

# 阳离子浮选体系中蓝晶石族矿物与石英的交互影响<sup>①</sup>

许洪峰<sup>1</sup>, 牛艳萍<sup>2</sup>

(1.黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2.黑龙江省地质矿产实验测试研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 运用扩展 DLVO 理论和显微镜分析, 研究了阳离子浮选体系中蓝晶石族矿物与石英的交互作用机理。结果表明, 在 pH=8、FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 用量 30 mg/L、十二胺用量 80 mg/L 条件下, 各粒级石英与不同粒级蓝晶石族矿物存在交互作用, 颗粒之间的黏附罩盖是造成蓝晶石族矿物与石英浮选过程中交互影响的主要原因之一; 蓝晶石族矿物与石英之间吸附作用力从大到小的顺序为: 红柱石与石英、蓝晶石与石英、硅线石与石英, 表明红柱石与石英的浮选分离相对困难。

**关键词:** 蓝晶石族矿物; 十二胺; 浮选交互影响; 扩展 DLVO 理论; 蓝晶石; 红柱石; 硅线石; 石英

中图分类号: TD923

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.013

文章编号: 0253-6099(2023)03-0056-05

## Interaction of Kyanite Group Minerals and Quartz in Cationic Flotation System

XU Hongfeng<sup>1</sup>, NIU Yanping<sup>2</sup>

(1. Heilongjiang Mining Group Co Ltd, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 2. Heilongjiang Provincial Research Center of Geological and Mineral Experimental Testing, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The interaction mechanism of kyanite group minerals and quartz in cationic flotation system was studied by using an extended DLVO (EDLVO) theory combined with microscopy analysis. The results show that, under conditions including pH value of 8, FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O dosage of 30 mg/L and dodecylamine dosage of 80 mg/L, there is interaction between quartz and kyanite group minerals in various size fraction, and the adhesive coating among particles is one of the main reasons for the interaction between kyanite group minerals and quartz amidst flotation process. Besides, the adsorption force between kyanite group minerals and quartz is in the following descending order: andalusite/quartz ≥ kyanite/quartz ≥ sillimanite/quartz, indicating that it is relatively difficult for andalusite to be separated from quartz by flotation.

**Key words:** kyanite group minerals; dodecylamine; flotation interaction; extended DLVO theory (EDLVO); kyanite; andalusite; sillimanite; quartz

蓝晶石族矿物包括蓝晶石、红柱石和硅线石<sup>[1]</sup>。蓝晶石族矿产资源丰富, 主要分布于中国、俄罗斯、南非、加拿大、美国等国家<sup>[2]</sup>。中国蓝晶石族矿产资源产地主要有河南南阳市、新疆库尔勒市、辽宁凤城市、河北邢台市等地<sup>[3]</sup>。蓝晶石族矿物是中国的优势非金属矿产, 是国民经济各领域生产基础材料和各种新材料的关键矿物原料, 广泛应用于冶金、钢铁、建材、陶瓷、化工等行业<sup>[4-5]</sup>。

矿物浮选过程中的交互影响是指复杂矿石浮选体系中各种矿物间相互吸附、活化、抑制等<sup>[6]</sup>。要实现

复杂体系中有用矿物的选择性分离, 需要掌握体系中矿物之间的交互影响规律, 找到消除或利用矿物间交互影响的方法, 从而达到选择性分离的目的<sup>[7-8]</sup>。石英是影响细粒蓝晶石族矿物产品质量的主要因素。本文系统研究了阳离子浮选体系中蓝晶石族矿物与石英之间的交互影响, 可为指导生产实践提供借鉴。

### 1 原料及药剂

试验原料红柱石和蓝晶石单矿物采自河南省, 硅线石和石英单矿物采自河北省。选择高纯度的块矿,

① 收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放研究基金项目 (BGRIMM-KJSKL-2017-11)

作者简介: 许洪峰 (1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 主要从事选矿及矿产综合利用研究。

