

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

微米 Fe_3O_4 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究

钱旭, 王毅力*, 赵丽

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市污染水源地控制技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 研究了微米 Fe_3O_4 磁粉调理污泥的投加量的优化以及微米磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺 (MPEOD) 的操作参数 (电场作用时间、机械压力、电压) 对脱水效果和能耗的影响, 分析了磁化调理后污泥上清液、污泥絮体理化性质及接触能变化特征. 结果表明, 微米 Fe_3O_4 磁粉最佳调理投加量为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$; 结合能耗与脱水效果, 电场作用时间、电压和机械压力分别确定为 2 h、30~50 V 和 400~600 kPa. 当 MPEOD 工艺的机械压力、电场作用时间和电压分别为 400 kPa、2 h 和 50 V 时, 污泥含水率由初始的 99.18% 降低至 44.46%, 水分脱除率和污泥减量化分别可达 99.34% 和 98.30%, 相应的能耗仅为 $0.0133 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$. 微米磁粉调理污泥时, 絮凝作用机制的影响很小, 污泥脱水性能得到提高的主要原因是微米磁粉大大降低了污泥颗粒间的路易斯酸碱作用, 致使污泥絮体聚集, 絮体间孔径增大, 利于脱水. 较之经典的 DLVO 理论, 扩展后的 EDLVO 理论能准确描述污泥颗粒的凝聚及分散行为.

关键词: 活性污泥; 微米 Fe_3O_4 磁粉调理; 脱水效果; 能耗; 接触能

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1864-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.034

Magnetic Fe_3O_4 Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge

QIAN Xu, WANG Yi-li*, ZHAO Li

(Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: For magnetic Fe_3O_4 microparticles conditioning—pressure electro-osmotic dewatering (MPEOD) process of activated sludge (AS), the effects of operating parameters (optimal dosage of Fe_3O_4 , electric field duration, mechanical pressure and voltage) on the dewatering efficiency and energy consumption were investigated, and the optimal conditions were determined. Moreover, the properties of supernatant and sludge along MPEOD process were studied as well as the interaction force between the sludge biosolids. Taking the energy consumption into consideration, the results showed that the optimal dewatering effect for AS could be achieved with a magnetic Fe_3O_4 microparticles dosage of $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, an electric field duration of 2 h, a mechanical pressure of 400-600 kPa and a voltage of 30-50 V. When MPEOD was conducted at 400 kPa and 50 V for 2 h, the sludge reduction rate reached 98.30%, the percentage of water removal was 99.34% and the moisture content of AS decreased from 99.18% to 44.46%. The corresponding consumption of energy was $0.0133 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$. The coagulation mechanism played a slight role in the AS conditioning with magnetic Fe_3O_4 microparticles. In fact, magnetic Fe_3O_4 micro-particles could greatly decrease the acid-base interaction (W_{AB}) between AS biosolids, cause floc growth and enlarge pores in AS aggregates, which will be beneficial to AS dewatering. Compared to DLVO theory, the extended DLVO theory could accurately describe the aggregation and dispersion behavior of sludge particles.

Key words: activated sludge (AS); magnetic Fe_3O_4 microparticles conditioning; dewatering effect; energy consumption; interaction force

随着我国城镇化水平不断提高,城市污水处理能力已达到 1.22 亿 m^3 ,“十二五”期间将增加 9 000 万 m^3 ^[1];此外我国每年污水厂产生的污泥达 3 千万 t (含水率按 80% 计),到 2020 年预计将翻一番^[1].同时,剩余污泥含水量极高 ($\geq 95\%$)^[2-4],脱水性能差,处理处置困难^[5,6].因此,发展高效低耗污泥脱水减量技术已成为目前研究的热点,同时也是我国未来污泥处置领域面临的严峻问题.近年来,污泥电脱水技术尤其是垂直电场脱水技术具有较好的脱水效果而受到了极大关注,该技术能脱除污泥中大量自由水和部分束缚水,操作较为稳定^[2,7,8],是

一种高效、绿色的脱水技术.目前,实验室规模的间歇式电脱水技术研究较多,明确了该技术的脱水效果和能耗;Mahmoud 等^[3]采用絮凝调理-压力垂直电场脱水技术研究发现使污泥含固率升高至 55.00% 需消耗 $0.312 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的能量;董立文等^[9]实验研究发现污泥的含水率从 74.85% 降至 60% 时所需要的能耗均在 $0.14 \sim 0.28 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$

收稿日期: 2015-08-18; 修订日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177010, 51078035)

作者简介: 钱旭 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染控制理论与技术, E-mail: qianxumail@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyilimail@126.com

之间.电脱水技术在实际工程应用中较少,已报道的串联式和叠加式电渗透脱水机^[10,11]是在传统的机械脱水中直接地引入直流电场,其脱水效果低于目前实验室研究可达到的效果,且同时也存在能耗较高、脱水驱动力随脱水进程不断减小、电极易腐蚀等问题.马德刚等^[12]研究指出,为降低能耗,可对脱水操作条件进行优化组合,但对于一些特殊条件如高含固率,则供优化的条件十分有限.因此,可考虑在污泥调理方式上寻找突破口^[13],以期在提高污泥脱水性能的同时促进电场脱水并降低调理成本,获得高效低能耗效果^[14].传统的污泥调理方法如酸处理、冷融等物理方法能耗成本过高^[15],化学调理剂会引发二次污染和生态健康风险等问题^[16].最近,磁性材料作为一种污泥调理剂逐渐引起关注.源亮君^[17]研究指出,磁性纳米材料能极大提高污泥泥水分离性能;Lakshmanan 等^[18]也发现,磁性纳米材料结合宏观磁场能降低污泥含水量达 95%;Ni 等^[19]也指出磁性纳米材料能影响污泥性质和细胞外聚合物(EPS)行为,从而促进污泥脱水效果.

