

海洋大气间气泡的气体输运¹⁾

刘春嵘 周显初

(LNM, 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 研究球形小气泡在理想流体的波浪场中的气体扩散过程, 把小雷诺数下均匀来流绕流球形气泡的气体交换结果与气泡运动方程耦合在一起进行求解. 讨论了溶解于水中的气体浓度、波浪、气泡半径、气泡初始深度对单个气泡气体扩散量的影响. 由于气泡云对气体的输运, 溶解于水中的气体可出现过饱和状态. 对 10 m/s 风速下气泡云的气体输运量进行了计算, 得到水中 O₂ 的过饱和度可达 1.89% ~ 3.92%, 与实际观测值一致.

关键词 气泡, 气泡云, 气体扩散, 气体输运

引 言

海气间的气体交换过程将影响海洋环境及气候变化. 以前这方面的研究工作主要集中于风速不大, 波浪没有大量破碎的情况, 一般不考虑气泡对气体交换的影响. 当风速增大后, 随着波浪的大量破碎, 气泡将大量产生. Thorpe^[1] 首先提出了气泡对气体交换过程的影响. 之后, Memery^[2] 建立了单个气泡在静水中上升情况下的气体扩散模型, 并对其进行研究. David^[3] 考虑海洋环流的影响, 讨论了气泡对海洋中各种气体过饱和状态的影响. Chanson^[4] 在对破碎波携带气泡问题研究的基础上, 讨论了气泡云的气体输运量.

以上这些工作都没有考虑气泡运动过程中波浪的影响. 在海洋环境中波浪的存在是不可避免的, 因此讨论波浪对气泡运动及气体交换过程的影响是十分必要的. 由于海洋中大多数气泡的半径都在 0.5 mm 以下, 而对于半径小于 0.5 mm 的气泡, 其变形很小, 可以忽略, 我们假设气泡是球形的. 由于海洋中的波长比气泡半径大得多, 我们认为气泡的存在对波浪没影响, 在波浪场中, 气泡可看作一质点. 同时, 我们假设气泡周围的流体是不可压且运动是无旋的. 根据以上假设文献 [5] 讨论了波浪对气泡运动的影响.

在文献 [5] 考虑了波浪对气泡在动力学和运动学方面的影响, 本文进一步讨论波浪对气泡内气体扩散过程的影响. 对问题进行化简, 把小雷诺数下均匀来流绕流球形气泡的气体交换结果与运动方程联立起来进行数值求解, 并讨论了溶解于水中的气体浓度、波浪、气泡半径、气泡初始深度对单个气泡气体扩散量的影响. 在对单个气泡气体扩散量研究的基础上, 根据 Chanson 给出的气泡云分布规律计算了气泡云对气体的输运量.

1 基本方程

在文献 [5] 中, 给出了气泡的运动方程并进行了求解. 为了考虑从单个小气泡向水体的气体扩散, 我们还要补充水中的气体扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (1)$$

1997-06-17 收到第一稿, 1998-06-23 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目.

边界条件为: 在气泡表面上, $C = C_S$; 在无穷远处, $C = C_\infty$. 其中, C 为水中的气体浓度, V 为水的速度, D 为扩散系数, 下标 S, ∞ 分别表示气泡表面和无穷远处. 对于单个气泡来说, 这样做是合适的. 对于气泡云那样大量的气泡群的气体交换来说, 用微机计算就显得力不从心了. 为此, 我们还需要把 (1) 式再简化. 为了避免波浪引起的不定常性, 我们把坐标取在气泡上, 随气泡和波浪运动, 则 (1) 式中的 $V = U_0 + U_\epsilon$, 其中 U_0 为气泡在静水中的稳定上升速度, U_ϵ 为气泡与波浪相互作用引起的速度, 由文献 [5] 知, U_ϵ 变化缓慢, 可看作为准定常的. 文献 [5] 已经指出, 海洋波浪的周期一般在秒的量级. 在我们的问题中, 球形小气泡的直径一般小于 0.1 cm, 气泡稳定上升速度约为 30 cm/s, 所以与其他的项相比, (1) 式的 $\partial C/\partial t$ 项可以忽略. 单个气泡与水的气体交换的方程 (1) 也与均匀来流绕流球形气泡的气体扩散方程一样, 又因为气体交换的量与所取的坐标系无关, 所以小雷诺数下均匀来流绕流球形气泡的气体交换结果就可以作为波浪场中单个小气泡向水体的气体扩散的近似.

