

韦连军, 陈燕清, 雷满奇, 等. 广西桂西地区沉积型铝土矿矿物特征研究[J]. 岩矿测试, 2023, 42(6): 1220–1229. doi: [10.15898/j.ykcs.202209200177](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202209200177).

WEI Lianjun, CHEN Yanqing, LEI Manqi, et al. Mineralogy Characteristics of Sedimentary Bauxite in Western Guangxi[J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(6): 1220–1229. doi: [10.15898/j.ykcs.202209200177](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202209200177).

## 广西桂西地区沉积型铝土矿矿物特征研究

韦连军, 陈燕清\*, 雷满奇, 黄庆柒

(广西壮族自治区地质矿产测试研究中心, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 随着中国铝土矿资源日益消耗, 高硫铝土矿将成为重要的新型铝土矿资源。中国有大量品位较高的高硫型沉积型铝土矿, 但这类矿石由于硫含量高(硫含量 $>0.7\%$ ), 严重影响后续提铝工艺流程, 因而一直未被工业化利用, 在铝土矿资源日益紧缺之时, 若能开发利用, 对中国铝工业发展具有重要意义。2020—2021 年在广西桂西地区自平果—靖西一带铝土矿成矿带新探获得相当量的沉积型铝土矿, 该沉积型铝土矿是堆积型铝土矿的矿源层, 二者在空间分布上存在重叠, 矿石多与黄铁矿密切共生, 部分矿段的硫含量高工业利用允许最高含量的数倍或数十倍, 尽管矿石品位较高, 但硫含量多在 $2\% \sim 8\%$ , 目前该铝土矿矿石性质及工业化技术指标尚不明确。因此, 本文以广西桂西地区的沉积型铝土矿为研究对象, 采用 X 射线荧光光谱、偏光显微镜、X 射线衍射及扫描电镜-能谱等分析测试技术研究了铝土矿的矿石矿物组成特性, 探究了沉积型铝土矿的矿石性质。分析结果表明, 该矿石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为  $64.21\%$ , S 含量为  $5.13\%$ , 属于高硫沉积型铝土矿; 矿石中铝矿物主要为一水硬铝石、绿泥石; 铁矿物主要有黄铁矿、赤铁矿及褐铁矿; 一水硬铝石, 其结晶粒度细, 呈鲕状集合体形式, 表面较光滑; 黄铁矿中粗粒、中粒级黄铁矿多以半自形及他形存在, 粒径较大。结合本项目组早前对高硫型铝土矿进行的大量试验研究认为, 该沉积型铝土矿高硫问题可通过选矿技术方法分离黄铁矿, 后续建议通过破碎磨矿手段使矿石矿物单体解离, 再辅以合理的选矿药剂制度将黄铁矿浮选分离出来, 从而使浮选后的含铝矿物满足下一步的氧化铝提取入料要求。

**关键词:** 沉积型铝土矿; 矿物特征; 黄铁矿; X 射线荧光光谱法; X 射线衍射法; 扫描电镜-能谱法

**要点:**

- (1) 沉积型铝土矿物相组成复杂, 主要有用组分为一水硬铝石。
- (2) 铝土矿中的硫含量高(硫含量 $>0.7\%$ ), 无法直接利用, 建议通过浮选脱硫预处理。
- (3) 黄铁矿是铁与硫的主要矿物, 颗粒大小不一, 与其他矿物嵌布关系较复杂。

**中图分类号:** TD989; TF041

**文献标识码:** A

铝是国民经济发展和国防建设等领域的重要战略金属<sup>[1-2]</sup>, 被广泛应用于飞机、汽车、火车、船舶、人造卫星等领域。铝土矿有 90% 用于生产金属铝, 中国铝土矿资源丰富, 其中高硫铝土矿储量达 1.5 亿吨, 占总储量的  $11.0\%$  左右<sup>[3-5]</sup>, 主要分布在贵州、广西、山东、云南等地区。随着铝工业不断发展, 中国铝土矿资源逐渐趋于贫、细、杂, 料矿石供应紧张,

优质的铝土矿资源已开发殆尽<sup>[6]</sup>。广西的铝土矿资源在助力桂西脱贫攻坚和资源型产业转型升级双重需求的状况下, 也面临着很大的资源挑战。为保障全区生态铝业的发展, 2020—2021 年广西加大了铝土矿勘查力度, 在探获一批堆积型铝土矿的同时探获了相当量的沉积型铝土矿<sup>[7-9]</sup>。然而, 探明的沉积型铝土矿多与黄铁矿密切共生, 部分矿段的硫

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2023-03-06; 接受日期: 2023-06-28

基金项目: 地质勘查广西财政专项资金(桂地矿综研[2021]9, 桂地矿地[2022]20 号)

第一作者: 韦连军, 高级工程师, 从事矿物加工技术研究及科研管理。E-mail: [120018983@qq.com](mailto:120018983@qq.com)。

通信作者: 陈燕清, 硕士, 高级工程师, 从事选矿技术研究及矿产资源综合利用研究。E-mail: [491082556@qq.com](mailto:491082556@qq.com)。

含量高于工业利用允许最高含量的数倍甚至数十倍, 尽管矿石品位较高, 但高硫铝土矿因其中硫含量较高 ( $S$  含量  $>0.7\%$ ), 在生产氧化铝过程中易造成设备的腐蚀、氧化铝的品质变差等问题<sup>[10-11]</sup>, 一直是影响高硫铝土矿高效利用的主要原因之一。因此, 开发脱硫技术对实现高硫铝土矿资源的高效利用、缓解中国氧化铝工业原料供应不足具有重要意义。

