

选矿废水中残留药剂生物降解技术研究进展

张东晨,王方略,董敬申,郑婧,秦华昱,程娟,付鹏

(安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001)

摘要:选矿药剂通常用于调节矿物表面和浮选介质的物理化学性质,扩大有用矿物与脉石矿物间的亲疏水性差异,从而达到更好的分选效果。选矿药剂种类繁多,含有残留药剂的选矿废水直接外排会造成环境污染。生物降解作为一种新型生化处理方法,具有成本低、能耗少、无二次污染等优点,因此研究高效降解选矿废水中残留药剂的方法尤为重要。论述了当前黄药、黑药、羟肟酸类、松醇油等选矿药剂生物降解技术的研究进展,分析了影响降解效果的工艺因素和选矿药剂生物降解研究存在的主要问题,并对今后的研究工作进行展望。影响黄药生物降解效果的因素有黄药初始浓度、pH、温度、振荡速率、降解时间、碳氮比、氮源和金属离子等。外加碳源可促进黄药的降解。 CS_2 、ROCSSH和单硫代碳酸盐是烷基黄药的主要降解产物,并伴有少许双黄药油液滴生成,属于一级酶促降解动力学。黄原酸盐分解的中间产物是过氧化黄原酸盐。不同外加碳源同样会促进黑苯胺药的降解。羟肟酸类捕收剂降解反应是一级反应动力学。影响对松醇油的降解因素有pH值、接种量、温度、摇床转速、松醇油初始浓度、反应时间等。针对选矿药剂生物降解研究存在的主要问题,今后的研究工作应借鉴相近领域的生物技术手段筛选出高效降解菌株,在降解机理上开展更深入研究,在分子水平上改造基因,利用基因工程技术构建新的降解菌株。同时,应加快选矿废水生物降解设备的研制。

关键词:选矿废水;选矿药剂;生物降解;微生物

中图分类号:TD926

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)01-0071-06

Research progress on biodegradation technology of residual agents in mineral processing wastewater

ZHANG Dongchen, WANG Fanglue, DONG Jingshen, ZHENG Jing, QIN Huayu, CHENG Juan, FU Peng

(College of Material Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Beneficiation agents usually regulate the physical and chemical properties of selected minerals and flotation media, which can expand the hydrophilic-to-hydrophobic differences between valuable minerals and gangue minerals and then achieve the best separation effect. There are many kinds of beneficiation agents and the direct discharge of mineral processing wastewater which contains residual chemicals will cause serious pollution to the environment. As a new biochemical treatment method, biodegradation has many advantages, such as low cost, low energy consumption and no secondary pollution. Therefore, it is of practical significance to study high efficiency biodegradation of residual agents in mineral processing wastewater. In this paper the current biodegradable research progress of mineral processing agents, such as xanthate, aerofloat, hydroxamic acid and pine oil were reviewed. The main factors affecting the degradation and biodegradation problems of beneficiation agents were analyzed and the future research work were also forecasted. The results show that the initial concentration, pH, temperature, shaking rate, time, C/N ratio, nitrogen source and metal ions are the main factors affecting the biodegradation of xanthate. External carbon sources can promote the degradation of xanthate. CS_2 , ROCSSH and mono-thiocarbonate are the main degradation products of alkyl-xanthate, accompanied by a few oil droplets of double-xanthate, which belongs to the first-order enzymatic degradation kinetics. The intermediate product of xanthate decomposition is xanthate peroxide. The analysis concluded that additional car-

收稿日期:2018-12-07;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18120701

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274012)

作者简介:张东晨(1965—),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,博士,主要从事矿物加工与生物洁净煤技术研究。E-mail: dchzhang@aust.edu.cn

引用格式:张东晨,王方略,董敬申,等.选矿废水中残留药剂生物降解技术研究进展[J].洁净煤技术,2019,25(1):71-76.

ZHANG Dongchen, WANG Fanglue, DONG Jingshen, et al. Research progress on biodegradation technology of residual agents in mineral processing wastewater[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 71-76.