在气体扩散问题中, 一个重要的无量纲数是 Sh 数, Sh 数定义为 $Sh = \frac{2kr}{D} = \frac{3Q}{2\pi r D(C_S - C_\infty)}$,

它表示输运总量和分子扩散输运的比, 其中, Q 为单位时间内从气泡表面交换出的气体克分子量, k 为质量输运系数, r 为气泡半径, D 为扩散系数, C_S, C_∞ 分别为气泡表面和无穷远处溶解于水中的气体浓度. 对于小雷诺数均匀来流绕流球形气泡运动这一模型的 Sh 数已有大量研究成果, 这里采用 R. Clift^[6] 的结果 $Sh = [1 + (1 + 0.564 Pe^{2/3})^{3/4}]$, 其中, 无量纲数 $Pe = 2U_0 r/D$, 假定气泡运动过程中温度不变, 气泡内的压力 $p_g = 3nRT/[4\pi r^3]$, n 为气泡内气体的克分子量, R 为气体常数, T 为绝对温度, 于是, 气泡内气体的扩散过程可用下述方程来描述

$$\frac{dn_i}{dt} = -\frac{2\pi}{3} r D_i Sh_i S_i (p_{g_i} - p_{\infty_i}) \quad (2)$$

其中, 下标 i 表示第 i 种气体. $p_{\infty_i} = C_{\infty_i}/S_i$, $p_{g_i} = C_i/S_i$, S_i 为常数. 方程 (2) 代替了方程 (1), 把它和文献 [5] 中的气泡运动方程联立, 并用初始的气泡半径 $r(0)$, 气泡初始包含的气体克分子量 $n(0)$, 静水中气泡稳定上升速度 U_0 , 液体的密度 ρ_l 作为特征长度、特征气体量、特征速度、特征密度把方程无量纲化, 得到基本方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{r} \left(p_g - p_w - \frac{2}{rW} - \frac{3}{2}v^2 + \frac{U_b^2}{4} \right) \\ \frac{dU_{bx}}{dt} &= -2 \frac{\partial p_w}{\partial x} - \frac{3}{4} \sqrt{U_{bx}^2 + U_{bz}^2} U_{bx} C_d / r - 3vU_{bx}/r \\ \frac{dU_{bz}}{dt} &= -2 \frac{\partial p_w}{\partial z} - \frac{3}{4} \sqrt{U_{bx}^2 + U_{bz}^2} U_{bz} C_d / r - 3vU_{bz}/r \\ \frac{dX}{dt} &= U_x = U_{bx} + \frac{\partial \phi_w}{\partial X} \\ \frac{dZ}{dt} &= U_z = U_{bz} + \frac{\partial \phi_w}{\partial Z} \\ \frac{dn_i}{dt} &= -\frac{2\pi r}{3} Sh_i \frac{K_i (p_{g_i} - p_{\infty_i})}{p_{g_0}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, 下标 g 表示气泡内的气体, 下标 w 表示波浪, x, z 表示固定不动的水平和垂直方向的坐标, v 为气泡半径的变化速率, W 为 Weber 数, C_d 为气泡运动的阻力系数, 其值在文献 [5]

中给出, U_b 为球心坐标系的速度, ϕ_w 为波浪引起的速度势, $p_{gi} = \frac{n_i}{r^3} p_{g0i}$, $p_g = \sum_{i=1}^3 p_{gi}$, p_{g0i} 为初始时刻气泡内第 i 种气体的分压, $K_i = \frac{D_i S_i RT}{U_0 r(0)}$, $D_i S_i$ 的值取自文献 [3].

2 由单个气泡扩散到水中的气体量

由单个气泡扩散到水中的气体量受很多因素的影响, 我们只研究下面几种因素的影响: (1) 溶解于水中的气体浓度的影响; (2) 波浪的影响; (3) 气泡半径的影响; (4) 气泡初始深度的影响. 下面, 我们分别讨论这四方面因素的影响.

