某难选铜铁多金属矿高效分选与综合回收试验

郭风芳[1]，张严之[2]，赵 强[3]

（1. 海南矿业股份有限公司，海南 昌江 571927；2. 湖南省建筑材料研究设计院有限公司，湖南 长沙 410125；
3. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：某铜铁多金属矿中铜主要以黄铜矿的形式赋存，质量分数为 0.26%；铁主要以磁黄铁矿、磁铁矿与褐铁矿的形式赋存，质量分数为 27.88%；砷主要以毒砂的形式赋存，质量分数为 0.76%。其矿物嵌布粒度较细，且相互间的共生关系密切，属复杂难选高硫高砷的铜－铁多金属矿。基于矿石的性质特点，本文开展系统的选矿试验研究，制定“优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”的选别工艺流程，通过采用 Z－200 为铜捕收剂，强化粗精矿再磨、铁精矿脱硫等多项措施，有效提高原矿分选过程中铜、铁的回收效果。闭路试验获得了铜品位为 25.25%、回收率为 81.81%、砷质量分数为 0.16% 的铜精矿，以及铁品位为 64.98%、回收率为 33.26%、硫质量分数为 0.15% 的铁精矿，实现铜、铁、硫矿物的高效分选与综合回收，为类似资源的开发利用提供借鉴。

关键词：铜铁多金属矿；黄铜矿；磁黄铁矿；毒砂；浮－磁联合工艺

中图分类号：TD95 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0070－10

doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.077

Test on efficient separation and comprehensive recovery of a refractory copper-iron polymetallic ore

GUO Fengfang[1], ZHANG Yanzhi[2], ZHAO Qiang[3]

(1. Hainan Mining Co., Ltd., Changjiang 571927, Hainan, China; 2. Hunan Province Materials Design Institute Co., Ltd., Changsha 410125, Hunan, China; 3. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Copper in a copper-iron polymetallic ore is mainly in the form of chalcopyrite, with a mass fraction of 0.26%. Iron is mainly in the form of pyrrhotite, magnetite and limonite, with a mass fraction of 27.88%. Arsenic is mainly in the form of toxic sand, with a mass fraction of 0.76%. Its mineral embedding has a fine particle size and a close symbiotic relationship with each other, which is a complex copper-iron polymetallic ore with high sulfur and high arsenic. Based on the nature and characteristics of the ore, a systematic beneficiation test is carried out, the separation process of “preferential copper separation-weak magnetic iron separation, iron separation, iron-sulfur separation” is formulated, and the recovery effect of copper and iron in the process of raw ore separation is effectively improved by using Z－200 as the copper collector to strengthen the re-grinding of crude concentrate and desulfurization of iron concentrate. The closed-circuit test obtains copper concentrate with a copper grade of 25.25%, a recovery rate of 81.81% and an arsenic mass fraction of 0.16%, and an iron concentrate with an iron grade of 64.98%, a recovery rate of 33.26% and a sulfur mass fraction of 0.15%, which realizes the efficient separation and comprehensive recovery of copper, iron and sulfur minerals, and provides references for the development and utilization of similar resources.

Key words: copper-iron polymetallic ore; chalcopyrite; pyrrhotite; arsenopyrite; combined floating-magnetic process

收稿日期：2024－02－20；**修回日期**：2024－03－05

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902305)

作者简介：郭风芳(1965—)，男，高级工程师，从事选矿工艺技术与工程管理方面的研究工作。

铜是一种重要的金属元素，具有优良的导电性、导热性、延展性、耐腐蚀性和耐磨性等，被广泛地应用于电力、电子、能源、石化、机械、轻工、新兴产业等领域[1-3]。自然界中的铜通常以矿物形式存在，例如黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿等。其中黄铜矿广泛分布于世界各地，是最重要的含铜矿物资源[4]。由于成矿作用，黄铜矿往往与黄铁矿、毒砂、磁铁矿等矿物共存，形成复杂的矿物集合体，影响了黄铜矿的高效回收[5]。因此，工业上通常使用泡沫浮选、磁选、电选等联合选别方法将该类型矿石中铜、铁等资源分离回收，然而受限于矿石性质变化的制约，如何高效利用该类型资源成为待解决的重要问题[6-7]。

目前，针对该类型资源的选别工艺有优先浮选工艺、磁－浮联合工艺等[8-9]，其中优先浮选工艺应用最广泛，但对于既有硫化矿又有氧化矿的复杂矿石浮选效果较差。因此，使用磁－浮或浮－磁联合工艺成为解决这类矿石有效的方法[10-11]。然而，由于不同区域矿石性质具有差异性，如何有针对性地制定合理的综合回收工艺仍然需要加强研究[12]。某铜铁多金属矿矿物组成复杂，有价元素主要为铜和铁。其中铜元素约 90% 以硫化物的物相赋存，主要为黄铜矿，矿物质量分数在 0.5% 以上；铁元素主要赋存于磁铁矿、磁黄铁矿与褐铁矿中；矿石中有害元素砷的质量分数达到了 0.75%，且主要以毒砂的形式赋存，具有较好的可浮性。矿石中黄铜矿、磁铁矿与磁黄铁矿嵌布粒度细，共生关系密切，尤其与毒砂的连生紧密，分选难度较大。可通过筛选高选择性的捕收剂，强化磨矿以提高矿物的单体解离度等方式实现与毒砂的有效分离。矿石中磁黄铁矿的含量高且磁性强，可通过强化脱硫来提高磁铁矿精矿的品质。围绕上述问题和研究思路，本文对该铜－铁多金属矿开展工艺矿物学分析和选矿试验研究，并有针对性制定浮选工艺，实现该铜－铁多金属硫化矿石中铜、铁、硫等资源的高效综合回收。

1　矿石性质

1.1　化学多元素

对某铜－铁多金属矿进行化学多元素分析，结果如表 1 所示。由表 1 可见，该矿石铜品位为 0.26%、铁品位为 27.64%，其它有价元素的含量较低，因此含铜矿物与含铁矿物为选矿回收的主要目的矿物。矿石中的有害元素砷质量分数达到了 0.75%，因此在铁或铜的选矿富集过程中，均必须考虑砷的脱除；铅、锌、钨、钒等金属元素的含量极低，无需考虑进行单独回收；铝、镁、硅、钙等元素含量较高，主要为脉石矿物组成元素（主要为铝硅酸盐矿物、含钙镁辉石与榴石等脉石矿物），但这部分矿物对于含铜矿物与含铁矿物的选矿回收影响较小。

