

Advances in Assisted Technology of Electroosmotic Dehydration of Sludge

Baihua Cai¹, Shujuan Zhang^{1*}, Jixiu Jiang¹, Hao Li²

¹School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

²Southern China Environmental Science Research Institute of Environmental Protection Department, Guangzhou Guangdong

Email: *654419974@qq.com

Received: Nov. 27th, 2016; accepted: Dec. 16th, 2016; published: Dec. 20th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The high efficiency and feasibility of electroosmotic technology applied in sludge dewatering has been confirmed. More and more studies focused on strengthening electro-osmosis. This paper gives a preliminary and brief generalization about existing research based on the available literature. And that leads the direction of research ideas.

Keywords

Sludge, Electro-Osmosis, Dewatering

污泥电渗透脱水辅助技术的研究进展

蔡白桦¹, 张淑娟^{1*}, 江纪修¹, 李浩²

¹中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州

²环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州

Email: *654419974@qq.com

收稿日期: 2016年11月27日; 录用日期: 2016年12月16日; 发布日期: 2016年12月20日

*通讯作者。

摘要

电渗透技术应用于污泥脱水的高效可行性已被证实,越来越多的研究着重于强化电渗透脱水效果,本文在查阅相关文献的基础上对现有的研究进行一个初步、简要的归纳和概括,并由此引出该方向发展的研究思路。

关键词

污泥, 电渗透, 脱水

1. 引言

电渗透是一种以电场作为驱动力的固液分离技术,其原理是在电场的作用下,污泥颗粒由于其表面带有负电荷会向阳极移动,而水分子由于带有部分正电荷,在电场驱动下会向阴极移动,从而实现对污泥脱水[1]。基本工作原理图可见图 1 [2]。目前已有大量的实验研究表明,电渗透脱水技术在对污泥深度脱水及节能高效方面具有重要的意义[3]-[9]。于晓艳[10]等人利用电渗透技术将污泥含水率从 79%降至 60.3%,耗能 0.075 kWh/kg 脱除水, Yang [6]等人也做过类似试验,他们将污泥含水率从 79.3%降至 65%左右,能耗为 0.02~0.03 kWh/kg 脱除水。这一结果远低于热干化发平均能耗 0.6~1.2 kWh/kg 脱除水[11]。

效益最大化永远是发展生产的不懈追求,由于目前单一的电渗透脱水技术能耗仍旧较高,越来越多的研究者着力于研究强化电渗透脱水效果。笔者以主题为污泥脱水和电、污泥脱水和电渗透、电渗透脱水分别检索了 cnki 和 web of science 数据库,发现电渗透效果主要有三种强化手段: 1) 物理方法联合电渗透技术; 2) 化学方法联合电渗透技术; 3) 生物方法联合电渗透技术。(三种方法的对比可见附表 1)。

2. 物理方法联合电渗透技术

物理方法主要有机械、加热、冻融和超声波等。

2.1. 机械联合电渗透

机械作为电渗透脱水的辅助手段能够有效促进脱水主要在于其有两大作用: 1) 使污泥泥饼中水分分布均匀[12] (见图 2); 2) 使电极与泥饼始终保持紧密接触[13]。

Akrama Mahmoud [14]在整理前人工作中得出结论: 联合机械和电渗透脱水技术的脱水效果比单独使用电渗透脱水技术好得多。郝健[11]的研究结果也表明机械压力的施加对污泥的脱水效果有一定程度的提高, 对比于未施加压力污泥最终含水率 78%左右, 当施加 61 kPa 的压力后, 经 20 min 的电渗透脱水, 污泥最终含水率为 59.3%, 施加 74 kPa 的压力污泥最终含水率为 58.8%。Olivier Larue [15]等人也有相同的结论。但同时也有研究[3]指出机械压力的施加并不是越大越好, 机械压力的施加虽能够使污泥泥饼中的水分分布更均匀, 维持泥饼中电场的连续性, 保证了电渗透脱水过程能够持续进行, 但过大的机械压力也会使泥饼压实从而增加了水分在泥饼中迁移阻力。

2.2. 热干化联合电渗透

有研究者总结出高温促进脱水的机理在于其能消除极性官能团, 减小水和颗粒间的静电吸引力, 于此同时, 高的温度能降低液体的密度、黏度和表面张力, 并能促进水分的蒸发, 因此能够促进脱水[14]。

