

大坝下游水体溶解气体浓度超饱和模型研究进展

陈雪巍,程香菊,詹 威

中山大学工学院,广州 510275

摘要 大坝泄水建筑物过流水体强烈掺气容易导致下游水体中溶解气体 (TDG) 浓度超饱和,使下游一定水深处的水生生物遭受气泡病的危害,因此有必要对大坝水垫塘内强紊动水体的气液传质问题进行研究。本文对国内外 TDG 浓度超饱和模型的发展进行了简要的评述,分析总结了 TDG 输运方程、气液双流体模型、气泡界面传质系数、传质面积、气泡直径、掺气浓度和有效饱和浓度等的研究进展及其优缺点。其突出的问题是对气泡动力学认识不够,气泡数量、气泡聚并与破碎、气泡尺寸、气含率和气泡速度的求解仍存在诸多假设和尚需实验验证的系数。预测模型发展受到湍流模型、气泡表征方法和 TDG 输运方程的限制。本文为更好地完善水体 TDG 浓度超饱和模型提供了参考和依据。

关键词 数值模型;总溶解气体;超饱和;气泡传质

中图分类号 X143,TV131.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)17-0101-05

Progress of Model Studies on Total Dissolved Gas Supersaturation Downstream of Sluicing Dam

CHEN Xuewei, CHENG Xiangju, ZHAN Wei

School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract The strong air entrainment is related with the hydrostatic force of the water column, which increases the pressure within the entrained bubbles. This phenomenon may lead to the Total Dissolved Gas (TDG) supersaturation downstream of spillway and aquatic animals may suffer from gas bubble diseases at a certain water depth. Thus, it is necessary to study the gas-liquid mass transfer of turbulent water in still basins. The paper reviews some representative models of the total dissolved gas concentration both at home and abroad, and discusses the development of the TDG transport equation, two-fluid model, mass transfer coefficient, interfacial area, bubble size, gas volume fraction, and the effect of

saturation concentration. However, in these models the air bubble hydraulics is not well represented. To determine the number and size of air bubbles, the air concentration and the air bubble rising velocity, some assumptions are still necessary. Some parameters in the models remain to be verified by experiments. Bubble breakup and coalescence are assumed to be negligible since neither bubble size nor bubble distribution are actually measured in the field. The predictive capability of the models is limited by the modeling accuracy of the different terms in the turbulence, bubble and TDG transport equation. This paper provides some food for thought for further development of the numerical models of the TDG supersaturation and the methods for solving supersaturation problems.

Keywords numerical model; total dissolved gas; supersaturation; bubble mass transfer

0 引言

随着水电建设力度加大,大型水电项目的生态环境问题日益凸显。当水库上游来流溶解气体浓度接近饱和时,水库闸坝泄水可能使下游水体中溶解气体浓度超饱和,直接导致鱼类等水生动物因患气泡病而死亡,如美国哥伦比亚河上的梯级电站开闸泄流^[1]、浙江省新安江水库开闸泄流^[2]以及加拿

收稿日期:2009-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50609011);中国水利水电科学研究院开放研究基金项目

作者简介:陈雪巍,研究方向为环境水力学,电子信箱:chxuew@mail2.sysu.edu.cn;程香菊(通信作者),副教授,研究方向为环境水力学,电子信箱:chengxj@mail.sysu.edu.cn

大马克塔夸克水电站下游河段^[3]等都有不同程度的幼鱼出现气泡病而死亡的现象。因此,为了有效地保护水生态环境并制定相应的保护措施,必须对不同水力条件下高坝泄洪时下游水体溶解气体的浓度进行准确而快速地计算或预测。

已有研究表明,泄水建筑物下游水体出现溶解气体超饱和现象的根本原因在于下游水体与随泄流进入下游河道的气泡间发生了气体质量交换,气泡贡献了气体传输质量的95%^[4]。在强紊动掺气水体中,气泡不时地发生聚并、分裂和上升等现象,对准确地测定或估计气泡的尺寸、大小和运动轨迹增加了难度,从而直接影响气泡界面与水体之间的质量转移速率的精度。

