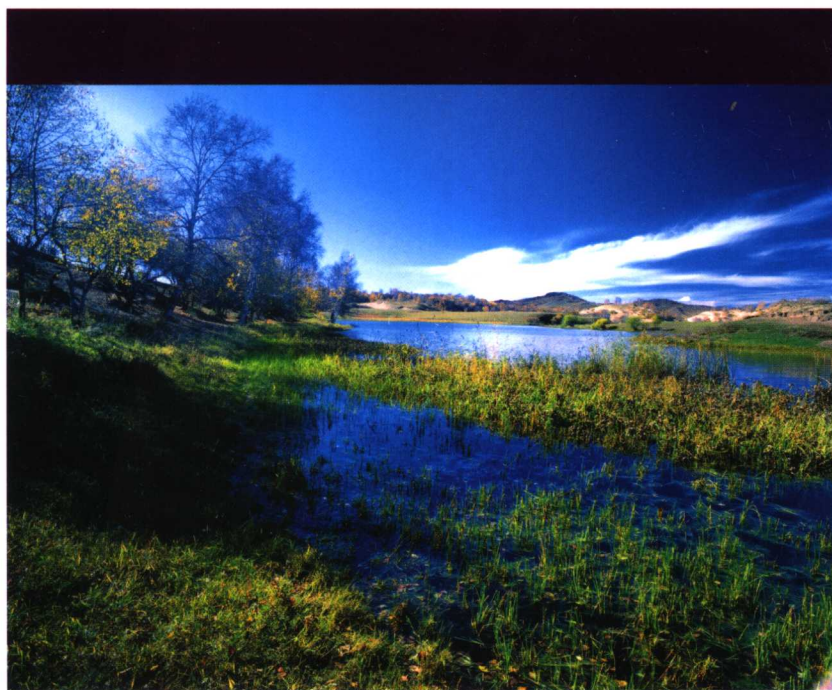


陈鸣钊 丁训静 编著

势能大气复氧理论与实践

—— 污水生物处理新台阶



Chemical Industry Press



化学工业出版社
高等教育教材出版中心

势能大气复氧理论与实践

——污水生物处理新台阶

陈鸣钊 丁训静 编著



化学工业出版社
高等教育教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

势能大气复氧理论与实践——污水生物处理新台阶/陈
鸣钊, 丁训静编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3
ISBN 7-5025-8415-3

I. 势… II. ①陈…②丁… III. 污水处理: 生物处
理 IV. X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024140 号

势能大气复氧理论与实践

——污水生物处理新台阶

陈鸣钊 丁训静 编著

责任编辑: 满悦芝 陈 丽

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 宋 玮

封面设计: 胡艳玮

*

化 学 工 业 出 版 社
出版发行
高等教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 323 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8415-3

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

天然河流的势能被用来发电是 20 世纪以来最大的发明之一，由火力发电（利用动能）到水力发电（利用势能）是一大革命。其最大的功绩是将发电的运行费用大大降低，不用燃料或燃油，减少能源的消耗，天然河流的势能取之不尽，用之不竭，并且是无烟工业，无环境污染。

污水生物处理的好氧工艺，一般都需要应用鼓风曝气进行复氧，以增加污水中的溶解氧含量，使好氧微生物得以生长、繁殖，并分解水中的有机物，获取营养，使污水得到净化。鼓风曝气一般都需要消耗电能，其能耗在要求达到污水排放标准一级时约为 $0.4\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，若水质要求提高，其能耗更大。

污水生物处理好氧工艺的另一种增加水中溶解氧的方法是利用大气复氧，例如，生物转盘法。

本书介绍势能大气复氧理论是利用低水头水泵的扬程一般在 $10\sim 15\text{m}$ 形成势能（或天然河流的势能），结合应用大气复氧双膜理论和生物转盘法大气复氧的实践而进行大气复氧，处理污水。实现势能大气复氧的工艺设备称为“势能增氧生态床（草皮）”，是国家专利“厌氧/增氧滴滤池”的进一步改进成果，最新专利称为“势能增氧生态床”。其特点是可将生活污水（或污染的河水或湖水）进行处理，使其得到再生，变为地表水Ⅲ类或直接达到自来水标准，并且可将污水处理的直接运行费用大大降低，使直接运行费用小于或等于 $0.15\text{元}/\text{m}^3$ [电费 $0.6\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$]，全部自动控制，无需专人管理；在天然河流有势能可利用时，能够达到不花费任何人工，不花费运行费用即可使河水自动达到地表水Ⅲ类或自来水标准。

