

空气提升式反应器处理制革污泥的中试研究

陈浩, 周立祥*, 李超

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 设计了 1 个 280 L 空气提升式生物沥浸反应器, 利用特异嗜酸性硫杆菌为主的微生物复合菌群对制革污泥进行了较长期的(连续运行 43 批次)生物沥浸脱铬试验. 研究了 1.0~3.0 m³/h 不同通气量对生物沥浸法脱铬效率的影响. 结果表明, 不同处理条件下污泥均能快速充分混匀, 通气量不足 1.5 m³/h 时经过至少 90 h 才可获得 80% 以上的 Cr 溶出率. 综合多因素考虑, 本试验规模下通气量为 2.0 m³/h 较为合适, 72 h Cr 溶出率可达 92.5%. 研究还发现, 在通气量为 2.0 m³/h 或以上时, 体系溶氧值随 pH 值的下降而明显上升, 最终 DO 可达到 5 mg/L 以上. 因此, 在工程化运行中可在每个沥浸周期的后期调低 ALR 反应器的供气量, 控制 DO 值在 2.0 mg/L 左右满足 LX5 和 TS6 菌的生长需求即可, 以此控制运行成本.

关键词: 制革污泥; 生物沥浸; 空气提升式反应器; 中试

中图分类号: X794 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-2046-06

Removal of Cr from Tannery Sludge by Bioleaching in Air-lift Reactor: A Pilot Study

CHEN Hao, ZHOU Li-xiang, LI Chao

(College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A bioleaching process performed in 280 L air-lift reactor was developed for extracting Cr from tannery sludge. Cr removal efficiency under different aeration amount with a range from 1.0 m³/h to 3.0 m³/h was investigated. The results showed that the sludge could be homogeneous quickly for different aeration treatment even if aeration amount was as low as 1.0 m³/h. But the obvious effect of aeration amount on pH decrease and subsequent Cr dissolution in tannery sludge during bioleaching was observed. If the aeration amount was below 1.5 m³/h, it at least took 90 h to reach 80% Cr removal efficiency. In the light of Cr removal efficiency and energy consume, the aeration amount of 2.0 m³/h was considered as an optimum one for bioleaching in this trial. Cr removal efficiency could reach above 92.5% at 72 h. In the sludge bioleaching system dissolved oxygen increased obviously with the decrease of pH. Eventually, dissolved oxygen rised to 5 mg/L or more when aeration amount was maintained at 2.0 m³/h or more. Therefore, it was suggested that the aeration amount in ALR could be adjusted to a lower level in the late stage of tannery sludge bioleaching in order to save operation cost.

Key words: tannery sludge; bioleaching; air-lift reactor; pilot

制革废水处理过程中产生的制革污泥含有高量的重金属铬(1.0%~4.0%)和病原菌,属于危险类废弃物^[1].近年来,本实验室尝试采用污泥生物沥浸方法(bioleaching,以前称之为生物淋滤或生物沥滤)对制革污泥无害化处理,获得较大成功^[2].生物沥浸方法是通过接种以特异性硫杆菌为主体的配合有耐酸性异养菌的复合菌群,在有氧条件下利用其生物氧化和生物酸化作用降低体系 pH 值,而浸出污泥中重金属并杀灭病原物和消除恶臭的一项新技术^[3,4].利用本实验室分离的 2 株嗜酸性硫杆菌菌株(*A. ferrooxidans* LX5 和 *Acidithiobacillus thiooxidans* TS6),在实验室条件下采用摇瓶法生物沥浸处理制革污泥,最终铬的溶出率可达 95% 以上^[5];在 70 L 连续搅拌式反应釜(CSTR)中进行放大试验,接种后经过 6 d 的处理其铬溶出率可达 87.4%^[6].但 CSTR 反应器因既要通气提供溶解氧(DO),又需要采用搅拌机连续搅拌,因此动力耗能较高^[7].空气提升式反

应器(ALR)作为一种低能耗,高效率反应设备被广泛运用于制药、化工等行业的废水处理^[8,9].Shi 等曾利用 ALR 反应器对铁闪锌矿浮选浓缩物进行 10 L 规模的生物沥浸试验,10 d 后获得了 80% 的 Zn 去除率^[10].ALR 反应器的重要特点是采用空气作为搅拌动力又兼有为介质提供氧气的作用,从而减少动力耗能.但将 ALR 反应器应用于污泥生物沥浸处理却鲜有报道^[11].此外,从工程化应用角度考虑,研究用反应器规模越大所得的各项参数越具有实际意义.为此,本研究构建了 1 个以 280 L 的 ALR 反应器为主体的生物沥浸处理系统,并进行了近半年的连续运行中试,以期污泥生物沥浸处理技术走向产

收稿日期:2006-10-24;修订日期:2006-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(20377023);教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-04-0505)

作者简介:陈浩(1981~),男,硕士,主要研究方向为固体废弃物生物脱毒.

