

硫化矿物的浮选电化学与浮选行为

覃文庆¹, 姚国成², 顾帼华¹, 邱冠周¹, 王淀佐¹

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;
2. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘要: 研究黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等矿物在有/无捕收剂两种情况下的浮选行为, 考察浮选与矿浆电位的关系。结果表明: 当 pH 值分别小于 4.0 时, 黄铜矿无捕收剂浮选的电位区间为 0~0.9 V; 当 pH 值为 4.0 或 11.0 时, 矿浆电位大于 0.85 V 以后, 黄铁矿的浮选回收率低于 20%; 当 pH 值为 11.0 时, 黄铜矿无捕收剂浮选的矿浆电位区间为 0.35~0.85 V。当 pH 值为 10.0、丁黄药浓度为 5×10^{-5} mol/L 时, 方铅矿浮选的矿浆电位为 0.45~0.55 V, 而黄铜矿在 0.45~0.80 V 的电位区间具有良好的浮选性能; 对闪锌矿而言, 当 pH 值为 9.0 时, 矿浆电位在 -0.40~0.80 V 区间都不具有良好的可浮性。在浮选体系中, 黄铜矿表面氧化会产生元素 S⁰, 当矿浆电位从 -0.2 V 增大至 0.6 V, 黄铜矿表面氧化产生的元素 S 的数量逐渐增大, 黄铜矿的无捕收剂浮选性能越来越好。从南京和青海 2 个铅锌矿山的应用情况来看, 采用电位调控浮选技术可以大幅度缩短铅矿石的浮选时间, 减少浮选机数量。例如在南京某铅锌矿, 由于采用电位调控浮选技术, 原来 2 个系列每天处理 900 t 矿石, 现在采用一个系列即可处理。

关键词: 方铅矿; 黄铜矿; 黄铁矿; 浮选; 电化学

中图分类号: TD923

文献标志码: A

Electrochemistry of sulfide minerals and its floatability

QIN Wen-qing¹, YAO Guo-cheng², GU Guo-hua¹, QIU Guan-zhou¹, WANG Dian-zuo¹

(1. School of Mineral Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The flotation behaviors of chalcopyrite, pyrite, and sphalerite in the present or absent of collector were studied. The relationship between the floatability and the pulp potential was simulated through flotation test and electrochemical calculation. When the pulp pH value is lower than 4.0, chalcopyrite can be floated in the potential range from 0 to 0.9 V (vs SHE). When the pulp pH value is 4.0 or 11.0, the recovery rate of pyrite is lower than 20% after the potential value is higher than 0.85 V. When the pulp pH value is 11.0, the chalcopyrite can be floated in the potential range from 0.35 V to 0.85 V. When the pulp pH value is 10.0, the galena can be floated when the pulp potential is from 0.45 V to 0.55 V, and the chalcopyrite exhibits strong collector-induced floatability in the pulp potential range from 0.45 V to 0.80 V. Although the potential is adjusted from -0.4 V to 0.8 V, the sphalerite can not be floated at pH 9.0. When the range of potential is from -0.2 V to 0.6 V, the chalcopyrite surface is changed from hydrophilicity to hydrophobicity. And in the range of higher potential near 0.6 V, the amount of elemental sulfur (S⁰) decreases as the potential becomes higher. The recovery of chalcopyrite is in good correspondence with the amount of elemental sulfur (S⁰) at given pH value. The potential controlled flotation technology has made the Nanjing Lead-Zinc Mine and Xitieshan Lead-Zinc Mine obtain more profits because of the improvement of flotation results and the simplification of flotation separation system, and only one flotation system was used to treat the whole feed of 900 t/d.

Key words: galena; chalcopyrite; pyrite; flotation; electrochemistry

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB630900); 自然科学基金资助项目(50774094)

收稿日期: 2011-05-10; 修订日期: 2011-07-20

通信作者: 覃文庆, 教授, 博士; 电话: 0731-88830884; E-mail: qinwenging@csu.edu.cn

关于浮选电化学，其研究的核心是矿浆氧化还原气氛对浮选过程的影响，可以认为研究发展经历了3个阶段^[1]。

1930年代以来，捕收剂泡沫浮选迅速推广，实践中人们发现硫化矿氧化后浮选困难，而有新鲜解离表面的硫化矿物则易浮。GANDIN等^[2]研究则认为，氧气是硫化矿物表面和捕收剂之间化学反应中的一种反应成分，矿物表面先氧化生成氧一硫产物，然后该产物与溶液中的黄药捕收剂离子交换，形成表面黄原酸金属盐。

自1950~1980以来，研究发现氧气是硫化矿浮选过程不可缺少的物质并参与了反应。1953年，SALAMY和NIXON^[3]用电化学测试方法，研究了硫化矿物电极表面浮选药剂的反应机理，解释了硫化矿物表面捕收剂产物的生成机理，指明了捕收剂、氧、硫化矿物三者的作用方式。这标志着硫化矿浮选电化学研究进入了新的阶段。

1980年至现在，开始分析硫化矿物体系中的电化学反应，研究矿浆电位对硫化矿可浮性影响原因。调节矿浆电位，实现电位 φ 、矿浆pH值和药剂浓度c的耦合^[4~10]，使硫化矿浮选过程的选择性和参数控制得到新的发展，电位调控浮选技术开始应用于实践，取得显著的应用价值。

