

# 泡沫浮选表面化学

J. 赖亚 著  
何伯泉 陈祥涌等 译

冶金工业出版社

# 泡沫浮选表面化学

J. 赖亚 著

何伯泉 陈祥涌 等译

冶金工业出版社

# 泡沫浮选表面化学

J. 赖亚 著

何伯泉 陈祥涌 等译

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

轻工业出版社印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 印张 23 1/2 字数 623 千字

1987年8月第一版 1987年8月第一次印刷

印数 00, 001~2, 100 册

统一书号: 15062·4322 定价 6.80元

## 译者的话

《泡沫浮选的表面化学》是根据美国“普伦诺姆”(Plenum Publishing Corporation)出版社一九八二年版的《Surface Chemistry of Froth Flotation》一书译出的。

作者J.赖亚是加拿大不列颠哥伦比亚大学采矿和矿物工程系的教授,现已退休。本书是他长期从事浮选和表面化学教学和研究的结晶。自本书问世以来,得到各国的好评,一致认为是一本详尽地阐述泡沫浮选理论的好书,涉及面广,有一定的理论深度。所论述的表面化学以及有机和无机化学的有关方面,对理解和控制浮选过程有十分重要的意义。收集的参考文献,对有兴趣深入研究的读者也是极其有用的。本书对浮选药剂和分选过程的各种现象进行了广泛的探讨,在捕收剂的作用机理、起泡剂的作用机理和界面现象方面,作者有许多新的见解。

本书对选矿研究工作者,选矿厂的技术人员,大专院校的师生以及从事冶金、矿物工程、表面和胶体科学 and 环境保护领域的工作人员均有一定参考价值。对提高我们的理论水平将有所裨益。

全书共分十章,重点是第五、六、七、九、十章。第一、二、八章由王文潜翻译;第三、四、十章由胡力行翻译;第五、九章由陈祥涌翻译;前言和第六、七章由何伯泉翻译。全书译稿由何伯泉和陈祥涌校审。在翻译过程中,得到北京矿冶研究总院总工程师东乃良的大力帮助,在此表示感谢。

由于译者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

译者

一九八四年二月

# 前 言

泡沫浮选过程是应用表面化学的一个著名范例。在矿山、矿物、冶金和化学工业中，泡沫浮选广泛用于分离和选择性富集各种矿物和其它固体。所富集的物料用作生产相应金属和化学制品的原料。浮选在工艺上的重要性主要归因于过程经济，且易产生选择性和通用性。

本书的目的是论述表面化学的基本原理以及有机和无机化学的有关方面，作者认为这些对控制泡沫浮选过程来说是至关重要的。论述使萨瑟兰和沃克 [Sutherland and Wark (1955)]、高登 [Gaudin(1957)]、克拉辛和莫克罗乌索夫 [Klassen and Mokrousov (1963)] 和格列姆博茨基等人 [Glembotsky et al. (1963)] 的著作中的资料得到更新和适时修正。本书主要强调过程的表面化学，其它有关方面的课题，如流体动力学、机电工艺、回路工程设计、生产分析、仪表工艺、数学模型等等，留待适当的专述。

本书第一章简要论述浮选领域及其主要应用范围。第二、三、四章分别叙述物理键和化学键的基本概念，固体矿物结晶学的要点以及水和水溶液结构的简况。第五章讨论称为表面活性剂的有机药剂。其中一些称为捕收剂，是浮选的最重要添加剂，它们控制着亲水固体向疏水固体的转化；另一些表面活性剂影响颗粒向气泡附着的动力学，称为浮选起泡剂。第六章介绍固体表面不均匀性的主要方面，第七章讨论固/液界面的某些电性。表面活性剂在各种固/液界面上吸附的不同特性，决定了在泡沫浮选中分离选择性所能达到的程度。这些吸附机理在第八章中予以研究。第九章的内容为泡沫的形成和相互接近的两个颗粒之间（例如固体颗粒和与其发生碰撞的气泡之间）液膜薄化的机理。无机添加剂，例如盐、酸和碱，作为调整剂或活化剂和抑制剂而广泛采

