

浮选工艺及应用

Flotation Technology and Application

杨松荣 邱冠周 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

浮选工艺及应用

杨松荣 邱冠周 编著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书结合作者从事矿物加工工程研究、咨询和设计的实践经验,从工程应用的角度出发,系统地介绍了泡沫浮选的基本原理、浮选工艺及其影响因素、浮选工艺设计需考虑的因素、常用的浮选设备等,对浮选工艺进行了详细的分析和论述,并结合部分生产矿山的实际情况对铁、铜、镍、铅、锌、金、铂、煤、磷等不同金属(非金属)矿物的浮选工艺流程实例进行了介绍。

本书可供从事矿物加工科学研究和工程设计的人员、企业的工程技术人员和高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

浮选工艺及应用/杨松荣,邱冠周编著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5024-7053-1

I. ①浮… II. ①杨… ②邱… III. ①浮选工艺
IV. ①TD923

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 242018 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7053-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京画中画印刷有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 16 印张; 1 彩页; 311 千字; 243 页

66. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

作者简介



杨松荣, 1957年生, 山东莱州人, 先后就读于东北工学院(现东北大学)、中南大学, 获博士学位, 教授级高级工程师, 现任中国黄金集团建设有限公司总工程师。1982年大学毕业后分配至北京有色冶金设计研究总院(现中国恩菲工程技术有限公司)选矿室工作, 一直从事冶金矿山工程的设计、咨询和试验研究工作, 先后担任过室(所)副主任(副所长)、矿山分院副院长、院长、中国恩菲工程技术有限公司副总工程师, 中铝海外控股有限公司技术总监。先后兼任中国黄金协会理事、北京金属学会理事、中国有色金属学会选矿学术委员会副主任委员、中国矿业联合会选矿委员会副主任委员, 现为全国勘察设计注册采矿/矿物工程师(矿物加工)执业资格考试专家组组长。

30多年来, 先后参加了中国德兴铜矿、巴基斯坦山达克铜金矿、伊朗米杜克铜矿和松贡铜矿、亚美尼亚铜工业规划、赞比亚谦比西铜矿、越南生权铜矿、中国冬瓜山铜矿、阿舍勒铜锌矿、尹格庄金矿、烟台黄金冶炼厂生物氧化厂、金川有色公司选矿厂和白音诺尔铅锌矿、蒙古奥云陶勒盖铜矿、中国白象山铁矿、普朗铜矿、多宝山铜矿、会宝岭铁矿、澳大利亚 Sino 铁矿、巴布亚新几内亚瑞木红土矿、中国金堆城钼矿、东沟钼矿、秘鲁 Toromocho 铜矿等多项大型矿山的选矿工程及 20 余项中小型选矿工程的咨询设计工作。曾获国家优秀设计银奖 1 项、铜奖 1 项, 部级优秀设计奖一等奖 1 项、二等奖 1 项, 国家科技进步奖一等奖 1 项, 部级科技进步奖二等奖 1 项。在国内外发表论文多篇、英文及日文译文多篇, 获国家发明专利 1 项、实用新型专利 3 项。出版了《含砷难处理金石生物氧化工艺及应用》及《碎磨工艺及应用》两部专著, 作为总编辑出版了《全国勘察设计注册采矿/矿物工程师执业资格考试辅导教材(矿物加工专业)》。



邱冠周, 1949年生, 广东梅州人, 1987年9月毕业于中南工业大学矿物加工工程专业, 获博士学位, 是我国第一位自行培养的矿物加工工程专业的博士生。著名的矿物工程学家, 曾任中南工业大学副校长, 中南大学副校长, 现任中南大学教授, 博士生导师。2011年12月当选为中国工程院院士。

