

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.009

## 污泥调理技术研究进展

严伟嘉, 孙永军, 冯丽颖, 谭 洋, 郑怀礼

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:**分析了污泥调理的必要性和迫切性,阐述了污泥调理的作用,介绍现行主要污泥调理技术:物理调理、化学调理、微生物调理和联合调理的调理方法。探讨了调理原理和研究进展,对其各自的优势和局限性进行了详细的论述;并对污泥调理技术的未来发展方向进行了展望。

**关键词:**污泥调理;污泥脱水;絮凝剂;处理技术

**中图分类号:**X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0041-05

## A review of the sludge conditioning technology

*Yan Weijia, Sun Yongjun, Feng Liying, Tan Yang, Zheng Huaili*

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Regions Eco-Environment, Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** This paper illustrates the necessity of sludge conditioning and its function and introduces the current main sludge conditioning technologies, including physical conditioning, chemical conditioning, microbiological conditioning and united conditioning. This paper discusses the conditioning theory, the research progress, their advantages and disadvantages. At last, the paper prospects the development direction of sludge conditioning technologies for the future.

**Key words:** sludge conditioning; sludge dewatering; flocculent; processing technology

改革开放三十年来中国工业和城市化建设取得举世瞩目的成就,但与此同时,工业与生活产生的尤其是工业发展产生的污水量也迅速增长。随着污水处理量的不断增长,污水处理厂势必将产出更多污泥<sup>[1]</sup>。如果对污泥不进行处理任其排放,就可能对环境造成严重的污染。此外,我国现在还存在“重水轻泥”的现象,使得我国污泥处理水平严重滞后于污水处理水平。城市污水污泥是由多种微生物形成的菌胶团和其吸附的有机物和无机物组成的集合体,在城市污水污泥中含有水分、盐类、重金属、难降解有机物和少量病原微生物和寄生虫等,因此,如对

污泥处理不得当,将会对环境产生巨大的影响。因此如何经济有效地处理污泥成为中国目前研究的重点<sup>[2]</sup>。

在污泥处理工艺中,对污泥脱水是一个必不可少的步骤。而为了提高污泥的过滤和脱水性能,以便后期的运输和降低处置成本,对污泥进行调理预处理就变得尤为重要且必不可少。污泥调理就是通过物理、化学和生物等方法改变污泥的性质,改进污泥脱水性能,从而提高脱水后污泥含固率,最终达到减少运输和最终处置费用的目的。常用的污泥调理的方法有物理调理、化学调理、物理化学联合调

收稿日期:2015-03-15

基金项目:重庆大学大学生科研训练计划(SRTP);国家自然科学基金项目(21177164)

作者简介:孙永军(1987-),男,博士生,主要从事水处理剂的合成及应用、水资源保护与利用,重庆大学B区城市建设与环境工程学院,(E-mail)sunyongjun008@163.com。

郑怀礼(通信作者),男,博士,教授,博导,主要从事水处理剂的合成及应用、水资源保护与利用,(E-mail)zhl@cqu.edu.cn; zhl6512@126.com。

理、微生物调理以及其他调理技术。本文将对各种污泥调理技术进行介绍,并进行优缺点的对比,提出今后研究方向。

## 1 污泥调理方法

### 1.1 物理调理

物理调理是通过物理的方法破坏污泥中的微生物细胞,改变污泥的结构,降低污泥与水的结合作用,从而释放出部分内部水的污泥调理方法<sup>[3]</sup>。物理调理主要包括热调理、微波调理、冷冻调理、加骨料调理以及超声波调理等。热调理是以对污泥进行加热为方法的物理调理技术,在对污泥加热过程中,污泥中的微生物细胞受热膨胀破裂,絮体解散,最终细胞内的结合水得到更多的释放,从而降低污泥含水率<sup>[4]</sup>;微波调理是传统热调理的升级调理技术,值得注意而是,微波调理不是对从表面开始进行加热,而是热量从污泥各个方向均匀的渗透。冷冻调理是对污泥冷冻一段时间后再在一定条件下对污泥进行解冻使污泥性质发生改变的调理过程<sup>[5]</sup>。加骨料调理是对污泥中加入适量骨料(主要是煤灰)使得污泥物理性状发生改变的调理方式,骨料可使污泥颗粒为中心形成骨架构建体,减小污泥可压缩性从而有利于污泥脱水<sup>[6]</sup>。超声波调理是对污泥进行超声波处理使其物理性质发生改变的调理方式,超声波可使污泥菌胶团结构发生破坏,将污泥内部结合水释放成容易去除的自由水<sup>[7]</sup>。

