

磁黄铁矿选矿研究进展与发展趋势

张小普, 艾光华, 严华山

(江西理工大学, 江西 赣州 341000)

摘要: 本文概述了磁黄铁矿选矿方面的研究进展, 认为磁黄铁矿在浮选和与多金属硫化矿分离方面仍将是研究热点。系统研究磁黄铁矿矿物基因特性、开发出与矿物基因特性相和谐的分选工艺流程和药剂制度是今后的重点研究方向。

关键词: 磁黄铁矿; 选矿; 基因特性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.018

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 05-0103-06

磁黄铁矿 Fe_{1-x}S ($0 < x < 0.223$) 正如其名, 是自然界中常见的具有磁性的硫化铁矿, 储量丰富, 分布广泛, 在诸多类型的内生矿床中均可以见到。磁黄铁矿表面呈暗青铜黄色, 硬度 $3.5 \sim 4.5$, 磁性强弱不等, 其磁力的强弱决定于内部构造中铁原子空缺的多少。磁黄铁矿构成组份较为复杂, 经常与铜、镍、铁等磁性物质伴生, 所以单纯的磁选很难将其回收。目前来说, 浮选技术在回收和分离磁黄铁矿中应用较为广泛。近年来, 不少专家和学者在磁黄铁矿的富集、分离以及其同质多象变体展开研究, 尤其在磁黄铁矿的地质成因、晶系特征等方面取得了不少进展。本文针对磁黄铁矿现阶段的选矿研究进展和发展趋势进行了简要概述。

1 磁黄铁矿不同晶系的研究现状

在磁黄铁矿的分子结构中, Fe 原子含量通常要少于 S 原子含量, 所以其结构式呈 Fe_{1-x}S , 其中 x 介于 0 到 0.223 之间, 其中部分 Fe^{2+} 被 Fe^{3+} 取代, 为保持价态平衡, Fe^{2+} 处产生空位, 形成缺陷固溶体^[1]。因为铁原子缺失数量 x 的不同, 磁黄铁矿结构主要分为 3 种晶系: 六方、单斜以及斜方晶系磁黄铁矿^[2]。自然界中磁黄铁矿主要以单斜和

六方磁黄铁矿存在, 因此对于六方和单斜磁黄铁矿的矿物特性、浮选理论和工艺研究较多。晶体结构的不同直接导致了矿物性质和选别工艺上的不同, 六方和单斜磁黄铁矿在矿物磁性、可浮性、药剂作用等方面表现不尽相同。六方磁黄铁矿在磁性和可浮性等方面表现均逊色于单斜磁黄铁矿, 单斜磁黄铁矿在较宽的 pH 值范围内可浮性表现都较好, 磁性也较强, 属于铁磁性矿物, 而六方则不然^[3]。

1.1 区分异型晶系磁黄铁矿的标识方法

自然界中少有单一晶系磁黄铁矿物质的存在, 70% 以上均为混合晶系, 因此用单一的选别方法很难将其分离^[4]。章振根等^[5]对某含磁黄铁矿的矿床进行了研究, 通过破碎筛分、强磁水吸、电磁仪等方法分离出六方和单斜磁黄铁矿, 而后对两种矿物分别进行了区别特征实验, 实验发现, 不同晶系的同种矿物在 X 光射线、铁原子含量、磁性、差热分析曲线等方面有着明显的差异, 反射率和硬度方面也可作为区别标识。梁学谦^[6]通过浮选的方法初步达到富集磁黄铁矿的目的, 对富集的磁黄铁矿进行磁选分离, 得到六方和单斜磁黄铁矿, 分别对其进行电流分选和人工磁选, 最终得到了纯度较高的不同晶系磁黄铁矿。

收稿日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51974138); 江西省自然科学基金项目 (20202BABL214022); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金项目 (GRIMM-KJSKL-2020-21); 江西理工大学博士科研启动基金项目 (jxxjbs19019)

