

物理调理法改善污泥脱水性能研究进展

叶新合¹, 刘军伟², 策红军², 王 锐³

(1. 正阳县生态环境局, 河南驻马店 463600; 2. 洛阳绿潮环保科技有限公司, 河南洛阳 471000;
3. 洛阳理工学院环境工程与化学学院, 河南洛阳 471023)

[摘要] 采用活性污泥法处理城市废水和工业废水时会产生大量剩余污泥, 其中含有病原体、重金属、有机污染物等有毒物质, 如未经适当处置可能会产生严重的环境风险。脱水作为污泥处理的重要步骤, 在减少污泥体积、方便运输、提高热值、减少垃圾填埋场渗滤液产生等方面发挥了重要作用。物理调理技术通过加入非化学调理剂或输入能量等方式改善污泥脱水性能, 经济性好, 应用广泛。而探寻高效物理调理剂与方法对于提升脱水效率至关重要。详细分析了物理调理技术的种类, 归纳了典型物理调理技术, 如多孔材料调理、超声波、热处理、冻融和电处理方法改善污泥脱水性能的作用机理。总结了不同物理调理方法的影响因素及其耦合增效作用对污泥脱水的影响, 并对未来的研究工作进行展望。该领域未来的研究重点为采用物理法和化学法协同调理处理城镇污泥, 结合使用混凝、生物分解、高温加热、冷冻和化学氧化, 用硅藻土、人造纤维和石膏等为骨架颗粒与化学絮凝剂或药剂联合调理污泥。

[关键词] 市政污泥; 物理调理; 污泥脱水

[中图分类号] TU992.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0051-09

Research progress in the improvement of sludge dewatering by physical conditioning

YE Xinhe¹, LIU Junwei², CE Hongjun², WANG Rui³

(1. Zhengyang County Environmental Protection Bureau, Zhumadian 463600, China; 2. Luoyang Lvchao Environmental Protection Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 3. College of Environmental Engineering and Chemistry, Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Treatment of municipal and industrial wastewater by activated sludge process generates a large amount of excess sludge, which contains pathogens, heavy metals, and organic pollutants, and may pose serious environmental risks without appropriate disposals. As the essential step of sludge treatment, dewatering plays a significant role in reducing sludge volume, facilitating transportation, improving calorific value and reducing the production of landfill leachate. Physical conditioning technology improves sludge dewatering performance by adding non-chemical conditioning agents or inputting energy. It is economical and widely used. Exploring efficient physical conditioning agents and methods is essential to improve dewatering efficiency. The types of physical conditioning techniques were analyzed in detail, and the mechanism of typical physical conditioning techniques, such as porous material conditioning, ultrasonic, heat treatment, freeze-thaw and electrical treatment methods to improve sludge dewatering performance, was summarized. The influencing factors of different physical conditioning methods and their coupling synergistic effects on sludge dewatering were summarized, and future research work was prospected. Future research in this field will focus on the use of synergistic conditioning methods of physical and chemical to treat municipal sludge, combining the use of coagulation, biodegradation, high-temperature heating, freezing and chemical oxidation, and the use of diatomite, artificial fiber and gypsum as skeletal particles with chemical flocculants or agents to condition sludge.

Key words: municipal sludge; physical conditioning; sludge dewatering

市政污泥是污水处理过程生成的副产物,主体部分为生化处理产生的剩余污泥。随着城镇化速度的加快,市政污泥的产量日益增加。欧盟^[1]、澳大利亚^[2]、美国^[3]和中国^[4]的干污泥年均产量分别达到 9×10^6 、 3.6×10^5 、 1.78×10^7 、 3.69×10^7 t。由于市政污泥中含有机污染物、重金属离子和寄生虫等,必须采用适当方法进行处理与处置,否则会产生较大的环境风险^[5]。脱水是污泥处理的重要步骤,对于减少污泥体积、方便运输、稳定其有机成分、实现资源化利用、提高热值甚至减少垃圾填埋场渗滤液的产生具有重要作用^[6]。现有文献多关注污泥性质、污泥脱水工艺方法和污泥脱水效率影响因素的研究^[7-9]。

污泥脱水调理方法通常分为化学、生物和物理调理法^[5,9-10]。其中化学调理已被广泛用于污泥机械脱水预处理,但化学调理剂的价格较高,且调理后增加了脱水滤液中污染物的浓度,易造成二次污染^[11-12],而生物调理的周期过长,因此寻找经济有效的物理调理法具有重要意义^[13]。物理调理技术的研究内容广泛,但目前对于污泥脱水还缺乏较全面的综述,笔者以污泥物理调理技术为对象,分析了调理技术对污泥脱水性能的影响及其作用机制,并对物理调理改善污泥脱水性能的研究现状和进展进行归纳和总结,以期对市政污泥高效处理及处置技术的开发提供借鉴。

1 污泥物理调理技术分类

物理调理是指用非化学调理剂或以输入能量来改善污泥脱水性能的技术^[13]。其中非化学调理剂包括碳基材料和工业矿渣等,而能量调理法则包括加热、冻融、微波或电场等形式(见图1)^[5]。一般来说,污泥中的水分为3种类型,自由水、间隙水和束缚水^[13-14]。其中束缚水是胞外多聚物(EPS)和细胞内水的结合水,只占污泥总含水量的10%左右,很难机械去除。因此,去除束缚水和细胞内的水需要调节EPS结构或破坏细胞膜,以便将其转化为自由水。碳基材料、热处理、冻融处理和电处理在束缚水的去除方面具有较大优势^[13]。

