

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.12.003

云南某高磷高铁锰矿工艺矿物学与选矿工艺研究

李向益^{1,2,3,4}, 杨社平^{1,2,3,4}, 乐智广^{1,2,3,4}, 孙广周^{1,2,3,4}, 黄斌^{1,2,3,4}

(1. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明 650051;

2. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明 650051;

3. 云南省矿产资源勘查与综合利用工程技术研究中心, 昆明 650217;

4. 云南省地质矿产勘查开发局中心实验室, 昆明 650217)

摘要:为充分了解云南某地锰矿资源的矿石性质, 制定合理的选别工艺流程, 采用化学分析、透反射偏光显微镜、X射线衍射分析仪、扫描电子显微镜、电子探针等多种现代分析测试方法对锰矿矿石进行系统的工艺矿物学研究, 并在此基础上开展了锰矿选矿工艺研究。结果表明, 锰矿的入选品位为 Mn 14.77%, 含 TFe 9.39%、P 0.20%, P/Mn=0.0135, Mn/TFe=1.57, 属于高磷高铁锰矿; 锰主要是以独立矿物软锰矿形式存在, 少量以锰铝榴石形式存在; 铁主要是以独立矿物褐铁矿形式存在; 有害元素磷主要是以类质同象或吸附状的形式赋存在软锰矿、锰铝榴石、褐铁矿中, 部分以包裹体的形式赋存在石英和其他矿物中; 主要脉石矿物为石英、绢云母、绿泥石、软锰矿、锰铝榴石、褐铁矿、石英紧密连生, 嵌布关系复杂。采用“一次粗选、一次精选”高梯度强磁选工艺流程处理该矿石, 可获得 Mn 29.52%、P/Mn=0.088, 锰回收率 79.37% 的锰精矿, 锰回收效果较好。研究为该地区锰矿资源的开发利用提供技术依据, 也为同类锰矿资源的开发利用提供技术借鉴。

关键词:软锰矿; 褐铁矿; 锰铝榴石; 工艺矿物学; 强磁选

中图分类号: TD912

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)12-0034-09

Research on Process Mineralogy and Mineral Processing of a High Phosphorus and High Iron Manganese Ore in Yunnan

LI Xiangyi^{1,2,3,4}, YANG Sheping^{1,2,3,4}, LE Zhiguang^{1,2,3,4}, SUN Guangzhou^{1,2,3,4}, HUANG Bin^{1,2,3,4}

(1. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization Ministry of Natural Resources, Kunming 650051, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, China;

3. Yunnan Engineering Research Center of Exploration and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Kunming 650217, China;

4. Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Center Laboratory, Kunming 650217, China)

Abstract: In order to fully understand the ore properties of a manganese ore in Yunnan province and formulate a reasonable separation process, the process mineralogy of the manganese ore was studied by chemical analysis method, reflection polarizing microscope (PMR POL), X-ray diffraction (XRD), analysis type scanning electron microscope (SEM), and electron microprobe analysis (EMPA). On this basis, the research of manganese ore beneficiation technology was carried out. The results showed that the technological type of this ore belongs to high phosphorus and high iron manganese ore and the grade of manganese ore was Mn 14.77%, TFe 9.39%, P 0.20%, P/Mn=0.0135, Mn/TFe=1.57. Manganese mainly existed in the form of independent mineral pyrolusite, with a small amount in the form of spessartite; Iron mainly existed in the form of independent mineral limonite; The harmful element

收稿日期: 2024-05-23

基金项目: 云南省科技厅基金项目(202101AT070277)

作者简介: 李向益(1987—), 男, 云南宣威人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事选矿及矿产综合利用研究。

phosphorus occurred mainly in the form of isomorphism or absorption in pyrolusite, spessartite and limonite, and partly in the form of inclusion in quartz and other minerals. The main gangue minerals were quartz, sericite and chlorite. Pyrolusite, spessartite, limonite and quartz were closely connected, and the intercalation relationship was complicated. The results of experimental on mineral processing of the manganese ore showed that manganese concentrate grade of 29.52%, recovery of 79.37% and $P/Mn=0.088$ was achieved through the high gradient magnetic separation process, which was once roughing and once cleaning to the rough concentrate. The research provides technical basis for the development and utilization of manganese minerals in this area, and also provides technical reference for the development and utilization of similar manganese mineral resources.

Key words: pyrolusite; limonite; spessartite; process mineralogy; high intensity magnetic separation

锰矿作为国家重要的战略矿产资源之一,在现代工业中扮演着极其重要的角色,锰及其化合物广泛应用于钢铁、有色冶金、化工、电子、电池、农业、医药、环境保护等各个领域^[1-2]。锰矿资源按矿石中主要锰矿物可分为氧化锰、碳酸锰、硅酸锰等,目前开采利用较多的主要是氧化锰和碳酸锰^[1,3-4]。中国锰矿资源丰富,但大多数为“贫、细、杂”锰矿资源^[5-7],具有难利用、采选成本高、选冶难度大的特点^[8]。近年来随着各行业、各领域对锰矿需求的不断增大,锰矿资源不断开采、加工、利用,导致易处理优质锰矿资源逐渐减少,亟需加强对难选冶、“贫、细、杂”锰矿资源,尤其是一些储量大的高磷、高铁锰矿资源的开发利用研究,以满足未来各行业对锰矿资源庞大的市场需求,保障国家锰矿资源安全供给。因此,进行工艺矿物学及选矿研究对高磷高铁锰矿资源的开发利用及对国家锰矿资源保障都具有重要战略意义。