作者简介: 张小普 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物加工理论与工艺方面的研究。

1.2 六方晶系磁黄铁矿研究进展

六方磁黄铁矿具有顺磁性,可浮性差于单斜磁黄铁矿,在其组成成分中铁原子摩尔分数占比 47.8%~47.0% (近于 $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}\sim\text{Fe}_9\text{S}_{10}$)^[7]。Lehmann 等^[8]研究了天然六方磁黄铁矿样品的溶解程度和速度,发现六方磁黄铁矿在各种条件下的溶解速率小于单斜磁黄铁矿,氧化溶解的活化能为 71.9 kJ/mol,表明六方磁黄铁矿的初始溶解受化学支配。刘之能等^[9]研究了丁铵黄药体系下,六方磁黄铁矿的浮选行为和表面吸附机理,实验结果表明,药剂在矿物表面产生化学吸附,中性条件下六方磁黄铁矿的可浮性表现最好,碱性条件下硫酸铜对六方磁黄铁矿的活化作用更加明显。卢晓英等^[10]在用六方磁黄铁矿处理有 Cr(VI) 污水实验时发现,被氧化后的六方磁黄铁矿常在其外层形成磁铁矿,使得外层 Fe 原子造成缺失,因此除 Cr(VI) 效果要好于六方磁黄铁矿本身。

1.3 单斜晶系磁黄铁矿研究进展

单斜磁黄铁矿具有铁磁性,可浮性优于六方磁黄铁矿,在其组成成分中铁原子摩尔分数占比 47.0%~46.5% (近于 Fe_7S_8)^[11]。赵翠华等^[12]利用密度泛函理论方法考查了单斜磁黄铁矿的电子结构和浮选行为,结果发现,单斜磁黄铁矿中存在 S-Fe 共价键, HOMO 轨道和 LUMO 轨道的主要贡献来自于 S 和 Fe, S 的存在阻止了 $\text{Ca}(\text{OH})^+$ 的吸附,从而石灰对单斜磁黄铁矿的抑制作用更小。宋永胜等^[13]研究了单斜磁黄铁矿在不同矿浆 pH 值和电位下的浮选行为差异和分离情况,结果表明,在乙硫氮体系中,单斜磁黄铁矿在 pH 值中至碱性范围内,可浮性表现较好,且可浮性不随矿浆电位的变化而产生大的波动,酸性条件下,单斜磁黄铁矿可浮性较差,此时可通过条件矿浆电位实现与方铅矿、闪锌矿分离。

2 磁黄铁矿与其他多金属硫化矿物分离研究现状

目前磁黄铁矿与其他多金属硫化矿物的分离工艺研究主要体现在与磁铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、铁闪锌矿等矿物方面。

2.1 磁黄铁矿与磁铁矿的分离研究

存在于自然界的磁黄铁矿多为混合晶系,从单斜磁黄铁矿的角度来说,磁性较强,在磁性选铁的过程中,很容易混杂在铁精矿中,且选别之

后,由于剩磁作用的存在,又易发生磁团聚行为,所以单纯的磁选不易将其分离。从六方磁黄铁矿的角度来说,可浮性较差,容易跟随目的矿物进入尾矿,再加上六方磁黄铁矿易泥化和氧化的特点,极大的影响了浮选分离^[14]。张云海等^[15]研制了成本低廉、脱硫成效较好的新型脱硫药剂 BK420A,通过该药剂的搭配使用可以大幅降低磁黄铁矿的含量,最终使得硫精矿中硫含量达标。苏建芳等^[16]在加拿大某磁铁矿脱磁黄铁矿浮选实验中,通过组合使用活化剂(硫酸+硫酸铜),捕收剂(异戊黄药+丁铵黑药),起泡剂(BK204),成功脱除了磁铁矿中的磁黄铁矿。

2.2 磁黄铁矿与黄铜矿的分离研究

磁黄铁矿 $\text{Fe}_{1-x}\text{S}(0<x<0.223)$ 中, Fe 原子的亏损空位被 S 元素所取代,恰好被 Cu^{2+} 所活化,导致其可浮性有了较大提升,所以黄铜矿与磁黄铁矿的难分离问题一直存在。现阶段的研究方向主要集中在黄铜矿的高效捕收和磁黄铁矿的高效抑制方面,实际生产中多采用抑硫浮铜原则^[17]。陈强等^[18]针对大宝山铜选厂原矿中磁黄铁矿含量过高而导致选矿指标不理想的问题展开选矿实验研究,实验表明,在浮选实验中加入石灰调节矿浆 pH 值为 9~10 时,腐殖酸钠可以有效的抑制磁黄铁矿。宋宝旭等^[19]采用抑硫浮铜原则流程在云南某含银铜矿,实现了铜硫分离并强化了银的回收。

