

厌氧-好氧反应器处理选矿废水的挂膜实验

宋卫锋, 罗丽丽, 林梓河, 谢辉

广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006

摘要 选矿废水中所含的选矿药剂种类多, 毒性大, 物质结构复杂, 大多难以被微生物快速、有效利用, 进入环境后可以长期存留, 用物化法难以保证出水中有机浮选药剂长期稳定达标排放, 因此用生物法处理选矿废水达标排放或便于回收利用已势在必行。本实验采用逐渐增加进水的选矿药剂浓度、固定水力停留时间的方法启动厌氧-好氧反应器, 分析了其挂膜过程中对 COD 和浮选药剂浓度的去除效果及生物相的变化情况。结果表明, 挂膜和驯化期间, 系统对 COD 的去除主要集中在好氧反应器, 厌氧反应器虽也有一定的去除效果, 但去除率远远低于好氧反应器。反应器启动 40d 后, COD 的总去除率稳定在 55%, 苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药的总去除率分别达到 92%, 84% 和 82%, 且填料中的生物相趋于稳定, 标志着系统挂膜成功。

关键词 选矿废水; 挂膜; 生化处理

中图分类号 X703

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.27.007

Experimental Study of Biofilm Formation in Anaerobic-Aerobic Reactor for Flotation Wastewater

SONG Weifeng, LUO Lili, LIN Zihé, XIE Hui

College of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract Beneficiation reagents exist in a great variety, with high toxicity and complex material structure, and it is difficult to be used by microorganisms quickly and efficiently. They can stay for a long time after they go into the environment. It is difficult to guarantee the organic flotation reagents in the water to discharge down into standard values and to be steady for a long time by physical and chemical methods. So, it is imperative to recycle the beneficiation wastewater and to achieve the drainage standard by biological methods. The Anaerobic-Aerobic reactor starts by using the method of gradually increasing the floating agent concentration and fixing the hydraulic retention time. The treatment efficiencies of COD and floating agent and the changes of biofacies are analyzed. The results show that during the biofilm formation and the domestication, the removal rate of COD is mainly concentrated in the aerobic reactor. Anaerobic reactor has also a certain removal effect, but far below that of an aerobic reactor. 40 days after a reactor starts, the total removal rate of COD is stable at a level of 55% and the total removal rates of aniline aerofloat, diethyldithiocarbamate and butyl xanthate reach 92%, 84% and 82%, the biofacies are steady and the biofilm is formed successfully.

Keywords flotation wastewater; biofilm formation; biochemical treatment

0 引言

据统计, 中国有色金属选矿厂每年外排废水约 2 亿 m^3 , 占有色金属行业废水总量的 30% 左右^[1]。选矿废水中主要污染物是重金属离子、各种有机和无机浮选药剂, 选矿药剂种类多, 毒性大, 物质结构复杂, 大多难以被微生物快速、有效利用, 进入环境后可以长期存留, 对生态环境和人体健康构成严重威胁, 特别是苯胺类化合物被列为优先环境优先控制

污染物, 在工业排水中要求严格控制。用物化法难以保证出水中有机浮选药剂长期稳定达标排放, 长期回用后也会对生产指标产生不良影响, 因此用生物法处理选矿废水达标排放或便于回用已是势在必行。

目前, 国内外主要采用混凝沉降^[2-13]、混凝沉降-活性炭吸附^[14-15]、混凝沉降-氧化^[16-17]、自然降解^[18-19]、化学氧化^[20-23]等方法处理选矿废水, 而关于生物法处理方面的报道较少。本实

收稿日期: 2010-11-19; 修回日期: 2011-05-29

作者简介: 宋卫锋, 副教授, 研究方向为水污染控制与资源综合利用技术, 电子邮箱: weifengsong@263.net

验采用厌氧-好氧反应器研究选矿废水, 可以拓宽废水净化技术路线, 并为选矿废水生物净化措施提供理论基础支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置与工艺流程

