

张涛, 宋文磊, 陈倩, 等. 矿物自动定量分析系统在低品位铜矿渣工艺矿物学研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2023, 42(4): 748–759. doi: [10.15898/j.ykcs.202210250206](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202210250206).

ZHANG Tao, SONG Wenlei, CHEN Qian, et al. Application of Automated Quantitative Mineral Analysis System in Process Mineralogy of Low-grade Copper Slag[J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(4): 748–759. doi: [10.15898/j.ykcs.202210250206](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202210250206).

## 矿物自动定量分析系统在低品位铜矿渣工艺矿物学研究中的应用

张涛<sup>1</sup>, 宋文磊<sup>1\*</sup>, 陈倩<sup>1</sup>, 杨金昆<sup>1</sup>, 胡轶<sup>2</sup>, 黄军<sup>2</sup>, 许丹妮<sup>1</sup>, 徐亦桐<sup>1</sup>

(1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 泰思肯(TESCAN)中国总部技术应用部, 上海 201112)

**摘要:** 矿产资源高效综合利用是目前全球矿业发展的主要方向。传统的光学显微镜和扫描电镜等技术在查明许多低品位矿石的元素赋存状态等方面具有局限性, 且无法提供定量化的矿物学信息, 制约了对这些金属矿石选矿工艺的提升。近年来, 基于扫描电镜和 X 射线能谱仪的矿物自动定量分析系统越来越多地应用到复杂矿石和工艺矿物学的研究中。为了进一步丰富和拓展该类系统在工艺矿物学领域的应用研究, 本文利用矿物自动定量分析系统 TIMA(TESCAN Integrated Mineral Analyzer)对中国某矿山低品位铜矿渣样品进行矿物学测试分析, 展示其在提取多种工艺矿物学参数研究中的具体应用。分析结果表明: 该铜矿渣中铜元素含量(0.08%)很低, 主要赋存在黄铜矿中, 该矿物含量为 0.21%; 脉石矿物含有大量石英(47.46%)、白云母(10.10%)和方解石(9.88%)等; 黄铜矿连生关系复杂, 主要以连生体形式呈不规则粒状零散分布在石英和方解石等脉石矿物中, 粒度小且分布极不均匀, 其中 11~76 $\mu\text{m}$  颗粒占比较大; 解离度低于 30% 的黄铜矿颗粒质量占全部的 85% 左右, 整体解离度较低, 因而需要进一步磨矿来提升黄铜矿回收率。以上研究表明, 对于有用矿物含量低、粒度细小且嵌布关系复杂的矿石样品, 包括 TIMA 在内的矿物分析系统能够提供快速、定量、全面且准确的工艺矿物学参数信息, 有利于优化选冶流程, 在提高矿产资源的综合利用方面具有非常广阔的应用前景。

**关键词:** TIMA; 矿物自动定量分析; 工艺矿物学; 铜矿渣; 解离度

**要点:**

- (1)TIMA 可清晰检测并统计复杂矿石中各种矿物的含量、组成、形态、粒径分布、嵌布关系以及有用矿物的解离度。
- (2)低品位铜矿渣中铜主要赋存于黄铜矿中, 且含量较低, 并常与脉石矿物复杂嵌布和连生, 需通过进一步磨矿提升解离度和回收品位。
- (3)TIMA 可提供快速、定量、全面且准确的工艺矿物学参数信息, 可以有效地监控和优化复杂且低品位矿石的选冶流程。

中图分类号: P575; P618.41

文献标识码: A

工艺矿物学的任务是为矿石的可处理性提供详细的矿物学评价, 具体研究有用矿物(元素)的含量、赋存状态、矿物的粒度、嵌布关系和解离度等<sup>[1-8]</sup>。传统的岩矿鉴定和工艺矿物学参数统计主要借助偏

光显微镜和普通扫描电镜等仪器设备完成。然而, 对于很多低品位、细颗粒和矿物连生关系复杂的矿石和矿渣, 其组分非常多样, 结构十分复杂, 仅依靠传统的光学显微镜和扫描电镜很难实现其选矿工艺

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-07-04; 接受日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41973036, 42273070)

第一作者: 张涛, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: [2103074768@qq.com](mailto:2103074768@qq.com)。

通信作者: 宋文磊, 博士, 副教授, 主要从事矿床地球化学研究。E-mail: [wlsong@nwu.edu.cn](mailto:wlsong@nwu.edu.cn)。

上的提升<sup>[1-3,8-12]</sup>。

近几十年来,随着计算机技术、扫描电子显微镜、X射线能谱分析以及复杂图像分析和数据统计技术的发展,基于扫描电子显微镜的矿物自动定量分析系统也得到迅速发展,如 QEMSCAN(Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy)、MLA(Mineral Liberation Analyser)、AMICS(Advanced Mineral Identification and Characterization System)、TIMA(TESCAN Integrated Mineral Analyzer)等,并逐渐被应用于复杂矿石工艺矿物学研究和优化矿山选矿工艺流程中<sup>[2,8-11,13-58]</sup>。例如,利用 TIMA 对中国白云鄂博矿床稀土和铌矿物的研究工作,不仅查明了矿石中稀土和铌的主要赋存矿物和分布规律,还统计出有用矿物的含量、粒度和解离度等信息,为该矿床中稀土、铌的成因研究和资源提取提供了可靠的矿物学基础数据<sup>[2,29]</sup>;TIMA 对澳大利亚 Pilgangoora 伟晶岩型锂矿床的研究显示,其中富锂矿物主要为锂辉石和锂云母,不同类型矿石中锂矿物的矿物类型、含量、共生组合和嵌布关系明显不同,这些特征参数有助于厘清不同类型矿石的选矿目标<sup>[37-38]</sup>。此外,对澳大利亚 Mount Isa 矿床铀矿渣浸出实验前后样品的 TIMA 研究表明,铀石溶解程度高,钍铀矿次之,而高硅钍铀矿最难溶,硅的存在使本已难溶的钍铀矿更加难溶;此外,相对于 X 射线粉晶衍射(XRD),TIMA 还识别出许多含量低于 1% 的脉石矿物,该研究在微观尺度上鉴别浸出前后矿石的矿物学特征变化,方便及时有效地监控整个选冶过程<sup>[36]</sup>。值得注意的是,目前最新的矿物自动定量分析系统可以检测并提供包括矿物(元素)种类、含量、赋存状态、结构、粒度、解离度和预测回收率等至少十余种矿物学参数<sup>[5,9-10]</sup>。然而,以往使用该系统的研究主要关注样品少数几项矿物学参数(如粒度、解离度等),而使用该系统提取全套工艺矿物学参数信息方面的研究仍然相对较少。此外,对于一些低品位(通常介于最低工业品位和边界品位之间)、细颗粒和矿物连生关系复杂的矿石和矿渣的分选难题,一直以来都是阻碍选冶厂生产效率提高的重要因素<sup>[8,18,20]</sup>。这些矿石中,有用矿物含量通常很低、矿物颗粒细小(如几微米)、连生脉石矿物多且结构关系复杂,传统光学显微镜和扫描电镜等手段难以准确查清其赋存状态且非常耗时耗力,还很难获取准确的定量统计信息。目前商业化的矿物自动定量分析系统多数是基于高分辨率的场发射扫描电镜,其对矿物成分、结构的识别和定量

