

水库深孔挑射出流对复氧的试验研究

范丽丽¹, 沙海飞², 吴时强², 周 辉², 陈惠玲²

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 在水工泄水建筑物复氧能力的研究中, 前人对自由溢流复氧能力和闸下出流复氧能力的研究较多, 但对泄流水库下层水的中孔和深孔的复氧能力研究较少。为了消除低溶解氧的水库下层水对下游生态环境的不利影响, 保证水生生物的多样性, 在滩坑水电站泄洪洞模型中进行了系统的试验, 发现复氧率与弗汝德数和下游相对水深相关性较好, 同时增设掺气槽能够显著的提高复氧率。经研究提出的在一定条件下的经验公式, 为水工深孔设计提供了参考。

关键词: 水库; 复氧; 试验研究; 生态环境

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)02-0176-05

水电站等大型水工建筑物的主要环境问题之一是对流域的生态环境的影响, 这些工程的建设将显著改变河流的水文条件、河流溶解氧(DO)水平, 引起水生态环境及生物群落结构和分布格局的变化。为了保证水生生物的多样性, 维持一个平衡的、完整适应的水生生物群落, 使水体满足水生生物所需的溶解氧是十分必要的。美国水法制定了冷水和暖水溶解氧不同的平均值和最低值, 还制定了为保护幼鱼独立的一些标准, 根据不同的试验方法、生命阶段和水温, 溶解氧标准可低到 3.0 mg/L(暖水“成鱼”生命阶段 1 d 的最低值)或高到 9.5 mg/L(卵石间水的 7 d 平均值, 用于冷水鱼类早期生命阶段的保护)^[1]。目前在国内, 水体溶解氧对水生态环境的影响尚未引起足够的重视。

水工泄水建筑物对耗氧性污染河流中溶解氧的恢复有明显的作用, 由于其流量大, 复氧效果较好, 并且费用增加不多, 所以近代在建水工建筑物时都重视这个问题。英、美、日、德等国常把闸、堰等泄水建筑物作为人工增氧的一种措施。前人研究主要在闸、堰等水工泄水建筑物上, 对泄流水库下层水的中孔和深孔等水工泄水建筑物的复氧能力研究较少, 而水库下层水的溶解氧浓度较低, 如不采取措施直接泄流, 对下游生态环境是不利的。为正确的设计和合理运用水工泄水建筑物, 满足水体的溶解氧的需要, 弄清水工深孔泄水建筑物大气复氧的规律是很有必要的。

1 水库深层水的特点

水库下层水的一个显著特点是低温和低溶解氧。库区蓄水后水深较大, 垂向温度分布有 3 个层次: 上层温度较高, 下层温度较低, 中间的过渡段称为温越层。冬季表面水温比高, 没有显著的温越层, 夏季水面温度较高, 温越层就较显著。而低的溶解氧通常因蓄水体的温度分层引起的, 植物和动物的呼吸、入流耗氧有机物的分解和化学反应都会逐渐消耗底层水中的溶解氧, 由于水库较深和垂向温度分层的存在, 水面复氧又不能及时传到下层, 所以一般水库的下层水溶解氧较低。

南山水库坝高 72m, 正常最大蓄水设计水深 59 m, 正常库容 7000 万 m³, 集水面积为 108 km², 属多年调节

收稿日期: 2004-09-22; 修订日期: 2004-12-10

作者简介: 范丽丽(1981-), 女, 江苏兴化人, 河海大学博士研究生, 主要从事环境容量及生态水力学研究。

E-mail: fanlili@hohai@126.com

水库, 是一座以灌溉为主, 结合防洪、发电、养鱼等综合利用的大型水利工程。表 1 为南山水库各层水温和溶解氧的情况^[2], 从表中可知, 南山水库下层水溶解氧是很低的。低温低溶解氧的水库下层水经水轮机、中孔和深孔等泄流到下游, 如不采用一定的增氧措施, 对下游生态环境是不利的。目前采用的人工增氧措施基本上有两种: 压气复氧和利用水工泄水建筑物复氧。水库低溶解氧的下层水, 经水轮机、中孔或深孔下泄可以复氧。利用已有的水工泄水建筑物复氧费用较低, 采用合适的方式就能达到较好的效果, 所以近代在修建水工建筑物时, 都较重视这个问题。