2.1 水中气体浓度的影响

在讨论这个问题之前, 我们定义两个无量纲数 $E_i = (C_{swi} - C_{wi})/C_{swi}$, $Q_i^* = Q_i/Q_{i0}$, 其中, C_{swi} 为饱和浓度 $C_{swi} = S_i p_{ai}$, p_{ai} 为水面上某种气体的分压, C_{wi} 为溶解于水中的某种气体的浓度, Q_i 为气泡内某种气体的扩散量, Q_{i0} 为初始时刻气泡内某种气体的含量. 我们保证波况、气泡半径、气泡初始深度等条件不变的情况下, 对 N_2 , O_2 , CO_2 三种气体的 Q_i^* 随 E_i 的变化规律进行了研究 (图 1). 由图可知: 在其它条件不变的情况下 Q_i^* 的值总是随 E_i 的增大而增大, 基本呈线性关系变化. 这意味着水中某种气体的浓度越大, 该种气体从气泡内扩散到水体中的量就越小, 基本上是线性关系, 即使水中的气体浓度已经饱和, 气体仍然可以从气泡中向水体扩散.

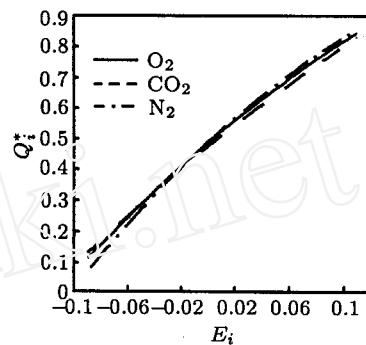


图 1 水中气体浓度对气泡气体扩散量的影响
波高: 0.5 m, 波长: 25 m,
气泡半径: 0.1 mm, 初始深度: 2 mm
Fig.1 The effect of the gas concentration on the gas diffusion
wave height: 0.5 m, wave length: 25 m,
bubble radius: 0.1 mm, initial depth: 2 m

2.2 波浪对单个气泡气体扩散量的影响

从我们的模型和方程 (2) 可知, 单个气泡的气体交换量公式与波浪无直接关系而与静水中气泡交换量相同. 本文中波浪对气泡交换的影响是间接的, 主要表现为波浪的压力和诱导速度对气泡的上升时间, 也就是气体交换时间的影响. 我们分别对不同波高、波长、初始相位角情况下气泡的相对气体扩散量 Q^* 进行了计算 (表 1), 发现波浪的初始相位角对气泡的气体输运有较大的影响. 初始相位角为 $3\pi/2$ 时, Q^* 最大, 而初始相位角为 $\pi/2$ 时 Q^* 最小. 其原因在于初始相位角为 $\pi/2$ 时, 波浪的初始诱导速度为负的最大值, 因此气泡先向下沉, 然后再上浮,

表 1 波浪对气泡气体扩散量的影响 (气泡半径: 0.2 mm, 初始深度: 2 m)

Table 1 The effect of waves on gas diffusion (bubble radius: 0.2 mm, initial depth: 2 m)

		0	0.2 m	0.5 m	0.8 m
50 m	$\pi/2$	0.250	0.226	0.181	0.168
	$3\pi/2$	0.250	0.269	0.286	0.312
100 m	$\pi/2$	0.250	0.231	0.191	0.172
	$3\pi/2$	0.250	0.276	0.307	0.328

等于增加了气泡的初始深度和上升时间，所以增加了气体的输运量。初始相位角为 $3\pi/2$ 时，

情况正好相反。初始相位角为 0 或 π 时，波浪的初始诱导速度为零，而气泡很快就达到了稳定上升的速度，所以两者的结果没有明显差别，且与静水无波时的结果几乎没有误差。由表 1 还可知在相位角为 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 时，波高越大，波浪对气泡气体扩散量的影响越大。

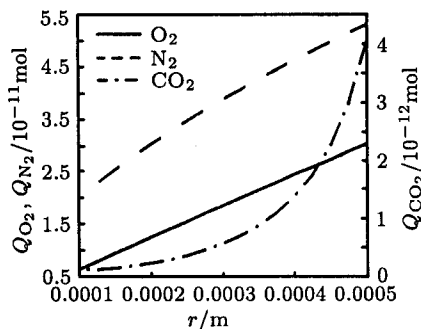


图 2 气泡半径对气泡气体扩散量的影响
 气泡初始深度: 1 m, $E_i = 0$,
 波高: 0.8 cm, 波长: 100 mm

Fig.2 The effect of the bubble radius on the gas diffusion
 initial depth of the bubble: 1 m, $E_i = 0$
 wave height: 0.8 m, wave length: 100 m

