

青海省科学技术学术著作出版基金资助出版

难选铜镍硫化矿 清洁选矿工艺及应用

罗仙平 周贺鹏 程琍琍 著

北 京

冶金工业出版社

2018

前 言

铜镍硫化矿是一种具有极高开发价值的矿产资源，它除含有大量金属铜、镍矿物以外，还经常伴生金、银、铂、钯等稀贵金属，具有很好的回收利用价值，铜镍矿产资源在国民经济中占有极其重要的地位。然而，随着我国近40年来对铜镍硫化矿的开采，富矿及易开采矿石逐渐减少，大量的微细粒、低品位、表面矿、废矿等难选矿产资源正逐步得到重视，如四川丹巴铜镍铂矿，虽早已探明成为我国继金川之后的第二大铜镍铂矿区，但由于原矿品位低（铜品位0.18%~0.20%、镍品位0.38%~0.42%）、矿石化学成分及物质组成复杂、铜镍矿物嵌布粒度细，一直未得到大规模开发利用。因此，为适应我国经济持续增长的需要，充分利用铜镍资源，加强对微细粒低品位铜镍矿石经济高效开发利用的研究势在必行。

浮选电化学经过近60年的发展，已经初步形成了一套较完善的硫化矿浮选电化学理论，以此为基础形成的电位调控浮选技术在矿山应用上也取得了可喜的成绩。1996年以来，以王淀佐院士为首的学术梯队成功地将高碱原生电位调控浮选工艺应用于矿山生产，实现了铅锌硫化矿电位调控浮选的工业化，该工艺在全国十几座矿山得到推广，

取得了巨大的经济效益和社会效益，为硫化矿的高质量选矿提供了新的思路。

由于镍的化学性质，铜镍硫化矿中常见的硫化矿物是磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等。铜镍硫化矿几乎都是用浮选予以回收，但目前浮选工艺普遍存在以下问题：(1) 矿石易氧化，可浮性变化较大；(2) 多数情况下含镁脉石矿物含量较高，且可浮性好；(3) 黄铁矿、磁黄铁矿与镍黄铁矿共生，可浮性相近，当镍品位低时难以选出合格的镍精矿而多被废弃或没有得到综合回收。这些因素使得我国铜镍硫化矿矿产资源整体利用水平偏低。而要解决这一难题，使原来得不到开发的众多微细粒低品位铜镍硫化矿资源化，就需与之相适应的资源开发技术。为此，进行微细粒铜镍硫化矿浮选应用基础研究，从微观机制上探寻铜镍硫化矿浮选分离的本质，对提高我国铜镍硫化矿矿产资源的综合利用水平，缓解矿产需求与资源开发之间的矛盾，增强国内铜镍硫化矿矿石供矿能力，抵御国际市场价格冲击，促进矿产资源的可持续发展具有重要指导意义。

本书将电位调控浮选工艺应用于铜镍硫化矿的生产实践，首先根据硫化矿浮选电化学理论，从热力学分析和电化学分析测试具体研究了几种常见铜镍硫化矿在有或无捕收剂条件下的电化学行为。通过热力学计算，绘制了镍黄铁矿、黄铜矿及黄铁矿在有或无捕收剂体系中的 E_h -pH

图, 确定了表面氧化产物 S 为硫化矿物无捕收剂浮选的疏水物质, 随着 pH 值升高、电位 E_h 增加, 其表面氧化产物由疏水产物 S 向亲水 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、金属氢氧化物等转换, 可浮性降低; 阐明了丁黄药和黄铜矿及镍黄铁矿表面作用的疏水产物是 X_2 ; 通过循环伏安测试发现, 捕收剂的加入, 大大增强了硫化矿物表面的氧化进程, 比较两种硫化矿, 黄铜矿具有更宽的浮选临界 pH 值, 在强碱条件下, 黄铜矿与捕收剂的作用受自身氧化的影响比镍黄铁矿小, 生成的双黄药能够很好地在矿物表面形成吸附, 而镍黄铁矿在强碱介质中, 表面先发生自身氧化反应, 氧化所形成的氧化产物阻滞捕收剂双黄药的形成, 降低了其表面疏水性; 利用控制电位暂态方法对电极的氧化进行了研究, 建立了几种硫化矿电极在有或无捕收剂体系下的氧化动力学模型, 在相同捕收剂浓度和 pH 值条件下, 捕收剂在硫化矿物表面氧化生成的疏水性双黄药分子层厚度不一样, 导致硫化矿物表面的亲疏水程度存在差异, 进而影响硫化矿的可浮性; 通过 Tafel 测试, 探索了药剂浓度变化及 pH 值对硫化矿电化学浮选的影响, 在相同 pH 值体系中, 黄铜矿的腐蚀电流密度 i_{corr} 更大, 说明黄铜矿更易发生腐蚀。同时本书还对黄铜矿、镍黄铁矿及黄铁矿的浮选行为进行了研究, 得出了不同矿浆电位 E_h 、矿浆 pH 值、捕收剂浓度 c 条件下的浮选行为曲线, 由此说明, 对于硫化矿物的浮选, E_h 、 pH 、 c 是三个基本参数, E_h 、 pH 、 c 参数的耦合,