本文以广西桂西地区沉积型铝土矿为研究对象, 该沉积型铝土矿是堆积型铝土矿矿源层, 二者矿石主要化学组成和矿物组成均为  $Al_2O_3$  和一水硬铝石, 但共 (伴) 生物物质组成存在差异。结合 X 射线荧光光谱测试手段, 采用 X 射线衍射对矿石元素进行精确的定性/定量分析, 利用偏光显微镜微尺度下观察矿石的形貌和矿石组分赋存状态, 再辅以扫描电镜和能谱分析对该矿石进行全面的工艺矿物学研究, 以查明该矿石中主要矿物的种类、组成、主要金属元素的赋存状态、矿物在矿石中相互之间的嵌布关系等矿石性质, 最后针对矿石性质, 提出关键技术问题的解决方法, 为后续此类型矿石的开发利用研究提供基础参数。

1 实验部分

1.1 实验样品

广西桂西地区沉积型铝土矿矿石样品由硬质块状组成, 颜色呈深灰、灰黑色。挑选出代表性块状样品磨制薄片、光片用作偏光显微观察, 其余矿石样品经破碎、混匀、缩分、干燥、研磨等处理后进行 X 射线荧光光谱、X 射线衍射及扫描电镜-能谱等分析测试。

1.2 样品测试

矿石的化学组成采用 X 射线荧光光谱仪 (Axios mAX 单道扫描型 X 射线荧光光谱仪, 日本) 测定, 允许元素分析范围: O(8)~U(92), 测角仪重现性:  $0.0001^\circ$ 。测定前将样品磨成  $-0.074\text{mm}$  粉末, 烘干后称取样品与硼酸在玛瑙研钵充分研磨混匀, 完成压片, 进行定量分析法分析。

X 射线衍射仪 (Shimadzu D/MAX-rA 型, 日本)、X 射线荧光光谱对矿石样品进行定量定性分析同时可呈现分析矿物组成元素相关分布规律、赋存状态等信息<sup>[12]</sup>, 利用高能电子束对样品照射, 分析衍射结果可获得矿物集合体嵌布特征分布图。

实验采用偏光显微镜 (Leica DMLA 型透反偏光显微镜, 德国) 和扫描电镜-能谱 (XL30 ESEM-TM 型扫描电子显微镜/GENESIS 能谱仪, 荷兰) 观察和

分析矿样的形貌和性状。在显微测试分析前磨制矿石样品薄片、光片, 需要选择样品中有代表性的部位进行切割, 面积不小于  $22\text{mm}\times 22\text{mm}$ , 厚度为  $0.03\text{mm}$ , 厚薄均匀, 光、薄片内无气泡、无裂纹、无掉块, 无特殊要求时加有盖片, 盖片略大于相应的片面积, 并留出三分之一部分不加盖片, 以备染色等; SEM-EDS 测定将矿样 ( $-0.038\text{mm}$  粒级的粉末状) 均匀粘在石墨导电胶上, 放置在测试台上, 除去附着物, 然后置于测试设备抽真空检测。

2 结果与讨论

2.1 铝土矿矿石主要化学元素

对矿石样品进行了 X 射线荧光光谱半定量分析 (表 1) 以及多元素分析 (表 2)。结果表明: 该矿石样品主要成分为  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $S$  等,  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  含量分别为  $64.21\%$ 、 $7.77\%$ ,  $S$  元素含量为  $5.13\%$ , 矿石铝硅比 ( $A/S$ ) 为  $16.68$ , 达到了铝土矿一般工业指标 (DZ/T 0202—2020) 沉积型铝土矿地质勘探要求; 根据铝土矿其他工业指标质量划分要求, 铝土矿中硫元素含量  $>0.8\%$  时, 其铝土矿类型属于高硫型铝土矿 (GB/T 24483—2009), 因此, 该沉积型铝土矿属于高硫型沉积型铝土矿; 矿石的其余组分硅、钛成分含量分别为  $3.85\%$ 、 $4.07\%$ , 还含有一定量的有机碳。

表 1 沉积型铝土矿矿石样品 X 射线荧光光谱半定量分析结果

Table 1 Semi-quantitative analysis of X-ray fluorescence spectrometry of sedimentary bauxite ore samples.

| 矿石成分      | 含量 (%) | 矿石成分     | 含量 (%) |
|-----------|--------|----------|--------|
| $Al_2O_3$ | 70.37  | CaO      | 0.05   |
| $SO_3$    | 10.54  | $P_2O_5$ | 0.04   |
| $Fe_2O_3$ | 8.20   | Nb       | 0.04   |
| $SiO_2$   | 6.04   | Cl       | 0.03   |
| Ti        | 4.15   | Y        | 0.03   |
| Zr        | 0.37   | Th       | 0.02   |
| $K_2O$    | 0.13   |          |        |

2.2 沉积型铝土矿矿物组成

称取  $5\text{g}$  左右 ( $-0.074\text{mm}$  粒级的粉末状) 的矿石样品, 采用石英载玻片制样压片, 然后将其放置于 Shimadzu D/MAX-rA 型 X 射线衍射仪中进行测试, 其测试角度范围为  $5^\circ\sim 85^\circ$ , 测量步长为  $0.05^\circ$ , 单次采样时间为  $0.1\text{s}$ , 获取衍射图谱后采用 Jside6.0 软件进行分析, 其分析结果见图 1。由 X 射线衍射图谱 (图 1) 分析可知, 铝土矿主要矿物包括绿泥石、铝土

表 2 沉积型铝土矿矿石样品主要化学成分分析

Table 2 Main chemical composition analysis of sedimentary bauxite ore samples.

| 矿石成分                           | 含量 (%) | 矿石成分   | 含量 (%) |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 64.21  | Ga     | 0.0072 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.77   | Sc     | 0.0066 |
| S                              | 5.13   | 稀土总量   | 0.046  |
| TiO <sub>2</sub>               | 4.07   | 总碳 (C) | 3.40   |
| SiO <sub>2</sub>               | 3.85   | 有机碳    | 3.03   |
| A/S                            | 16.68  | 烧减量    | 19.21  |

