

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.004

势能增氧生态净化工艺在污水处理中的应用

陈鸣钊,冯 骞,肖玉冰

(河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为进一步提升污水处理好氧段的复氧效果,将水力学中虹吸理论、渗流理论与水电站尾水管理理论及污水生物处理工艺相结合,在传统的厌氧/好氧工艺基础上,研发了厌氧/势能增氧生态净化工艺。工业废水(油脂废水和焦化废水)处理实例表明,该工艺具有良好的污染物净化效果。
关键词: 污水生物处理;水利科学;工业废水
中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0394-05

Application of potential energy increasing oxygen ecological purification technology to wastewater treatment
CHEN Mingzhao, FENG Qian, XIAO Yubing
(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the effect of air reaeration in the anaerobic phase of wastewater treatment, we used a combination of the siphon theory, the seepage theory, the theory of draft tubes in hydropower stations, and the wastewater biological treatment technology to develop an anaerobic/potential energy increasing oxygen ecological purification technology based on traditional anaerobic/aerobic technology. Case studies in industrial wastewater including grease wastewater and coking wastewater show that the technology is effective in pollutant purification.
Key words: wastewater biological treatment; hydraulics; industrial wastewater

任何一种污水处理工艺都会与水流发生联系,污水在各种处理设备中流动并产生各种反应变化,最后以清水(或达标的水)排出。因此,研究污水的流动特性对提高污水处理效率具有重要意义。
本文将探讨污水在各种处理设备中的流动特性,介绍“水体势能的大气复氧方法——势能增氧生态床^[1-2]”,即厌氧/势能增氧生态净化(potential energy increasing oxygen ecological purification technology,PIEP)工艺如何将污水生物处理工艺与水利科学相结合而得到最新产品。

1 平流紊动扩散理论的应用

在城市生活污水(或有机废水)处理工艺中,常采用厌氧/好氧工艺流程。采用厌氧工艺时,常选用代表第2代厌氧反应器的UASB法。污水处理过程中产生的甲烷气体通过三相分离后,回流使水中的污泥颗粒运动形成上流式厌氧污泥床。UASB法的关键在于三相分离器的设计能否让水中的污泥颗粒产生自下而上的上流运动。
如果追踪污水在厌氧反应器中运动及浓度降低的过程,并将其投影到 x 轴方向上,则可以用污水浓度在 x 方向上的变化来描述反应器中污水的浓度变化,这便与平流紊动扩散理论产生了联系。污水在河流中的流动变化规律常用河流水质数学模型来描述,各种河流水质数学模型的研究,其最根本的内容是求解平流紊动扩散基本微分方程式。该微分方程式符合分子扩散(或紊动扩散)Fick第一定律^[3]:

$$F_a = -\rho D \nabla C_a \tag{1}$$

收稿日期: 2013-07-11
基金项目: 国家自然科学基金(51208173)
作者简介: 陈鸣钊(1937—),男,江苏南京人,教授,主要从事环境科学与污水处理工程研究。E-mail: ch_mz@ sina. com

式中： F_a ——a 物质的通量(为矢量,包括 x,y,z 方向); ρ ——密度; $-\nabla C_a$ ——a 物质浓度梯度,负号表示 a 物质自高浓度向低浓度处扩散; D ——分子扩散系数(为 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$),对于流动水体中的紊流扩散,仅将式(1)中的 D 换为 E (紊动扩散系数,为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$),由于 $E \gg D$,故可以忽略 D 。

如果缓慢地将浓染料沿装满清水的容器壁注入,不 让其产生扰动,则可看到如图 1 所示的分子扩散过程。

开始时刻($t=0$),有一条染料与清水的分界线;经过 一段时间后($t>0$),染料逐渐向清水中扩散;当 $t=\infty$ 时, 浓度完全均匀。取 3 个小的水层来分析染料的浓度变化,假定 A 层为 5 个单位,B 层为 3 个单位,C 层为 1 个单位。令在每一层内作随机扩散向上和向下的分子各占 $1/2$,则 B 层有 1.5 个单位进入 A 层,1.5 个单位进入 C 层。同样,A 层有 2.5 个单位进入 B 层,C 层则有 0.5 个单位进入 B 层。综合这 3 个小水层看,有 1.0 个单位染料从 高浓度的 A 层进入 B 层,再从 B 层进入低浓度 C 层,即有 1.0 单位的染料从高浓度向低浓度方向扩散,这就是 Fick 定律的自然过程。据此,笔者对厌氧池进行改进:(a)将厌氧池改进为圆池;(b)进水由导管从池的上部引入,从池的底部按圆池的切线方向排出;(c)池中悬挂少量填料,如图 2 所示。