然而,磁性材料调理污泥的研究基本上都采用纳米级别的颗粒材料,其生产工艺复杂、成本高;而且上述研究大部分集中于调理效果,而对磁性纳米材料调理引起的污泥理化性质、污泥颗粒间行为的变化,以及其与电脱水技术结合的效果方面还不够深入.

鉴于此,本研究采用微米磁性材料,并与压力垂直电场脱水技术结合,探究脱水效果和能耗影响因素,寻找高效低能条件,并对磁性材料调理下污泥的性质与行为进行探讨,以期推进污泥压力垂直电场脱水技术的发展和推广.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 污泥样品

污泥样品采自北京市某污水处理厂回流段,2 h 内运送至实验室,存放于 4℃ ± 0.5℃ 冰箱中备用.为保证污泥性质稳定,每批实验在污泥采集后 5 d 内完成.活性污泥基本性质如表 1 所示.

表 1 活性污泥基本性质

Table 1 Basic characteristics of raw activated sludge

pH	电导率 /mS·cm ⁻¹	TSS /g·L ⁻¹	VSS /g·L ⁻¹	MC /%	CST/s
6.58 ± 0.04	2.46 ± 0.01	8.20 ± 0.30	4.46 ± 0.21	99.18 ± 0.03	19.0 ± 2.34

1.1.2 磁粉

微米 Fe₃O₄ 磁粉(包头市倍力肯工业科技有限公司)粒径为 20 μm ± 1.03 μm,图 1 为该磁粉磁滞回曲线(VSM, 7037/9509-P, Lake Shore Cryotronics 有限责任公司,美国),其矫顽力 $H_c = 76.359$ Oe,剩磁强度 $M_r = 5.2963$ emu·g⁻¹,饱和磁化强度 $M_s = 58.907$ emu·g⁻¹.如图 1 所示,磁滞现象极弱,表明该磁粉具有超顺磁性,即在外界没有磁场影响时,其磁化强度为 0,不会对外界产生磁的影响.

1.2 实验装置

压力垂直电场脱水装置如图 2 所示,主要包括有机玻璃压滤筒(内径 = 70 mm)、连接导线的有机玻璃活塞(直径 = 70 mm)、直流电源(DH1719A-4, 中国大华),电子天平及配套实时监测质量的软件(PL2002-IC, Mettler Toledo 公司,瑞士).

1.3 实验方法

1.3.1 压力垂直电场污泥脱水流程

磁化调理-压力垂直电场脱水流程主要由 4 个阶段组成:磁化调理-重力沉降-机械加压-复合脱水.

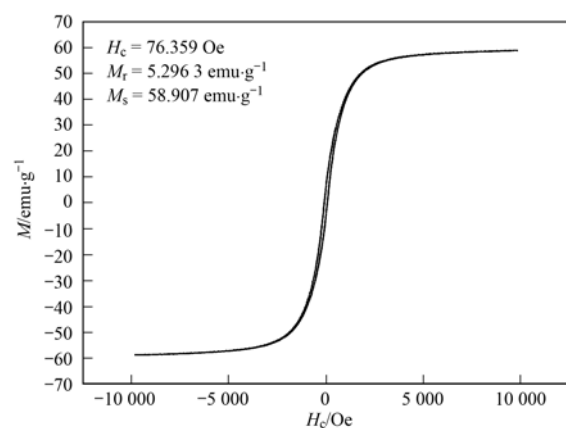


图 1 微米 Fe₃O₄ 磁粉的 M-H 曲线

Fig. 1 M-H curve of magnetic Fe₃O₄ micropraticles

取适量污泥置于有机玻璃烧杯中,在六联搅拌机(JTY-6,唐山大昌化工公司)的搅拌下投加微米磁粉,进行调理实验.将调理后污泥转移静置于压力电场反应装置的压滤筒内在重力作用下进行过滤,用烧杯收集滤出液.对重力沉降后污泥进行机械压缩,分别施加不同的恒定压力,考察压力对污泥

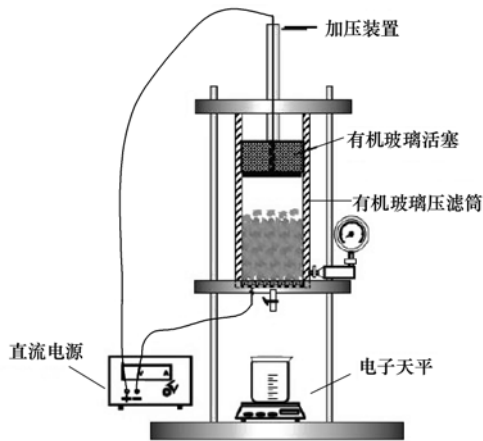


图 2 压力-电场脱水装置示意

Fig. 2 Schematic representation of the pressure electro-osmotic dewatering device

脱水效果的影响. 使用机械压力、电场进行联合脱水, 在不同机械压力下, 采用 10 ~ 50 V 电压进行脱水.

1.3.2 接触角测定

采用垂滴法^[20]在接触角测量仪(JC2000C, 上海中晨数字技术设备有限公司)上测定接触角, 检测液体分别为水、甲酰胺和 1-溴代萘^[20], 测定流程参照文献[20]进行.

1.4 分析方法

1.4.1 污泥脱水效果

采用质量法进行污泥含水率和脱水率的分析测定^[21]; 脱水过程中, 污泥的含水率(MC)及脱水率(PRW)分别按公式(1)和公式(2)计算.

$$MC = \frac{m_s \times W_0 - m_w}{m_s - m_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$PRW = \frac{m_w}{m_s \times W_0} \times 100\% \quad (2)$$

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, %.

