doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.008

响应曲面法优化超声预处理铜钼混合精矿浮选分离工艺

王 营[1],秦贵杰[1],刘学勇[1],孟宪瑜[1],印万忠[2]
(1. 沈阳有色金属研究院有限公司,沈阳 110141;
2. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819)

摘 要:针对铜钼混合精矿浮选分离过程选择性抑制效率低、药剂消耗量大的问题,采用超声预处理技术改善铜钼分离效果,结合响应曲面法开展多因素协同工艺优化研究。以某铜钼混合精矿(Mo品位22.47%、Cu品位3.44%)为试验矿样,通过单因素试验探究超声时间、超声功率、硫化钠用量、抑制剂QN-27用量对分选指标的影响;采用Box-Behnken设计构建以Gaudin选择性指数为响应值的二次回归模型,分析各因素及其交互作用对铜钼分离效果的影响,确定最优工艺条件,并结合接触角、XPS测试揭示超声强化分离作用机理。结果表明,超声预处理可差异化调控矿物浮选行为,与常规浮选相比,钼回收率提升2.87个百分点,铜回收率降低7.55个百分点。模型预测并验证得到最优工艺条件:超声时间2.66 min、超声功率280 W、硫化钠用量1.86 g(75 g矿样,对应原矿50 g/t)、QN-27用量13.97 g(对应原矿370 g/t);该条件下钼回收率较常规浮选提升3.27个百分点,QN-27抑制剂用量降低26%。机理研究表明,超声清洗作用剥离矿物表面碳质污染,暴露出更多活性位点,强化QN-27对黄铜矿的抑制效果,同时保留辉钼矿表面疏水性,扩大两种矿物可浮性差异。研究可为复杂铜钼矿绿色分选提供理论依据与技术参考。

关键词:铜钼分离;超声处理;响应曲面法;交互作用;浮选
中图分类号:TD923;TD952 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)09-0070-11

Optimization of Flotation Separation Process for Copper-Molybdenum Rough Concentrate with Ultrasonic Pretreatment Using Response Surface Methodology

Wang Ying[1], Qin Guijie[1], Liu Xueyong[1], Meng Xianyu[1], Yin Wanzhong[2]
(1. Shenyang Research Institute of Nonferrous Metals, Shenyang 110141, China;
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the problems of low selective inhibition efficiency and high reagent consumption in flotation separation of copper-molybdenum bulk concentrate, ultrasonic pretreatment was adopted to improve the separation performance, and response surface methodology was used for multi-factor collaborative process optimization. A copper-molybdenum bulk concentrate (Mo grade of 22.47%, Cu grade of 3.44%) was used as ore sample. Single-factor experiments were carried out to investigate the effects of ultrasonic time, ultrasonic power, sodium sulfide dosage and inhibitor QN-27 dosage on separation indexes. A quadratic regression model with Gaudin selectivity index as the response value was established based on Box-Behnken design to analyze the influence of various factors and their interactions on copper-molybdenum separation, and the optimal process parameters were determined. Contact angle measurement and XPS analysis were applied to reveal the strengthening mechanism of ultrasonic pretreatment. The results show that ultrasonic pretreatment can differentially regulate the flotation behavior of minerals. Compared with conventional flotation, the molybdenum recovery increases by 2.87 percentage points while copper recovery decreases by 7.55 percentage points. The verified optimal conditions are ultrasonic time of 2.66 min, ultrasonic power of 280 W, sodium sulfide dosage of 1.86 g (for 75 g ore sample, equivalent to 50 g/t raw ore), QN-27 dosage of 13.97 g (equivalent to 370 g/t raw ore). Under these conditions, molybdenum

收稿日期:2025-07-21
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374259)
作者简介:王 营(1998—),男,河北邯郸人,硕士,助理工程师,主要从事浮选工艺研究。

recovery is increased by 3.27 percentage points and the consumption of QN-27 is reduced by 26%. Mechanism analysis indicates that ultrasonic treatment removes carbon-containing contaminants on mineral surfaces and exposes more active sites, which strengthens the inhibition effect of QN-27 on chalcopyrite while maintaining the hydrophobicity of molybdenite, and enlarges the floatability difference between the two minerals. This study can provide theoretical basis and technical reference for green separation of complex copper-molybdenum ores.

Key words: copper-molybdenum separation; ultrasonic treatment; response surface methodology; interaction; flotation

随着全球对铜、钼资源需求的持续增长，高效开发利用低品位、复杂共生铜钼矿已成为矿物加工领域的研究热点。铜矿物与钼矿物物化性质相近[1]，浮选分离过程中矿物表面可浮性差异小，导致分选难度大[2-3]；传统铜钼分离工艺普遍存在药剂消耗高、分离效果有限以及环境压力较大等问题。超声预处理凭借空化效应[4]、机械振动效应与化学活化效应[5-6]，可实现矿物表面改性、药剂分散以及界面反应强化，在硫化矿分选领域具备良好应用潜力[7-8]，为铜钼矿绿色高效分离提供了新思路。但超声参数(超声功率、作用时间)与浮选化学条件(药剂用量、矿浆pH值等)存在复杂多变量耦合关系，仅依靠单因素试验难以充分揭示各因素间交互作用规律，制约超声浮选工艺优化与工业化落地。

响应曲面法(Response surface methodology，RSM)是基于统计学的多因素试验设计手段[9-10]，可通过构建数学模型解析变量之间的非线性关系，将其应用于超声强化铜钼分离体系，能够系统揭示超声场-浮选药剂的协同作用，提升工艺优化效率。已有研究证实超声预处理能够改变黄铜矿、辉钼矿的表面疏水性差异[11]，但现有研究大多只针对单一超声参数进行条件试验，多因素耦合交互作用对铜钼选择性分离的影响机制尚不清晰。

本文以实际铜钼混合精矿为研究对象，开展单因素浮选试验考察超声参数、药剂用量对铜钼分选指标的影响。基于Box-Behnken试验设计构建响应曲面模型，探究多因素交互作用，得到超声强化铜钼浮选分离最优工艺条件。结合接触角测试与XPS表面分析，阐明超声差异化调控黄铜矿、辉钼矿可浮性的内在机理。研究结果可为铜钼混合精矿高效分选提供试验支撑，同时为超声预处理技术在选矿领域的工程应用提供参考，符合绿色矿山发展方向。

1　试验材料与试验方法

1.1　试验材料

试验用铜钼混合精矿取自某低品位钼矿选厂的铜钼混合浮选精矿，矿样中钼主要以辉钼矿形式存在，铜主要赋存于黄铜矿，伴生少量黄铁矿等硫化杂质矿物。矿样化学多元素分析结果见表1。由表1可知，铜钼混合精矿Mo品位为22.47%，Cu品位为3.44%。