表 1　原矿化学多元素分析结果（质量分数）

Table 1　Chemical multi-element analysis results of raw ore　　%

Fe	Cu	S	Pb	As	Zn
27.84	0.26	4.56	0.03	0.75	0.01
MgO	Al_2O_3	SiO_2	WO_3	V_2O_5	Na_2O
8.61	5.37	14.29	0.02	0.03	0.87

1.2　矿物组成

采用 MLA（矿物参数自动分析仪）对矿石的矿物组成进行分析，结果如表 2 所示。由表 2 可见，该矿石矿物组成复杂，主要含铜矿物为黄铜矿，质量分数为 0.54%，是选矿回收的主要的目的矿物之一。矿石中磁铁矿质量分数为 16.36%，是可回收的主要铁矿物；其余的含铁矿物主要为磁黄铁矿，质量分数为 12.09%；弱磁性铁矿物主要为褐铁矿，质量分数为 6.34%，其余还有少量的黄铁矿。矿石主要有害矿物为毒砂，质量分数为 3.07%，其作为硫化矿可浮性好，在黄铜矿浮选中需重点考察铜、砷分离；此外，毒砂同样可能以夹带或连生体的形式进入磁铁矿精矿中，铁精

表 2　矿物组成分析结果（质量分数）

Table 2　Analysis results of mineral composition　　%

磁铁矿	磁黄铁矿	褐铁矿	自然铁	毒砂	黄铜矿	黄铁矿
16.36	12.09	6.34	0.98	3.07	0.54	0.20
石榴子石	辉石	石英	长石	方解石	符山石	云母
27.4	24.96	3.82	1.20	0.71	0.49	0.45
铋华	白钨矿	橄榄石	方铅矿	铁闪锌矿	白铅矿	其他
0.01	0.01	0.28	0.01	0.04	0.12	0.92

矿中砷的去除也同样需要着重探索。矿石中非金属矿物为辉石、石榴子石、石英与长石，质量分数达到了 50% 以上，但其总体上对于铜、铁的回收影响不大。

1.3 主要矿物嵌布特征

（1）磁铁矿。磁铁矿为矿石中主要的含铁矿物，最具回收价值，质量分数为 16.36%。如图 1 所示，磁铁矿主要呈不规则状、片状、粒状嵌布，部分与磁黄铁矿、辉石、褐铁矿、石英嵌镶共生，少量呈不规则粒状被包裹在辉石等脉石矿物中，总体上与其它矿物的嵌镶关系简单，有利于单体解离。图 2 可观察到褐铁矿与磁铁矿边缘交代共生。

（2）磁黄铁矿。磁黄铁矿的质量分数仅次于磁铁矿，达到 12.09%。如图 3 所示，磁黄铁矿主要以粒状、不规则状、长条状、片状嵌布，并与辉石、毒砂、方解石、橄榄石紧密连生，少部分与磁铁矿连生，连生体的边界多呈港湾状、锯齿状，不利于其单体解离。图 4 可观察到方解石与磁黄铁矿边缘交代连生。橄榄石呈针状、不规则状嵌布在磁黄铁矿中。

（3）毒砂。对于铁与铜的分选，毒砂是有害矿物，其矿物质量分数达到 3.07%。如图 5 所示，毒砂主要呈不规则状、粒状、条状、网脉状，部分毒砂与黄铁矿、磁黄铁矿、方解石、辉石、磁铁矿、石榴子石等矿物交代连生，形成矿物集合体；小部分黄铜矿呈条状充填于毒砂的裂隙中，该部分矿物单体解离较为困难；部分毒砂与黄铜矿紧密共生(图 6)。

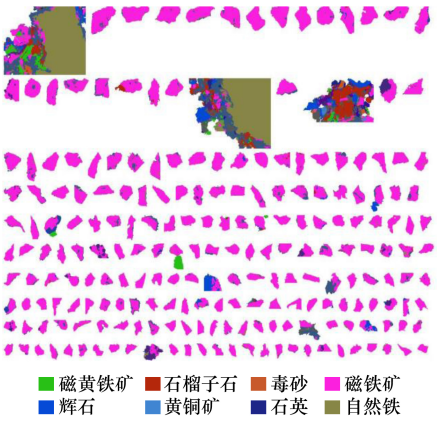
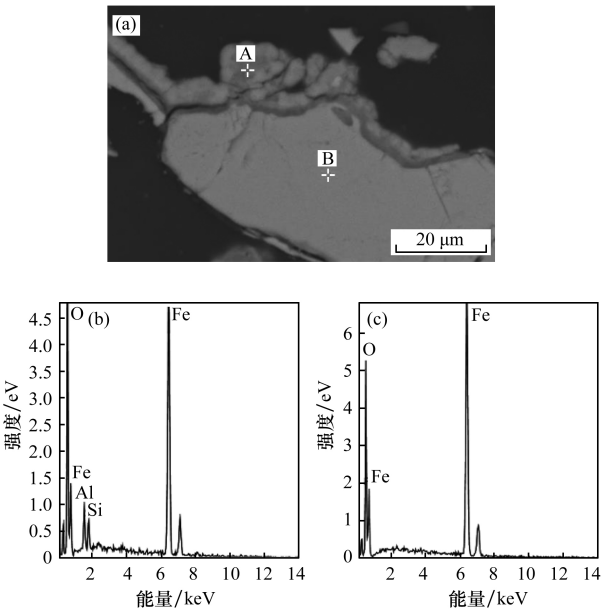


图 1 磁铁矿嵌布特征

Fig. 1 Embedded characteristics of magnetite



（a）磁铁矿的扫描电镜图像。

X 射线能谱图：（b）褐铁矿；（c）磁铁矿

图 2 褐铁矿(点 A)与磁铁矿(点 B)边缘交代共生

Fig. 2 Coexistence of marginal metasomatism between limonite(point A) and magnetite(point B)