长期致力于我国低品位、复杂难处理金属矿产资源加工利用研究, 在细粒及硫化矿物浮选分离和铁矿直接还原等方面取得了显著成绩, 特别是在低品位硫化矿的生物冶金方面作出了突出贡献, 被授予国家有突出贡献科技专家。先后获得国家技术发明二等奖 2 项, 国家科技进步奖二等奖 1 项, 国家科技进步奖一等奖 1 项, 中国高等学校十大科技进展 2 项; 出版专著 5 部。2003 年当选国家自然科学基金创新群体学术带头人, 2004 年、2009 年连续两次担任生物冶金领域国家 973 计划项目首席科学家, 担任 2011 年第 19 届国际生物冶金大会主席, 并被推选为国际生物冶金学会副会长。



前 言

矿物加工（选矿）是人类从自然资源（矿石）中获取所需固体原材料的重要过程。随着人类社会的发展，不需要经过选别或易于选别的自然资源越来越少，人类所开采的自然资源中所含有用矿物的品位也越来越低，因此，矿物加工逐渐成为自然资源获取过程中不可或缺的关键。美国地质调查局《Mineral Commodity Summaries 2015》的数据表明，2014 年全球通过开采和矿物加工所获得的矿物（或金属含量）约为：铝土矿 2.34 亿吨，铜金属 1870 万吨，钼金属 26.6 万吨，金 2860 吨，银金属 26100 吨，铂金属 161 吨，钨 190 吨，铁矿石 32.2 亿吨，铅金属 546 万吨，锰金属 1800 万吨，汞金属 1870 吨，镍金属 249 万吨，钴金属 11.2 万吨，锡金属 29.6 万吨，钨金属 8.24 万吨，锌金属 1330 万吨，钽金属 1200 吨，铌金属 5.9 万吨，长石 2150 万吨，石墨 117 万吨，磷矿石 2.20 亿吨。这些矿物（或金属的载体矿物）开采出后绝大部分需要通过矿物加工过程处理。

矿物的选别有多种方法，如重力选矿（重选）、浮游选矿（浮选）、磁力选矿（磁选）、静电选矿（电选）、化学选矿等，但其中适应性最强、应用范围最广的则是浮游选矿。浮游选矿中目前唯一仍在使用的是泡沫浮选。

1905 年，Sulman 和 Picard 在美国获得了“在浮选中气泡的使用”的专利。同年，Potter 采用硫化矿物颗粒与 1% 的硫酸溶液热浴反应产生气泡使硫化矿物颗粒得到浮选的工艺首次应用于矿物浮选，在澳大利亚的 Broken Hill 铅锌矿选矿厂生产出锌精矿，由此开启了泡沫浮选的历史。2015 年是泡沫浮选首个专利获批和进入工业应用的 110 周年。

110年来,针对泡沫浮选的机理、不同矿物的浮选工艺、不同性能的药剂等,众多研究人员做出了不懈的努力,使得泡沫浮选除矿物加工领域之外,还拓展应用于环境保护领域的污水处理、水质净化、重金属离子脱除、从沥青砂中提取沥青、资源的回收利用等。

本书结合泡沫浮选发展的现状,着重从应用的角度对其进行了比较系统的介绍,根据内容的不同分为上、下两篇:上篇为1~4章,介绍了浮选工艺的发展历史、原理、影响因素、工业设计、设备等各个主要部分,对当前浮选工艺发展的新特点、新理论、新装备进行了论述;下篇为5~12章,分别介绍了有关金属矿、非金属矿、能源矿产的国外17个矿山分别采用的浮选工艺流程的生产实践。

此外,由于本书的内容和篇幅所限,为了使读者更全面地了解有关浮选的发展及其选矿工业试验的操作和数据分析过程方面的信息,把“浮选——百年的发展”和“Kanowna Belle 金矿闪速浮选回路作用的分析”两篇编译的文章以附录的形式放入本书,以供读者特别是在选矿厂生产一线工作的同行参考。

在本书的编写过程中,特别是有关浮选的发展历史,参阅了大量相关的国内外文献,谨向所有本书中所涉及的参考资料的作者表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中的不足之处,敬请批评指正。

