

磁黄铁矿型铜铁多金属矿选矿研究进展

王双玉¹, 袁致涛¹, 刘磊², 孟庆有¹, 李丽匣¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 国土资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006)

摘要: 根据磁黄铁矿型铜铁多金属矿的分选难点并结合磁黄铁矿的特殊性质, 着重从铜硫分离、铁矿脱硫的浮选药剂和选矿工艺两方面梳理了磁黄铁矿型铜铁多金属矿的国内外选矿研究现状及进展。

关键词: 磁黄铁矿; 铜硫分离; 铁矿脱硫; 浮选药剂; 选矿工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.05.003

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 05-0013-08

磁黄铁矿型铜铁多金属矿是一种复杂难选的矿产资源, 该类矿石中含铜矿物主要是黄铜矿, 含铁矿物主要是磁铁矿, 有害杂质主要是磁黄铁矿。磁黄铁矿具有多种晶形, 性质多变, 是干扰铜硫分离和铁矿脱硫的主要因素^[1-2]。若从磁黄铁矿型铜铁多金属矿中获得较高质量的铜精矿和铁精矿, 必须实现黄铜矿、磁铁矿与磁黄铁矿的高效分离。因此针对磁黄铁矿型铜铁多金属矿选矿的主要问题 - 铜硫分离和铁矿脱硫, 国内进行了大量的试验研究, 本文将从浮选药剂和分选工艺方面阐述黄铜矿、磁铁矿与磁黄铁矿分离的研究进展^[3-5]。

1 磁黄铁矿的特点

磁黄铁矿其含硫理论品位为 38% ~ 40%^[6]。由于铁原子的亏损 (即结构中出现的空位) 数量不同, 使其结构和成分发生了变化, 磁黄铁矿包含 3 种晶系结构: 单斜晶系、六方晶系和斜方晶系, 其中常见的是单斜和六方两种晶系^[7], 且随着 S/Fe 比例的增大, 磁黄铁矿的晶体结构由六方晶系变为单斜晶系^[8]。不同晶体结构磁黄铁矿的选别

性质有一定差异, 在可浮性、磁性、活化或抑制等方面的表现都有不同^[9]。单斜晶系磁黄铁矿的可浮性好, 磁性强; 六方晶系磁黄铁矿的可浮性差, 磁性也极弱^[10]。自然界中 70% 以上的磁黄铁矿都是两种晶系的混合物^[11]。有试验表明^[11], 新鲜表面的单斜晶系磁黄铁矿的可浮性近似甚至优于黄铜矿, 且不易被石灰抑制^[12], 因此在选铜过程中, 磁黄铁矿会与黄铜矿一起上浮, 影响精矿质量。单斜晶系磁黄铁矿属铁磁性矿物^[2], 磁性与磁铁矿相近, 在磁选选铁过程中, 易富集于铁精矿中, 二者之间在磁选后还会通过剩磁作用产生异相磁团聚, 当矿物粒度较细时, 这种磁团聚现象尤为严重, 从而致使磁铁矿和磁黄铁矿难以通过磁选法进行有效分离^[13]。六方晶系磁黄铁矿的可浮性较差, 在浮选过程中嵌布粒度细的黄铜矿易随铜硫连生体进入浮选尾矿, 造成铜的损失^[14]。此外, 磁黄铁矿易泥化和氧化^[15-16], 泥化使矿物颗粒粒度变细、比表面积增大, 导致氧化能力增强, 生成 Fe(OH)₃、FeO(OH) 等亲水层^[17-18], 阻碍黄药类捕收剂在矿物表面的吸附, 降低其可浮性, 影响

收稿日期: 2017-04-21; 改回日期: 2017-05-24

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助项目 (N160103004)、中国地质调查局地质调查项目 (DD20160073)、国家自然科学基金资助项目 (51574061)

作者简介: 王双玉 (1992-), 女, 硕士研究生在读。

通讯作者: 袁致涛 (1971-), 教授, 博士。

磁黄铁矿和磁铁矿的浮选分离；同时氧化大量消耗矿浆中的氧，恶化浮选环境，严重时导致开始阶段铜矿物不浮，影响铜矿物的浮选效果^[4]。

2 黄铜矿与磁黄铁矿分离的研究

磁黄铁矿复杂多变的矿石性质使得黄铜矿与磁黄铁矿分离难度增大，难以获得较高产品指标的铜精矿。为了实现黄铜矿与磁黄铁矿的高效分离，国内外许多选矿工作者从浮选药剂和分选工艺两方面进行了大量的试验研究，并取得了一定的研究成果。