本实验中所用的反应器均为有机玻璃加工而成,其中,配水箱的尺寸为 35cm×35cm×50cm,有效容积为 50L;好氧反应器和厌氧反应器形状、尺寸均一样,为圆柱体,直径 30cm,高 40cm,有效容积为 20L,内置两根悬挂式的组合填料;储水箱的尺寸为 35cm×35cm×50cm (图 1)。原水由厌氧反应器的底部进入,由上部出水进入好氧反应器底部,再由好氧反应器的上部出水流入储水箱,最终出水通过回流泵回流到配水箱。实验过程中,反应器的温度与环境温度保持一致,始终维持在 24—30℃,进水流量为 1L/h,水力停留时间为 20h。

1.2 实验用水与接种污泥

1.2.1 实验用水

反应器启动实验用水:在自来水中加入如表 1 所示浓度的葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾,同时投加少量硫酸镁、氯化钙、硫酸亚铁等。待 11d 生物膜基本形成后,采用人工模拟选矿废水,反应器启动和运行稳定器的废水营养配比见表 1 和表 2 该废水与南京某铅锌硫化矿浮选废水的成分基本相符,主要污染物为苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药,废水 3 种药剂

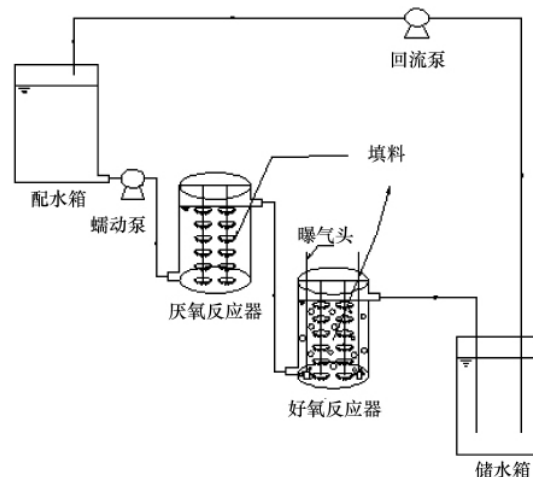


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

表 1 反应器启动时的营养配比

Table 1 Nutrient materials during start-up of biofilm reactor

成分	C ₆ H ₁₂ O ₆	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	CaCl ₂	FeSO ₄
含量/(mg·L ⁻¹)	500	66.88	15.35	17.8	13.3	0.18

浓度配比分别为 165, 52, 6.15 mg/L。由于实际废水中重金属离子的浓度较低, 本实验忽略重金属离子对挂膜研究的影响。

表 2 驯化运行稳定期的营养配比

Table 2 Nutrient materials during stationary phase

成分	C ₆ H ₁₂ O ₆	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	CaCl ₂	FeSO ₄	丁基黄药	乙硫氮	苯胺黑药
含量/(mg·L ⁻¹)	50	6.688	1.535	1.78	1.33	0.018	6.15	52	165

1.2.2 接种污泥

接种污泥取自广州市某废水处理厂生物处理二沉池。污泥外观呈黄褐色,挥发性悬浮物(VSS)为 6.792g/L,悬浮物(SS)为 13.85g/L, $VSS/SS=0.49$,污泥含水率为 98.57%,污泥沉降比(SV)为 87%。

1.3 分析检测项目及测定方法

实验分析检测项目主要为废水的 COD、3 种选矿药剂浓度和生物相。

(1) COD 值采用快速密闭催化消解法测定^[24]。

(2) 苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药质量分数:采用紫外分光光度法测定^[25-28],分别在波长为 230,435,301nm 条件下,测定水样中药剂的浓度。

(3) 生物相的观察:用镊子从填料上刮取一小块生物膜,用蒸馏水稀释一定倍数制成菌液,用胶头滴管取1滴菌液,放在干燥、洁净的载玻片上,盖上盖玻片,在显微镜下观察^[29]。

2 实验结果与分析

2.1 反应器的启动

本实验好氧反应器的挂膜方法采用接种挂膜法^[30-32],接

种污泥量为反应器有效容积的 30%，接种污泥和废水混合后加入好氧反应器内；而厌氧反应器采用好氧预挂膜启动法^[33-34]。废水 COD 约为 500mg/L，同时补充尿素、磷酸二氢钾，使进水的 BOD:N:P=100:5:1(质量比)，闷曝 3d。在 11d 前只加入葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾、微量元素(各种成分的具体浓度见表 1)，从第 12 天开始加入苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药，药剂浓度逐渐增加，直到接近南京某铅锌硫化矿浮选废水的浓度，葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾等营养液逐渐减少，使废水 COD 浓度保持在 500mg/L 左右。继续驯化 30d，驯化运行稳定期各种成分的具体浓度见表 2。