2.3 磁黄铁矿与镍黄铁矿的分离研究

硫化矿矿石组份极其复杂,各种矿物交相纵横,分布不均,其中铜、镍矿物存在容易过粉碎、易泥化和氧化的特点,并且在浮选性质方面与磁黄铁矿相差无异,所以导致分离困难^[20]。赵开乐等^[21]自主研发了一种磁黄铁矿浮选抑制剂(碳酸钠+焦亚硫酸钠+二乙烯三胺),结合新的工艺流程该抑制剂在浮选中能够高效抑制磁黄铁矿,却对镍黄铁矿的捕收不产生任何影响。刘莉等^[22]在保留铜镍硫化矿物原矿物性质的基础上采用磁选去除磁黄铁矿,达到了镍黄铁矿单矿物分离的目的。

2.4 磁黄铁矿与铁闪锌矿的分离研究

铁闪锌矿多与磁黄铁矿伴生于同一矿石中,且二者磁性和可浮性又十分相似,使得分选的困难程度大大增加,高质量的锌精矿难以获得^[23]。罗仙平等^[24]通过调控浮选工艺和组合药剂的搭配使用,实现了铁闪锌矿和磁黄铁矿的分选。余润兰等^[25]探索了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 体系中存在乙硫氮时磁

黄铁矿和铁闪锌矿的电化学行为, 结果发现, 二者表现大不相同。

3 磁黄铁矿选矿研究进展

3.1 磁黄铁矿浮选理论进展

磁黄铁矿 (Fe_{1-x}S , $0 < x < 0.223$) 作为红砷镍矿族的一员, Fe 原子数量 x 亏损的不同, 导致磁黄铁矿的结构和性质表现不一, 当磁黄铁矿中 S/Fe 比值越大时, 磁黄铁矿便会由六方晶系转为单斜晶系, 可浮性与磁性也会由弱变强^[26]。覃武林等^[27] 发现在浮选实验中, 石灰通过降低磁黄铁矿表面氧化电位, 使得磁黄铁矿趋近氧化形成亲水物质, 阻碍药剂吸附, 达到抑制的目的, 活化剂草酸和硫酸对被石灰抑制后的磁黄铁矿具有较好的活化作用, 其机理主要是提高矿物表面氧化电位, 阻碍和去除亲水物质, 促进捕收剂和矿物的表面作用。张芹等^[28] 对磁黄铁矿的天然可浮性进行了研究, 发现磁黄铁矿在 pH 值 < 13, 一定的矿浆电位下, 磁黄铁矿均可以实现自诱导浮选。

3.2 磁黄铁矿选矿工艺进展

通过对磁黄铁矿矿物地质成因的了解, 发现磁黄铁矿通常以伴生形式内含于各种硫化矿物中, 是常见的硫化铁矿物。目前, 通过单一的形式很难将磁黄铁矿与其他硫化矿物分离, 现阶段主要采用磁-浮联合工艺将其分离^[29]。肖骏等^[30] 在土耳其某铜硫铁矿原有的生产工艺基础上, 针对其铜精矿品位过低的原因展开研究, 最终确定了硫化矿混浮-硫化矿精矿磁选分离-磁选精矿及尾矿分别进行铜硫分离-混浮尾矿磁选回收磁铁矿新的工艺。张添钧等^[31] 通过预先磁选脱硫-优先浮铜-铜硫分离-铜尾矿浮铅-铅尾矿活化浮锌的工艺流程解决了某含高磁黄铁矿复杂铜铅锌矿浮选过程中有价金属精矿产出困难的问题, 最终获得了理想的铜、铅、锌精矿产品。

3.3 磁黄铁矿药剂研究进展

硫化矿作为重要的矿产资源之一, 现有的硫化矿资源多以贫、细、杂、难特点凸显, 且随着自然环境和矿石性质的改变, 选矿工艺和药剂制度也在不断改进和升级。

3.3.1 活化剂

磁黄铁矿目前的活化剂主要以硫酸铜、硫酸以及草酸等居多^[32]。谢玉娟等^[33] 在冀东地区高硫铁矿直浮降硫实验中, 对比使用了活化剂硫酸

铜、硫酸、草酸对硫铁精矿的影响, 结果发现, 硫酸铜脱硫效果要好于硫酸和草酸。卜显忠等^[34] 在高钙体系磁黄铁矿浮选中的, 对比使用硫酸铜和柠檬酸对磁黄铁矿的活化作用, 结果发现, 柠檬酸在该体系中起到了络合 Ca^{2+} 的作用, 提升了磁黄铁矿的浮选性能。

