

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.020

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌对市政污泥脱水性能的改善

秦松岩¹, 郭丽娜¹, 解永磊¹, 张丹丹¹, 马放²

(1.天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 300384 天津;

2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

摘要: 为改善市政污泥脱水性能, 利用嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans* XJF8 (简称 *At · f* XJF8) 对 Fe^{2+} 矿化过程中的酸化作用, 对污泥进行连续流深度脱水实验. 生物酸化反应器为推流式, 有效容积为 68 L. 通过 pH、比阻、抽滤脱水前后泥饼含水率、有机质等指标研究了污泥脱水性能的变化. 结果表明, 营养剂投加量为 $2.11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 $\text{Fe}(\text{II})$ 计算)、污泥停留时间 (SRT) 为 3.7 d、污泥回流比 80% 时, 污泥 pH 由最初的 7.22 降至最终 2.95 左右, 污泥比阻由原始污泥的 $(4.2 \pm 0.59) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ (难脱水污泥) 下降到 $(0.55 \pm 0.11) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ (易脱水污泥), 整个过程中 $\text{Fe}(\text{II})$ 的氧化率在 96% 以上. 对生物酸化铁氧化前后的污泥在 0.05 MPa 条件下进行抽滤脱水, 泥饼含水率由 80% 下降到 68%, 且污泥有机质质量分数变化较小. *At · f* XJF8 在污泥生物酸化铁氧化过程中具有良好的活性, 在一定条件下可对市政污泥进行生物酸化铁氧化提高其脱水性能.

关键词: 生物酸化铁氧化; 污泥脱水性; 市政污泥; 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)08-101-05

Improvement of municipal sludge dewaterability by *Acidithiobacillus ferrooxidans*

QIN Songyan¹, GUO Lina¹, XIE Yonglei¹, ZHANG Dandan¹, MA Fang²

(1. College of Environmental Science & Safety Engineering, Tianjin University of Technology, 300384 Tianjin, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

Abstract: To improve the dewaterability of municipal sludge, the *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*At · f* XJF8) cultivated in a laboratory-scale plug flow reactor (68 L) were used, which had efficient biomineralization and biological acidification. Chemical parameters of pH, specific resistance, suction filter mud cake moisture content of the municipal sludge was determined pre-and after dehydration etc. The optimum operation parameters of the reactor was: SRT 3.7 d, $\text{Fe}(\text{II})$ dosage $2.11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, reflux ratio 80%. Experiment result showed that the pH of the sludge decreased from 7.22 (stat-up stage) to 2.95 (steady stage) after the dewatering, and the specific resistance to filtration (SRF) of sludge decreased from initial $(4.2 \pm 0.59) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ to the final $(0.55 \pm 0.11) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. Ferrous oxidation rate kept above 96% in the whole running process. At the condition of 0.05 MPa pressure from the suction filtration, water content of the sludge decreased from 80% to 68%. This paper developed a new method for the sewage sludge dewaterability with the bio-acidification and ferrous oxidation by *At · f* XJF8.

Keywords: bio-acidification and ferrous oxidation; sludge dewaterability; municipal sludge; *Acidithiobacillus ferrooxidans*

利用生物的酸化作用和亚铁离子的氧化作用(简称生物酸化铁氧化)提高污泥脱水性能,是近年来应用于污泥深度脱水的新方法^[1]. 经过生物酸化铁氧化处理后的市政污泥在不加药剂的条件下,其

脱水性能提高了近 10 倍^[2]. 该方法是利用嗜酸性复合菌群如嗜酸自养菌 (*Acidithiobacillus thiooxidans*、*Acidithiobacillus ferrooxidans*) 和耐酸性异养菌的协同作用, 在提供营养剂的条件下, 该菌群通过自身产酸使污泥 pH 降低并改变污泥中原有的微生物菌群结构, 菌群生长过程中产生的 $\text{Fe}(\text{III})$ 和次生矿物等均促进和改善了污泥的脱水性能^[1].

