

微电场强化生物除磷过程实验研究

汤 兵¹, 石太宏², 王五洲¹

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要 利用惰性电极形成的外加电场对强化生物除磷的效果进行了研究。实验采用两套结构尺寸完全一致的反应器进行对比实验, 确定生物除磷过程适宜的工况条件, 测定了在各种实验条件下水相及剩余污泥中磷含量的变化情况。在有无外加电场的情况下, 对生物除磷的动力学参数进行了比较。实验结果表明: 电场的作用促进厌氧放磷, 同时也促进好氧吸磷, 相应的动力学参数均有明显的提高。

关键词 微电场; 生物除磷; 动力学参数; 惰性电极

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2007)06-0040-04

Experimental study on enhanced biological phosphorus removal with micro electric field

TANG Bing¹, SHI Tai-hong², WANG Wu-zhou¹

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The effects of enhanced biological phosphorus removal with electric field formed by inert electrode were studied. Parallel experiments were carried out by two bio-reactors which had the same structure and size to determine the suitable conditions of phosphorus removal, and the change of phosphorus content both in aqueous phase and surplus sludge was determined under different experimental conditions. The dynamic parameters of biological phosphorus removal were compared under the conditions with or without electric field. The results showed that the electric field could promote releasing phosphorous under anaerobic condition as well as absorbing phosphorous under aerobic condition, and corresponding dynamic parameters increased obviously.

Key words: micro electric field; biological phosphorus removal; dynamic parameters; inert electrode

由于水体富营养化趋势的加重, 高效去除废水中的磷日益显得重要。目前常用的废水除磷方法包括化学除磷和生物除磷。化学除磷是利用 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子与磷酸盐形成难溶的金属磷酸盐沉淀而除去, 而生物除磷则是利用微生物对磷的超量吸收形成剩余污泥而除去。化学除磷需要消耗大量的沉淀剂, 也易形成二次污染, 生物除磷成本低廉, 比较适合于低浓度含磷废水的处理。对于生物除磷的机理, 迄今已经作过大量的研究^[1-3], 目前总的解释是聚磷菌在厌氧条件下释放出磷, 而在好氧情况下则超量吸磷。基于该生物除磷机理而建立的具有脱磷作用的城市污水处理工艺目前在国内已经得到

普遍应用, 比较典型的有 A/O 工艺、 A^2/O 工艺等。运行实践表明: 活性污泥中微生物细胞干重含磷量可提高到 2% ~ 3%。近年来普遍开展了电解聚集除磷的方法研究^[4-7], 此方法是利用铁或铝作为阳极材料, 在电解条件下溶解产生的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 与含磷物质反应生成沉淀而达到除磷的目的。

考虑到可溶性阳极在工程实践中可能导致的物质、能量消耗增加以及维护不便等不利因素, 笔者曾利用惰性电极作阳极, 对电场强化生物除氮的一些基本因素进行了研究^[8-9], 而本文则进一步利用惰性电极形成的微电场, 对强化生物除磷过程的影响进行了研究, 并实验比较了微电场作用下厌氧放磷、好

氧吸磷过程的动力学参数。

1 材料与方法

1.1 试验菌种

试验菌种取自广州市大坦沙城市污水处理厂 A²/O 工艺的厌氧池、缺氧池、好氧池的污泥。

1.2 试验水样及水质

试验用水为按比例稀释的餐饮废水,并调配少量的磷酸二氢钾,使其水质情况尽量接近广州市城市生活污水的水质条件。试验用水水质见表 1。

表 1 试验用水水质

水样	pH 值	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
试验用水	6.0~9.0	100.0~250.0	50.0~90.0	14.2~26.4	2.9~7.7	10.0~30.0
城市污水	6.0~9.0	86~166.7	44.7~85.0	14.5~25.3	1.6~7.1	38.5~126.0