是硫化矿物浮选的关键,并且硫化矿物的浮选有不同的 E_h 、pH、 c 区间。据此,进行了复杂难选铜镍硫化矿清洁选矿工艺设计,在小型试验的基础上成功地把新工艺应用于通化吉恩镍业有限公司、四川盐边县宏大铜镍有限责任公司等单位的矿山,结果表明,新工艺获得了成功,铜、镍精矿品位和回收率得到大幅提高,药剂成本明显降低。该工艺已为多座矿山带来了显著的经济效益和社会效益。当然,本书所介绍的一些阶段性的研究成果仍有待进一步的完善与提高。

本书是作者多年科研成果的汇总,研究内容先后得到了国家自然科学基金(51374116)、四川省重点技术创新项目计划(2009XM124)、江西省发明专利产业化技术示范(20143BBM26047)、青海省重点实验室发展专项(2014-Z-Y10)与青海省“高端创新人才千人计划”等项目的资助,本书的出版还得到青海省科学技术学术著作出版基金的资助,同时还得到了西部矿业集团有限公司、通化吉恩镍业有限公司、四川里伍铜业股份有限公司、四川盐边县宏大铜镍有限责任公司等的的大力支持。江西省矿业工程重点实验室、江西省矿冶环境污染控制重点实验室、青海省高原矿物加工工程与综合利用重点实验室、青海省有色矿产资源工程技术研究中心以及江西理工大学矿物加工学科相关老师与科技人员对本书的完成给予了很大的帮助,团队的几位研究生杨备、雷梅芬、李建伟、韩统坤、

马鹏飞、翁存建、王金庆等为本书中实验的开展作出了重要贡献。通化吉恩镍业有限公司、四川盐边县宏大铜镍有限责任公司等为现场工业实验研究和新工艺的产业化实施提供了大力帮助，这些单位的领导、工程技术人员和工人兄弟都付出了辛勤劳动！在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平和时间有限，书中不妥之处，恳请读者批评指正！

作 者

2018 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 铜镍硫化矿选矿技术的现状及发展	1
1.1.1 铜镍硫化矿选矿技术的现状及发展	1
1.1.2 研究意义	4
1.2 硫化矿物浮选电化学理论	5
1.2.1 硫化矿浮选的历史与发展	5
1.2.2 硫化矿物的无捕收剂浮选电化学理论	6
1.2.3 捕收剂与硫化矿作用的电化学机理	7
1.2.4 调整剂电化学浮选理论	10
1.2.5 磨矿体系的电化学行为	14
1.3 硫化矿物电化学测试方法	15
1.3.1 循环伏安法	16
1.3.2 Tafel 曲线	17
1.3.3 恒电势阶跃	19
1.3.4 交流阻抗法	20
2 试验试样及研究方法	23
2.1 试样来源及制备	23
2.2 试验试剂及主要设备	25
2.2.1 试验试剂	25
2.2.2 试验设备及仪器	26
2.3 研究方法	26