2.3 气泡半径的影响

在保证波况、气泡初始深度、 E_i 值不变的情况下，我们对 N_2, O_2, CO_2 三种气体的气体扩散量 Q_i 随气泡半径的变化规律进行了研究 (图 2)。由图可知，气泡内气体的扩散量随气泡半径的增大而增大。对于 O_2, N_2 来说，其扩散量随气泡半径线性增大。而对于 CO_2 扩散量的增长率 $\frac{dQ_{CO_2}}{dr}$ 则随半径的增大而增大。这可能意味着大气泡对 CO_2 的输运有更大的影响。

2.4 气泡初始深度的影响

在保证波况、气泡半径、 E_i 值不变的情况下，我们对 N_2, O_2, CO_2 三种气体的 Q_i^* 随气泡初始深度的变化规律进行了研究 (如图 3)。从图中我们可以看到下面几点：(1) 随着气泡初始深度的增加，气泡内气体扩散量将增大；(2) 由于气泡内气体的扩散量随气泡深度的增大而增大，当气泡初始深度超过某一值时气泡将消失在水中。我们定义当 $Q_i^* > 0.98$ 时，气泡就消失在水中了。图 4 显示了气泡消失在水中临界的 r_{0c}, z_{0c} 值。图 4 中，曲线 $z_{0c} = f(r_{0c})$ 左上边区域的气泡将完全消失于水中，右下边区域的气泡则不会消失在水中。

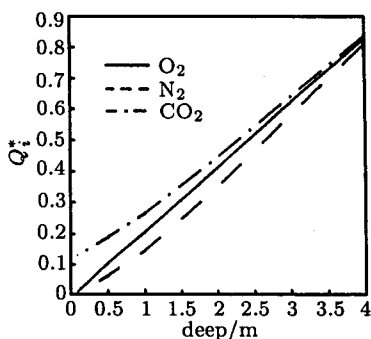


图 3 初始深度对气泡气体扩散量的影响
 气泡半径: 0.15 mm, $E_i = 0.109$,
 波高: 0.8 m, 波长: 100 m

Fig.3 The effect of the initial depth of the bubble on the gas diffusion
 bubble radius: 0.15 mm, $E_i = 0.109$,
 wave height: 0.8 m, wave length: 100 m

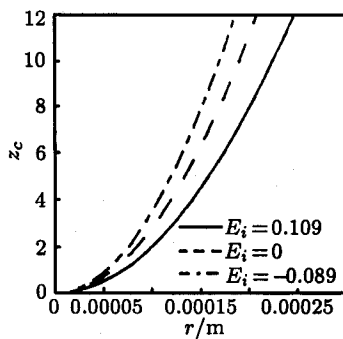


图 4 气泡消失在水中的临界深度
 波高: 0.5 m, 波长: 50 m

Fig.4 The critical depth for the bubble disappearance
 wave height: 0.5 m, wave length: 50 m

3 气泡云的气体输运量

气泡云的气体输运量由气泡云的分布及单个气泡的气体交换量决定。单个气泡的气体交换量通过求解方程 (3) 得到, Chanson^[4] 采用斜入射的射流模型代替破碎波得到了气泡云的分布函数。根据 Chanson 给出的气泡云的分布函数, 我们得到了气泡云气体输运量的计算公式。在单位时间内, 从单位面积的海面, 由气泡输送到水中的某种气体的量可由如下公式求得

$$Q_{gas_i} = \frac{1}{\lambda} \int_0^{H^*} P(H^*) dH^* \int_{-d}^0 \int_0^\infty S(r_*, z, H^*) Q_i(r_*, z) dr_* dz \quad (4)$$