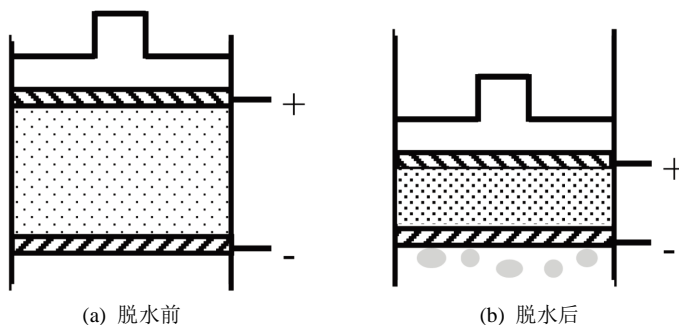


Figure 1. Electro-osmosis basic working principle diagram
图 1. 电渗透基本工作原理图

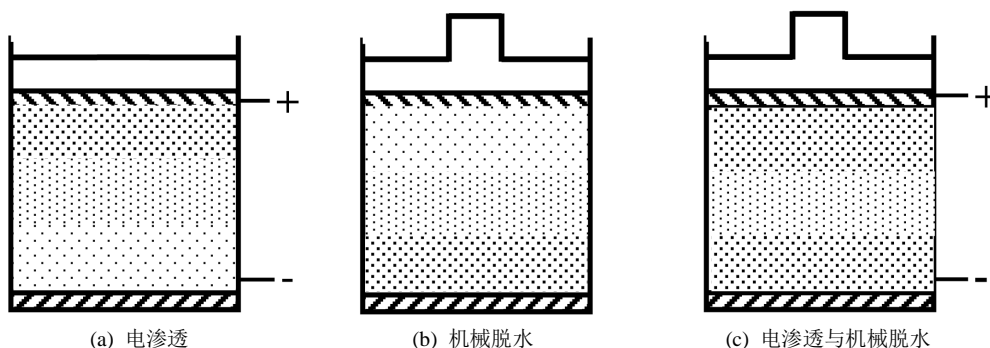


Figure 2. The moisture distribution diagram of electroosmosis, mechanical dewatering and electroosmosis combined with mechanical dehydration
图 2. 电渗透、机械脱水及电渗透与机械脱水相结合的形式水分分布情况图

电渗透脱水过程中，由于水分的脱除导致泥饼干化，电阻增大，产生的欧姆热使得污泥泥饼的温度升高。研究显示[16]，在 60 V 电压的作用下，相比于冷却的电极(温度保持在 47℃ 以下)，应用未被冷却的电极的试验在通电 15 min 后去除更多的水(71.2% ± 1.1% vs 49.6% ± 2.2%)。不同的是，Jiaxiang Zhou 等人[17]将污泥放置在 50℃ 的温度下培育一个小时，然后立即进行电渗透脱水。在 20 V 电压的作用下，对比常温条件下培育一个小时后污泥的电渗透脱水效果，热处理后的水分脱除率减少约 30% (约 20% vs 约 50%)，这可能是因为热处理导致污泥颗粒分解成更小的颗粒和有机酸，减少了污泥的表面电荷从而导致电渗透过程中去除水量的减少。

2.3. 冻融联合电渗透

冷冻过程中可以使得细胞丧失活性从而导致机械脱水，结合水同细胞内部水被释放出来，提高污泥的脱水性能[18]。

Jiaxiang Zhou 等人[17]将污泥放置在 -15℃ 的温度下培育一个小时，然后放置到 20℃ 的水浴中进行解冻，随后进行电渗透实验(20 V, 180 min)。对比常温条件同样处理方式的污泥的脱水效果，结果发现经冻融后的污泥水分脱除率没有较大的变化(约 50%)，但其达到相同水分脱除率时所用时间减少约 80 min。观察发现经冻融后的污泥絮体凝聚从而有利于污泥脱水。李恺[19]等人在其文章中也指出有关研究表明，较低的冷冻速率更能提高污泥的脱水性能。

2.4. 超声波联合电渗透

污泥在吸收超声波的能量后泥饼的温度升高，促进水分蒸发、增加化学反应速率同时降低液体粘性，

此外, 超声能量能破坏污泥结构, 释放结合水及创造新的水分流通通道, 破坏细胞结构, 溶解细胞和污泥颗粒表面的 EPS, 还可以清洁滤布表面, 防止堵塞[13] [14]。

目前也有不少实验对超声波联合电渗透技术进行探究。马德刚[20]等人的研究表明, 在最佳工艺条件下, 与单纯的电渗透脱水相比, 污泥脱水率由 4.88% 增大至 12.44%。董立文[13]在其研究中也发现, 适当的超声波作用后污泥的脱水率约为 83%, 但增大超声投加量后, 污泥的脱水率下降约至 79%, 且增大了能耗。因此存在恰当的声强和声波作用时间, 使得声波能量能够破坏絮体结构释放出部分的结合水而没有造成污泥颗粒分解成更小的颗粒阻碍脱水。