2.1 黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离的药剂研究

在黄铜矿与磁黄铁矿分选的生产实践中，比较常用的分选方法是抑硫浮铜，这就涉及到两种重要的浮选药剂：黄铜矿的捕收剂和磁黄铁矿的抑制剂^[19]。

2.1.1 黄铜矿的捕收剂

高效的黄铜矿捕收剂是铜硫浮选分离的关键因素之一^[20]。浮选黄铜矿的捕收剂通常有三类：黄药类、黑药类及酯类^[1]。黄药类捕收剂常用的有乙基、异丙基和丁基黄药等，是目前工业生产中广泛使用的硫化矿捕收剂；黑药类捕收剂的选择性好，但是捕收性能比黄药差，国外以黑药 208[#]、238[#]、242[#]为主，我国以甲酚黑药、丁铵黑药为主；酯类捕收剂是近 20 年来主要研究的硫化矿捕收剂^[21]，具有适应性强、稳定度高、可长期保存等优点，在工业生产中应用的有 Z-200、酯-105、OSN-243 及苯硫氨酯等^[22]。

为提高黄铜矿的浮选性能和伴生金属的回收率，国内外选矿工作者开发研制了大量的针对黄铜矿具有高选择性的新型捕收剂和组合捕收剂。

Y-89 系列药剂是具有长碳链和带支链的高级黄药，是硫化铜和氧化铜的高效捕收剂，对矿石中伴生的金、银也有较好的捕收性能^[19]。应用于铜绿山选矿，与现场生产使用的异丁基黄药相比，铜精矿中铜品位提高了 0.39%，铜回收率提高了 0.23%，铜精矿中伴生金品位提高了 1.39 g/t，金

回收率提高了 5.39%^[23]。二烷基单硫化磷酸盐和单硫代磷酸盐属于新型黑药类捕收剂^[24]，是硫化铜和金银矿物的有效捕收剂^[4]。前者适用于酸性条件，后者则只有在中性或弱碱性的介质中效果显著。

新型捕收剂 PZO 是一种对硫化铜矿以及金、银、铂、钯等贵金属选择性高且具有一定起泡性的酯类捕收剂^[25]。汪泰等^[26]针对西南某铜金硫多金属矿进行了研究，结果表明，PZO 对硫化铜矿和自然金的选择捕收效果优于丁铵黑药和丁基黄药，起泡性能优于 2[#]油和 MIBC，以丁基黄药+PZO 作为组合捕收剂，最终可获得铜品位 23.02%、回收率 92.65%，金品位 20.32 g/t、回收率 50.88%，银品位 267.35 g/t、回收率 56.50%的铜精矿，以及品位 41.52%的硫精矿。

LP-01 是一种膦酸类新型高效硫化铜矿石捕收剂，在低碱条件下具有选择性强、使用方便、用量少、捕收能力强等特点^[27]。邱廷省等^[28]利用 LP-01 捕收剂对某复杂硫化铜矿进行铜硫分离试验研究，采用分步优先浮选和中矿再磨再选的浮选工艺，实现了该复杂硫化铜矿铜硫的高效分离，最终获得铜品位为 18.43%、铜回收率为 87.54%的铜精矿，分离效果显著。

从硫化铜矿石中铜、铁、金等元素和铜矿物、硫矿物的地球化学特性，以及黄铜矿和黄铁矿等矿物在碱性溶液中的界面性质出发，中南大学化学化工学院化工冶金研究所运用 Pearson 软硬酸碱理论和分子轨道理论^[29-31]，研发出新型硫化铜矿高效捕收药剂：T-2K、Mac-12、Mac-10，该类药剂已应用于多个铜矿山，并取得了良好的指标。

2.1.2 磁黄铁矿的抑制剂

单斜晶系磁黄铁矿的可浮性近于甚至优于黄铜矿，易与黄铜矿一起上浮，从而影响铜精矿质量。因此，在铜硫浮选分离过程中，对磁黄铁矿的有效抑制十分重要^[19]。磁黄铁矿的抑制剂通常可分为无机抑制剂和有机抑制剂^[1]。

石灰是最为常见的磁黄铁矿抑制剂^[4]。目前

工业生产中,铜硫分离大都在高碱环境中进行,通常加入石灰调节pH值并抑制磁黄铁矿^[32]。石灰对磁黄铁矿的抑制作用主要表现在两方面:一是OH⁻离子的作用,在磁黄铁矿表面生成一层Fe(OH)₃亲水薄膜,阻碍磁黄铁矿与选矿药剂表面接触,降低了其可浮性;二是石灰在矿浆中有钙离子存在,吸附在磁黄铁矿表面并生成Ca(CaOH)⁺、Ca(OH)₂、CaSO₄等含钙的化合物,降低了磁黄铁矿对捕收剂的吸附能力^[33]。但是往往加入大量的石灰对矿石中的铜、金、银等矿物也有不同程度的抑制作用,不利于铜指标的进一步提高和伴生金属的综合回收;同时选铜尾矿中的硫被强烈抑制,只有加入活化剂,才能实现铜尾选硫,增加了浮选成本^[34]。