硫化矿浮选电化学理论认为^[11~14]：硫化矿浮选体系中，阳极反应为捕收剂(黄药)与硫化矿物作用形成捕收剂金属盐或者捕收剂的二聚物(双黄药)，阴极反应则是矿浆中的氧接受阳极反应给出的电子而被还原，捕收剂-硫化矿物-氧三者通过电化学反应在硫化矿物表面形成疏水性产物导致其可浮^[15~16]。主要内容如下：

- 1) 捕收剂-硫化矿物的电化学反应。
- 2) 静电位对浮选过程电化学反应的影响。
- 3) 矿浆电位对浮选的影响。

WOODS等^[17~19]控制硫化矿物电极电位，测定了黄药类捕收剂在矿物表面的吸附量及其对矿物表面疏水性的影响，对黄铁矿-黄药体系的研究结果表明，只有黄铁矿电极的电位高于黄药氧化成双黄药的可逆电位时，黄铁矿表面才开始疏水。层状饱和电极浮选体系的研究结果也证实了这一点。JOHNSON等^[20]在澳大利亚的Mount Isa铅锌硫选矿厂现场测定资料更加直接证实了硫化矿浮选体系的矿浆电位与浮选回收率、速率有必然的联系。许多硫化矿物如黄铜矿、方铅矿、黄铁矿和磁黄铁矿等，具有较好的半导体性质，因此在合适的矿浆电位条件下，表现出良好的捕收剂

诱导浮选特性，而且可以通过调控浮选矿浆电位改变硫化矿物表面的疏水性质，改变其可浮性质。

1 实验

浮选试验在20mL挂槽式浮选机上进行，采用外加恒电位仪进行电位调控。单矿物浮选前用超声波清洗3min，然后进行浮选试验。浮选时间为5min。工作电极是从矿化结晶良好的块矿中切出合适的试样制作矿物电极，装入直径为7mm的有机玻璃圆柱体中，周边以环氧树脂密封，将电极暴露的部分抛光作为工作面。电极的连接线是用铜线焊接在矿物电极表面，电极工作面的表观面积为1cm²，辅助电极为石墨电极，参比电极为甘汞电极，测量电位统一为相对于氢标电极电位(SHE)。由粒度小于0.15mm的铁闪锌矿、石墨和石蜡组成碳糊电极(Carbon paste electrode, CPE)，工作面面积为1cm²。以0.10mol/L KNO₃溶液作为支持电解质，丁黄药为捕收剂，所用试剂皆为分析纯，水为一次蒸馏水。

电化学测量系统是美国Princeton公司的EG&G M273A恒电位/电流系统，分析软件为Model 270和Model 352。电化学测试是在三电极体系中进行的，辅助电极为石墨电极，参比电极为甘汞电极，电位值均相对于氢标电极；整个电化学测量体系处于无氧环境，采用氮气对溶液进行驱氧。

2 结果与讨论

2.1 矿浆电位对浮选的影响

1) 黄药存在时矿浆电位对浮选的影响

有些硫化矿物并不具备天然可浮性，但是在合适的矿浆电位条件下可表现出良好的自诱导可浮性，改变矿浆电位和矿浆pH值，可以调控这些矿物的自诱导可浮性，在一定的pH条件下，每种硫化矿物都具有自诱导浮选的电位区间。

图1所示为在不同的pH条件下矿浆电位对黄铜矿的无捕收浮选的影响，其矿浆电位通过添加Na₂S₂O₄和(NH₄)₄S₂O₈来调节。从图1可知，当pH=2.50时，黄铜矿在矿浆电位从-0.177V到1.0V区间都具有良好的无捕收剂浮选性能；当pH为4.0、6.0、9.0和10.2时，对应的黄铜矿无捕收剂浮选的电位区间分别如下：-0.10~0.82V、0.38~0.83V、0.39~0.8V和0.40~0.77V。从以上分析可知，随着矿浆pH值的升

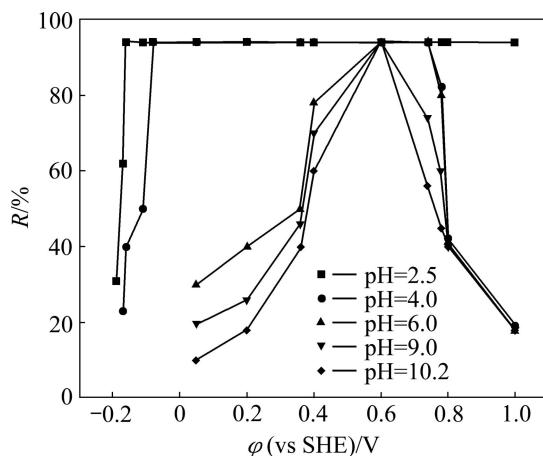


图 1 不同 pH 对矿浆电位对黄铜矿无捕收剂浮选的影响

Fig.1 Effect of pulp potential on flotation of chalcopyrite without flotation agent at different pH values

高, 黄铜矿无捕收剂浮选的电位区间变得越来越窄。

图 2 和 3 所示为 pH 分别为 4.0 和 11.0 时, 当矿浆电位大于 0.85 V 以后, 黄铁矿的浮选回收率低于 20%。当 pH 值升至 11.0 时, 黄铜矿无捕收剂浮选的矿浆电位区间为 0.35~0.85 V, 而此时黄铁矿则完全不可浮(见图 3)。