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

业化提供技术上的保障。

1 ALR 反应器的设计

污泥生物沥浸反应时的温度、溶解氧对嗜酸性化能自养菌的活性影响极为显著^[12],工程放大中运用本工艺处理制革污泥时,为了确保所接种的嗜酸微生物发挥作用,要求反应器能够保证:①污泥与所接种的菌株充分接触;②污泥介质的温度处于 25 ~ 37℃,最低不能低于 10℃^[13];③维持一定水平的溶解氧水平供微生物新陈代谢;④总体能耗较低。据此,设计采用内循环的 ALR 反应器以满足上述要求。从 ALR 底部通入压缩空气,借助气泡的浮升力提升搅拌污泥和充氧,省去了机械搅拌混匀污泥这一耗能步骤。采用循环热水管的间接加热法对 ALR 反应器内部污泥进行加热,反应器内部安装控温仪确保泥温稳定在硫杆菌的最适生长温度(29 ± 1)℃。本试验所用 ALR 反应器主要结构见图 1。

ALR 反应器由圆柱形筒体、曝气系统和加热系统 3 大部分组成。

圆柱形筒体由普通钢内衬 PVC 材料构成,高度 245 cm,有效容积 280 L。中部为污泥升流区,靠近管壁区域为降流区。

防堵塞曝气系统则由空压机(W-0.9/0.8 型)、稳压阀、滤气器、转子可调气量计和曝气器组成。由于污泥含固率往往在 3% 以上,曝气头采用了特殊的止逆设计,当曝气停止时,可有效防止污泥反渗堵塞曝气头。

循环水加热系统主要考虑在秋冬季时环境温度较低需要对污泥加热。循环水在水箱中加热后采用增压泵输送到设在反应器内部的循环加热管。污泥

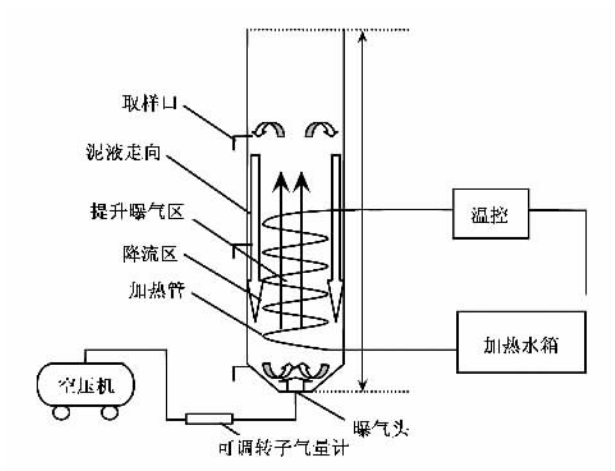


图 1 ALR 反应器结构示意图
Fig.1 Configuration sketch map of ALR reactor

升温所需热量和升到指定温度的时间由反应器的有效体积 V 、循环水的进口温度 $t_{进}$ 、环境温度和循环水的流速确定^[14]。最终选择输送循环热水增压泵的型号为:15GW-14,最大流量 1.2 m³/h,加热水箱尺寸为长 × 宽 × 高 = 42 cm × 42 cm × 63 cm,泥温采用温控器自动控制循环水温度和自动开关循环水来控制

和调节。在 ALR 反应器的上、中、下部各设置 1 个放泥阀,作为取样口。每处理完 1 批污泥,就从下部放泥阀放出污泥。

2 材料与方法

2.1 供试材料

采自浙江某制革企业污水处理厂污泥浓缩池。该厂采用氧化沟法二级处理工艺处理制革污水,日处理污水 3 000 m³。污泥基本特性见表 1。

表 1 供试污泥基本理化性质(以干物质计)

Table 1 Primary physicochemical properties of the selected tannery sludge(dry basis)								
pH	全 P/%	全 K/%	全 N/%	有机质/%	Zn/mg·kg ⁻¹	Fe/%	Cr /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹
8.05	0.50	0.32	1.55	55.1	211.0	7.4	12 144.3	310.6