3. 化学方法联合电渗透技术

3.1. 无机化合物

无机化合物的添加会改变污泥中的电导率。电导率过高会压缩双电层, 降低 zeta 电位, 不利于污泥脱水, 但是高电导率同时也意味着相同电压下, 会有更多的电流流经污泥, 对电渗透脱水产生有利影响, 因此电导率的主要影响在于电渗的能耗方面[13]。所添加无机化合物某些离子的氧化还原性可破解细胞, 释放内部水[21], 且能分解污泥中的有机物成分, 改变污泥的脱水性能[22]。

李静[21]探究了四种电解质(NaCl、CaCl₂、Na₂SO₄、NaHCO₃)不同投加量条件下对污泥进行电渗透实验的结果, 四种电解质对污泥电渗透作用效果大小排序为: CaCl₂ > NaCl > NaHCO₃ > Na₂SO₄。卢宁[23]向污泥中投加一定浓度的硝酸钠溶液进行电渗透实验, 结果表明在硝酸钠投量较小的条件下, 污泥含固率随投药量的增加而升高, 到达一定量后, 污泥含固率不会发生明显的变化。在其的探究中, 适当硝酸钠的投入使得污泥含固率达到 40% 的时间缩短 10.4 min, 且适能降低能耗 280 kWh/tDS, 但加入过多的硝酸钠则会导致能耗升高。俞力[24]的实验结果表明在一定数值以下 NaCl 的投加量增加使得污泥泥饼含水率降低, 降低幅度为 0%~8.58%, 但当投加量大于一定数值后, 泥饼含水率并未有显著的降低。季雪元[25]的研究发现在水平电场作用下对污泥进行酸化或碱化都会降低其的脱水效果。黄殿男[26]对加碱与电渗透联合进行探究, 发现相比于未加碱电化学组, 处理 60 min 后, NaOH-电化学组污泥最终含水率增加 10.2%, 而 Ca(OH)₂-电化学组污泥最终含水率下降 2.1%。Jiaxiang Zhou [17]等人还对电渗透联合 FeCl₃ 进行实验发现 FeCl₃ 能够加强电渗透脱水效果, 但不如 CPAM 的效果好。M.Loginov [27]等人通过石灰(CaO)对电渗透脱水效果的探究发现, 石灰浓度的增加会促进渗透, 但同时它也会对电动性能造成损害, 过高浓度的石灰投入会显著减少泥饼含固率。李亚林[22]等人还利用 Fe-过硫酸盐氧化手段辅助电渗透脱水, 他们发现到 FeSO₄·7H₂O 与 Na₂S₂O₈ 比例为 1:1 时得到最佳效果, 对比空白组, 污泥含水率下降 10.85%。

还有许多研究[11] [13] [28] [29]对无机化合物辅助电渗透脱水进行探讨, 这里不一一赘述, 详细可见附表 1。

此外, 有文章[30]提到, 二价阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺)可通过结合絮体间负电荷的结合位点, 以桥接作用增大污泥絮体从而促进脱水, 而一价阳离子(Na⁺、K⁺)会置换絮体中部分二价阳离子, 破坏絮体结构, 不利于强化污泥脱水, 甚至于会恶化污泥的脱水性能。同时, K⁺在微生物代谢合成蛋白质中发挥重要作用, 其含量多少会对污泥中蛋白质含量产生影响, 而有研究结果[31]表明, 污泥胞外聚合物(EPS)中蛋白质与多糖的比值与电渗透脱水后污泥的最终含水率呈正相关性。

3.2. 有机聚合物

有机聚合物主要是通过架桥及中和污泥表面电荷、减弱静电斥力的方式凝聚污泥絮体, 改善其的脱水性能[32]。

M. Citeau [32]等人对比了五种有机聚合物及它们的组合作用于污泥电渗透脱水, 发现无论是在最终

污泥泥饼的含水率还是能耗方面,各实验组与空白组均无显著差异。这与先前 Llenc Gingerich [33]等人的研究结果是一致的,他们发现添加聚合物(polymer)的剂量大小,对污泥最终含水率无明显的影响。Hans Saveyn [34]等人也表示聚合电解质的特征和剂量对污泥压力脱水有明显作用,但对电渗透脱水的作用并不明显,他们从经济角度上建议添加适当剂量的聚合电解质,使污泥在机械脱水时脱去尽可能多的水,然后再进行电渗透脱水,以保证较少的能耗。

