

生活污水电渗透脱水的最佳参数组合*

吴卓宇¹, 梁耀轩², 张淑娟¹, 张旭兰¹, 蔡白桦¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 东莞市环保产业促进中心, 广东 东莞 523000)

摘要: 电渗透脱水是新兴的污泥脱水技术, 具有脱水效果好、成本低和无需加入絮凝剂等优点而具有较大的发展前景。通过两轮正交实验, 以污泥含水率和脱水能耗为评价体系, 研究机械压力、电渗透时间、电压梯度和污泥厚度的最佳操作参数组合; 在第一轮正交实验后缩小参数范围后, 开展第二轮正交实验, 最终确定参数范围。实验结果表明, 电渗透脱水的最佳操作参数组合为: 机械压力为 14.6~15.0 kPa、电渗透时间为 58.7~70.0 min、电压梯度为 15.1~16.1 V/cm、污泥厚度为 0.50 cm。脱水后污泥含水率为 55.00%~58.00%, 脱水能耗为 0.110~0.120 kW·h/kg。在两轮正交实验确定的操作参数下, 污泥脱水后含水率达到现行国家标准, 而脱水能耗仅为热干化技术的 9%~19%。

关键词: 城市污泥; 电渗透脱水; 两轮正交试验; 操作参数

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 06-0033-08

The best combination of parameters for electroosmosis dehydration of sewage sludge

WU Zhuoyu¹, LIANG Yaoxuan², ZHANG Shujuan¹, ZHANG Xulan¹, CAI Baihua¹

(1. School of Environmental Science and Engineering,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510000, China;

2. Dongguan Environmental Protection Industry Promotion Center, Dongguan 523000, China)

Abstract: As a new technology of sludge dehydration, electro-osmotic dehydration has the advantages of good dehydration effect, low cost and without flocculant. Through two rounds of orthogonal experiments and by using moisture content of sludge and dewatering energy consumption as evaluation system, this study investigated the combination of optimal operating parameters of mechanical pressure, electroosmosis time, voltage gradient and sludge thickness. After shrinking range of parameters by the first orthogonal experiment, the second orthogonal experiment was carried out. Finally, the optimal operation parameters were determined as follows: mechanical pressure was between 14.6 and 15.0 kPa, and electroosmosis time was between 58.7 and 70 min, and voltage gradient was between 15.1 and 16.1 V/cm, and sludge thickness was 0.50 cm. After dewatering, the moisture content of sludge was between 55.00% and 58.00%, and dewatering energy consumption was between 0.110 and 0.120 kW·h/kg. The optimal operation parameters obtained through two rounds of orthogonal experiments, the moisture content of sludge can achieve the standards and energy consumption is only 9% to 19% of thermal drying.

Key words: municipal sludge; electro-osmosis dewatering; two rounds of orthogonal test; parameter

* 收稿日期: 2020-01-06

作者简介: 吴卓宇 (1994年生), 男; **研究方向:** 污泥减量化; E-mail: wuzhy53@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 张淑娟 (1952年生), 女; **研究方向:** 固体废弃物管理与处理处置技术、室内空气污染防治技术、环境评价与规划; E-mail: eeszs@j@mail.sysu.edu.cn

随着经济水平的不断发展,我国的污水排水量和处理量也在不断上升。据报道显示,我国污水处理总量已达到2亿 m^3/d ^[1],而2015年的处理量为1.87亿 m^3/d ^[2],呈现每年逐步递增的趋势。目前,我国每年含水率为80%的污泥产生量约为 $3 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7 \text{t}$,平均每年的增长量为15%,预计到2020年,我国的污泥年产量将会超过 $6 \times 10^7 \text{t}$ ^[3]。目前,污水处理厂典型的机械脱水工艺主要是板框压滤脱水、带式压滤脱水和离心脱水等,产生的污泥经过机械脱水处理后的含水率为65%~80%^[4-5]。根据有关国家标准,不同的污泥处置方法对于含水率的要求也不同^[7-9],其中用作污泥混合填埋时,含水率要小于60%^[10]。而目前的工艺水平很难达到后续处理工艺的要求。因此,需要发展新的污泥脱水技术来降低污泥含水率。