2.3.1	电化学测试	26
2.3.2	红外及紫外光谱测试	27
2.3.3	浮选试验	28
3	铜镍硫化矿物的表面氧化	29
3.1	铜镍硫化矿物表面氧化的热力学分析	29
3.1.1	热力学条件	29
3.1.2	镍黄铁矿在水系中表面氧化的 E_h -pH 关系	31
3.2	铜镍硫化矿物表面氧化的电化学研究	38
3.2.1	镍黄铁矿表面氧化的电化学研究	38
3.2.2	黄铜矿表面氧化的电化学研究	42
3.2.3	pH 值对镍黄铁矿表面腐蚀的影响	46
3.2.4	pH 值对黄铜矿表面腐蚀的影响	49
3.3	本章小结	50
4	铜镍硫化矿物-捕收剂相互作用的电化学机理	52
4.1	硫化矿物电极表面静电位对氧化产物的影响	52
4.2	黄药在硫化矿物电极表面作用的电化学研究	53
4.2.1	镍黄铁矿捕收剂条件下表面氧化电化学研究	54
4.2.2	丁黄药-水体系中镍黄铁矿的腐蚀	60
4.2.3	黄铜矿与捕收剂作用的电化学机理	63
4.2.4	丁黄药-水体系中黄铜矿的腐蚀	65
4.3	本章小结	66
5	硫化矿物电化学动力学研究	68
5.1	硫化矿物电极氧化的电位阶跃试验	68

5.2	丁基黄药在硫化矿电极表面作用的电极过程.....	71
5.3	本章小结.....	75
6	铜镍硫化矿物的浮选行为与机理.....	76
6.1	铜镍硫化矿自诱导浮选行为.....	76
6.1.1	矿浆 pH 值对铜镍硫化矿自诱导浮选的影响	76
6.1.2	矿浆电位对铜镍硫化矿自诱导浮选的影响.....	78
6.2	铜镍硫化矿捕收剂诱导浮选行为.....	83
6.2.1	矿浆 pH 值对铜镍硫化矿捕收剂诱导浮选的 影响.....	83
6.2.2	矿浆电位对铜镍硫化矿捕收剂诱导浮选的影响.....	84
6.3	铜镍硫化矿电位调控浮选.....	88
6.4	本章小结.....	89
7	捕收剂与铜镍硫化矿表面作用机理.....	91
7.1	捕收剂在铜镍硫化矿表面的吸附量的测定.....	91
7.1.1	丁基黄药在镍黄铁矿表面的吸附量.....	92
7.1.2	丁基黄药在黄铜矿表面的吸附量.....	97
7.2	丁基黄药对镍黄铁矿表面吸附的影响	101
7.3	丁基黄药对黄铜矿表面吸附的影响	105
7.4	本章小结	107
8	难选铜镍硫化矿清洁选矿工艺小型试验	109
8.1	矿石性质概述	110
8.1.1	试样多元素分析	110
8.1.2	试样的矿物组成	110

8.1.3	试样的矿物组成	111
8.1.4	试样的矿物含量	111
8.1.5	试样的构造与结构	112
8.1.6	矿物嵌布特征	113
8.1.7	矿石矿物的嵌布粒度	114
8.1.8	矿物单体解离度测定	115
8.1.9	矿石性质研究小结	116
8.2	选矿试验方案论证	116
8.2.1	铜镍选矿方案的确定	116
8.2.2	需要解决的关键技术问题	119
8.2.3	技术路线	121
8.3	铜镍优先浮选工艺方案试验	121
8.3.1	铜粗选捕收剂种类对铜浮选的影响	122
8.3.2	铜粗选捕收剂用量对铜浮选的影响	123
8.3.3	铜粗选石灰用量对铜浮选的影响	124
8.3.4	铜粗选磨矿细度对铜浮选的影响	126
8.3.5	铜精选 CMC 用量对铜选矿指标的影响	127
8.3.6	铜精选再磨细度对铜选矿指标的影响	129
8.3.7	铜精选次数对铜选矿指标的影响	131
8.3.8	镍粗选捕收剂种类对镍粗选的影响	132
8.3.9	镍粗选捕收剂用量对镍浮选的影响	135
8.3.10	镍粗选硫酸用量对镍浮选的影响	139
8.3.11	镍粗选硫酸铜用量对镍浮选的影响	140
8.3.12	镍精选 CMC 用量对镍选矿指标的影响	142
8.3.13	镍精选次数对镍选矿指标的影响	144
8.3.14	铜镍优先浮选工艺方案闭路流程试验	147