1.4.2 污泥脱水能耗

电场作用下及机械压力作用下污泥脱水能耗分别按公式(3)和公式(4)计算.

$$E = \frac{1}{1000 V} \cdot \int UI dt \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{1000 V} \cdot \int PA dl \quad (4)$$

式中, E 为单位污泥脱水能耗, $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$; U 为电压, V; I 为电流, A; t 为时间, h; V 为污泥体积, m^3 ; P 为压强, kPa; A 为压滤筒面积, m^2 ; l 为极板移动距离, m.

1.4.3 污泥理化性质

污泥 CST 值用 CST 测定仪 (Z304M, Triton Electronic, 英国) 进行测定; 污泥表面微观形貌图像采用扫描电镜 (Quanta 200, FEI, USA) 观测.

1.4.4 污泥上清液理化性质

采用 Zetasizer Nano Z 型 Zeta 电位分析仪 (Malvern Instrument, 英国) 测定污泥上清液中胶体颗粒的 Zeta 电位; 污泥上清液的 COD/SCOD 和 TOC 分别采用 COD 快速测定仪 (DR1010 型, HACH, 美国) 和 TOC 分析仪 (TOC-V CSN, Shimadzu, 日本) 测定. 上清液/滤出液的悬浮固体浓度 (SS) 采用紫外分光光度计 (北京普析通用仪器责任有限公司) 在 650 nm 波长下测定吸光值, 利用标准曲线计算其浊度从而转化为 $\text{SS}^{[22]}$.

1.4.5 污泥界面接触能计算方法

污泥颗粒之间接触能可由扩展的 DLVO 理论 (EDLVO 理论) 得到. 其表面的总接触能 (W_T^{ED}) 可以由范德华力作用能 (W_A)、静电力作用能 (W_R) 和酸碱接触能 (W_{AB}) 这 3 个部分之和计算^[23,24]:

$$W_T^{\text{ED}} = W_A + W_R + W_{AB} \quad (5)$$

范德华力作用能 W_A 可由以下公式计算:

$$W_A = -\frac{A_{\text{BLB}} R}{12H} \quad (6)$$

式中, A_{BLB} 为有效哈梅克常数 (effective Hamaker constant); R 为凝胶颗粒中位粒径 (m); H 为胶粒两表面间距离 (m).

静电力作用能 W_R 可由以下公式计算:

$$W_R = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R\psi_s^2 \ln[1 + \exp(-\kappa H)] \quad (7)$$

式中, π 为圆周率, ϵ 与 ϵ_0 分别为水的介电常数 ($78.5 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) 和真空介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$); ψ_s 胶体 stern 层电势; κ 为 Debye 长度的倒数.

酸碱接触能 W_{AB} 可由以下公式计算:

$$W_{AB} = \pi R \lambda \Delta G_{\text{adh}}^{\text{AB}} \exp\left(\frac{l_0 - H}{\lambda}\right) \quad (8)$$

式中, λ 为溶液中分子间关联长度 ($\approx 0.6 \times 10^{-9} \text{ m}$), $\Delta G_{\text{adh}}^{\text{AB}}$ 为路易斯酸碱接触能.

2 结果与讨论

2.1 微米 Fe_3O_4 磁粉调理污泥过程的研究

2.1.1 微米 Fe_3O_4 磁粉投加量对污泥脱水性能的影响

图 3 为微米磁粉投加量对污泥 Zeta 电位, CST 值以及含水率的影响曲线. 如图 3(a) 所示, 原始污泥

Zeta 电位值为 $-12.37 \text{ mV} \pm 0.89 \text{ mV}$, 随着磁粉投加量不断增加, 污泥 Zeta 电位不断波动, 这与周正等^[25]研究的宏观磁场对污泥 Zeta 电位的影响一致. 图 3 (b) 中, 磁粉投加量在 $0 \sim 0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 范围内, CST 值迅速减小, 此后增大投加量对 CST 值影响不大, 其值在 16 s 附近波动. 调理污泥静沉 30 min 后其含水率随着投加量增加而不断减小, 当投加量为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时含水率达到最低值 98.04%. 结合上述结果, 确定较为合适的磁粉投加量为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.1.2 微米 Fe₃O₄ 磁粉调理下上清液及污泥特征变化

(1) 上清液特征

当微米磁粉投加量为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 调理污泥上清液的基本性质如表 2 所示. 投加磁粉后, 污泥 pH 与电导率均略有升高, 可能是由于磁粉作用使污泥 EPS 分解或破坏, 碱性离子分泌释放所致. 污泥上清液 SS (悬浮固体) 从 $0.032 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $0.027 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, Zeta 电位值几乎不变. 此外, COD、SCOD 及 TOC 数值变化表明, 磁粉处理后污泥上清液的有机物浓度有所升高, 可推测磁粉对污泥 EPS 产生一定分解和破坏作用, 致使 EPS 中金属离子和有机质释放进入上清液中. 由 COD 与 SCOD 数值差异可知释放的大部分有机物属于非溶解性有机物. 污泥中物质如蛋白质、胶质物质、溶解性有机物等可被吸附或沉淀在磁粉上^[17], 因此上清液中有机物浓度升高可能是其在处理过程中随磁粉释放入上清液中.