本文对目前国内外总溶解气体 (Total Dissolved Gas, TDG) 浓度超饱和理论模型进行了综述,分析总结了双流体模型、气泡界面的传质系数与面积、气泡直径和数量、掺气浓度、有效饱和浓度等的关系式,为最终完善 TDG 浓度超饱和理论模型提供定量参数和科学依据。

1 预测模型的发展

目前,预测大坝下游 TDG 浓度的模型主要有两种:一种是基于实验和实测数据为主的拟合关联式的操作模型,它不涉及对 TDG 物理过程的理论分析,即无物理意义;另一种是基于物理概念的模型,描述气液传质的物理过程,并对利用实测数据对有物理意义的关系式的系数进行拟合。

Roesner 和 Norton^[5]提出了 TDG 早期物理模型,表达式为

$$C_d = C_{sc} - (C_{sc} - C_u) \exp(-K_L t) \quad (1)$$

其中, C_d 、 C_u 和 C_{sc} 分别为下游 TDG 浓度、上游 TDG 浓度和 TDG 有效饱和浓度, K_L 为传质系数, t 为气泡在水垫塘经历的时间。Roesner 和 Norton 选取水垫塘水深的 2/3 计算有效饱和浓度 C_{sc} 。Johnson 和 King^[6]通过实测数据对 K_L 和 t 的值进行了修正。

Geldert 等^[7]提出的模型增加了在溢洪道、水垫塘和尾水的传质计算。该模型同时考虑了水-气表面传质和气泡界面传质,仍沿用有效饱和浓度来对气泡传质进行预测,提出了 5 个经验系数对在哥伦比亚河和斯勒克河上的 3 种溢洪道水体 TDG 的计算,利用 Azbel^[8]提出的将水-气传质系数和界面面积统一考虑的方法对两种传质进行计算。然而该模型只能针对特定溢洪道水流情况,对实测数据依赖性较高。

Orlins 和 Gulliver^[9]发展了一种应用在哥伦比亚河上 Wanapum 大坝下游的 TDG 浓度的预测模型。该模型基于二维平均质量输运方程,此方程将伴随着气泡和表面传质的对流和湍流扩散进行了合并,假设气泡分布在垂向上是一致的,利用已有实测资料分析在不同泄流量和水深下的气泡分布。虽然该模型对 TDG 浓度的数值模拟的有了一定的改进,但仍需要依赖物理模型和实测数据的支持,限制了它的应用范围。

Politano 等^[10]提出了基于 $k-\varepsilon$ 双流体模型的模型,利用改进的 $k-\varepsilon$ 湍流模型预测水流特性,利用气泡数量密度函数预

测随传质和水压变化的气泡大小,利用包含掺气浓度和气泡大小的气液质量输运方程计算溢洪道下游 TDG 浓度。该模型按半径尺寸将气泡划分为较典型的若干组,分别对每组气泡进行求解,然后综合各组气泡对 TDG 浓度的贡献。这样对气泡大小进行离散处理,能使气泡大小对 TDG 浓度贡献程度做出更直观的表述,从而为避免 TDG 超饱和问题提供更精细的参考依据。模型的模拟结果与实测数据吻合较好,且改善了前述模型对实测数据依赖性较高和假设条件过多的特点,在一定程度上提高了适用价值。然而该模型仍存在不足,如忽略了气泡聚并和破碎的影响,计算模型有待改进。

Urban 和 Gulliver^[11]进一步完善了 Geldert 和 Orlins、Gulliver 模型,提出更为合理的下游 TDG 浓度预测模型。该模型将水垫塘内湍动水流划分为 3 个区域,即水跃扩散区域、反向滚动流区域和尾水区域,并根据 3 个区域特点分别计算每个区域湍流动能、水流速度、气含率、气泡尺寸和速度,从而计算有效饱和浓度和传质系数,得到各个区域 TDG 浓度,其预测结果与实测数据较一致。该模型对水垫塘内的湍流及气泡分布进行更细致的研究,首次考虑了气泡聚并的影响,为 TDG 浓度预测模型提供了更有实际意义的理论分析。