低碱铜硫分离是发展的一个重要方向,一些低碱的有机或无机抑制剂被研究和应用^[35]。中南大学矿物工程研究所研制了一种新型小分子抑制剂CTP,取代部分石灰实现铜硫混合精矿的低碱度浮选分离,在德兴铜矿大山选矿厂得到成功应用,不仅能生产出合格的硫精矿,而且综合回收的铜、硫、金、银、钼等有价值元素的指标都有所提高,同时大幅度地降低了铜硫分离中石灰的用量^[36]。蔡振波等^[37]采用新型抑制剂DT-4代替石灰作抑制剂,对江铜集团某铜矿进行低碱度铜硫分离,实现了铜硫精矿的浮选分离,降低了矿山综合外排废水的pH值,达到了排放标准,同时有利于其他伴生有价值组分的综合回收,具有良好的经济效益和显著的社会效益。

其他无机抑制剂主要有氰化物、SO₂、高锰酸钾等^[38-39]。氰化物的抑制效果较好,但其具有毒性,容易造成环境污染^[40]。SO₂抑制能力比氰化物弱,但其毒性小、易被氧化成SO₃,废水易处理;同时,SO₂对黄铜矿有清洁、擦洗表面的作用,更有利于实现铜硫分离^[9]。高锰酸钾等氧化剂也是磁黄铁矿的有效抑制剂,研究表明其作用原理是调节矿浆电位形成氧化气氛使矿物表面形成亲水层的氧化物而受到抑制^[8]。

与无机抑制剂相比,有机抑制剂具有来源广、种类多、抑制性强等优点,受到广泛重视^[41-43]。巯基乙酸是硫化矿浮选分离中研究较多的有机抑制剂^[44-45],选矿生产中往往用该类药剂取代氰化物,不仅减少了污染环境的废气、废水、废渣,同时也改善了选矿生产的作业环境^[46]。张芹等^[47]研究表明,有机抑制剂RC对磁黄铁矿有抑制作用,RC为造纸废液中提取物,其结构中含有-COO⁻、-SO₃⁻、-OH等多种官能团,而这种官能团与黄药存在一种竞争吸附关系且携带众多的亲水基团,进而可以抑制磁黄铁矿。

螯合剂类也是磁黄铁矿的有效抑制剂。雷克别克等^[48-49]研究认为,单独使用EDTA和TATE对磁黄铁矿的抑制能力较弱,与SO₂或焦亚硫酸钠联合使用时,能大幅度增强对磁黄铁矿的抑制作用。二乙烯三胺和三乙烯四胺(多胺)是抑制能力强的螯合剂,当使用这种多胺时,磁黄铁矿表面吸附的黄药量明显降低。将这种多胺与焦亚硫酸钠配合使用时,镍黄铁矿与磁黄铁矿会得到更好的浮选分离效果。

2.2 黄铜矿与磁黄铁矿分离工艺的研究

黄铜矿与磁黄铁矿常用的浮选分离工艺包括混合浮选、优先浮选、联合分选等^[50]。在实际生产中,一般根据矿石性质和选矿产品的质量要求来选择适合的分选工艺^[51]。

2.2.1 混合浮选工艺

混合浮选工艺是先将黄铜矿以及矿石中其它有用矿物浮选出来,然后抑制其他矿物而将铜矿物浮出,获得符合要求的铜精矿^[52]。该工艺适合处理原矿品位低、矿石性质相对简单的矿石,具有节省磨矿及其费用、浮选设备、浮选药剂等优点^[49]。

肖骏等^[54]对土耳其安卡拉省某大型铜硫铁矿的选矿工艺进行优化,由于原矿中含有较多的磁黄铁矿,采用优先浮选方案以及常规抑制剂很难获得高品位的铜精矿产品,而采用混合浮选流程可将绝大部分的硫化矿物充分回收,分离研究在合

理的药剂制度上最终确定了采用硫化矿混浮-混浮精矿再磨再磁-混浮尾矿磁选回收磁铁矿工艺,该工艺可获得达到入冶标准的铜精矿、硫精矿、铁精矿,极大地提高了原矿的产出价值。吕良等^[55]针对豫西某高硫低铜铁矿石的特点采用混合浮选-铜硫分离的工艺流程,获得铜品位20.62%、回收率64.98%的铜精矿,硫品位为43.19%、回收率为91.56%的硫精矿,铜硫回收效果较好,同时该工艺较现场的优先浮选工艺流程更短、药剂用量更少、药剂成本更低。周晓文^[56]等针对江西某铜硫矿石的特点进行优先浮选与混合浮选两种工艺的对比试验研究,确定采用铜硫混浮-铜硫分离的浮选工艺处理该矿石,最终可获得铜品位为14.22%、铜回收率为87.58%的铜精矿和硫品位为34.01%、硫回收率为80.84%的硫精矿,从而使矿石中的铜、硫得到较好的综合回收。

