

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.015

光照预处理强化污泥高压机械脱水效能

盛强¹, 屠厚德¹, 刘威¹, 寇舒¹, 饶宾期², 马凯莉¹,
邓龙¹, 焦燕红¹

(1. 湖州职业技术学院 新能源汽车学院, 浙江 湖州 313000; 2. 中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 市政污泥快速增加给污泥处理带来了极大的挑战,单独的机械脱水无法实现深度脱水。基于此,提出在污泥机械脱水前对其进行光照预处理,并分析光照预处理与高压机械脱水的协同处理效果。结果表明,光照预处理可降低污泥中的有机质含量,提高污泥脱水性能,并能够提高污泥在机械脱水阶段的滤液流速。相比未经过光照预处理的污泥,当预处理阶段光照强度为750 W/m²时,污泥含水率降低6.22个百分点;当光照强度高于750 W/m²时,随着光照强度的增加,污泥含水率的变化趋于平缓。此外,通过分析污泥表面元素发现,污泥中大量的C元素为污泥光照预处理提供了良好的吸光效率。

关键词: 市政污泥; 含水率; 机械脱水; 光照强度; 有机质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0104-06

Light Pretreatment Enhancing the Efficiency of High-pressure Mechanical Dewatering of Sludge

SHENG Qiang¹, TU Houde¹, LIU Wei¹, KOU Shu¹, RAO Binqi², MA Kaili¹,
DENG Long¹, JIAO Yanhong¹

(1. School of New Energy Vehicles, Huzhou Vocational & Technical College, Huzhou 313000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The rapid growth of municipal sludge has posed tremendous challenges to sludge treatment, and mechanical dewatering alone cannot achieve deep dewatering. To address this issue, this study proposed subjecting the sludge to light pretreatment prior to mechanical dewatering, and analyzed the synergistic effect of combining light pretreatment with high-pressure mechanical dewatering. The results showed that light pretreatment could reduce the organic matter content in sludge, improve its dewaterability, and enhance the filtrate flow rate during the mechanical dewatering stage. Compared with sludge that had not undergone light pretreatment, when the light intensity during the pretreatment stage was set at 750 W/m², the moisture content of the sludge decreased by 6.22 percentage points. When the light intensity exceeded 750 W/m², the change in sludge moisture content tended to level off as the light

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52570182); 浙江省万人计划科技创新领军人才项目(2021R52056); 浙江省自然科学基金资助项目(LZ24E060002); 浙江省重点研发计划项目(2024C03138); 金华市重大科研计划项目(2023-1-002)

通信作者: 饶宾期 E-mail: raobinqi@cjlu.edu.cn

intensity increased. Furthermore, analysis of the surface elements of the sludge revealed that the abundant carbon element in the sludge provided excellent light absorption efficiency for the light pretreatment process.

Keywords: municipal sludge; moisture content; mechanical dewatering; light intensity; organic matter

目前,我国污泥年产量已超过 8×10^7 t,污泥中含有大量的有机物、重金属和病原微生物等,这将使污泥后续处理处置面临巨大挑战^[1-3]。传统的机械脱水技术已广泛应用于污水处理厂,但存在脱水极限,机械脱水后含水率仍较高^[4]。许多学者通过采用预处理和干化与机械脱水相结合的方式实现深度脱水。Rao等^[5]研究了机械脱水和干化一体化处理技术,结果表明,脱水和干化联合处理的能耗与处理时间分别降低了75.94%和18.75%。王艳芳等^[6]采用重力浓缩+污泥低温碳化+机械脱水工艺的处理方法发现,最终污泥含水率低于40%。Rao等^[7]采用微波预处理+超高压机械脱水技术,可将污泥含水率降至28%。然而太阳能干化存在干化周期长、速率低等问题^[8]。颜莹莹等^[9]在实际阳光棚中研究了机械扰动与碳基骨架掺混强化污泥太阳能干化,结果表明干化时长减少49.3%,含水率降幅最大达到18.7%。太阳能干化与机械脱水两种方式的能耗均较低,属于绿色环保的污泥处理方式,但主要是独立进行研究,未能将两种绿色低碳处理方式进行联合。