2 模型结构

在预测 TDG 浓度的数值模型中,主要是根据 TDG 输运方程和 $k-\varepsilon$ 双流体模型进行数值计算。

2.1 TDG 输运方程

目前在已有模型中对 TDG 输运方程的形式相同,只是针对 TDG 源项的处理上存在差别。TDG 输运方程的基本形式为^[9]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(U_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + S \quad (2)$$

其中, C 为 TDG 浓度, U_i 为相应速度, D 为气体在水中的湍动扩散率, S 为 TDG 浓度源项。

Geldert 等^[7]和 Orlins、Gulliver^[9]所提模型在处理源项上采用将水-气传质系数和界面面积统一考虑计算水-气质量输移率,用有效饱和浓度计算水体中气泡对 TDG 浓度的贡献。其 TDG 源项方程形式为

$$S = (K_L a)_B (C_{sc} - C) + (K_L a)_{sur} (100 - C) \quad (3)$$

其中, C_{sc} 为在气泡-水界面的平衡浓度 (考虑了静水压的影响), $(K_L a)_B$ 和 $(K_L a)_{sur}$ 分别表示在气泡-水界面和水表面的质量输移率。

Politano 等^[10]将气泡群按半径大小离散成若干个气泡组,然后对每组气泡进行求解,最后综合各组气泡对 TDG 源项的贡献。气泡半径第 i 组的表达式为

$$S = \int f \left(\frac{dm}{dt} \right) dm \approx \sum_i N_i \left(\frac{dm}{dt} \right)_i = \sum_i S_i \quad (4)$$

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_i = K_L a_i (C_{sc} - C) \quad (5)$$

$$S_i = N_i a_i K_L (C_{sc} - C) = 4\pi N_i R_i^2 K_L \left(\frac{P + \sigma/R_i}{He} - C \right) \quad (6)$$



式中, N_i 为半径为 R_i 的气泡个数, He 为亨利常数, P 为气泡内压, σ 为界面张力, a_i 为气泡表面积, 半径 $R_i = [3\alpha/(4\pi N)]^{1/3}$ 。上述处理的优点在于能直观地表述气泡大小对 TDG 浓度的贡献程度, 且对传质系数和界面面积的计算上更具有物理意义。

2.2 双流体模型

双流体模型^[12-13]的基本形式相同, 模型是否能对不同条件下的各种复杂流动行为都有较好的预测能力, 关键在于是否能对相间作用力以及气泡对液相湍动的影响进行表征。相间作用力包括曳力、附加质量力、径向升力和湍动扩散力等, 其中曳力是相间主要作用力, 决定了气含率的大小。

针对大坝泄流的 TDG 浓度超饱和问题, 一般采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型表征液相的湍动。Politano 等^[10]利用 $k-\varepsilon$ 双流体模型, 忽略气泡对水流体的影响和气泡的聚并与破碎, 计算出每个时刻每个点的第 i 组气泡的气含率和气泡速度。

气相的连续方程为^[13]

$$\frac{\partial \rho_i \alpha_i}{\partial t} + \nabla (\rho_i \alpha_i u_i) = -S_i \quad (7)$$

其中 α_i 为气含率, u_i 为气相速度。

由于气相的密度和黏性都比较小, 因此气相的重力和黏性剪切力与压力和其他相间力相比小得多, 常常忽略重力和黏性剪切力的影响^[14]。另外, 气泡表面张力引起的内外压差也可以忽略, 即在气泡界面上的压力与液相压力相等。于是气相的动量方程^[15-16]表示为

$$0 = -\alpha_i \nabla \left(P + \frac{2}{3} k \right) + M_i \quad (8)$$

其中, M_i 为气液相间作用力, k 为无量纲的湍动能。在大坝泄流强紊动水体中, 大多数相间作用力例如升力和附加质量力可以忽略, 于是气液相间作用力项可表示为

$$M_i = M_i^D + M_i^{TD} \quad (9)$$

其中 M_i^D 为曳力, M_i^{TD} 为湍动扩散力。曳力可表示为^[17]

$$M_i^D = -\frac{3}{8} \alpha_i \frac{C_i^D}{R_i} u_{ri} |u_{ri}| \quad (10)$$

式中曳力系数 C_i^D 可以表征为^[17]