利用生物酸化铁氧化方法处理市政污泥时, 多采用复合菌群并在一定量营养剂条件下进行^[3-4], 复合菌是基于菌群中嗜酸性异养菌消耗污泥中水溶性有机物 (DOM) 以促进生物酸化进程^[5] 以及嗜酸

收稿日期: 2014-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51108317); 天津市应用基础及前沿青年科技基金(12JCQJNC05400); 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)开放基金(QA201210)

作者简介: 秦松岩(1978—), 女, 博士, 副教授;

马放(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 马放, mafang@hit.edu.cn.

性硫杆菌的生物氧化和产酸作用,其中 pH 降低主要是氧化硫硫杆菌的生物产酸作用.然而嗜酸性氧化亚铁硫杆菌的生物产酸及生物成矿作用对提高市政污泥脱水性能的影响尚未明确.本课题组分离得到一株嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*),该菌可在 pH 1.4~3.5 范围生长,对环境 pH 适应能力较强^[6],氮源需求少且溶解性 Fe(III)生成量大^[7].污泥生物处理过程中可利用污泥中氨氮等营养物质而不需另外添加,减少营养剂的需求量;同时溶解性 Fe(III)的增加有利于污泥脱水^[8].为此,利用课题组现有的 *Acidithiobacillus ferrooxidans* XJF8 菌株进行污泥生物酸化铁氧化处理,并参考摇瓶实验^[9]进行连续流小试实验模拟.探讨单一菌株生物酸化铁氧化对市政污泥脱水性能的影响,为实际工程应用提供技术支持.

1 实验

1.1 实验用菌与供试污泥

实验用菌:利用山西某露天煤矿的矿坑废水通过 9K 液体培养基^[10]对其中的菌群进行富集培养,然后在 9K 固体培养基上涂布,直至固体培养基上长出棕褐色具有金属光泽的单菌落,挑取单菌落在 9K 液体培养基中富集,纯化后经过 16SrDNA 鉴定为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans* XJF8, 基因库登录号 KF378735, 简称 *At · f* XJF8)^[11].该菌(如图 1 所示)属于嗜酸性自养型好氧菌,以 CO₂ 为唯一碳源,30 h 达到对数生长期,最适温度和 pH 分别为 30 ℃ 和 2.0,通过氧化 Fe(II) 为 Fe(III) 获得能量.

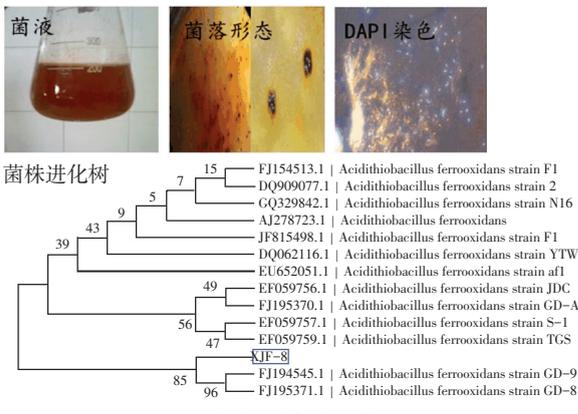


图 1 氧化亚铁硫杆菌 XJF8

接种菌泥培养:按照文献[12]的方法,在摇瓶中利用嗜酸性氧化亚铁硫杆菌加入改进的营养剂(主要含 Fe 和 N、P、Ca、Mg 等微量元素)对市政污泥进行酸化,反复转接 2 次后,污泥 pH 降至 3.0 左右培养完成.共计培养 5 L 生物酸化污泥作为反应器接种污泥.供试污泥采自天津某市政污水处理厂

浓缩污泥,包含初沉池和二沉池污泥,基本性质如表 1 所示.

