

刘奋武, 周立祥. 2009. 不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高城市污泥脱水性能的效果 [J]. 环境科学学报, 29(5): 974-979
Liu FW, Zhou LX. 2009. Enhancing dewaterability of municipal sewage sludge through the combined approaches of bioleaching and Fenton reaction [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(5): 974-979

不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高城市污泥脱水性能的效果

刘奋武, 周立祥*

南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系, 南京 210095

收稿日期: 2008-08-28 录用日期: 2009-03-25

摘要: 采用复合硫杆菌和不同能源物质配比, 通过序批式摇瓶实验, 研究了城市污泥生物沥浸处理效果特别是对脱水性能的影响. 分析了以不同比例添加底物 Fe^{2+} 与 S^0 条件下, 城市污泥沥浸系统中 pH、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、污泥脱水性能 (污泥比阻 ν 和毛细吸水时间 CST) 的变化情况. 并在此基础上, 研究了对生物沥浸处理后污泥采用 Fenton 试剂化学强化处理对污泥脱水性能的影响. 结果表明, 当 S^0 的添加量为 2 g L^{-1} , Fe^{2+} 的添加量大于 1 g L^{-1} 时, 采用 1:1 回流比, 在 2.0~2.5 d 均可以完成生物沥浸过程. 生物沥浸中复合能源物质的加入对城市污泥脱水性能有重要的促进作用. 在投加 $2\text{ g L}^{-1} S^0$ 的同时, 投加 $4\sim 6\text{ g L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} , 处理后污泥的脱水性能提高 8~10 倍. 对生物沥浸后污泥进行 Fenton 试剂化学强化处理, 可进一步使污泥的脱水性能提高 50%. 生物沥浸和 Fenton 试剂联合处理方式, 可使污泥的脱水性能提高 18 倍. 这对污泥高干度脱水和污泥减量化有重要的实用价值.

关键词: 城市污泥; 生物沥浸; Fenton 试剂; 脱水性能

文章编号: 0253-2468(2009)05-974-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

Enhancing dewaterability of municipal sewage sludge through the combined approaches of bioleaching and Fenton reaction

LIU Fenwu, ZHOU Lixiang*

Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Received 28 August 2008; accepted 25 March 2009

Abstract The effectiveness of municipal sludge bioleaching on enhancing sludge dewaterability were investigated through batch experiments with co-inoculation of two acidophilic thiobacilli (*Acidithiobacillus thiooxidans* TS6 and *A. ferrooxidans* LX5) and the addition of two energy substrates (Fe^{2+} and S^0) in different ratios. During sludge bioleaching dynamic changes of pH, Fe^{2+} , Fe^{3+} and dewaterability (expressed as specific resistance ν or Capillary Suction Time CST) of municipal sludge were monitored. Furthermore, trials on the Fenton reaction's effect on the dewaterability of bioleached sludge were also conducted in this study. Results showed that the bioleaching process was finished in 2.0~2.5 days (pH < 2.00) with the addition of $2\text{ g L}^{-1} S^0$ and more than $1\text{ g L}^{-1} Fe^{2+}$ and a 1:1 recycling ratio of raw sludge to bioacidified bioleached sludge. Co-addition of Fe^{2+} and S^0 to the bioleaching system markedly enhanced the dewaterability of municipal sludge. For example, sludge dewaterability increased 8~10 fold after bioleaching when $2\text{ g L}^{-1} S^0$ and $4\sim 6\text{ g L}^{-1} Fe^{2+}$ were added into raw sludge. The dewaterability of bioleached sludge could be increased by 50% if Fenton's agent was incorporated into bioleached sludge. Combining bioleaching and the Fenton reaction in municipal sludge treatment led to an 18-fold increase in sludge dewaterability over raw sludge.

Keywords municipal sludge; bioleaching; Fenton's reagent; dewaterability

1 引言 (Introduction)

目前普遍采用的城市污泥脱水工艺是在液态

污泥中添加聚丙烯酰胺 (PAM) 等絮凝剂后进行机械脱水, 使其成为含水量为 80%~85% 的脱水污泥, 脱水污泥高水分含量不但造成污泥体积庞大,

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2006AA06Z314); 国家自然科学基金项目 (No. 20377023)

Supported by the National High-Tech Research and Development Program of China (No. 2006AA06Z314) and the National Natural Science Foundation of China (No. 20377023)

作者简介: 刘奋武 (1984-), 男; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lzhou@njau.edu.cn