其中, r_* 为无量纲的气泡半径, 定义为 r/r_0 , r_0 为特征气泡半径, 这里, $r_0 = 60 \mu\text{m}$, H^* 为无量纲的波高, 定义为 H/H_{mean} , H_{mean} 为平均波高。 λ 为平均波长; H_{mean} , λ 由下面公式^[7] 给出

$$H_{\text{mean}} = 4.33 \times 10^{-6} U^{2.5} \quad (U : \text{cm/s}, H_{\text{mean}} : \text{cm})$$

$$\lambda = \frac{U^2 \pi}{g}$$

U 为风速。 $P(H^*)$ 为无量纲波高 H^* 的破碎波的概率密度, $Q_i(r_*, z)$ 单个气泡对某种气体的运输量, 可由公式 $Q_i(r_*, z) = x_i \frac{4}{3} \pi r^3(t) Q_i^*$ 求得。其中, x_i 为气泡初始时刻某种气体所占的体积比, $r(t)$ 为气泡的初始半径。 $S(r_*, z, H^*)$ 为某一波高下气泡云随气泡半径及气泡初始深度的分布函数, Chanson 假设 $S(r_*, z, H^*) = C(r_*, H^*) \left[1 - \frac{z}{D(r_*, H^*)} \right]$, 其中 $C(r_*, H^*)$ 由破碎波产生的气泡量决定, $D(r_*, H^*)$ 为破碎波能将气泡带入的最大深度, C, D 的计算公式由文献^[4] 给出。因为该式很复杂, 牵涉到很多因素, 这里就不列出了。

我们对 10 m/s 风速下不同的 E_i 值, 不同相位角的情况, 气泡云对 N_2 , O_2 , CO_2 的气体输运量进行了计算 (图 5), 由图可知:

(1) 对于同一风速的情况, 由于波浪相位角的影响, 由气泡运输的气体量经常是不同的。当相位角为 $\pi/2$ 时, 气泡运输的气体量最小; 当相位角为 $3\pi/2$ 时, 气泡运输的气体量最大。对于实际海况来说, 各种波浪相位角都有可能出现。因此, 气泡运输的气体量将为最大值和最小值之间的任一值。

(2) 由于气泡内不同气体的含量不同, 气泡对不同气体的运输能力是不同的。从图 5 可以看到当 E_i 值相同时, 气泡对 N_2 的输运量最大, 其次是 O_2 , 对 CO_2 的输运量最小。由图 3 可知, 对于单个气泡来说, N_2 , O_2 , CO_2 三种气体的相对扩散量 Q_i^* 在量级上是差不多的。但是, 由于初始时刻 CO_2 在气泡内的含量比起 O_2 , N_2 来是很低的 (初始时刻气泡内 CO_2 的含量约为 0.35%, O_2 的为 21%, N_2 的为 78%), 因此, 由单个气泡扩散到水中的 CO_2 的绝对量也就很少, 气泡云对 CO_2 的输运量也就很小。

(3) 气体输运量 Q_{gas_i} 随 E_i 的增大而增大, 当 $E_i < 0$ 时, Q_{gas_i} 的值还可以为正。这说明, 当水体中某种气体的浓度大于水表该种气体的浓度时, 由于气泡的存在, 气体仍能继续向水中输运, 而使溶解于水中的气体达到过饱和状态。这与只考虑海气界面扩散情况所得到的结果不同。对于只考虑海气界面扩散情况下, 气体输运量可用公式 $Q_{gas_i} = K_{li}(C_{sw_i} - C_{w_i})$ 描