2 非化学调理剂对污泥的脱水性能

非化学调理剂具有刚性和多孔特性,能降低压缩性和改善压缩过程中渗透性,常用作骨架材料或助滤

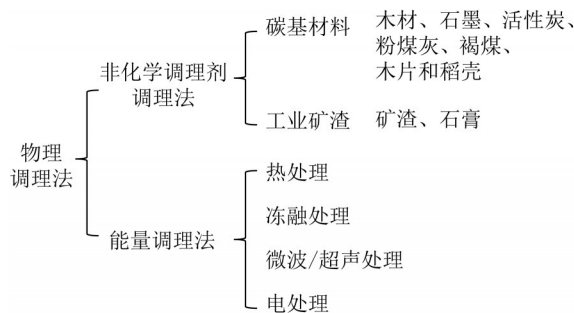


图1 市政污泥物理调理技术分类

Fig. 1 Classification of physical conditioning techniques for municipal sludge

剂^[13]。这些刚性多孔材料包括粉煤灰^[15]、石墨^[16]、褐煤^[17]、钢渣^[18]、石膏^[19]、木片^[20]和稻壳^[9,21],添加量通常为干污泥质量的30%~50%。相应地,过滤比阻(SRF)和压缩系数可降低58%~88%和22%~90%^[21]。

2.1 碳基材料

碳基材料具有增加渗透性但不降低污泥热值的能力,有利于脱水污泥的焚烧^[22],与其他矿物基材料相比具有优势。典型的碳基材料包括粉煤灰、石墨材料和稻壳材料等。

(1)粉煤灰。粉煤灰廉价易得,用于调理市政污泥可以达到“以废制废”的功效。粉煤灰通过降低污泥比阻^[23]和保持污泥在压滤过程中的渗透性^[24]来提高脱水性。研究表明,硫酸改性粉煤灰的调理能力明显强于原粉煤灰,改性的主要影响因素为酸浓度和浸泡时间,优化改性条件为酸浓度4 mol/L,酸灰比5:1(mL/g),浸泡时间3 h,改性后粉煤灰的比表面积由 $2.810 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $3.376 \text{ m}^2/\text{g}$ ^[25]。当硫酸改性粉煤灰投加量为干污泥质量的273%时,污泥SRF由 $1.86 \times 10^{13} \text{ m/kg}$ 降至 $4.23 \times 10^{11} \text{ m/kg}$,滤饼含水率由86.90%降至56.52%。粉煤灰改性后表面可能会出现大量带正电荷的硅铝活性中心,而污泥表面的负电荷被铝硅活性中心的正电荷抵消,从而破坏了胶体污泥颗粒的稳定性^[26]。因此,硫酸改性粉煤灰的污泥调理机理主要包括通过电荷中和与吸附架桥作用改善絮体的形成,以及通过骨架构建剂提供输水通道。此外,粉煤灰还有利于降低重金属的浸出风险。

(2)石墨材料。污泥胞外聚合物(EPS)具有高度的亲水性和可压缩性,导致污泥脱水困难^[5]。与此同时,EPS含量决定了污泥表面电荷密度、Zeta电

位和絮体结构的稳定性^[27]。石墨等碳基材料(CBM)具有发达的孔结构,可以吸附生物聚合物^[14]。Wenqing XU等^[28]的研究也表明石墨通过吸附作用对EPS和微生物代谢产物(SMP)的组成和含量产生显著影响。此外,石墨还会通过减弱污泥微生物的相对疏水性、提高表面自由能和形成微生物团聚体来促进污泥脱水^[29]。

(3)稻壳材料。利用农业废弃物稻壳粉提高污泥的脱水性能具有多重优势^[9]。稻壳碳和木屑较粉煤灰更易在污泥体中形成多孔通道,从而达到高效去除自由水的目的^[21]。通过管网效应和层间通道效应,稻壳材料将市政污泥的脱水率提升30%~65%,大量多孔骨架材料在污泥颗粒中建立起完整的排水管网,使出水通畅^[21]。与石灰处理相比,稻壳粉作为骨架助剂时可使污泥压缩系数由1.08降低到0.78,泥饼的极限热值从 9×10^3 J/g升至 1.12×10^4 J/g,滤液的总氮和总磷分别降低13.4%、50%^[12]。吴彦等^[9]发现投加稻壳粉可有效降低滤液的浊度和溶解性化学需氧量,稻壳粉最佳投加量为污泥干质量的70%;与单独投加三氯化铁(138.09 g/kg)相比,污泥比阻降低59.73%,污泥泥饼的含固率从13.99%提高到23.97%。稻壳粉含有大量二氧化硅,使其具有一定硬度,能在污泥泥饼内部起到骨架支撑作用,有助于污泥泥饼中裂缝的生成,从而提高污泥的脱水性能。此外,稻壳粉表面带有负电荷(70%稻壳粉表面Zeta电位为-25.00 mV),而污泥表面也带负电荷,由此推测稻壳粉仅作为骨架颗粒改善污泥泥饼的微观结构,对污泥无絮凝作用。Yan WU等^[11]用FeCl₃制得改性稻壳生物炭(MRB-Fe),最佳改性条件为FeCl₃浓度3 mol/L、超声时间1 h。MRB-Fe最佳用量为污泥干质量的60%,与原污泥相比,在0.03 MPa真空过滤条件下脱水6 min,污泥比过滤阻力下降97.9%,泥饼含水率由96.7%降至77.9%,SV₃₀由96%降至60%,净污泥固体产率提高28倍。MRB-Fe表面携带的正电荷可抵消污泥絮体的负电荷,从而提高污泥的沉降性和脱水性。稻壳粉调理后的污泥泥饼具有不可压缩性和可渗透性,有利于污泥中水分的脱出。