试验所用硫化钠为工业级；抑制剂QN-27为沈阳有色金属研究院有限公司自主研发的改性巯基醋酸钠类铜抑制剂。

1.2　试验方法及流程

超声波发生器型号为KMD-M3(深圳市蓝汇超声波设备有限公司)，浮选设备采用吉林探矿机械厂XFD-0.75 L单槽浮选机，试验装置见图1，超声频率固定40 kHz，采用外接超声设备方式完成超声处理。每次称取75 g矿样置于750 mL浮选槽内配制矿浆，矿浆浓度为10%，试验采用矿浆自然pH值，未外加酸碱进行调节。

该铜钼混合精矿在前期混合浮选过程已残留捕收剂与起泡剂，因此铜钼分离阶段不再额外添加捕收剂和起泡剂。矿浆完成超声预处理后进行浮选试验(图2)，浮选结束后分别收集精矿、尾矿产品，烘干、称重、制样，化验各产品中铜、钼品位并计算回收率。

2　试验结果与分析

通过前期相关试验，确定铜钼混合精矿再磨细度为－0.038 mm占90%，硫化钠用量1.88 g(75 g矿

表1　矿石化学多元素分析结果

Table 1　Results of chemical multi-element analysis of the ore　　/%

组分	Cu	Mo	Zn	Fe	S	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
含量	3.44	22.47	0.95	9.48	23.81	24.08	3.31	2.69	0.42



图1 超声浮选试验装置

Fig. 1 Ultrasonic flotation test device

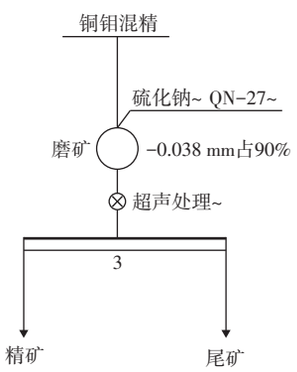


图2 浮选试验流程

Fig. 2 Flowsheet of flotation tests

样,对应原矿50 g/t),抑制剂QN-27用量18.8 g(75 g矿样,对应原矿500 g/t),分别考察超声时间、超声功率、硫化钠用量、抑制剂QN-27用量对铜钼分选效果的影响。

2.1 单因素变量试验

2.1.1 超声时间对铜钼分离的影响

固定铜钼混精再磨细度-0.038 mm占90%、硫化钠用量1.88 g、QN-27用量18.8 g、超声功率300 W,考察超声时间对铜钼分离效果的影响,试验结果见图3。

由图3可知,随着超声时间延长,钼回收率从94.86%提升至97.53%,提升幅度为2.67个百分点;铜回收率呈明显下降趋势,从29.92%降至21.60%,降幅为8.32个百分点。当超声处理时间为2 min时,分选综合效果达到较优水平,此时钼精矿钼品位为38.66%、钼回收率为97.53%,铜被有效抑制,此时铜品位为1.31%、铜回收率为21.60%。继续延长超声时间,钼、铜指标变化幅度较小。

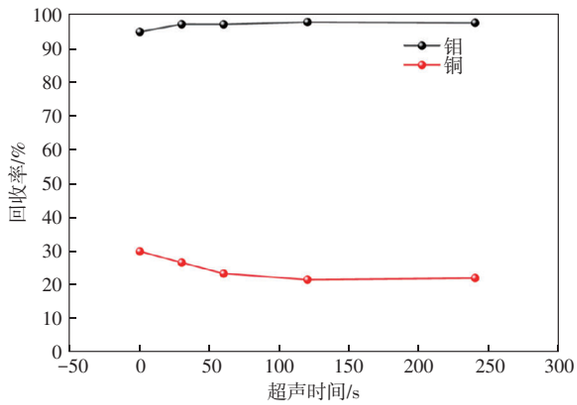


图3 超声时间对铜钼回收率的影响

Fig. 3 Effects of ultrasonic time on copper-molybdenum recovery

2.1.2 超声功率对铜钼分离的影响

固定铜钼混精再磨细度-0.038 mm占90%、硫化钠用量1.88 g、QN-27用量18.8 g、超声时间2 min,考察超声功率对铜钼分离效果的影响,试验结果见图4。

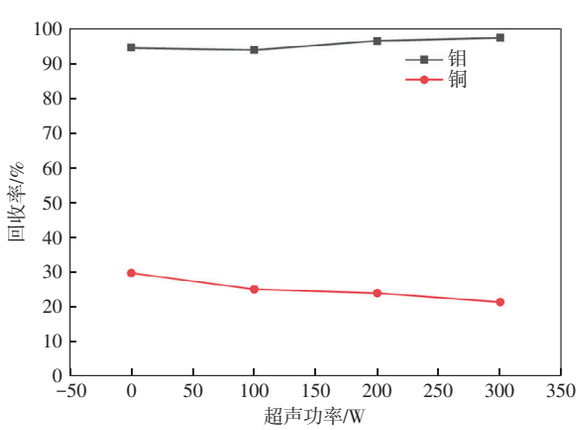


图4 超声功率对铜钼分离的影响

Fig. 4 Effects of ultrasonic power on copper-molybdenum separation

由图4可以看出,随着超声功率增大,钼回收率小幅上升,从不经超声处理的94.86%提升至97.28%;而对于铜来说,铜回收率下降趋势明显,从不经超声处理的29.92%降低至21.56%。当超声功率达到300 W时,铜钼综合分选效果最佳。

2.1.3 超声处理硫化钠用量对铜钼分离的影响

固定铜钼混精再磨细度-0.038 mm占90%、超声时间2 min、超声功率300 W,在超声预处理条件下考察硫化钠用量对铜钼分离的影响,试验结果见图5。

由图5可知,在超声环境中,随着硫化钠用量增

加，铜得到逐步抑制，而钼受影响较小。当不添加硫化钠时，铜回收率为29.35%，钼回收率为95.89%；当硫化钠用量为1.88 g时，铜回收率降至21.60%，钼回收率达到97.73%。

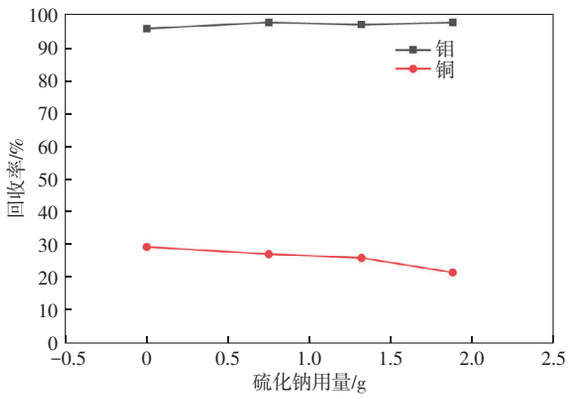


图5　超声环境下硫化钠用量对铜钼分离的影响

Fig. 5　Effects of sodium sulfide dosage on copper-molybdenum separation under ultrasonic environment

