

赞比亚某高铁锰矿工艺矿物学特性

刘鹏飞, 孙永升, 袁帅, 韩跃新

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 赞比亚某高铁锰矿中有用矿物为赤铁矿和各种锰矿物, 铁品位为 44.71%, 锰品位为 17.86%。为制定合适的选别工艺流程, 通过光学显微镜、化学分析、X 射线衍射等手段, 对该矿石的化学成分、矿物组成及嵌布特征等方面进行的研究。研究结果表明: 该矿石中主要的铁矿物为赤铁矿, 含量为 61.53%; 主要的锰矿物为软锰矿、褐锰矿和硬锰矿, 含量分别为 18.62%, 4.82% 和 4.66%。最后针对该矿石进行了预富集—磁化焙烧—磁选实验, 最终获得铁精矿铁品位平均值为 67.97%; 铁作业回收率平均值为 94.67%。锰精矿锰品位平均值为 49.85%; 锰作业回收率平均值为 88.24%。该研究结果对该矿石的分选工艺流程的制定具有一定的指导意义, 同时也能为同类矿石提供借鉴。

关键词: 赞比亚; 高铁锰矿工艺矿物学; 磁化焙烧

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.006

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 04-0027-06

锰矿石共分为五个基本类型: 氧化锰矿石, 碳酸锰矿石, 共生多金属锰矿石, 硫锰矿石和锰结核, 其中最重要的是氧化锰矿石和碳酸锰矿石^[1]。近些年来, 锰在膳食添加剂的制备、化肥、细胞和精细化工等领域都发挥着重要作用^[2]。锰在钢铁行业中主要用于脱硫和脱氧; 也用作合金的添加剂, 以提高钢的强度、硬度、弹性极限、耐磨性和耐腐蚀性等。在高合金钢中, 还用作奥氏体化合元素, 用于炼制不锈钢、特殊合金钢、不锈钢焊条等^[3]。

世界锰矿分布极不均衡, 主要分布在南非、乌克兰、澳大利亚、印度、加蓬、中国等国, 其中南非锰矿资源约占世界的 76.9%, 乌克兰占 10%^[4]。我国的锰矿资源特点是“贫、薄、杂、细”, 全国平均锰品位只有 21.4%^[5]。

我国是世界上最大的锰矿石进口国。2019 年

我国锰矿进口量已超过 3000 万 t, 且短时间内仍将是全球第一消费大国^[6]。我国锰矿石资源供求现状决定了我国必将长期依赖进口锰矿石^[7], 因此, 对赞比亚某高铁锰矿进行矿物工艺学研究, 以期建立合适的分选流程, 解决我国锰矿需求。

1 矿石物质组成分析

1.1 化学多元素分析

矿石主要化学成分分析见表 1。

表 1 表明, 该矿石的主要化学元素为铁和锰, 矿石中铁品位为 44.71%, 锰品位为 17.86%, 其中二价锰含量极少, 说明该矿石属于高铁锰矿; 有害元素磷和硫含量均较低; SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 和烧失量均不高, 说明该矿石中碳酸盐和硅酸盐矿物较少; 铁和锰为该矿石中主要有用元素, 其他元素利用价值较小。

表 1 原矿化学多元素分析/%

Table 1 Results of raw material chemical multi-element analysis

TFe	FeO	Mn	Mn ²⁺	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	烧失
44.71	<0.1	17.86	<0.1	5.08	1.98	0.18	0.26	0.022	0.004	2.72

收稿日期: 2020-06-25

基金项目: 磁化焙烧过程中铁矿物的物相转化及调控机制 (51874071)

作者简介: 刘鹏飞 (1994-), 男, 硕士研究生在读, 目前主要从事锰矿研究。

1.2 铁化学物相分析

矿石中铁化学物相分析结果见表 2。
表 2 表明，该矿石中的铁主要赋存于赤铁矿矿物中，占总铁含量的 98.18%，其次是磁铁矿，占 0.79%，其他形式铁含量较少。

表 2 矿石铁化学物相结果分析
Table 2 Iron phase analysis results of the ore

名称	赤铁矿中铁	磁铁矿中铁	硫化铁中铁	碳酸铁中铁	硅酸铁中铁	总铁
含量/%	42.04	0.34	0.22	0.10	0.12	42.82
分布率/%	98.18	0.79	0.51	0.23	0.28	100.00

