in waste activated sludges[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(3): 253 - 258.
- [9] WU C C, HUANG C, LEE D J. Bound water content and water binding strength on sludge flocs[J]. Water Research, 1998, **32**(3): 900 - 904.
- [10] CHU C P, LEE D J. Moisture distribution in sludge: effects of polymer conditioning[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, **125**(4): 340 - 345.
- [11] VAXELAIRE J, CÉZAC P. Moisture distribution in activated sludges: a review[J]. Water Research, 2004, **38**(9): 2215 - 2230.
- [12] 谢浩辉. 污泥的结合水测量和热水解试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (XIE Hao-hui. Research on Bound Water Measurement and Thermal Hydrolysis Test of Sewage Sludge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [13] 占鑫杰. 市政污泥的化学调理和真空预压联合作用固结机理及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (ZHAN Xin-jie. Study on the Consolidation Mechanism of Sewage Sludge under Combined Effect of Chemical Conditioning and Vacuum Preloading and its Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [14] 耿增超, 戴 伟. 土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (GENG Zeng-chao, DAI Wei. Soil Science[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [15] HILHORST M A, DIRKSEN C, KAMPERS F W H, et al. Dielectric relaxation of bound water versus soil matric pressure[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, **65**(2): 311 - 314.
- [16] 徐敦祖, 奥利奋特 J L, 泰斯 A R. 土水势、未冻水含量和温度[J]. 冰川冻土, 1985, **7**(1): 1 - 14. (XU Xiao-zu, OLIPHANT J L, TICE A R. Soil water potential, unfrozen water content and temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, **7**(1): 1 - 14. (in Chinese))
- [17] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 1999. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [18] 城市污水处理厂污泥检验方法: CJ/T 221—2005[S]. 2005. (Determination Method for Municipal Sludge in Wastewater Treatment Plant: CJ/T 221—2005[S]. 2005. (in Chinese))
- [19] DELAGE P, HOWAT M D, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, **50**(1/2): 31 - 48.
- [20] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 347 - 349. (YE Wei-min, TANG Yi-qun, CUI Yu-jun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 347 - 349. (in Chinese))
- [21] 吴宏伟, 陈 锐. 非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 123 - 128. (WU Hong-wei, CHEN Rui. Advanced suction control technology in unsaturated soil test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 123 - 128. (in Chinese))