

水处理原理

中国建筑工业出版社

水 处 理 原 理

林 家 廉 秦 裕 珩 摘译
顾 泽 南 潘 南 鹏

潘 南 鹏 校

中国 建 筑 工 业 出 版 社

本书摘译自美国 G. M. 非耳和 J. C. 格业所著《给水与废水处理》一书中，有关介绍给水净化与废水处理原理，水卫生学原理以及水与废水的物理、化学和生物学性质，必要的例题，统计分析方法及其应用部分，供给排水专业人员参考。

WATER SUPPLY and WASTE-WATER DISPOSAL

Gordon Maskew Fair

John Charles Geyer

水 处 理 原 理

林家濂 秦裕珩 摘译
顾泽南 潘南鹏

潘南鹏 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 11 1/2 字数: 305 千字

1975年2月第一版 1975年2月第一次印刷

印数: 1—14,050 册 定价: 1.00 元

统一书号: 15040·3206

译 者 的 话

本书摘译自美国 G.M. 非耳和 J.C. 格业所著《给水与废水处理》一书。书中关于水处理的一些基本理论有一定参考价值。因此，我们摘译了该书的第四章、第十七至十九章、第二十一至二十九章有关水卫生学原理，水与废水的物理、化学和生物学性质，水质标准和水与废水处理单元操作的混凝、生物絮凝、沉淀、过滤、消毒和污泥的处理与处置，水的天然净化或自净，工业给水和废水的处理，以及观测资料统计分析方法及其应用等方面的内容，改名为《水处理原理》，供给排水专业人员参考。

由于译者的水平所限，书中错误难免，欢迎广大读者批评指正。

译 者

1974 年 7 月

目 录

第一章	水的物理性质	1
第二章	水化学原理	22
第三章	水与废水的生物学	63
第四章	水质标准和水与废水处理的单元操作	91
第五章	沉淀和浮选	112
第六章	化学混凝和化学沉淀	131
第七章	过滤	155
第八章	生物絮凝和沉淀	181
第九章	污泥的处理和处置	211
第十章	消毒	251
第十一章	水的天然净化或自净	274
第十二章	工业给水和工业废水处理	300
附录	观测资料的统计分析	330

第一章 水的物理性质

1-1 应注意那些性质

在水的物理性质中，对水力学和卫生学有重要意义的是它的密度、黏滞度、蒸汽压、表面张力、对扩散的阻力、溶解和悬浮的能力、光的吸收、热容以及对热的吸收和传递。这些性质，将在本章或以后的几章中作一概括的叙述，以便了解它们对水质和水与废水处理的密切关系。

水的物理、化学和生物学性质，大多数都是温度的函数。水的物理性质取决于温度，实际上已习惯于采用温度作为控制水质的因素，而不再提到那些个别特性的本身。

1-2 密度和黏滞度

在牵涉到运动的阻力时，特别是层流运动时，水的密度和黏滞度是它最重要的水力学性质。例如它们是雷诺数的组成部分，又例如它们列入于颗粒沉降和水通过砂滤的公式中。深水体的纵向密度变化，是湖泊和蓄水库的季节性成层和翻动作用及发生水质显著变化的原因（第1-8节）。密度流在沉淀池中和在较大的水体中引起了短流现象，黏滞度是絮凝的重要因素（第6-4节）。

1. 密度 水的密度可用三种方式表示：（1）质量密度 ρ 或单位体积的质量（因次： ml^{-3} ，式中 m 表示质量； l 表示长度）；（2）重率 γ 或单位体积的重量（因次： $ml^{-2}t^{-2}$ ，式中 t 表示时间）；（3）比重 $s = \rho/\rho_0 = \gamma/\gamma_0$ （因次：无）。下标符号零，表示在标准时的密度，如最大密度时的温度 $4^\circ C$ ($39.2^\circ F$)，此时

