

干磨过程中抑制剂对铁闪锌矿表面性质的影响研究^①

傅开彬^{1,2,3}, 李贺², 刘泽铭^{1,2,3}, 孔云龙^{1,2,3}, 朱乐明^{1,2,3}

(1.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2.四川里伍铜业股份有限公司 西科大里伍铜业产业技术创新研究院, 四川 甘孜 626000; 3.西南科大四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299)

摘要: 采用干式磨矿方法研究了常用抑制剂氧化钙和多硫化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响, 并利用 XPS 探究了 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等活化离子对铁闪锌矿表面相原子组成、化学状态的影响。结果表明: 经氧化钙、多硫化钙抑制后, 铁闪锌矿表面 Zeta 电位发生不同程度的偏移; 与氧化钙作用后, 铁闪锌矿表面 Zeta 电位向正方向偏移, 零电点 $\text{pH}=6.43$; 与多硫化钙作用后, 铁闪锌矿表面 Zeta 电位向负方向偏移, 但偏移幅度较小; 氧化钙和多硫化钙对铁闪锌矿的抑制能力较弱; 经 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等离子活化后铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子的比例分别为 2.07、1.34 和 1.07, 均大于闪锌矿理论值(1.0), Cu^{2+} 与 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} 等的离子半径相近, 易发生强烈的离子置换, 铁闪锌矿表面呈现金属缺陷型矿物相, 与表面 S^{2-} 结合, Pb^{2+} 、 Ag^+ 与 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 的离子半径差距较大, 以吸附、沉淀等方式改变铁闪锌矿表面相组成, 对表面硫原子和金属原子比例影响较小, 铁闪锌矿表面出现多硫化物和硫酸盐等。

关键词: 干磨; 铁闪锌矿; 表面性质; Zeta 电位; 结合能; 氧化钙; 多硫化钙; 抑制剂; 活化剂

中图分类号: TD925

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.017

文章编号: 0253-6099(2025)03-0104-06

Effect of Depressant on Surface Properties of Marmatite During Dry Grinding

FU Kaibin^{1,2,3}, LI He², LIU Zeming^{1,2,3}, KONG Yunlong^{1,2,3}, ZHU Leming^{1,2,3}

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. SWUST-Liwu Copper Industry Innovation Institute, Sichuan Liwu Copper Industry Co., Ltd., Ganzi 626000, Sichuan, China; 3. Sichuan Tianfu Innovation Research Institute, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, Sichuan, China)

Abstract: The effects of common depressants, including calcium oxide and calcium polysulfide, on the surface zeta potential of marmatite were studied by using dry grinding, and the influence of active ions such as Cu^{2+} , Pb^{2+} and Ag^+ on the surface atomic composition and chemical state of marmatite was explored by using XPS. It is found that after depression by calcium oxide and calcium polysulfide, the marmatite has its surface zeta potential shifted to varying degrees. After the marmatite interacts with calcium oxide, its surface zeta potential shifts positively, with point of zero charge at pH of 6.43; after the marmatite interacts with calcium polysulfide, its surface zeta potential shifts negatively at low amplitude. Both calcium oxide and calcium polysulfide exhibit weak depression for marmatite. After activation by ions like Cu^{2+} , Pb^{2+} and Ag^+ , the marmatite has sulfur atoms and metallic atoms on the surface at a ratio of 2.07, 1.34 and 1.07, respectively, all higher than the theoretical value (1.0) of sphalerite. Due to Cu^{2+} with its ionic radius similar to Zn^{2+} and Fe^{2+} , facilitating strong ion substitution, marmatite presents a metal-deficient mineral phase on the surface, being bound to the surface S^{2-} ; while Pb^{2+} and Ag^+ have their ionic radius quite different from Zn^{2+} and Fe^{2+} , which can alter the surface phase composition of marmatite by adsorption and precipitation, but bring less impact to the ratio of sulfur and metallic atoms. As a result, polysulfides and sulfates exist on the surface of marmatite.