2.2 生物沥浸处理方法

2.2.1 菌株的驯化与反应器的启动

按文献[3]的方法制备含嗜酸性硫杆菌 LX5、TS6 和耐酸性异养菌 R30 及 B65 等的酸化污泥(pH 2.0 左右)作为接种物,将约 30 L 酸化污泥接种到含有 250 L 预酸化原始污泥(pH 6.0)的反应器中,按 0.4% 的比例添加能源物质。控制体系温度 30℃,调节供气量至 3.0 m³/h 进行生物沥浸处理。待体系 pH 降至 2 后结束通气。然后排出一半酸化污泥,再补充

待处理原始污泥,继续通气处理,直至 pH 降低到 2,再如此处理 1 次。此时介质中嗜酸性硫杆菌密度经镜检达到 10⁷ ~ 10⁸ 个/mL,驯化和启动阶段完成,转入正式试验。正式试验共连续处理 43 批次,采用留存部分处理后污泥于反应器中作为接种物,再加入新污泥的方法进行。在不同批次,研究通气量等对生物沥浸的影响。

2.2.2 ALR 反应器流化效果摸索

通过可调转子气量计调节空气压缩机供气量,设

计了 5 个比较合理的通气量.分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 m³/h 的不同处理,在 5 种不同通气量条件下经过 1 h 和 24 h 反应后,分别从反应器上部、中部、下部 3 个采样口取样测定污泥 pH 值和污泥浓度,考察污泥在 ALR 反应器中不同部位的混匀情况.

2.2.3 通气量对生物沥浸的影响试验

在上述 5 个通气量条件下每个处理 2 次重复.采用 pH 计(pH2-TC)每隔 6 h 测定 ALR 反应器内污泥 pH,观察在本反应器中不同通气量的处理条件下污泥 pH 下降情况.并用溶氧仪(JPB-607)选择性测定体系溶氧值.每隔 12 h 采生物沥浸污泥 200 mL 于 12 000 r/min 下离心 15 min,清液过 0.45 μm 微孔滤膜进行固液分离.采用等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定滤液中铬,据试验前后污泥上清中铬含量的差值计算溶出率.生物沥浸过程中污泥液所含 Cr 基本为三价铬,沥浸前后几乎测不出氧化态的六价铬^[3].

2.2.4 反应器的能耗测定

5 个不同通气量条件下,分别记录空压机的工作和间歇时间之比,记录 3 次.W-0.9/0.8 型空压机的工作功率为 7.5 kW,乘以工作时间所占比例即是供气功率 $P_{\text{均}}$.记录各个处理条件下完成污泥处理(pH<2)所需总时间 t . $W_{\text{均}}$ 与 t 的积即是完成 1 次生物沥浸的总能耗 E .结合时间 t 与总能耗 E ,确定

在本实验条件下的最合适通气量.

2.2.5 连续批次运行中 DO、pH 等的变化研究

确定最适通气量后,连续在该气量条件下处理 43 批次,从中随机选择处理时间和污泥浓度基本相同的第 23 批,第 24 批和第 25 批 3 个批次,每隔 6 h 测定污泥体系 DO 值,同时记录 pH.在运行初始和结束时分别采泥样,离心过滤后测定上清液中 Fe²⁺ 的含量,考察 Fe 在生物沥浸中的价态变化.由于正常按 1/2 回流比回流后反应器内初始 pH 为 6.0 左右,3 次回流之后第 26 批减少回流比形成了 1 个初始 pH 为 6.7 左右的对照处理,考察在不同初始 pH 条件下 DO 值的变化情况.

3 结果与讨论

3.1 ALR 反应器污泥流化混合效果

当曝气量仅为 1.0 m³/h 时,反应 1 h 后反应器上、中、下各部位污泥 pH 均在 6 左右、污泥浓度均在 42.7 g/L 左右,各部位没有统计意义上的差别(见表 2).经过 24 h 后反应器上、中、下部位的 pH 都下降了约 1.7,各部位污泥浓度更趋于一致.说明在气量仅为 1.0 m³/h 时污泥就能很快充分混匀,生物沥浸反应在反应器中各部位均速进行,因此,在更大的通气量条件下污泥能很快混匀.