高磷高铁锰矿多与褐铁矿、绢云母、绿泥石等共生,嵌布粒度细、嵌布关系复杂、单体解离困难^[9],而锰矿细磨时易泥化,分选困难,导致细粒级锰矿难以回收。由于高磷高铁锰矿中有害元素磷的赋存状态复杂,磷去除困难,导致提高锰精矿产品质量难度增加。国内外高磷高铁氧化锰矿的选矿主要采用重选、磁选、浮选、化学选矿等工艺^[6,10]。贾宝亮等^[5]对陕西镇安某高磷混合型铁锰矿选矿试验研究,对含 $Mn\ 14.26\%$ 、 $TFe\ 11.90\%$ 、 $P\ 0.52\%$ 、 $P/Mn>0.006\%$ 、 $Mn/Fe<3$ 的锰原矿,采用原矿—磨矿—强磁选别的工艺流程,获得产率 59.66%,精矿 Mn 品位 21.51%,回收率 $Mn\ 90.01\%$ 的锰精矿。师伟红等^[11]针对云南某铁锰矿进行了选矿试验研究,采用粗磨—跳汰—摇床的技术方案,获得锰精矿 Mn 品位 40.41%,回收率 70.92% 的技术指标。崔恩静等^[9]对陕西某地高磷低锰难选矿石除磷提高锰

矿品位进行试验研究,采用强磁选—焙烧酸浸工艺获得含磷 0.2% 以下、锰 30% 以上的合格锰精矿。高磷高铁锰矿的研究主要集中在选矿工艺研究,对于高磷高铁锰矿的工艺矿物学研究尤其是有害元素铁、磷的赋存状态研究较少。

云南某锰矿,资源丰富,原矿品位 $Mn\ 14.77\%$ 、含 $P\ 0.20\%$ 、 $TFe\ 9.39\%$ 、 $P/Mn=0.0135$ 、 $Mn/TFe=1.57$,属于高磷高铁氧化锰矿。为了高效、合理地开发利用该锰矿资源,采用化学分析、显微镜显微分析、重砂分析、X-射线衍射分析、扫描电子显微镜、电子探针分析等现代分析测试手段对矿石进行系统的工艺矿物学研究,在工艺矿物学研究基础上对此锰矿资源进行选矿工艺研究,获得适合此锰矿资源合理开发利用的选矿工艺,为该地区锰矿资源及同类型锰矿资源的合理开发利用及生产实践提供技术依据和参考。

1 试验设备及方法

矿样取自云南某锰矿,经晾晒、破碎、混匀、缩分、配矿等工序制备成试验样品。

对试验样品制备光薄片,采用偏光显微镜、体视显微镜进行矿物结构构造、嵌布特征等研究;采用 X-射线荧光光谱仪、X-射线衍射仪、电感耦合等离子体光谱仪、原子吸收分光光度计、扫描电子显微镜等手段进行化学成分及矿物组成分析;采用重砂分析、电子探针、单矿物分析等手段研究矿样中锰、铁、磷的赋存状态。采用 SLon-100 高梯度磁选机、RK/LY-1100×500 摇床、RK/FD-1.5L 浮选机进行强磁选、重选、浮选等选矿试验。

2 矿石工艺矿物学研究

2.1 原矿化学多元素分析

原矿化学多元素分析结果见表 1。

表1 原矿化学多元素分析结果

Table 1 Multi-element analysis results of raw ore

/%

成分	Mn	TFe	P	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
含量	14.77	9.39	0.20	50.35	0.41	0.16	4.91	0.04	1.31

原矿中 Mn 品位 Mn 14.77%，含 TFe 9.39%、P 0.20%，其他成分主要为 SiO₂、Al₂O₃ 和 K₂O，P/Mn=0.0135>0.006，Mn/TFe=1.57，属于高磷高铁锰矿。

2.2 原矿的矿物组成

综合化学多元素分析、矿石光薄片显微镜下分析、X-射线粉晶衍射分析、电子探针分析、人工重砂分析等研究，得到原矿的矿物组成，结果见表2。

表2 原矿矿物组成分析结果

Table 2 Mineral composition analysis results of raw ore

/%

矿物名称	软锰矿	锰铝榴石	褐铁矿	石英	绢云母	绿泥石	钾长石	钨独居石	黄钾铁矾
含量	21.2	5.5	17	45	9	2	0.2	微量	微量

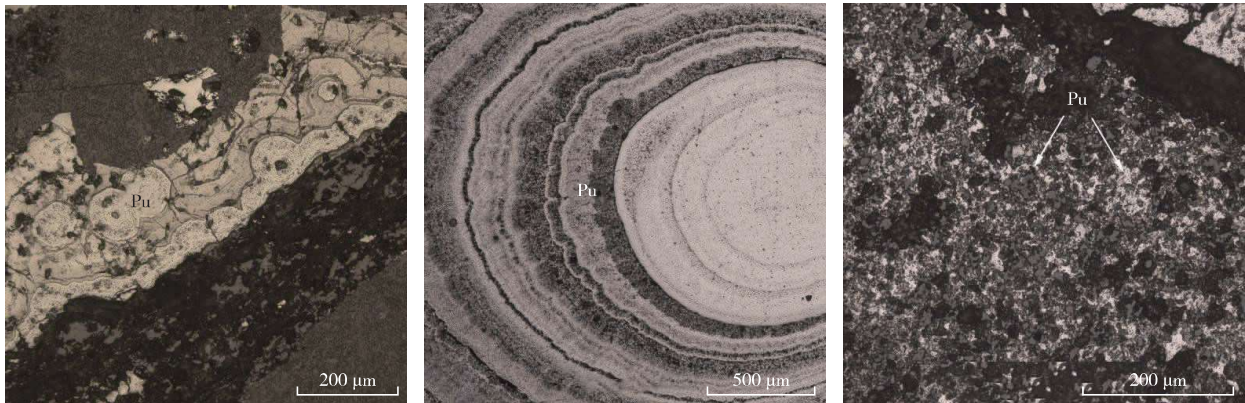
矿石中含锰主要的矿物为软锰矿和少量锰铝榴石，其他金属矿物为褐铁矿，脉石矿物主要为石英、绢云母和绿泥石。