从图 2 和 3 的结果可以判定, 在碱性环境中, 黄铜矿和黄铁矿的无捕收剂可浮性差异较大, 在碱性条件下, 黄铜矿无捕收剂可浮性好, 而黄铁矿基本上不可浮, 基于这种差异, 这 2 种矿物在实际浮选中可能采用无捕收剂进行分离。

图 4 所示为湖北铜录山所产的含黄铜矿和黄铁矿的矿石采用无捕收剂浮选工艺进行铜硫分离的工艺流

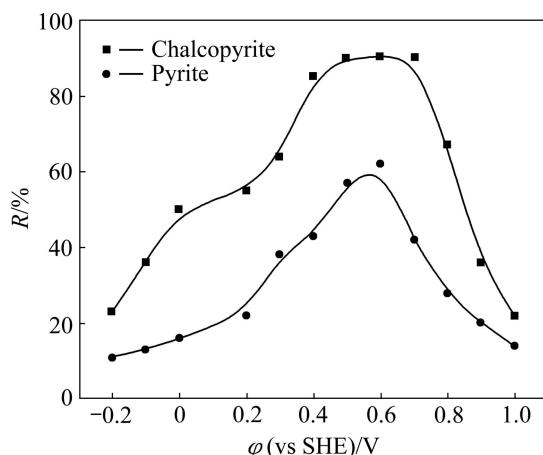


图 2 pH=4.0 时矿浆电位对黄铜矿和黄铁矿无捕收剂浮选的影响

Fig.2 Effect of pulp potential on flotation of chalcopyrite and pyrite without flotation agent at pH 4.0

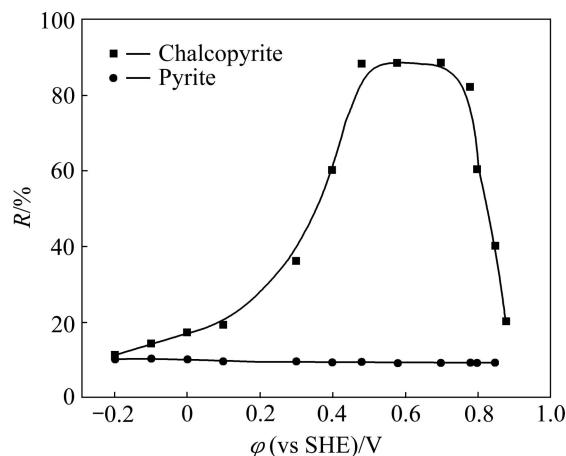


图 3 pH=11.0 时矿浆电位对黄铜矿和黄铁矿无捕收剂浮选的影响

Fig.3 Effect of pulp potential on flotation of chalcopyrite and pyrite without flotation agent at pH 11.0

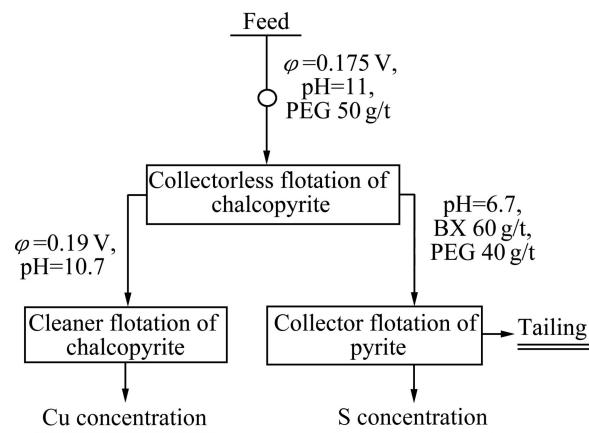


图 4 湖北铜录山矿铜-硫无捕收剂浮选流程

Fig.4 Flow sheet for separating chalcopyrite from pyrite by collector less flotation

程图。从图 4 可知, 黄铜矿和黄铁矿的浮选分离是在 pH 为 11.5、矿浆电位 φ 为 0.175 V 的条件下实现的, 且实验中仅添加了 50 g/t 的松醇油(PEG)作为起泡剂。铜粗精矿在 pH=10.7 和 $\varphi=0.19$ V 的条件下进行精选时可以获得含铜 24.65% 的铜精矿, 铜的回收率可达到 90.82%。

2) 有黄药存在时, 矿浆电位对浮选的影响

图 5 和 6 所示分别为有黄药存在时、pH=9.0 和 11.0 条件下矿浆电位对方铅矿、闪锌矿、黄铁矿浮选的影响。从图 5 和 6 可知, 丁黄药浓度为 5×10^{-5} mol/L 时, 方铅矿在 0~0.70 V 的电位区间具有较好的可浮性, 其中当矿浆电位为 0.40 V 时, 浮选回收率最高。而黄铁矿在 0~0.40 V 的矿浆电位区间可浮性较好; 对闪锌

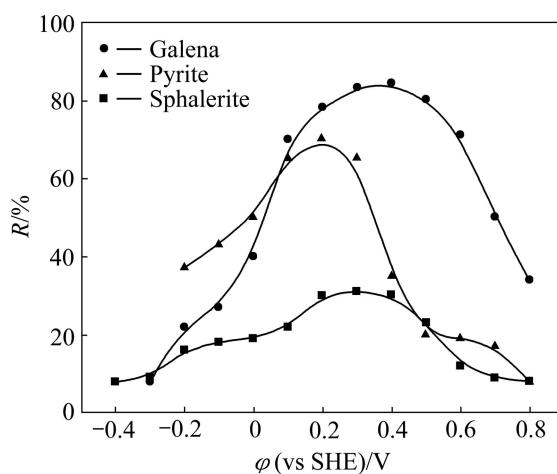


图5 黄药存在时矿浆电位对硫化矿物浮选的影响
(pH=9.0, [BX]=5×10⁻⁵ mol/L)
Fig.5 Effect of pulp potential on flotation of sulfide minerals in presence of xanthate