Key words: dry grinding; marmatite; surface property; zeta potential; binding energy; calcium oxide; calcium polysulfide; depressant; activator

① 收稿日期: 2024-12-15

基金项目: 四川省转移支付科技计划项目(210031); 甘孜州科技计划项目(220012)

作者简介: 傅开彬(1975—), 男, 四川威远人, 博士, 教授, 主要从事难处理矿石选矿和固废综合利用研究。E-mail: fukaibin@126.com

随着干旱缺水地区找矿取得新突破,干式选矿正被考虑作为传统湿式选矿替代方案。通过磨矿降低粒度和提高矿物单体解离度是选矿富集有用矿物的前提^[1]。磨矿方式和介质影响矿物颗粒表面性质和矿浆溶液化学特性,导致矿物浮选行为变化^[2]。干磨对浮选的正效应体现在三个方面:第一,干磨对硫化矿影响较大,它会使硫化矿表面相对粗糙、存在大量微小结构缺陷,有利于浮选药剂与矿物表面相互作用,提高浮选效率^[3];第二,与湿磨相比,干磨的钢球和衬板磨蚀率更低^[4];第三,磨矿条件相同时,干磨能产生更多细粒级,磨矿效率更高^[5]。磨矿介质类型、机械力大小影响矿物电极电位、表面反应电流以及矿物与矿物之间、矿物与介质之间的腐蚀电偶作用,改变硫化矿表面的氧化还原反应行为,进而改变矿物表面的疏水和亲水性^[6]。干磨使矿物表面相组成发生变化是影响其浮选行为的关键,值得深入研究。

本文以铁闪锌矿为研究对象,采用干式磨矿方法研究黄铁矿和磁黄铁矿常用抑制剂氧化钙和多硫化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响,利用 X 射线光电子能谱(XPS)探究 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等活化离子对铁闪锌矿表面相原子组成、化学状态的影响,深入探讨干磨与铁闪锌矿浮选效率的关系,可为干旱地区硫化矿开发利用提供理论依据和技术支撑。

1 试验

1.1 试验样品

试验样品为四川里伍铜业股份有限公司选矿厂的锌精矿。经多次精选提高样品纯度,再经乙醇洗涤、二次蒸馏水洗涤,获得试验用铁闪锌矿纯矿物,冷冻干燥后,以磨口瓶保存备用。该铁闪锌矿中锌、铁和硫品位分别为 58.85%、12.67% 和 26.38%,为高铁闪锌矿,纯度 87.71%。

1.2 试验方法

以氧化钙(CaO)或多硫化钙(CaS_x)为铁闪锌矿抑制剂。将铁闪锌矿纯矿物与用量 2 000 g/t 的抑制剂置于玛瑙研钵中研磨,研磨一定时间后,称取 0.1 g 混合样品至 100 mL 蒸馏水的烧杯中,超声均化处理 3 min,再采用英国马尔文公司纳米粒度和电位仪(Zetasizer Nano ZS90)研究与抑制剂作用前后铁闪锌矿表面 Zeta 电位变化规律,pH 值调整剂为盐酸和氢氧化钠。

以硫酸铜、硝酸银和硝酸铅为活化剂,活化经氧化钙或多硫化钙抑制的铁闪锌矿。活化剂用量均为

1 000 g/t,活化剂粉末与铁闪锌矿混合干磨 30 min,运用赛默飞世尔科技(中国)有限公司的 Axis Ultra DLD Kratos AXIS SUPRA 型多功能 X 射线光电子能谱仪(XPS)探究 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等活化离子对铁闪锌矿表面相原子组成、化学状态的影响,所有谱峰均以样品中 $\text{C}1s$ 峰 $E_b = 284.5 \text{ eV}$ 进行参考校正,以消除荷电效应的影响。

2 结果与讨论

2.1 干磨时间对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响

干磨使矿物表面温度升高,矿物表面离子反应活性提高,矿物易与空气中氧气相互作用,致使矿物表面元素氧化。延长干磨时间将影响铁闪锌矿表面锌、铁和硫的赋存形态,调控浮选药剂与铁闪锌矿的相互作用。考察了干磨时间对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响,结果如图 1 所示。