(4)泥基碳。污泥的含碳量高,经过化学处理或热解碳化^[30]可制得功能性炭基材料(简称泥基碳,SBC),用于污泥脱水工程中能够实现污泥循环利用。Weijun ZHANG等^[31]用CeCl₃和污泥制得Ce-SBC,可改善污泥

的脱水性能。主要作用机理为电荷中和及络合反应。Liqing LI等^[32]通过高锰酸钾-铁(II)处理结合热解方法将市政污泥转化为多功能污泥基碳(Fe/Mn-SBC),Fe/Mn-SBC具有多孔结构,制备方法简单且经济有效,具有较好的污泥脱水应用前景。

2.2 废弃矿渣材料

(1)废弃矿渣。矿渣具有刚性结构,用作骨架材料时可作为去除污泥多余水分的通道。R. H. RAMACHANDRA等^[33]采用生石灰和高炉矿渣对污泥进行脱水处理,在pH为10.2、投加量为0.34 g/g、接触时间为14 min的条件下,污泥的脱水性能最佳。Qiang XUE等^[34]研究了生石灰和矿渣对市政污泥的脱水效果,结果表明,矿渣粒径和污泥含水率对脱水效果影响较大,矿渣有效粒径范围为0.075~0.85 mm,含水率为83%时污泥脱水率达到最大值。

(2)废弃石膏。Y. Q. ZHAO等^[19]将废弃石膏作为骨架材料,与聚合物结合对污泥进行处理,研究结果表明,石膏的加入可将污泥的压缩性由0.83降至0.65,原因可能是石膏有助于建立多孔、透水、坚硬的晶格结构,保留固体颗粒,使水被压滤出来。王燕杉等^[35]研究了脱硫石膏耦合微波技术对厌氧消化污泥脱水性能的改善效果,脱硫石膏最佳投加量为6 g/L,微波功率为640 W(120 s),可使污泥比阻降至 1.05×10^{12} m/kg,处理后的污泥有机质含量能够满足制备有机肥的要求。

上述研究表明,非化学调理剂作为骨架材料,通过改善微观结构使污泥体形成层状,在机械脱水过程中保持泥饼的多孔性,在管网效应和层间通道效应的共同作用下提高脱水效果^[36,21]。值得注意的是,多孔材料的粒径应超过10 mm,以免堵塞过滤介质^[6]。

3 能量调理法

除使用非化学调理剂,还可采用其他物理方法改变污泥絮体的微观结构,改善污泥的脱水性。最常用的物理调理法包括水热、冻融、微波或电场等,均与能量输入有关,因此也称为能量调理法。

3.1 水热处理

水热预处理是在密闭条件下将污泥加热至60~240 °C,加速脂质和碳水化合物的溶解,以及细胞壁内蛋白质的释放^[37-38]。加热过程会促进凝胶状污泥

絮体的分解^[39]。水热反应温度和反应时间对污泥减量的影响较大,而污泥初始含水率的影响较小。从机理角度来讲,水热处理降低了污泥对水的亲和力,显著降低污泥黏度,使水热处理后的污泥易于脱水^[40]。甘雁飞等^[41]用水热法处理食品行业剩余污泥,优化反应温度为220℃、反应时间为3h、污泥初始含水率为84%,在该反应条件下污泥湿重减量可达72.9%,污泥干重减量为31.2%,污泥VSS降解率为35.5%,脱水污泥的含水率降至59.4%,脱水滤液COD为38.2 g/L。徐振佳等^[42]研究了温度、时间、硫酸铁对污泥水热碳化脱水性能的影响,当反应温度为220℃、反应时间为2h、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 浓度为0.5 mol/L时,污泥经水热碳化处理后脱水性能最好,比阻和黏度分别较对照组降低了97.7%、98.7%。活性污泥中的胞外聚合物EPS含有黏性蛋白类物质并高度亲水,破坏污泥絮体、释放和水解黏性有机物能有效改善污泥的脱水性能。而水热碳化的高温高压环境破坏了污泥絮体,使得污泥胶体结构的内聚力降低,污泥脱水性能得到改善。

水热反应引起的有机物种类和官能团变化存在显著区别。水热反应可诱导一系列室温下无法发生的转化过程,如水解、脱水、脱羧和芳构化^[37]。水热处理时,去除有机物中的亲水官能团和污泥碳化能显著降低污泥的持水性能。水热处理的不足之处为产生大量含氮杂环化合物的难降解有机废水。此外,水热处理过程还应关注设备腐蚀问题^[37]。庄修政等^[43]指出污泥直接机械脱水时含水率一般只能降到70%~80%,进行水热处理后含水率能降至20%~40%。水热处理耦合机械压滤技术可有效降低剩余污泥的脱水能耗,其中水热处理(温度为120~210℃,停留时间为10~90 min)的脱水率较高,达到相同脱水率所外加的机械压力随温度的升高而降低^[38]。

水热处理后的污泥可作为土壤改良剂或固体燃料使用。但水热处理后污泥中的重金属Pb、Cd、Hg、Cu、Zn、Cr等均表现出一定程度的富集,其潜在风险主要取决于土地环境特征、负荷率和生物有效性^[44]。而水热处理的温度越高,磷、钙、镁等营养元素越容易富集到水相中。

