

粒度大小对赤铁矿和石英浮选分离的影响

李 东¹⁾, 李正要¹⁾✉, 印万忠²⁾, 孙春宝¹⁾, 寇 珏¹⁾, 姚 金²⁾, 韩会丽²⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819

✉通信作者, E-mail: zyli0213@ustb.edu.cn

摘 要 通过浮选试验、DLVO 理论计算、聚焦光束反射测量(FBRM)等研究了油酸钠浮选体系下粒度大小对赤铁矿和石英浮选分离的影响。人工混合矿浮选试验表明, 窄粒级粗粒或中等粒级的赤铁矿-石英混合矿(CH&CQ 和 MH&CQ)的浮选效果较好, 其中 CH&CQ 和 MH&CQ 的分选效率分别为 85.49% 和 84.26%, 明显高于全粒级混合矿(RH&RQ)的分选效率 74.94%; 但窄粒级的细粒赤铁矿-石英混合矿(FH&FQ)的浮选效果则较差, 其分选效率只有 54.98%。浮选动力学试验表明, 赤铁矿的浮选速率和回收率不仅与赤铁矿的粒度有关, 还受石英粒度的影响, 细粒脉石矿物石英会降低赤铁矿的浮选速率和回收率。DLVO 理论计算表明, 当矿浆 pH 值为 9.0 时, 石英与赤铁矿颗粒间的相互作用力为斥力, 此时细粒石英很难“罩盖”在赤铁矿表面并通过这种“直接作用”的方式抑制赤铁矿浮选, 这也与聚焦光束反射测量(FBRM)的测定结果基本一致; 颗粒-气泡碰撞分析表明, 在浮选过程中细粒石英可能通过“边界层效应”的方式跟随气泡升浮(夹带作用), 影响赤铁矿颗粒与气泡间的碰撞及黏附, 从而降低了赤铁矿的浮选速率和回收率。

关键词 赤铁矿; 石英; 浮选分离; 粒度; DLVO 理论

分类号 TD923

Effect of particle size on flotation separation of hematite and quartz

LI Dong¹⁾, LI Zheng-yao¹⁾✉, YIN Wan-zhong²⁾, SUN Chun-bao¹⁾, KOU Jue¹⁾, YAO Jin²⁾, HAN Hui-li²⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

✉ Corresponding author, E-mail: zyli0213@ustb.edu.cn

ABSTRACT Generally, the flotation performance of mineral particles in a wide size range is usually poor, which can be attributed to the high reagent consumptions and low floatability differences between valuable and gangue minerals. Classification flotation is an effective method for improving the flotation efficiency of particles in a wide size range and is commonly used for coal slime. However, for refractory iron ores, the literature on the relative technology and basic theory of classification flotation, which are necessary and beneficial for the effective utilization of refractory iron ore resources, is scarce. In this study, flotation tests, DLVO theory calculations, and focused beam reflectance measurement (FBRM) particle size analysis were used to analyze the effect of particle size distribution on the flotation separation of hematite and quartz in the sodium oleate system. The flotation results of artificial mixtures show that the flotation performance of coarse or medium hematite-quartz mixture (such as CH&CQ and MH&CQ) with a narrow size range is better than that of the wide size range mixtures. The separation efficiency of CH&CQ and MH&CQ is 85.49% and 84.26%, respectively, which is higher than that of the wide size range mixtures (74.94%). However, the separation efficiency of fine hematite-quartz mixture with a narrow size range (FH&FQ) decreases to 54.98%. The flotation kinetic tests demonstrate that the flotation rate and recovery of hematite are not only related to the particle size of hematite but also influenced by the particle size of quartz. The fine quartz particles

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904020); 中国博士后科学基金资助项目(2019M660466); 中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-TP-18-082A1)

could reduce the hematite flotation rate and recovery. The DLVO theory calculations demonstrate that the interaction energies between hematite and quartz are repulsive, indicating that fine quartz particles scarcely cover the hematite surface to depress floatability, which is consistent with the FBRM results. The bubble-particle collision analysis indicates that the collision between hematite and bubbles might be influenced by the “boundary layer” effects of fine quartz particles, resulting in the decreased bubble-particle efficiency of collision and attachment, which may explain the decrease in hematite flotation rate and recovery.

KEY WORDS hematite; quartz; flotation separation; particle size; DLVO theory

我国的铁矿资源具有“贫”、“细”、“杂”的特点,其中相当比例的铁矿石矿物组成复杂、嵌布粒度不均匀,导致其碎磨处理后的浮选物料一般粒级较宽^[1-2]。一般来说细粒矿物的表面活性更高且在矿浆中的弥散度更好,因此当入浮物料的粒级过宽时,药剂会优先吸附于细粒矿物的表面,从而很难有效地作用于粗粒矿物^[3-5]。同时对于矿物组成复杂的矿石来说,粒级过宽还可能导致“难浮矿物”的宜浮粒级与“易浮矿物”的难浮粒级(粒度过粗或过细)具有相似的可浮性,此外宽粒级的物料还更容易发生细粒脉石矿物在粗粒目的矿物表面的“黏附罩盖”等现象,增大矿物间浮选分离的难度^[6-8]。总的来说,浮选入料的粒级过宽会从多方面对浮选的分选指标及效率产生不利影响。

分级浮选是指对磨矿后的产品进行分级,按矿石粒度分成粗、细等几部分分别进行浮选,其中不同粒级矿物可以根据各自的浮选特性得到优化,该工艺能够在一定程度上减弱浮选过程中物料粒级过宽所带来的不利影响^[9-12]。目前分级浮选工艺在煤泥分选中的应用较为常见,但大多数研究主要是关于分级设备选择、分级粒度确定等工艺流程参数方面的内容,而在基础理论方面则相对欠缺^[13-14]。鉴于此,本文主要针对复杂难选铁矿石碎磨物料粒级过宽的问题,以赤铁矿和石英为

