

电渗透交变电场联合双氧化技术 污泥深度脱水研究

李亚林^{1,2*}, 刘 蕾¹, 周 涛², 王尊严¹, 毕雅洁¹, 陈高昂¹

(1.河南工程学院资源与环境学院,河南 郑州 451191; 2.同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要:以带式压滤机处理过的一次脱水污泥为研究对象,运用电渗透交变电场联合双氧化技术对污泥进行脱水,研究不同单因素条件对污泥深度脱水的影响。利用响应曲面法的 Box-Behnken 中心组合设计对污泥脱水条件进行优化,分析了投药摩尔比 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 、电压梯度、时间比之间的交互作用,探究最佳工艺参数。单因素实验结果表明,当投药摩尔比为 0.96:1、电压梯度为 13.76 V/cm、不等占空比为 4.59:1 时,污泥含水率可降至 53.99%。优化结果显示,回归模型可达到显著水平,在实验研究区域内拟合较好,模型的精确度、准确度及可信度均在可信范围内,并且各因素之间交互作用显著,可以真实地反映对污泥脱水效果的影响。

关键词:污泥;电渗透;交变电场;高级氧化;脱水

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)08-0180-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.08.038

Study on deep-dewatering of sludge by electro-osmosis under alternating electric field combined with double oxidation technology

LI Ya-lin^{1,2*}, LIU Lei¹, ZHOU Tao², WANG Zun-yan¹, BI Ya-jie¹, CHEN Gao-ang¹

(1.School of Resources and Environment Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking the primary dewatering sludge treated by belt filter press as the research object, the effects of different signal factors on deep dewatering of sludge are systematically studied by means of electro-osmosis under alternating electric field combined with double oxidation technology. By means of the Box-Behnken Center combination design of response surface method, the dewatering conditions for sludge is optimized, and the interaction among the dosage ratio of oxidation agents, voltage gradient and time ratio are analyzed to seek for the best process parameters. The single factor experiment results show that the moisture content of dewatered sludge can be reduced to 53.99% when the dosage ratio is 0.96:1, the voltage gradient is 13.76 V·cm⁻¹ and the unequal duty cycle is 4.59:1. The regression model can reach a significant level, which fits well in the experimental study area with a good precision, accuracy and reliability of the model in the feasible range. In addition, there is a significant interaction among various factors, which can truly reflect the effect on sludge dewatering.

Key words: sludge; electro-osmosis; alternating electric field; advanced oxidation; dewatering

近年来,随着各地污水处理厂新建及改扩建数量的不断增加,作为污水处理副产物的污泥产生量激增,年产含水率为 80% 的污泥多达 5 000 万 t,传统的脱水技术很难将污泥含水率降至 60% 以下,无法满足后续处置的要求^[1]。

电渗透脱水技术是一种新兴的污泥深度脱水技术, Mahmoud 在传统机械压滤脱水的基础上辅助以电渗透技术,可以将污泥的含水率降至 45% 左右,但脱水时间长、能耗损失大^[2];冯源和马德刚通过细化操作条件和在传统电渗透的基础上辅助适当的机械压力,提高了电渗透污泥脱水的效果,降低了脱水过程中的能耗^[3-4]。但电渗透脱水耗时长、电

能消耗较高仍是限制其大规模应用的瓶颈问题^[5]。

为了解决上述问题,有学者通过改变电场条件或与其他技术联用的方法对物料进行处理,以期提高电渗透的脱水效率和改善物料的脱水效果^[6]。李修渠^[7]采用改变电场的方式对大豆残渣进行脱水,发现改变电场模式能够提高电渗透脱水的速率,但过程中仍存在大量热损失。Xiao^[8]采用 Na₂SO₄ 辅助以电场作用于废弃的活性污泥,有效地改善了污泥的脱水效果;Zhen^[9]将电渗透与 Fe²⁺/过硫酸盐氧化技术相结合发现,污泥中的有机菌胶团和细胞壁在被破坏后可以释放 EPS 和胞内水,提高了脱水效率,但单独一种氧化剂与电渗透联用对于污泥含

收稿日期:2019-11-07;修回日期:2020-06-08

基金项目:河南省科技攻关项目(162102310402);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS239);教育部中西部高等学校青年骨干教师国内访问学者项目(19042)

