

浮选废水中苯胺黑药与外加基质的共代谢特性

宋卫锋, 严 明, 孙水裕

(广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘 要: 采用自制 SBR 系统研究不同基质与苯胺黑药的共代谢特性。结果表明: 在不同基质种类和比例条件下, SBR 系统的好氧反应时间为 3 h, 反应过程均可基本完成; 几种不同共代谢基质促进苯胺黑药降解效率从高到低的顺序为蔗糖、乙酸钠、葡萄糖、淀粉和维生素 C; 当基质与苯胺黑药的质量比为 1:1 时, 苯胺黑药的降解效率最高; 以蔗糖为共代谢基质的出水 COD 为 70 mg/L, 去除率达到 87.3%, 苯胺黑药出水浓度为 3.7 mg/L, 降解率达到 98%; 以蔗糖与乙酸钠作为混合基质时, 出水 COD 为 84.70 mg/L, COD 去除率为 84.6%, 苯胺黑药浓度为 13.55 mg/L, 苯胺黑药降解率为 93.23%; 对苯胺黑药与蔗糖质量比为 1:1 时的实验数据进行动力学分析, 得到动力学参数米氏常数 $K_m = (1.6008 \pm 0.080)$ mg/L、 $v_{\max} = (0.264 \pm 0.006)$ mg/(L·min)。

关键词: 苯胺黑药; 共代谢; SBR; 动力学

中图分类号: X753

文献标志码: A

Co-metabolism characteristics of aniline aerofloat with different substrates in flotation wastewater

SONG Wei-feng, YAN Ming, SUN Shui-yu

(School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Self-made sequencing batch reactor (SBR) was used to study the co-metabolism characteristics of aniline aerofloat with different substrates. The results show that the aerobic reaction process can be completed in 3 h regardless of substrate sort and the ratio of aniline aerofloat to substrate; the order of promoting degradation from high to low is as follows: sucrose, sodium acetate, glucose, amylum and vitamin C. When the mass ratio of aniline aerofloat to substrate is 1:1, the degradation efficiency of the aniline aerofloat is the highest, the COD in the effluent is 70 mg/L. When co-metabolism substrate is sucrose, the removing rate of COD is 87.3%, the concentration of aniline aerofloat in the effluent is just 3.7 mg/L and the degradation rate reaches 98%. The COD and aniline aerofloat in the effluent is 84.7 mg/L and 13.55 mg/L respectively when sucrose and sodium acetate are mixed as the compound substrate, 84.6% of COD is removed, and 93.23% of aniline aerofloat is degraded. The modified Michaelis-Menten equation was used to analyze the data at mass ratio of aniline aerofloat to substrate being 1:1 from the sucrose experiment, and the kinetics parameters are obtained as K_m (1.6008±0.080) mg/L and $v_{\max}$ (0.264±0.006) mg/(L·min).

Key words: aniline aerofloat; co-metabolism; sequencing batch reactor; kinetics

有色金属矿山浮选废水具有水量大、pH 值高、含有机物和重金属、生化降解性差和起泡性强等明显特征, 其中的污染物种类多、毒性强, 对环境非常敏感。我国的选矿废水排放量超过 10 亿 t/a, 是主要的工业

污染行业。近年来, 浮选废水处理技术有了较大发展, 目前主要采用物理法和化学法^[1]。苯胺黑药(硫代磷酸二苯胺, $(C_6H_5NH)_2P(S)SH$)是硫化矿有效的浮选捕收剂, 被广泛应用于浮选作业中, 对 COD 贡献大, 不

基金项目: 广东省重大科技专项资助项目(2010B080703035)