研究对象,系统地对宽粒级和窄粒级人工混合矿的浮选分离效果,从浮选动力学、颗粒间相互作用、颗粒-气泡碰撞分析等方面探索了石英粒度对赤铁矿浮选的影响机理,旨在研究赤铁矿-石英浮选分离过程中的粒度效应,为分级浮选工艺应用于铁矿石分选提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用矿样(赤铁矿和石英)取自辽宁鞍山地区,经过破碎—手选除杂—磨矿—摇床等处理后得到纯度较高的赤铁矿和石英,然后通过标准筛湿筛的方法制得-106、-106+74、-74+38和-38 μm 四个粒级。为方便表述,RH(全粒级)、CH(粗粒级)、MH(中等粒级)、FH(细粒级)分别表示粒级为-106、-106+74、-74+38、-38 μm 的赤铁矿;同理,粒级为-106、-106+74、-74+38、-38 μm 的石英分别用RQ(全粒级)、CQ(粗粒级)、MQ(中等粒级)、FQ(细粒级)表示。X射线衍射和化学多元素分析结果分别如图1和表1所示,可以看出赤铁矿和石英的纯度分别在95%和99%以上,满足试验的要求。不同粒级矿样的粒度分布特性由激光粒度仪(Mastersizer 3000)测得,其中 D_{50} 表示粒径小于 D_{50} 的颗粒数占总颗粒数的50%时所对应的颗粒粒径,结果如图2所示。

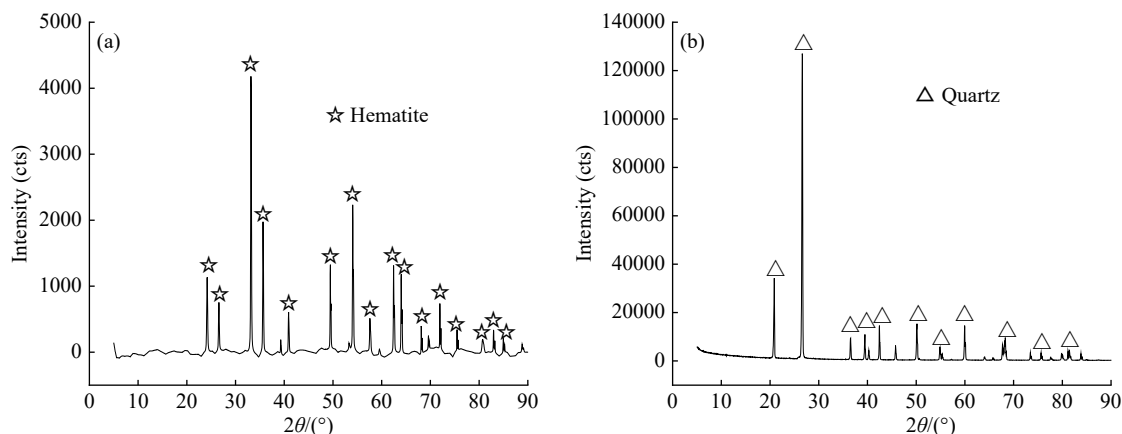


图1 赤铁矿和石英的X射线衍射图。(a) 赤铁矿; (b) 石英

Fig.1 X-ray diffraction spectra of hematite and quartz: (a) hematite; (b) quartz

表 1 单矿物化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical element analysis results of single minerals								%
Minerals	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	P	S
Hematite	68.17	0.43	1.65	0.28	0.04	0.08	0.02	0.05
Quartz	0.02	—	99.22	0.04	—	0.05	—	—

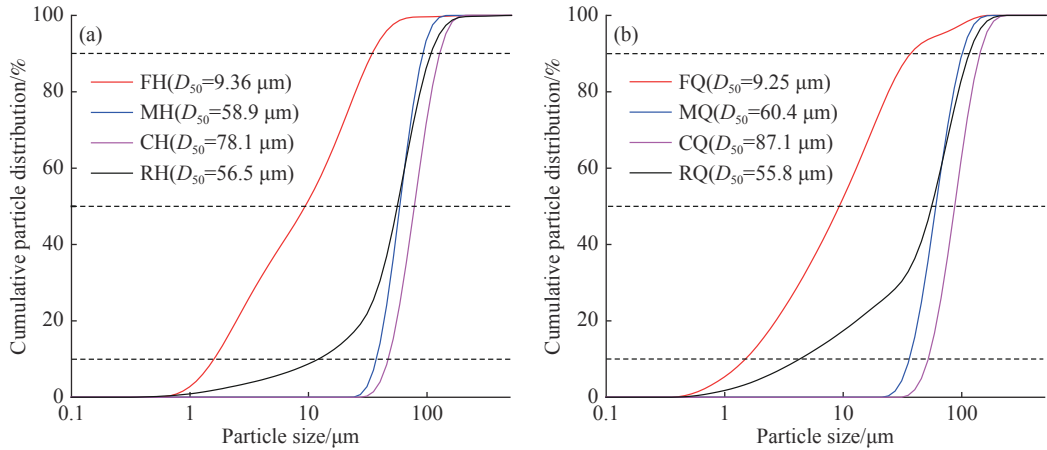


图 2 矿物粒度的累积分布曲线. (a) 赤铁矿; (b) 石英
Fig.2 Cumulative particle distributions of minerals: (a) hematite; (b) quartz

1.2 试验方法

1.2.1 浮选试验

赤铁矿-石英人工混合矿的浮选分离试验在 Denver 浮选机上进行, 每次称取 100 g 混合矿样(赤铁矿与石英的质量比为 3 : 2)置于 1.5 L 的浮选槽内并加入适量去离子水, 浮选机转速设为 1000 r·min⁻¹, 搅拌 2 min 后按照试验要求依次加入 pH 调整剂、捕收剂, 每次加药后均调浆 3 min, 最后在浮选机中充入空气(充气量为 5 L·min⁻¹)后浮选刮泡 5 min. 所得的泡沫产品和槽内产品分别烘干、称重、化验、计算品位与回收率, 浮选原理及药剂制度如

图 3 所示.