用，这些都是为了使复杂的混合物达到选择性分离所必不可少的添加剂。它们的作用和作用方式在第十章中论述。

本书主要写给浮选领域的研究工作者，部分地也为了矿物工程课的优等生或浮选厂的操作人员，作为论述浮选实践的著作的补充。本书也可以作为国内外会议的文章和文集的汇编。然而，读者将会发现没有进行特定浮选分离的现成答案和公式化的药方，列于第一章末的一些著作有助于更好地达到这一目的。再者，列于本书末的参考文献也并不是包罗万象的，而矿冶协会文摘 (IMM Abstracts)、道浮选索引 (Dow's Flotation Index)、美国化学协会的化学文摘选编 (ACS Chemical Abstract Selects) 可以起到这一作用。

非常感谢在手稿准备的不同阶段从我的朋友和同事那里得到的最有帮助的评论和建议。特别是要对芬克尔斯坦博士 (N.P. Finkelstein, 以前在南非约翰内斯堡的国立冶金学院，目前在以色列海法的国际矿物协会)、福赛思教授 (J.S. Forsyth, 不列颠哥伦比亚大学)、奥布赖恩教授 (R.N. O'Brien, 不列颠哥伦比亚省维多利亚大学)、波米亚诺夫斯基博士 (A. Pomianowski, 波兰克拉可夫的波兰科学院)、劳博士 (R.S. Rao, 加拿大萨斯卡吞市的萨斯喀彻温大学)、茨蔡帕博士 (J. Szczypa, 波兰卢布林的玛丽娅·居里-斯克渥多夫斯卡大学) 以及在不列颠哥伦比亚大学采矿和矿物工程系的同事波林教授 (G.W. Poling)、缪勒教授 (A. Mular)、伊万斯教授 (J.B. Evans, 目前在澳大利亚墨尔本大学矿冶系) 等人表示衷心的感谢。

在不同的时间里萨莉·芬诺拉 (Sally Finora)、戴夫·霍恩斯比 (Dave Hornsby)、琼·罗贝尔-兰德尔 (June Wrobel-Randle)、康尼·维利斯塔克 (Connie Velestuk) 和梅尔巴·韦伯 (Melba Weber) 给予了技术上的帮助，仅表衷心谢忱。

非常感激已故舒曼博士 (J.H. Schulman)。他在英国剑桥大学胶体科学系当讲师时点燃了我对表面化学的兴趣，正是在他1967年的建议下开始了本书编写的缓慢过程。

对曾参与研究工作的我以前的学生和取得博士学位后的副研究员，我真诚地感谢他们非常宝贵的合作。

对“普伦诺姆”出版社编辑人员的帮助谨致谢意。

**J. 赖亚**

加拿大温哥华不列颠哥伦比亚大学采矿和矿物工程系

## 常用符号注释

- $\alpha$  相, 例如溶剂或固体  
 $a$  毛细管常数  
 $\alpha$  在德博尔 (de Boer) 方程 (6-18) 中表示吸附质间横向作用的子项  
 $a$  电荷迁移常数  
 $\alpha_M$  体积金属相中的活度, 设等于1  
 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  极化率  
 $\alpha_1^*, \alpha_2^*$  有效极化率  
 $\beta$  相; 组分, 例如溶质  
 $\beta$  常数, 表面活性剂同系物的特征  
 $\beta$  吸附质分子 (组分) 所占的面积  

$$= \frac{1}{2} \pi d^2$$
 $\beta$  电荷迁移常数  
 $\beta_{\text{exp}}$  新吸附质分子体积与苯分子体积之比率  
 $\gamma$  表面张力  
 $\Gamma_i, \Gamma_1, \Gamma_2$  组分  $i$  或组分1和2的表面净吸附量  
 $\gamma_c$  固体的临界表面张力  
 $\gamma^d$  起因于色散力的表面张力组成项  
 $\gamma^h$  起因于氢键作用的表面张力组成项  
 $\gamma_{s/v}, \gamma_{s/l}, \gamma_{l/v}, \gamma_{l/a}$  固/蒸气、气/固、固/液和液/气界面的界面张力  
 $\gamma_0$  产生单位面积的紧密堆积低指数面所做的功  
 $\epsilon$  固体表面上产生突面所做的功  
 $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2$  物质的介电常数



