

城市污泥水热脱水处理的工业应用与研究进展

庄修政^{1, 2, 3, 4}, 阴秀丽^{1, 2, 3}, 黄艳琴^{1, 2, 3}, 吴创之^{1, 2, 3}

(¹中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510650; ²中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510650; ³广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510650; ⁴中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 城市污泥是人类生活活动的副产品, 对其脱水处理是污泥处置的关键。其中, 水热脱水技术由于其能有效提高污泥脱水效率与低能耗等优势, 成为污泥减量化与资源化处理的研究热点。文章首先介绍了城市污泥的特点及其处理现状, 然后总结了近年来国内外关于污泥水热脱水工艺的发展历程与工业应用情况, 并进一步对比分析了污泥水热脱水与其他脱水技术之间的能耗优势。此外, 重点综述了污泥水热脱水的影响因素与机理, 包括温度、时间、pH 等处理条件以及水热过程中污泥水分形态与胞外聚合物 (EPS) 对污泥脱水性能的影响, 并分析了目前机理研究上存在的矛盾与原因。最后对污泥水热脱水的发展前景作出展望, 指出通过优化 EPS 分层提取从而深入分析污泥中各组分在水热过程中的迁移与结构变化是研究污泥水热脱水机理的重要途径。

关键词: 城市污泥; 废物处理; 水热脱水; 工业应用; 聚合物; 脱水机理

中图分类号: X7 文献标志码: A 文章编号: 1000-6613(2017)11-4224-08

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-0359

Research on hydrothermal treatment of sewage sludge and its industrial applications

ZHUANG Xiuzheng^{1, 2, 3, 4}, YIN Xiuli^{1, 2, 3}, HUANG Yanqin^{1, 2, 3}, WU Chuangzhi^{1, 2, 3}

(¹Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; ²CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510650, Guangdong, China; ³Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510650, Guangdong, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sewage sludge is the by-product of human activities and its dewatering treatment is essential for sludge disposal. Among these dewatering technologies, hydrothermal dewatering has been the research focus of sludge reduction and utilization because of its advantages of improving dewatering and low-energy consumption. This paper introduced the characteristics of sewage sludge and its disposal status, then comprehensively summarized the development process of sludge hydrothermal dewatering and its industrial application. Besides, the advantage of energy consumption for hydrothermal dewatering was compared with other dewatering technologies. After that, the latest studies relate to the effects of hydrothermal conditions, moisture distribution and extracellular polymers substance (EPS) on the dewaterability of sludge were analyzed in detail. Finally, the future developing perspectives of sludge hydrothermal dewatering treatment were also put forward, and studying the transformation of sludge components and structure *via* modified EPS extraction was considered as important ways to understand the mechanism of hydrothermal dewatering.

Key words: sewage sludge; waste treatment; hydrothermal dewatering; industrial application; polymers; dewatering mechanism

收稿日期: 2017-03-07; 修改稿日期: 2017-03-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (51661145022, 51676195) 及广东省自然科学基金重大基础研究培育项目 (2017B030308002)。

第一作者: 庄修政 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物质燃料的制备与转化。联系人: 阴秀丽, 研究员, 博士生导师。E-mail: xlyin@ms.giec.ac.cn。

随着我国人口数量的增加以及城镇化进程的加快, 经由城镇污水处理厂处理的污泥逐年增加, 导致数量庞大的污泥废弃物无处安放。在 2013 年, 我国的城市污泥产量已达 3075.4 万吨污泥(含水率 80%), 且每年以近 290 万吨的速率增长。此外, 城市污泥(以下简称污泥)由于有机物含量高、营养元素丰富等特点, 被认为是一种潜在的、可利用的能源化资源。

目前污泥的处理技术包括焚烧、填埋和农业利用等, 但不论何种处理方式, 其对污泥含水率均有一定要求。城市污泥由于其颗粒胶状结构以及高度亲水等特性使得污泥中的部分水分难以脱除, 通常在机械脱水前需要进行物理或化学等调理, 其中水热处理以其低能耗、有效提高污泥脱水性以及降低污泥生态危害性等优势, 成为研究污泥减量化与资源化的热点。

污泥水热脱水处理包括污泥水热处理以及水热污泥的机械脱水处理, 其中污泥水热处理指将污泥置于密闭的容器中加热至一定温度下进行水解反应, 在此过程中污泥微生物细胞中胶体结构被破坏、有机物水解, 降低污泥颗粒对水分子的束缚作用, 根本上改变污泥中的水分分布, 从而提高污泥的脱水性能^[1]。污泥水热脱水处理由于其优势被广泛应用于污水处理工业中, 但相对于工艺的改进, 关于污泥水热脱水的机理仍较为匮乏, 有的甚至会相互矛盾。因此, 对污泥的水热脱水机理进一步深入研究具有重要意义。

1 技术与工业应用

1.1 国外水热脱水工艺的发展历程

水热脱水的研究与应用最早可追溯于 1850 年对褐煤和泥煤水热脱水处理的专利。从表 1 可以看出, 由 20 世纪 30 年代末开始, 先后出现 Porteous、