笔者分析了不同光照强度预处理对污泥机械脱水性能的影响,研究了污泥的微观结构、表面元素分布和有机质的变化,并利用分形维数定量描述污泥孔隙结构,揭示污泥光照预处理机理,以期为市政污泥的光照预处理结合超高压机械脱水耦合技术发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验样品

实验样品来源于浙江省杭州市七格污水处理厂,采用厌氧-缺氧-氧化(A/A/O)和倒置A/A/O活性污泥处理工艺,其中1 t干污泥添加2~3 kg聚丙烯酰胺(CPAM),污泥日产量为150 t(含水率以80%计),采用絮凝+带式机械脱水工艺处理至含水率约为83%后外运处置。实验样品储存环境温度为4℃且不超过3 d,即每批实验周期为3 d,以避免因样品

变质而对实验结果产生明显影响。污泥样品的pH约为6.9,有机质含量为47.40%,碳、氢、氧和氮的占比分别为28.70%、4.46%、15.18%和4.34%。

1.2 实验装置及方法

实验装置如图1所示。采用太阳能仿生灯对污泥进行光照预处理,用于模拟稳定的太阳能光照条件,避免实验时天气等不可控因素产生的不利干扰。机械脱水采用团队研制的机械脱水装置来模拟污泥机械压滤脱水。当对污泥进行光照预处理后,利用机械脱水装置对其进行脱水。其中,在利用太阳能仿生灯对污泥进行预处理阶段,采用密封袋封装污泥样品以保证原始污泥对照组的样品含水率一致。另外,采用灼烧法测量污泥有机质,先将污泥样品在烘箱中烘干且2 h内污泥样品质量无变化,称量污泥样品;再将污泥样品直接在高温马福炉(600℃)中灼烧3 h,冷却后称量,直到样品质量无变化。采用场发射扫描电子显微镜(SEM)检测污泥微观结构,采用能谱仪(EDS)分析污泥成分。

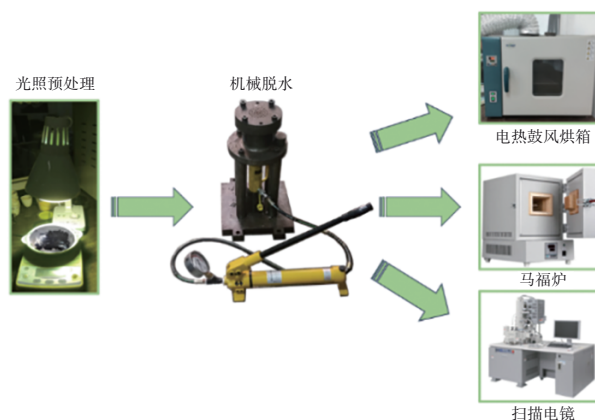


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.3 实验设计

浙江省杭州市某地7月中旬户外光照强度的变化如图2所示。可以看出,在08:00—17:00光照强度最高达到 1.1 kW/m^2 ,最低为 0.5 kW/m^2 。因此,为避免户外环境的影响,采用太阳能仿生灯进行实

验,其中光照强度最高设计为 1.0 kW/m^2 。

采用单因素实验研究污泥光照预处理时间、光照强度对机械脱水阶段出泥含水率的影响,光照强度的范围为 $0 \sim 1\,000 \text{ W/m}^2$,光照强度间隔为 250 W/m^2 ;光照预处理时间范围为 $0 \sim 120 \text{ min}$,时间间隔为 30 min 。污泥初始质量均为 100 g 。光照预处理后机械脱水阶段设置机械压力(P_d)为 $2 \sim 8 \text{ MPa}$,间隔为 2 MPa ;机械脱水时间(T_d)为 $10 \sim 60 \text{ min}$,间隔为 10 min 。