8.4 铜镍混合浮选工艺方案试验	148
8.4.1 粗选捕收剂种类对铜镍浮选的影响	148
8.4.2 粗选捕收剂用量对铜镍浮选的影响	151
8.4.3 粗选硫酸用量对铜镍浮选的影响	153
8.4.4 粗选硫酸铜用量对铜镍浮选的影响	155
8.4.5 磨矿细度对铜镍混合浮选的影响	156
8.4.6 CMC 用量对混合精矿精选指标的影响	157
8.4.7 混合精矿精选次数对铜镍选矿指标的影响	159
8.4.8 混合精矿再磨细度对铜镍分离指标的影响	160
8.4.9 铜捕收剂种类对铜镍分离指标的影响	163
8.4.10 LP-01 用量对铜镍分离指标的影响	165
8.4.11 石灰用量对铜镍分离指标的影响	167
8.4.12 铜精选次数对铜选矿指标的影响	169
8.4.13 铜镍混合浮选工艺方案闭路流程试验	171
8.5 铜镍等可浮浮选工艺方案试验	173
8.5.1 铜粗选捕收剂种类对铜浮选的影响	173
8.5.2 铜粗选捕收剂用量对铜浮选的影响	175
8.5.3 铜粗选磨矿细度对铜浮选的影响	176
8.5.4 铜精选 CMC 用量对铜选矿指标的影响	177
8.5.5 精矿再磨细度对铜镍分离指标的影响	179
8.5.6 Z-200 用量对铜镍分离指标的影响	181
8.5.7 石灰用量对铜镍分离指标的影响	182
8.5.8 铜精选次数对铜选矿指标的影响	184
8.5.9 镍粗选捕收剂种类对镍浮选的影响	187
8.5.10 镍粗选捕收剂用量对镍浮选的影响	188
8.5.11 镍粗选硫酸铜用量对镍浮选的影响	191

XII 目 录

8.5.12 镍精选 CMC 用量对镍选矿指标的影响	193
8.5.13 镍精选次数对镍选矿指标的影响	194
8.5.14 铜镍等可浮浮选工艺方案闭路流程试验	196
8.6 铜镍选矿试验方案结果分析	198
8.7 铜镍硫化矿选矿废水处理及废水回用试验	199
8.7.1 通化吉恩镍业现场选矿废水净化试验	200
8.7.2 实验室铜镍混合浮选工艺选矿废水净化及回用 试验	206
8.7.3 实验室混合浮选工艺选矿废水处理回用对 选矿指标的影响	213
8.7.4 选矿废水处理试验研究小结	215
9 难选铜镍硫化矿清洁选矿工艺的应用	216
9.1 难选铜镍硫化矿高效清洁选矿新工艺验证试验	216
9.2 难选铜镍硫化矿高效清洁选矿新工艺工业试验	218
9.2.1 原工艺技术条件与存在的问题	218
9.2.2 新工艺技术条件与特点	221
9.2.3 新工艺持续改进措施	224
9.2.4 新工艺工业试验结果	233
9.3 难选铜镍硫化矿高效清洁选矿新工艺工业应用	233
参考文献	236
索引	244

1 绪 论

1.1 铜镍硫化矿选矿技术的现状及发展

1.1.1 铜镍硫化矿选矿技术的现状及发展^[1~3]

我国的镍资源量占世界总储量的 3.20%，在世界各国中排第 9 位。与国外资源相比，我国镍矿资源具有两个显著特点：（1）矿石品位较富，平均镍品位大于 1.00% 的硫化镍富矿约占全国的 40%。（2）我国镍资源分布高度集中，西部地区的镍矿储量约占全国总量的 97.70%，特别是甘肃、四川，其镍储量约占全国总量的 84%。但随着我国近 40 年来对铜镍硫化矿的开采，富矿及易开采矿石逐渐减少，而现存大量的微细粒、低品位、表面矿、废矿等难选矿产资源亟待开发，如四川丹巴杨柳坪、正子岩窝、协作坪等铜镍铂矿区，已探明为我国继金川之后的第二大铜镍铂矿区，但由于原矿品位低（铜品位 0.18%~0.20%、镍品位 0.38%~0.42%）、矿石化学成分及物质组成复杂、铜镍矿物嵌布粒度细，一直未得到大规模开发利用。加强对此类资源的应用基础研究开发，无疑将大幅提高我国铜镍硫化矿矿产资源的资源保障能力。