2.3 原矿的结构构造

矿石主要的构造为网脉状浸染构造、碎裂岩化构造，主要的结构为胶状结构、似海绵陨铁结构、微晶结构、显微鳞片状结构、它形粒状结构等。矿石的结构和构造较为复杂，矿物集合体之间的镶嵌连生关系紧密。

2.4 原矿中主要矿物的嵌布特征

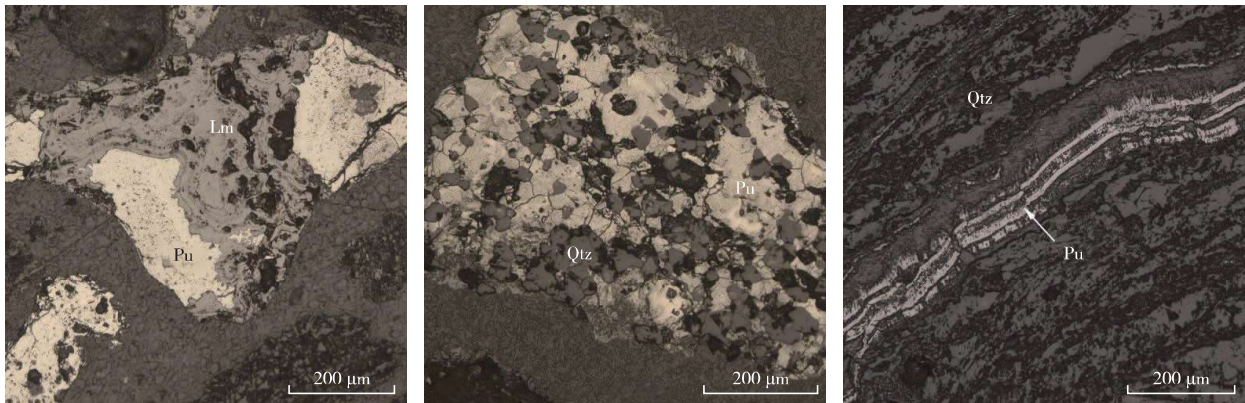
软锰矿：分子式是 MnO₂，矿石中含量约 21.2%，是主要的目的矿物。矿石中软锰矿主要呈胶状、鲕状、它形粒状、显微鳞片状，部分呈脉状产出(图1)；多与石英或褐铁矿紧密镶嵌连生，或呈胶结物状分布于石英颗粒之间；显微鳞片状者粒度细小，与石英呈混杂状分布。软锰矿嵌布粒度主要在 0.05~0.3 mm(图2)。



(a)胶状软锰矿(Pu)集合体。反射单偏光

(b)鲕状的软锰矿(Pu)。反射单偏光

(c)显微鳞片状的软锰矿(Pu)。反射单偏光



(d)与褐铁矿(Lm)紧密连生的软锰矿(Pu)。反射单偏光

(e)与石英(Qtz)紧密镶嵌连生的软锰矿(Pu)。反射单偏光

(f)脉状分布的软锰矿(Pu)。反射单偏光

图1 软锰矿嵌布特征

Fig. 1 Dissemination characteristics of pyrolusite

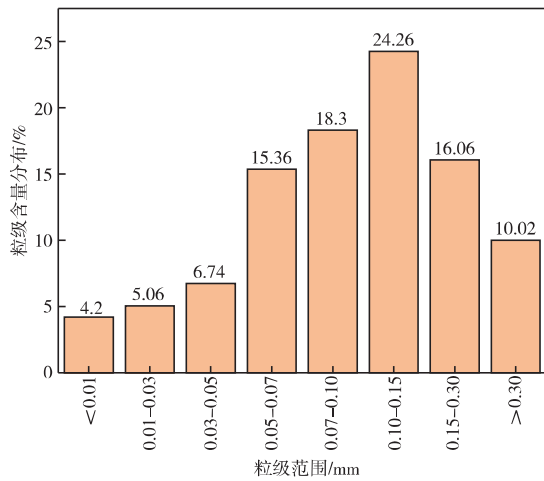


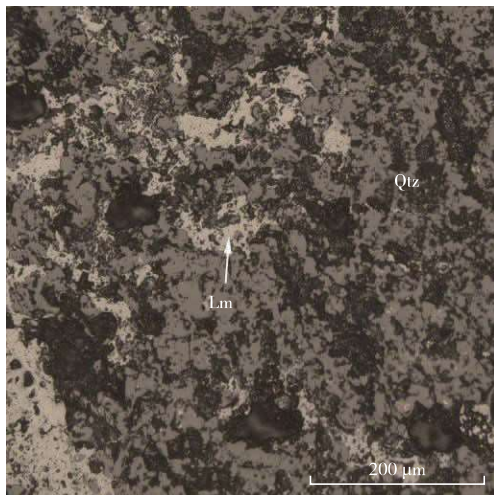
图2 软锰矿的粒度分布柱状图

Fig. 2 Histogram of pyrolusite grain size distribution

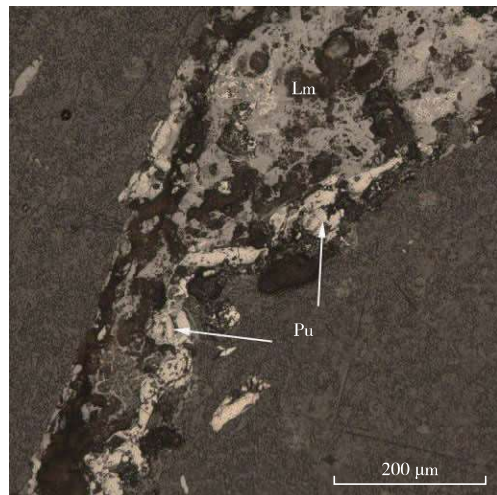
褐铁矿:化学式是 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 含量约 17%, 主要呈胶状、它形粒状, 少部分呈显微鳞片状、黄铁矿假象状; 大多和石英镶嵌连生或胶结连生, 难以和石英分离, 部分和软锰矿连生(图 3), 嵌布粒度主要在 0.01~0.3 mm。