2.1.4　超声处理抑制剂QN-27用量对铜钼分离的影响

固定铜钼混精再磨细度－0.038 mm占90%、超声时间2 min、超声功率300 W，考察超声条件下抑制剂QN-27用量对铜钼分离的影响，试验结果见图6。

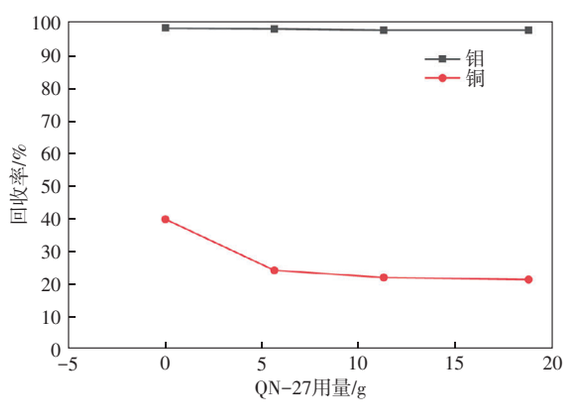


图6　超声环境下抑制剂QN-27用量对铜钼分离的影响

Fig. 6　Effects of inhibitor QN-27 dosage on copper-molybdenum separation under ultrasonic environment

QN-27为沈阳有色金属研究院研发的一种铜选择性抑制剂，对铜矿物具备良好抑制作用。由图6可知，超声条件下，增大QN-27用量可明显抑制铜的上浮，钼回收率基本维持在98%左右的较高水平。未添加QN-27时铜回收率为40.02%；当QN-27添加量为11.3 g时，铜回收率下降至22.37%。

2.2　响应曲面法建模及优化试验

2.2.1　响应曲面模型设计

为综合评判浮选分选效果，采用Gaudin选择性指数SI作为响应评价指标，计算公式见式(1)。

$$SI=\sqrt{\frac{R\times J}{(100-R)\times(100-J)}} \tag{1}$$

式中，SI为Gaudin选择性指数；R为精矿中目的矿物钼的回收率，%；J为尾矿中铜矿物的回收率，%。

采用Design-Expert软件中Box-Behnken模块进行四因素三水平响应曲面试验设计。结合前述单因素试验结果，选取超声时间(A)、超声功率(B)、硫化钠用量(C)、QN-27用量(D)4个关键影响因素，以选择性指数SI为响应值，各因素水平见表2，试验结果见表3。

表2　Box-Behnken试验因素与水平

Table 2　Box-Behnken experimental factors and levels

水平	A/min	B/W	C/g	D/g
−1	1	200	1.32	5.64
0	2	250	1.66	12.22
1	3	300	1.88	18.80

2.2.2　回归方程方差分析

利用Design-Expert 13.0软件对表3试验数据进行二次多元回归拟合(表4)，得到选择性指数SI的回归模型，见式(2)。

$$SI=19.12654+0.728131A+0.104046B+16.69256C+0.130498D+0.001228AB+1.51357AC+0.012103AD+0.014102BC+0.000313BD+0.142836CD-0.720280A^2-0.000261B^2-6.92116C^2-0.017118D^2 \tag{2}$$

由表5可知，模型相关系数R^2=0.9769，校正决定系数R^2=0.9538，预测决定系数R^2=0.8914，二者差值小于0.2，说明模型拟合程度高，可用于对铜钼分选选择性指数进行预测。

2.2.3　响应面分析

响应曲面陡峭程度、等高线疏密与形态可以评判因素交互作用强弱：曲面越陡峭、等高线越密集代表因素影响越显著；等高线呈椭圆形态代表两因素交互作用显著，接近圆形代表交互作用较弱。

由响应曲面与等高线结果可以看出(图7、9～11)，A(超声时间)与B(超声功率)、A与D(QN-27用量)、B

表3 Box-Behnken试验设计及结果

Table 3 Box-Behnken experiment design and results

试验编号	A	B	C	D	SI
1	2	300	1.32	12.22	10.136 607 36
2	2	250	1.6	12.22	12.327 568 32
3	2	250	1.6	12.22	12.071 391 30
4	2	250	1.32	18.80	10.487 460 24
5	3	200	1.6	12.22	11.582 818 95
6	3	300	1.6	12.22	11.839 342 51
7	3	250	1.6	5.64	11.205 621 41
8	2	250	1.6	12.22	12.369 068 35
9	1	250	1.32	12.22	10.045 517 36
10	2	200	1.6	5.64	10.729 502 66
11	1	300	1.6	12.22	10.155 740 95
12	2	250	1.88	5.64	11.024 957 20
13	3	250	1.32	12.22	10.737 414 70
14	3	250	1.88	12.22	13.014 435 31
15	1	250	1.6	5.64	10.123 184 63
16	2	300	1.6	5.64	10.794 581 08
17	1	250	1.88	12.22	10.627 337 32
18	2	250	1.88	18.80	12.450 304 16
19	2	200	1.88	12.22	11.711 966 80
20	2	300	1.6	18.80	11.428 358 44
21	3	250	1.6	18.80	11.746 251 35
22	1	250	1.6	18.80	10.345 259 65
23	2	250	1.6	12.22	12.283 114 12
24	2	200	1.6	18.80	10.950 726 51
25	2	250	1.6	12.22	12.596 665 84
26	2	200	1.32	12.22	10.196 440 56
27	1	200	1.6	12.22	10.144 849 28
28	2	250	1.32	5.64	10.114 754 56
29	2	300	1.88	12.22	12.441 868 75

(超声功率)与C(硫化钠用量)、B与D(QN-27用量)等高线接近同心圆,说明以上几组因素交互效应较弱,各因素更多表现为独立作用。

A与C、C与D的等高线呈明显偏心椭圆(图8、12),交互作用显著($P<0.05$)。超声时间-硫化钠用量交互表现为:在合适硫化钠用量区间,适度增加超声时间能够明显提升分选选择性指数;硫化钠与QN-27用量存在显著交互,二者用量配比需要控制在合理区间,才能获得最优分选指标。

