

中国水力学 2000

Hydraulics 2000, China

刘树坤 李嘉 黄真理 李克锋 主编

四川大学出版社

2000 年

责任编辑:孙思涛 韩 果

责任校对:朱兰双

封面设计:罗 光

责任印制:石大明

图书在版编目(CIP)数据

中国水力学 2000/刘树坤等主编. —成都:四川大学出版社, 2000.9

ISBN 7-5614-1987-2

I. 中... II. 刘... III. 水力学-研究-中国
IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 48520 号

书名 中国水力学 2000

作 者 刘树坤 李 嘉 黄真理 李克锋

出 版 四川大学出版社

地 址 成都一环路南一段 24 号(610065)

印 刷 郫县犀浦印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 34.5

字 数 780 千字

版 次 2000 年 9 月第 1 版

印 次 2000 年 9 月第 1 次印刷

印 数 1~300 册

定 价 120.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电话:5412526/5414115/
5412212 邮编:610064

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回印刷厂调换。

前 言

中国水利学会 2000 年水力学专业委员会年会的重要文献《中国水力学 2000》即将正式出版，它记录了中国水力学界在世纪之交为推动水力学的发展所做的贡献。

水力学作为研究工程流体运动特征的基础理论，对推动水利事业的发展发挥了重要作用。它包括明渠水流、泄水及输水建筑物水力学问题和波浪、异重流、渗流及动床水力学等实用性较强的研究内容，中国的许多水力学先驱在上述领域中取得了很多可喜的成就，已载入水力学史册。新中国成立后，随着我国大型水利工程建设，水力学在高速水流、消能防冲、长距离输水、水流激振、原型水力学观测等方面取得了许多重大成果，这些成果标志着我国水力学研究者的智慧和做出的新贡献。进入 80 年代，随着计算机技术的发展，流体数值模拟技术获得快速的发展。我国的水力学研究者抓住了这一机遇，迅速地扩大了研究领域，在水力学专业委员会之下先后设立了环境水力学学组、计算水力学学组、随机水力学学组、水工程学组、城市水利学组，应用传统的水力学试验技术、原型观测技术和新兴的计算机技术，使水力学研究内容变得十分丰富。

传统水力学只研究水体的物理和力学特征，如今的环境水力学则在原有水动力特征的基础上同时研究水体的化学特征，甚至是生态特征。研究对象的尺度也从原来的水流紊动、质点运动等微观尺度及建筑物周边流动等小尺度扩大到洪水泛滥、海洋风暴潮、水库涌浪、湖泊环流、海水预测等大尺度的水流现象研究，这样就可以使水力学研究成果直接为各种宏观决策服务。不管是传统水力学问题还是新兴水力学问题，都由于计算技术的进步而变得更加深入和生动。加上最近发展较快的可视化技术、GIS 及专家决策支持系统等新技术，皆赋予水力学研究更大的生命力。各种水力学模型与上述技术结合将成为流域防洪、供水、水质管理的有力手段，进一步推动着水利事业的发展，也给我们水力学研究者提供了广阔的活动舞台。

在收入本书的 70 余篇论文中，其作者多是 40 岁以下的青年专家。他们活跃在我国水力学研究第一线，正在攀登前人所未有到达的高峰，这是十分可喜可贺的。本书的出版不仅反映了我国水力学研究的新成就，也显示了我国水力学研究队伍的壮大。借本书出版之机，祝愿在新的世纪里，我国水力学研究能做出新贡献，涌现出更多的青年专家和学者。

刘树坤

2000 年 8 月

目 录

水力学

Hydraulics

我国西部大开发中的灾害与生态环境问题.....	刘树坤	3
对泄洪水流溅水雾化的几点认识.....	范宝山 巩宪春 吴柏春	9
水动力荷载与闸门振动问题.....	严根华	15
黄河流域水资源现状.....	李世明 王玲 董雪娜	23
微型冲击式水轮机组应用.....	陈惠玲 王河生	31
基于神经网络原理的城市用水量预测模型及其应用.....	张土乔 俞亭超 程朴	35
小湾电站水垫塘区边坡饱和与非饱和渗流分析.....	胡云进 速宝玉 詹美礼	44
雨水渗透技术与城市水环境状态改善.....	许士国	50
水文计算中降水资料代表性分析 ——以窟野河为例.....	董雪娜 李世明 李婷	57
滞洪区在济南城市防洪中的作用和问题.....	张志华 孟庆斌	64
日海地新关系与新世纪水利事业发展.....	刘清仁	68
黄河宁夏内蒙古河段及万家寨水库 1999 - 2000 年度凌情分析	可素娟 钱云平 杨向辉 兰华英	75
水土保持是吉林省农业可持续发展的根本措施.....	代全厚 年吉刚 房淑琴	79
白石水库水力学问题研究综述.....	闫铁奎 张勤 贺清禄 刘波	84
挖泥船与城市水利建设.....	王究	89
21 世纪水利发展刍议 ——以吉林省水利发展为例.....	许晓鸿 王跃邦 刘明义	97

环境水力学

Environmental Hydraulics

水环境中绕流体尾流区流动与污染物混合输移特性研究.....	余常昭 李玉梁	103
博多湾水温和盐度的数值模拟.....	沈永明 郑永红 小松利光 邱大洪	113
非均匀网格上的高精度差分格式设计: 纯扩散方程.....	王烜 杨志峰	122
不规则及弯曲边界明渠水流及浓度场耦合三维代数应力通量模型	华祖林 王惠民	130
溶解氧对有机污染物降解影响的实验研究.....	蒲迅赤 李克锋 赵文谦 李嘉	141