1.3 锰化学物相分析

矿石中锰化学物相分析结果见表 3。
表 3 表明，该矿石中的锰主要赋存于软锰矿矿物和水、褐锰矿矿物中，分别占总锰含量的 77.35% 和 18.83%，少量赋存在菱锰矿中。

表 3 矿石锰化学物相结果分析
Table 3 Manganese phase analysis results of the ore

名称	软锰矿中锰	水、褐锰矿中锰	菱锰矿中锰	总锰
含量/%	13.97	3.40	0.69	18.06
分布率/%	77.35	18.83	3.82	100.00

1.4 矿石的矿物组成

矿石的 XRD 见图 1，矿石的矿物组成及含量见表 4。

从图 1 中可以看出：该矿石中主要金属矿物为赤铁矿和软锰矿，主要脉石矿物为石英。
表 4 表明，该矿石中金属矿物主要为赤铁矿，含量为 61.53%，其次为软锰矿、褐锰矿和硬锰矿，含量分别为 18.63%、4.82% 和 4.66%，脉石矿物主要为黏土矿物和石英，含量分别为 6.8% 和 2.72%。

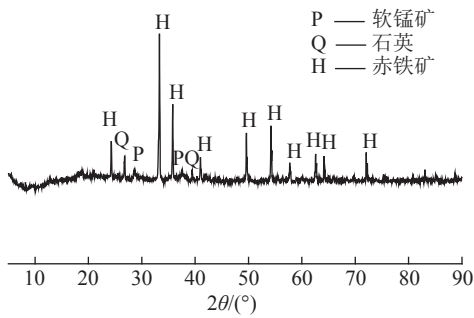


图 1 原矿 XRD
Fig.1 XRD analysis of raw ore

表 4 矿石中主要矿物组成及含量
Table 4 Main minerals composition and contents of the ore

名称	赤铁矿	软锰矿	褐锰矿	硬锰矿	水锰矿	石英	黏土矿物	合计
含量/%	61.53	18.62	4.82	4.66	0.85	2.72	6.80	100.00