Guohong Feng<sup>[8]</sup>等研究了热处理对市政污泥脱水性能的影响,结果表明热处理后污泥的结合水含量和粒度以及粘弹性明显降低,而污泥絮体的比表面积增加,滤液量在 60 min 内显著增加了近 7 倍。Ewa Wojciechowska<sup>[9]</sup>等采用微波调理剩余污泥,研究表明微波调理可以显著提高污泥脱水性能,同时投加有机高分子絮凝剂后,再进行微波调理,比单独微波调理和单独絮凝剂调理效果更好。Pham-Anh Tuan<sup>[10]</sup>等采用对絮凝后的污泥采用冻结/解冻调理技术,脱水后的污泥含固率在 35.8%~48.7%。K. B. Thapa<sup>[11]</sup>等采用褐煤调理活性污泥,当混合样品中含有 40%的污泥和 60%的褐煤时,单独絮凝后污泥比阻高于其污泥比阻的 27 倍,褐煤调理污泥增加污泥的空隙性。Ying Qi<sup>[12]</sup>等采用褐煤作为调理剂进行中试试验,结果表明褐煤可以显著提高污泥脱水性能,具有一定的应用和经济价值,当褐煤和污泥固体质量比为 0.5:1~1:1 时,其净污泥产

量从未调理的  $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  增加到  $5.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $7.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Xin Feng<sup>[13]</sup>等采用超声波调理污泥,当能量剂量小于  $4400 \text{ kJ/kg TS}$  时,可以提高污泥脱水性能,但大于  $4400 \text{ kJ/kg TS}$  反而会降低污泥脱水性能。

虽然物理调理可以降低污泥含水率,但由于其作用方式不同,各有其优点和缺点。热调理对提升大多数污泥脱水率有明显效果,但对有机物含量较低的污泥处理效果较差<sup>[4]</sup>。微波调理具有加热时间短、加热温度低、热效高、热量立体传递、设备简单等优点,但用微波处理污泥要注意污泥量的控制,同时由于长时微波辐射对人体易造成害,在调理时需注意对微波的封闭<sup>[13-14]</sup>。冷冻调理具有可自发进行,无需化学添加剂,成本低的优势,但是其使用范围的具有局限性,冷冻调理目前主要应用于给水污泥的调理,对其他污泥的调理还有待进一步的研究<sup>[3]</sup>。加骨料调理在调理污泥的同时还可有效利用废弃资源,符合环保的要求,且在适当条件下使用会取得良好的调理效果,但是存在由于投加大引起污泥量增加的结果以及骨料中重金属的处置的问题<sup>[6]</sup>。超声波调理效率高且绿色环保,具有广阔的应用前景,但超声波在水中产生的各种效应十分复杂,而且它的调理机理在科学界还没有统一的解释,在广泛应用于实际前还有待人们对其进一步研究<sup>[7]</sup>。

### 1.2 化学调理

化学调理是指向污泥中添加絮凝剂、助凝剂、氧化剂等化学药剂,来改变污泥性质及污泥颗粒表面带电性,克服粒子间的斥力,破坏污泥的原有的胶体结构,减小污泥与水的亲和力,使得污泥颗粒脱稳的污泥调理技术。一般认为化学调理的调理机理是三种作用联合作用的结果:压缩双电层作用、吸附架桥作用和网捕作用<sup>[15]</sup>。化学调理主要分为无机调理剂调理以及有机高分子调理剂调理。无机调理剂按金属盐分可分为铝盐系和铁盐系,按相对分子量大小分可分为普通无机絮凝剂和无机高分子絮凝剂,应用广泛的无机化学调理剂主要有聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铝(PAC)、聚合氯化铝铁(PAFC)、聚合硅酸铝(PASiC)等。有机调理剂按其带电性质可分为阳离子型、阴离子型、非离子型和两性型 4 种类型。由于污泥絮体往往带负电荷,所以阳离子型和两性型应用更为广泛。此外,近年来,天然改性高分子絮凝剂成为研究新的热点<sup>[16]</sup>。

Guangyin Zhen<sup>[17]</sup>等采用铁(II)-活化过硫酸盐氧化剩余污泥,研究发现在  $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ,