石英:分子式是 SiO_2 , 含量约 45%, 主要呈它形粒状、微晶状, 部分重结晶, 部分受应力作用亚颗粒化, 部分与软锰矿连生, 粒度主要在 0.01~0.5 mm (图 4)。

锰铝榴石:分子式是 $\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$, 含量约 5.5%, 多以变斑晶的形式产出, 呈它形粒状(图 5); 多与软锰矿连生, 部分与石英连生, 部分蚀变为软锰矿, 呈残余状分布于软锰矿中, 粒度在 0.05~0.2 mm。



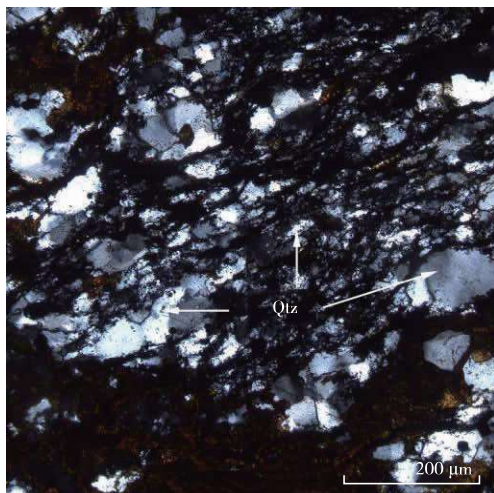
(a)和石英(Qtz)紧密连生的褐铁矿(Lm)。反射单偏光



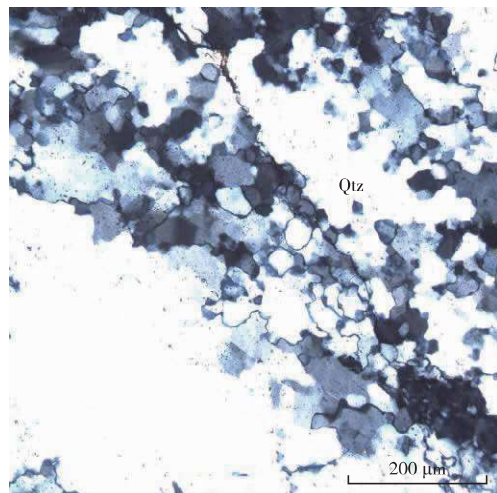
(b)和软锰矿(Pu)连生的褐铁矿(Lm)。反射单偏光

图3 褐铁矿嵌布特征

Fig. 3 Dissemination characteristics of limonite



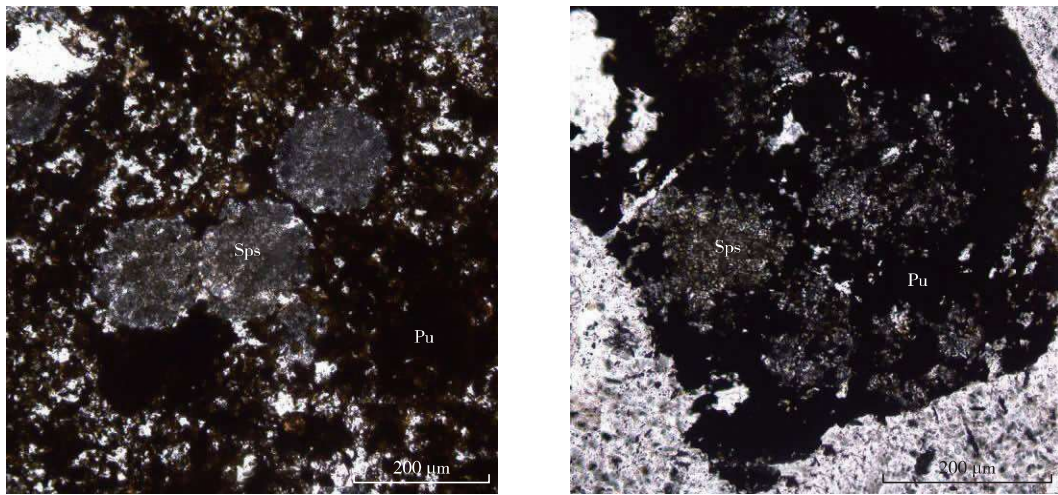
(a)它形粒状的石英(Qtz)。透射正交偏光



(b)受应力亚颗粒化的石英(Qtz)。透射正交偏光

图4 石英的嵌布特征

Fig. 4 Dissemination characteristics of quartz



(a) 锰铝榴石(Sps)和软锰矿(Pu)连生。透射单偏光

(b) 锰铝榴石(Sps)和软锰矿(Pu)连生。透射单偏光

图 5 锰铝榴石的嵌布特征

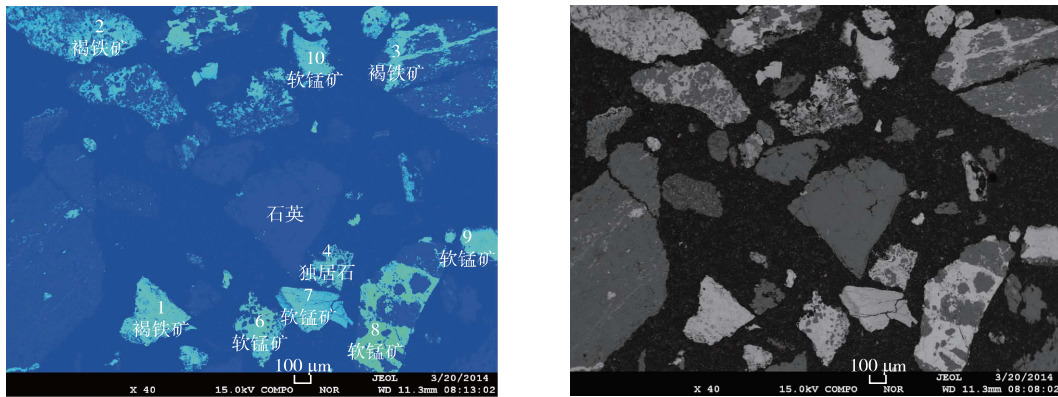
Fig. 5 Dissemination characteristics of spessartite

绢云母:分子式是 $K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$, 含量约 9%, 主要呈显微鳞片状, 与石英连生或呈脉状分布, 部分呈定向分布, 粒度 $<0.05\text{ mm}$ 。

2.5 软锰矿、褐铁矿电子探针分析

对软锰矿、褐铁矿进行电子探针分析(图 6), 分析结果见表 3。电子探针分析结果显示, 软锰矿中含

MnO 平均值为 97.046%, 含 P_2O_5 平均值为 0.249%, 未发现含磷的独立矿物, P_2O_5 在软锰矿中为类质同象的形式, 无法通过物理选矿方法去除。褐铁矿中含 FeO 83.7%~93.7%, 含量不等, 是因为褐铁矿中含其他元素的缘故; 褐铁矿中含 P_2O_5 在 0.96%~3.67%, 未发现含磷的独立矿物。



(a) 软锰矿、褐铁矿的矿物颗粒标示图

(b) 软锰矿、褐铁矿的背散射电子图像

图 6 软锰矿、褐铁矿的电子探针分析图

Fig. 6 Electron probe analytical spectrum of pyrolusite and limonite

表 3 软锰矿、褐铁矿的电子探针分析结果

Table 3 Electron probe analysis results of pyrolusite and limonite

/%

点号	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	矿物名称