2 矿石构造和矿物构造

2.1 矿石构造

通过对该矿石的标本观察可知，该矿石构造主要包含：块状构造，胶状构造和浸染状等。

(1) 块状构造。矿石中的金属矿物如赤铁矿、硬锰矿和褐锰矿等以其中一种为主，构成致密集合体，其中金属矿物含量在 80% 以上的形成块状构造。

(2) 胶状构造。矿石中部分硬锰矿以胶状产出，呈胶状构造。

(3) 浸染状构造。矿石中的部分赤铁矿、硬锰矿等以粗细不等的粒状嵌布在脉石矿物中，且无定向排列，形成浸染状构造。

2.2 矿物构造

(1) 自形半自形晶构造。矿石中的赤铁矿主要以自形、半自形的板状、片状、粒状产出，形成自形-半自形晶结构。

(2) 他形晶构造。矿石中的部分褐锰矿和硬锰矿以他形晶产出，不具任何完好晶面，形成他形晶结构。

(3) 交代构造。矿石中的褐锰矿蚀变生成硬锰矿，硬锰矿沿边缘和内部交代褐锰矿，二者连晶产出，形成交代结构。

3 矿石中主要矿物的嵌布特征

3.1 赤铁矿

矿石中的赤铁矿含量高，主要以自形-半自形

的板状、片状、粒状和鳞片状的致密集合体，集合体颗粒十分粗大，少量赤铁矿嵌布在脉石中（图2(a)、(b)、(c)、(d)）。部分赤铁矿的粒间充

填粒状、不规则状、脉状的褐锰矿、硬锰矿和软锰矿，一些细粒赤铁矿分布在褐锰矿和硬锰矿中（图2(e)、(f)）。

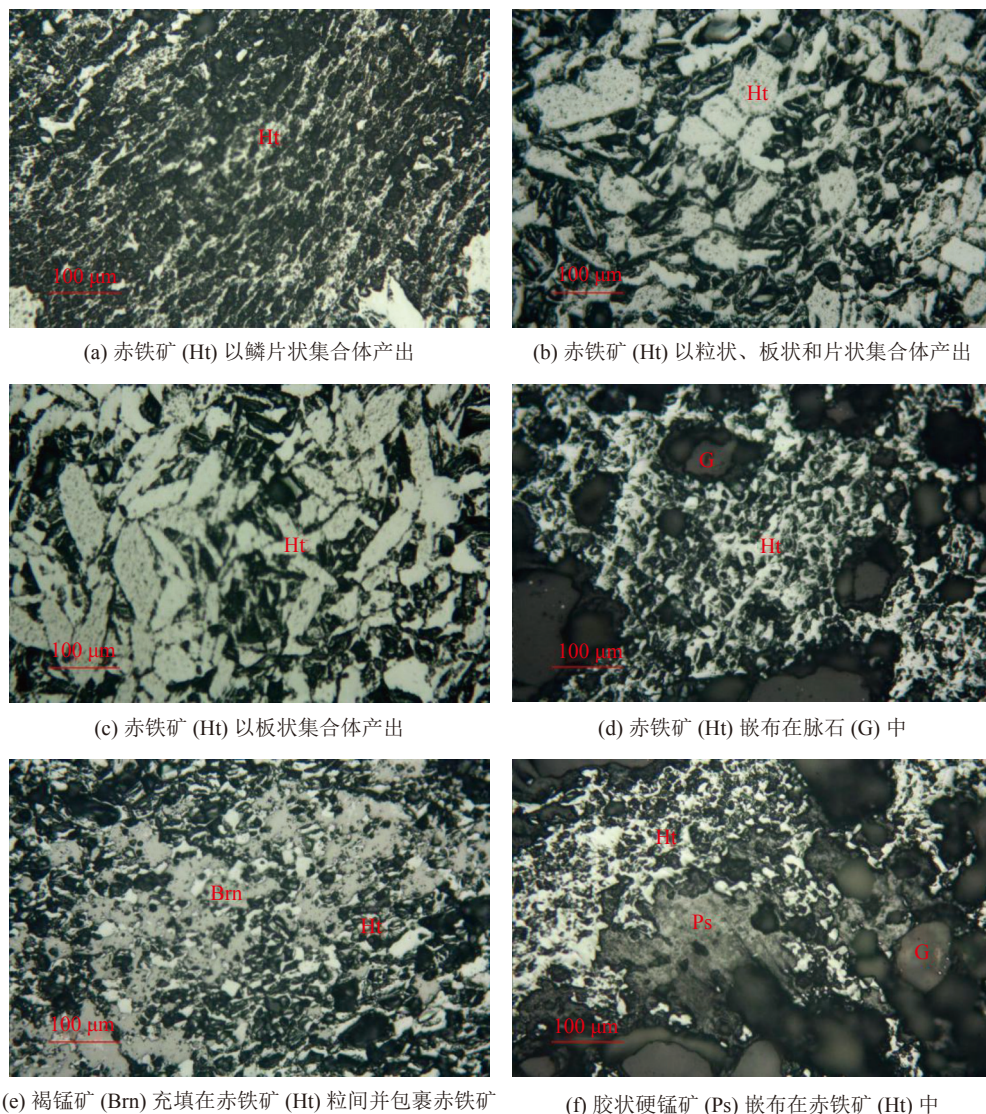


图2 赤铁矿嵌布特征

Fig.2 Dissemination characteristics of hematite

3.2 褐锰矿

褐锰矿以致密的粒状集合体产出，颗粒粗大，在矿石中较集中分布。常见褐锰矿常以粒状、不规则状和脉状充填在赤铁矿粒间和集合体的裂隙中，并包裹细粒的赤铁矿（图2(e)、图3(a)、(b)）。褐锰矿常发生蚀变生产硬锰矿，二者连晶共生，硬锰矿在褐锰矿中呈斑点状、脉状、网状分布。有的褐锰矿蚀变严重，仅剩余少量细粒褐锰矿包裹在硬锰矿中（图3(c)、(d)）。

3.3 硬锰矿

硬锰矿主要为褐锰矿蚀变矿物，多以不规则

状、斑点状、细脉状和网状分布在褐锰矿中，二者连晶共生，形成致密的块体。常见硬锰矿与褐锰矿一起充填在赤铁矿的粒间，并包裹细粒赤铁矿，少量以胶状、土状和波纹状嵌布在脉石中（图3(c)、图4(a)）。硬锰矿常与软锰矿连晶共生，包裹细粒软锰矿（图4(b)）。

