

Design on Aeration Scheme of Jianhe River's Urban Part*

Xiaomei Yu, Zhaohua Li, Kun Li, Li Jiao

Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan
Email: yuxiaomeifly@163.com

Received: Jul. 9th, 2012; revised: Jul. 28th, 2012; accepted: Aug. 10th, 2012

Abstract: Pollutants in Jianhe River has gone beyond its water environmental capacity. As a result, the river has been very seriously polluted. The appearance of black and odorous in Jianhe River caused a bad influence on coastal residents. Moreover, the confluence of Jianhe River is Danjiangkou reservoir that is the source of South to North Water Transfer Project. So dirties water from Jianhe River will pollute the water in Danjiangkou reservoir. Therefore, to improve the water quality of Jianhe River, aeration is chosen to solve this problem. According to the particular case of Jianhe River, actual oxygen demand of Jianhe River is result to be 1500 kgO₂/d. After a comparison of different aerations, jet aeration is proved to be the most suitable one for Jianhe River. Then the paper makes an introduction to the installation location, installation methods, protection, control, maintenance and circuit of the aeration. Moreover, aeration can not only improve the environment of Jianhe River, but also be an important factor on the economic growth and the communication of different cultures.

Keywords: Jianhe River; Danjiangkou Reservoir; Aeration; Oxygen Demand; Jet Aerator

剑河城区段曝气复氧方案设计*

余晓妹, 李兆华, 李 昆, 焦 粟

湖北大学资源环境学院, 武汉
Email: yuxiaomeifly@163.com

收稿日期: 2012年7月9日; 修回日期: 2012年7月28日; 录用日期: 2012年8月10日

摘 要: 武当山剑河城区河段水环境容量严重超载, 污染严重, 出现恶臭, 成为城区旅游景观的一大诟病, 影响沿岸居民生活。且由于剑河最终汇入南水北调源头——丹江口水库, 对源头水的水质会产生一定影响。因此对剑河的污染治理是当务之急。本文考虑对剑河实施曝气复氧工程以提高河水中溶解氧, 加快污染物降解, 恢复其生态平衡。根据剑河实际情况和处理目标, 采用一级反应的箱式模型计算出剑河需氧量约为 1500 kgO₂/d。在对现有常用各种曝气机的优缺点进行比较后, 选择了与剑河耦合度最高的射流式曝气机, 并对其安装位置、安装方法方式、防护、控制、电路、后期维护等各方面进行了设计探讨。而在综合效益方面, 对剑河进行人工复氧后不仅可以改善水环境且对武当山地区的经济和文化也有一定积极作用。

关键词: 剑河; 丹江口水库; 曝气复氧; 需氧量; 射流式曝气机

1. 引言

溶解氧是衡量河流水质重要的综合性指标, 对河流水体自净过程起着非常重要的作用^[1]。河流水体的

溶解氧主要来源于大气复氧作用和水生植物的光合作用, 其中大气复氧起着主要作用。水体的溶解氧主要消耗于底泥氧化、硝化反应、有机物降解、生化及生物合成等过程、水生生物和植物生长等^[2]。当耗氧过程的总耗氧量大于复氧总量, 则水体的溶解氧水平

*国家民生科技计划(2011MSB5007)资助。

会逐渐下降，直至消耗殆尽。此时水中的好氧分解停止，引起有机物的厌氧发酵，分解出 H_2S 、 NH_3 、 CH_4 等气体，出现恶臭，毒害其他水生生物^[3]，水生生态系统遭到严重破坏。因此提高水体的溶解氧是治理河流的根本原则。

曝气复氧是通过曝气机将大量氧气充入水体，可以迅速提高水中溶解氧水平，此方法对污染严重的水体具有明显作用。其具体表现在消除水体黑臭，降解有毒有害物质，增加水中的溶解氧，恢复生态平衡等方面^[4]。此法作为一种投资少见效快的河流治理措施，已在国内外污水治理工程中被已大量应用，并取得满意效果^[5]。