表 2 曝气量 1.0 m³/h 时污泥流化后混合效果测定

Table 2 Mix-up degree of the sludge in ALR facilitated by compressed air of 1.0 m ³ /h						
反应时间/h		pH			污泥质量浓度/(g·L ⁻¹)	
1	6.04(上)	6.00(中)	5.99(下)	42.2(上)	42.3(中)	43.5(下)
24	4.67(上)	4.65(中)	4.71(下)	42.9(上)	42.9(中)	43.4(下)

3.2 不同通气量条件下 pH 值变化和 Cr 的去除情况

随着通气量的增加,不同批次污泥 pH 值下降速度变快(见图 2).通气量越大泥液紊流程度越大、液体粘度越小均有利于氧气转移.氧气的供应量越充足,微生物菌群的活性越强,导致 pH 下降速度的加快.从图 2 中可以看出,加污泥反应后 6 h,只有气量为 3.0 m³/h 曝气量的处理 pH 下降较快,由 pH 6 左右降到 pH 5.3,其余处理 pH 下降缓慢.反应到 42 h 时,2.0、2.5 和 3.0 m³/h 的处理 pH 值都降到了 3 以下,分别为 2.67、2.47 和 2.04.在 60 h 时 pH 分别降到了 1.99、1.98 和 1.89,此时 1.5 m³/h 和 1.0 m³/h 的处理 pH 为 2.43 和 3.73.曝气量为 1.5 m³/h 的处理在沥浸时间达到 54 h 时开始迅速下降,并在第 90 h 时达到了 pH<2 的水平.而气量为 1.0 m³/h 的处理

由于供氧明显不足,污泥 pH 下降很缓慢,反应 96 h

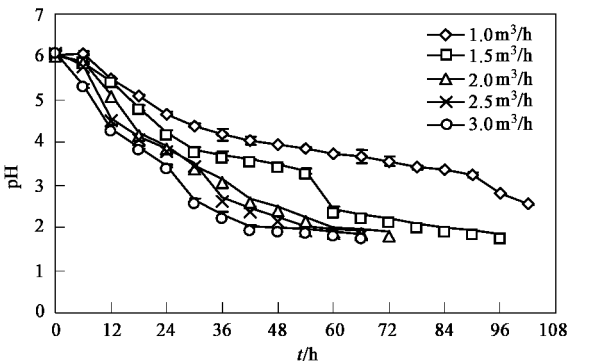


图 2 不同曝气量时制革污泥生物沥浸处理过程中介质 pH 动态变化

Fig.2 pH dynamics of tannery sludge during bioleaching with different aeration treatments

后体系 pH 仅降至 2.8,144 h 后才降到 2 以下.这表明微生物的活性在 1.0 m³/h 的处理中明显受到抑制,见图 3.此时,DO 值一直稳定在 1.3~1.8 mg/L 之间,而通气量在 2.0 m³/h 以上时,DO 能迅速达到 2 mg/L 以上.从中可看出,污泥生物沥浸处理对氧的需求至少要维持在 2 mg/L 以上.

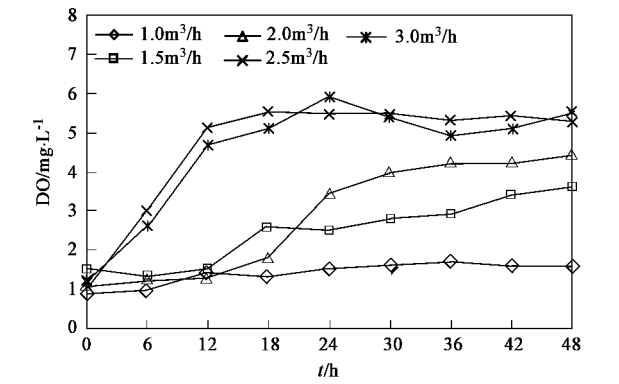


图 3 不同曝气量时制革污泥生物沥浸处理过程中介质 DO 值动态变化

Fig.3 Dissolved oxygen dynamics of tannery sludge during bioleaching with different aeration treatments

从图 4 中可以看出,尽管在生物沥浸反应的起始 12 h,各通气量处理铬溶出率都很低(几乎没有铬溶出),处理间没有差别.但 12 h 后,特别是反应到 48 h,通气量越大,表现出铬的溶出率越高,二者呈极显著直线相关($r = 0.978$).例如,当通气量在 1 m³/h、1.5 m³/h 时,铬的溶出率不到 10%,而当通气量在 2 m³/h 以上时,铬的溶出率大幅度增加,如 2 m³/h、2.5 m³/h 和 3 m³/h 的通气量,48 h 铬的溶出率分别达到 31.5%、59.4% 和 81.9%.反应 60 h 或以上时,通气量在 2 m³/h 以上的 3 个处理,铬的溶出率均达到 80%~90%,且三者无明显差别.而 1.5 m³/h 或以下的通气量处理效果明显较差,60 h 时只有 27.6%(1.5 m³/h 处理)和 10.2%(1.0 m³/h 处理)的溶出率.显然,增加通气量有利于 Cr 溶出.