2.2 污染物的去除效果

2.2.1 COD 的去除效果

反应器启动过程中进水、出水的 COD 浓度及 COD 去除率随时间的变化关系分别见图 2 和图 3。

由图 2 可知,启动期间进水 COD 为 492—540mg/L,平均为 510mg/L;厌氧反应器出水 COD 最大达到 460mg/L,最小值为 375mg/L,平均为 417mg/L;好氧反应器出水 COD 最大达到 303mg/L,最小值为 185mg/L,平均为 235mg/L。在挂膜初期,COD 主要来源于葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾等营养物质,反

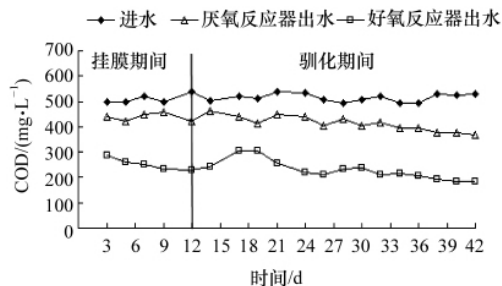


图2 进、出水 COD 的变化
Fig. 2 Changes of COD of influent and effluent

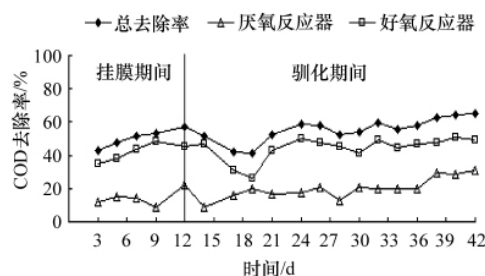


图3 各反应器对 COD 的去除率
Fig. 3 Changes of COD removal efficiency

反应器出水的 COD 比较平缓,12d 开始进入驯化期,好氧反应器出水的 COD 有上升的趋势。其原因可能是由于选矿药剂毒性大,适应营养液的微生物在短期内对选矿药剂的吸收能

力较差,导致出水 COD 升高,随着反应器的运行,微生物适应选矿废水的能力增强,生物膜生长较快,去除效果较好。系统启动 40d 后,厌氧反应器对 COD 的去除效果趋于稳定,其出水 COD 稳定在 375mg/L;好氧反应器对 COD 的去除效果也趋于稳定,其出水 COD 稳定在 185mg/L。

由图 3 可知,好氧反应器对 COD 的去除贡献最大。虽然驯化前期微生物在短时间内吸收选矿药剂的能力差,COD 去除率有下降趋势,但是随着驯化时间的增加,去除效果好,启动后的第 40 天,对 COD 的去除率最终稳定在 51%左右。厌氧反应器对 COD 的去除效果不明显,平均去除率仅为 19%,其原因可能是由于填料表面附着的生物膜在毒性较大的选矿废水中很难富集,容易脱落,其吸附性能和降解性能均较差,在水流流动作用下会被冲刷出反应器,造成厌氧反应器出水水质恶化。随着驯化时间的增加,微生物对废水的适应性增强,COD 去除率缓慢增长,最终达到相对稳定。

从总体来看,系统对 COD 的去除主要集中在好氧反应器。厌氧反应器虽也有一定的去除效果,但去除率远低于好氧反应器。其作用可将大分子的有机物降解为小分子有机物,小分子有机物经过好氧反应器能有效被去除掉,出水水质较好。

2.2.2 3 种药剂的降解效果

实验期间反应器进水、出水中苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药的降解情况分别见图 4、图 5 和图 6。