2. 剑河概况

2.1. 简介

剑河为芝河流域右岸一级支流，流域面积 47.2 km^2 ，主河道长度为 26.5 km。从龙潭沟进入城区，城区段河道长 3.50 km，穿过工厂、居民稠密区、公路、学校和机关单位至城区出口，最后顺流而下汇入丹江口水库。剑河属山溪性河流，河道狭窄，陡坡水流湍急，河道中布有 5 个橡皮坝。河流雨源性特征明显，雨季河水陡涨陡落，旱季径流很少，水环境容量很小。此外水利、防洪和景观工程隔断了河流的连续性，水动力条件不佳，淤积和水质恶化现象严重。

2.2. 水质状况

根据调查小组在剑河设置的 32 个监测点采集的水样监测数据，将剑河水质指标的检测数据列于下表 1。

从单一水质参数来看，剑河氮源污染较为严重，总氮和氨氮的污染尤其严重，其次是总磷的污染。污染物主要来自剑河下游两岸的废水排放和个别工厂工业废水的直排，其中乔家院桥处的排污管道的污水排放影响最严重，是水质恶化的重要因素。

Table 1. Quality of water
表 1. 水质监测数据

COD	DO	TN	TP	NH_3-N
97 mg/L	1.8 mg/L	6.5 mg/L	0.25 mg/L	1 mg/L

从富营养化程度来看，目前剑河流域主要营养水平为重富营养状态和极重富营养状态，故剑河流域的营养元素已处于非常高的水平。

如今只有采取有力的控制手段，才能有效改善现有水质并使其不进一步恶化。人工曝气复氧法能迅速提高水体含氧量，对水体自净有较大促进作用，将此法应用于剑河治理，可取得较好效果。

3. 需氧量计算

污染河流的需氧量取决于河流的实际水质和水体自净能力^[6]，是河流曝气复氧工程中最重要设计参数。

3.1. 出水目标

通过曝气复氧工程恢复剑河过量消耗的溶解氧，加速水中有机污染物的降解，消除黑臭，提高水质和水体自净能力，改善水环境，使剑河的溶解氧达到 3 mg/L，达到水生动物能够生存的水平。

3.2. 需氧量计算

剑河城区河段总长约 3500 m，建有五级橡胶坝，平均水深为 1.21 m，平均河宽 21 m，平均流量 0.55 m^3/s ，非洪水季节水体滞流。

通常当水体污染严重，长期处于黑臭状态时，在计算需氧量时需要综合考虑还原物质耗氧、有机物耗氧、硝化耗氧、底泥耗氧等耗氧作用和大气复氧、藻类光合作用复氧等复氧作用^[7]。但由于现场情况较复杂，影响因素较多，需结合实践后综合考虑，因此为方便起见，曝气量的初步确定时只考虑大气复氧作用^[8]。

1) 计算公式

对于这一类面积小、水深浅的滞流水体河段，可以采用基于一级反应的箱式模型^[9]。计算公式为：

$$O = [1.4L_0(1 - e^{-k_1t}) - (C_s - C)(1 - e^{-k_2t}) + C_m] \times V$$

式中 O ——水体的需氧量，g；

V ——水体的体积， m^3 ；

t ——充氧时间，d；

C ——水体的溶解氧浓度，mg/L；

L_0 ——水体初始的 BOD_5 浓度，mg/L；

K_1 —— BOD_5 生化反应速率常数， d^{-1} ；

C_s ——水体的饱和溶解氧, mg/L;

k_2 ——水体的复氧速率常数, d^{-1} ;

C_m ——维护水体好氧微生物生命活动的最低溶解氧浓度, mg/L。

充氧时间 t 根据下式确定:

$$L = L_0 (1 - e^{-k_2 t})$$

式中 L ——水体改善后的 BOD_5 浓度, mg/L。

2) 计算参数

计算参数主要采用剑河 2011 年 10 月测定平均值, 部分参数参照国内同类研究的成果:

设计水温: 25°C(剑河河道夏季平均水温);