$$C_i^D = \begin{cases} \frac{24}{Re_i} (1 + 0.1 Re_i^{3/4}) & N_\mu < 0.11 \left(\frac{1 + \psi_i}{\psi_i^{8/3}} \right) \\ \frac{4}{3} R_i \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma}} \left\{ \frac{1 + 17.67 [g(\alpha)]^{6/7}}{18.67 g(\alpha)} \right\}^2 & N_\mu \geq 0.11 \left(\frac{1 + \psi_i}{\psi_i^{8/3}} \right) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $g(\alpha) = \sqrt{1 - \alpha} (\mu_c / \mu_m)$; $N_\mu = \mu_c (\rho_c \sigma \sqrt{g(\Delta \rho)})^{0.5}$; μ 为黏性系数, 雷诺数 $Re = \rho_m u_r R / \mu_m$, $\Delta \rho = \rho_m - \rho_c$ 为两相密度差, 下标 c 和 m 分别表示连续相和混合相; $\psi_i = 0.55 [(1 + 0.08 R_i^{*3})^{4/7} - 1]^{3/4}$, $R_i^* = R_i \cdot \left(\frac{\rho_c g \Delta \rho}{\mu_c^2} \right)^{1/3}$ 。

湍动扩散力项表征为^[15]

$$M_i^{TD} = -\frac{3}{8} \frac{C_i^D}{R_i} \frac{u_{ri}}{Sc_b} \nabla \alpha_i \quad (12)$$

其中, ν' 为紊动黏性系数; Sc_b 为气泡的施密特数, Carrica 等^[15]

认为, $Sc_b = 1$ 。

联合式(8)~式(12)可得^[10]

$$-\frac{3}{8} \frac{R_i}{C_i^D} \nabla \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \left(\nu' \frac{\nabla \alpha_i}{\alpha_i} + u_{ri} \right) |u_{ri}| = 0 \quad (13)$$

在其他气液参数已知的情况下, 利用方程(13)即可求出第 i 组气泡的速度。由式(13)可知, 相对速度是随气泡大小发生改变。

3 模型参数的确定

模型中参数的确定直接关系到预测方法的准确性。下面分别对气液传质系数、气液传质界面面积、掺气浓度(气含率)、气泡大小、气泡数量和水-气平衡浓度进行说明。

3.1 气泡界面传质系数

目前计算气在液传质系数主要有两种典型的理论模型, 即渗透模型和表面更新模型, 然而它们的结果均与实际相差甚远。因此, 针对大坝泄洪强紊动水体, 不少学者通过实验得到了一些传质系数的经验表达式。

Gelder 等^[7]提出了在溢洪道紊动水体中夹带气泡的水气传质系数表达式为

$$K_{Lb} = \beta_1 \cdot \frac{D_m}{h} \frac{(1 - \alpha)^{1/2}}{(1 - \alpha^{5/3})^{1/4}} \cdot Re^\eta Sc^{1/2} \quad (14)$$

式中, h 为水深; α 为气含率(掺气浓度); D_m 为分子扩散系数; β_1 和 η 为常数, 尚需实验验证, 针对不同的紊动水体, η 取不同值, 范围为 0.55~0.75^[8]。

Clift^[18]和 Takemura, Yabe^[19]等通过实验得出了气泡在不同雷诺数范围下的传质系数表达式:

$$K_L = \frac{D_m}{R \sqrt{\pi}} \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(1 + 0.09 Re^{2/3})^{3/4}} \right] Pe^{1/2} \quad (15)$$

