矿物加工工程

# 气溶胶化丁基黄药强化黄铁矿浮选回收机理研究

张帅，王宇斌，雷大士，吴忠意，张钰

西安建筑科技大学 资源工程学院，陕西 西安 710055

**中图分类号：**TD923+.14；TD971+.6　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001−0076(2024)01−0053−08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.01.007

**摘要**　为分析气溶胶处理丁基黄药对黄铁矿浮选效果的影响规律及其机理，以气溶胶化丁基黄药为捕收剂，进行了黄铁矿单矿物浮选实验，采用电导率、红外光谱及 XPS 等手段对经气溶胶处理前后的丁基黄药作用的黄铁矿进行表征。结果表明，气溶胶化丁基黄药可显著提高丁基黄药中的有效成分双黄药分子的含量以及黄铁矿的浮选效果，在丁基黄药质量浓度为 15 mg/L 时，黄铁矿的回收率为 57.20%，与未处理相比，黄铁矿回收率提高 16.47 百分点。气溶胶化处理丁基黄药可以提高溶液中的溶解氧浓度，溶解氧既可促进溶液中双黄药的生成，强化丁基黄药对黄铁矿的捕收效果，又可影响黄铁矿的氧化反应程度，使黄铁矿表面矿物组成发生变化，并且疏水性单质硫的比例增加了 7.61 百分点，有利于黄铁矿上浮。此外，由于气溶胶化丁基黄药在黄铁矿表面吸附量增大，黄铁矿表面所含疏水基团−$C_4H_9$ 增多，提高了黄铁矿的疏水性。研究结果对气溶胶浮选技术在浮选领域应用有一定的参考意义。

**关键词**　气溶胶化；丁基黄药；强化；黄铁矿；浮选

## 引言

由于矽卡岩型黄铁矿天然可浮性较差[1-3]，常规浮选药剂对其浮选效果不理想。矿浆 pH 值对黄铁矿的可浮性影响较大，在酸性条件下黄铁矿的可浮性较好，而在碱性条件下黄铁矿的可浮性较差[4]。为了改善黄铁矿的浮选效果，通常通过调整矿浆 pH 值为 3～6、增大捕收剂用量和添加活化剂等手段来提高黄铁矿的回收率[5-7]。如刘向等人[8]研究发现，在相同温度的条件下，黄铁矿的回收率随着捕收剂用量的增加而增大。赵清平等[9]在浮选黄铁矿时发现，适宜浓度的铜离子作为活化剂可有效提高黄铁矿的浮选效果。在不影响黄铁矿回收率的前提下，如何降低捕收剂的用量成为了研究热点。

气溶胶是指悬浮在气体介质中的固体微粒或液体微粒所组成的多相分散体系，其粒径大小通常在 $10^{-3}$ ~$10^{2}$ μm 之间[10]。在药剂的物理改性方法中，药剂的气溶胶化处理可将所需药剂以空气作为媒介，呈气溶胶状态加入浮选过程中，这种加药方式可使药剂充分扩散，具有增强药剂效果和提高浮选指标等优点[11-12]。Xu 等[13]在浮选某低品位钼矿时发现，与常规浮选相比，将煤油以气溶胶形式加入矿浆中可使浮选时间缩短 30%，药剂用量减少 20%。刘行刚等[14]在浮选钼矿时发现，将煤油气溶胶化进行加药在粗选阶段可使钼的回收率提高 2.01 百分点，煤油用量节约 40%；在精选阶段可提高钼的回收率 1.12 百分点，煤油用量节约 50%。已有研究[15]在浮选镍矿时发现，与常规浮选相比，将丁基黄药、2#油和 25 号黑药以气溶胶形式加入镍精矿产率可提高 4.39 百分点，镍回收率可提高 3.62 百分点。由上可知，气溶胶浮选技术在部分硫化矿物的浮选中得到了应用，但气溶胶浮选技术有待进一步推广，其机理也需要深入研究。此外，药剂溶液或矿浆中的溶解氧对于丁基黄药以及黄铁矿的氧化有较大影响，而现有研究虽然注意到捕收剂液滴的粒级组成，但是没有注意到气溶胶化处理过程中溶液或矿浆中溶解氧浓度变化的现象。

鉴于此，本研究采用气溶胶化丁基黄药对黄铁矿单矿物进行实验，并采用电导率、红外光谱等揭示气溶胶浮选对改善黄铁矿浮选效果的机理，以期为气溶胶浮选技术在浮选领域应用提供一定的参考。

**收稿日期：**2023 − 12 − 06
**基金项目：**国家自然科学基金青年项目 (52304192)；中国博士后科学基金项目(2022MD723813)
**作者简介：**张帅(1999—)，男，陕西榆林人，硕士研究生，主要从事矿物材料及资源综合利用研究，E-mail: 13474448550@163.com。
**通信作者：**雷大士(1993—)，男，河北石家庄人，博士后，主要从事浮选界面化学及资源综合利用研究，E-mail: leidashi@xauat.edu.cn。

# 1　实验

## 1.1　实验原料与药剂

实验所用黄铁矿单矿物试样取自广西桂林晴朗矿物标本公司，矿样经破碎、筛分等作业，最终得到−0.074+0.037 mm 试样。为查明黄铁矿样品的物相，对黄铁矿样品进行了 X 射线衍射（XRD）分析，结果如图 1 所示。