作 者

2015年5月

目 录

上篇 浮选工艺

1 绪论	3
1.1 浮选的基本概念及其意义	3
1.2 浮选的发展历史	3
1.2.1 浮选工艺	3
1.2.2 研究技术的发展	10
1.2.3 热力学和双电层理论	11
1.2.4 硫化矿浮选	11
1.2.5 捕收剂离子的静电吸附	13
1.2.6 氧化物和硅酸盐的浮选	14
1.2.7 活化	16
1.2.8 半溶盐	18
参考文献	20
2 浮选的原理	29
2.1 浮选的热力学	29
2.1.1 矿物表面的润湿性	29
2.1.2 黏附功	31
2.2 浮选动力学	32
2.2.1 单一气泡的结构	32
2.2.2 气泡簇	33
2.2.3 矿粒-气泡的附着过程	36
2.2.4 浮选中有用矿物的颗粒粒度	44
2.2.5 负载气泡的规格	47
2.2.6 气泡表面可迁移性和矿粒惯性的影响	48
2.3 起泡剂对浮选的影响	53
参考文献	54

3 浮选工艺	59
3.1 常规浮选	59
3.2 闪速浮选	65
3.3 分支浮选	67
3.3.1 入选品位提高的动力学影响	68
3.3.2 药剂添加量变化的动力学影响	69
3.3.3 泡沫结构的改善	71
3.4 浮选工艺的影响因素	71
3.4.1 矿物的内在影响因素	71
3.4.2 矿物的外在影响因素	83
3.5 工艺设计	98
3.5.1 试验报告	98
3.5.2 回路的配置	104
3.5.3 设备的选择	106
参考文献	109
4 浮选设备	111
4.1 浮选机	111
4.1.1 机械搅拌外充气式浮选机	111
4.1.2 机械搅拌自吸气式浮选机	112
4.1.3 常规浮选机与高能浮选机	113
4.1.4 浮选机选择的主要参数	113
4.2 浮选柱	115
4.2.1 常规浮选柱	116
4.2.2 Jameson 浮选柱	118
4.2.3 浮选柱选择的主要参数	119
参考文献	121
下篇 工业应用	
5 镍矿石浮选	125
5.1 Mount Keith 镍矿选矿厂	125
5.2 Strathcona 镍矿选矿厂	130
5.3 Clarabelle 镍矿选矿厂	132
参考文献	134

6 铜金矿石浮选	135
6.1 Alumbreira 铜金矿	135
6.2 Cadia 铜金矿	137
6.3 Mt. Milligan 铜金矿	140
6.4 Candelaria 选矿厂	144
6.5 Ernest Henry 选矿厂	146
6.6 Miduk 铜矿选矿厂 (浮选柱粗选)	148
参考文献	153
7 铜多金属矿石浮选	154
7.1 KGHM 的 Lubin-Glogow 多金属沉积铜矿石浮选	154
7.1.1 铜矿石的性质	154
7.1.2 KGHM 选矿厂的工艺流程	155
7.1.3 Lubin-Glogow 铜矿带上矿石处理的替代工艺	156
7.2 Garpenberg 多金属矿选矿厂 (预磁化浮选回收细粒级矿物)	160
参考文献	164
8 铁矿石浮选	166
8.1 Chadormalu 铁矿选矿厂	166
8.2 Samarco 矿业公司选矿厂	168
参考文献	170
9 铅锌矿石浮选	171
参考文献	175
10 铂矿石浮选	176
参考文献	178
11 磷矿石浮选	180
11.1 Florida 磷矿石浮选工艺	180
11.2 Serrana 磷矿石选矿厂	182
参考文献	183
12 其他工业矿物浮选	184
12.1 云母	184