污泥脱水环节是污泥处理工艺中至关重要的一环,直接决定了污泥处理的成本^[11]。传统的机械脱水装置容易出现堵塞等问题,需间歇运行^[12]。而在电渗透脱水过程中,由于电场的作用,水与污泥絮体的运动方向相反,因而不易发生堵塞^[13]。在电渗透脱水的直流电场作用下,污泥中的水分会随之移动,而污泥颗粒由于粒径过大而会被截留在装置的过滤介质上,从而实现污泥和水分分离的目的^[14-17]。根据相关研究显示^[18-19],通入电流后污泥样品都有明显的脱水效果。电渗透主要作用于颗粒间的毛细孔道内,加快污泥中的自由水和孔隙水等的脱除^[20],再结合机械压力配合,其脱水效果要好于传统的机械脱水,更能进行深

度脱水^[21-24]。电渗透脱水主要问题在能耗较高,如何优化电渗透脱水的操作条件,降低脱水能耗是当前许多学者研究的重点。但目前的研究主要采用单因素实验法,很少研究有进行多因素综合优化的探索。例如,鲁子焯等^[25]考察了不同电压强度(0、15、35和55 V)对污泥电脱水效果的影响,发现电压强度越大脱水效果越好;李贺等^[26]采用单因素轮换法进行实验,发现最佳技术参数为:污泥厚度10 mm、机械压力100 kPa、电压梯度50 V/cm,但能耗较高,为0.3 kW·h/kg。

正交实验具有实验次数少周期短、各因素具有均衡分散性和每个因素不同水平具有可比性的优点而广泛运用于科学研究中^[27-28]。本研究采用正交试验法,以污泥含水率和脱水能耗作为评价指标,探索电渗透脱水过程中机械压力、电渗透时间、电压梯度以及污泥厚度的最优化组合。为了使污泥的含水率达到我国现行标准规定以下,并尽可能降低脱水能耗。本研究通过第一轮正交实验,探索合适的参数范围,以此为基础设计并开展第二论正交实验。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

本实验污泥采自广州市大坦沙污水处理厂,该厂位于广州西郊大坦沙岛。实验污泥是经机械脱水后的生活污水,采回来的污泥样品都先放置在4℃的冰箱里保持,并同时测定其基本性质。基本性质结果如下。

表1 实验污泥的基本性质

Table 1 Basic properties of the sludge

来源	含水率/%	有机质含量/%	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	pH	挥发分含量/%
大坦沙污水处理厂	82.30±0.11	47.70±0.39	406	5.89	52.47

1.2 实验装置

本实验采用的装置是平板电极的电渗透脱水装置,主要设备是一块15 cm×15 cm的阳极电极、一块19 cm×19 cm的阴极电极、压力传感器和底下放置的精确到0.01 g的电子天平(可实时测量脱出的水分的质量值)。实验通过稳压直流电源提供电压供电,并用万用表测定电压和电流。为了保证实验的重现性,每组实验至少重复两次。

1.3 实验方法

开启电源,观察污泥的变化,每1 min记录一次电流值和脱除水的质量,直到实验结束为止。

污泥的最终含水率的计算公式为:

$$w = \frac{mw_1 - m_1}{m - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, w 为最终污泥的含水率(%), m 为填充污泥的质量(g), w_1 为原始污泥的含水率(%), m_1 为脱除水的质量(g)。

电渗透过程中,脱水能耗的计算公式为

$$E = U \int I(t) dt / m \quad (2)$$

式中, E 为脱水能耗(kW·h/kg), U 为脱水时通入的电压(V), $I(t)$ 为脱水过程中电流随时间的变化(A), t 为脱水时间(h), m 为脱除水分的质