注：表中 A/S 为矿石中氧化铝和氧化硅百分含量的比值 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)，下同。

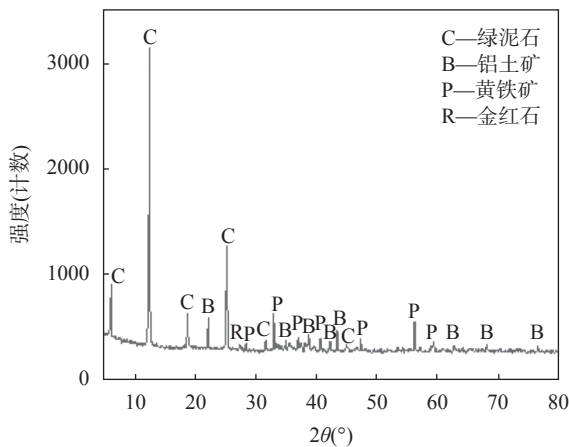


图1 沉积型铝土矿 X 射线衍射分析图谱

Fig. 1 The pattern of X-ray diffraction analysis of the sedimentary bauxite ore sample.

矿、黄铁矿、金红石等<sup>[13-15]</sup>。与同一矿源层的堆积型铝土矿相比,桂西地区沉积型铝土矿在共伴生物质组成上存在一定差异<sup>[16-17]</sup>。以平果太平堆积型铝土矿为例,平果太平堆积型铝土矿以一水硬铝石为主,同时可见三水铝石、石英、铁的氢氧化物(褐铁矿、赤铁矿、针铁矿等)<sup>[18-21]</sup>,而平果沉积型铝土矿还富含黄铁矿。

在化学测试分析的基础上,经过显微鉴定和矿

物定量分析了沉积型铝土矿的矿物组成和含量,测定结果见表 3。矿石铝矿物主要为一水硬铝石(50%)和绿泥石,少部分为三水铝石和高岭石;铁矿物主要有黄铁矿、赤铁矿及褐铁矿,其中黄铁矿是硫矿物主要存在形式;钛矿物主要以金红石形式出现,少量存于锐钛矿中。

铝土矿元素分析得出铝土矿的高硫属性,验证了铝土矿中黄铁矿的存在形式。为了了解黄铁矿含量情况,对铝土矿的主要杂质元素铁、钛进行物相分析。物相结果(表 4)显示,铁元素主要是黄铁矿中的铁(占比 68.78%)。次之是菱铁矿中的铁(占比 17.92%)以及有磁性的磁铁矿、雌黄铁矿中的铁(占比 4.34%),其余为赤铁矿、褐铁矿中的铁和硅酸铁中的铁;钛矿物主要是由金红石中的钛组成(占比 82.10%),与铁相结合的钛铁矿中的钛占比较少(2.40%),其余的是硅酸盐中的钛。与同一成矿带产出的堆积型铝土矿矿物组成相比较,沉积型铝土矿中的铁矿物含有黄铁矿,且黄铁矿是主含量的铁矿物。

2.3 沉积型铝土矿矿物成分粒度特征分析

采用岩矿鉴定分析矿石中各种矿物的形态、分布状况及主要矿物(工艺矿物学)的粒度,结果显示铝土矿矿石多具粒屑结构,常含有砂屑、鲕粒、豆粒、砾屑、团块、粉屑、生物碎屑等粒屑,其中砂屑、鲕粒、豆粒、砾屑、粉屑等多呈边缘较清晰的不规则拉长状、不甚规则的圆形及椭圆形、不规则状,团块则多呈边

表 3 沉积型铝土矿的矿物成分及含量

Table 3 Chemical components and content of sedimentary bauxite.

| 矿物    | 含量 (%) | 矿物      | 含量 (%) |
|-------|--------|---------|--------|
| 一硬水铝矿 | 50     | 绿泥石     | 33     |
| 三水铝石  | 3      | 金红石     | 4      |
| 滑石    | 3      | 黄铁矿     | 4      |
| 高岭石   | 2      | 锐钛石     | <1     |
| 石英    | <1     | 赤铁矿及褐铁矿 | ≤1     |

表 4 沉积型铝土矿中的铁矿物和钛矿物物相组成

Table 4 Phase composition characteristics of iron minerals and titanium minerals in sedimentary bauxite.

| 铁矿物物相  | 磁铁矿和雌黄铁矿中的 Fe | 菱铁矿中的 Fe  | 赤铁矿和褐铁矿中的 Fe | 硫化铁中的 Fe    | 硅酸铁中的 Fe |
|--------|---------------|-----------|--------------|-------------|----------|
| 含量 (%) | 0.24          | 0.99      | 0.40         | 3.80        | 0.10     |
| 占比 (%) | 4.34          | 17.92     | 7.24         | 68.78       | 1.72     |
| 钛矿物物相  | 金红石中的 Ti      | 钛磁铁矿中的 Ti | 钛铁矿中的 Ti     | 榍石和硅酸盐中的 Ti |          |
| 含量 (%) | 1.88          | 0.00      | 0.06         | 0.36        |          |
| 占比 (%) | 82.10         | 0.00      | 2.40         | 15.50       |          |

缘不甚清晰的不规则状;矿石中的粒屑含量不等且分布不规律,其中矿块内部粒屑含量变化较大,范围在0.001~3.08mm。矿块内部粒屑的排布有较定向的,也有杂乱的,部分矿块中有均匀的,也有不均匀的,如矿石中的金红石及锐钛矿主要散布于一水硬铝石、铁绿泥石、高岭石、三水铝石等矿物中,这种分布显示出不均匀性和无规律性;矿石中的粒屑及其间的填隙物主要由一水硬铝石、铁绿泥石和少量高岭石、黄铁矿、三水铝石、滑石、赤铁矿及褐铁矿等矿物组成,其中高岭石在填隙物中相对富集,生物碎屑可能是苔藓虫,部分粒屑中有相对较细小的砂屑、鲕粒嵌布,粒屑粗细不一。