作者简介:李亚林(1984-),男,博士,副教授,研究方向为固体废物处理与资源化,通讯联系人,li_ya_lin@haue.edu.cn。

水率的降低作用有限,最终污泥含水率仍无法降至60%以下而达到深度脱水的目的。

因此,笔者采用基于交变电场的电渗透技术与双氧化技术联用,在交变电场中构建 $\text{CaO}_2/(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 双氧化体系, CaO_2 在电解作用下提供碱性环境和热效应, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 在碱性热活化条件下产生更多的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$, 诱发链式反应产生 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_5^{\cdot-}$ 等自由基,在交变电场条件下使多种自由基均匀分布在污泥中,达到污泥深度脱水的目的,探究电渗透交变电场联合双氧化技术应用于污泥脱水的可行性及影响因素。

1 材料试剂与实验装置

1.1 材料

污泥含水率为 $(82.0 \pm 2.5)\%$, 取自郑州市新郑某污水处理厂,经过带式压滤机一次脱水处理。双氧化药剂 CaO_2 和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 均为分析纯。

1.2 实验装置

自制污泥实验脱水装置如图1所示。

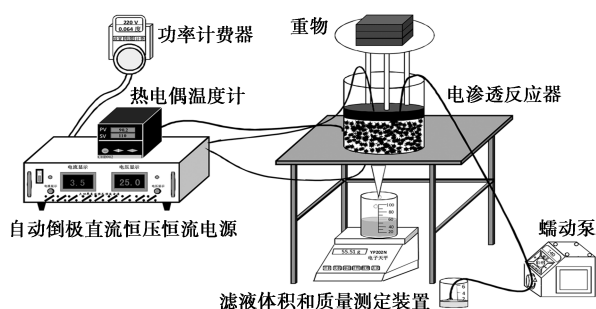


图1 电渗透实验装置

2 实验方法

2.1 污泥脱水极限的设定

根据不同单因素实验条件,将加入药剂搅拌均匀的污泥分成2等份放入脱水装置,放置重物后开始实验,过程中脱除水的质量及泥饼的温度、电流每隔10s记录1次。脱水极限设定为0.2g/min,即污泥脱水质量小于0.2g/min时,实验可以终止^[10]。

2.2 污泥脱水指标的测定

污泥含水率用烘干称重法测定^[11],含水率计算式为:

$$W = [(M_0 \cdot W_0 - M) / (M_0 - M)] \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为污泥的理论含水率,%; M_0 为未脱水污泥的质量,g; W_0 为未脱水污泥的含水率,%; M 为实时脱除的水分,g。

含水率降低率的计算式为:

$$W_r = [(W - W_0) / W_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_r 为污泥的含水率降低率,%。

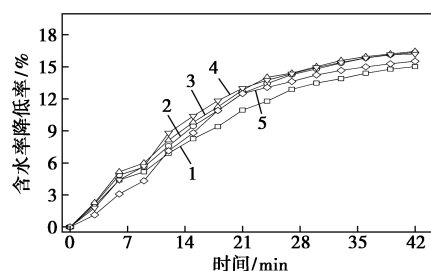
2.3 交变电场模式的控制方法

实验初始阶段施加正向电场,脱水过程中根据需求进行电场模式切换,形成负向电场,当正向电场与负向电场时间相等时,定义为等占空比;反之,为不等占空比^[7]。定义阳极为上层电极,阴极为下层电极的情况为AU(Anode-upward)模式;反之,为AD(Anode-downward)模式。AD或者AU模式持续的时间定义为交换电极停留时间(Exchange electrode stayed time,简称EST)。

3 结果与分析

3.1 投药摩尔比对污泥脱水性能的影响

称取150g污泥(控制阴阳极间距为2.0cm),设置不等占空比为6:1、电压梯度为12.5V/cm、机械压力为23.59kPa,根据前期实验固定 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为30mg/(gDS)^[12],改变 CaO_2 与 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 的摩尔比进行脱水实验,结果如图2所示。

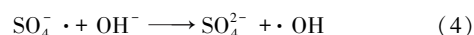


1—0:1;2—0.5:1;3—1.0:1;4—1.5:1;5—2.0:1

图2 投药摩尔比对污泥脱水效果的影响

由图2可知,当 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 小于1:1时, W_r 随着 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 的增加而增加, W_r 最佳为16.45%;当 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 大于1:1时,随着投药量的增加, W_r 逐渐降低。这是因为当 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 较小时,体系中产生的 $\cdot\text{OH}$ 与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 数量有限,无法对污泥中的有机物质产生有效破坏,结合水得不到较好的释放而影响脱水效果。