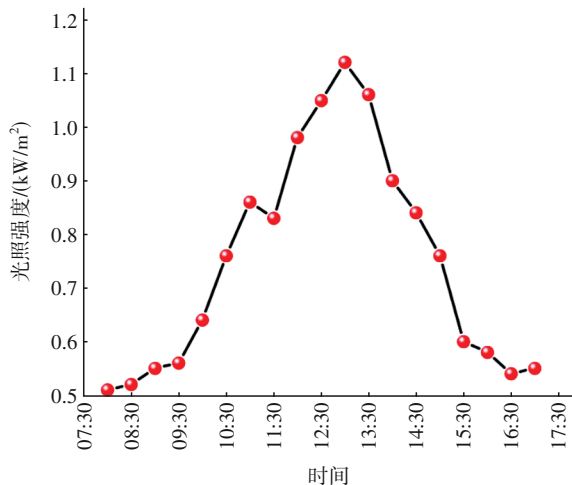


图2 户外光照强度的变化

Fig.2 Variation of outdoor light intensity

1.4 理论分析

为了研究光照预处理对污泥表面孔隙结构的影响,通过SEM观察泥饼,并引入分形维数进行定量分析^[10]。根据污泥与太阳光直接接触表面积计算太阳能干化污泥吸收的能量,具体见式(1)。

$$E_c = P_s \times S \times T_s \quad (1)$$

式中: E_c 为污泥吸收能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; P_s 为光照强度, kW/m^2 ; S 为污泥接受光照面的表面积, m^2 ; T_s 为污泥光照时间, h 。

2 结果与讨论

2.1 含水率分析

图3为污泥预处理光照时间与机械脱水后含水率的关系。其中,机械压力为 6 MPa ,预处理阶段光照强度为 1.0 kW/m^2 。可以看出,随着光照时间的增加,污泥在机械脱水阶段的含水率逐渐降低,未经过光照预处理的污泥经机械脱水 60 min 后含水率为 61.86% ,然而经过光照预处理 90 min 再进行脱水的污泥含水率可降至 43.35% 。光照预处理 120 min 相比 90 min 的含水率仅减少 1.2 个百分点。

这是由于辐射作用使光能转换为热能,污泥吸热后内部的水分类型发生了变化,在原始污泥中有部分高结合能水分难以去除,光照处理后高结合能的水分转化为低结合能的水分,低结合能的水分在污泥中容易被去除。因此,光照处理后污泥后续机械脱水的效果更好。而当光照时间较长时,污泥内部高结合能水分已经转化为低结合能的水分,更高结合能的水分需要吸收更高的能量,所以当光照预处理时间达到 90 min 后污泥含水率变化较小。此外,在光照过程中,污泥内部水分会蒸发,其中由于污泥水蒸气的作用,污泥内部孔隙结构增大、增多,孔隙率增大,污泥更加松散^[11]。因此,更多的孔隙通道为后续机械脱水过程中水分的排除提供了更多通道,光照处理后污泥的机械脱水效果更好。

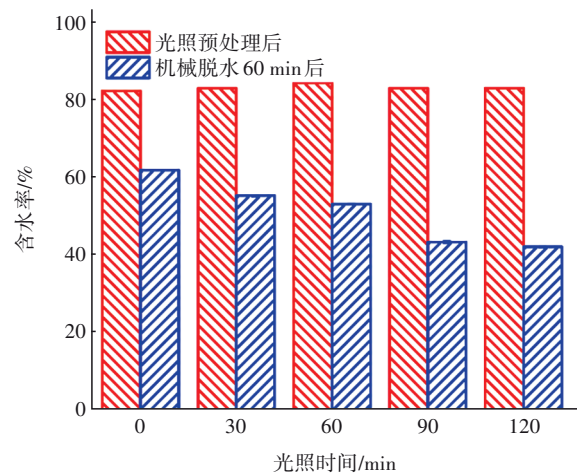


图3 污泥预处理光照时间与机械脱水后含水率的关系

Fig.3 Relationship between light exposure time of sludge pretreatment and moisture content after mechanical dewatering

图4为不同光照强度预处理与机械脱水后含水率的关系。其中,机械压力为 6 MPa ,机械脱水时间为 60 min ,光照预处理时间为 60 min 。可以看出,在相同脱水时间下,光照强度越大,污泥中的水分被去除得越多,含水率越低。当光照强度为 750 W/m^2 时,含水率为 55.78% ,相比没有进行光照预处理,含水率降低 6.22 个百分点;当光照强度为 $1\,000 \text{ W/m}^2$ 时,含水率为 54.67% ;当光照强度超过 750 W/m^2 后,机械脱水含水率的变化逐渐平缓。这是因为光照强度不同意味着污泥吸收的能量不同,随着光照强度的增加,更多的水分吸收能量并转换为低结合能的自由水,然而当光照强度 $>750 \text{ W/m}^2$ 时,污泥内

部低结合能的水分已经完成转化,剩余的结合水转化为低结合能水分所需要的能量更高。因此,随着光照强度的增加,污泥含水率降低,但是当光照强度 $>750\text{ W/m}^2$ 时,光照强度提供的能量进一步降低污泥含水率的效果显著变差。

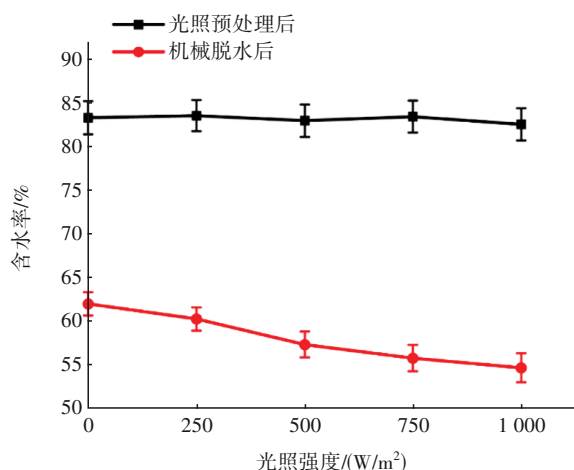


图4 不同光照强度预处理与机械脱水后含水率的关系

Fig.4 Relationship between pretreatment with different light intensities and moisture content after mechanical dewatering

2.2 能耗分析

图5为能量密度与污泥含水率和能耗的关系。其中泥饼厚度为2 cm,光照强度为 1.0 kW/m^2 。

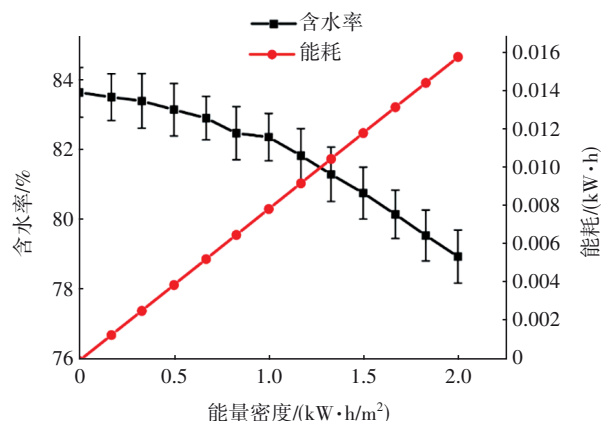


图5 能量密度与污泥含水率和能耗的关系

Fig.5 Relationship between energy density and sludge moisture content as well as energy consumption

由图5可以看出,随着能量密度的增加,污泥含水率逐渐下降,能耗呈线性增加。其中在能量密度为 $0\sim 1.0\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$ 条件下,污泥含水率的下降速率较为平缓;当能量密度为 $1.0\sim 2.0\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$ 时,含水率曲线变得较为陡峭。这是因为在光照预处理开

始阶段污泥吸收能量,温度升高,此时污泥吸收的大量能量被用来升温,同时,污泥中的大部分水分尚未蒸发出来,导致在升温阶段污泥含水率变化不明显。随着能量密度的增加,污泥含水率显著下降。分析原因是在污泥干化过程中,吸收的光照能量增加,使更多的水分蒸发,导致污泥含水率下降显著,能耗增大。此外,污泥在干化阶段吸收的能量可以为后续机械脱水阶段实现深度脱水提供一定的基础条件。

2.3 脱水性能分析

图6为初始污泥和光照处理后污泥的脱水时间与滤液流速的关系。其中,机械压力为6 MPa,预处理的光照强度为 1.0 kW/m^2 。

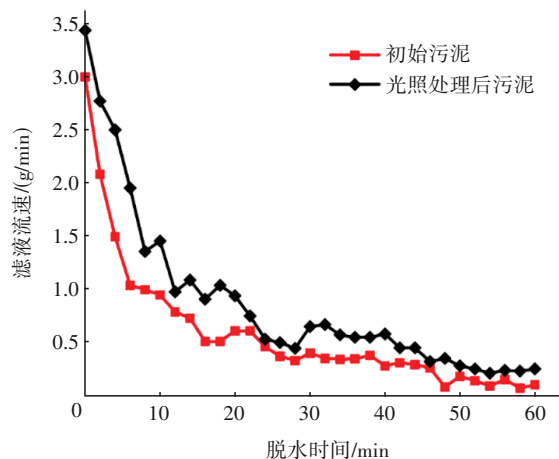


图6 初始污泥和光照处理后污泥的脱水时间与滤液流速的关系

Fig.6 Relationship between dewatering time and filtrate flow rate of raw sludge versus sludge after light treatment

从图6可以看出,在脱水前期,初始污泥和光照处理后污泥的滤液流速分别为 3.01 和 3.45 g/min ,随着脱水的进行,滤液流速逐渐降低,最终趋于平缓且趋同。这是因为在脱水阶段前期污泥含水率较高,污泥内部自由水占比更高,对其去除更加简单,因此在脱水前期滤液流速更高。同时还可以发现,经过光照处理的污泥滤液流速在脱水过程中高于初始污泥。这是由于污泥经过光照处理后吸收了一定的能量,此时污泥的内部水分会有一个转化过程,结合能较高的间隙水、表面水和结合水吸收能量后转换为结合能较低的自由水,因此光照处理后的污泥在脱水阶段的流速要高于初始污泥。另一方面,污泥在光照处理过程中内部水分会蒸发,可及时利用密封袋以保证污泥含水率不变,但是污

泥中水分仍然发生相变,蒸发过程中产生的水蒸气会使污泥内部产生更多的孔隙,开辟出新的脱水通道^[12]。光照处理后的污泥在脱水阶段比初始污泥表现出更好的脱水性能。

测量光照预处理后污泥有机质占比的变化,结果表明,当光照预处理0、30、60、90和120 min后,污泥有机质占比分别为48.80%、29.43%、23.50%、20.98%和17.60%。随着光照预处理时间的增加,污泥有机质含量呈下降趋势。在光照强度为1.0 kW/m²、时间为120 min条件下,污泥有机质占比由48.80%降至17.60%,降低了31.20个百分点。随着光照时间的延长,污泥中有机质占比的下降趋势逐渐趋于平缓。污泥经过光照处理后有机质含量降低的主要原因是太阳光能够直接分解污泥中的有机质,其中一些大分子物质吸收光能后化学键断裂,生成小分子物质或者自由基;另一方面,光照使污泥温度升高进而提高污泥中一些微生物的活性,促进其对有机物的分解。所以污泥经过光照处理后其内部有机质含量减少,黏弹性下降,有利于污泥中水分的去除^[13-15]。

2.4 微观结构及表面元素分析

图7为污泥的SEM和边缘化图片。分析发现,原始污泥的分形维数(D_f)为1.525,在光照强度为1.0 kW/m²下预处理30 min后污泥的 D_f 为1.572,相比原始污泥提高了0.047。光照预处理后的污泥内部结构更加松散,具有更多的孔隙通道。污泥在光照处理过程中,内部水分发生相变,液态水蒸发产生气体,污泥内部压强增大,导致污泥内部出现许多孔隙。然而,这些新产生的孔隙将为后续污泥脱水阶段提供更多的排水通道,进一步提高了污泥脱水性能。

通过SEM能谱测得污泥中主要含有C、N、O、Si、P、S、K和Fe等元素,各元素的占比分别为71%、2%、11%、5%、4%、4%、2%、1%。污泥内部C元素的占比较高。碳是一种对光有一定吸收能力的物质,特别是一些有机碳成分,在太阳能的照射下,能够吸收光能并将其转化为热能,从而使污泥的温度升高;此外,C元素作为固体成分的一部分,参与了热传导过程^[11]。当太阳能通过污泥表面进入内部时,C元素与其他固体物质、水分等相互作用,将热量从温度较高的区域传递到温度较低的区域,使污泥整体温度趋于均匀。

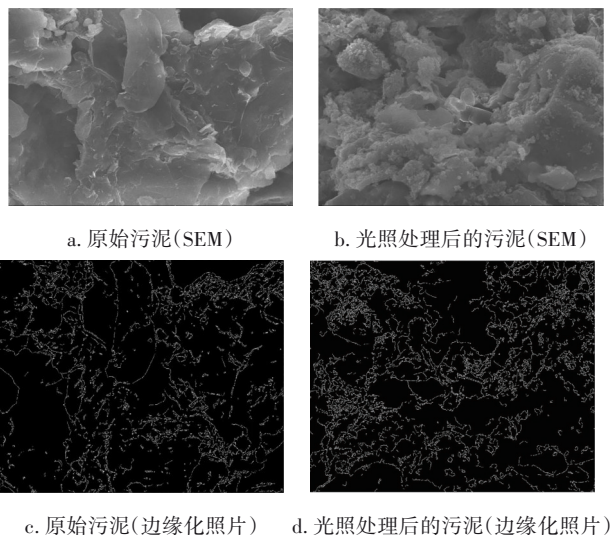


图7 污泥的SEM和边缘化图片

Fig.7 SEM and marginalized images of sludge

3 结论

① 污泥经光照预处理后进行机械脱水,结果显示,光照预处理可以提高污泥的脱水性能,有效降低污泥含水率。这为污泥处理提供了一种新的有效途径,实现了高效的污泥减量化和无害化。

② 光照处理可以减少污泥内部中的有机质含量,初始污泥在光照强度为1.0 kW/m²条件下作用120 min时,有机质占比降低了31.20个百分点。

③ 通过分析污泥表面元素发现,污泥中C元素占比最大,在光照预处理过程中发挥了至关重要的作用。

④ 采用SEM对污泥表面结构进行表征,利用分形维数定量分析污泥孔隙结构,相比原始污泥,光照预处理后的污泥分形维数提高了0.047,光照预处理增加的孔隙为后续机械脱水提供了排水通道,有利于提高污泥的脱水性能。

参考文献:

- [1] 贺珊珊,余鑫磊,陈红芳,等. 武汉市污水厂污泥处理处置技术碳排放特征对比[J]. 中国给水排水, 2025, 41(10):35-41.
- HE S S, YU X L, CHEN H F, et al. Comparison of greenhouse gas (GHG) emission characteristics of sludge treatment and disposal technologies of wastewater treatment plants in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(10):35-41 (in Chinese).
- [2] 刘波,廖竞萌,郭韵,等. 成都市污水污泥处理处置现状及对策探讨[J]. 中国给水排水, 2025, 41(4):9-15.