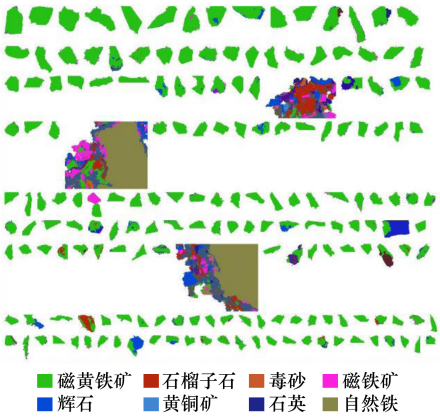


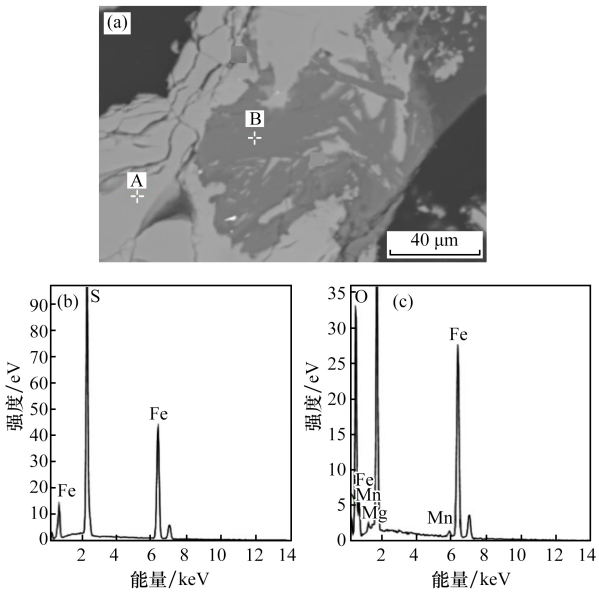
图 3 磁黄铁矿嵌布特征

Fig. 3 Embedded characteristics of pyrrhotite

（4）黄铜矿。黄铜矿是主要的硫化矿物，但矿物质量分数较低，仅为 0.54%。如图 7 所示，黄铜矿主要呈不规则状、粒状，少部分呈脉状与点状分布于辉石、石榴子石等非金属矿物中，部分黄铜矿与磁黄铁矿、辉石交代连生，与毒砂紧密共生，形成矿物集合体，黄铜矿总体上与其它矿物的嵌布关系较为复杂，对于其单体解离不利。

2 试验方案的确定

矿石中铜主要以黄铜矿的形式赋存，可采用



（a）磁黄铁矿的扫描电镜图像。

X 射线能谱图：（b）磁黄铁矿；（c）橄榄石

图 4　橄榄石(点 B)呈针状、不规则状嵌布在磁黄铁矿(点 A)中

Fig. 4　Olivine(point B) is needle shaped and irregularly embedded in magnetite(point A)

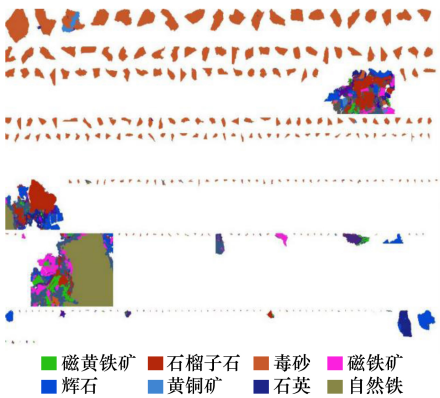


图 5　毒砂嵌布特征

Fig. 5　Embedded characteristics of arsenopyrite

浮选的方法进行回收；铁主要以磁铁矿的形式赋存，其次为磁黄铁矿与磁铁矿，可采用磁选的方法进行回收。由于矿石中铁与铜的回收工艺差异大，确定浮选回收铜与磁选回收铁的顺序极为关键。

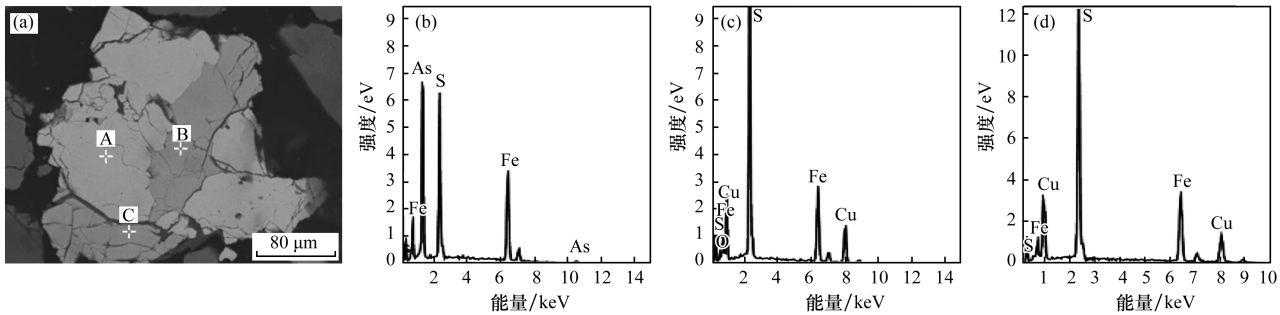
从探索性的试验效果上看，在采用“先铁后铜”原则工艺流程对原矿进行选别时，由于矿石中黄铜矿与磁黄铁矿共生关系密切，需要在较高的磨矿细度下进行磁选，但依然难以避免大量的铜在铁精矿矿中的损失(铜在铁精矿中的分布率超过 7%)。而较高细度磨矿不仅会导致铁的磁选指标不佳，还会对后续铜的浮选回收产生不利影响。此外，工业上磁选通常在较低的浓度下进行，而浮选浓度则相对更高，若先通过磁选回收铁，则在浮选前还需要对磁选的尾矿进行浓缩。鉴于此，对于该铜铁矿石，宜采用“先浮后磁”工艺流程进行选别。