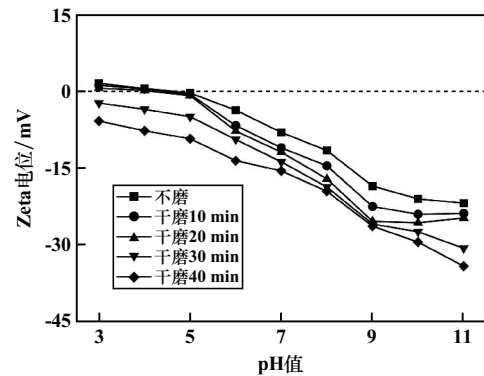
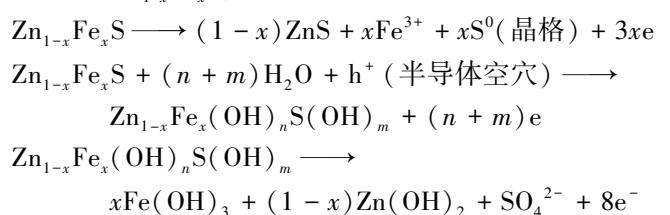


图 1 干磨时间对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响

Fig. 1 Effect of dry grinding time on surface zeta potential of marmatite

从图 1 可以看出,随着 pH 值逐渐升高,铁闪锌矿表面 Zeta 电位逐渐降低。铁闪锌矿与溶液界面物理化学反应决定了定位离子形态。不磨时,铁闪锌矿零电点 $\text{pH} = 4.9$; $\text{pH} < 4.9$ 时,在弱酸性环境中,铁闪锌矿溶解产生 Zn^{2+} 、 H^+ 和 Zn^{2+} 等阳离子为定位离子,表面荷正电; $\text{pH} > 4.9$ 时,在碱性环境中,以 OH^- 、 S^{2-} 、 HS^- 和 ZnO_2^{2-} 为定位离子,铁闪锌矿表面荷负电。干式磨矿影响铁闪锌矿表面 Zeta 电位,干磨后铁闪锌矿表面 Zeta 电位均向负偏移。在自然环境中,干磨将加速铁闪锌矿($\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$)表面氧化^[7]:



干磨使矿物比表面积增大,表面金属离子活性提高,产生的热量促进了矿物表面金属离子氧化,超声均化作用导致矿物表面金属氧化物溶解^[8],铁闪锌矿表面 Zeta 电位向负方向偏移,干磨时间 30 和 40 min 时,铁闪锌矿表面 Zeta 电位均为负数,无零电点。表明适度氧化有利于提高铁闪锌矿浮选效率,研磨能达到充分暴露矿物表面、降低粒度和适度氧化的目的,适宜的铁闪锌矿干磨时间为 30 min。

2.2 抑制剂对矿物表面 Zeta 电位的影响

2.2.1 氧化钙的影响

在铁闪锌矿和黄铁矿、磁黄铁矿等硫化矿共存体系中,常用氧化钙(CaO)抑制黄铁矿、磁黄铁矿等。干磨时间 30 min,氧化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响如图 2 所示。

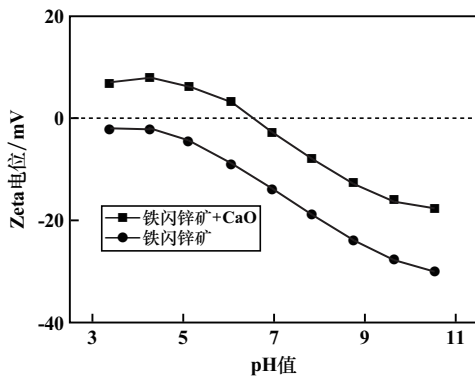


图 2 氧化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响

Fig.2 Effect of CaO on surface zeta potential of marmatite

从图 2 可以看出,干磨 30 min 后铁闪锌矿表面 Zeta 电位为负值,且随着 pH 值增加,Zeta 电位逐渐降低。与氧化钙作用后,铁闪锌矿表面 Zeta 电位向正方向发生偏移,铁闪锌矿的零电点 pH=6.43。干磨导致铁闪锌矿表面锌、铁和硫发生氧化反应,硫氧化为单质硫、亚硫酸盐、硫代硫酸盐和硫酸盐,这些反应产物容易溶解进入溶液,导致铁闪锌矿表面锌和铁离子正电荷增加,也表明少量氧化钙对铁闪锌矿的抑制能力弱,印证了表面轻微氧化有利于铁闪锌矿表面疏水组分的生成和捕收剂在其表面的吸附。