3.3. 絮凝剂

絮凝剂对污泥脱水性能的作用与有机聚合物的作用基本一致。目前运用较多的絮凝剂为聚丙烯酰胺(PAM)。

李静[21]对三种絮凝剂(NPAM、CPAM、APAM)对电渗透脱水效果的影响进行比较,发现其中 APAM 的处理效果并不理想,可能与污泥颗粒表面带负电荷有关。而 CPAM 的脱水效果要高于 NPAM,可能是由于 NPAM 对污泥所带负电荷的中和作用较小,以吸附架桥作用为主导,而 CPAM 不止有吸附架桥的作用,同时还可对污泥表面的负电荷起到中和作用。对于 CPAM 来说,其分子量越大,给污泥中水分子带来的黏度越大,对脱水存在阻碍,因此宜选用分子量小的阳离子絮凝剂。黎艳[35]对 CPAM 的投加量对电渗透脱水效果进行探究,发现随着投药量的增加,污泥的含水率是逐渐降低的,但含水率降低的趋势变缓,在最佳的实验条件下可使污泥泥饼含水率降至 78.66%,比空白组降低了 9.3%。Jiaxiang Zhou [17]的实验结果同样也表明了 CPAM 的投加可促进污泥电渗透脱水,在电压 40 V 作用 180 min 后,添加 3%(w/w), 1 g/L 的 CPAM 可使污泥的含水率由 96.7%降至约 92.14%,相比于未添加 CPAM 的空白组,含水率减少了 1.47%。

4. 生物方法联合电渗透技术

主要是通过生物的氧化还原活动导致污泥酸化,提升污泥的自然沉降率,且在生物活动的作用下,污泥表面电荷发生变化,使得污泥结构由絮体变为紧实,提高其的脱水性能[36]。

这方面的研究并没有太多。Sharif Ibeid [37]等人在对膜生物反应器添加电的条件下探究活性污泥脱水率的实验中发现,连续流电—生物反应器相比于传统膜生物反应器,在分别反应 50 d 和 120 d 的情况下,污泥特性比阻降低 8 和 86 倍。电流密度为 15~35 A/m²的情况下,连续流电—生物反应器在 100 kPa 真空压力的作用下,污泥泥饼平均含水率为 82%,而相同作用条件下,传统膜生物反应器污泥泥饼平均含水率约为 93%。

5. 结语

现已有大量的研究证实了电渗透技术运用于污泥脱水的高效可行性,但随着电渗透过程的持续,污泥泥饼中水分流失所导致的泥饼电阻增大,将会对污泥脱水产生不利影响,同时使得能耗增加。因此对于电渗透脱水技术运用的推广,一种有效的辅助手段是十分有必要的。此外,辅助手段的选用也需考虑到其对污泥性质产生的影响是否会干扰到污泥的后续处理处置及回收利用。

参考文献 (References)

- [1] Lee, J.-K., Shin, H.-S., Park, C.-J., et al. (2002) Performance Evaluation of Electrodewatering System for Sewage Sludges. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **19**, 41-45. <https://doi.org/10.1007/BF02706872>
- [2] 卢宁. 污泥的电渗透脱水技术[J]. 石油化工应用, 2011(11): 85-87.
- [3] 马德刚, 张书廷, 季民, 等. 污泥电渗透脱水操作条件的优化研究[J]. 中国给水排水, 2005(5): 36-38.
- [4] 尹协东, 梁晶. 电化学法污泥深度脱水研究[J]. 污染防治技术, 2014(4): 49-52.