3.2 冻融调理法

冻融调理是通过改变污泥絮体结构来降低束缚水量的方法。在循环冷冻/解冻过程中,污泥首先在

水冰点温度以下被冻结(-20~-15℃),再在室温下解冻并保持一段时间^[22]。由于均匀冰晶的形成,水分子被固定在冰晶中,污泥颗粒被排除在晶体结构之外。冰基质中微小的未冻结区域被周围的冰锋不断脱水的过程,称为固化阶段。固化阶段可实现固液分离,同时聚集体内水分的结晶会破坏细胞膜,将细胞内物质释放到水环境中^[45]。此后随着冰的融化,水被排出,浓缩固体可单独收集^[46]。冻融循环次数和冷冻温度是脱水性的主要影响因素,反复冻融操作会导致细胞内水结晶和体积膨胀,伴随着细胞膨胀现象,包含细胞内水在内的束缚水含量降低,有利于污泥深度脱水^[47]。

冻融处理可以有效降低污泥比阻,从而改善其脱水性能。武亚军等^[48]研究发现温度为-11℃时处理效果最优,冻融处理后污泥含水率最低可降至54.0%,抗压强度最高可达42.84 kPa,最大减容比为40%,达到污泥减量的目的。Kai HU等^[45]在-18℃下冻融处理污泥72h,混合污泥和剩余活性污泥的沉降量分别减少31.2%~31.3%和33.3%~44.7%。此外,冻融处理有利于固相向水相的传质过程。方兴等^[49]探究了冷热联用干燥市政脱水污泥的可行性。当冷冻温度降到-30℃时,细胞死亡率达到15.5%,是未冷冻时的9.7倍;当干燥温度为60℃,冷冻温度分别为-10、-20、-30℃时,脱水污泥的干燥时间分别缩短25.0%、33.3%、29.2%。

在气候寒冷的地区,冻融处理具有显著优势,然而如何量化释放的细胞内水分及细胞肿胀对改善脱水性的贡献值得进一步研究。此外,重复冻融操作能耗大,也限制了其推广与应用^[13]。

3.3 超声波和微波调理法

采用超声波和微波调理污泥具有巨大潜力,近年来受到研究者的关注。超声的频率>20 kHz,由于存在循环负压会发生声空化现象,此时超声波应力会破坏微生物的细胞壁,并将细胞内的有机物释放到水相中^[50]。黄锦佳等^[51]采用超声-生物沥浸-氧化钙调理市政污泥,SRF和结合水分别下降90.12%、72.21%;经预调理联合超高压压滤系统处理后,泥饼含水率可降至49.94%,泥饼中Cr、Cu、Cd、Zn、As、Pb的去除率分别为42.41%、36.50%、30.92%、27.97%、25.94%、22.11%,白菜发芽指数>80%;超声预处理后污泥的结构被破坏,污泥粒径减小、Zeta电位上升,污泥中的多糖和蛋白质

被释放,促进污泥中重金属释放,从而改善脱水性能。适当的超声能量密度和超声时间对污泥脱水有积极作用。有文献报道,超声处理对污泥脱水效果的影响取决于能量输入,最佳超声能量输入为 800 kJ/kg^[52]。薛飞等^[53]研究发现,超声预处理的最佳工况为超声能量密度 2.0 W/mL、超声时间 20 min,此时泥饼含水率为 62.3%,污泥比阻为 3.21×10^{12} m/kg。薛飞等^[53]研究了超声-溶菌酶协同处理印染污泥的脱水性能,结果表明,污泥体积减小近 50%,脱水性能明显改善,溶胞效率表现为超声-溶菌酶协同处理>超声处理>溶菌酶水解。关于超声处理对污泥脱水性能的影响也存在一些争议。J. BIEN 等^[54]报道了超声波处理可提高污泥脱水性,而 F. WANG 等^[55]认为细胞内聚合物的释放和细胞解体会使污泥脱水性恶化。尽管超声调理的有效性存在争论,工程化放大难度是限制其推广应用的主要原因之一。

微波调理是利用波长为 0.1 mm~1 m、频率为 300 MHz~3 THz 的电磁波对污泥进行热输入的过程,在碱性条件下微波处理对污泥脱水有积极影响^[56]。吴建等^[57]考察了微波、超声波和微波-超声联用技术对铝加工污泥的调理情况。微波单独调理时,当微波功率为 400 W、微波辐射时间为 40 s,污泥含水率由 90% 降至 74.87%;超声波单独调理时,超声时间为 8 min 污泥含水率由 90% 降至 77.57%;采用微波-超声调理,微波辐射时间 40 s,超声时间为 4 min 时污泥含水率可由 90% 降至 74.09%。李洋洋等^[58]采用微波耦合 $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 方法提升剩余污泥的脱水性能,当初始 pH 为 3、微波功率为 400 W、反应时间为 150 s、 H_2O_2 投加量为 90 mg/g、 Fe^0 投加量为 60 mg/g 时,污泥脱水性能达到最佳,SRF、泥饼含水率和毛细吸水时间分别降低 90.5%、15.5%、63.3%,分析认为紧密型胞外聚合物中蛋白质和糖类的减少与污泥脱水性能提高正相关。

微波调理污泥生产的固体生物燃料类似于煤炭,与型煤混烧后可用于民用或工业锅炉。然而与空化作用类似,污泥预处理所用高功率微波发生器的规模化应用在技术上存在较大困难,同时也缺少经济性。