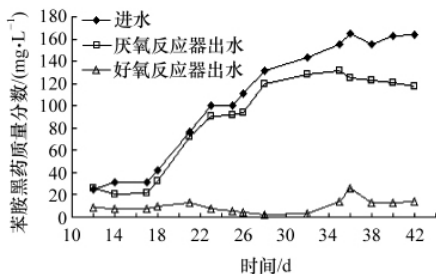


图4 进、出水苯胺黑药质量分数的变化
Fig. 4 Changes of aniline aerofloat of influent and effluent

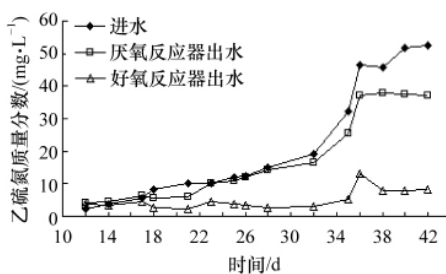


图5 进、出水乙硫氮质量分数的变化
Fig. 5 Changes of diethyldithiocarbamate of influent and effluent

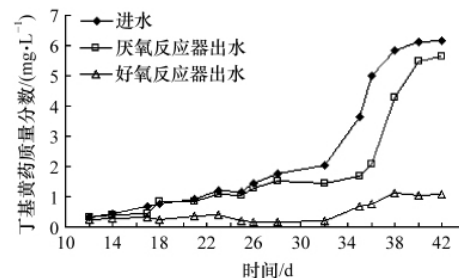


图6 进、出水丁基黄药质量分数的变化
Fig. 6 Changes of butyl xanthate of influent and effluent

由图 4、图 5、图 6 可知,实验期间苯胺黑药质量分数为 25mg/L (12d)—165mg/L (42d),乙硫氮为 2.32mg/L (12d)—52.38mg/L (42d),丁基黄药为 0.35mg/L (12d)—6.16mg/L (42d)。虽然选矿药剂较难降解,但在本实验条件下,由于葡萄糖等易降解有机物的存在,促进了苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药降解,推测产生了共代谢作用。反应器启动 40d 后,苯胺黑药的降解率从刚启动时的 64.4%逐渐上升到 92%,出水浓度为 12.64mg/L,降解效果趋于稳定;乙硫氮的降解率逐渐上升到 84%,出水浓度为 8.05mg/L;丁基黄药的降解率从 24%逐渐上升到 82%,出水浓度约为 1.1mg/L。这说明适应此 3 种药剂的微生物已驯化成功。

2.3 生物相观察

图 7 为挂膜启动过程中生物膜表面结构的扫描电镜照片。由图 7(a)可知,填料上基本无生物膜生长,仅有少量丝状菌开始繁殖。运行初期前 10d,反应器的废水处理能力较低,生物膜呈淡黄色,结构松散。从图 7(b)可见,随挂膜过程的进行,填料表面的微生物相发生了较大变化,生物膜厚度增大。填料内表面的淡黄色生物膜变为灰褐色,镜检发现,出现暗红色的藻类、游仆虫、侠盗虫和线虫、轮虫、钟虫等后生动物。从图 7(c)可知,反应器运行至 33d 时,生物膜由大量丝状菌组成。镜检发现盖果虫、吸管虫、半眉虫,这些生物的出现标志着反应器的稳定运行。原生动物和细菌之间存在相互依存