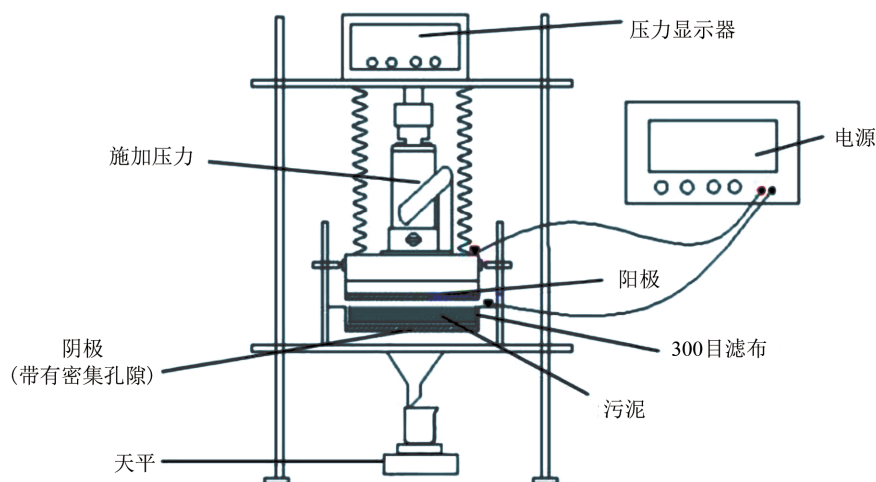


图1 电渗透装置简略图

Fig. 1 Simple diagram of electro-osmotic device

量 (kg)。

2 结果与讨论

2.1 第一轮正交试验

本研究在此前的实验的探索中显示: 随着机械压力增加, 含水率降低速度变慢, 能耗快速上升; 电渗透时间不断增加的同时, 能耗不断升高, 而含水率降低速度变慢; 适当的电压梯度有利于电渗透的进行, 随着电压梯度的升高, 能耗也在升高, 而含水率下降速度变慢; 污泥厚度越大, 达到相同含水率时, 电渗透所需能耗也越大。因此本次实验设定参数范围为机械压力为0~30 kPa, 电渗透时间为20~80 min, 电压梯度为5~20 V/cm, 污泥厚度为0.75~3.00 cm。

根据设定的实验参数范围和正交试验表 $L_{16}(4^5)$ 设计了第一轮正交试验, 因素和水平如表2所示, 第五列作为误差列。完成第一轮正交实验后, 利用Minitab 16软件进行极差分析和方差分析, 得出各个因素影响的主次顺序, 如表3所示。再结合综

合平衡法对比分析各操作条件下的脱水效果和能耗, 得出较优的操作参数来缩小水平范围, 继而进行第二轮正交试验。

进行方差分析时, 由于脱水能耗的数值较小, 计算时容易出现较大误差, 因此将脱水能耗的数值放大100倍来计算以减少误差, 计算结果如表3所示。以不同因素水平的含水率与脱水能耗的 k_{ij} 值为纵坐标, 因素水平为横坐标作趋势变化图如图2所示。

表2 正交试验的因素和水平

Table 2 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	因素			
	机械压力/ kPa	时间/ min	电压梯度/ (V·cm ⁻¹)	污泥厚度/ cm
1	0	20	5	0.75
2	10	40	10	1.50
3	20	60	15	2.25
4	30	80	20	3.00

表3 第一轮正交试验极差和方差分析结果

Table 3 Results of range and variance analysis of the first orthogonal test

因素	以含水率为指标		以能耗为指标	
	极差 (R_j)	P值	极差 (R_j)	P值
机械压力/kPa	9.07	0.005	0.075	0.632
时间/min	12.46	0.002	0.089	0.506
电压梯度/(V·cm ⁻¹)	14.16	0.001	0.307	0.038
污泥厚度/cm	3.27	0.088	0.285	0.055
误差列	1.34		0.091	