3.4 软锰矿

部分软锰矿以粒状、柱状产出，多与硬锰矿连晶共生，嵌布在硬锰矿中。少量软锰矿充填在赤铁矿粒间和嵌布在脉石中，另一部分以胶状、土状产出，分布在脉石中，粒度较细小（图4(b)、图5(a)、(b)）。

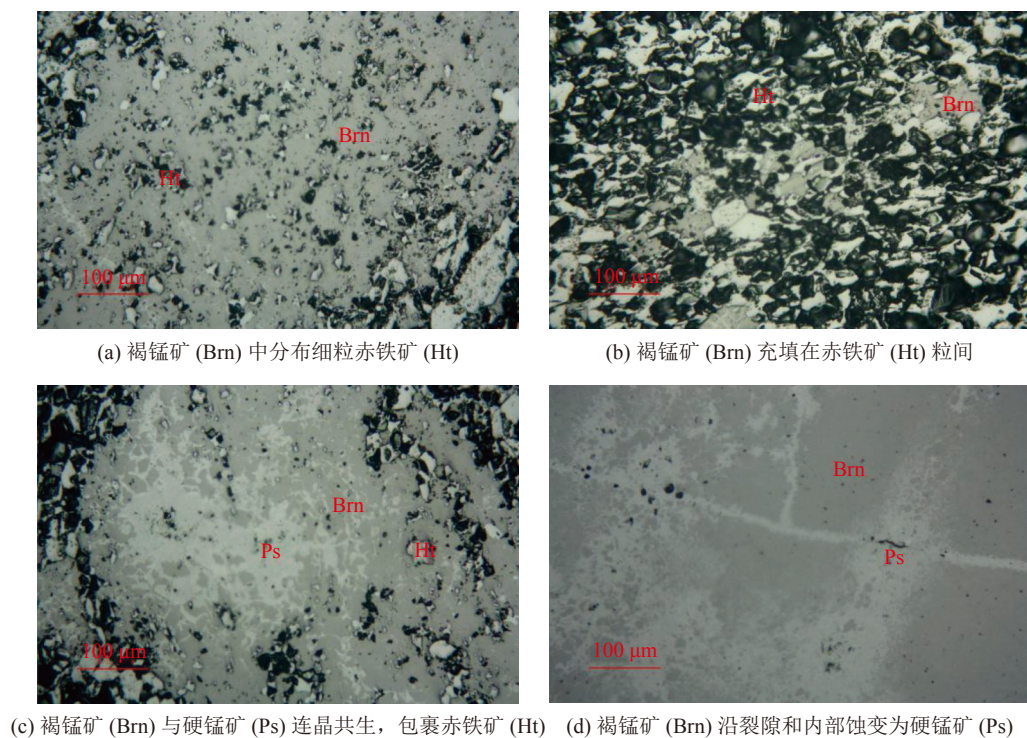


图 3 褐锰矿嵌布特征

Fig.3 Dissemination characteristics of braunite

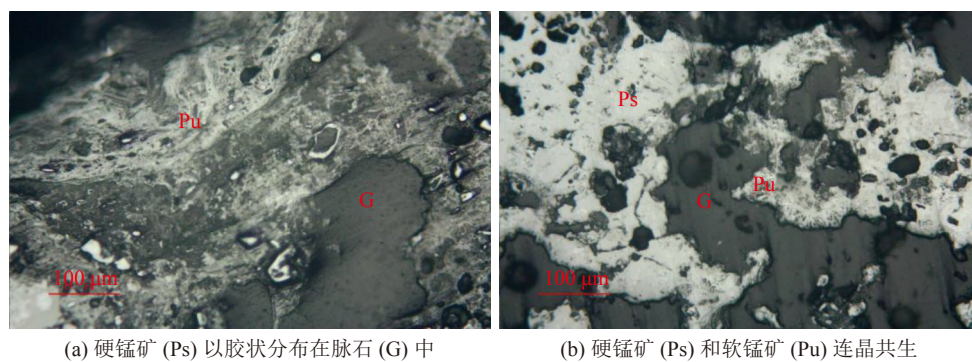


图 4 硬锰矿嵌布特征

Fig.4 Dissemination characteristics of psilomelane

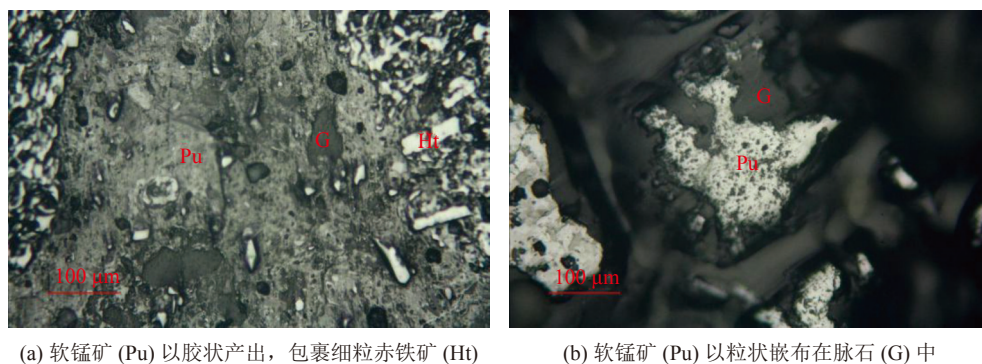


图 5 软锰矿嵌布特征

Fig.5 Dissemination characteristics of pyrolusite

4 主要矿物工艺粒度

矿石中嵌布粒度特征是矿石的重要性质，其中赤铁矿、软锰矿、褐锰矿和硬锰矿和为回收矿物，对其进行粒度测定。根据选矿需要，将褐锰

矿、硬锰矿和软锰矿统计结果合并计为锰矿物。主要矿物工艺粒度统计结果见表5。

从表5看，赤铁矿和锰矿物在+0.15 mm 粒级中的分布率分别为 93.12% 和 81.42%，可见赤铁矿和锰矿物的粒度以粗粒嵌布为主。

表5 主要矿物工艺粒度统计结果
Table 5 Results of particle size of main mineral processes

粒度/mm	赤铁矿分布率/%	累计含量/%	锰矿物分布率/%	累计含量/%
+0.15	93.12	93.12	81.42	81.42
-0.15+0.10	2.74	95.86	7.78	89.20
-0.10+0.075	1.46	97.32	3.62	92.82