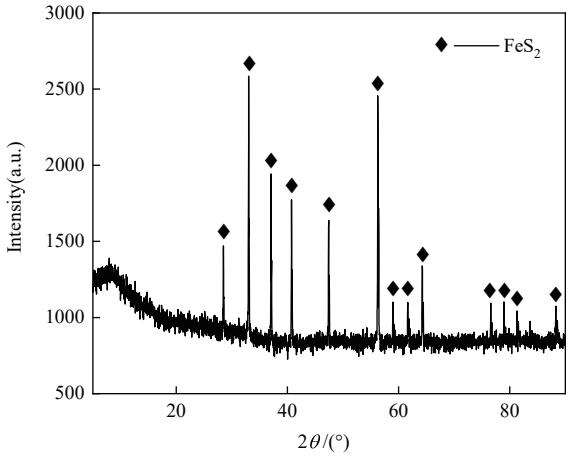



图 1　黄铁矿单矿物 XRD 谱图
**Fig. 1**　XRD spectrum of pyrite single mineral

由图 1 可知，试样中的特征峰吸收峰均为黄铁矿的特征峰吸收峰，判断黄铁矿含量达 97% 以上，符合单矿物实验需要。

浮选实验所用捕收剂丁基黄药（工业级，纯度≥90%）和起泡剂 2#油（工业级）均取自天津市河东区红岩药剂厂。

## 1.2　丁基黄药溶液的气溶胶化实验

实验前配制质量浓度为 10% 的丁基黄药溶液，将丁基黄药溶液加入至水箱中，打开电路板开关，丁基黄药溶液经超声雾化片的高频振动引起液体共振，使丁基黄药溶液形成微细液滴，并通过气流形成气溶胶加入至浮选槽中。实验装置如图 2 所示。

研究使用 PW−Spray 激光粒度仪对经超声波雾化片处理后的丁基黄药液滴粒径进行检测，丁基黄药液滴粒径分布如图 3 所示。

已有研究表明[13,16]，溶液液滴粒径尺寸为毫米级别，经超声雾化后可获得微米级别的液滴。由图 3 可知，丁基黄药溶液经超声雾化后得到的液滴粒径范围为 0.3~14 μm，其 $d_{50}$ 为 4.14 μm，$d_{90}$ 为 7.52 μm。其中粒径尺寸在 4~6 μm 范围内分布最广，其累积体积占比为 41.07%，小于 7 μm 粒径累积体积占比为 86.61%，有少量丁基黄药液滴粒径达到了 7 μm 以上。

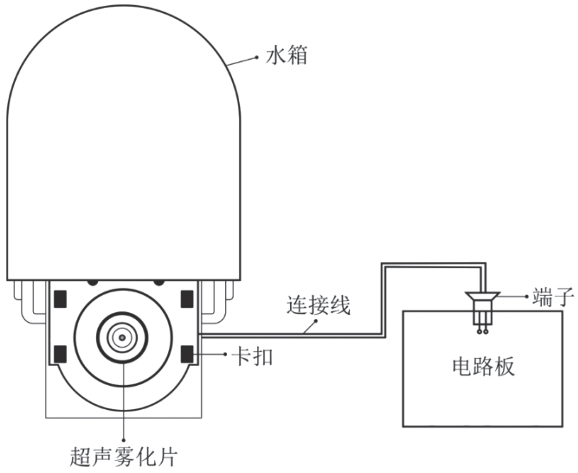



图 2　丁基黄药超声波雾化实验装置示意图
**Fig. 2**　Diagram of test device

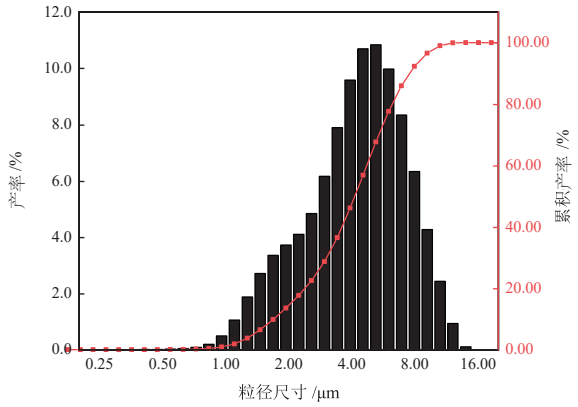



图 3　丁基黄药液滴粒径分布
**Fig. 3**　Particle size distribution of butyl xanthate droplet

## 1.3　单矿物浮选实验流程

实验在 XFGC 型挂槽式浮选机上进行，浮选机转速为 1 995 r/min，每次称取 5.0 g 黄铁矿矿样加入到浮选槽中，随后加入 45 mL 蒸馏水，此时 pH 值为 4.50，再分别加入气溶胶化前后的丁基黄药搅拌 2 min，然后依次加入 2#油搅拌 2 min，充气 10 s 后进行刮泡 3 min。将实验所得泡沫产品和槽内产品分别过滤、烘干并称重，计算其回收率。实验流程如图 4 所示。

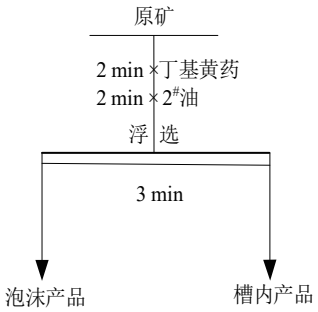



图 4　黄铁矿单矿物浮选实验流程
**Fig. 4**　Flow chart of pyrite single mineral flotation test

## 1.4　检测方法

红外光谱分析：利用 TENSOR27 型傅立叶变换红

外光谱仪, 采用溴化钾压片法对不同丁基黄药浓度作用的黄铁矿进行扫描, 扫描范围为 400~4 000 $cm^{-1}$, 最小分辨率 0.09 $cm^{-1}$, 精度为 0.01 $cm^{-1}$。

