

## 铜绿山铜铁矿深部矿石中铜的可选性研究

杨丙乔<sup>1,2</sup> 邓冰<sup>1,2</sup> 左倩<sup>1,2</sup> 王飞<sup>1,2</sup> 张芹<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室)

**摘 要** 为解决铜绿山铜铁矿进入井下深部开采后因矿石性质变化造成的选矿指标恶化问题,在工艺矿物学研究基础上,对该矿深部矿石进行了铜的可选性试验。试验结果表明:将磨矿细度从目前现场生产所采用的 $-0.074\text{ mm}$ 占63%~70%提高到 $-0.074\text{ mm}$ 占85.9%,采用异步浮选流程,以单一丁黄药作捕收剂,可获得含铜22.85%,含金14.27 g/t,含银85.69 g/t的铜精矿,相应的铜、金、银回收率分别为93.72%,94.83%,82.34%,而以丁黄药+丁胺黑药组合药剂作捕收剂,可使铜、金、银的回收率提高1~2个百分点,但铜、金、银品位略有降低。

**关键词** 铜绿山铜铁矿深部矿石 硫化铜 异步浮选

### Study on the Beneficiation Ability of Copper from Deep Ore-body of Tonglushan Copper Iron Mine

Yang Bingqiao<sup>1,2</sup> Deng Bing<sup>1,2</sup> Zuo Qian<sup>1,2</sup> Wang Fei<sup>1,2</sup> Zhang Qin<sup>1,2</sup>

(1. Wuhan University of Science and Technology; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources)

**Abstract** To resolve the deterioration problems of mineral indicators caused by ore properties variation during the process of underground deep mining in Tonglushan copper iron mine, the beneficiation ability tests of copper for deep ore-body is made, based on the process mineralogy research. The results showed that: when the grinding fineness at the current production was improved from  $-0.074\text{ mm}$  63% to 70% to  $-0.074\text{ mm}$  85.9%, and the asynchronous flotation process was adopted with single butyl xanthate as collector, copper concentrate containing copper 22.85%, gold 14.27 g/t, silver 85.69 g/t at a copper, gold, silver recovery of 93.72%, 94.83%, 82.34% respectively were achieved. While butyl xanthate + butylamine black were used as collectors, the recovery of copper, gold, silver can be increased by 1 to 2%, but their grades are slightly decreased.

**Keywords** Deep ore-body of Tonglushan copper-iron mine, Copper sulfide, Asynchronous flotation

湖北铜绿山铜铁矿为露天地下联合开采的大型矿山,是我国的大型铜铁基地。近年来,由于二期-245, -305, -365 m 3个中段资源量减少,矿山后续开采需要向井下深部-425 m中段拓展。而井下深部矿石与先前开采的矿石相比,性质有很大变化,选矿厂按照原有工艺生产,很难达到理想的选别指标。为此,武汉科技大学受大冶有色金属公司委托,在工艺矿物学研究的基础上,按照先浮选铜、浮铜尾矿再回收铁、金银随铜一起富集的技术路线,对铜绿山铜铁矿深部矿石进行了可选性研究。鉴于铁的选别相对简单,本文仅介绍铜浮选的研究结果。

### 1 矿石性质

显微镜鉴定、X射线衍射分析和电子探针分析结果表明,铜绿山铜铁矿深部矿石的矿物组成比较复杂,主要金属矿物为磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿,有少

量的闪锌矿、黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝等;脉石矿物有石英、斜长石、透辉石、蒙脱石、玉髓、高岭石、方解石、黑云母、白云母、石榴石等,但以石榴石、石英、碳酸盐矿物为主。矿石中还含有少量的贵金属矿物自然金以及银金矿,但显微镜观察很难发现。

矿石的化学多元素分析结果见表1。可见,矿石中主要有价元素铜含量为1.135%,铁含量为31.60%,金和银的含量分别为0.704 g/t和4.87 g/t,表明该矿石属于含金银贵金属的铜铁矿石。

对矿石中的铜和铁进行化学物相分析,结果分别见表2,表3。可见:铜在矿石中主要以硫化物的形式存在,氧化率很低,仅4.29%。铁主要以磁铁

杨丙乔(1985—),男,武汉科技大学资源与环境工程学院,冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室,硕士研究生,430081 湖北武汉市青山区建设一路武汉科技大学428信箱。