- LIU B, LIAO J M, GUO Y, et al. Analysis of current status and countermeasures for sewage sludge management in Chengdu [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(4): 9–15 (in Chinese).
- [3] 王先宝, 张雨笛, 张敏婷, 等. 活性污泥胞外聚合物原位碳源化技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2023, 39(16): 8–13.
- WANG X B, ZHANG Y D, ZHANG M T, et al. Research advance in extracellular polymeric substances of activated sludge as in-situ carbon source [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(16): 8–13 (in Chinese).
- [4] YANG N, YANG S C. Neglected sludge solid phase in sludge pretreatment process: physicochemical characterization and mechanism study of its role in anaerobic degradation [J]. Science of the Total Environment, 2024, 944: 173–186.
- [5] RAO B Q, TU H D, JIA H B, et al. The cooperative effect of mechanical dewatering and thermal drying for activated sludge deep reduction [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 9–20.
- [6] 王艳芳, 陈龙, 张宏伟. 晋中市某污水处理厂扩建及再生水回用工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 71–76.
- WANG Y F, CHEN L, ZHANG H W. Design of a sewage treatment plant expansion and reclaimed water reuse project in Jinzhong [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 71–76 (in Chinese).
- [7] RAO B Q, SU X Y, LU X L, et al. Ultrahigh pressure filtration dewatering of municipal sludge based on microwave pretreatment [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 588–595.
- [8] 吴宝利, 李鹏峰, 张岳, 等. 污水处理系统碳排放影响因素及降碳策略研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 1–12.
- WU B L, LI P F, ZHANG Y, et al. Research on influencing factors and carbon reduction strategies of sewage treatment system [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(12): 1–12 (in Chinese).
- [9] 颜莹莹, 满高智, 何智, 等. 机械扰动与碳基骨架原位强化污泥太阳能干化[J]. 中国给水排水, 2025, 41(13): 26–32.
- YAN Y Y, MAN G Z, HE Z, et al. Enhanced solar drying of sewage sludge using mechanical disturbance and carbonaceous skeleton blending [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(13): 26–32 (in Chinese).
- [10] RAO B Q, WANG G Q, XU P, et al. Recent advances in sludge dewatering and drying technology [J]. Drying Technology, 2022, 40(15): 3049–3063.
- [11] RAO B Q, ZHAO T T, TU H D, et al. Mechanistic exploration of activated carbon synergistic solar drying through theoretical analysis coupled with experimental validation [J]. Waste Management, 2025, 197: 50–60.
- [12] RAO B Q, SU J G, XU J, et al. Coupling mechanism and parameter optimization of sewage sludge dewatering jointly assisted by electric field and mechanical pressure [J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 1529–1539.
- [13] 夏加华, 饶汀, 季娟, 等. 氧化-絮凝调理对剩余污泥脱水性能的影响[J]. 土木与环境工程学报, 2023, 45(3): 173–182.
- XIA J H, RAO T, JI J, et al. Effects of oxidation-flocculation conditioning on dewatering performance of activated sludge [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(3): 173–182 (in Chinese).
- [14] RAO B Q, SU J G, XU S J, et al. Thermal and non-thermal mechanism of microwave irradiation on moisture content reduction of municipal sludge [J]. Water Research, 2022, 226: 119231.
- [15] 杨亚红, 马鹏锦, 杨兴峰, 等. 沸石/超声强化污泥脱水 and 好氧堆肥效能研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(9): 84–90.
- YANG Y H, MA P J, YANG X F, et al. Zeolite and ultrasonic wave for enhancing sludge dewaterability and aerobic composting efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(9): 84–90 (in Chinese).

作者简介: 盛强(1981—), 男, 浙江金华人, 硕士, 副教授, 主要从事电气自动化技术和新能源环保设备系统控制方法研究。

E-mail: 376041718@qq.com

收稿日期: 2025-09-03

修回日期: 2025-12-25

(编辑: 任莹莹)