Zimpro 和 LPO 等工艺利用水热技术改善污泥的脱水性能, 而从 20 世纪 80 年代中起, 研究者们开始把污泥水热处理的研究热点从优化水热条件转移到催化剂的研究上^[1-3]。但无论何种工艺, 都因为其在运行过程中存在臭气、高强度腐蚀与堵塞以及较高的设备成本等问题导致实际运行失败。因此, 在 20 世纪 90 年代中期开发出一种新型热水解技术, 即快速热调节法(RTC)^[4]。RTC 工艺主要利用高温高压饱和蒸汽将污泥快速升温到 200℃以上, 在极短的反应时间内(10~30s)破坏污泥微生物细胞, 水解有机物与杀灭病原菌, 从而提高污泥脱水性能以及缩短热水解时间。此外, 近年来出现的 Cambi 与 Biotheys 工艺则在 RTC 工艺的基础上将污泥热水解与中温厌氧消化工艺联合, 保证了污泥热水解能量自平衡的需求, 降低污泥的处理费用^[5-6]。法国 Veolia 企业也于 2010 年公布 Exelys 工艺, 主要由一套连续的水热反应装置组成, 更加紧凑节能, 但具体的运行参数还没见报道^[7]。

1.2 国内污泥水热脱水的工业应用与能耗分析

相对于国外的污泥水热脱水技术而言, 我国污泥水热脱水技术与工业应用发展较为缓慢。在 2002 年, 北京市清河污水处理厂首次进行污泥水热脱水的试点运行, 随后在 2008 年, 2010 年和 2012 年分别在广东东莞、江苏无锡以及内蒙古呼和浩特建立污泥水热干化示范工程, 是我国目前仅有的 3 项污泥水热干化示范工程。其中, 东莞污水处理厂是全国第一个污泥水热干化技术的示范工程, 其处理工艺具有代表性意义。图 1 给出了该污水处理厂的污泥水热干化工艺^[9]。污泥首先通过泵进入均质罐中被调理成均匀浓度, 然后送入浆化反应器中以蒸汽加热至近 90℃保持 40~60min 进行预处理。处理后污泥经由螺旋泵送入水热反应罐中加热至

表 1 水热脱水工艺的发展进程

国家	发展年代	水热工艺	工艺条件	特点
英国	20 世纪 30 年代末	Porteous ^[4]	200℃以下热水解	间歇式流程工艺, 在 20 世纪 60 年代末改良为连续流程工艺
美国	20 世纪 50 年代	Zimpro ^[4]	200℃以上热水解	污泥高压湿式氧化, 反应过程产生恶臭、腐蚀以及高 COD 液相产物
英国	20 世纪 70 年代末	Low Pressure Oxidation (LPO) ^[4, 8]	200℃以下热水解	低污泥氧化率, 液相产物 COD 含量低
美国、欧盟	20 世纪 80 年代	Synox, Prottox ^[1-3]	低温酸碱热水解	通过改善污泥等电位点从而改善其脱水性能, 实现重金属的回收利用, 使用辅助药剂(氢氧化钙等)
美国、欧盟	20 世纪 80 年代	Krepro ^[1-3]	低温酸碱热水解	使用三价铁盐作为催化剂, 回收磷酸铁作为农业肥料
美国	20 世纪 90 年代	Rapid thermal conditioning (RTC) ^[4]	200℃以上热水解	高温高压蒸汽快速升温, 短处理时间, 回收液体产物作为反硝化碳源
法国	20 世纪 90 年代初	Cambi ^[5, 6]	200℃以下热水解	与中温厌氧消化工艺联合, 热电联产
法国	21 世纪初	Biotheys ^[5, 6]	200℃以下热水解	对 Cambi 工艺的改进, 热水热反应罐兼有浆化和泄压功能
法国	21 世纪初	Exelys ^[7]	—	连续运行的热水解装置

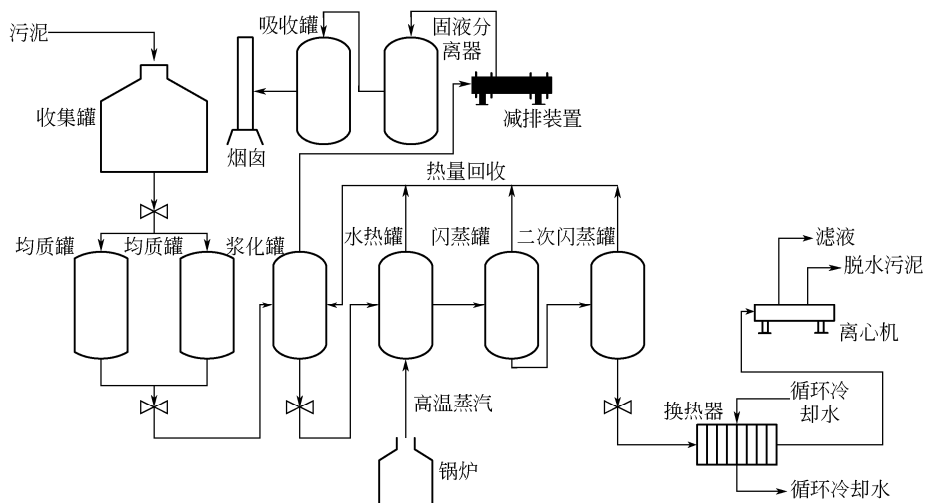


图 1 污泥水热处理的工艺流程^[9]