3　试验结果与讨论

3.1　铜浮选条件试验

3.1.1　铜粗选捕收剂试验

采用图 8 流程进行铜粗选条件试验。选取选择性高、捕收性能好的捕收剂是保障铜矿物回收的关键。试验探索乙硫氮、酯 105，以及三种硫胺脂类药剂(Z－200、TQ－06、ZQ－11)对铜选别效果的影响，其中乙硫氮用量为 100 g/t，其它捕收剂用量均为 44 g/t。磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数为 85%、2#油用量为 14 g/t。试验结果如图 9 所示。由图 9 可见，采用 Z－200 作为捕收剂优先选铜，选别指标相对要好于其它 4 种捕收剂，该捕收剂可以得到 Cu 品位为 5.33%、Cu



（a）毒砂的扫描电镜图像。X 射线能谱图：（b）毒砂；（c）黄铜矿；（d）黄铜矿

图 6　毒砂(点 A)与黄铜矿(点 B、点 C)紧密共生

Fig. 6　Arsenopyrite(point A) closely coexists with chalcopyrite (point B, point C)

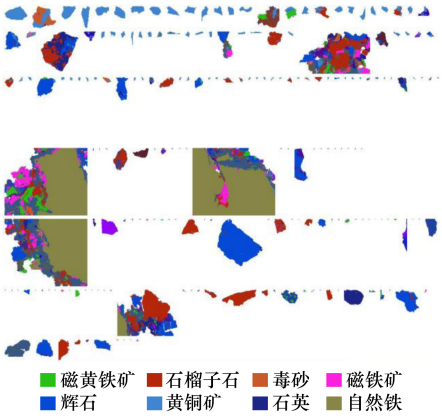


图 7 黄铜矿嵌布特征

Fig. 7 Embedded characteristics of chalcopyrite

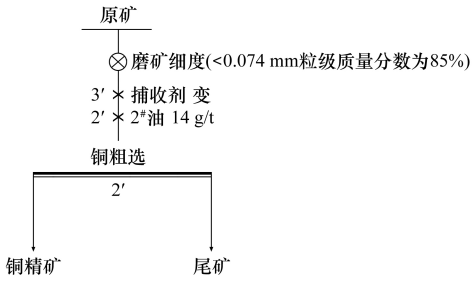
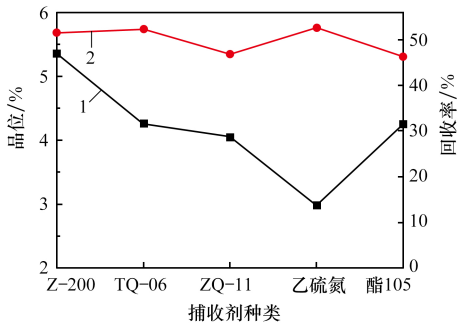


图 8 铜粗选条件试验流程

Fig. 8 Test process of copper rough selection condition



1—Cu 品位；2—Cu 回收率。

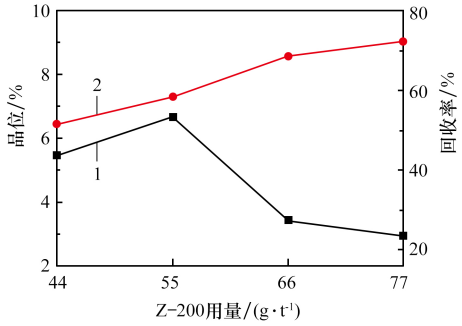
图 9 铜粗选捕收剂试验结果

Fig. 9 Test results of copper roughing collector

回收率为 51.55% 的铜粗精矿。其中，采用 LP-01 作为捕收剂时也能获得较好的 Cu 品位指标，但回收率相对更低；采用乙硫氮虽然可以得到更高的回收率，但品位最低。因此，采用 Z－200 作为捕收剂进一步优化浮选指标。

3.1.2 铜粗选捕收剂用量条件试验

在捕收剂种类条件试验中发现，5 种捕收剂得到的铜精矿回收率均小于 60%，效果较差。原因可能在于铜矿中 Cu 品位低，捕收剂用量不够。因此对捕收剂用量进行优化。试验固定磨矿细度 < 0.074 mm 粒级质量分数为 85%、$2^{\#}$ 油用量为 14 g/t的条件，考察捕收剂 Z－200 用量对铜浮选指标的影响。试验结果如图 10 所示。由图 10 可见，通过优化用量，Z－200 捕收剂体系下的铜浮选回收指标均有一定程度的提升。然而，过高的用量会造成铜精矿品位的下降，这主要是过大的捕收剂用量导致毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿等硫化矿物上浮。从试验结果上看，最佳的 Z－200 用量为55 g/t。在该用量下，可获得含 Cu 品位为 6.68%、Cu 回收率为 58.37% 的铜粗精矿。



1—Cu 品位；2—Cu 回收率。

图 10 铜粗选捕收剂用量试验结果

Fig. 10 Test results of copper roughing collector dosage

3.1.3 铜粗选段数条件试验

增大捕收剂用量可以明显改善 Cu 的品位和回收率，然而该回收率仍然低于 60%。分析原因是采用一段粗选可能使部分上浮速度较慢的铜矿物难以有效回收，因此考察粗选段数对铜浮选指标的影响。采用两段粗选可以适当降低第一段 Z－200 的用量，并补充到第二段铜浮选中加强浮选速率慢的铜矿物的回收，因此设置第一段 Z－200的用量为 44 g/t、第二段 Z－200 的用量为 22 g/t。试验结果如表 3 所示。

由表 3 可见，采用二段铜粗选时，铜的回收效果大幅提升。第二段铜粗选可得到 Cu 品位为 5.21%、Cu 回收率 29.26% 的铜精矿 2。此外，对各产品中砷的含量进行分析可知：原矿中近 10% 的砷进入了铜精矿中，尤其是铜精矿 1 中砷的质量分数达到 2.56%、分布率为 7.96%，铜精矿 2 中砷的分布率更低，仅为 1.98%，铜精矿中砷的加权平均品位为 2.01%、分布率为 9.94%。因此，后续的铜精矿精选中需要重点考虑含砷矿物的抑制作用。