3.3.2 捕收剂

目前硫化矿捕收剂大致分为以下几类^[35]: 黄药及其衍生物、硫氮及其衍生物、黑药、以代号表示的新型药剂以及混合捕收剂。杨峰涛等^[36] 在铁精矿浮选脱硫实验中, 对药剂进行了种类实验, 最终确定捕收剂使用丁黄药可以达到理想效果。张云海等^[37] 将研制出的新型捕收剂 BK420A 运用到铁精矿的脱硫中, 结果脱硫率高达 98.72%。任新年等^[38] 在某硫铁精矿脱硫实验中结合使用复合捕收剂丁黄药+Y89, 成功提高了硫精矿中铁的品位。

3.3.3 抑制剂

目前磁黄铁矿的抑制剂研究进展主要体现在无机抑制剂、有机抑制剂以及组合抑制剂方面。王慧等^[39] 在云锡大屯选矿厂进行铜硫分离实验时发现, 使用石灰作为磁黄铁矿和黄铜矿分离时的抑制剂, 分离效果较好。孙伟等^[40] 将巯基有机化合物 DMPS 作为抑制剂, 在丁基黄药存在下, 从磁黄铁矿中分离铜活化铁闪锌矿。实验表明, 有机抑制剂 DMPS 对磁黄铁矿和铁闪锌矿均有较强的抑制作用。赵开乐等^[21] 在进行某难选硫化铜镍矿石选矿实验时, 采用了组合抑制剂(碳酸钠+焦亚硫酸钠+二乙烯三胺), 并结合“铜镍硫混浮-精矿分离硫”新工艺, 成果提高和获得了铜、镍的品位和回收率。

4 结 语

(1) 磁黄铁矿因其自身独有矿物特性和伴生形式, 成为了硫化矿物浮选和分离领域中的关注焦点和研究热点。在今后的研究中, 磁黄铁矿自身的矿物特性、不同晶系的剥离研究、与其他多金属硫化矿物的分离仍将是研究的重点和方向。

(2) 随着选矿领域发展的日渐成熟, 磁黄铁矿的研究领域将持续拓展, 通过地质成因、晶体结构、表面特性、化学组成、微量组成、联合工艺等方面的研究, 将有助于其与其他硫化矿物的有效分离。

