

# 水体大气复氧的研究

乔 丹

(杨凌职业技术学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 水体中的溶解氧是其生态功能的重要控制性因素, 主要来源于大气复氧, 因此水体大气复氧机理和影响因素是水体生态环境研究的重要课题, 目前主要集中于水体大气复氧模型和复氧系数计算方面。通过概括总结水体大气复氧的理论模型及其复氧系数计算方程基本形式, 以期今后其他学者的研究提供依据。

**关键词:** 水体大气复氧; 复氧理论; 表面传质系数; 复氧系数; 气泡界面传质

**中图分类号:** X143, TV131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839 (2017) 03-0069-04

## Study on atmospheric reaeration in water body

QIAO Dan

(Yangling Vocational & Technology College, Yangling 712100, Shanxi)

**Abstract:** The dissolved oxygen in water is an important control factor of the ecological function, mainly from atmospheric reaeration. So that mechanism and influence factors of atmospheric reaeration in water is an important research subject of water ecological environment, mainly concentrates on the atmospheric reaeration model and reaeration coefficient. The theoretical models and the basic equations of coefficient of atmospheric reaeration in water are summarized in this paper in order to provide the basis for the future research.

**Key words:** atmosphere reaeration in water; reaeration theory; surface mass transfer coefficient; reaeration coefficient; interfacial mass transfer

天然水体都具有一定的自净能力, 其自净过程受到多种因素影响, 其中, 溶解氧的含量高低是衡量水体自净能力强弱的先决条件。天然水体中的溶解氧主要来源于大气复氧, 因此, 增加水体中的溶解氧含量对于维持良好的水质具有重要的现实意义。水体的大气复氧是气液两相间的传质过程, 有许多研究提出了描述传质过程的理论模型。同时, 许多学者提出了计算水体大气复氧速率的经验和半经验公式。但由于忽略了一些影响复氧速率的重要因素, 或受到水力条件和环境条件

的影响, 没有得到一个可以普遍适用于任何河流或者水流状态下的复氧速率计算公式。另外, 对于强烈紊动水体, 气泡卷吸掺气是水中溶解氧增加的一个重要原因, 有学者对强紊动水体中的含气率、气泡数率等进行了研究, 但对于气泡的形成、迁移和变化等研究较少, 而这些因素对大气复氧的气液两相传质过程具有重要的影响, 需要开展更进一步的研究。

## 1 水体大气复氧理论模型

收稿日期: 2017-01-07

作者简介: 乔丹 (1989-), 女, 硕士, 主要从事水利水电工程方面研究工作。

### 1.1 双膜理论

Whitman 和 Lewis 于 1924 年提出了双膜理论<sup>[1]</sup>。大气中的氧通过液膜表面转移至水中成为溶解氧,氧气的传输过程服从 Fick 定律:

$$\frac{dm}{Adt} = \frac{VdC}{A \frac{dt}}{\delta} = \frac{D_m}{\delta} (C_s - C) = K_L (C_s - C) \quad (1)$$

$$\text{即 } \frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) = K_2 (C_s - C) \quad (2)$$

式中:

$m$ —穿过气、水表面膜的气态氧的质量;

$C_s$ —大气压作用下的饱和溶解氧浓度;

$C$ — $t$  时刻水中的溶解氧浓度;

$D_m$ —液膜中氧气分子的扩散系数;

$\delta$ —液膜厚度;

$V$ —水体体积;

$A$ —水体与气体的接触面积;

$a=A/V$ —单位体积的水中起传递氧气作用的实际总面积;

$K_L=D_m/\delta$ —表面传质系数;

$K_2=K_L a$ —总传质系数,即复氧系数。

### 1.2 溶质渗透理论

考虑到实际中气液是在高速湍动情况下相互接触的,不稳定的两相界面不存在不动的膜,Higbie 提出了溶质渗透理论<sup>[2]</sup>,该模型得到的传质系数  $K_L=2\sqrt{D_m/(\pi\tau)}$ 。该模型描述了非稳态的传质过程,能更加合理的解释湍流下的传质机理。但该模型将流体单元在界面接触时间视为常数,并没有考虑其随机性,其结果与一些实际应用仍相差较大。

### 1.3 表面更新理论

Danckwerts 对渗透理论做了改进和修正,提出了表面更新理论<sup>[3]</sup>。得到的传质系数计算式为  $K_L=\sqrt{D_m s}$ 。该模型考虑了液体微元在界面接触时间的随机性,所以与实际情况比较接近。但是,该理论当中的随机模型参数(表面更新率  $s$ )难以采用实验方法准确测定。