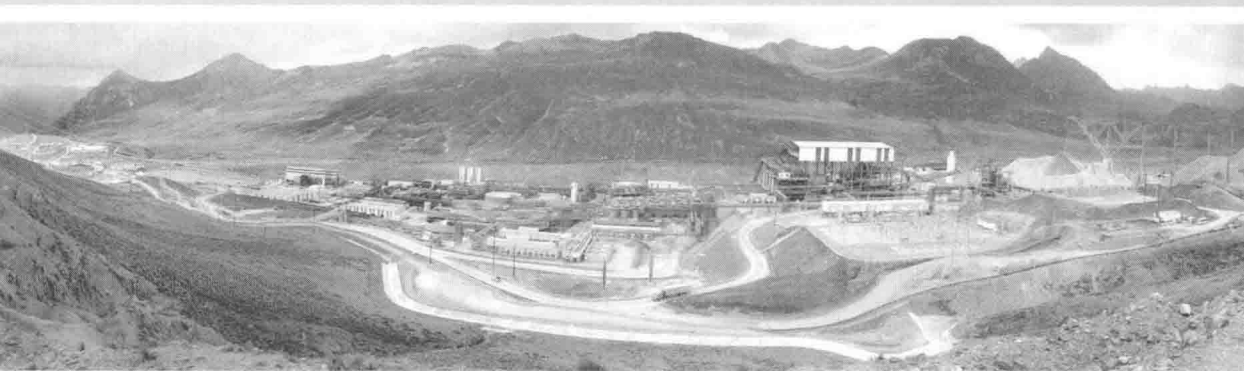
12.2 石英和长石	185
12.3 高岭土	187
12.4 煤	188
12.5 钾盐	189
参考文献	191

附 录

附录 A 浮选——百年的发展	195
附录 B Kanowna Belle 金矿闪速浮选回路作用的分析	211
附录 C 位流	239
附录 D 雷诺数	241
参考文献	243

上 篇

浮选工艺



1 绪 论

1.1 浮选的基本概念及其意义

浮游选矿 (flotation) 是利用矿物表面润湿性的差异, 从水的悬浮液 (矿浆) 中浮出固体矿物的选别过程, 简称浮选。浮选的过程是一个物理-化学分离的过程。

“浮选”一词原本是指所有的比水重的颗粒从水中浮起富集的过程。如果某些矿粒富集在油层中或富集在油层和水层之间的界面中, 该过程称为全油浮选 (bulk-oil flotation); 如果矿粒以单颗粒层富集于自由水表面, 该过程称为表层浮选 (skin flotation); 如果矿粒富集于厚的泡沫层中, 该过程称为泡沫浮选 (froth flotation)^[1]。

全油浮选的特点是:

(1) 浮选过程需要大量的油。

(2) 全油浮选过程中矿物与脉石的分离是借助于矿物的金属特性, 如硫化物; 或疏水性, 如煤、石墨, 可以在水存在的条件下优先被油润湿, 然后进入油与水之间的界面, 而脉石则被水润湿后仍留在介质中。

表层浮选的特点是:

(1) 表层浮选中矿粒的附着受自由水表面和颗粒两者的影响, 且这种影响通常大于泡沫浮选中两者的影响。

(2) 表层浮选中, 矿物与脉石分离是在气-水界面完成的, 其利用了水的表面张力和某些矿物如硫化物和碳氢化合物阻止被水润湿的特性。

泡沫浮选是在矿浆中加入药剂充分搅拌并通入空气使其矿化后进行有用矿物与脉石矿物分离的过程。泡沫浮选经历了时间的考验, 是目前唯一仍在使用的浮选方法, 也是矿物加工工艺中最重要、使用最广泛的选矿方法。全油浮选和表层浮选方法早已被淘汰。

1.2 浮选的发展历史

1.2.1 浮选工艺

浮选始于 1860 年, 当时 William Haynes 证明了可以利用油类分离矿物。1869 年, 他们对采用烃类油来分离硫化物和脉石的全油浮选的工艺申请了专利。