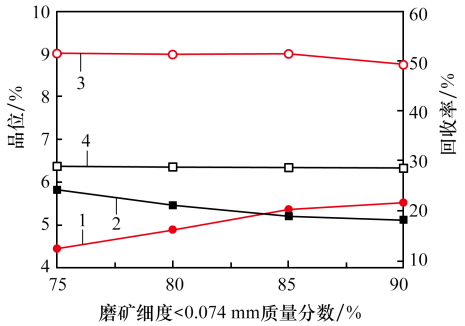
表 3　铜两段粗选条件试验结果(质量分数)

Table 3　Test results of copper two-stage rough selection condition　　%

产品名称	产率	品位		分布率	
		Cu	As	Cu	As
铜精矿 1	2. 33	5. 36	2. 56	51. 07	7. 96
铜精矿 2	1. 37	5. 21	1. 08	29. 26	1. 98
铜精矿加权值	3. 71	5. 30	2. 01	80. 33	9. 94
尾矿	96. 29	0. 05	0. 70	19. 67	90. 06
原矿	100. 00	0. 24	0. 75	100. 00	100. 00

3. 1. 4　*磨矿细度条件试验*

在浮选过程中为了得到较好的浮选指标，合适的解离度起着至关重要的作用。过高的磨矿细度会导致矿石泥化不利于回收，过低的磨矿细度使得目的矿物与脉石矿物未能充分解离，导致精矿品位差。因此，试验考察磨矿细度对于铜浮选回收指标的影响，试验结果如图 11 所示。由图 11 可见：当磨矿细度 <0. 074 mm 粒级质量分数从 75% 提高至 90% 时，铜精矿 1 的品位在逐步提升，对应的铜精矿 2 的品位在逐步降低；而铜精矿 1、2 的回收率变化较小，仅铜精矿 1 的回收率在磨矿细度 <0. 074 mm 粒级质量分数为 90% 时出现明显下降。总的来说，铜的选矿指标有较大幅度的提升，尤其体现的铜精矿的品位上，由 4. 85% 提高至 5. 51%，回收率变化相对较小。因此，综合考虑后续试验磨矿细度定为 <0. 074 mm 粒级质量分数为 85%。



1—铜精矿 1 品位；2—铜精矿 2 品位；

3—铜精矿 1 回收率；4—铜精矿 2 回收率。

图 11　磨矿细度条件试验结果

Fig. 11　Test results of grinding fineness condition

3. 1. 5　*精选条件试验*

在粗精矿中铜得到了较好的富集，品位为 5. 31%、含砷量约为 2%。需要通过精选进一步富集铜，一方面降低铜精矿中夹带的脉石矿物，另一方面分离铜精矿中其它的硫化矿，尤其是含砷矿物。为此，在铜粗选条件试验的基础上，进行精选试验，采用石灰作为抑制剂，调节 pH 值抑制铜精矿中的硫化矿(尤其是毒砂)上浮，选矿试验流程如图 12 所示，试验结果如表 4 所示。

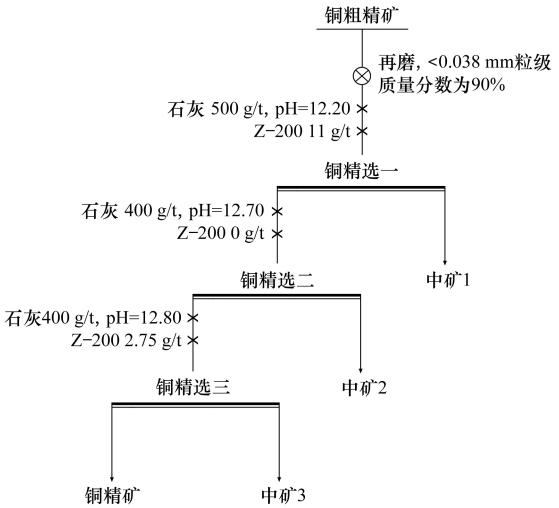


图 12　精选条件试验流程

Fig. 12　Test process of selected condition

表 4　精选条件试验结果(质量分数)

Table 4　Test results of selection condition　　%

产品名称	产率	品位		分布率	
		Cu	As	Cu	As
铜精矿	0. 71	26. 22	0. 17	74. 50	0. 16
中矿 1	2. 45	0. 42	2. 02	4. 14	6. 56
中矿 2	0. 39	0. 78	3. 85	1. 23	1. 99
中矿 3	0. 12	1. 58	4. 21	0. 74	0. 67
尾矿	96. 34	0. 05	0. 71	19. 40	90. 62
原矿	100. 00	0. 25	0. 75	100. 00	100. 00

精选条件试验对比了通过铜粗精矿直接精选与再磨后精选两种工艺，发现再磨后铜的品位有了显著的提升；此外，砷的含量也得到有效控制，可见通过再磨可以提高铜的单体解离度。由表 4 可知，将铜粗精矿再磨至 <0. 038 mm 粒级质量分数为 90%，经过三次精选后，铜精矿的品位提高至 26. 22%，砷的品位降低至 0. 17%，而铜的回收率仅出现少量降低，中矿中含铜较少的浮选指标良好。后续试验发现通过增加精选次数(精选 4 次)难以进一步大幅提升铜的品位，但铜在中矿的

损失大幅增加。因此，试验确定的精选次数定为 3 次，同时再磨细度 < 0.038 mm 粒级质量分数为 90%。

3.2 铁回收条件试验

对铜粗选尾矿经行两次扫选后，将得到的最终尾矿进行铁的分析，结果表明：尾矿中铁质量分数为 27.86%、S 质量分数为 11.92%。从工艺矿物学分析结果可知，矿石中的铁矿物主要为磁铁矿与磁黄铁矿，其中磁铁矿与磁黄铁矿具有强磁性，可以通过“弱磁—浮选”的联合工艺流程进行综合回收。矿石中还有部分铁矿物以褐铁矿的形式赋存，但含量总体较低，矿物质量分数仅为 6.34%，因此不考虑对其进行回收。

3.2.1 弱磁选场强条件试验

该阶段试验考察场强对于选铜尾矿中铁的弱磁选回收效果，试验流程如图 13 所示，试验结果如图 14 所示。由图 14 可见，随着磁场强度由 2 000 Gs 提高至 3 000 Gs，铁精矿中 Fe 的回收率提升幅度较大，进一步增加磁场强度至 5 000 Gs，Fe品位大幅下降，但铁的回收率增加幅度较小；