曝气池中气泡上升速度的实验研究.....	程文 周孝德 郭瑾龙 李华	149
河流瞬时源垂向混合规律及其应用的研究.....	杜彦良 褚君达	154
天然河流中大尺度紊动结构的观测与分析.....	邓联木 叶闽	162
GIS 技术与水环境模型的集成.....	禹雪中	176
倾斜壁卷流的相似解.....	郭维东 槐文信 那宇彤	180
水库宽度平均的立面二维水温模型研究.....	邓云 李嘉 李克锋 罗麟	188
我国 21 世纪的防洪建设与水生态环境保护.....	廖文根 彭静 王立新	197
管理信息系统在水环境研究中的应用.....	王泽良 黄柱崇 淮斌	203
用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟三维湍浮力射流流动.....	郝瑞霞	210
恒定条件下物质输移扩散方程的几种解析解.....	武周虎	217
利用紊动装置研究悬浮物与沉积物对核素的吸附作用	沈珍瑶 李伟娟 杨志峰 倪世伟 姚兰根 蔡匀	223
天然河流纵向分散系数的理论预测.....	邓志强 褚君达	228
海河流域生态环境用水初步分析.....	林超 郭勇	235
ADV 测速技术在紊动射流流场特性研究中的应用	华明 唐洪武 王惠民 王志良	243
基于 GIS 的城市工业水环境模拟系统.....	程红光 杨志峰	250
螺旋管流的阻力损失.....	彭龙生 张羽 卢淮炜	259
东深供水源水生物处理工程中的水力学问题研究	黄本胜 赖冠文 黎子浩 邱静	271
水库库区粘性淤泥起动特性探讨.....	张兰丁	280
WQRRS 模型在水资源保护规划中的应用.....	郝芳华 杨志峰 李道峰	287
水电站下游河道水温预测.....	周新民 王滨蓉 邓云	293
平轴螺旋管流中的泥沙起动与起旋.....	张羽 彭龙生 张仙娥 马发勇	300
渔业与水质关系的典型资料剖析.....	吴生桂 胡传林 蔡少华	306
潮汐水域油污染计算初探.....	王艳红 王惠民	311
石油在水中悬浮物上的吸附研究.....	尹海龙 武周虎	321
以分子运动动能理论为基础的水质模型.....	邓家泉	328
深圳水库水文预报模型 Windows 版及 1999 年度运行情况分 析.....	周买春 王谦伟 董益林 陈斯俊 刘文珊	337
溪落渡水库重金属含量分析预测.....	李然 李嘉 李克锋 赵文谦	349
北京乡村水环境问题与对策研究 ——中英合作探索北方大城市周围农村水环境保护和污染治理途径.....	倪新铮	356
葛洲坝电站治漂效果及三峡电站治漂措施研究.....	杨文俊 孙尔雨	364
闹得海水库异重流排沙分析.....	闫铁奎 张勤 沈英浩 康君田	371

中国水源地保护的问题与对策 ——以太湖为例.....	成新 朱威	375
水系管理的生态环境基础.....	彭静 廖文根 孙平生	381

计算水力学

Computational Hydraulics

水流、泥沙问题的数值模拟与工程应用.....	倪汉根 金生	391
紊流数学模型在泄洪洞体型优选中的应用.....	许联锋 李建中 陈刚 谭立新	399
广义粘滞流模型及其在 N-S 方程求解中的应用.....	詹美礼 速宝玉 盛金昌	407
具有自由水面的二维密度流的数值模拟.....	江春波 邢秀英 梁东方	417
新津河口围海工程数学模型研究.....	江涌	426
丁坝近岸流动的三维仿真模拟.....	彭静 周胜	433
大涡模拟预报可靠性分析.....	何子干 夏庆福	441

三峡水库水污染控制研究专题

Special Issue for Study on Water Pollution Control of the Three Gorges Reservoir

三峡水库水污染控制研究及其进展.....	黄真理	449
三峡库区长河段水文水质同步观测研究.....	黄真理 吕平毓 李锦秀	459
三峡库区典型污染带观测研究 (I) ——黄沙溪岸边污染带.....	李崇民 黄真理	467
三峡库区典型污染带观测研究 (II) ——嘉陵江与长江汇流口污染带.....	李崇民 黄真理	475
三峡库区典型污染带观测研究 (III) ——李渡镇岸边污染带.....	黄真理 吕平毓	483
三峡水库纵向离散系数变化趋势预测.....	李锦秀 黄真理 苏德慧 黄金池	490
三峡库区污染物沿程变化规律模拟研究	李锦秀 黄金池 廖文根 苏德慧 彭静 禹雪中	494
三峡库区岸边污染混合区数值模拟与分析.....	陈永灿 刘昭伟 李闯	501
重庆交汇江段污染混合特性的数值模拟.....	洪益平 周雪漪 陈永灿 余常昭	509
三峡库区涪陵江段水流及水污染预测.....	江春波 周雪漪 程志强 陈立秋	520
流场和浓度场三维计算的数学模型与验证.....	李嘉 李克锋 邓云 李然	527
三峡水库坝前 50km 流场三维计算.....	李嘉 李克锋 邓云 李然	535