1.3 检测方法

试验中有关水质指标的分析方法均按照《水和废水监测分析方法》进行,具体方法见表 2。

表 2 水质分析方法

水质指标	分析方法	水质指标	分析方法
COD	重铬酸钾法	pH 值	精密 pH 值电极
TP	钼锑抗分光光度法	DO	溶解氧仪

1.4 试剂

氢氧化钠、碘化钾、碘化汞、酒石酸钾钠、抗坏血酸、钼酸铵分析、酒石酸锑氧钾、重铬酸钾、N-(1-萘基)-乙二胺二盐酸盐、硫酸汞、硫酸银等均为分析纯试剂,用于分析测试。磷酸二氢钾、硝酸钾为分析纯试剂,用作污泥培养的营养盐。

1.5 仪器设备

721 型分光光度计由上海第三分析仪器厂生产;COD 速测仪(TL-1A)由承德市环保仪器厂生产;溶解氧分析仪(JPSJ-605 型)由北京泰克仪器有限公司提供;空气泵(ACO-5503)由广东海利集团有限公司提供;直流稳压稳流电源(APR-3005)由龙威仪器设备制造厂生产;定时控制仪器由郑州鸿联电子有限公司提供;离心沉淀器(800 型)由上海手术器械厂生产;手提式不锈钢蒸气消毒器由上海三申医疗器械厂生产,用于高温消解。

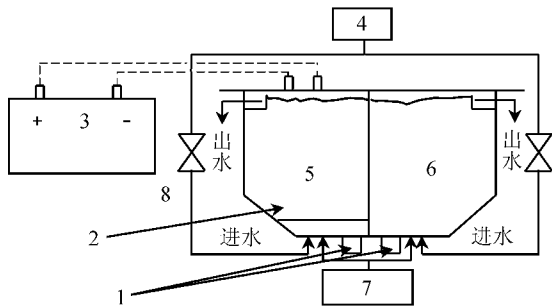
1.6 取样分析方式

水相总磷浓度分析 在反应周期内,根据需要每隔 30 min(或 15 min),用虹吸管在这两个反应器中各取混合液 30 mL,以 3 000 r/min 的速度离心分离 5 min,取适量的上清液,立即分析测定。

剩余污泥中总磷浓度分析 采用稀释取样法,即准确量取剩余污泥 10 mL 稀释到 1 000 mL,充分混匀,取适量稀释液立即分析测定。

1.7 试验流程及设备

采用 2 套尺寸结构完全一致的反应器进行,其组成见图 1。电场强化生物反应器与对照的普通生物反应器的外形、尺寸完全相同,均由有机玻璃制成。电场强化生物反应器中的电极由三块石墨板组成,一块石墨板居中作阳极,另外两块石墨板与阳极等间距放置作阴极,极板中的碳含量大于 90%。



1—排泥管 2—极板 3—直流电源 4—高位水槽 5—电场强化生物反应器 6—普通生物反应器 7—曝气机 8—调节阀

图 1 实验装置

两反应器总容积均为 6.86 L,基本尺寸为 26 cm × 12 cm × 22 cm,极板尺寸为 20 cm × 12 cm × 1 cm,其中阴极板总面积 480 cm² 阳极板总面积 240 cm²。

2 试验过程

2.1 污泥培养及驯化

取适量经沉淀浓缩后的污泥接种于反应器中,添加营养(稀释了的餐饮废水),控制每个反应器的污泥沉降比为 20% 左右,按厌氧/好氧的方式运行,每天 3 个周期,每次连续曝气 4 h,开始曝气前,换加新鲜污水。培养驯化期进水的污泥中 COD 负荷为 0.05 kg/(kg·d)左右。运行 1 周后,测定两反应器的 COD 去除率已达 75%,且活性污泥结构紧密,沉降性能良好,出水清澈。镜检显示菌胶团已经形成,其中原生动物种类丰富,有大量的钟虫及累枝虫、盖纤虫等。至此,可认为活性污泥已经培养、驯化成熟。