污水生物处理势能大气复氧理论的问世必将把污水处理的理论和实践推上一个新的台阶。

编者将为污水生物处理势能大气复氧理论推荐给环境界而著此书。由于时间及编者水平所限，书中不妥之处在所难免，恳切希望专家、学者及广大读者批评指正。

陈鸣钊
2006 年 4 月于南京

目 录

1 绪论	1	3.1.2 活性污泥法体系	44
1.1 水力发电与水能利用新方向	1	3.1.3 生物膜法体系	55
1.1.1 水能利用发展简史	1	3.1.4 自然生物处理法	65
1.1.2 水力发电的特点	1	3.2 对流扩散理论	68
1.1.3 水能利用新方向	2	3.2.1 静水环境中的分子扩散	69
1.2 势能大气复氧开发的方式	2	3.2.2 流动水体中的分子扩散	70
1.2.1 山区或丘陵区开发	2	3.2.3 紊流情况下的扩散	72
1.2.2 平原地区或城市河流开发	4	3.2.4 平流紊流扩散基本方程的解	72
1.3 势能大气复氧开发实践的进程	4	析解	72
1.3.1 萌芽阶段	4	3.2.5 扩散器的研究	74
1.3.2 浮动生物滤清器阶段	5	3.3 生态学中的岛屿生物群集模型	75
1.3.3 生物氧化发生器阶段	5	3.3.1 基本概念	75
1.3.4 势能大气复氧的形成及完善	5	3.3.2 生物栖息地及岛屿	76
2 水利学科基础	9	3.3.3 岛屿生物群集模型	78
2.1 管流、孔口和闸孔出流	9	3.4 生态食物链	79
2.1.1 短管的水力计算	9	3.4.1 污水处理系统中的生态食物链	79
2.1.2 孔口出流	12	3.4.2 水环境中的生态食物链	79
2.1.3 闸孔出流及堰流	15	3.5 生物分相理论	82
2.2 虹吸理论应用	21	3.5.1 河流水体中的生物分相	82
2.2.1 虹吸管的管径选择	21	3.5.2 河流中的生物分相试验	85
2.2.2 虹吸管的水力计算	22	3.5.3 厌氧反应器中的生物分相	87
2.2.3 虹吸形成与进水流量的关系	23	3.6 微生物反应动力学	88
2.2.4 虹吸管的口径选择	23	3.6.1 有机污染物降解一级动力反应	88
2.3 渗流理论	24	3.6.2 有机污染物降解二级动力反应	91
2.3.1 达西定律	24	3.7 突破二级动力反应的音障	93
2.3.2 颗粒级配水力学	28	3.7.1 二级动力反应的起动和音障	93
2.3.3 井点与集水廊道	29	3.7.2 恢复地表水Ⅲ类的音障	95
2.4 水电站尾水管原理的应用	32	3.7.3 突破“音障”的研究	97
2.4.1 尾水管的作用	32	4 势能大气复氧理论	100
2.4.2 尾水管形状和尺寸的选择	33	4.1 大气复氧双膜理论	100
2.4.3 尾水管用于虹吸管的效果	34	4.1.1 道尔顿气体分压定律	100
2.5 地转力	36	4.1.2 亨利定律	101
2.5.1 大气西风环流	36	4.1.3 大气复氧双膜理论	102
2.5.2 水流的地转力	39	4.2 势能大气复氧的复氧过程	106
2.5.3 地转力对虹吸尾水管的影响	39	4.2.1 污水生物处理中的大气复氧	106
3 环境学科基础	41	4.2.2 鼓风曝气的大气复氧	110
3.1 污水生物处理方法简介	42	4.2.3 生物转盘大气复氧	112
3.1.1 概述	42	4.2.4 势能大气复氧的复氧过程	114

4.3 势能大气复氧的计算问题	126	5.2 浮动生物滤清器阶段	181
4.3.1 势能大气复氧数学模型	127	5.2.1 第二代产品浮动生物滤清器	182
4.3.2 势能大气复氧数值解	144	5.2.2 浮动生物滤清器的完善	183
4.3.3 工程实践中的近似估算	151	5.3 生物氧化发生器阶段	186
4.4 势能大气复氧污水处理设计	154	5.3.1 在河南漯河肉罐头厂的应用	186
4.4.1 势能大气复氧污水处理工艺 流程	154	5.3.2 在江苏省海安县曲塘镇大陈村的 应用	187
4.4.2 天然河流的势能利用	156	5.3.3 河海大学小型设备的应用	187
4.4.3 水泵提升的势能利用	159	5.3.4 在广西武鸣淀粉厂的应用	187
4.5 势能大气复氧的建筑结构	160	5.3.5 在无锡梅园水厂的应用	188
4.5.1 生态床结构	161	5.4 造纸黑液氧化塔阶段	189
4.5.2 增氧机的虹吸管结构	161	5.5 厌氧/增氧滴滤池阶段	193
4.5.3 集水廊道的作用	161	5.5.1 重要结论	193
4.5.4 生态草皮的结构	162	5.5.2 厌氧/增氧滴滤池	194
4.5.5 二沉池和调节池（或泵前池） 结构	162	5.6 势能增氧生态床（草皮）	196
4.6 势能大气复氧最优化设计	163	5.6.1 既无“滴”又无“滤”也无 “池”的意义	196
4.6.1 势能大气复氧的费用函数	163	5.6.2 势能增氧	196
4.6.2 势能大气复氧的目标函数	169	5.6.3 生态床	197
4.6.3 动态规划法求最优解	169	5.6.4 增氧生态草皮	197
5 生产应用实例	178	5.6.5 扬州煤气总公司污水处理工程	197
5.1 萌芽阶段——被动生物转盘设计与 运行	178	5.6.6 南京建邺区泵站河道管理处黑色 河水变清处理工程	197
5.1.1 前人研究的总结	178	5.6.7 白鹭洲公园小样板工程	198
5.1.2 被动生物转盘研究的指导思想	180	5.7 结语	199
5.1.3 试验装置	180	参考文献	200

1 绪 论

1.1 水力发电与水能利用新方向

1.1.1 水能利用发展简史

水能利用是一门研究如何获得水能和利用水能的技术科学。传统的说法,水能利用的主要形式是利用水能生产电能,即指水力发电。本书又给水能利用输入了新鲜血液,指出如何获得水能和利用水能(势能)进行大气复氧——它是污水处理(好氧生物处理)中的关键环节,可大大降低污水处理的直接运行费用,只需低于 0.15 元/m^3 即可将污水处理的出水水质达到地表水Ⅲ类水质标准。