东深供水源水生物处理工程中的水力学问题研究

黄本胜¹ 赖冠文¹ 黎子浩¹ 邱 静¹

(1 广东省水利水电科学研究所, 广州 510610)

摘要: 作为一种比较成熟的污水处理技术的生物接触氧化工艺, 近 20 年来开始研究并应用于源水的预处理工程, 但其处理的水量和工程规模相对都较小。应用生物接触氧化预处理技术对东深供水工程的源水进行处理, 其设计的日处理能力达 $400 \times 10^4 \text{ t/d}$, 是前所未有的特大型水处理工程, 自然有其与“众”不同的水力学问题。本文介绍为配合该工程设计和运行管理所进行的一系列水动力学试验研究中的水力摩阻、曝气均匀性、出水闸过流量控制等试验研究的方法和成果, 为类似的工程提供参考。

关键词: 源水生物预处理; 填料; 曝气; 阻力; 沿程壅水叠加试验法; 系列试验延长法; 集气采样法; 淹没系数

1 前言

担负着向香港和深圳以及工程沿线东莞地区近 1 000 万人民提供主要饮用水水源重任的东江—深圳供水工程, 是一跨流域的大型引水工程。该工程从东莞市桥头镇的东江边抽取东江源水, 利用石马河天然河道作为输水载体逆流而上, 通过 8 级抽水泵站, 把水逐级提升至雁田水库或雁田隧洞, 再沿沙湾河流入深圳水库, 而后分别向香港及深圳供水。东深供水工程始建于 1964 年 2 月, 1965 年 3 月 1 日建成并正式向香港供水后, 随着香港、深圳市以及东莞沿线地区社会经济的发展, 需水量不断增加, 又先后进行了第一期、第二期和第三期扩建, 但都仍沿用原石马河和沙湾河天然河道作为输水载体。1990 年以前, 深圳水库向港供水的水质全部达到协议规定的国家地面二级水标准。1991 年后, 随着工程沿线经济的高速发展和人口的急剧增长, 东深工程水质污染状况日趋严重, 引起广东省水利厅和东深供水局的高度重视, 并积极采取各种有力的措施, 研究制定东深供水水质保证的系统工程。经多年充分的研究论证, 决定采用由同济大学环境工程学院设计的弹性立体填料加曝气系统的生物接触氧化处理微污染技术对东深源水进行预处理, 作为水质改善工程措施之一。该工程历时一年的建设, 于 1998 年底建成并投入运用。

1.1 生物接触氧化法原理简介

生物处理方法是利用在处理构筑物中驯化培养聚集的优势生物群体, 在生长过程中需要利用周围环境中的营养物质包括人们常称谓的水中的污染物, 进行新陈代谢, 达到

降解污染物、净化水质的目的。生物处理方法有两大类：活性污泥法和生物膜法。作为生物膜法的主体，是供微生物栖息、生长的载体，俗称填料。生物接触氧化工艺即属生物膜法的一种型式。所谓生物膜，是指生长在填料上的贫营养性微生物。为了使细菌在填料上生长(俗称挂膜)并起净化水质的作用，必须进行人工曝气供氧。故该工艺的另一组成部分就是曝气系统(见图1)。

1.2 东深源水生物处理工程的特点

对推流式的处理池，若设计的停留时间为 T ，生物处理池池长为 L ，则

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

$$Q = VBH \quad (2)$$

其中 V 为生物池的平均流速， B 为生物池的总宽度， H 为生物池的设计水深， Q 为设计的处理水流量。如果把生物池的体积定义为生物处理的环境容量 EV

$$EV = LBH \quad (3)$$

那么， EV 的大小就代表生物处理池规模的大小，由式(1)~(3)得：

$$EV = QT \quad (4)$$

可见，在满足停留时间的条件下，设计的处理水量直接决定其工程规模。东深供水源水生物预处理工程的设计水处理能力达 $400 \times 10^4 \text{t/d}$ ，其规模分别比目前国内建成运行的嘉兴石臼洋水厂($10 \times 10^4 \text{t/d}$)和宁波梅林水厂($4 \times 10^4 \text{t/d}$)的生物预处理工程大 40 和 100 倍；比日本较大规模的茨城县源水生物处理水厂($135\,675 \text{m}^3/\text{d}$)也大近 30 倍，是特大型水处理工程。其所遇到的关键问题和难点就是工程规模大，处理水量大，这是史无前例的，也是与其他同类工程的最大区别。因而在生物处理工艺和水工建筑物布置设计上存在一系列与水动力学问题有关的难题。为配合该工程的设计，我所独立完成共 6 个专题 11 项的试验研究工作，这些研究成果为该工艺成功应用于东深源水生物处理工程起到了决定性的作用。本文仅介绍水力摩阻、曝气均匀性、出水闸过流量控制等试验研究的方法和主要成果。

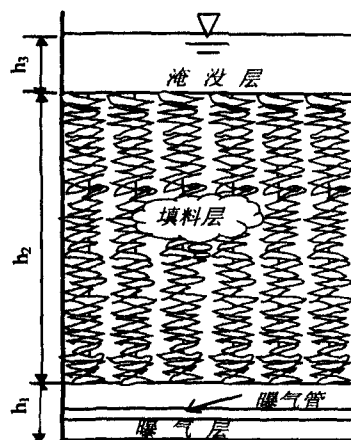


图1 生物槽剖面示意图

2 水力摩阻试验研究^[1, 2]