表 1 南山水库各层水温和溶解氧实测值

Table 1 DO and temperature of Nanshan reservoir

水深/m	测定时气温/℃	样水水温/℃	饱和含氧量/(mg·L ⁻¹)	实测含氧量/(mg·L ⁻¹)	氧亏/(mg·L ⁻¹)
0.5	28.9	27.3	7.6	7.8	
10	28.9	12.6	9.2	1.6	7.6
20	28.9	11.1	9.5	0.8	8.2
30	28.9	10.7	9.9	0.7	9.2
底层	28.9	10.5	10.0	0.6	9.4

注: 1986 年 6 月 30 日测定的数据。

2 已有的研究成果

工程中常用氧亏比 r 来表示水工泄水建筑物的复氧效果, 氧亏比定义为

$$r = \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \quad (1)$$

式中 C_1 和 C_2 分别为水工泄水建筑物上游和下游的溶解氧; C_s 为饱和溶解氧浓度。也有用复氧率 E 来表示复氧效果

$$E = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} = 1 - \frac{1}{r} \quad (2)$$

式中 C_u 和 C_d 分别为水工泄水建筑物上游和下游的溶解氧; C_s 为饱和溶解氧浓度; r 为氧亏比。在不出现过饱和复氧的情况下, 复氧率 E 更加直观, 当不发生复氧为 0, 最大复氧率为 1, 复氧率越大复氧效果越好。但对于有些水工建筑物泄流时, 水流流态比较复杂, 泄水建筑物下游的流速较大, 紊动掺混剧烈, 而且有大量的空气掺入。在这种水流情况下, 泄水建筑物下游水体溶解氧的能力要高于一般水体的纳氧能力。当来流的溶解氧含量较高时, 泄水建筑物下游水流中的溶解氧含量往往大于饱和溶解氧 C_s 。对于这种情况, 采用氧亏比 r 在物理意义上和实际应用上都不太恰当, 采用相对复氧率能很好的反映泄水建筑物下游水流中溶解氧的情况, 相对复氧率定义为

$$R = \frac{C_2 - C_1}{C_s} \quad (3)$$

国外对自由溢流复氧的研究开始于 50 年代后期, 六七十年代及以后, 这方面的研究较多, 并取得了一些研究成果, 表 2 是关于复氧计算的计算关系式^[3,4]。其中 r_{15} 和 r_{20} 分别表示水温为 15℃及 20℃时的氧亏比; a 和 b 为水质系数和堰型系数; h 和 h_t 为水头和下游水深, 为 m; q 为单宽流量, m³/s·m; T 为水温, ℃。

表 2 自由溢流复氧能力计算关系式

Table 2 Relationship of free-surface aeration

编号	计算关系式	编号	计算关系式
1	$r = 1 + 0.11ab(1 + 0.046T)h$	6	$r = 1 + 0.69h(1 - 0.1h)(1 + 0.0464T)^a$
2	$r = 1 + 0.5abh$	7	$r = 1 + 0.38ah(1 - 0.11h)(1 + 0.0464T)^a$
3	$r_{15} = 1.05h^{0.434a}$	8	$\ln r_{20} = 0.0675h^{1.28}q^{0.62}h_t^{0.439}$
4	$r_{20} = 1 + 0.91h$	9	$\ln r_{20} = 0.0675h^{0.1}q^{0.2}h_t^{0.3}$
5	$r_{20} = 1 + 0.21h$	10	$R_{20} = 275.8h^{1.25}q^{-1.35}$