2.2.2 多硫化钙的影响

多硫化钙为石硫合剂晶体,其直链结构为 S_x^{2-} ,它能与阴离子捕收剂争夺矿物表面阳离子,在磁黄铁矿、黄铁矿等和铁闪锌矿浮选分离时,多硫化钙能有效抑制磁黄铁矿和黄铁矿^[9]。干磨时间 30 min,多硫化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响如图 3 所示。

从图 3 可以看出,与多硫化钙作用后,铁闪锌矿表

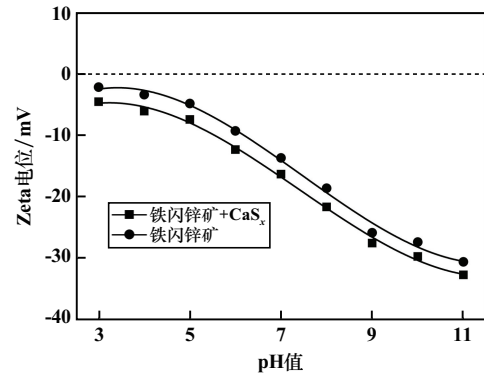
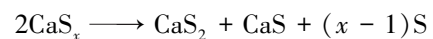
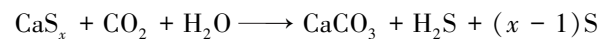
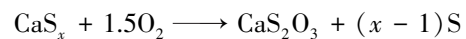


图 3 多硫化钙对铁闪锌矿表面 Zeta 电位的影响

Fig.3 Effect of calcium polysulfide on surface zeta potential of marmatite

面 Zeta 电位向负方向偏移。干磨时,空气中氧气、二氧化碳和水分子等与多硫化钙发生反应,生成的 $S_2O_3^{2-}$ 、 CO_3^{2-} 、 S_2^{2-} 、 S^{2-} 以及多硫化钙直链结构 S_x^{2-} 与铁闪锌矿表面活性阳离子键合,导致铁闪锌矿表面 Zeta 电位均向负方向偏移,但偏移幅度较小,说明多硫化钙对铁闪锌矿的抑制能力较弱。



2.3 XPS 分析

2.3.1 铁闪锌矿表面相 XPS 总谱

干磨条件下, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 活化后铁闪锌矿 XPS 总谱如图 4 所示。采用 XPS 分析软件 Thermo Avantage 中的 Chemicalstate assessment analysis regions for chemical-state information 模块拟合获得铁闪锌矿表面相锌、铁、硫和典型活化剂离子 (Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+) 的原子组成比例,见表 1。

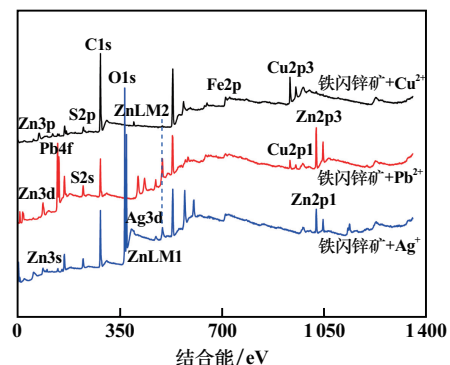


图 4 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 活化后铁闪锌矿 XPS 总谱

Fig.4 XPS spectra of marmatite after activation by Cu^{2+} 、 Pb^{2+} and Ag^+

从图 4 可以看出,干磨条件下,经 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和

Ag⁺活化后的铁闪锌矿表面出现了 Cu2p、Pb4f 和 Ag3d 吸收峰,表明 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 等与铁闪锌矿表面锌、铁和硫等发生了离子交换、吸附、络合等作用^[10],导致铁闪锌矿表面相发生重构,改变了铁闪锌矿表面相亲水性和疏水性。