2.1 水力摩阻试验的作用

明渠水流的沿程水头损失

$$h_f = \lambda \frac{L}{4H} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

式中 h_f 为水头损失, λ 为阻力系数, 与流速 V 等有关, g 为重力加速度。可见, 生物接

触氧化工艺工程措施所引起的壅水值 $\Delta Z \sim L \times V^2$, 由式 (1) 可知, 在一定的设计停留时间下, 生物处理池越长, 流速越大, 壅水越高。也就是说, 壅水值与池长的立方成正比, 即 $\Delta Z \sim L^3$ 。

同样对照嘉兴石臼洋水厂生物处理池的规模, 其池长为 96m, 如果本工程的池长设计为 360m, 那么, 所引起的壅水值可比石臼洋水厂大约 52.7 倍。由此可知, 水力摩阻问题在其他规模相对较小的工程中可能不成为问题, 而在本工程中则很重要, 要么影响到上游供水渠的防洪, 要么影响下游水库的正常运行调度, 损失库容。随工艺设计和水工设计的深入, 水力摩阻试验的重要性和必要性愈来愈为人们所认同。首先, 通过室内的水力摩阻试验, 否定了原 1080m 池长的方案; 然后, 在 360m 池长方案的基础上, 进行了有利于工艺效果的填料布设方式的优化试验, 设计单位采纳了淹没水层有间隔填料的修改方案; 最后, 为了减少壅水值, 又将池长减小为 240m。

2.2 试验研究方法

显然, 生物接触氧化工艺的水力摩阻来源于填料的阻水面积及其物体阻力和曝气阻力。和一般的边界摩阻不同, 填料充满于水流中, 其摩阻具有三维的特性, 并且与水流相互作用, 使得水流流速发生重新分布; 曝气与水流的相互作用形成的水气二相流, 其中空气从微孔喷出还属水气二相浮射流, 其流动结构复杂, 这些都只能由实验求得其阻力和壅水值。设计的生物池出口水深为 3.8m, 流速 $V = 0.0813 \sim 0.375 \text{ m/s}$ 。试验分两个阶段进行, 首先在室内进行水力摩阻试验, 受试验室供水流量的限制, 难以进行水深达 3.8m 的 1:1 的断面模型试验, 为此, 我们提出了沿程壅水叠加试验法和系列试验延长法对该问题进行研究; 第二阶段则是利用后来建成的雁田现场工艺试验槽进行填料挂膜后的水力摩阻试验。

2.2.1 系列试验延长法

即在截取一定河宽的模型上, 进行不同水深 H 的系列试验。填料与原体一样, 但各部份的水深(填料高度)及施放流量按试验水深与原体水深之比例缩小。如此之结果是各组试验的某一断面平均流速 V 要保持一致, 故模型与原体的物体雷诺数 $R_e = Vd/\nu$ 亦相等, 其中 d 为填料体尺寸, ν 为水流粘滞系数。由此可保证模型阻力与原体基本一致。然后根据各组试验成果点绘 $\Delta Z \sim H$ (水深) 的关系曲线, 延长而得到原体实际水深时的水位壅高值。

2.2.2 沿程壅水叠加试验法

由于模型长度有限, 没法一次求出填料敷设长度 $L=360\text{m}$ 或 1080m 时的壅水值。但因处理槽为人工规则矩形水槽, 故可采取分段叠加的方法, 即第一次控制下游水位 Z_F , 测得有效填料敷设长度内上游的水位 $Z_{上1}$, 再用 $Z_{上1}$ 作为下游控制水位, 求得第二次有效填料敷设长度内上游的水位 $Z_{上2}$, 依次类推, 则可求得任意填料敷设长度的壅水值。

2.3 模型设计制作、曝气系统及其控制设备

室内的水力摩阻试验槽宽 0.8m、高近 2.0m、长 45m, 填料可敷设 30m, 叠加试验长度可用 20m, 最大供水流量约 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。曝气装置为穿孔曝气管, 管间距为 0.5m, 穿

孔管开二排向下,与垂直方向成 45° 角的孔,孔直径 2mm,同侧孔间距 14cm,两侧孔错开布置。用空压机作为供气设备,安装有大小不同型号的 8 个转子流量计以及 20 个压力表对气流量大小及其分配进行监控。一级主管装有旁通阀,可以调节供气量的大小。

雁田试验槽有 A、B 两槽,槽宽均为 1.0m、高约 4.3m、长 30m,原设计只满足工艺试验要求,供水流量较小。为了进行水力摩阻试验,后对 A 槽进行改造,改造后的 A 槽高达 5.0m,最大供水流量约 $0.43\text{m}^3/\text{s}$ 。试验槽填料敷设长度 20m,叠加试验长度为 10m。

沿程壅水叠加试验法解决试验槽长度“短”的问题,系列试验延长法则解决室内试验水深不足的问题。因此,雁田试验槽水力摩阻试验只用沿程壅水叠加试验法;而室内试验槽的水力摩阻试验则要用到沿程壅水叠加试验法和系列试验延长法。试验的平均流速和单位面积的曝气量与原池相等。