1877 年, Bessel 兄弟对于用水和油及辅助用来产生气泡的沸腾系统进行石墨选别的工艺申请了专利, 这大概就是今天所说泡沫浮选的起始。后来他们又把在酸性介质中利用碳酸岩矿物来产生气泡的工艺申请了专利。其他的利用油类的浮选工艺直到 1905 年英格兰的 A. H. Higgins 和澳大利亚的 G. A. Chapman 同时发现了泡沫浮选后才得到发展和利用。当时 A. H. Higgins 和 G. A. Chapman 都在 Minerals Separation Ltd. 工作, 该工艺的专利授予了该公司。随后的 10 多年里, 该公司陷入了长时间的关于该专利的侵权诉讼案。1911 年, James M. Hyde 把该工艺引入了位于美国蒙大拿州 Basin 的 Reduction Company 选矿厂。Minerals Separation Ltd. 把案件诉讼到了美国最高法院, 法院支持了其专利但限制其“油的用量小于 1%”。该工艺所引起的法律纷争和诉讼直至该工艺被更先进的工艺取代才终止^[2]。

第一个成功地应用于工业上硫化矿物选别的浮选工艺是由 Frank Elmore 发明的^[3], 他和他的兄弟 Stanley 一直在对浮选工艺进行研发, 他们兄弟俩与他们的父亲 William 一起于 1896 年购买了 North Wales 的 Dolgellau 附近的位于 Llanelltyd 的 Glasdir 铜矿。1897 年, Elmore 兄弟俩在 Glasdir 铜矿建成了世界上第一个工业上进行矿物选别的浮选厂 (见图 1-1)。其浮选工艺不是泡沫浮选, 而是采用烃类油使粉化后的硫化物团聚 (成球状), 浮升到表面。该浮选工艺于 1898 年申请专利, 工艺过程的描述刊登于 1903 年的《E/MJ》。此时, 他们已经意识到气泡在辅助油类运送矿物颗粒过程中的重要性。Elmore 兄弟成立了一个公司——The Ore Concentration Syndicate Ltd., 在世界范围内推广该浮选工艺的工业应用。

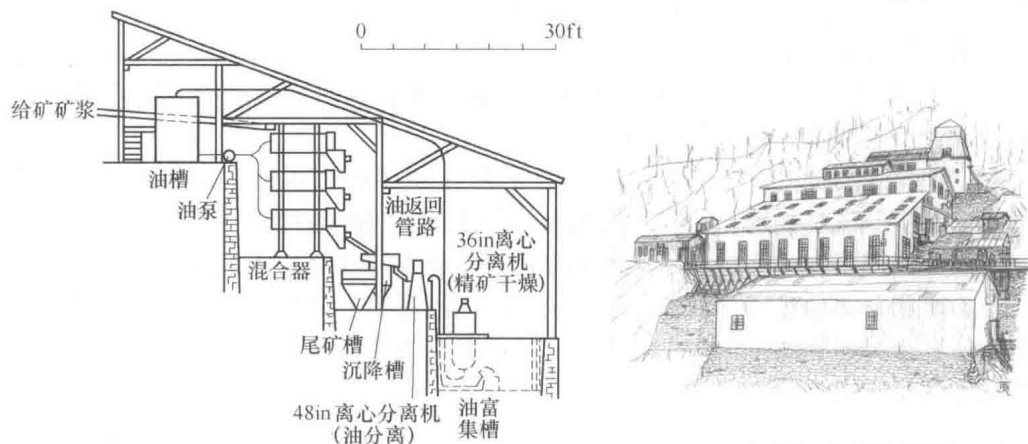


图 1-1 世界上第一个浮选厂 (50t 油浮选厂) 的配置示意图
(1ft=0.3048m, 1in=2.54cm)

大约从 1899 年开始, Charles Butters 与 Elmore 兄弟及 The Ore Concentration Syndicate Ltd. 的代表 E. H. Nutter 一起研发了当时称为 “Butters Process”^[4] 的浮