2.2.2 优先浮选工艺

优先浮选工艺包括全优先浮选和部分优先浮选^[57]。全优先浮选工艺是根据黄铜矿与磁黄铁矿的可浮性差异,使用选择性好的高效黄铜矿捕收剂浮选铜矿物,得到铜精矿,选铜尾矿捕收硫得到硫精矿^[58];部分优先浮选工艺是将单体解离度好、可浮性较好的部分铜矿物先捕收优先浮选,实现部分铜矿物的快浮早收^[59-60]。

全优先浮选工艺适合于处理成分简单、可回收有用矿物种类不多、有用矿物之间的浮选差异较大,或者与黄铜矿共生的矿物能很好的被抑制,而又对黄铜矿可浮性无明显影响的矿石^[61]。邓冲等^[62]针对某铜硫硫化矿的特点采用“优先选铜-活化选硫”的工艺,最终得到铜品位为18.93%,铜回收率为94.31%的铜精矿,硫品位为33.46%,硫回收率为55.39%的硫精矿。

部分优先浮选工艺适用于处理可回收矿物种类多、有用矿物之间的浮选差异较大,即铜矿物的种类不同,其可浮性差异较大的矿石。田锋等^[59]针对某难选铜硫矿石的解离特性和可浮性差异进行浮选工艺改造优化,最终采用了部分优先浮选

新工艺,与原有工艺相比,显著提高了铜、金、银的浮选指标,有利于矿产资源的综合利用。

2.2.3 联合分选方法

对于含有较多磁黄铁矿,且其中的黄铜矿易受影响的矿石,可采用磁选和浮选联合的选矿方法,即先磁选脱除部分磁性强的磁黄铁矿,减小对浮选指标的影响,剩余磁黄铁矿再通过浮选方法脱除^[62]。

唐顺昌等^[63]针对某复杂铜铅锌硫化矿的特点就铜铅分离和铜硫分离做了系统地研究,由于该矿石含硫高,铜铅锌矿物与硫分离以及铜与铅锌分离难度大,非常复杂难选。因此,采用磁选-浮选联合工艺流程,先磁选脱除磁黄铁矿,消除其对后续浮选的影响,磁选尾矿采用优先浮选工艺回收铜,最终获得铜品位23.61%,铅品位0.85%,铜回收率74.16%的铜精矿,实现了铜铅硫的高效分离,得到了优良的指标。朱维成^[64]等对江西某含铜磁黄铁矿进行了选矿试验研究,采用磁选-浮选联合分选的工艺方法,得到较好的选矿指标,最终硫精矿品位为34.20%,硫回收率为94.50%;铜精矿品位为18.98%,铜回收率为56.10%。

3 铁矿脱硫的研究进展

硫是伴生在磁铁矿中的主要有害杂质,由于磁黄铁矿的特殊性质,使得铁矿脱硫困难,导致铁精矿中硫含量易超过我国铁精矿的质量标准,得不到合格的铁精矿^[65]。为此,采用合理的选矿方法脱除铁精矿中的磁黄铁矿,对于保护环境和提高选厂的经济效益具有重要的意义。

3.1 铁矿脱硫浮选药剂的研究

由于磁黄铁矿氧化程度较高,泥化严重,使得磁黄铁矿的可浮性很差,采用常规的浮选药剂难以脱除磁黄铁矿得到合格铁精矿^[66]。因此,寻找高效的磁黄铁矿的活化剂是铁矿脱硫的一个重要研究方向。

磁黄铁矿的活化剂主要有无机酸、有机酸、金属离子和硫化钠等,不同种类活化剂的活化机

理不同^[67]。无机酸主要能脱除磁黄铁矿表面亲水性氧化膜，使其表面的金属离子露出形成活化点；有机酸则不但能脱除磁黄铁矿表面亲水膜，还能与矿浆中抑制磁黄铁矿的 Ca^{2+} 发生络合反应，阻止磁黄铁矿表面 CaSO_4 的生成；金属离子能在磁黄铁矿表面形成离子活化点，从而吸附捕收剂，提高其可浮性；硫化钠能与磁黄铁矿表面发生硫化反应，增强捕收剂与矿物表面的吸附作用，从而提高磁黄铁矿表面的疏水性。由此可见，不同种类活化剂发挥作用的方式不同，通过不同种类活化剂的复合，能够起到更佳的活化效果。