2.4 主要试验研究成果

2.4.1 室内和现场水力摩阻试验成果比较

在广东省水科所室内试验槽进行了填料布设修改方案的池长 $L=360\text{m}$ 和 240m , $V=0.122\text{m/s}$ 和 0.0813m/s 的水力摩阻试验,试验水深组次共 5 组,叠加计算延长得到的壅水值见表 1。室内试验的最大缺陷是没能模拟填料挂膜(泥)的情况,另外水深没能达到 3.8m,只能通过系列试验延长得到 3.8m 水深的壅水值。雁田试验槽填料挂膜(泥)后的水力摩阻试验结果也列于表 1。可见,填料挂膜(泥)后的壅水值比没挂膜(泥)的大,说明填料挂膜(泥)后阻力增大。

表 1 修改方案填料挂膜与否壅水试验成果比较

试验日期	流速(m/s)	池长(m)	气水比	试验地点	填料状态	壅水值(cm)		$(\Delta Z - \Delta Z_0)/L$
						无曝气 ΔZ_0	曝气 ΔZ	
1997.2	0.122	360	1:1	水科所	未挂膜	68.0	86.3	0.051
1997.8	0.122	360	1:1	雁田	正常挂膜	82.3	109.4	0.075
1997.7	0.0813	240	1:1	水科所	未挂膜	26.2	38.2	0.050
1997.8	0.0813	240	1:1	雁田	正常挂膜	39.4	58.6	0.080
1997.10	0.0813	240	1:1	雁田	长苔藓虫	52.8	70.1	0.072

室内试验的结果和雁田试验槽的结果规律是一致的,曝气增加的单位长度的壅水值也较接近,雁田试验槽略大。这因为室内试验的曝气器为穿孔曝气管,曝气管间距为 0.5m;而雁田试验槽曝气器为微孔曝气头,横向间距为 0.5m,纵向间距为 1.0m,因此,其单位面积的曝气强度比室内试验的大,曝气造成的阻力也大,并且微孔曝气头出来的气泡比穿孔曝气管为小,小气泡在水中的上浮速度比大气泡为小,在水中的停留时间较长,相应地水中的含气量也较大。这些都从另外一个侧面说明沿程壅水叠加试验法和系列试验延长法是合理的、正确的。

2.4.2 流速分布与各水层流量分配

实测的流速分布显示（见图 2）：由于填料的存在，使得断面垂线流速重新分布，呈填料上下层水体流速大，填料层流速较小且分布均匀的规律。实测雁田试验槽填料挂膜(泥)后的流速分布表明：填料层的流速比曝气层和淹没水层的流速小 4~10 倍。这对防止处理池底泥沙落淤是有利的，但对生物硝化工艺的效果来说可能是极为不利的。与无曝气比较，曝气后曝气层和淹没水层的流速减小。

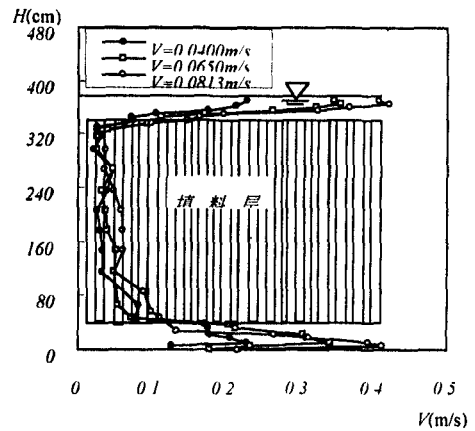


图 2 不同断面平均流速组次流速沿垂线分布

室内和现场雁田试验槽的试验都显示，从生物池出口往上游，各层流量分配的规律是：底层 (h_1) 沿程逐渐减小；上层 (h_3) 随壅水的不断增大，水深加深，过流量逐渐增大；填料层 (h_2) 则沿程逐渐减小。曝气后，填料层过流量比无曝气时增大，相应地上层和底层减小。这说明曝气不仅增大水流阻力，对促进各层流量交换是有较大作用的。

2.4.3 填料挂泥问题及填料不同挂膜(泥)状态壅水比较

3m 长、20cm 直径的单体填料仅 250g 左右，表 2 是试验设置的活动填料不同挂膜（泥）状态时的重量比较。可见，填料挂膜（泥）后重量是很大的。须说明的是：活动填料经常提起来观察、称重等，人为影响较大，实际固定的填料挂泥重量要大得多。

表 2 填料不同挂膜（泥）状态时的重量比较

日 期	位置 (上游起之距 m)	0	5	10	15	20
1997.8.10	填料正常挂膜(泥)湿重(0.5kg)	9.4	11.3	12.0	6.2	14.2
1997.9.21	长苔藓虫后填料湿重(0.5kg)	22.4	20.7	17.5	6.5	13.7
1997.10.12	长苔藓虫后填料湿重(0.5kg)	12.5	24.5	16.5	7.8	12.0

由表 1 可见，填料不同挂膜(泥)状态时的壅水是不同的。实测资料计算分析表明：正常挂膜(泥)填料比室内未挂膜的填料的综合糙率大 1.27 倍；运行一段时间，在一定环境条件下，填料上生长有苔藓虫，此时生物池的综合糙率又比填料没有生长苔藓虫时大 1.23 倍。试验还实测了生长苔藓虫时不同流速对应的均匀流临界底坡：

$$i(\%) = 48.735V^2 + 0.3344V \quad (\text{无曝气}) \quad (6)$$

$$i(\%) = 25.607V^2 + 4.0549V \quad (\text{气水比 } 1:1) \quad (7)$$

3 曝气均匀性试验研究^[3]