表 1 矿石化学多元素分析结果 %

| 成 分 | Cu    | TFe   | S     | FeO               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-----|-------|-------|-------|-------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
| 含 量 | 1.135 | 31.60 | 1.393 | 17.35             | 25.41                          | 17.24            | 2.41                           |
| 成 分 | CaO   | MgO   | MnO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O               | Au               | Ag                             |
| 含 量 | 8.30  | 9.01  | 0.49  | 0.062             | 0.26                           | 0.704            | 4.87                           |

注: Au 和 Ag 的含量单位为 g/t。

矿和赤、褐铁矿的形式存在,磁铁矿中铁的占有率为 63.80%,赤、褐铁矿中铁的占有率为 30.35%。由于赤、褐铁矿中铁的占有率较高,因此生产上应重视对赤、褐铁矿的回收,以提高铁的回收率。

表 2 矿石铜物相分析结果 %

| 相 别  | 自 由<br>氧化铜 | 结 合<br>氧化铜 | 次 生<br>硫化铜 | 原 生<br>硫化铜 | 总 铜    |
|------|------------|------------|------------|------------|--------|
| 铜含量  | 0.022      | 0.025      | 0.304      | 0.746      | 1.097  |
| 铜占有率 | 2.01       | 2.28       | 27.71      | 68.00      | 100.00 |

表 3 矿石铁物相分析结果 %

| 相 别  | 磁铁矿   | 赤褐<br>铁矿 | 硫化铁  | 硅酸铁  | 碳酸铁  | 总 铁    |
|------|-------|----------|------|------|------|--------|
| 铁含量  | 20.16 | 9.59     | 0.32 | 0.45 | 1.08 | 31.6   |
| 铁占有率 | 63.80 | 30.35    | 1.01 | 1.42 | 3.42 | 100.00 |

显微镜鉴定结果显示,矿石中的含铜矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝等铜的硫化物为主。黄铜矿呈他形粒状分布,粒径在 0.01 到 0.5 mm 之间。早期的黄铜矿边缘多分布细粒斑铜矿和铜蓝,且多被二者溶蚀交代;晚期的黄铜矿与闪锌矿形成乳浊状结构。部分黄铜矿颗粒被赤铁矿溶蚀交代,形成溶蚀结构。局部可见黄铜矿与斑铜矿共生,黄铜矿呈叶片状分布在斑铜矿中,构成固溶体分解结构。斑铜矿呈他形粒状分布,粒径在 0.01 到 0.5 mm 之间,多交代溶蚀黄铜矿的边缘。光片中多见斑铜矿向铜蓝蚀变的中间过程,局部还可见斑铜矿被铜蓝溶蚀交代。辉铜矿含量很低,呈他形粒状分布,粒径约 0.01 mm,可见被磁铁矿溶蚀交代形成的交代残余结构。铜蓝呈他形粒状分布,粒径在 0.01 到 0.1 mm 之间。铜蓝主要由斑铜矿蚀变而来,光片中可见二者的中间产物。铜蓝多沿黄铜矿和斑铜矿的边缘分布,交代溶蚀黄铜矿和斑铜矿。

矿石中的铁矿物以磁铁矿和赤铁矿为主。磁铁矿呈半自形-他形粒状分布,粒径在 0.02 到 0.5 mm 之间,压碎现象普遍,裂隙多被碳酸盐矿物充填胶结,部分裂隙的边缘分布有细粒状和脉状的赤铁矿,也可见由黄铜矿交代溶蚀形成的交代残余结构。赤铁矿呈半自形或他形粒状、集合体状分布,粒径多在 0.01~0.3 mm 之间,少数颗粒粒径可达 0.8 mm。赤铁矿压碎现象也较普遍,裂隙多被碳酸盐矿物充填胶结,晶隙间常被黄铜矿交代溶蚀形成溶蚀边结

构。

2 浮铜粗选条件试验

按图 1 流程进行浮铜粗选条件试验。试验中磨矿采用 XMQ-67  $\phi$  240  $\times$  90 型锥形球磨机,浮选采用 XFD-63 型单槽式浮选机。试验用水为自来水,浮选药剂均为工业品。单元试样重 500 g。

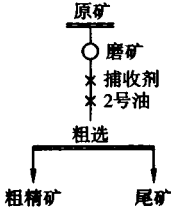


图 1 浮铜粗选条件试验流程

2.1 磨矿细度试验

以丁黄药为捕收剂,在丁黄药用量为 100 g/t,2 号油用量为 44 g/t 的条件下,按图 1 流程进行磨矿细度试验,试验结果如图 2 所示。可见:粗精矿铜品位随磨矿细度变化较小,而铜回收率随着磨矿细度的变细先略有上升,达到最高后反而急剧下降。金、银的品位和回收率均在磨矿细度为 -0.074 mm 占 78.9% 时达到最优。综合考虑,选择 -0.074 mm 占 78.9% 的磨矿细度进行后续粗选条件试验。