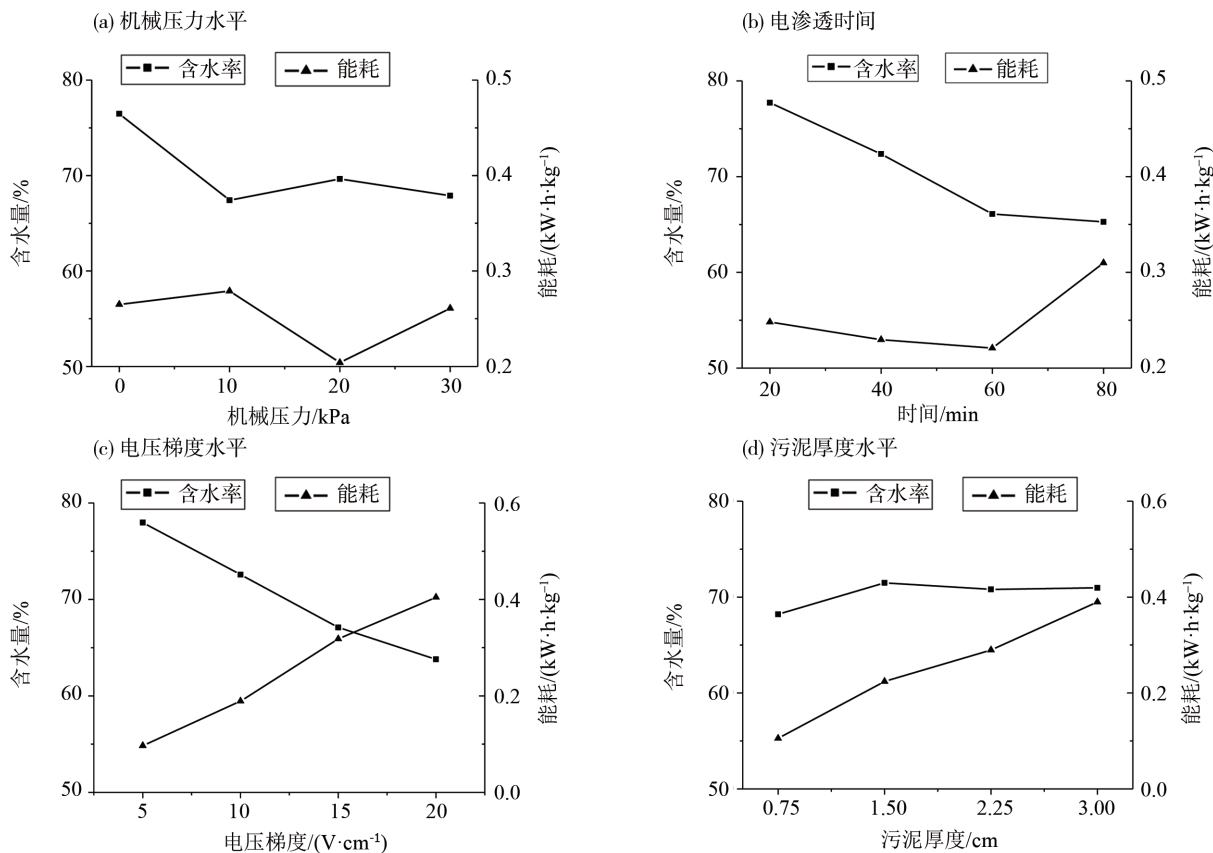


图2 不同因素水平的含水率与脱水能耗变化趋势

Fig. 2 Variation trend of sludge moisture content and energy consumption of dewatering at different factor levels

如图2a所示,最终含水率最低的机械压力水平是10 kPa,而能耗最低的机械压力水平为20 kPa。根据极差分析显示,相对于能耗变化而言,机械压力的变化对含水率变化的重要程度更大,而且在实际生产过程中,机械压力越大对生产设备要求就越高。因此,本次实验选取10 kPa为机械压力的优化水平。

如图2b所示,含水率最低的电渗透时间是80 min,而能耗最低的是60 min。由极差分析可得,电渗透时间的变化对含水率变化要更加重要。考虑到80 min和60 min水平的含水率相差不大,因此本实验选取60 min作为电渗透时间的优化水平。

如图2c所示,含水率最低的电压梯度水平是20 V/cm,但能耗最低的电压梯度水平却为5 V/cm。通过极差分析可知,电压梯度对于污泥含水率与脱水能耗均为重要影响因素。因此,为了实现脱水效果与能耗的平衡,本实验选取15 V/cm作为电压梯度的优化水平。