1	3.630	0.965	0.373	0.015	93.561	0.038	1.419	褐铁矿
2	5.049	1.303	0.507	0	92.285	0.092	0.763	
3	7.892	3.673	3.772	0.471	83.725	0.120	0.347	
6	0.291	0.350	1.317	0	0.115	0.931	96.995	软锰矿
7	0.200	0.170	1.111	0	0.175	0.049	98.295	
8	0.234	0.079	0.611	0	0.729	0.085	98.262	
9	0.108	0.566	1.233	0	0.155	0.010	97.929	
10	0.152	0.080	4.968	0.072	0.868	0.109	93.751	

2.6 锰、铁和磷的赋存状态

为了查明目的元素锰和有害元素铁和磷的赋存状态,在化学多元素分析、矿物组成和含量分析的基础上,结合各矿物中 Mn、Fe、P 的含量,综合分析矿石中锰、铁、磷元素的赋存状态,结果见表 4。

锰主要以独立矿物的形式赋存在软锰矿和锰铝榴石中,分别占 87.46% 和 10.70%;少量赋存在褐铁矿中,少量以包裹体的形式赋存在石英及其他矿物中。

铁主要以独立矿物的形式赋存在褐铁矿中,占 85.89%;其次以类质同象的形式赋存在锰铝榴石中,占 7.75%;少量以类质同象的形式赋存在软锰矿中,少量以包裹体的形式赋存在石英及其他矿物中。

磷主要以类质同象或吸附状的形式赋存在软锰矿、锰铝榴石、褐铁矿中,分别占 20.66%、6.70%、28.99%;部分以包裹体的形式赋存在石英和其他矿物中,占 43.65%,磷分布极为分散、且相对均匀。

表 4 锰、铁、磷元素的赋存状态

Table 4 Occurrence state of Mn、Fe、P

/%

矿物	矿物含量	矿物中的各元素含量			矿物中各元素的分配量			元素在各矿物中的分配率			赋存形式		
		Mn	Fe	P	Mn	Fe	P	Mn	Fe	P	Mn	Fe	P
软锰矿	21.2	60.10	0.30	0.20	12.741 2	0.063 6	0.042 4	87.46	0.64	20.66	独立矿物	类质同象	类质同象或吸附状
锰铝榴石	5.5	28.35	13.94	0.25	1.559 25	0.766 7	0.013 75	10.70	7.75	6.70	独立矿物	类质同象	类质同象或吸附状
褐铁矿	17	0.65	50.00	0.35	0.110 5	8.5	0.059 5	0.76	85.89	28.99	包裹体	独立矿物	类质同象或吸附状
石英及其他	56	0.28	1.01	0.16	0.156 8	0.565 6	0.089 6	1.08	5.72	43.65	包裹体	包裹体	包裹体
合计	99.7	—	—	—	14.567 75	9.895 9	0.205 25	100.0	100.0	100.0	—	—	—

2.7 影响选矿的工艺矿物学因素

1)原矿中 Mn 品位为 14.77%,含 TFe 9.39%、P 0.20%, $P/Mn=0.0135>0.006$, $Mn/TFe=1.57$,属于高磷高铁锰矿。铁、磷含量较高,会对最终锰精矿产品质量造成影响。