每毫升水重为 1 克。水的密度 [厘米-克-秒 (cgs) 制单位] 和温度的变化关系列于表 1-1。

水的密度和温度的变化关系 表 1-1

温 度(°C)	0	5	10	15	20	25	30
密度(ρ, γ, s)	0.9999	1.0000	0.9997	0.9991	0.9982	0.9971	0.9957

当水冰冻时, 水的体积约膨胀 1/8, 因此冰的密度是水的最大密度的 88~92%。

与上不同, 压力对水的密度只有轻微的影响。压力每增加一个大气压或深度每增加 33.9 英尺时, 压缩系数仅约 5×10^{-5} 。溶解杂质能改变水的密度, 其变化关系与溶解杂质的浓度和密度的大小成正比。海水的密度也是它的“盐度”的函数, 这在不同的洋、海和盐水湖中有很大的变化。正常海水的比重是 1.025。接近海洋边缘和受潮汐影响的河口的咸水, 具有它组成部分(淡水和盐水)两者的密度。

2. 黏滞度 水的黏滞度可用两种方式表示: (1) 绝对黏滞度或动态黏滞度 μ , 单位长度和单位时间的质量(因次: $ml^{-1}t^{-1}$); (2) 运动黏滞度 $\nu = \mu/\rho$, 或单位时间的长度平方(因次: l^2t^{-1})。在厘米-克-秒制中, 绝对黏滞度的常用度量为厘泊(1 厘泊 = 10^{-2} 泊)或 10^{-2} (达因)(秒)/厘米² = 10^{-2} 克质量/(厘米)(秒)。运动黏滞度的标准度量, 在厘米-克-秒制中, 为厘斯或 10^{-2} 厘米²/秒。黏滞度和温度的变化关系列于表 1-2。

水的黏滞度和温度的变化关系 表 1-2

温 度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30
绝对黏滞度 μ (厘泊)	1.792	1.519	1.310	1.145	1.009	0.8949	0.8004
运动黏滞度 ν (厘斯)	1.792	1.519	1.310	1.146	1.011	0.8975	0.8039

温度对黏滞度变化的影响要比对密度大得多。其他的因素对水质的影响一般并不显著。对污水的污泥，说它是可塑体不如说它是黏滞体（第9-9节）。

黏滞度效应是如此常见和巨大，因此我们必须对黏滞度和温度的变化关系至少要有个粗略的概念。下面的近似式就是正常的水温变化范围（32~80°F）内黏滞度与温度的关系式：

$$\mu_T/\mu_{50}=\nu_T/\nu_{50}=60/(T+10) \quad (1-1)$$

式中 T ——华氏温度度数；

μ_T 和 ν_T —— $T^\circ\text{F}$ 时的黏滞度；

μ_{50} 和 ν_{50} ——50°F时的黏滞度。

1-3 蒸汽压和表面张力

这两种性质主要表现在水和空气的界面上。水的蒸汽压是蒸发作用的控制因素之一，不论是自由水表面或者是拟加风干的污水污泥表面（第9-18节）的蒸发都是如此。和水相接触的空气或气体很快地就被水蒸汽所饱和，这减少了水和大气之间的气体交换作用和在水面上的大气中形成了水蒸汽的分压（第1-5节）。水的蒸汽压也能减小水泵的吸水头，这与分压的大小成比例关系。

表面张力控制了水的毛细上升现象，并且是物质进入水和出自水的交换作用中的一个重要因素（第8-3节）。液体的表面张力愈大，则润湿能力愈差。因此表面张力抑制剂，如肥皂，可以用来改善水的润湿和洗涤效应。尘土、花粉和其他的外界颗粒得能保留在水-空气的界面上，是由于存在有表面张力所致。

1. 蒸汽压 与水相接触的空气和其他气体，当其中的水蒸汽和水处在平衡状态时，即称为已被水蒸汽所饱和。在达到这种状态前，可存在未饱和或过饱和的状态。水的蒸汽压 p_w 的表示方式一般和大气压力相同（例如在0°C时的汞柱毫米数）。它在不同温度下的平衡数值简要地列于表1-3。