Biography: LIU Fenwu (1984-), male; * Corresponding author. E-mail: kzhou@njau.edu.cn

而且严重影响污泥的后续处置或资源化利用(周立祥, 2007)。加之污泥中还存在有重金属等有害物质。因此, 城市污泥减量化和无害化一直是污泥处理处置的重要任务也是亟待解决的难题。近 10 多年来, 人们发现利用嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用和酸化作用发展起来的生物沥浸技术(Bioleaching)可有效去除污泥中重金属(Taygi 1992 周立祥等, 2004a)、消除恶臭和杀灭病原菌(郑冠宇等, 2007), 是一种污泥无害化新技术。不仅如此, 我们还发现, 在制革污泥生物沥浸处理中, 该方法还兼有促进污泥的浓缩和改善脱水性能的明显功效, 可不加任何絮凝剂而机械脱水至污泥含水率 60% 左右(周立祥等, 2004; 王电站等, 2006 陈浩等, 2007)。由于城市污泥与制革污泥的理化性质差异较大, 最近我们发现, 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的改善远不如制革污泥, 而且在某些情况下, 生物沥浸处理后城市污泥的脱水性反而比处理前的污泥差(宋兴伟和周立祥, 2008)。例如, 笔者发现, 当利用氧化亚铁硫杆菌 *A. ferrooxidans* LX5 单一菌对城市污泥进行生物沥浸处理, 虽然沥浸后污泥的脱水性能得到一定程度的改善, 但在沥浸后期, 污泥体系的 pH 下降速度缓慢, 影响到处理效率。而采用氧化硫硫杆菌 *A. thiooxidans* TS6 进行生物沥浸时, 虽然污泥体系 pH 下降速度较快, 但是该过程不利于污泥的脱水, 甚至沥浸后污泥的脱水性能较原始污泥反而变差(宋兴伟和周立祥, 2008)。为进一步提高生物沥浸处理法对城市污泥脱水性能改善效果, 本研究拟采用 *A. thiooxidans* TS6 和 *A. ferrooxidans* LX5 复合硫杆菌处理城市污泥, 深入研究能源物质的不同组合对脱水性能的影响, 并在此基础上, 研究 Fenton 试剂强化措施提高生物沥浸处理后城市污泥的脱水性, 以期在城市污泥生物沥浸法处理的工程化应用提供技术支撑。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 供试污泥与接种物的制备

供试污泥: 采自苏州某污水处理厂的污泥浓缩池, 该污水处理厂的污水处理工艺采用氧化沟法处理, 污泥未经厌氧或好氧消化处理。液态污泥采回后, 保存于聚乙烯塑料桶中, 并置于 4℃ 冰箱保存备用。该液态污泥基本性质为: pH 6.54 有机质 50.3%, 含固率 3.29%, 密度 $1.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 污泥比阻 (γ) $3.28 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 污泥毛细吸水时间

(CST) 71.1 s

接种物的制备按参考文献(周立祥, 2004a)进行。主要微生物由氧化硫硫杆菌 *A. thiooxidans* TS6 氧化亚铁硫杆菌 *A. ferrooxidans* LX5 组成。

2.2 生物沥浸试验及配合化学强化处理试验

不同能源物质配比的多批次生物沥浸试验: 在 250 mL 三角瓶中, 将 15 mL 已驯化好接种污泥接入 135 mL 新鲜的城市污泥中, 分别按相应的设计比例加入能源物质 S^0 与 Fe^{2+} , S^0 的添加量设置 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 两个水平, Fe^{2+} 的添加量设置 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 6 个水平, 将两种能源物质不同水平进行两两配合, 共设置 12 个处理, 每个处理 3 个重复, 三角瓶置于 28℃ 往复式摇床 ($180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 中振荡培养。待污泥 pH 下降到 2 左右时, 结束处理。将生物沥浸后的酸化污泥与新鲜原始污泥按 1:1 比例混合, 继续进行第二批生物沥浸试验, 能源物质配比和其他条件均保持不变。按同样的方法继续进行第三批次的生物沥浸试验。每 12h 采取称重法补充蒸发的水分, 同时测定各批次生物沥浸过程中污泥 pH。并重点对第三批沥浸后的污泥进行沉降性能, 脱水性能(以比阻 γ 和毛细吸水时间 CST 衡量)测试, 以及对部分处理进行相应的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 和测定。