上述三种经典传质理论均将气液传质过程假定为简单的理想状态,建立了传质系数与扩散系数之间的关系,为传质理论研究的发展奠定了基础。但是这三种模型存在一个共同的缺点就是认为液相界面处的流体停滞不动,忽略了其流体力学特性,将诸多影响传质的因素由一个模型参数来体现,

且该参数只能通过传质实验结果反算,只能得到经验或半经验的关联式,在实际应用中并不具有普遍性。

## 2 水体大气复氧系数计算公式

鉴于以上理论模型应用的局限性,一些学者针对传质系数  $K_L$  和气液总传质系数  $K_2$ ,根据不同水力学条件和影响因素,提出了计算水体复氧速率系数的公式。

### 2.1 表面传质系数 $K_L$ 计算公式

#### 2.1.1 理论计算方程

方祥位<sup>[4]</sup>等人得到  $K_L=\frac{D_m}{\delta}=\frac{1}{A_1} \frac{D_m}{v^{1/4}} k^{0.5}$ ,将此表达式代入 Levic 用 Prandtl 混合长理论得到的传质系数表达式,便得到可用于实际的表面传质系数计算公式,即:  $K_L=0.32 \sqrt{\frac{D_m u^3 \rho}{0.00019 k^{-0.5} + \frac{l^2 \rho g}{16}}}$ 。

#### 2.1.2 经验计算方程

(1) 李然等人<sup>[5]</sup>拟合得到紊动水体表面传质系数与紊动动能  $k$  的关系式为:  $K_{L20}=0.085k^{1/2}+0.0014$ ,  $K_{L20}$  为温度  $T=20^\circ\text{C}$  时的表面传质系数,单位:  $\text{m/h}$ 。

李然等人进一步通过水槽试验对表面传质系数与紊动动能和流场的关系进行研究<sup>[6]</sup>。得到紊动水体表面传质系数表达式为:  $K_{L20}=0.00012u^{1/3}k^{1/3}+3.9\times 10^{-7}$ ,  $K_{L20}$  单位为:  $\text{m/s}$ 。

(2) 当水流经河中兴建的泄水建筑物流出时,由于紊动加剧,会使水体中的溶解氧含量大大提高,程香菊<sup>[7]</sup>对此进行了研究。得到光滑型(或阶梯型)溢流坝表面传质系数。同样,可得到带挑流鼻坎陡槽水流表面传质系数。

### 2.2 复氧系数 $K_2$ 计算公式

关于复氧系数  $K_2$  的研究,大量学者利用原型或模型试验所得到的数据,根据其相关性,用回归分析或量纲分析等方法推导一个与实测数据相吻合的经验或半经验公式。

(1) 以河流流速和水深为基本参数,这类计算公式的表达式为<sup>[8]</sup>:

$$K_2 = \alpha \frac{u^x}{H^y}$$

式中:

$u$ —流速;

$H$ —水深;

$\alpha$ —有量纲系数;

$x, y$ —常量指数。

(2) Melching 和 Flores<sup>[9]</sup> 利用多个河段的复氧系数数据对  $K_2$  的计算公式进行拟合。

①浅滩:  $K_2=517(ui)^{0.524}Q^{-0.242}$   $Q < 0.556\text{m}^3/\text{s}$

②浅滩:  $K_2=596(ui)^{0.528}Q^{-0.136}$   $Q > 0.556\text{m}^3/\text{s}$

③水流特性相对均匀的柱状流:

$K_2=88(ui)^{0.313}H^{-0.353}$   $Q < 0.556\text{m}^3/\text{s}$

④水流特性相对均匀的柱状流:

$K_2=142(ui)^{0.333}H^{-0.66}W^{-0.243}$   $Q > 0.556\text{m}^3/\text{s}$

式中:

$i$ —水面坡降;

$ui$ —能量耗散率;

$W$ —水面宽度;