根据铜镍硫化矿的矿石类型、矿物共生组合、嵌布特性、矿石品位和贵金属含量等因素的影响，铜镍硫化矿的选矿工艺也不尽相

同。浮选铜镍硫化矿石时,确定浮选流程的一个基本原则是宁可使铜进入镍精矿,而尽可能避免镍进入铜精矿,因为铜精矿中的镍在冶炼过程中损失大,而镍精矿中的铜可以得到较完全的回收。铜镍矿石浮选有混合浮选流程、混合-优选浮选流程、直接优先浮选或部分优先浮选流程、浮选-磁选联合流程、闪速浮选法、BFP 全混合浮选等几种基本流程。目前大部分选矿厂都在使用混合浮选流程,如 A. A. Sirkeci 等人采用混浮工艺回收迪夫利铁矿尾矿中铜、镍、钴资源,针对老尾矿获得含镍 0.721%、钴 0.376%、铜 0.403%,镍、钴、铜回收率分别为 57.70%、83.10%、59.00% 的混合硫化矿精矿;而其他一些浮选方法通过工艺和药剂制度控制也取得了较好的经济技术指标,如金川二矿区易选富矿,在原矿含镍 1.70%、铜 1.15% 时,采用 HA 和石灰做组合抑制剂,对铜镍混合精矿分离,获得含镍 13.55%、铜 1.29% 的镍精矿,含铜 25.09%、镍 1.30% 的铜精矿,镍、铜作业回收率分别达到 96.50% 和 88.20% 的优良指标。另外,除了常规浮选,国内外在其他浮选工艺上也做了大量的研究工作。磁浮选是将磁选和浮选同时在一个装置中完成的过程,在非磁性矿物浮选时,防止磁性矿物进入泡沫产品中。磁浮选的最大优点是将两个分选过程合并到一个过程中,可减少中间物料处理次数,简化工艺流程。T. 雅尔辛等人提出用“磁浮选法”来有效处理含磁黄铁矿的硫化镍矿石,该法通过外加磁场将泡沫产品中的磁黄铁矿留在浮选槽中,降低浮选精矿中磁黄铁矿含量,获得了良好指标。重介质(重悬浮液)选矿首先将致密矿石和浸染矿石分别以重产品和轻产品的形式产出,然后再单独浮选每种产品,这能够从铁镍铂型的铜-镍矿石中大幅度地提高回收所有的有价成分。通过将传统的“柔性”流体变为“刚性”流体后,使工作中的悬浮液密度保持在高水平,提高了作业中浸染矿

石的产率,且浮选后废弃尾矿中的铜和镍含量都有所降低,精矿中有价成分的回收率有所提高。

矿物资源的日趋枯竭促进了人们对低品位矿石的研究,传统的浮选工艺对于微细粒铜镍矿物分选效率不高、经济指标不理想,而化学浸出,如加压氨浸—氢还原、加压氨浸(预氧化焙烧—选择性还原—氨浸)、硫酸化焙烧—浸出、加压酸浸—置换—浮选等工艺又普遍存在流程复杂、经济效益不佳、环境污染严重等问题。虽然生物浸出低品位铜镍硫化矿的引入,可望有效缓解这个难题,但生物浸出存在浸出细菌培养驯化周期长、保存困难、成本高等问题,离工业化还有一定距离。

综合分析国内外铜镍硫化矿选矿技术发展现状可以看出,浮选仍是铜镍硫化矿选矿的主要技术,国内外铜镍硫化矿的浮选研究主要在浮选药剂方面,重点是新型抑制剂的研究,包括铜镍浮选分离抑制剂和含镁脉石矿物的抑制剂,但主要是针对高品位、粗粒嵌布铜镍硫化矿,对低品位、微细粒嵌布铜镍硫化矿的研究主要集中在化学浸出和生物浸出等方面,在浮选工艺、药剂等方面的研究结果不是很理想,尤其是微细粒铜镍硫化矿浮选过程中黄铜矿、镍黄铁矿以及滑石、蛇纹石、绿泥石等脉石矿物在浮选矿浆体系中氧化动力学参数的确定以及与其浮选速率常数之间的关系、动力学模型的建立等方面的研究比较少见。