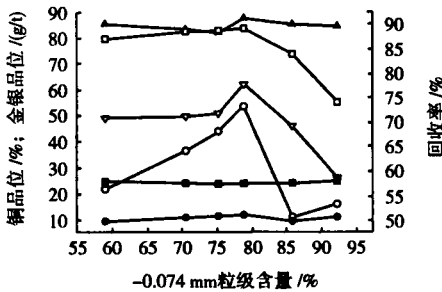


图 2 磨矿细度试验结果

■—铜品位; □—铜回收率; ●—金品位;  
○—金回收率; ▲—银品位; ▽—银回收率

2.2 捕收剂种类试验

捕收剂是影响浮选过程的一个重要因素,选择合适的捕收剂不仅是获得良好试验指标的保证,也是控制选矿成本的关键。在磨矿细度为 -0.074 mm 占 78.9%,捕收剂用量为 200 g/t,2 号油用量为 44 g/t 的条件下,分别以栖霞黄药(现场所用纯度较低的高级黄药),Z-200,丁黄药,丁黄药+丁胺黑药(质量比 2:1),栖霞黄药+丁胺黑药(质量比 2:1)为捕收剂,按图 1 流程进行捕收剂种类试验,试验结果如图 3 所示。可见:采用单一丁黄药时,可获得较好的综合指标;采用丁黄药+丁胺黑药组合时,两种

药剂的协同效应使粗精矿的铜、金、银回收率较高,但铜、金、银品位较低。根据图3结果,选择丁黄药作为捕收剂进行后续粗选条件试验。

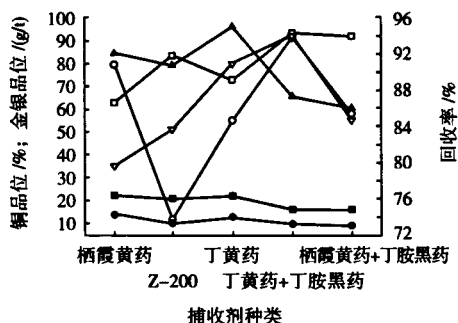


图3 捕收剂种类试验结果

■—铜品位;□—铜回收率;●—金品位;  
○—金回收率;▲—银品位;▽—银回收率

### 2.3 丁黄药粗选用量试验

在磨矿细度为 $-0.074\text{ mm}$ 占78.9%,2号油用量为44 g/t的条件下,按图1流程进行丁黄药粗选用量试验,试验结果如图4所示。可见:随着丁黄药用量的增加,粗精矿的铜品位逐渐下降;而铜回收率则先是上升,但在丁黄药用量达到100 g/t后变化不大。故选择丁黄药粗选用量为100 g/t。

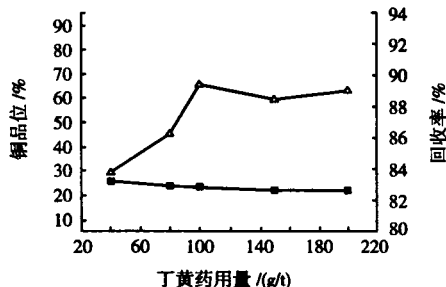


图4 丁黄药粗选用量试验结果

■—铜品位;□—铜回收率

### 2.4 2号油粗选用量试验

在磨矿细度为 $-0.074\text{ mm}$ 占78.9%,丁黄药用量为100 g/t的条件下,按图1流程进行2号油粗选用量试验,试验结果如图5所示。可见:增大2号油用量对粗精矿铜、金、银品位影响较小,却能使铜、金、银的回收率大幅度提高。因此确定2号油粗选用量为44 g/t。

### 3 闭路流程试验

在粗选条件试验和开路流程试验的基础上,按图6所示一粗三扫常规浮选流程和图7所示异步浮选流程进行闭路试验。为了获得更好的试验指标和考察混合捕收剂在闭路条件下的选铜效果,试验中