表 1 污泥理化性质

pH	含固率/%	w(有机质)/%	比阻/(m · kg ⁻¹)	ρ(污泥)/(mg · L ⁻¹)	SV ₃₀ /%	ρ(Fe(II))/(mg · L ⁻¹)	臭味
7.2	3.26	55.4	4.2×10 ¹²	34 000	96	102	恶臭

1.2 污泥生物酸化铁氧化反应系统

污泥生物酸化铁氧化反应系统由进泥池、调节池、生物酸化反应池、污泥浓缩池等结构单元,以及曝气、搅拌和污泥回流泵等构成.进泥池为 100 L 带搅拌圆桶,调节池和污泥浓缩池由直径 200 mm 的有机玻璃制成,容积分别为 3.14, 12.56 L.生物酸化反应池采用 8 mm PVC 板焊接而成,尺寸为 670 mm×485 mm×280 mm,有效容积 68 L.用隔板将其分为 3 个廊道,并设置折流板,将反应器分为 7 个区域.反应系统流程如图 2 所示.

在整个系统中,原始污泥经进液泵提升至调节池,与回流污泥以及营养剂进行曝气混合后进入生物酸化反应池,沿 1~7 号区域上下折流推进.在生物酸化反应器中,嗜酸性氧化亚铁硫杆菌在曝气和营养剂存在下进行污泥的生物氧化及酸化.酸化后的污泥进入污泥浓缩池进行浓缩沉淀.

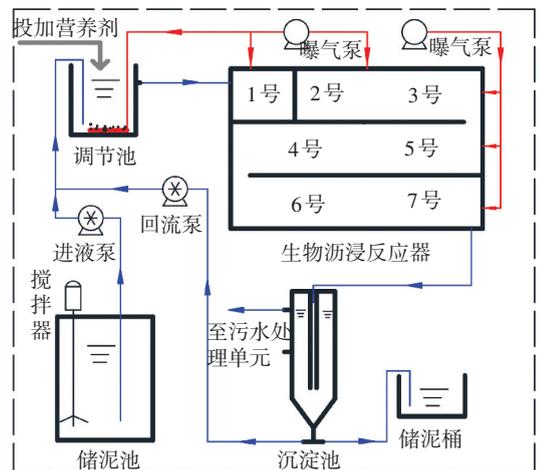


图 2 污泥生物酸化铁氧化反应系统流程

1.3 污泥生物酸化铁氧化系统小试实验启动

将培养好的接种污泥接种到反应器的 1 号区域,然后进行连续流启动运行.根据进泥量,按照 2.11 g · L⁻¹ (以 Fe(II) 计算) 每隔 4 h 间歇投加营养剂.随着反应进行,污泥从 1~7 号区域逐级推进,最终达到整个反应器运行稳定.污泥平均停留时间 (SRT) 3.7 d, 温度保持室温 (25 ℃), 污泥回流比 80%.反应器启动和稳定运行过程中,每天监测各区 pH、Fe(II) 氧化率,反应系统稳定后,测定各区的污泥沉降性以及污泥比阻.比较在同等抽滤条件下的泥饼含水率以及有机质质量分数.

1.4 实验指标测定方法

采用 Sartorius PB-10 精密 pH 计测定污泥 pH; 污泥比阻 (SRF) 采用布式漏斗-真空抽滤法测定^[13-15]; 上清液中 Fe(II) 质量浓度采用重铬酸钾容量法 (GB/T 6730.8-1986) 测定^[16]; 污泥沉降性能: 取各区污泥混匀后, 倒入 100 mL 量筒中, 记录 30 min、24 h 后污泥体积, 计算污泥沉降性^[17]。在 0.05 MPa 恒压下, 抽滤 100 mL 污泥直至真空破坏, 将泥饼在 105 °C 烘干, 根据烘干前后的质量计算含水率, 然后在 600 °C 下灼烧 2 h, 计算污泥有机质质量分数。

2 结果与讨论

2.1 生物酸化反应池 pH 变化

pH 在生物酸化铁氧化过程中的变化主要是由嗜酸性氧化亚铁硫杆菌将 Fe(II) 离子氧化为 Fe(III), 为自身的生长提供能量, Fe(III) 的生物成矿过程以及水解过程使 pH 下降^[18]。为使微生物快速适应污泥环境, 节约启动时间, 在初期的 84 h 内, 调节池污泥用硫酸将 pH 调至 4.00, 待反应器满负荷后停止加酸。图 3 为生物酸化反应器从启动到稳定阶段 pH 的变化。