通信作者: 牛艳萍 (1981—), 女, 黑龙江富锦人, 博士, 正高级工程师, 主要从事浮选理论及工艺方面研究。

经破碎-拣选-陶瓷球磨后,筛分出 $-18\ \mu\text{m}$ 、 $18\sim 45\ \mu\text{m}$ 、 $45\sim 106\ \mu\text{m}$  粒级产品,再经磁选-淘洗,获得单矿物。单矿物化学成分分析结果见表1,其中红柱石、蓝晶石、硅线石单矿物纯度均高于95%,石英单矿物纯度高于99%。

表1 单矿物化学成分分析结果(质量分数) %

矿物名称	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Mn	LOI
红柱石	35.50	60.29	0.15	0.14	—	0.024	—	1.05
蓝晶石	36.52	60.40	0.81	0.18	—	0.060	—	0.51
硅线石	39.20	57.80	0.25	0.17	0.31	0.44	0.002	0.81
石英	99.31	—	0.08	—	—	—	—	—

试验用水为去离子水。选择HCl和NaOH为pH值调整剂、十二胺为捕收剂、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为金属盐类调整剂,均为分析纯药剂。

## 2 试验原理及试验方法

### 2.1 扩展DLVO理论

扩展DLVO理论<sup>[9-11]</sup>,即EDLVO理论,可以解释在多种浮选剂作用下,矿物颗粒间的凝聚和分散行为。

$$V_T^{\text{ED}} = V_W + V_E + V_{\text{HR}} + V_{\text{HA}} \quad (1)$$

式中 $V_T^{\text{ED}}$ 为颗粒间总相互作用能; $V_W$ 为颗粒间范德华作用能; $V_E$ 为颗粒间静电作用能; $V_{\text{HR}}$ 为水化相互

作用排斥能; $V_{\text{HA}}$ 为疏水相互作用吸引能。

### 2.2 试验方法

采用长春探矿机械厂XFG型挂槽浮选机,每次称取2.0 g矿样,加40 mL去离子水,调浆1 min后,用HCl或NaOH调节pH值,搅拌2 min,再加入调整剂搅拌2 min,最后加入捕收剂搅拌2 min,浮选6 min。将泡沫产品和槽内产品分别烘干、称重,计算回收率。

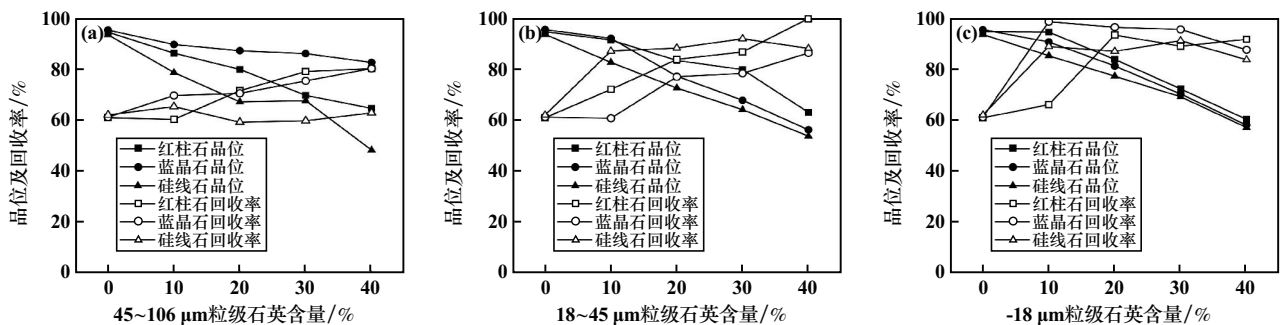
采用德国蔡司公司Scope A1型研究级正立数字偏光显微镜观察矿物表面的黏附情况。