水的蒸汽压和温度的变化

表 1-3

温 度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30
蒸汽压 p_w (毫米汞柱)	4.58	6.54	9.21	12.8	17.5	23.8	31.8

在结冰点时，冰的蒸汽压和水的蒸汽压相等。在 -5°C 和 -10°C 时，它分别降低至 3.01 和 1.95 毫米汞柱。

2. 表面张力 液体和气体之间的界面张力实质上只是液体的性质。它的因次是单位面积的能或单位长度的力（因次： mt^{-2} ）。水和空气相接触的表面张力是比较大的，它和温度的变化简要地列于表 1-4。

水和空气相接触的表面张力和温度的变化

表 1-4

温 度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30
表面张力 σ (达因/厘米)	75.6	74.9	74.2	73.5	72.8	72.0	71.2

1-4 溶解物质的分子扩散

即使没有机械的混合，溶解于水的物质的浓度在全部给定体积的水中，终究将变成为均匀。这种浓度均等化的过程称为分子扩散，它是非常缓慢的。扩散定律和热传导定律（第 1-7 节）相类似。该定律表明：通过截面 A 的扩散率 $\partial W / \partial t$ 和物质自较高浓度至较低浓度的浓度梯度 $\partial c / \partial l$ 成正比，或为

$$\partial W / \partial t = k_d A \partial c / \partial l \quad (1-2)$$

式中 W ——溶解物质的重量；

t ——时间；

A ——截面面积；

c ——浓度；

l ——距离；

k_d ——比例因数，称为扩散系数。

k_d 值随着分子量的增加而减小，它和温度的变化关系见第2-17节。对于气体它还随着气体密度的平方根变化。由于浓度梯度随着扩散作用的发生而减小，所以扩散定律写成为偏微分方程式。应用傅立叶级数可求得方程式的解答。

$$c_t = c_s - 0.811(c_s - c_0) \left(e^{-K_d} + \frac{1}{9} e^{-9K_d} + \frac{1}{25} e^{-25K_d} + \dots \right) \quad (1-3)$$

式中 c_s ——溶解物的饱和浓度；

c_0 和 c_t ——在时间零和时间 t 时的溶解物浓度；且

$$K_d = \pi^2 k_d t / (4l^2) \quad (1-4)$$

当浓度梯度为 1 克/毫升/厘米时，扩散系数一般以溶质每小时通过 1 平方厘米截面积的扩散克数来表示。因而 k_d 的因次为 $[l^2 t^{-1}]$ ， K_d 则为无因次。某些分子扩散系数列于表 1-5。

气体在水中的分子扩散系数

表 1-5

物 质	分 子 量	温 度 (°C)	K_d (厘米 ² /时)
NH ₃	17	15.2	6.4×10^{-2}
O ₂	32	20.0	6.7×10^{-2}
Cl ₂	71	12.0	5.1×10^{-2}
CuSO ₄	98	17.0	4.8×10^{-2}

在正常的水温变化范围内，氧在水中的扩散系数的变化，可用下列方程式表示：

$$k_d = (6.7 \times 10^{-2}) \times 1.016^{T-20} = 6.7 \times 10^{-2} e^{0.0159(T-20)} \text{ 厘米}^2/\text{时} \quad (1-5)$$

式中 T ——°C。

二氧化碳在水中的扩散系数的大小与此为同量级。

例 1-1 在一静止水体中，深度为 30.48 厘米处的初始溶解氧浓度为

3.0毫克/升。假使水温为 18°C，并假定对大气中氧的吸收速度足够地快，能在相对短时间内饱和表层水，求12天后的浓度。

解 对扩散系数 $k_d = 6.7 \times 10^{-2} \times 1.016^{18-20} = (6.5 \times 10^{-2})$ 厘米²/时，按方程式1-4得：

$$K_d = \frac{\pi^2 \times (6.5 \times 10^{-2}) \times 12 \times 24}{4 \times (30.48)^2} = 0.05$$