当 $n(\text{CaO}_2) : n[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 较大时,如式(3)和式(4)所示,生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀聚集在滤布上,同时 Ca^{2+} 的增加促使污泥絮体团聚,阻塞了排水通道,从而降低了污泥的脱水效果^[13]。



当在体系中投加适当的 CaO_2 与 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 时, 污泥不仅可以在 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_4\cdot^-$ 的作用下氧化破解, 而且在 CaO_2 活化后产生的碱性环境下, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 可以进行碱性热活化, 产生更多的 $\text{SO}_4\cdot^-$, 还可以诱发链式反应产生 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_5\cdot^-$ 、 $\text{S}_2\text{O}_8\cdot^-$ 等自由基, 可以进一步有效地破坏污泥中的有机质, 加快污泥的分解, 改善脱水效果^[14]。

3.2 电压梯度对污泥脱水效果的影响

称取 150 g 污泥, 在投药摩尔比为 1:1、不等空比为 6:1、阴阳极间距为 2.0 cm、机械压力为 23.59 kPa 的条件进行不同电压梯度的脱水实验, 结果如图 3 所示。

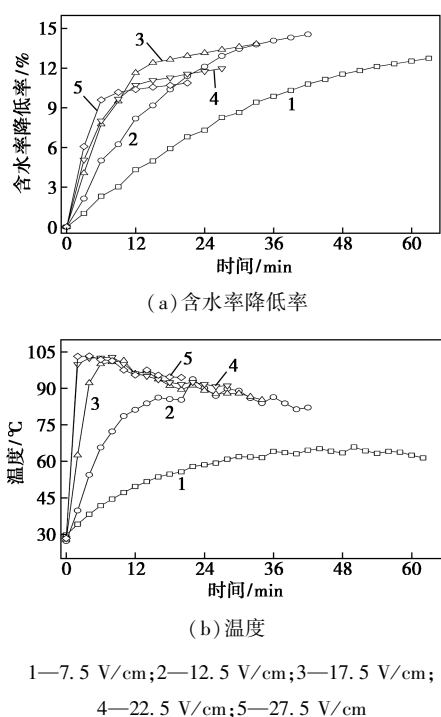


图 3 电压梯度对污泥脱水效果的影响

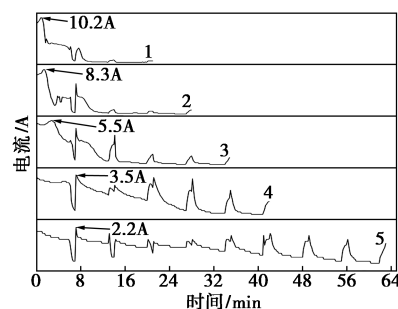
由图 3(a) 可知, 当电压梯度大于 12.5 V/cm 时, 随着电压梯度的提升, W_r 呈现降低的趋势, 脱水时间逐渐缩短; 电压梯度小于 12.5 V/cm 时, W_r 随着电压梯度的增加而升高。在 0~6 min 内的 AU 模式下, 污泥中的电阻增大, 体系温度开始快速上升, 在此阶段 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 易被热活化分解成 $\text{SO}_4\cdot^-$, 可以更好地破坏污泥中的有机质^[15], 反应如式(5)所示。同时, 高温有助于降低污泥的黏度系数, 提高溶液的电渗流速度, 脱水效果改善^[16-17]。



由图 3(b) 可知, 在 AD 模式下, 污泥的温度短

时间内达到 100℃ 左右, 此时, 污泥内部由饱和态转变为非饱和状态, 空隙水压变为负值, 产生水力梯度引起与电渗流方向相反的水力渗流, 迫使水分向上移动^[18], 水分的迁移对 AU 模式下造成上层泥饼干化的现象起到的一定的缓解作用。