根据图2d显示,污泥厚度水平为0.75 cm时,能耗和含水率均为最低。因此,选取0.75 cm作为

污泥厚度的优化水平。

综合第一轮正交试验确定的操作结果:机械压力为10 kPa、电渗透时间为60 min、电压梯度为15 V/cm、污泥厚度为0.75 cm。由于第一轮正交试验中没有该组合,所以将该操作组合进行实验,结果表明:脱水后含水率为 $(59.72 \pm 0.42)\%$,脱水能耗为 (0.139 ± 0.005) kW·h/kg。为了进一步降低含水率以及能耗,在第一轮正交试验的基础上开展第二轮正交试验,以确定更优化的参数组合。

2.2 第二轮正交试验

根据第一轮正交试验后筛选得出的较优操作参数组合。第二轮实验设定参数范围为机械压力为5~15 kPa,电渗透时间为50~70 min,电压梯度为10~17.5 V/cm,污泥厚度为0.50~1.50 cm。根据 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表设计出第二轮正交试验方案,第五列空列作为误差列,能直观反映出试验误差的大小,结果如表4。

2.2.1 极差和方差分析 由表5可得,对于污泥含水率而言,机械压力和电压梯度的极差值均较大,说明这两个因素是污泥最终含水率的主要因

表4 第二轮正交试验结果统计¹⁾

Table 4 Results of the second orthogonal test orthogonal experiment

编号	机械压力/ kPa	时间/min	电压梯度/ (V·cm ⁻¹)	污泥厚度/ cm	误差列	含水率/%	能耗/ (kW·h·kg ⁻¹)
1	5.0	56.7	15.0	0.83	3	65.73	0.176
2	11.7	70.0	10.0	0.83	2	62.40	0.092
3	8.3	70.0	15.0	1.17	4	60.43	0.223
4	15.0	56.7	10.0	1.17	1	63.22	0.117
5	5.0	63.3	10.0	1.50	4	67.90	0.167
6	11.7	50.0	15.0	1.50	1	59.98	0.235
7	8.3	50.0	10.0	0.50	3	66.02	0.061
8	15.0	63.3	15.0	0.50	2	57.99	0.114
9	5.0	50.0	17.5	1.17	2	64.73	0.274
10	11.7	63.3	12.5	1.17	3	62.15	0.207
11	8.3	63.3	17.5	0.83	1	56.49	0.186
12	15.0	50.0	12.5	0.83	4	62.73	0.121
13	5.0	70.0	12.5	0.50	1	65.80	0.111
14	11.7	56.7	17.5	0.50	4	58.50	0.124
15	8.3	56.7	12.5	1.50	2	64.39	0.212
16	15.0	70.0	17.5	1.50	3	55.84	0.294

1) 原始污泥含水率为(82.30±0.11)%。

表5 第二轮正交试验极差和方差分析结果

Table 5 Results of range and variance analysis of the second orthogonal test

因素	以含水率为指标		以能耗为指标	
	极差 (R _j)	P值	极差 (R _j)	P值
机械压力/kPa	6.09	0.011	0.02	0.654
时间/min	2.25	0.101	0.023	0.625
电压梯度/(V·cm ⁻¹)	5.99	0.011	0.11	0.024
污泥厚度/cm	0.8	0.741	0.125	0.013
误差列	1.06		0.026	

素, 而污泥厚度对最后含水率的影响不大。对于污泥脱水能耗而言, 污泥厚度和电压梯度是主要因素。由P值也可以得出相应的结论, 机械压力和电压梯度对污泥含水率的影响是显著的, 而电压梯度和污泥厚度对污泥脱水能耗的影响是显著的。

2.2.2 水平优化 以污泥含水率和脱水能耗为响应指标, 用响应曲面法进行污泥电渗透脱水操作参数的优化研究。运用Minitab软件, 分别分析在考虑线性作用、线性+相互作用、线性+平方作用

三种模型下, 污泥脱水的最佳操作参数组合, 并对此进行试验验证, 每组试验重复两次。综合三种模型的优化结果, 得到电渗透脱水的最佳操作参数组合。图3~图5是在三种模型模拟下, 关于含水率和脱水能耗的水平优化的结果。对三种模型优化参数进行实验验证, 结果如表6所示。