1.2.2 分选效率

分选效率是反映选矿工艺过程的综合性指标, 当无分选作用时, 其数值为 0; 当分选效果最理想时, 其数值为 100%, 本文中采用的分选效率公式如下:

$$E = \frac{\varepsilon - \gamma}{1 - \alpha/\beta_x} \% \tag{1}$$

其中, ε 为回收率, γ 为精矿产率, α 为原矿品位, β_x 为目的矿物中 有用组分的品位^[15].

1.2.3 动电位测试

首先将待测矿物磨细至 5 μm 左右, 每次称取

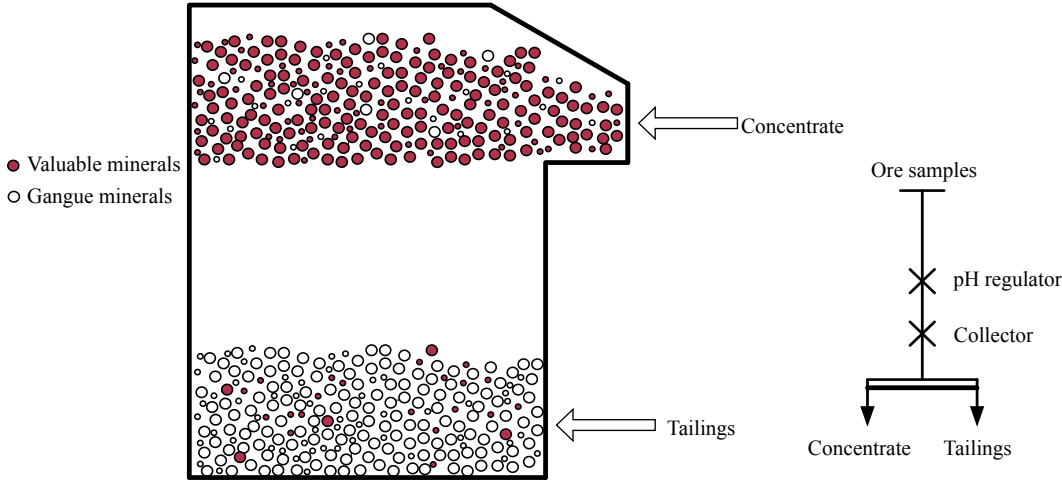


图 3 赤铁矿-石英混合矿浮选分离原理和药剂制度示意图
Fig.3 Schematic of the flotation separation principle and reagent regime for hematite-quartz mixtures

100 mg 置于烧杯中并加入 100 mL 去离子水, 按照试验要求调节矿浆 pH 值并加入适量药剂, 经过磁力搅拌器搅拌一定时间后, 吸取适量的矿浆悬浮液通过 Zeta 电位分析仪(Nano ZS-90)进行矿物(赤铁矿和石英)的动电位测量。

1.2.4 聚焦光束反射测量(FBRM)分析

聚焦光束反射测量技术(Focused beam reflectance measurement, FBRM)能在高浓度且不透明的溶液体系中对颗粒粒径及颗粒数目进行实时在线地测量^[16-17]。FBRM 的测量系统如图 4 所示, 本试验采用的 FBRM 设备型号为 Mettler Toledo G400, 试验过程中首先将 2 g 矿样置于烧杯中并加入 200 mL 去离子水, 然后按照试验要求通过 FBRM 探头对

矿浆中颗粒(絮团)的粒径分布等进行测定。

2 结果与讨论

2.1 粒度对赤铁矿-石英混合矿浮选分离的影响

首先探索了粒度的大小和分布对赤铁矿-石英人工混合矿浮选分离的影响, 不同粒度组成的赤铁矿-石英混合矿的精矿铁品位、铁回收率及分选效率如图 5 所示, 其中分选效率是依据式(1)计算得到的。从图 5 中可以看出, 全粒级人工混合矿 RH&RQ 的分选效率为 74.94%, 当脉石矿物为粗粒石英(CQ)时, CH&CQ 和 MH&CQ 的分选效率分别为 85.49% 和 84.26%, 均高于 RH&RQ 的分选效率(74.94%), 而 FH&CQ 的分选效率(71.06%)