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-10-25

通信作者: 宋卫锋, 副教授, 博士; 电话: 18929528006; E-mail: weifengsong@263.net

易分解,是选矿废水中的难降解物质^[2-3]。

共代谢指原本不能被代谢的物质在外界提供碳源和能源的情况下被代谢的现象^[4],在难降解污染物与外加基质共代谢反应中,外界提供的碳源称为一级基质,用于微生物细胞增长,并为微生物细胞活动提供能量;被共代谢的物质称为二级基质,不用于微生物细胞增长,也不能为微生物细胞活动提供能量。ZIAGOVA 等^[5]的研究表明:在有葡萄糖存在的条件下,2,4-二氯苯酚和4-氯甲酚能够很容易地被葡萄糖菌共代谢。TOMKUO 等^[6]等的研究表明:用甲苯作为共代谢底物,在微生物的共代谢作用下可以有效地提高三氯乙烯的降解效率。VERCE 等^[7]研究了1,2-二氯乙烯在以氯乙烯为初级基质的好氧培养基中共代谢降解情况,发现共代谢对难降解二氯乙烯的降解有显著的促进作用。现有的共代谢^[8-14]研究表明:共代谢是降解污染物的一个有效途径,对于不同的难降解污染物,不同基质的降解效果也不同,确定合适的共代谢基质,是共代谢研究的重要内容之一。苯胺黑药是浮选废水中的主要难降解有机物,关于苯胺黑药的共代谢研究尚未见报道,共代谢为解决含苯胺黑药的废水处理问题提供了一种新思路。SBR 生物反应器以其运行稳定、处理效率高、耐冲击负荷及结构简单等诸多优点,在水处理工艺优化方法中得到广泛应用。

本文作者以浮选废水中主要有机药剂苯胺黑药为研究对象,利用 SBR 生物反应器,选用合适的共代谢基质对苯胺黑药进行生物降解处理,为选矿废水的处理提供新途径,为工程实践提供理论依据。

1 实验

1.1 水样

实验用浮选废水根据实际选矿废水经过混凝沉淀+活性炭吸附预处理后的水质情况进行模拟,各项指标尽量保持一致。为防止水样在保存过程中的水质变化,废水均为新鲜配制,其中苯胺黑药浓度为 200 mg/L,加入如下营养液(mg/L): NH_4Cl 25、 KH_2PO_4 5、 MgSO_4 5、 FeSO_4 2、 CaCl_2 2。

1.2 实验装置与方法

1.2.1 主要仪器和药品

紫外分光光度计、COD 快速消解仪、光学显微镜、蠕动泵、充氧泵;苯胺黑药为工业纯(95%,质量分数),蔗糖、葡萄糖、淀粉、维生素 C 和乙酸钠均为

优级纯。

1.2.2 SBR 系统

用有机玻璃材料定制相同规格的圆桶 SBR 反应器,直径 25 cm,深度 40 cm,有效容积 15 L,中间高度开排水孔,进水 6 L, SBR 采用间歇式进水,水力停留时间恒定。实验装置见图 1。

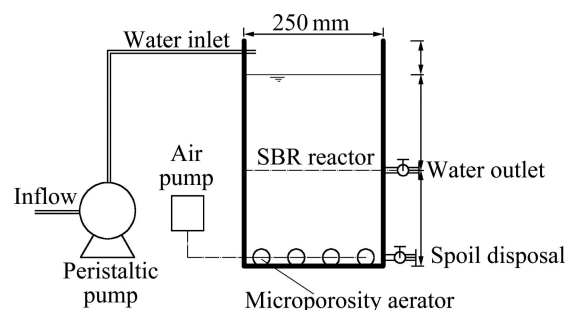


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

反应器接种污泥取自广州沥滘污水处理厂二沉池沉淀污泥, SBR 反应器正常运行期间污泥浓度为 21.822 g/L。

1.2.3 实验方法

1) 反应器运行条件: 实验室温度 20 ℃ 左右, 湿度约 75%, SBR 反应器位于阴暗处, 避免阳光直接照射, 运行周期 8 h, 其中曝气 6 h, 沉淀 1 h, 排水 0.5 h, 进水 0.5 h。充氧泵空气量为 8 L/min (2×4 L/min), 从池底部曝气, 曝气运行溶解氧为 3 mg/L 左右, 进水 COD 为 500 mg/L 左右, 通过 SBR 反应器底部的排泥口排放污泥, 根据系统运行情况, 确定每 7 d 排放一次污泥, 沉淀出水完成后排泥, 每次 500 mL。

2) 污泥驯化: 二沉池活性污泥在 SBR 反应器中闷曝 24 h 以去除污泥中的有机物, 然后在反应器中加入葡萄糖、无机营养盐和苯胺黑药, 进水 6 L, 葡萄糖初始浓度为 500 mg/L, 然后按比例逐渐降低其浓度至添加量为 0, 苯胺黑药的浓度由 0 按比例逐渐增加至 200 mg/L, 在驯化过程中, 每天检测进水和出水水质, 检测微生物活性和系统运行状况。经过 40 d 的驯化, 进水 COD 为 530 mg/L 左右, 苯胺黑药浓度为 200 mg/L, 系统趋于稳定, 表现出一定的降解效果。