组合活化剂主要是利用药剂之间的协同作用，增强药剂对磁黄铁矿的活化效果。大量试验研究表明，使用组合药剂对磁黄铁矿的活化效果明显强于单一药剂。饶峰等^[68]对云南文山某磁铁精矿进行浮选脱硫试验研究，做了硫酸铜、硫化钠、硫酸铜+硫化钠活化效果的对比试验。结果表明，在其他条件相同的前提下，使用组合药剂比单独使用硫酸铜、硫化钠效果好，硫的脱除率提高了0.91%。李付龙等^[69]对新疆某高硫磁铁精矿进行脱硫试验研究，采用硫酸为pH值介质调整剂，硫酸铜+硫化钠为活化剂以及组合捕收剂丁黄药+Y-89，成功将铁精矿中的铁品位由66.80%提高至68.72%，硫品位由2.71%降至0.055%，为矿山的提铁降硫提供了新的途径。

马鞍山矿山研究院自发研制的药剂MHH-1是磁黄铁矿的高效活化剂，具有效果好、用量少、成本低等优点，已应用于国内外的许多脱硫试验中，取得了较好的脱硫效果，李亮等^[70]对某进口高硫铁矿石进行了硫活化剂种类试验，使用MHH-1活化剂后铁精矿中硫含量大幅降低，降低至0.298%，选别指标明显优于使用硫酸铜作活化剂的指标。刘兴华等^[71]针对某细粒低品位铁矿石的性质使用磁黄铁矿高效活化剂CS和铁矿反浮选新型阳离子捕收剂YA进行了选矿试验研究，最终得到铁品位70.05%、硫品位0.16%、铁回收率73.17%的高品位铁精矿和硫品位25.86%、回收

率53.43%的硫精矿，有效实现了磁铁矿与磁黄铁矿的综合回收。赵志强^[72]对疆锋某含硫铁矿进行了深度降硫技术研究，采用新型活化剂TS并结合新型捕收剂DH，仅通过一次浮选降硫，就使得铁精矿铁品位由60%提高到66.74%，硫品位由1.8%降至0.087%，达到了深度降硫的目的。

3.2 铁矿脱硫的选矿工艺研究

3.2.1 阶段磨矿阶段选别脱硫选铁工艺

磨矿细度对选矿指标有较大的影响，不同磨矿细度的产品有不同的粒度组成，会影响矿物的单体解离度和可选性，细粒嵌布的铁矿石，只有细磨才能使矿物充分解离^[73]。对于嵌布粒度细、含硫铁矿类型单一的铁矿石，通常采用阶段磨矿—阶段选别工艺来实现铁矿降硫的目的^[74]。

某铁矿山矿石试样的铁品位为42.86%，通过阶段磨矿阶段选别全磁选工艺，同时合理控制流程中的精选次数和磁场强度，成功获得了铁品位为66.97%、回收率为80.31%的铁精矿^[75]。成建等^[76]针对安徽某铁矿石的特点在磁选过程中加入阶段磨矿阶段选别流程，最终得到品位为65.25%、回收率为80.33%的铁精矿。张彦明^[77]对某选厂硫铁矿石进行了选别工艺试验研究，采用磨矿-磁选-抛尾-磨矿-磁选的工艺流程，在保持铁精矿品位大于65.00%的前提下，铁回收率由86.43%提高到90.38%，铁精矿中的硫含量也明显降低，为该选厂工艺改造提供了科学依据。

3.2.2 磁选-浮选联合脱硫选铁工艺

磁选-浮选联合工艺是我国高硫铁矿石提铁降硫的有效工艺之一^[74]，将反浮选与磁选法结合起来，有利于提高磁铁矿石精矿品位。根据磁、浮工艺的先后顺序，该工艺又分为两种分选流程：

(1) 先磁后浮，即先磁选得到高硫铁精矿，再反浮选脱除铁精矿中的磁黄铁矿；(2) 先浮后磁，即先浮选脱除磁黄铁矿，再从浮选尾矿中磁选回收磁铁矿。

新建平等^[78]对陕西某铁矿石进行选矿试验研究，磁选后的高硫铁精矿经一粗一精一扫的反浮选

脱硫工艺, 最终获得含铁 66.90%、含硫 0.18%、铁回收率为 60.64% 的优质铁精矿。杨国锋等^[79]对白音敖包高硫磁铁矿进行了选矿试验研究, 原矿含硫 1.98%, 其中部分以磁黄铁矿的形式存在, 采用磁选-浮选联合工艺, 有效降低了铁精矿中硫含量, 最终获得铁品位为 65.20%、硫品位为 0.22% 的优质铁精矿, 为难处理铁矿资源开发利用提出了新的思路。邵伟华等^[80]对云南某矿石进行试验研究, 在含硫 5.71%、含铁 31.52% 的条件下, 采用先浮选后磁选的工艺流程, 最终得到含铁 65.36%, 含硫 0.171%, 铁回收率 81.67% 的铁精矿。陈雯^[81]针对某高硫低磷磁铁矿的特点进行工艺改造, 结果表明, 与原有工艺相比, 经过先浮选后磁选的工艺流程, 可将铁精矿品位提高到 66% 以上, 硫含量降至 0.3% 以下, 改变了该矿因产品硫含量过高而停产的局面。郭灵敏等^[82]对某尾矿中的硫、铁资源进行综合回收, 采用浮选-磁选-浮选联合选矿回收工艺, 成功地得到了硫品位 38.77% 的优质硫精矿和含铁 58.04%、含硫 0.547% 的合格铁精矿。