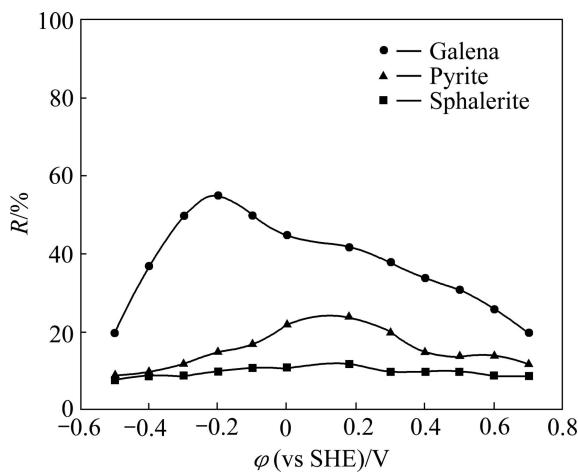


图6 有黄药存在时矿浆电位对硫化矿物浮选的影响
(pH=11.0, [BX]=5×10⁻⁵ mol/L)
Fig.6 Effect of pulp potential on flotation of sulfide minerals in presence of xanthate

矿而言，而当pH=9.0时、矿浆电位在-0.40~0.80 V区间，闪锌矿都不具有良好的可浮性。

图7所示为pH为10.0、丁黄药浓度为5×10⁻⁵ mol/L时，矿浆电位对黄铜矿和方铅矿浮选的影响。从图7可知，方铅矿浮选的矿浆电位为0.45~0.55 V，而黄铜矿在0.45~0.80 V的电位区间表现出良好的浮选特性。图8所示为pH=10.0时矿浆电位对方铅矿、闪锌矿浮选的影响。从图8可知，当矿浆电位处于0~0.70 V的区间，方铅矿可浮性较好，而此时闪锌矿的可浮性不好，二者存在浮选分离的可能性。

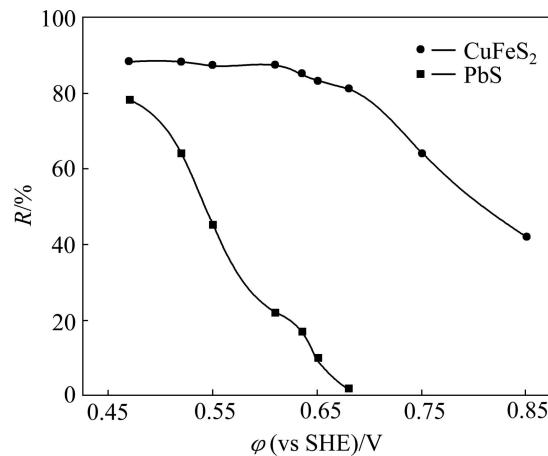


图7 矿浆电位对黄铜矿和方铅矿浮选的影响
(pH=10.0, [BX]=5×10⁻⁵ mol/L)
Fig.7 Effect of pulp potential on flotation of chalcopyrite and galena

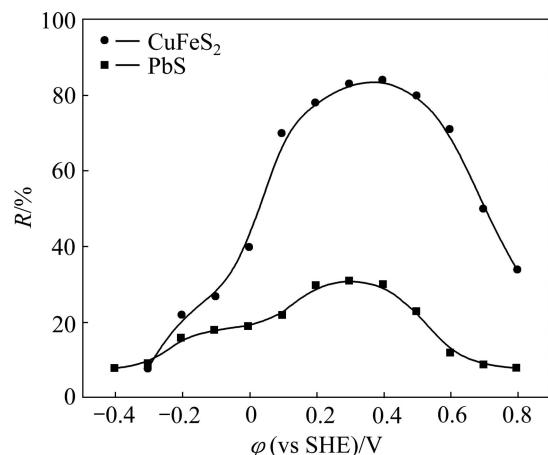


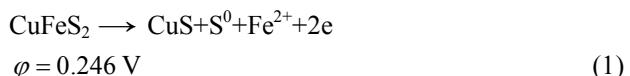
图8 矿浆电位对闪锌矿和方铅矿浮选的影响
(pH=10.0, [BX]=5×10⁻⁵ mol/L)
Fig.8 Effect of pulp potential on flotation of sphalerite and galena

2.2 浮选机理讨论

1) 无捕收剂浮选

许多研究表明^[17]，许多硫化矿物如黄铜矿、方铅矿和黄铁矿，是由于其表面发生氧化反应疏水性物质吸附而产生的。从黄铜矿和方铅矿表面氧化产物的分析可知，这些疏水性物质包括元素S和缺金属硫化物。以黄铜矿为例，其表面可能发生的反应如下：

① 酸性条件下：



② 弱碱性条件下：



$$\varphi = 0.62 \text{ V} \quad (2)$$

③ 碱性条件下:

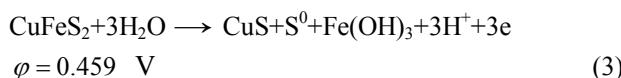


图9和10所示为黄铜矿在pH=4.0和11.0条件下的循环伏安电位扫描曲线。从图9和图10可知,都出现了阳极电流峰,对应的是黄铜矿表面发生了氧化反应,这些阳极反应可能是反应(1)、(2)或(3)。

黄铜矿表面氧化会产生元素S⁰,而元素S⁰数量的多少是和氧化还原气氛相关联的,图11所示为从黄铜矿表面提取的元素S⁰的数量与电位的关系曲线。从图11可知,当矿浆电位从-0.2 V增大至0.6 V时,黄铜矿表面氧化产生的元素S的数量逐渐增大,由于元素

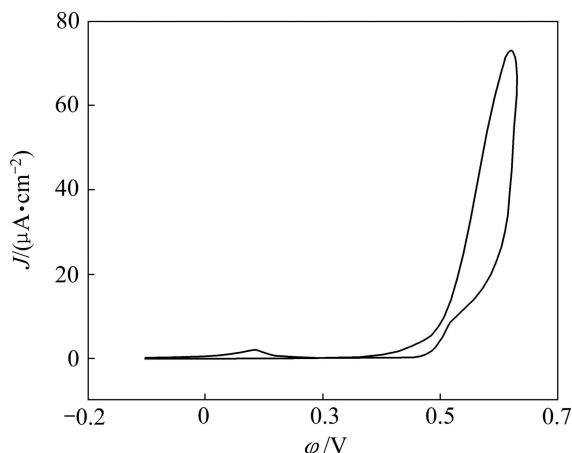


图9 pH=4.0时Na₂B₄O₇体系黄铜矿循环伏安电位扫描曲线

Fig.9 Voltammogram curve of chalcopyrite electrode in 0.1 mol/L Na₂B₄O₇ solution at pH 4.0

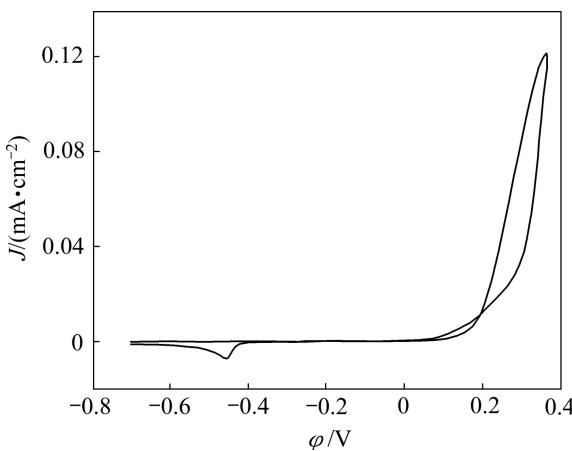


图10 pH=11.0时Na₂B₄O₇体系黄铜矿循环伏安电位扫描曲线

Fig.10 Voltammogram curve of chalcopyrite electrode in 0.1 mol/L Na₂B₄O₇ solution at pH 11.0

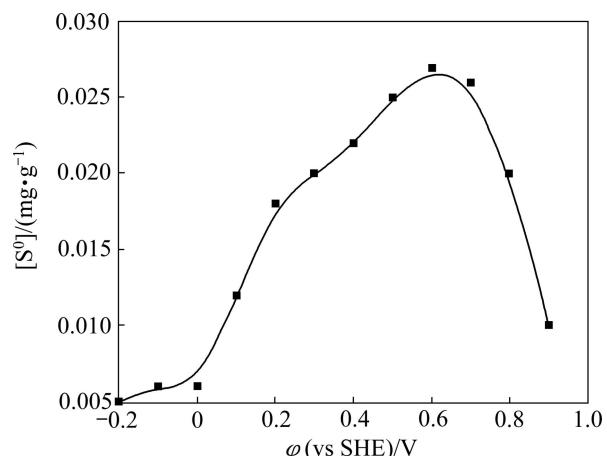


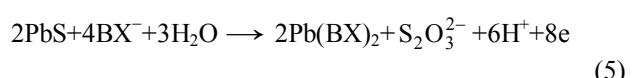
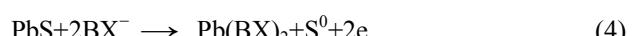
图11 pH为9.0时电位对黄铜矿表面元素产生量的影响

Fig.11 Effect of potential on amount of elemental sulfur (S⁰) extracted on chalcopyrite surface at pH 9.0

S⁰具有疏水性,吸附于黄铜矿表面的元素S的数量越多,黄铜矿的无捕收剂浮选性能越来越好,这与黄铜矿矿物的无捕收剂浮选行为是一致的,但是黄铜矿表面氧化产生的元素S是不稳定的。

2) 捕收剂诱导浮选

丁黄药存在时,方铅矿在很宽的电位范围都具良好的可浮性,丁黄药在方铅矿表面氧化形成了黄原酸铅(PbX₂),丁黄药在方铅矿表面可能发生以下反应:



而对于黄铁矿而言,一般认为^[4],黄药在其表面氧化形成双黄药并吸附于矿物表面,导致黄铁矿表面疏水而具有可浮性,其反应式如下:



丁黄药离子在黄铁矿表面氧化形成双黄药是分步进行的,第一步是黄药离子在矿物表面的电化学吸附,第二步是吸附的黄药离子失去电子氧化形成双黄药。

2.3 电位调控浮选实践

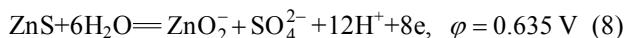
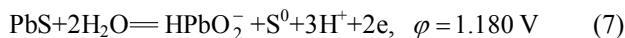
虽然硫化矿电位调控浮选理论已经进行了大量的研究,但是其实践应用进展并不明显,主要难点在于缺少合适的电位控制方法,目前主要采用化学药剂调节和外加电场调节两种方法。采用化学药剂调节电位时,由于矿物浮选是一个不断充气的过程,氧气的大量充入使得调控电位的化学药剂消耗大,同时化学药剂的加入对矿物浮选产生不利影响。这两个原因导致采用化学药剂调控电位在实践中难以实现。但是采用

外加电场调节矿浆电位时，则由于浮选处于高度分散的矿浆体系中，外加电场无法实现电位的调节。

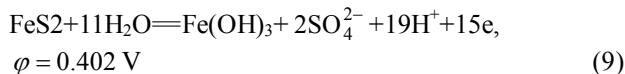
1) 磨矿过程的原生电位

由于磨矿过程产生了以系列的氧化还原反应形成了原生电位，原生电位调控浮选技术已在中国的一些铅锌矿山获得成功应用。

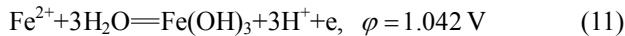
在铅锌硫化矿的磨矿过程中，矿石中的方铅矿、闪锌矿两种硫化矿物表面的氧化反应，会因为矿石中黄铁矿矿物的存在受到强化。



而在黄铁矿表面会发生以下反应：



磨矿时，含铁磨矿介质表面会发生以下反应



这些反应会在磨矿时发生，综合起来会形成一个原生电位(φ_{op})，如果调节和利用原生电位(φ_{op})可以实现某些矿物之间的浮选分离。

在磨矿过程中，钢球的氧化会消耗大量的氧气，从而使磨矿过程中矿浆电位保持在一个较低的水平，已有的研究表明^[11~12]，氧含量低是有利于方铅矿的浮选。表1所列为方铅矿在不同磨矿—浮选流程作业中，氧气含量、矿浆电位、浮选时间的关系。

在磨矿过程中加入捕收剂，利用磨矿过程的低电位(原生电位)可以使方铅矿表面疏水，而于闪锌矿、黄铁矿表面亲水，可以实现高效分离。表2所列为捕收剂加入磨矿和搅拌槽2种方法所对应的浮选结果。

表1 铅锌硫化矿物浮选过程溶氧量与矿浆电位的关系

Table 1 Relationship of oxygen dissolved and pulp potential in flotation of lead-zinc sulfide ore

Test site	Pulp waiting time/min	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	$\varphi(\text{vs SHE})/\text{V}$
Exit of mill	—	3	0.147
Overflow of mill	—	9	0.156
Stirrer	4	30	0.166
Lead rougher flotation	8	35	0.174
Lead scavenger flotation I	4	60	0.181
Lead scavenger flotation II	3	74	0.190
Lead scavenger flotation III	3	92	0.198

2) 电位调控浮选的实际应用

图12所示为南京某铅锌矿的电位调控浮选工艺流程，该矿选矿规模为900 t/d，原工艺采用2个系列(450 t/d)处理，原矿品位分别为pb 2%~4%，Zn 4%~8%，S 15%~25%，Ag 50~70 g/t。表3所列为采用电位调控浮选技术前后的生产指标比较结果。

原工艺中，方铅矿、闪锌矿和黄铁矿的浮选分离是在中性pH条件下进行的，浮选捕收剂为乙硫氮和丁胺黑药，抑制剂为ZnSO₄和Na₂SO₃。在电位调控浮选工艺中，方铅矿与闪锌矿、黄铁矿浮选分离的条件是pH=12.4~12.5， $\varphi_{OP}=0.14 \text{ V}$ ，以乙硫氮(DDTC)作为捕收剂，取消传统工艺中常用的ZnSO₄和Na₂SO₃。

从表3可知，电位调控浮选工艺的指标明显优于传统浮选工艺的，而且降低了浮选药剂的消耗。

另一个成功应用的矿山是西部矿业的锡铁山铅锌矿，其选矿日处理量为4 400 t/d，分别由4个系列处理(1 100 t/d)，原矿品位如下：pb 4%~5%，Zn 6%~7%，S 16%~24%，采用的电位调控浮选工艺流程如图13所示。该工艺在第四系列进行。表4所列为采用电位

表2 铅锌硫化矿物浮选分离结果

Table 2 Experiment results of flotation of lead-zinc sulfide ore

Scheme	Production	Grade/%		Recovery/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Collector adding into stirrer before lead rougher flotation	Lead concentrate	61.13	8.79	74.91	2.31
	Lead tail 1	0.42	7.61	25.09	97.69
	Feed	1.64	7.63	100.00	100.00
Collector adding into mill	Lead concentrate	64.23	5.49	76.07	1.40
	Lead tail 1	0.40	7.61	23.93	98.60
	Feed	1.64	7.57	100.00	100.00