- [5] Lee, J.E., Lee, J.K. and Choi, H.K. (2007) Filter Press for Electrodewatering of Waterworks Sludge. *Drying Technology*, **25**, 1985-1993. <https://doi.org/10.1080/07373930701727333>
- [6] Yang, G.C.C., Chen, M.-C. and Yeh, C.-F. (2011) Dewatering of a Biological Industrial Sludge by Electrokinetics-Assisted Filter Press. *Separation and Purification Technology*, **79**, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.02.012>
- [7] Alshawabkeh, A.N., Sheahan, T.C. and Wu, X. (2004) Coupling of Electrochemical and Mechanical Processes in Soils under DC Fields. *Mechanics of Materials*, **36**, 453-465. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(03\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(03)00071-1)
- [8] Iwata, M. and Jami, M.S. (2010) Analysis of Combined Electroosmotic Dewatering and Mechanical Expression Operation for Enhancement of Dewatering. *Drying Technology*, **28**, 881-889. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.490505>
- [9] Barton, W.A., Miller, S.A., Veal, C.J., et al. (1999) The Electrodewatering of Sewage Sludges. *Drying Technology*, **17**, 498-522. <https://doi.org/10.1080/07373939908917548>
- [10] Yu, X.Y., Zhang, S.T., Xu, H., et al. (2010) Influence of Filter Cloth on the Cathode on the Electroosmotic Dewatering of Activated Sludge. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **18**, 562-568
- [11] 郝健. 电渗透法污泥减量技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [12] 李里特, 李修渠, 薛文通. 提高电渗透脱水速率的措施[J]. 食品科学, 1999(3): 18-21.
- [13] 董立文. 城镇机械脱水污泥的电渗透深度脱水技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2012.
- [14] Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. and Hoadley, A.F.A. (2010) Electrical Field: A Historical Review of Its Application and Contributions in Wastewater Sludge Dewatering. *Water Research*, **44**, 2381-2407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.033>
- [15] Larue, O., Mouroko-Mitoulou, T. and Vorobiev, E. (2001) Pressurized Electroosmotic Dewatering in a Filter Cycle. *Drying Technology*, **19**, 185-198. <https://doi.org/10.1081/DRT-100001360>
- [16] Navab-Daneshmand, T., Beton, R., Hill, R.J. and Frigon, D. (2015) Impact of Joule Heating and pH on Biosolids Electro-Dewatering. *Environmental Science & Technology*, **49**, 5417-5424. <https://doi.org/10.1021/es5048254>
- [17] Zhou, J.X., Liu, Z., She, P. and Ding, F.X. (2007) Water Removal from Sludge in a Horizontal Electric Field. *Drying Technology*, **19**, 627-638.
- [18] 黄玉成, 张维佳, 金秋冬, 郝利娜. 自然冷融法对污泥沉降及脱水性能研究[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(4): 43-46.
- [19] 李恺, 叶志平, 王凤英, 李焕文. 冷融技术联合化学调理对污泥脱水性能的影响及其机理[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 536-543.
- [20] 马德刚, 翟君, 柯忱, 苑梦影, 林伟强. 超声辅助对污泥电脱水的特性改进[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 3991-3996.
- [21] 李静. 电化学处理及其组合技术对污泥脱水性能影响[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2014.
- [22] 李亚林, 刘蕾, 张毅, 魏添, 史丹. 电渗透/Fe-过硫酸盐氧化协同强化污泥深度脱水[J]. 化工学报, 67(9): 4013-4019.
- [23] 卢宁, 莫文宁, 魏婧娟. 硝酸钠强化污泥电渗透脱水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1): 68-70.
- [24] 俞力. 污水厂污泥电解法脱水研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [25] 季雪元, 王毅力, 冯晶. 水平电场作用下活性污泥的脱水研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4393-4399.
- [26] 黄殿男, 李薇, 王冬, 傅金祥. 碱-电法对污泥脱水性能作用的试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015(5): 936-943.
- [27] Loginov, M., Citeau, M., Lebovka, N. and Vorobiev, E. (2013) Electro-Dewatering of Drilling Sludge with Liming and Electrode Heating. *Separation and Purification Technology*, **104**, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.11.021>
- [28] Lee, J.-E. (2011) The Effect of the Addition of Fly Ash to Municipal Digested Sludge on Its Electroosmotic Dewatering. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **13**, 259-263. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0023-z>
- [29] Citeau, M., Larue, O., Vorobiev, E., et al. (2011) Effect of Electrolytes Content on the Electro-Osmotic Dewatering of Agro-Industrial Sludge.
- [30] 刘吉宝, 魏源送, 王亚炜, 才兴, 邵春岩. 基于预处理的强化污泥脱水研究进展[J]. 中国给水排水, 2014(14): 1-6.
- [31] 于晓艳, 王润娟, 支苏丽, 张书延, 马德刚. 胞外聚合物对生物污泥电渗透脱水特性的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(15): 1-5.
- [32] Citeau, M., Larue, O. and Vorobiev, E. (2011) Influence of Salt, pH and Polyelectrolyte on the Pressure Elec-

- tro-Dewatering of Sewage Sludge. *Water Research*, **45**, 2167-2180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.01.001>
- [33] Gingerich, I., Neufeld, R.D. and Thomas, T.A. (1999) Electroosmotically Enhanced Sludge Pressure Filtration. *Water Environment Research*, **71**, 267-276(10).
- [34] Saveyn, H., Pauwels, G., Timmerman, R. and Van der Meeren, P. (2005) Effect of Polyelectrolyte Conditioning on the Enhanced Dewatering of Activated Sludge by Application of an Electric Field during the Expression Phase. *Water Research*, **39**, 3012-3020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.002>
- [35] 黎艳, 林海, 朱向东, 刘伟岩. 板式电凝聚强化市政污水处理厂剩余污泥脱水的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(4): 572-575.
- [36] 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.
- [37] Ibeid, S., Elektorowicz, M. and Oleszkiewicz, J.A. (2015) Electro-Conditioning of Activated Sludge in a Membrane Electro-Bioreactor for Improved Dewatering and Reduced Membrane Fouling. *Journal of Membrane Science*, **494**, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.051>