生物沥浸后的污泥的化学强化处理试验: 为进一步提高生物沥浸后污泥的脱水性, 在试验结束后的部分沥浸污泥中加入少量 Fenton 试剂, 以观测 Fenton 试剂对污泥脱水性能的影响。试验设计 3 个处理: ①原始污泥(对照); ②原始污泥 + Fenton 试剂; ③生物沥浸处理后污泥 + Fenton 试剂。生物沥浸处理污泥选择能源物质配比为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 S^0 + $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} , 以及 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 S^0 + $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} 的两种处理的污泥为材料。Fenton 试剂的加入方法为: 在 50 mL 原始污泥或生物沥浸污泥中, 按 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 加入 Fe^{2+} ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 形式), 和按质量体积比为 0.4% 的量加入体积浓度为 30% 的 H_2O_2 , 在磁力搅拌仪上中速充分搅拌反应 3 min, 测定反应后污泥的比阻 γ 。

2.3 测定方法

采用 pHS-3C 精密 pH 计(上海雷磁厂)测定污泥的 pH 值; 沥浸体系中的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 的测定按参考文献(宋兴伟和周立祥, 2008)进行, 即首先将待分析的污泥在 $12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, 0.45 μm 滤膜过滤进行固液分离, 获取沥浸液样, 然

后用邻菲罗啉分光光度法测定(鲍士旦, 2000). 污泥的比阻 γ 采用布氏漏斗-真空抽滤法测定(周立祥, 2007; 宋兴伟和周立祥, 2008). 污泥毛细吸水时间 CST(指污泥中的水分在特制的滤纸上渗透 1cm 距离所需要的时间, 用 s 表示)采用 CST 测定仪 (TYPE 304M, 英国 Triton 公司)测定. 污泥沉降性能测试: 150mL 沥浸后的污泥充分摇匀后, 倒入 250mL 量筒中, 记录下 24h 后上清液的体积, 并计算上清液体积占总体积的百分数即代表污泥的沉降性(周立祥等, 2004b).

3 结果 (Results)

3.1 能源物质配比对城市污泥生物沥浸进程的影响

图 1 反映了能源物质 (S^0 和 Fe^{2+}) 不同配比时连续 3 批污泥沥浸体系 pH 的变化. 从图 1a 中可看出, 当 S^0 的添加量较少 ($1 g \cdot L^{-1}$) 时, 若不添加 Fe^{2+} , 则污泥的 pH 下降相对较慢, 而其它处理在 7d 以内均可完成第一批生物沥浸过程 (以 $pH < 2.00$ 为终点). 当将生物酸化污泥以 1:1 回流方式进行回流, 进行第二、三批生物沥浸实验, 这些处理生物沥浸进程明显加快, 均可以在 6d 内完成沥浸过程. 随着 Fe^{2+} 加入量的增加, 生物沥浸速度也越快, 最快可以提前 2d 结束. 但当 Fe^{2+} 的添加量大于 $2 g \cdot L^{-1}$ 时, 所有处理的 pH 下降趋势趋于一致, Fe^{2+} 的加入量的影响已经变小.

当体系中 S^0 的添加量达到 $2 g \cdot L^{-1}$ 时 (见图 1b), 较之 S^0 添加量为 $1 g \cdot L^{-1}$ 的各处理, 污泥生物沥浸的时间明显缩短. 例如, 单加 $2 g \cdot L^{-1} S^0$ (不加 Fe^{2+}) 的处理首批沥浸时间也仅 6d 而同时添加不同量 Fe^{2+} 的各处理, 首批生物沥浸可在 5d 时间内即可完成. 在后两批通过生物酸化污泥回流方法的连续批次处理中, 生物沥浸时间比首批沥浸时间更短, 特别是在加 $2 g \cdot L^{-1} S^0$ 的同时, 添加 $1 \sim 6 g \cdot L^{-1} Fe^{2+}$, 在 2d 左右即可完成生物沥浸过程, 且当 Fe^{2+} 加入量在 $\geq 2 g \cdot L^{-1}$ 时, Fe^{2+} 加入量影响相对较小.

值得注意的是, 当 Fe^{2+} 的添加量相对较少时 ($\leq 1 g \cdot L^{-1}$), 体系的 pH 在下降过程中有一定程度的波动, 而当其添加量大于 $2 g \cdot L^{-1}$ 时, 沥浸过程中 pH 稳定下降 (见图 1). 究其原因可能与体系中存在 $Fe(II)$ 向 $Fe(III)$ 的转化 (耗 H^+ 过程) 与 $Fe(III)$ 的水解 (释 H^+ 过程) 有关, 当 Fe^{2+} 的添加量相对较多时, $Fe(III)$ 的水解释放 H^+ 数量远高于 $Fe(II)$ 氧

化的耗 H^+ 数量.