移动阅读

bon sources can promote the degradation of aniline aerofloat. Hydroxamic acid collectors are a first-order reaction kinetics. Besides, factors influencing the degradation of pine oil include pH, inoculation amount, temperature, shaking speed, initial concentration, time, etc. In view of the main problems about biodegradation of mineral processing agents, the future work should imitate the biotechnological means of similar fields to screen highly efficient degradation strains. The research on degradation mechanism should be deeply studied and new biodegradable strains should be constructed by genetic engineering at the molecular level. Meanwhile, the development of biodegradation equipment should be accelerated.

Key words: mineral processing wastewater; beneficiation agents; biodegradation; microorganisms

0 引言

随着经济的快速发展,对矿产资源的质量和产量要求越来越高。选矿伴生的环境问题也受到人们关注,特别是选矿废水中选矿药剂引发的环境污染和生态破坏。常用的选矿药剂有捕收剂、起泡剂、絮凝剂等,这些选矿药剂使用量很大,选矿废水中仍含有大量浮选药剂,直接排放会对环境造成污染,尤其是水环境。因此,选矿废水的有效处理一直是选矿领域亟待解决的难题。

国内外对选矿废水的处理大都使用物理、化学方法,一般要向选矿废水中添加大量的化学试剂或吸附剂,易对环境造成二次污染,且操作繁琐,成本高。而生物降解作为一种新型生化处理方法,利用微生物的新陈代谢降解选矿废水,具有低成本、能耗少、无二次污染等优势。但由于技术不成熟,生物法尚未推广使用。因此,对选矿废水中残留药剂开展生物降解研究具有重要意义。

1 黄药的生物降解

黄药化学名为烃基二硫代碳酸盐,也称为黄原酸盐。残留黄药的污染水样硫含量高,严重污染水源,有刺激臭味。

1.1 微生物的降解作用

张萍等^[1]在南京某选矿厂废水中获得以黄药为唯一碳源的黄原酸盐降解菌,鉴定该菌株为铜绿假单胞菌属,对其进行生长和降解性能研究。黄药的最佳降解工艺为:黄药初始浓度 1 500 mg/L, pH = 8, 温度 30 ℃, 振荡速率 120 r/min, 降解时间 24 h。在该试验条件下,降解率为 95.7%, COD 去除率为 84.7%。外加碳源促进黄药的生物降解,当加入 0.2 g/L 葡萄糖时,黄药的降解率最大。

陈绍华等^[2]研究了不同种共基质乙酸钠、甘油和葡萄糖等对黄药生物降解的影响。结果表明,在共基质葡萄糖和氮源蛋白胨试验条件下,对黄药的生物降解效果最佳,黄药的降解率高达 91.47%。但只有单基质情况下,黄药降解率为

55.54%。共基质可加快微生物的新陈代谢,促进黄药生物降解。

由黄药降解前后的红外吸收图谱得出,降解后在 2 700 ~ 3 000 cm^{-1} 处的烃基红外吸收峰没有太大变化,主要是因为测定试剂正己烷的烃基对其产生影响。降解后,在 1 259 cm^{-1} 处的巯基红外吸收峰出现了强吸收,表明降解产物中有 CS_2 生成。降解前,在 1 100 ~ 1 140 cm^{-1} 处的峰为—ROCSSH 基团的红外吸收峰。降解后,在 1 101 cm^{-1} 出现了较强吸收峰,证明有双黄药。 CS_2 和双黄药是降解后的主要中间产物。

陈绍华等^[3-6]利用活性污泥对几种烃基黄药进行生物降解,结果表明:在第 8 天时,乙基黄药、正丁基黄药、正戊基黄药、异丙基黄药、异丁基黄药的降解率分别为 96.36%、81.76%、73.74%、63.37%、60.30%,该好氧降解过程皆是一级酶促反应动力学。降解速率常数顺序为: $k(\text{乙基}) > k(\text{正丁基}) > k(\text{正戊基}) > k(\text{异丙基}) > k(\text{异丁基})$ 。若化合物中支链数和碳链长度减少,则生物降解率增加。支链数比碳链长度更能影响烃基黄药降解率。初步探讨黄药生物降解机理时发现: CS_2 、ROCSSH 和单硫代碳酸盐是烃基黄药的主要降解产物,并伴有少许双黄药油液滴生成。