3.4 电处理法

电脱水是新兴的污泥脱水技术,具有效果好、成本低、无需加入絮凝剂等优点,具有较大的发展前景^[59]。袁晋亭等^[60]研究了电渗透高干脱水技术对污泥的脱

水效果,发现泥饼初始 pH 可影响污泥的电渗透脱水效果,pH 为 5 时 Zeta 电位为负值,污泥含水率降低,脱水效果最好。黄殿男等^[61]研究了电渗透条件下不同极板间污泥的脱水性能,结果表明,阴阳极附近区域污泥的含水率均呈下降趋势,其中阳极下降最快,最低含水率可降至 50.4%;阴极 pH 升至 9.1,中部变化不明显,阳极 pH 持续降至 5.8。Shaogang HU 等^[62]应用电氧化+ $\text{Fe}(\text{II})$ 调理策略去除 2 种污泥的重金属,同时实现污泥脱水和稳定化。当 $\text{Fe}(\text{II})$ 投加量为 82 mg/g、处理时间为 4.5 h 时,污水污泥和工业污泥中的 Cu、Zn、Pb 去除率分别为 72.95% 和 78.49%、66.29% 和 84.26%、36.52% 和 36.99%。污水污泥和工业污泥体系的 pH 分别降至 2.33、2.98,氧化还原电位分别升到 435.90、480.60 mV,有利于污泥结构中重金属的解吸和溶解,以及与重金属络合的有机物的降解。此外,在污泥絮体的高效电化学分解作用及电氧化产生的 $\text{Fe}(\text{III})$ 对污泥颗粒的凝聚作用下,混合调理工艺表现出优异的脱水性能。Binqi RAO 等^[63]认为,外加电场通过驱动中间层水克服毛细管压力,使恒压梯度脱水(G-PEDW)较超高压机械脱水(UMDW)去除更多的水。经 G-PEDW 和恒压加压电脱水(U-PEDW)处理后,污泥含水率分别达到 28.41%、27.33%。此外,G-PEDW 的能耗为 189.62 kW·h/kg,远低于 U-PEDW。因此,与 UMDW 和 U-PEDW 模式相比,含水量低、能耗低的 G-PEDW 模式具有最佳脱水性能。

电化学反应引起的胞外聚合物溶解会堵塞滤布。活性炭、石墨等碳基材料具有良好的导电性和孔结构,能够吸附生物聚合物。添加碳基材料有望提高污泥的电导率和可过滤性,从而改善电脱水性能。研究表明,选用碳基材料对剩余污泥的电脱水性能有促进作用,该促进作用与碳基材料的电导率成正比,同时碳基材料还能提高污泥絮体的电泳迁移率和电渗效应^[14]。此外,碳基材料可以吸附溶解的 EPS,从而减轻过滤介质的堵塞和过滤阻力;碳基材料的加入还降低了电脱水能耗,提高了泥饼的热值和持续燃烧时间。在改善污泥电脱水效果方面,碳基材料的导电作用较吸附作用更为重要。

能量调理法改善污泥脱水性能的方法、机制和优化条件如表 1 所示。

表1 能量调理法对污泥脱水性能的改善情况

Table 1 Improvement of sludge dewatering performance by energy conditioning

项目	方法	作用机制	优化条件	脱水率/%	文献
水热处理	密闭条件下加热污泥至 60~240 ℃	加热条件下加速脂质和碳水化合物溶解及细胞壁内蛋白质的释放, 强化污泥脱水	温度 175 ℃, 保温时间 30 min	24.6~40	[37-43]
冻融调理	在低于水冰点的温度下冻结(约-20~-15 ℃), 室温下解冻并保持一段时间	通过冷冻条件下形成冰晶, 实现污泥脱水	-18 ℃下处理 72 h	26	[45-49]
超声调理	利用>20 kHz 的声波循环压缩和扩展污泥	发生声空化现象, 超声波应力会破坏微生物细胞壁, 并将细胞内的有机物释放到水相中	能量密度 2.0 W/mL、超声时间 20 min	17.5	[50-54]
微波调理	碱性条件下, 用波长为 0.1 mm~1 m、频率为 300 MHz~3 THz 的电磁波对污泥进行热输入脱水	通过热效应对污泥脱水	pH 为 3、微波功率为 400 W、反应时间为 150 s	12~15.2	[55-58]
电处理	外加电场、电压或电流对污泥脱水	通过污泥絮体的高效电化学分解实现污泥脱水	处理时间为 58.7~70.0 min、电压梯度为 15.1~16.1 V/cm	22~25	[59-62]

4 结语与展望

脱水是市政污泥处理处置的重要预处理过程。物理调理法具有工艺简单、脱水效率高和二次污染少等优点, 是一种适宜的脱水预处理方法。现有文献多关注物理调理剂的开发, 重视物理调理技术的影响因素研究, 掌握了不同调理技术的优化操作条件, 促进物理调理技术的发展。非化学调理剂碳基材料往往作为骨架材料, 能保持污泥泥饼的多孔性, 从而提高污泥的脱水性能, 并有“以废制废”的优势。能量调理法可破坏污泥的絮体, 使污泥胶体结构的内聚力降低, 污泥脱水性能得到改善。然而在机理研究和工厂规模化应用方面, 有许多问题尚未解决。

未来, 市政污泥可采用物理法和化学法协同调理, 将混凝、生物分解、高温加热、冷冻和化学氧化结合, 用硅藻土、人造纤维、木屑、粉煤灰、石膏等作为骨架颗粒与化学絮凝剂或药剂联合调理污泥, 将微波与生物处理相结合调理污泥, 是值得研究的方向。考虑到现有污泥脱水技术普遍存在能耗偏高的问题, 后续开发低功耗组合调理技术具有现实意义。此外, 还应重视污泥脱水调理对污泥后续利用的潜在影响研究, 调理技术进步的终极目标是促进污泥的再利用。

参考文献

[1] EUROSTAT E C. Sewage sludge production and disposal[R/OL]. Luxembourg, 2018. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_w_w_spd/default/table?lang=en.