(3) 磁黄铁矿伴生与其他多金属硫化矿物的现实不会改变, 因此在药剂的提升和开发方面仍将是磁黄铁矿乃至硫化矿物研究方向, 并且会朝着经济、环保、稳定等方面发展。开发出与矿物基因特性相和谐的分选工艺流程和药剂制度, 实现含磁黄铁矿多金属硫化矿的短流程优先高效回收是今后的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 洪秋阳. 磁黄铁矿晶体化学和可浮性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- HONG Q Y. Study on crystal chemistry and floatability of pyrrhotite[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [2] 崔毅琦, 童雄, 周庆华, 等. 国内外磁黄铁矿浮选的研究概况[J]. [金属矿山](#), 2005(5):24-26,63.
- CUI Y Q, TONG X, ZHOU Q H, et al. Research situation of pyrrhotite flotation at home and abroad[J]. [Metal Mines](#), 2005(5):24-26,63.
- [3] 周利华. 黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离的机理研究及技术应用 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- ZHOU L H. Mechanism research and technical application of flotation separation of chalcopyrite and pyrrhotite [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [4] R G Arnold. Range in composition and structure of 82 natural terrestrial pyrrhotites[J]. *The Canadian Mineralogist*. 1967, Vol. 9(NO. 1): 31-50.
- [5] 章振根, 李锡林, 陈国玺. 广西某矿田磁黄铁矿的研究及其区别特征[J]. [地球化学](#), 1976(1):54-63.
- ZHANG Z G, LI X L, CHEN G X. Study on pyrrhotite in a ore field in Guangxi and its distinguishing characteristics[J]. [Geochemistry](#), 1976(1):54-63.
- [6] 梁学谦. 单斜磁黄铁矿与六方磁黄铁矿的分离[J]. *地质与勘探*, 1984(7):23-24.
- LIANG X Q. Separation of monoclinic pyrrhotite and hexagonal pyrrhotite[J]. *Geology and Exploration*, 1984(7):23-24.
- [7] 洪秋阳, 汤玉和, 王毓华, 等. 磁黄铁矿结构性质与可浮性差异研究[J]. [金属矿山](#), 2011, 40(1):64-67.
- HONG Q Y, TANG Y H, WANG Y H, et al. Study on the difference of structural properties and floatability of pyrrhotite[J]. *Metal Mines*, 2011, 40(1):64-67.
- [8] M N Lehmann, P Kaur, R M Pennifold, et al. A comparative study of the dissolution of hexagonal and monoclinicpyrrhotitesincyanidesolution[J].2000,55(3):255-273.
- [9] 刘之能, 覃文庆, 张健文, 等. 六方磁黄铁矿浮选行为及其表面吸附机理[J]. [矿冶](#), 2009, 18(2):5-8+12.
- LIU Z N, QIN W Q, ZHANG J W, et al. Flotation behavior of hexagonal pyrrhotite and its surface adsorption mechanism[J]. [Mining and Metallurgy](#), 2009, 18(2):5-8+12.
- [10] 卢晓英, 鲁安怀, 陈洁, 等. 单斜与六方磁黄铁矿处理含 Cr(VI) 废水过程中 pH 值变化规律[J]. [高校地质学报](#), 2000, 6(2):271-277.
- LU X Y, LU A H, CHEN J, et al. Variation of pH value during treatment of Cr(VI)-containing wastewater by monoclinic and hexagonal pyrrhotite[J]. [Geological Journal of Universities](#), 2000, 6(2):271-277.
- [11] 梁冬云, 何国伟, 邹霓. 磁黄铁矿的同质多象变体及其选别性质差异[J]. *广东有色金属学报*, 1997, 7(1):1-5.
- LIANG D Y, HE G W, ZOU N. Homogeneous polymorphic variants of pyrrhotite and their differences in sorting properties[J]. *Guangdong Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(1):1-5.
- [12] 赵翠华, 吴伯增, 陈建华. Electronic structure and flotation behavior of monoclinic and hexagonal pyrrhotite[J]. [Journal of Central South University of Technology](#), 2015, 22(2):466-471.
- ZHAO C H, WU B Z, CHEN J H. Electronic structure and flotation behavior of monoclinic and hexagonal pyrrhotite[J]. [Journal of Central South University of Technology](#), 2015, 22(2):466-471.
- [13] 李文娟, 宋永胜, 周桂英, 等. 乙硫氮体系中铅锌铁硫化矿的电化学浮选行为[J]. [金属矿山](#), 2009, 39(10):90-92.
- LI W J, SONG Y S, ZHOU G Y, et al. Electrochemical flotation behavior of lead-zinc-iron sulfide ore in ethyl disulfide system[J]. [Metal Mines](#), 2009, 39(10):90-92.
- [14] 王双玉, 袁致涛, 刘磊, 等. 磁黄铁矿型铜铁多金属矿选矿研究进展[J]. [矿产综合利用](#), 2018(5):13-20.
- WANG S Y, YUAN Z T, LIU L, et al. Research progress on beneficiation of pyrrhotite-type copper-iron polymetallic ore[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2018(5):13-20.
- [15] 张云海, 刘方. 捕收剂 BK420A 在铁矿浮选脱硫中的应用[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2013(S1):244-246.
- ZHANG Y H, LIU F. Application of collector BK420A in flotation desulfurization of iron ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2013(S1):244-246.
- [16] 苏建芳, 王中明, 刘书杰, 等. 加拿大某磁铁矿脱除磁黄铁矿浮选试验研究[J]. [矿产综合利用](#), 2017(4):42-45+27.
- SU J F, WANG Z M, LIU S J, et al. Flotation test of removing pyrrhotite from a magnetite in Canada[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2017(4):42-45+27.
- [17] 马先峰, 邱显扬, 何晓娟, 等. 黄铜矿与磁黄铁矿选别性质差异研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2012(6):35-38.
- MA X F, QIU X Y, HE X J, et al. Study on the difference of beneficiation properties between chalcopyrite and pyrrhotite[J].

Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012(6):35-38.

[18] 陈强, 黎国进, 黄火根. 大宝山矿铜选厂磁黄铁矿型铜矿石选矿试验[J]. *南方金属*, 2003(2):17-19+29.

CHEN Q, LI G J, HUANG H G. Mineral beneficiation test of pyrrhotite-type copper ore in the copper processing plant of Dabaoshan Mine[J]. *Southern Metal*, 2003(2):17-19+29.