- $\epsilon_i$  波兰尼 (Polanyi) 吸附势
- $\epsilon_s$  静电介电常数
- $\epsilon_{0.0}$  不受频率变化影响的介电常数
- $\zeta$  电位
- $\eta$  超电位
- $\eta$  粘度 (牛顿·秒/米<sup>2</sup>)
- $\theta$  接触角或两晶面间的夹角
- $\theta$  覆盖率, 分数或百分数
- $\theta$  形成离子对中离子的百分率
- $\theta_c$  临界覆盖率
- $\theta_r, \theta_a$  后退或前进接触角
- $\theta_1, \theta_2$  偶极子投影间的夹角
- $\kappa$  双电层厚度的倒数
- $\kappa$  离子云德拜 (Debye) 长度的倒数
- $\lambda$  波长
- $\lambda$  与杨氏 (Young) 弹性模数有关的常数
- $\lambda$  流动电位中溶液的导电率
- $\lambda_i$  组分*i*的特征吸附波长
- $\mu$  偶极矩
- $\mu_h$  厚度为*h*的薄膜的化学势
- $\mu_i, \mu_A, \mu_B$  组分*i*, A, B的化学势
- $\mu_{liq}$  体积液体的化学势
- $\mu_i^\circ$  浓度为1摩/升时*i*组分的标准化学势
- $\mu_i^*$  分压为1大气压时*i*组分的标准化学势
- $\nu$  动粘度,  $\nu = \eta / e$  (米<sup>2</sup>/秒)
- $\nu_1, \nu_2$  谐振频率
- $\Pi$  脱落压 (Disjoining Pressure)
- $\Pi_e$  薄膜的位能中起因于双电层重叠的静电力分项
- $\Pi_h$  与外部压力处于平衡时厚度*h*的薄膜的

## 脱落压

- $\Pi_{s,11}$  薄膜的位阻分项
- $\Pi_w$  薄膜中脱落压的范德华力分项
- $e, e_1, e_2$  密度
- $e$  电荷密度
- $\tau$  粘滞系数 (凝聚系数)
- $\tau$  介电松弛时间
- $\tau$  气泡-颗粒附着的诱导时间
- $\tau_{cr}$  从  $h_0$  薄化至  $h_{cr}$  的诱导时间
- $\tau_0$  薄膜从宏观厚度薄化至由流体动力或毛细管力所决定的厚度  $h_0$  时的诱导时间
- $\phi$  古德 (Good) 和吉里福尔科 (Girifalco) 方程中的常数
- $\phi$  表面压力或薄膜压力 ( $\phi = \gamma - \gamma_s$ )
- $\phi^\alpha, \phi_M, \phi^\beta$  相  $\alpha, M$  或  $\beta$  的内电位
- $\phi_1, \phi_2$  倾角
- $\chi^\alpha, \chi^\beta$  相  $\alpha, \beta$  的表面电位
- $\chi_1, \chi_2$  原子的磁化率
- $\psi_0$  表面电位 (OHP层的电位)
- $\psi^\alpha, \psi^\beta$  相  $\alpha, \beta$  的外电位
- $\Delta\psi$  伏特电位差
- $\omega$  每一甲基频率的内聚能
- $A$  微分电容方程中的常数
- $A$  平均离子活度系数中的常数
- $A, A^s$  表面和薄膜的面积
- $A_c$  每一分子的临界表面积
- $A_h$  哈马克 (Hamaker) 常数
- $A_p$  极化常数
- $a$  表示吸附质之间横向相互作用程度的参数

- $a$  范德华方程中的常数
- $a$  迁移单位电荷所做的功
- $a_A, a_i$  组分  $A$  或  $i$  的活度
- $a_s$  表面活化剂的活度
- $a_1, a_2$  常数
- $B_h$  阻滞力的哈马克常数
- $B_p$  极化常数
- $b$  范德华方程中的常数
- $b$  朗缪尔 (Langmuir) 吸附等温线中的常数
- $b_{ij}$  给定离子组分的常数
- $b_1, b_2$  常数
- $C$  BET方程中的常数
- $C$  伦敦色散力常数
- $C.N.$  配位数
- $C_{b1}$  表面活化剂初始形成黑膜 (第一黑膜) 时的浓度
- $C_H, C_{G-C}$  亥姆霍兹 (Helmholtz) 层或古伊-查普曼 (Gouy-Chapman) 层的电容
- $c$  光速 (真空中  $= 2.99795 \times 10^8$  米·秒<sup>-1</sup>)
- $c_h$  薄膜中的浓度
- $c_i$  离子  $i$  的浓度
- $c_s$  表面活化剂的浓度
- $c_0$  体积溶液中离子的初始浓度
- $D$  扩散系数 (厘米<sup>2</sup>/秒)
- $d$  颗粒或分子的直径
- $d$  电容器平行极板间距
- $d$  离子的中心距
- $d_M$  金属晶格中原子的间距
- $d_{sc}$  半导体中原子的间距