[2] AWA. Australian biosolids statistics[R/OL]. New South Wales, 2018. <https://www.biosolids.com.au/guidelines/australian-biosolids-statistics/>.

[3] EPA USA. Biosolids generation, use, and disposal in the United States[R/OL]. Washington, DC., 2018. <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids>.

[4] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境统计年报[R/OL]. 北京, 2019. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218_969391.shtml.

[5] CAO Bingdi, ZHANG Tao, ZHANG Weijun, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review[J]. Water Research, 2021, 189: 116650.

[6] QI Ying, THAPA K B, HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties—A review[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(2): 373-384.

[7] 王硕, 陈晓光, 陈宇, 等. 城市污水处理厂污泥深度脱水技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S2): 186-190.

WANG Shuo, CHEN Xiaoguang, CHEN Yu, et al. Recent advances on deep dewatering of sludge in wastewater treatment plant[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S2): 186-190.

[8] 徐慧敏, 秦卫华, 李中林, 等. 双频超声改善剩余污泥的脱水性能研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4): 380-384.

XU Huimin, QIN Weihua, LI Zhonglin, et al. Effects of double frequency ultrasound improving dehydration property of waste activated sludge in pretreatment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(4): 380-384.

[9] 吴彦, 平巍, 王翔, 等. 稻壳粉添加剂提高污泥的脱水效果研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 229-234.

WU Yan, PING Wei, WANG Xiang, et al. Study on dewatering effect of sewage sludge by adding rice husk flour[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 229-234.

[10] 于晓, 李衍博, 张文哲, 等. 化学调理法改善污泥脱水的研究进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(11): 1-6.

YU Xiao, LI Yanbo, ZHANG Wenzhe, et al. Research progress in the improvement of sludge dewatering by chemical conditioning method[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(11): 1-6.

[11] WU Yan, ZHANG Panyue, ZHANG Haibo, et al. Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modi-

- fied by ferric chloride [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 258-263.
- [12] WANG S, YANG Y K, CHEN X G, et al. Effects of bamboo powder and rice husk powder conditioners on sludge dewatering and filtrate quality [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 288-296.
- [13] WU Boran, DAI Xiaohu, CHAI Xiaoli. Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations [J]. *Water Research*, 2020, 180: 115912.
- [14] CAO Bingdi, WANG Ruilu, ZHANG Weijun, et al. Carbon-based materials reinforced waste activated sludge electro-dewatering for synchronous fuel treatment [J]. *Water Research*, 2019, 149: 533-542.
- [15] Nelson R F, Brattlof B D. Sludge pressure filtration with fly ash addition [J]. *Water Pollution Control Federation*, 1979, 51 (5): 1024-1031.
- [16] 朱梦扬, 李青, 王进, 等. 石墨对污泥中厌氧微生物代谢产物及其性能的影响 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(4): 721-728.
- ZHU Mengyang, LI Qing, WANG Jin, et al. The effect of graphite on the microbial metabolite substances production and characteristics of anaerobic sludge microorganism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(4): 721-728.
- [17] THAPA K B, QI Y, CLAYTON S A, et al. Lignite aided dewatering of digested sewage sludge [J]. *Water Research*, 2009, 43(3): 623-634.
- [18] Czarczyk K, Myszk K. Biosynthesis of extracellular polymeric substances (EPS) and its role in microbial biofilm formation [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, 16(6): 799-806.
- [19] ZHAO Y Q, BACHE D H. Conditioning of alum sludge with polymer and gypsum [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 194(1/2/3): 213-220.
- [20] LIN Yingfeng, JING S R, LEE D Y. Recycling of wood chips and wheat dregs for sludge processing [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76(2): 161-163.
- [21] ZHANG Xiaochun, KANG Huashan, ZHANG Qingrui, et al. The porous structure effects of skeleton builders in sustainable sludge dewatering process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 14-20.
- [22] MOWLA D, TRAN H N, ALLEN D G. A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 58: 365-378.
- [23] 刘学鹏, 戴财胜, 贾飞跃, 等. 基于煤粉的污泥调质与机械脱水的实验研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(2): 99-102.
- LIU Xuepeng, DAI Caisheng, JIA Feiyue, et al. Experimental study on sludge conditioning for mechanical dewatering of sludge by using coal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(2): 99-102.
- [24] FANG M, WONG J W C, MA K K, et al. Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: Nutrient transformations [J]. *Bioresource Technology*, 1999, 67(1): 19-24.
- [25] CHEN Changya, ZHANG Panyue, ZENG Guangming, et al. Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 158(3): 616-622.
- [26] STELLACCI P, LIBERTI L, NOTARNICOLA M, et al. Valorization of coal fly ash by mechano-chemical activation; Part II. Enhancing pozzolanic reactivity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 149(1/2/3): 19-24.
- [27] 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.
- [28] XU Wenqing, PIGNATELLO J J, MITCH W A. Role of black carbon electrical conductivity in mediating hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) transformation on carbon surfaces by sulfides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7129-7136.
- [29] MORE T T, YADAV J S S, YAN S, et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144: 1-25.
- [30] B Alexander, J Stina, H Salar, et al. Sewage sludge-based activated carbon: Production and potential in wastewater and stormwater treatment [J]. *Environmental Management Chemical Process Engineering*, 2018, 12: 1-60.
- [31] ZHANG Weijun, TANG Mingyue, YANG Peng, et al. Micro-interfacial mechanisms on sludge dewaterability enhancement using cerium chloride for preparation of carbon-based functional material [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 386: 121930.
- [32] LI Liqing, DENG Yun, AI Jing, et al. Fe/Mn loaded sludge-based carbon materials catalyzed oxidation for antibiotic degradation: Persulfate vs H_2O_2 as oxidant [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 263: 118409.
- [33] RAMACHANDRA R H, DEVATHA C P. Experimental investigation on sludge dewatering using granulated blast furnace slag as skeleton material [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(11): 11870-11881.
- [34] XUE Qiang, CHEN Yijun. Experimental study on municipal sludge dewatering capacity by using quicklime and slag [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 54: 1499-1506.
- [35] 王燕杉, 王维红, 台明青, 等. 脱硫石膏耦合微波对生产燃料乙醇厌氧消化污泥脱水性能的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(10): 5609-5614.
- WANG Yanshan, WANG Weihong, TAI Mingqing, et al. Enhancing dewaterability of fuel ethanol producing anaerobic digestion sludge by microwave combined with desulfurization gypsum [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(10): 5609-5614.
- [36] 黄绍松, 梁嘉林, 张斯玮, 等. Fenton 氧化联合氧化钙调理对污泥脱水的机理研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1906-1919.