附录

Table S1. Summary of the assistive technology of electroosmosis sludge dewatering

附表 1. 污泥电渗透脱水辅助技术汇总

辅助方法	参考文献	装置	污泥	添加剂/温度/功率	压力	电场	时间	最终含水率	能耗	备注
物理方法	[11]	重物垂直电场反应器	污水污泥 79.6%~81.3%	—	0 kPa	恒定 30 V	20 min	64.5%	0.213 kWh/kg DS	文中仅给出最优压力值下的脱水能耗
					25 kPa					
					37 kPa					
					49 kPa					
					61 kPa					
74 kPa	58.8%	—								
机械	[15]	空压水平电场反应器	硫酸盐硅土 94%	—	5 bar	恒定 1 A	—	70%	0.22 kWh/kg 水	—
					15 bar			66%	0.16 kWh/kg 水	
物理方法	[3]	重物垂直电场反应器	污水污泥 82%~83%	—	10 kPa	6 V/mm	3.5 min	70%	38.17 kWh/m ³ 泥	—
					15 kPa		1.75 min		41.54 kWh/m ³ 泥	
					20 kPa		2.3 min		29.97 kWh/m ³ 泥	
					25 kPa		2.74 min		41.82 kWh/m ³ 泥	
热干化	[16]	活塞垂直电场反应器	污水污泥 81.5%~85.9%	未冷却的电极(6 min 后泥饼温度达到 95.7°C ± 1.9°C) 冷却电极(泥饼温度保持在 47°C 以下)	—	—	15 min	约 59.66%	45.3 ± 2.4 Wh	—
							约 71.13%	32.0 ± 0.7 Wh		
物理方法	[17]	方形水平电场反应器	污水污泥 96.7%	室温(20°C)	—	20 V	180 min	约 93.61%	—	在设置温度下放置 1 小时后马上进行电渗透脱水
				中温(50°C)				约 96.05%		
冻融	[17]	方形水平电场反应器	污水污泥 96.7%	室温(20°C)	—	20 V	约 180 min	约 93.61%	—	低温处理污泥先在设定温度下放置 1 小时后室温放置 30 min 再进行实验
				低温(-15°C)			约 100 min	约 93.61%		

Continued

物理方法	超声波	[13]	重物垂直电场反应器	污水污泥 96.42%~97%	0 kJ/kg DS	76 kPa	30 V/cm	9 min	60%	0.0960 kWh/kg 水	污泥超声后经离心至含水率为85%~87%后再进行电渗透
					594 kJ/kg DS			8 min		0.0916 kWh/kg 水	
					1485 kJ/kg DS			9 min		0.0976 kWh/kg 水	
					2969 kJ/kg DS			10 min		0.1076 kWh/kg 水	
					5940 kJ/kg DS			18 min		0.1211 kWh/kg 水	
					11880 kJ/kg DS			14 min		0.1167 kWh/kg 水	
					17820 kJ/kg DS			16 min		0.1748 kWh/kg 水	
物理方法	超声波	[20]	空压垂直电场反应器	污水污泥 82% ± 2%	0 W (原泥)	0.1 MPa	60 V	5.5 min	约 79.00%	0.428 kWh/kg 水	仅给出最优组合及原泥超声电渗脱水的能耗, 最优组合中超声波施加时间为3.5 min
									20 W	约 72.70%	
化学方法	无机化合物	[21]	圆柱形水平电场反应器	污水污泥 91.42%	(0%~2.0%*DS) NaCl	—	20.88 V/cm	—	57%~65%	—	含水率最低值出现在1.0%*DS
					(0%~2.0%*DS) CaCl ₂				56%~67%	—	含水率最低值出现在1.0%*DS
					(0%~2.0%*DS) Na ₂ SO ₄				59%~65%	—	含水率最低值出现在0.5%*DS
					(0%~2.5%*DS) NaHCO ₃				63%~75%	—	含水率最低值出现在1.5%*DS
[23]	重物垂直电场反应器	污水污泥 83%~85%	NaNO ₃	0 kg/t DS	100 kN	30 V	19 min	60%	1380 kWh/t DS	—	
				30 kg/t DS			8.6 min		1100 kWh/t DS		
				60 kg/t DS			8.3 min		1500 kWh/t DS		