由于在18°C时，曝露在大气下的水的饱和溶解氧浓度为9.5毫克/升，由方程式1-3得：

$$c_t = 9.5 - 0.811(9.5 - 3.0)(e^{-0.05} + \frac{1}{9}e^{-0.45} + \frac{1}{25}e^{-1.25} + \dots)$$

和 $c_t = 9.5 - 5.3 \times 1.036 = 4.0$ 毫克/升

也就是说：单纯依靠分子扩散作用，深度为 30.48 厘米处的溶解氧浓度增加 1 毫克/升需时12天之久。

有关空气-水界面上的氧吸收要比在水体中的氧向下扩散为快的问题，将在本章下一节中加以论证。

1-5 气体的吸收和逸散

气体被水吸收或自水中逸散是下列三者的函数：

1. 气体的溶解度，对于一个给定的气体，它取决于（1）与水相接触的大气中该气体的分压；（2）水的温度；（3）水中杂质的浓度。

2. 气体的溶解和逸散速度，受制于（1）水的未饱和或过饱和的程度；（2）水的温度；（3）由于大气和水的运动，以及气-水界面上固定膜的形成而造成的水和气体的相接触与受阻隔的曝露情况。

3. 气体在水中的分散速度，有赖于（1）分子扩散作用；（2）对流（涡流扩散）；（3）搅拌（涡流扩散）。

1. 气体的溶解度 假使气体对水并无化学反应，则在其溶解过程中，它的溶解度由亨利定律确定。地球大气层中的气体如氧、氮和稀有气体，是严格地属于这一类的气体，而二氧化碳则对水有反应，其中约1%形成了碳酸。其他有关气体中（存在于天然水、处理过的水以及废水和废水产物如消化污泥中的气体）：

甲烷和氢是惰性的；硫化氢并非完全是惰性的，氯则具有强烈的反应性。

根据道尔顿的混合气体定律，每一种组成气体所施加的压力约与该气体的体积百分比和混合气体总压力的乘积成正比。这个压力即所谓气体的分压。亨利定律表明：一种气体在一种液体如水中的浓度和与液体或溶液相接触的大气中该气体的浓度或分压成正比，即

$$c_s = k_s p \quad (1-6)$$

式中 c_s —— 气体在水中的饱和浓度；

p —— 气体在气相中的分压；

k_s —— 比例常数，称为吸收系数。

倘若 p 取体积比率和 k_s 取毫升/升，则 c_s 的单位可以合适地用毫升/升来表示。体积换算至重量可用阿伏加德罗假说为基础；即等体积的理想气体在同温同压下都含有同等数目的分子。在标准温度和压力下（ 0°C 和 760 毫米汞柱，或 32°F 和 29.92 英寸汞柱），任何气体的分子体积都是 22412 毫升/克分子或 359 英尺³/磅分子。在某一给定温度和压力下的气体体积欲换算至标准状态时的体积时，可应用理想气体方程式 $pV = NRT$ ，因为

$$V_0 = V \frac{p - p_w}{p_0} \frac{T_0}{T} \quad (1-7)$$

式中 N —— 体积 V 中的气体分子数目；

R —— 通用气体常数（ 8.3156×10^7 达因-厘米/克分子/绝对温度 C 或 1,546 磅-英尺/磅分子/绝对温度 F）；

T —— 绝对温度度数（ $273.1 + ^\circ\text{C}$ 或 $459.7 + ^\circ\text{F}$ ）；

p —— 绝对压力；

p_w —— 水的蒸汽压。

下角注有零者表示标准状态。

通常 k_s 系指压力等于一个大气压或 760 毫米汞柱时的数值；对于其它压力时，数值可应用方程式 1-6 加以校正。某些对给水与废水处理有重要关系的气体的溶解度列于表 1-6。

溶解于水的普通气体的吸收系数

表 1-6

(气体分压为 760 毫米汞柱时, 每升水中溶有气体的毫升数, 并已换算至 0°C 和 760 毫米汞柱时的体积)