3) 共代谢实验: 实验中设置 6 套规格相同的 SBR 反应系统, 分别编号为 0、1、2、3、4 和 5, 各个系统均在相同条件下运行, 用相同的驯化方法驯化至稳定运行。0 号 SBR 系统作为对照组, 只加含苯胺黑药和营养液成分的废水, 1、2、3、4 和 5 号 SBR

系统分别加入蔗糖、葡萄糖、可溶性淀粉、维生素 C 和乙酸钠作为外加基质。实验中改变单一基质与苯胺黑药的比例,研究不同条件下的共代谢情况,以确定最佳共代谢基质及其投加比例。每组实验重复进行 5 次,以平均值作为实验结果。每次改变进水条件之前,均要空载闷曝 24 h 后再进行下一阶段实验,以减小污泥对实验的干扰。在确定了最佳单一共代谢基质之后,还对多种混合基质的共代谢情况进行了实验。

1.2.4 分析方法

水样:沉淀后取上清液,用定性滤纸过滤水中的悬浮颗粒杂质后,再进行相应的分析。

COD_{Cr}:重铬酸钾法。

苯胺黑药浓度:苯胺黑药在紫外区的最大吸收波长是 230 nm,测定 SBR 反应系统出水的吸光度,从而确定苯胺黑药浓度。苯胺黑药的标准曲线方程为 $A=0.0515x+0.1043$, $R^2=0.999$,工作曲线的有效浓度范围是 0~40 mg/L,有效浓度范围以外的水样,稀释适当的倍数,测其紫外吸光度,再进行苯胺黑药浓度计算。

2 结果与讨论

2.1 SBR 系统的启动与驯化

驯化过程中,逐渐降低葡萄糖浓度,同时增加苯胺黑药浓度,经过 40 d 的驯化培养,进水中葡萄糖浓度为 0 mg/L,苯胺黑药浓度为 200 mg/L。系统稳定运行,出水水质基本不变,COD 去除率达到 64.3%,苯胺黑药的降解率为 93.4%,表明系统驯化成功。驯化过程中,对进水和出水水质进行监测,及时了解系统运行情况。显微镜观察发现,系统运行初期,生物群落丰富多样、生物活性强、游离细菌数量多、代谢速率高、出水较好,随着苯胺黑药浓度的增加,系统微生物种类逐渐变得单一,数量有所减少,出现大量丝状菌和短杆菌,且逐步成为种群主体生物。

驯化过程中,进水葡萄糖和苯胺黑药的比例在不断变化,但进水 COD 一直稳定在 500 mg/L 左右,与实际选矿废水基本一致。驯化期间,进水和出水 COD 及苯胺黑药浓度分别见图 2 和 3。

由图 2 和 3 知,驯化初期苯胺黑药几乎没有被降解,4 d 后开始表现出降解效果,降解效率较高。随着苯胺黑药浓度的增加,出水中苯胺黑药始终保持在 13.2 mg/L 左右,但出水 COD 在 180 mg/L 左右保持稳定,COD 去除率约为 64%,可能是系统对苯胺黑药降