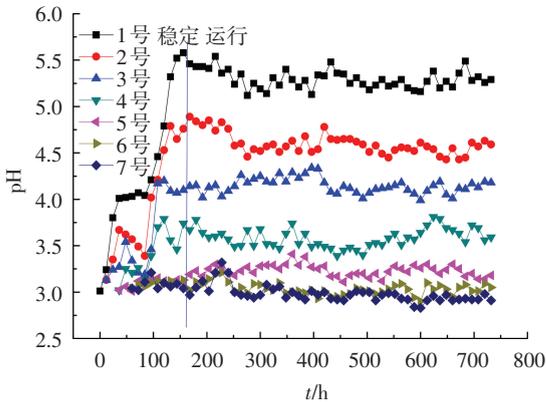


图3 生物酸化反应器 pH 变化

由图 3 可知, 在启动初期反应器未连续进泥的条件下, 1~7 号区域初始 pH 均维持在 3.0 左右。在连续流运行状况下, 随着新泥将原有酸化污泥替换后, 1 号区域的 pH 由 3.0 逐渐升高到 4.0, 之后 2 号、3 号和 4 号的变化与 1 号趋势一致。而 5~7 号区域, pH 在整个启动和稳定阶段变化不大, 维持在 3.0 ± 0.3 , 说明在 SRT 为 3.7 d 的条件下, 反应器完全能够完成污泥生物酸化铁氧化过程, 存在进一步缩短停留时间的可能。在 84 h 之后进泥停止调节 pH, 1~4 号区域 pH 随之逐渐上升, 分别由 84 h 的 4.04、3.39、3.19、3.13 上升到 156 h 的 5.58、4.76、4.1、3.74, 并基本保持稳定, 此时整个生物酸化铁氧化反

应系统经过 168 h 运行后达到稳定, 稳定期间反应器 1~7 号区域的 pH 分别为 5.27 ± 0.15 、 4.57 ± 0.11 、 4.15 ± 0.13 、 3.57 ± 0.6 、 3.23 ± 0.02 、 3.01 ± 0.06 、 2.95 ± 0.02 。污泥随着推流式前进, 整个过程中 pH 最低在 3.0 左右, 没有进一步降低, 这与已有报道^[19] pH 可降至 2.5 相比偏高, 可能由于本系统中不存在生物酸化作用较强的氧化硫硫杆菌群, 在缺乏氧化硫硫杆菌协同作用下, S⁰ 氧化为 H₂SO₄ 的过程受到限制, pH 没有进一步降低。整个反应系统运行过程中, pH 由原泥的 7.22 经过生物酸化铁氧化后降至 2.95 左右, 说明 *At. f. XJF8* 菌株在一定条件下可以实现对污泥的逐步酸化。

2.2 泥饼含水率及污泥比阻变化

泥饼的含水率直接体现了污泥生物处理前后脱水性能的变化。实验期间在 0.05 MPa 条件下对 100 mL 污泥进行抽滤, 测定污泥泥饼含水率和有机质。两者抽滤时间上存在较大差异, 原泥大约需要 20 min 完成此过程, 而处理后的污泥在 2~3 min 即可完成。原泥泥饼含水率大约在 80%, 而处理后泥饼含水率低于 68%。经过生物酸化铁氧化之后, 污泥的脱水性能大大提高, 泥饼含水率变化明显。

污泥比阻可作为脱水性能的指标, 比阻越低, 污泥的脱水性能越好^[20-21]。一般认为比阻 $SRF > 4 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时污泥不易脱水; SRF 在 $1 \times 10^{12} \sim 4 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时脱水性能中等; $SRF < 1 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时为易脱水污泥^[22]。