2.2 微电流驯化

参照前期的实验研究结果,采用惰性电极形成微电场,电流强度为 20 mA,电流密度为 0.08 mA/cm²。

厌氧驯化 反应系统经过驯化和调整后,对 1 号反应器在运行周期的厌氧反应段实施微电流驯化,驯化 7 d 后,进入厌氧段电场强化除磷运行试验。

好氧驯化 在试验的第二阶段,对 1 号反应器在运行周期的好氧反应段实施微电流驯化,驯化 7 d 后,进入好氧段电场强化除磷运行试验。

3 结果与讨论

3.1 反应器运行工况的调整与确定

对于城市污水生物除磷系统,一般厌氧和好氧

的时间分别是 1.5~2.5 h 和 2~3 h 厌氧段 DO 质量浓度为 0.2~0.3 mg/L,缺氧段为 0.5~0.7 mg/L 好氧段 DO 质量浓度为 1.5~2.5 mg/L。因此,参照 A²/O 工艺的厌氧、好氧、缺氧段的水力停留时间,在系统启动初期各阶段的参数为:

周期 8 h 进水 0.5 h 厌氧 1.0~2.0 h 好氧 3.0~4.0 h 缺氧 0.5~1.5 h 沉淀 0.5 h 排水 0.5 h 闲置 0~1.0 h 污泥质量浓度为 2000 mg/L 左右。

污泥龄 10~15 d ;污泥中 COD 负荷为 0.10~0.30 kg/(kg·d)。

参照上述的工艺条件,本试验共选择了 5 种不同的工况进行试验研究,各工况的运行参数见表 3。

表 3 运行工况及参数					h
工况	厌氧时间	好氧时间	缺氧时间	闲置时间	
1	1.0	3.0	1.5	1.0	
2	1.0	3.5	1.5	0.5	
3	1.5	3.5	1.0	0.5	
4	2.0	3.0	1.0	0.5	
5	2.0	4.0	0.5	0.0	

在 5 种工况条件下运行 2 周,测定其运行效果,每种工况的进、出水各项指标均是稳定运行期间的统计平均数据。结果见表 4。

表 4 运行效果						
工况	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
	进水	出水	COD 去除率/%	进水	出水	TP 去除率/%
1	190	47.2	75	4.81	1.55	68
2	230	50.8	80	4.23	1.24	71
3	220	32.3	85	5.11	1.41	72
4	180	27.7	85	5.48	1.30	76
5	202	39.8	80	5.69	1.43	75

由于试验用水中有机物可生化性良好,各工况的 COD 去除率均达到 75% 以上。从试验结果看,厌氧时间满足 1.5 h 以上时,除磷效果较为理想,例如工况 3,4,5 的除磷效率都达到 70% 以上,明显高于工况 1,2。分析其原因在于充足的厌氧时间可保证有机大分子水解酸化成有机挥发酸,从而便于聚磷菌吸收同化为 PHB,而进入好氧段的聚磷菌菌体内 PHB 是否充足是决定整个生物系统除磷效率大小的关键。好氧段的氧化作用使得污水中的有机物得到进一步的降解,同时完成硝化反应和好氧吸磷过程。但是在工况 5 中,好氧时间达 4.0 h,COD 的去除效率并没有得到很大的提高,反而有所降低。分析其原因可能是曝气时间过长而导致污泥絮体细微化,引起出水水质变差,COD 值升高。另外,缺氧时段的反硝化作用,可以有效降低下一周期厌氧段混合液中硝酸盐浓度,提高了聚磷菌的释磷效果,稳定了除磷效率,但是缺氧段时间过长,会导致磷的重新释放,工况 3,4 的缺氧时间为 1.0 h,较为合理。以下