(2) 污泥形貌特征

图 4 为原始及微米磁粉调理后活性污泥表面微观电镜图像. 图 4(a) 与 4(c) 对比可知, 原始活性污泥絮体之间间隙大, 磁粉调理后污泥絮体结构增大, 污泥絮体之间结合紧密^[17], 间隙水含量得以减少. 粒径变化结果显示, 调理前后污泥粒径分别为 $73.7 \mu\text{m}$ 和 $97.5 \mu\text{m}$, 电镜观察所得的结果与此吻合. 此

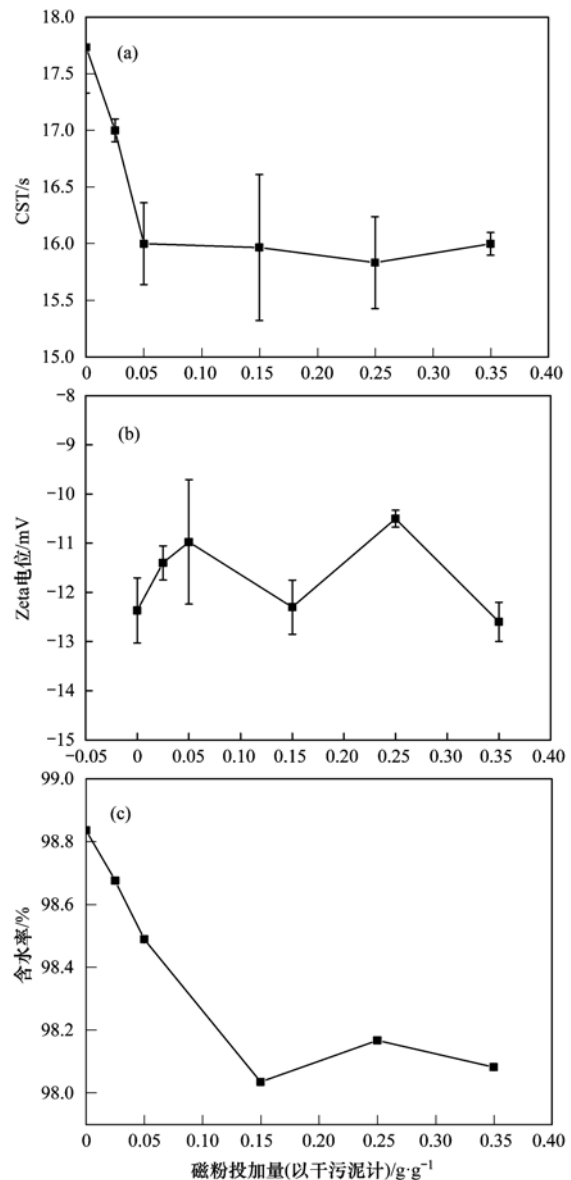


图 3 微米 Fe₃O₄ 磁粉投加量对污泥 Zeta 电位、CST 值以及含水率的影响

Fig. 3 Effect of MMPs dosage on Zeta potential, CST and MC of the sludge

表 2 磁粉调理对污泥上清液基本性质的影响

Table 2 Effect of magnetic particle conditioning on the characteristics of supernatant of AS

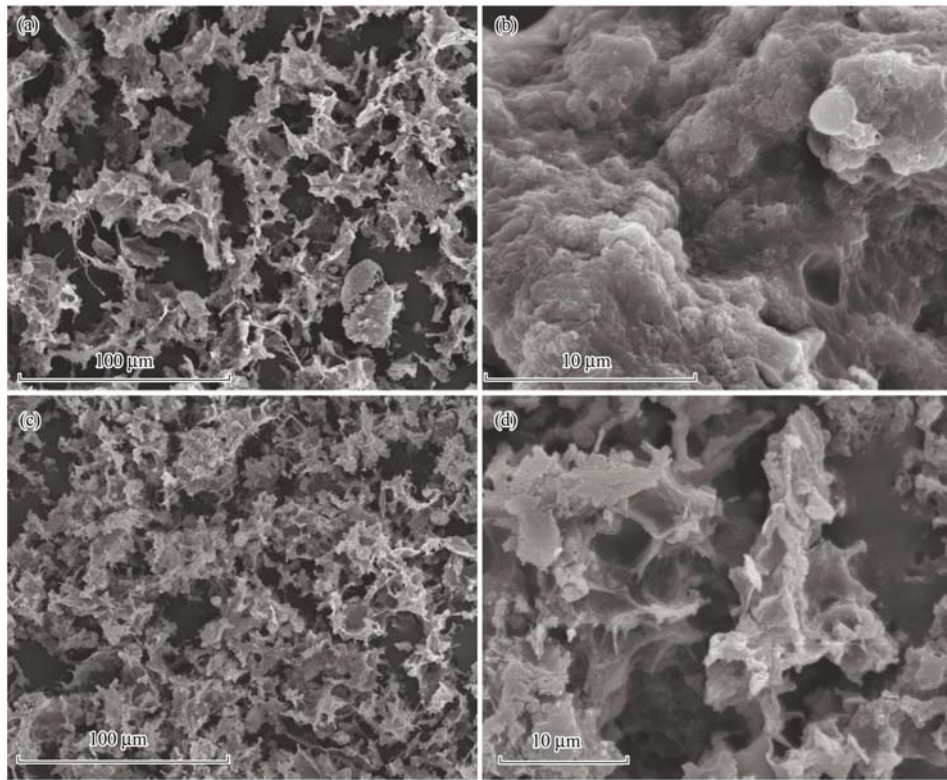
项目	pH	电导率 $/\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$	SS $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Zeta 电位 $/\text{mV}$	COD $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SCOD $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TOC $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
原始污泥	6.807	2.513	0.032	-12.37	90	45.15	9.33
磁粉调理	6.997	2.543	0.027	-12.4	210	60.2	11.35

外, 从图 4(b) 与 4(d) 可知, 原始污泥颗粒表面较为连续, 而磁粉作用后出现孔隙和通道, 胞外聚合物发生皱缩, 便于水分通过, 污泥脱水性能得到改善.