- $E$  弹性常数  
 $E$  外加电位或实测电位  
 $E$  坐落液滴的边缘效应函数  
 $E_L$  液化热  
 $E_0$  厄缶 (Eotvos) 数  
 $E_1$  第一吸附层中的吸附热  
 $e$  电子电荷  $= 4.8 \times 10^{-10}$  静电单位  
 $= 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$   
 $F$  亥姆霍兹 (Helmholtz) 自由能  
 $F$  法拉第 (一克摩尔离子)  
 $F$  电子伏特换算为千卡每克摩尔或克当量的转换系数  
 $f_A$  活度系数  
 $f^*$  在两界面之间的薄膜的比界面自由能  
 $G$  吉布斯 (Gibbs) 自由能  
 $G^*$  标准压力  $P^*$  下的标准吉布斯自由能  
 $g$  重力加速度  
 $h$  普朗克 (Planck) 常数  
 $(6.625 \times 10^{-34} \text{焦尔秒})$   
 $h$  低指数面中单突面的高度  
 $h$  液膜破裂后残留于固体表面上的稳定层的厚度  
 $h_{cr}$  薄膜在破裂瞬间的临界厚度  
 $I_1, I_2$  原子的离子化能  
 $i$  任意组分或吸附质  
 $i_0$  交换电流密度  
 $K$  平衡常数  
 $K_A$  缔合常数  
 $K_D$  解离常数  
 $K_e$  经验常数

- $K_T$  特姆金 (Temkin) 方程中的常数  
 $K_0$  常数  
 $K_1$  阻滞力的伦敦力常数  
 $K_{11}, K_{12}, K_{12}^0$  相1之间、相1和相2以及带有吸附层的相1和相2之间薄膜的范德华-哈马克常数  
 $\kappa$  玻耳兹曼 (Boltzmann) 常数  
 $= 1.3805 \times 10^{-16}$  尔格·度 $^{-1}$   
 $= 1.3805 \times 10^{-23}$  焦耳·开 $^{-1}$   
 $\kappa$  物质迁移的渗透系数  
 $L$  孔或气泡的特征尺寸  
 $l$  偶极子正电荷中心与负电荷中心的距离  
 $l$  电极距离  
 $l_{sc}$  空间电荷层厚度  
 $M$  分子量  
 $M$  摩尔/升  
 $m$  分子质量  
 $m$  吉布斯方程 (2-83) 中的“盐”参数  
 $m$  滴汞电极的毛细管速率 (克·秒 $^{-1}$ )  
 $N$  阿伏加德罗数  $= 6.02252 \times 10^{23}$  摩 $^{-1}$   
 $n$  电子组态指数  
 $n$  每立方米1:1电解质的分子浓度 (第九章)  
 $n_0$  每秒碰击单位表面的分子数  
 $n_d$  每秒解吸的分子数  
 $n_r$  折射指数  
 $P, p$  压力  
 $P_A$  分压,  $P_A = X_A P$   
 $P_M$  克分子极化强度  
 $Q$  热, 能