综合优化结果, 最优的操作参数组合为: 机械压力为14.6~15.0 kPa、电渗透时间为58.7~70.0 min、电压梯度为15.1~16.1 V/cm、污泥厚度为

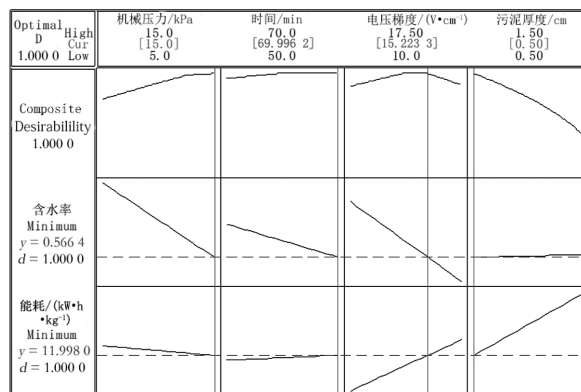


图3 模型1: 线性作用

Fig. 3 Model 1: linear action

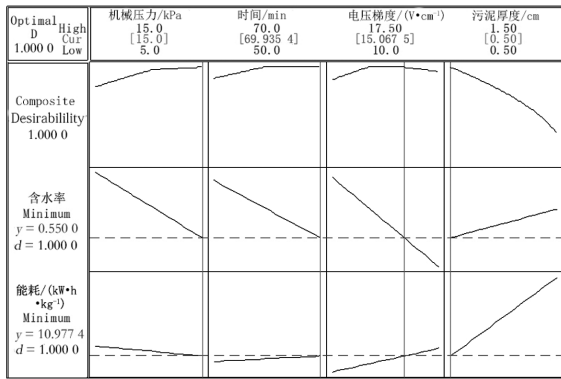


图4 模型2: 线性+相互作用
Fig. 4 Model 2: linear + interaction

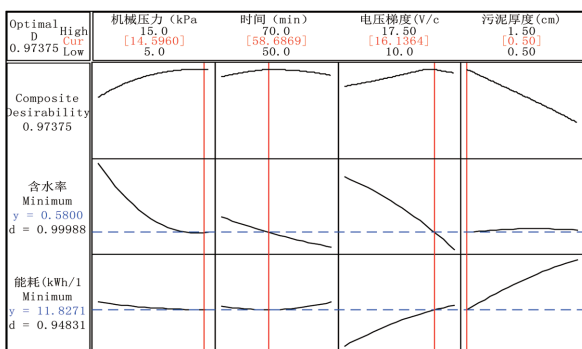


图5 模型3: 线性+平方作用
Fig. 5 Model 3: linear + square action

0.50 cm, 脱水后污泥含水率为 55.00%~58.00%, 脱水能耗为 0.110~0.120 kW·h/kg。如表 6 所示, 经过验证试验后, 脱水后污泥含水率为 56.23%~

57.01%, 脱水能耗为 0.116~0.120 kW·h/kg, 均位于预测结果的范围中, 说明模型预测结果的可信度较高。从实验结果来看, 其含水率达到我国现行的标准规定, 且脱水能耗仅为热干化技术的 9%~19%^[29]。

3 结论

本次实验采用两轮正交试验的方式优化电渗脱水的操作参数, 结合上述实验分析, 现有如下结论。

1) 通过第一轮正交实验中可以发现, 电压梯度、电渗透时间和机械压力对污泥含水率的影响特别显著, 而电压梯度对污泥脱水能耗影响显著。综合平衡后得到本实验水平优化后, 最优操作参数为: 10 kPa、60 min、15 V/cm、0.75 cm。该组合经实验结果表明: 脱水后含水率为 (59.72±0.42)%, 脱水能耗为 (0.139±0.005) kW·h/kg。