夏丽娟等^[7]从土壤中分离驯化出具有降解黄药能力的杂菌,考察共基质、碳氮比、氮源和金属离子等因素对黄药的降解效果。共基质对黄药降解影响如图 1 所示。研究发现,共基质促进黄药降解强弱关系为:多糖 > 二糖 > 单糖。

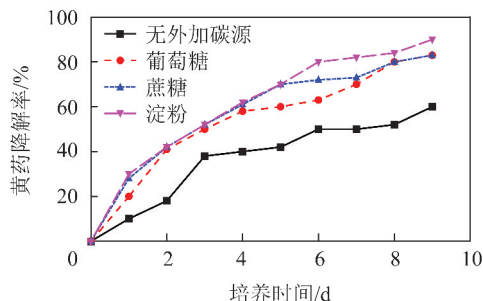


图 1 共基质对黄药降解的影响^[7]

Fig. 1 Effect of co-substrates on degradation of xanthate^[7]

与其他氮源相比,氮源中氯化铵和尿素促进作用最好。高碳氮比有利于黄药的降解。 Fe^{3+} 浓度为 $0 \sim 20 \text{ mg/L}$,对黄药的降解效果随其浓度升高而升高。 Zn^{2+} 浓度低于 10 mg/L 时,对黄药降解有促进作用;浓度为 $30 \sim 50 \text{ mg/L}$ 时产生抑制效果。 Pb^{2+} 抑制黄药降解,且随 Pb^{2+} 浓度升高抑制更强。

林伟雄等^[8]对广东某硫化铅锌废矿外排废水进行枯草芽孢杆菌生物膜法的生化处理,探索不同载体、不同COD浓度的黄药降解性能。结果表明,在 $6 \sim 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、停留时间 2 d 时,用 $50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 的黏胶作为挂膜载体进行矿厂废水处理,得到较好的降解效果。出水COD浓度稳定在 40 mg/L 左右。

鄢恒珍等^[9]以丁基黄药为唯一碳源,并添加共基质,探索了活性污泥对丁基黄药的降解规律,发现共基质促进丁基黄药的降解。以丁基黄药为唯一碳源, $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 振荡培养 72 h ,降解率仅为 43.1% ;在此基础上,添加共基质葡萄糖浓度 0.2 g/L ,降解率为 65.2% ;再加入少量蛋白胨后,降解率上升至 73.5% 。加入共基质后,调整期由 36 h 缩短至 24 h ,说明共基质可有效增强丁基黄药降解。

由微生物降解不同时间后丁基黄药的紫外吸收谱图可见, $190 \sim 200 \text{ nm}$ 处吸收峰是溶剂峰。随降解反应进行, 226 nm 和 301 nm 处丁基黄药特征吸收峰强度不断降低。由于中间产物 CS_3^- 分解生成 S^{2-} , S^{2-} 再进一步水解成 HS^- , 218 nm 处出现低强度吸收峰。由于丁基黄药不断降解成 CS_2 且在溶液中积累, 206 nm 处 CS_2 的特征吸收峰强度不断增加,而丁基黄药特征吸收峰强度随时间推移不断下降。累积的 CS_2 对微生物有毒副作用,会使微生物细胞失去活性,无法进行正常新陈代谢。

1.2 微生物降解反应器

程铨等^[10-11]采用上流式厌氧好氧一体化生物滤池对选矿模拟废水中黄药进行处理,发现该滤池具备良好的降解能力,以乙基黄药为唯一碳源进水,该滤池COD去除率为 89.2% ,出水COD浓度在 60 mg/L 以下;正常试验 $\text{pH}=7 \sim 9$,过酸或过碱条件都对滤池降解有很大影响,且滤池中的重金属对有机物降解也有负面影响。