电导率检测: 采用 DZB−712 电导率仪对不同丁基黄药浓度的矿浆上清液进行电导率测量。检测时将经离心处理的待测液倒入 50 mL 烧杯中, 将电导率仪校准后置入待测溶液中, 测量 3 次取平均值作为最终结果。

溶解氧检测: 利用 JPBJ−608L 便捷式溶解氧测定仪对经气溶胶化前后的丁基黄药溶液的溶解氧进行测定, 取三次测量结果的平均值作为最终结果。

XPS 检测分析: 将 3 g 气溶胶状态丁基黄药作用后的黄铁矿进行 XPS 检测。采用 Al Kα 线作激发源, 激发源能量为 1 436.8 eV, 仪器的分辨率为 0.1 eV, 使用真空室中的污染碳(Cls 284.6 eV)进行标定。

## 2　结果与讨论

### 2.1　黄铁矿单矿物浮选实验

为了解气溶胶化的丁基黄药对黄铁矿浮选效果的影响, 利用不同质量浓度的丁基黄药与气溶胶化丁基黄药进行黄铁矿单矿物浮选实验, 实验结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 气溶胶化处理的丁基黄药对黄铁矿的浮选效果较好, 且经气溶胶化处理后可以改善丁基黄药对黄铁矿的捕收性能。在 10~60 mg/L 的质量浓度范围内, 黄铁矿回收率增加的幅度不同。当丁基黄药质量浓度为 15 mg/L 时, 气溶胶化的丁基黄药时黄铁矿的回收率为 57.20%, 相比非气溶胶化的丁基黄药,

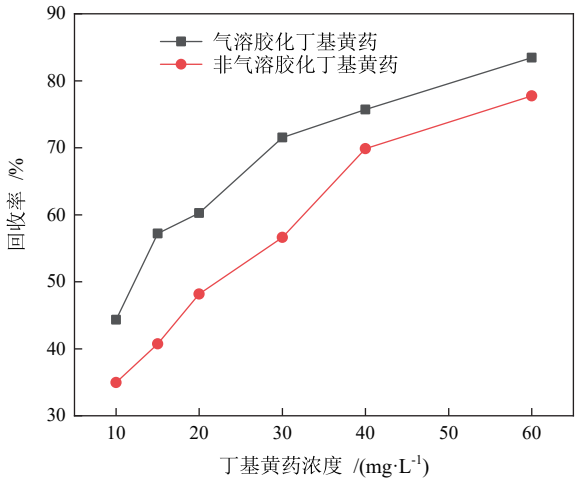



**图 5**　气溶胶化丁基黄药对黄铁矿回收率的影响
**Fig. 5**　Effect of aerosolized butyl xanthate on pyrite recovery

黄铁矿的回收率变化最大, 为 16.47 百分点。当丁基黄药质量浓度增加到 60 mg/L时, 气溶胶化的丁基黄药相比非气溶胶化的丁基黄药, 黄铁矿的回收率变化最小, 为 5.63 百分点。由此可见, 经气溶胶化处理的丁基黄药有利于改善黄铁矿的浮选效果。

### 2.2　气溶胶化处理丁基黄药对溶液性质的影响

#### 2.2.1　气溶胶化处理前后丁基黄药溶液电导率和溶解氧的变化规律

为了解气溶胶化处理丁基黄药对溶液电导率和溶解氧的影响, 对其进行了电导率和溶解氧检测, 检测结果如图 6 所示。

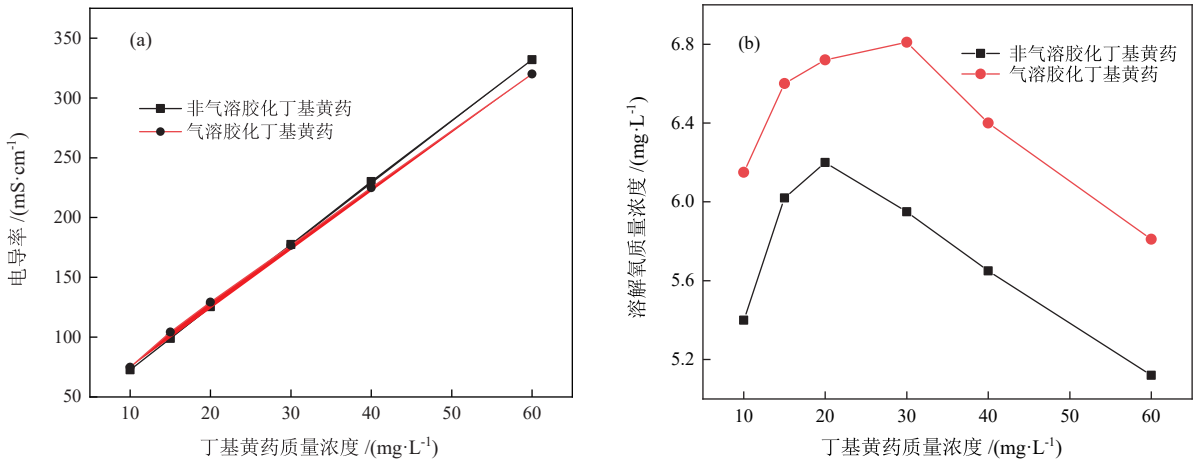



**图 6**　气溶胶化处理丁基黄药对丁基黄药溶液电导率(a)和溶解氧(b)的影响
**Fig. 6**　Effect of aerosolization treatment of butyl xanthate on conductivity ( a ) and dissolved oxygen ( b ) of butyl xanthate solution