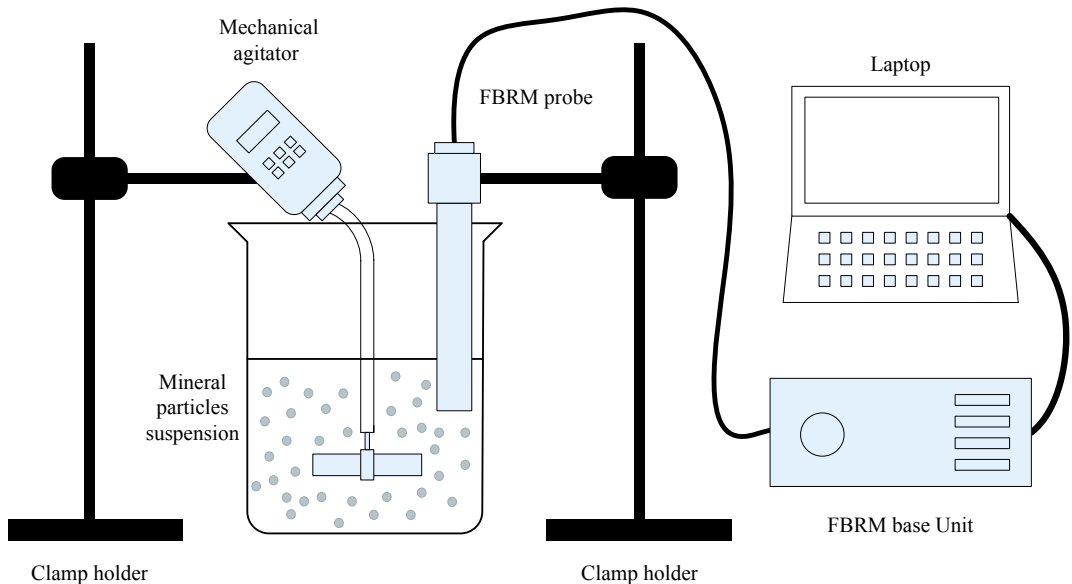


图 4 聚焦光束反射测量系统示意图

Fig.4 Schematic of the focused beam reflectance measurement (FBRM) system

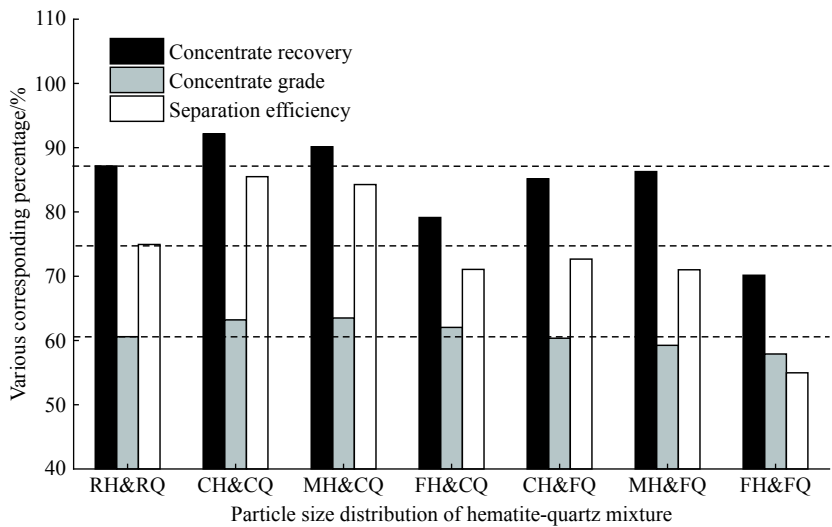


图 5 粒度对赤铁矿-石英混合矿浮选分离的影响(pH, 9.0; 油酸钠, 每吨 400 g)

Fig.5 Influence of particle size on the separation of hematite and quartz (pH, 9.0; sodium oleate, 400 g per ton)

则略低于 74.94%; 当脉石矿物为细粒石英 (FQ) 时, CH&FQ 和 MH&FQ 的分选效率分别为 72.66% 和 71.00%, 略低于 RH&RQ 的分选效率 (74.94%), 但 FH&FQ 的分选效率仅为 54.98%, 明显低于 74.94%。

因此, 对赤铁矿-石英混合矿来说, 窄粒度粗粒或中等粒级的赤铁矿-石英混合矿的浮选效果较好, 其中 CH&CQ 和 MH&CQ 的分选效率明显高于全粒度混合矿 RH&RQ 的分选效率; 但窄粒度细粒的赤铁矿-石英混合矿 FH&FQ 的浮选效果较差, 其分选效率显著降低。所以对物料进行分级处理, 有利于强化粗粒部分的浮选分离, 但细粒部分的浮选效果则较差。从图 5 中还可以看出浮选精矿中赤铁矿的回收率不仅与赤铁矿的粒度有关, 也受脉石矿物石英的影响, 细粒石英在一定程度上会降低赤铁矿的浮选回收率, 如 FH&CQ 中赤铁矿的浮选回收率为 79.14%, 但 FH&FQ 中赤铁矿的浮选回收率则为 70.15%。

2.2 赤铁矿浮选动力学研究

在上述研究的基础上, 为进一步探索脉石矿物石英对目的矿物赤铁矿浮选的影响, 对比了不同粒度赤铁矿与不同粒度石英的浮选分离效果, 精矿中铁回收率与浮选时间的关系如图 6~8 所示, 同时根据一级浮选动力学方程 (式 (2)) 对试验数据进行了拟合, 拟合方程的相关性系数 R^2 均在 0.99 以上。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中: ε_t 为浮选 t 时间后的累积回收率, %; ε_∞ 为最大回收率, %; t 为浮选时间, min; k 为浮选速率常数, min^{-1} 。

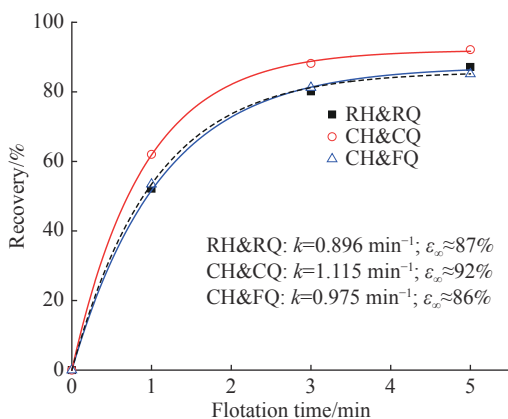


图 6 石英粒度对粗粒级赤铁矿 (CH) 浮选的影响 (pH, 9.0; 油酸钠, 每吨 400 g)

Fig.6 Influence of quartz particle size on the flotation of hematite (CH) (pH, 9.0; sodium oleate, 400 g per ton)