实验均以工况 4 的各参数为基础进行。

3.2 反应周期内液相总磷浓度变化

反应器运行稳定后,分别测定其在整个运行周期内液相总磷浓度变化情况,绘制两个反应器中液相总磷质量浓度变化曲线图,见图 2。

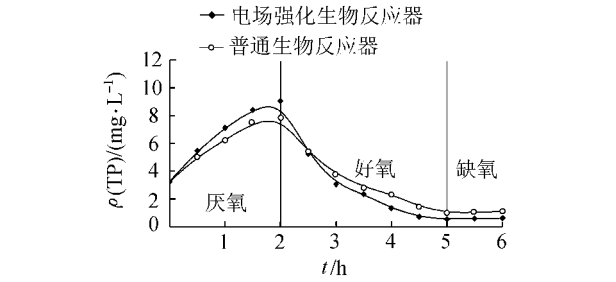


图 2 反应周期内液相总磷质量浓度

厌氧期间,聚磷菌释放磷使得两反应器的液相总磷浓度逐渐提高,且在厌氧末段达到最大值。而进入好氧反应段后,经过厌氧段释放了磷酸盐的活性污泥显示出很强的吸磷能力,使得反应器液相总磷浓度迅速下降,尤其在好氧反应段前 1 h,聚磷菌吸磷速率最快,据测算,两反应系统该时段吸磷量分别为整个好氧段吸磷量的 70% 和 60%。随后的好氧反应段总磷浓度缓慢下降,且在缺氧阶段略有上升,原因可能是经过长达 3 h 的好氧反应后,污水中的有机基质已消耗殆尽,聚磷菌无法从基质中获得充足的外源营养基质,只能分解其在好氧段吸收储存在体内聚磷酸盐,以获得维持其基础代谢所需的能量,从而导致磷的释放。

对比 2 条曲线,电场强化反应器中厌氧段的有效释磷速率比普通反应系统要快,计算表明,电场强化反应器在厌氧段的释磷质量浓度达 5.8 mg/L,比对照组普通生物反应器提高 24.7%。

3.3 剩余污泥含磷量

生物除磷通过厌氧放磷、好氧超量吸磷两个生化过程,被同化合成成为污泥细胞,最终排放富磷污泥来实现。为了更全面地研究电场对生物除磷的强化作用,在运行时段,每天分析测定电场强化生物反应器(电流密度 $i = 0.08 \text{ mA}/\text{cm}^2$)及普通生物反应器中剩余污泥总磷含量,检测数据见表 5。

表 5 剩余污泥总磷含量比较			
运行时间/ d	TP 质量比/ (mg·kg)		磷含量 提高 率/%
	电场 反应器	普通 反应器	
1	506	446	13.5
2	443	384	15.4
3	405	358	13.1
4	298	254	17.3
5	574	510	12.6
6	299	261	14.6
7	323	254	27.2

在试验条件下,每个运行周期电场强化生物反

反应器排放的剩余污泥总磷含量都高于对照组的普通生物反应器,含磷量提高率为 12.6% ~ 27.2%,表明在污泥龄相同的情况下,电场的强化作用提高了剩余污泥中的磷含量,从而降低了出水磷浓度,这从另一角度解释了电场可强化生物除磷效果的原因。

3.4 动力学参数

由于生物除磷分为厌氧和好氧两个阶段,对电场强化生物反应器与普通生物反应器的动力学参数比较也分厌氧和好氧两个阶段进行。

运行稳定后,测定运行周期内普通生物反应器和电场强化生物反应器厌氧段液相中的总磷浓度,结果见图 3。

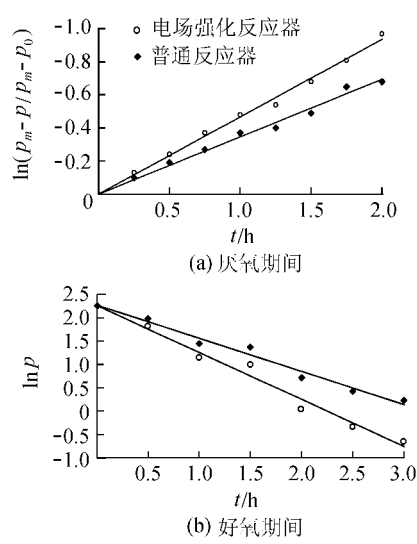


图 3 厌氧期间生物放磷动力学比较

图 3(a)中两条曲线均呈现良好的线性关系,线性相关系数普通生物反应器为 0.994,电场强化生物反应器为 0.992。

$$\ln \frac{p_m - p}{p_m - p_0} = -k_1 t \quad (1)$$

式中: p 为 t 时刻液相总磷质量浓度, mg/L; p_0 为进水总磷质量浓度, mg/L; p_m 为厌氧条件下达到最大有效释放量时的液相总磷质量浓度, mg/L。