曝气作为生物接触氧化工艺的重要组成部分之一, 主要的作用是充氧和造成有利于生物净化的水流流态。生物膜的多少以及其净化效果与曝气装置和曝气量密切相关。曝气装置布设于生物池的底部, 一般来说, 曝气量与处理水量之比, 即气水比越大, 处理效果愈好。而从工程造价和运行管理的角度看, 气水比越大, 投资愈大, 运行费愈大。而同样的气水比情况下, 曝气量在处理池的分布如何, 即曝气均匀性则关系到能否充分利用有限的供气量, 达到较好的净化效果的问题。研究穿孔曝气管在各种运行条件下的曝气均匀性, 目的是为工程设计提供依据和控制允许的安装误差。

3.1 模型设计制作及量测技术

设计的曝气装置为穿孔曝气管, 穿孔管直径 $D_N=80\text{mm}$, 长 12.5m , 沿垂直方向成 45° 向下两侧交错开直径 $d=2\text{mm}$ 的孔, 同侧孔距 88mm , 异侧孔距 44mm , 孔口流速 18m/s , 穿孔管流速 3.2m/s , 生物池有效水深 3.8m 。

试验在修改制作的 $20\text{m}\times 0.5\text{m}\times 1.0\text{m}$ 的玻璃水槽模型上进行, 以便有利于观察和测量曝气的情况。曝气管用 $D=80\text{mm}$ 的镀锌管加工制作, 穿孔段长 12.5m , 总长约 12.8m , 将其置于玻璃水槽模型中, 可调整管坡。穿孔管大小、长度, 孔眼布置方式、孔径、孔距保持和生产性运行条件一致, 管内及孔口流速亦尽量和原体一致。但室内试验水深难以满足 3.8m 有效水深要求。为弥补室内试验水深之不足, 试验还研究同一曝气量和曝气管放置方式下, 不同水深对其曝气均匀性的影响效应。供气设备为鞍山空压机厂生产的 W-0.5 型空压机, 供气管进入曝气管之前有放气旁通阀, 可调节气量。模型头尾有供水系统和水深调节装置。

利用作者提出的集气采样法和研制的采样器测量穿孔曝气管孔眼的出气量, 以分析曝气量沿曝气管分布的变化规律。该测量方法的原理如图3所示: 把带有刻度的集气筒放入挟气水流中适当深度, 集气筒顶部与大气连通, 然后关闭集气筒顶部大气连通口, 此时筒中气压为大气压 p_a , 垂直把集气筒提升至所要测量的位置, 则经过测量点的挟气水流中的气泡就会进入集气筒, 从而使筒中液面不断降低, 设液面下降 Δh 高度时所花的时间为 T , 则单位时间内通过该点单位面积的气流量 $q_a(x, z)$ 为:

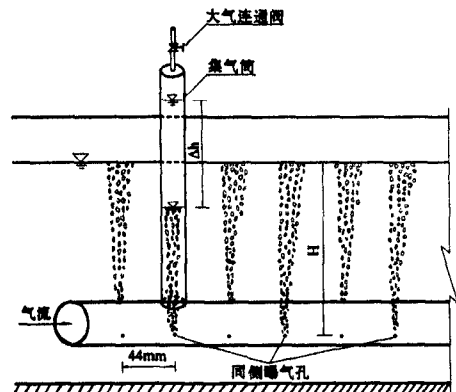


图3 集气采样法测量曝气孔曝气量示意图

$$q_a(x, z) = \frac{\Delta h}{T} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (8)$$

式中: D 为集气筒直径。试验的实践经验表明, 采用直接测量单个曝气孔的出气量的方法, 能够较好地控制测量误差, 提高测量精度。

3.2 穿孔管曝气均匀性试验研究成果

3.2.1 曝气量沿曝气管分布的变化规律

曝气量沿曝气管的分布基本上呈直线变化的规律,其方程可写为:

$$q_a(x) = Ax + B \quad (9)$$

相关分析得到的系数 A , B 值如表3。

表3 不同管坡 J 的 A , B 值

$J(\%)$	3	2	1	0	-1	-2	-3
A	3.7239	2.6457	1.0411	0.7764	-0.9978	-1.3782	-2.1309
B	37.864	47.642	56.128	59.393	68.907	71.631	77.529

3.2.2 不同淹没水深 H 对穿孔曝气管曝气均匀性的影响

为了研究不同淹没水深 H 对曝气量分布均匀性的影响,在同一管坡 J 和同一曝气流量 Q_a 的前提下,进行了不同淹没水深 H 的试验。成果表明:水深 H 对曝气量分布均匀性的影响很小。本试验的成果可以推广到原体 3.8m 水深的情况。换句话说,这充分证明本试验设计的合理性。