姜彬慧等^[12]采用膜生物反应器(MBR)处理高浓度丁基黄药废水,考察外加碳源投加量、水力停留时间、反应温度等因素对黄药降解能力影响,同时探究黄药降解机理。最佳工艺为:无水乙酸钠投加量 0.5 g/L ,水力停留时间 24 h ,反应温度 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。MBR运行稳定后,出水时COD去除率和黄药降解率皆大

于 94.0% 。对上清液和出水水样进行紫外线扫描,发现 226 与 301 nm 处黄药吸收峰皆消失, 348 nm 处仅有较小过氧化黄原酸盐吸收峰,说明黄原酸盐分解的中间产物是过氧化黄原酸盐。

宋卫锋等^[13]利用序批式生物反应器(SBR)研究了不同种外加碳源对模拟选矿废水中黄药降解影响,结果如图2所示。结果表明:在停留时间 1.5 h 、黄药初始浓度 6 mg/L 条件下,淀粉是最佳外加碳源,此时,黄药降解率为 89.8% 。共基质降解速率常数大小顺序为淀粉>葡萄糖>醋酸钠。

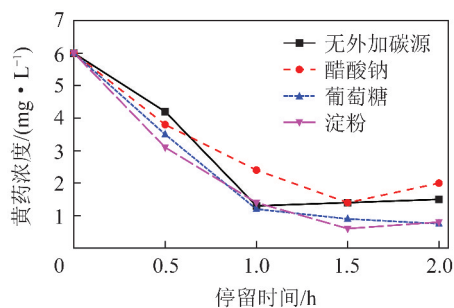


图2 外加碳源对黄药降解效果的影响^[13]

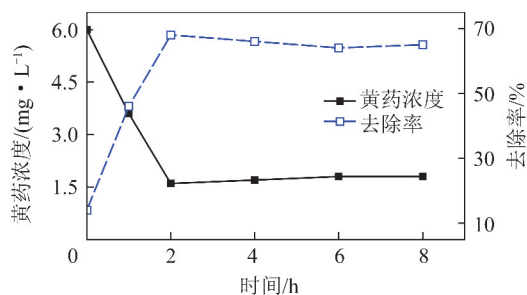
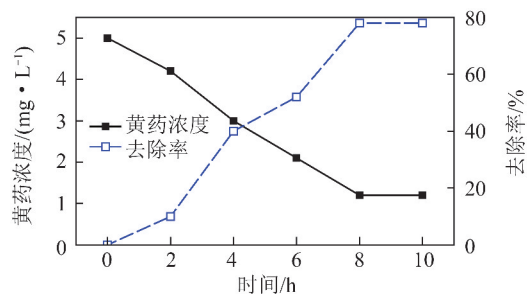
Fig. 2 Effect of additional carbon source on degradation of xanthate^[13]

张新等^[14]采用序批式生物反应器(SBR)对模拟选矿废水中丁基黄药进行处理。对丁基黄药含量、沉降时间、曝气时间和进水方式等参数进行优化后,SBR法处理丁基黄药选矿废水的最佳运行参数为:运行周期 8 h ,包括进水 10 min ,曝气 6 h ,沉降 40 min ,排水 10 min ,间歇 60 min ;进水丁基黄药含量为 100 mg/L 、曝气流量为 100 mL/min 时,出水丁基黄药浓度为 0.04 mg/L ,出水COD为 55 mg/L 。

宋卫锋等^[13,15-16]采用序批式生物反应器(SBR)和生物接触氧化法对浮选废水进行降解能力研究,探讨不同的运行条件对黄药去除效果的影响。发现 24 d 驯化有助于浮选药剂降解,如图3所示。SBR法在最佳停留时间为 2 h 、 $\text{pH}=6 \sim 7$ 、外加碳源葡萄糖添加量为 0.1 g/L 时,降解效果最好。生物接触氧化法对黄药的降解^[17]如图4所示,采用生物接触氧化反应器时,降解效果最佳条件为:停留时间为 8 h ,进水 $\text{pH}=6 \sim 7$,葡萄糖投加量为 0.1 mg/L 。此外,这2种方法承受硫化矿能力皆达到 120 mg/L 。