人类利用自然界江河湖泊蕴藏的水能已有悠久的历史,我国远在三千多年前,在黄河沿岸就采用竹木材料制造水车进行粮食加工等;4世纪末,欧洲开始利用水力,作为采石加工之用。

1851年,英国制造了铁制浮轮式水轮,汲引河水,西方国家认为这是利用机器汲水供应城市的第一个给水系统。

1872年,福尼龙(M. Fourneyron)创造了世界上第一台新式水轮机,于1878年在德国建成世界上第一座水力发电站。

1.1.2 水力发电的特点

水力发电站具有许多特点,利用水能(势能)进行大气复氧的方法,亦有不少与水力发电站相同的特点,如下所述。

1.1.2.1 水能的循环使用

江河湖海中的水受太阳照射蒸发,变为水汽,上升至空中形成气流,气流遇冷凝结,下降为雨和雪,再流向江河湖海。这是自然界的水在大气中的循环,又称水文循环。

从自然界的水不断循环的这个意义上来说,自然界的水源是取之不尽,用之不竭的。

由于工农业的迅速发展,人口的增长,所有的废弃物质最终也将随自然界的水循环而排入江河湖海,这就造成了污染,致使江河湖海特别是大中城市附近江河湖海的污染特别严重。虽然有水无质难以应用,但水能仍然存在,并不会因水质被污染而消失,只是没有较好的方法来利用水能而已,十分可惜。

本书研究利用水能(势能)进行大气复氧的方法,就是充分利用这种取之不尽、用之不竭的水能的一种新形式。

1.1.2.2 水力发电的可逆性

水能利用仅仅是利用水体所带的能量而并不消耗水体本身。位于高处的水体可将其引向低处生产电能;可通过电动抽水机组,将低处的水抽送到高处,成为储蓄的水能,建造抽水蓄能式水电站。

平原(或城市)河流也可以通过电动抽水机组,将水抽送到高处。一般低水头水泵的扬程可在 $10 \sim 15 \text{ m}$ 范围内,通过水泵即可将污水抽送到 $10 \sim 15 \text{ m}$ 的高处,这时就可利用水能

(势能)进行大气复氧。

1.1.2.3 水电机组工作的灵活性

水力发电机组具有设备简单,操作灵活,易于实现自动化等优点。利用水能(势能)进行大气复氧亦有上述优点,易于实行“自动化和傻瓜化”管理。

1.1.2.4 水电站的生产成本低、效率高

水电站设备简单,厂用电耗省,运行人员只有相同容量火电厂的 $1/10\sim 1/5$,成本低。且水电站能源利用效率较高,可达85%以上,而火电站只有40%左右。利用势能进行大气复氧的能源利用效率亦比较高,可达85%以上;而利用鼓风曝气进行大气复氧其效率能达到10%已是很好了,很少能达到15%的效率。

1.1.2.5 水电站不产生污染

水电站不产生“三废”,无污染。利用势能进行大气复氧无噪声,对周围居民无影响。在最后一级设立生态草皮可以美化当地环境。而利用鼓风曝气进行大气复氧其噪声很大,必须增设消除噪声的设施。

1.1.3 水能利用新方向

在第12届“世界水日”和第17届“中国水周”的第一天即2004年3月22日,水利部部长汪恕诚强调在我国水资源严重短缺的形势下,落实科学发展观建设节水型社会是一件非常重要的事情,其意义不亚于三峡工程和南水北调工程。

日益严重的水污染不仅降低了水体的使用功能,进一步加剧了水资源短缺的矛盾,对我国正在实施的可持续发展战略造成了严重影响,而且还严重威胁到城市居民的饮水安全 and 人民群众的健康。

节水型社会的“节水”很重要,但仅仅依靠“节水”还是很有限的(能节约5%的水已经很不错了),还必须要研究被污染水资源的再生技术(可将被污染的水资源恢复为地表水Ⅲ类,可再生80%~90%),这对可持续发展战略具有重要意义。

研究一种利用河流水力特性和利用势能,能使被污染的水资源再生的技术,彻底改变工业污水处理方法导致的运行费用高的状态,具有战略意义。上述水力发电的五个特点摘录了水能利用的优点,这些优点不会因为当前水资源被污染形成有水无质而消失,如何将这些水资源的优点应用于被污染的水源再生,这将是水能利用的一个新方向。

应用增氧生态床(草皮)法正是利用上述优点,开辟了在改变水环境污染方面的一个多学科相结合的新领域,使污水生物处理技术上了一个新台阶,这将引起污水生物处理技术的一场新革命,开辟一个新天地。

1.2 势能大气复氧开发的方式

1.2.1 山区或丘陵区开发

1.2.1.1 水库式开发

淮河流域有许多污水水库,对全流域污水排放的污染浓度的调峰起了很大作用,但对污水总量的减少并无作用。污水水库是由于流域上污水通过河流或支流不断地排入而形成的。当今的各种污水处理工艺很难对流域上的污水进行处理,究其原因,一是因为流域上的污水无主,无法执行谁污染谁处理的规定;二是污水处理厂的建设和管理问题,特别是运行费用很高,将成为一项沉重的负担。

污水生物处理应用势能大气复氧法就可以克服上述困难,对于淮河流域已有的污水水库的污水处理可有两种开发方式。

(1) 在污水水库下游 在水库大坝上游两侧各建立引水渠道将污水水库的污水引向下游河岸,沿河两岸建立增氧生态床,每降低高程 0.30m 为一级,连续建立 30 级(即具有 9m 落差),即可将引入沿河两岸的污水(具体设计详见后面章节)处理变为地表水Ⅲ~Ⅱ类。只要建立水利工程和增氧生态床的投资投入后,今后不需任何运行费用即可将污水变为清水,排向下游。这是污水水库下游的开发方式,如图 1-1 所示。