解析可达到微米-亚微米尺度,相比传统光学显微镜和扫描电镜具有明显优势。因此,本文以 TIMA 为例,对中国某矿山低品位铜矿渣进行测试,展示矿物自动定量分析系统在工艺矿物学研究中的具体功能和优势,旨在为矿产资源高效综合利用提供借鉴。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品及处理

本文研究的矿石样品来源于中国某铜矿山含铜低品位矿石。初步工作显示矿石主要呈浸染状构造,矿物颗粒主要为半自形-他形结构,以石英为主,其次为云母类和碳酸盐矿物等。实验时对矿石样品进行破碎,取部分铜矿渣试样在初步研磨后用环氧树脂制样,树脂靶样品经磨平和抛光后进行镀碳处理。由于天然地质样品的导电性差,上机测试前需在真空条件下对样品进行镀碳、镀金和镀铬等导电涂层处理,防止其放电,影响正常测试。

### 1.2 测试仪器与测试条件

样品测试分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室矿物自动定量分析系统(TIMAS)实验室完成,仪器型号为:TIMA3 X GMH。该系统主要由高分辨率肖特基场发射扫描电镜(TESCAN MIRA 3)和包括 4 个高通量硅漂移能谱探测器(EDAX Element 30)在内的 9 个探测器组成,其探测器与软件高度兼容,具有 4 种 X 射线数据扫描采集模式(高分辨扫描、点扫描、线扫描和点阵扫描)和 3 种分析模式(模态分析、解离分析和亮相搜索)<sup>[10,29,33]</sup>。该类系统通常还配备强大的矿物数据处理软件,可将分析测试与数据处理分开,软件具备矿物识别、数据研究、图像处理、报告生成和解释等功能。

TIMA 测试过程中使用的扫描电镜图像获取和能谱分析实验参数条件为:加速电压 25kV,电流 10nA,工作距离 15mm。背散射(BSE)信号和能谱(EDS)信号分别使用 Pt 法拉第杯和 Mn 标样进行校准<sup>[10]</sup>。选择好数据扫描采集模式后,用户可根据样品实际情况自行设定采集 BSE 像素点间距、EDS 测试步长和 X 射线计数。本测试使用解离分析的点阵模式,BSE 像素和 EDS 步长分别为 3 $\mu\text{m}$  和 9 $\mu\text{m}$ ,每个能谱点的 X 射线计数为 1000。值得注意的是,对于一些含颗粒非常细小的隐晶质和黏土矿物的样品,需要进一步提高 BSE 像素(<3 $\mu\text{m}$ )的分辨率和降低 EDS 步长(<9 $\mu\text{m}$ ),同时适当提高 X 射线计数(>1000)。虽然测试时间会相应增加,但会明显地提高矿物识别的精度和准确度。

图1为TIMA对铜矿渣树脂靶样品测试流程示意图。主要步骤为:①设置实验参数后,用5~10min快速自动获取整个样品的低分辨率BSE全景图像,用户可根据需求选择任意大小和形状的测试区域(本次测试为全选);②然后将所选区域平均划分成若干正方形区块(Field)(区块尺寸通常为500~1000 $\mu\text{m}$ ,本次选择区块尺寸为500 $\mu\text{m}$ );③测试开始后仪器会以区块为单位,对区块内样品按一定顺序进行逐个扫描;④在具体某个区块内,系统按照预先设置的BSE像素点间距(3 $\mu\text{m}$ )和EDS点阵间距(9 $\mu\text{m}$ )获取BSE和EDS信号数据,待持续收集能谱X射线计数达到设定值时(1000),系统会自动移动至下一区域进行测试;⑤测试完成后,TIMA软件会逐级自动统计拼合每个像素位置和每个区块内所获取的所有BSE图像和EDS数据,区分不同矿物相,并且利用EDS谱图和元素含量等相关信息与内置数据库中高达4700多种矿物能谱信息自动进行对比匹配从而准确鉴定矿物,最后通过伪彩图像显示不同的矿物相及其结构关系<sup>[10]</sup>。后期样品数据处理、校正、矿物学参数信息查看和成果导出需利用TIMA Version在线或离线版本软件,这套软件的功能也在持续更新。详细的测试流程和实验参数选取可参考陈倩等<sup>[10]</sup>和Liu等<sup>[29]</sup>。

## 2 TIMA对低品位铜矿渣工艺矿物学参数分析结果

### 2.1 矿物组成分析

本文对该铜矿渣TIMA矿物定量分析结果显示,TIMA不仅可以识别出矿渣样品中的矿物种类,还可以计算出每种矿物的含量(质量分数)。该样品中脉石矿物主要为石英(47.46%,为质量分数,下同)、白云母(10.10%)、方解石(9.88%),其次是钙铁榴石(6.29%)、正长石(4.96%)、阳起石(3.92%)和黑云母(3.37%)等;其中含铜矿物主要为黄铜矿,含量只有0.21%(图2),这些微量的铜矿物与大量的石英、方解石和白云母等矿物紧密共生,在以往的研究工作很难被准确表征。

### 2.2 元素组成及赋存状态分析

查清矿石中有益元素的赋存状态,明确这些有益元素以何种矿物形式存在是决定选矿回收方法的关键<sup>[5]</sup>。TIMA可以直接获取样品中能谱检测范围内任意元素的质量分数及赋存状态。利用TIMA对铜矿渣中元素组成进行查看发现样品中Cu元素占比仅0.08%(图3a),且这些Cu元素主要以独立矿物形式赋存在黄铜矿中,在含铜矿物中占比高达99.82%,剩余极少量分布在斑铜矿中(图3b)。因此,可确定该铜矿渣主要回收的铜矿物为黄铜矿。值得