4 结 语

(1) 磁黄铁矿复杂多变的矿石性质, 是干扰磁黄铁矿型铜铁多金属矿中铜硫分离和铁矿脱硫的主要因素。对于解决磁黄铁矿型铜铁多金属矿的铜硫分离和铁矿脱硫问题, 国内外的选矿工作者做了大量的试验研究, 在浮选药剂和选矿工艺方面均取得的一定的研究进展。

(2) 浮选药剂方面, 选矿工作者针对性的研发了新型高效的黄铜矿捕收剂和磁黄铁矿抑制剂、活化剂, 并取得了一定的成效。但是, 新型药剂价格相对较高, 工业上大规模推广具有一定的难度; 有机抑制剂抑制能力强, 但选择性差; 新型活化剂存在高效性和污染性的矛盾。因此, 采用新技术简化药剂合成条件、降低药剂成本来研发高效低廉药剂, 对无机抑制剂和有机抑制剂组合使用、相互补充达到强化抑制的效果, 设计开发环保、易降解的高效活化剂是浮选药剂领域发展

的一个重要方向。

(3) 选矿工艺方面, 选矿工作者对浮选、磁选等传统的选矿方法进行简化、组合、优化来适应不同矿石的特点以提高选矿指标。随着可入选矿石资源的日益贫化, 进一步研究新型分选工艺以及电化学调控电位浮选、微生物冶金脱硫等新方法的加入也是磁黄铁矿型铜铁多金属矿分选的一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] 祁忠旭. 高硫难选铜矿石的浮选研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [2] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿 [M]. 北京: 有色金属工业出版社, 1987.
- [3] 孟宪瑜. 磁铁矿与磁黄铁矿的浮选分离的试验研究 [J]. 有色矿冶, 2011(5):16-17.
- [4] 邱显扬, 马先峰, 何晓娟, 等. 磁黄铁矿与黄铜矿浮选分离研究进展 [J]. 矿业工程, 2011(6):29-32.
- [5] 郭艳华, 廖雪珍, 杨俊龙. 某难选铜铁矿选矿试验研究 [J]. 甘肃冶金, 2015(2):13-17.
- [6] 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.
- [7] 覃武林. 高碱抑制硫铁矿及活化浮选机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [8] 李文娟, 宋永胜. 磁黄铁矿的浮选电化学及抑制剂研究概况 [J]. 矿冶, 2008(1):10-13.
- [9] 马先峰. 黄铜矿与磁黄铁矿分选行为机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [10] 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.
- [11] J.D.Miller, J.Li, J.C.Daviatz. A review of pyrrhotite flotation chemistry in the processing of PGM ores [J]. Minerals Engineering, 2005, 18: 855-865.
- [12] 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(1):64-67.
- [13] 杨菊, 吴熙群, 李成必. 难选磁黄铁矿浮选工艺研究 [J]. 有色金属, 2002(4):11-13.
- [14] 刘之能, 覃文庆, 张建文, 等. 六方磁黄铁矿浮选行为及其表面吸附机理 [J]. 矿冶, 2009(2):5-8.
- [15] 王运敏. 中国黑色金属矿选矿实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 孙传尧. 当代世界的矿物加工技术与装备-第十届选