表 1 铁闪锌矿表面原子组成

Table 1 Atomic composition on surface of marmatite

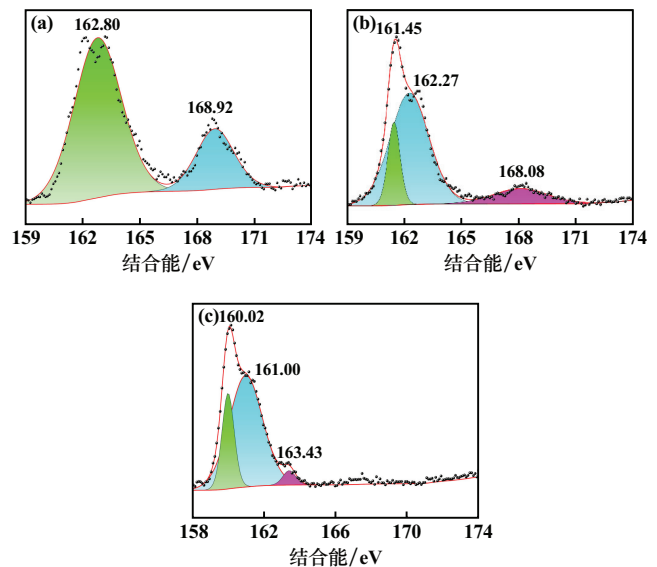
样品名称	原子分数/%						备注
	Zn2p	Fe2p	S2p	Cu2p	Pb4f	Ag3d	
闪锌矿 (ZnS)	50	0	50	0	0	0	理论值
铁闪锌矿+Cu ²⁺	2.65	1.92	67.47	27.96	0	0	实测值
铁闪锌矿+Pb ²⁺	19.64	9.95	57.34	0	13.07	0	实测值
铁闪锌矿+Ag ⁺	11.49	4.04	40.45	0	0	22.27	实测值

闪锌矿表面相硫原子和锌原子的理论比值为 1:1,但从表 1 可以看出,与活化剂离子作用后,铁闪锌矿晶体表面相中锌、铁和硫等原子组成与闪锌矿的理论值相比差异较大,经 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 等活化后铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子的比例分别为 2.07、1.34 和 1.07。与 Cu²⁺ 相互作用后,铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子之比大于 1.0,表面相金属离子缺失,金属原子含量降低,铜离子与锌离子或铁离子半径相近,干磨致热、氧气和水分子耦合,使铁闪锌矿表面相锌、铁和硫等离子氧化,生成氧化物或硫酸盐,经过空气中干磨和溶液中超声处理后,易脱离铁闪锌矿表面,非金属硫离子氧化生成单质硫、硫代硫酸盐、亚硫酸盐或硫酸盐,与铁闪锌矿表层或亚层离子相互作用力较强,不易脱离矿物表面。铅离子半径远大于铁离子和锌离子半径,干磨条件下不易置换矿物表面铁离子和锌离子,对铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子组成影响较小,表面相硫原子和金属原子的比例接近闪锌矿理论值。与 Ag⁺ 作用后,铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子之比略大于 1.0,铁闪锌矿表面硫元素出现富集现象,金属原子流失,含量降低,形成金属缺陷型硫化物^[11]。

2.3.2 铁闪锌矿表面相 S2p 谱图

干磨条件下,Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 活化后铁闪锌矿表面相 S2p 谱图如图 5 所示。经过 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 活化后,铁闪锌矿表面相的 S2p 谱线差异较大,硫吸收峰位和峰数量均不同。与活化前铁闪锌矿相比,Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 等离子与硫元素结合,导致 Cu-S、Pb-S 和 Ag-S 等改变了铁闪锌矿晶体表面相的键长、能级、电子云分布等。Cu²⁺ 活化后铁闪锌矿表面相 S2p 谱线中 162.80 eV 处的峰与 S²⁻ 相关,如 Zn-S、Fe-S 和 Cu-S (Cu₂S) 等,铜离子以

晶格置换方式进入铁闪锌矿表面相,168.92 eV 处的峰与铁闪锌矿表面硫深度氧化相关。Pb²⁺ 和 Ag⁺ 活化后铁闪锌矿表面 S2p 谱线中硫吸收峰数量相同,Pb²⁺ 活化后的铁闪锌矿表面相 S2p 谱线中硫吸收峰出现在结合能 168.08、162.27 和 161.45 eV 处,Ag⁺ 活化后的铁闪锌矿表面相 S2p 谱线中硫吸收峰出现在结合能 163.43、161.00 和 160.02 eV 处。结合能 162.27、161.45、161.00 和 160.02 eV 处的峰与 S²⁻ 相关,163.43 eV 处的峰与多硫化物(S_n²⁻, n≥2)关系密切^[12],168.08 eV 处的峰与硫酸盐形成相关。