铝土矿中各矿物成分粒度特征如下。

(1) 一水硬铝石:多呈他形粒状,少量呈半自形板状,粒度在0.004~0.36mm之间,以0.004~0.03mm间者较多。

(2) 绿泥石:呈显微鳞片状,粒度在0.001~0.2mm之间,一般在0.01~0.1mm。

(3) 三水铝石:呈显微粒状或隐晶质尘状,粒度在0.001~0.1mm之间,多在0.001~0.01mm。

(4) 金红石及锐钛矿:绝大部分呈尘状,少量呈显微粒状,在显微镜下无法将两者区分,但从矿样的X射线衍射图中可观察到它们的衍射峰。其工艺矿物学粒度绝大部分<0.004mm,粒度最大约为0.04mm。

(5) 高岭石:呈隐晶质尘状或显微鳞片状。

(6) 黄铁矿:多呈半自形、自形的五角十二面体状、立方体状,一部分呈不规则的他形粒状、莓粒状,另一部分相对聚集形成不规则的斑点、团块,还有部分则为单体或细微的集合体。黄铁矿的工艺矿物学粒度范围较大,在0.001~3.08mm之间。

(7) 赤铁矿及褐铁矿:部分呈黄铁矿假象,部分呈显微粒状或隐晶质状,工艺矿物学粒度在0.001~1.68mm之间,一般在0.01~0.06mm之间。

(8) 石英:显微镜下未观察到,但从矿样的X射线衍射图中可观察到微弱的石英的衍射峰。

## 2.4 沉积型铝土矿中的主要矿物嵌布特征及扫描电镜-能谱分析

诸多研究已证明,铝土矿的高硫问题是影响铝土矿经济有效利用的主要因素,该类型的铝土矿在进行氧化铝提取前的脱硫预处理是必要环节<sup>[22-24]</sup>。这类沉积型铝土矿的主要有用矿物一水硬铝石和黄铁矿在成分粒度上存在差异,但能否实现脱硫,还与两者的嵌布关系相关。因此,本文对矿石中的主要矿物即一水硬铝石和黄铁矿进行嵌布关系分析。

### 2.4.1 主要矿物的嵌布特征

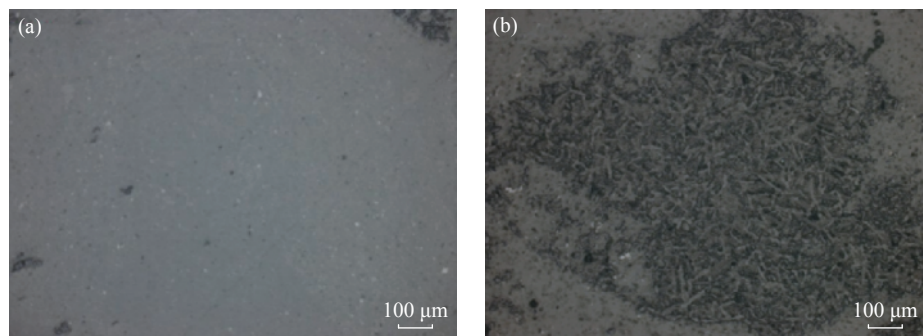
对矿石中的主要矿物一水硬铝石和黄铁矿采用Leica DMLA型透反偏光显微镜分析,其分析结果见图2和图3。

#### (1) 一水硬铝石

一水硬铝石是铝土矿的主要有用组分,显微镜下分析结果显示:铝土矿为一水硬铝石,其结晶粒度细,主要以集合体形式存在;灰色为一水硬铝石(图2a),灰白色且呈星点状分布的为金红石,针柱状一水硬铝石(图2b)呈无反向性的杂乱嵌生,其粒间为铁矿物或高岭石充填,呈浸染状构造。

#### (2) 黄铁矿

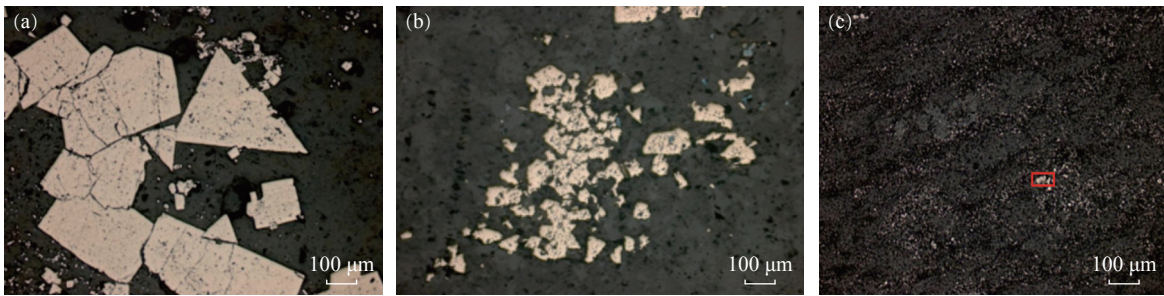
黄铁矿是铁与硫的主要矿物。镜下显微结果显示:黄铁矿以自形、半自形和他形晶态存在于矿物中,颗粒大小不一,有的达几百微米,有的仅几微米。其粗粒黄铁矿(图3a)的粒径可达1mm以上,常呈自形及半自形晶粒或棱角状结构分布于一水硬铝石中;



a—灰色为一水硬铝石;b—针状、柱状为一水硬铝石。

图2 沉积型铝土矿中以集合体存在形式的一水硬铝石嵌布特征的显微照片

Fig. 2 Microphotos of dissemination characteristics of diaspore in the presence of aggregates in sedimentary bauxite.



a—自形粗粒黄铁矿；b—他形中粒黄铁矿；c—中细粒、微细粒黄铁矿。

图3 沉积型铝土矿中黄铁矿嵌布特征的显微照片

Fig. 3 Microphotos of dissemination characteristics of pyrite with different grain sizes in sedimentary bauxite.

