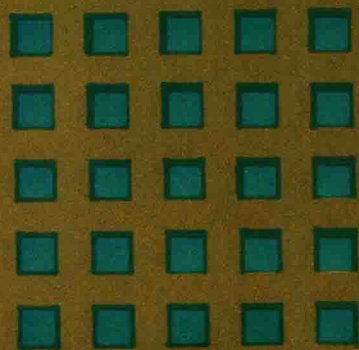


[澳]A.J.Lynch 等 著
国民 亢 力 译
张国祥 校

浮选回路的 模拟和控制

中国建筑工业出版社

浮选回路的模拟和控制

[澳]A.J. Lynch 等著

国民 亢力 译

张 国 祥 校

中国建筑工业出版社

本书为澳大利亚昆士兰大学《选矿发展》丛书的第三卷。全书共十章，从分析工业浮选过程中浮选变量开始，逐步深入地论述浮选过程的数学模型的建立，浮选回路模拟，数据的收集及模型参数的计算；进而讨论硫化矿及煤浮选回路的自动控制系统；介绍载流分析技术的应用及其计算方法。本书对从事选矿过程自动化的工程技术人员均有切实的参考价值。

A. J. Lynch N. W. Johnson E. V. Manlapig C. G. Thorne
Mineral and Coal Flotation Circuits—Their Simulation and Control
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY
Amsterdam—Oxford—New York 1981

* * *

浮选回路的模拟和控制

国民 亢 力 译

张 国 祥 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
北京市平谷县大华山印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：9 1/4 插页：1 字数：262 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数：1—1,170册 定价：1.80元

统一书号：15040·5103

前 言

尽管浮选回路的数学模拟技术仍处于迅速开发并不断发展的阶段，但可以认为，即使是在目前，它业已进展到有可能用来分析浮选操作和设计浮选回路的控制系统。本书通过模拟技术在浮选机组和回路中的应用，阐述了昆士兰大学Julius Kruttschmitt矿物研究中心开发的浮选模拟技术，讨论了浮选回路的自动控制，并扼要地评述了对浮选回路控制系统来说是相当重要的载流分析技术。

在本书编写前和编写中，为本书提供论文和研究报告的有J.P.Bisshop(Decd)先生、J.R.Braes先生、R.H.Doherty先生、L.Elber博士、J.S.Hall博士、K.R.Leach先生、G.J.Lyman先生、D.J.McKee博士、C.K.McKenzie先生、J.F.Thompson先生、G.W.Walter博士、M.E.White博士、以及W.J.Whiten博士和A.M.Whiten夫人。第三章由N.W.Johnsen博士执笔，他当时是墨尔本大学采矿系的讲师，我们感谢该大学为他的工作提供时间和方便。

我们特别感谢Mount Isa矿物有限公司和MIM Holdings有限公司领导和职员多年来不断给予的鼓励和财政与技术支持。还有许多公司通过澳大利亚矿物工业研究协会参与了研究工作，在此也对他们致意，这些公司是ASARCO公司、Bougainville铜有限公司、Consolidated Gold Fields澳大利亚有限公司及子公司、澳大利亚的Conzinc Riotinto有限公司及子公司、澳大利亚电解锌有限公司、Foxboropty有限公司、北Broken Hill有限公司、Peko Wallsend pty有限公司及子公司、西部采矿联合有限公司。我们有关煤浮选的研究工作是与Ulah开发公司合作，并在他们的财政和技术支持下进行的，

在此均致谢忱。

我们向多次为本书草稿和终稿打字的Barbara Kirkcaldie夫人、Kathy Pollard夫人、Joan Richardson夫人和Libby Hill小姐以及绘制全部插图的Vince Dooley先生表示敬意和感谢。

符 号 说 明

- M , 一个浮选槽中组分 i 的质量或体积;
- F , 孤立浮选槽给料中组分 i 的流量 (质量/时间或体积/时间);
- T , 孤立浮选槽尾矿中组分 i 的流量 (质量/时间或体积/时间);
- P , 孤立浮选槽精矿或产品中组分 i 的流量 (质量/时间或体积/时间);
- R , 精矿中第 i 个物料的分率回收率 (P_i/F_i);
- l 平均粒度为 x 的矿粒到达精矿流槽的概率;
- P_c , 单位时间内矿粒和气泡碰撞的概率;
- P_a , 碰撞后粘着的概率;
- V 一个浮选槽中的矿浆体积;
- F 度量泡沫稳定性的系数;
- [x] 矿浆中平均粒度为 x 的矿粒浓度 (质量/体积);
- W 矿浆流经 1 个或 N 个浮选槽后余留的矿物组分的重量;
- W , 浮选给料中矿物组分的重量;
- P 任一浮选槽中任一矿物组分的浮选概率;
- N 浮选槽个数;
- C 以质量分数表示的浮选槽中矿粒的浓度;
- K 浮选速度常数 (时间 $^{-1}$);
- t 矿粒在浮选过程中的停留时间 (时间);
- K_s, K_p 快浮和慢浮物料的浮选速度常数;
- φ 慢浮物料所占的比例;
- τ 矿浆在一个浮选槽中的标准停留时间;
- ν 浮选槽尾矿体积流量 (体积/时间);