(3) 污泥接触能特征

图 5 为原始污泥以及微米磁粉调理后污泥颗粒

间的接触能曲线. 从中可知, 对于调理前后的污泥来说, 其表面静电力作用能和酸碱接触能组分均为正值, 属排斥力, 而范德华力作用能为负值, 属吸引力. 且 3 种接触能组分均随着颗粒间距离靠近而增大. 酸碱接触能均较静电力作用能和范德华力作用



(a) 和 (b) 为原始污泥; (c) 和 (d) 为磁粉调理后污泥

图 4 污泥 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of the sludge

能大 2 个数量级^[23,26,27], 因此其对污泥颗粒间总的接触能的变化起主导作用. 此外, 磁粉调理后污泥颗粒间的 W_A 与 W_R 之和有所增大, 表明调理后污泥凝聚性能变差; 而 W_A 、 W_R 与 W_{AB} 三者之和急剧减小, 污泥凝聚性能提高, 这与粒径以及扫描电镜图像显示的结果一致. 由此, 较之经典的 DLVO 理论, 扩展后的 EDLVO 理论能准确描述污泥颗粒的凝聚及分散行为.

对比调理前后污泥的接触能曲线, 在 0.157 ~ 10 nm 的范围内, 调理后污泥的酸碱作用能 W_{AB} 下

降, 范德华力作用能 W_A 与静电力作用能 W_R 数值均没有发生较大变化, 总接触能 W_T^{ED} 显著减小. 这说明磁粉对污泥的调理过程中, 絮凝机制的作用极小, 污泥脱水性能得到提高的主要原因在于微米磁粉大大降低了污泥颗粒间的路易斯酸碱作用.

2.2 微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力垂直电场脱水操作条件研究

2.2.1 复合脱水时间对脱水效率和能耗的影响

图 6 为复合脱水时间对脱水效果和电流的影响. 如图 6(a) 所示, 复合脱水 1 h 后污泥含水率从

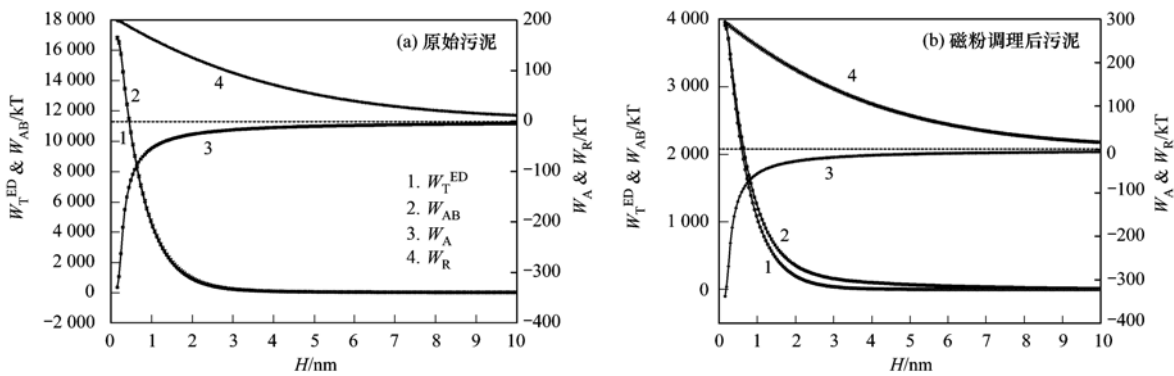


图 5 污泥接触能曲线

Fig. 5 Profiles of the interaction forces of the sludge

91.87%降低至80.75%，2 h 后为55.04%，3 h 后为53.27%，Saveyn 等^[28]指出，污泥电脱水的效果很大程度上依赖于电场施加的时间段，其持续时间不宜过长也不宜过短。电场作用时间太短通常无法达到满意的脱水效果^[29,30]，太长则脱水能耗较

高^[31,32]。根据含水率下降的幅度大小可知复合脱水时间控制在2h 较合理。图6(b)显示电流脱水效率较高的时间段是40~60 min 以及90~120 min，图6(a)确定的2 h 的复合脱水时间正好处于上述时间段。

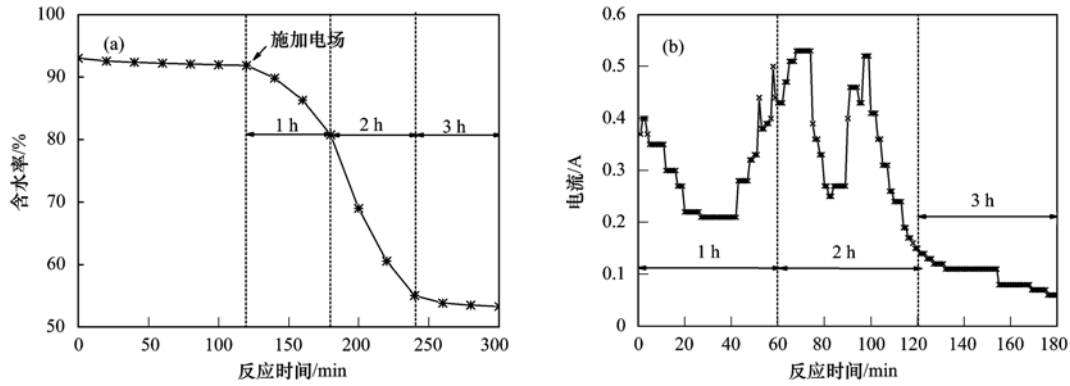


图6 脱水时间对脱水效果和电流的影响

Fig. 6 Effect of dewatering time on the dewatering efficiency and electric current

2.2.2 机械压力对脱水效率和能耗的影响

图7为机械压力对脱水效率和能耗的影响。在机械压缩阶段，施加的机械压力越大，脱除的水分越多，脱水污泥的含水率越低，机械能耗也

相应增大。这一结果与 Lee 等^[33]的观点一致，即机械压力增大导致污泥含固率升高。综合考虑脱水效果与能耗，机械压力选取400~600 kPa 较为合理。

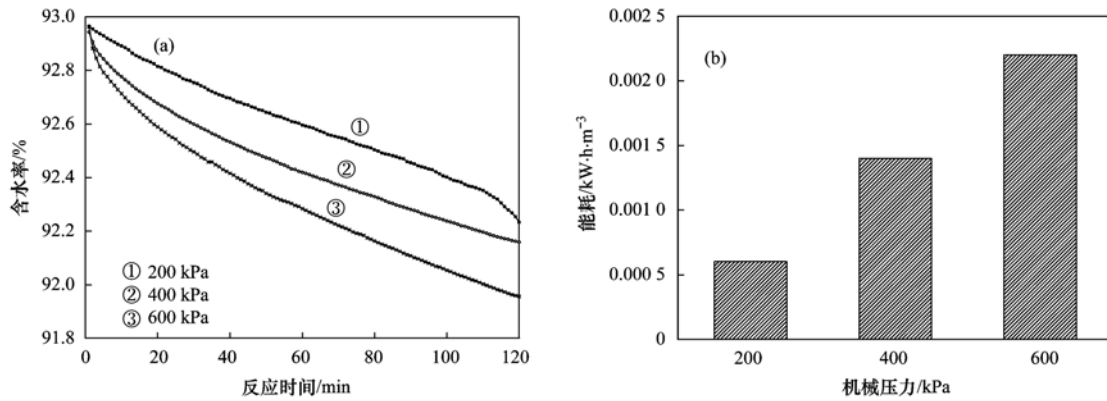


图7 机械压力对脱水效率和能耗的影响

Fig. 7 Effect of mechanical pressure on the dewatering efficiency and energy consumption

2.2.3 电压对脱水效率和能耗的影响

电压对污泥脱水效果和电流的影响如图8所示。在图8(a)、8(c)和8(e)中，电压为50V 时污泥脱水效果最佳，脱水污泥的含水率可降低至79.73%、44.46%和33.90%；电压降低而含水率升高，当电压降至10 V 时污泥脱水效果最差。Tuan 等^[4]亦指出电压大小与脱水效果呈正相关关系。此外，从含水率曲线的下降程度可知，10 V 和30 V 电压下污泥脱水效率较小，而电压上升至50 V 时，污泥脱水效率显著升高。在图8(b)、8(d)和8(f)中，

脱水电压为10 V 时，整个复合脱水过程中电流均在0.05 A 附近波动，并未出现电流峰，表明污泥脱水效率较低；脱水电压为30 V 时，亦未出现明显电流峰，但全程电流较之10 V 时有显著升高，为0.2 A 左右；脱水电压选取50 V 时，在电场施加初期，由于阴阳极之间距离较大等原因，污泥脱水效率相对较低；在50~120 min 内，阴阳电极距离靠近，出现明显电流峰，脱水效率提高。此外，在不同的机械压力下，污泥复合脱水过程中电流变化范围也呈现出显著的差别：当机械压力在200、400、600 kPa 时，

相应的电脱水过程中电流变化范围依次为 0 ~ 0.3、0 ~ 1.2、0 ~ 1.8 A. 由此可见,较高的机械压力可以

使同一脱水进程中污泥泥饼的厚度减小,从而在同样的电压下产生更大的电场强度和电流,提高了脱

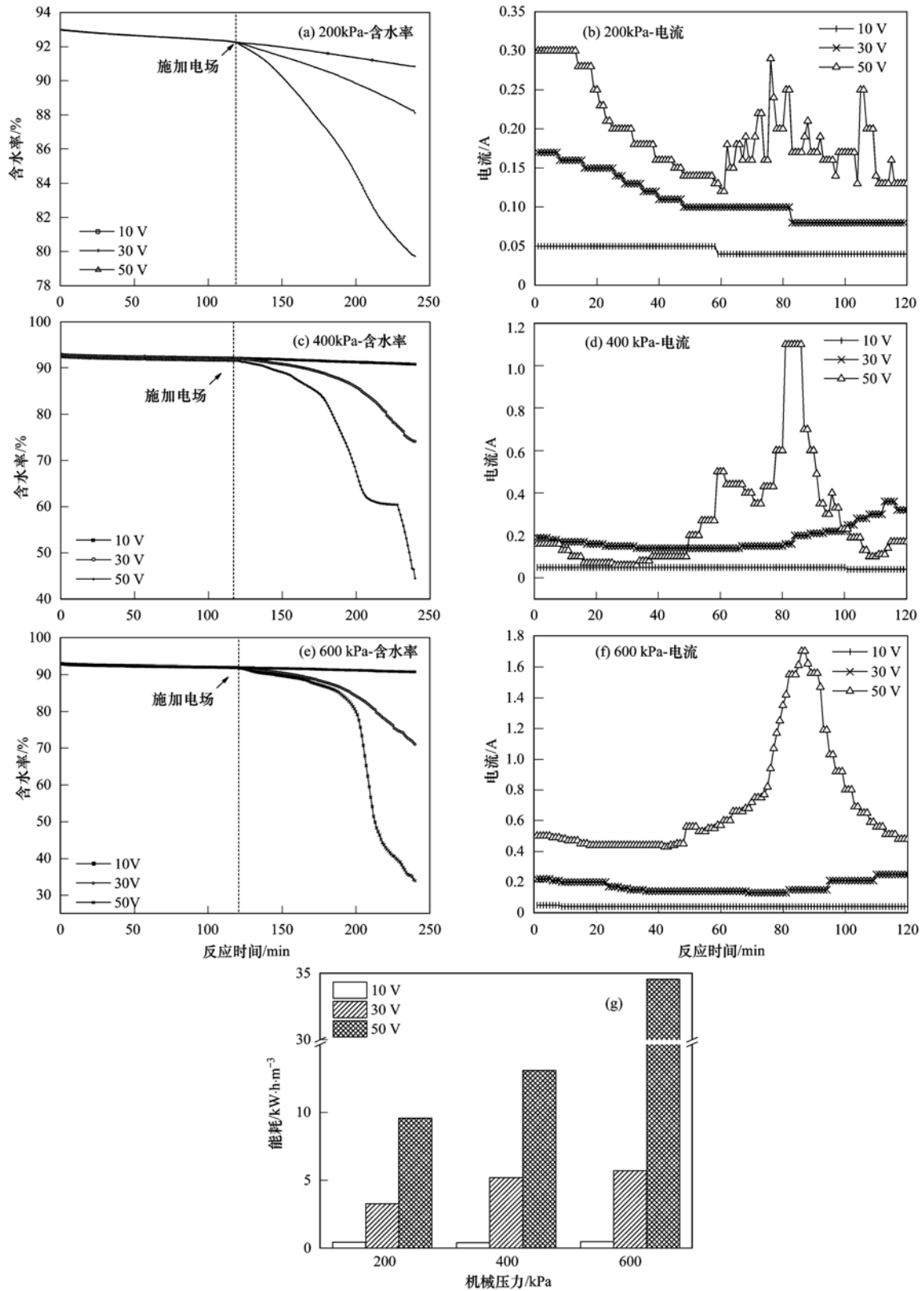


图 8 电压对脱水效率、电流和能耗的影响

Fig. 8 Effect of voltage on the dewatering efficiency, electric current and energy consumption

水效果。

结合图 7、图 8 的结果可知,机械压缩过程对污泥含水率降低的程度比复合脱水过程小,但是经过机械压缩,泥饼变薄,阴阳极距离减小,有利于后续电渗透脱水作用。

如图 8(g) 所示脱水效果佳的组合其能耗也相对较高。Gingerich 等^[32]指出电脱水能耗在不同的研究中并不一致,但其总体规律是随着污泥含固率增加而增加。综合上述研究结果,在 MPEOD 过程中电压选择在 30 ~ 50 V 较为合理,这与已有的研究结果一致^[3,4,28]。

2.3 微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力垂直电场污泥脱水效果评价

图 9 为优化 MPEOD 工艺参数下污泥含水率及减量化的变化曲线。原始活性污泥的含水率为 99.18%,经微米磁粉调理后含水率降至 98.08%,此过程污泥质量由 2000 g 减少至 987.43 g,质量减

少了 50.63%。Lakshmanan 等^[18]利用纳米磁粉来脱离污泥中水分从而分离污泥的固液相,发现在外加磁场的辅助下,污泥中水分可脱去 95%,高于本研究的减量率 50.63%;这是由于其采用宏观磁场和纳米磁粉联合调理 100 mL 污泥浓度为 0.4 g·L⁻¹ 的初沉污泥所致。在 MPEOD 过程中含水率下降幅度最大的阶段为复合脱水阶段,从 91.60% 降低至 44.46%,此过程污泥质量由 224.52 g 减少至 33.96 g,质量减少了 84.74%。如图 9(b) 所示,MPEOD 工艺可使污泥减量化达到 98.30%,水分脱除率达到 99.34%,同时能耗仅为 0.013 3 kW·h·kg⁻¹。而 Saveyn 等^[28]对于垂直电场的研究发现在 400 kPa、50 V 条件下脱水 1 h 污泥脱水率为 88.05%,远低于本研究同条件下的脱水率 95.74%;Feng 等^[34]的研究发现用絮凝调理后活性污泥进行同样程序操作,最后污泥含水率为 58.1% 且能耗为 0.153 kW·h·kg⁻¹,高于本研究的能耗。

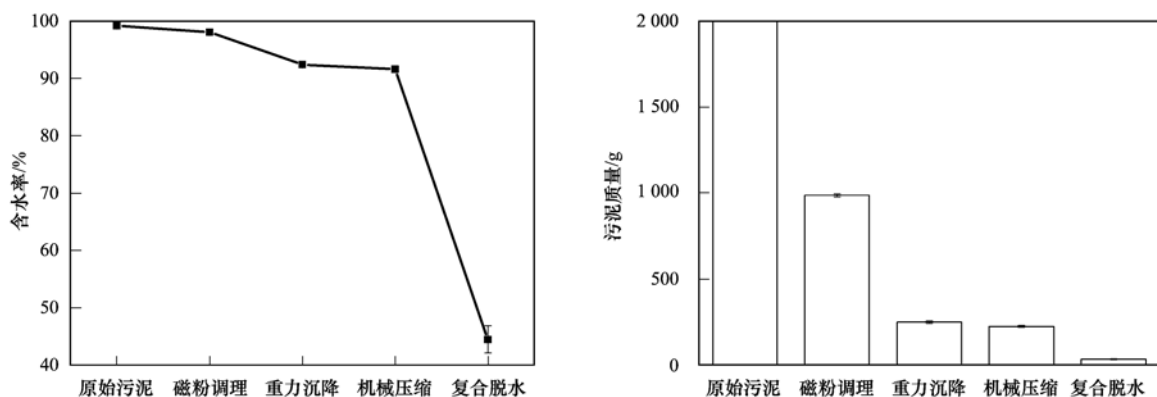


图 9 MPEOD 工艺污泥含水率变化及污泥减量效果

Fig. 9 Variation in sludge MC and the minimization of sludge during the MPEOD process

3 结论

(1) 微米 Fe₃O₄ 磁粉投加量为 0.15 g·g⁻¹ 时污泥脱水效果最佳。

(2) 微米 Fe₃O₄ 磁粉调理使得污泥颗粒之间总接触能降低,污泥颗粒易于聚集,絮体结构增大,孔径增多,有机物释放进入上清液中,利于脱水。

(3) 磁化调理过程中,絮凝机制的作用极小,污泥脱水性能得到提高是由于微米 Fe₃O₄ 磁粉降低了污泥颗粒间的路易斯酸碱作用。

(4) MPEOD 操作条件对脱水效果和能耗产生重要影响。电场作用时间、电压、机械压力均与脱水效果和能耗呈正相关关系。为在较小能耗下获得较佳脱水效果,电场作用时间宜取 2 h,电压宜取 30

~ 50 V,机械压力宜取 400 ~ 600 kPa。

(5) 机械压力为 400 kPa,电压取 50 V,电场作用时间为 2 h 时,进行 MPEOD 实验,过程中污泥减量化达到 98.30%,水分脱除率达到 99.34%,效果明显,同时能耗仅为 0.013 3 kW·h·kg⁻¹。

参考文献:

- [1] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 2012, 38(2): 1-5.
- [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] 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.

- [4] Tuan P A, Mika S, Pirjo I. Sewage sludge electro-dewatering treatment—a review [J]. *Drying Technology*, 2012, **30** (7): 691-706.
- [5] 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.
- [6] 周贞英, 袁海平, 朱南文, 等. 电化学处理改善剩余污泥脱水性能[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2199-2203.
- [7] 卢宁, 文一波, 魏婧娟. 污泥的电渗透脱水技术研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2010, **35**(3): 85-87, 95.
- [8] 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.
- [9] 董立文, 张鹤清, 汪诚文, 等. 造纸污泥的电渗透脱水效果[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(11): 4185-4190.
- [10] Kuh S E, Kim D S. Effects of surface chemical and electrochemical factors on the dewatering characteristics of fine particle slurry[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2004, **39**(8): 2157-2182.
- [11] Grant C S, Matteson M J, Clayfield E J. Surfactant-enhanced electroosmotic dewatering of mineral ultrafines [J]. *Separation Science and Technology*, 1991, **26**(6): 773-802.
- [12] 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, **21**(5): 36-38.
- [13] 刘欢, 杨家宽, 时亚飞, 等. 不同调理方案下污泥脱水性能评价指标的相关性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3394-3399.
- [14] 周翠红, 凌鹰, 曹洪月. 市政污泥脱水性能实验研究与形态学分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 898-903.
- [15] 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 等. 克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1183-1190.
- [16] 周雨珺, 付豪逸, 范先锋, 等. 改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 612-618.
- [17] 源亮君. 磁性物质调理污泥及其机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [18] Lakshmanan R, Rajarao G K. Effective water content reduction in sewage wastewater sludge using magnetic nanoparticles [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **153**: 333-339.
- [19] Ni S Q, Ni J Y, Yang N, *et al.* Effect of magnetic nanoparticles on the performance of activated sludge treatment system [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 555-561.
- [20] Liu X M, Sheng G P, Luo H W, *et al.* Contribution of extracellular polymeric substances (EPS) to the sludge aggregation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (11): 4355-4360.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] Wahlberg E J, Keinath T M, Parker D S. Influence of activated sludge flocculation time on secondary clarification [J]. *Water Environment Research*, 1994, **66**(6): 779-786.
- [23] Van Oss C J, Good R J. Surface tension and the solubility of polymers and biopolymers: the role of polar and apolar interfacial free energies [J]. *Journal of Macromolecular Science: Part A-Chemistry*, 1989, **26**(8): 1183-1203.
- [24] Hoek E M V, Agarwal G K. Extended DLVO interactions between spherical particles and rough surfaces [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **298**(1): 50-58.
- [25] 周正, 边炳鑫, 李帅. 磁化处理对活性污泥胶体颗粒表面的 Zeta 电位的影响[J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(3): 174-177.
- [26] 郭玲香, 欧泽深, 胡明星. 煤泥水悬浮液体系中 EDLVO 理论及应用[J]. *中国矿业*, 1999, **8**(6): 69-72.
- [27] 罗琳, 邱冠周, 何伯泉, 等. 界面相互作用与石英、赤铁矿颗粒的凝聚行为[J]. *中南工业大学学报*, 1996, **27**(2): 153-158.
- [28] Saveyn H, Van der Meeren P, Pauwels G, *et al.* Bench-and pilot-scale sludge electro-dewatering in a diaphragm filter press [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(9): 53-60.
- [29] Smollen M, Kafaar A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study [J]. *Water Science & Technology*, 1994, **30**(8): 159-168.
- [30] Snyman H G, Forssman 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.
- [31] Barton W A, Miller S A, Veal C J. The electro-dewatering of sewage sludges [J]. *Drying Technology: An International Journal*, 1999, **17**(3): 498-522.
- [32] Gingerich I, Neufeld R D, Thomas T A. Electroosmotically enhanced sludge pressure filtration [J]. *Water Environmental Research*, 1999, **71**(3): 267-276.
- [33] Lee J K, Shin H S, Park C J, *et al.* Performance evaluation of electro-dewatering system for sewage sludges [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2002, **19**(1): 41-45.
- [34] Feng J, Wang Y L, Ji X Y. Dynamic changes in the characteristics and components of activated sludge and filtrate during the pressurized electro-osmotic dewatering process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **134**: 1-11.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行