由图 6(a)可知, 随着丁基黄药质量浓度的增大, 气溶胶化的丁基黄药和非气溶胶化的丁基黄药溶液的电导率均呈直线上升的趋势。当丁基黄药质量浓度为 15 mg/L 时, 气溶胶化的丁基黄药溶液电导率增加到 104.2 mS·$cm^{-1}$, 非气溶胶化的丁基黄药溶液电导率增加至 98.9 mS·$cm^{-1}$, 此时溶液电导率的增加量最大, 为 5.3 mS·$cm^{-1}$。由于丁基黄药溶于水时, 发生水解反应, 生成了大量的 $C_4H_9OCSS^-$和 $Na^+$, 导致溶液的电导率增加。当丁基黄药质量浓度增加到 60 mg/L 时, 气溶胶化的丁基黄药溶液的电导率增加到 320 μS/cm,

非气溶胶化的丁基黄药溶液的电导率增加到 332 mS·cm$^{-1}$，气溶胶化的丁基黄药比非气溶胶化的丁基黄药溶液的电导率降低 12 mS·cm$^{-1}$，这说明非气溶胶化的丁基黄药溶液离子数量增多。随着丁基黄药质量浓度的增加，$C_4H_9OCSS^-$与水和氧气反应生成双黄药分子，导致溶液中 $C_4H_9OCSS^-$离子减少，所以溶液的电导率降低。

由图 6(b)可知，随着丁基黄药浓度的增大，气溶胶化的丁基黄药和非气溶胶化的丁基黄药相比，溶液的溶解氧浓度均呈现先增大后减小的趋势。当丁基黄药质量浓度由 10 mg/L 增大到 60 mg/L 时，气溶胶化的丁基黄药溶液的溶解氧质量浓度由最初的 6.15 mg/L 增大到 6.81 mg/L 后降至 5.81 mg/L，非气溶胶化的丁基黄药溶液的溶解氧质量浓度由最初的 5.4 mg/L 增大到 6.2 mg/L后降至 5.12 mg/L。当丁基黄药质量浓度为 15 mg/L 时，气溶胶化的丁基黄药溶液的溶解氧浓度比非气溶胶化的丁基黄药溶液的溶解氧质量浓度高 0.58 mg/L。溶液中溶解氧浓度增大的原因在于陶瓷雾化片的高频谐振作用能够将液态水分子内部结构打散，使得水分子间氢键断裂导致水分子间距增大，减小水分子对氧气分子压缩，氧气分压变大，氧气在溶液中溶解度增大[17−18]。溶解氧浓度的增大，促进了双黄药分子的形成和黄铁矿的氧化，有利于提高黄铁矿的回收率。

### 2.2.2　气溶胶化处理前后丁基黄药溶液官能团的变化

为了解气溶胶化处理丁基黄药溶液对官能团的变化情况，研究对其进行了红外光谱分析，结果如图 7 所示。

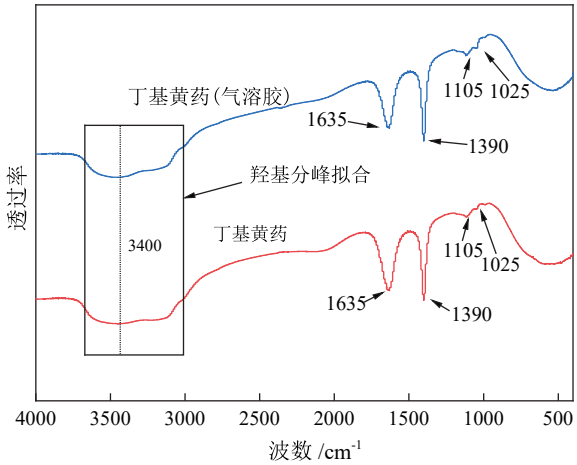



**图 7**　气溶胶化处理前后丁基黄药溶液的红外光谱图
**Fig. 7**　Infrared spectra of butyl xanthate solution before and after aerosol treatment

由图 7 可知，波数 1 025 cm$^{-1}$ 处的峰为 C=S 的振动吸收峰，波数 1 105 cm$^{-1}$ 处的峰为 C−O−C 的对称振动峰，波数 1 390 cm$^{-1}$ 为 C−O−C 的非对称振动[19−20]，波数 1 635 cm$^{-1}$ 和 3 400 cm$^{-1}$ 处的吸收峰是水中−OH 的伸缩振动峰。此外，从图 7 中可以看出，气溶胶化的丁基黄药中波数为 1 105 cm$^{-1}$ 的双黄药分子中 C−O−C 对称伸缩振动峰峰形更加尖锐。为进一步了解气溶胶处理前后对丁基黄药溶液中不同种类羟基组成比例的影响，对丁基黄药溶液中的羟基进行了分峰处理，结果如图 8 所示。

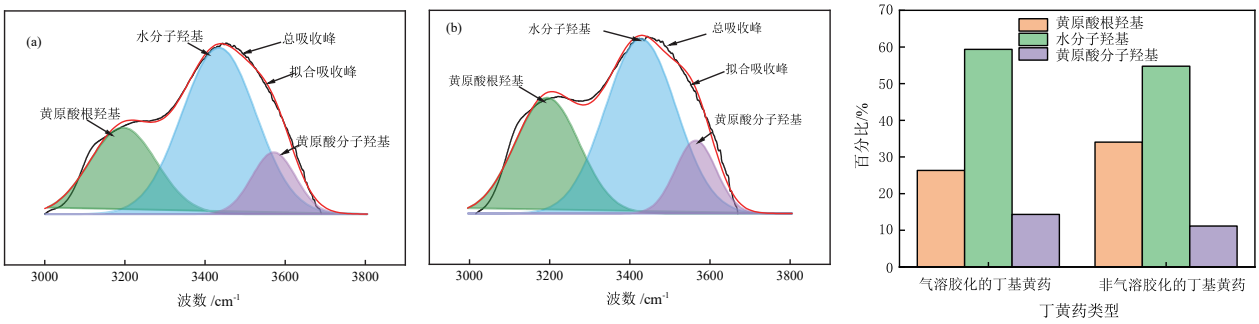



**图 8**　气溶胶处理前后丁基黄药溶液红外光谱中各羟基分峰拟合结果
**Fig. 8**　Fitting results of hydroxyl peak in infrared spectrum of butyl xanthate solution before and after aerosol treatment