- $E(t)$ 停留时间分布 (连续分布);
- m_i 一个浮选槽的矿浆体积中组分 i 的质量或体积;
- v_0 一个浮选槽给料的体积流量 (体积/时间);
- v' 混合作用引起的矿浆流量或称混合系数 (体积/时间);
- a', b' 比例系数;
- Q_0 精矿体积流量 (体积/时间);
- G 矿浆中脉石的浓度 (质量/体积);
- i 有用矿物中固有脉石的分数含量;
- H 矿浆 (不包括空气) 中有用矿物的浓度 (质量/体积);
- RRW 水回收率 (质量/时间);
- CF_i 游离脉石中第 i 粒级的分级矢量 (无因次);
- $MFGP_i$ 矿浆中第 i 粒级游离脉石的质量;
- $MWATP$ 矿浆体中水的质量;
- K_i 矿浆中组分 i 往精矿流槽迁移的一级速度常数 (时间 $^{-1}$);
- K_w 矿浆中水往精矿流槽迁移的一级速度常数 (时间 $^{-1}$);
- α 水从泡沫层泄落的迁移系数或速度常数 (时间 $^{-1}$);
- β 固体从泡沫层泄落的迁移系数或速度常数 (时间 $^{-1}$);
- $M_i, (M_w)$ 固体组分 i (或水) 从泡沫层泄落的速度常数 (时间 $^{-1}$);
- $N_i, (N_w)$ 固体组分 i (或水) 从泡沫层回收至精矿中的比例常数;
- L_1 经验常数 (体积质量 $^{-1}$, 时间 $^{-1}$);
- L_2 在固体和水泄落系数关系 ($\beta - \alpha$) 中的粒度系数 (长度 $^{-1}$);
- r 颗粒在泡沫中的标准停留时间;
- $\rho_{\text{min}}, (\rho_{\text{矿浆}})$ 固体 (矿浆) 密度 (质量/体积);
- Y_i 泡沫中未固着于气泡上的固体组分 i 的重量;
- X_i 矿浆中固体组分 i 的重量与水的重量之比;
- A_w 水从矿浆中进入泡沫层的流量 (质量/时间);

- P_i 单位重量水中从矿浆向泡沫层迁移的固体组分 i 的比例（通常取1）；
- A_i 通过携带作用从矿浆体向泡沫体迁移的固体组分 i 的流量（质量/时间）；
- B_i 从泡沫体向矿浆体迁移的固体组分 i 的流量（质量/时间）；
- C_i 从泡沫体向矿浆迁移固体组分 i 的流量（质量/时间）；
- $MFGC_i$ 精矿中第 i 粒级的游离脉石质量；
- $MWATC$ 精矿中水的质量；
- λ_i 泡沫体中物料的停留时间（时间）；
- $RFGC_i$ 第 i 粒级中游离脉石进入精矿的流量（质量/时间）；
- $RWATC$ 精矿中水的流量（质量/时间）；
- $RWATP$ 尾矿中水的流量（质量/时间）；
- $f(k, 0)$ 一个浮选槽（分批的或连续的）给料（在0时间）的一级速度常数分布；
- m 一个浮选槽的矿浆体中一组分的质量；
- m_f 一个浮选槽的泡沫体中一组分的质量；
- V_f 泡沫体积；
- Q_0 精矿的体积流量（体积/时间）；
- K_p 一种组分从矿浆体向泡沫体迁移的一级速度常数（时间 $^{-1}$ ）；
- K_a 一种组分从泡沫体向矿浆体迁移的一级速度常数（时间 $^{-1}$ ）；
- Y_i 泡沫中未固着在气泡上的组分 i 的质量；
- k_0 矿浆中化学环境造成的基本速度常数（时间 $^{-1}$ ）；
- k' 说明携带作用回收有用矿物的递增速度常数（时间 $^{-1}$ ）；
- $RRCG$ 连生体中脉石的回收率（质量/时间）；
- D_i 试样分析得出的第 i 个速度常数组的有用矿物中脉石与有用矿物的典型重量比；
- RRV_i 第 i 个速度常数组的有用矿物回收率（质量/时间）；