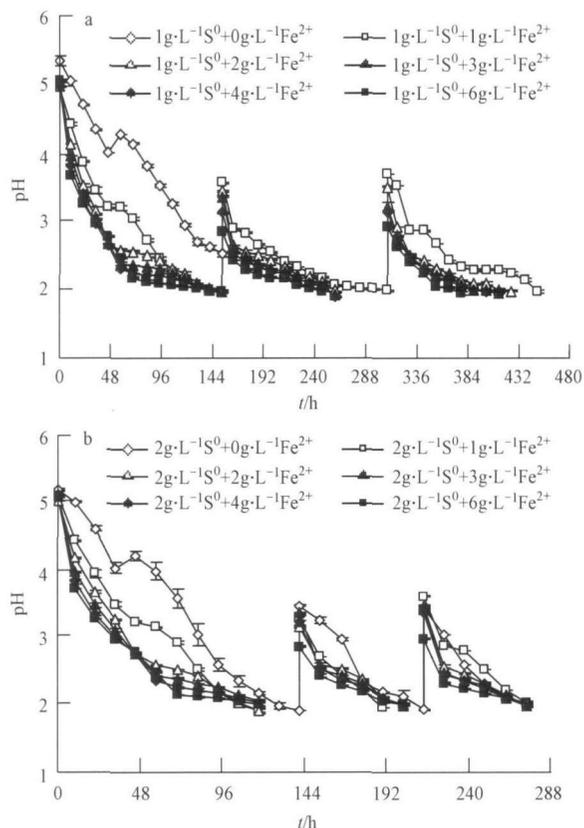


图 1 能源物质不同配比对连续三批次城市污泥生物沥浸中污泥 pH 的影响

Fig. 1 The change of pH in sewage sludge during bioleaching for successive three batch trials with different ratios of S to Fe^{2+}

3.2 城市污泥生物沥浸过程中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 浓度的变化趋势

图 2 以第 3 批的 3 个不同处理 ($2 g \cdot L^{-1} S + 2 g \cdot L^{-1} Fe^{2+}$; $1 g \cdot L^{-1} S + 6 g \cdot L^{-1} Fe^{2+}$; $2 g \cdot L^{-1} S + 6 g \cdot L^{-1} Fe^{2+}$) 为代表, 显示了生物沥浸过程中沥浸液 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 浓度的变化趋势. 从中可看出, 随着生物沥浸的进行, 污泥体系 Fe^{2+} 浓度在前 20h 内直线下降, 反应 20h 后体系中 Fe^{2+} 几乎完全被氧化. 例如, 当 Fe^{2+} 加入量达 $6 g \cdot L^{-1}$, S^0 的加入量为 $1 \sim 2 g \cdot L^{-1}$ 时, 溶液中自由态的 Fe^{2+} 的浓度由起始时的 $2420 \sim 2567 mg \cdot L^{-1}$ 降低至 20h 时的 $35 \sim 45 mg \cdot L^{-1}$, Fe^{2+} 的氧化率达到 $98.3\% \sim 98.6\%$. 相对应地, 污泥体系 Fe^{3+} 的量逐渐增加, 当 Fe^{2+} 加入量为 $6 g \cdot L^{-1}$ 时, 体系溶液中 Fe^{3+} 的浓度由最初的 $756 \sim 922 mg \cdot L^{-1}$ 升高至 20h 以后直至结束时的 $2281 \sim 2428 mg \cdot L^{-1}$. 总 Fe 的初始浓度由最初的 $3323 \sim 3324 mg \cdot L^{-1}$ 降低至 $2011 \sim 2132 mg \cdot L^{-1}$ 后呈现出

增加的趋势,升高至结束时的 $2317 \sim 2473 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当 Fe^{2+} 加入量为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, S^0 的加入量为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Fe^{2+} , Fe^{3+} , 总 Fe 浓度的变化趋势与 Fe^{2+} 加入量为 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理变化趋势相同. 即随着沥浸过程的进行,呈现出 Fe^{2+} 浓度逐渐降低, Fe^{3+} 浓度逐渐增加, 而总 Fe 的浓度呈现出先降低后上升的变化趋势.