中粒黄铁矿 (图 3b) 的粒径最大可达 100 $\mu\text{m}$ , 多以他形晶分布, 被一水硬铝石包裹, 绿泥石、一水硬铝石等矿物嵌布于部分黄铁矿中; 而中细粒及微细粒黄铁矿 (图 3c) 多以星点状散落分布在一水硬铝石中, 粒径较小, 仅有几个微米。

2.4.2 主要矿物的扫描电镜-能谱分析结果

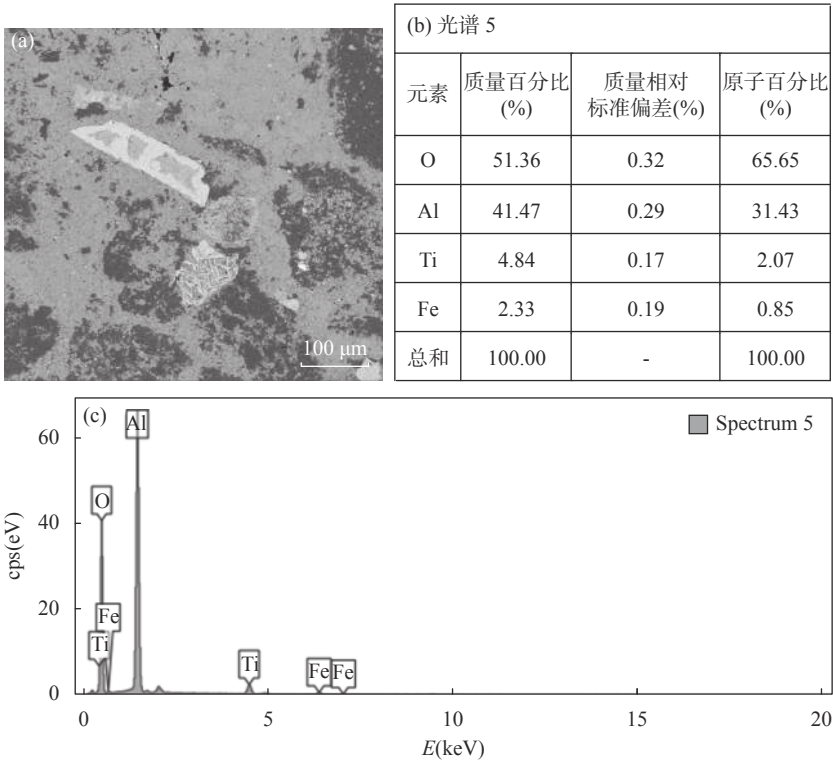
对矿样中的主要矿物一水硬铝石和黄铁矿采用 XL30 ESEM-TM 型扫描电子显微镜和 GENESIS 能谱仪进行分析, 其分析结果见图 4 和图 5。

(1) 一水硬铝石

由图 4 可知, 矿样中存在较纯的一水硬铝石, 呈鲕状集合体形式, 表面较光滑; 同时, 一水硬铝石中包裹微细粒状的金红石和绿泥石等, 且一水硬铝石中 O 和 Al 元素的含量分别为 51.36% 和 41.47%。

(2) 黄铁矿

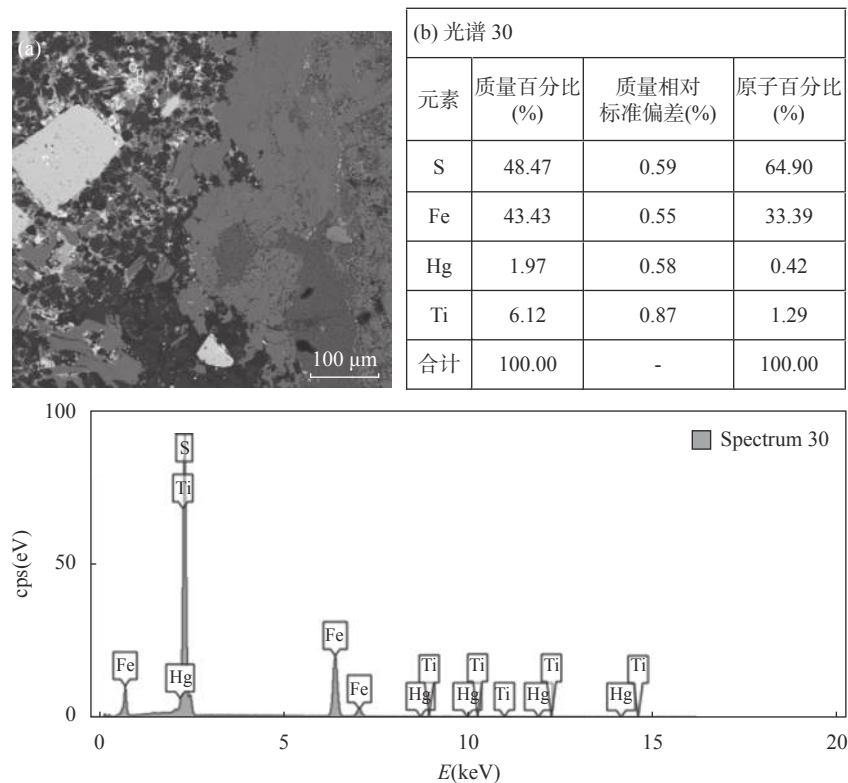
图 5 为自形粗粒黄铁矿的 SEM 和能谱图, 分析图中数据可知, 该黄铁矿中的 Ti、Hg 含量较高, 呈细分散状态, 查阅资料可知, 这可能是由于矿床的低温



a—扫描电镜图；b—图中对应位置的元素含量表；c—对应位置的能谱图。

图4 沉积型铝土矿中一水硬铝石赋存形式和元素含量

Fig. 4 The occurrence form and element contents of diaspore in sedimentary bauxite by scanning electron microscope and energy spectrum.



a—扫描电镜图像；b—图中对应位置的元素含量表；c—对应位置的能谱图。

**图5 沉积型铝土矿中黄铁矿赋存形式和元素含量**

Fig. 5 The occurrence form and element contents of pyrite in sedimentary bauxite by scanning electron microscope and energy spectrum.