180℃反应 40~60min，所需加热蒸汽由电锅炉提供。污泥水热处理后被输送至闪蒸罐中，期间产生的热蒸汽可通过管道进入浆化罐中对污泥进行预加热从而回收能量。随后，对降温后的水热污泥通过离心机进行离心脱滤可得到含水率为 37%~55%的污泥泥饼，减量率超过 70%。

不仅如此，污泥水热脱水的工业化应用在减耗方面也有突出优势。WANG 等^[10]设计出一套污泥水热处理耦合机械压滤系统，将之与传统热干处理以及电脱水处理^[11]相比可发现污泥水热脱水的能耗低于上述两种处理方法。如图 2 所示，其中热干燥能耗区间底部为理论最小值，即水的气化潜热 2257kJ/kg；热干燥能耗区间顶部为工业应用最大值，4320kJ/kg^[12]。ESCALA 等^[13]也将污泥在 205℃下水热处理并进行机械脱水处理以及能耗计算，得出污泥水热脱水处理要比直接机械脱水处理减少 65%热能损耗与 69%电能损耗。GUAN 等^[14]则研究了污泥分别在中性、酸性、碱性和 CaCl₂ 催化剂条件下的水热脱水能耗，发现 CaCl₂ 催化剂作用下污

泥水热脱水处理能耗仅为 185.1kJ/kg，比中性水热条件下的能耗低 74%。同时，由于污泥的水热处理本身是一个放热过程，若将污泥在水热过程中所释放的热量以及反应结束后的污泥余热充分地回收利用，则能进一步降低污泥水热脱水过程中的能量输入。

从污泥的水热技术发展可以看出，水热处理能有效提高污泥的脱水性，尤其在污泥的减量化和减耗方面体现出较大优势，具有良好的发展前景。但相对于工艺的改进，污泥水热脱水的相关机理一直没有定论或者出现较多的矛盾结论。为了进一步优化水热处理工艺，对污泥水热脱水的影响因素与机理进行深入分析十分重要。

2 影响因素与机理

2.1 污泥水热处理的影响因素

污泥水热处理过程中，水热温度、反应时间以及 pH 等反应条件对污泥的脱水性能影响很大。对于水热温度而言，WANG 等^[15]在 120~210℃条件下对污泥进行水热处理，发现在 120~150℃下污泥含水率的降低趋势不明显，而当水热温度高于 150℃时，污泥含水率的降低程度增大，说明 150℃是污泥在水热处理后脱水性能改善的一个临界温度点。BOUGRIER 等^[16]也在其研究中给出水热处理改善污泥脱水性能的临界温度点为 150℃，这与 GUAN 等^[14]的研究结果相近。同时，SAVEYN 等^[17]在 150~240℃的区间下进行污泥水热处理，发现在 195~240℃范围内污泥含水率降低的趋势趋于平缓，说明水热温度对污泥脱水性能的改善也具有一个上限值。因此，在对污泥进行水热处理时，在合

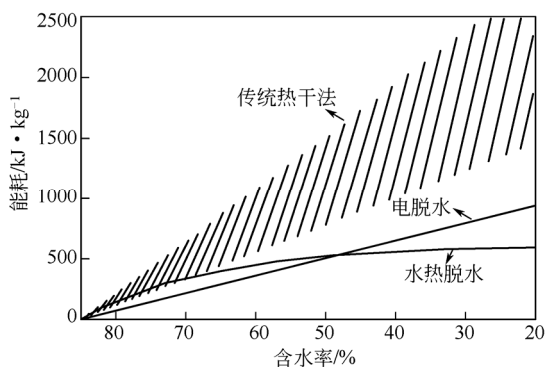


图 2 污泥干化处理技术的能耗对比^[10-12]

适的温度范围 (150~210℃) 内, 水热污泥的脱水性能随水热温度的增加而增加。

对于水解时间对污泥脱水性能的影响, WANG 等^[15]研究了在 10~90min 水解时间下污泥的水热脱水效果, 发现水热污泥含水率在 10~30min 区间内缓慢降低, 而在 30~60min 区间内降低程度明显。当水解时间超过 60min 后, 污泥的深度脱水性能仅有微小的提高, 说明依靠延长水热停留时间以改善污泥脱水性能的程度是有限的, 这与其他研究者的结论相符^[18]。因此, 在对污泥进行水热处理时, 在合适的时间范围 (30~60min) 内, 水热污泥的脱水性能随水解时间的增加而增加。