## 3 试验结果

### 3.1 浮选交互影响的规律研究

#### 3.1.1 石英对粗粒级(45~106 $\mu\text{m}$ )蓝晶石族矿物浮选的影响

考虑实际矿浆中难免存在着 $\text{Fe}^{3+}$ 等金属离子,浮选试验加入金属盐类调整剂。矿浆 $\text{pH}=8$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 用量30 mg/L、十二胺用量80 mg/L条件下,不同粒级石英对45~106  $\mu\text{m}$ 粗粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选品位和回收率的影响见图1。由图1可知,45~106  $\mu\text{m}$ 粗粒级红柱石、蓝晶石、硅线石精矿品位随着石英含量增加不断降低,回收率随着石英含量增加而增加,且越细的石英使回收率增加的幅度越大。



(a) 45~106  $\mu\text{m}$  粒级石英; (b) 18~45  $\mu\text{m}$  粒级石英; (c) -18  $\mu\text{m}$  粒级石英

图1 不同粒级石英对45~106  $\mu\text{m}$ 粗粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选的影响

#### 3.1.2 石英对中等粒级(18~45 $\mu\text{m}$ )蓝晶石族矿物浮选的影响

矿浆 $\text{pH}=8$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 用量30 mg/L、十二胺用量80 mg/L条件下,不同粒级石英对18~45  $\mu\text{m}$ 中粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选品位和回收率的影响见图2。由图2可知,18~45  $\mu\text{m}$ 中粒级红柱石、蓝晶石、硅线石精矿品位随着石英含量增加而降低,精矿回收率整体变化不大,说明石英含量越多,与红柱石、蓝晶石、硅线石分离越困难。

#### 3.1.3 石英对细粒级(-18 $\mu\text{m}$ )蓝晶石族矿物浮选的影响

矿浆 $\text{pH}=8$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 用量30 mg/L、十二胺用量80 mg/L条件下,不同粒级石英对-18  $\mu\text{m}$ 细粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选的影响见图3。由图3可知,-18  $\mu\text{m}$ 细粒级红柱石、蓝晶石、硅线石精矿品位随着石英含量增加不断降低,精矿回收率整体变化不大。