(a) Cu²⁺ 活化; (b) Pb²⁺ 活化; (c) Ag⁺ 活化

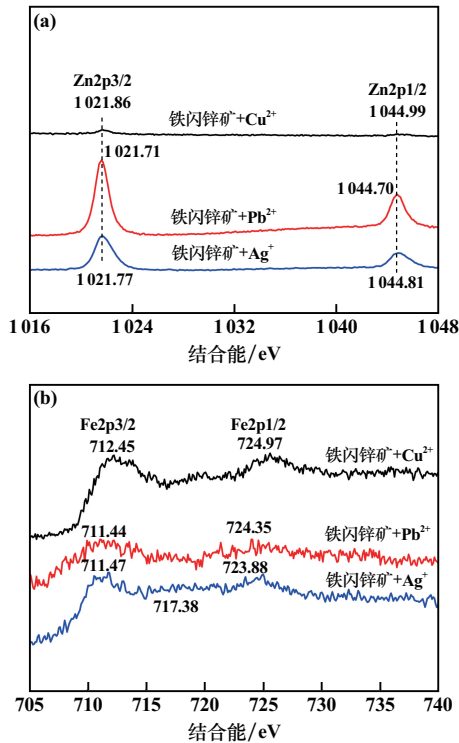
图 5 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 活化后铁闪锌矿表面相 S2p 谱图

Fig. 5 S2p spectra of surface of marmatite after activation by Cu²⁺、Pb²⁺ and Ag⁺

2.3.3 铁闪锌矿表面相 Zn2p、Fe2p 谱图

干磨条件下,活化后铁闪锌矿表面相 Zn2p、Fe2p 谱图如图 6 所示。活化后铁闪锌矿表面相中锌和铁的结合能发生改变,表面锌和铁原子比例关系差异较大,与 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 等离子与铁闪锌矿发生表/界面差异化相互作用相关。经过 Cu²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺ 等离子活化后,铁闪锌矿表面相 Zn2p_{3/2} 吸收峰出现在 1 021.86、1 021.71 和 1 021.77 eV 处,与 Zn(II) (ZnS) 关系密切,Zn2p_{1/2} 吸收峰出现在 1 044.99、1 044.70 和 1 044.81 eV 处,与 Zn(II) 离子存在相关,表明 3 种活化剂离子对铁闪锌矿表面锌离子影响较小,相互作用较弱;铁闪锌矿表面相 Fe2p_{3/2} 吸收峰出现在 712.45、711.44 和 711.47 eV 处,与 Fe(II)-S 关系密切,Fe2p_{1/2} 吸收峰出现在 724.97、724.35 和 723.88 eV 处,与 Fe(III) 离子存在相

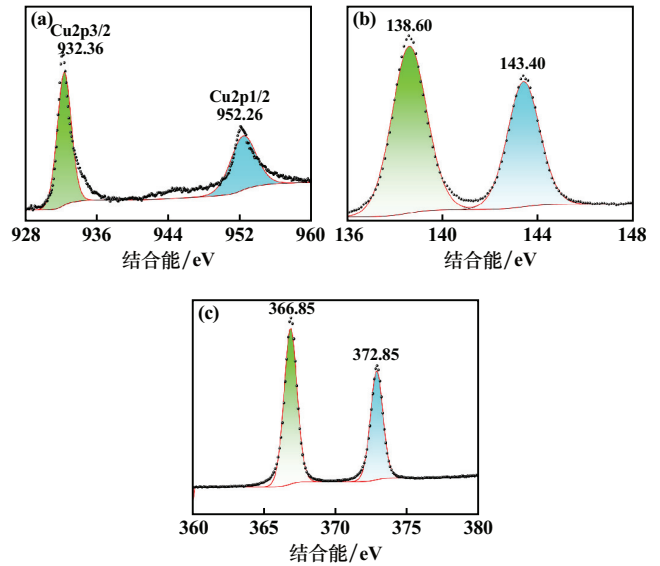
关,表明铁闪锌矿表面铁离子氧化。干磨条件下,经过 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等离子活化后,铁闪锌矿表面相 Zn2p、Fe2p 谱线吸收峰结合能接近,干磨过程中在铁闪锌矿表面发生化学反应所得生成物经超声处理后易脱离铁闪锌矿表面而进入溶液。