热液交代变质作用导致 Ti、Hg 等元素在黄铁矿中富集。由图 5a 也可看到, 部分金红石等呈细粒状包裹在黄铁矿中。

**2.4.3 铝土矿主矿物分布特性对矿石可选性的影响**

沉积型铝土矿的嵌布特征分析结果显示, 主要矿物—水硬铝石和黄铁矿在矿石中的分布形式是有区别的, 尽管它们相互之间存在包裹或者充填, 但—水硬铝石结晶粒度细且大部分呈鲕状集合体存在, 结构均匀且致密, 黄铁矿则以自形、半自形和它形晶形式存在, 结晶颗粒大小不一, 粗粒、中粒级的黄铁矿粒径有的达几百微米以上。在当前的选矿技术方法中, 通过破碎磨矿手段使矿物单体解离, 再选用适宜的选矿方法分离有用矿物与脉石矿物是选矿常用的手段<sup>[25-27]</sup>。马兴飞等<sup>[28]</sup>采用低温焙烧技术路线对低品位高硫铝土矿进行低温焙烧脱硫研究, 结果表明, 在矿石粒径 48μm 条件下, 铝土矿脱硫率达到 75.83%; 李振宇<sup>[29]</sup>将西北某高硫铝土矿破碎磨矿至-0.074mm 90% 的条件下, 采用组合捕收剂丁基黄药和 Z-200 进行浮选脱硫, 获得硫含量 0.38% 的铝土矿精矿, 脱硫率达到 95.01%。由此判断, 该高

硫型沉积型铝土矿中主要矿物—水硬铝石和黄铁矿之间的这种嵌布特性是有可能通过破碎磨矿实现单体解离的。

对此, 项目组参照浮选、煅烧、还原焙烧+磁选等选矿方法对高硫型沉积型铝土矿进行了大量的脱硫预处理试验探索, 探索发现这三种选矿方法脱硫预处理各有优缺点。浮选脱硫含铝矿物氧化铝方法的损失最小, 同时可获得满足品质要求的硫精矿产品; 煅烧方法铝硫分离效果最佳, 含铝矿物中硫元素的品位可低至 0.13%, 但煅烧会产生工业废气, 环境不友好, 需要增加废气处理装置<sup>[30]</sup>; 还原焙烧+磁选方法可获得更高品位的含铝矿物, 但其含铝矿物损失大, 不利于氧化铝的回收。虽然以上三种方法获得的含铝矿物都能满足下一步的氧化铝提取入料要求, 但从生产成本、环境要求等方面考虑, 项目组一致认为采用浮选脱硫预处理方法技术可行且是经济合理的工艺路线。

**3 结论**

以广西桂西地区沉积型铝土矿为研究对象, 采

用X射线荧光光谱、偏光显微镜、X射线衍射及扫描电镜-能谱等测试方法进行全面的工艺矿物学研究。研究结果表明该沉积型铝土矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为64.21%, S含量为5.13%, 属于高硫型沉积型铝土矿; 矿石中铝矿物主要为一水硬铝石、绿泥石, 铁矿物主要有黄铁矿、赤铁矿及褐铁矿; 由于铝土矿的高硫属性使其不能直接进行氧化铝的提取, 但矿石的主矿物嵌布特征结果表明, 沉积型铝土矿主矿物一水硬铝石和黄铁矿之间的赋存特性可以考虑通过选矿方法来进行分离。

针对沉积型铝土矿高硫问题, 目前采用浮选方法回收有色金属矿石中的黄铁矿是工业上常见的一种方法, 该工艺技术成熟, 且环境相对友好, 适用于沉积型铝土矿中的黄铁矿浮选, 建议后续采用该方法进行高硫沉积型铝土矿的脱硫处理。

**致谢:** 在本文样品采集过程中, 得到广西壮族自治区二七二地质队所有技术人员的指导和帮助; 在本文的实验分析过程中, 中南大学朱忠平、李光辉两位教授给予指导和帮助, 在此一并表示感谢!

## Mineralogy Characteristics of Sedimentary Bauxite in Western Guangxi

WEI Lianjun, CHEN Yanqing\*, LEI Manqi, HUANG Qingqi

(Geological and Mineral Testing Research Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) Sedimentary bauxite has a complex phase composition and its main useful component is diaspore.
- (2) Sedimentary bauxite has high sulfur content (greater than 0.7%), so it cannot be utilized directly, and it is recommended to use desulfurization by flotation for pretreatment.
- (3) Pyrite is the main mineral of iron and sulfur, with different particle sizes, and has a complex relationship with other minerals.

### ABSTRACT

**BACKGROUND:** China is the world's largest aluminum producer and consumer. With the development of China's aluminum industry, bauxite resources are consumed continuously and highly dependent on imports. In 2019, China's imports exceeded 100 million tons of bauxite, with an increase of 21.9%, and in 2020, imports reached a record high of 110 million tons, and dependency on importing bauxite is increasing from 5% in 2001 to 50%. Therefore, high-sulfur bauxite becomes an important new resource. A large number of high-grade high sulfur sedimentary bauxite has been found in China. However, due to the high sulfur content ( $S > 0.7\%$ ) in high sulfur sedimentary bauxite, which seriously affects the subsequent aluminum extraction process, it has not been used in industry. If it can be developed and utilized in industry, it is of great significance to the development of the aluminum industry.