设计曝气水域长 3.5 km, 平均水深 1.21 m, 平均水宽 21 m;

BOD_5 反应速率常数: $K_1 = 0.1 d^{-1}$;

复氧系数 K_2 与风力、水温、流速、水深等因素有关, 一般来说, 在流速 $u < 0.5 m/s$ 时, 可取 $K_2 = 0.2 d^{-1}$;

经测定, 初始 BOD_5 浓度 $L_0 = 20.0 mg/L$;

设水体改善后的 BOD_5 浓度满足地表水 IV 类标准: $L = 6.0 mg/L$;

水体的饱和溶解氧: $C_s = 8.5 mg/L$;

C_m : 3 mg/L。

3) 计算结果

根据箱式模型对剑河城区段曝气段需氧量进行初步估算, 为了确保 DO 达到 3 mg/L 的预期目标, 理论上该段水体的总需氧量约为 777.6 kgO_2/d 。此值为无冲击负荷时的需氧量, 考虑到雨水等突发状况的冲击负荷, 应将需氧量留有余地, 将需氧量加倍此值为 1500 kgO_2/d 即 62.5 kgO_2/h ^[10]。

4) 供气量

供气量的计算公式为

$$G_s = \frac{R_0}{0.28 \times E_a}$$

E_a ——氧转移速率; 20%。

剑河曝气复氧所需空气量约为 1116 m^3/h 。

4. 曝气设备选型

4.1. 技术背景及曝气设备技术选择

根据剑河下游(城区河段)水质改善的要求(消除黑臭)、河道条件(包括水深 0.2~2.5 m、有橡胶坝阻隔、

流速较小、河道规则)、河段功能要求(旅游景观)、污染源特征(如长期污染负荷)的要求, 对现有常用的 6 种曝气技术进行了必选, 对其各自特点和与剑河的耦合程度归纳如表 2。

由此表可知, 纯氧增氧系统和鼓风机-微孔布气管曝气系统由于成本高维修困难且水深不够^[11], 不适用于剑河的曝气工程。只有叶轮吸气推流式曝气器和水下射流曝气设备可以在剑河使用。而叶轮吸气推流式曝气器运行时易产生泡沫^[12], 影响剑河的景观效果。故水下射流曝气是剑河曝气复氧的首选技术。水下射流曝气设备安装方便, 占地小, 无噪音污染, 唯一的缺点是影响通航^[13]。由于剑河已没有航运功能, 并不妨碍设备的运行, 因此与此工程耦合程度最高的是水下射流式曝气设备。

4.2. 设备参数及结构

根据河流需氧量和设备曝气能力及性价比等因素综合考虑, 此曝气复氧工程采用川源股份有限公司的沉水式 JA-7.5-100 射流式曝气机。此型号曝气机的充氧量为 7.1~8.0 kgO_2/h , 采用 16 台间歇式工作, 每次运行 8 台, 即可达到剑河需氧要求。曝气机具体性能参数如表 3。

5. 设备安装设计方案

5.1. 曝气机的安装选址

剑河流经城区段水质严重恶化, 水体发黑发臭, 排入剑河的污染物已远超过剑河本身的自净能力。而且此河段河道已硬化, 并建有五级橡胶坝, 用以蓄水。根据潜水射流式曝气机的最低和最高安装水深的要求, 通过实地测量河内枯水期和丰水期的水位, 选择了 8 个固定点安装 16 台曝气机。安装点均在橡胶坝上游方向 10 米以内, 以保证水深要求。

5.2. 设备固定

考虑到剑河的洪水期水量大, 冲击力强, 曝气机的安装采用内置河岸墙壁法, 以保证设备正常运行。其具体安装如图 1 所示。

如图, 在固化河道壁内开凿出一个开间为 120 cm, 进深 80 cm, 高度为 100 cm 的方形槽, 槽内下底面距河道底部 50 cm, 将射流器的电机部分放置在壁