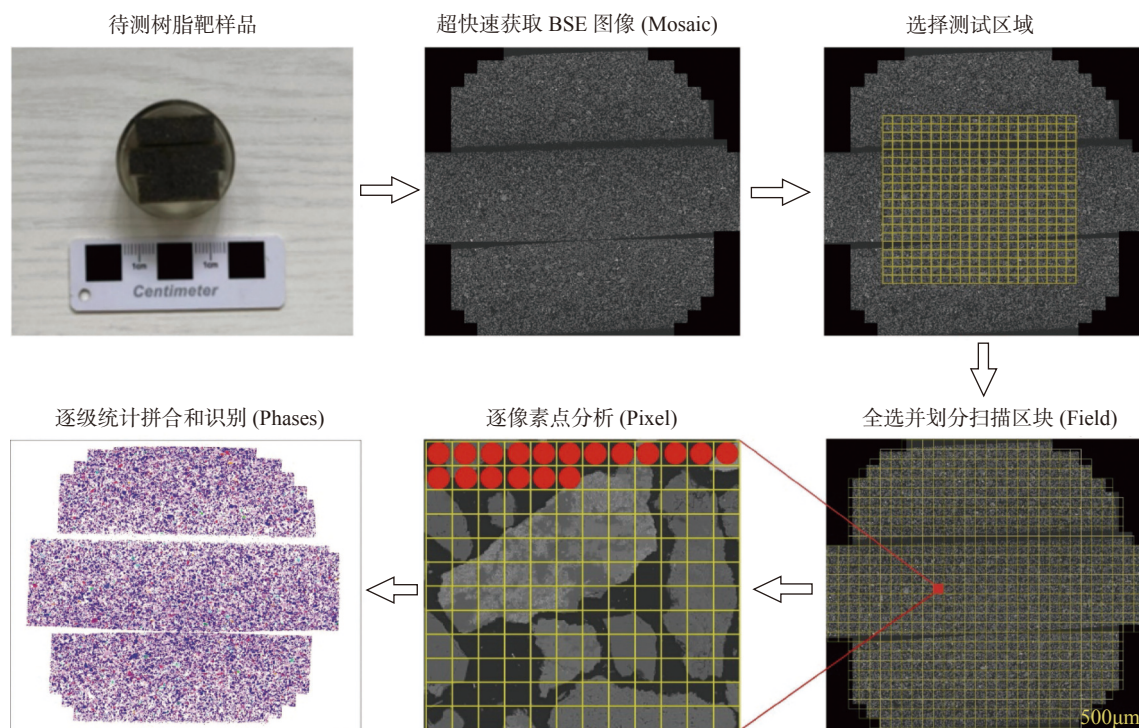


图1 TIMA 解离模式测试铜矿渣树脂靶样品流程示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of TIMA analysis process using resolution liberation analysis mode for the copper tailings.

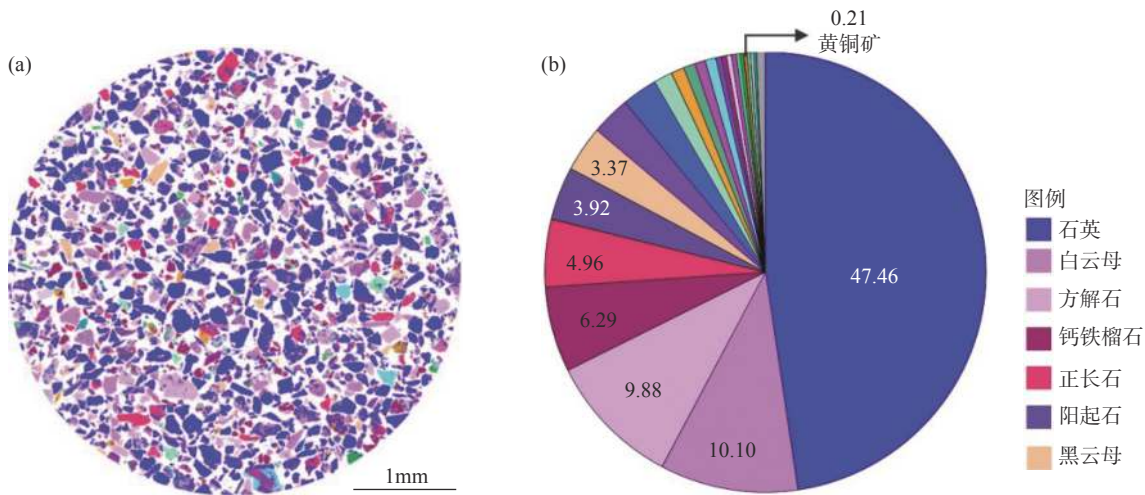


图2 (a)铜矿渣 TIMA 矿物伪彩相图(局部)和(b)矿物含量百分比组成(%)  
Fig. 2 (a) TIMA false-colored mineral phase map of copper tailings (partial) and (b) mineral abundance distribution map (%).

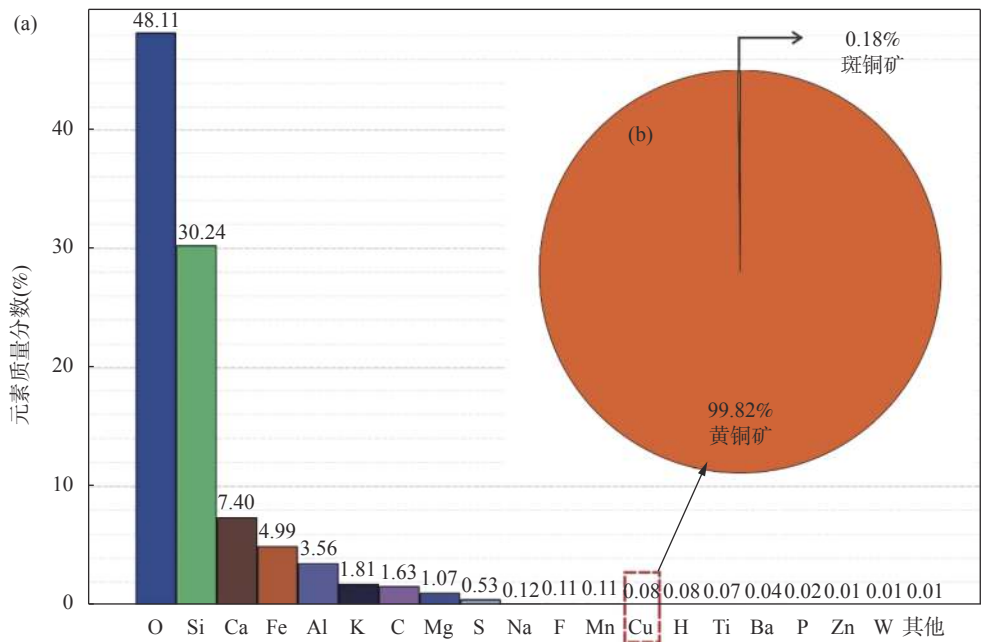


图3 (a)铜矿渣元素质量分布柱状图; (b)铜元素赋存状态分布图  
Fig. 3 (a)The element mass distribution histograms of the copper tailings; (b) Copper element distribution between the copper minerals.

注意的是, 矿渣中未发现 As、Hg、Cd 等有害元素, 在实际选矿过程中 TIMA 可对矿物中的这些有害元素进行识别和定量, 冶炼厂可以将含有害元素矿物进行提前筛选, 提高选矿效率<sup>[7]</sup>。

此外, 若需要查看这些 Cu 元素或矿物在样品中的具体位置, 可通过 TIMA 的元素搜索功能即时显示铜矿渣中 Cu 元素的分布特征(图 4a)以及在 BSE 背景下黄铜矿的分布图(图 4b)。图 4 显示 Cu 元素含量高的(亮点)位置与黄铜矿产出位置完全对应,

这一功能是开展矿物微区原位分析和嵌布特征研究的有效手段。

### 2.3 矿物颗粒分布与粒度统计分析

在确定铜矿渣矿物组成和铜元素赋存状态的基础上, 进一步研究含铜矿物的粒度组成及其分布特点, 对确定该矿渣合适的磨矿细度和选矿流程具有重要的指导作用<sup>[19]</sup>。TIMA 软件中颗粒查看功能可以快速统计单个或多个样品中 有用金属矿物的尺寸和表面积等形态参数。图 5 为 TIMA 颗粒查看功