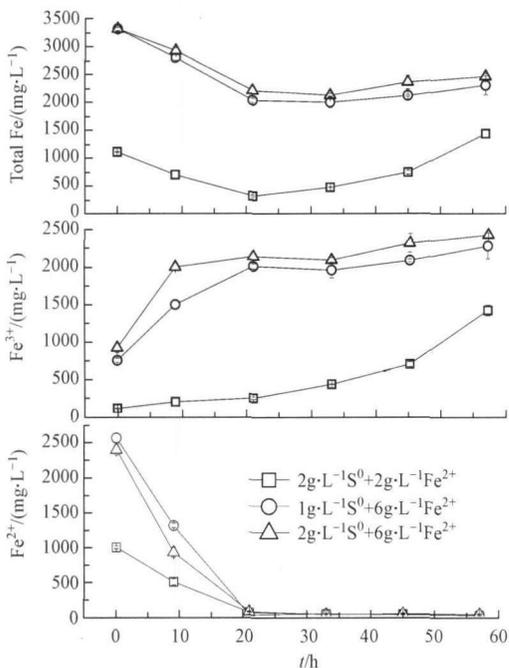


图 2 城市污泥生物沥浸过程中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 浓度的变化
Fig 2 The change of Fe^{2+} , Fe^{3+} and total Fe in the sewage sludge system during bioleaching

3.3 生物沥浸过程对城市污泥脱水性能的影响

为了研究生物沥浸过程对城市污泥脱水性能的影响,我们测定了在沥浸过程中固定 S^0 的加入量为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 但 Fe^{2+} 不同添加量的各处理城市污泥比阻 γ , 比阻 γ 越大表明污泥脱水性能越差. 试验结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 当 Fe^{2+} 的添加量为 $0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沥浸结束后污泥的比阻由原始污泥的 $3.28 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高到 $6.45 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, $3.93 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 污泥脱水性能反而变差. 而当 Fe^{2+} 的添加量大于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沥浸后污泥的比阻相对于原始污泥有不同程度的降低, Fe^{2+} 的添加量为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时. 沥浸后污泥的比阻达到 $0.43 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.34 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 沥浸后污泥脱水性能较原始污泥提高了 8~10 倍. 污泥毛细吸水时间 (CST) 也是衡量污泥脱水性的指标, 与污泥比阻的测定相比, CST 的测定更为快捷而且重复性好. CST 时间越短, 脱水性能越好. 一般认为 $\text{CST} \leq 10 \text{ s}$ 时, 污泥容易脱水. 分析发现, 随着 Fe^{2+} 添加量的增加, 污

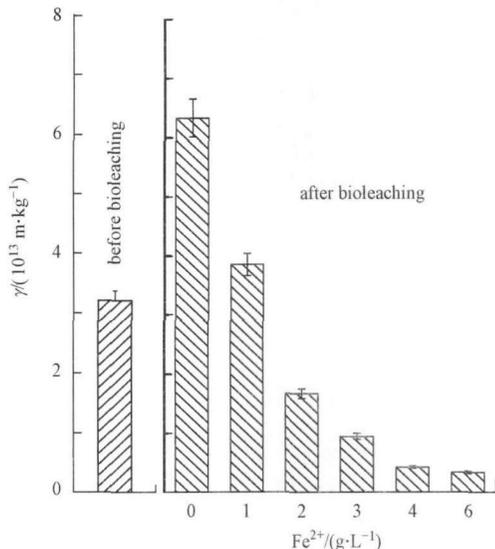


图 3 生物沥浸中亚铁的加入量对城市污泥比阻的影响 (S^0 的添加量为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig 3 Influence of the addition of ferrous iron on sludge specific resistance after bioleaching (added $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{S}^0$)

泥的 CST 值呈现出明显减小的趋势 (见图 4). 当不加 Fe^{2+} 而单加 S 时, 生物沥浸后污泥的 CST 值比原始污泥的 CST 反而更大, 高达 197.3 s . 当同时加入 $1 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Fe}^{2+}$ 时 CST 值变小, $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Fe}^{2+}$ 处理的 CST 值为 73.5 s 逐渐降低到 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Fe}^{2+}$ 处理的 28.9 s 左右. CST 的变化与污泥比阻 γ 的变化非常吻合. 二者大致有如下关系: $\gamma (\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}) = (0.082\text{CST} - 2.505) \times 10^{13} (R^2 = 0.92, p < 0.005)$.