借助Design-Expert软件对建立的响应曲面模型进行寻优求解,得到铜钼浮选分离最优工艺参数:超声时间2.66 min,超声功率280 W,硫化钠用量1.86 g(对应原矿50 g/t),QN-27抑制剂用量13.97 g(对应原矿370 g/t)。利用上述参数进行粗选验证试验,实际得到钼品位40.95%、回收率98.13%的钼精矿。与未进行超声预处理的对照组(硫化钠用量1.88 g、QN-27用量为18.80 g,对应原矿分别为50、500 g/t,钼精矿品位36.27%、钼回收率94.86%)相比,超声预处理在提升钼回收指标的同时,可将抑制剂QN-27用量降低26%,体现出超声预处理-浮选耦合工艺在药剂减量与强化分选方面的优势。

3 超声处理优化铜钼分离的影响机理

为明晰超声预处理对铜钼混合精矿浮选分离的作用机理,选取纯度>95%的黄铜矿、辉钼矿单矿物

表4 铜钼浮选选择性指数模型回归方差分析

Table 4 Regression-variance analysis of Cu-Mo flotation selectivity index model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	差异性
模型	23.77	14	6.28	42.28	<0.0001	极显著
A	6.28	1	0.182 6	156.21	<0.0001	极显著
B	0.182 6	1	7.60	4.55	0.051 2	不显著
C	7.60	1	0.972 3	189.39	<0.0001	极显著
D	0.972 3	1	0.015 1	24.22	0.000 2	显著
AB	0.015 1	1	0.718 4	0.375 7	0.549 8	不显著
AC	0.718 4	1	0.025 4	17.89	0.000 8	显著
AD	0.025 4	1	0.155 9	0.631 8	0.440 0	不显著
BC	0.155 9	1	0.042 6	3.88	0.068 9	不显著
BD	0.042 6	1	0.277 0	1.06	0.320 7	不显著
CD	0.277 0	1	3.37	6.90	0.019 9	显著
A^2	3.37	1	2.76	83.81	<0.0001	极显著
B^2	2.76	1	6.28	68.71	<0.0001	极显著
C^2	1.91	1	1.91	47.57	<0.0001	极显著
D^2	3.56	1	3.56	88.74	<0.0001	极显著
残差	0.562 1	14	0.040 2			
失拟	0.420 4	10	0.042 0	1.19	0.471 1	不显著
纯误差	0.141 7	4	0.035 4			
总离差	24.33	28				

注:方差检查结果通过P值判断,当$P\leqslant0.01$时,差异极显著;当$0.01<P\leqslant0.05$时,差异显著;当$P>0.05$时,差异不显著。

表 5　选择性指数模型拟合统计结果

Table 5　Fitting statistical results of selectivity-index model

项目	标准偏差	平均值	变异系数	相关系数	正决定系数	预测决定系数
数值	0.200 4	11.23	1.78	0.976 9	0.953 8	0.891 4

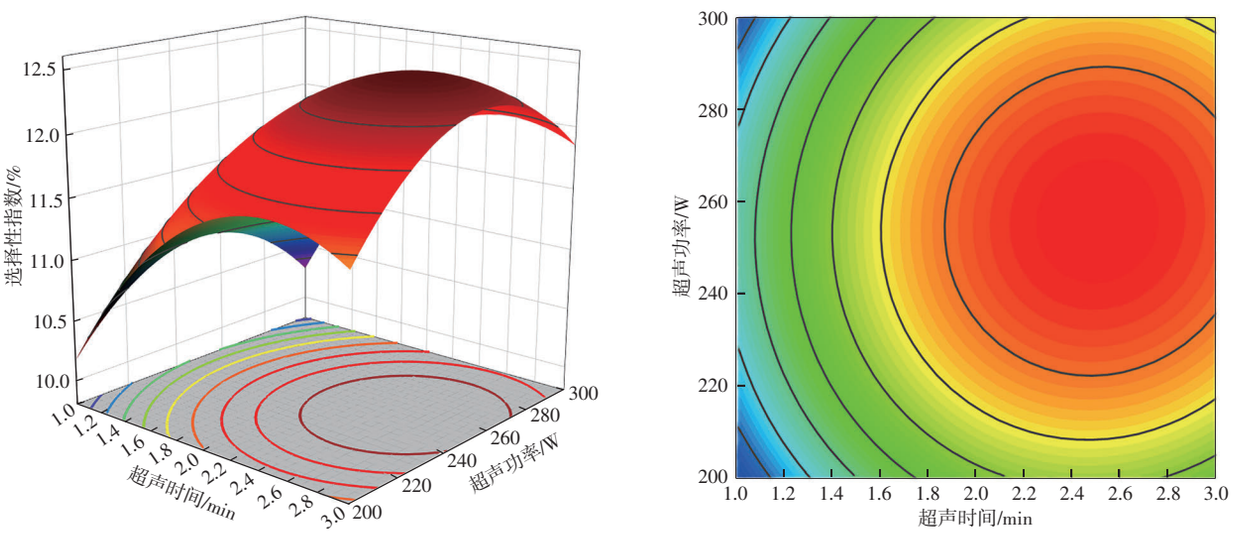


图 7　超声时间与超声功率的响应曲面与等高线

Fig. 7　Response surfaces and contours of ultrasonic time and ultrasonic power

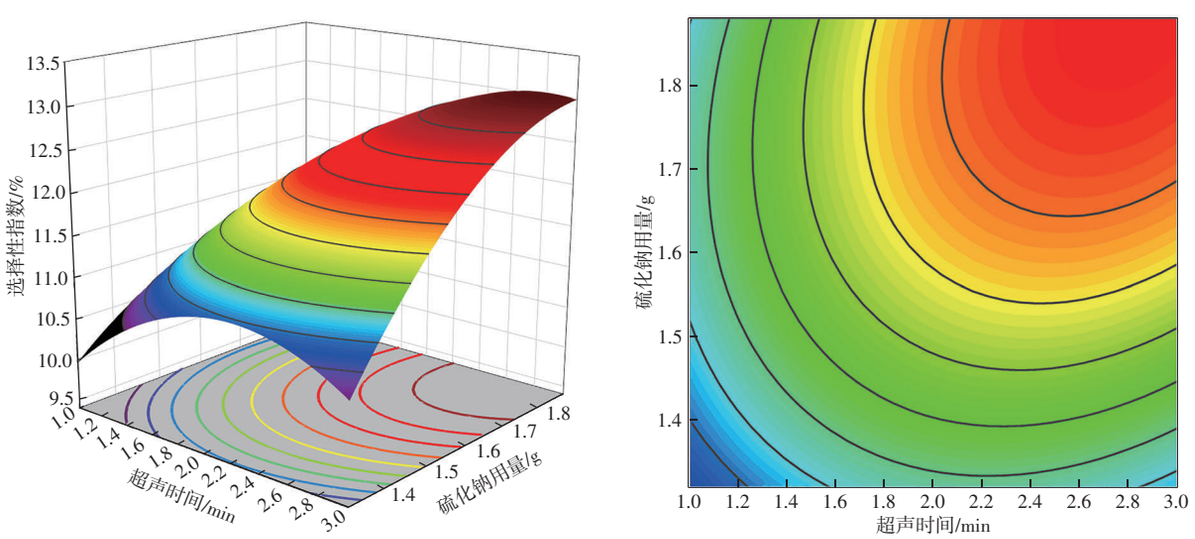


图 8　超声时间与硫化钠用量的响应曲面与等高线

Fig. 8　Response surfaces and contours of ultrasonic time and sodium sulfide dosage