- α_n 连生颗粒中 有用矿物的可浮性分布；
- α_i 当量粒度的游离有用矿物的可浮性；
- $\alpha_{\max}$ 高捕收剂浓度下的游离有用矿物颗粒的最大可浮性；
- ν 连生颗粒中 有用组分的体积分数；
- ϕ 属于双峰分布中的低浮选速度常数的给矿所占的分数；
- a, b γ 分布参数；
- n, k_m γ 分布参数（根据 Harris 和 Chakravarti, 1970），
其中 k_m 为具有一级速度常数的单位；
- m 双峰形 γ 分布参数。

目 录

前言

符号说明

第一章 工业浮选过程	1
1.1 引言	1
1.2 浮选回路中颗粒的类型	2
1.2.1 硫化矿	2
1.2.2 煤	7
1.3 浮选回路的类型	10
1.3.1 硫化矿	10
1.3.2 煤	14
1.4 浮选变量	16
1.5 浮选回路效能的评价	17
1.5.1 硫化矿	17
1.5.2 煤	20
第二章 浮选回路中硫化矿和煤的行为模式	22
2.1 硫化矿物	23
2.1.1 浮选粗选	23
2.1.2 浮选精选	29
2.1.3 斑岩铜矿	32
2.1.4 矿物回收率和颗粒大小的关系	33
2.1.5 捕收剂和抑制剂添加量变化的影响	35
2.1.6 影响泡沫性质的变量变化的作用	39
2.1.7 泡沫过载	43
2.2 煤	45
2.2.1 浮选粗选	45
2.2.2 捕收剂用量变化的影响	47
2.2.3 起泡剂用量变化的影响	49
2.2.4 浮选给料粒度分布变化的影响	49

2.2.5 泡沫过载	51
2.2.6 煤的显微组分	52
第三章 浮选过程的数学模型	56
3.1 引言	56
3.2 经验模型	60
3.3 概率模型	61
3.4 动力学模型	63
3.4.1 模型的性质	63
3.4.2 孤立连续浮选槽中的停留时间分布	67
3.4.3 工业浮选槽之间的相互混合	72
3.4.4 携带和泄落的回收率模型	74
3.4.5 有用矿物的速度常数分布	78
3.4.6 低速度常数有用矿物的起因——不浮部分的概念	84
3.4.7 泡沫过载	85
3.4.8 泡沫体	86
3.4.9 槽与槽间固体组分速度常数的恒定性	91
3.4.10 矿物的解离	93
3.4.11 水回收率模型	95
第四章 回路模拟导论	98
4.1 停留时间和浮选槽产物的计算	99
4.2 浮选机组的模拟	102
4.2.1 稳定给料性质	102
4.2.2 给料性质的变化	104
4.3 浮选回路的模拟	105
4.4 包括再磨的浮选回路的模拟	106
4.5 模拟工业浮选回路所遇到的问题	108
第五章 浮选回路模拟的数据收集、质量平衡的模型	
参数计算	110
5.1 引言	110
5.2 数据收集	112
5.2.1 生产回路	112
5.2.2 实验室浮选槽	116

5.2.3 生产厂和实验室浮选操作的固有差异	117
5.3 质量平衡	118
5.3.1 浮选机组给料样品和能够得到的单个浮选槽中矿浆和精矿 的样品	118
5.3.2 可采集的浮选机组给料试样和单独浮选槽中矿浆与精矿 试样以及浮选槽精矿流量的估计	121
5.4 模型参数的计算	127
5.4.1 浮选速度常数	127
5.4.2 连续浮选槽的混合参数	129
5.4.3 分级函数	132
第六章 包含操作变量的浮选回路模型	135
6.1 硫化矿浮选—模拟捕收剂的影响	136
6.1.1 恒定给料条件下捕收剂用量变化的模拟研究	141
6.1.2 捕收剂用量与原矿品位比例保持不变时的模拟研究	143
6.1.3 在浮选机组中分段添加捕收剂效果的模拟研究	144
6.2 硫化矿浮选—模拟抑制剂的效果	146
6.3 硫化矿浮选—模拟泡沫层厚度	148
6.4 硫化矿浮选—模拟起泡剂添加量	152
6.5 硫化矿浮选—模拟充气量	153
6.6 硫化矿浮选—泡沫过载	154
6.7 煤浮选—模拟捕收剂的影响	158
6.8 煤浮选—泡沫过载	160
6.9 煤浮选—动力学和泡沫过载组合模型的应用	162
第七章 浮选回路自动控制系统的目标、类型和费用	164
7.1 自动控制的目标	165
7.2 扰动的类型	167
7.2.1 矿石浮选性质的变化	167
7.2.2 磨矿回路的不稳定性	169
7.2.3 浮选回路的不稳定性	171
7.3 控制等级	172
7.3.1 调节控制	172
7.3.2 监视控制	174
7.3.3 最优控制	175