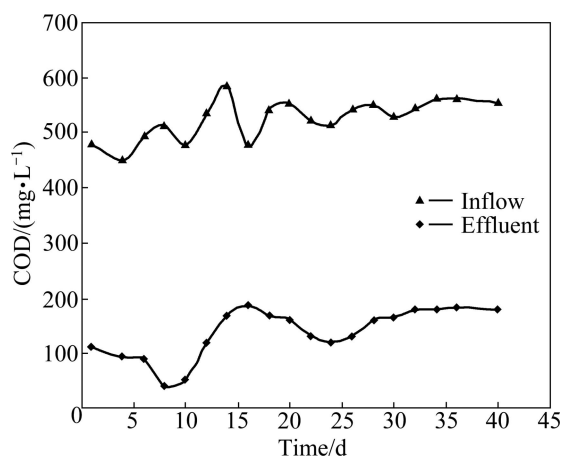


图 2 SBR 系统驯化期间进水和出水 COD 随时间的变化

Fig. 2 COD changes of inflow and effluent during domestication of SBR system

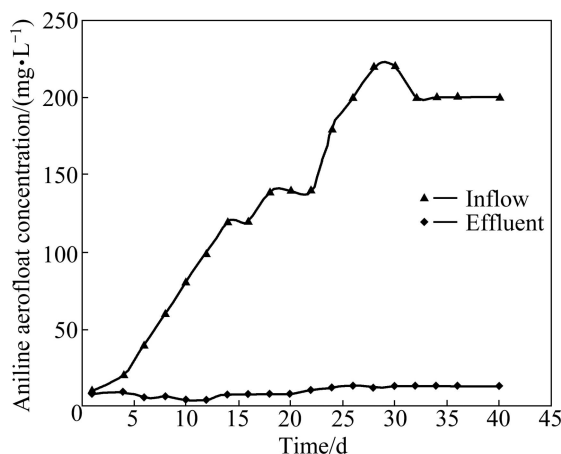


图 3 驯化期间进水和出水苯胺黑药浓度随时间的变化

Fig. 3 Changes of aniline aerofloat concentration inflow and effluent during domestication of SBR system

解不彻底,产生了难降解的中间产物,导致出水 COD 偏高。因此,出水 COD 更能真实地反映系统对苯胺黑药的降解情况,但是出水苯胺黑药的浓度也是系统降解效率的重要参数。

2.2 苯胺黑药与不同外加单一基质的共代谢

在共代谢实验中,保持模拟浮选废水中苯胺黑药浓度为 200 mg/L 不变,在编号为 1、2、3、4 和 5 的 SBR 系统中,分别以蔗糖、葡萄糖、淀粉、维生素 C 和乙酸钠作为共代谢基质,改变共代谢基质与苯胺黑药的质量比为 3:1、2:1、1:1、1:2 和 1:4,实验结果见表 1。

由表 1 可见,进水中共代谢基质与苯胺黑药的质量比是影响苯胺黑药降解效率的主要因素。当共代谢

表 1 不同单一基质与苯胺黑药在不同质量比条件下的共代谢结果

Table 1 Co-metabolism degradation results of aniline aerofloat with different single substances at different mass ratios

Mass ratio	COD/(mg·L ⁻¹)					Concentration of aniline aerofloat/(mg·L ⁻¹)				
	Sucrose	Glucose	Amylum	Vitamin C	Acetate	Sucrose	Glucose	Amylum	Vitamin C	Acetate
3:1	110.0	183.3	176.7	243.4	156.7	5.45	6.88	11.30	37.60	17.5
2:1	153.3	283.3	266.7	233.3	206.7	10.80	12.90	15.50	32.20	20.2
1:1	72.0	85.0	125.3	195.0	77.3	3.67	6.21	7.63	10.80	10.8
1:2	90.3	123.7	153.7	178.3	95.0	5.44	7.14	9.20	9.16	14.4
1:4	170.0	180.0	206.7	193.3	140.0	9.31	11.40	13.30	13.80	18.6

基质与苯胺黑药的质量比较高时, 基质过多, 苯胺黑药对关键酶的竞争处于劣势; 当共代谢基质比例较低时, 基质过少, 不能满足大量微生物生长的需要, 不能诱导出大量有活性的关键酶; 当基质与苯胺黑药的质量比接近 1:1 时, 生长基质和目标污染物对关键酶的分享达到最为合理, 既满足了微生物生长的需要, 又能最大限度地降解目标污染物。

由表 1 可知: 蔗糖、葡萄糖、淀粉和乙酸钠对苯胺黑药都表现出了共代谢作用, 能诱导微生物产生关键酶, 在一定程度上促进了苯胺黑药的降解, 出水 COD 较不加基质的情况要低, 表明共代谢基质促进了苯胺黑药降解过程中间代谢产物的降解, 关键酶的主要作用是提高中间产物的降解效率; 维生素 C 基本上没有表现出促进苯胺黑药降解的作用, 当比例较高时, 与不添加基质相比, 反而增大了微生物负荷, 出水 COD 更高了。因此, 共代谢基质与苯胺黑药的最佳质量比为 1:1, 5 种共代谢基质对苯胺黑药的共代谢效率由高到低的顺序为蔗糖、乙酸钠、葡萄糖、淀粉和维生素 C。