(a) Zn2p 谱图; (b) Fe2p 谱图
图6 活化后铁闪锌矿表面相 Zn2p 和 Fe2p 谱图
Fig.6 Zn2p and Fe2p spectra of activated marmatite surface

2.3.4 铁闪锌矿表面相 Cu2p、Pb4f 和 Ag3d 谱图

活化后铁闪锌矿表面相 Cu2p、Pb4f 和 Ag3d 谱图如图7所示。干磨条件下,活化后铁闪锌矿表面均出现了 Cu2p、Pb4f 和 Ag3d 吸收峰,表明 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 与铁闪锌矿表面阴离子结合,或与锌和铁发生离子交换等作用,改变了铁闪锌矿表面相原子组成。经 Cu^{2+} 活化后铁闪锌矿表面相 Cu2p 出现在结合能 952.26 和 932.36 eV 处,932.36 eV 处吸收峰与 $\text{Cu}(\text{II})\text{-S}$ 相关,952.26 eV 处吸收峰为 $\text{Cu}(\text{II})$ 的强卫星峰^[13]。经 Pb^{2+} 活化后铁闪锌矿表面相 Pb4f 峰出现在结合能 143.40 和 138.60 eV 处,与铁闪锌矿表面相 PbCO_3 和 PbSO_4 关系密切, Pb^{2+} 可能与空气中的 CO_2 发生反应,表面形成少量 PbCO_3 。经 Ag^+ 活化后铁闪锌矿表面相 Ag3d 峰出现在结合能 372.85 和 366.85 eV 处,与铁闪锌矿表面 Ag_2SO_4 、 Ag_2CO_3 和 Ag_2S 关系密切^[14]。



(a) Cu2p 谱图; (b) Pb4f 谱图; (c) Ag3d 谱图

图7 活化后铁闪锌矿表面相 Cu2p、Pb4f 和 Ag3d 谱图
Fig.7 Cu2p, Pb4f and Ag3d spectra of activated marmatite surface

3 结论

1) 干磨使铁闪锌矿表面形成了热、氧气、二氧化碳和水分子协同作用的微观环境,延长研磨时间能强化铁闪锌矿表面锌、铁和硫等离子氧化反应,铁闪锌矿表面 Zeta 电位向负方向偏移,干式磨矿 30 和 40 min 时,铁闪锌矿表面 Zeta 电位均为负数,无零电点。适宜的铁闪锌矿干磨时间为 30 min,适度氧化有利于提高铁闪锌矿浮选效率。

2) 经氧化钙、多硫化钙抑制后,铁闪锌矿表面 Zeta 电位发生不同程度的偏移。与氧化钙作用后,铁闪锌矿表面 Zeta 电位向正方向偏移,零电点 $\text{pH}=6.43$;与多硫化钙作用后,铁闪锌矿表面 Zeta 电位向负方向偏移,但偏移幅度较小。氧化钙和多硫化钙对铁闪锌矿的抑制能力较弱。

3) 经 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^+ 等离子活化后铁闪锌矿表面相硫原子和金属原子的比例分别为 2.07、1.34 和 1.07,与 3 种活化离子的半径关系密切。铜离子与锌离子和铁离子等半径相近,易发生强烈的离子置换,铁闪锌矿表面呈现金属缺陷型矿物相,与表面 S^{2-} 结合,改变铁闪锌矿表面硫的结合能; Pb^{2+} 、 Ag^+ 与 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 的离子半径差异较大,以吸附、沉淀等方式改变铁闪锌矿表面相组成,故对表面相硫原子和金属原子比例影响较小,其离子价态无变化,铁闪锌矿表面出现多硫化物和硫酸盐等。

参考文献(References):