气 体	分子量	0°C和760毫米汞柱时的重量(克/升)	温 度 (°C)				沸 点 (°C)
			0	10	20	30	
氢(H ₂)	2.016	0.09004	21.5	19.6	18.2	17.0	-253
甲烷(CH ₄)	16.03	0.7160	55.6	41.8	33.1	27.6	-165
氮(N ₂)	28.02	1.251	23.0	18.5	15.5	13.6	-195
氧(O ₂)	32.00	1.429	49.3	38.4	31.4	26.7	-183
氨(NH ₃)	17.03	0.7706	1300	910	711	.....	-38.5
硫化氢(H ₂ S)	34.08	1.523	4690	3520	2670	.....	-60
二氧化碳(CO ₂)	44.00	1.977	1710	1190	878	665	-80
臭氧(O ₃)	48.00	2.144	641	520	368	233	-119
二氧化硫(SO ₂)	64.06	2.927	79800	56600	39700	27200	-10
氯(Cl ₂)	70.91	3.167	4610	3100	2260	1770	-33.6
空气①	.....	1.2928	28.8	22.6	18.7	16.1	.....

① 位在海平面的干燥空气, 以体积计, 含有78.03% N₂, 20.99% O₂, 0.94% A, 0.03% CO₂ 和 0.01% 其他气体。对一般用途, 可假定它是由 79% N₂ 和 21% O₂ 组成。

例 1-2 在 0°C 时, 曝露在气压为 760 毫米的空气纯水中溶解氧浓度为若干?

解 从表 1-6 查得 $k_s = 49.3$ 毫升/升。由于干燥空气, 以体积计, 含有 20.99% 的氧, 并必须假定与水相接触的空气已被水蒸汽所饱和, 所以氧的分压是 $0.2099(760 - 4.58) = 158$ 毫米汞柱, 其中的 4.58 是水在 0°C 时的蒸汽压。因此氧的体积浓度是 $49.3 \times 158 / 760 = 10.2$ 毫升/升, 又因为 1 毫升氧重 $2 \times 16 \times 10^3 / 22,412 = 1.43$ 毫克, 所以氧的重量浓度是 $1.43 \times 10.2 = 14.6$ 毫克/升。

当亨利定律所示的比例关系已完全建立时, 则水已被气体所饱和。升高温度将降低饱和值, 硬水和咸水中的盐也具有同样的效应。增加高度或降低气压将减小溶解度, 并且是按观察得的压力与标准压力的比率减小。高度每升高 270 呎, 压力的变化约为 1%。假使海水的盐浓度以 n 毫克/升氯化物表示, 则盐水中

溶解氧饱和值约为它在淡水中的数值乘以 $(1 - n \times 10^{-5})$ 。取自北大西洋的具有充分强度的海水含氯化物约 18,000 毫克/升，因此它的溶解氧饱和值约为淡水中值的 82%。在生活污水中的相应数值据报告为 95%。

2. 气体吸收的速率 本节开始时已曾提及，倘若假定气体吸收的速率和它在吸收液体中的未饱和程度（或饱和的不足）成比例，则气体的吸收速率可表示如下：

$$dc/dt = K_g(c_s - c) \quad (1-8)$$

式中 dc/dt ——气体在时间 t 时的浓度变化或吸收率；

K_g ——在曝露条件下的溶解或气体转移的速度常数；

c_s ——气体在给定温度时的饱和浓度；

c ——气体的浓度。

由 $t=0$ 时的 c_0 至 $t=t$ 时的 c_t 的积分得方程式：

$$c_t - c_0 = (c_s - c_0)(1 - e^{-K_g t}) \quad (1-9)$$

式中 c_t ——气体在时间 t 时的浓度。

K_g 值的大小随着温度的升高而增大。同时它也随着气体和液体的混合程度，也就是随着气体-液体界面的更新速率和涡流扩散程度的增进而增大。温度的影响见公式(2-12)，但是混合的程度或界面的更新速率和涡流扩散的程度则很难确定，除非是有关物理的功率都能予以固定不变。由于气体进入到液体必定发生在气体-液体界面上，倘使界面面积和液体体积之间的关系能够固定不变，则 K_g 将更具有其特殊性。这是可以做到的，例如把水喷入空气中使呈小滴珠状或将空气气泡吸入水体。在此情况下， K_g 的总值为 $k_g A/V$ ，其中 k_g 是气体转移系数， A/V 是每单位体积液体的气体和流体之间的界面面积。