2)矿石中软锰矿呈胶状、鲕状、它形粒状、显微鳞片状,部分呈脉状产出,多与石英或褐铁矿紧密镶嵌连生,嵌布粒度主要在 0.05~0.3 mm,部分软锰矿与脉石矿物嵌布关系紧密、复杂,在磨矿过程中很难单体解离,从而难以回收。

3)由于软锰矿、锰铝榴石和褐铁矿在比重、磁性等方面性质相近,且他们之间嵌布关系紧密、复杂,因此通过采用磁选、重选等物理选矿工艺难以实现软锰矿和锰铝榴石及褐铁矿之间的有效分离,最终锰铝榴石、褐铁矿会随着选矿过程进入锰精矿,产出含铁锰精矿,会导致锰精矿品位较低。

4)矿石中有害元素磷主要以类质同象或吸附状的形式赋存在软锰矿、锰铝榴石、褐铁矿中,软锰矿、

锰铝榴石及褐铁矿中磷含量分别为 0.20%、0.25%、0.35%,通过物理选矿方法无法脱除,会导致锰精矿含有害元素磷较高。

3 选矿试验研究

3.1 选矿工艺流程的选择与确定

锰矿物常见的主要选矿方法有强磁选、浮选、重选或其联合流程^[12]。原矿入选品位 Mn 14.77%,含 TFe 9.39%、P 0.20%。软锰矿和锰铝榴石是选矿回收的对象,实现锰矿物与脉石矿物的有效分离是选矿回收的关键。

软锰矿和锰铝榴石属弱磁性矿物,而石英、绢云母等脉石矿物无磁性,采用高梯度强磁选工艺可以实现锰矿物的分离与富集^[13];软锰矿、锰铝榴石与石英、绢云母和绿泥石在比重、可浮性方面存在差异,也可通过分级—摇床重选、浮选工艺实现锰矿物与脉石矿物的分离^[12-15]。因此进行高梯度强磁选、分级—摇床重选和浮选工艺三种流程对比试验,试验结果见表 5。

表 5 三种选锰流程的对比结果

Table 5 Comparative results of three manganese selection processes

/%

选锰工艺	产品名称	Mn 品位	Mn 回收率
高梯度强磁选	锰精矿	30.54	74.17
分级摇床重选	锰精矿	29.90	52.30
浮选	锰精矿	22.30	41.98

从对比结果可以看出,高梯度强磁选所获得的锰精矿品位和回收率最高,尤其是锰回收率远高于摇床重选和浮选两种工艺,并且高梯度强磁选具有不使用药剂、不污染环境的优点。因此,高梯度强磁选是合理的选锰流程。

3.2 磨矿细度试验

单体解离是实现目的矿物与脉石矿物有效分离的前提,也是选矿过程中取得良好分选指标的关键^[16]。因此,确定合适的磨矿细度至关重要。为了确定适宜的入选细度,在高梯度强磁选机的粗选磁场强度 1.2 T、精选磁场强度为 0.8 T、脉动冲程 8 mm、冲次 200 次/min、 $\Phi 1$ mm 棒介质的固定条件下,考查磨矿细度 -74 μm 粒级含量为 45%、55%、65% 和 75% 对锰分选效果的影响,试验流程见图 7,试验结果见图 8。

由图 8 可知,磨矿细度不宜过粗或过细,过粗时

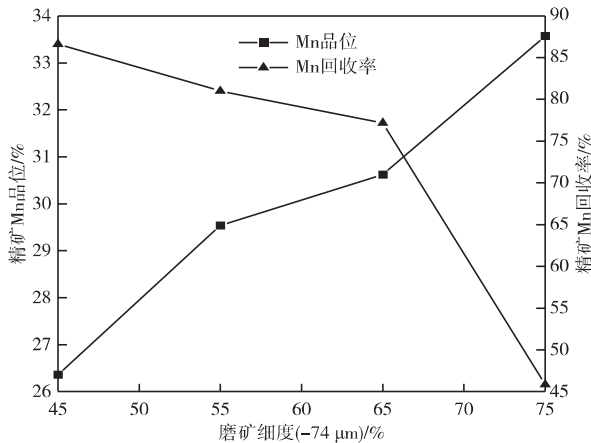


图 8 磨矿细度对锰精矿指标的影响

Fig. 8 Effects of grinding fineness on the indexes of manganic concentrate

3.3 粗选磁场强度条件试验

在磨矿细度 -74 μm 粒级含量为 65%,高梯度强磁选机的脉动冲程 8 mm、冲次 200 次/min、 $\Phi 1$ mm 棒介质的条件下,进行粗选磁场强度条件试验,考查粗选磁场强度为 1.0、1.2、1.4 和 1.6 T 对锰分选效果的影响。试验结果见图 9。

随着粗选磁场强度的增加,锰精矿 Mn 品位逐渐降低后变化趋势较小,而回收率则随着磁场强度的增加而提高,根据锰精矿分选指标考虑,合适的粗选磁场强度 1.2 T。

3.4 高梯度强磁选全流程试验

在流程探索对比试验、主要工艺技术条件和流程结构优化试验的基础上,确定了“一次粗选、一次精选”高梯度强磁选工艺是合理的选锰流程,其全流程见图 10,试验结果见表 6,锰精矿多元素分析见表 7。

锰矿物单体解离不充分,锰精矿品位较低;而过细时锰矿物泥化严重(特别是软锰矿的硬度很低、更易泥化),锰精矿回收率则大幅度下降。随着磨矿细度的变细,锰精矿中磷含量逐渐降低后趋于稳定。综合锰精矿 Mn 品位、回收率及磷含量考虑,较佳的磨矿细度为 -74 μm 粒级含量为 65%。