-0.075+0.053	0.55	97.87	2.67	95.49
-0.053+0.037	1.33	99.20	3.30	98.79
-0.037	0.80	100.00	1.21	100.00
合计	100.00	100.00	100.00	100.00

5 选别工艺流程

基于对该高铁锰矿矿物工艺学的研究，制定两种选别方案。方案一是对原矿直接进行悬浮磁化焙烧，磁化焙烧产品进行弱磁选；方案二是先对原矿进行一段强磁预富集，预富集产品再进行悬浮磁化焙烧和弱磁选。方案一和方案二我们均进行半工业化实验，具体条件和指标如下：

在方案一中，针对-1 mm 原矿物料开展了还原温度、还原剂用量、还原气氛、处理量等悬浮磁化焙烧条件实验。确定-1 mm 物料适宜的悬浮磁化焙烧工艺参数为：还原温度 500℃ 以上、处理量 80 kg/h、CO 用量 8.0 m³/h、H₂ 用量 4.0 m³/h、N₂ 用量 14.7 m³/h、总气量 26.7 m³/h、还原剂浓度 40%、过剩系数 1.5；-1 mm 原矿物料在悬浮磁化焙烧 500℃ 下连续稳定运行，焙烧样品磁选管磁选后，铁精矿铁品位平均值为 66.60%；铁回收率平均值为 93.93%。锰精矿锰品位平均值为 46.22%；锰回收率平均值为 87.29%。

对于方案二，同样针对-1 mm 物料采用一段强磁预富集工艺可获得 TFe 品位 46.64%，锰品位 17.92% 的预富集精矿，针对该预富集精矿开展了还原温度、还原剂用量、还原气氛、处理量等悬浮磁化焙烧条件实验。适宜的悬浮磁化焙烧工艺参数为：还原温度 500℃ 以上、处理量 80 kg/h、CO 用量 7.5 m³/h、H₂ 用量 3.8 m³/h、N₂ 用量 13.8 m³/h、总气量 25.1 m³/h、还原剂过剩系数 1.4；预富集精矿在悬浮磁化焙烧 500℃ 下连续稳定运行，焙烧