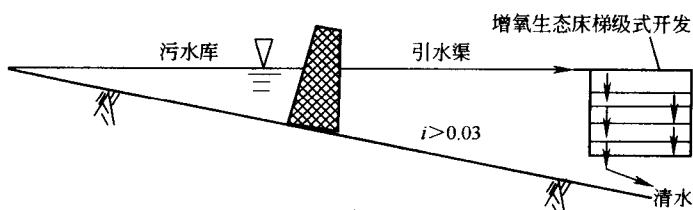


图 1-1 污水水库下游梯级方式开发

(2) 在污水水库上游 在水库上游进入水库的各条河流或支流上(仅对于有污水排入的支流),建立增氧生态床。一般来说,在水库上游的支流或河流,大多是河底比降较大的河流,只要该河流的河底比降 $i > 0.03$ (3%) 即可建立梯级小滚水坝式开发的增氧生态床(见 1.2.1.2 节)。按设计要求施工后,即可不需要任何运行费用,将进入水库的污水处理成为地表水Ⅲ类~Ⅱ类,从而将污水水库变为清水水库。

1.2.1.2 梯级小滚水坝式开发

在山区或丘陵区没有建立水库的地区可采用梯级小滚水坝式开发。大多数天然河流的河床断面都为复式河槽。在河底比降大于 3%~5% 时,可在主河槽中拦河建立小滚水坝,坝高比主河槽高出 0.5m (或高于河漫滩),在滚水坝上游主河槽的两侧河滩地上各建立引水渠道,引向滚水坝下游 100m 的两侧河岸上(可获得 3~5m 的势能),在岸边建立增氧生态床;或者滚水坝上游主河槽为沉淀区,在滚水坝下游建立与滚水坝平行的增氧生态床以替代消力池或消力坎,利用滚水坝滚入下游的势能再次应用增氧生态床,将消除滚水坝对下游河床的冲刷。发生洪水时,由于滚水坝坝高不高,其阻水能力较小不影响泄洪,又由于位于河流底部的河底流速较低不易被洪水冲毁。滚水坝上游的生态河床处于滚水坝的回水区,行近流速很小,滚水坝下游的生态河床每一级跌差仅为 0.3m,且是通过增氧机的虹吸管排向下游,不是直接的漫溢,故也不易冲毁。在发生特大洪水时,滚水坝已全部淹没,且处于底部的流速小,梯级无直接坡降,故不易冲毁。

增氧生态床建成后,每 100m 为一级,3km 后即可将水质处理达到地表水Ⅲ类,变为清水,如图 1-2 所示。

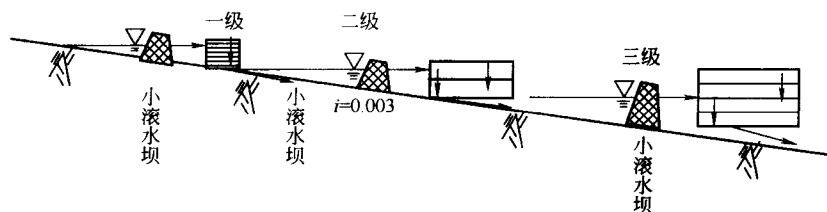


图 1-2 梯级小滚水坝式开发

1.2.2 平原地区或城市河流开发

平原地区或城市河流的污水都在河床之中，一般河底比降很小，且在河床之中很少有大河滩，而没有经过整治的河流两岸通常都有很大的乱草荒地，经过整治的河流两岸通常都进行了护砌和建立绿地。

针对这一情况可在河流中建立水闸（平时关闭，汛期开闸），通过电动抽水机组将闸上的河水抽送到两岸高处，充分利用低水头水泵的扬程（10~15m 范围内），将污水抽入增氧生态床（可做成 9m 高，0.3m 为一级，共 30 级）之中，利用势能进行大气复氧来处理污水。可利用的势能通常可达 9m，一般情况最多进行两次提升（一次提升耗能为 $0.125\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ），就可将污水处理达到地表水Ⅲ类~Ⅱ类，故其运行费用仅为低于 0.15 元/ m^3 。这样就将闸上的污水自动变为清水送往下游河道。

南方主要大城市在城市河流中均设有排涝电站，抽水排入外河。排涝闸前均形成河川型小水库，一般受污染河流中的排涝电站均形成河川或污水库。不排涝时，河中为臭水，影响周围环境；排涝抽水时，则将污水排入外河污染外河水质。这时可在排涝电站的上游河流两岸建立 9m 高的增氧生态床或增氧生态草皮，绿化河岸的同时处理污水，可将排涝电站闸前的河川型小水库的污水处理为地表水Ⅲ类的清水，使得未抽水前的河川型小水库为清水且环境优美，抽水后排入外河的清水可大大改善外河的水质，如图 1-3 所示。

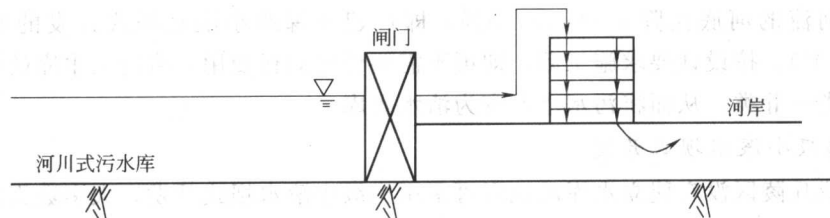


图 1-3 排涝电站闸前污水库的开发

1.3 势能大气复氧开发实践的进程

1.3.1 萌芽阶段

编者立足于建立独具特色的污水治理方法，于 1988 年开始了为治理南京秦淮河和玄武湖污水的研究工作。经过 16 年的不断研究与改进，终于创造出“污水生物处理势能大气复氧理论”并付诸实践，事实证明是成功的。