1.5 mmol · g<sup>-1</sup> Fe(II)且 pH 3.0~8.5 时,污泥毛细吸水时间在 1 min 内降低了 88.8%,这个是由于原子激发机理导致了溶解性胞外聚合物的降解,以及污泥颗粒破裂引起内部结合水的释放。Maha A. Tony<sup>[18]</sup>等采用芬顿试剂(Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)调理铝泥即自来水厂污泥,当 Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 为 20/125 mg · g<sup>-1</sup>、pH 值为 6.0 时,毛细吸水时间降低了 47%。Huaili Zheng<sup>[19]</sup>等人采用紫外光引发聚合阳离子聚丙烯酰胺 PADB 并将其用于城市污水处理厂活性污泥脱水,其脱水效果显著,当 PADB 投加量为 40 mg · L<sup>-1</sup>、pH 值为 7 时,污泥含固率和污泥比阻分别为 32.2% 和  $5.51 \times 10^{12}$  m · kg<sup>-1</sup>。John T. Novak<sup>[20]</sup>等对有机高分子絮凝剂进行污泥脱水研究,具有较好的污泥脱水效果,同时通过数据分析可知,絮凝剂投加量和污泥中蛋白质含量具有较好的相关性。

利用无机调理剂进行化学调理具有原料易得、制作简单、成本低的优势,对去除污泥中的细微悬浮颗粒很有效果,但无机调理剂生成的絮体较小,调理剂的用量也较大,从而大大增加污泥量,降低污泥的肥效和热值,还会将重金属带入污泥,对环境构成威胁。有机高分子调理剂种类丰富,各有优势,阳离子型聚丙烯酰胺类絮凝剂具有用量少的特点,阴离子型絮凝剂分子量更大,两性型絮凝剂则有更优良的适用范围,在污泥性质改变或有一定程度腐败时,也可使污泥具有较好的脱水性能,但有机絮凝剂具有难降解,残留单体有毒的缺点<sup>[21]</sup>。

### 1.3 微生物调理

微生物调理,顾名思义,是以微生物絮凝剂为调理剂的调理技术。微生物絮凝剂按照来源来分可分为三类,包括直接用微生物细胞作为絮凝剂、用微生物细胞提取物质作为絮凝剂和用微生物细胞代谢产物作为絮凝剂,用微生物絮凝剂进行调理有利于水中胶体悬浮物相互凝聚沉淀和提升污泥脱水性能<sup>[21]</sup>。

Fenwu Liu<sup>[22]</sup>等以嗜酸氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌为絮凝剂采用生物浸矿法对污泥进行调理,污泥比阻和毛细吸水时间分别减少了 93.1% 和 74.1%,同时对污泥中的 COD、氨氮、总磷有一定的去除作用。刘奋武<sup>[23]</sup>等采用生物沥浸法,以含嗜酸性硫杆菌为主要菌群进行生物氧化酸化,对市政污泥进行中试脱水研究,脱水后污泥滤饼含水率为 58%。王电站<sup>[24]</sup>等采用生物淋滤法调理制革污泥,使其污泥比阻值从原来的  $195 \times 10^{12}$  m · kg<sup>-1</sup> 下降

至  $5.4 \times 10^{12}$  m · kg<sup>-1</sup>,将其进行离心脱水,脱水率达到 83%。杨阿明<sup>[25]</sup>等从活性污泥中培养分离出奇变形杆菌作为絮凝剂,当投加量为投加量为 6%(体积分数)、pH 值为 6.5 的条件下,污泥脱水率达 82%。

微生物絮凝剂具有使用效能高、无毒性、无二次污染、可进行生物降解、污泥絮体密实、适用范围广等强大优势,不过该类絮凝剂在国内外的研究均处于起步阶段,研究水平较低,絮凝机理尚无明确解释,而且存在用量大,制作成本较高,针对性不强等问题,进一步研究后必将拥有广阔的应用前景<sup>[26]</sup>。

### 1.4 联合调理

基于单独的物理、化学和微生物调理都有着一定的缺陷,联合调理技术在近些年来成为研究的热点。联合调理就是不同的药剂联合或者复配使用,或联合物理调理、化学调理和生物调理的污泥调理方法。联合调理可分为药剂联用调理、物理和化学联用调理以及污泥联合调理三类。污泥联合调理是将化学污泥与活性污泥以一定比例混合,化学污泥作为污泥的骨架减少了污泥的可压缩性,增强了污泥的脱水能力。药剂联用主要有无机絮凝剂和有机絮凝剂联用、表面活性剂和无机盐联用、微生物和化学絮凝剂联用、多种有机絮凝剂联用和多种微生物絮凝剂联用等。