这一变化可以从体系电流变化情况得到印证, 如图 4 所示。由图 4 可知, 脱水初期污泥电阻一定, 电压梯度的增加会使体系电流峰值持续升高。在 AU 模式下, 电流先逐渐下降, 切换到 AD 模式后, 污泥中的水分反向运动, 由于离子间的相互作用增加了水分的迁移阻力, 电流迅速下降。再次切换到 AU 模式, 电阻短时间内增大, 温度快速上升, 打破了给水污泥的钝化性质^[19]。随后离子迁移速率加快, 电阻减小, 电流激增形成峰值; 之后, 污泥水分不断脱除, 电阻变大, 同时生成的气体在阴阳两极形成气膜, 水分的迁移阻力加剧, 电渗流在污泥内部发生局部停止, 水分迁移达到极限, 脱水终止。



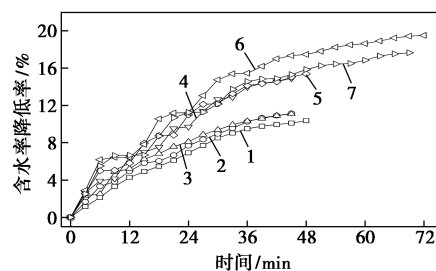
1—7.5 V/cm; 2—12.5 V/cm; 3—17.5 V/cm; 4—22.5 V/cm;
5—27.5 V/cm

图 4 不同电压梯度下电流的变化

3.3 电场变化模式对污泥脱水效果的影响

3.3.1 等空比对污泥脱水效果的影响

称取 150 g 污泥, 设置投药摩尔比为 1:1、电压梯度为 12.5 V/cm、机械压力为 23.59 kPa, 等空比对污泥脱水效果的影响如图 5 所示。



1—1:1; 2—2:2; 3—3:3; 4—4:4; 5—5:5; 6—6:6; 7—7:7

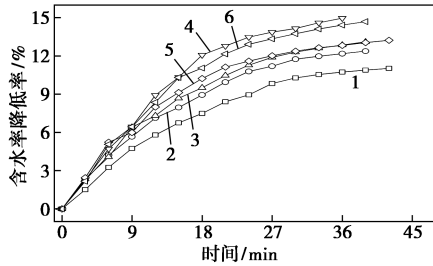
图 5 等空比对污泥脱水效果的影响

由图 5 可知, 随着等空比的增加 W_r 先增加后

降低。但由于正反电极的 *EST* 一样,大部分水分在污泥中做往返运动,只有部分水分在重力作用下排出,脱水时间接近传统电渗透,脱水效果不明显。

3.3.2 不等占空比对污泥脱水效果的影响

称取 150 g 污泥,设置投药摩尔比为 1:1、电压梯度为 12.5 V/cm、机械压力为 23.59 kPa,不等占空比对污泥脱水效果的影响如图 6 所示。



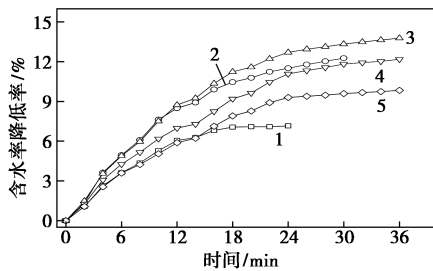
1—2:1;2—3:1;3—4:1;4—5:1;5—6:1;6—7:1

图 6 不等占空比对污泥脱水效果的影响

由图 6 可知,随着不等占空比的增加, W_r 呈现先增加后减小的趋势,当不等占空比为 5:1 时,上层污泥迅速失水,切换到 AD 模式后,水分迁移缓解了上层污泥的过度干化现象^[20],反向迁移的 $SO_4 \cdot$ 和 $\cdot OH$ 可以有效快速地分解污泥中的有机物^[21]。当不等占空比大于 5:1 时, AU 模式下通电时间较长接近传统电渗透,反向电压迁移的水分不足以改变阳极干化现象;当不等占空比小于 5:1 时, AU 模式与 AD 模式切换过于频繁,污泥中的部分水分来不及脱除,又被反向电场力跟随离子运动带回上层污泥,降低了脱水效率。

3.4 阴阳极间距对污泥脱水效果的影响

设置投药摩尔比为 1:1、电场不等占空比为 5:1、电压梯度为 12.5 V/cm、机械压力为 23.59 kPa,加入不同质量的污泥,阴阳极间距对污泥脱水效果的影响如图 7 所示。