$Q'$	与亥姆霍兹自由能 $F'$ 相关的分函数
$q$	时间 $t$ 内物质迁移的摩尔数
$q_c$	化学吸附能 (热)
$q_{e1}$	电解质配衡电荷
$q_p$	物理吸附能 (热)
$q_{sc}$	空间电荷
$q_{ss}$	表面态电荷
$R$	气体常数 = $1.9872 \text{卡} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{摩尔}^{-1} =$ $8.3143 \text{焦} \cdot \text{开}^{-1} = 0.082057 \text{升} \cdot \text{大气压} \cdot$ $\text{度}^{-1} \cdot \text{摩尔}^{-1}$
$R_a$	吸附速度
$R_d$	解吸速度
$Re$	雷诺数
$R_1, R_2$	球的半径、气泡的表面曲率
$r$	自中心离子或自表面算起的距离
$r_0$	在 $U(r) = 0$ 时的距离
$S$	熵
$S$	扩散系数
$S$	液滴的表面积
$S_0, S_1, S_2, \dots$	无吸附质覆盖的表面, 单层覆盖的表面, 双层覆盖的表面, $\dots$ 在整个表面中所占的百分数
$T$	绝对温度, $^{\circ}\text{K}$
$T_{2c}, T_{3c}$	二维相和三维相的临界温度
$t$	液膜厚度
$t$	吸附质在表面上的停留时间
$t_c$	接触时间 (在碰撞中, 在附着中, 等等)
$t_0$	固体中原子的振动周期
$U$	内能
$U_{\mu}$	基桑 (Keesom) 效应 (偶极子的相互

作用能)

- $U_0$  流体运动的特征速度  
 $V$  体积  
 $V_m$  液体的摩尔体积  
 $V_m$  单层覆盖所需的气体体积  
 $V_0$  每平方厘米单分子层的比体积  
 $v$  颗粒或气泡的速度; 胶体的电泳速度  
 $v$  吸附于表面上的气体体积  
 $W_A$  附着功  
 $W_C$  内聚功  
 $X$  比例因素  
 $X$  位移度 (厘米)  
 $X_A, X_B$   $A$ 和 $B$ 的摩尔百分数  
 $X_s$  表面活性剂的摩尔百分数  
 $x$  整数  
 $Y$  弹性模数  
 $y$  整数  
 $z$  电价  
 $z$  电子数  
 $z_0 e$   $a$ 携带的电荷  
 $z^+, z^-$  离子的正电荷和负电荷数

# 目 录

常用符号注释	Ⅺ
第一章 绪论	1
1-1 泡沫浮选的范围	1
1-2 矿物浮选系统概述、定义	3
1-3 典型的浮选作业和流程	14
1-4 矿物的解离粒度	20
1-5 矿物分离中遇到的一些问题	23
1-6 硫化矿物工业分选实例	29
1-6-1 铅-锌矿石	31
1-6-2 铜矿石	32
1-7 铜、铅、锌、铁氧化矿及非金属矿物的工业浮选实例	35
1-7-1 表面氧化的矿物和氧化物型矿物的浮选	35
1-7-2 非金属工业矿物的浮选	38
1-8 从饱和卤水中分选可溶性盐	40
1-9 硅酸盐矿物的浮选	41
1-10 天然疏水性矿物的分选	42
1-11 工业浮选生产和试验研究的新进展	44
1-12 浮选文献	48
1-13 选读文献	52
1-13-1 浮选理论	52
1-13-2 浮选实践	54
1-13-3 国际选矿会议文集 (IMPC)	55
1-13-4 定期发表有关浮选理论与实践论文的期刊目录	58
1-13-5 不定期发表有关浮选化学论文的期刊目录	58
第二章 化学键和分子键, 界面能学	60



2-1	离子键	60
2-2	共价键	61
2-3	部分离子-共价键	64
2-4	偶极矩和偶极子-偶极子相互作用	66
2-5	氢键	72
2-6	伦敦色散力, 范德华相互作用	75
2-6-1	宏观尺寸原子集合体间的色散力	78
2-6-2	范德华相互作用的实际意义	83
2-7	金属键, 固体的能带说	84
2-8	界面键合中空间(尺寸)参数的重要性	87
2-9	界面热力学、定义和概念	88
2-9-1	化学及电化学系统的热力学关系式	92
2-9-2	气/液界面上吸附的热力学	97
2-9-3	固/液界面上吸附的热力学	102
2-9-4	薄液层的热力学	103
2-10	界面润湿与接触角的关系	104
2-10-1	接触角的解释	108
2-10-2	润湿和脱湿的动力学特性	116
2-10-3	低能固体的临界表面张力	121
2-11	液/气和液/液界面	126
2-12	选读文献	127
2-12-1	化学键及分子键	127
2-12-2	热力学	128
2-12-3	界面的关系式	128
<b>第三章 固体结构</b>		<b>129</b>
3-1	原子堆积	129
3-2	简单化合物的晶体结构	132
3-3	结构变化和化学关系	151
3-4	含有限络合离子的结构	153
3-5	硅酸盐类	158