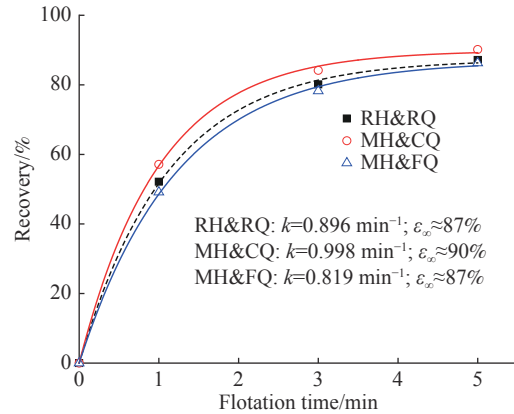


图 7 石英粒度对中等粒级赤铁矿 (MH) 浮选的影响 (pH, 9.0; 油酸钠, 每吨 400 g)

Fig.7 Influence of quartz particle size on the flotation of hematite (MH) (pH, 9.0; sodium oleate, 400 g per ton)

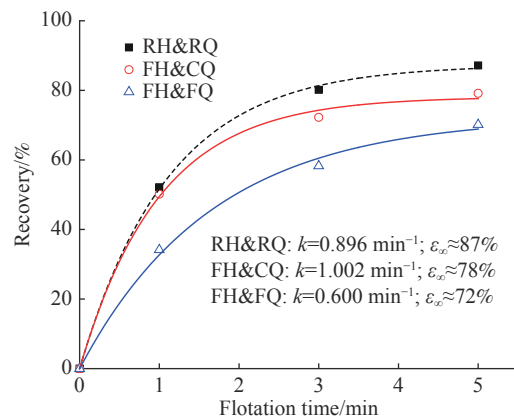


图 8 石英粒度对细粒级赤铁矿 (FH) 浮选的影响 (pH, 9.0; 油酸钠, 每吨 400 g)

Fig.8 Influence of quartz particle size on the flotation of hematite (FH) (pH, 9.0; sodium oleate, 400 g per ton)

从图 6 中可以看出, 赤铁矿-石英混合矿 CH&CQ 与 RH&RQ 相比, 浮选速率常数 k 由 0.896 min^{-1} 提高至 1.115 min^{-1} , 最大回收率 ε_∞ 由 87% 提高至 92%; 而 CH&FQ 与 RH&RQ 相比, 浮选速率常数 k 由 0.896 min^{-1} 提高至 0.975 min^{-1} , 最大回收率 ε_∞ 基本不变。上述结果表明窄粒度粗粒赤铁矿 (CH) 的浮选效果优于宽粒级的赤铁矿 (RH), 但石英的粒度也会影响赤铁矿的浮选, 细粒级石英 (FQ) 会降低粗粒赤铁矿 (CH) 的浮选速率和回收率, 如 CH&FQ 与 CH&CQ 相比, 浮选速率常数 k 和最大回收率 ε_∞ 分别由 1.115 min^{-1} 和 92% 降低至 0.975 min^{-1} 和 86%。

从图 7 中可以看出, 赤铁矿-石英混合矿 MH&CQ 与 RH&RQ 相比, 浮选速率常数 k 由 0.896 min^{-1} 增加至 0.988 min^{-1} , 最大回收率 ε_∞ 由 87% 增加到 90%, 这表明窄粒级的中等粒级赤铁矿 (MH) 的浮选效果优于宽粒级的赤铁矿 (RH); 但 MH&FQ 与

MH&CQ 相比, 浮选速率常数 k 和最大回收率 ε_{∞} 则分别由 0.998 min^{-1} 和 90% 降低至 0.819 min^{-1} 和 87%, 表明细粒石英(FQ)的存在同样不利于中等粒级赤铁矿(MH)的浮选。

从图 8 中可以看出, 与粗粒级赤铁矿(CH)和中等粒级赤铁矿(MH)相比, 石英的粒度对细粒级赤铁矿(FH)浮选的影响更加明显, 如 FH&FQ 与 FH&CQ 相比, 浮选速率常数 k 和最大回收率 ε_{∞} 分别由 1.002 min^{-1} 和 78% 降低为 0.600 min^{-1} 和 72%。为了能够更加直观地描述粒度对赤铁矿和石英浮选分离过程的影响, 根据 Fuerstenau 提质公式(式(3))绘制了赤铁矿-石英混合矿的提质曲线, 结果如图 9 所示。

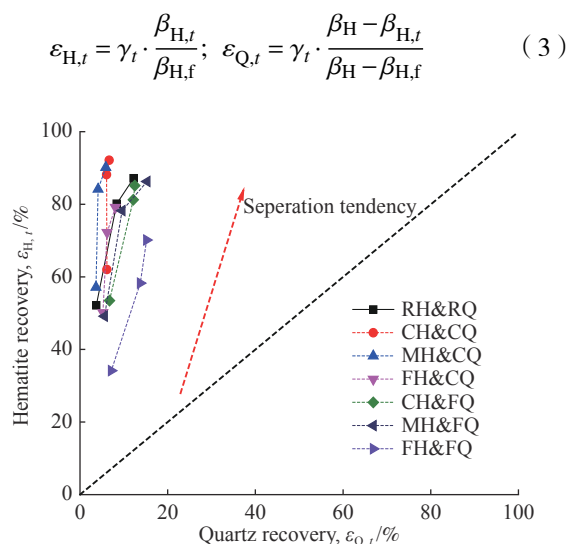


图 9 不同粒度组成的赤铁矿-石英混合矿的提质分离曲线(pH, 9.0; 油酸钠, 每吨 400 g)

Fig.9 Upgrading curves of hematite-quartz mixtures with different particle sizes (pH, 9.0; sodium oleate, 400 g per ton)