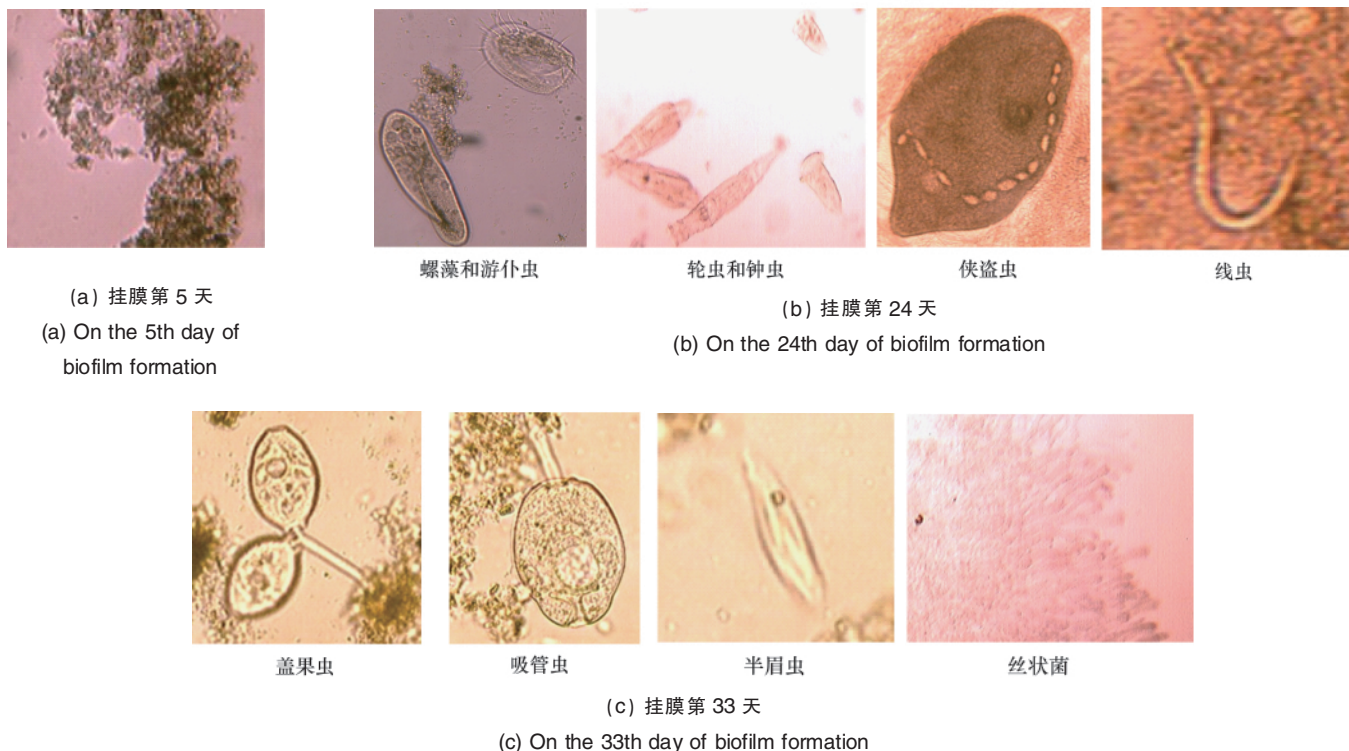


图 7 挂膜启动过程中生物膜表面结构的扫描电镜照片

Fig. 7 Scanning electronic microscopy photos of biofilm structure

的关系。文献^[9]显示,活性污泥系统中的原生动物有纤毛虫 160 种,鞭毛虫约 36 种,肉足虫约 29 种,但由于选矿废水中含有苯胺黑药、乙硫氮和丁基黄药等有毒物质,所以微生物种类相对较少。观察废水中的微生物可了解反应器的运行状况,从而及时控制、调整其运行条件。

3 结论

(1) 研究采用逐渐增加进水的选矿药剂浓度、固定水力停留时间的方法启动反应器,40d 即可达到较好的启动效果。反应器运行稳定,COD 总去除率平均达 55%。

(2) 挂膜和驯化期间,系统对 COD 的去除主要集中在好氧反应器,厌氧反应器虽也有一定的去除效果,但去除率远低于好氧反应器。

(3) 反应器启动的 40d,苯胺黑药的降解率从 64.4%逐渐上升至 92%,乙硫氮的降解率逐渐上升至 84%,丁基黄药的降解率从 24%逐渐上升到 82%,说明微生物已驯化成功。

(4) 虽然苯胺黑药、丁基黄药和乙硫氮属于难降解物质,但葡萄糖等有机物可有效促进这三种选矿药剂的生物降解。

参考文献 (References)

[1] 唐锦涛. 选矿废水的危害及防治[J]. 工程设计与研究, 1992, 75(1): 41-45.
Tang Jingtiao. *Engineering Design and Research*, 1992, 75(1): 41-45.
[2] 吴俊义, 付永胜, 鄂铁军. 铅锌选矿废水治理技术研究[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(2): 181-185.
Wu Junyi, Fu Yongshen, E Tiejun. *Journal of Southwest Jiaotong*