进行机理分析。

3.1　接触角分析

采用煤油与 Z-200 对黄铜矿、辉钼矿进行预先浮选处理，模拟铜钼混合精矿的表面药剂吸附环境。试验固定硫化钠用量 50 g/t、抑制剂 QN-27 用量 500 g/t（均以原矿计），考察超声处理对两种矿物表面接触角的影响，超声处理对黄铜矿接触角的影响见图 13。

由图 13 可知，混合浮选后黄铜矿接触角为 94.66°，表面具备良好可浮性；加入硫化钠与 QN-27 抑制剂后，黄铜矿接触角降至 76.49°，矿物表面可浮性下降，受到明显抑制；经超声处理后，黄铜矿接触角进一步降至 59.90°，表面亲水性显著增强，可浮性进一步降低，抑制效果得到强化。

由图 14 可知，混合浮选后辉钼矿接触角达到 105.13°，表面疏水性优异、可浮性极佳；加入硫化钠与 QN-27 后，辉钼矿接触角小幅降至 99.03°，疏

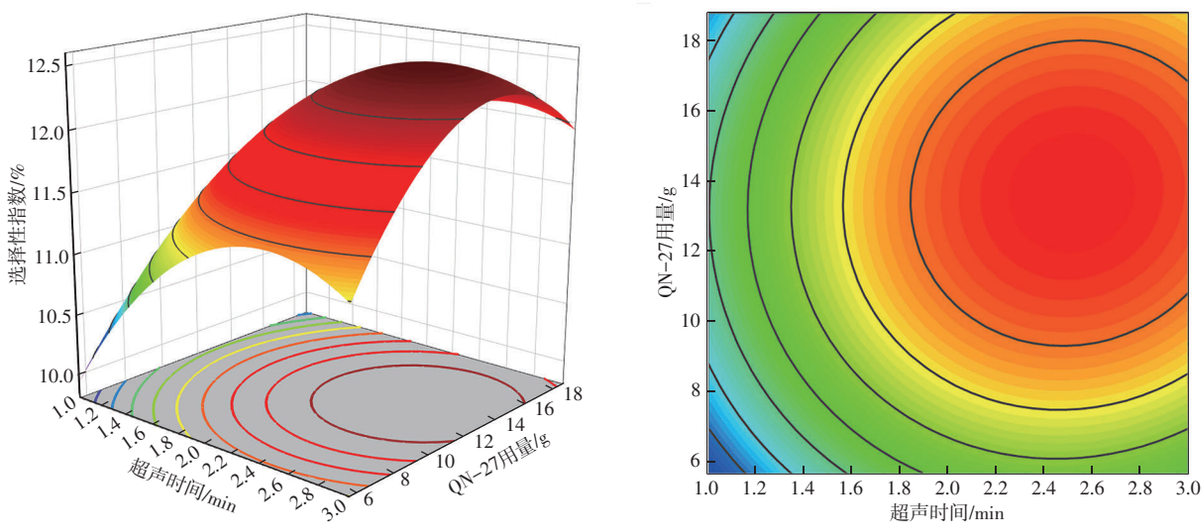


图9 超声时间与QN-27用量的响应曲面与等高线

Fig. 9 Response surfaces and contours of ultrasonic time and QN-27 dosage

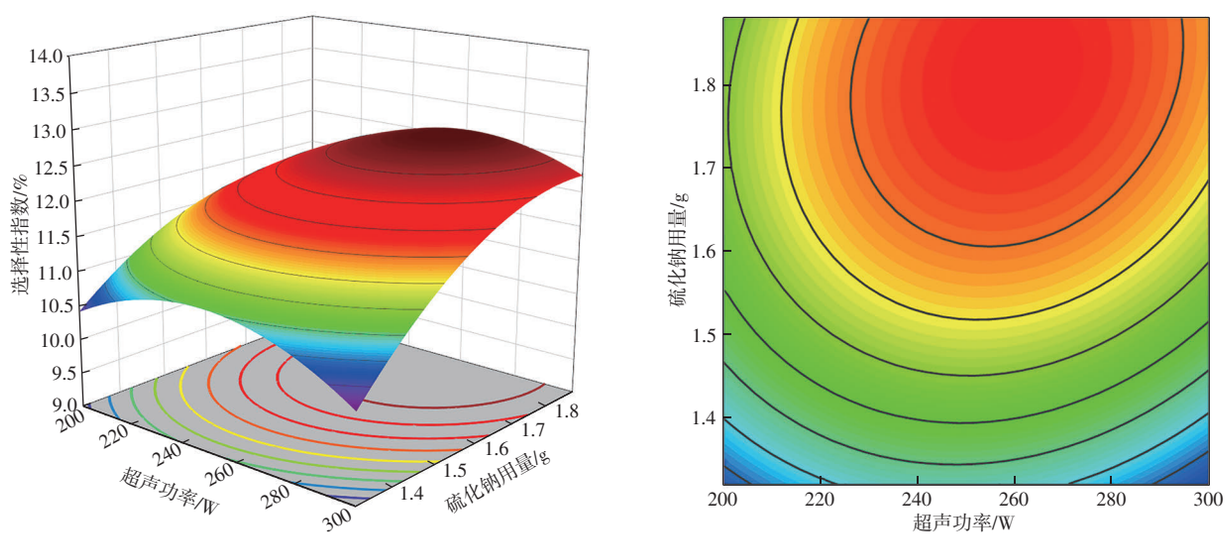


图10 超声功率与硫化钠用量的响应曲面与等高线

Fig. 10 Response surfaces and contours of ultrasonic power and sodium sulfide dosage

水性略有减弱；经超声处理后，辉钼矿接触角回升至100.03°，表面疏水性得到恢复提升。

3.2 XPS分析

选取纯度＞95%的黄铜矿、辉钼矿单矿物，采用最优超声参数(超声时间2.66 min、超声功率280 W)进行超声前后XPS表征测试。超声处理前后黄铜矿表面元素相对含量见表6，铜元素高分辨XPS谱图见图15。