此外, 通过调节 pH 来进行酸碱热水解也由于其简单有效性而受到越来越多的关注。陈嘉愉等^[19]指出, 在碱性条件下适当提高污泥 pH 可以使胞外聚合物从污泥絮体表面脱离, 释放束缚水从而提高污泥的脱水性; 而邢弈等^[20]则认为在酸性条件下污泥脱水性能要优于中性条件与碱性条件下处理的污泥, 在酸性条件 (pH 为 3) 下处理的污泥含水率与毛细吸水值 (CST) 均为最低值 (60.8% 和 25.4s), 这与 DEVLIN 等^[21]的结论相符。HE 等^[22]研究亦发现酸化处理可以使污泥中 EPS 发生水解, 破坏污泥絮体结构, 改变污泥中的水分分布以及减少污泥束缚水含量, 从而提高污泥脱水性能。NEYENS 等^[23-24]则分别研究了酸碱热水解对污泥脱水性的影响, 发现酸热水解对污泥脱水性的改善效果要优于碱热水解, 其含水率能从 78% 降至 30%, 而碱热水解仅能将污泥含水率降至 54%。一般而言, 在酸性 pH 为 3~5 条件下进行污泥酸水解能有效提高其脱水性能。

2.2 污泥水分分布形态对其脱水的影响研究

大量研究发现, 污泥脱水的效率与程度由污泥

中水分的分布特性决定。污泥中水分分布根据其其与固体颗粒间的结合力大小可分为 4 种形态, 包括自由水、间隙水、表面吸附水和结合水^[25], 如图 3 所示。其中自由水与间隙水是污泥水分的主要部分 (占总水分的 80%~90%), 其受固体颗粒的影响较少, 可通过沉降浓缩或机械力等方式进行脱除。相反, 表面吸附水与结合水则由于其分子间结合力等作用, 较难以机械力等形式脱除。在污泥脱水干化过程中, 一般只将水分简单分为自由水分与束缚水分, 能被机械力脱除的水分称为自由水分, 反之则为束缚水分。HERWIJN^[26]通过结合能的大小定义自由水分与束缚水分, 认为当结合能小于 1kJ/kg 时的水分可归类为污泥中的自由水分。

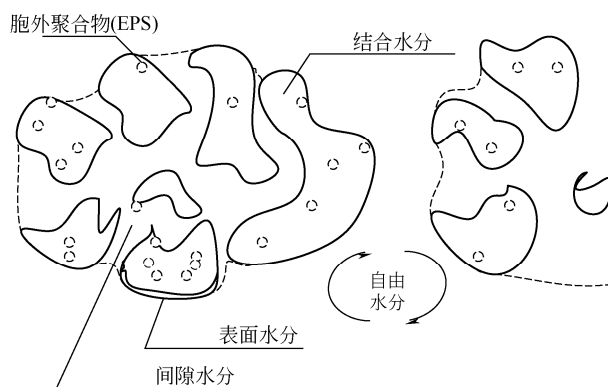


图 3 污泥中水分的存在形态

表 2 列举了近年来关于污泥水热脱水的研究成果, 从中可发现直接对污泥进行机械脱水一般只能将含水率降到 70%~80%^[1], 但对污泥进行水热处理后能有效提高污泥脱水性, 其机械脱水滤饼的含水率能降至 20%~40%。荀锐等^[29]发现在 170℃ 下水解 90min 能将污泥的束缚水含量由 3.6g/g 干污泥

表 2 污泥水热脱水的相关研究

种类	水热条件		污泥含水率		束缚水分含量		文献
	水热温度/℃	反应时间/min	机械脱水 (水热处理前)/%	机械脱水 (水热处理后) ^① /%	处理前 ^② /g·(gDS) ⁻¹	处理后 /g·(gDS) ⁻¹	
废水污泥	90~210	10~90	85	20	5.7	0.3	[10, 15]
高/低挥发分污泥	60~180	0~50	81/82	35/27	4.3/4.6	0.5/0.4	[27]
废水污泥	145~180	15~90	80	41	4.0	0.7	[9]
含油污泥	110~190	15~60	70	34	2.3	0.5	[28]
废水污泥	140~180	15~90	90	41	9.0	0.7	[29]
工业污泥	180~260	30~300	75	—	3.0	—	[30]
消化/未消化污泥	190~220	300~430	70/90	48/30	3.0/9.0	0.9/0.4	[13]
污水污泥	150~230	60	85	43	5.7	0.8	[31]
污水污泥	160~220	10~50	82	33	4.6	0.5	[32]

①该处理后污泥含水率指最佳水热脱水条件后的含水率; ②DS 表示干污泥。

降至 0.59g/g 干污泥，通过把污泥中大部分束缚水转变为可被机械力去除的自由水从而提高污泥的脱水性能，这与王利平^[33]和 VERMA 等^[34]的结论相符。此外，CHU 与 LEE 等^[35]发现在污泥含水量大于 5g/g 干污泥时其结合能为零，而在污泥含水量少于 1g/g 干污泥时其结合能为 800kJ/kg。CHEN 等^[36]也发现当污泥含水率降至 30%时，其水分子结合能会急剧增加，这意味着在自由水不断脱除的过程中，束缚水所占比例逐渐上升，其水分脱除所需的结合能也逐渐上升。当脱水设备能够提供的机械功低于克服水脱离污泥固体所需要的能量时，难以进一步降低含水率，表现为机械脱水存在着极限值。荀锐等^[29]通过热分析发现机械力能脱除的水分结合能极限为 65kJ/kg。