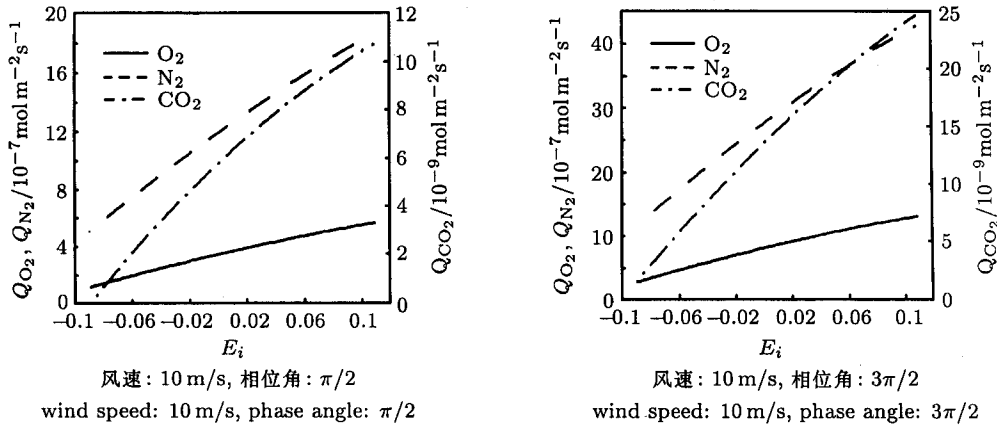


图 5 气泡云的气体扩散量
Fig.5 The gas transfer by bubble clouds

述 [8]. 由这一公式可知, 当水体中的气体浓度大于水表的气体浓度时, 大气中的气体就不能运输到水中去了. 但我们将气泡的影响考虑进去后, 情况就不同了. 气泡能被破碎波带入水下较深的地方, 由于静水压的影响, 使得气泡内某种气体的分压比大气中该气体的分压大. 这样, 当水体中气体的浓度比水表大时, 气体仍能从气泡内扩散到水中去.

为了定量描述溶解于水中气体的过饱和程度, 我们定义 $E_{si} = -E_i$ 值为过饱和度. E_{si} 越大, 溶解于水中气体的过饱和程度越高. 当水中某种气体处于过饱和状态时, 一方面, 水中的气体将会通过海气界面扩散到大气中, 其扩散量 $Q = K_{li}C_{sw}E_{si}$; 另一方面, 大气中的气体会通过气泡输运到水中, 其输运量 $Q = f(E_{si})$. 当 $f(E_{si}) = K_{li}C_{sw}E_{si}$ 时所对应的 E_{si} 值就为水中气体所能达到的过饱和度. 我们计算了 10 m/s 风速下, 气泡对 O_2 的输运量 $Q = f(E_{si})$, 对于 K_{lO_2} 的值, 我们采用 Yoram^[9] 的结果 $K_{lO_2} = 20 \text{ cmh}^{-1}$. 由此, 我们得到了气泡云气体输运量随 E_{si} 的变化曲线及水中气体通过界面的气体扩散量随 E_{si} 的变化曲线 (如图 6). 图中, 实

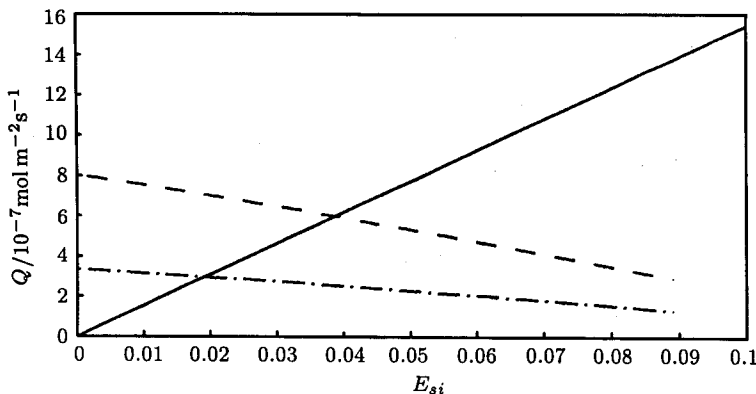


图 6 10 m/s 风速下水中 O_2 所能达到的过饱和度
—— 从水中由界面扩散到大气中的气体量, --- 由气泡云输运到
水中的可能最大气体量, - · - 由气泡云输运到水中的可能最小气体量

Fig.6 The supersaturation of O_2 at wind speed 10 m/s
—— the gas transfer from water to air via surface, --- the possible maximum gas
transfer to water by bubble clouds, - · - the possible minimum gas transfer to water by bubble clouds

线表示水中气体由界面扩散到大气中的气体量, 虚线表示由气泡云输运到水中可能的最大气体量, 点划线表示气泡云输运到水中可能的最小气体量. 实线同虚线的交点对应的 E_{si} 值为水中 O_2 可能达到的最大过饱和度, 实线同点划线的交点对应的 E_{si} 值为水中 O_2 可能达到的最小过饱和度. 由图可知, 在 10 m/s 风速下, 水中 O_2 所能达到的过饱和度 1.92% ~ 3.89%. 海洋中 O_2 的平均过饱和度在 3% 左右^[10], 在风暴 (风速大于 10 m/s) 过后可达 8%^[11]. 这说明我们的计算模型还是可行的.