其中, R 为气泡半径, 雷诺数 $Re = \rho u_r R / \mu$, 佩克莱特数 $Pe = u_r R / D_m$, u_r 为气泡和流体的相对速度。Lamont 和 Scott^[20]提出传质系数为

$$K_L = 0.4 (D/\nu)^{-1/2} (\nu \varepsilon)^{1/4} \quad (16)$$

其中 ε 紊动动能耗散率。在实际应用中一般取式(15)和式(16)中的最大值。

3.2 气泡传质界面面积

气泡传质界面面积 a 是指气泡在单位水体中的表面积。研究表明, 在气液湍流中, 传质系数 K_L 几乎是常数, 它与气泡尺寸和流体状况相关性很小, 而气泡传质界面面积与气泡大小、掺气浓度有直接影响^[21]。如果气泡传质界面面积能得到合理的分析测算, 那么将对提高预测 TDG 浓度的精度有直接影响。 a 的表达式为^[11]

$$a = N 4 \pi (d_b/2)^2 = \frac{6 \alpha}{d_b} \quad (17)$$

其中气泡个数 N 为

$$N = \frac{6 \alpha}{\pi d_b^3} \quad (18)$$

式中, 气泡直径 d_b 为整个气液系统中气泡的平均直径, 即多气泡体系气泡的 Sauter 平均直径 d_{bs} 。

$$d_{bs} = \frac{\sum_{i=1}^N N_i d_{bi}^3}{\sum_{i=1}^N N_i d_{bi}^2} \quad (19)$$

式中 N_i 为直径为 d_{bi} 的气泡个数。在高紊动水体中, 气泡碰撞、破碎瞬息万变, 常忽略气泡聚并和破碎的影响, 气泡数量方程可由 Boltzmann 输运方程给出^[10]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_g N) = 0 \quad (20)$$

其中 $\mathbf{u}_g$ 为气泡速度。从式(17)可知, 计算气泡传质界面面积需对掺气浓度和气泡大小进行分析和评价。

3.3 气泡尺寸

目前, 多气泡体系气泡的 Sauter 平均直径的求解由于缺乏实测数据而多采用数值模拟的方法, 数值模拟结果与实际情况吻合较好。Politano 等^[10]根据式(18)和式(20)反算出气泡的直径。Orlins、Gulliver^[9]和 Urban^[11]等的模型则用最大气泡直径间接计算平均气泡直径。

在紊动水体中, 最大气泡的直径可由表面张力和剪切力表示^[22]:

$$d_{max} = \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{3/5} \left(\frac{k}{L_r} \right)^{-2/5} \quad (21)$$

式中, d_{max} 为该直径或更小直径的气泡挟持全部气体的 95%, ρ 为水密度, L_r 为湍流流体特征尺寸。Gulliver 等^[23]认为水体中 Sauter 平均气泡直径 d_{bs} 是最大直径 d_{max} 的 0.62 倍。式(21)假设气泡的破碎和聚并是一个动态的平衡过程, 并认为气泡存在瞬间的聚并。可以看出, 这个假设还有待商榷。

3.4 掺气浓度

掺气浓度或称气含率指的是单位体积内气体与流体体积之比。高速水流中掺气浓度的测量和计算均较为复杂。Orlins 和 Gulliver^[9]通过对溢洪道下游水体溶解气体浓度超饱和的研究认为, 当流场中漩涡的扩散率足够大以致可以控制气泡的上升速度时, 气泡的分布在垂向上一致, 这时水体中气体的体积浓度沿水流方向呈指数递减分布, 即

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\omega r}{q}\right) \quad (22)$$

式中, ω 为气泡的上浮速度, r 为下游距离, q 为泄洪单宽流量。式(22)使掺气浓度的计算问题得到大大地简化。Urban 和 Gulliver^[11]通过分析 Ice Harbor 大坝模型中的气泡分布, 发现在坝下游强紊动水体中的气泡高度混合, 因此假设气泡在垂向上的分布相同有实际意义。Politano 等^[10]通过双流体模型对水体的掺气浓度进行数值计算的结果与利用式(22)得出的值近似。谭立新等^[24]采用单流体模型对水垫塘掺气浓度进行了数值模拟, 计算结果与实测数据吻合较好; 许唯临等^[25]对雷诺应力采用代数应力方程模拟, 体积浓度的脉动通量采用涡黏性概念模拟, 计算了大坝下游水垫塘水体的掺气浓度, 其结果与实验资料比较一致。