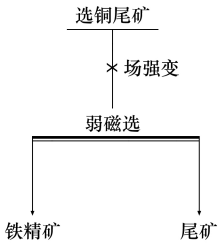
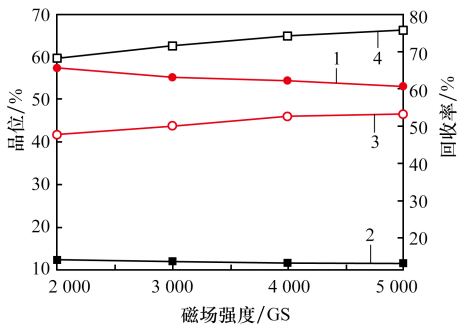


图 13 弱磁场强条件试验流程

Fig. 13 Test process of weak magnetic field strength condition



1—Fe 品位；2—S 品位；3—Fe 回收率；4—S 回收率。

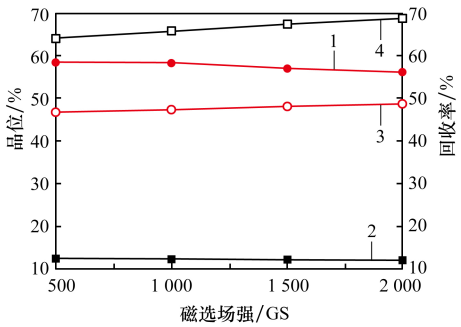
图 14 弱磁选场强条件试验结果

Fig. 14 Test results of weak magnetic field strength condition

此外，随着磁场强度的增加，铁精矿中硫的品位变化不大，但硫的分布率不断增加。经综合考虑，最佳的弱磁选场强为 3 000 Gs。

3.2.2 弱磁选精矿再磨磁选条件试验

由于选铜尾矿经弱磁选得到的铁精矿的铁质量分数仅为 55.22%，含硫量接近 12%。选铜尾矿的细度 < 0.074 mm 粒级质量分数仅为 85%，磁铁矿与磁黄铁矿的共生关系紧密，在此细度下二者的解离程度均较差。为此，对铁精矿进行再磨后进行弱磁选精选（试验中再磨细度选择为 < 0.038 mm 粒级质量分数为 83%，以使磁铁矿达到充分的单体解离），考察精选场强对铁精选效果的影响，结果如图 15 所示。由图 15 可见，随着磁场强度的增加，采用 2 000 Gs 精选与 1 500 Gs 精选时铁的分选指标相差不大，采用 1 000 Gs 精选尽管铁的品位有所提高，但回收率相对较低。总的来说通过弱磁选无法实现磁铁矿和磁黄铁矿的分离，但通过磁选可以提高铁精矿中 Fe 的品位。因此，后续试验精选磁场强度定为 1 500 Gs。



1—Fe 品位；2—S 品位；3—Fe 回收率；4—S 回收率。

图 15 弱磁选精矿条件试验结果

Fig. 15 Test results of concentrate conditions for weak magnetic separation

3.3 铁精矿反浮选脱硫试验

铁粗精矿经过再磨弱磁精选后，铁的品位仅为 57%，硫的质量分数高达 12%。矿石中含硫的铁矿物为磁黄铁矿，磁性较强，仅通过磁选的方式无法将其与磁铁矿分离。因此，该阶段试验采用浮选方法对铁精矿脱硫，试验流程如图 16 所示，试验结果如表 5 所示。

由表 5 可见：采用反浮选方法可将铁精矿中的硫有效脱除，可以得到铁质量分数为 64.98%、硫质量分数仅为 0.14%、铁作业回收率为 32.79%

的铁精矿；由于含铁硅酸盐、碳酸盐等脉石矿物存在，尾矿中 Fe 无法综合回收。此外，硫精矿 4 的产率极小，因此反浮选初选四段工艺的脱硫作用极小。因此，采用三段反浮选对铁精矿进行脱硫。此外，由表 5 可见，脱除的硫精矿中硫的质量分数均较低，主要在30% 以下，可以作为低品质的硫精矿。

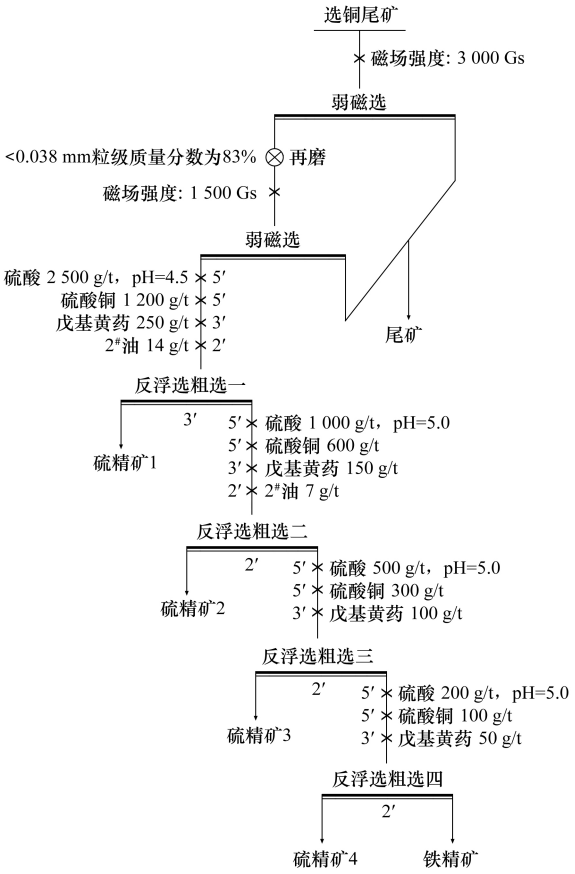


图 16　铁精矿反浮选脱硫试验流程

Fig. 16　Reverse flotation desulfurization test process of iron concentrate

表 5　铁精矿反浮选脱硫试验结果(质量分数)