在测定 K_g 的数量中含有这样一个假定，就是以通过气体-液体界面的气体转移速率作为控制因素要较液体内溶解气体的扩散速率为佳。根据对气泡状的氧、氮和空气被水吸收的速度所作出的观察， k_g 值以厘米/时计，在 $3.5 \sim 35^\circ\text{C}$ 温度范围内，可表示如下： O_2 为 $32.3 \times 1.018^{T-20}$ ； N_2 为 $34.0 \times 1.019^{T-20}$ ；空气为

$32.1 \times 1.019^{T-20}$ 。这里 T 是摄氏温度度数，具有速度因次 $[lt^{-1}]$ 的 k_g 是气体转移系数。应当注意这些 k_g 值只是在曝露条件下所获得的结果，在不同的条件下可能观察到较高的或较低的数值。

通常情况下，在界面的液体和气体中都会形成界面膜，穿越过这些固定层将涉及扩散问题，因此和膜的厚度有关。虽然膜的厚度基本上是运动黏滞度的函数，但是在搅拌或搅动气体或液体的主体下，则有所减小。例如在空气中的氧进入水的过程中，氧必须扩散通过界面处的空气和水的固定膜。按照第 1-4 节，扩散速率取决于界面面积和浓度梯度，或为

$$\frac{dW}{A dt} = k_{a(g)}(p_g - p_i) = k_{a(l)}(c_i - c_l) \quad (1-10)$$

式中 $\frac{dW}{A dt}$ ——单位时间内通过单位面积的气体数量；

p_g 和 p_i ——气体主体中和界面处的气体分压；

c_i 和 c_l ——分别为界面处和液体主体中的气体浓度；

$k_{a(g)}$ 和 $k_{a(l)}$ ——气相和液相中的气体扩散系数，这些系数等于每单位厚度膜的真实的扩散系数并具有速度的因次为 $[lt^{-1}]$ 。

平衡状态建立在界面处。因此，当用亨利定律时， p_i 为 c_i 的函数并等于 c_i/k_s 。可发生下列三种状况：

(1) 当一种气体极易溶解于液体中时(例如 NH_3 于水中)， c_l 很大，即使在 p_i 为较小时亦然，在此情况下，气体通过气体膜成为控制因素，而方程式 1-10 接近于 $\frac{dW}{A dt} = k_{a(g)} p_g$ 的数值。因为 p_i 可予忽略不计，因此可写成为 $\frac{dc}{dt} = k_{a(g)} p_g A / V$ ，从而得知气体的转移可依靠吹动或搅拌气体以减小气体膜的厚度而获得改进。

(2) 当一种气体在液体中的溶解度很小时(例如 O_2 ， N_2 和 CO_2 于水中)， c_l 实际上等于 c_s ，后者是溶解气体和大气中气体处在平衡状态时的浓度(饱和浓度)。在此情况下，气体通过液体膜成为控制因素，而方程式 1-10 接近于 $\frac{dW}{A dt} = k_{a(l)}(c_s - c)$ 的数值。其中 $c = c_l$ 是液体中的浓度。

从而得 $\frac{dc}{dt} = k_{a(l)} (c_s - c) \frac{A}{V}$ ，这和方程式1-8完全相同。因此得知气体的转移可依靠搅拌或搅动液体以减小液体膜厚度而获得改进。