由图 8 可知，未经气溶胶化处理丁基黄药中，黄原酸根羟基和黄原酸分子羟基比例分别为 34.05% 和 11.18%。气溶胶化处理丁基黄药时，黄原酸根羟基和黄原酸分子羟基比例分别为 26.33% 和 14.32%，与未处理相比，黄原酸根的比例下降了 7.72 百分点，黄原酸分子的比例上升了 3.14 百分点。造成这一现象的原因是气溶胶化的丁基黄药溶液的溶解氧浓度增大，有利于黄原酸根氧化生成双黄药分子，导致气溶胶化的丁基黄药溶液中黄原酸根比例降低，黄原酸分子的比例上升。同时，超声波雾化片将丁基黄药以气溶胶状态加入，增加了捕收剂在气−固界面的吸附量[21]，有利于双黄药分子与黄铁矿吸附，提高黄铁矿的回收率。

## 2.3　气溶胶化丁基黄药溶液作用的黄铁矿表面基团的变化

### 2.3.1　气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿表面官能团的变化

为了解气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿表面官

能团的变化情况, 研究对其进行了红外光谱分析, 结果如图 9 所示。

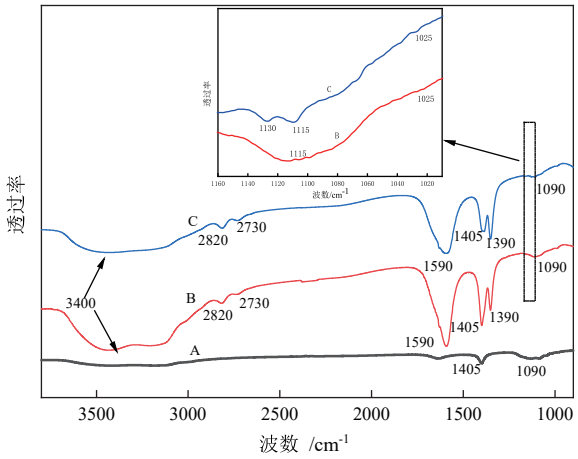



**图 9**　气溶胶化处理前后丁基黄药作用黄铁矿的红外光谱图
**Fig. 9**　Infrared spectra of pyrite treated with butyl xanthate before and after aerosolization

图 9 中 A、B、C 样为黄铁矿、非气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿和气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿。由图 9 可知, 波数 1 090 $cm^{-1}$ 和 1 405 $cm^{-1}$ 处的峰是黄铁矿的特征峰, 其中波数 1 091 $cm^{-1}$ 处的峰为 S−S 的伸缩振动特征峰[22−23]。波数 2 820 $cm^{-1}$ 为 $CH_3$−的不对称伸缩振动峰, 波数 2 730 $cm^{-1}$ 处的峰为−$CH_2$−的不对称伸缩振动峰[24]。为对比 B 样和 C 样中双黄药分子和 $Fe(BX)_3$ 振动吸收峰, 对图 9 中局部区域进行放大, 由图可知, 波数 1 025 $cm^{-1}$ 为 $Fe(BX)_3$ 中 C=S 双键的伸缩振动峰, 波数 1 115 $cm^{-1}$ 为双黄药分子中 C−O−C 对称伸缩振动峰, 波数 1 130 $cm^{-1}$ 为 $Fe(BX)_3$ 中 C−O−C 的伸缩振动峰[25−26]。对比图中 B 样和 C 样, B 样中新增波数为 1 130 $cm^{-1}$, 归属于 $Fe(BX)_3$ 中 C−O−C 的伸缩振动峰, C 样中波数为 1 025 $cm^{-1}$ 处的峰并不明显。由此可以推断, 气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿表面形成了双黄药分子和 $Fe(BX)_3$。

### 2.3.2　气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿表面 XPS 分析

为进一步了解气溶胶化的丁基黄药对黄铁矿表面元素的化学状态变化情况, 研究对气溶胶处理前后丁基黄药作用的黄铁矿样品进行了 XPS 检测, 结果如图 10 所示。

图 10 中 A、B 样为气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿和非气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿。由图 10 可知, 黄铁矿样品表面主要有 Fe、S、O、C 等元素。气溶胶化的丁基黄药和非气溶胶化的丁基黄药相比, 其表面各元素的特征峰均有一定程度的变化, 各元素相对含量变化如表 1 所示。

由表 1 可知, 与 B 样相比, 经气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿表面的 C 含量由 60.15% 增加到 68.54%,