这些改进是根据水流特性将进、出水的水头差(势能)转变为动能^[4-5],让污水沿圆池壁流出形成旋转运动,圆池底部进水,上部出水,整个水流自下而上缓慢地做旋转上升运动,并且进入的高浓度污水不断向低浓度污水作紊动扩散混合运动,同时又遇上池中悬挂的少量填料,增加了紊动扩散运动的反射作用,使得进入的高浓度污水很快混合均匀,从而让污水与颗粒和填料表面上的厌氧细菌得到充分接触,提高厌氧反应效率。

2 Fick 定律与双膜理论相结合的应用

在城市污水(或有机废水)处理工艺中,最后必须采用好氧微生物处理工艺才可以使水质达标。常用的好氧微生物处理工艺可分为两大类:一类为活性污泥法,是水体自净的人工强化(包括氧化塘、SBR 等);另一类为生物膜法^[6],是土地自净的人工强化(如污水灌溉农田),是使微生物群落附着在其他物体表面上呈膜状,并让该生物膜和污水接触而使之净化的方法。常用的生物膜法有生物转盘、滴滤池、生物滤池、生物滤塔、生物接触氧化和生物流化床等方法。好氧微生物处理工艺共同的基本点有 2 个:(a)增加污水中溶解氧(采用曝气或复氧法),使好氧微生物得以生长、繁殖、分解污水。溶解氧增长率(即氧气利用效率)越高,其允许进水的有机负荷越高,处理效率也越高。(b)填料(统称)的比表面积越大处理效率越高。

曝气法和复氧法均依据大气复氧双膜理论增加污水中的溶解氧^[1,7]。由大气复氧双膜理论可知,水—气界面存在一个不流动的水体薄膜,在这个薄膜中隐态的分子扩散控制着气体的传输率:

$$\frac{dO}{dt} = \frac{E_m}{HX}(O_s - O) = K_L \frac{A}{V}(O_s - O)$$

(2)

式中: $O_s、O$ ——水中溶解氧的饱和浓度与实际浓度; E_m ——氧分子扩散系数; X ——薄膜厚度; H ——水深; $A、V$ ——水的表面积和体积, A/V 称为比表面积; K_L ——氧的质量传输系数。

2.1 曝气方法

增加溶解氧的机理是水中气泡内部大气中氧分子通过气泡壁表面的薄膜与水中的氧分子进行交换,从而增加水中溶解氧(DO)。单位体积气泡的表面积(即比表面积)越大,氧分子交换量越大,水中的 DO 含量增加也越快,故微孔曝气最好。

2.2 大气复氧方法

大气复氧方法的典型例子是生物转盘法^[8]。如果在生物转盘的盘片上取 1 个单位面积并做上记号,通

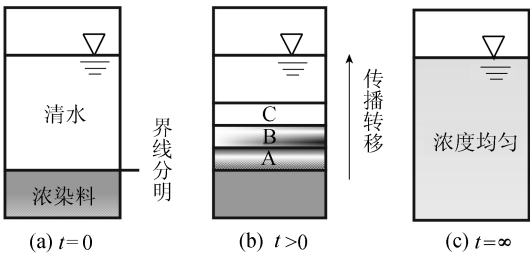


图 1 分子扩散过程

Fig. 1 Process of molecule diffusion

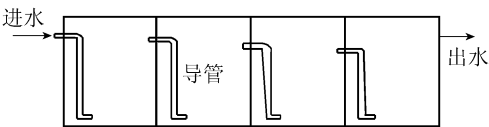


图 2 厌氧池改进示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anaerobic tank improvement