在 120 倍光学显微镜下观察系统微生物状态, 可见, 微生物活性强, 且比较稳定, 种群以短杆状菌居多, 逐渐取代了原有的丝状微生物种群, 占据优势地位, 各 SBR 系统在实验过程中均运行良好。

2.3 最佳单一共代谢基质

以共代谢基质与苯胺黑药质量比为 1:1 加入反应系统中, 每间隔 30 min 取系统水样, 测定水中 COD 和苯胺黑药的浓度。图 4 和 5 所示分别是各共代谢基质与苯胺黑药的质量比为 1:1 时 COD 和苯胺黑药的降解情况。SBR 系统对苯胺黑药的降解经历 3 个过程: 反应开始前 60 min, 生物污泥迅速吸附水中的污染物, 污染物浓度迅速降低; 第 60 min 到 150 min, 一部分污染物在吸附的污泥表面被微生物共代谢降解, 另一部分污染物被释放出来, 进入水中后又又被吸附降

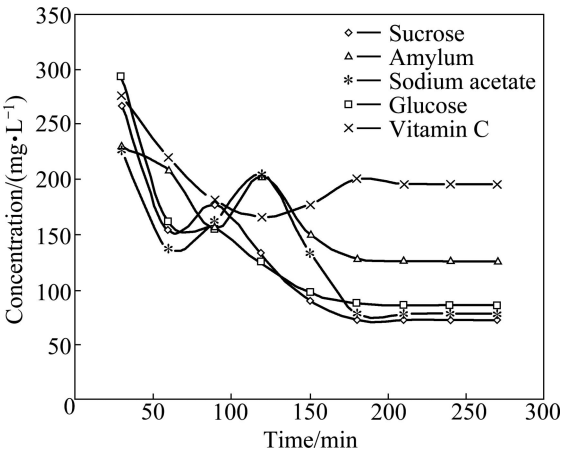


图 4 共代谢基质与苯胺黑药质量比为 1:1 时的 COD 降解曲线

Fig. 4 Degradation curves of COD at mass ratio of co-metabolism substance to aniline aerofloat being 1:1

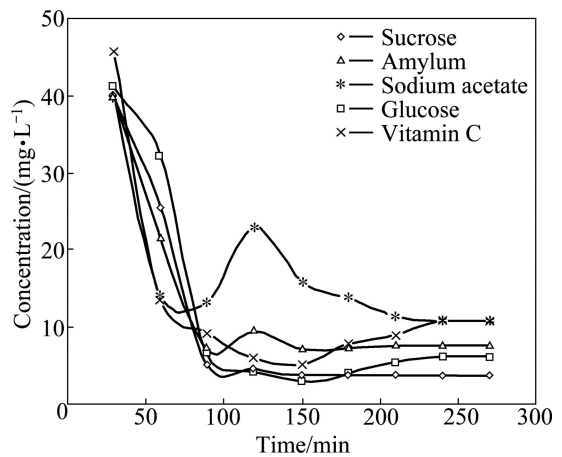


图 5 共代谢基质与苯胺黑药质量比为 1:1 时苯胺黑药的降解曲线

Fig. 5 Degradation curves of aniline aerofloat at mass ratio of co-metabolism substance to aniline aerofloat being 1:1

解; 当反应进行到 150 min 后, 水中污染物基本被降解, 水质基本稳定。

从图 4 苯胺黑药共代谢降解情况可知, 3 h 左右后, SBR 反应系统中反应已经基本完成, 微生物的活性高, 反应速率快。蔗糖与苯胺黑药质量比为 1:1 时废水的共代谢降解情况如图 6 所示。可见, 出水 COD 保持在 70 mg/L 左右, 去除率达到 87.3%, 苯胺黑药出水浓度为 3.7 mg/L, 降解率达到 98%, 达到国家污水综合排放标准的第二类污染物最高允许排放浓度的一级标准, 满足浮选废水的回用和排放要求。值得一提的是, 出水 COD 相对于苯胺黑药浓度来说仍很高, 再次说明苯胺黑药在共代谢降解过程中产生难降解的中间产物, 致使出水 COD 高。

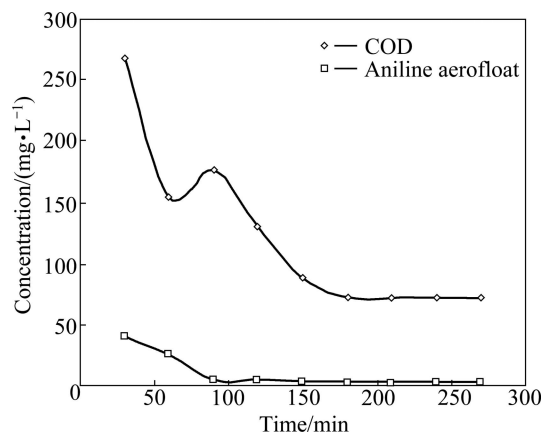


图 6 蔗糖与苯胺黑药质量比为 1:1 时废水的共代谢降解曲线
Fig. 6 Co-metabolism degradation curves of waste water at mass ratio of sucrose and aniline aerofloat being 1:1

2.4 苯胺黑药与混合外加基质的共代谢

在混合基质共代谢实验中, 分别将各单一基质两

者或三者混合, 保持共代谢基质与进水中苯胺黑药的质量比为 1:1, 实验结果见表 2。

由表 2 可见, 在控制共代谢基质与苯胺黑药质量比为 1:1 的条件下, 蔗糖与乙酸钠混合基质与苯胺黑药共代谢降解的效果最好, 出水 COD 为 84.70 mg/L, 苯胺黑药浓度为 13.55 mg/L, COD 去除率达到 84.6%, 苯胺黑药的降解率达到 93.23%, 出水 COD 满足国家污水综合排放标准的第二类污染物最高允许排放浓度的一级标准要求。图 7 所示为蔗糖与乙酸钠混合基质与苯胺黑药共代谢降解曲线。由图 7 可知, 与单一蔗糖共代谢降解相比, 微生物污泥对苯胺黑药的吸附过程更长, 当降解进行至 90~120 min 时, 微生物污泥对污染物同样有释放作用, 随后很快即被降解, 苯胺黑药的降解作用主要发生在污泥吸附过程中。这可能是在两种混合基质存在的条件下, 诱导出关键酶, 且关键酶主要在苯胺黑药吸附过程中发生作用, 污染物得到去除。此外, 通过微生物镜检观察, 在这一阶段系统中线状菌数量有所减少, 且活性没有单一蔗糖基质系统的高。系统出水的 pH 值检测结果表明, 出水略显碱性, 可能是由于乙酸钠的水解作用, 使系统 pH 值偏高, 乙酸钠增强了苯胺黑药降解过程中产生中间产物的分解作用, 但与蔗糖单一共代谢相比, 苯胺黑药的降解率有所下降。

2.5 共代谢降解动力学

根据 SBR 反应过程的特点, 反应池内微生物的浓度是变化的, 但由于一个运行周期内微生物的总量变化不大, 因此, 可认为在一个周期内微生物的总量为常数。苯胺黑药降解动力学研究的进水条件为苯胺黑

表 2 不同混合基质与苯胺黑药的共代谢降解结果

Table 2 Co-metabolism degradation results of aniline aerofloat with different mixed substances at different mass ratios

Mass ratio of compound substance to aniline aerofloat	Ratio value	COD in effluent/(mg·L ⁻¹)	COD removal/%	Concentration of aniline aerofloat in effluent/(mg·L ⁻¹)	Degradation rate of aniline aerofloat/%
(Amylum:VitaminC):Aniline aerofloat	(1:1):2	228.00	58.54	10.45	94.78
(Sucrose:VC):Aniline aerofloat	(1:1):2	153.30	72.13	4.15	97.93
(Glucose:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1):2	166.70	69.70	16.15	91.93
(Glucose:VC):Aniline aerofloat	(1:1):2	120.00	78.18	3.90	98.05
(Sucrose:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1):2	84.70	84.60	13.55	93.23
(Amylum:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1):2	126.67	76.97	13.60	93.20
(Amylum:VC:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1:1):3	173.30	68.50	6.70	96.65
(Glucose:VC:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1:1):3	123.40	77.56	4.14	97.93
(Sucrose:VC:Sodium acetate):Aniline aerofloat	(1:1:1):3	102.00	81.45	18.80	90.60