在系统运行达到稳定后 (168 h 后), 测定原始污泥、1 号区域、4 号区域和 7 号区域的污泥比阻, 取整个运行期间的平均值进行分析。图 4 为反应器中不同区域污泥比阻的变化。可以看出, 实验期间污泥比阻的变化十分明显, 原始污泥的比阻为 $(4.2 \pm 0.59) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于较难脱水污泥, 在 1 号区域中污泥比阻变化较小, 此时比阻变化主要是由调节池中原始污泥与回流污泥和营养剂混合后导致 pH 下降而引起, 随着污泥在反应器中推流式前进, *At. f. XJF8* 菌株逐步适应污泥环境, 微生物活性逐渐增强, 到达 4 号区域时, 污泥比阻变化较明显, 为 $(1.0 \pm 0.06) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时污泥脱水性能大大提高, 这一变化趋势与 pH 变化相吻合。经过生物酸化铁氧化反应之后, 污泥比阻最终降至 $(0.55 \pm 0.11) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时污泥属于易脱水污泥。比阻变化表明整个反应体系中 *At. f. XJF8* 菌株逐渐适应在污泥环境中进行生物酸化铁氧化反应, 污泥逐步酸化过程中污泥比阻也明显降低, 此过程中市政污泥的脱水性能得到明显改善。

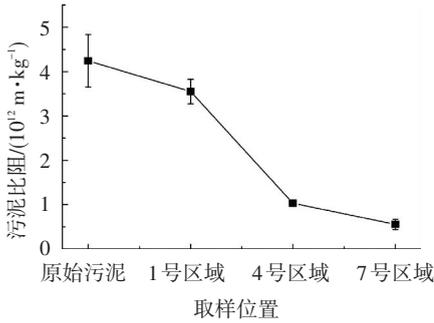


图 4 反应器中污泥比阻变化

2.3 反应过程中 Fe(II) 质量浓度及氧化率变化

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌通过将 Fe(II) 氧化成 Fe(III) 获取能量,进而产生 H⁺ 使污泥酸化。Fe(II) 的氧化速率可以反映嗜酸性氧化亚铁菌的活性以及污泥生物酸化铁氧化的进程^[23]。图 5 反映了系统稳定运行期间,Fe(II) 质量浓度和氧化率的变化。可以看出,初始 Fe(II) 质量浓度为 (1.98±0.05) g·L⁻¹,比实际加入量 2.11 g·L⁻¹ 低,可能是由于部分 Fe(II) 吸附在污泥絮体中,整个过程中 Fe(II) 质量浓度由 (1.98±0.05) g·L⁻¹ 降为最终的 (0.133±0.06) g·L⁻¹,Fe(II) 的氧化率达 (96.6±1.2)%。在最初的 1 号和 2 号区域内,Fe(II) 质量浓度变化缓慢,氧化率较低,微生物活性较低;污泥从 2 号区域到 4 号区域,Fe(II) 质量浓度由 (1.39±0.05) g·L⁻¹ 降到 (0.3±0.11) g·L⁻¹,氧化率也增加到 (93.6±0.96)%。这一变化与 pH 和比阻的变化趋势一致。表明这一过程中微生物活性明显增强,生物酸化铁氧化过程主要发生在 2~4 号区域内。5~7 号区域 Fe(II) 质量浓度及氧化率变化较小,此时生物酸化铁氧化达到稳定阶段,由于受到低质量浓度 Fe(II) 的限制 *At. f* XJF8 菌株的活性降低。这也进一步解释了系统稳定运行后,5~7 号区域 pH 略微升高是由 Fe(III) 转化为羟基硫酸铁等次生矿物,如黄钾铁矾和施氏矿物^[24],Fe(III) 水解量减少导致的。

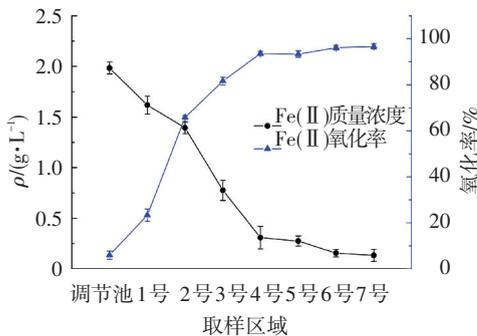


图 5 Fe(II) 质量浓度及氧化率变化

2.4 污泥沉降性变化

污泥沉降性(SV)可以反映污泥的固液分离程度。选取在 30 min 的 SV₃₀ 反映生物酸化铁氧化过程变化。在反应系统稳定运行后(180 h 之后)测定污泥沉降性。图 6 为原始污泥和反应器 7 个区域 SV₃₀