7.4 控制系统的类型及费用	176
7.4.1 粗选机组的简单前馈控制系统	177
7.4.2 粗选、精选回路的稳定控制系统	180
7.4.3 采用多料流载流分析系统的整个浮选回路的综合控制系统	182
7.4.4 评述	184
第八章 硫化矿浮选回路的自动控制系统	185
8.1 粗选—扫选回路	185
8.1.1 捕收剂的控制	185
8.1.2 捕收剂控制系统的一些问题	188
8.1.3 泡沫层厚度的控制	195
8.1.4 充气量的控制	197
8.1.5 起泡剂的控制	201
8.1.6 活化剂和抑制剂的控制	203
8.1.7 模拟技术在分析粗扫选机组控制系统时的应用	203
8.1.8 开路粗选、扫选机组控制系统现状的评述	206
8.2 精选回路	207
8.2.1 充气量的控制	207
8.2.2 抑制剂的控制	211
8.2.3 应用模拟技术分析精选回路的控制系统	213
8.3 改变矿浆流向控制浮选回路	215
8.3.1 控制范围	215
8.3.2 北Broken Hill有限公司用分流盘控制铅精选机组	217
8.3.3 澳大利亚电镀锌有限公司采用分流盘控制锌精选回路	221
8.4 在线最优化控制	224
第九章 煤浮选回路的自动控制概念	228
9.1 自动控制系统的要求	229
9.2 可能的控制系统	232
9.2.1 给矿粒度的控制	232
9.2.2 药剂	234
9.2.3 泡沫层厚度	235
9.3 评述	237
第十章 选矿的载流分析	238
10.1 X射线技术	238

10.1.1	波长色散分析仪	239
10.1.2	能量色散分析仪(固态)	241
10.1.3	正比探测器系统	243
10.1.4	闪烁探测器系统	244
10.2	XRF载流分析的进一步研究	246
10.2.1	矿粒尺寸的影响	246
10.2.2	矿浆固体含量	248
10.2.3	矿浆的空气含量	248
10.2.4	校准方程式	249
10.3	核共振荧光(NRF)	251
10.4	中子法	251
10.4.1	矿浆	253
10.4.2	运输机和矿仓中的物料	255
10.4.3	煤	255
10.4.4	铁矿石	256
10.4.5	水分	257
10.5	确定煤的灰分	257
10.5.1	对铁没有补偿的方法	257
10.5.2	对铁有补偿的方法	259
附录	载流分析的计算方法	260
A.1	X和 γ 射线与物质的交互作用	260
A.2	X射线光谱	263
A.3	X射线源	264
A.4	辐射探测器	266
A.5	用XRA和XRF技术分析矿浆	266
参考文献		276
主题索引		287

第一章 工业浮选过程

1.1 引言

浮选是依据固体原材料表面性质的不同，将有用固体物料与废料分离的过程。浮选法广泛地用于硫化矿、氧化矿和煤的富集。原料中的大多数矿物是亲水的，但也有一些如滑石或刚刚开采出来的煤是疏水的。另一些则是在吸附了适宜的化学药剂后，表面具有了疏水性。如果将一些相对于水来说具有不同表面性质的颗粒，混合在水中制成矿浆，就可采用以疏水性差异为根据的方法将它们分离。当硅石和新破碎的煤粒在水中搅拌并在矿浆中导入气泡后，煤与气泡碰撞就会粘附在气泡上，气泡-矿粒的集合体上升到矿浆的表面，就作为泡沫精矿排出，那些未进入精矿的颗粒，就是尾矿。金刚石表面也是疏水性的，分选方法的依据是金刚石与共生脉石表面性质的差异，但这个方法不涉及气相，本书不予讨论。