Continued

化学方法	[13]	重物垂直电场反应器	污水污泥 85.66%~86.27%	Na ₂ SO ₄	0 g/kg DS	76 kPa	30 V/cm	20 min	51.2%	0.138 kWh/kg 水	能耗为污泥含水率达到 60% 时的能量消耗
					7.1 g/kg DS				51.4%	0.170 kWh/kg 水	
					14.2 g/kg DS				47.4%	0.183 kWh/kg 水	
					21.3 g/kg DS				48.1%	0.215 kWh/kg 水	
					28.4 g/kg DS				45.7%	0.234 kWh/kg 水	
	[24]	长方形水平电场反应器	污水污泥 97.83% ± 0.85%	NaCl	0 kg/t DS	—	6 V/cm	60 min	72.69%	—	—
					1 kg/t DS				72.74%		
					3 kg/t DS				72.11%		
					5 kg/t DS				70.03%		
					7 kg/t DS				67.23%		
					10 kg/t DS				64.27%		
					15 kg/t DS				64.05%		
	20 kg/t DS	64.11%									
	[25]	方形水平电场反应器	污水污泥 99.25% ± 0.05%	原泥	pH 6.93	—	40 V	120 min	约 97.12%	—	该最终含水率由脱水率计算得出
				HCl	调至 pH 5.50				约 97.76%		
				NaOH	调至 pH 10.52				约 98.18%		
				原泥	电导率 1.46 mS/cm				约 98.48%		
				KCl	调至电导率 2.68 mS/cm				约 98.60%		
	[26]	圆柱形环状电场反应器	污水污泥 99%	原泥	—	—	7 V/cm	60 min	74.5%	—	处理 30 min 后通电, 含水率 84.5%
				NaOH	10 m mol/L				84%左右		处理 30 min 后通电, 含水率 84%左右
				Ca(OH) ₂	20 m mol/L				72.5%		处理 30 min 后通电, 含水率 79.6%

Continued

化学方法	无机化合物	[11]	重物垂直电场反应器	污水污泥 79.6%~81.3%	NaCl	0 g/L	11 kPa	30 V	15 min	0.517 kWh/kgDS	—	时间为污泥含水率达到60%所需时长, 能耗为污泥含水率达到60%时的能量消耗	
						1 g/L			10 min	0.522 kWh/kgDS			
						2 g/L			10 min	0.608 kWh/kgDS			
						3 g/L			8 min	0.586 kWh/kgDS			
						4 g/L			8 min	0.654 kWh/kgDS			
						调至 pH 10.98			55.1%	0.862 kWh/kgDS			
						NaOH			调至 pH 9.36	56.2%			0.632 kWh/kgDS
						调至 pH 5.83			20 min	55.6%			0.573 kWh/kgDS
						H ₂ SO ₄			调至 pH 3.91	54.2%			0.707 kWh/kgDS
						原泥			pH 7.56~7.79	57.6%			0.380 kWh/kgDS
[22]	重物垂直电场反应器	污水污泥 81.42%~85.71%	FeSO ₄ ·7H ₂ O + Na ₂ S ₂ O ₈	0	17.59 kPa	11 V/cm	—	69.32%	—	—			
				1:1				58.47%					
[28]	活塞垂直电场压滤机	市政消化污泥 97%	原泥	0 wt%	4 kg/cm ²	40 V/cm	20 min	64 wt%	—	—			
				10 wt%				65 wt%					
				20 wt%				57 wt%					
[17]	方形水平电场反应器	污水污泥 96.7%	原泥	0	—	40 V	180 min	约 93.61%	—	该最终含水率由脱水率计算得出			
				FeCl ₃				3%(w/w) 1.5 g/L			约 92.49%		
[29]	圆筒活塞水平电场反应器	活性污泥 97%	Na ₂ SO ₄	pH 5.3, 电导率 3.6 mS/cm	5 bar	80 A/m ²	6 h 40 min	60%	0.32 kWh/kg水	污泥经预处理后进行实验, 处理后污泥含水率为87%			
				调至电导率 5.9 mS/cm				4 h 30 min			0.26 kWh/kg水		
				调至电导率 9.5 mS/cm				3 h 03 min			0.26 kWh/kg水		
				NaOH				调至 pH 9.3			3 h 58 min	0.28 kWh/kg水	
				H ₂ SO ₄				调至 pH 2.6			5 h 05 min	0.33 kWh/kg水	