复氧系数  $K_2$  单位为  $\text{day}^{-1}$ 。

(3) H.Streeter 和 E.Phelps 在 1925 年提出 S-P 模型, 该模型给出的复氧系数  $K_2$  计算公式为

$K_2 = \frac{5.026u(1.024)^{T-20}}{R^{1.673}}$ ,  $R$  为水力半径, 此公式计算

结果较实测值偏小。因此, Agunwamba 等人<sup>[10]</sup> 提出

了新的复氧系数计算公式:  $K_2 = \frac{11.6325u^{1.0954}}{R^{0.0016}}$ 。

(4) 不同的弗劳德数  $Fr$  对应不同的水流流态, Thackston 和 Krenkel<sup>[11]</sup> 得出了复氧系数与  $Fr$  之间的关系表达式, 即  $K_2=24.9(1+Fr^{0.5})u^*H^{-1.0}$ ,  $u^*$  为剪切速度。但是, 在低弗劳德数或者低流速和水面坡降的情况下, 此公式对复氧系数有所高估。后来, 作者用其他一些学者的实测数据将上式进行重新率定, 得出以下的率定公式<sup>[12]</sup>  $K_2=4.98(1+9Fr^{0.25})u^*H^{-1.0}$ 。

(5) 以河流流速、水面坡降和水深为基本参数,

$K_2 = \beta \frac{u^* i^z}{H^y}$

式中:

$\beta$ —有量纲系数;

$i$ —水面坡降;

$x, y, z$ —常量指数。

(6) Dobbins 基于薄膜渗透理论, 结合自然河流中和 Krenkel & Orlob 实验水槽中的实验数据建立了如下的半经验公式:

$K_2 = \frac{6.24(1+Fr^2)(ui)^{0.375}}{(0.9+Fr)^{1.5}H} \coth \left\{ \frac{4.10(ui)^{0.125}}{(0.9+Fr)^{0.5}} \right\}$

Dobbins 基于能量耗散模型和分子扩散模型

给出的半经验公式为:  $K_2 = \frac{23(1+0.17Fr^2)(ui)^{0.375}}{H}$ 。

(7) Gualtieri 等人<sup>[13]</sup> 考虑了所有影响  $K_2$  的重要的水动力学参数, 用量纲分析的方法得到了一组综合的理论公式。  $K_2 = \frac{u}{H} f_1 [Fr, Re, S]$  此公式具有普通适用性;  $K_2 = \frac{u}{H} f_1 [i, Re, S]$  此公式具有普遍适用性;  $K_2 = \frac{u}{H} f_1 [Fr, i, Re]$  此公式适用于  $S$  值很小的情况;  $K_2 = \frac{u}{H} f_1 [Fr, i, Re]$  此公式适用于  $\lambda$  取决于  $Re$  和  $S$  的情况。

该组表达式在推导过程中, 始终紧密联系相关理论公式, 使所得公式具有理论基础, 能更好地适用于一般情况, 不具有针对性。

### 3 气泡界面传质

强烈的紊动使水流破碎, 水流的翻滚及回旋使大量的空气气泡被卷吸进入水中。溶解氧浓度的增加与含气率、气泡数、气泡直径以及气泡在水体中的停留时间等因素有关。

#### 3.1 气泡界面传质系数

目前, 对流动水体气—液二相自由界面传质的研究较多, 而对传输中起主导作用的气泡界面传质研究则比较少见。Politano M、李新海、Fayolle Y 等人分别给出了 3 个典型的均匀流条件下气泡界面传质系数计算公式, 即<sup>[14]</sup>:

(1) Politano M 公式:

$K_L = \frac{D_m}{R_b \sqrt{\pi}} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{1}{(1+0.09Re^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{4}}} \right\} Pe^{\frac{1}{2}}$ ,  $R_b$

为气泡半径;  $Pe$  为 Peclet 数;  $Re$  为雷诺数。

(2) 李新海公式:  $K_L = \sqrt{\frac{1.5 D_m n_d Q d_b \delta_N}{a}}$ ,  $n_d$

为界面上任一瞬间脱离的气泡数;  $Q$  为充气量;  $d_b$  为气泡直径;  $\delta_N$  为边界层厚度;  $a$  为界面面积。

(3) Fayolle 公式:  $K_L = 2 \sqrt{\frac{D_m V_r}{\pi d_b}} \frac{6C}{d_b}$ ,  $V_r$  为气