3.2.3 曝气均匀性与曝气管坡度的关系

以上试验成果显示,不同管坡 J 对曝气量分布均匀性影响较大。 $|J|$ 越大,曝气越不均匀。可以看出,式(9)中的 A 值的绝对值的大小代表的就是曝气沿曝气管分布的均匀程度, A 愈接近零,曝气量分布愈均匀。根据表2中 A , B 值随 J 的变化,相关分析得:

$$A = 987.54J + 0.5257 \quad (10)$$

$$B = -6419.7J + 59.871 \quad (11)$$

式(10)中 $A=0$,可计算得 $J=-0.532\%$,也就是说,在水面是水平的情况下,曝气管设计为 $J=-0.532\%$ 时,对于本文所研究的特定条件,沿曝气管曝气量分布最均匀。

4 生物池出水闸过流量试验研究^[4]

4.1 试验研究目的

东深供水源水生物预处理工程生物槽设计的处理流量为 $7.716\text{m}^3/\text{s}$ 。每条槽进口布置有2个宽4m、对称的平底进水闸;出口有一宽6m的平底宽顶堰闸,用于控制生物槽的水位和流量。实际运行管理时,由于上游来流量和下游库水位的变化,要求开启生物槽出口闸门以控制槽末水深等于3.8m。此时,需知道生物槽实际的过流量,以便根据设计的气水比来控制曝气量,实现运行管理的自动控制系统。为此,制作一大比尺(1:10)的模型,通过不同的可能的运行条件下的大量试验,研究了不同水力条件下生物槽出水闸的过流能力,为自动化运行管理提供具有较高精度的计算公式,确保工程实际运行能满足设计的运行条件并发挥较好的处理效果。

4.2 试验研究成果

闸孔出流可分为自由出流和淹没出流。对于自由出流

$$Q = \mu \cdot e \cdot b \sqrt{2gH_{\perp}} \quad (12)$$

其中, Q 为过流量, μ 为流量系数, b 为堰宽, e 为开度, $H_{\perp}$ 为上游堰上水头。由试验资料分析得自由出流时流量系数与闸门开度的关系为: 图4 流量系数与淹没度的关系

$$\mu = 0.3292e^2 - 0.5364e + 0.7032 \quad (13)$$

对于淹没出流

$$Q = \sigma_s \mu e b \sqrt{2g\Delta H} = M e b \sqrt{2g\Delta H} \quad (14)$$

其中, σ_s 为淹没系数, ΔH 为上下游水头差。如所周知, 淹没系数 σ_s 的确定比较复杂和烦琐。大量的试验研究表明 (图4): 淹没出流又可分为不完全淹没出流和完全淹没出流, 闸孔不完全淹没出流的流量系数为下游淹没水深与开度的比值 h_s/e 的函数, 闸孔完全淹没出流的流量系数为一常数。即:

(1) $1 < h_s/e \leq 5.1$ 时, 为不完全淹没出流

$$M = 0.921 \left(\frac{h_s}{e} \right)^{-0.2317} \quad (15)$$

(2) $h_s/e > 5.1$ 时, 为完全淹没出流

$$M = 0.6314 \quad (16)$$

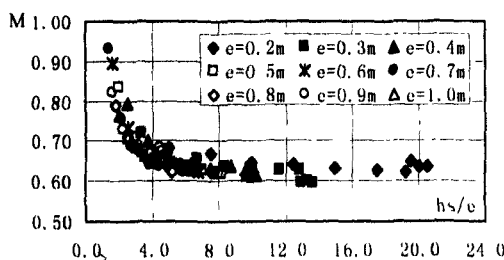


图4 流量系数与淹没度的关系

现场不同开度的实测表明, 上述公式计算的流量值和现场实测值吻合较好, 误差均在 5% 以内。

5 结语

实际工程所遇到的新问题赋予传统而古老的水力学科新的研究内容。东深供水源水生物处理工程已建成投入运行近二年, 处理效果理想, 获得了巨大的经济效益和社会效益。为配合该工程设计而开展的一系列有特色的水力学问题的研究, 为该工艺成功应用于东深源水生物处理工程起到了决定性的作用。限于篇幅, 其他研究成果参见文献[5-7]。

参考文献

- [1] 黄本胜, 赖冠文, 邱静, 陈树容, 黎子浩. 东深供水渠源水生物处理工程水力摩阻试验研究. 《第十一届全国水动力学研讨会文集》, 北京: 海洋出版社, 1997, 534-539
- [2] Huang Bensheng, Lai Guanwen, Qiu Jing, and Li Zihao. Hydrodynamic and sediment problems of

biological contact aeration process for water supply source pre-treatment. *Environmental Hydraulics*, 1998, 789-794

- [3] 黄本胜, 赖冠文, 欧阳显良, 邱静, 陈树容. 穿孔曝气管曝气均匀性试验研究. *水动力学研究与进展*, 1998, 13: 534-539
- [4] 邱静, 张辉, 黄本胜, 赖冠文. 闸孔出流过流量计算公式的研究与应用. 《第十三届全国水动力学研讨会文集》, 北京: 海洋出版社, 1999, 350-356
- [5] 赖翼峰, 赖冠文, 黄善和. 生物接触氧化处理槽内泥沙淤积特性及水力清淤分析. 《第五届全国海事技术研讨会文集》, 北京: 海洋出版社, 1999, 614-618
- [6] Lai Yifeng, Lai Guanwen, and Li Zihao. Wate mixing and exchanging in biological contact oxidation process flumes of water supply works nad and wastewater engineering. *Environmental Hydraulics*, 1998, 795-800
- [7] 黄本胜. 生物接触氧化法工艺试验水力比尺. 《第四届全国海事技术研讨会文集》, 北京: 海洋出版社, 1998, 815-820