此外, 从一定时间的污泥沉降性也能反映出污泥脱水性能好坏 (见图 4). 由图得知, 采用复合硫杆

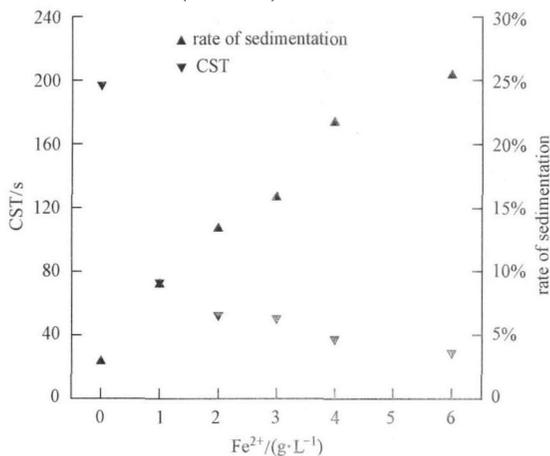


图 4 城市污泥生物沥浸后 CST 与沉降率的关系 (S^0 的添加量为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig 4 Relation between the CST and rate of sedimentation of sewage sludge after bioleaching (added $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{S}^0$)

菌对城市污泥进行生物沥浸过程中,当 S^0 的添加量一定时 (2 g L^{-1}),随着 Fe^{2+} 的加入量的增加,沥浸后污泥 24h 的沉降率也逐渐增加,当 Fe^{2+} 的加入量为 $4\sim 6\text{ g L}^{-1}$ 时,沥浸后污泥的沉降率达到 $22\%\sim 25\%$. 污泥沉降率的变化与 CST 值的变化趋势刚好相反. 显然,从提高污泥脱水性角度综合考虑,亚铁的加入量达到 4 g L^{-1} 以上最好.

3.4 Fenton 试剂的添加对沥浸后污泥比阻值的影响

如前所述,即使在城市污泥生物沥浸中采用两种能源物质最佳配比,污泥脱水性大幅度提高,但仍未达到易脱水的水平. 基于 Fenton 试剂通过对有机质的氧化能有效提高污泥脱水性的认识 (Lu *et al.* 2003),我们尝试了在沥浸后的污泥中加入 Fenton 试剂进一步提高污泥脱水性的效果,结果见图 5 的确,原始污泥中直接加 Fenton 试剂也能使污泥脱水性大幅度增加,表现在可使原始污泥的比阻从 $3.28 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ 降低到 $0.72 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$,脱水性提高 4.5 倍. 但在原始污泥中加 Fenton 试剂反应剧烈,产生大量泡沫和逸发恶臭,工程应用不便. 研究发现,将 Fenton 试剂加入到生物沥浸后的污泥中仍能进一步明显提高污泥的脱水性,且泡沫和恶臭释放量较少. 以 $2\text{ g L}^{-1}\text{ S}^0 + 4\text{ g L}^{-1}\text{ Fe}^{2+}$ 和 $2\text{ g L}^{-1}\text{ S}^0 + 6\text{ g L}^{-1}\text{ Fe}^{2+}$ 两处理的沥浸后污泥为例,经 Fenton 试剂处理后其比阻均可降低 50% 左右. 换言之,比阻为 $3.28 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ 的原始污泥经过生物沥浸并进一步经 Fenton 试剂处理后,其比阻仅为 $0.21 \times 10^{13} \sim 0.18 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$,脱水性提高了 18 倍.

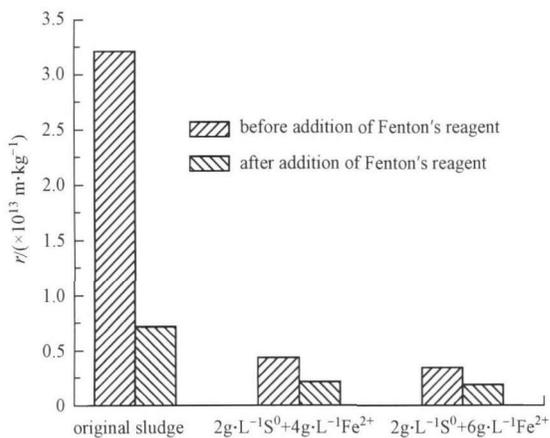


图 5 Fenton 试剂的添加对城市污泥与沥浸后污泥比阻的影响

Fig 5 Influence of Fenton reagent on specific resistance of

original sludge and leached sludge

4 讨论 (Discussion)