### 3.2 浮选交互作用的机理分析

根据扩展DLVO理论计算矿物的Hamaker常数和

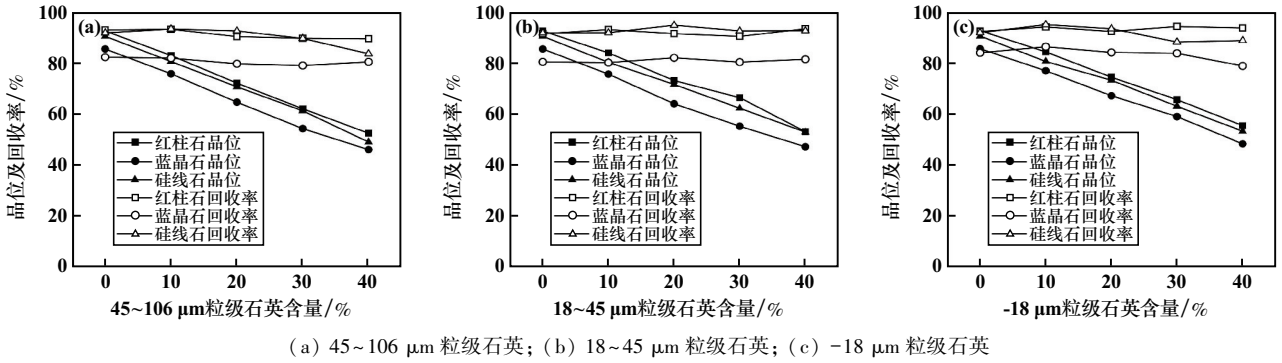


图2 不同粒级石英对18~45 μm 中等粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选的影响

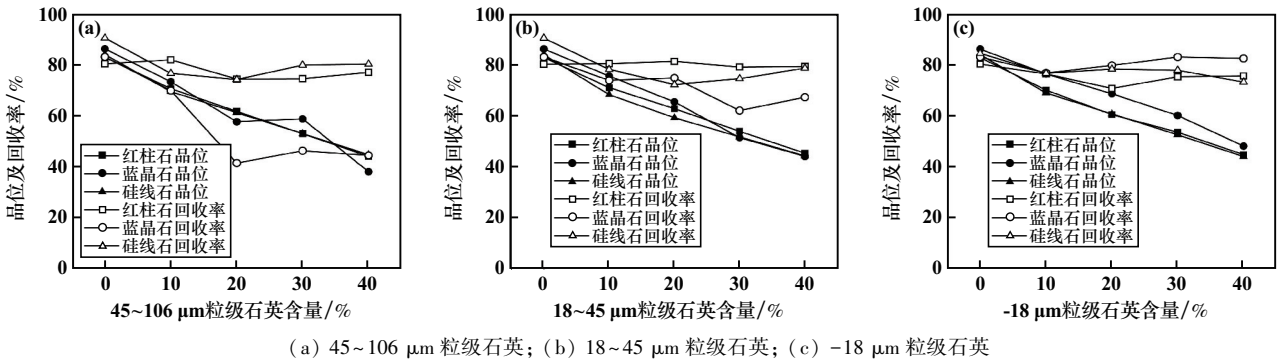


图3 不同粒级石英对-18 μm 细粒级红柱石、蓝晶石、硅线石浮选的影响

表面张力参数,再结合矿物表面动电位,计算在 pH=8、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  用量 30 mg/L、十二胺用量 80 mg/L 条件下,不同粒级红柱石、蓝晶石、硅线石分别与石英颗粒间总的相互作用能  $V_T^{\text{ED}}$ ,计算参数见表2,分析结果见图4~6。

对图4~6 进行分析可以看出,红柱石、蓝晶石、硅线石与石英颗粒间总 EDLVO 势能随着颗粒间作用距离变小而向负值方向移动,颗粒间表现为吸引力。表现为:细粒级石英能够向粗粒级(45~106 μm)红柱石、蓝晶石、硅线石表面黏附,细粒级(-18 μm)红柱石、蓝晶石、硅线石可以向粗粒级石英黏附,以及细粒

级红柱石、蓝晶石、硅线石与细粒级石英发生黏附聚集。不同粒级石英与红柱石、蓝晶石、硅线石之间存在着黏附作用,使各精矿品位随着石英含量增加而降低。

表2 矿物的 Hamaker 常数及  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、十二胺作用后矿物的表面张力参数

矿物名称	Hamaker 常数 / ( $10^{-20}$ J)	表面能色散分量 / ( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	给予体分量 / ( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	表面动电位 / mV
红柱石	7.25	18.46	24.19	5.9
蓝晶石	5.99	37.22	27.88	3.8
硅线石	6.79	26.31	30.39	5.2
石英	7.57	11.38	14.72	7.0