- 矿年评[M].北京:科学出版社,2006.
- [17]Nicholson R.V., Scharer J.M.Environmental Geochemistry of sulfide oxidation[J].Washington DC:American Chemical Society, 1994, 14-30.
- [18]Laskowski J.S..Energy barrier in particle-to-bubble attachment on flotation kinetics[J].Mines&carriers.Les techniques, 1992, 95-100.
- [19]李崇德,孙传尧.铜硫浮选分离的研究进展[J].国外金属矿选矿,2000(8):2-7.
- [20]汤玉和,汪泰,胡真.铜硫浮选分离药剂的研究现状[J].材料研究与应用,2000(2):100-103.
- [21]朱玉霜,朱建光.浮选药剂的化学原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1987.
- [22]RCR. Remarks about the practice of flotation promoters of sulphide minerals[J].Metallic Ore Dressing Abroad, 2001(9):2-7.
- [23]丁大森,顾愚.应用提高铜绿山原生矿分选指标的研究[J].有色金属,1999(5):27-29.
- [24]李杰,钟宏,刘广义.硫化铜矿石浮选捕收剂的研究进展[J].铜业工程,2004(4):15-18.
- [25]汪泰,胡真,李汉文,等.用高效捕收剂PZO实现铜金硫多金属矿浮选分离的研究[J].材料研究与应用,2014(3):57-61.
- [26]汪泰,胡真,汤玉和,等.硫化铜矿新型捕收剂PZO的浮选性能与机理[J].金属矿山,2016(5):57-60.
- [27]左小华,谭元敏,苏振宏,等.硫化铜矿石浮选捕收剂的最新研究进展[J].应用化工,2015(9):1733-1736.
- [28]邱廷省,徐其红,匡敬忠,等.某复杂硫化铜矿铜硫分离试验研究[J].矿冶工程,2011(3):5-48.
- [29]刘广义,戴塔根,钟宏,等.T-2K捕收剂优先浮选永平铜矿的研究[J].矿冶工程,2003(3):22-24.
- [30]刘广义,钟宏,王晖,等.T-2K捕收剂优先浮选硫化铜矿的研究[J].金属矿山,2003(1):31-33.
- [31]刘广义,戴塔根,钟宏,等.T-2K捕收剂优先浮选高硫含铜矿石新工艺[J].有色金属,2003(3):87-89.
- [32]匡敬忠,李永峰,刘德华,等.铜硫分离中抑制剂的应用[J].矿业研究与开发,2013(5):51-54.
- [33]吴多吉,童雄,罗溪梅.强化铜-硫浮选分离的研究进展[J].矿冶,2010(3):9-14.
- [34]李兵.浅谈我国铜硫化矿选矿技术的现状及进展[J].企业技术开发,2015(3):09-110.
- [35]何桂春,吴艺鹏,冯金妮.低碱环境铜硫分离研究进展[J].有色金属科学与工程,2012(3):47-50.
- [36]欧乐明,冯其明,陈建华,等.低碱度铜硫分离新工艺工业应用[J].湖南有色金属,2001(3):9-11.
- [37]蔡振波,刘亮,吕炳军.江铜集团某铜矿低碱度铜硫分离工艺研究[J].现代矿业,2009(3):97-99.
- [38]胡军,宋剑华,王淀左,等.浮选药剂BET在煤与黄铁矿表面作用的ESCA分析[J].北京科技大学学报,2002(5):483-487.
- [39]杨令恩.汉源唐家铅锌矿石的选矿工艺研究[J].四川唐有色金属,2001(3):49-52.
- [40]徐竞,孙伟,张芹,等.新型有机抑制剂RC对黄铁矿和磁黄铁矿的抑制作用研究[J].矿冶工程,2003(6):27-29.
- [41]张剑峰,胡岳华,邱冠周.浮选有机抑制剂研究的进展[J].有色矿冶,2000(2):15-17.
- [42]罗仙平,邱廷省.方夕辉等黄铁矿低碱介质高效有机抑制剂的选择及其机理研究[J].江西科学,2001,19(2):79-82.
- [43]陈建华,冯其明,等.硫化铜有机抑制剂分子结构设计与作用原理[J].广西大学学报,2002(4):276-280.
- [44]Agar G E. Copper sulphide depression with thiogly -collate of trithiocarbonate[J].CIM Bulltin, 1984, 77 (872) : 43-47.
- [45]Nagaraj D R. Structure-activity relationships for copper depressants[J].Trans IMM, 1986 (2): 17-20.
- [46]刘奇英.铜钼分离抑制剂硫基乙酸钠合成工艺研究[D].西安:西北大学,2010.
- [47]张芹.铅铋锌铁硫化矿电化学浮选行为及表面吸附的研究[D].长沙:长沙中南大学,2004.
- [48]倪朝东,等.第二届全国矿产资源综合利用会议.1998.
- [49]S·克雷别克,吴成栋,太白.在复杂镍铜矿石处理时用螯合剂分离矿物[J].国外金属矿选矿,2000(11):26-29.
- [50]吴多吉,童雄,罗溪梅.强化铜-硫浮选分离的研究进展[J].矿冶,2010(2):9-14.
- [51]林靖杰.试析黄铜矿与磁黄铁矿的浮选分离机理及研究进展[J].化工管理,2016(9):71-71.
- [52]杨松荣,邱冠周.浮选工艺及应用[D].北京:冶金工业出版社,2015.
- [53]乔吉波.云南某难选铜矿石的选矿工艺研究[J].矿业研究与开发,2012(6):57-60.
- [54]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(3):48-53.
- [55]吕良,马驰,郭珍旭,等.豫西某高硫低铜铁矿石铜硫回收试验[J].金属矿山,2014(11):62-66.
- [56]周晓文,张志辉,温德新.江西某铜硫矿石浮选工艺研究[J].金属矿山,2014(4):99-103.
- [57]王勇军,尹曾根,王海波.某铜硫矿优先浮选工艺研究[J].矿产保护与利用,2011(3):15-18.
- [58]叶岳华,曾克文,王立刚,等.铜硫等可浮与有限浮