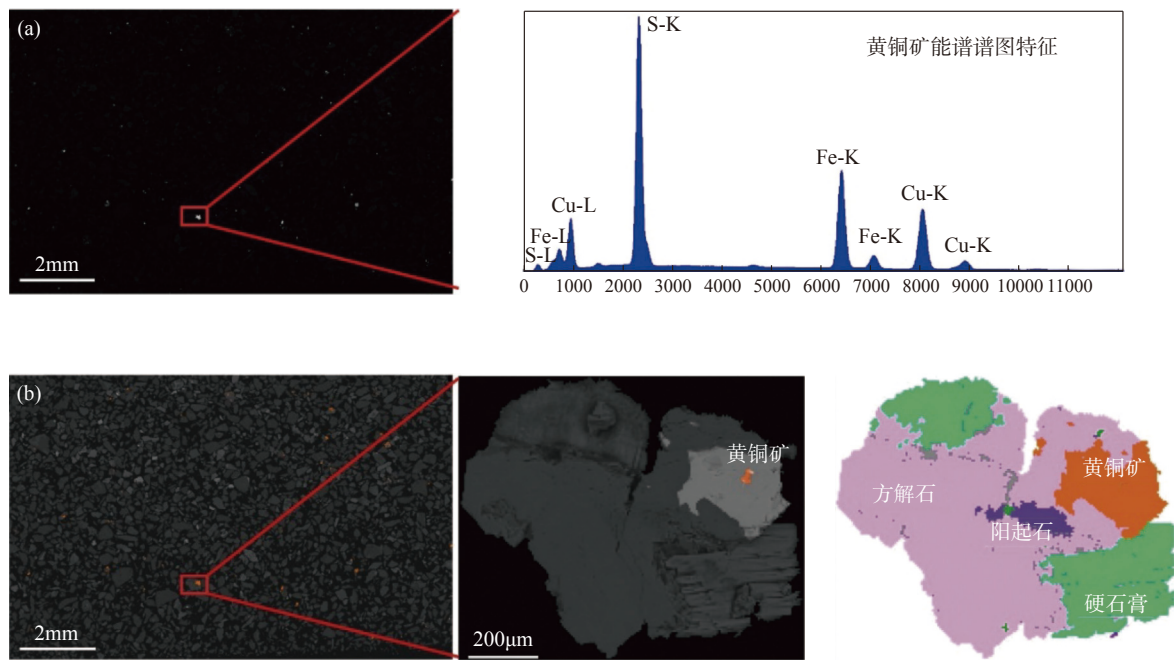


图4 (a)铜矿渣中铜元素分布图以及黄铜矿的能谱谱图特征; (b)黄铜矿在铜矿渣背散射图像中的分布特征及其矿物共生关系  
Fig. 4 (a) Distribution of copper element and the EDS spectrum of the chalcopyrite in copper tailings; (b) Distribution and mineral paragenesis characteristics of chalcopyrite in backscatter images.

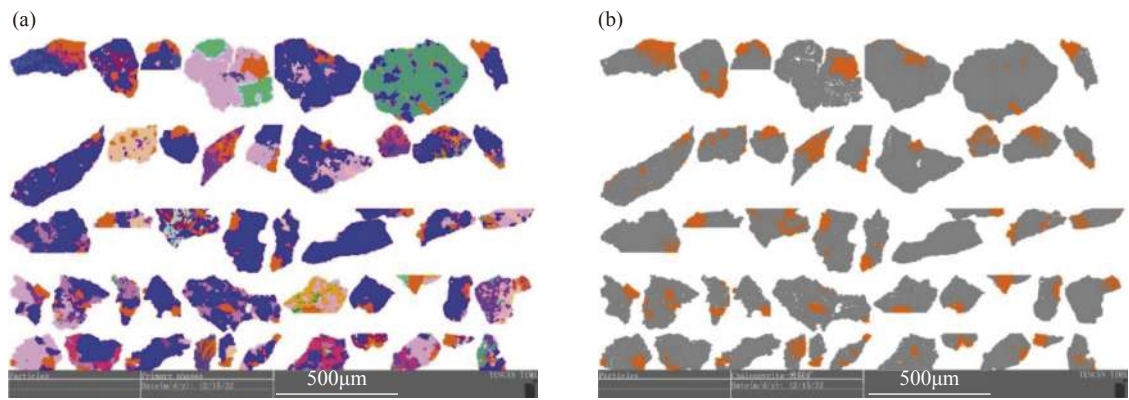


图5 (a)铜矿渣中含黄铜矿颗粒 TIMA 矿物统计图(矿物图例与图 2 一致); (b)黄铜矿在各含铜颗粒中的分布特征  
Fig. 5 (a) Summary of the TIMA false-colored chalcopyrite-bearing mineral particles in copper tailings (mineral legend is consistent with Fig.2); (b) Distribution characteristics of chalcopyrite in copper-bearing particles.

能提供的含黄铜矿颗粒的矿物统计图, 图中显示黄铜矿颗粒主要以连生体形式呈不规则粒状、微粒状或斑点状零星散布在脉石矿物中(图 5 中 a, b)。TIMA 可进一步对铜矿渣中黄铜矿的粒度分布进行统计。如图 6 所示, 图中横坐标表示颗粒粒度区间( $\mu\text{m}$ ), 纵坐标为对应粒度区间内黄铜矿质量分数(%), 图中显示黄铜矿粒度分布不均匀, 粒度多介于  $11 \sim 76\mu\text{m}$ , 样品中的黄铜矿整体粒度较小且粒度变化范围大。

## 2.4 矿物嵌布特征与连生关系分析

以 TIMA 为代表的矿物定量分析系统除了准确识别矿物单体, 还能够对矿渣中金属矿物颗粒与其他矿物的复杂连生状态进行快速分析<sup>[2-3, 13-20]</sup>。Gaudin<sup>[59]</sup> 根据矿石颗粒中多种矿物的连生特征, 将矿物颗粒连生关系划分为四种类型: 毗邻型、细脉型、层壳型和包裹型。利用 TIMA 颗粒查看功能厘定出铜矿渣中黄铜矿颗粒与其他矿物的嵌布特征也存在这四种类型(图 7)。相对于细脉型、层壳型和包裹型,

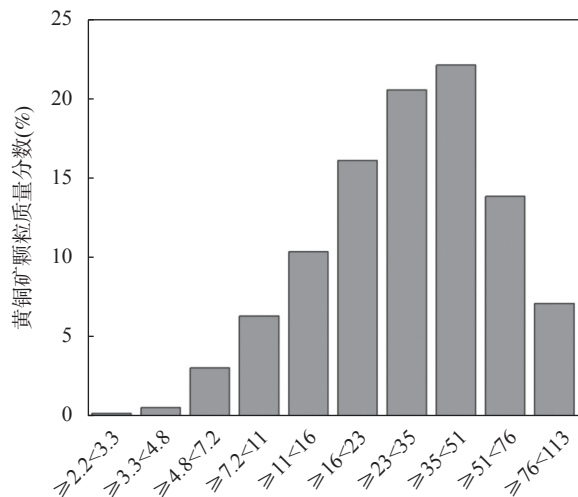


图6 铜矿渣中黄铜矿颗粒粒度(横坐标 μm)分布图

Fig. 6 Histogram of size (abscissa, μm) distribution of chalcopyrite in the copper tailings.

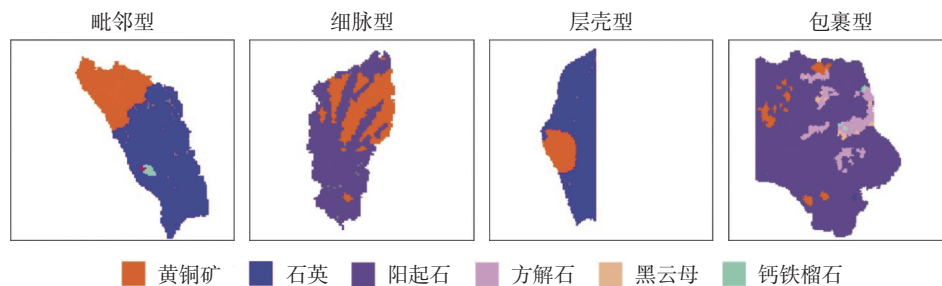


图7 铜矿渣中黄铜矿与其他矿物在微米尺度下典型的连生关系类型

Fig. 7 Interlocked relationship types (neighboring, stringer, shell and wrapped) of chalcopyrite and other minerals (quartz, actinolite, calcite, biotite and andradite) at micron scale in the copper tailings.

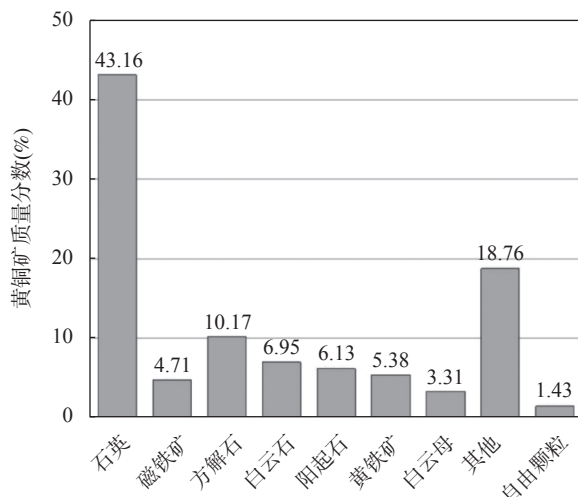


图8 铜矿渣中黄铜矿与其他矿物连生关系统计图

Fig. 8 Statistical histogram of the association relationship of chalcopyrite and other minerals (quartz, magnetite, calcite, dolomite, actinolite, pyrite, muscovite, et al.) in the copper tailings.

毗邻型的铜矿渣颗粒更容易解离和分选。此外, TIMA 软件还可对与黄铜矿连生矿物的类型和含量进行定量统计。如图 8 所示,在铜矿渣中,与石英连生的黄铜矿占比达 43.16%,石英是最主要的脉石矿物,剩下的黄铜矿与方解石(10.17%)、白云石(6.95%)和阳起石(6.13%)等矿物存在不同程度地连生,而黄铜矿自由颗粒非常稀少,占比不到 2%。上述实验结果表明,黄铜矿连生关系较为复杂,不利于矿物分选。

## 2.5 矿物解离度及矿石品位和回收率计算

在破碎和研磨过程中,矿物解离度表示有用矿物从其他脉石矿物中释放出来的程度<sup>[37, 59]</sup>。在充分了解铜矿渣粒度特征和连生关系的前提下, TIMA 软件可以根据颗粒表面积或者体积计算出矿渣中黄铜矿的解离度<sup>[37]</sup>,并预测铜精矿尾矿矿石回收过程中的品位和回收率。如图 9a 所示,横坐

标代表黄铜矿不同的解离度区间,纵坐标代表特定解离度区间内黄铜矿所占的质量分数(%)。总体来看,解离度低于 30% 的黄铜矿颗粒质量占全部的 85% 左右,说明矿渣中黄铜矿解离度较低。同时 TIMA 能够利用颗粒筛选、分类功能方便用户查看不同解离度下黄铜矿颗粒的嵌布特征和连生关系。图 9b 选取了三组不同解离度(0%~30%, 30%~60% 和 60%~100%)的黄铜矿颗粒,该功能能够直观地看出整个矿渣中黄铜矿的解离度情况,其中低解离度的黄铜矿颗粒最多,导致铜矿渣的矿石品位和回收率偏低。

矿石的理论品位-回收率曲线是指为某一矿石在给定品位下通过物理分离所能达到的最大预期回收率。这是由有用矿物的表面解离面积决定的,并与磨矿细度直接相关<sup>[60]</sup>。根据上述矿物解离度和矿物粒度的关系, TIMA 可以快速计算出铜矿渣中黄铜矿理论品位-回收率(图 10)。由图 10 可知,若回

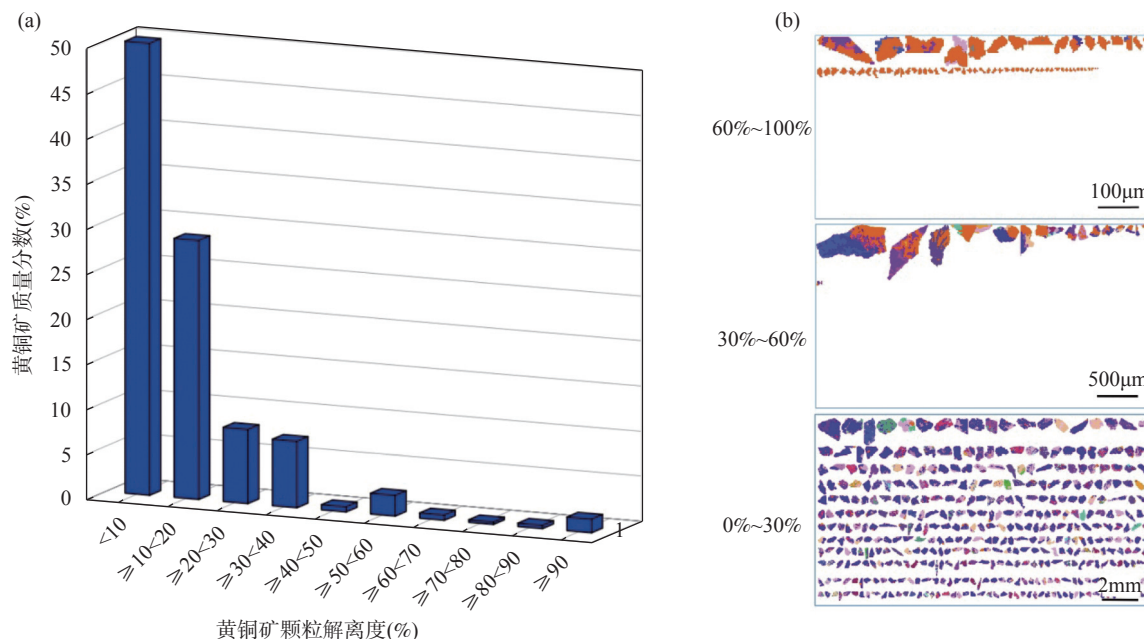


图9 (a)铜矿渣中不同解离度条件下黄铜矿的质量分布柱状图(%); (b)不同解离度范围内的含黄铜矿矿物颗粒特征(矿物图例与图2一致)

Fig. 9 (a) Bar chart of chalcopyrite mass fraction with different degrees of liberation in the copper tailings; (b) Particle characteristics under different degrees of liberation (mineral legend is consistent with Fig.2).

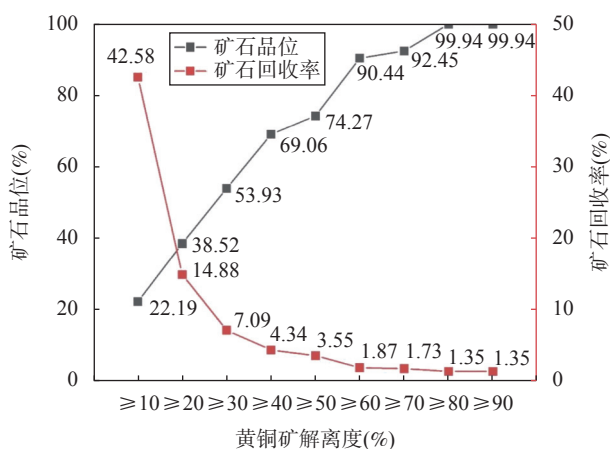


图10 铜矿渣中黄铜矿解离度与矿石品位、回收率关系示意图

Fig. 10 Line graph of relationship between chalcopyrite liberation degree and ore grade and recovery percent in the copper tailings.

收所有解离度 $\geq 80\%$ 的黄铜矿颗粒,回收的精矿铜品位为99.94%,但只有1.35%的黄铜矿可被回收;若回收所有解离度 $\geq 10\%$ 的黄铜矿颗粒,回收的精矿铜品位为22.19%,大约42.58%的黄铜矿可被回收利用。可见,该铜矿渣矿物组合复杂,在当前研磨细度下,黄铜矿整体解离度较低,属难选矿石,若想要提高黄铜矿的回收率,可考虑通过磨矿进一步降低粒度来释放更多的黄铜矿单体颗粒,提高其解离度。

### 3 结论

本文使用矿物自动定量分析系统TIMA对低品位铜矿渣进行工艺矿物学研究,结果表明该铜矿渣中Cu元素含量为0.08%,主要赋存于黄铜矿中。这些黄铜矿与脉石矿物嵌布关系复杂,且矿物颗粒细小,在当前磨矿细度下,黄铜矿解离度低,为提升铜的回收率,需进一步磨矿从而获取更高的黄铜矿解离度和回收品位。从本文研究可以看出,包括TIMA在内的矿物自动定量分析系统应用于低品位和复杂金属矿石工艺矿物学领域,除了能够测定低品位金属矿石中矿物和元素的类型、含量和分布以外,还能快速准确获取矿物的微观结构、矿物连生及嵌布关系、粒度等矿物学参数。更为重要的是,该系统还能显示金属矿物颗粒的解离度特征,并以此来计算和评估矿石的品位和矿渣的回收率,从而做到监控和优化粉碎、研磨、浮选、浸出、回收和冶炼等选冶流程。

值得注意的是,虽然矿物自动定量系统在矿物定量识别方面具备优势,但仍有其不足之处。这些系统测试是基于能谱分析,其对元素检测的精度和准确度要低于波谱和质谱,在进行元素赋存状态研究时,侧重于对独立矿物的定量分析,而无法对低含量的元素类质同象和离子吸附等赋存状态进行分析,

也不易区分化学成分特别相似的矿物。因此,建议配合使用X射线粉晶衍射(XRD)、电子探针(EPMA)、激光拉曼以及激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)等测试手段,以提升测试分析准确度。

## Application of Automated Quantitative Mineral Analysis System in Process Mineralogy of Low-grade Copper Slag

ZHANG Tao<sup>1</sup>, SONG Wenlei<sup>1\*</sup>, CHEN Qian<sup>1</sup>, YANG Jinkun<sup>1</sup>, HU Yi<sup>2</sup>, HUANG Jun<sup>2</sup>, XU Danni<sup>1</sup>, XU Yitong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Technology Application Department of TESCAN China, Shanghai 201112, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) TIMA can be used to measure and calculate the abundance, composition, morphology, particle size distribution, association, and liberation degree of useful minerals in complex ores.
- (2) The copper in low-grade copper slag is mainly distributed in chalcopyrite with low concentrations; the chalcopyrite is usually associated with gangue minerals and needs further grinding to improve the liberation degree and recovery grade.
- (3) TIMA provides fast, quantitative, comprehensive, and accurate information on process mineralogy parameters to effectively monitor and optimize the smelting process of complex and low-grade ores.

### ABSTRACT

**BACKGROUND:** The high-efficient utilization of mineral resources is the leading research aspect of global mining development. Traditional optical and scanning electron microscopy have limitations in identifying the occurrence of elements in many low-grade ores and usually cannot provide quantitative mineralogy information, hindering the improvement of mineral processing of these ores. In recent years, automated mineral quantitative analysis systems based on scanning electron microscope and X-ray energy spectrometer have been increasingly applied to study complex ore formation and process mineralogy.

**OBJECTIVES:** To enrich and expand the application of an automated quantitative mineral analysis system in process mineralogy.

**METHODS:** The low-grade copper slag from a copper mine in China is analyzed using the TESCAN Integrated Mineral Analyzier (TIMA).

**RESULTS:** The results show that the content of the copper element (0.08%) in the copper slag is very low, and it is mainly distributed in chalcopyrite, which accounts for 0.21%. Gangue minerals include quartz (47.6%), muscovite (10.10%), and calcite (9.88%). Chalcopyrite usually occurs in irregular granular form and shows complex associations with the above gangue minerals. The particle size is small and variable, and the particles of 10-76 $\mu$ m occupy a large proportion. The mass of chalcopyrite with a liberation degree below 30% accounts for 85% of the total mass, and the overall liberation degree is low, so further grinding is needed to improve chalcopyrite recovery.

**CONCLUSIONS:** Research shows that for the ore samples with low content of useful minerals, small particle size, and complex mineralogical associations, the automated mineral analysis system, including TIMA, can provide rapid, quantitative, comprehensive, and accurate process mineralogy parameter information, which is conducive to optimizing the ore extraction and smelting process, and has an extensive application prospect in improving the comprehensive utilization of mineral resources.

**KEY WORDS:** TIMA; automated mineral quantitative analysis; process mineralogy; copper slag; liberation degree

## 参考文献

- [1] 孟晶, 杨洪英, 张忠辉, 等. 青海—阿斯哈矿区金矿工艺矿物学及金赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5): 1-7, 15.  
Meng J, Yang H Y, Zhang Z H, et al. Study on process mineralogy and gold hosting state of gold deposits in Qinghai Asha mining area[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(5): 1-7, 15.
- [2] 杨波, 杨莉, 沈茂森, 等. TIMA测试技术在白云鄂博矿床钼工艺矿物学中的应用[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 65-68.  
Yang B, Yang L, Shen M S, et al. Application of TIMA in process mineralogy study of niobium minerals in Bayan Obo deposit[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6): 65-68.
- [3] 陈福林, 杨晓军, 何婷, 等. 四川冕宁牦牛坪稀土矿尾矿工艺矿物学分析[J]. 现代矿业, 2018, 34(8): 110-112.  
Chen F L, Yang X J, He T, et al. Process mineralogy analysis of tailings from Mianning Maoniuping rare earth mine in Sichuan Province[J]. Modern Mining, 2018, 34(8): 110-112.
- [4] 周乐光. 工艺矿物学(第三版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 1-301.  
Zhou L G. Process mineralogy (The 3rd edition)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 1-301.
- [5] 肖仪武, 方明山, 付强, 等. 工艺矿物学研究的新技术与新理念[J]. 矿产保护与利用, 2018(3): 49-54.  
Xiao Y W, Fang M S, Fu Q, et al. New techniques and concepts in process mineralogy[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 49-54.
- [6] Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2003, 2(1): 33-41.
- [7] 彭明生, 刘晓文, 刘羽, 等. 工艺矿物学近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 210-217.  
Peng M S, Liu X W, Liu Y, et al. The main advances in process mineralogy in China in the last decade[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(3): 210-217.
- [8] 叶小璐, 肖仪武. 工艺矿物学在选厂流程优化中的作用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(4): 13-16, 33.  
Ye X L, Xiao Y W. Role of process mineralogy in process optimization of concentrator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(4): 13-16, 33.
- [9] 温利刚, 贾木欣, 王清, 等. 基于扫描电子显微镜的自动矿物学新技术——BPMA及其应用前景[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 12-23.  
Wen L G, Jia M X, Wang Q, et al. New automatic mineralogy technology based on scanning electron microscope—BPMA and its application prospect[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2021(2): 12-23.
- [10] 陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 等. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用——以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. 矿床地质, 2021, 40(2): 345-368.  
Chen Q, Song W L, Yang J K, et al. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An example from TESCAN TIMA[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(2): 345-368.
- [11] 温利刚, 贾木欣, 王清, 等. 自动矿物学新技术——BPMA技术及在煤中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(9): 8-17.  
Wen L G, Jia M X, Wang Q, et al. A new technology for automated process mineralogy: BPMA technology and its application in coal research[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(9): 8-17.
- [12] 施明哲. 扫描电镜和能谱仪的原理与实用分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 1-400.  
Shi M Z. Principles and practical analysis techniques of

- scanning electron microscopy and energy spectrometer[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 1-400.
- [13] 高歌, 王艳. MLA自动检测技术在工艺矿物学研究中的应用[J]. 黄金, 2015, 36(10): 4.  
Gao G, Wang Y. Application of MLA automatic detection technology in process mineralogy research[J]. Gold, 2015, 36(10): 4.
- [14] 李建华, 孙小俊. MLA技术在某铜钼矿选矿工艺研究中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(5): 1-5.  
Li J H, Sun X J. Application of MLA technology in process mineralogy research on copper-molybdenum ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(5): 1-5.
- [15] Al-Ali S, Wall F, Fitzpatrick R, et al. Key process mineralogy parameters for rare earth fluorocarbonate-bearing carbonatite deposits: The example of Songwe Hill, Malawi[J]. Minerals Engineering, 2020, 159: 106617.
- [16] 李广, 肖琴, 胡海祥, 等. MLA在斑岩型锡石矿工艺矿物学研究中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6): 5-11.  
Li G, Xiao Q, Hu H X, et al. Application of MLA to study characteristics and occurrences of porphyry tin ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6): 5-11.
- [17] 张文, 田承涛, 翁孝卿, 等. 矿物解离分析系统在磷石膏工艺矿物学研究中的应用[J]. 矿产综合利用, 2022(1): 205-210.  
Zhang W, Tian C T, Weng X Q, et al. Research on the process mineralogy of phosphogypsum using mineral liberation analysis system[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(1): 205-210.
- [18] 温利刚, 付强, 于志超, 等. 矿物自动定量分析系统在低品位微细粒钼矿工艺矿物学研究中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(2): 31-38.  
Wen L G, Fu Q, Yu Z C, et al. Application of automated quantitative mineralogy system in the process mineralogy study of low-grade fine-grained molybdenum ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(2): 31-38.
- [19] 曾广圣, 欧乐明. X射线衍射-扫描电镜等技术研究秘鲁铜硫矿石选矿工艺矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2): 160-168.  
Zeng G S, Ou L M. Study on mineralogical characteristics of Peru copper-sulphur ore dressing process by X-ray diffraction and scanning electron microscope[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2): 160-168.
- [20] 邱显扬, 梁冬云, 洪秋阳, 等. 难处理金矿石的工艺矿物学及可选冶特性分析[J]. 贵金属, 2020, 41(2): 36-44.  
Qiu X Y, Liang D Y, Hong Q Y, et al. Process mineralogy and process improvement analysis of a refractory gold ore[J]. Precious Metals, 2020, 41(2): 36-44.
- [21] 胡欢, 王汝成, 车旭东, 等. 关键金属元素铍的原位分析技术研究进展[J]. 岩石学报, 2022, 38(7): 1890-1900.  
Hu H, Wang R C, Che X D, et al. Research progress of *in situ* analysis technology of key metal element beryllium[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(7): 1890-1900.
- [22] 杨建文, 肖骏, 陈代雄, 等. 矿物解离分析仪在泥堡金尾矿金赋存状态分析中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2619-2624.  
Yang J W, Xiao J, Chen D X, et al. Application of mineral liberation analyzer in the analysis of occurrences of gold in Nibao gold tailings[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2619-2624.
- [23] 王俊萍, 武慧敏, 王玲. MLA在银的赋存状态研究中的应用[J]. 矿冶, 2015, 24(1): 77.  
Wang J P, Wu H M, Wang L. Application of MLA in the study of silver occurrence status[J]. Mining and Metallurgy, 2015, 24(1): 77.
- [24] 张然, 叶丽娟, 党飞鹏, 等. 自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物鉴定和赋存状态研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 61-73.  
Zhang R, Ye L J, Dang F P, et al. Application of automatic mineral analysis technology to identify minerals and occurrences of elements in sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 61-73.
- [25] 余彬, 王礼珊, 赵立恒, 等. 铜冶炼渣工艺矿物学研究与磨浮流程优化方向探讨[J]. 矿冶, 2020, 29(5): 119-126.  
Yu B, Wang L S, Zhao L H, et al. Study on process mineralogy of copper smelting slag and optimization direction of grinding flotation process[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(5): 119-126.
- [26] 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统(AMICS)技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 121-129.  
Wen L G, Zeng P S, Zhan X C, et al. Application of the automated mineral identification and characterization system (AMICS) in the identification of rare earth and