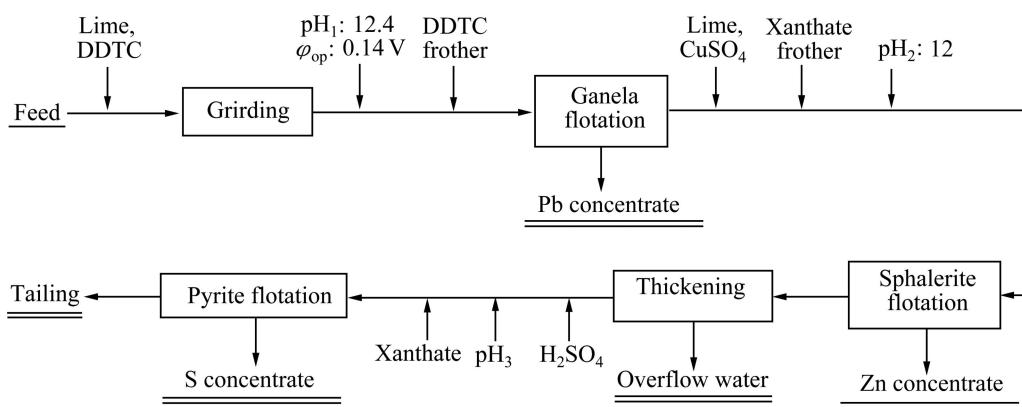


图 12 南京某铅锌矿的电位调控浮选工艺流程

Fig.12 Potential controlled flotation flowsheet for plant test at Nanjing lead-zinc mine

表 3 南京某铅锌矿的浮选工艺指标的对比结果

Table 3 Comparison of plant test results at Nanjing lead-zinc mine

Flowsheet	Production	Grade/%			Recovery/%			Condition for lead flotation
		Pb	Zn	S	Pb	Zn	S	
Original	Lead concentrate	52.10	5.59	20.81	85.88	4.27	5.61	pH=7.0
	Zinc concentrate	1.23	52.56	32.40	4.41	87.02	18.95	PDTC: 40 g/t
	S concentrate	0.61	1.38	37.42	6.91	7.20	68.80	Benzidine: 20 g/t
	Tailing	0.16	0.19	2.30	2.80	1.51	6.64	ZnSO ₄ : 1.1 kg/t
	Feed	2.93	6.33	17.93	100.00	100.00	100.00	Na ₂ SO ₃ : 0.7 kg/t
New	Lead concentrate	60.01	4.68	17.35	88.79	3.47	4.22	
	Zinc concentrate	1.03	53.01	30.55	3.58	91.93	17.42	pH=12.40
	S concentrate	0.55	0.60	46.52	5.16	2.80	71.9	φ _{op} =170 mV
	Tailing	0.24	0.35	3.80	2.47	1.80	6.46	Lime: 5 kg/t
	Feed	4.05	8.10	24.63	100.00	100.00	100.00	DDTC: 60 g/t

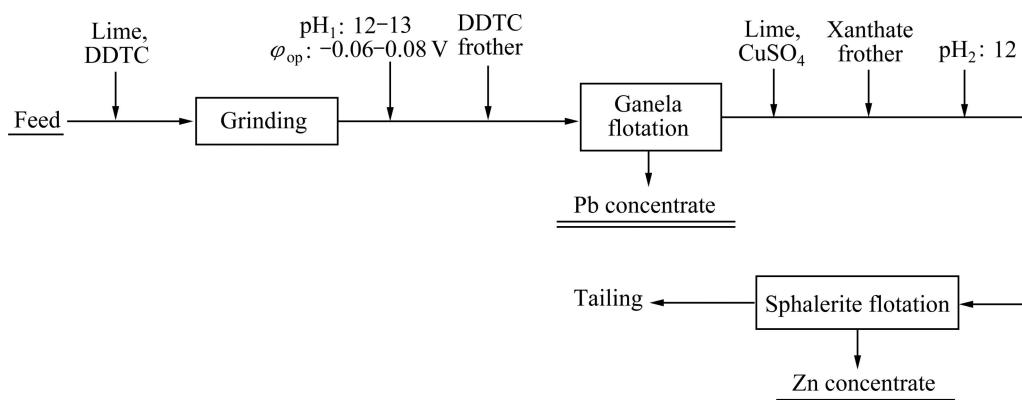


图 13 锡铁山铅锌矿的电位调控浮选工艺流程

Fig.13 Potential controlled flotation flowsheet for plant test at Xitieshan lead-zinc mine

表4 锡铁山铅锌矿的电位调控浮选工艺指标

Table 4 Operation results of potential controlled flotation at Xitieshan Lead-zinc Mine

System No. of flotation	Products	Grade/%		Recovery/%		Condition for Pb flotation
		Pb	Zn	Pb	Zn	
I, II, III	Lead concentrate	73.77	2.54	91.86	4.27	
	Zinc concentrate	0.81	49.63	4.41	86.44	pH: 7.0–8.0
	Tailing	0.18	0.51	3.73	9.29	Benzidine: 130 g/t
	Feed	4.36	5.71	100	100	
IV	Lead concentrate	79.19	2.10	93.69	3.47	pH: 12.0–13.0
	Zinc concentrate	0.52	49.85	3.58	91.93	φ_{op} : -0.08–0.06 V
	Tailing	0.21	0.53	2.73	4.60	Lime: 5–7 kg/t
	Feed	4.62	5.97	100	100	DDTC: 28–35 g/t