2.3 胞外聚合物 (EPS) 对污泥脱水的影响

胞外聚合物 (EPS) 是指污泥在形成过程中由微生物分泌于细胞外的一些高分子有机聚合物，主要由蛋白质、多糖以及少量腐殖质、核酸和磷脂质组成，是污泥有机物的重要组成部分^[37-38]，占有机物组分的 50%~90%。其中，蛋白质与多糖又是 EPS 的主要成分，占 EPS 含量的 70%~80%。EPS 中的生化聚合物具有高度水合特性和带电性，不仅使污泥束缚大量结合水，对污泥絮体的表面特性也具有重要作用，从而影响污泥的脱水特性^[39]。一般而言，EPS 主要通过两方面影响污泥的脱水特性，其一是通过 EPS 组分中的羧基、碳酸基和硫酸基等酸性官能团的离子化使得污泥表面电荷呈负电性，从而令污泥絮体间产生静电斥力，使其难以聚合絮凝^[40-41]。王红武等^[42]研究也发现污泥表面 zeta 电位值增大会导致其絮凝、沉降和脱水性能变差，这主要是因为高 zeta 电位值表明污泥絮体表面的离子化多聚物较多，使得污泥与水分子间的极性作用力增强^[43]。并且张兰河等^[44]也发现污泥 zeta 电位值与污泥沉降性能 (SVI 值) 呈正相关 ($R^2=0.9597$)，说明污泥絮

体表面负电荷越低，其静电斥力越大，导致污泥沉降性能恶化。除此以外，羟基 (—OH) 还会与水分子中的氢键结合，使其难以脱水。其二是由于 EPS 表面官能团的亲水特性导致污泥脱水困难^[39]，亲水性增强可导致污泥絮体内结合水增多，与水分离的难度增大。总体而言，污泥 EPS 的表面电荷和亲水性与 EPS 中的蛋白质/多糖的比例有关。在 EPS 中，蛋白质和多糖分别携带正电荷和负电荷，蛋白质中带正电荷的氨基可中和部分多糖中带负电荷的羟基等，降低污泥表面 zeta 电位^[45]。同时，蛋白质由于其疏水性氨基酸、甘氨酸和丙氨酸等使得污泥表面呈疏水性；而多糖则由于其亲水性基团如羟基等使得污泥表面呈亲水性^[46]。因此，污泥 EPS 中蛋白质与多糖的比值可用作评价污泥脱水性能好坏的标准。

在结构上，EPS 呈现凝胶状、高度水合的带电生物膜基质，根据其不同的存在形态可分为可溶性 EPS (S-EPS)，松散结合 EPS (LB-EPS) 和紧密结合 EPS (TB-EPS)，最内层则为细胞相 (Pellet) ^[47]，如图 4(a)所示。有研究表明污泥的脱水性能受 EPS 各层的影响都不相同，但关于 EPS 总量或者其中单一组分对污泥脱水性能的影响至今仍存在争议，EPS 与污泥脱水性能的关系如图 4(b)所示。BO 等^[48-49]认为 EPS 总含量的增加会导致污泥脱水性能的提高，而 SHENG 等^[50]却得出相反的结论。这主要是因为污泥中 EPS 浓度对脱水性的影响存在着一个特定值，当高于或者低于这个值都会使污泥的沉降性能降低^[51]。对于 EPS 中各层的 EPS 含量而言，有学者对单独 TB-EPS 和 LB-EPS 层对污泥的絮凝影响进行了研究对比。研究发现由于 LB-EPS 属于松散结合型 EPS，位于污泥的外层，其含量增多会导致污泥表面 zeta 电位增大从而引起静电斥力增大，阻碍絮凝作用^[52]。而 TB-EPS 位于内层，具有结合紧密、流变性小、水分少、体积小等特点，对污泥的絮凝性能影响较少。同时，也有研究发现随

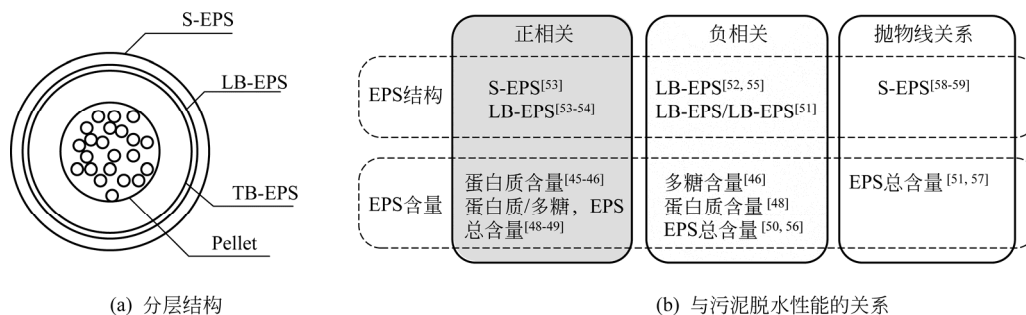


图 4 EPS 的分层结构以及 EPS 与污泥脱水性能的关系 ^[45-46, 48-59]