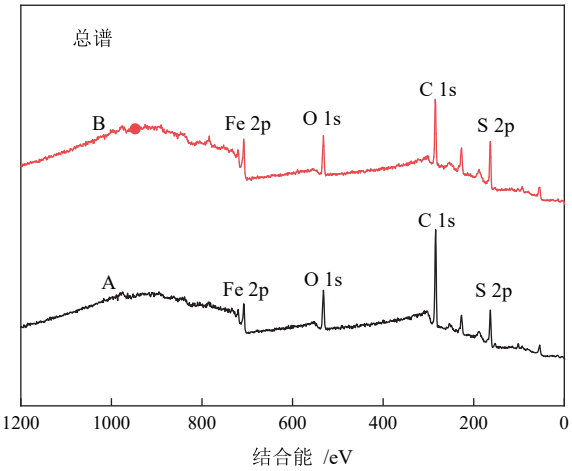



**图 10**　黄铁矿矿样品表面 XPS 总谱图
**Fig. 10**　XPS spectra of pyrite sample surface

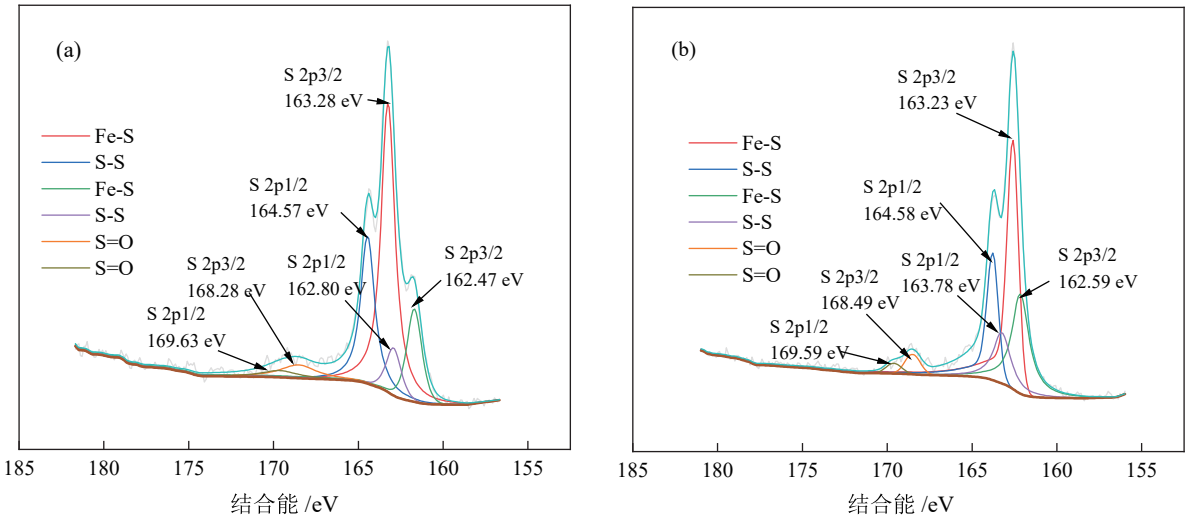
**表 1**　黄铁矿表面原子个数相对含量
**Table 1**　Relative content of atomic number on talc surface

| 黄铁矿样品 | C/% | O/% | S/% | Fe/% |
|---|---|---|---|---|
| A | 68.54 | 12.32 | 13.47 | 2.56 |
| B | 60.15 | 14.58 | 20.49 | 4.79 |

增加了 8.39 百分点; O 的含量由 14.58% 减少到 12.32%, 下降了 2.26 百分点; S 的含量由 20.49% 减小到 13.47%, 下降了 7.02 百分点; Fe 含量由 4.79% 减小到 2.56%, 下降了 2.23 百分点。C 含量的增加、Fe 和 S 含量的降低都说明了气溶胶化丁基黄药在黄铁矿表面吸附量增多。

为进一步了解 S 的光电子能谱在黄铁矿表面的存在形式, 研究对 S 的光电子能谱进行了分峰拟合, 结果如图 11、表 2 和表 3 所示。

由图 11 可知, 丁基黄药作用后, 黄铁矿中的 S 以三种形式存在。其中结合能 162.47 eV 处的 S $2p_{3/2}$ 为黄铁矿表面 $S^{2-}$的特征峰, 结合能 163.28 eV 的 S $2p_{3/2}$ 为黄铁矿表面 $S^{2-}$的特征峰, 结合能 162.8 eV 和 164.57 eV 的 S $2p_{1/2}$ 为单质硫的 S−S 键, 结合能 168.28 eV 和 169.63 eV 的 S $2p_{3/2}$ 和 S $2p_{1/2}$ 为 $SO_4^{2-}$的特征峰[27-30]。由此可见, A 和 B 样品表面均存在一定程度的氧化。为进一步分析黄铁矿表面的氧化程度, 研究对 S 的拟合峰面积进行了计算, 结果如表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知, 样品中主要存在 Fe−S 键、S−S 键和 S=O 键。A 样中 Fe−S 键、S−S 键和 S=O 键相对比例分别为 54.43%、37.64% 和 7.93%, B 样中 Fe−S 键、S−S 键和 S=O 键相对比例分别为 64.70%、30.03% 和 5.27%。气溶胶化处理丁基黄药作用后的黄铁矿中单质硫的相对比例为 37.64%, 与未处理相比, 增加了 7.61 百分点。单质硫的相对比例增加的原因在于经气溶胶化处理的丁基黄药溶液的溶解氧浓度增大, 导致黄铁矿表面部分硫离子转化为单质硫。由于单质硫的天然可浮性较好, 而黄铁矿的天然可浮性较差, 因此, 气溶胶化




a—气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿；b—非气溶胶化丁基黄药作用的黄铁矿

**图 11**　S 2p 的分峰拟合图
**Fig. 11**　Peak fitting diagram of S 2p

**表 2**　峰拟合各形态 S 的峰面积
**Table 2**　Peak fitting the peak area of each form of S

| 样品 | 峰面积 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Fe−S(S 2p 3/2) | S=O(S 2p 3/2) | S−S(S 2p 1/2) | S=O(S 2p 1/2) |
| A | 8 092.41 | 780.66 | 5 595.80 | 398.78 |
| B | 11 444.85 | 616.73 | 5 310.88 | 315.03 |