3.5 气泡-水界面的平衡浓度

水垫塘的气泡压强受制于水体压力的作用, 根据亨利定

律, 饱和浓度随各个气泡的压强不同而不同, 也随水深的不同而不同。

$$C_{sc} = \frac{P}{He} \quad (23)$$

Politano 等^[10]对 C_{sc} 的求解是利用双流体模型中动量方程对 P 进行求解。其他模型则采用有效饱和浓度 C_{sc} 的概念, 用一个统一的饱和浓度代替整个水垫塘内气泡达到某一特征深度的平衡溶解度^[26]。

$$P_b = \frac{P_v/He}{P_g/He} P_a = \frac{C_{sc}}{C_s} P_a = P_a + \gamma d_{eff} \quad (24)$$

式中, P_b 为气泡内压, P_a 为大气压, γ 为水的比重, d_{eff} 为气泡的有效水深, 该水深处溶解气体浓度能达到的最大值为 C_{sc} 。Nakasone 和 Hibbs、Gulliver 通过实验观测和射流理论研究表明, 气泡穿透水体达到一定水深后, 气泡释放空气进入水体的能力将达到一个最大值, 该水深 d_{eff} 约等于尾水深 d_{tw} 的 2/3, 即 $d_{eff} = 2d_{tw}/3$, 代入式(24)整理得^[26]

$$C_{sc} = \left(1 + \frac{2\gamma d_{tw}}{3P_a}\right) C_s \quad (25)$$

4 结论

本文对目前国内外大坝下游 TDG 浓度的预测方法及模型进行了综述, 从列举的模型发展情况可知, 已有的研究工作取得了很多有意义的工作, 主要结果如下。

- 1) 在水垫塘内主要是气泡传质, 在水垫塘尾水则主要为表面传质。
- 2) 水垫塘水深对 TDG 浓度有关键作用, 它将影响气泡所能进入的最大深度。
- 3) 气泡聚并和破碎对 TDG 浓度有重要影响。
- 4) 气泡分布对下游 TDG 浓度起决定性作用, 中小气泡对 TDG 浓度有主要贡献, 而大气泡则对 TDG 浓度影响较小。
- 5) 过坝单宽流量、过水建筑物形状、上下游水位差和下游水深等是影响过坝水体气体传输的主要因素。

由于气液两相流体系的复杂性, 尚有很多问题需要进行更深入地研究, 其本身就是一个复杂的三维问题, 同时伴随着强紊动、表面传质以及气泡传质。在模型建立上, 突出的问题是对气泡动力学认识不够, 气泡数量、气泡尺寸、气含率和气泡速度的求解上仍存在诸多假设和尚需实验验证的系数。同时, 双流体模型对气液体系流体力学行为的模拟仍有待改进和更充分的实验验证。在已有的模型中常忽略气泡聚并和破碎的作用, 这必将影响对气泡分布的求解精度, 使得流场信息的计算不够准确。

目前, 国内外对气液反应器的流体力学行为研究较多, 例如将群体平衡模型用于气液体系, 系统考查气泡聚并和破碎作用对气泡大小分布的影响, 从机制上对气液体系的流动行为进行更深入的研究^[27], 为更好地解决大坝泄流中气泡动力学和气液传质的问题提供了借鉴。

总的来说, 气液传质是气液两相之间质量传递的一个较复杂的问题, 涉及到环境水力学、水工水力学、气泡动力学、

实验流体力学等多个领域,已有的研究工作还不尽合理,仍需要进一步地探索和完善。

参考文献 (References)