着 LB-EPS/TB-EPS 比值的增大, 污泥 zeta 电位增大, 脱水性能恶化, 这主要是因为污泥颗粒结构类似于颗粒胶体, LB-EPS 层与 TB-EPS 层则如同胶体颗粒的双电层结构, LB-EPS/TB-EPS 的增大相当于扩散层的厚度增大从而导致 zeta 电位增大^[42]。此外, SHAO 等^[53]研究发现污泥的脱水特性与 S-EPS 中的蛋白质/多糖相关, 表现为污泥毛细吸水值 (CST) 与 S-EPS 层中的蛋白质/多糖比例呈现正相关性 ($R^2=0.668$)。LI 等^[54]也认为污泥脱水特性与上清液、S-EPS 和 LB-EPS 中的蛋白质/多糖有关, 但是也有研究表明污泥中的结合水主要束缚在 LB-EPS 中, 且 LB-EPS 含量的增加会导致污泥黏度的增加, 造成污泥脱水性能变差^[52-55]。这主要是由于不同的 EPS 分层提取方法所造成的, 目前的 EPS 分层提取方法包括加热提取法、超声提取法以及 CER 提取法等, 不同的提取方法势必会对细胞造成不同程度的破坏从而造成 EPS 提取误差。LIAO 等^[60]认为可利用 DNA 作为 EPS 分层提取过程中细胞裂解的评价依据, 若 DNA 含量在总 EPS 含量的 2%~15% 之间则证明在 EPS 提取过程中细胞的裂解程度不剧烈, EPS 分层结果可靠。因此, 对 EPS 分层提取方法的优化以及其提取效果的评价将是研究污泥 EPS 影响的关键因素。

YU 等^[59]在 100~200℃ 的范围内对污泥进行水热处理, 发现其 Zeta 电位值呈现先下降后增大的趋势。ZHU^[32]等在较低温度范围 (60~180℃) 内对城市污泥进行水热处理后再进行机械脱水, 发现污泥含水率能从 72% 降至 27%; 而 ESCALA^[13]和 SAVEYN^[61]等在更高温度范围 (150~240℃) 内进行水热脱水实验, 得出类似结论。WANG 等^[10]通过在 210℃ 条件下水解污泥 90min, 发现水热污泥的表面负电荷由 0.36meq/g 降至 0.04meq/g, 颗粒间静电斥力减弱使得污泥脱水能力增强。同时, 水热污泥的疏水性也由 75% 上升至 92%。由此表明水热处理过程能对污泥中的胞外聚合物进行水热改性, 提高污泥的疏水性并且降低其表面负电荷, 从根本上破坏了污泥表面对水分子的亲水性束缚, 从而提高污泥的脱水性能。此外, 由于在水热过程中水分没有发生相变, 热能被储存在污泥颗粒和高温滤液中, 使得整个污泥深度脱水过程的能耗远远低于一般的热干燥脱水。

3 结语与展望

污泥水热脱水技术是污泥减量化与无害化处

理利用中一项新兴技术。目前对于污泥的脱水处理一般局限在机械脱水-热干化或者药剂调理-机械脱水, 但这两种方法都因为能耗高或后续处理困难而存在缺陷; 而水热处理能对污泥进行水热改性, 从根本上破坏污泥表面对水分子的束缚, 改善污泥脱水性能, 并且在水热过程中水分没有发生相变, 大大降低了整个污泥深度脱水的能耗, 为城市污泥的处理提供了一条可行前处理工艺。

目前污泥水热脱水处理工艺在工业上得到不断地改进, 但关于其脱水机理的相关研究则仍比较匮乏且矛盾。因此针对污泥的水热脱水处理研究, 可以从以下几个方面入手: ①通过对不同种类的污泥进行水热处理对比研究, 探讨污泥中不同组分对其脱水性能的影响, 以便更清晰地揭示污泥的水热反应机理; ②对污泥 EPS 各层的提取方法进行对比分析以便确定适宜的分析方法, 并进一步对污泥各层结构以及组分对污泥脱水性能的影响进行深入研究; ③研究不同的催化剂或者絮凝剂在污泥水热处理过程中的作用, 以便提高水热污泥的脱水性或者降低其过程能耗。