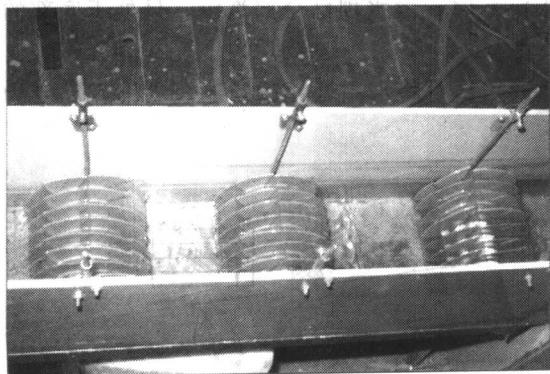


图 1-4 被动生物转盘试验装置

第一代产品是研究被动生物转盘，见文献 [1]。生物转盘需要动力（电动机）带动其转动，才能实现污水处理，而“被动生物转盘”则不需要动力，而是利用水力来冲动其转动，如图 1-4（照片）所示。

由于在实践和推广的过程中发现该开发方式的缺点，一是能耗是不经济的，用水力冲动生物转盘需要先用水泵打水，使水流动起来，然后再用水力冲动生物转盘。经过水泵耗能、水力冲击耗能、机械磨损耗能等，最后的电能消耗将大于生物

转盘直接由电动机带动的能量消耗。二是不易实施将“被动生物转盘”拖挂于交通（旅游）船之后的行为，因为拖挂之后也需耗能，船主们不会同意。

1991 年开始第二代产品的开发。

1.3.2 浮动生物滤清器阶段

污水生物处理好氧工艺必须要增加水中的溶解氧含量，一般都需向污水中进行鼓风曝气，消耗很大的动能，只有生物转盘工艺不需要鼓风曝气。故此，研究了“被动生物转盘”，试图用水力来冲动生物转盘旋转。

第二代产品是皮胎启动的“浮动生物滤清器”，它是将生物转盘的盘片（填料）复氧改为垂直排列的 PVC 管，增大填料与水接触的比表面积，并使填料不断做露出大气、淹没水下的运动，从而实现大气复氧以增加污水中的溶解氧含量，使填料表面生物膜中的好氧微生物处于好氧状态并生长、繁殖，处理污水。实现办法是将填料安装于皮胎（拖拉机内胎）之上，向皮胎充气则填料上浮，放气则下沉，也能使污水得到处理。浮动生物滤清器在乌龙潭试验的照片见图 1-5。

第三代产品是机械推动的“浮动生物滤清器”，由于皮胎是易损易耗品，改为用电动机带动曲柄链杆，将电动机的旋转运动改变为链杆的上下运动来带动填料的上浮露出水面、下沉淹没于水中。改装后的“浮动生物滤清器”已应用于苏州干将河，见文献 [2] 和图 1-6。

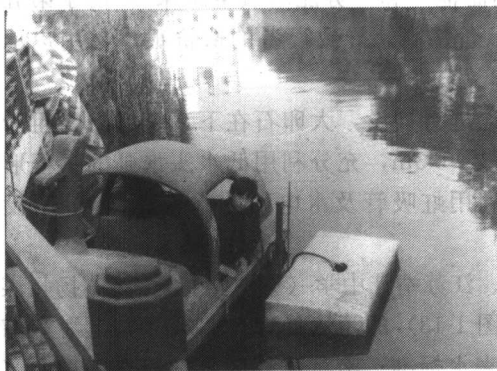


图 1-5 皮胎式浮动生物滤清器在乌龙潭试验



图 1-6 浮动生物滤清器在苏州干将河应用

1.3.3 生物氧化发生器阶段

第四代产品是将第三代水中的“浮动生物滤清器”改装用于岸上处理污水及河水，即将水体中的一层填料改为六层填料，增加污水处理量，称为“生物氧化发生器”，已应用于河南漯河屠宰场及江苏海安曲塘镇大陈村的污水处理，将水质较差的河水处理为自来水，如图 1-7 和图 1-8 所示。