根据试验数据求得电场强化反应器的厌氧放磷速率常数 k_1 为 $0.47h^{-1}$, 普通生物反应器的厌氧放磷速率常数 k_1 为 $0.35h^{-1}$ 。

运行稳定后,测定运行周期内普通生物反应器和电场强化生物反应器好氧段液相中总磷的浓度,得到图 3(b)。

图 3(b)中两条曲线呈现良好的线性关系,线性相关系数:普通生物反应器为 0.989,电场强化生物反应器为 0.991。

$$\ln p = \ln p'_m - k_2 t \quad (2)$$

式中: 电场强化反应器的好氧吸磷速率常数 k_2 为

$1.01h^{-1}$, 普通生物反应器的好氧吸磷速率常数 k_2 为 $0.71h^{-1}$; p'_m 为好氧反应起始时液相总磷质量浓度。

4 结 论

a. 在微电场的作用下,生物除磷仍然符合‘厌氧释磷,好氧吸磷’的规律。微电场对生物除磷的强化作用体现在厌氧段促进磷的释放,好氧段促进磷的吸收。有电场的作用时厌氧段放磷速率常数 k_1 为 $0.47h^{-1}$,好氧段吸磷速率常数 k_2 为 $1.01h^{-1}$,普通生物反应器在相同实验条件下,厌氧放磷速率常数 k_1 为 $0.35h^{-1}$,好氧吸磷速率常数 k_2 为 $0.71h^{-1}$ 。

b. 在本文实验条件下,电场强化反应器中剩余污泥磷含量比普通生物反应器中剩余污泥提高 12.6% ~ 27.2%。

c. 采用惰性材料作为电极,无电极材料消耗的问题,实验中采用的电流强度为 20 mA,电流密度为 0.08 mA/cm^2 ,电耗相对较小。

生物除磷目前已证实为聚磷菌超量吸磷的生理作用,但缺乏产酸菌提供低分子有机基质,其吸磷作用会受到较大的抑制,因此,生物除磷应是多种微生物协同作用的结果。电场的强化亦是对这种作用的综合促进。至于电场通过何种途径强化了生物除磷,还需从微生物生态学、分子生物学的角度进行综合探讨。

参考文献:

- [1] SEVIOUR R J, TAKASHI M, MOTOHARU O. The microbiological phosphorus removal in activated sludge systems[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, 27(1): 3193-3207.
- [2] 吴光学,管运涛,蒋展鹏,等. 强化生物除磷的机理模型研究进展[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(4): 259-261.
- [3] 姜安玺,郑朔方,时双喜,等. 厌氧-好氧活性污泥法除磷机理及动力学探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(2): 64-70.
- [4] 张惠灵,李良华,伊江明. 电凝聚除磷及动力学分析[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(3): 57-59.
- [5] 冯爽,孔海南,褚春风,等. 电絮凝法去除二级处理出水中的磷[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 52-54.
- [6] YOUSUF M, MOLLAH A, ROBERT S. Electrocoagulation (EC) - science and applications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 84: 2-41.
- [7] 李燕莉,丁忠浩,王刚,等. 微污染水源水中磷的去除[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(8): 1-3.
- [8] 汤兵,朱又春,许燕滨,等. 电极-生物过程除氮的实验研究[J]. 环境工程, 2003, 21(5): 19-23.
- [9] 王五洲,汤兵,蔡河山,等. 电解-生物滤床反应器反硝化作用初探[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(增刊): 117-119.