- HUANG Shaosong, LIANG Jialin, ZHANG Siwei, et al. A comprehensive mechanism for deeply dewatering sludge using Fenton's reagent with lime[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1906-1919.
- [37] WANG Liping, ZHANG Lei, LI Aimin. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: Influence of operating conditions and the process energetics[J]. *Water Research*, 2014, 65: 85-97.
- [38] WANG Liping, LI Aimin. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: The dewatering performance and the characteristics of products[J]. *Water Research*, 2015, 68: 291-303.
- [39] 关若楠, 时亚飞, 梁莎, 等. 复合调理脱水污泥热解残渣中重金属形态分布[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(3): 74-78.
- GUAN Ruonan, SHI Yafei, LIANG Sha, et al. Speciation distribution of heavy metals in pyrolysis residue of dewatered sewage sludge after conditioned with the composite conditioners[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(3): 74-78.
- [40] WANG Wei, LUO Yuxiang, QIAO Wei. Possible solutions for sludge dewatering in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2010, 4(1): 102-107.
- [41] 甘雁飞, 周宁娟, 张若晨, 等. 废水处理厂剩余污泥水热减量及改善脱水性能的研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 91-96.
- GAN Yanfei, ZHOU Ningjuan, ZHANG Ruochen, et al. Study on excess sludge reduction from wastewater treatment plant and dewatering improvement by hydrothermal method[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(4): 91-96.
- [42] 徐振佳, 陆宇倩, 李莲, 等. 不同反应条件对污泥水热碳化脱水性能的影响[J]. *环境工程*, 2019, 37(3): 1-6, 12.
- XU Zhenjia, LU Yuqian, LI Lian, et al. Effect of reaction condition on hydrothermal carbonization dewatering performance of sludge[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(3): 1-6, 12.
- [43] 庄修政, 阴秀丽, 黄艳琴, 等. 城市污泥水热脱水处理的工业应用与研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4224-4231.
- ZHUANG Xiuzheng, YIN Xiuli, HUANG Yanqin, et al. Research on hydrothermal treatment of sewage sludge and its industrial applications[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(11): 4224-4231.
- [44] WANG Liping, LI Aimin, CHANG Yuzhi. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: Heavy metals, volatile organic compounds and combustion characteristics of hydrochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 297: 1-10.
- [45] HU Kai, JIANG Junqiu, ZHAO Qingliang, et al. Conditioning of wastewater sludge using freezing and thawing: Role of curing[J]. *Water Research*, 2011, 45(18): 5969-5976.
- [46] TUNÇAL T. Improving thermal dewatering characteristics of mechanically dewatered sludge: Response surface analysis of combined lime-heat treatment[J]. *Water Environment Research: a Research Publication of the Water Environment Federation*, 2011, 83(5): 405-410.
- [47] Franceschini O. Dewatering of sludge by freezing [D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2010.
- [48] 武亚军, 何心妍, 张旭东, 等. 冻融预处理填埋污泥的室内真空脱水试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(11): 154-161.
- WU Yajun, HE Xinyan, ZHANG Xudong, et al. Experimental study on vacuum dehydration of sludge in landfill by freeze-thaw pretreatment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(11): 154-161.
- [49] 方兴, 李志华, 杨成建. 冷热联用对市政脱水污泥低温干燥的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2546-2553.
- FANG Xing, LI Zhihua, YANG Chengjian. Effect of combined cooling and heating methods on low-temperature drying of municipal dewatered sludge[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2546-2553.
- [50] GOGATE P R, KABADI A M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 44(1): 60-72.
- [51] 黄锦佳, 梁嘉林, 杨贤, 等. 超声-生物沥浸-氧化钙联合超高压压滤系统实现市政污泥深度脱水及其泥饼的毒性评估[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(5): 1745-1759.
- HUANG Jinjia, LIANG Jialin, YANG Xian, et al. Deep dewatering of sewage sludge by ultrasonic-bioleaching-lime conditioning combined with ultrahigh pressure filtration system and its toxicity evaluation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(5): 1745-1759.
- [52] FENG Xin, DENG Jinchuan, LEI Hengyi, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100(3): 1074-1081.
- [53] 薛飞, 陈钦, 郭庆峰, 等. 超声-溶菌酶协同处理强化纺织印染污泥脱水性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(5): 528-533.
- XUE Fei, CHEN Qin, GUO Qingfeng, et al. Research on the enhanced dewatering performance of textile dyeing sludge by ultrasonic-lysozyme synergistic treatment[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(5): 528-533.
- [54] BIEN J, WOLNY L. Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(11): 101-106.
- [55] WANG F, JI M, LU S. Influence of ultrasonic disintegration on the dewaterability of waste activated sludge[J]. *Environmental Progress*, 2006, 25(3): 257-260.
- [56] YU Qiang, LEI Hengyi, YU Guangwei, et al. Influence of microwave irradiation on sludge dewaterability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 155(1/2): 88-93.
- [57] 吴建, 唐维学, 潘湛昌, 等. 微波-超声波对铝加工污泥的脱水性能研究[J]. *工业水处理*, 2020, 40(5): 49-51.
- WU Jian, TANG Weixue, PAN Zhanchang, et al. Study on microwave-ultrasonic dewatering performance of aluminum pro-