- rare minerals[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(2): 121–129.
- [27] Yu J, Ke H Q, Pei C Z, et al. Process mineralogy of Dalucao rare earth ore and design of beneficiation process based on AMICS[J]. *Rare Metals*, 2020, 39(8): 959–966.
- [28] Luo L Q, Zhang H Q. Process mineralogy and characteristic associations of iron and phosphorus-based minerals on oolitic hematite[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(9): 1959–1967.
- [29] Liu T, Song W, Kynicky J, et al. Automated quantitative characterization REE ore mineralogy from the giant Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Minerals*, 2022, 12(4): 426.
- [30] Gottlieb P, Wilkie G, Sutherland D, et al. Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications[J]. *Journal of Metals*, 2000, 52(4): 24–25.
- [31] Grammatikopoulos T, Mercer W, Gunning C. Mineralogical characterisation using QEMSCAN® of the Nechalacho heavy rare earth metal deposit, Northwest Territories, Canada[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2013, 52(3): 265–277.
- [32] Rythoven A D V, Pfaff K, Clark J G. Use of QEMSCAN® to characterize oxidized REE ore from the Bear Lodge carbonatite, Wyoming, USA[J]. *Ore and Energy Resource Geology*, 2020, 2-3: 100005.
- [33] Hrstka T, Gottlieb P, Skála R, et al. Automated mineralogy and petrology—Applications of TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA)[J]. *Journal of Geosciences*, 2018, 63(1): 47–63.
- [34] Aylmore M G, Eksteen J J, Jones M G, et al. The mineralogy and processing potential of the commonwealth project in the Molong volcanic belt, central Eastern New South Wales, Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 111: 102976.
- [35] Smythe D M, Lombard A, Coetzee L L. Rare earth element deportment studies utilising QEMSCAN technology[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 52: 52–61.
- [36] Gilligan R, Nikoloski A N. Alkaline leaching of brannerite. Part 2: Leaching of a high-carbonate refractory uranium ore[J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 173: 224–231.
- [37] Aylmore M G, Merigot K, Quadir Z, et al. Applications of advanced analytical and mass spectrometry techniques to the characterisation of micaceous lithium-bearing ores[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 116: 182–195.
- [38] Aylmore M G, Merigot K, Rickard W, et al. Assessment of a spodumene ore by advanced analytical and mass spectrometry techniques to determine its amenability to processing for the extraction of lithium[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 119: 137–148.
- [39] Breiter K, Badanina E, Uriová J, et al. Chemistry of quartz—A new insight into the origin of the Orlovka Ta-Li deposit, Eastern Transbaikalia, Russia[J]. *Lithos*, 2019, 348-349: 105206.
- [40] Ward I, Merigot K, McInnes B I A. Application of quantitative mineralogical analysis in archaeological micromorphology: A case study from Barrow Is. Western Australia[J]. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2017, 25(19-20): 1–24.
- [41] Honeyands T, Manuel J, Matthews L, et al. Comparison of the mineralogy of iron ore sinters using a range of techniques[J]. *Minerals*, 2019, 9(6): 333.
- [42] Juránek R, Výravský J, Kolář M, et al. Graph-based deep learning segmentation of EDS spectral images for automated mineral phase analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2022: 105109.
- [43] 谢小敏, 李利, 袁秋云, 等. 应用TIMA分析技术研究 Alum页岩有机质和黄铁矿粒度分布及沉积环境特征[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(1): 50–60.
- Xie X M, Li L, Yuan Q Y, et al. Grain size distribution of organic matter and pyrite in Alum shales characterized by TIMA and its paleo-environmental significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(1): 50–60.
- [44] 钟祥, 陈福林, 史志新, 等. 矿物自动分析系统在攀西某矿区钒钛磁铁矿工艺矿物学上的应用[J]. *冶金分析*, 2022, 42(7): 62–70.
- Zhong X, Chen F L, Shi Z X, et al. Application of advanced mineral identification and characterization system in process mineralogy of vanadium-titanium magnetite in a mining area of Panxi[J]. *Metallurgical Analysis*, 2022, 42(7): 62–70.
- [45] 温利刚, 贾木欣, 付强, 等. 矿物自动定量分析系统在金的赋存状态研究中的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(4): 1–8.
- Wen L G, Jia M X, Fu Q, et al. Application of automated quantitative mineralogy system in the deportment study of low-grade and fine-grained gold[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2022(4): 1–8.
- [46] 高倩倩, 刘杨, 杨艳芳, 等. MLA与偏光显微镜在工艺矿物学研究中的应用对比[J]. *矿业工程*, 2018, 16(4): 39–40.
- Gao Q Q, Liu Y, Yang Y F, et al. The application comparison between MLA and polarizing microscope in process mineralogy study[J]. *Mining Engineering*, 2018,

- 16(4): 39–40.
- [47] 刘榕鑫, 朱坤, 谢海云, 等. 云南斑岩型多金属金矿的嵌布特征及赋存状态研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(4): 404–410.
- Liu R X, Zhu K, Xie H Y, et al. Study on the inlay characteristics and occurrences of Yunnan porphyry polymetallic gold deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(4): 404–410.
- [48] 朱丹, 桂博艺, 王芳, 等. AMICS测试技术在铌矿中的应用——以竹溪铌矿为例[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(3): 1–7.
- Zhu D, Gui B Y, Wang F, et al. Application of AMICS test technology in Niobium ore—A case study of Zhuxi niobium ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(3): 1–7.
- [49] 庞建涛, 肖喆, 王灿霞, 等. MLA系统在磷块岩工艺矿物学研究中的应用[J]. *化工矿物与加工*, 2015, 44(10): 19–21.
- Pang J T, Xiao Z, Wang C X, et al. Application of MLA system in process mineralogy research of phosphorite block[J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2015, 44(10): 19–21.
- [50] 方明山, 王明燕. AMICS在铜矿伴生金银综合回收中的应用[J]. *矿冶*, 2018, 27(3): 104–108.
- Fang M S, Wang M Y. Application of AMICS in comprehensive recovery of associated gold and silver in a copper ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2018, 27(3): 104–108.
- [51] 李波, 梁冬云, 张莉莉, 等. 自动矿物分析系统的统计误差分析[J]. *矿冶*, 2018, 27(4): 120–123.
- Li B, Liang D Y, Zhang L L, et al. The statistical deviation analysis of automatic process mineralogy analysis system[J]. *Mining and Metallurgy*, 2018, 27(4): 120–123.
- [52] 付艳红, 李振, 周安宁, 等. 煤中矿物及显微组分分离特性的MLA研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(6): 1357–1363.
- Fu Y H, Li Z, Zhou A N, et al. Liberation characterization of minerals and macerals in coal by using MLA[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2017, 46(6): 1357–1363.
- [53] Xu C L, Zhong C B, Lu R L, et al. Process mineralogy of Weishan rare earth ore by MLA[J]. *Journal of Rare Earth*, 2019, 37(3): 334–338.
- [54] Sampaio N P, Araújo F G, von Kruger F L. The formation of Brazilian minerals database for integrated SEM-EDS system applied to the gold ore characterization[J]. *Holos*, 2018, 3: 2–22.
- [55] Goodall W R, Scales P J, Butcher A R. The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(8): 877–886.
- [56] Benvie B, Chapman N M, Robinson D J, et al. A robust statistical method for mineralogical analysis in geometallurgical diagnostic leaching[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 52: 178–183.
- [57] Schulz B, Merker G, Gutzmer J. Automated SEM mineral liberation analysis (MLA) with generically labelled EDX spectra in the mineral processing of rare earth element ores[J]. *Minerals*, 2019, 9(9): 527.
- [58] 王运, 胡宝群, 李佑国, 等. 邹家山铀矿石伴生稀土的EMPA和MLA研究[J]. *稀土*, 2018, 39(3): 17–26.
- Wang Y, Hu B Q, Li Y G, et al. Study of EMPA and MLA of associated rare earth in Zoujiashan uranium ore[J]. *Chinese Rare Earths*, 2018, 39(3): 17–26.
- [59] Gaudin A M. Principles of mineral dressing[R]. New York: McGraw Hill, 1939: 1–554.
- [60] McIvor R E, Finch J A. A guide to interfacing of plant grinding and flotation operations[J]. *Minerals Engineering*, 1991, 4(1): 9–23.