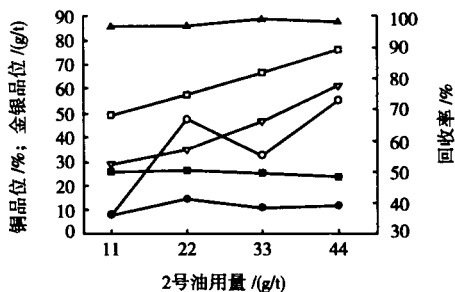


图5 2号油用量试验结果

■—铜品位;□—铜回收率;●—金品位;  
○—金回收率;▲—银品位;▽—银回收率

采用 $-0.074\text{ mm}$ 占78.9%和 $-0.074\text{ mm}$ 占85.9%两种磨矿细度以及丁黄药和丁黄药+丁胺黑药(质量比2:1)两种捕收剂进行对比。试验结果见表4和表5。

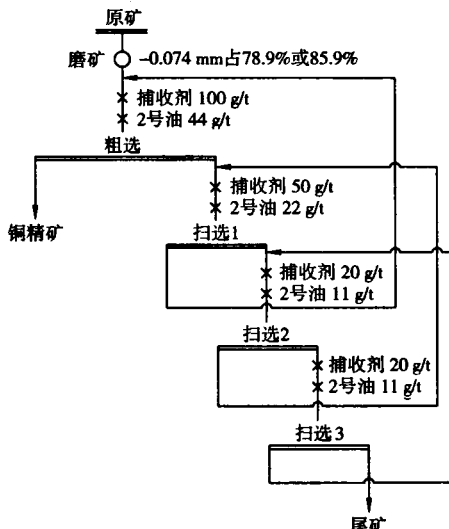


图6 常规浮选闭路流程及条件

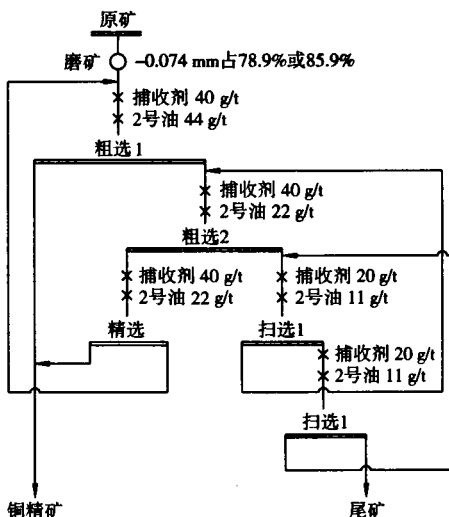


图7 异步浮选闭路流程及条件

表 4 常规浮选闭路试验结果

%

| 磨矿细度<br>(-0.074 mm) | 捕收剂           | 产 品 | 产 率    | 品 位    |        |       | 回 收 率  |        |        |
|---------------------|---------------|-----|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                     |               |     |        | Cu     | Au     | Ag    | Cu     | Au     | Ag     |
| 78.9                | 丁黄药           | 铜精矿 | 5.98   | 18.150 | 10.400 | 66.46 | 93.52  | 88.26  | 81.57  |
|                     |               | 尾 矿 | 94.02  | 0.080  | 0.088  | 0.95  | 6.48   | 11.74  | 18.43  |
|                     |               | 原 矿 | 100.00 | 1.160  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 85.9                | 丁黄药           | 铜精矿 | 4.74   | 22.970 | 13.390 | 85.82 | 94.35  | 90.11  | 83.46  |
|                     |               | 尾 矿 | 95.26  | 0.068  | 0.073  | 0.85  | 5.65   | 9.89   | 16.54  |
|                     |               | 原 矿 | 100.00 | 1.153  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 85.9                | 丁黄药 +<br>丁胺黑药 | 铜精矿 | 5.22   | 21.440 | 12.490 | 79.80 | 95.89  | 92.57  | 85.53  |
|                     |               | 尾 矿 | 94.78  | 0.051  | 0.055  | 0.74  | 4.11   | 7.43   | 14.47  |
|                     |               | 原 矿 | 100.00 | 1.167  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