对于铜镍硫化矿浮选分离电化学研究,由于镍黄铁矿电极制作困难,使得该方面的研究(无论是理论上还是实践上)受到限制。具体到微细粒铜镍硫化矿的浮选,对于浮选矿浆体系中各矿物表面和矿浆体系物质组成及其表面氧化研究,电化学动力学研究,细磨时滑石、蛇纹石、绿泥石等含镁脉石矿物对铜镍硫化矿浮选行为的影响研究还很不充分。

因此,针对我国微细粒铜镍硫化矿矿产资源的特点,必须大力加强铜镍硫化矿选矿基础理论研究和开发复杂难选铜镍硫化矿石的选矿新技术与新工艺。

1.1.2 研究意义

铜镍硫化矿是一种具有极高开发价值的矿产资源,它除含有大量金属铜、镍矿物以外,还经常伴生金、银、铂、钯等稀贵金属,具有较好的回收利用价值,铜镍矿产资源在国民经济中占有极其重要的地位。然而,随着我国近 40 年来对铜镍硫化矿的开采,富矿及易开采矿石逐渐减少,大量的微细粒、低品位、表面矿、废矿等难选矿产资源正逐步得到重视。因此,为适应我国经济持续增长的需要,充分利用铜镍资源,加强对微细粒低品位铜镍矿石经济高效开发利用的研究势在必行。由于镍的化学性质,铜镍硫化矿中常见的硫化矿物是磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等。铜镍硫化矿几乎都是用浮选予以回收,但目前浮选工艺普遍存在以下问题:(1) 矿石易氧化,可浮性变化较大;(2) 多数情况下含镁脉石矿物含量较高,且可浮性好;(3) 黄铁矿、磁黄铁矿与镍黄铁矿共生,可浮性相近,当镍品位低时难以选出合格的镍精矿而多废弃或没有得到综合回收。这些因素使得我国铜镍硫化矿矿产资源整体利用水平偏低,而要解决这一难题,使原来得不到开发的众多微细粒低品位铜镍硫化矿资源化,需要与之相适应的资源开发技术。为此,进行微细粒铜镍硫化矿浮选应用基础研究,从微观机制上探寻铜镍硫化浮选分离的本质,对提高我国铜镍硫化矿矿产资源的综合利用水平,缓解矿产需求与资源开发之间的矛盾,增强国内铜镍硫化矿矿石供矿能力,抵御国际市场价格冲击,促进矿产资源的可持续发展具有重要指导意义。

1.2 硫化矿物浮选电化学理论

硫化矿物浮选电化学理论, 其研究核心是矿物浮选过程中, 硫化矿物在矿浆体系不同的氧化还原氛围下, 包括硫化矿物自身、硫化矿-捕收剂、硫化矿-调整剂等相互间的一系列氧化还原电化学反应。因此, 从氧化还原电化学反应是否涉及捕收剂的角度出发, 可将硫化矿浮选电化学理论分为无捕收剂浮选电化学理论和捕收剂浮选电化学理论。

1.2.1 硫化矿浮选的历史与发展^[4~6]

1860 年, 英国人 William Haynes 将经过细磨的硫化矿物与适量的油混合, 利用硫化矿颗粒与油滴形成大的聚合体, 而脉石矿粒可用水流从中分离开来。这种利用硫化矿和脉石在与油接触时所产生的差别从而实现硫化矿和脉石分离的方法虽然不能认作是真正的浮选方法, 但可视为早期浮选方法应用于矿业生产的先驱。回顾硫化矿浮选超过 100 年的发展历程, 经历了三个发展阶段, 即:

(1) 1860~1925 年, 黄药出现前的表层浮选和全油浮选。该法因只适用未氧化、颗粒易浮的简单硫化矿, 处理量小, 药剂消耗量大, 随着黄药的问世很快被泡沫浮选取代。

(2) 泡沫浮选。1925 年黄药和 1926 年黑药的发明应用^[7], 标志着硫化矿捕收剂泡沫浮选的到来。

随着捕收剂泡沫浮选时代的到来, 众多研究者对浮选药剂, 特别是黄药类捕收剂与硫化矿作用机制, 进行了大量细致深入的研究, 先后出现了一系列硫化矿浮选的经典理论和假说^[5], 为硫化矿浮选新工艺开发和药剂寻找提供了方向。

(3) 硫化矿浮选电化学。自 20 世纪 50 年代以来, 人们开始