- cessing sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40 (5) : 49-51.
- [58] 李洋洋, 马姝雅, 朱薇, 等. 微波耦合 $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 对剩余污泥脱水性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(1): 53-60.
LI Yangyang, MA Shuya, ZHU Wei, et al. Effect of microwave-coupled $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ on excess sludge dewaterability [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(1): 53-60.
- [59] 熊杰, 张鹤清, 王玉珏. 污泥脱水过程重金属迁移规律研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 30-35.
XIONG Jie, ZHANG Heqing, WANG Yujue. Heavy metal migration during sludge electro-dewatering process [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(4): 30-35.
- [60] 袁晋亨, 曾锐, 莎莉, 等. 高盐高有机制药废水污泥电渗透高干脱水[J]. 化工进展, 2020, 39(8): 3380-3385.
YUAN Jinteng, ZENG Rui, SHA Li, et al. Electroosmotic dewatering of high salinity organic pharmaceutical wastewater sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(8): 3380-3385.
- [61] 黄殿男, 焦美怡, 李琳, 等. 电渗脱水对污泥性质及结合水含量的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 424-430.
HUANG Diannan, JIAO Meiyi, LI Lin, et al. Effect of electroosmotic dehydration on sludge properties and bound water content [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 424-430.
- [62] HU Shaogang, HU Jingping, SUN Yingfei, et al. Simultaneous heavy metal removal and sludge deep dewatering with $\text{Fe}(\text{II})$ assisted electrooxidation technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124072.
- [63] RAO Binqi, PANG Hongru, FAN Feibiao, et al. Pore-scale model and dewatering performance of municipal sludge by ultrahigh pressurized electro-dewatering with constant voltage gradient [J]. Water Research, 2021, 189: 116611.
- 【作者简介】 叶新合(1977—), 高级工程师。E-mail: zyxzlb2015@163.com。 通讯作者: 王锐, 博士, 讲师。E-mail: daxia_wang008@163.com。
- 【收稿日期】 2022-07-09(修改稿)

(上接第7页)

- [43] POERIO T, PIACENTINI E, MAZZEI R. Membrane processes for microplastic removal [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2019, 24(22): 4148.
- [44] LÜ Xuemin, DONG Qian, ZUO Zhiqiang, et al. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 579-586.
- [45] LARES M, NCIBI M C, SILLANPÄÄ M, et al. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology [J]. Water Research, 2018, 133: 236-246.
- [46] ENFRIN M, LEE J, LE-CLECH P, et al. Kinetic and mechanistic aspects of ultrafiltration membrane fouling by nano- and microplastics [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 601: 117890.
- [47] WANG Rui, ZHANG Lina, CHEN Baoliang, et al. Low-pressure driven electrospun membrane with tuned surface charge for efficient removal of polystyrene nanoplastics from water [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 614: 118470.
- [48] DING Haojie, ZHANG Jian, HE Huan, et al. Do membrane filtration systems in drinking water treatment plants release nano/microplastics? [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142658.
- [49] SINGH N, KHANDELWAL N, GANIE Z A, et al. Eco-friendly magnetic biochar: An effective trap for nanoplastics of varying surface functionality and size in the aqueous environment [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418: 129405.
- [50] PIVOKONSKÝ M, PIVOKONSKÁ L, NOVOTNÁ K, et al. Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140236.
- [51] KIM K T, PARK S. Enhancing microplastics removal from wastewater using electro-coagulation and granule-activated carbon with thermal regeneration [J]. Processes, 2021, 9(4): 617.
- [52] SIIPOLA V, PFLUGMACHER S, ROMAR H, et al. Low-cost biochar adsorbents for water purification including microplastics removal [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 788.
- [53] HU Kunsheng, TIAN Wenjie, YANG Yangyang, et al. Microplastics remediation in aqueous systems: Strategies and technologies [J]. Water Research, 2021, 198: 117144.
- [54] MIAO Fei, LIU Yanfeng, GAO Mingming, et al. Degradation of polyvinyl chloride microplastics via an electro-Fenton-like system with a TiO_2 /graphite cathode [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 123023.
- 【作者简介】 糜自栋(1997—), 硕士研究生。电话: 19854170311, E-mail: 312984148@qq.com。 通讯作者: 孙韶华, 研究员, E-mail: jnsunshaohua@163.com。
- 【收稿日期】 2022-07-11(修改稿)