2) 在第二轮正交实验中, 将第一轮正交实验的结果再进一步细分。由第二轮正交实验可以得出, 机械压力和电压梯度对污泥最终含水率影响显著, 电压梯度和污泥厚度对脱水能耗的影响显著。最终得到最优化的操作参数组合为: 机械压力为 14.6~15.0 kPa、电渗透时间为 58.7~70.0 min、电压梯度为 15.1~16.1 V/cm、污泥厚度为 0.50 cm, 脱水后污泥含水率为 55.00%~58.00%, 脱水能耗为 0.110~0.120 kW·h/kg。

表6 三种模型优化参数预测值与实验值对比

Table 6 Comparison between the predicted value of three models and the experimental value

模型	线性作用		线性+相互作用		线性+平方作用	
操作参数 ¹⁾	15.0 kPa、70.0 min		15.0 kPa、69.9 min		14.6 kPa、58.7 min	
	15.2 V/cm、0.50 cm		15.1 V/cm、0.50 cm		16.1 V/cm、0.50 cm	
预测值 ²⁾	56.64%	0.120 kW·h/kg	55.00%	0.110 kW·h/kg	58.00%	0.118 kW·h/kg
试验值 ²⁾	(56.23±0.84)%	(0.117±0.003) kW·h/kg	(57.01±1.27)%	(0.116±0.001) kW·h/kg	(56.80±0.51)%	(0.120±0.001) kW·h/kg

1) 操作参数为机械压力、电渗透时间、电压梯度和注泥厚度;
2) 预测值和试验值均为脱水后污泥含水率和脱水能耗。

参考文献:

[1] 肖培蒙. 城镇污水处理厂污泥碳化技术探析[J]. 中国设备工程, 2019, 414(3):186-188.
XIAO P M. Analysis of sludge carbonization technology in urban sewage treatment plant[J]. China Plant Engineering, 2019, 414(3):186-188.

[2] 中华人民共和国生态环境部. 2015年环境统计年报 [DB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/hjtjnb/201702/P020170223595802837498.pdf. 2017-02-23.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic

- of China. The 2015 annual statistical review of the environment [DB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/hjtjnb/201702/P020170223595802837498.pdf. 2017-02-23.
- [3] 钱旭,周兴求,伍健东,等. 恒电流模式下污泥电渗透的脱水性能及能耗分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10):261-268.
- QIAN X, ZHOU X Q, WU J D, et al. Performance and energy consumption of electro-osmotic sludge-dewatering in constant current mode[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(10):261-268.
- [4] 张浩,周佳,赵洋. 污泥脱水机性能分析[C]//城镇供水排水节能减排专题技术——2010年全国给水排水技术信息网年会. 苏州, 2010:242-245.
- ZHANG H, ZHOU J, ZHAO Y. Performance analysis of sludge dehydrator [C]//Energy Conservation and Emission Reduction Technology for Urban Water Supply and Drainage—2010 Annual Meeting of National Water Supply and Drainage Technology Information Network. Suzhou, China, 2010:242-245.
- [5] 程俊,胡小虎,姚宝军. 污泥机械深度脱水方法对比研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(5): 47-49.
- CHENG J, HU X H, YAO B J. The contrastive study of sludge mechanical deep dehydration methods [J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2010, 20(5): 47-49.
- [6] 朱寅. 污泥脱水机选型比较[J]. 机电信息, 2012(24):45-46.
- ZHU Y. Selection comparison of sludge dehydrator [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2012 (24) : 45-46.
- [7] GB/T 23485-2009. 城镇污水处理厂污泥处置——混合填埋用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 23485-2009. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge for co-landfilling [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [8] GB/T 24602-2009. 城镇污水处理厂污泥处置——单独焚烧用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 24602-2009. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge used in separate incineration [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [9] GB/T 23486-2009. 城镇污水处理厂污泥处置——园林绿化用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 23486-2009. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant - Quality of sludge used in gardens or parks [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [10] GB/T 23485-2009. 城镇污水处理厂污泥处置——混合填埋用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 23485-2009. Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant - Quality of sludge used for co-landfilling [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [11] 郑立庆,崔红帅,黄瑞娟,等. 新型改性聚丙烯酰胺的合成及对污泥调理效果的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5):1166-1170.
- ZHENG L Q, CUI H S, HUANG R J, et al. Synthesis of novel modified polyacrylamide and its effect on dewatering performance of sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5): 1166-1170.
- [12] 陈丹丹,窦昱昊,卢平,等. 污泥深度脱水技术研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(10):4722-4746.
- CHEN D D, DOU Y H, LU P, et al. A review on sludge deep dewatering technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(10):4722-4746.
- [13] 郭一飞,韩露,朱新锋,等. 电渗透污泥深度脱水技术研究进展[J]. 河南城建学院学报, 2018, 27(1): 80-85.
- GUO Y F, HANG L, ZHU X F, et al. Research progress on deep dewatering technology of electro-osmotic sludge [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2018, 27(1):80-85.
- [14] SNYMAN H G, FOSSMAN P, KAFAAR A, et al. The feasibility of electro-osmotic belt filter dewatering technology at pilot scale [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(8): 137-144.
- [15] 许景文. 一种污泥脱水的新方法——电渗透脱水法[J]. 重庆环境科学, 1990(6):45-49.
- XU J W. The invention relates to a new method of sludge dewatering—electroosmotic dewatering method [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1990 (6) : 45-49.
- [16] 黎文威,张晓云. 城市污泥脱水技术及脱水污泥资源化利用的研究进展[J]. 环境, 2011(S1):52-54.
- LI W W, ZHANG X Y. Research progress on dewatering technology and utilization of municipal sludge [J]. *Environment*, 2011(S1):52-54.
- [17] SMOLLEN M, KAFAAR A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot-plant study [J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30(8):159-168.
- [18] GLENDINNING S, MOK C K, KALUMBA D, et al. Design framework for electrokinetically enhanced dewatering.