在浮选中矿浆相和泡沫相是重要的，颗粒在两相间转移时的机理有：

(1) 矿浆向泡沫转移

(a) 颗粒向气泡附着，颗粒-气泡的集合体上升到泡沫层中。

(b) 泡沫层底部气泡间的矿浆携带作用。

(2) 泡沫向矿浆转移

(a) 被携带的矿浆从泡沫层中返回矿浆

(b) 气泡破裂、颗粒从破裂的颗粒-气泡集合体上解脱，一些不再附着在稳定气泡上的颗粒返回矿浆中。

最终进入精矿流的颗粒是第(2)项中(a)、(b)所说明的不再返回矿浆中的颗粒。

成功地进行浮选的关键是正确选择加到矿浆中的化学药剂。一些药剂在矿浆中影响浮选过程,另一些则在泡沫相中影响浮选过程。Sutherland和Wark(1955)是这样说明的:

四种药剂在浮选中已获得永久的地位:

(1)起泡剂:起泡剂是一种能溶解在水中,并使水产生稳定泡沫的物质。

(2)捕收剂:任何一种矿物的捕收剂是使矿物粘附于气水界面,在有泡沫存在时,形成矿化泡沫的物质。

(3)活化剂:任何一种矿物的活化剂都是这样的一些物质,即添加它,可在捕收剂存在的情况下诱导浮选行为发生,否则捕收剂对矿物不起作用。

(4)抑制剂:任何一种矿物的抑制剂(通常为无机物)都是在添加它后可阻止捕收剂对该矿物起作用的物质。

这两位和其它作者(例如Gaudin 1957, Klassen和Mokrousov 1963, Rogers 1962, Aplan和Fuerstenau 1962)已经详细讨论过浮选理论,有兴趣的读者可以参考这些出版物,以获得更详细的资料。

本书所讨论的是有关浮选过程的工艺问题,不同于讨论化学方面的问题,就是用适当的模拟模型来研究浮选回路的最优化、控制和设计。因为文献中有关诸如磷灰石和铁矿石等其它矿物的资料还不足以用来建立模拟这些矿物浮选过程的数学模型,所以本书只能重点讨论硫化矿和煤。

1.2 浮选回路中颗粒的类型

1.2.1 硫化矿

矿物是一种“……自然产出的均质固体,是无机地形成的,具有一定的化学成分和有序的原子的排列……”(Berry和Mason

1959)。硫化矿是一种含有块状或浸染状硫化物的岩石，回收其中的硫化物可获得效益。常见有价值的硫化矿是：

辉铜矿 Cu_2S ；斑铜矿 Cu_5FeS_4 ；

黄铜矿 CuFeS_2 ；铜蓝 CuS ；

黄铁矿 FeS_2 ；磁黄铁矿 Fe_{1-n}S ；

镍黄铁矿 $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$ ；辉砷钴矿 CoAsS ；

方铅矿 PbS ；闪锌矿 $(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$ ；

辉钼矿 MoS_2 ；辉铋矿 BiS_3 ；

常见脉石矿物是：

石英 SiO_2 ；白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ；

方解石 CaCO_3 ；菱镁矿 Fe_3O_4 ；

长石 WZ_2O_6 （W代表钠、钾、钙或钡，Z代表硅和铝）

浮选常用来从脉石矿物中分离有价硫化矿，它也是分离硫化矿的最重要的工艺。

若干年来，含粗粒硫化物的矿石已趋枯竭，现在必须开采那些需要细磨才能充分解离的细粒嵌布矿石。常常用若干段的破碎和磨矿减小矿石粒度，以为浮选作准备。尽管大多数的破碎是沿着颗粒的界面进行的，并获得仅含单一矿物的颗粒，但是穿过颗粒界面的破碎也是存在的，此时进入浮选的颗粒是由两种以上矿物组成的连生体。既含有用成分又含脉石的连生体对浮选来说是一个难题，因为在浮选过程中要做出决策：若使连生体排到尾矿中去，可防止脉石贫化精矿，但这将会使一些有用矿物损失于尾矿中；若将连生体混入精矿，可回收其中的有用矿物，然而由于脉石贫化精矿而遭罚款。有用矿物的粒度愈小，矿物嵌布愈细，连生体的问题就愈重要，因为将会有更多的有用矿物作为连生体存在于磨矿回路的产品中。因此人们企图找出更有效的方法来处理连生体，以使有用矿物的回收率维持在最大，而同时精矿被脉石贫化的程度最小。这样浮选流程就变得复杂化。

通过考察澳大利亚Tennant Creek的磁铁矿-黄铜矿-石英矿石自磨生成的颗粒，可以定性地讨论磨矿回路中单体和连生体