对闸下出流复氧问题的研究相对较晚, 主要始于 70 年代, 表 3 是目

前已有的研究成果^[4,5]。其中 ΔV 和 ΔE 分别表示水跃跃首和跃尾断面的平均流速及能量差, 单位分别为 ft/s 和 cm ; W 和 Q 为闸门开度和流量, 单位为 ft 和 ft^3/s ; q 为单宽流量, cm^2/s ; Fr 为跃首断面的弗汝德数; S 为淹没度; 其他符号意义同前。

表 3 闸下出流复氧能力计算关系式

Table 3 Relationship of sluice aeration

编号	计算关系式	编号	计算关系式
1	$r_{20} = 1 + 0.0043\Delta V^2$	5	$r_{20} = 1 + 0.001\Delta V^2$
2	$r_{20} = 1 + (3600W/Q)^2$	6	$r = 1/[1 - \beta(Fr - 1)^{0.5}C_1/C_2]$
3	$r_{15} = 10^{0.0024\Delta E}$	7	$R = 0.089Q^{-0.553}(Fr - 1)^{0.5} +$
4	$r_{15} = 1 + 0.000287q^{0.75}Fr^{2.1}$		$0.0084(0.32 - S^{0.6})(Fr - 1)^{1.245}$

在自由溢流复氧和闸下出流复氧这两种情况下, 泄水建筑物上游溶解氧一般不会很低, 经过自由溢流复氧和闸下出流复氧作用, 下游溶解氧较高, 甚至会出现饱和的状态, 但对泄流水库下层水的中孔和深孔等水工泄水建筑物的复氧能力研究较少, 而水库下层水的溶解氧较低, 氧亏较大, 复氧规律和以上两种情况有所不同。

3 深孔的复氧能力实验及其分析

为弄清泄流水库下层水的中孔和深孔的复氧规律, 在 1:25 的滩坑水电站泄洪洞水工试验模型上进行了系统的复氧能力观测。滩坑水电站泄洪洞底高程为 65.00 m, 设计水位 165.87 m, 水头较高, 故在试验中上游溶解氧值保持较低水平。模型中, 流量 $Q = 684.0 \sim 1980.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 水头 $h = 0.87 \sim 4.02 \text{ m}$, 下游水深 $h_t = 0.35 \sim 1.76 \text{ m}$, 挑流出口处的弗汝德数 $Fr = 1.32 \sim 4.45$, 坝前水体溶解氧浓度 C_u 控制在 $0.9 \sim 1.2 \text{ mg/L}$, 温度在 20°C , 泄洪洞反弧段挑角为 20° , 分设掺气槽和不设掺气槽两种情况进行了观测。

3.1 深孔复氧试验

实验测定了上游水头 h 、下游水深 h_t 、流量 Q 、入水流速 v 、上游溶解氧 C_u 、下游溶解氧 C_d , 共测定了 30 多组试验。经过对数据的系统分析发现复氧率 E_{20} 和弗汝德数 Fr 和下游相对水深 h_t/h 相关性较好, 图 1 为 E_{20} 与 Fr 和 h_t/h 之间的关系。由图上可以看出, E_{20} 随 Fr 增加而增加, 随 h_t/h 增加而增加, 但随 h_t/h 增加慢慢变缓, 到一定的 h_t/h 时, E_{20} 不再增加, E_{20} 只随 Fr 变化而变化。图 2 为深孔复氧示意图, 主要有表面复氧和掺气复氧两种情况, 掺气复氧主要是被卷入水体内的气泡引起的复氧。在一定的上游水位条件下, 下游水深较浅时, 被水流卷入水体的气泡很快就浮出水面, 停留时间较短, 复氧效果不佳; 随着下游水深的增加, 被水流卷入水体的气泡在水中停留的时间变长, 复氧效果变好; 到一定水深时, 气泡在水流冲力、浮力等因素的综合影响下, 不到水底就浮上去了, 这时增加下游水深对复氧效果没有任何提高。在试验中发现, 当 $h_t/h \geq 1.58$ 时, 增加下游水深对复氧率几乎没有影响。