**OBJECTIVES:** In order to clarify the ore properties and the possible industrialization technical indicators of sedimentary bauxite in Western Guangxi.

**METHODS:** X-ray fluorescence spectroscopy, polarizing microscope, X-ray diffraction and scanning electron microscopy were applied to investigate composition and properties of the sedimentary bauxite ore, which provided important reference data for the development of this type of bauxite.

**RESULTS:** (1) The content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the ore is 64.21% and the content of S is 5.13%. According to the classification of the bauxite industrial index quality, the ore belongs to high sulfur deposit type bauxite. (2) The aluminum minerals in the ore are mainly diaspora and chlorite, with fine crystal size, oolitic aggregate form and smooth surface for diaspora. The main iron minerals are pyrite, hematite and limonite. The pyrite exists in the form of euhedral, semi-euhedral and allotriomorphic crystals, and the size of crystal particles is different. Some of the coarse-grained and medium-grained pyrites have a particle size of more than hundreds of microns. Compared with the accumulated bauxite in the same source layer, the biggest difference of sedimentary bauxite in Western Guangxi is that it contains an amount of pyrite. (3) Diaspora and pyrite are the main useful minerals of bauxite, there are differences in the distribution between the two minerals in the ore. The difference is conducive to the use of crushing and grinding methods to dissociate mineral monomers, and then select appropriate mineral processing methods to separate pyrite.

**CONCLUSIONS:** It is possible to dissociate the main minerals in the high sulfur sedimentary bauxite by crushing and grinding. Based on previous experiments on high-sulfur bauxite, the high-sulfur problem of the sedimentary bauxite can be effectively separated from pyrite by mineral processing. Monomer separation can be achieved by crushing and grinding, with removal of the pyrite by flotation by a mineral processing reagent system. Thus, the aluminum-containing minerals after floating sulfur meet the requirements of alumina extraction and feeding in the next step.

**KEY WORDS:** sedimentary bauxite; mineral characteristics; pyrite; X-ray fluorescence spectrometry; X-ray diffraction; scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry

## 参考文献

- [1] 张歆, 吴泽港, 刘凤琴, 等. 高硫铝土矿脱硫技术研究现状与发展趋势[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2023(4): 20–27.  
Zhang X, Wu Z G, Liu F Q, et al. Research status and development trend of high-sulfur desulfurization technology[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4): 20–27.
- [2] 李林松, 金会心, 刘文纪, 等. 铝土矿资源状况及高硫铝土矿脱硫方法[J]. 广州化工, 2021, 49(17): 18–22.  
Li L S, Jin H X, Liu W J, et al. Status of high sulfur bauxite resource and desulfurization method[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(17): 18–22.
- [3] 何润德, 胡四春, 黎志英, 等. 用高硫型铝土矿生产氧化铝过程中湿法除硫方法讨论[J]. 湿法冶金, 2004, 23(2): 66–68.  
He R D, Hu S C, Li Z Y, et al. Discussion on the method of hydrometallurgical desulfurization during producing alumina with high grade bauxite containing sulfur[J]. Hydrometallurgy of China, 2004, 23(2): 66–68.
- [4] 宋翔宇. 从某高硫铝土矿中浮选分离硫铝试验研究[J]. 湿法冶金, 2012, 31(4): 243–247.  
Song X Y. Experimental study on separation of sulfur and aluminum minerals from high sulfur bauxite by flotation[J]. Hydrometallurgy of China, 2012, 31(4): 243–247.
- [5] 卯松, 李先海, 张覃. 贵州某高硫铝土矿工艺矿物学研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 146–150.  
Mao S, Li X H, Zhang Q. Study on process mineralogy of a high-sulfur bauxite ore in Guizhou[J]. Conservation and Utilization of Mineral, 2022, 42(3): 146–150.
- [6] 惠博, 曾令熙, 刘飞燕. 重庆地区铝土矿工艺矿物学研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(8): 70–73.  
Hui B, Zeng L X, Liu F Y. The bauxite processing mineralogy study in Chongqing[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(8): 70–73.
- [7] 孟祥仑, 尹本纯, 覃丰. 桂西地区沉积型铝土矿床成矿地质特征及找矿方案[J]. 冶金管理, 2019(5): 115–117.  
Meng X L, Yi B C, Qin F. Geological characteristics and prospecting scheme of sedimentary bauxite deposits in Western Guangxi[J]. China Steel Focus, 2019(5): 115–117.
- [8] 孙莉, 肖克炎, 姜德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 82–94.