参考文献

- [1] JOMAA S, SHANABLEH A, KHALIL W, et al. Hydrothermal decomposition and oxidation of the organic component of municipal and industrial waste products[J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7 (3): 647-653.
- [2] ALSOP G M and CONWAY R A. Improved thermal sludge conditioning by treatment with acids and bases[J]. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1982, 54 (2): 146-152.
- [3] WOODARD S E, WUKASCH R F. A hydrolysis thickening filtration process for the treatment of waste activated-sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30 (3): 29-38.
- [4] NEYENS E, BAEYENS J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 98 (1/2/3): 51-67.
- [5] CAMACHO P, EWERT W, KOPP J, et al. Combined experiences of thermal hydrolysis and anaerobic digestion latest thinking on thermal hydrolysis of secondary sludge only for optimum dewatering and digestion[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2008, 15: 1964-1978.
- [6] KEPP U, MACHENBACH I, WEISZ N, et al. Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis—three years of experience with full scale plant[J]. *Water Science & Technology*, 2000, 42 (9): 89-96.
- [7] 符成龙. 机械脱水污泥热水解预处理及深度脱水的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
FU C L. Experimental study on thermal hydrolysis pretreatment and dewatering of mechanically pewatered sewage sludge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [8] SONTHEIM H. Effects of sludge conditioning with lime on

- dewatering[J]. Journal Water Pollution Control Federation, 1966, 38 (3): 357.
- [9] QIAO W, WANG W, WAN X, et al. Improve sludge dewatering performance by hydrothermal treatment[J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2010, 7 (1): 7-11.
- [10] WANG L P, ZHANG L, LI A M. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: Influence of operating conditions and the process energetics[J]. Water Research, 2014, 65: 85-97.
- [11] MAHMOUD A, OLIVIER J, VAXELAIRE J, et al. Electro-dewatering of wastewater sludge: influence of the operating conditions and their interactions effects[J]. Water Research, 2011, 45 (9): 2795-2810.
- [12] GAZBAR S, ABADIE J M, COLIN F. Combined action of electro-osmotic drainage and mechanical compression on sludge dewatering[J]. Water Science & Technology, 1994, 30 (8): 169-175.
- [13] ESCALA M, ZUMB HL T, KOLLER C, et al. Hydrothermal carbonization as an energy-efficient alternative to established drying technologies for sewage sludge: a feasibility study on a laboratory scale[J]. Energy & Fuels, 2013, 27 (3): 454-460.
- [14] GUAN B H, YU J, FU H L, et al. Improvement of activated sludge dewaterability by mild thermal treatment in CaCl₂ solution[J]. Water Research, 2012, 46 (2): 425-432.
- [15] WANG L P, LI A M. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: the dewatering performance and the characteristics of products[J]. Water Research, 2015, 68: 291-303.
- [16] BOUGRIER C, DELGEN S J P, CARR RE H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139 (2): 236-244.
- [17] SAVEYN H, CURVERS D, SCHOUTTETEN M, et al. Improved dewatering by hydrothermal conversion of sludge[J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2009, 6 (1): 51-56.
- [18] MA H, CHI Y, YAN J, et al. Experimental study on thermal hydrolysis and dewatering characteristics of mechanically dewatered sewage sludge[J]. Drying Technology, 2011, 29 (14): 1741-1747.
- [19] 陈嘉愉, 吴学伟. 污水污泥有机调质浓缩和无机调质脱水工艺研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3 (3): 529-532.
- CHEN J Y, WU X W. Research of wastewater sludge organic conditioning concentration and inorganic conditioning dewatering technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3 (3): 529-532.
- [20] 邢奕, 王志强, 洪晨, 等. 不同pH值下胞外聚合物对污泥脱水性能及束缚水含量的影响[J]. 工程科学学报, 2015 (10): 1387-1395.
- XING Y, WANG Z Q, HONG C, et al. Influence of extracellular polymeric substances on sludge dewaterability and bound water content at various pH values[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015 (10): 1387-1395.
- [21] DEVLIN D C, ESTEVES S R R, DINSDALE R M, et al. The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (5): 4076-4082.
- [22] HE W, YANG H, GU G. Acid treatment of waste activated sludge for better dewaterability[J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28 (9): 680-675.
- [23] NEYENS E, BAEYENS J, CREEMERS C. Alkaline thermal sludge hydrolysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 97 (1/2/3): 295-314.
- [24] NEYENS E, BAEYENS J, WEEMAES M, et al. Hot acid hydrolysis as a potential treatment of thickened sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98 (1/2/3): 275-293.
- [25] VAXELAIRE J, CEZAC P. Moisture distribution in activated sludges: a review[J]. Water Research, 2004, 38 (9): 2215-2230.
- [26] HERWIJN A. Fundamental aspects of sludge characterization[R]. Technische Universit Eindhoven, 1996.
- [27] ZHU Y, HAN Z, LIU X Y, et al. Study on the effect and mechanism of hydrothermal pretreatment of dewatered sewage sludge cake for dewaterability[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, 63 (8): 997-1002.
- [28] 闫秀懿, 乔玮, 李飘, 等. 含油污泥的水热法减量处理[J]. 化工环保, 2014, 34 (4): 340-343.
- YAN X Y, QIAO W, LI P, et al. Reduction of oily sludge by hydrothermal method[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34 (4): 340-343.
- [29] 荀锐, 王伟, 乔玮, 等. 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 R, WANG W, QIAO W, et al. Water distribution and dewatering performance of the hydrothermal conditioned sludge[J]. Environmental Science, 2009, 30 (3): 851-856.
- [30] MAKELA M, BENAVENTE V, FULLANA A. Hydrothermal carbonization of industrial mixed sludge from a pulp and paper mill[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 444-450.
- [31] YOSHIKAWA K. Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53 (1): 160-163.
- [32] JIANG Z L, MENG D W, MU H Y, et al. Experimental study on hydrothermal drying for sewage sludge in large-scale commercial plant[J]. Journal of Environmental Science and Engineering, 2011, (5): 900-909.
- [33] 王利平. 水热处理耦合机械压滤对剩余污泥的深度脱水性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- WANG L P. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression for excess sludge deep dewatering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [34] VERMA S, PRASAD B, MISHRA I M. Physicochemical and thermal characteristics of the sludge produced after thermochemical treatment of petrochemical wastewater[J]. Environmental Technology, 2012, 33 (13/14/15): 1789-1801.
- [35] CHU C P, LEE D J, CHANG C Y. Energy demand in sludge dewatering[J]. Water Research, 2005, 39 (9): 1858-1868.
- [36] 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.
- [37] FLEMMING H C, WINGENDER J. Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs)—Part I: Structural and ecological aspects[J]. Water Science & Technology A: Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2001, 43 (6): 1-8.
- [38] MCSWAIN B S, IRVINE R L, HAUSNER M, et al. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2005,