Haijian Luo<sup>[27]</sup>等采用木屑和聚丙烯酰胺联合调理印染污泥,研究表明调理后的污泥具有多孔,可渗透和不可压缩的结构,污泥的脱水率得以有效提高。Hao Zhang<sup>[28]</sup>等以制铝工业的废渣赤泥、硅酸盐水泥以及生石灰作为污泥脱水的骨料,配合芬顿试剂,对城市污水处理厂剩余污泥进行污泥调理脱水研究,当 Fe<sup>2+</sup> 投加量为 31.9 mg · g<sup>-1</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 投加量为 33.7 mg · g<sup>-1</sup>、赤泥投加量为 275.1 mg · g<sup>-1</sup>时,污泥的含水率为 59.8%。G. R. Chang<sup>[29]</sup>等以制革厂污水处理系统的初沉池污泥作为骨料,与二沉池剩余活性污泥混合后,投加聚电解质调理,研究发现当活性污泥:初沉污泥为 1:1~2:1 时,混合污泥具有较好的污泥脱水性能。M. Takashima<sup>[30]</sup>等采用酸处理、热处理以及酸热处理活性污泥,在 pH 值 2~6 时,有助于提高污泥脱水性能,但当温度在 25℃~180℃有助于污泥量的减少和甲烷的产生,酸热处理可以提高 22%~23% 的污泥脱水效率。Akrama Mahmoud<sup>[31]</sup>等采用电场辅助脱水技术对活性污泥进行脱水研究,研究表明电场辅助脱水技术可以比常规脱水技术多去除

10%~24%的水分。M. Citeau<sup>[32]</sup>等采用电渗析法分别对活性污泥和消化污泥进行脱水研究,结果表明在  $40\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  下,脱水后消化污泥和活性污泥的含固率分别为 47.0% 和 31.7%。

药剂联用调理污泥可增强污泥的脱水性能,减少药剂的添加量,降低调理成本,但是对药剂的投加比例和投加顺序有严格的要求,比例或顺序不当会对结果有严重的影响。物理和化学调理联用可以节约物理调理所需能量和化学调理的化学药剂量,减小对环境的污染,但该联合调理机理尚不明确,有待进一步研究。污泥联合调理可减少絮凝剂的添加量,但是在过程中会使化学污泥中的无机物进入液相,容易破坏活性污泥的稳定性,从而限制了活性污泥的循环利用<sup>[26]</sup>。

## 2 结 语

污泥调理是污泥处置的关键步骤,对污泥进行调理可改变污泥的理化性质,降低污泥与水的亲和力,提升污泥的脱水性能,使脱水后泥饼含水率和质量更低,对降低运输费用和后期处置费用有重要意义。当前污泥调理技术已有长足的发展,呈现出多样性的发展趋势,但是依然有许多问题亟待解决,单一方法调理污泥总是有或多或少的劣势,易对环境造成污染;联合污泥调理技术尚处于研究阶段,很多调理机理尚不得而知,距离实际应用还有不小的距离。

从当前的污泥调理研究看来,应向以下方向发展:联合调理技术应向无害化、绿色化方向发展,应用清洁的调理剂;在物理调理方面,应把研究重点放在降低能耗;多致力于污泥调理原理方面的研究,探明调理机理,早日应用于实际。