由深孔复氧研究试验得出, 在弗汝德数 $Fr = 1.32 \sim 4.45$ 情况下

$$E_{20} = 0.0982Fr^{0.894} \left(\frac{h_t}{h} \right)^{0.283} \left[\text{当 } \frac{h_t}{h} > 1.58 \text{ 时, 取 } \frac{h_t}{h} = 1.58 \right] \quad (4)$$

观测的 E_{20} 值为 $0.10 \sim 0.37$, 按式(4)算出的 E_{20} 为 $0.11 \sim 0.38$, 计算值和试验值相符的很好。对于水温的影响, 可以用 Gulliver 在 1990 年的研究成果^[6]

$$E_T = 1 + (1 - E_{20})^f \quad (5)$$

$$f = 1 + \alpha(T - 20) + \beta(T - 20)^2$$

式中 T 为水温, $\alpha = 0.02103$, $\beta = 8.261 \times 10^{-5}$ 。Gulliver 经过系统的试验, 认为在 0 到 40°C 之间, 用公式(5)计算不同水温复氧率的最大误差小于 0.3% , 可见具有较高的精度。式(4)是在 1:25 的模型中试验得出的, 弗汝德数 Fr 和下游相对水深 h_t/h 均为量纲一数, 复氧率和入水角度有一定的关系, 在本试验中, 由于试验条件的限制, 只做了挑角为 20° 时的一种情况, 还不够完善, 向原型和其他工程中推广尚待进一步研究。

在试验中上游溶解氧控制在 $0.9 \sim 1.2 \text{ mg/L}$, 低溶解氧的水经过泄洪洞的复氧作用, 下游溶解氧变为 2.13

~ 4.75 mg/L, 还是不能达到 5 mg/L(美国环境保护局 EPA 为保护淡水生物多样性的 DO 浓度标准), 需要进一步采取措施加大复氧率, 提高下游的溶解氧水平。

3.2 复氧效果改进试验

为了提高下游的溶解氧水平, 可以采用在无压段增设掺气槽的办法, 图 3 为增加掺气槽后的复氧效果示意图。掺气是高速水流中减免空化空蚀的一种措施, 已在工程中广泛应用, 同时也可以起到增加水体溶解氧的功能。增设掺气槽后, 水流在无压段就开始掺气复氧, 增加了水流中气泡的含量, 气泡在水流中反复的掺混, 提高了复氧率。试验中, 在无压段增设了 8 个掺气槽, 每个进气口的面积为 $(0.032 \times 0.06) \text{ m}^2$, 通风风速为 0.1~3.2 m/s。经掺气槽掺气, 无压段水体的含气量明显增加, 水体变成乳白色, 而之前几乎是透明状的。下游溶解氧增至 6.2~8.5 mg/L, 较大的提高了下游溶解氧的水平。

增设掺气槽投入较小, 不需要任何运行费用, 但效果是显著的, 能为鱼类等水生生物提供合适的生活环境, 提高水体的自净能力, 减少大型水利工程建设负面效应, 起到较大的环境经济效益。

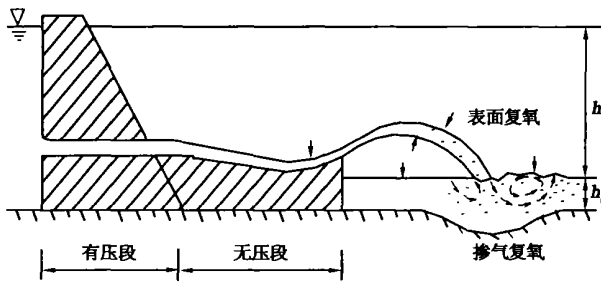


图 2 深孔复氧示意图

Fig. 2 Diagram of hydraulic tunnel excavation

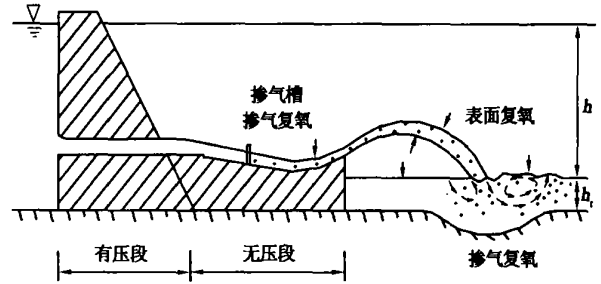


图 3 设掺气槽的深孔复氧示意图

Fig. 3 Diagram of hydraulic tunnel excavation with aerator

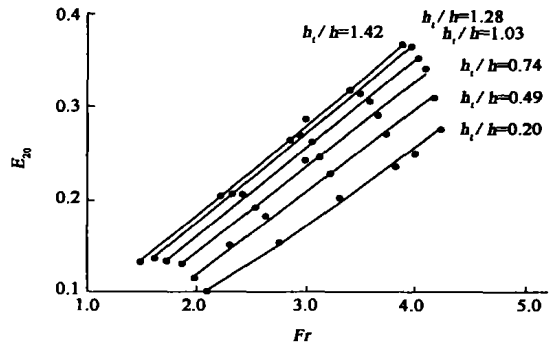


图 1 深孔复氧率变化曲线

Fig. 1 Relationship of hydraulic tunnel excavation

4 结 论

(1) 在水工泄水建筑物复氧能力的研究中, 前人对自由溢流复氧能力和闸下出流复氧能力的研究较多, 成果亦较多, 但泄流水库下层水的深孔复氧能力规律是有所不同的, 水库下层水具有低温和低溶解氧的特点, 如处理不当, 易造成下游溶解氧较低, 影响下游水生生态环境。

(2) 通过室内系统试验, 在前人的基础上, 对泄流水库下层水的深孔的复氧能力作了研究, 按式(1)计算的复氧率对实际工程具有较大的参考价值。对于其它泄水形式, 可以在表 2 和表 3 中选择合适的公式进行计算。

(3) 增设掺气槽等方法对提高复氧率有很大作用, 利用水工建筑物复氧, 可以显著提高下游溶解氧水平, 费用增加不多, 可以起到了较大的环境经济效益。

(4) 本文提出的式(1)是从模型试验中得到的, 还有待进一步完善, 同时复氧机理的研究较缺乏, 为进一步发挥水工泄水建筑物对水生态环境的兴利除害作用, 开展进一步的研究是很有必要的。

参考文献:

- [1] G F 卡达[美]等. 溶解氧的富集[J]. 水利水电快报, 2004, 2: 28- 30.
- [2] 孙先波, 楼继民. 水库深层水低温缺氧对灌溉作物的影响[J]. 浙江水利科技, 2000(2): 8- 20.
- [3] 廖文根. 水工泄水建筑物泄流及河流的大气复氧[D]. 北京: 清华大学, 1991.
- [4] 李玉梁, 廖文根, 余常昭. 泄水建筑物的复氧能力和控制[J]. 水利学报, 1994(7): 63- 69.
- [5] 李玉梁, 廖文根. 闸下淹没出流大气复氧能力的研究[J]. 水力发电学报, 1989(4): 30- 40.
- [6] Gulliver J S, Thene J R, Rindels A J. Index ing gas transfer in self aerated flows[J]. Journal of Environmental Engineering, 1990, 116(3): 503- 523.

Experimental studies on aeration performance of hydraulic tunnel excavation

FAN Li-li¹, SHA Hai-fei², WU Shi-qiang², ZHOU Hui², CHEN Hui-ling²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the previous aeration researches on the sluice structure, there are many achievements about the free-surface aeration and the sluice aeration, but there are fewer hydraulic tunnel excavation aeration researches. In order to reduce the disadvantageous impact on the ecological environment, a set of aeration performances were conducted for the hydraulic tunnel excavation. It is found from the experiments that the oxygen transfer efficiency at the hydraulic tunnel excavation is related to Fr and h_t/h . It also reveals that the oxygen transferable efficiency of the hydraulic tunnel excavation increases with the aerator. It is expected that the results from this study will serve for the improvement of the design of the hydraulic tunnel excavation with high aeration efficiency.

Key words: reservoir; aeration; experimental; ecological environment