Table 5　Reverse flotation desulfurization test results of iron concentrate　　%

产品名称	作业产率	Fe 品位	S 品位	Fe 作业回收率	S 作业回收率
铁精矿	14. 06	64. 98	0. 14	32. 79	0. 47
硫精矿 1	6. 22	43. 22	29. 27	9. 65	43. 01
硫精矿 2	1. 95	47. 87	29. 55	3. 35	13. 61
硫精矿 3	0. 94	50. 44	32. 44	1. 70	7. 20
硫精矿 4	0. 40	53. 27	35. 77	0. 76	3. 38
尾矿	76. 43	18. 86	1. 79	51. 74	32. 32
给矿	100. 00	27. 86	4. 23	100. 00	100. 00

3. 4　全流程闭路试验

在详细的条件试验基础上，进行“优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”浮选全闭路流程试验，试验流程如图 17 所示，试验结果如表 6 所示。由表 6 可见，针对该铜－铁多金属矿，采用“优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”工艺流程，在原矿含铜量为 0. 25%、含砷量为 0. 76%、含硫量为 4. 32%、含铁量为 27. 88% 的条件下，可以得到铜品位为25. 25%，铜回收率为81. 81% 的铜精矿。

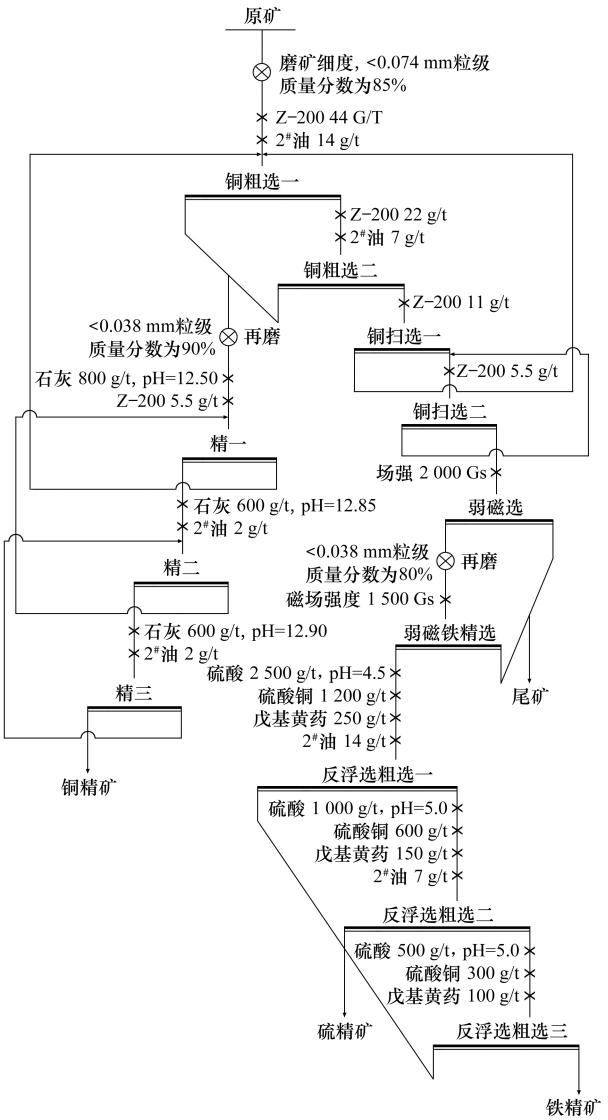


图 17　“优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”浮选闭路试验流程

Fig. 17　Flotation closed-circuit test process of “preferential copper separation-low intensity magnetic separation-iron-sulfur separation”

表6 “优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”浮选闭路流程试验结果

Table 6 Flotation closed-circuit test results of “preferential copper flotation-low intensity magnetic separation-iron-sulfur separation” %

产品名称	产率	品位				回收率			
		Cu	As	Fe	S	Cu	As	Fe	S
铜精矿	0.81	25.25	0.16	20.15	7.56	81.81	0.17	0.59	1.42
硫精矿	9.08	0.06	0.11	45.85	28.21	2.18	1.31	14.93	59.29
铁精矿	14.27	0.01	0.04	64.98	0.15	0.57	0.75	33.26	0.50
尾矿	75.84	0.05	0.98	18.83	2.21	15.44	97.76	51.22	38.8
原矿	100.00	0.25	0.76	27.88	4.32	100.00	100.00	100.00	100.00

铜精矿中砷的质量分数为0.16%，砷回收率为0.17%（相对原矿）。得到的铁精矿含铁量为64.98%，铁回收率33.26%，硫质量分数仅为0.15%。由于矿石中磁铁矿的理论回收率约为36%，因此大部分的磁铁矿得到了回收。总体可见，矿石中的铁与硫均得到了较好回收。

3 结 论

（1）某铜－铁多金属矿的矿物组成复杂，主要有价回收的组分为铜与铁。其中，铜的质量分数为0.25%，主要以黄铜矿的形式赋存；铁的质量分数为27.88%，主要以磁黄铁矿、磁铁矿与褐铁矿形式赋存。矿石中的主要有害组分为砷，以毒砂的形式赋存。矿石中铜、砷、硫、铁等矿物的共生关系密切，属高硫高砷的铜铁多金属矿，选别难度较大。在矿石选别中，黄铜矿与毒砂的分离、磁黄铁矿与磁铁矿的分离是提高选矿指标的技术关键。

（2）基于矿石的性质，通过系统试验研究，发现通过采用Z－200铜高选择性捕收剂，结合“两段粗选—粗精矿再磨—铜精选”流程可实现铜矿物的有效回收；采用“弱磁—磁选精矿再磨—浮选脱硫”对选铜尾矿进行选别，可实现矿石中磁铁矿的有效富集。

（3）在条件试验基础上，确定采用“优先选铜—弱磁选铁—铁硫分离”工艺对原矿的分选效果最佳，在闭路条件下可获得铜品位为25.25%，铜回收率为81.81%的铜精矿，铜精矿中砷的质量分数为0.16%、砷分回收率0.17%；得到的铁精矿含铁量为64.98%，铁回收率为33.26%，硫质量分数仅为0.15%。

参考文献：

[1] 翁存建，马鹏飞，王鹏程，等. 我国铜硫矿选矿技术研究进展[J]. 有色金属科学与工程，2014，5(5)：117－122.
WENG Cunjian，MA Pengfei，WANG Pengcheng，et al. Research progress of beneficiation technology for China’s copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2014，5(5)：117－122.