1—1.0 cm;2—1.5 cm;3—2.0 cm;4—2.5 cm;5—3.0 cm

图 7 阴阳极间距对污泥脱水效果的影响

由图 7 可以看出,当阴阳极间距小于 2.0 cm 时,随着间距的增加污泥脱水效果逐渐改善,而当阴

阳极间距大于 2.0 cm 时,继续增加污泥投加量,即阴阳极间距增加污泥脱水效果恶化。这是因为厚度过小时,在电压作用下上层污泥迅速脱水干裂,与电极的接触面积变小,致使电流迅速降低,脱水效果变差^[19];而厚度增加后,污泥中离子在阴阳极板间运动的路程和阻力均变大,电阻随着厚度增大而变大,则恒压模式下电流减小,脱水效果变差。

3.5 表面响应法优化实验

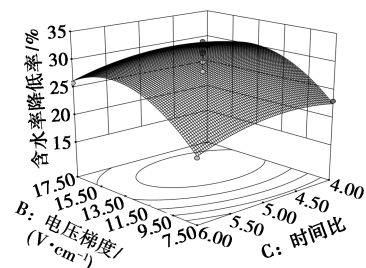
为了进一步研究各单因素之间的交互作用,采用表面响应法进行优化实验。通过软件 Design-expert 8.0 实现 Box-Behnken 的设计过程^[22],选取投药摩尔比、电压梯度、时间比 3 个单因素,以 W_r 为响应值,利用响应曲面法对其进行优化。设定因素水平编码,如表 1 所示。中心组实验重复 5 组,共进行 17 组实验。

表 1 RSM 优化实验设计因素水平

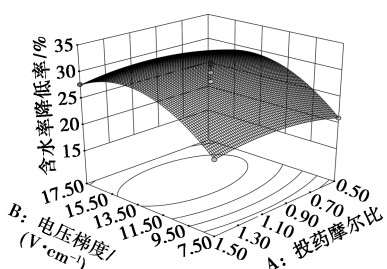
变量	编码水平		
	-1	0	1
A:投药量比值	0.5:1	1:1	1.5:1
B:电压梯度/(V·cm ⁻¹)	7.5	12.5	17.5
C:时间比/(min·min ⁻¹)	4:1	5:1	6:1

优化结果表明,模型项显著,其中 *F* 值为 9.49, *P* 值为 0.003 6 < 0.050 0。而与纯误差相比较失拟项不显著,其中 *F* = 0.095, *P* = 0.958 9 > 0.05。因此,可以判定优化实验得到的回归方程中的投药摩尔比、电压梯度和时间比 3 个因子与 W_r 之间非线性方程关系显著。同时,模型的可信度和精确度较高,其中决定系数 $R^2 = 0.924 3$,调整系数 $R_{Adj}^2 = 0.826 9$,预测复相关系数 $R_{Pred}^2 = 0.809 0$, $R_{Adj}^2 - R_{Pred}^2 = 0.017 9 < 0.2$, *C. V. %* = 5.80%, 小于 10%。

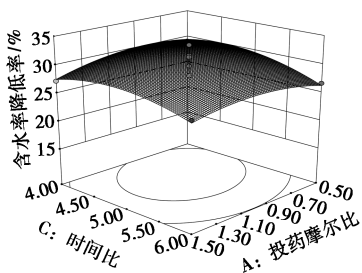
为了更好地分析各单因素的交互作用,拟合得到回归方程的响应曲面,如图 8 所示。由图 8 中可以看出,响应曲面中的等高线均呈规则的椭圆形,表明各单因素间存在交互关系,且交互作用显著。



(a) 电压梯度和时间比对 W_r 的交互影响



(b) 电压梯度和投药摩尔比对 W_r 的交互影响



(c) 时间比和投药摩尔比对 W_r 的交互影响

图 8 各因素交互影响等高线与响应曲面图

为了验证结果的准确性,利用软件选取了 3 组预测结果进行验证实验,结果如表 2 所示。

表 2 优化验证实验结果

投药 摩尔比	电压梯度/ ($V \cdot cm^{-1}$)	时间比/ (min:min)	含水率降低率/%		
			理论值	实际值	相对误差
0.96:1	13.76	4.59:1	31.39	32.51	3.60
0.79:1	15.27	5.25:1	30.42	29.99	1.40
1.30:1	4.27	4.27:1	29.38	28.56	2.80