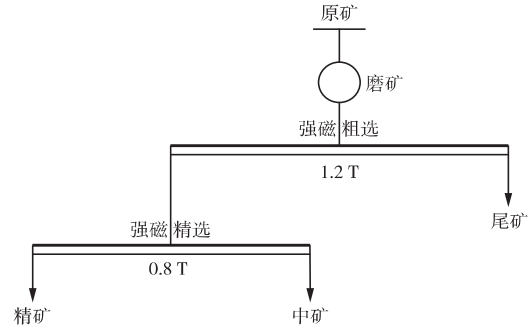


图 7 磨矿细度条件试验流程

Fig. 7 Flowsheet of grinding fineness tests

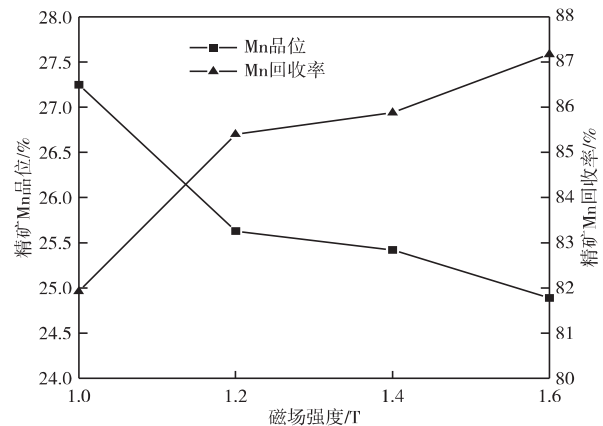
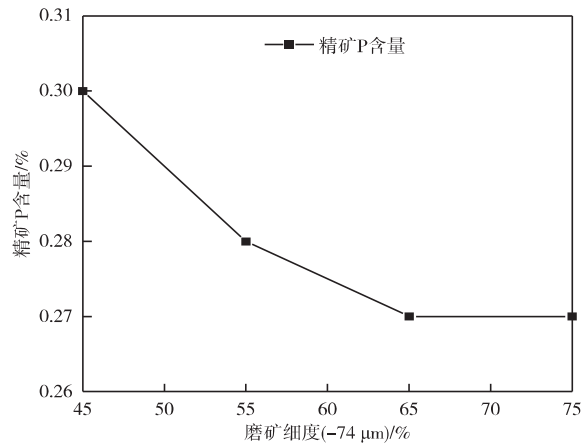


图 9 粗选磁场强度对锰精矿指标的影响

Fig. 9 Effects of magnetic field strength on the indexes of manganic concentrate

表6 高梯度强磁选全流程试验结果

Table 6 Test results of the whole process of high gradient high intensity magnetic separation /%

产品名称	产率	Mn品位	Mn回收率
精矿	44.23	29.52	79.37
中矿	3.33	11.06	5.97
尾矿	52.44	4.07	14.66
原矿	100.0	14.54	100.0

表7 锰精矿多元素分析结果

Table 7 Multi-element analysis results of manganic concentrator /%

组分	Mn	P	TFe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Pb
含量	29.52	0.26	14.03	21.73	0.27	3.61	0.52	0.004

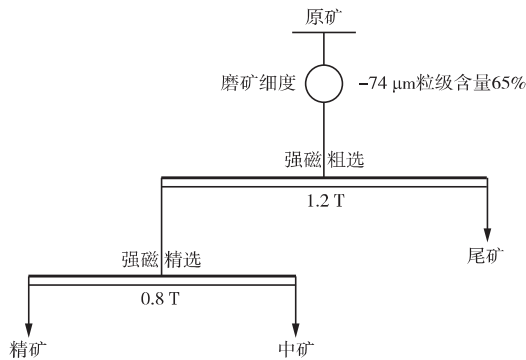


图10 高梯度强磁选全流程

Fig. 10 Flowsheet of the whole process of high gradient high intensity magnetic separation

在较佳的分选条件下,原矿经“一次粗选、一次精选”高梯度强磁选全流程选别后,可获得锰精矿产率44.23%、Mn 29.52%、锰回收率79.37%的指标,锰矿物回收效果较好。

锰精矿 Mn 29.52%、含 P 0.26%, Mn/TFe = 2.10、P/Mn = 0.0088,有害元素磷含量偏高,主要是由于软锰矿、锰铝榴石及褐铁矿中均存在以类质同象或者吸附状形式存在的磷,这部分磷难以通过物理选矿方法进一步脱除。生产过程中可将该锰精矿与其他低磷锰精矿混合作为冶金工业的达标原料。

4 结论

1) 矿石中 Mn 品位 Mn 14.77%, 含 TFe 9.39%、P 0.20%, 其他元素主要为 SiO₂、Al₂O₃ 和 K₂O, P/Mn = 0.0135 > 0.006, Mn/TFe = 1.57, 属于高磷高铁锰矿。

2) 矿石主要的锰矿物为软锰矿、少量锰铝榴石, 其他金属矿物为褐铁矿, 主要的脉石矿物为石英、绢云母、绿泥石。软锰矿呈胶状、鲕状、它形粒状、显微鳞片状, 部分呈脉状产出, 多与石英或褐铁矿紧密镶嵌连生, 嵌布粒度主要在 0.05~0.3 mm, 部分软锰矿与脉石矿物嵌布关系紧密、复杂, 磨矿过程中很难

达到单体解离, 从而难以回收。

3) 矿石中目的元素锰主要是以独立矿物软锰矿形式存在, 少量以锰铝榴石形式存在; 有害元素铁主要是以褐铁矿形式存在, 磷主要是以类质同象或吸附状的形式赋存在软锰矿、锰铝榴石、褐铁矿中, 部分以包裹体的形式赋存在石英和其他矿物中。

4) 针对矿石开展高梯度强磁选、分级摇床重选及浮选工艺探索对比试验, 确定合适的锰选别流程为高梯度强磁选。在磨矿细度为 -74 μm 粒级含量 65%、粗选磁场强度 1.2 T、精选磁场强度 0.8 T 的条件下, 原矿经“一次粗选、一次精选”高梯度强磁选流程选别后, 可获得锰精矿产率 44.23%、Mn 29.52%、P/Mn = 0.0088, 锰回收率 79.37% 的技术指标。

参考文献

[1] 宁海, 袁帅, 何佳昊, 等. 国外某铁锰矿工艺矿物学特性研究及分离利用技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 81-88.
NING Hai, YUAN Shuai, HE Jiahao, et al. Study on the process mineralogy characteristics of an overseas ferromanganese ore and its separation and utilization techniques[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(5): 81-88.