- 71 (2): 1051-1057.
- [39] ZHANG J H, LIN Q M, ZHAO X R. The hydrochar characters of municipal sewage sludge under different hydrothermal temperatures and durations[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (3): 471-482.
- [40] SUTHERLAND I W. Exopolysaccharides in biofilms, flocs and related structures[J]. *Water Science & Technology A: Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2001, 43 (6): 77-86.
- [41] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (3): 3488-3497.
- [42] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 活性污泥的表面特性与其沉降脱水性能的关系[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44 (6): 766-769. WANG H W, LI X Y, ZHAO Q X. Surface properties of activated sludge and their effects on settleability and dewaterability[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2004, 44 (6): 766-769.
- [43] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPO I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. *Water Research*, 2001, 35 (2): 339-350.
- [44] 张兰河, 李军, 郭静波, 等. EPS 对活性污泥絮凝沉降性能与表面性质的影响[J]. *化工学报*, 2012, 63 (6): 1865-1871. ZHANG L H, LI J, GUO J B, et al. Effect of EPS on flocculation-sedimentation and surface properties of activated sludge[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63 (6): 1865-1871.
- [45] YANG Q, LUO K, LI X M, et al. Enhanced efficiency of biological excess sludge hydrolysis under anaerobic digestion by additional enzymes[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (9): 2924-2930.
- [46] TIEHM A, NICKEL K, NEIS U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 36 (11): 121-128.
- [47] TSAI B N, CHANG C H, LEE D J. Fractionation of soluble microbial products (SMP) and soluble extracellular polymeric substances (EPS) from wastewater sludge[J]. *Environmental Technology*, 2008, 29 (10): 1127-1138.
- [48] BO J, WIL N B M, LANT P. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, 98 (1/2): 115-126.
- [49] RASZKA A, CHORVATOVA M, WANNER J. The role and significance of extracellular polymers in activated sludge. Part I: Literature review[J]. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*, 2006, 34 (5): 411-424.
- [50] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28 (6): 882-894.
- [51] BECCARI M, MAPPELLI P, TANDOI V. Relationship between bulking and physicochemical-biological properties of activated sludges[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2004, 22 (5): 969-979.
- [52] GUAN W, XIAO P, ZHOU X T, et al. Research advances on sludge extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Chemical Engineer*, 2009 (6): 35-39.
- [53] SHAO L, PEIPEI H E, GUANGHUI Y U, et al. Effect of proteins, polysaccharides, and particle sizes on sludge dewaterability[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21 (1): 83-88.
- [54] LI X, YANG S. Influence of extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, 41 (5): 1022-1030.
- [55] WANG F, JI M, LU S. Influence of ultrasonic disintegration on the dewaterability of waste activated sludge[J]. *Environmental Progress*, 2006, 25 (3): 257-260.
- [56] ERIKSSON L, ALM B. Study of flocculation mechanisms by observing effects of a complexing agent on activated sludge properties[J]. *Waterence & Technology*, 1991, 24 (7): 21-28.
- [57] HOUGHTON J I, STEPHENSON T. Effect of influent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability[J]. *Water Research*, 2002, 36 (14): 3620-3628.
- [58] YUAN H, ZHU N, SONG F. Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (3): 2308-2315.
- [59] YU J, GUO M H, XU X H, et al. The role of temperature and CaCl₂ in activated sludge dewatering under hydrothermal treatment[J]. *Water Research*, 2014, 50: 10-17.
- [60] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPO I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. *Water Research*, 2001, 35 (2): 339-350.
- [61] SAVEYN H, CURVERS D, SCHOUTTETEN M, et al. Improved dewatering by hydrothermal conversion of sludge[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2009, 6 (1): 51-56.