4.1 能源物质配比对城市污泥生物沥浸进程的影响

污泥生物沥浸过程中 pH 变化,被认为是微生物活性和生物沥浸效果好坏的重要评判指标,对污泥中重金属的溶出 (李超等, 2008) 和污泥的脱水性能 (宋兴伟和周立祥, 2008) 有非常好的指示作用, pH 下降速率越快表征生物沥浸进程越快,当 pH 达到 2 时,几乎所有的重金属均可溶出 (周立祥等, 2004a). 因此,从图 1 可以得出,从 pH 下降角度和工程应用角度分析,为了尽可能大的提高污泥的处理效率, S^0 和 Fe^{2+} 的添加量选择 2 g L^{-1} 为宜.

4.2 城市污泥生物沥浸过程中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 浓度的变化趋势

我们曾经证明,在生物沥浸体系中这些 Fe^{2+} 的氧化主要靠生物氧化作用而非化学氧化 (宋兴伟和周立祥, 2008). 由于 Fe^{2+} 的快速生物氧化产生 Fe^{3+} ,而 Fe^{3+} 是一种氧化剂,因此,可以推想,体系中 S^0 不但能被复合硫杆菌氧化成 SO_4^{2-} ,而且 Fe^{3+} 的存在能加速 S^0 的氧化. 事实上,我们也曾报道,对于只加 $2\text{ g L}^{-1}\text{ S}^0$ 的处理,生物沥浸后加入的 S^0 的氧化率不足 20%,而同时加入 $6\text{ g L}^{-1}\text{ Fe}^{2+}$ 的处理 S^0 的氧化率有显著提高 (Zhou *et al.*, 2008). 因此,在生物沥浸过程中 S^0 和 Fe^{2+} 配合使用,不但可加速生物沥浸进程,而且有利于 S^0 氧化率的提高,从而减少生物沥浸后污泥中可能残余 S^0 而导致污泥土地利用时的“后酸化”问题,或生物沥浸污泥在焚烧时因残余 S^0 而导致气中 SO_2 大量产生的问题. 另外,不同处理体系溶液中的总 Fe 均呈现出先降低后增加的变化趋势. 可能由于在沥浸过程中 $\text{Fe}(\text{III})$ 在微生物的作用下形成高铁沉淀或高铁矿物 (陈福星和周立祥, 2006; Liao *et al.*, 2008), 导致液相中总 Fe 含量的降低,而在生物沥浸后期, pH 逐渐降低,污泥体系酸度增加,污泥生物沥浸过程中沉降在固相中的 Fe 大量溶解进入液相,使得体系液相中的总 Fe 浓度又呈现出增加的趋势.

4.3 生物沥浸过程对城市污泥脱水性能的影响

一般地,污泥比阻越大,说明污泥脱水性越差. 一般认为比阻 $\gamma > 0.40 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ 时不易脱水; γ 在 $0.10 \times 10^{13} \sim 0.40 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ 时脱水性能中等; $\gamma < 0.10 \times 10^{13}\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ 时污泥为易脱水污泥 (王电站等, 2006). 当以 *A. thiooxidans* TS6

A. ferrooxidans LX5复合菌株为主体微生物,以 S^0 , Fe^{2+} 为能源物质,当 Fe^{2+} 的添加量增加到一定程度时,污泥的比阻值将有大幅度的降低,从而使得污泥的脱水性能有所改善,这与我们以前的研究报道结果相一致(宋兴伟和周立祥,2008)。

4.4 Fenton 试剂的添加对沥浸后污泥比阻值的影响

Fenton 试剂的添加可能由于其系统的强氧化性,使得系统中的有机物被氧化分解,从而导致有机物对水分子的吸附能力减弱,同时由于反应过程伴随有能量的大量释放。这一过程可能有助于污泥中细胞结合水的释放,进而改善城市污泥的脱水性能(Lu *et al.*, 2003)。图 5 表明,Fenton 试剂的添加可以使得沥浸后污泥的比阻进一步降低。但在生物沥浸污泥中 Fenton 试剂的加入量为多少最为适宜还需要进一步探究。

5 结论 (Conclusions)

1) 采用 *A. thiooxidans* TS6 和 *A. ferrooxidans* LX5 复合微生物菌群进行城市污泥生物沥浸,当 S^0 的添加量为 $2 g L^{-1}$, Fe^{2+} 的添加量大于 $1 g L^{-1}$ 时,采用 1:1 回流比,在 20~25d 均可以完成生物沥浸过程。