[2] 代典, 梁欢, 何东升, 等. 湘西地区微细粒级难选菱锰矿浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020, 41(4): 76-81.
DAI Dian, LIANG Huan, HE Dongsheng, et al. Experimental study on the flotation of a micro-grained refractory rhodochrosite in western Hunan area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 41(4): 76-81.

[3] 刘鹏飞, 孙永升, 袁帅, 等. 赞比亚某高铁锰矿工艺矿物学特性[J]. 矿产综合利用, 2022, 43(4): 27-32.
LIU Pengfei, SUN Yongsheng, YUAN Shuai, et al. Research on process mineralogy of a high-iron manganese ore in Zambia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 43(4): 27-32.

- [4] 杨创,张覃,李龙江,等. 贵州某低品位碳酸锰矿选矿提锰研究[J]. 有色金属(选矿部分),2020(3):58-66.
YANG Chuang,ZHANG Qin,LI Longjiang,et al. Study on the separation of manganese from a low-grade manganese carbonate ore in Guizhou [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2020(3):58-66.
- [5] 贾宝亮,孙亚峰,李小钊,等. 陕西镇安某高磷混合型铁锰矿选矿实验研究[J]. 矿产综合利用,2021,42(1):83-87.
JIA Baoliang, SUN Yafeng, LI Xiaozhao, et al. Experimental study on beneficiation of a high phosphorus mixed ferromanganese ore in Zhenan, Shaanxi province [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021,42(1):83-87.
- [6] 王正刚,聂光华,朴海善,等. 黔北典型低品位菱锰矿高梯度脉冲磁选及产品特征研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(1):38-49.
WANG Zhenggang, NIE Guanghua, PIAO Haishan, et al. High gradient pulse magnetic separation and product characteristics of typical low grade rhodochrosite in northern Guizhou [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(1):38-49.
- [7] 汤振宏,阙绍娟. 广西某高硫低品位碳酸锰矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2017(5):51-54.
TANG Zhenhong, QUE Shaojuan. Experimental study on mineral processing of a high-sulfur and low-grade manganese carbonate ore in Guangxi [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2017(5):51-54.
- [8] 王若枫,袁帅,刘应志,等. 全球锰矿资源现状及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用,2023,43(1):14-23.
WANG Ruofeng, YUAN Shuai, LIU Yingzhi, et al. Present situation of global manganese ore resources and progress of beneficiation technology [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43 (1): 14-23.
- [9] 崔恩静,任金菊,马晶,等. 高磷低锰难选矿石除磷提高锰矿品位试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2004(3):36-39.
CUI Enjing, REN Jinju, MA Jing, et al. About separating phosphorus and refining manganese mineral assay experiment with hardly separated high phosphorus low manganese ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2004(3):36-39.
- [10] 李少平,郭腾博,黄超军,等. 碳酸锰矿浮选药剂研究进展[J]. 矿产保护与利用,2018,38(1):140-145.
LI Shaoping, GUO Tengbo, HUANG Chaojun, et al. Research progress of flotation reagents for manganese carbonate ore [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2018,38(1):140-145.
- [11] 师伟红,杨波,刘守信,等. 云南铁锰矿选矿试验[J]. 矿冶,2007,16(1):30-34.
SHI Weihong, YANG Bo, LIU Shouxin, et al. A mineral processing test of ferromanganese ore in Yunnan [J]. Mining and Metallurgy,2017,16(1):30-34.
- [12] 蒋太国,魏志聪. 云南某低品位锰矿选矿工艺研究[J]. 中国锰业,2015,33(4):21-23.
JIANG Taiguo, WEI Zhicong. Mineral processing research on a low grade manganese ores in Yunnan [J]. China's Manganese Industry,2015,33(4):21-23.
- [13] 李国栋,魏志聪. 云南某低品位软锰矿强磁选工艺研究[J]. 中国锰业,2016,34(1):29-31.
LI Guodong, WEI Zhicong. High-intensity magnetic separation of a low-grade pyrolusite ores in Yunnan [J]. China's Manganese Industry,2016,34(1):29-31.
- [14] 魏克帅,蔡建新. 科特迪瓦某锰矿的选矿工业试验[J]. 中国金属通报,2021(6):64-65.
WEI Keshuai, CAI Jianxin. Industrial tests on the beneficiation of a manganese ore in Côte d' Ivoire [J]. China Metal Bulletin,2021(6):64-65.
- [15] 谭鑫,浅析氧化锰矿石选矿工艺研究现状[J]. 科技与创新,2019(1):80-81.
TAN Xin. Analysis of manganese oxide ore beneficiation process research status [J]. Science and Technology & Innovation,2019(1):80-81.
- [16] 李向益,孙广周,曾茂青,等. 云南某难选低品位胶磷矿正一反浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2019(3):51-54.
LI Xiangyi, SUN Guangzhou, ZENG Maoqing, et al. Experimental research on direct-reverse flotation process for a low grade refractory collophanite in Yunnan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(3):51-54.

(本文编辑 汪东芳)