

生物淋滤-PAC与PAM联合调理城市污泥

刘昌庚^{1,2}, 张盼月^{3*}, 曾光明^{1,2}, 刘勇刚^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082; 3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:采用生物淋滤-聚合氯化铝(PAC)与聚丙烯酰胺(PAM)联合使用工艺对城市污泥进行了调理研究. 结果表明,在固定单质硫投量为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,投加亚铁离子能明显加快污泥生物淋滤速率; $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,污泥pH降至2约需1.5 d.生物淋滤显著改善了污泥的脱水性能,生物淋滤后使污泥比阻从 $6.45\times 10^{10}\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 降到 $1.45\times 10^{10}\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$,降低了77.52%,但污泥仍属于难脱水污泥.回调淋滤污泥pH至6,投加PAC及PAM对淋滤污泥进行强化调理.结果表明,单独使用PAC与PAM的最佳投量分别为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;联合使用PAC与PAM时,PAC与PAM的最佳投量分别为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥比阻和滤饼含水率分别为 $2.02\times 10^8\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 和74.81%,污泥属于易脱水污泥.与单独使用PAC与PAM相比,PAC与PAM联合使用调理污泥费用低、处理效果好.

关键词:城市污泥;生物淋滤;PAC;PAM;脱水性能

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)09-2124-05

Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching-Dual PAC and PAM Addition

LIU Chang-geng^{1,2}, ZHANG Pan-yue³, ZENG Guang-ming^{1,2}, LIU Yong-gang^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Bioleaching-dual polyaluminum chloride (PAC) and polyacrylamide (PAM) addition was used to condition sewage sludge. The results showed that $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ addition improved the bioleaching rate obviously with a fixed sulfur power dosage of $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; when the $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dosage was $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, the bioleaching lasted 1.5 d to decrease the sludge pH below 2. Bioleaching improved the sludge dewaterability significantly with a specific resistance to filtration (SRF) reduction of 77.52% from $6.45\times 10^{10}\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$ to $1.45\times 10^{10}\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$, but the bioleached sludge was still difficult to be dewatered. After adjusting the bioleached sludge pH to 6, PAC and PAM were used to enhance conditioning of the bioleached sludge. The results indicated that the optimal dosage was $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for PAC or $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for PAM when single chemical was used. When PAC and PAM were dually used, the optimal dosages of PAC and PAM were $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; SRF and moisture of sludge cake reduced to $2.02\times 10^8\text{ s}^2\cdot\text{g}^{-1}$ and 74.81%, respectively, showing good dewaterability of the treated sludge. Compared with the single use of PAC and PAM, the dual use of PAC and PAM showed the advantages of lower cost and better conditioning effect.

Key words: sewage sludge; bioleaching; polyaluminum chloride (PAC); polyacrylamide (PAM); dewaterability

活性污泥法广泛应用于城市污水处理厂,其运行过程产生大量的剩余污泥^[1],而剩余污泥处理费用昂贵,大约占整过污水处理费用的35%~50%^[2],给污水处理厂正常运行带来巨大的压力.剩余污泥含水率高,体积庞大,必须经脱水处理减少其体积.调理方法主要包括投加化学试剂调理^[3~5]、Fenton试剂预处理^[6,7]、超声波处理^[8,9]等.传统的加酸调理污泥能够改善污泥的脱水性能^[3,10],但由于投加无机酸(如硫酸)使得其处理费用相对昂贵.生物淋滤利用嗜酸性硫杆菌(主要是氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌)将还原性硫氧化成硫酸,降低污泥的pH值,不仅能够去除重金属,降解有机物,杀灭病原体,除臭,改善污泥脱水性能,而且具有成

本低的特点^[11~14].本研究采用从剩余污泥中驯化培养生物淋滤接种物,在单质硫投量为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,确定 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 最佳投量以加快生物淋滤速率.研究发现,单独使用生物淋滤调理难脱水污泥不能使其达到易过滤脱水程度.因此将生物淋滤与投加聚合硫酸铝(PAC)及阳离子聚丙烯酰胺(PAM)联合,对污泥进行脱水调理.