- 选工艺技术研究 [J]. 中国矿业, 2014(2): 225-229.
- [59] 田锋, 胡保栓, 孙运礼, 等. 难选铜硫矿石部分优先浮选新工艺研究 [J]. 矿产综合利用, 2012(6): 10-14.
- [60] 彭会清, 徐林, 李禄宏, 等. 某难选硫化铜矿石选矿工艺流程研究 [J]. 矿业研究与开发, 2006(4): 36-38.
- [61] 白丽梅, 李萌, 韩跃新, 等. 安徽某铜矿石工艺矿物学研究 [J]. 金属矿山, 2015(9): 80-84.
- [62] 邓冲, 邱廷省, 邱仙辉, 等. 某复杂铜硫矿石优先浮选工艺试验研究 [J]. 有色金属科学与工程, 2016(8): 73-79.
- [63] 唐顺昌, 朱雅卓, 胡波, 等. 高硫难选低品位铜铅锌矿铜铅硫分离浮选新工艺研究 [J]. 湖南有色金属, 2015(4): 20-24.
- [64] 朱维成. 含铜磁黄铁矿的选矿研究 [J]. 化工矿山技术, 1994(3): 30-31.
- [65] 陆冠伟, 等. 选矿设计手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [66] 赵冠飞. 高硫铁矿石脱硫选矿技术研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [67] 程建忠, 刘占全, 耿郑州, 等. 高硫磁铁矿浮选脱硫工艺及机理研究现状 [J]. 矿产保护与利用, 2013(5): 51-54.
- [68] 饶峰, 童雄, 黄宇林, 等. 云南文山某铁精矿脱硫的试验研究 [J]. 云南冶金, 2007(5): 13-16.
- [69] 李付龙, 关翔, 李田. 新疆某高硫磁铁矿精矿脱硫试验研究 [J]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集, 2015.
- [70] 李亮. 新型活化剂 MHH-1 在分离磁黄铁矿与磁铁矿中的应用 [J]. 矿业快报, 2004(6): 50-51.
- [71] 刘兴华, 廖振鸿, 严小虎, 等. 磁铁矿与系黄铁矿综合回收试验 [J]. 矿冶工程, 2014(4): 48-51.
- [72] 赵志强. 含硫铁矿深度降硫技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [73] 章晓林, 徐翔, 魏志聪. 磨矿细度对钛铁矿浮选指标的影响 [J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2010(5): 6-9.
- [74] 邱廷省, 赵冠飞, 朱冬梅, 等. 含硫铁矿石脱硫技术研究现状 [J]. 矿山机械, 2013(3): 62-65.
- [75] 许开, 余丽萍. 提高某磁铁矿精矿质量试验研究 [J]. 矿产保护与利用, 2011(4): 33-35.
- [76] 成建, 岳紫龙. 安徽某铁矿选矿工艺流程探讨 [J]. 矿产保护与利用, 2006(12): 33-35.
- [77] 张彦明. 利用阶段磨矿阶段选别工艺提高回收率试验研究 [J]. 矿业快报, 2004(1): 24-26.
- [78] 靳建平, 李英, 吴天娇, 等. 山西某韩流磁铁矿选矿试验 [J]. 现代矿业, 2016(1): 91-93.
- [79] 杨国锋, 张光平. 白音敖包高硫磁铁矿选矿工艺流程试验研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2009(1): 85-86.
- [80] 邵伟华, 杨波. 降低铁精矿含硫的试验研究 [J]. 金属矿山, 2006(8): 23-26.
- [80] 李冰, 王小玉. 桓仁某铁矿选矿试验研究 [J]. 现代矿业, 2009(9): 33-36.
- [81] 陈雯. 浮选分离某磁铁矿和富含磁黄铁矿的试验研究 [J]. 金属矿山, 2003(5): 33-35.
- [82] 郭灵敏, 许小健. 某铅锌矿尾矿硫铁矿资源综合回收工艺试验研究 [J]. 矿产保护与利用, 2011(8): 45-48.

Research Progress ion Beneficiation of Pyrrhotite Type Copper -iron Polymetallic Ore

Wang Shuangyu¹, Yuan Zhitao¹, Liu Lei², Meng Qingyou¹, Li Lixia¹

(1.School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China;

2.Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, Ministry of Land and Resources, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: According to the difficulty of separating magnetic pyrite type copper iron polymetallic ore and combined with the special nature of pyrrhotite, mainly from two aspects of flotation reagents and mineral processing technology of copper sulfur separation desulfurization iron ore mineral processing at home and abroad the research status and progress of magnetic iron pyrite type copper polymetallic ore

Keywords: Pyrrhotite; Separation of copper and sulfur; Desulfurization of iron ore; Flotation reagent; Mineral Processing