University, 1997, 32(2): 181-185.
[3] 解庆林, 张学洪. 选矿废水的混凝沉淀处理及回用工程设计 [J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(2): 186-188.
Xie Qinglin, Zhang Xuehong. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 2000, 20(2): 186-188.
[4] 夏妍, 李福全, 姜效军. 阳离子淀粉的合成及在选矿废水处理中的应用[J]. 梅山科技, 2006(3): 29-31.
Xia Yan, Li Fuquan, Jiang Xiaojun. *Meishan Technology*, 2006(3): 29-31.
[5] 张艳, 戴晶平, 张康生. 凡口矿选矿废水处理与利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(3): 45-48.
Zhang Yan, Dai Jingping, Zhang Kangsheng. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2008, 28(3): 45-48.
[6] 许国强. 高悬浮物选矿废水处理技术与工程实践 [J]. 矿冶, 2005, 14(2): 28-32.
Xu Guoqiang. *Mining and Metallurgy*, 2005, 14(2): 28-32.
[7] 吴烈善, 覃登攀, 唐景静, 等. 化学混凝法处理选矿废水的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5): 15-17.
Wu Lieshan, Tan Dengpan, Tang Jingjing, et al. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2007, 34(5): 15-17.
[8] 冯秀娟, 刘祖文, 朱易春. 混凝剂处理选矿废水的研究 [J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 27-29.
Feng Xiujian, Liu Zuwen, Zhu Yichun. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005, 25(4): 27-29.
[9] 冯秀娟, 朱易春, 阮强. 脱稳和混凝法处理某多金属矿尾矿废水试验研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(5): 47-50.
Feng Xiujian, Zhu Yichun, Ruan Qiang. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2008, 28(5): 47-50.
[10] 杨金林, 张红梅, 谢建宏, 等. 某地铅锌矿选矿废水净化再用试验研究[J]. 矿产综合利用, 2006(2): 44-45.