过追踪可看到它在不断地出露大气和淹没于水下,周而复始。当盘片出露大气时,盘片(填料)表面附有一层水膜,大气中氧气分子与水膜中的氧分子进行交换,从而增加水膜中的 DO 含量,并很快向 O_s 趋近。当盘片(填料)淹没于水下时,盘片水膜中 DO 含量趋近于 O_s ,而污水中实际 DO 含量大大小于 O_s ,由于高含量的 DO 会很快地向低含量 DO 的水中紊动扩散,因此盘片水膜中的 DO 含量很快由 O_s 向 O 趋近。当盘片再出露水面时 DO 含量又较低(即有较大的 O_s-O 值),故而生物转盘的复氧是高效的,是 Fick 定律与双膜理论相结合的典范。也就是说,只要使盘片(填料)不断出露大气和淹没水下,就能不断进行大气复氧。生物转盘盘片面积(或填料比表面积)越大复氧量越大。

3 渗流理论的应用

好氧工艺的填料比表面积越大,填料表面所结生物膜量越多,处理效率越高。从几何学可知表面积最大为圆球,因此采用价格便宜的卵石、黄砂可获得最佳的比表面积。由渗流理论^[34,9]可知,水在土壤孔隙中的渗流服从达西定律:

$$Q = K_{\phi} WI \quad v = \frac{K_{\phi} h}{L} = K_{\phi} I \tag{3}$$

式中: Q 、 v ——渗透流量和渗透速度; K_{ϕ} ——土壤渗透系数(砾质砂为 0.05 ~ 0.3 cm/s,中砂为 0.01 ~ 0.04 cm/s,粉砂为 0.01 ~ 0.02 cm/s,卵石为 0.1 ~ 0.6 cm/s,圆砾为 0.06 ~ 0.1 cm/s); W ——渗流断面面积; I ——渗流的水力坡度(梯度); h ——水头损失; L ——渗径长度。

水流在土壤孔隙中的实际速度为

$$v' = \frac{v}{n} \tag{4}$$

式中: n ——土的孔隙率。

增氧生态床采用浅层、多层结构,每一层从底到顶按大砾石、中砾石、小砾石、粗砂、细砂分层铺砌。多层生态床的上一层与下一层隔有水泥砂浆层,水不能从上一层渗到下一层,从上一层向下一层水的流动是利用增氧机的虹吸动力。

当污水排入增氧生态床时,水流通过集水廊道随水位的上升自下而上运动,即从大颗粒大孔隙(小孔隙率)向小颗粒小孔隙(大孔隙率)运动(不同土的孔隙率见表 1)。由式(4)可知,水流越来越慢,且水中的颗粒及脱落的生物膜被层层拦截。当水位上升超过增氧机的虹吸管顶部时,虹吸开始,水从集水廊道中以很大的速度被吸出,且自上而下运动。水流实际流速越向下越大,由于孔隙从小到大,故在填料中拦截下来的颗粒及脱落的生物膜可以畅通地通过虹吸管排向下一层。如此向下传递进入底部二沉池沉淀,不会发生堵塞现象。如正常运行 2 a 的南京腊梅食品厂在翻修时发现,从第 2 层以下的卵石、黄砂填料像新铺砌的一样,没有任何堵塞现象。

4 虹吸及水电站尾水管理理论的应用

在增氧生态床的两端设立增氧机^[2],增氧机的设计是根据虹吸和水电站尾水管理理论制成。水利工程中经常用到虹吸理论,即将虹吸管内空气排出,使管内形成一定的真空度,由于虹吸管进口处水流的压强大于大气压强,因此在管内管外形成压强差,水流便由压强大的地方流向压强小的地方。只要虹吸管中有一定的真空度、一定的上下游水位差,水流便会不断地由上游通过虹吸管流向下流,虹吸管顶部的真空度应限制在 7 ~ 8 m 以下^[10]。因为低水头电站水轮机出口有较大的动能,因此在建水电站时,常常通过修建水轮机尾水管来充分利用此能量。