- [1] Parametrix K. Total dissolved gas biological effects [R]. Rockey Reach Hydroelectric Project FERC Project No. 2145 Draft. Washington: Public Utility District No.1 Chelan County Wenatchee, 2003.
- [2] 吴成根. 虹鳉气泡病[J]. 中国水产, 1994(10): 27.
Wu Chenggen. *China Aquatic*, 1994(10): 27.
- [3] Weitkamp D E, Katz M. A review of dissolved gas supersaturation literature [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1980, 109 (6): 659-702.
- [4] Nakasone H. Study of aeration at weirs and cascades [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1987, 113(1): 64-81.
- [5] Roesner L A, Norton W R. A nitrogen gas model for the Lower Columbia River[R]. Walnut Creek, Calif: Water Resources Engineers, Inc, 1971.
- [6] Johnson P L, King D L. Prediction of dissolved gas transfer at hydraulic structures [C]//Symposium on Reaeration Research. New York: American Society of Civil Engineers, 1975.
- [7] Geldert D, Gulliver J, Wilhelms S. Modeling dissolved gas supersaturation below spillway plunge pools [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(5): 513-521.
- [8] Azbel D. Two-phase flows in chemical engineering [M]. New York: Cambridge University Press, 1981.
- [9] Orlins J J, Gulliver J S. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway II: Computational model [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2000, 38(2): 151-159.
- [10] Politano M S, Carrica P M, Turan C, et al. A multidimensional two-phase flow model for the total dissolved gas downstream of spillways[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(2): 165-177.
- [11] Urban A L, Gulliver J S, Johnson D W. Modeling total dissolved gas concentration downstream of spillways [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(5): 550-561.
- [12] Ishii M, Zuber N. Thermo-fluid Dynamic theory of two-phase flow[M]. Paris: Eyrolles, 1975.
- [13] Drew D A, Lahey R T. Application of general constitutive principles to the derivation of multidimensional two-phase flow equations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1979, 5(4): 243-264.
- [14] Antal S P, Lahey R T, Flaherty J E. Analysis of phase distribution in

fully developed laminar bubbly two-phase flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, 17(5): 635-652.

- [15] Carrica P M, Bonetto F J, Drew D A, et al. The interaction of background ocean air bubbles with a surface ship [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 28(4): 571-600.
- [16] Politano M, Carrica P M, Converti J. A model for turbulent polydisperse two-phase flow in vertical channels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(7): 1153-1182.
- [17] Ishii M, Zuber N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows[J]. *AIChE J*, 1979, 25(5): 843-855.
- [18] Clift R. Bubbles, drops and particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [19] Takemura F, Yabe A. Gas dissolution process of spherical rising gas bubbles[J]. *Chem Eng Sci*, 1998, 53(15): 2691-2699.
- [20] Lamont J C, Scott D S. An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid[J]. *AIChE J*, 1970, 16: 513-519.
- [21] Kawase Y, Moo-Young M. Correlation for liquid-phase mass transfer coefficients in bubble column reactors with Newtonian and non-newtonian fluids[J]. *Chem Eng*, 1992, 70: 48-54.
- [22] Hinze J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting dispersion processer[J]. *AIChE J*, 1955, 1(3): 289-295.
- [23] Gulliver J S, Thene J R, Rindels A J. Indexing gas transfer in self-aerated flows [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1990, 116(3): 503-523.
- [24] 谭立新, 许唯临, 杨永全, 等. 水气二相流特点及其单流体模型[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(3): 280-283.
Tan Lixin, Xu Weilin, Yang Yongquan, et al. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(3): 280-283.
- [25] 许唯临, 王伟, 谭立新, 等. 水工水气两相流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16(2): 225-229.
Xu Weilin, Wang Wei, Tan Lixin, et al. *Journal of Hydrodynamics*, 2001, 16(2): 225-229.
- [26] Hibbs D E, Gulliver J S. Prediction of effective saturation concentration at spillway plunge pools [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(11): 940-949.
- [27] Wang T F, Wang J F, Jin Y. Population balance model for gas-liquid flows: Influence of bubble coalescence and breakup models [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44(19): 7540-7549.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“第12次全国环境微生物学术研讨会”征文

中国环境微生物领域大规模、高水平的学术盛会“第12次全国环境微生物学术研讨会”将于2009年11月27-30日在武汉市华中科技大学召开。会议主题是:环境微生物与人类健康。会议口号是:发展环境微生物科学与技术,保障人类健康。

会议的主要内容包括:环境微生物学前沿,环境微生物与环境健康,环境微生物与人类健康,环境微生物资源及其应用,环境微生物与环境保护工程。会议征文截止日期为2009年10月15日,稿件通过会务组信箱:hjws2009@gmail.com,hus-tlfe2009@gmail.com,或会议网站http://rbb.hust.edu.cn提交。

联系方式:武汉市洪山区珞瑜路1037号华中科技大学生命科学与技术学院(430047)李为;电话:027-87792264;传真:027-87792265;电子信箱:hjws2009@gmail.com。