收稿日期:2009-11-01;修订日期:2010-01-11

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX 07212-001-02);北京林业大学青年科技启动基金项目(BLX2108022)

作者简介:刘昌庚(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为污泥处理与资源化及水污染控制, E-mail: changwyx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zgm500@163.com

1 材料与方法

1.1 供试污泥和接种物制备

供试污泥:取自长沙市国帛污水处理厂的污泥浓缩池,其基本性质如表 1.

表 1 供试污泥的基本性质

Table 1 Characteristics of the excess sludge sample					
pH	含水率 /%	TS /mg·L ⁻¹	VS /mg·L ⁻¹	污泥比阻 /s ² ·g ⁻¹	滤饼含 水率 ¹⁾ /%
6.83	98.45	15 461	10 248	6.45 × 10 ¹⁰	93.83

1) 经布氏漏斗法测定污泥比阻后,截留在滤纸上的污泥滤饼的含水率

接种物制备:将 100 mL 实验污泥装入 250 mL 的锥形瓶中,并投加 10 g·L⁻¹ 单质硫及 15 g·L⁻¹ FeSO₄·7H₂O 作为淋滤细菌(主要是氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌)的能源物质,置于水浴恒温振荡器中振荡培养,控制温度 28℃,转速 180 r/min. 待污泥体系 pH < 2 时,吸取此淋滤污泥 10 mL 加入 90 mL 实验污泥中,并投加与上步等量的单质硫和 FeSO₄·7H₂O,在相同条件下继续富集培养. 待此污泥体系 pH 低于 2 时,重复上步操作. 经过 3 次培养后,淋滤细菌的活性到达要求,所得驯化污泥即为接种物^[15].

1.2 实验材料

化学试剂均为分析纯. PAC 溶液浓度为 5% (质量分数,以 Al 计),PAM 溶液浓度为 0.1% (质量分数);调节 pH 所用碱为 30% (质量分数) 氢氧化钠溶液.

1.3 实验方法

1.3.1 生物淋滤实验

分别在一系列 250 mL 锥形瓶中加入 135mL 供试污泥,接种物按污泥量的 10% 加入,固定单质硫投量为 3 g·L⁻¹,设置不同 FeSO₄·7H₂O 投量,研究其投量对生物淋滤速率的影响. 将锥形瓶置于 28℃ 水浴恒温振荡器中振荡培养,控制转速为 180 r/min,测定体系 pH 变化及生物淋滤后污泥性质. 整个过程采用称重补加蒸馏水弥补蒸发的水分.

1.3.2 PAC 和 PAM 强化调理实验

污泥经过生物淋滤处理后,采用 30% 氢氧化钠回调污泥 pH 至 6 后,然后向污泥中分别加入 5% 的 PAC 溶液或 0.1% 的 PAM 溶液,并搅拌使污泥均匀. 联合投加 PAC 和 PAM 时,先投加 PAC,搅拌均匀后再投加 PAM,并继续搅拌,使污泥均匀.

1.4 分析方法

污泥脱水性能用污泥比阻 α 来反映,其测定采用布氏漏斗法,取 100 mL 污泥样于布氏漏斗中,使用中速定量滤纸,依靠重力过滤约 1min^[16],然后进行定压抽滤,记录不同时间 (t) 的滤液体积 (V),至滤饼抽破或过滤时间超过 20 min 后停止抽滤^[17]. 污泥比阻的计算公式为:

$$\alpha = 2bA^2p/\mu C$$

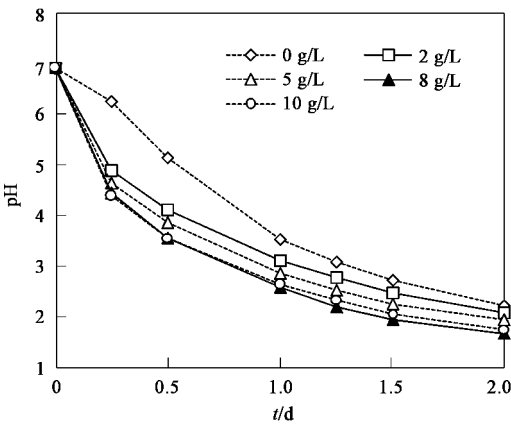
式中, α 为污泥比阻, s²·g⁻¹; b 为以 t/V 与 V 作图所得的斜率, s·cm⁻⁶; p 为真空压力, g·cm⁻²; A 为过滤面积, cm²; μ 为滤液黏度, g·(cm·s)⁻¹; C 为单位体积滤液的固体量, g·cm⁻³. 抽滤完成后,滤饼含水率采用重量法测定. 污泥总固体 (TS) 和挥发性固体 (VS) 采用重量法测定.

2 结果与讨论

2.1 FeSO₄·7H₂O 投量对污泥生物淋滤的影响

生物淋滤主要依靠氧化硫硫杆菌氧化还原性硫生成硫酸^[18] 以及氧化亚铁硫杆菌的间接代谢^[19,20] 作用生成硫酸使污泥体系的 pH 降低,达到调理污泥的目的,前者占主要作用,后者占次要作用. 生物淋滤过程中硫粉利用率较低^[21],为减少运行成本及防止后酸化效应^[22],本实验单质硫投量固定为 3 g·L⁻¹,低于通常采用量 5 ~ 10 g·L⁻¹^[23~25]. 在此基础上,研究亚铁投量对生物淋滤速率的影响.

由图 1 可知,投加 FeSO₄·7H₂O 可以明显加快污泥生物淋滤过程. 当 FeSO₄·7H₂O 投量低于 8 g·L⁻¹ 时,淋滤速率随 FeSO₄·7H₂O 投量增加而加快. 增加 FeSO₄·7H₂O 投量有利于生物淋滤的启动点提前,这是由于污泥中至少存在 2 类嗜酸程度不同的硫杆菌,投加适量的亚铁,当其水解产生 H⁺



单质硫投量:3 g·L⁻¹; 培养温度:28℃

图 1 FeSO₄·7H₂O 投量对生物淋滤速率的影响

Fig. 1 Effects of FeSO₄·7H₂O dosage on bioleaching rate

后,弱嗜酸性硫杆菌会先增殖,使污泥体系 pH 快速降到一定程度,强嗜酸性硫杆菌会逐渐繁殖,从而使得污泥体系 pH 快速下降^[26]. 当其投量超过 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,淋滤速率基本维持不变,甚至有下降趋势. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量为 12 、 15 、 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 pH 变化曲线和投加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的曲线基本重合. 间接代谢产酸的前提是将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+} \vee$ 硫化物氧化为单质硫,单质硫进而被氧化成硫酸^[19,26];而氧化亚铁硫杆菌将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 的过程是一个耗酸过程,随着亚铁投量的增加, Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} 的量相应增加,使得氧化过程中消耗的 H^+ 量增大.

pH 降低可以直接反映污泥生物淋滤过程的进行. 从 pH 降低的角度看,污泥生物淋滤的最佳 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量为 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;在该投量下,污泥体系 pH 降至 2,只需要 1.5 d 左右. 处理后污泥性质如表 2,经过生物淋滤处理后,污泥的 VS 降低 16.5%,污泥的稳定性得到较大提高;同时污泥的脱水性能得到明显改善,污泥比阻降低了 77.5%. 这是由于生物淋滤处理时,发生了污泥胞外聚合物的水解、微生物细胞的破解,污泥水分分布发生变化,使一部分间隙水被释放变成自由水,从而导致污泥脱水能力改善^[7]. 一般认为污泥比阻 $> 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为难脱水污泥,污泥比阻介于 $0.4 \times 10^9 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 之间属于中等难脱水,污泥比阻 $< 0.4 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 属于易过滤脱水污泥^[14,17],经过生物淋滤处理后的污泥仍属于难脱水污泥.

表 2 淋滤处理污泥的基本性质

pH	TS $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	VS $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	污泥比阻 $/\text{s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	滤饼含水率/%
1.95	14 301	8 557	1.45×10^{10}	86.74

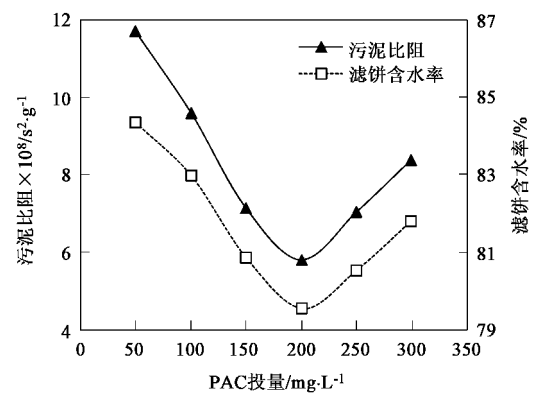
2.2 PAC 及 PAM 联合使用强化调理淋滤污泥的效果

污泥经过生物淋滤处理后,尽管其脱水性能得到了显著改善,但仍属于难脱水污泥. 因此,利用 30% 氢氧化钠回调污泥 pH 至 6 后,投加 PAC 及 PAM 改善淋滤污泥的脱水性能.

2.2.1 单独投加 PAC

投加 PAC 对淋滤污泥脱水性能的影响见图 2. 随着 PAC 投量的增加,污泥脱水性能提高;但当 PAC 投量超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,污泥的比阻和滤饼含水率均有明显的回升趋势. 因此,最佳 PAC 投量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时污泥比阻和滤饼含水率均达到最小值,分别为 $5.81 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 79.54%. PAC 在

水中形成各种形态的水合络合物,通过压缩双电层、电荷中和、羟基间桥—作用可以吸附带负电荷的胶体粒子,使胶体粒子脱稳^[4],从而改善污泥的脱水性能. 当 PAC 投量较少时,由于不能很好地使胶体脱稳,不足以将胶粒架桥连接起来,导致形成的絮体不够多、粒径不够大,不能起到很好的吸附卷扫作用,絮凝效果不够理想;但投加量偏高时,有可能会使胶粒的表面被无机 PAC 高分子覆盖,两胶粒接近时,受到 PAC 高分子之间的相互排斥而不能聚集,产生“胶体保护”作用,使絮凝效果下降,甚至重新稳定^[28]. 因此,过多或过少的 PAC 投量均不利于污泥脱水性能的改善. 经过 PAC 调理,虽然污泥的脱水性能得到极大改善,但仍属于中等难脱水污泥.



温度: 28°C ; 污泥 pH: 6.00 ± 0.05

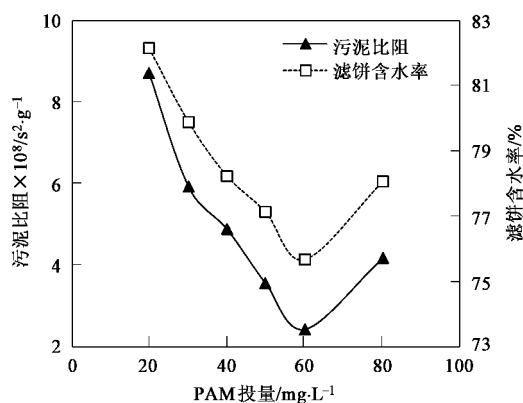
图 2 PAC 投量对淋滤污泥脱水性能的影响

Fig. 2 Effects of PAC dosage on dewaterability of the bioleached sludge

2.2.2 单独投加 PAM

投加 PAM 对淋滤污泥脱水性能的影响见图 3. 污泥比阻和滤饼含水率的变化趋势和投加 PAC 情况类似,最小污泥比阻和滤饼含水率均出现在 PAM 投量为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别为 $2.41 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 75.66%. 本研究采用的 PAM 为阳离子型高分子聚合物,吸附在颗粒表面上的高分子长链可能同时吸附在另一个或多个颗粒表面,通过架桥方式将 2 个或更多的微粒连在一起,从而导致微粒絮凝^[5],改善污泥脱水性能. 此外,阳离子型的 PAM 在吸附架桥作用的同时,还可对带负电荷的污泥胶体颗粒产生电中和作用,获得更好的絮凝效果. 但当其投加过量时,溶液中高浓度的高分子也能使颗粒表面完全被所吸附的高分子覆盖,架桥作用大大减弱,而且过量的阳离子会使污泥颗粒带上正电荷,重新相互排斥,絮凝效果快速下降^[29],污泥脱水性能变差. 尽管

在 PAM 投量为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时污泥脱水性能最佳,但在 PAM 投量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥比阻为 $3.55 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,已属于易过滤脱水污泥.考虑到经济因素,选择 PAM 最佳投量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.



温度: 28°C ; 污泥 pH: 6.00 ± 0.05

图3 PAM 投量对淋滤污泥脱水性能的影响

Fig.3 Effects of PAM dosage on dewaterability of the bioleached sludge

2.2.3 联合投加 PAC 与 PAM

在 PAC 及 PAM 单独使用的基础上,分别采用 PAC 及 PAM 最佳投量的 1/4、1/2 及 3/4,联合投加 PAC 与 PAM 强化调理淋滤污泥,结果见表 3. 联合投加 PAC 及 PAM 时,淋滤污泥的脱水性能得到明显改善,除 PAM 投量为 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 3 组实验的污泥比阻在中等难脱水的范围内,其它联合投加 PAC 及 PAM 处理后,污泥比阻值均在易脱水的污泥比阻范围内. 在 PAC 及 PAM 投加量分别为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,调理后污泥比阻及滤饼含水率达到最小,分别为 $2.02 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 74.81%. 由联合使用 PAC 及 PAM 实验可知,PAM 对污泥脱水效果的影响更大.联合使用 PAC 及 PAM 调理,不仅污泥的调理效果比单独使用 PAC 或 PAM 要佳,而且调理剂的用量大大减少.

单独使用 PAM 和联合使用 PAC 及 PAM 强化调理污泥均能使污泥达到易脱水程度.单独使用 PAM 的最佳投量(以干泥计,下同)为 3.2 kg/t ;联合使用 PAC 和 PAM 时,它们的最佳投量分别为 6.5 kg/t 和 1.6 kg/t . 本实验所用 PAC 及 PAM 市场价格分别约为 1 000 元/t 和 12 000 元/t. 单独使用 PAM 调理药剂费(以干泥计,下同)为 38.4 元/t,联合使用 PAC 及 PAM 调理药剂费为 25.7 元/t. 综合考虑污泥脱水性能和经济效益,联合使用 PAC 及 PAM 调理污泥的效果比单独使用 PAM 更加显著.

表3 PAC 与 PAM 联合使用对淋滤污泥脱水性能的影响

Table 3 Effects of dual PAC and PAM addition on dewaterability

编号	PAC 投量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	PAM 投量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	污泥比阻 / $\text{s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	滤饼含水率/%
A ₁	150	37.5	2.25×10^8	75.31
A ₂	150	25.0	3.50×10^8	77.10
A ₃	150	12.5	4.09×10^8	77.90
B ₁	100	37.5	3.11×10^8	76.12
B ₂	100	25.0	2.02×10^8	74.81
B ₃	100	12.5	4.82×10^8	78.08
C ₁	50	37.5	2.31×10^8	75.26
C ₂	50	25.0	3.22×10^8	76.52
C ₃	50	12.5	4.95×10^8	78.34

3 结论

(1) 投加硫酸亚铁能明显加快污泥生物淋滤速率,在单质硫投量为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,最佳 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投量为 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,该条件下污泥 pH 降至 2 约需 1.5 d. 生物淋滤显著改善了污泥的脱水性能,污泥比阻从处理前的 $6.45 \times 10^{10} \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $1.45 \times 10^{10} \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,降低了 77.52%,但污泥仍属难脱水污泥.

(2) PAC 与 PAM 单独使用强化调理污泥的最佳投量分别为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 联合使用时,PAC 与 PAM 的最佳投量分别为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时污泥易过滤脱水,污泥比阻和滤饼含水率分别为 $2.02 \times 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 74.81%,且调理药剂费用低、调理效果好.

参考文献:

- [1] Bruus J H, Nielsen P H, Keiding K. On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [J]. Water Res, 1992, 26: 1597-1604.
- [2] Dewil R, Baeyens J, Neyens E. Fenton peroxidation improves the drying performance of waste activated sludge [J]. J Hazard Mater, 2005, B117: 161-170.
- [3] Chen Y G, Yang H Z, Gu G W. Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling [J]. Water Res, 2001, 35(11): 2615-2620.
- [4] 金建华, 苗兆静. 污泥脱水中 PAC 与 PAM 联合使用的试验研究 [J]. 江苏环境科技, 2006, 19(2): 4-6.
- [5] 邓慧萍, 梁超, 许建华. PAM 在给水厂排泥水处理中的调质作用及机制探讨 [J]. 给排水, 2004, 30(6): 31-33.
- [6] Lu M C, Lin C J, Liao C H, et al. Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. Adv Environ Res, 2003, 7(3): 667-670.
- [7] Nurdan B. Biological sludge conditioning by Fenton's reagent [J]. Process Biochem, 2004, 39(11): 1503-1506.
- [8] Feng X, Deng J C, Lei H Y, et al. Dewaterability of waste

- activated sludge with ultrasound conditioning [J]. *Bioresour Technol*, 2009, **100**: 1074-1081.
- [9] Na S, Kim Y U, Khim J. Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment[J]. *Ultrason Sonochem*, 2007, **14**: 281-285.
- [10] 何文远,杨海真,顾国维. 酸处理对活性污泥脱水性能的影响及其作用机[J]. *环境污染与防治*, 2006, **28**(9): 680-682, 708.
- [11] Benmoussa H, Tyagi R D, Campbell P G C. Simultaneous sewage sludge digestion and metal leaching using an internal loop reactor[J]. *Water Res*, 1997, **31**(10): 2638-2654.
- [12] Couillard D, Chartier M, Mercier G. Bacterial leaching of heavy metals from aerobic sludge[J]. *Bioresour Technol*, 1991, **36**: 293-302.
- [13] Mekkassi Y F, Tyagi R D, Narasiah K S. Simultaneous sewage sludge digestion and metal leaching: effect of aeration [J]. *Process Biochem*, 2000, **36**: 263-273.
- [14] 宋兴伟,周立祥. 生物沥浸处理城市污泥脱水性能的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2012-2017.
- [15] Zhang P Y, Zhang G M, Zeng G M, *et al.* Influence of Fe(II) addition on heavy metal bioleaching from sewage sludge with mixed inocula[J]. *Int J Biotechnol*, 2008, **10**(1): 16-25.
- [16] 陈花果,伍素兰. 提高石油化工污泥脱水性能试验研究[J]. *西安地质学院学报*, 1996, **18**(3): 100-105.
- [17] 陈泽堂. 水污染控制工程实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 97-101.
- [18] Blais J F, Tyagi R D, Auclair J C. Bioleaching of metal from sewage sludge: microorganisms and growth kinetics[J]. *Water Res*, 1993, **27**: 101-110.
- [19] Bosecker K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms [J]. *FEMS Microbiol Rev*, 1997, **20**: 591-604.
- [20] Tyagi R D, Tran F T. Bacterial leaching of metal from digested sewage sludge by indigenous iron-oxidizing [J]. *Environl Pollut*, 1993, **82**: 9-12.
- [21] Ravishankar B R, Blais J F, Benmoussa H, *et al.* Bioleaching of metals from sewage sludge: elemental sulfur recovery [J]. *J Environ Eng*, 1994, **120**: 462-470.
- [22] Chen S Y, Chiu Y C, Chang P L, *et al.* Assessment of recoverable forms of sulfur particles used in bioleaching of contaminated sediments[J]. *Water Res*, 2003, **37**: 450-458.
- [23] Lombardi A T, Garcia O. An evaluation into potential of biological processing for the removal of heavy metals from sewage sludge[J]. *Crit Rev Microbiol*, 1999, **25**(4): 275-288.
- [24] Couillard D, Mercier G. An economic evaluation of biological removal of heavy metals from wastewater sludge [J]. *Water Environ Res*, 1994, **66**: 32-39.
- [25] Villar L D, Garcia O Jr. Solubilization profiles of metal ions from bioleaching of sewage sludge as a function of pH[J]. *Biotechnol Lett*, 2002, **24**: 611-614.
- [26] Jain D K, Tyagi R D. Bacterial leaching of heavy metal from anaerobic sewage sludge by sulfur-oxidizing bacteria[J]. *Enzyme Microb Tech*, 1992, **14**: 376-383.
- [27] 周顺桂,周立祥,黄焕忠. 生物淋滤技术在去除污泥中重金属的应用[J]. *生态学报*, 2002, **22**(1): 125-133.
- [28] 常青. 水处理絮凝学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 69-77.
- [29] 高健磊,闫怡新,吴建平,等. 城市污水处理厂污泥脱水性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 108-111.