### 参考文献:

- [1] Chen H, Yan S H, Ye H J, et al. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 19:1454-1463.
- [2] 刘云兴,罗海斌. 中国城市污水厂污泥处理技术的现状及发展研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(7):94-97.
- [3] Alexandros K A, Athanasios S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries [J]. Waste Management, 2012, 32: 1186-1195.
- [4] 荀锐,王伟,乔玮,等. 城市污泥处理现状与强化脱水的水热减量技术[J]. 环境卫生工程, 2008, 16(2): 28-32.
- [5] 李玉瑛,李冰. 冷融技术对剩余污泥的调理研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(8):56-58.
- [6] 程磊,于衍真,索宁,等. 粉煤灰在污泥调理中的应用进展[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(4):37-39.
- [7] 余林锋,汤兵,余国骏. 超声波调理污泥的研究进展[J]. 化工环保, 2007, 27(5):426-430.
- [8] Guo H F, Wei T, Ni Z, et al. Effects of thermal treatment on physical and expression dewatering characteristics of municipal sludge [J]. Chemical Engineering Journal 2014(247):223-230.
- [9] Ewa W. Application of microwaves for sewage sludge conditioning [J]. Water Research 2005 (39): 4749 - 4754.
- [10] Pham-Anh Tuan, Sillanpaa M. Effect of freeze/thaw conditions, polyelectrolyte addition, and sludge loading on sludge electro-dewatering process [J]. Chemical Engineering Journal 164 (2010):85-91.
- [11] Thapa K B, Qi Y, Clayton S A. Lignite aided dewatering of digested sewage sludge [J]. Water Research 2009(43): 623-634.
- [12] Ying Q, Khagendra B. Thapa, Andrew F A. Hoadley. Benefit of lignite as a filter aid for dewatering of digested sewage sludge demonstrated in pilot scale trials [J]. Chemical Engineering Journal 2011 (166): 504-510.
- [13] Xin F, Deng J C, Lei H Y, Bai T. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. Bioresource Technology 2009(100):1074-1081.
- [14] 吕斌,王弘宇,杨小俊. 污泥脱水性能调理技术研究进展[J]. 山西建筑, 2009, 35(9):180-181.
- [15] 蒋波,傅佳骏,蔡伟民. 污泥化学调理研究现状[J]. 上海化工, 2007, 32(1):4-7.
- [16] Wang W, Luo Y X, Qiao W. Possible solutions for sludge dewatering in China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2010, 4(1): 102-107.
- [17] Zhen G Y, Lu X Q, Zhao Y C. Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of Fe (II)-activated persulfate oxidation [J]. Bioresource Technology 2012 (116):259-265.
- [18] Maha A, Tony Y Q, Aghareed M. Tayeb. Exploitation of Fenton and Fenton-like reagents as alternative conditioners for alum sludge conditioning [J]. Journal of Environmental Sciences 2009(21):101-105.
- [19] Zheng H L, Sun Y J, Guo J S. Characterization and evaluation of dewatering properties of PADB, a highly efficient cationic flocculant [J]. Ind. Eng. Chem. Res.

- 2014, 53:2572-2582.
- [20] John T. The Role of organic colloids in dewatering [J]. Drying Technology, 2010, 28: 871-876.
- [21] 于荣丽,孙铁珩,孙丽娜,等. 微生物絮凝剂用于河道疏浚底泥快速脱水的研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5):35-42.
- [22] Liu F, Zhou J, Wang D Z. Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods [J]. Journal of Environmental Sciences 2012, 24(8) 1403-1410.
- [23] 刘奋武,周立祥,周俊,等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究:批式运行模式[J]. 环境科学, 2011, 32(7):2023-2029.
- [24] 王电站,周立祥,何锋. 生物淋滤法提高制革污泥脱水性能的研究[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1):67-71.
- [25] 杨阿明,张志强,王学江. 高效微生物絮凝剂用于污泥脱水及其动力学研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(9): 24-27.
- [26] 源亮军,汤兵,薛嘉韵. 生化污泥调理技术研究进展 [J]. 工业安全与环保, 2007, 33(1):27-29.
- [27] Luo H J, Ning X N, Liang X J. Effects of sawdust-CPAM on textile dyeing sludge dewaterability and filter cake properties [J]. Bioresource Technology, 2013, 139: 330-336.
- [28] Zhang H, Yang J K, Yu W B. Mechanism of red mud combined with Fenton's reagent in sewage sludge conditioning [J]. Water Research, 2014, 59: 239-247.
- [29] Chang G R, Liu J C, Lee D J. Co-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge [J]. Wat. Res. 2001, 35(3):786-794.
- [30] Takashima M, Tanaka Y. Acidic thermal post-treatment for enhancing anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014(2) :773-779.
- [31] Akrama M, Je' re' my Olivier, Jean V, Andrew F A. Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects [J]. Water Research, 2011(45): 2795-2810.
- [32] Citeau M J, Olivier A. Mahmoud J. Pressurised electro-osmotic dewatering of activated and anaerobically digested sludges: Electrical variables analysis [J]. Water Research, 2012 (46) :4405-4416.

(编辑 侯 湘)