[19] 宋宝旭, 邱显扬, 胡佛明, 等. 云南某含银铜矿伴生银矿物强化回收实验研究[J]. *贵金属*, 2018, 39(3):47-50,58.

SONG B X, QIU X Y, HU F M, et al. Experimental study on enhanced recovery of associated silver minerals from a silver-bearing copper mine in Yunnan[J]. *Precious Metals*, 2018, 39(3):47-50,58.

[20] 黄俊玮, 张亚辉. 铜镍硫化矿浮选技术难点研究进展[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2014(4):75-79.

HUANG J W, ZHANG Y H. Research progress on difficulties in flotation technology of copper-nickel sulfide ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2014(4):75-79.

[21] 赵开乐, 顾帼华, 王昌良, 等. 高磁黄铁矿含量型硫化铜镍矿选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(3):40-43+47.

ZHAO K L, GU G H, WANG C L, et al. Experimental study on beneficiation of copper-nickel sulfide ore with high pyrrhotite content[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2015, 35(3):40-43+47.

[22] 刘莉, 张悦, 王建华, 等. 铜镍硫化物矿石中镍黄铁矿单矿物的分离方法研究[J]. *地质调查与研究*, 2010, 33(3):232-237.

LIU L, ZHANG Y, WANG J H, et al. Study on the separation method of pyrite single mineral in copper-nickel sulfide ores[J]. *Geological Survey and Research*, 2010, 33(3):232-237.

[23] 杜显彦, 韩统坤, 冯博, 等. 铁闪锌矿与磁黄铁矿分离技术现状与进展[J]. *四川有色金属*, 2013(4):11-15,23.

DU X Y, HAN T K, FENG B, et al. Status and progress of separation technology of sphalerite and pyrrhotite[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2013(4):11-15,23.

[24] 罗仙平, 王淀佐, 孙体昌, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿电位调控浮选试验研究[J]. *金属矿山*, 2006(6):30-34.

LUO X P, WANG D Z, SUN T C, et al. Experimental study on potential control flotation of a copper-lead-zinc polymetallic sulfide ore[J]. *Metal Mines*, 2006(6):30-34.

[25] 余润兰, 邱冠周, 胡岳华, 等. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 体系中铁闪锌矿和磁黄铁矿的电化学行为差异[J]. *金属矿山*, 2005(8):30-33.

YU R L, QIU G Z, HU Y H, et al. Electrochemical behavior difference between sphalerite and pyrrhotite in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system[J]. *Metal Mining*, 2005(8):30-33.

[26] 马英强. 基于晶体化学的硫化铁矿物浮选特性研究[D].

沈阳: 东北大学, 2013.

MA Y Q. Research on flotation characteristics of iron sulfide minerals based on crystal chemistry [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

[27] 覃武林, 孙伟, 张英, 等. 基于交流阻抗技术的磁黄铁矿活化浮选研究[J]. *矿冶工程*, 2009, 29(2):32-35.

QIN WU L, SUN W, ZHANG Y, et al. Research on activated flotation of pyrrhotite based on AC impedance technology[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2009, 29(2):32-35.

[28] 张芹, 胡岳华, 顾帼华, 等. 磁黄铁矿自诱导浮选电化学的研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2004(2):4-6+15.

ZHANG Q, HU Y H, GU G H, et al. Electrochemical study of self-induced flotation of pyrrhotite[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2004(2):4-6+15.

[29] 敖顺福, 李洪强, 李佳磊. 硫精矿深度精选技术与应用进展[J]. *矿冶*, 2020, 29(2):15-21.

AO S F, LI H Q, LI J L. Advances in deep concentration technology and application of sulfur concentrate[J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29(2):15-21.

[30] 肖骏, 陈代雄, 祁忠旭, 等. 含方黄铜矿-磁黄铁矿铜硫铁矿的分离工艺[J]. *矿物学报*, 2016, 36(1):48-53.

XIAO J, CHEN D X, QI Z X, et al. Separation process of copper pyrite containing cristobalite-pyrrhotite[J]. *Mineral Sinica*, 2016, 36(1):48-53.

[31] 张添钧. 某高磁黄铁矿铜铅锌矿选矿分离试验研究[J]. *四川有色金属*, 2016(2):14-17,21.

ZHANG T J. Experimental study on beneficiation and separation of a high pyrrhotite copper-lead-zinc ore[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2016(2):14-17,21.

[32] 陈享享. 硫化矿捕收剂的研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2015(3):1-5.