由表 2 可知,模型预测值与实际值吻合程度较好,当投药摩尔比为 0.96:1、电压梯度为 13.76 V/cm、时间比为 4.59:1 时,污泥含水率为 53.99%, W_r 达到最佳为 31.39%,相对误差为 3.60% $<$ 10%, W_0 为 83.04%,实际 W_r 为 32.51%,说明该预测模型可以真实准确地反映各因素对 W_r 的影响。

4 结论

(1) 电渗透交变电场联合双氧化技术可以显著改善污泥脱水效果,在 $CaO_2:(NH_4)_2S_2O_8$ 摩尔比为 0.96:1、电压梯度为 13.76 V/cm、时间比为 4.59:1、阴阳极间距为 2.0 cm、机械压力为 23.59 kPa 进行脱水时,污泥含水率可以降至 53.99%。

(2) CaO_2 和 $(NH_4)_2S_2O_8$ 通过电活化与热活化的作用生成的 $\cdot OH$ 和 $SO_4^{\cdot -}$ 对污泥絮体与细胞具有破坏作用,一定程度上可以加速胞内物质的溶解,并且 Ca^{2+} 具有絮凝作用,可以提高脱水速率和污泥的脱水效果。

(3) 在优化实验设定的区域内,回归模型的预测结果与实际值相对误差小于 5%,可以用于脱水实验结果的预测。

参考文献

- [1] Zhan T L, Zhan X, Lin W, et al. Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China [J]. Engineering Geology, 2014, 170:24-32.
- [2] Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, et al. Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering [J]. Water Research, 2010, 44(8):2381-2407.
- [3] 冯源, 詹良通, 陈云敏. 城市污泥电渗脱水实验研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(5):1081-1087.
- [4] 马德刚, 张书廷, 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, 21(5):36-38.
- [5] Conraydy J, Vaxelaire J, Olivier J. Electro-dewatering of activated sludge: Electrical resistance analysis [J]. Water Research, 2016, 100:194-200.
- [6] Chen Zhan, Zhang Weijun, Wang Dongsheng, et al. Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants; Kinetics of enzymatic reaction and reflocculation morphology [J]. Water Research, 2015, 83:367-376.
- [7] 李修渠, 李里特, 植村邦彦, 等. 不同电场下豆渣的电渗透脱水 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(3):100-103.
- [8] Xiao J, Wu X, Yu W B, et al. Migration and distribution of sodium ions and organic matters during electro-dewatering of waste activated sludge at different dosages of sodium sulfate [J]. Chemosphere, 2017, 189:67-75.
- [9] Zhen G Y, Lu X Q, Li Y Y, et al. Innovative combination of electrolysis and $Fe(II)$ -activated persulfate oxidation for improving the dewaterability of waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2013, 136:654-663.
- [10] Yu W B, Yang J K, et al. Study on dewaterability limit and energy consumption in sewage sludge electro-dewatering by in-situ linear sweep voltammetry analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 317:980-987.
- [11] Li Y L, Liu G A, Chen G A, et al. Reuse of dewatered sewage sludge conditioned with skeleton builders as landfill cover material [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(1):233-240.
- [12] Li Y L, Liu L, Hou J J, et al. Coordination of electro-osmosis and ammonium persulfate on sewage sludge deep-dewatering [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 13(2):431-440.
- [13] Ahmad A, Gu X, Li L, et al. Effects of pH and anions on the generation of reactive oxygen species (ROS) in nZVI-rGO-activated persulfate system [J]. Water, Air, Soil Pollution, 2015, 226(11):369.
- [14] 吴楠, 王三反, 李乐卓, 等. 碱热活化过硫酸盐降解柴油精制废水中的有机硫化物 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4):435-438.