- tering of sludge[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(4):417-426.
- [19] 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.
YI X D, LIANG J. A study on advanced sludge dehydration using electrochemical method [J]. *Pollution Control Technology*, 2014(4):49-52.
- [20] TUAN P A, SILLANP M. Migration of ions and organic matter during electro-dewatering of anaerobic sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173 (1/2/3):54-61.
- [21] 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.
FENG Y, ZAN L T, CHEN Y M. Laboratory study on electroosmosis dewatering of sewage sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5):1081-1087.
- [22] YOSHIDA H, KITAJYO K, NAKAYAMA M. Electro-osmotic dewatering under A. C. electric field with periodic reversals of electrode polarity [J]. *Drying Technology*, 1999, 17 (3): 539-554.
- [23] ZHOU J X, LIU Z, SHE P, et al. Water removal from sludge in a horizontal electric field [J]. *Drying Technology*, 2007, 19 (3/4): 627-638.
- [24] LARUE O, WAKEMAN R J, TARLETON E S, et al. Pressure electroosmotic dewatering with continuous removal of electrolysis products [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61 (14): 4732-4740.
- [25] 鲁子焯,张堯,徐硕,等. 电压强度对污泥电脱水效能及滤液有机物特征的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12 (12): 3333-3340.
- LU Z Y, ZHANG Y, XU S, et al. Effect of voltage intensity on sludge electro-dewatering efficiency and characteristics of organic matters in filtrate [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12 (12): 3333-3340.
- [26] 李贺,周国亚,殷锡芬. 静态模拟城市污泥电渗透脱水的实验研究 [J]. *广东化工*, 2017, 44 (4): 98-100.
LI H, ZHOU GU Y, YIN X F. Laboratory study on technology of the sludge dewatered by electroosmosis [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44 (4): 98-100.
- [27] 王军,林慧,杨刚,等. 直流磁控溅射ITO薄膜的正交试验分析[J]. *半导体光电*, 2007, 28(1):68-71.
WANG J, LIN H, YANG G, et al. Analysis of orthogonal experiments on ITO films prepared by DC magnetron sputtering [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28 (1): 68-71.
- [28] 林秀雄. 田口方法实战技术[M]. 深圳:深圳海天出版社, 2004.
LIN X X. Taguchi method actual combat technology [M]. Shenzhen: Shenzhen Haitian Publishing House, 2004.
- [29] 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.

(责任编辑 张冰)