- [1] JANKOVIC A, SUTHERS S, WILLS T, et al. Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air classifier[J]. Minerals Engineering, 2015, 71:133-138.
- [2] CHELGANI S C, PARIAN M, PARAPARI P S, et al. A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5):5004-5011.
- [3] 朱泊翰,张鹏羽,欧乐明,等. 高压辊磨对低品位金矿浮选的影响研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(3):80-83.
ZHU Bohan, ZHANG Pengyu, OU Leming, et al. Influence of high-pressure roller grinding on flotation performance of low-grade gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(3):80-83.
- [4] ALTUN D, GEROLD C, BENZER H, et al. Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 136:32-36.
- [5] OGONOWSKI S, WOLOSIEWŁCZ-GLĄB M, OGONOWSKI Z, et al. Comparison of wet and dry grinding in electromagnetic mill[J]. Minerals, 2018, 8(4):138.
- [6] PELTONIEMI M, KALLIO R, TANHUA A, et al. Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding[J]. Minerals Engineering, 2020, 156:106500.
- [7] WANG C T, LIU R Q, ZHAI Q L, et al. Exploring the effect of pulp aeration and lime-aid grinding on pyrrhotite-rich type copper sulfide ore flotation separation[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 311:123268.
- [8] LIU J, HAN L, CORIN K C, et al. A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores[J]. Minerals Engineering, 2018, 122:339-345.
- [9] MU Y F, PENG Y J. The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water[J]. Minerals Engineering, 2019, 142:105921.
- [10] BU X Z, CHEN F F, CHEN W, et al. The effect of whey protein on the surface property of the copper-activated marmatite in xanthate flotation system[J]. Applied Surface Science, 2019, 479(15):303-310.
- [11] MENG X Y, ZHAO H B, SUN M L, et al. The role of cupric ions in the oxidative dissolution process of marmatite: A dependence on Cu^{2+} concentration[J]. Science of the Total Environment, 2019, 675:213-223.
- [12] 傅开彬,董发勤,陈道前,等. 四川某低品位尾矿中铜、锌硫化物生物浸出研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1):81-84.
FU Kaibin, DONG Faqin, CHEN Daoqian, et al. Bioleaching of copper and zinc sulphides in a low-grade tailings from Sichuan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(1):81-84.
- [13] QIU H X, WU B Z, CHEN J H, et al. Selective depression of marmatite by sodium alginate in flotation separation of galena and marmatite[J]. Minerals Engineering, 2023, 201:108229.
- [14] LYU X, ZHAO H B, LIU Z L, et al. Comparative study on biotic system and abiotic system of marmatite at high cupric ions concentration[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6):14887-14894.
- 引用本文:傅开彬,李贺,刘泽铭,等. 干磨过程中抑制剂对铁闪锌矿表面性质的影响研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3):104-109.
FU Kaibin, LI He, LIU Zeming, et al. Effect of depressant on surface properties of marmatite during dry grinding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):104-109.
- (上接第 103 页)
- [9] 郭颖,刘文宝,刘文刚,等. 月桂酰胺丙基甜菜碱对赤铁矿反浮选性能及机理研究[J]. 金属矿山, 2023(8):74-79.
GUO Ying, LIU Wenbao, LIU Wengang, et al. Study on reverse flotation performance and mechanism of lauramidopropyl betaine for hematite[J]. Metal Mine, 2023(8):74-79.
- [10] 张弘,高鹏鑫,高卿楠. 热红外反射光谱技术在石英含量评价中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5):710-719.
ZHANG Hong, GAO Pengxin, GAO Qingnan. Application of thermal infrared reflectance spectroscopy in the evaluation of quartz content[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(5):710-719.
- [11] 王纪镇,程雅芝,肖雨辰,等. 油酸钠/TX-100 组合药剂对白钨矿的捕收性能及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(1):100-104.
WANG Jizhen, CHENG Yazhi, XIAO Yuchen, et al. Collecting performance of mixed NaOL/TX-100 for scheelite flotation and its mechanism[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(1):100-104.
- 引用本文:郑业超,赵通林,依爽,等. 新型耐低温捕收剂对齐大山铁矿石的反浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3):99-103.
ZHENG Yechao, ZHAO Tonglin, YI Shuang, et al. Experimental study on reverse flotation of Qidashan iron ore with novel low-temperature collector[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):99-103.