由表6可知，超声处理后黄铜矿表面Cu、S相对含量上升，C含量降低。原因在于超声波的空化清洗作用剥离了矿物表面吸附的杂质与多余药剂，裸露出新鲜矿物表面与活性位点。本试验所用QN-27为改性巯基醋酸类抑制剂，其对黄铜矿的抑制机理为巯基官能团与矿物表面Cu活性位点发生吸附作用，提升矿物亲水性；超声暴露更多Cu活性位点，可促进抑制剂分子的吸附作用，进一步强化对黄铜矿的抑制效果。由图15可知，932.11、951.85 eV为黄铜矿Cu 2p特征主峰，932.94 eV对应CuO、944.72 eV对应$Cu(OH)_2$[12-16]；超声处理后矿物表面未出现新的特征峰，仅峰强度与结合能发生小幅偏移，说明超声未改变黄铜矿表面物相，仅调控表面活性位点数量。

由表7可知，超声处理后辉钼矿表面Mo、S占比提升，C占比下降，同样源于超声的表面清洗效应，裸露出新鲜活性位点。QN-27对辉钼矿基本无抑制作

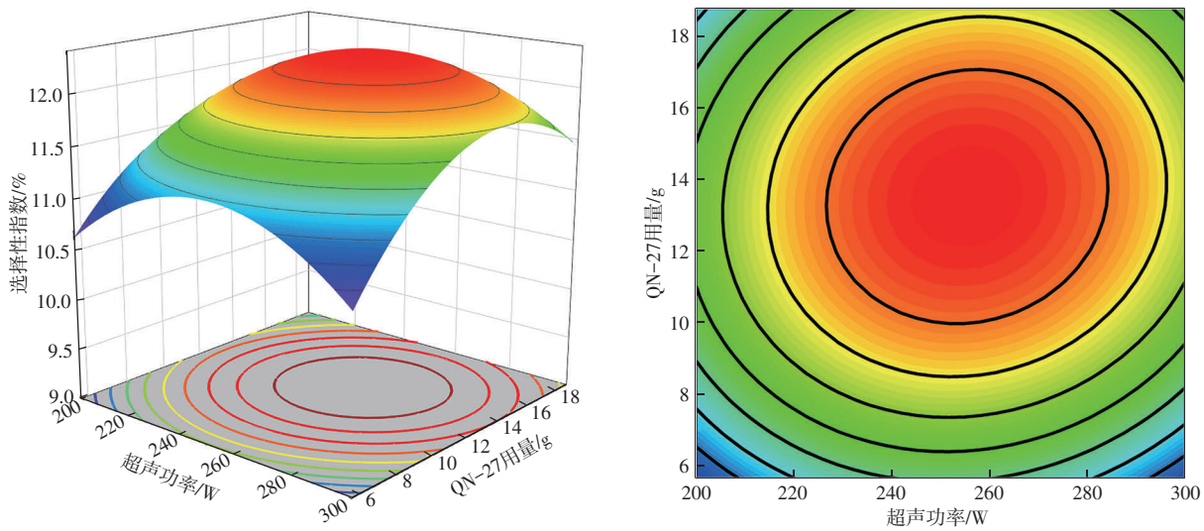


图 11　超声功率与 QN-27 用量的响应曲面与等高线

Fig. 11　Response surfaces and contours of ultrasonic power and QN-27 dosage

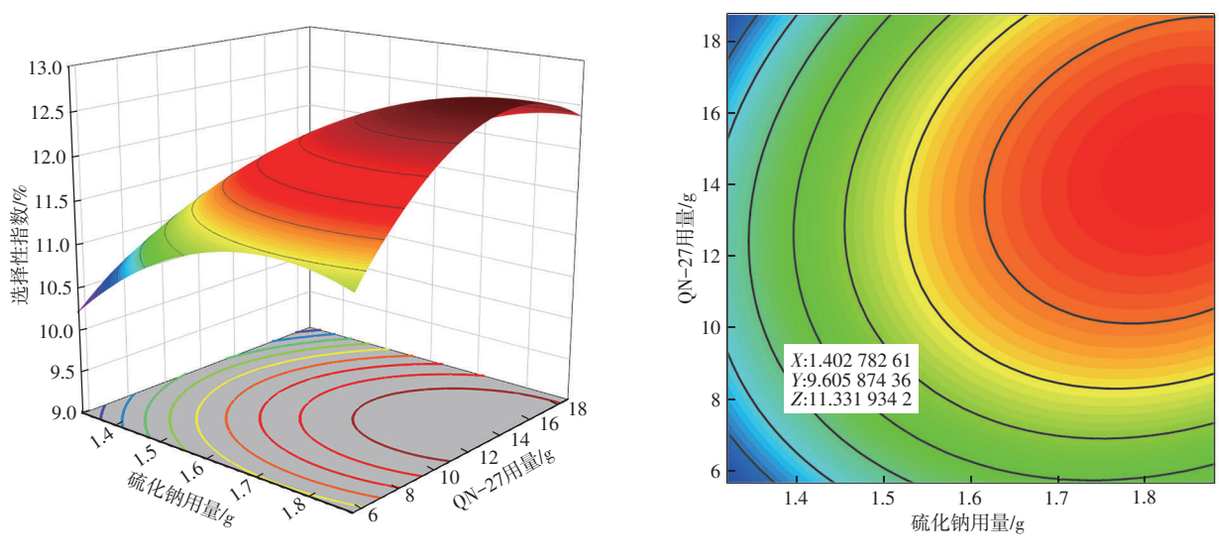


图 12　硫化钠用量与 QN-27 用量的响应曲面与等高线

Fig. 12　Response surfaces and contours of sodium sulfide dosage and QN-27 dosage

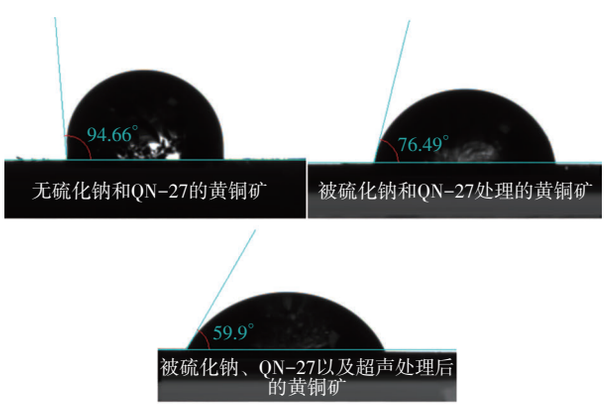


图 13　超声处理对黄铜矿接触角的影响

Fig. 13　Effects of ultrasonic treatment on contact angle of chalcopyrite

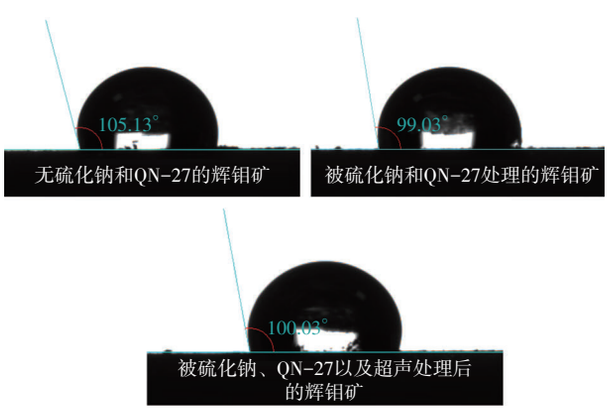


图 14　超声处理对辉钼矿接触角的影响

Fig. 14　Effects of ultrasonic treatment on contact angle of molybdenite

表 6 超声处理前后黄铜矿表面元素 XPS 分析结果

Table 6 XPS elemental analysis results of chalcopyrite surface before and after ultrasonic treatment /%