(3) 对于中等溶解度的气体(例如H₂S于水中)，两种膜的效应是同样重要的。因此为促进气体的转移，必须将气体和液体两者都加以搅拌或搅动以减小膜的厚度。倘使亨利定律可相当满意地适用时，可以采用一个总系数 k ，它取决于两个膜系数，这样可写成为：

$$\frac{dc}{dt} = k(c_s - c) \frac{A}{V} \quad (1-11)$$

观察得的低溶解度气体的 $k_{a(l)}$ 值归纳于表1-7。

水中低溶解度气体的扩散系数

表 1-7

A、通过平面的扩散

气 体	搅 拌 速 度 (转/分钟)	$k_{a(l)}$ (厘米/时)	液体膜厚度① (厘米)
空 气	0	0.4	1.7×10^{-1}
空 气	150	5.0	1.3×10^{-2}
空 气	1000	15.0	4.5×10^{-3}
O ₂	60	3.3	20×10^{-2}
CO ₂	250	7.5	.....

B、通过球面气泡的扩散

气 体	圆 球 的 大 小 (厘米 ³)	$k_{a(l)}$ (厘米/时)	液体膜厚度① (厘米)
空 气	15	60	1.1×10^{-3}
空 气	9	30	2.2×10^{-3}
空 气	3.4×10^{-3}	10	3.4×10^{-2}
CO ₂	3.3×10^{-2}	40	.....
CO ₂	2.7×10^{-3}	20	.....

① 液体膜厚度等于分子扩散系数(表1-5)除以 $k_{a(l)}$ 。

假使通过气泡界面处的浓度梯度是常数，则气泡的直径随时间而直线状地减小。减小的速度与气体转移系数和浓度梯度成正比，而与气体的分子量成反比。湍动、温度和溶解物质的浓度都有关系。溶解物质浓度愈高，转移系数则愈小。

对降落的水滴或上升的气泡，气体被吸收的速度以开始形成水滴或气泡时为最大，此后它将迅速地降低，因为没有内部的液体运动，水的表面膜厚度将有所增加。

3. 气体逸散的速率 和吸收相反，气体自液体中逸散或溶出的速率和液体中的气体过饱和程度成正比。因此吸收速度的方程式也能应用于溶出速率。遇有饱和浓度 c_s 比所测得的浓度 c_0 为小而造成负数时，则表示是逸散。

例 1-3 在去除水中二氧化碳的试验中，喷洒到空气中的水滴直径为0.55厘米，水的初始的过饱和二氧化碳为27.5毫克/升。在曝露1秒钟后，它减少至11.5毫克/升，求气体转移系数。

解 由于 $c_s - c_0 = -27.5$ 毫克/升和 $c_t - c_s = 11.5$ 毫克/升， $c_t - c_0 = -16$ 毫克/升。按方程式1-9，因此得， $(-16) = -27.5(1 - e^{-k_0 x^1})$ ，和 $k_0 = 0.872$ /秒。已知每单位面积水滴的体积为 $0.55/6 = 0.0917$ 厘米， $k_0 = 0.872 \times 0.0917 = 0.0800$ 厘米/秒。因此转移系数等于 $0.0800 \times 3600 = 288$ 厘米/时。

1-6 固体的溶解和悬浮

固体溶解于水是不能够用与理想气体溶液相比拟的关系来推测的。溶解度是温度、固体性质、水中杂质的性质和浓度等的函数。作为一般规则，可认为固体的溶解度和气体的溶解度不同，是随着温度的升高而增高的，但是在不同的温度范围内它可以有巨大的变化。热将使某些物质分裂为其组成部分，后者的溶解度将决定它们所能维持的浓度。加热使碳酸钙(CaCO_3)从碳酸氢钙 $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ 中沉淀出，就是这种效应的一个例子。二氧化碳和水(或碳酸)也同时被释出。在另一方面，压力对于固体的溶解只有微小的可测影响。物质溶解于水后的状态和性质将在第二章中讨论。

与气体相同，固体在水中的溶解速率和固体在溶液中的未饱和程度成正比。此外，它又和固体的表面积成正比，而和液体的体积成反比。每单位体积水中的固体表面积愈大，它的溶解速率