**表 3**　分峰拟合各形态 S 的分布比例
**Table 3**　Peak fitting distribution ratio of each form of S

| 样品 | 相对比例/% | | |
|---|---|---|---|
| | Fe−S | S−S | S=O |
| A | 54.43 | 37.64 | 7.93 |
| B | 64.70 | 30.03 | 5.27 |

处理丁基黄药作用于黄铁矿后可使黄铁矿的浮选效果增强。此外，结合表 1 可知，由于气溶胶化丁基黄药在黄铁矿表面吸附量增大，黄铁矿表面所含疏水基团−$C_4H_9$ 增多，提高了黄铁矿的疏水性。

## 3　结论

（1）将丁基黄药进行气溶胶化处理，可显著提高黄铁矿的回收率。当丁基黄药浓度为 15 mg/L 时，气溶胶化处理后的丁基黄药时黄铁矿的回收率为 57.20%，相比普通浮选黄铁矿的回收率可提高 16.47 个百分点。

（2）气溶胶化处理可提高丁基黄药溶液中溶解氧浓度，当丁基黄药浓度为 15 mg/L 时，气溶胶化处理丁基黄药溶液与未处理相比，溶液的溶解氧浓度提高了 0.58 mg/L。溶解氧既可促进溶液中双黄药的生成，强化丁基黄药对黄铁矿的捕收效果，还可促进黄铁矿的氧化反应，使黄铁矿表面矿物组成发生变化，单质硫的比例增加了 7.61 百分点，有利于黄铁矿上浮；由于气溶胶化丁基黄药在黄铁矿表面吸附量增大，黄铁矿表面所含疏水基团−$C_4H_9$ 增多，提高了黄铁矿的疏水性。

## 参考文献：

[1] 毕云霄，余攀，丁湛，等. 黄铁矿浮选抑制剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用，2020，40(4)：157−166.
BI Y X, YU P, DING Z, et al. The development of research on the pyrite flotation depressants[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 157−166.

[2] ARSLAN Y U, JEFFERSON M, MORAR C C, et al. Pathway to prediction of pyrite floatability from copper ore geological domain data[J]. Minerals, 2023, 13(6): 801.

[3] 于宏东，孙传尧. 不同成因类型黄铁矿的浮游特性[J]. 有色金属工程，2009，61(3)：111−115.
YU H D, SUN C Y. Flotation characteristics of different geo−genetic type pyrite[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2009, 61(3): 111−115.

[4] 梁爽，路亮，张行荣. 有机抑制剂在黄铁矿浮选中的研究进展[J]. 中国矿业，2020，29(S2)：300−302+307.
LIANG S, LU L, ZHANG X R. Research on organic depressors of pyrite flotation[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 300−302+307.

[5] 赵连兵，先永骏，文书明，等. 黄铁矿的抑制及活化分选研究进展[J]. 矿产保护与利用，2020，40(2)：74−81.
ZHAO L B, XIAN Y J, WEN S M, et al. Research development of depression and activation separation of pyrite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 74−81.

[6] 李诗浩，马强，王龙，等. 黄铁矿浮选活化机理研究进展[J]. 矿产综合利用，2023(2)：124−130+140.
LI S H, MA Q, WANG L, et al. Present situation and research progress of comprehensive utilization of low grade zinc oxide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2): 124−130+140.

[7] 苏超，申培伦，李佳磊，等. 黄铁矿浮选的抑制与解抑活化研究进展[J]. 化工进展，2019，38(4)：1921−1929.
SU C, SHEN P L, LI J L, et al. A review on depression and derepression of pyrite flotation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(4): 1921−1929.

[8] 刘向，李祚毕，李展，等. 黄铁矿低温浮选试验及机理分析[J]. 矿产

保护与利用, 2019, 39(4): 115−120.
LIU X, LI Z B, LI Z, et al. Study and mechanism analysis on the flotation of pyrite in low temperature[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 115−120.

[9] 赵清平, 蓝卓越, 童雄. 铜离子对闪锌矿、黄铁矿浮选的选择性活化机理研究[J]. 矿产综合利用, 2021(3): 27−38.
ZHAO Q P, LAN Z Y, TONG X. Activation mechanism of selective flotation of sphalerite and pyrite by copper[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3): 27−38.

[10] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001(1): 119−124.
WANG M X, ZHANG R J. Frontier of atmospheric aerosols researches[J]. Climatic and Environmental Research, 2001(1): 119−124.

[11] 徐涛, 孙春宝, 阎志强, 等. 气溶胶浮选技术及其应用现状[J]. 中国矿业, 2011, 20(8): 75−78.
XU T, SUN C B, YAN Z Q, et al. Aerosol flotation technology and its application status[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(8): 75−78.

[12] 徐涛, 孙春宝, 刘行刚, 等. 低品位钼矿煤油气溶胶加药浮选规律的研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(12): 91−95.
XU T, SUN C B, LIU X G, et al. The effect of flotation condition on the kerosene aerosol dosing flotation of low grade molybdenum ore[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(12): 91−95.

[13] XUN T, SUN C B. Aerosol flotation of low−grade refractory molybdenum ores[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2012, 19(12): 1077−1082.

[14] 刘行刚, 孙春宝, 徐涛. 某低品位钼矿煤油气溶胶浮选特性的研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(12): 109−112.
LIU X G, SUN C B, XU T. Study on characteristics of kerosene aerosol flotation for a low−grade molybdenum ore[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(12): 109−112.

[15] 辽宁省冶金研究所气溶胶试验小组. 气溶胶浮选特性的探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 1976(3): 31−36+44.
Liaoning Provincial Metallurgical Research Institute Aerosol Test Group. Discussion on aerosol flotation characteristics[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 1976(3): 31−36+44.