样品	Cu	C	S
黄铜矿(未超声)	4.51	52.82	12.55
黄铜矿(超声)	6.11	44.39	19.47

表 7 超声处理前后辉钼矿表面元素 XPS 分析结果

Table 7 XPS elemental analysis results of molybdenite surface before and after ultrasonic treatment /%

样品	Mo	C	S
辉钼矿(未超声)	20.57	32.88	20.57
辉钼矿(超声)	21.29	21.82	21.29

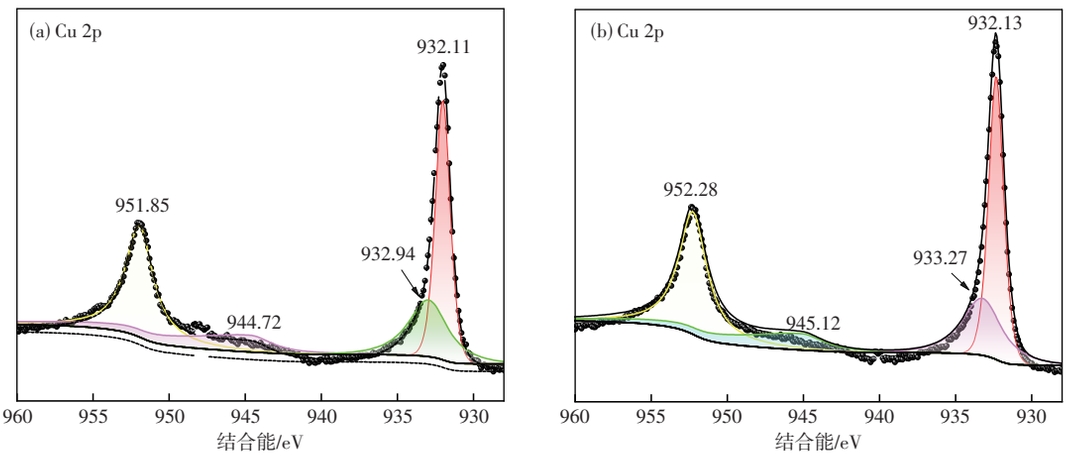


图 15 超声处理前后黄铜矿表面 Cu 2p 高分辨 XPS 谱图

Fig. 15 High-resolution XPS spectra of Cu 2p on chalcopyrite surface before and after ultrasonic treatment

用,表面活性位点增多后,更有利于煤油捕收剂在辉钼矿表面吸附,维持并强化其可浮性。由图 16 可知,229.54、232.69 eV 为 MoS_2 特征双峰,226.82 eV 为 MoS_2 特征单峰[17-18];超声处理后辉钼矿钼元素结合能谱无明显变化,矿物表面物相结构稳定。

综上,超声预处理通过空化清洗作用,使黄铜矿表面 Cu 活性位点数量增加,大幅提升 QN-27 抑制剂的吸附效率,矿物亲水性增强、可浮性下降;而辉钼矿不受抑制剂影响,表面新鲜位点暴露后更利于捕收剂吸附,疏水性得到优化。二者可浮性差异进一步拉大,最终实现铜钼高效分离,同时降低抑制剂消耗量。

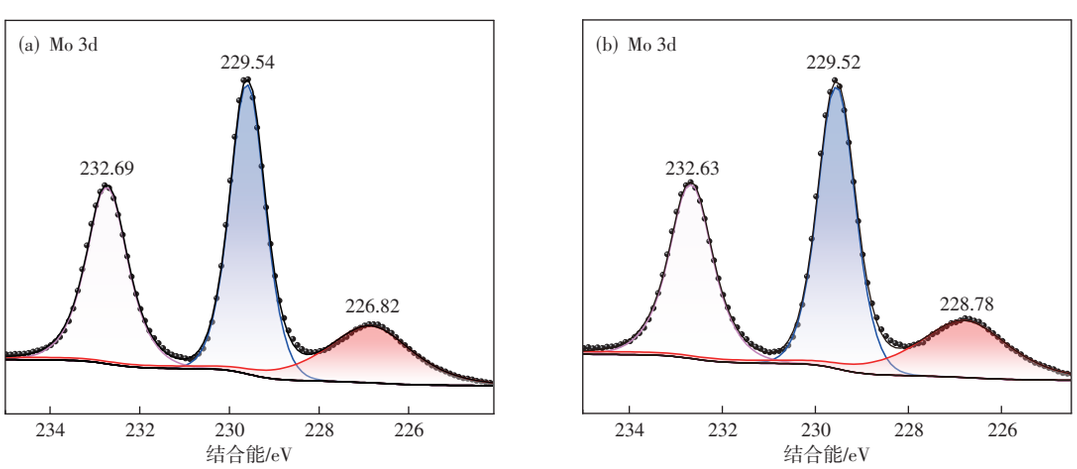


图 16 超声处理前后辉钼矿表面 Mo 3d 高分辨 XPS 谱图

Fig. 16 High-resolution XPS spectra of Mo 3d on molybdenite surface before and after ultrasonic treatment

4　结论

1）单因素浮选试验结果表明，超声预处理可差异化调控黄铜矿与辉钼矿浮选行为。与常规浮选相比，超声处理可使钼回收率提升2.87个百分点，铜回收率降低7.55个百分点，证明超声能够强化铜-钼混合精矿的浮选分离效果。