选工艺。该浮选工艺在 1900 年初由澳大利亚的 Charles Vincent Potter 独立发明。大约同时, 澳大利亚籍荷兰裔冶金学家和工程师 Guillaume Daniel Delprat^[5,6] 也研发出了一种浮选工艺, 该浮选工艺不使用烃类油, 而是通过在矿浆中添加一种酸所产生的气泡来进行浮选。1902 年, Froment 把油浮选和气浮选两种工艺结合在一起, 形成了 Potter-Delprat 浮选工艺。

另一种浮选工艺出现于 1902 年, 是由 Cattermole 研发的。他将矿浆中加入少量的烃类油, 强烈的搅拌后使其乳化, 然后缓慢搅动使有用矿物凝聚成球形通过重力从矿浆中分离出来。这也是 The Ore Concentration Syndicate Ltd. 工艺的基础。1904 年, 出现了 Macquisten 工艺, 该工艺是基于表面张力进行浮选, 但其缺点是有矿泥存在时不适用。1905 年, Sulman 和 Picard 在浮选中气泡的使用获得了美国专利 (专利号: 793808), 同年, Potter 工艺 (采用硫化矿物颗粒与 1% 的硫酸溶液热浴反应产生气泡使硫化矿物颗粒浮选) 在矿物工业的浮选中得到应用, 使泡沫浮选第一次工业上应用于澳大利亚的 Broken Hill 铅锌矿来生产锌精矿^[7]。

1912 年, Hyde 调整了 The Ore Concentration Syndicate Ltd. 的工艺, 并且安装在了美国蒙大拿州 Basin 的 Butte 和 Superior 选矿厂。

盐湖城 General Engineering 公司的 John M. Callow 根据技术文章的介绍及其在蒙大拿州的 Butte 和 Superior 选矿厂的应用情况, 和在亚利桑那的 Inspiration 铜矿应用的实际情况, 认定对当时的工艺来说机械搅拌是一个缺点。他在浮选工艺中采用了多孔材料, 通入压缩空气, 安装了机械搅动机构, 并于 1914 年申请了专利^[8]。这种称之为充气浮选 (pneumatic flotation) 的方法被认为是浮游选矿工艺的一次革命, Callow 也于 1926 年被美国矿冶石油工程师学会 (AIME) 授予 James Douglas 金牌, 以表彰他在浮选领域的突出贡献。

1930 年, Taggart 等人概括地提出了捕收剂的概念: 捕收剂是一类既有一个可以附着到矿物表面上的极性基, 又有一个导向表面之外的非极性基的选矿药剂。目前使用的大部分捕收剂是在那个时期研发出来的, 如黄原酸盐 (xanthate)、二黄原酸 (dixanthogen)、黄原甲酸盐 (xanthogen formate)、二硫代磷酸盐 (dithiophosphate)、二硫代氨基甲酸盐 (dithiocarbamate)、硫醇 (mercaptan)、巯基苯并噻唑 (mercaptobenzothiazole)、脂肪酸 (fatty acid)、烃基硫酸盐 (alkyl sulfate)、磺酸盐 (sulfonate) 和胺 (amine) 等。

在浮选工艺的发展过程中, 部分早期的标志性成果见表 1-1。

表 1-1 早期浮选技术的重要成果^[9,10]