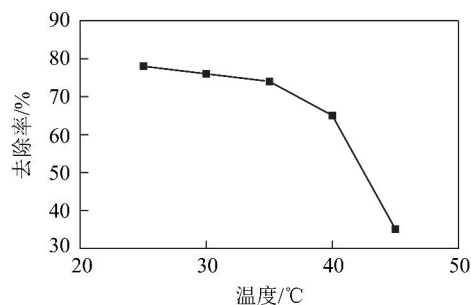
2 黑药的生物降解

1981年于文勇等成功地研制出苯胺黑药,又名二苯胺基二硫代磷酸,是一种高效且选择性优良的捕收剂,广泛应用于浮选工艺。浮选时,会残留在选

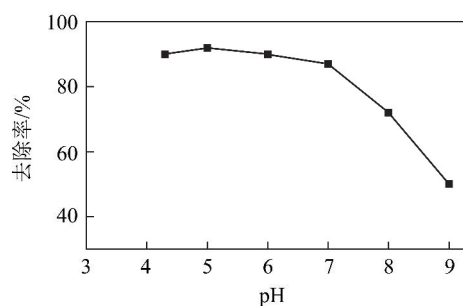
图 3 SBR 法对黄药的降解^[13]Fig. 3 Degradation of xanthate SBR^[13]图 4 生物接触氧化法对黄药的降解^[16]Fig. 4 Degradation of xanthate in bio-contact oxidation reactor^[16]

矿废水中,难于降解。

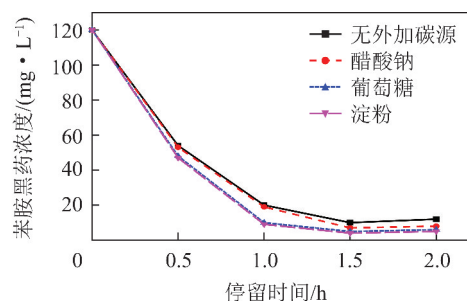
宋卫锋等^[17]分离提取出降解菌株 AFF0039 分泌的苯胺黑药降解酶,并检测酶的活性。同时采用正交设计研究了菌株分泌降解酶的最佳条件,进一步探索了黑药的最佳降解条件,如图 5 所示。在温度 25~40℃,该降解酶具有较高的热稳定性,去除率大于 65%。降解 pH 对苯胺黑药去除率的影响,如图 6 所示。pH=4.3~7 时,降解酶具有较高的酸碱稳定性,去除率大于 85%。菌株 AFF0039 降解苯胺黑药最佳条件为:时间 30 h,温度 35℃,pH=6,此时去除率为 98.61%。菌株 AFF0039 产生降解酶的最佳条件为:时间 12 h,温度 40℃,pH=5,此时降解酶的最大活力为 49.01 μg/(h·mL)。

图 5 降解温度对苯胺黑药去除率的影响^[15]Fig. 5 Effect of temperature on removal rate of aerofloat^[15]

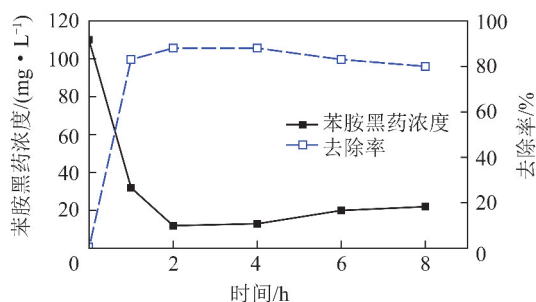
宋卫锋等^[13]采用 SBR 法研究了不同添加碳源对模拟选矿废水中苯胺黑药降解影响,如图 7 所示。

图 6 降解 pH 对苯胺黑药去除率的影响^[17]Fig. 6 Effect of pH on removal rate of aerofloat^[17]

结果表明:在停留时间 2 h、苯胺黑药初始浓度 120 mg/L 条件下,淀粉为添加碳源时,降解效果最佳。苯胺黑药去除率为 96.6%,模拟废水 COD 去除率为 82.3%。共基质对苯胺黑药降解速率常数大小顺序为:淀粉>葡萄糖>醋酸钠。

图 7 外加碳源对苯胺黑药降解的影响^[13]Fig. 7 Effect of additional carbon source on degradation of aerofloat^[13]

宋卫锋等^[13,16]采用 SBR 和生物接触氧化法研究浮选废水降解能力,探讨不同运行条件对苯胺黑药降解影响,如图 8 所示。SBR 法培养驯化 24 d,最佳停留时间为 2 h,pH=6~7,外源葡萄糖添加量为 0.1 g/L 时,降解效果最佳。生物接触氧化法对苯胺黑药的降解如图 9 所示。接触氧化反应器的最佳停留时间为 8 h,进水最佳 pH=6~7,外源葡萄糖添加量为 0.1 g/L 时,降解效果最佳。此外,这 2 种生化方法承受硫化物的能力均达到 120 mg/L。

图 8 SBR 法对苯胺黑药的降解^[13]Fig. 8 Degradation of aerofloat in SBR^[13]

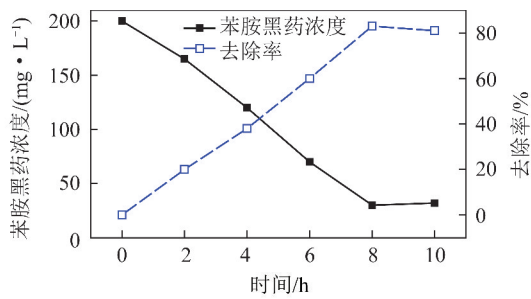


图9 生物接触氧化法对苯胺黑药的降解^[16]
Fig. 9 Degradation of aerofloat in bio-contact oxidation reactor^[16]

3 羟肟酸类药剂的生物降解

羟肟酸及其盐类捕收剂的使用会引入氮元素,造成水体富营养化,影响环境。鄢恒珍等^[18]采用振荡培养箱,研究复合菌对该捕收剂的降解影响,结果见表1。结果表明:在第7天,水杨羟肟酸、苯甲羟肟酸、N-羟基邻苯二甲酰亚胺和H₂₀₅降解率分别为93.3%、86.9%、86.5%和21.9%。前3种捕收剂属于易降解物质,H₂₀₅属于难降解物质,梅光军等^[19]、Zhou等^[20]得到相同的结果。羟肟酸类捕收剂降解反应是一级反应动力学,捕收剂降解速率常数大小排序为: $k(\text{水杨羟肟酸}) > k(\text{苯甲羟肟酸}) > k(\text{N-羟基邻苯二甲酰亚胺}) > k(\text{H}_{205})$ 。

表1 羟肟酸类捕收剂的生物降解性能

Table 1 Biodegradability of hydroxamic acid collectors

药剂	DT-90(降解率达到90%时所需时间)/h	降解率/%
水杨羟肟酸	96	93.3
苯甲羟肟酸	192	86.9
N-羟基邻苯二甲酰亚胺	240	86.5
H ₂₀₅	1 768	21.9

4 松醇油的生物降解

利用松节油生产的松醇油是萜烯醇类有机化合物,俗称二号油,作为起泡剂应用于浮选。萜烯醇类物质在自然条件下很难降解,长期积累会污染环境,威胁水体生物以及人类生命。梁杰慧等^[21]在广东凡口铅锌废矿厂附近土壤中分离提取出降解松醇油细菌KS-1,并对松醇油模拟废水进行降解试验,摸索COD去除率优化条件。菌种生理和形态分析表明:该KS-1菌株为革兰氏阳性好氧菌,细胞呈杆状、芽孢呈椭圆或柱状。16SrDNA序列分析表明:该菌株与Bacillus subtilis AF0907的相似性达到100%,最终鉴定菌株KS-1为枯草芽孢杆菌(Bacil-

lus subtilis AF0907)。采用正交设计优化,KS-1降解菌株降解松醇油模拟废水的最佳条件为:接种量为15%,pH=4,摇床转速为200 r/min,松醇油初始浓度为300 mg/L,反应4 d后COD去除率为65.91%。

梁杰慧等^[21]研究了起泡剂松醇油的生物降解,在广东省某铅锌废矿附近土壤中分离纯化出3株降解松醇油的高效菌株,分别命名为KS-1、KS-2和KS-3。不同菌株对松醇油的去除率如图10所示。KS-1菌株对松醇油的降解效果最好,鉴定该菌株为枯草芽孢杆菌。重点研究了KS-1菌株对实际尾矿选矿废水的处理结果,探索了不同pH、接种量和温度等因素对COD去除率影响。结果表明,菌株KS-1降解实际废水最佳工艺为:接种量为5%,pH=6,温度为25℃。该试验参数48 h内COD浓度降至12.87 mg/L,且搅拌促进降解。

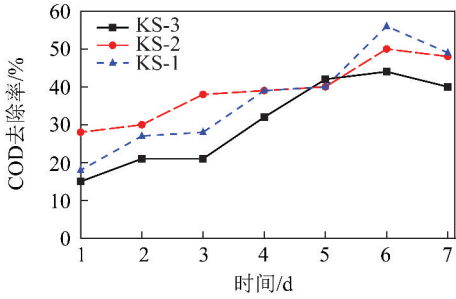


图10 不同菌株对松醇油的去除率^[21]
Fig. 10 Removal rate of pine oil by different strains^[21]

5 研究展望

- 1) 现阶段筛选的选矿药剂降解菌株种类和数量很有限,应多参考借鉴其他难降解有机物生化处理技术,筛选驯化出更高效选矿药剂降解菌株,用于生物降解研究。
- 2) 加强基因组学和酶工程的知识应用,尽快找到不同降解酶对应的基因,利用分子生物学技术开展选矿药剂生化降解的先进技术研究。
- 3) 现有生物降解大多在实验室研究,对实验室模拟废水残留的浮选药剂进行降解,这与生产现场的处理环境和条件有较大差异,应尽快研究出大型的反应设备,开展对实际选矿废水生物降解的应用基础研究。

参考文献(References):

[1] 张萍,孙水裕,徐劲. 一株有机浮选药剂——黄原酸盐降解菌的特性研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(2):53-56.
ZHANG Ping,SUN Shuiyu,XU Jin. Characteristics of a xanthate-

- degrading bacterial strain[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(2): 53-56.
- [2] 陈绍华, 龚文琪, 梅光军, 等. 共基质条件下黄药的生物降解特性研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(9): 60-64.
- CHEN Shaohua, GONG Wenqi, MEI Guangjun, et al. Study on biodegradability of xanthate under the conditions of co-substrate[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(9): 60-64.
- [3] 陈绍华, 龚文琪, 梅光军. 烃基黄药类捕收剂的生物降解性评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 546-553.
- CHEN Shaohua, GONG Wenqi, MEI Guangjun. Evaluation of biodegradability of alkyl xanthates flotation collectors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(2): 546-553.
- [4] CHEN Shaohua, GONG Wenqi, MEI Guangjun, et al. Primary biodegradation of sulfide mineral flotation collectors[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(8): 953-955.
- [5] CHEN Shaohua, GONG Wenqi, MEI Guangjun, et al. Quantitative structure - biodegradability relationship of sulfide mineral flotation collectors[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 101: 112-115.
- [6] ZHONG Xisun, FORSLING W. The degradation kinetics of ethyl-xanthate as a function of pH in aqueous solution[J]. Minerals Engineering, 1997, 10(4): 389-400.
- [7] 夏丽娟, 胡学伟, 张雅琳, 等. 选矿废水中黄药的生化处理[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 21-26.
- XIA Lijuan, HU Xuewei, ZHANG Yalin, et al. Biological treatment of xanthate in floatation wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 21-26.
- [8] 林伟雄, 孙水裕, 黄绍松, 等. 生物膜法处理硫化铅锌矿尾矿库外排废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 67-71.
- LIN Weixiong, SUN Shuiyu, HUANG Shaosong, et al. Biofilm process for treating Pb-Zn sulfide ore tailing wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 67-71.
- [9] 鄢恒珍, 龚文琪, 梅光军, 等. 共基质代谢条件下丁基黄药的生物降解实验研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(4): 1-5.
- YAN Hengzhen, GONG Wenqi, MEI Guangjun, et al. Study on co-metabolism biodegradation of butyl xanthate[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(4): 1-5.
- [10] 程铤, 林海, 朱亦珺, 等. 厌氧好氧一体生物滤池处理选矿废水的研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 68-72.
- CHENG Huang, LIN Hai, ZHU Yijun, et al. Treating ore floatation wastewater by an anaerobic-aerobic biological filter[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(7): 68-72.
- [11] CHENG Huang, LIN Hai, HUO Hanxin, et al. Continuous removal of ore floatation reagents by an anaerobic-aerobic biological filter[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 255-261.
- [12] 姜彬慧, 黄娅琼, 王宇佳, 等. 采用膜生物反应器处理丁基黄药废水[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 3072-3079.
- JIANG Binhui, HUANG Yaqiong, WANG Yujia, et al. Treatment of butyl xanthogenate wastewater by membrane bioreactor[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 3072-3079.
- [13] 宋卫锋, 林梓河, 罗丽丽, 等. SBR法处理选矿废水的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 509-514.
- SONG Weifeng, LIN Zihé, LUO Lili, et al. Study on influencing factors of flotation wastewater treatment with SBR method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(2): 509-514.
- [14] 张新, 周洪波. 序批式生物反应器处理选矿黄药废水的研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(1): 108-111, 132.
- ZHANG Xin, ZHOU Hongbo. Treatment of butyl xanthate wastewater by sequencing batch reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(1): 108-111, 132.
- [15] 宋卫锋, 林梓河, 罗丽丽, 等. 外加碳源对选矿废水浮选药剂生物降解效果的影响[J]. 化工环保, 2011, 31(3): 218-221.
- SONG Weifeng, LIN Zihé, LUO Lili, et al. Effects of external carbon resource on biodegradation of flotation reagents in ore milling wastewater[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2011, 31(3): 218-221.
- [16] 宋卫锋, 唐铁柱, 林梓河, 等. 生物接触氧化法处理选矿废水的影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2): 603-607.
- SONG Weifeng, TANG Tiezhu, LIN Zihé, et al. Some influencing factors of flotation wastewater treatment with bio-contact oxidation method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(2): 603-607.
- [17] 宋卫锋, 武纯, 林丽婷, 等. 苯胺黑药降解菌降解条件优化及降解酶特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(35): 13486-13488.
- SONG Weifeng, WU Chun, LIN Liting, et al. Optimization of degradation conditions for degrading bacteria of dianilindithiophosphoric acid and properties of degrading enzyme[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(35): 13486-13488.
- [18] 鄢恒珍, 龚文琪, 梅光军, 等. 羟肟酸类捕收剂的生物降解性能及机理研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 89-91.
- [19] YAN Hengzhen, GONG Wenqi, MEI Guangjun, et al. Study on biodegradability and mechanism of hydroxamic acid collectors[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 89-91.
- [19] 梅光军, 陈晓东, 龚文琪, 等. 羟肟酸类捕收剂的好氧生物降解性评价[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3): 57-61.
- MEI Guangjun, CHEN Xiaodong, GONG Wenqi, et al. Evaluation of aerobic biodegradability of hydroxamic acid collector[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(3): 57-61.
- [20] ZHOU Wenjun, GONG Wenqi, MEI Guangjun. Effect of co-metabolism on biodegradation of hydroxamic acid[C]//International conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE2011), Lushan: [s. n.], 2011: 5900-5903.
- [21] 梁杰慧, 孙水裕, 杜青平, 等. 松醇油降解菌的分离鉴定及降解条件优化[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3278-3284.
- LIANG Jiehui, SUN Shuiyu, DU Qingping, et al. Isolation and identification of pine oil degrading bacteria and optimization of degrading conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3278-3284.