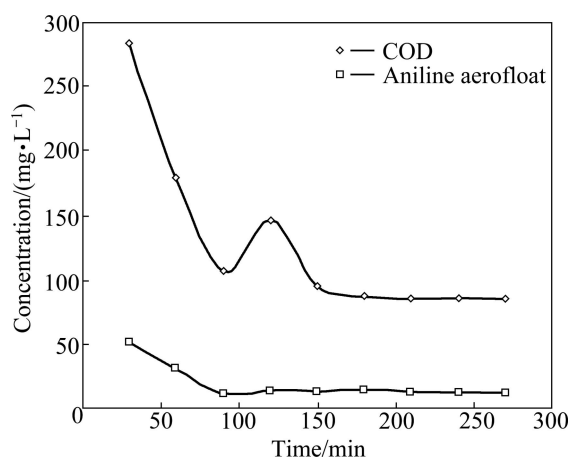


图7 蔗糖与乙酸钠混合基质与苯胺黑药共代谢降解曲线

Fig. 7 Co-metabolism degradation curves of waste water at compound substrate of sucrose and sodium acetate

药与蔗糖以质量比 1:1 进水,实验开始后,每隔 15 min 取样测定混合水样的 COD,进入曝气阶段后,池内发生好氧反应,有机物去除过程符合米门方程,可用改良的 Michaelis-Menten 方程描述,其具体形式为

$$\frac{1}{v_i} = \frac{K_m}{v_{\max}(\rho_i - \rho_{\min})} + \frac{1}{v_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\min}$ 为最终降解出水苯胺黑药的浓度。测定不同时刻的浓度 ρ_i 及其对应的降解速率 v_i , 求出二者的倒数,以 $1/v_i$ 对 $1/(\rho_i - \rho_{\min})$ 作图,即 Lineweaver-Burk 作图法,可得一直线,直线在纵轴上截距为 $1/v_{\max}$ 、在横轴上截距为 $-1/K_m$,直线的斜率为 $K_m/v_{\max}$,量取直线在两坐标轴上的截距就可求出 K_m 和 $v_{\max}$ 。由此得到 5 次平行实验的 K_m 、 $v_{\max}$ 及相关系数 R^2 ,结果分别为米氏常数 $K_m = (1.6008 \pm 0.080)$ mg/L、 $v_{\max} = (0.264 \pm 0.006)$ mg/(L·min), $\rho_{\min} = (3.712 \pm 0.012)$ mg/L 和 $R^2 = (0.9579 \pm 0.010)$ 。

3 结论

1) 根据实际生产中浮选废水的特点,对浮选废水进行人工模拟,通过 40 d 的驯化培养,出水基本稳定,微生物能代谢降解一部分苯胺黑药,COD 去除率约为 64%;添加外加基质能够提高污染物的去除效率,SBR 系统最佳曝气运行时间为 3 h,且当添加基质与苯胺黑药的质量比为 1:1 时,共代谢作用最好,去除效率最高。

2) 进水苯胺黑药浓度均保持在 200 mg/L,单一外

加基质与苯胺黑药进行共代谢研究表明,各种基质对苯胺黑药的降解效果由高到低的顺序为蔗糖、乙酸钠、葡萄糖、淀粉和维生素 C,当蔗糖与苯胺黑药以质量比 1:1 共代谢降解时,出水 COD 保持在 70 mg/L 左右,去除率达到 87.3%,苯胺黑药出水浓度为 3.7 mg/L,降解率达到 98%,对浮选废水的回用或排放十分有利。

3) 保持苯胺黑药与共代谢基质量比为 1:1,添加不同混合基质,研究苯胺黑药的降解情况,结果表明蔗糖与乙酸钠两种基质混合与苯胺黑药共代谢降解效果最好,出水 COD 为 84.7 mg/L,苯胺黑药浓度为 13.55 mg/L,COD 和苯胺黑药的去除率分别达到 84.6%和 93.23%。

4) 胺黑药与蔗糖以质量比 1:1 进水,对其降解动力学方程进行拟合,得到其动力学参数米氏常数 $K_m = (1.6008 \pm 0.080)$ mg/L, $v_{\max} = (0.264 \pm 0.006)$ mg/(L·min), $\rho_{\min} = (3.712 \pm 0.012)$ mg/L 和 $R^2 = (0.9579 \pm 0.010)$ 。