式中: $\varepsilon_{H,t}$ 和 $\varepsilon_{Q,t}$ 分别为浮选时间为 t 时精矿中赤铁矿和石英的回收率, %; γ_t 为浮选时间为 t 时的精矿产率, %; β_H 、 $\beta_{H,t}$ 、 $\beta_{H,f}$ 分别为赤铁矿单矿物中的铁品位、原矿中的铁品位、浮选时间为 t 时精矿中的铁品位, %。

从图 9 中可以看出, 不同粒度组成的赤铁矿-石英混合矿通过浮选均可得到不同程度的富集, 当目的矿物为粗粒赤铁矿(CH 和 MH)或脉石矿物为粗粒石英(CQ)时的分选效果较好; 当目的矿物为细粒赤铁矿(FH)且脉石矿物为细粒石英(FQ)时分选效果较差。其中 FH&FQ 与 FH&CQ 相比, 精矿中赤铁矿的回收率降低地最为明显, 这说明细粒的脉石矿物石英会降低目的矿物赤铁矿的回收率, 并且这种抑制作用对于细粒赤铁矿更

加强烈, 这也与上述浮选动力学的试验结果基本一致。

2.3 赤铁矿与石英颗粒间的相互作用

浮选动力学试验表明赤铁矿的浮选与石英粒度有关, 当细粒石英存在时, 赤铁矿(尤其是细粒赤铁矿)的浮选速率和回收率均会降低。石英作为脉石矿物具有较强的亲水性, 因此如果石英颗粒与赤铁矿发生“异相凝聚”或在赤铁矿表面“黏附罩盖”, 则会抑制赤铁矿的浮选。基于上述分析, 为探索细粒石英(FQ)抑制细粒赤铁矿(FH)浮选的作用机理, 本节主要通过 DLVO 理论计算和聚焦光束反射测量技术(FBRM)研究了矿浆中赤铁矿与石英颗粒间的相互作用。

DLVO 理论作为描述溶液中带电胶粒稳定性的经典理论, 多数情况下能够准确预测溶液中矿物颗粒的分散/团聚行为^[18]。根据 DLVO 理论, 颗粒间总的相互作用能 V_{TD} 由以下两部分组成: 1) 长程范德华力, V_W ; 2) 静电力, V_E 。

$$V_{TD} = V_W + V_E \quad (4)$$

上述各部分的作用能(V_W 、 V_E)分别按照下式计算:

1) 长程范德华力, V_W

$$V_W = -\frac{A_{132}r_1r_2}{6H(r_1+r_2)} \quad (5)$$

其中,

$$A_{132} = (\sqrt{A_1} - \sqrt{A_3})(\sqrt{A_2} - \sqrt{A_3}) \quad (6)$$

式中, A_1 和 A_2 分别表示矿物 1 和矿物 2 的 Hamaker 常数, A_3 表示介质 3 的 Hamaker 常数, H 为两个球形颗粒间的距离, r_1 和 r_2 分别为两球形颗粒的半径, 均假设为 $5 \mu\text{m}$, A_{132} 表示矿物 1 和矿物 2 在介质 3 中的 Hamaker 常数。在本文中, 赤铁矿、石英、水在真空中的 Hamaker 常数分别取值为 23.20×10^{-20} 、 5.0×10^{-20} 、 $4.0 \times 10^{-20} \text{ J}$ 。

2) 静电力, V_E

$$V_E = \frac{\pi\eta_0\eta_r r_1 r_2}{r_1 + r_2} (\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2) \left(\frac{2\varphi_{01}\varphi_{02}}{\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2} p + q \right) \quad (7)$$

其中,

$$p = \ln\left(\frac{1 + e^{-\kappa H}}{1 - e^{-\kappa H}}\right), q = \ln(1 - e^{-2\kappa H}) \quad (8)$$

式中, η_0 和 η_r 分别为真空的介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) 和水的相对介电常数 ($\eta_r=81$)。 φ_{01} 和 φ_{02} 分别表示赤铁矿和石英的 Zeta 电位, 结果如图 10 所示, 赤铁矿和石英颗粒的 Zeta 电位与矿浆 pH 值

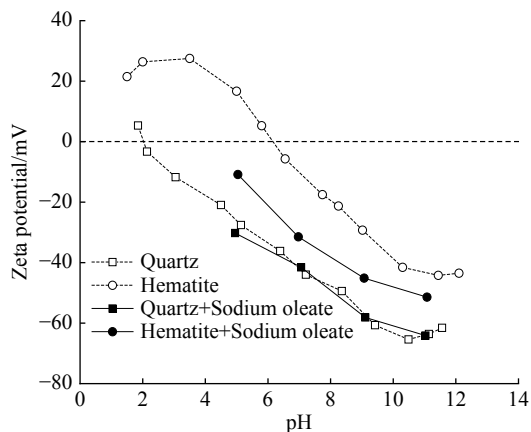


图 10 矿物的 Zeta 电位与 pH 的关系曲线(油酸钠, $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig.10 Relationship between zeta potentials and pH values (sodium oleate, $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

密切相关, 油酸钠在一定程度上会降低赤铁矿的表面电位, 但对石英的表面电位几乎没有影响。 κ 是 Debye 常数, 本次计算中取值为 0.104 nm^{-1} [18]。

根据式(4)~(8)计算了溶液中赤铁矿与石英颗粒间的相互作用力, 结果如图 11 所示。从图中可以看出, 当矿浆 pH 值为 9.0 时, 赤铁矿与石英颗粒间的相互作用力为明显的斥力; 当加入油酸钠后, 带负电的油酸根离子则会吸附在赤铁矿表面, 使其电负性增强(如图 10 所示), 导致赤铁矿与石英颗粒间的斥力进一步增大。因此, 根据 DLVO 理论的计算结果可知, 在浮选过程中细粒的石英颗粒很难“罩盖”在赤铁矿表面。