剑河城区段曝气复氧方案设计

Table 2. Technique selection of aeration for Jianhe River
表 2. 剑河曝气技术比选表

项目	纯氧增氧系统		鼓风机 - 微孔管曝气系统	叶轮吸气推流式曝气器		水下射流曝气设备
	纯氧 - 微孔布气设备	纯氧 - 混流增氧系统		轴向流液下曝气器	复叶推流式曝气器	
充氧效率	15% (5 m 水深)	70% (3~5 m 水深)	25%~35%	1.5~1.8 kgO ₂ /(kW/h)	1.8~2.0 kgO ₂ /(kW/h)	1~1.2 kgO ₂ /(kW/h)
安装	工程量大	较方便	工程量大 安装难度大	方便	方便	方便
维修	困难	困难	方便	方便	方便	较方便
对环境的影响	较小	较小	航运	泡沫	少量泡沫	较小
噪声	LOX: 无 PSA: 较强	LOX: 无 PSA: 较强	强	较轻	轻	轻微
水深范围	水位高于喷口	水深 > 4 m	水深 > 4 m	水深 3~6 m	水深 2~5.5 m	水深 2~3 m
与剑河的耦合性	成本高 水深不够	成本高 水深不够	技术复杂 水深不够	基本可行	可行	可行

Table 3. Performance parameter of selected aeroator
表 3. 曝气机性能参数

型号	功率		空气量水深		溶解氧	适合水深	重量
	电压	KW	m ³ /h	m			
JA-7.5-100	380 V	7.5	115	4	7.1~8.0	2~6	195

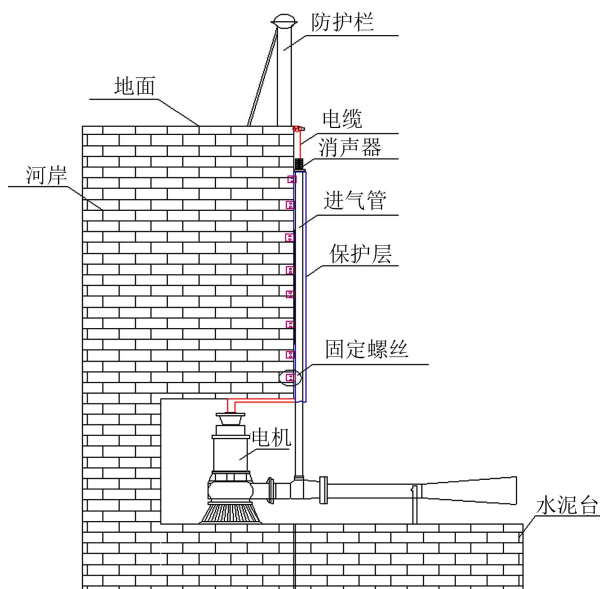


Figure 1. Setting of selected aeroator
图 1. 曝气设备安装

槽内。曝气机后侧与槽壁间隔 15 cm，左右间隔 30 cm，顶部留有 17 cm 的空隙，便于曝气机的散热。与槽间隔 30 cm 处开凿出一个与其规格相同的槽，可将两台曝气机分别放置于两个槽内。进气管紧贴墙壁安装，外层需加装铁质保护层以提高进气管对洪水石块冲击的抵抗力。喷嘴部分则固定在沿河壁砌筑的高 50 cm 的砖混结构的水泥台上，水泥台的上顶面与河道内槽下底面平齐。此方法可有效保护电机免受洪水冲击且便于维修管理。

5.3. 设备安全防护

剑河洪水季节水量大，且夹杂各种岩石土块泥沙等各种硬物，在随水流快速流动的情况下会产生极大的冲击力，因此须对曝气设备加以安全防护以免造成损毁。

如图 2 所示，在槽上游方向砌筑一面防护墙，倾

斜度为 45°。由于水流的惯性，会顺着防护墙的倾斜方向流动，在很大程度上减少了对曝气机的冲击。防护墙内需配置钢筋以增大其强度，槽内也需加筑与其大小相适应的钢筋框以防止内置槽变形或塌陷。