当污水进入每一层盒子,盒子中水位上升,水位超过弯管顶部时,弯管顶部与流水的水面之间形成真空,水便自动被虹吸至下一层盒子,直到水被吸干,空气从吸水口进入弯管,破坏虹吸,虹吸断开,水位又继续上升,周而复始。

根据水电站尾水管理理论^[11],在出水管尾部设计了扩散角 θ 。若不按尾水管理理论设计,管中出口流速仅

表 1 各种土的孔隙率^[10]
Table 1 Porosities of different kinds of soil

土的种类	$n/\%$
砾石	24.9
粗砂	31.4
中砂	32.3
细砂	33.6
极细砂	34.0

为 0.37 m/s,如按尾水管理论设计,则管中出口流速达到 0.7 m/s。由于出口流速加大,相应的增氧机体积缩小,降低了成本,提高了盒子中水被吸干的速度。

在生态床两头设立增氧机,其作用是利用强大的虹吸动力,将每一个单位浅层生态床中的水吸干排入下面一层,与此同时大气也随之进入填料孔隙之中,填料表面的水膜与空气接触,水膜及大气中的氧分子运动则产生水气两相之间的大气复氧。由式(2)可知,填料中水体被吸干后,填料的比表面积即是水的表面积 A ,该值越大复氧效果越好,与生物膜法是相适应的。由于填料采取浅层、多层结构,因此相应的水的体积也较小,由式(2)可知 V 越小,大气复氧效果越好。由于污水自上而下经历了排干和新鲜污水再充满的过程,排干时填料所附水膜中溶解氧很快增加,向饱和溶解氧靠近,随后新鲜污水加入其溶解氧含量很低,甚至为零,故此 (O_s-O) 值也接近于 O_s 值。式(2)的右边 3 个变量全部都向着使 dO/dt 增加的方向增长。所以上述改进的设计,其大气复氧效率很高。观测数据表明,这时的充氧能力在该增氧生态床中的数值为每小时每立方米填料可增加溶解氧 2.2 g(即 $\rho(DO)=2.2\text{ mg/L}$)。故此,好氧微生物生长、繁殖十分活跃^[12]。

5 A-PIEP 法在工程实例中的应用

5.1 南京腊梅食品厂实例

南京腊梅食品厂是生产著名“台湾三鸿肉松”的工厂,每日排放污水为 100 m³ 左右,其 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})=3\,000\text{ mg/L}$ 左右,污水含有油脂,又黑又臭。应用 A-PIEP 法处理后, $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 降为 100 mg/L 左右(达标的水质 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})<150\text{ mg/L}$),见表 2。

表 2 南京腊梅食品厂验收监测值
Table 2 Monitored water quality for acceptance inspection of Lamei Food Factory, in Nanjing

pH		$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{动植物油类物质})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后
6.8	7.4	3 531	102	378	49	79	5
6.8	7.4	2 022	102	272	33	91	5
6.8	7.3	4 753	50	780	53	915	5
6.7	7.5	2 941	94	513	29	73	5
6.6	7.7	3 067	88	601	67	256	5
6.5	7.8	2 265	83	1 490	30	203	5

5.2 扬州煤气总公司焦化煤气废水处理实例

扬州煤气总公司生产的焦化煤气供应扬州全市居民使用,其生产过程中产生的废水属于高浓度有机废水, COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、酚、氰等的质量浓度都很高,在其排放的浓氨水中 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 高达 22 000 mg/L。本文仅列出通过前处理工艺之后进入厌氧—增氧滴滤池工艺环节的效果。该 A-PIEP 的处理能力为 1 200 m³/d(其中浓氨水 50 t/d,终冷水 150 t/d,冷却水 1 000 t/d),采用 2 级 A-PIEP 处理,一级厌氧出水 $\rho(\text{SS})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 分别为 125 mg/L 和 806 mg/L,最终出水 $\rho(\text{SS})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 分别为 40 mg/L 和 90 mg/L,去除率分别为 68.0% 和 88.8%。