水库库区粘性淤泥起动特性探讨

张兰丁¹

(1 南京水利科学研究院水工研究所, 南京 210029)

摘要: 本文介绍了某水库库区原状淤泥起动流速试验全过程及试验结果, 通过对试验结果分析认为, 该库区表层淤泥的起动流速一般大于下层淤泥, 因此对下层淤泥可以起到保护作用。此外起动流速试验还揭示了该库区淤泥的分层特性以及起动流速与天然湿容重及粘粒含量之间的定性关系。通过计算给出了该库区固结粘土及表层淤泥的颗粒组成计算公式, 研究成果可作为该课题今后研究的基础。

关键词: 淤泥; 起动流速; 分层特性; 颗粒组成

1 前言

泥沙淤积现象在水库及河流中广泛存在, 由于工程设施的建立往往需要考虑水流对淤积泥沙的扰动情况, 因此需对淤积泥沙的起动特性加以研究。本文根据某抽水蓄能电站建设的需要, 对下库出水明渠出口附近的库区在发电及抽水工况下所形成的往复水流是否会对明渠出口附近表层泥沙形成扰动, 从而影响下库水质, 以及是否会有泥沙进入隧洞而磨损机组的工程问题进行了研究。1997 年作者曾对下库出水明渠尾部附近开挖过的区域即原库底固结粘土进行过原状土起动流速试验, 近底起动流速大约在 1.36 ~1.66m/s, 详见[3]。1998 年又在下库出水明渠尾部附近淤积较深区域进行了原状淤泥的取样, 进行了淤泥起动流速试验, 目的是针对上述工程部门所关心的两个问题提供评估依据。

2 原状土取样过程简介

根据取样前向有关部门对下库库底淤积泥沙特性的初步了解, 认为下库原库底泥沙及淤积泥沙均属粘性泥沙, 需进行原状土的起动流速试验研究。根据淤积厚度的分布情况, 沿原河床及冲沟一带淤积厚度一般在 1.0~1.5m 左右, 两岸冲积阶地上淤积厚度约 0.2~0.5m 不等, 分别采用不同长度的原状土取样设备, 这样就保证了整个淤积层全部取出。根据需要在明渠尾部附近布设了 6 个取样点, 每点取 4 个土样, 共取土样 24 个。

3 原状淤泥起动流速试验

3.1 试验情况简介

在起动流速试验进行之前, 首先选定每个取样点的第 2 号土样进行土力学强度指标

测试及颗粒组成分析（比重计法），以便对六个取样点的土质进行对比。土力学强度指标测试表明，6 个取样点的土质均为粘土。其表层淤泥为高液限粘土，天然湿容重 $\rho_s < 1.6 \text{g/cm}^3$ ，粘粒含量较高（40%左右）。底层为低液限粘土，俗称亚粘土，由其天然湿容重（ $\rho_s > 1.6 \text{g/cm}^3$ ）可以看出为固结粘土，是原库底土层。由此表明，此次所取土样包含了整个淤积层。土样取得后一直在水中养护，因此保证了土样的天然特性。由于所取土样包括了各取样点自该水库建库以来总的淤积厚度，因此此次起动流速试验较为详细的研究了整个淤积厚度不同层次的淤泥起动状况。

试验在 40cm 宽矩形活动玻璃水槽中进行，试验过程中通过逐步加大水槽底坡来调整流速。流速用本院自制的 86 型直读式多功能测速仪及毕托管对照测量，并通过量水堰进一步验证，部分试验结果绘于图 1。图 1 的试验结果表明该区域各取样点淤泥的起动流速具有良好的规律性。

在起动流速试验进行之后，又有针对性的选择了 7 个土样进行颗粒组成分析及天然湿容重测试，目的在于分析天然湿容重及粘粒含量（ $d < 0.005 \text{mm}$ ）对起动流速的影响，作为粘性泥沙起动流速深入研究的积累，测试结果见表 1。

表 1 及图 1 给出的起动流速为近底流速，测量位置距土样表面约 1.0cm，实际运用时可暂时按下述公式将近底流速换算成断面平均流速：

$$U_b = \frac{\bar{V}}{\frac{m}{m+1} \left(\frac{H}{Y}\right)^{\frac{1}{m}}}$$

式中： U_b ：近底起动流速，m/s； $\bar{V}$ ：断面平均流速，m/s； H ：原体水深，m；此次试验暂取 $m=6.0$ ， $y=0.01\text{m}$ 。

表 1 各种粒径颗粒的起动流速

	湿	颗 粒 组 成				起
土样	密 度	粒 径 大 小				动 流
		(mm)				
编号	ρ_s	>0.075	0.075-0.005	<0.005	d_{50}	速
	g/cm ³	%	%	%	mm	m/s
1	1.51	7.5	69.5	23.0	0.0140	1.12
2	1.37	3.2	41.8	55.0	0.0041	1.61
3	1.36	19.0	35.0	46.0	0.0059	1.90
4	1.35	10.0	40.0	50.0	0.0050	1.73
5	1.33	27.0	31.0	42.0	0.0074	1.47
6	1.46	17.0	48.0	35.0	0.0082	1.47
7	1.99	9.5	64.5	26	0.0124	1.95