REFERENCES

- [1] 谢光炎,孙水裕,宁寻安,刘如意.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 Guang-yan, SUN Shui-yu, NING Xun-an, LIU Ru-yi. Treatment and reuse of wastewater from a sulphide ore float plant [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(2): 67-70.
- [2] 顾泽平,孙水裕,肖华花. Fenton 试剂处理选矿废水的实验研究[J]. 水资源保护,2006,7(4): 82-84.
GU Ze-ping, SUN Shui-yu, XIAO Hua-hua. Experimental study on treatment of beneficiation wastewater by Fenton reagent [J]. Water Resources Protection, 2006, 7(4): 82-84.
- [3] 刘见峰. 铅锌硫化矿浮选废水生化深度处理中试研究[D]. 广州: 广东工业大学,2010: 6.
LIU Jian-feng. Pilot study on the biochemical deep treatment of Pb-Zn sulfide ores floatation wastewater [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2010: 6.
- [4] KOCAMEMI B A, CECEN F. Biological removal of the xenobiotic trichloroethylene (TCE) through cometabolism in nitrifying systems [J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 430-433.
- [5] ZIAGOVA M, KYRIAKOU G, LIAKOPOULOU-KYRIAKIDES M. Cometabolism of 2, 4-dichlorophenol and 4-Cl-m-cresol in the presence of glucose as an easily assimilated carbon source by *Staphylococcus xylosus* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163: 383-390.
- [6] TOMKUO M C, LIANQ K F, FAN K C. Pilot studies for in-situ aerobic cometabolism of trichloroethylene using toluene-vapor as the primary substrate [J]. Water Research, 2004, 38: 4125-

- 4134.
- [7] VERCE M F, GUNSCH C K, DANKO A S, FREEDMAN D L. Cometabolism of cis-1,2-dichloroethene by aerobic cultures grown on vinyl chloride as the primary substrate [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36: 2171–2177.
- [8] 孙剑辉, 梁志伟, 孙靖宇. 不同共代谢基质下厌氧生物降解间二苯酚的研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 5(5): 24–26.
SUN Jian-hui, LIANG Zhi-wei, SUN Jing-yu. Study on resorcinol anaerobic biodegradation with different co-metabolism substances [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 5(5): 24–26.
- [9] LUO Wei, ZHAO Yu-hua, DING Hai-tao, LIN Xiao-yan, ZHANG Hua-bao. Cometabolic degradation of bensulfuron-methyl in laboratory conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158: 208–214.
- [10] 王淑红, 马邕文, 万金泉. 不同基质共代谢降解 2, 4, 6-三硝基苯酚的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(3): 479–484.
WANG Shu-hong, MA Yong-wen, WAN Jin-quan. Study on co-metabolism biodegradation of 2, 4, 6-trinitrophenol with different substrates [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(3): 479–484.
- [11] 魏晓雪, 郝文静, 张云飞, 郭栋生. 共代谢深度处理焦化废水研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 70–72.
WEI Xiao-xue, HAO Wen-jing, ZHANG Yun-fei, GUO Dong-sheng. Study on the coking waste water treated by co-metabolism system [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(10): 70–72.
- [12] WAHMAN D G, KATZ L E, SPEITEL Jr G E. Trihalomethane cometabolism by a mixed-culture nitrifying biofilter [J]. American Water Works Association, 2006, 98: 48–60.
- [13] WANG S J, LOH K C, CHUA S S. Prediction of critical cell growth behavior of *Pseudomonas putida* to maximize the cometabolism of 4-chlorophenol with phenol and sodium glutamate as carbon sources [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 32: 422–430.
- [14] HAN Y L, TOM KUO M C, TSENG I C, LU C J. Semicontinuous microcosm study of aerobic cometabolism of trichloroethylene using toluene [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148: 583–591.
- [15] VERCE M F, FREEDMAN D L. Modeling the kinetics of vinyl chloride cometabolism by an ethane-grown *Pseudomonas* sp [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2000, 71: 274–285.
- [16] WANG S J, LOH K C. Growth kinetics of *Pseudomonas putida* in cometabolism of phenol and 4-chlorophenol in the presence of a conventional carbon source [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2000, 68: 437–447.

(编辑 陈卫萍)