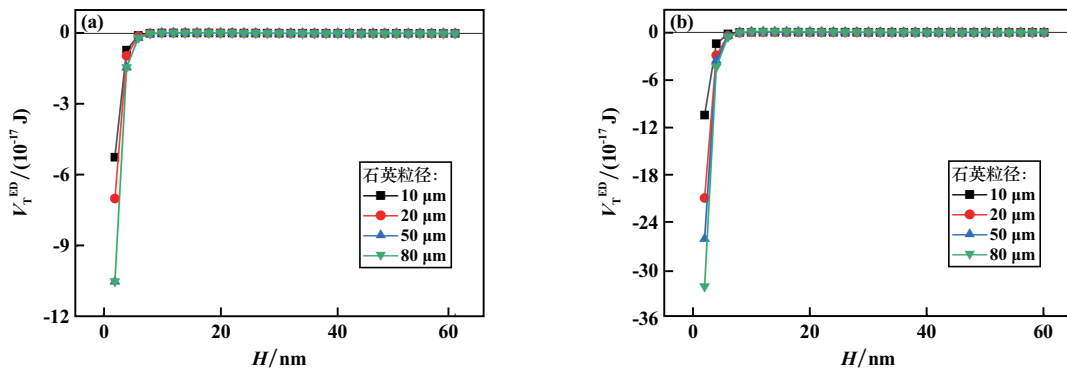
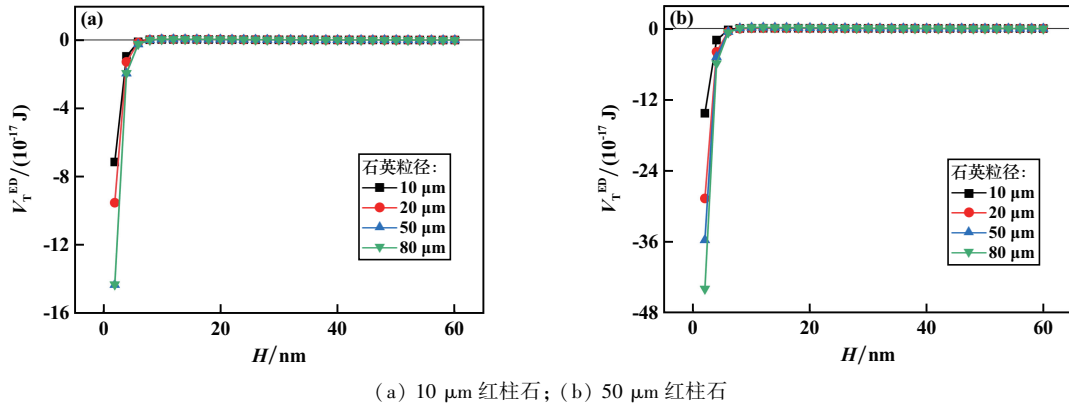
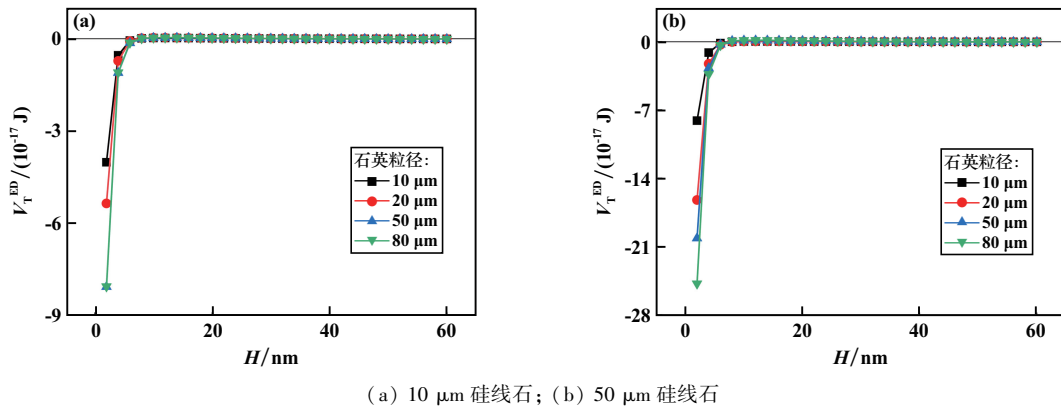