1.3.4 势能大气复氧的形成及完善

由于将多层填料全部上举露出水面和淹没水下，都是水体不动而填料运动造成的，因此填料越多，电动机的能耗越大，故又考虑用水流流动而填料不动来节约能耗。

若将填料分层垂直安装，则可使水流流动而填料不动，同时还要实现使填料不断地露出

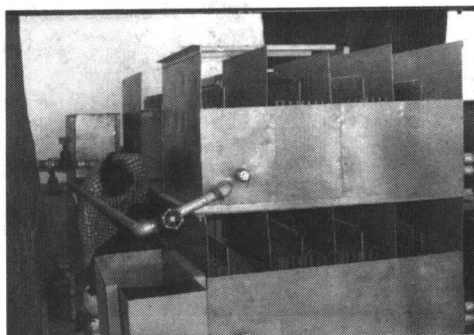


图 1-7 生物氧化发生器应用于河南漯河屠宰场

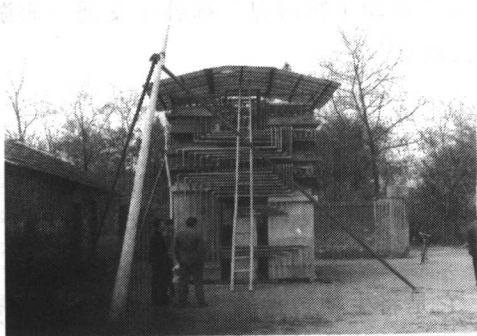


图 1-8 生物氧化发生器应用于
江苏海安曲塘镇大陈村

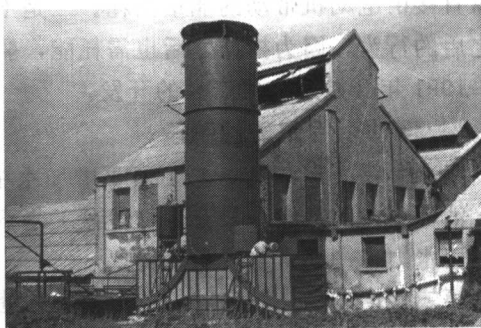


图 1-9 南京造纸厂黑液碱回收工程

大气、淹没水中，才能增加污水中的溶解氧含量。实现办法是将垂直排列的 PVC 管子放入 PVC 盒子之中，同时制作相应的虹吸管也放入盒子，一层一层垒起来，水泵将水打入顶层后，可使盒子装满水，盒子中的虹吸管利用虹吸原理将污水吸入下一层，逐层传递，以实现填料不动而水流流动的过程。该产品为第五代产品，已用于南京造纸厂黑液碱回收工程，见文献 [3] 和图 1-9。

第六代产品是应用国家专利的“厌氧/增氧滴滤池”和“势能增氧生态床”。由于第五代产品的填料是由 PVC 管子垂直密排制成的，PVC 价格高，导致设备的造价很高，用户承受能力受限，竞争时优势不大，经改进成为第六代产品。

第六代产品填料选用卵石、黄沙，按渗流理论进行铺设，大卵石在下，小卵石、粗沙分层铺砌（避免填料被堵塞），分层、浅层结构（每层 0.3m，充分利用低水头水泵的扬程形成势能，做成 9m 高，共 30 层），两端设增氧机（利用虹吸管及水电站尾水原理），最后设立增氧生态床。

该产品已应用于南京腊梅食品厂（见图 1-10）、江苏靖江中学（见图 1-11）、江苏扬州煤气总公司（见图 1-12）、江苏省军区第二干休所（见图 1-13）的污水处理；2004 年，上海东南模板厂“势能增氧生态床”（见图 1-14）出水达到自来水标准；南京建邺区泵站河道管理所（见图 1-15）建立的污水处理，达到地表水Ⅲ类；2005 年，南京白鹭洲公园（见图 1-16）建立的河水处理，比中水水质标准还要好，南京的《现代快报》和《扬子晚报》都做了报道。

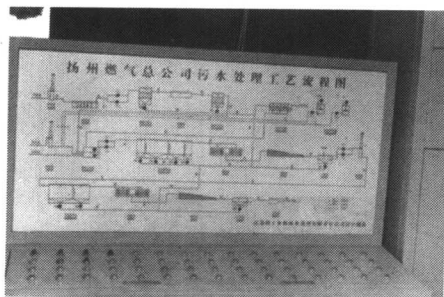
另外，2003 年研究了对自来水进一步净化为直接饮用水，南京宁青涂装环保设备厂，应用“势能增氧生态床”处理各项指标全部达到直接饮用水标准，如图 1-17 所示。



图 1-10 厌氧/增氧滴滤池应用于
南京腊梅食品厂



图 1-11 江苏靖江中学“势能增氧生态床
（草皮）”埋入地下



(a)



(b)

图 1-12 江苏扬州煤气总公司“势能增氧生态床（草皮）”

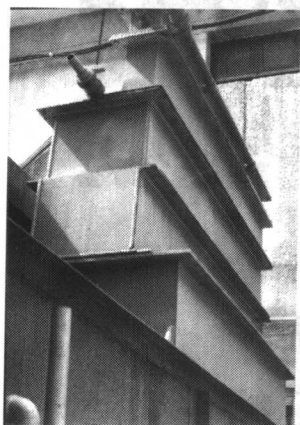


图 1-13 江苏省军区第二干休所洗车水回用“势能增氧生态床”

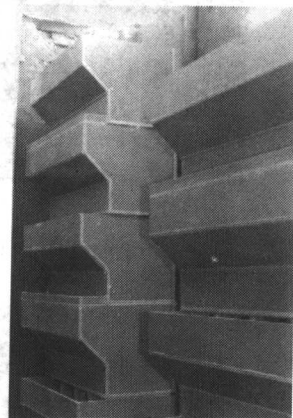
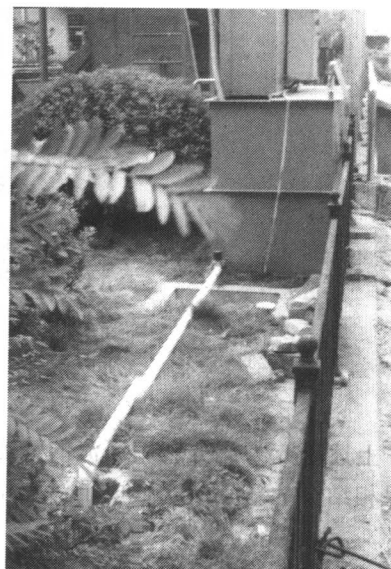


图 1-14 上海东南模板厂“势能增氧生态床”出水达到自来水标准



(a)



(b)

图 1-15 南京建邺区泵站河道管理所“势能增氧生态床（草皮）”