注: Au 和 Ag 的品位单位为 g/t。

表 5 异步浮选闭路流程试验结果

%

| 磨矿细度<br>(-0.074 mm) | 捕收剂           | 产 品       | 产 率    | 品 位    |        |       | 回 收 率  |        |        |
|---------------------|---------------|-----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                     |               |           |        | Cu     | Au     | Ag    | Cu     | Au     | Ag     |
| 78.9                | 丁黄药           | 铜精矿       | 5.79   | 18.640 | 11.570 | 66.80 | 93.47  | 95.10  | 79.38  |
|                     |               | 尾 矿       | 94.21  | 0.080  | 0.037  | 1.07  | 6.53   | 4.90   | 20.62  |
|                     |               | 原 矿       | 100.00 | 1.154  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 85.9                | 丁黄药           | 82.34 铜精矿 | 4.68   | 22.850 | 14.270 | 85.69 | 93.72  | 94.83  | 94.83  |
|                     |               | 尾 矿       | 95.32  | 0.075  | 0.038  | 0.90  | 6.28   | 5.17   | 17.66  |
|                     |               | 原 矿       | 100.00 | 1.141  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 85.9                | 丁黄药 +<br>丁胺黑药 | 85.06 铜精矿 | 5.25   | 21.310 | 12.840 | 78.84 | 94.81  | 95.86  | 95.86  |
|                     |               | 尾 矿       | 94.75  | 0.065  | 0.031  | 0.77  | 5.19   | 4.14   | 14.94  |
|                     |               | 原 矿       | 100.00 | 1.181  | 0.704  | 4.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

注: Au 和 Ag 的品位单位为 g/t。

由表 4 和表 5 可以看出,当磨矿细度为 -0.074 mm 占 78.9% 时,以单一丁黄药作捕收剂,两种流程的选别指标相近,铜精矿铜回收率可达 93% 左右,但铜品位仅在 18% 左右。说明铜矿物可浮性较好,低捕收剂用量就能使大部分铜矿物得到回收,但铜矿物单体解离不充分,部分连生体上浮造成精矿品位较低。

磨矿细度提高至 -0.074 mm 占 85.9% 后,仍然以单一丁黄药作捕收剂,两种流程所获铜精矿的铜品位都得到了有效提高,可以达到 22.85% 以上,同时铜回收率也略有提高。

在相同的 -0.074 mm 占 85.9% 磨矿细度下,丁黄药 + 丁胺黑药混合捕收剂比单一丁黄药的捕收能力强,铜精矿铜、金、银的回收率均有 1~2 个百分点的提高,但铜、金、银品位稍有降低。

采用相同磨矿细度和捕收剂,两种流程所获铜精矿的铜品位和铜回收率相当,但异步浮选流程对

金的回收效果却明显好于常规浮选流程,金的回收率高出 3~7 个百分点。此外,异步浮选流程具有更加贴合目前的生产流程,有利于工艺改造的优势。

4 结 论

(1) 铜绿山铜铁矿井下深部矿石属自熔性原生铜铁矿石,矿石矿物组成较为复杂,铜的氧化率较低。

(2) 矿石中黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿和铜蓝等铜的硫化物多交代共生。黄铜矿的构造形式多样,并且交代残余严重,嵌布粒度较细,必须细磨才能有效单体解离,这给黄铜矿的分选带来不利影响。

(3) 改善现场现有磨矿制度是处理铜绿山铜铁矿深部矿石的关键。将磨矿细度从目前现场生产所采用的 -0.074 mm 占 63%~70% 提高到 -0.074 mm 占 85.9%,按异步浮选流程和常规浮选流程均能获得较好的选铜试验指标,但异步浮选流程更有利于金的综合回收。

(下转第 101 页)

- 山,2007(6):25-29.
- [10] 《现代铁矿石选矿》编委会. 现代铁矿石选矿[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009:31-35.
- [11] 张长久. HP 型圆锥破碎机提高碎磨效率生产实践[C]//金属矿山杂志社. 2004 年全国选矿新技术及发展方向学术研讨与技术交流会论文集. 马鞍山:金属矿山杂志社,2004:237-242.
- [12] 葛新建. 高压辊磨工艺在我国冶金矿山的应用现状[J]. 现代矿业,2009(9):1-5.
- [13] 田嘉印,刘保平,陈占金,等. 我国红铁矿选矿高效节能技术及设备评述[J]. 金属矿山,2005(9):4-10.
- [14] 王薛芬. 高压辊磨工艺在我国冶金矿山的应用现状[J]. 现代矿业,2009(9):108-110.
- [15] 吴世清,圣 洪,赵光宇,等. YCG 系列粗粒辊式强磁选机的研制及现场生产应用[C]//金属矿山杂志社. 2006 年全国金属矿节约资源及高效选矿加工利用学术研讨会论文集. 马鞍山:金属矿山杂志社,2005:135-138.
- [16] 梁殿印. 磁选设备新进展[C]//中国有色金属学会第六届学术年会论文集. 北京:中国有色金属学会,2005:75-85.