泡与水流的相对速度;  $C$  为含气率。

#### 3.2 紊动水体中的含气率

关于紊动水体中气泡的形成、迁移和变化以及气泡界面传质系数与气泡各参数之间的定量关

系的研究较为少见。

Toombes L 和 Chanson H 通过一系列试验对阶梯陡槽上的不同流态下的空气卷吸及气—水传质进行了研究<sup>[16-18]</sup>。作者主要通过测定气泡数率  $F$ 、含气率  $C$ 、气—水界面面积  $a$  和流速  $u$  对复氧过程进行研究。在气泡较多的复杂的水流区域,  $a = n \frac{2F}{u}$ ,  $n$  是关于气泡形状的函数。气泡数率与含气率之间存在抛物线关系, 通过拟合得到  $\frac{F}{F_{\max}} = 4C(1-C)$ ,  $C$  值在 50% 左右时, 气泡数率最大为  $F_{\max}$ 。

#### 4 结论与展望

关于水体大气复氧的理论和复氧系数计算, 有不少学者已经进行了比较广泛的实验研究和实践, 基本上可以得出以下几点结论:

(1) 紊动水体大气复氧包括自由界面气液传质和气泡卷吸质量传输。在低流速情况下, 可仅考虑自由界面气液传质; 而在高流速情况下, 还需考虑气泡卷吸在传质中的作用。

(2) 自由液面传质系数(复氧系数)的研究成果较多, 多以  $u$ 、 $H$ 、 $k$ 、 $i$  和  $F_r$  等作为参数来进行公式推求。然而, 这些公式都是根据一定环境条件和水动力条件下所测得的数据分析得来的, 因此, 没有哪一个公式对所有河流都有较好的适用性。因此, 在以后的研究中, 应理论与实际相结合、大量采集各种条件下的监测数据, 综合考虑多种影响因素, 建立一个更加完善、更具有普适性的复氧系数计算方程, 为实际工程提供可靠的预测分析。

(3) 高紊动水流状态下, 影响溶解氧含量的主要因素有气泡直径、含气率、气泡数等参数。受水流紊动特性的影响, 研究难度较大。因此, 关于气泡卷吸传质系数研究甚少, 一些学者只是给出了均匀流条件下的气泡传质系数计算公式; 也有学者对剧烈紊动水体中的含气率、气泡数等情况进行了研究, 但对于气泡的形成、迁移和变化等需要更进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] Lewis W K, Whitman W G. Principles of gas absorption[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1924, 16(12): 1215-1220.
- [2] Higbie R. The rate of absorption of a pure gas into still liquid during short periods of exposure[M]. 1935.
- [3] Danckwerts P V. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1951, 43(6): 1460-1467.
- [4] 方祥位, 李建中, 魏文礼, 等. 河流复氧系数研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4): 400-403.
- [5] 李然, 赵文谦, 李嘉, 等. 紊动水体表面传质系数的实验研究[J]. 水利学报, 2000(02): 60-65.
- [6] 李然, 李嘉, 李克锋, 等. 水动力学条件对复氧过程的影响研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 542-546.
- [7] 程香菊. 河道泄水建筑物复氧研究[D]. 成都: 四川大学, 2000.
- [8] Omole D O. Composite Goodness of Fit in Reaeration Coefficient Modeling[J]. Environment & Natural Resources Research, 2012, 2(3): 71-83.
- [9] Melching C S, Flores H E. Reaeration equations derived from US Geological Survey database[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(5): 407-414.
- [10] Agunwamba J C, Maduka C N, Ofosaren A M. Analysis of pollution status of Amadi Creek and its management[J]. Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA, 2006, 55(6): 427-435.
- [11] Thackston E L, Krenkel P A. Reaeration prediction in natural streams[J]. 1969.
- [12] Thackston E L, Dawson III J W. Recalibration of a reaeration equation[J]. Journal of environmental engineering, 2001, 127(4): 317-321.
- [13] Gualtieri C, Gualtieri P, Doria G P. Dimensional analysis of reaeration rate in streams[J]. Journal of environmental engineering, 2002, 128(1): 12-18.
- [14] 尹则高, 李晓楠, 赵强, 等. 规则波强迫掺气条件下气泡界面传质系数的试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(11): 94-98.
- [15] Toombes L, Chanson H. Air-water flow and gas transfer at aeration cascades: A comparative study of smooth and stepped chutes[C]//Hydraulics of Stepped Spillways. Balkema, 2000(1): 77-84.
- [16] Chanson H, Toombes L. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(1): 145-156.
- [17] Toombes L, Chanson H. Air-water mass transfer on a stepped waterway[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(10): 1377-1386.

(责任编辑: 华智睿)