- Yang Jinlin, Zhang Hongmnei, Xie Jianhong, *et al.* *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2006(2): 44-45.
- [11] 蒋克旭. 钼选厂污水处理工艺探讨 [J]. 辽宁城乡环境科技, 2005, 25(2): 33-34.
- Jiang Kexu. *Liaoning Urban-rural Environment Technology*, 2005, 25 (2): 33-34.
- [12] 郑雅杰, 彭振华. 铅锌矿选矿废水的处理及循环利用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 468-473.
- Zheng Yajie, Peng Zhenhua. *J Cent South Univ: Sci Tech Ed*, 2007, 38 (3): 468-473.
- [13] 王方东. 应用旋流絮凝法处理选矿废水 [J]. 云南环境科学, 1999, 18 (3): 28-29.
- Wang Fangdong. *Yunnan Environmental Science*, 1999, 18(3): 28-29.
- [14] 谢光炎, 孙水裕, 宁寻安, 等. 选矿废水的回用处理研究与实践[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(2): 67-70.
- Xie Guangyan, Sun Shuiyu, Ning Xunan, *et al.* *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(2): 67-70.
- [15] 袁增伟, 孙水裕, 赵永斌, 等. 选矿废水净化处理及回用试验研究[J]. 水处理技术, 2002, 28(4): 232-234.
- Yuan Zengwei, Sun Shuiyu, Zhao Yongbin, *et al.* *Technology of Water Treatment*, 2002, 28(4): 232-234.
- [16] 杨军, 周玳. 南京铅锌银矿选矿废水净化处理方法试验[J]. 江苏冶金, 1995(3): 40-42.
- Yang Jun, Zhou Dai. *Jiangsu Metallurgy*, 1995(3): 40-42.
- [17] 杜军. 铋矿选尾矿废水的处理研究[J]. 甘肃有色金属, 1995(4): 32-35.
- Du Jun. *Gansu Nonferrous Metals*, 1995(4): 32-35.
- [18] 赵永红, 成先雄, 谢明辉, 等. 选矿废水中黄药自然降解特性的研究 [J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(6): 33-34.
- Zhao Yonghong, Cheng Xianxiong, Xie Minghui, *et al.* *Mining Safety and Environmental Protection*, 2006, 33(6): 33-34.
- [19] 朱来东, 吴国振. 某铅锌多金属矿尾矿废水自然净化试验研究[J]. 甘肃冶金, 2007, 29(4): 89-91.
- Zhu Laidong, Wu Guozhen. *Gansu Metallurgy*, 2007, 29(4): 89-91.
- [20] 顾泽平, 孙水裕, 肖华花. Fenton 试剂处理选矿废水的试验研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4): 82-84.
- Gu Zeping, Sun Shuiyu, Xiao Huahua. *Water Resources Protection*, 2006, 22(4): 82-84.
- [21] 徐劲, 孙水裕, 张萍, 等. Fenton 试剂处理选矿废水机理研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(10): 45-48.
- Xu Jin, Sun Shuiyu, Zhang Ping, *et al.* *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(10): 45-48.
- [22] 吉鸿安. 利用臭氧分解选矿废水中黄药和二号油[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(3): 70-72.
- Ji Hongan. *Gansu Metallurgy*, 2008, 30(3): 70-72.
- [23] 顾泽平, 孙水裕, 肖华花. 用次氯酸钠法处理选矿废水 [J]. 化工环保, 2006, 26(1): 35-37.
- Gu Zeping, Sun Shuiyu, Xiao Huahua. *Environment Protection of Chemical Industry*, 2006, 26(1): 35-37.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 104-107.
- State Environmental Protection Administration. *Monitoring and analysis method of water and waste water* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 104-107.
- [25] 肖华花. 二苯胺基二硫代磷酸生物降解特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2006.
- Xiao Huahua. *Research on biodegradation characteristics of dianilino dithiophosphoric acid* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2006.
- [26] 舒生辉. 黄原酸盐高效降解菌的紫外诱变选育及其降解特性的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- Shu Shenghui. *Breeding of xanthate-degrading bacterial strain by ultraviolet-ray mutation and its biodegradates characteristics* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.
- [27] 杨运琼. 硫化矿捕收剂的降解性能与机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- Yang Yunqiong. *Research on degradation and mechanism of flotation reagent*[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [28] Ramachandra R S. *Surface chemistry of froth flotation* [M]. New York: Plenum Press, 1982: 231.
- [29] 肖琳, 杨柳燕, 尹大强, 等. 环境微生物实验技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 34-35.
- Xiao Lin, Yang Liuyan, Yin Daqiang, *et al.* *Experimental technology of environment microbiology* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 34-35.
- [30] 周晴, 傅金祥, 赵玉华, 等. UBAF 两种挂膜方式的试验研究 [J]. 工业安全与环保, 2005, 31(5): 28-30.
- Zhou Qing, Fu Jinxiang, Zhao Yuhua, *et al.* *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2005, 31(5):28-30.
- [31] 傅金祥, 陈正清, 赵玉华, 等. 挂膜方式对曝气生物滤池的影响[J]. 水处理技术, 2006, 32(8): 42-45.
- Fu Jinxiang, Chen Zhengqing, Zhao Yuhua, *et al.* *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(8):42-45.
- [32] 李思敏, 宿程远, 张建昆. 生物砂滤池不同挂膜方法的试验研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(11): 60-63.
- Li Simin, Su Chengyuan, Zhang Jiankun. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(11): 60-63.
- [33] 叶芬霞. 载体好氧预挂膜处理对厌氧消化反应器启动的影响 [J]. 环境科学与技术, 2001, 24(1): 24-28.
- Ye Fenxia. *Environmental Science and Technology*, 2001, 24(1): 24-28.
- [34] 林英姿, 王爽, 于炳慧, 等. ABR 反应器的两种快速启动方法对比[J]. 环境工程学报, 2009, 3(4): 669-672.
- Lin Yingzi, Wang Shuang, Yu Binghui, *et al.* *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(4): 669-672.
- [35] 顾福康. 原生动物学概论[M].北京: 高等教育出版社, 1991: 282-286.
- Gu Fukang. *Introduction to protozoology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1991: 282-286.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱: kjdbbjb@cast.org.cn。