[16] 春江, 王瑾萱, 徐晨, 等. 液滴撞击超亲水表面的最大铺展直径预测模型[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 248−258.
CHUN J, WANG J X, XU C, et al. Theoretical model of maximum spreading diameter on superhydrophilic surfaces[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 248−258.

[17] 姚夏妍, 赵芸芸, 鲁兴武, 等. 强磁场作用下磁场梯度力对铜电解过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2695−2705.
YAO X Y, ZHAO Y Y, LU X W, et al. Effect of gradient force of magnetic field on copper electrolysis process under strong magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11): 2695−2705.

[18] 姚夏妍, 汪友元, 鲁兴武, 等. 磁场效应强化湿法冶金的现状及前景[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(1): 8−13.
YAO X Y, WANG Y Y, LU X W, et al. Current situation and Prospect of magnetic field effect enhanced hydrometallurgy[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019, 48(1): 8−13.

[19] 刘浩, 朱一民, 马艺闻, 等. 氰化尾渣中黄铁矿与闪锌矿的浮选回收技术研究[J]. 矿产综合利用, 2017(2): 99−104.
LIU H, ZHU Y M, MA Y W, et al. Study on flotation and recovery technology for pyrite and sphalerite in cyanidation tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 99−104.

[20] DENG Z B, CHENG W L, TANG Y, et al. Adsorption mechanism of copper xanthate on pyrite srfaces[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2021, 57(3): 46–60.

[21] 徐涛, 孙春宝, 米丽平, 等. 利用气溶胶浮选技术提高某铜钼矿混合浮选钼回收率[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(9): 982−986.
XU T, SUN C B, MI L P, et al. Improving molybdenum recovery in copper−molybdenum roughing by aerosol flotation technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2012, 34(9): 982−986.

[22] ENG Y, GRANO S. Effect of grinding media on the activation of pyrite flotation[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(8): 600−605.

[23] EJTEMAEI M, NGUYEN A V. Characterisation of sphalerite and pyrite surfaces activated by copper sulphate[J]. Minerals Engineering, 2017, 100: 223−232.

[24] BIN L, NIE W L, DONG J S. Effect of lead ions on the sulfidization flotation of smithsonite using sodium butyl xanthate as a collector[J]. Minerals Engineering, 2022, 185: 107710.

[25] SUN Q Y, YIN W Z, CAO S H, et al. Adsorption kinetics and thermodynamics of sodium butyl xanthate onto bornite in flotation[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11): 2998−3007.

[26] ZHANG Y H, CAO Z, SUN C Y. FTIR studies of xanthate adsorption on chalcopyrite, pentlandite and pyrite surfaces[J]. Journal of Molecular Structure, 2013, 1048(11): 434−440.

[27] ZHENG X, LIU L, NIE Z, et al. The differential adsorption mechanism of hexahydrated iron and hydroxyl irons on a pyrite (100) surface: A DFT study and XPS characterization[J]. Minerals Engineering, 2019, 138: 215−225.

[28] DENG Z B, CHENG W L, TANG Y, et al. Adsorption mechanism of copper xanthate on pyrite surfaces[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2021, 57(3): 46−60.

[29] FENG B, FENG Q, LU Y. The effect of lizardite surface characteristics on pyrite flotation[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 153−158.

[30] RABIEH A, ALBIJANIC B, EKSTEEN J J. A review of the effects of grinding media and chemical conditions on the flotation of pyrite in refractory gold operations[J]. Minerals Engineering, 2016, 94: 21−28.

# Flotation Mechanism of Pyrite Enhanced by Aerosolized Butyl Xanthate

ZHANG Shuai, WANG Yubin, LEI Dashi, WU Zhongyi, ZHANG Yu

*School of Resource Engineering, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi 'an 710055, Shaanxi, China*

**Abstract**: In order to study the influence and mechanism of aerosol treatment of butyl xanthate on the flotation effect of pyrite, the single mineral flotation experiment of pyrite was carried out with aerosolized butyl xanthate as collector. The pyrite treated by butyl xanthate before and after aerosol treatment was characterized by conductivity, infrared spectroscopy and XPS. The results showed that the aerosolized butyl xanthate could significantly increase the content of the active ingredient dixanthogen in butyl xanthate and the flotation effect of pyrite. The recovery of pyrite was 57.20% at the mass concentration of butyl xanthate of 15 mg/L, which could increase the recovery of pyrite by 16.47 percentage points compared with that of untreated. Aerosolization treatment of butyl xanthate can increase the dissolved oxygen concentration in the butyl xanthate solution. Dissolved oxygen not only promote, the formation of dixanthogen in the solution, but also enhanced the collection effect of butyl xanthate on pyrite. It also affected the degree of oxidation reaction of pyrite, and the proportion of hydrophobic elemental sulfur increased 7.61%, which was beneficial to improve the floatability of pyrite. In addition, due to the increase of the adsorption amount of aerosolized butyl xanthate on the surface of pyrite, the hydrophobic group $-C_4H_9$ on the surface of pyrite increased, which improved the hydrophobicity of pyrite. The research provides a reference for aerosol flotation technology in the field of flotation.

**Keywords**: aerosolization; butyl xanthate; strengthening; pyrite; flotation

**引用格式**: 张帅, 王宇斌, 雷大士, 吴忠意, 张钰. 气溶胶化丁基黄药强化黄铁矿浮选回收机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 53−60.
ZHANG Shuai, WANG Yubin, LEI Dashi, WU Zhongyi, ZHANG Yu. Flotation mechanism of pyrite enhanced by aerosolized butyl xanthate[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 53−60.

**投稿网址**: http://kcbhyly.xml-journal.net E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn