

水动力学条件对复氧过程的影响研究

李 然, 李 嘉, 李克锋, 傅晓英

(四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 通过水槽实验对紊动水体复氧规律进行了研究。将氧通量理论应用于紊动水体复氧过程的研究, 得到了紊动水体表面传质系数。数值模拟研究了实验流场分布和紊动特性, 得出了紊动水体表面传质系数与流速和紊动动能的关系式。不同工况的实验资料验证表明了紊动复氧理论的合理性和可靠性。

关键词: 复氧; 水动力学; 紊动水体

中图分类号: TV 131.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)05-542-05

水中溶解氧含量是评价水体有机物污染的重要指标, 水体复氧过程直接影响到水中有机污染物的迁移、扩散、降解直至整个水体的自净过程。因此, 准确地确定水体复氧过程具有重要意义。研究表明, 水体的速度分布和紊动对水气界面复氧及水体中溶解氧浓度的分布有很大影响^[1,2]。目前关于河流复氧系数计算的经验和半经验公式很多, 但由于将复氧过程的描述建立在对流场近似模拟的基础上, 未能从根本上揭示复氧系数或表面传质系数受河流流动特性影响的机理, 公式普遍存在通用性和精确性较差的问题。

本文从紊流理论和水气界面传质理论出发, 采用理论分析与实验相结合的方法, 将三维紊流数值模拟和水气界面传质等理论应用于复氧规律的研究, 以此建立能够精确描述水动力学特性影响的水体复氧参数。

1 紊动复氧规律的水槽实验研究

研究表明, 天然水体的复氧过程与流场分布有直接关系。转筒复氧实验研究表明水体复氧与水体紊动动能有良好的相关关系^[1,2]。由于转筒实验流场与天然水体的流场存在一定的差别, 因此使复氧过程与流场分布的研究受到限制。为继续表面传质系数与紊动动能和流场的关系研究, 笔者进行了水槽实验研究。

实验采用混凝土水槽, 长 280 m, 宽 0.4 m, 高 0.50 m, 比降 1‰。图 1 为水槽复氧实验示意图。实验采用干扰平衡法。实验水温在 20℃ 左右, 溶解氧浓度饱和。实验中在水槽入口加入还原剂亚硫酸钠及催化剂二氯化钴, 使其与水体中的溶解氧迅速反应, 造成氧亏

收稿日期: 2001-06-08; 修订日期: 2001-08-27

基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划

作者简介: 李 然(1968-), 女, 河北无极人, 四川大学副教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

条件, 然后分别在水槽上游($X = 5\text{ m}$)、下游($X = 275\text{ m}$)断面观测其溶解氧浓度变化过程。

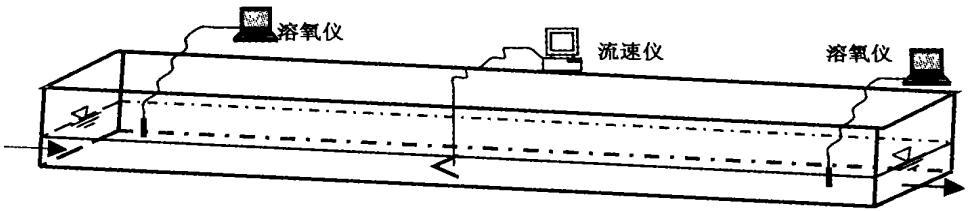


图 1 水槽复氧实验示意

Fig. 1 Setup of the flume experiment

实验流场的测量采用电脑型流速仪, 流速测量断面布置在水槽的中间断面($X = 140\text{ m}$)。溶解氧浓度的测量采用美国 YSI52 型溶氧仪, 仪器分辨率为 0.01 mg/L 。该仪器溶解氧浓度测量方法属于膜电极法。

实验共进行 38 个工况, 实验水深范围为 $3.09\sim 14.55\text{ cm}$, 流速范围为 $0.26\sim 0.65\text{ cm/s}$ 。

2 实验流场的紊流数值模拟

采用三维 $k-\varepsilon$ 紊流模型研究水槽流场。模型方程包括连续方程、动量方程、 k 方程和 ε 方程。水槽边壁应用考虑边壁粗糙影响的壁函数, 在自由水面采用自由滑动固壁边界条件。

模拟得到了各实验工况对应的流场和紊动动能分布。图 2 为工况 1 下游溶解氧监测断面流速分布图, 图 3 为工况 1 下游溶解氧监测断面紊动动能分布图。

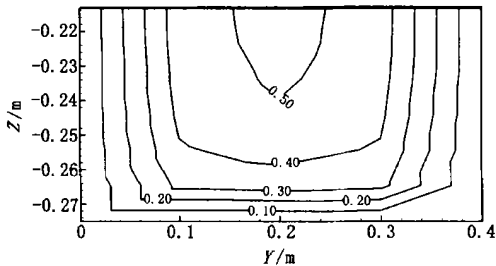
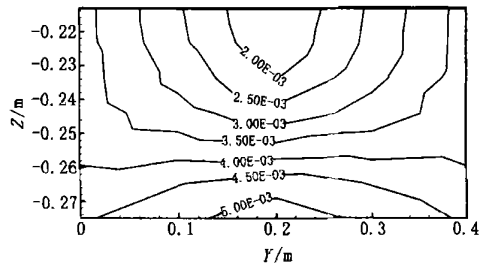


图 2 工况 1 下游 DO 监测断面流速分布(m/s)

Fig. 2 Velocity distribution on the downstream section of case 1 (m/s)



3 工况 1 下游 DO 监测断面紊动动能分布(m^2/s^2)

Fig. 3 Turbulence kinetic energy distribution on the downstream section of case 1 (m^2/s^2)

3 表面传质系数的计算

实验观测表明, 水槽上下游断面溶解氧浓度分布均匀, 因此水体复氧系数与表面传质系数之间满足 $k_2 = K_L/H$ ^[3]。水槽一维稳态溶解氧输移扩散方程

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right) + k_2 (C_s - C) \quad (1)$$

式中 U 为水流速度(m/s); C 为溶解氧浓度(mg/L); C_s 为饱和溶解氧浓度(mg/L)。

在实验条件下, 忽略扩散项, 方程写为

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = k_2 (C_s - C) \quad (2)$$

实验表明溶解氧浓度沿程直线变化, 因此对式(2)离散, 得到

$$k_2 = \frac{U(C_d - C_u)}{(C_s - (C_u + C_d)/2) \Delta x} \quad (3)$$

式中 C_u 、 C_d 分别为上下游观测断面溶解氧浓度; Δx 为上下游断面间的距离。

采用公式 $K_L = k_2 H$ 可得到各工况表面传质系数。在以往的研究中^[4], 曾得出多种计算复氧系数的经验和半经验公式 (表 1)。图 4 绘出了公式与水槽实验得到的复氧系数对比图。

表 1 复氧系数经验公式

Table 1 Experimental formulas of reaeration coefficients

公式	表达式	研究者
1	$k_2 = 0.175 U^{0.5} H^{-1.5}$	Ó Connor-Dobbins
2	$k_2 = 8.15 (\overline{U})^{0.408} H^{-0.66}$	Krenkel-Orlob
3	$k_2 = 8.70 (\overline{U})^{0.5} H^{-1}$	Cadwallader-McDonnell
4	$k_2 = 6.38 \overline{U}$	Tsivoglou-Walace
5	$k_2 = 0.235 U^{0.969} H^{-1.673}$	Churchill, Elmore, Buckingham
6	$k_2 = 0.325 U^{0.73} H^{-1.75}$	Owens, Edwards, Gibbs
7	$k_2 = 1.17(1 + F_r^{0.5}) U^{-1}$	Thackston-Krenkel

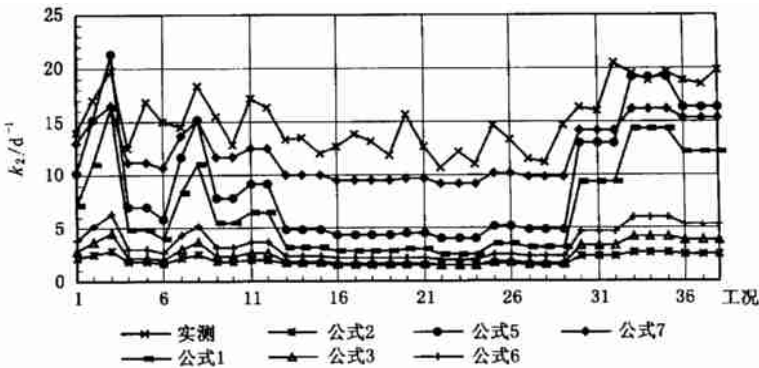


图 4 复氧系数对比

Fig. 4 Comparisons of reaeration coefficients

水槽实验得到的复氧系数略大于其它公式计算值, 原因是表 1 中 7 个经验公式均自天然河流中得到, 而天然河流中降解、沉淀等因素的影响使得到的复氧系数偏小。

4 表面传质系数关系式

选取速度 \overline{U} 、紊动能 k 与氧亏值 D 作为基本物理量, 由紊动作用产生的通过水气界面的氧通量 F_i 表达式可写为

$$F_i = f(\overline{U}, k, D) \quad (4)$$

取 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$ 为基本量纲, 由量纲和谐性原则以及 π 定理, 可以得到表面传质系数与流场和紊动能关系式

$$K_{L,t} = c_1 \overline{U}^x k^{(1-x)/2} \quad (5)$$

式中 c_1 为待定常数。考虑无紊动实验中得到的无紊动水体表面传质系数 K_{L0} ($3.9 \times 10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 并根据水槽实验结果及数值模拟得到的表面平均紊动动能, 采用最小二乘法拟合, 得到紊动水体表面传质系数关系式为

$$K_L = 0.00012 \bar{U}^{V3} k^{V3} + 3.9 \times 10^{-7} \quad (6)$$

拟合结果 $R^2 = 0.9585$ 。相关系数较大, 表明 K_L 与水流平均速度、表面平均紊动动能之间存在很好的相关关系。

5 紊动复氧理论的实验验证

利用第27至38种工况的水槽实验对上述紊动复氧公式进行验证。

(1) 表面传质系数验证 利用流场模型模拟得到的自由表面平均速度和紊动动能, 计算第27至38种工况的表面传质系数, 并与实验值对比, 结果如图5所示。两者差别较小, 说明表面传质系数表达式合理。

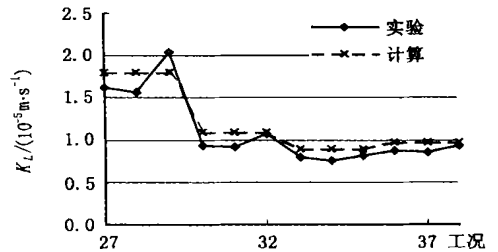


图5 实验与计算表面传质系数对比

Fig. 5 Comparison of experimental and calculative K_L

(2) 复氧过程验证 采用三维 $k-\epsilon$ 紊流数值模型, 建立溶解氧输移扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_c} \right) \right] \frac{\partial C}{\partial X_i} \quad (7)$$

方程在自由表面采用自由滑动固壁边界条件, 溶解氧通量为

$$F = (0.00012 \bar{U}^{V3} k^{V3} + 3.9 \times 10^{-7})(C_s - C) \quad (8)$$

采用模型对各工况复氧过程进行了模拟计算。计算得到的工况27下游断面溶解氧浓度分布如图6所示, 水槽中心纵断面溶解氧浓度分布如图7所示。由计算结果可以看出, 断面溶解氧浓度近似均匀分布, 与实验结果一致。

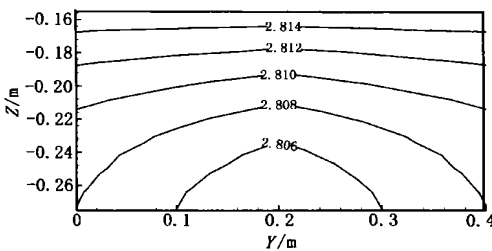


图6 工况27下游断面溶解氧浓度分布(mg/L)

Fig. 6 Calculated DO distribution on the downstream section of case 27(mg/L)

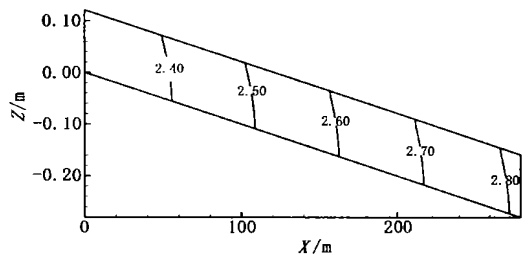


图7 工况27中心纵断面溶解氧浓度分布(mg/L)

Fig. 7 Calculated DO distribution on the longitudinal section of case 27(mg/L)

断面浓度平均值为 3.811mg/L , 与实测值 3.8mg/L 相对误差小于 0.3% 。所有实验工况的计算与实测比较表明, 模型对下游断面溶解氧浓度的计算误差均小于 0.8% , 这说明以上研究得到的紊动复氧理论合理、可靠。

6 结 语

将氧通量理论应用于紊动水体复氧过程的研究中, 将由分子扩散引起的氧传递以及由紊动扩散引起的氧传递分别考虑。进行了水槽复氧实验研究, 数值模拟研究了实验流场分布和紊动特性, 首次得出了紊动水体表面传质系数与流速和紊动动能的关系式。

采用表面传质系数研究水体复氧过程并将表面传质系数直接与速度和表面紊动动能建立关系, 充分考虑了速度分布和紊动特性对复氧的影响, 使复氧系数公式得到进一步细致和完善, 对于研究溶解氧沿垂向的分布具有重要意义。另外, 在对实际紊流流场的数值模拟研究中, 由于紊动动能也是一经常需要确定和研究的物理量, 且目前对紊动动能的研究也较为成熟和完善, 所以紊动动能与表面传质系数关系的建立, 不仅是对紊动复氧理论的新拓展, 并且也便于实际应用。

水体溶解氧分布不仅取决于水面复氧速率, 也与水体内部的紊动扩散直接相关, 所以要研究水体的复氧过程, 必须同时对水气界面特性及水体内部的紊动特性进行研究, 两者缺一不可。

参考文献:

- [1] Atkinson J F, Blair S, Taylor S, Ghosh U. Surface aeration[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(1): 113- 118.
- [2] Li Jia, Li Ran, Li Kefeng, Zhao Wenqian. Experimental study of turbulence effect on reaeration[J]. Progress in natural science, 2000, 10(9): 693- 697.
- [3] 李 然, 李 嘉, 赵文谦, 李克锋. 紊动水体复氧规律研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 723- 726.
- [4] 李玉梁, 廖文根. 河流的大气复氧[J]. 交通环保, 1992, 13(4): 12- 18.
- [5] 李 然. 紊动水体复氧规律研究[D]. 成都: 四川大学, 1999.

Study on effect of hydrodynamic characteristics on reaeration progress^{*}

LI Ran, LI Jia, LI Ke feng, FU Xiaoying

(The State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The reaeration progress for turbulent water is studied by the flume reaeration experiment and the interfacial mass transfer coefficients are obtained by employing the oxygen flux theory. The expression of the interfacial mass transfer coefficient related with velocity and kinetic energy is developed by using the numerical model to simulate the turbulence characteristics of the flow field. The examination with the experimental data of different cases shows the validation of the theory.

Key words: reaeration; hydrodynamic characteristics; turbulent water

^{*} The project is supported by Foundation for University key Teacher of China Education Ministry.