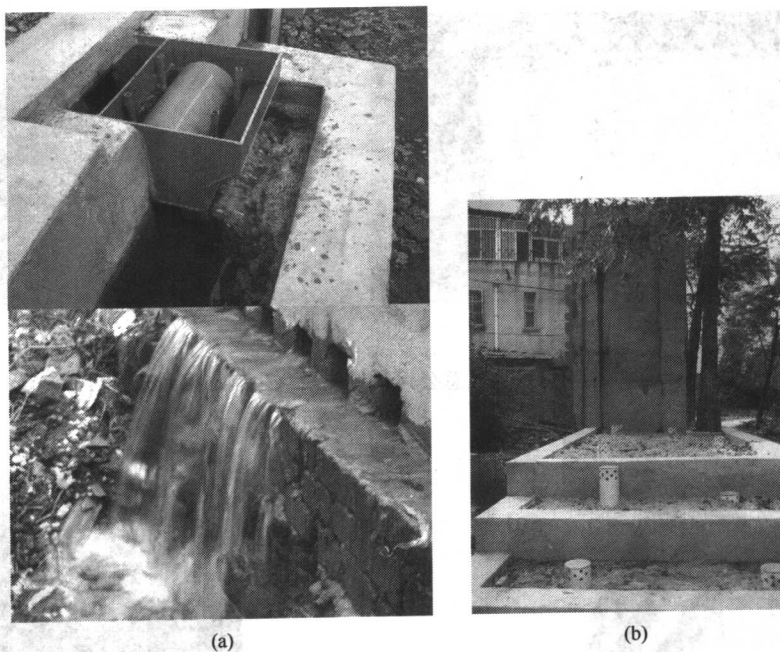


图 1-16 南京白鹭洲公园“势能增氧生态床(草皮)”



图 1-17 南京宁青涂装环保设备厂自来水净化为直接饮用水装置

上述研究为充分利用河流的势能(或低水头水泵扬程)打下了坚实基础,开创了水利与环保相结合的新领域,形成了污水生物处理势能大气复氧理论。

2 水利学科基础

实现势能大气复氧的关键设施为虹吸管。如何充分有效地利用虹吸管提高效率,研究虹吸管的启动、断开、虹吸流量加大和虹吸管中途断开等问题,都与水利学科的许多分支有密切联系。水利学科博大精深,分支众多,本书仅能介绍与势能大气复氧有关的章节,选择有紧密联系的问题深入讲解,有联系的其他问题则仅作为常识性介绍或一带而过。本书所述内容对今后进一步深入研究改进、提高效率十分有用。对于水利学科基础部分尤其需要认真对待,不可掉以轻心。

2.1 管流、孔口和闸孔出流

2.1.1 短管的水力计算

为了输送液体,常需修建各种管道,如自来水管、泄水隧洞、水电站引水管等。

管道中充满液流而无自由液面的,称为有压管流,简称管流。管道中未充满液流而有自由液面的,称为无压管流,例如未充满水的涵洞中的水流等。

水利工程中绝大多数管流的流态属于阻力平方区的紊流。故本章仅限于研究阻力平方区范围内的分析和计算方法。

管流可以是恒定流或者非恒定流。恒定管流的水力计算在于寻求管长、管径、流量和水头之间的关系。本书不介绍非恒定流。

在管流中沿程水头损失和局部水头损失是同时存在的,但是在不同的情况下,这两类水头损失在总水头损失中所占的比例不同。对于不很长的管道中的液流,沿程水头损失和局部水头损失都起一定作用,因此两者都必须计算,这样的管道称为短管道。长管道和管嘴的水力计算都是短管道水力学计算的特殊情况。

短管的水力学计算,只计算恒定流的自由出流及淹没出流两种,计算的内容是求水头 H 、管径 d 、流速 v 和流量 Q 之间的关系。

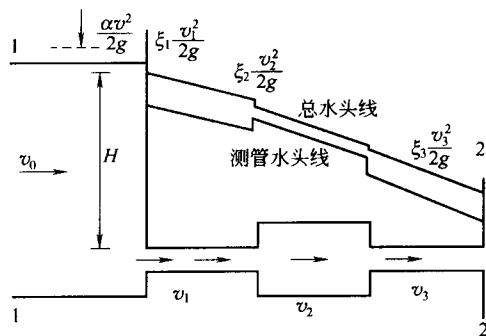


图 2-1 短管水头沿程变化图

(1) 自由出流 如短管道末端流入大气中,则为自由出流,如图 2-1 所示。就图中 1、2 两个过水断面写出能量方程

$$H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = 0 + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_w \quad (2-1)$$

式中 h_w ——包括沿程水头损失和局部水头损失两部分,现计算如下。

在管道进口处的进口水头损失为 $\xi \frac{v_1^2}{2g}$; 管道 1 的沿程水头损失为 $\lambda_1 \frac{L_1 v_1^2}{d_1 2g}$, 突然扩大水头损失为 $\xi \frac{v_2^2}{2g}$; 管道 2 的沿程水头损失为 $\lambda_2 \frac{L_2 v_2^2}{d_2 2g}$, 管道 3 的沿程水头损失为 $\lambda_3 \frac{L_3 v_3^2}{d_3 2g}$, 突

然收缩的水头损失为 $\xi \frac{v_3^2}{2g}$ ，依次计算，可得到整个管道的沿程水头损失和局部水头损失。

沿程水头损失的总和为

$$\lambda_1 \frac{L_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_2 \frac{L_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_3 \frac{L_3}{d_3} \frac{v_3^2}{2g} = \sum \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g}$$

式中 λ_i, L_i, v_i ——各管道沿程阻力系数、管长和流速。

局部水头损失的总和为

$$\xi_1 \frac{v_1^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_2^2}{2g} + \xi_3 \frac{v_3^2}{2g} = \sum \xi_i \frac{v_i^2}{2g}$$