最后, 值得一提的是本文所讨论的只是小气泡的情况. 尽管海洋中大气泡的个数很少, 但它们所含的气体量很大, 所以, 大气泡对海气间的气体运输的影响可能也需要专门考虑. 本文所述的气泡对海气交换的影响, 只是很粗略的初步的探讨, 目的在于提供一种简单的而又可行的模型和计算方法, 由于问题的复杂性, 很多问题有待进一步探讨.

参 考 文 献

- 1 Thorpe S A. On the clouds of bubbles formed by breaking waves, and their role in air-sea transfer. *Phil Trans Roy Soc Lond (A)*, 1982, 304: 155~210
- 2 Memery L, Merlivat L. Modelling of gas flux through bubbles at the air-water interface. *Tellus (B)*, 1985, 37: 272~285
- 3 Woolf D K, Thorpe S A. Bubbles and the air-sea exchange of gases in near-saturation conditions. *Journal of Marine Research*, 1991, 49: 435~466
- 4 Chanson H. Effects of plunging breakers on the gas contents in the ocean. *Marine Tech Soc Journal*, 1994, 28(3): 22~31
- 5 刘春嵘, 周显初. 气泡在波浪中的运动. 水动力学研究与进展, 1996, 11(5): 576~582 (Liu Chunrong, Zhou Xianchu. The motion of a bubble in waves. *J Hydrodynamics*, 1997, 9(1): 56~62 (in Chinese))
- 6 Clift R, Grace J R, Weber M E. Bubbles, Drops and Particles. New York: Academic Press, 1978
- 7 富永正英. 海洋波动. 北京: 科学出版社, 1984. 163~164 (Fu Yong Zheng Yeng. Ocean Waves. Beijing: Science Press, 1984. 163~164 (in Chinese, translated from Japanese))
- 8 Liss P S, Slater P G. Flux of gases across the air-sea interface. *Nature*, 1974, 247: 181~184
- 9 Cohen Y. Mass transfer across a sheared wavy air-water interface. *Int J Mass Transfer*, 1983, 26(9): 1289~1297
- 10 Stramska M, Marks R, Monahan E C. Bubble mediated aerosol production as a consequence of wave breaking in supersaturated seawater. *J of Geophys Res*, 1990, 95(C10): 18281~18288
- 11 Alekseyev V V, Kokorin A O. The effect of bubbles formed by breaking waves on air-sea gas transfer. *Atmospheric Ocean Physics*, 1984, 20(7): 554~559

GAS TRANSFER BY BUBBLES BETWEEN OCEAN AND ATMOSPHERE ¹⁾

Liu Chunrong Zhou Xianchu

(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The gas transfer by small bubbles in waves in the ideal fluid is studied in this paper. The motion equation coupled with the gas transfer result for the homogeneous flow over a spherical bubble is solved. The effects of the gas concentration dissolved in the water, waves, the bubble radius and the initial depth of bubbles on the gas diffusion of a single bubble are discussed. The relationship between the gas diffusion from a bubble and the gas concentration in water is basically linear. The wave length has no effect on the gas transfer but the wave phase effects the initial velocity and the rising time of a bubble directly. So, the gas exchange has the maximum at phase $3\pi/2$ and the minimum at phase $\pi/2$. As the bubble radius increases, the transfer of O_2 and N_2 almost grows linearly, but the transfer of CO_2 raises rapidly. It maybe means that the larger bubble has much effect on the transfer of CO_2 . Since the bubbles located deeper have much time to exchange the gas, the gas transfer increases linearly with the initial depth of a bubble. Some bubbles can disappear because of the exhaustion of the gas.

According to Chanson's model of the bubble distribution, this paper supplies a simple model for personal computer to calculate the gas transfer between air-sea surface by bubble clouds. The gas dissolved in the water can be in the supersaturation state due to the gas transfer by bubble clouds. According to the computation of the gas transfer by bubble clouds at wind speed 10 m/s, the supersaturation of O_2 in water can be 1.89% ~ 3.92%, which is consistent with the observations in oceans. As for large bubbles, although their number is less, their effect on the gas transfer needs to be considered separately because of more gas contained in one bubble.

Key words bubble, bubble clouds, gas diffusion, gas transfer

Received 17 June 1997, revised 23 June 1998.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China.