图4 蓝晶石与石英作用 EDLVO 势能曲线



(a) 10 μm 红柱石; (b) 50 μm 红柱石  
图5 红柱石与石英作用 EDLVO 势能曲线



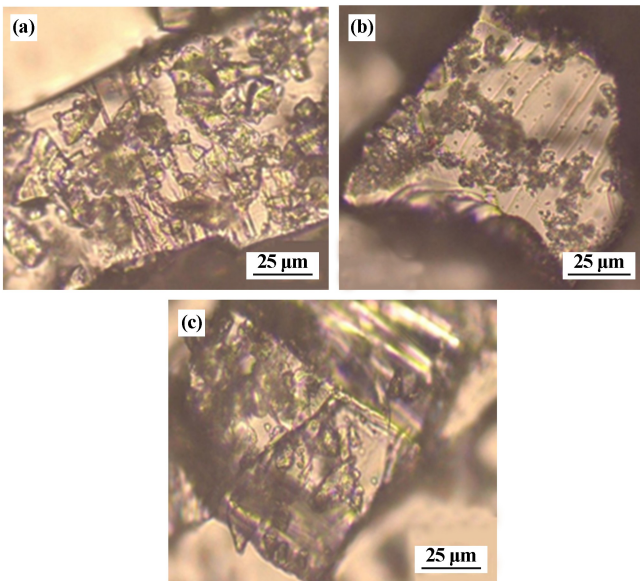
(a) 10 μm 硅线石; (b) 50 μm 硅线石  
图6 硅线石与石英作用 EDLVO 势能曲线

对浮选精矿进行显微镜观察,结果如图7所示。可以验证硅线石与石英、蓝晶石与石英、红柱石与石英之间均发生了黏附现象,这是造成浮选过程中矿物间

交互影响的主要原因。

### 3.3 矿物间 EDLVO 作用能分析

以 50 μm 蓝晶石族矿物与 80 μm 石英之间的作用能为例,当颗粒间界面力相互作用距离为 2 nm 时,在 pH = 8、FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O 用量 30 mg/L、十二胺用量 80 mg/L 条件下,蓝晶石族矿物与石英之间的 EDLVO 作用能见表3。EDLVO 作用能负值越大,表示两种矿物吸附越强,越难分离。矿物吸附作用力从大到小的顺序依次为:红柱石与石英、蓝晶石与石英、硅线石与石英,说明有 FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O 存在的十二胺浮选体系中,红柱石与石英混合矿的浮选分离相对困难。



(a) 45~106 μm 粒级蓝晶石与-18 μm 粒级石英;  
(b) -18 μm 粒级红柱石与45~106 μm 粒级石英;  
(c) 45~106 μm 粒级硅线石与-18 μm 粒级石英

图7 浮选精矿显微镜图像

表3 蓝晶石族矿物与石英之间的 EDLVO 作用能

相互作用矿物名称	EDLVO 作用能/(10 <sup>-17</sup> J)
红柱石与石英	-44.01
蓝晶石与石英	-32.22
硅线石与石英	-24.79

## 4 结 论

1) 阳离子浮选体系交互影响行为研究结果表明,

在难免金属  $\text{Fe}^{3+}$  存在的弱碱性十二胺浮选体系中,随着石英含量增加,各粒级红柱石、蓝晶石、硅线石精矿品位不断降低,粗粒级(45~106  $\mu\text{m}$ )红柱石、蓝晶石、硅线石回收率不断增加,而18~45  $\mu\text{m}$  和-18  $\mu\text{m}$  粒级红柱石、蓝晶石、硅线石回收率变化不大。

2) 浮选交互影响机理研究表明,在难免金属  $\text{Fe}^{3+}$  存在的弱碱性十二胺浮选体系中,各粒级红柱石、蓝晶石、硅线石与石英颗粒间总 EDLVO 势能随着颗粒间距离变小而呈现出负值变大,说明颗粒之间存在黏附罩盖作用。通过显微镜观察进一步验证了红柱石、蓝晶石、硅线石与石英之间确实发生了黏附现象。可见,颗粒之间的黏附是造成红柱石、蓝晶石、硅线石与石英浮选过程中交互影响的主要原因。

3) 混合矿物吸附作用力从大到小的顺序依次为:红柱石与石英、蓝晶石与石英、硅线石与石英,说明在难免金属  $\text{Fe}^{3+}$  存在的弱碱性十二胺浮选体系中,红柱石与石英混合矿的浮选分离相对困难。

#### 参考文献:

- [1] 林彬荫. 蓝晶石 红柱石 硅线石[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [2] Kucera M. Industrial minerals and rocks[M]. Elsevier, 2013.