- Sun L, Xiao K Y, Lou D B. Predictions and evaluation of bauxite resource in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 82-94.
- [9] 高兰, 王登红, 熊晓云, 等. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 853-863.
- Gao L, Wang D H, Xiong X Y, et al. Minerogenetic characteristics and resource potential analysis of bauxite in China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 853-863.
- [10] 周杰强, 梅光军, 于明明, 等. 低品位高硫铝土矿反浮选同步脱硫硅试验[J]. *金属矿山*, 2018(7): 123-126.
- Zhou J Q, Mei G J, Yu M M, et al. Research on synchronous desulfurization and desilication of low grade high-sulfur bauxite by reverse flotation[J]. *Metal Mine*, 2018(7): 123-126.
- [11] 覃丰, 孟祥仑, 尹本纯. 桂西沉积型铝土矿分布特征及控矿条件分析[J]. *世界有色金属*, 2019(5): 92-94.
- Qin F, Meng X L, Yi B C. Distribution characteristics and ore-controlling conditions of sedimentary bauxite deposits in Western Guangxi[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(5): 92-94.
- [12] 王冠, 戴婕, 王坤阳, 等. 应用能谱-扫描电镜分析铜矿床伴生元素的赋存状态[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(5): 659-669.
- Wang G, Dai J, Wang K Y, et al. Occurrence of associated elements in a copper mine by EDX-SEM[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(5): 659-669.
- [13] 苗煦, 史淼, 王礼胜. 湖南临武黑色石英岩质玉矿物组成特征及成因初探[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(4): 522-531.
- Miao X, Shi M, Wang L S. Mineral composition and genesis of black quartzite jade from Linwu County, Hunan Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(4): 522-531.
- [14] 张启燕, 史维鑫, 刘晓, 等. 高光谱扫描在碳酸盐岩矿物组成分析中的应用[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(5): 815-825.
- Zhang Q Y, Shi W X, Liu X, et al. Application of hyperspectral scanning in mineral composition analysis of carbonate rocks[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(5): 815-825.
- [15] 胡璇, 石磊, 张炜华. 碱熔融-电感耦合等离子体发射光谱法测定高硫铝土矿中的硫[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(2): 124-129.
- Hu X, Shi L, Zhang W H. Determination of sulfur in high-sulfur bauxite by alkali fusion-inductively coupled plasma-optical emission spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(2): 124-129.
- [16] 张启连, 赵辛金, 李玉坤, 等. 桂西二叠系铝土矿地球化学特征与沉积模式[J]. *地质论评*, 2020, 66(4): 1043-1058.
- Zhang Q L, Zhao X J, Li Y K, et al. Geochemical characteristics and sedimentary mode of Permian bauxite deposit in Western Guangxi[J]. *Geological Review*, 2020, 66(4): 1043-1058.
- [17] 陈燕清, 蒋奇亮. 拜耳法处理广西不同地区铝土矿适用性研究[J]. *矿产保护与利用*, 2018(2): 95-100.
- Chen Y Q, Jiang Q L. Research on the applicability of Bayer method for bauxite in different areas of Guangxi Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(2): 95-100.
- [18] 夏瑜, 罗星, 周卫宁, 等. 广西平果太平矿区外围铝土矿矿石工艺矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2019, 38(4): 579-586.
- Xia Y, Luo X, Zhou W N, et al. A study of technological mineralogy of bauxite in the Taiping mining area, Pingguo County, Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2019, 38(4): 579-586.
- [19] 夏楚林, 张起钻, 高莉. 桂西堆积型铝土矿矿物组成及地球化学特征探析[J]. *轻金属*, 2011(5): 6-9.
- Xia C L, Zhang Q Z, Gao L. Analysis on mineral component and geochemistry of accumulated bauxite in Western Guangxi[J]. *Light Metals*, 2011(5): 6-9.
- [20] 蔡书慧, 刘学飞, 孟健寅, 等. 桂西田阳堆积型铝土矿矿物学及地球化学[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(3): 460-470.
- Cai S H, Liu X F, Meng J Y, et al. Mineralogy and geochemistry of the Tianyang accumulation-type bauxite in Western Guangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(3): 460-470.
- [21] 欧阳承新, 奚小双, 曹荆亚. 广西平果堆积型铝土矿成矿元素多重分形特征[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 114-119.
- Ouyang C X, Xi X S, Cao J Y. Multifractal characteristics of metallogenic elements of Pingguo accumulated bauxite in Guangxi[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(5): 114-119.
- [22] 张永康, 任少峰, 刘金海, 等. 贵州某低品位高硫铝土矿拜耳法溶出试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2015(6): 35-39.
- Zhang Y K, Ren S F, Liu J H, et al. Tests on the Bayer dissolving method for the low-grade bauxite with high sulfur in Guizhou[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2015(6): 35-39.
- [23] 郭鑫, 魏培贺, 田应忠. 河南某地煤下高硫铝土矿深度脱硫试验研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(2): 1-8.

- Guo X, Wei P H, Tian Y Z. An experimental study on deep desulfurization of high sulfur bauxite under coal in Henan Province[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(2): 1-8.
- [24] 金会心, 吴复忠, 李军旗, 等. 高硫铝土矿微波焙烧脱除黄铁矿硫[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2707-2717.
- Jin H X, Wu F Z, Li J Q, et al. Desulfurization of pyrite in high-sulfur bauxite with microwave roasting process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2707-2717.
- [25] 田应忠, 任朋, 郭鑫. 西南某地高硫铝土矿浮选脱硫试验研究[J]. 轻金属, 2021(12): 5-8.
- Tian Y Z, Ren P, Guo X. Experimental study on flotation desulfurization of high-sulfur bauxite in Southwest China[J]. Light Metals, 2021(12): 5-8.
- [26] 吴国亮, 魏培贺. 中低品位铝土矿新型正浮选捕收剂的开发研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 115-118.
- Wu G L, Wei P H. Development and research of new positive flotation collector for medium and low-grade bauxite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(2): 115-118.
- [27] 肖红艳, 徐晓晴, 王斐, 等. 新型捕收剂 RA-92 在低品位碳酸锰矿选矿中的应用[J]. 岩矿测试, 2016, 35(3): 284-289.
- Xiao H Y, Xu X Q, Wang F, et al. Application of novel collector dosage RA-92 in the flotation procedure of low-grade carbonate manganese ore[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(3): 284-289.
- [28] 马兴飞, 张强, 张姗姗. 低品位高硫铝土矿低温焙烧脱硫研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 32-36.
- Ma X F, Zhang Q, Zhang S S. Study on desulfurization of low grade and high sulfur bauxite by low-temperature roasting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6): 32-36.
- [29] 李振宇. 西北某高硫铝土矿浮选脱硫试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020, 12(6): 127-130.
- Li Z Y. Study on flotation desulfurization of high-sulfur bauxite in Northwest[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 12(6): 127-130.
- [30] 高纯生, 邹春林, 陈黎军, 等. 高硫铝土矿重力分选脱硫试验研究[J]. 轻金属, 2020(1): 11-13.
- Gao C S, Zou C L, Chen L J, et al. Experimental study on desulfurization of high sulfur bauxite by gravity separation[J]. Light Metals, 2020(1): 11-13.