- [17] 熊大和. SLon 立环脉动高梯度磁选机分选红矿的研究与应用[J]. 金属矿山,2005(8):24-29.
- [18] 朱格来,张国庆,唐文彬,等. SLon 磁选机在调军台选矿厂改造前后工艺中的应用[J]. 金属矿山,2008(6):79-81.
- [19] 孙仲元. 磁选理论[M]. 修订版. 长沙:中南大学出版社,2007:171-176.
- [20] 汤玉和,朱远栋,何健全. 新型 SSS 高梯度磁选机在酒钢选矿厂的应用研究[J]. 金属矿山,2007(7):53-56.
- [21] 葛英勇,袁武谱,等. 阴离子捕收剂 MG 常温反浮选铁矿的应用研究[J]. 有色金属:选矿部分,2008(5):41-43.
- [22] 葛英勇,余永富,陈 达,等. 脱硅耐低温捕收剂 GE-609 的浮选性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2005,27(8):17-19.
- [23] 伍喜庆,刘长森,黄志华. 一种铁矿物与石英分离的有效浮选药剂[J]. 矿冶工程,2005,25(2):41-43.
- [24] 任建伟,王毓华. 铁矿反浮脱硅的试验研究[J]. 矿产保护与利用,2004(1):31-34.

(收稿日期 2010-06-20)

(上接第 74 页)

(4)在  $-0.074\text{ mm}$  占 85.9% 的磨矿细度下,以单一丁黄药为捕收剂,异步浮选流程获得的铜精矿含铜 22.85%,含金 14.27 g/t,含银 85.69 g/t,相应的铜、金、银回收率分别为 93.72%,94.83%,82.34%;采用丁黄药+丁胺黑药组合捕收剂,可使铜、金、银的回收率提高 1~2 个百分点,但铜、金、银品位略有降低。

### 参 考 文 献

- [1] 龙仲胜,张 芹,等. 大冶铜绿山坑采难选矿选铜试验研究[J]. 金属矿山,2007(12):61-63.

- [2] 周乐光. 工艺矿物学[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [3] 李荣改,宋翔宇,等. 含泥难选氧化铜矿石选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2008,28(1):46-50.
- [4] 汤雁斌. 铜绿山氧化铜矿石选矿工艺探讨[J]. 中国矿山工程,2004,33(4):13-16.
- [5] 苗爱民,魏盛甲. 锡铁山铅锌矿深部矿石工艺矿物学评价[J]. 现代矿业,2009(7):36-38.
- [6] 胡 真. 西部某低品位硫化铜矿选矿工艺流程的研究[J]. 有色金属:选矿部分,2004(6):14-17.
- [7] 张自业,陈红秩,等. 河南某多金属铁矿石选矿试验研究[J]. 金属矿山,2009(6):80-83.

(收稿日期 2010-06-15)

(上接第 88 页)

矿. 铁矿物以大量的褐铁矿为主,有少量磁铁矿、赤铁矿. 脉石矿物主要为绢云母、高岭石,其次为石英、方解石。

(2)采用浮选和化学浸出方法,可回收矿石中黄铜矿、孔雀石和硅孔雀石所含的铜,预计铜的理论回收率为 60%~61%。矿石中铁矿物和脉石中所含占原矿总铜量 39%~40% 的铜难以用冷酸浸出,需采用加温或加压等手段强化浸出工艺才能提高铜的回收率。

(3)矿石中绢云母、高岭土等粘土类矿物占 25%,并有 40% 易泥化的褐铁矿,因而该矿石含泥量极大. 粘土类矿物和褐铁矿对提铜工艺的影响,一方面是会加大浮选药剂的消耗,另一方面是会引

起堆浸矿堆通道堵塞,使酸液不能发挥作用而影响浸铜效果。

(4)褐铁矿中富含的结合铜的有效浸出,是提高铜回收率的关键。

### 参 考 文 献

- [1] 吴 霞,罗 琳,罗 丕. 青海某氧化铜矿选矿工艺研究[J]. 矿冶,2009,18(1):15-18.
- [2] 宋 涛,雷 霆,张汉平. 云南某低品位氧化铜矿的选矿试验研究[J]. 有色金属:选矿部分,2008(6):36-38.
- [3] 刘殿文,张文彬,方建军,等. 试论东川汤丹难选氧化铜矿的工艺矿物学特征及可选性[J]. 云南冶金,2003,32(3):7-8.
- [4] 梁冬云,张志雄. 湖北石头咀氧化铜铁矿石工艺矿物学研究[J]. 广东有色金属学报,1991,1(2):81-85.

(收稿日期 2010-06-12)