值得指出的是,上述不同处理铬溶出率的变化动态是由于相应处理 pH 发生变化而导致的. ALR 反应器内的污泥随着反应的进行 pH 逐渐降低,污泥中的重金属 Cr 才逐步溶出.图 5 是本试验所有处理 Cr 溶出率与 pH 的关系.

很明显,不管是何种通气处理,只要介质 pH 降到 2.4~2.2 时,Cr 才能快速溶出,当体系 pH 值降到 2.0 以下即可获得 80% 以上的 Cr 溶出率.这与笔者以前多次报道的研究结果相一致^[15,16].

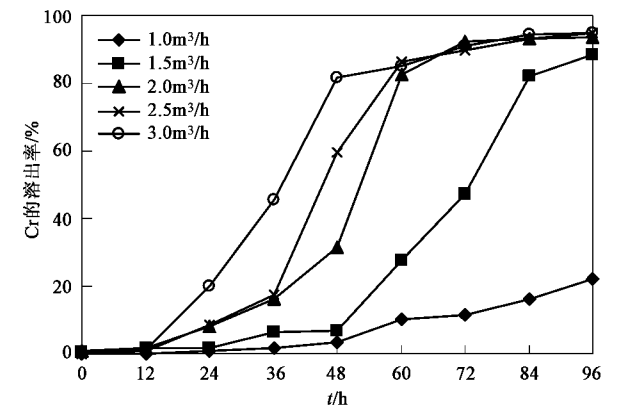


图 4 不同曝气量时制革污泥生物沥浸处理中铬的溶出率动态
Fig.4 Dynamics of Cr dissolution efficiency of tannery sludge during bioleaching with different aeration treatments

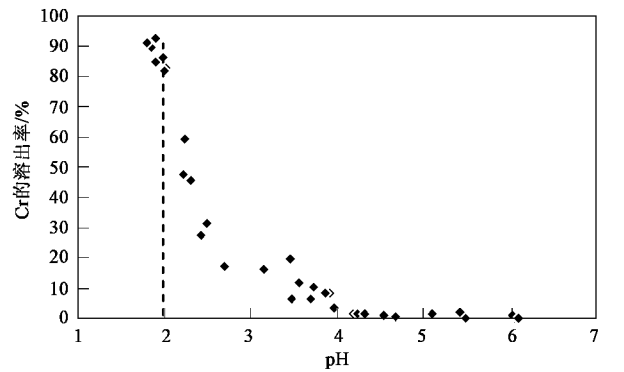


图 5 污泥生物沥浸过程中 pH 变化与 Cr 溶出率的关系
Fig.5 Cr solubilization as a function of sludge pH

3.3 最佳通气量的选择

通气量越大供气功率 $P_{\text{均}}$ 也明显地随之增加.从图 6 可见,气量 3.0 m³/h 和 2.5 m³/h 时的 $P_{\text{均}}$ 分别为 0.831 kW 和 0.645 kW,气量为 2.0 m³/h 的 $P_{\text{均}}$ 为 0.463 kW.上述 3 种不同气量条件下污泥达到 pH < 2 水平时的反应时间 t 分别为 52、60 和 65 h,总能耗 E 分别为 43.2、38.7 和 30.1 kW·h.可见 3.0 m³/h 和 2.5 m³/h 的处理仅比 2.0 m³/h 的处理节省了 25.0% 和 8.3% 的反应时间,但总能耗 E 分别高出 43.7% 和 28.7%.1.0 m³/h 和 1.5 m³/h 的处理则在反应所需时间和总能耗上都偏高.综合考虑污泥中重金属 Cr 的去除率和生物沥浸过程中能耗等因素,在本试验所用 ALR 反应器条件下通气量在 2.0 m³/h 左右较合适.

3.4 最佳通气量下 ALR 反应器中污泥 DO 值变化
在 2.0 m³/h 的最适曝气量下在反应器中进行了 34 次连续批次运行试验,大约每 2~4 d 处理 1 批,

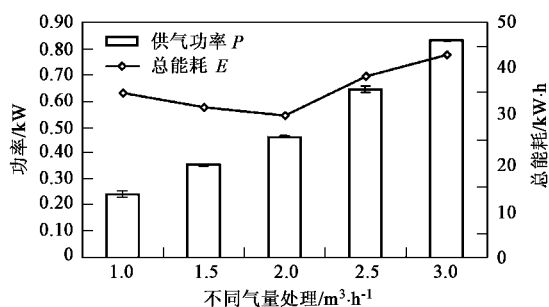


图6 ALR反应器中能耗分析

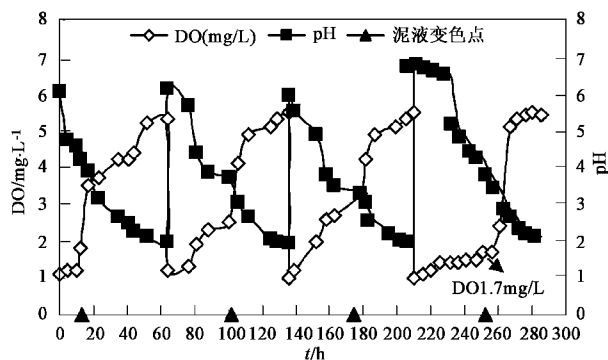
Fig.6 Energy consumption analysis in ALR reactor

铬溶出率大约 50% ~ 97% 不等, 处理时间越长, 污泥浓度越低, 铬溶出率越高. 图 7 则选择了处理时间和污泥浓度基本相同的连续 4 批, 详细监测了生物沥浸处理过程中 DO 和 pH 的变化, 并观测了污泥颜色的变化时间点.

从图 7 中可见, 在最佳气量条件下, 各批次在生物沥浸过程中介质的 DO 值均随着 pH 的下降而上升, 各批次开始运行时 pH 值保持在 5.9 ~ 6.1, DO 值很低, 约 1.0 mg/L, 大约 12 h 后, pH 约为 4, 此时 DO 逐渐升高到 2 mg/L. 随后体系 pH 继续下降, DO 则持续升高. 当 pH 降到 2 以下时, DO 值可达 5.2 ~ 5.5 mg/L. 值得指出的是, 第 4 批将处理起始的 pH 调为 6.7 (通过减少酸化回流的方法) 后 (见图 7), 经过 48 h 的沥浸反应 pH 降到 4.8 左右, 此时, DO 值仅为 1.7 mg/L, 远低于同样回流后 48 h 但初始 pH 6.0 左右处理 (即前 3 批处理) 的 DO 值水平 (4.2 ~ 4.6 mg/L). 然而当 pH 相似时, 无论是前 3 批初始 pH 6.0 左右的处理还是第 4 批起始 pH 6.7 的处理, DO 值水平也基本相同. 例如, 前 3 批初始 pH 6.0 左右的处理当生物沥浸处理至 pH 4.8 左右时, DO 值也为 (1.7 ± 0.5) mg/L. 这暗示生物沥浸过程中 DO 值的升高不但受外在曝气充氧状况的影响, 也深受特异性硫杆菌导致的环境 pH 的影响, pH 越低, DO 值越高. 这可能是由于反应初期 pH 通常在 6.0 以上, 体系中所含大量的好气、兼性异养微生物, 它们具有较高的活性, 其降解有机物需消耗大量 DO, 而沥浸导致 pH 值的下降, 特别是 $\text{pH} < 4.0$ 后, 绝大部分微生物活性受到抑制^[17], 导致系统耗氧量下降. 在系统曝气量一致的情况下, DO 值就明显上升.

另一方面, 制革污泥中还原性物质含量通常较高, 特别是还原性硫和亚铁. 生物沥浸后体系内 Fe^{2+} 的浓度明显降低. 经过约 60 h 的沥浸后 Fe^{2+} 由原先占总 Fe 含量的 61.4% 下降到只占 33.6%, 显然

随着反应的进行介质中还原性物质浓度逐渐降低, 系统的耗氧速率也随即降低. 将通气量固定条件下在 ALR 反应器中进行生物沥浸, 污泥内 DO 值也呈明显上升趋势. 因此, 在工程化运行中可在每个沥浸周期的后期调低 ALR 反应器的供气量, 控制 DO 值在 2.0 mg/L 左右满足 LX5 和 TS6 菌的生长需求即可^[18], 以此控制运行成本.