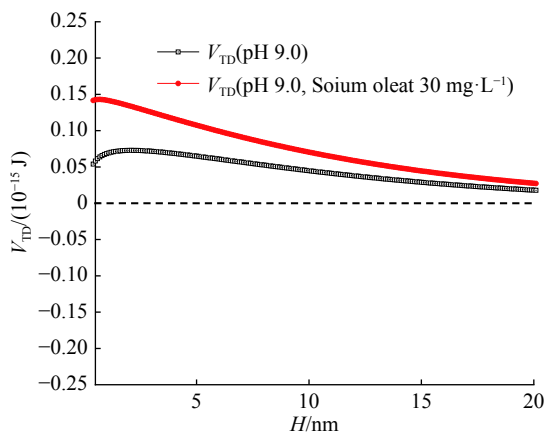


图 11 赤铁矿与石英颗粒间的相互作用力 V_{TD}

Fig.11 Interaction energies V_{TD} between hematite and quartz particles

赤铁矿-石英混合矿的 FBRM 分析结果如图 12 所示。其中, 矿浆中微细颗粒($<10 \mu\text{m}$)和中等颗粒($10 \sim 50 \mu\text{m}$)的含量采用非加权平均(No-weighted)的方式表示, 粗颗粒($>50 \mu\text{m}$)的含量采用平方平均(Square-weighted)的方式表示。从图中可以看出, 在油酸钠加入前矿浆中颗粒的平均粒

径(Median chord length)、微细颗粒的含量、中等颗粒的含量等基本保持不变, 表明此时矿浆中未发生颗粒间的团聚; 在油酸钠加入后, 矿浆中颗粒的平均粒度逐渐增大, 同时微细粒含量逐渐降低且中等颗粒和粗颗粒含量逐渐上升, 这表明在油酸钠的作用下矿浆中生成了新的絮团, 根据已知的文献资料 [19], 推测该絮团主要是赤铁矿颗粒在油酸钠的疏水作用下诱导生成的, 与脉石矿物石英基本无关。综上所述, DLVO 理论计算及 FBRM 分析结果表明细粒石英很难“罩盖”在赤铁矿表面并通过这种“直接作用”的方式抑制赤铁矿浮选。

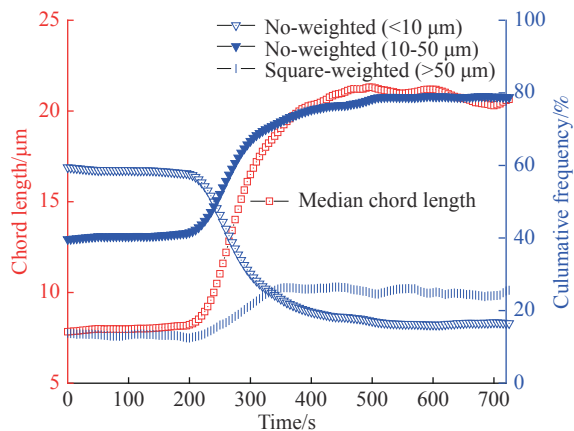


图 12 赤铁矿-石英混合矿的粒度分布特性随时间变化的关系曲线 (pH, 9.0; 搅拌速度, $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; 油酸钠($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 在 180 s 处加入到矿浆中)

Fig.12 Particle/aggregate size distribution of hematite-quartz mixtures as a function of stirring time (pH, 9.0; stirring speed, $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; sodium oleate ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) was added at 180 s)

根据经典的浮选理论, 浮选过程中矿粒在气泡表面的附着过程可分为碰撞、黏附、脱附三个阶段, 因此气泡对矿粒的捕获概率 P 可以表示为:

$$P = P_c P_a (1 - P_d) \quad (9)$$

其中, P_c 为矿粒与气泡的碰撞概率, P_a 为矿粒与气泡的黏附概率, P_d 为矿粒与气泡的脱附概率。虽然目前关于颗粒与气泡碰撞、黏附、脱附等的理论公式都只是单一地考虑目的矿物的性质(如粒度大小、表面物理化学性质等), 但实际浮选过程中亲水性的脉石矿物也可能对目的矿物在气泡表面的附着行为产生影响。

泡沫夹带是浮选过程中不可避免的一种现象, 对于微细粒矿物的浮选来说则更加明显, 微细粒的脉石矿物可以通过夹带作用进入到精矿中, 这也是微细粒矿物的分选效率和精矿质量偏低的重要原因之一。根据经典的边界层理论(Boundary

layer theory), 气泡升浮过程中由于流体力学的作用气泡边界会形成一层液膜, 被液膜包裹的部分矿物颗粒会随气泡一起进入泡沫层而成为精矿, 这种边界层效应也是微细粒矿物产生夹带作用最主要的方式之一^[20-21]。因此当赤铁矿-石英混合矿中石英的粒度较细时, 在浮选过程中石英的夹带作用会明显增强, 大量的石英颗粒会夹带在升浮气泡的边界液膜中, 因此石英颗粒的这种“边界层效应”会引起目的矿物赤铁矿与气泡碰撞的流体动力学条件的改变, 在一定程度上降低赤铁矿与气泡的有效碰撞及黏附的概率, 这可能也是细粒石英会降低赤铁矿浮选速率及回收率的主要原因。

3 结论

(1) 人工混合矿浮选试验表明, 窄粒级粗粒或中等粒级的赤铁矿-石英混合矿的浮选效果较好, 其中 CH&CQ 和 MH&CQ 的分选效率分别为 85.49% 和 84.26%, 明显高于全粒级混合矿 RH&RQ 的分选效率 74.94%; 但窄粒级细粒的赤铁矿-石英混合矿 FH&FQ 的浮选效果较差, 其分选效率只有 54.98%。