2) 生物沥浸中复合能源物质的加入对城市污泥脱水性能有重要的促进作用。在投加 $2 g L^{-1} S^0$ 的同时投加 $4\sim 6 g L^{-1}$ 的 Fe^{2+} ,处理后污泥的脱水性能提高 8~10 倍。污泥脱水性能即可用污泥比阻表征,也可用 CST 很好表示。

3) 对生物沥浸后污泥进行 Fenton 试剂化学强化处理,可进一步使污泥的脱水性能提高 50%。生物沥浸和 Fenton 试剂联合处理方式,可使污泥的脱水性能提高 18 倍。

责任作者简介:周立祥(1965—),教授,博士生导师。主要从事固体废物处理处置与资源化、环境微生物、环境化学等方面的研究。

参考文献 (References):

鲍士旦. 2000 土壤农化分析(第 3 版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 392—394, 225—227

Bao S D. 2000. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing China Agricultural Press 392—394; 225—227 (in Chinese)

陈福星, 周立祥. 2006. 生物催化合成的施氏矿物对废水中 Cr(VI) 的吸附 [J]. 中国环境科学, 26(1): 11—15

Chen F X, Zhou L X. 2006. Adsorption of Cr(VI) in wastewater by

catalytic biosynthesis Schwertmannite [J]. China Environ Sci 26 (1): 11—15 (in Chinese)

陈浩, 周立祥, 李超. 2007. 空气提升式反应器处理制革污泥的中试研究 [J]. 环境科学, 28(9): 2046—2051

Chen H, Zhou L X, Li C. 2007. Removal of Cr from tannery sludge by bioleaching in Air-lift Reactor a pilot study [J]. Environ Sci 28 (9): 2046—2051 (in Chinese)

李超, 周立祥, 王世梅. 2008. 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]. 环境科学学报, 28(6): 1155—1160

Li C, Zhou L X, Wang S M. 2008. Bioleaching of heavy metals from municipal sludge by the co-inoculation of two acidophilic Thiobacillus [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 28(6): 1155—1160 (in Chinese)

Lu M C, Lin C J, Liao C H, *et al.* 2003. Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. Advances in Environmental Research 7: 667—670

宋兴伟, 周立祥. 2008. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 28(10): 2012—2017

Song X W, Zhou L X. 2008. The influence of bioleaching on dewaterability of municipal sewage sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 28(10): 2012—2017

Tyagi R D. 1992. Microbial leaching of metals from municipal sludge. Effects of sludge solids concentration [J]. Process Biochemistry 27 (2): 89—96

王电站, 周立祥, 何峰. 2006. 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, 26(1): 67—71

Wang D Z, Zhou L X, He F. 2007. Studies on the enhancement of dehydration property of tannery sludge by bioleaching technique [J]. China Environ Sci 26(1): 67—71 (in Chinese)

郑冠宇, 王世梅, 周立祥. 2007. 污泥生物沥浸处理对病原物的杀灭效果影响 [J]. 环境科学, 28(7): 1539—1542

Zheng G Y, Wang S M, Zhou L X. 2007. Elimination of Pathogens in Municipal Sludge and Tannery Sludge by Bioleaching Approach [J]. Environ Sci 28(7): 1539—1542 (in Chinese)

周立祥. 2007. 固体废弃物处理处置与资源化 [M]. 北京: 中国农业出版社, 120—178

Zhou L X. 2007. Treatment disposal and reutilization of solid waste [M]. Beijing China Agriculture Press 120—178 (in Chinese)

周立祥, 方迪, 周顺桂, 等. 2004a. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究 [J]. 环境科学, 25(1): 62—66

Zhou L X, Fang D, Zhou S G, *et al.* 2004a. Removal of Cr from tannery sludge by Acidophilic Thiobacilli [J]. Environ Sci 25(1): 62—66 (in Chinese)

周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 2004b. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用 [J]. 环境科学学报, 24(6): 1014—1020

Zhou L X, Zhou S G, Wang S M, *et al.* 2004b. Cr removal and improving the settling and dehydrating capability from tannery sludge simultaneously through bioleaching approach [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 24(6): 1014—1020 (in Chinese)

Zhou S G, Zhou L X, Fang D. 2008. Enhancing metal removal by coaddition of Fe^{2+} and S^0 as substrates of acidithiobacillus ferrooxidans for sewage sludge bioleaching [J]. Practice Periodical of Hazardous Toxic and Radioactive Waste Management 12(3): 159—164