(上接第51页)

- [8] 吴爱祥,周 靓,尹升华,等. 全尾砂絮凝沉降的影响因素[J]. 中国有色金属学报, 2016,26(2):439-446.
- [9] 姜亚雄,黄丽娟,刘刚明,等. 微细粒尾矿絮凝沉降试验及絮凝剂高效使用模式研究[J]. 矿冶, 2017(1):42-55.
- [10] 张晋霞,牛福生. 响应曲面法优化赤铁矿絮凝体浮选行为研究[J]. 矿产综合利用, 2021(3):22-26.
- [11] 刘 伟,刘子龙,刘 畅. 响应曲面法优化低品位铜钼矿生物浸出工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(9):3111-3120.
- [12] 梁逸扬,梁瑛杰,麦榆敏,等. 响应曲面法优化羧甲基壳聚糖复合

(上接第55页)

可行。“分支处理-分质回用”新工艺可为类似矿山选矿废水循环利用提供一定的借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 胡岳华,冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [2] 杨 玮,李文香,王 倩,等. 某铅锌矿选矿废水回用于铅锌浮选的效果研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):53-56.

- [3] 金俊勋. 红柱石族同质多象体矿物浮选行为与机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学资源与环境工程学院, 2016.
- [4] Namiranian A, Kalantari M. Beneficiation and mullitization of mshdovan andalusite[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2014, 55(4):295-303.
- [5] ZHANG W, QIAN M, DAI W Y. Research on application of kyanite in plastic refractory[J]. Science Press and Institute of Geochemistry, CAS and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013,32:326-330.
- [6] 印万忠,罗溪梅,姚 金,等. 浮选体系中矿物交互影响的研究现状[C]//中国采选技术十年回顾与展望. 北京:冶金工业出版社, 2012:158-163.
- [7] 印万忠,马英强,王乃玲,等. 基于矿物浮选交互影响的铁矿石分散浮选技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(S1):146-150.
- [8] 邓陈雄. 基于矿物交互影响的低品位铁钛矿浮选分离基础研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2015.
- [9] 罗溪梅. 含碳酸盐铁矿石浮选体系中矿物的交互影响研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2014.
- [10] 姚 金. 含镁矿物浮选体系中矿物的交互影响研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2014.
- [11] ZHANG M Q, LIU Q, LIU J G. Extended DLVO Theory Applied to Coal Slime-Water Suspensions[J]. J Cent South Univ, 2012(19): 3558-3563.

引用本文: 许洪峰,牛艳萍. 阳离子浮选体系中蓝晶石族矿物与石英的交互影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):56-60.

- 絮凝剂处理金橙黄模拟废水[J]. 印染助剂, 2021,38(3):45-49.
- [13] 马致远,刘 勇,周吉奎,等. 响应曲面法优化废催化剂中微波浸出钒的工艺[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(6):1308-1315.
- [14] 姜盛基,王 刚,严亚萍,等. 絮凝剂对水中污染物去除性能和机理的最新研究进展[J]. 应用化工, 2021,50(5):1348-1354.
- [15] 董 琦. 多种絮凝剂协同作用的实验[D]. 唐山:华北理工大学建筑工程学院, 2019.

引用本文: 牛福生,武佳慧,于晓东,等. 响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):47-51.

- [3] 陈文胜,刘 旭,薛 珂,等. 混凝沉淀-吸附法处理萤石选矿废水的正交试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):68-70.
- [4] 黄俊文. 铅锌选矿废水净化处理与循环回用试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):64-67.
- [5] 黄伟秦,顾帼华,王艳红,等. 含水杨羟膦酸捕收剂废水对铅铋锌硫化矿浮选行为的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):16-20.

引用本文: 冯章标,阳华玲,王长福,等. 某钨铜矿选矿废水处理与分质回用工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):52-55.