(2) 浮选动力学试验表明, 赤铁矿的浮选速率和回收率不仅与赤铁矿的粒度有关, 还受石英粒度的影响, 细粒石英会降低赤铁矿的浮选速率和回收率, 其中 FH&FQ 与 FH&CQ 相比, 浮选速率常数 k 和最大回收率 ε_{∞} 分别由 1.002 min^{-1} 和 78% 降低为 0.600 min^{-1} 和 72%。

(3) DLVO 理论计算表明当矿浆 pH 值为 9.0 时, 石英与赤铁矿颗粒间的相互作用力为斥力, 细粒石英很难“罩盖”在赤铁矿表面并通过这种“直接作用”的方式抑制赤铁矿浮选, 这也与聚焦光束反射测量(FBRM)的测定结果基本一致。颗粒-气泡碰撞分析表明在浮选过程中细粒石英可能通过“边界层效应”的方式跟随气泡升浮(夹带作用), 影响赤铁矿颗粒与气泡的有效碰撞及黏附, 从而降低了赤铁矿的浮选速率和回收率。

参 考 文 献

- [1] Han Y X, Gao P, Li Y J, et al. Development strategies of available use of inferior quality and optimal use of high quality for domestic iron ore resources. *Metal Mine*, 2016, 45(12): 2
(韩跃新, 高鹏, 李艳军, 等. 我国铁矿资源“劣质能用、优质优用”发展战略研究. *金属矿山*, 2016, 45(12): 2)
- [2] Chen W. Technological process in processing low-grade fine-grained complicated refractory iron ores. *Metal Mine*, 2010, 39(5): 55
(陈雯. 贫细杂难选铁矿石选矿技术进展. *金属矿山*, 2010, 39(5): 55)
- [3] Peng Y L, Liang L, Tan J K, et al. Effect of flotation reagent adsorption by different ultra-fine coal particles on coal flotation. *Int J Miner Process*, 2015, 142: 17
- [4] Ni C, Xie G Y, Jin M G, et al. The difference in flotation kinetics of various size fractions of bituminous coal between rougher and cleaner flotation processes. *Powder Technol*, 2016, 292: 210
- [5] Li W B, Zhou L B, Han Y X, et al. Effect of carboxymethyl starch on fine-grained hematite recovery by high-intensity magnetic separation: experimental investigation and theoretical analysis. *Powder Technol*, 2019, 343: 270
- [6] Ni C, Bu X N, Xia W C, et al. Observing slime-coating of fine minerals on the lump coal surface using particle vision and measurement. *Powder Technol*, 2018, 339: 434
- [7] Miettinen T, Ralston J, Fornasiero D. The limits of fine particle flotation. *Miner Eng*, 2010, 23(5): 420
- [8] Li D, Yin W Z, Yao J, et al. Classification flotation of Donganshan siderite-containing hematite ore. *Metal Mine*, 2016, 45(12): 51
(李东, 印万忠, 姚金, 等. 东鞍山含菱铁矿赤铁矿石分级浮选试验研究. *金属矿山*, 2016, 45(12): 51)
- [9] Thella J S, Mukherjee A K, Srikulapala N G. Processing of high alumina iron ore slimes using classification and flotation. *Powder Technol*, 2012, 217: 418
- [10] Xie G Y, Wu L, Ou Z S, et al. Research on fine coal classified flotation flowsheet. *J China Univ Min Technol*, 2005, 34(6): 756
(谢广元, 吴玲, 欧泽深, 等. 煤泥分级浮选工艺的研究. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(6): 756)
- [11] Xing Y W, Gui X H, Liu J T, et al. Experimental study of classified flotation based on energy input and distribution. *J China Univ Min Technol*, 2015, 44(5): 923
(邢耀文, 桂夏辉, 刘炯天, 等. 基于能量适配的分级浮选试验研究. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5): 923)
- [12] Xie G Y, Wu L, Ou Z S, et al. Research on fine coal classified flotation process and key technology. *Procedia Earth Planet Sci*, 2009, 1(1): 701
- [13] Yao M Q. *Research on Classification Flotation of Low-Grade Phosphorite in Jinning* [Dissertation]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018
(姚孟齐. 晋宁低品位磷矿分级浮选试验研究[学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2018)
- [14] Zhou W, Yu C F, Wang T, et al. Research on sizing process of fine coal sized flotation. *Coal Preparation Technol*, 2013(6): 34
(周伟, 庾朝富, 王海, 等. 煤泥分级浮选中分级工艺的研究. *选煤技术*, 2013(6): 34)
- [15] Xing Y W, Xu X H, Gui X H, et al. Effect of kaolinite and

- montmorillonite on fine coal flotation. *Fuel*, 2017, 195: 284
- [16] Li D, Yin W Z, Liu Q, et al. Interactions between fine and coarse hematite particles in aqueous suspension and their implications for flotation. *Miner Eng*, 2017, 114: 74
- [17] Yu Y X, Cheng G, Ma L Q, et al. Effect of agitation on the interaction of coal and kaolinite in flotation. *Powder Technol*, 2017, 313: 122
- [18] Qiu G Z, Hu Y H, Wang D Z. *Interaction of Particles and Flotation Techniques of Fine Particles*. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993
- (邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间的相互作用和细粒浮选. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993)
- [19] Yin W Z, Yang X S, Zhou D P, et al. Shear hydrophobic flocculation and flotation of ultrafine Anshan hematite using sodium oleate. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2011, 21(3): 652
- [20] Neethling S J, Cilliers J J. The entrainment of gangue into a flotation froth. *Int J Miner Process*, 2002, 64(2-3): 123
- [21] Wang L, Peng Y, Runge K, et al. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Miner Eng*, 2015, 70: 77