年 份	贡 献 者	所取得的成就
1860	Haynes	全油浮选工艺
1877	Bessel	沸腾选别石墨的工艺

续表 1-1

年 份	贡 献 者	所取得的成就
1885	Bessel	利用化学反应产生气体选别石墨的工艺
1886	Everson	实现了矿浆酸化
1902	Froment, Potter, Delprat	气体成为硫化矿物浮起的介质
1905	Schwarz	硫化钠用于回收氧化的贱金属矿物
1906	Sulman, Pickard, Ballot	降低油的耗量, 通过强力搅拌引入气体
1913	Bradford	采用二氧化硫抑制闪锌矿
1913	Bradford	采用硫酸铜活化闪锌矿
1921	Perkins and Sayre	特效有机捕收剂
1921	—	碱回路
1922	Sheridan, Griswold	采用氰化物抑制闪锌矿和黄铁矿
1924	Sulman, Edser	采用肥皂浮选氧化矿
1925	Keller	采用黄药作为捕收剂
1929	Gaudin	pH 值控制
1929	Jeanprost	高溶盐类浮选
1933	Nessler	水溶性化学盐类混合物的浮选分离
1934	Chapman, Littleford	团聚
1934	—	烷基硫酸盐作为捕收剂
1935	—	阳离子捕收剂
1952	—	聚丙烯乙二醇作为水溶性起泡剂
1954	—	硫羰氨基甲酸酯作硫化矿物捕收剂
1965	—	异羟肟酸作为 Cu、Fe 氧化物捕收的螯合剂
1985	—	烷氧羰基加合物作为硫化矿和非硫化矿物的捕收剂和调整剂

不论从哪个方面来说, 1925 年黄原酸盐作为捕收剂在泡沫浮选中的使用是一个里程碑式的成果, 其确立了泡沫浮选在世界自然矿物资源利用中的角色。表 1-2~表 1-4 分别为美国矿物浮选工业在一段时期内发展的步幅、所处理矿石的类型及消耗的药剂剂量。

表 1-2 浮选工业发展的步幅^[11]

年 份	处理矿石量/Mt	生产的精矿/Mt	选矿比
1919	24. 08	2. 82	8. 6
1923	34. 29	1. 93	17. 7
1926	46. 16	3. 04	15. 3
1960	179. 86	19. 50	10. 8
1980	404. 34	71. 93	5. 6

表 1-3 处理矿石的类型

(Mt)

矿石类型	1926 年		1960 年		1980 年	
	原矿量	精矿量	原矿量	精矿量	原矿量	精矿量
铜矿石	39.89	2.17	133.38	4.82	211.61	4.67
铅锌矿石	5.57	0.84	7.43	0.49	11.39	0.84
金银矿石	0.48	0.03	0.12	0.003	0.10	0.005
铁矿石			1.39	0.54	37.88	21.48
磷酸盐矿石			19.03	6.37	108.70	26.63
碳酸钾矿石			10.87	2.83	12.93	2.99
煤			3.73	2.54	11.70	6.86
长石-云母石英砂			1.67	1.06	11.58	8.51
各种工业矿物	0.23	0.02	2.23	0.83	0.58	0.37

表 1-4 浮选消耗的药剂量

(t)

浮选药剂		1925 年	1926 年	1980 年
处理矿石量		41259000	41616000	440361000
起泡剂		2195	2935	12489
捕收剂	油类	8818	2665	115218
	化学药剂	1875	1896	108883
调整剂	酸类	18157	2061	35169
	碱类	1695	75701	413055
	其他	—	—	28735
活化剂		3210	4962	3925
抑制剂		754	1104	33389
絮凝剂		—	—	18069

在那个时期,由于缺少相应的测试手段,对浮选系统中表面化学现象的了解十分有限。当时的两个基本理论是 Taggart 等人所信奉的化学理论和 Gaudin 等人所信奉的基本吸附理论。

Taggart 等人认为,在浮选矿浆中,所有溶解的药剂或是作用于被浮选的矿粒,或是作用于不被浮选的矿粒;由于药剂和其影响的矿粒之间所发生的相应的化学反应影响了它们的可浮性。

试验也表明,硫化矿物在磨矿过程中会被氧化,产生一个由还原硫-氧化物、硫酸盐和碳酸盐组成的氧化产品表面覆盖层。在捕收剂溶液和氧化的硫化矿物接触之后,捕收剂离子和矿物表面离子发生了化学交换。在方铅矿的案例中,在和黄原酸盐接触后,交换的离子中 50%~75%是碳酸盐,其余的是硫-氧离子^[12]。