6 结 语

将普遍应用的厌氧/好氧工艺改进为 A-PIEP 工艺,主要是应用渗流理论将滴滤池改为浅层、多层结构,填料按颗粒大小分层铺砌,并利用平流紊动扩散理论、Fick 定律、大气复氧双膜理论及虹吸原理将填料中污水很快吸干,进行高效率的大气复氧,取得较高的处理效率。南京腊梅食品厂及扬州煤气总公司焦化煤气废水处理实例表明其处理效果较好。

参考文献:

[1] 陈鸣钊,丁训静. 水体势能的大气复氧方法:势能增氧生态床法[J]. 水科学进展,2008,19(5):742-745. (CHEN Mingzhao,DING Xunjing. Potential energy ecological bed method for air aeration using water potential energy [J]. Advances in Water Science,2008,19(5):742-745. (in Chinese))
[2] 邓风,陈鸣钊. 势能增氧生态处理工艺的应用研究[J]. 环境工程,2009,27(1):23-25. (DENG Feng, CHEM Mingzhao. Study on oxygen increased biological treatment process through potential energy [J]. Environmental Engineering,2009,27(1):

23-25. (in Chinese))

[3] 傅国伟,程声通. 水污染控制系统规划[M]. 北京:清华大学出版社,1985:96.

[4] 涅特里加. 水工建筑物设计手册[M]. 顾慰慈,滕庭熊,译. 北京:水利电力出版社,1992:129.

[5] 清华大学水力学教研室. 水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1981:426.

[6] 罗燕,王晟. 生物膜法处理地表水研究与应用进展[J]. 环境科学与管理,2011,36(3):69-72. (LUO Yan, WANG Sheng. Progress in research and application of treating surface water by bio-film technology[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(3):69-72. (in Chinese))

[7] 陈鸣钊,丁训静. 势能大气复氧理论与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2006:114.

[8] 梅丽,杨平,尚书勇. 污水的生物处理:生物转盘法[J]. 当代化工,2004,33(5):75-77. (MEI Li, YANG Ping, SHANG Shuyong. Biological treatment of wastewater:the method of rotating biological contactor[J]. Contemporary Chemical Industry, 2004, 33(5):75-77. (in Chinese))

[9] 毛祖熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社,1988:3.

[10] 顾慰慈. 渗流计算理论及应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2000:5.

[11] 刘启钊. 水电站[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998:36.

[12] 邓风,何超群,陈鸣钊. 势能增氧生物控藻技术研究[J]. 环境污染与防治,2009,31(11):75-77. (DENG Feng, HE Chaoqun, CHEN Mingzhao. Technological study of algae control by increasing oxygen through potential energy[J]. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(11):75-77. (in Chinese))

· 简讯 ·

2014 土壤及地下水污染整治与管理国际研讨会将在北京市召开

土壤和地下水是人类赖以生存的物质基础,是经济社会发展不可或缺的环境要素。近年来,随着我国经济快速发展,工业化、城市化进程加速,土壤及由此引发的地下水污染形势相当严峻。而我国与欧美、日本等国及我国台湾地区相比,土壤及地下水污染防治工作仍处于相对滞后的状态,不仅在时间上,更表现在相关法律法规不健全、技术水平落后、管理基础薄弱及资金保障等方面,急需借鉴国际上先进的管理理念和经验。为此,由中国环境科学学会主办的2014 土壤及地下水污染整治与管理国际研讨会将于2014 年11 月1—3 日在北京市召开。

研讨会通过研讨相互交流、启迪创新,借鉴和推广世界范围内土壤及地下水污染防治的先进理念、管理经验和技术、产品,为解决我国土壤及地下水污染问题提供技术支撑。会议主要议题包括:(a)土壤及地下水污染防治政策、制度及法律法规;(b)土壤及地下水污染防治投融资体系建设;(c)土壤及地下水调查关键性思路、技术方法及应用;(d)土壤与地下水污染防治修复技术、方法与案例;(e)地下水监测、调查及修复技术;(f)土壤及地下水污染防治的公众参与。

会议电子文件请浏览网站:www.meeting.edu.cn(中国学术会议在线)。

(本刊编辑部供稿)