Continued

无机化合物	[27]	圆柱形水平电场反应器	钻孔污泥 76.6%	CaO	500 kPa	80 A/m ²	—	0 g/L	约 34.10%	340 kJ/kg 水	能耗统一为污泥中含水率降至 36%时的能量消耗			
								0.3 g/L	约 32.70%	约 330 kJ/kg 水				
								0.5 g/L	约 33.75%	约 290 kJ/kg 水				
								1.0 g/L	约 35.60%	270 kJ/kg 水				
有机聚合物	[32]	圆柱空压水平电场反应器	工农工厂污泥 97%~99%	原泥	500 kPa	80 A/m ²	11000 s	—	约 64%	EM840TBD、FL4280、FO4990、Flosperse1000、Flosperse9000 为聚合有机物的种类				
				12g EM840TBD/kg DS				约 60%						
				12g FL4280/kg DS+ 1g FO4990/kg DS				约 58%						
				5g Flosperse1000/kg DS+ 6g FO4990/kg DS				约 58%						
				5g Flosperse9000/kg DS+ 8g FO4990/kg DS				约 56%						
	[33]	空压垂直电场反应器	污水污泥 97%~98.1%	7.5 g/kg DS	51.7 kPa	60 V	20 min	—	约 60%	未给出聚合物类型				
				10 g/kg DS				约 60%						
				20 g/kg DS				约 60%						
				Zetag DP7 7442				400 kPa	25 V/cm		3600 s	—	约 0.2 ± 0.1 kWh/L 水	添加剂一栏为聚合物的类型, 3600s 中, 前 1800s 为机械脱水, 后 1800s 为机械联合电渗透脱水
				Zetag 7867FS40										
Zetag 7878FS40														
Magnafloc LT 22														
Zetag 7878FS25														
[34]	活塞垂直电场反应器	污水污泥 96.37%~98.01%	Zetag 7650	400 kPa	25 V/cm	3600 s	—	约 0.2 ± 0.1 kWh/L 水	添加剂一栏为聚合物的类型, 3600s 中, 前 1800s 为机械脱水, 后 1800s 为机械联合电渗透脱水					
			Zetag 7651											
			Zetag 7899											
			Zetag 7555											
			0% DS							约 65%				
			0.03% DS							约 56%				
			0.05% DS							约 58%				
0.10% DS	约 59%													
絮凝剂	[21]	圆柱水平电场反应器	污水污泥 91.42%	NPAM	—	20.88 V/cm	20 min	—	APAM 在预实验中证明效果不佳, 并未进行正式实验					
										0.15% DS	约 59%			
										0% DS	约 65%			
										0.2% DS	约 64%			
										0.3% DS	约 61%			
										0.5% DS	约 60%			
										0.8% DS	约 58%			
[21]	圆柱水平电场反应器	污水污泥 91.42%	CPAM 600	—	20.88 V/cm	20 min	—	CPAM600、CPAM900、CPAM1200 代表不同絮凝剂的类型, 差别在于分子大小						
									0% DS	约 65%				
									0.2% DS	约 64%				
									0.3% DS	约 61%				
									0.5% DS	约 60%				
									0.8% DS	约 58%				

Continued

化学方法	絮凝剂	[21] 圆柱水平电场反应器	污水污泥 91.42%	—	20.88 V/cm	20 min	0% DS	约 65%	—	CPAM600、CPAM900、CPAM1200 代表不同絮凝剂的类型, 差别在于分子大小	
							0.1% DS	约 64%			
							CPAM 900	0.2% DS			约 60%
							0.3% DS	约 59%			
							0.4% DS	约 62%			
							0% DS	约 65%			
							0.15% DS	约 63%			
							CPAM 1200	0.20% DS			约 61%
							0.25% DS	约 59%			
							0.30% DS	约 63%			
		[35] 玻璃电解槽	污水污泥 2~5 g/L	—	0.3 A	8 min	7 g/kg DS	约 86%	—	—	
							CPAM	9 g/kg DS			约 84.5%
							11 g/kg DS	约 84%			
							13 g/kg DS	约 83.5%			
[17] 方形水平电场反应器	污水污泥 96.7%	—	40 V	180 min	原泥	0	约 93.61%	—	该最终含水率由脱水率计算得出		
					CPAM	3% (w/w) 0.1 g/L	约 92.14%				
生物方法	[37] 圆柱水平电场膜生物反应器	污水污泥 99%~99.5%	—	100 kPa	—	传统膜生物反应器	0	约 93%	—	—	
						电—膜生物反应器	15 A/m ²	约 82%			

注: DS——污泥干重; wt%——重量百分比; —表示文中未提及; 当数据之前出现“约”字表该数据文献中未直接给出, 由所提供的图表或由公式间接取得; 计算公式[21]: 污泥含水率 = $\frac{m_s \times W_0 - m_w}{m_s - m_w} \times 100\%$, 污泥脱水率 = $\frac{m_w}{m_s \times W_0} \times 100\%$, 式中: m_w 为滤出液质量, g; m_s 为初始污泥总质量, g; W_0 为初始污泥含水率, %。

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org