的变化。可以看出,在反应池中随着污泥由 1 号向 7 号推进,污泥的沉降性能得到改善,在 30 min 内沉降比由原泥的 (94±2)% 降至最低 (83±2)%。很明显,污泥的固液分离能力在生物酸化铁氧化之后明显提高,可进一步浓缩出更多的水分。5 号区域之后污泥沉降性升高,分析认为 5 号区域之后 Fe(II) 质量浓度降低,表明生物酸化铁氧化过程已经完成,Fe(II) 质量浓度降低抑制 *At. f* XJF8 菌株的活性,pH 略微上升,导致沉降速率降低,但沉降 24 h 的沉降比没有升高(如图 7 所示)。反应器稳定期污泥沉降性的变化趋势与 pH 变化一致,*At. f* XJF8 菌株随着污泥推流前进逐渐成为优势菌,并产生酸使污泥酸化,从而提高泥水分离效果。

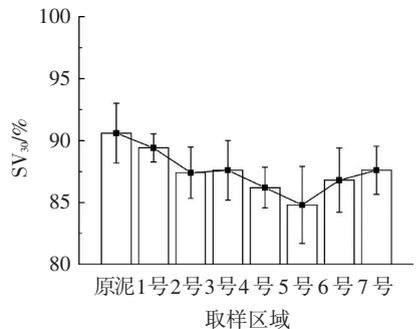


图 6 污泥沉降性变化

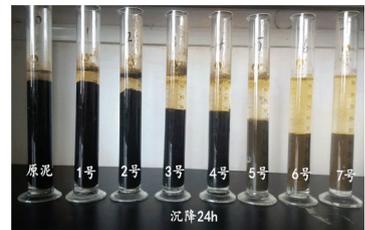


图 7 24 h 污泥沉降性

2.5 污泥有机质变化

污泥经过生物酸化铁氧化处理后有机质质量分数变化如图 8。可以看出,原始污泥的有机质质量分数平均为 (53±0.76)%,经过生物酸化铁氧化后污泥的有机质质量分数下降至 (45±0.24)%,下降了 8%,比市政污泥厌氧消化(或好氧消化)有机质的降解率低,后者一般大于 40%^[25]。较低的有机质削减率有利于脱水后污泥的资源化利用。

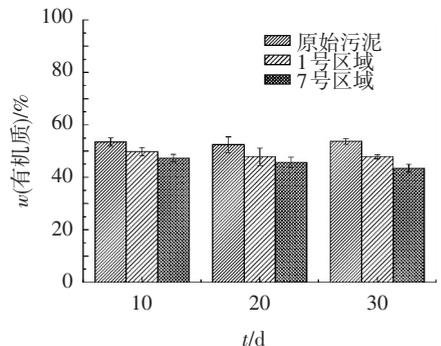


图 8 污泥有机质变化

目前对污泥有机质影响脱水性能的研究多为对污泥中胞外聚合物(EPS)的研究.EPS是微生物在一定的环境下,其代谢过程中分泌的包围在细胞壁外的多聚物,主要是一些高分子的聚合物,如蛋白质、多糖和核酸等^[26].EPS占污泥总有机成分的50%~90%,会影响污泥脱水性能,增加污泥脱水难度^[27].污泥有机质质量分数的减少,使污泥中EPS下降,而污泥中结合水主要来源于EPS束缚的结合水和微生物细胞束缚的细胞内结合水^[26],因此,污泥有机质的降低有利于污泥脱水性能的提高.

3 结 论

1)单一菌株的嗜酸性氧化亚铁硫杆菌生物酸化铁氧化处理市政污泥,其pH最终可降至3.0左右,处理后污泥比阻为 $(0.55 \pm 0.11) \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1} < 1 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于易脱水污泥,Fe(II)的氧化率达(96.6±1.2)%,表明*At·f*XJF8菌株能够在一定条件下对污泥进行生物酸化铁氧化从而提高污泥脱水性能.