样品磁选管磁选后，铁精矿铁品位平均值为 67.97%；铁作业回收率平均值为 94.67%。锰精矿锰品位平均值为 49.85%；锰作业回收率平均值为 88.24%。

6 结 论

(1) 矿石中金属矿物含量高，金属矿物主要为赤铁矿、硬锰矿、褐锰矿和少量软锰矿，脉石矿物主要为石英。

(2) 赤铁矿与锰矿物之间嵌布关系较密切，赤铁矿粒间充填锰矿物，一些细粒赤铁矿包裹在锰矿物中，赤铁矿与锰矿物较难完全解离。

(3) 锰矿物之间嵌布关系十分密切，硬锰矿常呈脉状、网状分布在褐锰矿中，硬锰矿常包裹细粒软锰矿难以彼此解离。

(4) 部分硬锰矿和软锰矿以胶状、土状产出，增加了回收难度。

(5) 在矿物工艺学研究的基础上，分别为磁化焙烧—弱磁选和预富集—磁化焙烧—弱磁选，两种工艺均可达到良好的指标。

参考文献：

[1] 王世磊, 章贤臻, 李运姣, 等. 天然锰矿低温 NH₃-SCR 烟气脱硝催化活性研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):76-82.
WANG S L, ZHANG X Z, LI Y J, et al. Performance of low temperature no catalytic oxidation activity of natural manganese ore catalysts[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):76-82.
[2] 何欢聚, 季淑娟. 基于专利信息的电解锰渣资源化利

用[J]. 矿产综合利用, 2019(6):7-12.

HE H J, JI S J. Resource utilization of electrolytic manganese slag based on patent information[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):7-12.

[3] Zhuo Cheng, Guocai Zhu, Yuna Zhao. Study in reduction-roast leaching manganese from low-grade manganese dioxide ores using cornstalk as reductant[J]. Hydrometallurgy, 2008, 96(1):176-179.

[4] 柴斌. 高铁锰矿固态还原—磁选及强化技术 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.

CHAI B. Process for solid-state reduction and magnetic separation of high iron content manganese ore and its strengthening technology[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[5] 洪世琨. 我国锰矿资源开采现状与可持续发展的研究[J].

中国锰业, 2011, 29(3):13-16.

HONG S K. Research on the mining status and sustainable development of manganese ore resources in China[J]. China's Manganese Industry, 2011, 29(3):13-16.

[6] 邢万里, 王安建, 王曼丽. 全球锰资源供需形势简析[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1):873-874.

XING W L, WANG A J, WANG M L. Brief analysis of global manganese resource supply and demand situation[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(S1):873-874.

[7] 赵鹏. 高铁锰矿煤基直接还原—分选研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

ZHAO P. Process for coal-based direct reduction and magnetic separation of high-iron manganese ore[D]. Changsha: Central South University, 2012.

Research on Process Mineralogy of a High-iron Manganese Ore in Zambia

Liu Pengfei, Sun Yongsheng, Yuan Shuai, Han Yuexin

(College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China)

Abstract: The useful mineral in a high-iron manganese ore in Zambia is hematite and various manganese minerals, and the iron grade is 44.71%, the manganese grade is 17.86%. In order to make an appropriate sorting process, the chemical composition, mineral composition and embedded characteristics of the ore were studied by optical microscope, chemical analysis and X-ray diffraction. The research results show that the main iron mineral is hematite, the content is 61.53%; the main manganese minerals are anthracite, limonite and soft manganese, the content are 18.62%, 4.82% and 4.66%. Finally, pre-concentration-magnetization roasting-magnetic separation test was carried out on the ore, and the average TFe grade was 67.97%, the average recovery rate was 94.67%; the average Mn grade was 49.85%; the average recovery rate was 88.24%. The research results have certain guiding significance for the formulation of the ore sorting process, and also can provide a reference for similar ore.

Keywords: Zambia; Process mineralogy of high-iron manganese; Magnetization roasting