式中， ξ_i ——各管道的局部阻力系数。

所以总水头损失 h_w 为

$$h_w = \sum \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum \xi_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (2-2)$$

将连续方程 $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = v_3 \omega_3$ ，或 $v_1 = \frac{\omega}{\omega_1} v$ ， $v_2 = \frac{\omega}{\omega_2} v$ ， $v_3 = \frac{\omega}{\omega_3} v$ （其中， v, ω 为短管末端过水断面的流速及过水断面的面积），代入式 (2-2) 得

$$h_w = \left[\sum \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 + \sum \xi_i \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 \right] \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{令} \quad \xi_z = \sum \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 + \sum \xi_i \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 \quad (2-3)$$

对于长管道，式 (2-3) 写为 $\xi_z = \sum \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2$ ；对于管嘴，式 (2-3) 写为 $\xi_z = \sum \xi_i \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2$ ，则得到

$$h_w = \xi_z \frac{v^2}{2g} \quad (2-4)$$

将上式代入式 (2-1) 得

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = \frac{\alpha v^2}{2g} + \xi_z \frac{v^2}{2g}$$

从而得

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_z}} \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (2-5)$$

式中

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_z}} \quad (2-6)$$

称为流速系数。

则得到

$$Q = \varphi \omega \sqrt{2gH_0} \quad (2-7)$$

(2) 淹没出流 如管道末端在液面以下，则为淹没出流，如图 2-2 所示。

以下游水池的水面 0—0 为基准面，就图中断面 1、2 写出能量方程，得

$$H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = 0 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$$

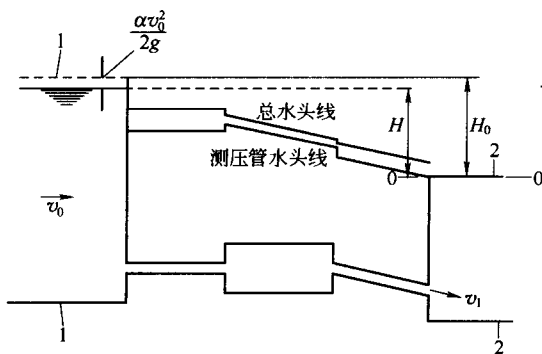


图 2-2 管道淹没涵流水头沿程变化

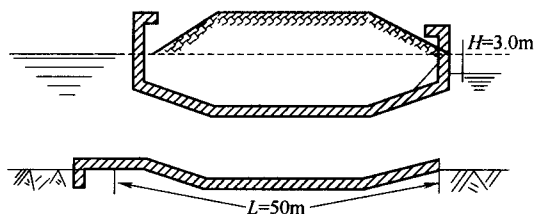


图 2-3 倒虹吸管断面

在一般情况下 $\frac{\alpha v_0^2}{2g} - \frac{\alpha v_2^2}{2g} \approx 0$, 则上式改写为 $H = h_w$, 结合式 (2-4) 可得到

$$v = \frac{1}{\sqrt{\xi_z}} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}$$

式中 $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\xi_z}}$ 。

则得到

$$Q = v\omega = \varphi\omega\sqrt{2gH} \quad (2-8)$$

利用式 (2-7) 和式 (2-8) 可以求解水头、断面尺寸或流量等。

例 2-1 某灌溉渠在穿过公路处建一圆形断面的倒虹吸管, 如图 2-3 所示。上下游水位差 $H = 3.0\text{m}$, 倒虹吸管的表面为中等混凝土敷面。管长 $L = 50\text{m}$, 有两处转弯, 折角 $\alpha = 60^\circ$, $\xi_\omega = 0.36$, 求当通过的流量 $Q = 3.0\text{m}^3/\text{s}$ 时, 需多大的管径。

解 因倒虹吸管不长, 又有进口、转弯和出口等局部损失, 故管中液流显然属于短管出流。由于下游水面在倒虹吸管出口之上, 所以出流为淹没出流, 可以用式 (2-8) 进行计算。

即 $Q = \frac{1}{\sqrt{\xi_z}} \omega \sqrt{2gH}$, 其中, $Q = 3.0\text{m}^3/\text{s}$, $\xi_z = \xi_j + \xi_\omega + \xi_e + \lambda \frac{L}{d}$ 。局部阻力系数 ξ 值可查表得到, 倒虹吸管进口的局部阻力系数 $\xi_j = 0.50$, 出口的局部阻力系数 $\xi_e = 1.0$, 已知转弯处的局部阻力系数 $\xi_\omega = 0.36$ 。对于混凝土管, 粗糙度 n 值可查表得 $n = 0.014$, 则得到 $c = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{n} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} = 56.6 d^{1/6}$, 因为 $\lambda = \frac{8g}{c^2} = \frac{8g}{(56.6 \times d^{1/6})^2} = \frac{0.0245}{d^{1/3}}$, 由此得到

$$\xi_z = 0.5 + 2 \times 0.36 + 1.0 + \frac{0.0245}{d^{1/3}} \times \frac{50}{d} = 2.22 + \frac{1.225}{d^{1.33}}$$

将已知量代入 $Q = \frac{1}{\sqrt{\xi_z}} \omega \sqrt{2gH}$ 中得

$$3 = \frac{1}{\sqrt{2.22 + \frac{1.225}{d^{1.33}}}} \times \frac{\pi d^2}{4} \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 3}$$

上式整理后得

$$0.498 = \frac{d^2}{\sqrt{2.22 + \frac{1.225}{d^{1.33}}}} = f(d)$$