图7 最佳气量 ($2 \text{ m}^3/\text{h}$) 下制革污泥生物沥浸过程中污泥介质 DO 和 pH 动态变化Fig.7 Changes of pH and DO of tannery sludge in air-lift bioleaching reactor with the optimum aeration of $2 \text{ m}^3/\text{h}$

4 结论

(1) 采用自制 280 L 空气提升式反应器 (ALR) 进行生物沥浸, 从底部鼓气完成对制革污泥搅拌和供气充氧, 取得了良好的中试效果.

(2) 增加通气量可以明显加快 Cr 的溶出, 结合能耗效益分析认为本试验条件下 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 为最佳气量, 制革污泥中 Cr 溶出率达 92.5%.

(3) 沥浸过程中反应器内 DO 水平与体系 pH 值呈显著负相关, pH 值的下降抑制了大部分异养菌的活性以及污泥中还原性物质在生物沥浸过程中大幅度减少, 系统耗氧减少是导致 DO 上升的主要原因.

参考文献:

- [1] Skrypaski-Matele S, Bridle T R. Environmentally sound disposal of tannery sludge [J]. Water Res, 1995, 29: 1033 ~ 1039.
- [2] Zhou L X, Fang D, Wang S M, et al. Bioleaching of Cr from tannery sludge: the effects of initial acid addition and recycling of acidified bioleached sludge [J]. Environ Technol, 2005, 26: 277 ~ 284.
- [3] 周立祥, 方迪, 周顺桂, 等. 利用嗜酸性硫杆菌去除污泥中铬的研究 [J]. 环境科学, 2004, 25(1): 62 ~ 66.
- [4] 李桂菊. 生物法处理制革废水 [J]. 皮革化工, 2004, 22(2): 34 ~ 38.
- [5] 方迪, 周立祥. 固体浓度对生物沥浸法去除制革污泥中铬的影响 [J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 163 ~ 165.

- [6] 周立祥,周顺桂,王世梅,等.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,2004,24(6):1013~1016.
- [7] 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.
- [8] Srivastava P, Kundu S. Studies on cephalosporin-C production in an air-lift reactor using different growth modes of *Cephalosporium acremonium* [J]. Process Biochemistry, 1999, 34: 329~333.
- [9] Gandolfi R, Cavenago K, Gualandris R. Production of 2-phenylacetic acid and phenylacetaldehyde by oxidation of 2-phenylethanol with free immobilized cells of *Acetobacter aceti* [J]. Process Biochemistry, 2004, 39: 747~751.
- [10] Shi S Y, Fang Z H. Bioleaching of marmatite flotation concentrate by adapted mixed mesoacidophilic cultures in an air-lift reactor [J]. Miner Process, 2005, 76: 316.
- [11] Chen S Y, Lin J G. Bioleaching of heavy metals from contaminated sediment by indigenous sulfur-oxidizing bacteria in an air-lift bioreactor: effects of sulfur concentration[J]. Water Research, 2004, 38: 3205~3214.
- [12] 王世梅,周立祥,黄峰源,等.耐酸性异养菌的分离及其在制革污泥重金属生物沥浸中的作用[J].环境科学,2004,25(5):154~157.
- [13] 王电站,周立祥.去除污泥中重金属铬的生物淋滤反应器设计与应用[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(11):66~70.
- [14] 王志魁.化工原理[M].北京:化学工业出版社,1998.
- [15] 王电站,周立祥.酸化污泥回流的生物淋滤技术处理制革污泥[J].中国环境科学,2006,26(3):284~287.
- [16] 方迪,周立祥.温度对制革污泥的生物淋滤除铬效果的影响[J].环境科学,2006,27(7):1455~1458.
- [17] 马文漪,杨柳燕.环境微生物工程[M].南京:南京大学出版社,1998.
- [18] Bevilacqua D, Leite A L L C, Garcia O, et al. Oxidation of chalcopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in shake flasks[J]. Proc Biochem, 2002, 38: 587~592.

欢迎订阅 2007 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想,理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国工程索引 EI;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2007 年为 16 开本,40 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 0205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail: hjkx@rcees.ac.cn;网址: www. hjkx. ac. cn