(下转第 189 页)

(2)以镀锡紫铜条并联连接构建了 WMFCs 与 NMFCs 2 种堆栈,WMFCs 最大功率密度为 47.22 W/m³,NMFCs 最大功率密度为 51.23 W/m³,相较于单电池最大功率密度均有所下降,但实现了整体功率和电池容量的提升,扩大了应用场景范围。堆栈后形成放大电池,由于 NMFCs 并联组件数较多造成较多的能量损失,因此 1 个运行周期下 WMFCs 相比 NMFCs 多回收 5.53% 的能量,并且 WMFCs 依然保持较高的 COD 去除率,在实际规模处理中应选用 WMFCs。

(3)接触电阻和导线电阻使堆栈功率产生损耗,考察了 4 种并联材料对 WMFCs 和 NMFCs 产电性能的影响,兼顾性能、经济性和使用寿命 3 方面,镀锡紫铜条是实际规模化的合理选择。

(4)研究还通过接入自主设计的储能电路实现了电能的回收,从实际应用角度验证了 WMFCs 与 NMFCs 相比具有较好的能量回收功能,并且通过锂电池储能使 MFC 堆栈实际规模化更加可靠。

参考文献

- [1] Bruce E Logan. 微生物燃料电池[M]. 冯玉杰,王鑫,史昕欣,等译.北京:化学工业出版社,2009:4.
- [2] Aelterman P, Rabaey K, Pham H T, *et al.* Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(10):3388-3394.
- [3] Cheng S, Logan B E. Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6):4468-4473.
- [4] Liu H, Cheng S, Logan B E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(14):5488-5493.
- [5] Mccarty P L, Bae J, Kim J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(17):7100-7106.
- [6] Zhuang L, Yuan Y, Wang Y, *et al.* Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123:406-412.
- [7] Chopra S, Sharma R K, Marfurt K J. Air-cathode preparation with activated carbon as catalyst, PTFE as binder and nickel foam as current collector for microbial fuel cells [J]. *Bioelectrochemistry*, 2013, 92(2):22-26.
- [8] Feng Y, He W, Liu J, *et al.* A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156(2):132-138.
- [9] Zhang F, Ge Z, Grimaud J, *et al.* Long-term performance of liter-scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility [J]. *Environmental science & technology*, 2013, 47(9):4941-4948.
- [10] Hiegemann H, Herzer D, Nettmann E, *et al.* An integrated 45 L pilot microbial fuel cell system at a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218:115-122.
- [11] 李顶杰,何辉,卢翠香,等.串/并联微生物燃料电池的性能[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(2):338-343.
- [12] 郭剑,潘彬,叶遥立,等.活性炭空气阴极微生物燃料电池的放大和串并联组合研究[J]. *现代化工*, 2013, 33(10):99-103.
- [13] Asensio Y, Mansilla E, Fernandez-Marchante C M, *et al.* Towards the scale-up of bioelectrogenic technology: Stacking microbial fuel cells to produce larger amounts of electricity [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2017, 47(10):1115-1125.
- [14] Logan B E, Regan J M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells [J]. *Trends in Microbiology*, 2006, 14(12):512-518.
- [15] He Z. Development of microbial fuel cells needs to go beyond "Power Density" [J]. *ACS Energy Letters*, 2017, 2(3):700-702.
- [16] 丁为俊.微生物燃料电池扩大化及实用化关键技术的研究[D].杭州:浙江大学能源工程学院,2017.
- [17] Gurung A, Oh S E. The improvement of power output from stacked microbial fuel cells (MFCs) [J]. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects*, 2012, 34(17):1569-1576.
- [18] An J, Lee H. Occurrence and implications of voltage reversal in stacked microbial fuel cells [J]. *Chem Sus Chem*, 2014, 7(6):1689-1695. ■
- [15] Yang D M, Wang B, Li Y T, *et al.* Treatment of high concentration sulfide wastewater by ammonium persulfate oxidation method [J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 41(1):87-91.
- [16] Tuan P A, Jurate V, Mika S. Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions [J]. *Environmental Technology*, 2008, 29(1):1075-1084.
- [17] Reddy K, Rjurbanek A, Khodadoust A P. Electroosmotic dewatering of dredged sediments: Bench-scale investigation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 78(2):200-208.
- [18] 李亚林,刘蕾,魏添,等.电渗透污泥脱水的影响因素分析及响应曲面优化[J]. *应用化工*, 2017, 46(1):127-131.
- [19] 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.
- [20] Saveyn H, Curvers D, Pel L, *et al.* In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electro-dewatering [J]. *Water Research*, 2006, 40(11):2135-2142.
- [21] 白润英,陈湛,张伟军,等.过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, 38(3):1151-1158.
- [22] 王世磊. Design-Expert 软件在响应面优化法中的应用[D]. 郑州:郑州大学硕士学位论文,2009. ■

(上接第 184 页)