5.4. 设备安装方法

由于射流式曝气机是潜水式工作，若采用潜水安装的方法会增加工程量。根据剑河枯水季节的水量小，水位低，甚至干枯的特点，可在枯水季节将橡胶坝放水，使其暂时失去蓄水功能，以降低水位，并使用挡板将水截留，使其绕过施工地点，保证施工方便。

5.5. 设备维护

1) 定期对曝气设备维护检查，看设备是否正常运行，及其零部件的正常，电缆线接头是否松动。

2) 曝气机替换下来后应用清水清洗，防止曝气机内留有沉积物，保证曝气机的清洁。

6. 效益分析

曝气复氧工程实施后在环境、经济和社会方面均可取得可观的效益。从环境的角度出发，对剑河进行曝气后可以提高水体溶解氧，明显改善剑河水质，恢

复水体功能和景观，美化城区河段。从经济角度出发，剑河水质提高可减轻下游污水处理厂的处理负荷，减少运行成本；且随着剑河环境的提升，对武当山地区的旅游业和城市发展也有积极促进作用。而在社会效益方面，由于剑河美化可一定程度刺激武当山旅游人数的增长，从而推动了武当山道教文化传播。

7. 结论

1) 对剑河进行曝气复氧处理，可提高河水溶解氧，减小黑臭现象、改善水质、恢复生态平衡，且此法投入较少、效果明显是河流治理的首选。

2) 射流式曝气设备充氧效率高，安装维修方便，噪音小，与剑河具有高度耦合性。对剑河采用一定数量射流式曝气机进行人工曝气即可达到预期效果，改善剑河整体景观。

参考文献 (References)

- [1] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 133-136.
- [2] 朱广一, 冯煜荣, 詹根祥. 人工曝气复氧整治污染河流[J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(3): 30-32.
- [3] 吴国琳. 水污染的监测与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 10-11.
- [4] 熊万永, 李玉林. 人工曝气生态净化系统治理黑臭河流的原理及应用[J]. 四川环境, 2004, 23(2): 34-36.
- [5] 程庆霖, 何岩, 黄民生等. 城市黑臭河道治理方法的研究进展[J]. 上海化工, 2011, 36(2): 25-31.
- [6] 董志勇. 环境水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 105-144.
- [7] 张玉清. 水污染动力学和水污染控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 126-132.
- [8] 彭泽洲. 水环境数学模型及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 103-110.
- [9] 王华东, 王建民, 刘永可等. 水环境污染概论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1984: 249-274.
- [10] 孙从军, 张明旭. 组合推流反应器模型用于河道需氧量计算[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 20-22.
- [11] 董卫华, 杨健, 张淑芬等. 纯氧曝气的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2006, 124(11): 28-30.
- [12] 李开明, 刘军, 刘斌等. 黑臭河道生物修复中3种不同增氧方式比较研究[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 816-821.
- [13] 吴世海. 射流自吸式增氧机[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 88-92.

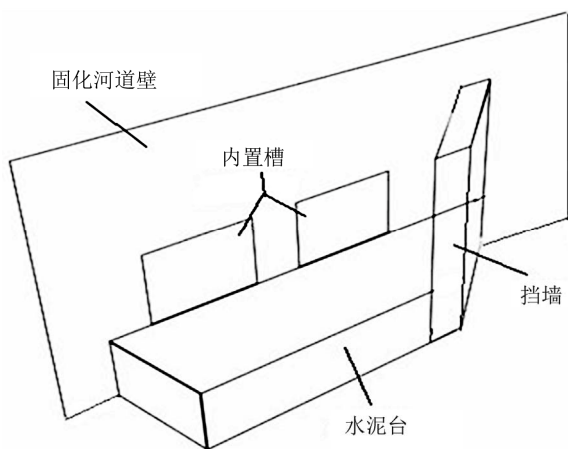


Figure 2. Structure for protecting river bank well
图 2. 曝气设备防护