2）基于Box-Behnken响应曲面试验建立以Gaudin选择性指数为响应值的二次回归模型，模型极显著、失拟项不显著，拟合可靠。超声时间、硫化钠用量、QN-27用量对分选选择性指数影响显著；超声时间与硫化钠用量、硫化钠用量与QN-27用量交互作用显著。模型得到最优工艺条件：超声时间2.66 min、超声功率280 W、硫化钠用量1.86 g(75 g矿样，对应原矿50 g/t)、QN-27用量13.97 g(对应原矿370 g/t)。平行验证试验表明，该条件下钼回收率较常规浮选提升3.27个百分点，抑制剂QN-27用量降低26%。

3）接触角与XPS表面分析结果表明，混合浮选后的黄铜矿、辉钼矿表面残留捕收剂，整体疏水性较强；经硫化钠＋QN-27协同超声处理后，黄铜矿接触角显著下降，可浮性被进一步抑制，辉钼矿疏水性得到保留，两种矿物的可浮性差异被有效拉大。超声主要起到表面清洗作用，剥离矿物表面碳质污染物，暴露出更多新鲜活性位点；超声不会产生新物相，黄铜矿暴露的铜活性位点有利于QN-27抑制剂吸附，辉钼矿新鲜位点利于捕收剂作用，最终实现铜钼高效分离。

4）针对间歇式超声预处理存在声场分布不均、难以直接工业化应用的问题，可开发连续流槽式超声反应器，采用浮选槽壁阵列化换能器布局并结合声场仿真优化，改善大型反应器内部声场，规避空化死区与能量衰减；针对换能器连续工作过热问题，可采用换能器交替工作模式，在保证处理效果的前提下延长设备使用寿命。该技术思路可为超声强化浮选工艺的规模化落地提供参考，后续可围绕声场仿真、换能器协同控制算法开展进一步研究。

参考文献

[1] 李世涛，田小松，王飞旺，等. 铜钼混合精矿预处理及强化分离研究进展[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(1)：21-32.
Li Shitao，Tian Xiaosong，Wang Feiwang，et al. Research progress on pretreatment and enhanced separation of copper-molybdenum mixed concentrate[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2025(1)：21-32.

[2] 宋翔宇，张红涛，许来福，等. 铜钼分离工艺研究现状与展望[J]. 有色金属(选矿部分)，2022(6)：92-101，114.
Song Xiangyu，Zhang Hongtao，Xu Laifu，et al. Research status and prospect of Cu-Mo separation technology[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2022(6)：92-101，114.

[3] 聂琪. 试论我国钼矿选矿方法及研究现状[J]. 云南冶金，2010，39(2)：34-36，55.
Nie Qi. Discussions on research status and separation methods for molybdenum ore beneficiation[J]. Yunnan Metallurgy，2010，39(2)：34-36，55.

[4] Leong T，Johansson L，Juliano P，et al. Ultrasonic separation of particulate fluids in small and large scale systems：a review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2013，52(47)：16555-16576.

[5] Luo Xiaoming，Cao Juhang，Gong Haiyang，et al. Phase separation technology based on ultrasonic standing waves：a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2018，48：287-298.

[6] Rooze J，Rebrov E V，Schouten J C，et al. Dissolved gas and ultrasonic cavitation:a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2013，20(1)：1-11.

[7] 胡松青，李琳，郭祀远，等. 功率超声对溶液性质的影响[J]. 应用声学，2003，22(1)：26-30.
Hu Songqing，Li Lin，Guo Siyuan，et al. Effect of power ultrasound on some properties of several solution[J]. Journal of Applied Acoustics，2003，22(1)：26-30.

[8] 薛娟琴，吴川眉. 超声波对溶液性质的影响[J]. 金属世界，2008(1)：25-28.
Xue Juanqin，Wu Chuanmei. Influence of ultrasonic wave on the properties of several solution[J]. Metal World，2008(1)：25-28.

[9] 袁晓丽，罗福明，周渝飞，等. 响应曲面法优化低品位铁尾矿负载壳聚糖处理含Cd^{2+}废水试验[J]. 矿产综合利用，2023，44(3)：43-50.
Yuan Xiaoli，Luo Fuming，Zhou Yufei，et al. Response surface method to optimize the treatment of Cd^{2+}-containing wastewater with low-grade iron tailings loaded with chitosan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2023，44(3)：43-50.

[10] 李博琦，纪翠翠，谢贤，等. 响应曲面法优化铜硫浮选分离试验研究[J]. 矿物学报，2022，42(2)：154-162.
Li Boqi，Ji Cuicui，Xie Xian，et al. Experimental study on the optimization of copper-sulfur flotation separation by using the response surface method[J]. Acta Mineralogica Sinica，2022，42(2)：154-162.

[11] 任森，印万忠，王营，等. 超声波强化硫化钠对黄铜矿的抑制及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(8)：51-59.

Ren Sen, Yin Wanzhong, Wang Ying, et al. Study on the depressant of sodium sulfide to chalcopyrite and its mechanism enhanced by ultrasound[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(8): 51-59.

[12] Zuo Weiran, Li Xinfeng, Shi Fengnian, et al. Effect of high voltage pulse treatment on the surface chemistry and floatability of chalcopyrite and pyrite[J]. Minerals Engineering, 2020, 147: 106170. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106170.

[13] Gutierrez L, Uribe L, Hernandez V, et al. Assessment of the use of lignosulfonates to separate chalcopyrite and molybdenite by flotation[J]. Powder Technology, 2020, 359: 216-225.

[14] Vaughan D J, England K E R, Kelsall G H, et al. Electrochemical oxidation of chalcopyrite($CuFeS_2$) and the related metal-enriched derivatives $Cu_4Fe_5S_{16}$, and $Cu_9Fe_8S_{16}$ [J]. American Mineralogist, 1995, 80(7/8): 725-731.

[15] Yang Yi, Harmer S, Chen Miao. Synchrotron-based XPS and NEXAFS study of surface chemical species during electrochemical oxidation of chalcopyrite[J]. Hydrometallurgy, 2015, 156: 89-98.

[16] Goh S W, Buckley A N, Lamb R N, et al. The oxidation states of copper and iron in mineral sulfides, and the oxides formed on initial exposure of chalcopyrite and bornite to air[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(9): 2210-2228.

[17] 陈渊淦. 小分子抑制剂对铜钼分离过程的影响研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2023.
Chen Yuangan. Study on the effect of small molecular inhibitor on the separation process of copper and molybdenum[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.

[18] Chen Yang, Chen Xumeng, Peng Yongjun. The effect of sodium hydrosulfide on molybdenite flotation in seawater and diluted seawater[J]. Minerals Engineering, 2020, 158: 106589. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106589.

(本文编辑 刘水红)