调控浮选工艺的第四系列与另外3个系列的生产指标比较,现采用电位调控浮选工艺,浮选指标大幅度提高。

从南京和青海2个铅锌矿山的应用情况来看,采用电位调控浮选技术可以大幅度缩短铅矿石的浮选时间,减少浮选机数量,例如在南京铅锌矿,由于采用电位调控浮选技术,原来2个系列月处理量为900 t,现在只需要一个系列即可处理。

4 结论

1) 矿浆电位是硫化矿物浮选过程一个重要的影响参数,调控矿浆电位,可以显著改变硫化矿物的浮选行为。

2) 每种硫化矿物都有合适的浮选电位区间,通过调节矿浆pH、矿浆电位和浮选药剂可以实现多种硫化矿物之间的浮选分离。

3) 由于多种复杂的氧化还原反应会形成磨矿过程的原生电位,对于某些矿物的浮选分离是合适的。利用硫化矿物磨矿-浮选过程自身的电位条件进行浮选分离,已应用到中国的多家铅锌矿山,获得的指标明显优于传统浮选工艺的指标。

REFERENCES

- [1] 王淀佐. 浮选理论的新进展[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
WANG Dian-zuo. New progress of flotation theory[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [2] GAUDIN A M, FINKELSTEIN N P. Interactions in the system galena-potassium ethyl-xanthate-oxygen[J]. Nature, 1956, 207:
- 389–391.
- [3] SALAMY S G, NIXON J G. The application of electrochemical methods to flotation research[C]//Recent development in Mineral Dressing. 1953: 503–516.
- [4] QIN Wen-qing, QIU Guan-zhou, XU Jing. Electrodeposition of dixanthogen on surface of pyrrhotite electrode[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000, 10(1): 61–64.
- [5] EDELBRO R, SANDSTR J M A, PAUL J. Full potential calculations on the electron band structures of sphalerite pyrite and chalcopyrite[J]. Applied Surface Science, 2003, 206(14): 300–313.
- [6] QIN Wen-qing, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua. Galvanic interaction of contacting sulfide particle and its effect on flotation[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 1998, 8(4): 456–459.
- [7] BUSWELL A M, NICOL M J. Some aspects of applied electrochemistry of the flotation of pyrrhotite[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2002, 32: 1321–1329.
- [8] 余润兰, 邱冠周, 胡岳华, 覃文庆. 脆硫锑铅矿与捕收剂作用的界面电化学[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 127–131.
YU Run-lan, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua, QIN Wen-qing. Interface electrochemistry of interaction of collector with jamesonite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 127–131.
- [9] SONG S, LOPEZ-VALDIVIESO A, OJEDA-ESCAMILLA M C. Electrophoretic mobility study of the adsorption of alkyl xanthate ions on galena and sphalerite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 237(1): 70–75.
- [10] BUSWELL A M, BRADSHAW D J, HARRIS P J, EKMEKCI Z. The use of electrochemical measurements in the flotation of a platinum group minerals (PGM) bearing ore[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(6): 395–404.
- [11] 顾帼华, 钟素姣. 方铅矿磨矿体系表面电化学性质及其对浮选的影响[J]. 中南大学学报, 2008, 39(1): 54–58.

- GU Guo-hua, ZHONG Su-jiao. Electrochemical properties on surface of galena in grinding system and its influence on flotation[J]. Journal of Central South University, 2008, 39(1): 54–58.
- [12] 胡岳华, 孙伟, 覃文庆. 方铅矿浮选的机械电化学行为[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 1060–1064.
- HU Yue-hua, SUN Wei, QIN Wen-qing. Mechanics-electrochemistry action in PbS flotation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 1060–1064.
- [13] FINKELSTEIN N P. The activation of sulphide minerals for flotation: A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1997, 52(2/3): 81–120.
- [14] BUSWELL A M, NICOL M J. Some aspects of applied electrochemistry of the flotation of pyrrhotite[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2002, 32: 1321–1329.
- [15] BRUCKARD W J, SPARROWA G J, WOODCOCK J T. A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100(1/2): 1–13.
- [16] ZHENG X, MANTONA P. A potential application of collectorless flotation in a copper/gold operation[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(11/13): 895–902.
- [17] WOODS R, RICHARDSON P E. The flotation of sulphide minerals electrochemical aspects[C]//SOMASUNDARAN P. Advance in Mineral Processing, SME, 1986: 154–170.
- [18] WOODS R. Electrochemical potential controlling flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1/4): 151–162.
- [19] WOODS R. Recent advances in electrochemistry of sulfide mineral flotation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000, 10(1): 26–29.
- [20] JOHNSON N W. Oxidation-reduction effects in galena flotation[J]. Trans IMMC, 1982, 91: 32–37.

(编辑 龙怀中)

覃文庆教授简介

覃文庆, 教授, 博士生导师, 2000年全国优秀博士论文获得者, 教育部跨世纪优秀人才, 2004年被评为享受政府特殊津贴专家, 第九届中国青年科技奖获得者, 新世纪百千万人才工程国家级人选。国家“973”项目“生物冶金过程多因素强关联”和国家“863”计划“生物冶金关键技术研究”重点项目的课题负责人, 近五年来获国家科技进步一等奖1项、国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步一等奖5项。目前, 负责国家自然科学基金项目2项、国家科技攻关项目2项, 其它省部级项目6项。出版专著一本, 在国内外公开出版刊物上发表论文68篇。