[2] 路梦雨，戴惠新，唐冬冬，等. 云南某硫化铜矿选矿试验[J]. 矿物学报，2021，41(6)：649－656.
LU Mengyu，DAI Huixin，TANG Dongdong，et al. Experimental study on mineral processing of the copper sulfide ore from a deposit in Yunnan province，China[J]. Acta Mineralogica Sinica，2021，41(6)：649－656.

[3] 姜克冰，库建刚，龙佳. 铜硫浮选分离难点及研究进展[J]. 化工矿物与加工，2020，49(1)：41－44；49.
JIANG Kebing，KU Jiangang，LONG Jia. Difficulties and research progress in flotation separation of copper and sulfur[J]. Industrial Minerals & Processing，2020，49(1)：41－44；49.

[4] 罗仙平，何坤忠，周贺鹏，等. 青海夏乌日塔铜铅锌多金属矿工艺矿物学特征及浮选原则工艺的确定[J]. 金属矿山，2022(4)：122－130.
LUO Xianping，HE Kunzhong，ZHOU Hepeng，et al. Process mineralogical characteristics and determination of flotation principle process of Xiawurita copper-lead-zinc mutil-metal ore in Qinghai[J]. Metal Mine，2022(4)：122－130.

[5] 曾小辉，李波，饶金山，等. 某伴生金银铅锌矿的工艺矿物学与浮选工艺[J]. 矿业研究与开发，2022，42(2)：31－38.
ZENG Xiaohui，LI Bo，RAO Jinshan，et al. Process

mineralogy and flotation technology of a lead-zinc ore associating gold and silver[J]. Mining Research and Development,2022,42(2):31 – 38.

[6] 张晓民,李恒,李浩,等. 铜金铁多金属矿综合回收选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(6):74 – 78.
ZHANG Xiaomin, LI Heng, LI Hao, et al. Mineral processing technology for comprehensive recovery of polymetallic copper-gold-iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2018,38(6):74 – 78.

[7] 孔德翠,张淑敏,刘杰,等. 某铁尾矿中含铜矿物的综合回收试验[J]. 现代矿业,2019,35(11):1 – 3.
KONG Decui, ZHANG Shumin, LIU Jie, et al. Comprehensive recovery test of copper-bearing minerals in an iron tailings[J]. Modern Mining,2019,35(11):1 – 3.

[8] 姚孟齐,童雄,谢贤,等. 澳大利亚某铜尾矿综合回收硫、铁试验研究[J]. 矿产保护与利用,2017,37(6):62 – 65.
YAO Mengqi,TONG Xiong,XIE Xian,et al. Study on the comprehensive recovery of sulfur and iron from copper tailings in Australia[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2017,37(6):62 – 65.

[9] 袁风香. 预先磁选工艺对某铜矿石浮选的影响[J]. 金属矿山,2015(增刊 1):55 – 58.
YUAN Fengxiang. Effect of magnetic separation process in advance of a copper ore flotation[J]. Metal Mine,2015(Suppl 1):55 – 58.

[10] 吴霞,王玉峰,胡定宝. 某尾矿综合回收铁、铜、硫试验研究[J]. 现代矿业,2012,28(1):18 – 22.
WU Xia, WANG Yufeng, HU Dingbao. Experimental study on a comprehensive recovery of iron,copper,sulfur from a certain tailing[J]. Modern Mining,2012,28(1):18 – 22.

[11] 高天龙. 某超贫铜多金属矿伴生铁选别提质增效实践[J]. 矿产综合利用,2019(2):124 – 127.
GAO Tianlong. Quality improvement of associated iron ore in ultra lean copper polymetallic deposit[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2019(2):124 – 127.

[12] 高起鹏,秦贵杰. 某复杂铅锌铁矿选矿试验研究[J]. 有色矿冶,2013,29(6):13 – 16.
GAO Qipeng, QIN Guijie. Experimental study on a comprehensive recovery of iron, copper, sulfur from a certain tailing[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2013,29(6):13 – 16.

[13] 鱼光辉,代献仁. 国外某斑岩型铜矿石的浮选试验研究[J]. 现代矿业,2023,39(12):146 – 150.
YU Guanghui, DAI Xianren. Experimental study on flotation of a porphyry copper ore abroad[J]. Modern Mining,2023,39(12):146 – 150.

广　告　目　次

封面	湖南中冶长天重工科技有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司
封三	《烧结球团》杂志征订启事
封底	河北同业冶金科技有限责任公司
前彩 1	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩 2 – 3	鞍山市昱昊机械设备有限公司
前彩 4 – 5	湖南德尚源耐磨工业有限公司
前彩 6 – 7	湖南晟清环保科技有限公司
前彩 8	江苏中鼎环境工程股份有限公司
前彩 9	罗迪格(北京)机械设备有限公司
前彩 10 – 11	中冶长天(长沙)智能科技有限公司
前彩 12 – 13	朝阳重型机器有限公司
前彩 14 – 15	北京艾瑞机械有限公司
前彩 16	南京三埃工控有限公司
前彩 17	平罗县国宁活性炭有限公司
前彩 18 – 19	湖南中冶长天重工科技有限公司
前彩 20 – 21	北京顺泰克科技有限公司
前彩 22 – 23	河北华通重工机械制造有限公司
前彩 24	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩 25	上海铭伦冶金科技开发有限公司
前彩 26 – 27	唐山市磁石矿冶科贸有限公司
前彩 28 – 29	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
前彩 30	SEW – 传动设备(天津)有限公司
前彩 31	江阴市创裕机械有限公司
前彩 32	成都利君实业股份有限公司
前彩 33	长沙天为华信环保装备有限公司
前彩 34	中冶长天国际工程有限责任公司
后彩 1	湖南精城特种陶瓷有限公司
后彩 2	鞍山市明阳金属材料有限公司
后彩 3	湖北中船气体有限公司
后彩 4	中冶京诚工程技术有限公司