

申亮, 施周, 罗璐, 等. 溶菌酶辅助壳聚糖调理对活性污泥脱水性能的影响及其机理[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 88-94.

SHEN L, SHI Z, LUO L, et al. Effect and mechanism of lysozyme assisted chitosan treatment on dewatering performance of activated sludge [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 88-94.

溶菌酶辅助壳聚糖调理对活性污泥脱水性能的影响及其机理

申亮¹, 施周^{2,*}, 罗璐², 戴慧奇², 周先敏²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北武汉 430010; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要 通过测定真空抽滤泥饼含水率、污泥比阻、污泥 ζ 电位, 研究溶菌酶辅助壳聚糖调理对活性污泥脱水性能的影响, 并通过提取污泥絮体形态学特征进行二维分形维数(D_2)分析, 深入剖析污泥脱水机理。结果表明, 溶菌酶辅助壳聚糖调理后泥饼含水率下降了约 21.3%, 污泥比阻下降了约 94.5%, 活性污泥脱水性能得到显著提高。分析调理前后的污泥 ζ 电位和絮体形态, 发现污泥双电层被压缩, 污泥 ζ 电位降至 0.28 mV, 同时污泥絮体密实程度增加, D_2 值提高到 1.748, 说明溶菌酶辅助壳聚糖调理活性污泥可以促进污泥胶体的脱稳、絮凝, 压缩絮体颗粒间孔隙并释放部分间隙水。

关键词 壳聚糖 溶菌酶 活性污泥脱水性能 污泥 ζ 电位 分形维数 絮体形态学

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)09-0088-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.09.011

Effect and Mechanism of Lysozyme Assisted Chitosan Treatment on Dewatering Performance of Activated Sludge

SHEN Liang¹, SHI Zhou^{2,*}, LUO Lu², DAI Huiqi², ZHOU Xianmin²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract The effect of lysozyme-assisted chitosan treatment on sludge dewaterability were evaluated through measurement of moisture content of cake by vacuum filtration, specific resistance to filtration (SRF) and ζ potential of sludge. Meanwhile, the mechanism of sludge dewaterability was further analyzed through two-dimensional fractal dimension analysis by extracting morphological features. The results indicated that moisture content of cake and SRF decreased by 21.3% and 94.5% respectively after lysozyme-assisted chitosan treatment, which showed that the dewaterability of activated sludge was improved significantly. The ζ potential of sludge decreased to 0.28 mV and the D_2 value increased to 1.748 which showed that twin electrical layer was compressed and the dense degree of sludge particles was increased by analyzing ζ potential and flocculation morphology after treated by lysozyme-assisted chitosan treatment. The results showed that lysozyme-assisted chitosan treatment on activated sludge can promote the destabilization and flocculation of sludge colloid, compress the internal pores of sludge flocs and release part of pore-water.

Keywords chitosan lysozyme dewatering performance of activated sludge ζ potential of sludge fractal dimension flocculation morphology

随着我国城镇化的快速发展和市政公用基础设施的不断完善, 我国污水处理能力在近十年内急剧

增长。根据《2021 年中国城市建设状况公报》, 截至 2021 年年末, 我国建成投产的城镇污水处理厂共 2 827 座, 污水处理规模约为 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$, 按污泥脱水至含水率 80% 计, 每年产生污泥量高达 $6.0 \times 10^7 \text{ t}$ 。污泥作为城市污水处理后产生的副产物, 富含难降解有机物、细菌、病毒及重金属等有害物质, 对污泥的妥善处理和处置至关重要^[1-2], 而对高含水率的活性污泥进行脱水处理是污泥处置的前

[收稿日期] 2022-10-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51078130); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3059)

[作者简介] 申亮(1989—), 男, 硕士, 研究方向为水质净化与水污染控制技术, E-mail: 844686514@qq.com。

[通信作者] 施周, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水质净化与水污染控制技术, E-mail: zhous61@163.com。

提和关键^[3]。活性污泥是在曝气池内产生的固液混合物,主要由菌胶团、难降解有机物及无机颗粒组成,其结构松散、表面积较大,含水率一般在 97%~99%,含有大量的自由水、孔隙水、结合水^[4]。

活性污泥的脱水性能通常较差,不经过化学药剂调理,很难进行下一步的机械脱水。研究^[5-7]表明,活性污泥脱水性能不仅受污泥自身的物理化学特性影响,还与活性污泥有机质成分、水分存在形式、抽滤比阻、 ζ 电位以及絮体形态等有关。污泥颗粒表面因存在羧基、羟基、磷酸基等阴离子官能团而带负电,当负电性的胶体颗粒彼此靠近时,胶体双电层结构产生静电斥力,不利于胶体脱稳凝聚,因此,污泥 ζ 电位是影响胶体脱稳凝聚的重要因素。随着计算机科学及扫描电镜技术的发展,目前国内外已有研究^[8]采用图像处理技术对污泥絮体形态特征进行分析,将图像分析和分形理论相结合,从微观角度观测污泥絮体形态表面特征和内部结构,利用絮体外形尺寸、粒径分布及分形维数等定量表征絮体结构,从絮体形态学角度探讨活性污泥的脱水机理。

目前,国内污水处理厂调理污泥主要采用聚丙烯酰胺(PAM)和聚合氯化铝(PAC)等高分子聚合物,其水解产生的物质存在低毒性、难降解、对环境有潜在危害等问题,已在污泥处理领域引起高度重视^[9]。壳聚糖分子含有活泼的羟基、氨基等极性基团,在弱酸环境中表面分布正电荷,可作为有机阳离子絮凝剂替代传统的无机絮凝剂^[10]。目前,用于污泥脱水的 PAC、PAM、壳聚糖单位污泥投加成本约为 2.48、6 元/(t 污泥),由此可见,壳聚糖的单位污泥投加成本高于 PAC,但远低于 PAM。同时,壳聚糖和溶菌酶作为天然提取物,均可生物降解,对人体无毒、无害。溶菌酶可以催化水解微生物细胞壁,改善污泥絮体结构,释放絮体内部间隙水从而促进污泥脱水^[11]。因此,溶菌酶辅助壳聚糖调理活性污泥,有望在壳聚糖调理的基础上进一步改善污泥脱水性能。有鉴于此,本文研究了溶菌酶辅助壳聚糖调理活性污泥对其脱水性能的影响,从污泥 ζ 电位、分形维数和絮体 SEM 表征等方面对污泥脱水机理进行了探讨和分析。

1 材料与方法

1.1 污泥来源与性质

污泥样品取自长沙市某大型污水处理厂的活性

污泥,经重力沉降和筛网过滤后,置于 4 ℃ 条件下备用,每批次污泥均在 5 d 内使用完,所有试验均采用 3 次平行试验。污泥各项基本指标经检测后如表 1 所示。

表 1 污泥的基本性质指标
Tab. 1 Basic Properties of Sludge

指标	数值
混合液悬浮固体浓度 (MLSS)/(mg·L ⁻¹)	22 000~25 000
混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)/(mg·L ⁻¹)	4 000~5 500
污泥含水率	97%~99%
pH 值	6.8~7.0
ζ 电位/mV	-4.71
比阻/(m·kg ⁻¹)	4.12×10 ¹²

1.2 主要试剂与仪器

主要试剂:壳聚糖,购于国药集团化学试剂有限公司,脱乙酰度质量分数为 80%~95%,溶于 1% HAC 溶液;溶菌酶 0633(活度:20 000 U/mg)为进口分装,Amresco 公司生产。

主要仪器:JJ-6 型六联搅拌机(长沙索拓科学仪器有限公司)、SHB-III A 型循环式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司)、Nano ZS90 型 ζ 电位仪(英国马尔文仪器有限公司)、XDS-1B 型倒置显微镜(重庆光电仪器有限公司)、JSM-5600LV 型扫描电镜(日本 JEOL 公司)及真空抽滤装置一套。

1.3 试验方法

采用真空抽滤法(50 kPa)测量污泥比阻(specific resistance to filtration, SRF)^[12];采用重量法测量泥饼含水率^[13];使用 Nano ZS90 型 ζ 电位仪测定污泥 ζ 电位;污泥絮体形态使用 XDS-1B 型倒置显微镜以及 JSM-5600LV 型扫描电镜探测,使用 Image-Pro 6.0 图像处理软件对絮体显微照片计算絮体特征参数(投影面积 P 及特征周长 A),对 $\ln P$ 和 $\ln A$ 进行线性拟合所得斜率即为二维分形维数(D_2)。

2 结果与讨论

2.1 污泥调理前后泥饼含水率和污泥比阻变化

真空抽滤泥饼含水率和污泥比阻是反映污泥脱水性能的指标,泥饼含水率和污泥比阻越低说明污泥脱水性能越好,反之亦然。图 1 和图 2 是在不同投加量下,壳聚糖单独调理污泥和溶菌酶辅助壳聚糖调理污泥[固定壳聚糖投加量为 0.01 g/(g 干污

泥)]对泥饼含水率和污泥比阻的影响。

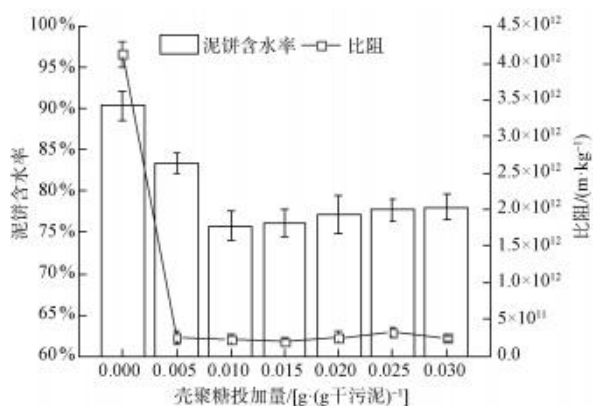
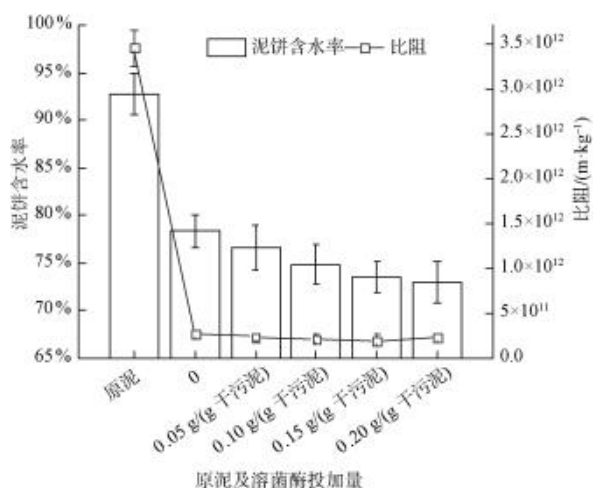


图1 壳聚糖单独调理对泥饼含水率和比阻的影响

Fig. 1 Effects of Chitosan Alone Conditioning on Moisture Content and Specific Resistance of Sludge



注:壳聚糖投加量为0.010 g/(g干污泥)。

图2 溶菌酶辅助壳聚糖调理对泥饼含水率和比阻的影响
Fig. 2 Effects of Lysozyme-Assisted Chitosan Conditioning on Moisture Content and Specific Resistance of Sludge

由图1可知,壳聚糖单独调理污泥显著降低了泥饼含水率和污泥比阻,污泥比阻下降尤甚。当壳聚糖投加量为0.005~0.030 g/(g干污泥)时,污泥比阻降至 $1.9 \times 10^{11} \sim 3.2 \times 10^{11}$ m/kg,相对原泥比阻(4.12×10^{12} m/kg)降低了92.2%~95.4%;而泥饼含水率随壳聚糖投加量先降低后缓慢升高,当投加量为0.010 g/(g干污泥)时,泥饼含水率从原泥的90.9%降至最低(77.5%),下降了约14.7%。溶菌酶辅助壳聚糖调理时,污泥比阻变化较小,泥饼含水率在壳聚糖调理的基础得以进一步降低,且随溶菌酶投加量的增加而不断降低。当溶菌酶投加量为0.200 g/(g干污泥)时,泥饼含水率由原泥的

92.7%降至73.0%,下降了约21.3%,污泥比阻由原泥的 3.45×10^{12} m/kg降至 1.9×10^{11} m/kg,下降了约94.5%。由此可见,溶菌酶辅助壳聚糖调理污泥可以有效降低泥饼含水率和比阻,污泥脱水性能得到显著提高。

2.2 污泥调理前后 ζ 电位变化

每批次污泥取8组试样测定其 ζ 电位,取均值作为污泥 ζ 电位值。如图3、图4所示,原泥 ζ 电位为-7.2~-1.0 mV,| ζ |电位平均值约为4.71 mV。污泥经壳聚糖单独调理后 ζ 电位变化较大,污泥 ζ 电位随投加量增加先降低后迅速上升,最终由负电位转变为正电位。当壳聚糖投加量为0.010 g/(g干污泥)时,污泥| ζ |电位降至最低,平均值为0.71 mV。溶菌酶辅助壳聚糖调理污泥时,投加适量溶菌酶能够在壳聚糖调理基础上进一步压缩双电层。溶菌酶投加量为0.10 g/(g干污泥)时,污泥| ζ |电位平均值降至0.28 mV,溶菌酶投加量超过0.10 g/(g干污泥)后,污泥颗粒表面的 ζ 电位转变为正电位。

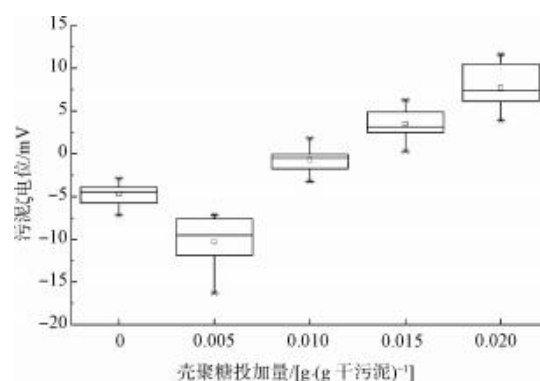
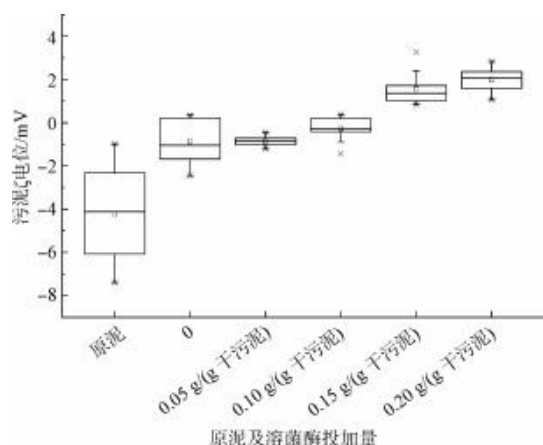


图3 壳聚糖单独调理对污泥 ζ 电位的影响
Fig. 3 Effects of Chitosan Alone Conditioning on Sludge ζ Potential

Morgan等^[14]研究认为,污泥 ζ 电位受蛋白质分子影响,污泥颗粒表面的负电荷与蛋白质分子上的氨基基团正电荷互相中和,引起 ζ 电位的增加。弱酸环境中壳聚糖分子表面的游离氨基质子化后呈现正电性,因此,投加适量壳聚糖调理污泥,可以压缩胶体双电层结构,降低污泥| ζ |电位,促进污泥胶体脱稳凝聚,从而改善污泥脱水性能。但壳聚糖投加量过多将导致污泥胶体表面带上相反电荷,变成正电位,胶体颗粒又因正电互斥而重新分散,造成污泥脱水性能恶化。

溶菌酶自身即是一种碱性球蛋白,因此,用适量



注:壳聚糖投加量为 0.010 g/(g 干污泥)。

图 4 溶菌酶辅助壳聚糖调理对污泥 ζ 电位的影响

Fig. 4 Effects of Lysozyme-Assisted Chitosan Conditioning on Sludge ζ Potential

的溶菌酶调理污泥也可以压缩胶体双电层结构,降低污泥 $|\zeta|$ 电位,促进污泥胶体脱稳凝聚。溶菌酶分子量约为 1.45 kDa,溶菌酶分子的氨基数量远远低于高分子聚合物的壳聚糖(分子量为 50~90 kDa,脱乙酰度质量分数为 86.6%),因此,可用溶菌酶在壳聚糖调理基础上进一步压缩胶体双电层结构,促进污泥胶体脱稳、凝聚。

2.3 污泥絮体形态学分析

2.3.1 污泥分形维数分析

活性污泥的脱水性能与其絮体结构密切相关,污泥絮体结构的不规则形态可用分形理论进行定量分析^[15-16]。 D_2 可表征污泥絮体的结构特征和密实程度,因此,分形维数可以有效地衡量污泥的脱水性能。 D_2 越接近 2,污泥絮体越密实,污泥的脱水性能也越好^[13]。

根据二值化的显微照片(图 5)提取污泥絮体形态学的特征参数,线性拟合后得到原泥、溶菌酶、壳聚糖以及两者联合调理的 D_2 值分别为 1.488、1.561、1.676 及 1.748(图 6)。原泥颗粒细小而松散, D_2 仅为 1.488;污泥经溶菌酶调理后,溶菌酶对微生物细菌的破壁作用,使得污泥絮体变得细碎、紧密, D_2 增加到 1.561;污泥经壳聚糖单独调理后,污泥絮体 D_2 增加至 1.676,污泥絮体宽大、疏松,其内部孔隙也较大;溶菌酶辅助壳聚糖调理污泥,进一步凝聚了絮体颗粒,使其变得更加紧密,并释放了絮体内的部分间隙水,污泥絮体 D_2 值增加至最大(1.748)。由此可见,分形维数越大,对活性污泥的脱水性能越有利。

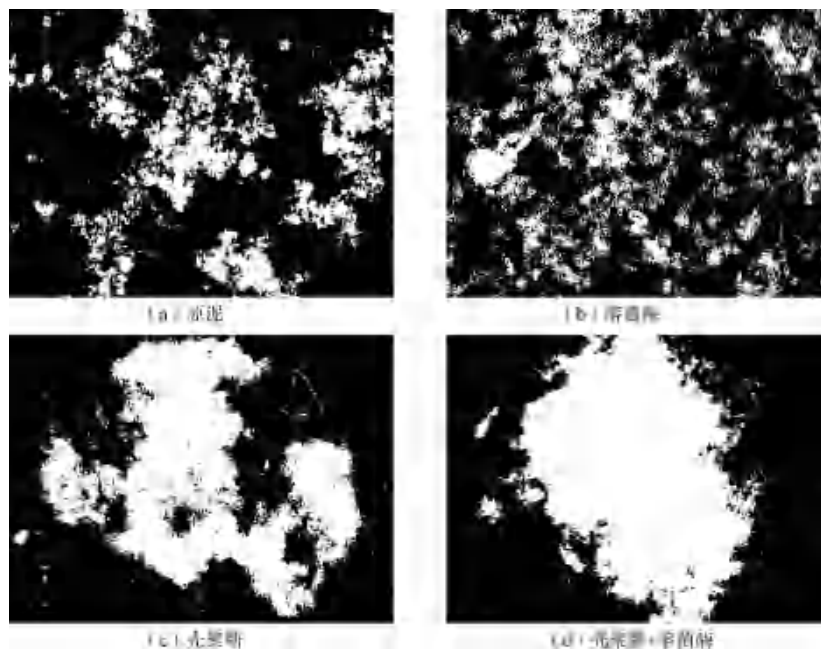


图 5 二值化的显微图

Fig. 5 Binarization Micrograph

2.3.2 污泥絮体扫描电镜分析

通过扫描电镜技术对活性污泥絮体进行微观观

测,污泥絮体经扫描电镜放大 3 000 倍拍摄的絮体表面如图 7 所示,电镜扫描图像可与二值化的显微

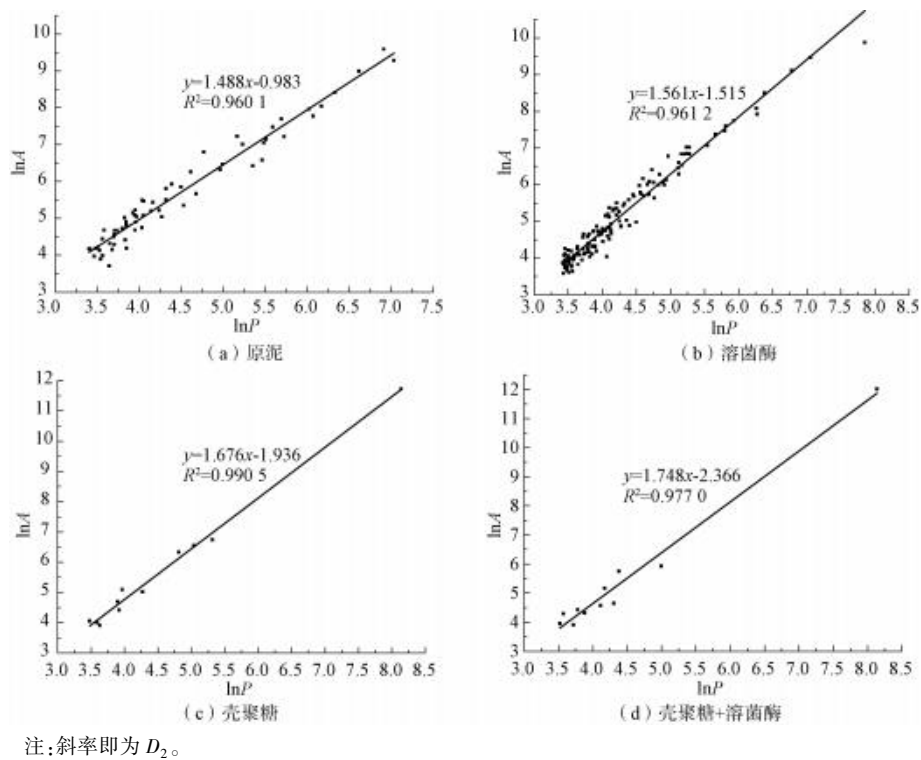
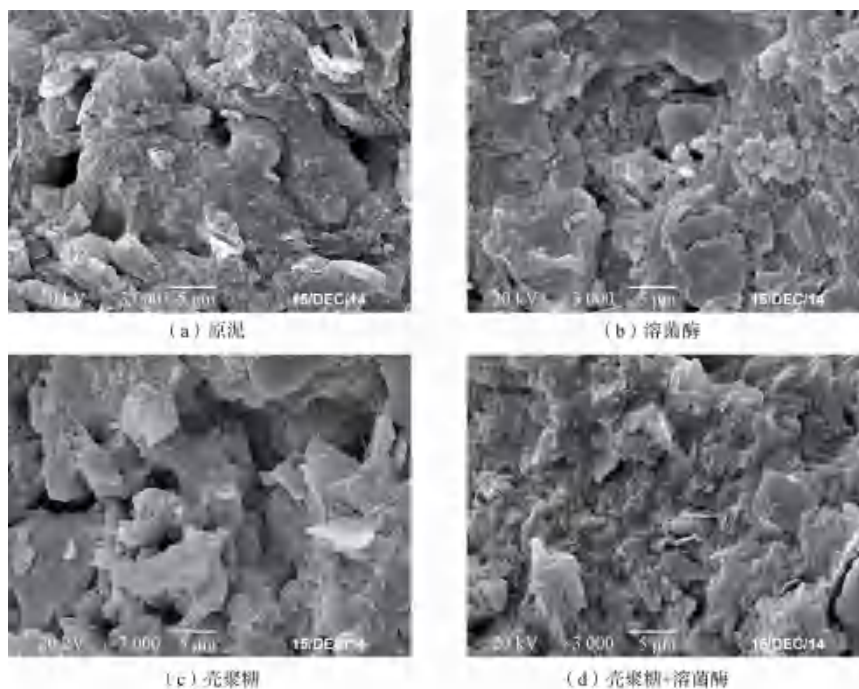
图6 $\ln P$ 和 $\ln A$ 线性拟合Fig. 6 Linear Fitting of $\ln P$ and $\ln A$ 

图7 污泥絮体表面形态扫描电镜图片(放大倍数:3 000)

Fig. 7 SEM Image of Surface Morphology of Sludge Floc (Magnification Times: 3 000)

图片互相印证。由图 7(a) 和图 7(c) 判断,污泥经壳聚糖单独调理后,污泥絮体颗粒呈网状结构,絮体孔隙较大,存在较多内部间隙水。根据图 7(b) 和图

7(d),经溶菌酶单独调理或溶菌酶辅助壳聚糖调理后,污泥絮体表面结构变得紧凑、密实,孔隙数量大大减少。结果表明,壳聚糖具有良好的吸附架桥作

用,污泥颗粒凝聚成疏松的絮状体,其体积和密度增加而易于沉降,但絮状体内部的颗粒间隙水未被去除。溶菌酶辅助壳聚糖调理污泥时,通过水解微生物细胞壁,释放颗粒内部间隙水,进一步改善了活性污泥的脱水程度。

3 结论

(1)活性污泥经溶菌酶辅助壳聚糖调理后,真空抽滤泥饼含水率由原泥的 92.7%降至 73.0%,下降约 21.3%,污泥比阻由原泥的 3.45×10^{12} m/kg 降至 1.9×10^{11} m/kg,下降了约 94.5%,活性污泥的脱水性能得到显著提高。

(2)通过对污泥絮体分形维数和扫描电镜分析,可知溶菌酶辅助壳聚糖调理改善活性污泥脱水性能,其机理主要在于:一方面通过电性中和和压缩污泥双电层结构,污泥 ζ 电位均值由 4.71 mV 降低至 0.28 mV,促进污泥胶体脱稳、凝聚;另一方面压缩絮体颗粒间孔隙并释放部分间隙水,增加污泥絮体密实程度, D_2 值由 1.488 提高到 1.748,从而进一步改善活性污泥的脱水性能。

参考文献

- [1] 于沛然. 活性污泥深度脱水过程的跨尺度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- YU P R. The cross-scale study on deep dewatering of activated sludge[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [2] WANG H L, WANG C J, CHEN F, et al. Modification to degradation of hexazinone in forest soils amended with sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199/200: 96-104. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.073.
- [3] 陆香玉, 俞海祥, 陈亚, 等. 化学絮凝与电絮凝调理污泥脱水性能影响作用的对比研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 257-267.
- LU X Y, YU H X, CHEN Y, et al. Comparison of the effects of chemical flocculation and electric flocculation conditioning on sludge dewatering performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 257-267.
- [4] 曹晨暘, 李玉瑛. 优化超声波联合絮凝剂强化污泥脱水的研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(6): 72-75.
- CAO C Y, LI Y Y. Research on the optimization of ultrasonic combined flocculants for reinforcing sludge dewatering [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(6): 72-75.
- [5] JIA X S, FANG H H P, FURUMAI H, et al. Surface charge and extracellular polymer of sludge in the anaerobic degradation process[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(5/6): 309-316. DOI: 10.1016/0273-1223(96)00660-9.
- [6] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- XU B J, LONG T R. Contemporary principles of water and wastewater treatment [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] 林群慧. 微波辅助热解污泥机理与试验[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- LIN Q H. Mechanism and experimental study on sewage sludge pyrolysis using microwave heating [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [8] 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.
- ZHOU C H, LING Y, CAO H Y. Dewatering capability and morphological of municipal sludge [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 898-903.
- [9] 李晶, 胡文容, 裴海燕. 壳聚糖絮凝剂在柠檬酸废水污泥处理中的应用[J]. 工业水处理, 2008, 28(8): 18-21.
- LI J, HU W R, PEI H Y. Application of the flocculant, chitosan, to the treatment of citric acid wastewater sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(8): 18-21.
- [10] KASEAMCHOCHOUNG C, LERTSUTTHIWONG P, PHALA-KORNKULE C. Influence of chitosan characteristics and environmental conditions on flocculation of anaerobic sludge[J]. Water Environment Research, 2006, 78(11): 2210-2216.
- [11] 罗璐, 施周, 许仕荣, 等. 溶菌酶预处理对剩余污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(3): 87-91.
- LUO L, SHI Z, XU S R, et al. Effect of lysozyme pretreatment on dewatering performance of excess activated sludge [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(3): 87-91.
- [12] 柳海波, 张惠灵, 范凉娟, 等. 投加调理剂与表面活性剂对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(3): 10-14.
- LIU H B, ZHANG H L, FAN L J, et al. Effect of joint action of inorganic conditioner and surfactant on dewaterability of sludge [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(3): 10-14.
- [13] 李恺, 叶志平, 王凤英, 等. 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(3): 536-543.
- LI K, YE Z P, WANG F Y, et al. The effect and mechanism of freeze / thawing combined with chemical treatment on sludge dewaterability [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010(3): 536-543.
- [14] MORGAN J W, FOSTER C F, EVISON L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges [J]. Water Research, 1990, 24(6): 745-750.
- [15] YUAN D Q, WANG Y L, FENG J. Contribution of stratified extracellular polymeric substances to the gel-like and fractal

structures of activated sludge[J]. *Water Research*, 2014, 56: 56–65. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.028.

- [16] 郝凯越, 李远威, 张宁, 等. MATLAB 环境下分形维数在活性污泥 SEM 图像中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 22–27.

HAO K Y, LI Y W, ZHANG N, et al. Application of fractal dimension in SEM image of activated sludge under MATLAB environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(7): 22–27.

(上接第 66 页)

- [11] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1489–1498.

CHENG S P, WANG Y Y, WU J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1489–1498.

- [12] BAYATI M, HO T L, VU D C, et al. Assessing the efficiency of constructed wetlands in removing PPCPs from treated wastewater and mitigating the ecotoxicological impacts[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2021, 231: 113664. DOI: 10.1016/j.ijheh.2020.113664.

- [13] 金磊. 黄浦江上游太浦河水源水体中全氟化合物赋存特征及风险评价[J]. *净水技术*, 2021, 40(1): 54–59.

JIN L. Risk assessment and occurrence characteristics of PFCs in water body of Taipu water source in upstream of Huangpu River[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(1): 54–59.

- [14] 金磊, 姜巍巍, 姜蕾, 等. 太浦河水体中抗生素赋存特征及生态风险[J]. *净水技术*, 2022, 41(4): 35–40.

JIN L, JIANG W W, JIANG L, et al. Occurrence characteristics and ecological risk of antibiotics in water body of Taipu River[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(4): 35–40.

- [15] 叶琳琳, 孔繁翔, 史小丽, 等. 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 779–788.

YE L L, KONG F X, SHI X L, et al. The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 779–788.

- [16] 郭雅倩, 薛建辉, 吴海波, 等. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(3): 58–68.

GUO Y Q, XUE J H, WU Y B, et al. Research progress on purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(3): 58–68.

- [17] 姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 971–978.

YAO Y, HE F, HU S H, et al. Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 971–978.

- [18] 程宪伟, 梁银秀, 祝惠, 等. 人工湿地处理水体中抗生素的研究进展[J]. *湿地科学*, 2017, 15(1): 125–131.

CHENG X W, LIANG Y X, ZHU H, et al. Advances in treating antibiotics in water by constructed wetland[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(1): 125–131.

- [19] 杨世博. 复合垂直流人工湿地对磺胺类抗生素的去除研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.

YANG S B. Study on the removal of sulfonamides in constructed wetlands with vertical load flow[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

- [20] CARDINAL P, ANDERSON J C, CARLSON J C, et al. Macrophytes may not contribute significantly to removal of nutrients, pharmaceuticals, and antibiotic resistance in model surface constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 482/483: 294–304. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.095.

- [21] 刘慧玲. 电催化水中氟苯尼考和砷的毒性削减及深度去除[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.

LIU H L. Toxic reduction and deep removal of florfenicol and arsenic in water by electrocatalysis[D]. Changsha: Hunan University, 2021.

- [22] 郭睿, 张超杰, 周琪. 水环境中全氟化合物的去除技术研究综述[J]. *净水技术*, 2016, 35(6): 18–24.

GUO R, ZHANG C J, ZHOU Q. Research overview of technology of perfluorinated compounds removal in water environment[J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(6): 18–24.

- [23] QIAO W C, LI R, TANG T H, et al. Removal, distribution and plant uptake of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in a simulated constructed wetland system[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, 15: 20. DOI: 10.1007/s11783-020-1312-3.

- [24] 刘建超, 郑超亚, 任静华, 等. 平原河湖系统中典型全氟化合物的胶体吸附特征及生态风险评估[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1714–1726.

LIU J C, ZHENG C Y, REN J H, et al. Adsorption characteristics of perfluorinated compounds from colloids in the river-lake system of the plain and their ecological risk[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1714–1726.

- [25] CHEN J F, KE Y C, ZHU Y, et al. Deciphering of sulfonamide biodegradation mechanism in wetland sediments: From microbial community and individual populations to pathway and functional genes[J]. *Water Research*, 2023, 240: 120132. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120132.