2)污泥经过生物酸化铁氧化后,不需要添加任何药剂,在0.05 MPa压力下,2 min之内即可完成抽滤,抽滤泥饼含水率低于68%.处理后污泥有机质质量分数在55%~63%,有利于脱水后污泥的资源化利用.

3)污泥生物酸化铁氧化需要一定营养剂条件下才能进行.本研究利用*At·f*XJF8菌株进行实验,营养剂中无需添加S、氨氮和有机酸等营养物质,减少了营养剂用量和运营费用.

参 考 文 献

- [1] 周立祥. 污泥生物沥浸处理技术及其工程应用[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 154-166.
- [2] 刘奋武, 周立祥. 不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高市政污泥脱水性能的效果[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 974-979.
- [3] 李超, 周立祥, 王世梅. 复合硫杆菌生物浸出污泥中重金属的效果及pH和ORP的关系[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1155-1160.
- [4] 宋兴伟, 周立祥. 生物沥浸处理对市政污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 2012-2017.
- [5] FANG D, ZHOU L X. Effect of sludge dissolved organic matter on oxidation of ferrous iron and sulfur by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2006, 171(1/2/3/4): 81-94.
- [6] 李树美, 秦松岩, 冯焱. 钢铁盐酸洗废液的可生物氧化性研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(11): 21-25.
- [7] 薛琳, 秦松岩, 刘宗瑜, 等. 含硫酸亚铁废液生物氧化过程中氮源对溶解性Fe(III)生成量的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2344-2349.
- [8] 肖凌鹏, 张盼月, 张玉璇, 等. 生物淋滤改善市政污泥的脱水性能[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2793-2797.
- [9] 朱海凤, 周立祥, 王电站. 生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 916-921.
- [10] 符翔, 王红梅, 刘乔, 等. Fe²⁺质量浓度对*Acidithiobacillus ferrooxidans*耐铜性的影响[J]. 矿物学报, 2011, 31(4): 662-667.
- [11] XIAO J F, QIN S Y, HUANG P, et al. Isolation and characterization of a strain of *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Advanced Materials Research, 2013, 777: 242-246.
- [12] 方迪. 制革污泥中Cr的生物淋滤研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [13] 高廷耀. 水污染控制工程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] 陈花果, 伍素兰. 提高石油化工污泥脱水性能实验研究[J]. 西安地质学院学报, 1996, 18(3): 100-105.
- [15] 王美莲, 田家宇, 潘志辉, 等. 活性污泥中的水分测定及其脱水性能[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2010(3): 285-290.
- [16] 王名德. 分析化学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
- [17] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高市政污泥脱水性能的中试研究: 批式运行模式[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2023-2029.
- [18] LIU F, ZHOU L, ZHOU J, et al. Improvement of sludge dewaterability and removal of sludge-borne metals by Bioacidified iron oxide at optimum pH [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 221: 170-177.
- [19] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高市政污泥脱水性能的中试研究: 连续运行模式[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2993-2998.
- [20] ALAM M Z, FAKHRU' L-RAZI A. Enhanced settle ability and dewaterability of fungal treated domestic wastewater sludge by liquid state bioconversion process [J]. Water Research, 2003, 37(5): 1118-1124.
- [21] FENG X, DENG J, LEI H, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1074-1081.
- [22] 王电站, 周立祥, 何锋. 生物淋滤法提高制革污泥脱水性能的研究[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 67-71.
- [23] BAI S, XU Z, WANG M, et al. Both initial concentrations of Fe(II) and monovalent cations jointly determine the formation of biogenic iron hydroxyl sulfate precipitates in acidic sulfate-rich environments [J]. Materials Science and Engineering: C, 2012, 32(8): 2323-2329.
- [24] 周立祥. 污泥生物沥浸处理技术及其工程应用[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 154-166.
- [25] 李超, 周立祥, 王世梅. 复合硫杆菌浸出污泥中重金属的效果及与pH和ORP的关系[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 1155-1160.
- [26] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 29(12): 3457-3461.
- [27] 牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 不同混凝剂对污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2126-2133.