CHEN X X. Research progress of collectors for sulfide ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2015(3):1-5.

[33] 谢玉娟, 陈辉. 冀东矿区高硫铁矿直接浮选降硫试验研究[J]. *中国锰业*, 2018, 36(4):152-155.

XIE Y J, CHEN H. Experimental study on sulfur reduction by direct flotation of high pyrite ore in Jidong mining area[J]. *China Manganese Industry*, 2018, 36(4):152-155.

[34] 卜显忠, 高珂, 龙涛. 高钙体系中柠檬酸对磁黄铁矿的活化作用[J]. *金属矿山*, 2017(3):81-86.

BU X Z, GAO K, LONG T. Activation of pyrrhotite by citric acid in high calcium system[J]. *Metal Mining*, 2017(3):81-86.

[35] 梁爽, 路亮, 吴桂叶. 硫化矿捕收剂的研究进展[J]. *中国矿业*, 2018, 27(S2):156-158.

LIANG S, LU L, WU G Y. Research progress of collectors for sulfide ore[J]. *China Mining Industry*, 2018, 27(S2):156-158.

[36] 杨峰涛, 李玉凤, 王晓旭. 内蒙某铁精矿浮选脱硫实

验[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2016, 38(4):13-18.
 YANG F T, LI Y F, WANG X X. Flotation desulfurization experiment of iron ore concentrate in Mongolia[J]. Journal of North China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 38(4):13-18.
 [37] 张云海, 刘方. 捕收剂 BK420A 在铁矿浮选脱硫中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(Z1):244-246.
 ZHANG Y H, LIU F. Application of collector BK420A in iron ore flotation desulfurization[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(Z1):244-246.
 [38] 任新年, 关翔, 李付龙. 新疆某高硫磁铁精矿脱硫试验研究[J]. 新疆钢铁, 2015(2):51-53.
 REN X N, GUAN X, LI F L. Experimental study on desulfurization of a high-sulfur magnetite concentrate in

Xinjiang[J]. *Xinjiang Iron and Steel*, 2015(2):51-53.
 [39] 王慧, 周忠堂. 从硫精矿中回收铜的浮选工艺试验研究与生产实践[J]. 四川有色金属, 2011(3):20-25.
 WANG H, ZHOU Z T. Experimental research and production practice of flotation process for recovering copper from sulfur concentrate[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2011(3):20-25.
 [40] SUN Wei, LIU Run-qing, CAO Xue-feng, et al. Flotation separation of marmatite from pyrrhotite using DMPS as depressant[J]. 中国有色金属学会会刊(英文版), 2006, 16(3):671-675.
 SUN W, LIU R Q, CAO X F, et al. Flotation separation of marmatite from pyrrhotite using DMPS as depressant[J]. Journal of China Nonferrous Metals Society (English version), 2006, 16(3):671-675.

Research Progress and Development Trend of Pyrrhotite Beneficiation

Zhang Xiaopu, Ai Guanghua, Yan Huashan

(Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi, China)

Abstract: This article summarizes the research progress of pyrrhotite beneficiation, and believes that pyrrhotite will remain a research hotspot in flotation and separation from polymetallic sulfide ore. The systematic study of the genetic characteristics of pyrrhotite minerals, and the development of a separation process and pharmaceutical system that are in harmony with the genetic characteristics of minerals are the key research directions in the future.

Keywords: Pyrrhotite; Beneficiation; Genetic characteristic

(上接第 95 页)

Research Progress of Microbial Technology in Mineral Processing and Metallurgy

Wang Yutong, Ai Guanghua, Xiao Guosheng

(School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi, China)

Abstract: Due to the gradual exploitation of minerals and the increasing shortage of high-quality mineral resources, the separation and recovery of "poor, fine and miscellaneous" minerals need to be solved urgently, and people's requirements for mineral processing technology are higher and higher. Some special microorganisms themselves or their metabolites can dissolve the ions in minerals or change the surface properties of minerals. Moreover, compared with traditional mineral processing reagents and leaching agents, microorganisms have the advantages of lower cost and less environmental pollution. Therefore, the micro biological flotation and microbial metallurgy technology has been developed rapidly. This paper introduces the research progress of bioleaching, oxidation, decomposition, adsorption, chemical reaction and cell surface chemistry of microorganisms at home and abroad.

Keywords: Microorganism; Leaching; Oxidation; Decomposition; Surface adsorption; Chemical reaction