

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于近红外光谱快速确定矿石中粘土矿物含量的方法研究

冯凯^{1,2*}, 肖仪武^{1,2}, 叶小璐^{1,2}, 方明山^{1,2}, 刘娟^{1,2}

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京市 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

粘土矿物是一类广泛分布在土壤、河海沉积物和众多固体矿产资源中的含水层状或层链状硅酸盐矿物, 兼具重要的环境与资源属性。在矿产资源综合开发利用中, 矿石中粘土矿物含量的高低常常会直接影响浮选或堆浸等工艺方案选择及流程优化。但目前还缺乏一套行之有效的快速确定矿石中粘土矿物种类及含量的方法, 以降低在矿石的预处理分类中人为判断的较大不确定性, 从而满足在矿山实际生产中对矿石预处理分类的迫切需要。本研究选取不同类型的高纯粘土矿物和不同含量粘土矿物的混合样品, 并利用近红外光谱分别采集了原始混合

矿物光谱数据, 经平滑+一阶导数+波段选择+最小二乘法等数据处理方法后, 分别建立了基于最小二乘法的高岭石、叶腊石和伊利石定量校正模型。通过独立的外部样品集验证, 表明了所建立模型的预测准确性, 分析误差均不大于 5%。该成果不仅可用于指导矿山生产现场矿石的快速预处理分类与工艺流程优化, 还在矿产勘查、表生环境与气候反演、矿山环境治理、土壤修复等诸多领域有着广泛的应用前景。

关键词: 粘土矿物, 近红外光谱, 矿物定量,

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

自动矿物分析系统在锂资源中的应用

李波^{1*}, 李美荣¹

1. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所 工艺矿物学与分析测试中心, 广州 510651

锂因其卓越的电化学性能, 在新能源等领域具有重要应用价值。作为最轻的金属元素, 锂的 K 层跃迁特征能量约为 54 eV, 对应波长约为 22 nm, 这一特性使得电子探针、X 射线能谱仪等传统 X 射线分析技术难以对其特征光谱进行有效检测。此外, 锂元素形成的矿物多数是硅酸盐矿物, 其光学特征和背散射信号与常见脉石矿物反差较小, 给锂矿物及物相的定性、定量分析造成极大困难。本文系统综述了包括 ToF-SIMS、LA-ICP-MS、自动矿物分析系统 (MLA) 在内的多种锂分析表征技术, 重点探讨各方法的优势

与局限性; 并选取了伟晶岩型锂矿、云母型锂矿、锂冶炼渣及废旧锂电池材料等典型样品, 以自动矿物分析系统为核心表征手段, 从样品前处理、仪器参数优化、数据后期处理等关键环节进行深入探讨, 建立了一套适用于锂矿物及物相的精准定性、定量分析方法体系, 并详细研究了这些锂资源的工艺矿物学特征, 为锂资源的开发利用提供重要的理论依据和技术支撑。

关键词: 自动矿物分析系统; 锂矿石; 工艺矿物学; MLA; 锂电池废料

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于矿物组成的脆性评价对矿石磨矿的影响

许晨^{1,2*}, 肖仪武^{1,2}

1. 矿冶科技集团, 北京 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

磨矿是选矿工艺中能耗最高、效率制约最严重的环节,而矿物脆性差异是导致选择性破碎不足与过磨现象的关键因素,科学界定与评价矿物脆性对优化磨矿工艺具有重要理论意义与工程价值。目前对矿石脆性评价的研究主要集中在岩石力学和油气资源开发利用领域,选矿场景下矿物脆性与磨矿行为的关联机制研究明显滞后于工程实践需求。本文搭建“矿物组成—脆性评价—矿石磨矿”理论框架,系统梳理矿物脆性的理论内涵、评价方法及其对磨矿工艺的调控机制,旨在揭示矿物学属性与磨矿行为的规律,为构建矿物脆性评价体系提供理论支撑。本文首先在综述既有文献对矿物的脆性研究基础上,梳理磨矿过程和矿

物脆性的基本概念,明确两者具有显著的相关影响;其次梳理矿物组成法和力学参数法两种评价体系的适用性与分歧点,尝试将两者结合以有效表征矿石脆性差异,构建脆性评价体系;最后根据脆性评价方法,在工艺应用层面上论证矿物脆性对磨矿行为指导的有效性。本文扩展了矿物脆性与磨矿行为的理论边界,为从矿物学出发突破磨矿工艺瓶颈提供了依据,有助于推动选矿工艺从经验判断向矿物属性驱动的精准模式转型和发展。

关键词: 矿物组成; 脆性评价; 磨矿; 工艺矿物学

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

内蒙古某含钛铁尾矿工艺矿物学及尾矿资源再利用

周亚坤^{1*}, 牛向龙^{1,2}, 赵立群¹, 陈彤¹, 莫凌超¹, 牛斯达¹

1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 云南昆明 650201

内蒙古某超贫磁铁矿矿石中, 钛、铁矿物致密共生、嵌布粒度细, 原选矿工艺选矿比偏大, 尾矿中的钛损失严重, 造成尾矿堆积、伴生资源综合利用率低。为回收铁尾矿的钛及其他可利用矿物, 对选矿全流程进行了工艺矿物学研究。结果表明, 原矿矿石含铁(以氧化物计) 16.92%、钛 2.45%、钒 0.08%, 铁物相主要为磁铁矿和赤铁矿(47.95%)、钛铁矿(10.91%), 少量黄铁矿(3.41%), 其余铁赋存于硅酸盐矿物中; 钛物相主要为钛铁矿(57.49%), 榍石(11.43%), 少量金红石(1.18%), 其余钛赋存于硅酸盐矿物中。原矿经干选抛尾、高梯度磁选、二次精选后, 尾矿铁

品位分别降低至 7.66%、7.78%、8.93%, 终尾中, 铁主要赋存于硅酸盐矿物(67.33%)、钛铁矿(14.93%)、磁铁矿和赤铁矿(11.31%), 少量黄铁矿(6.43%); 钛主要赋存于钛铁矿(42.72%)、硅酸盐矿物(39.19%)、榍石(15.57%)以及少量金红石中。多元素分析结果显示, 终尾仍含钛 2.21%且主要赋存于钛铁矿中, 可考虑通过“重选-磁选-浮选”等联合工艺对其进一步回收利用。

关键词: 尾矿; 工艺矿物学; 尾矿资源化利用; 有价元素回收; 综合利用

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

喜马拉雅伟晶岩中石英原位微量元素特征及资源潜力评价

胡欢¹, 王汝成^{1*}, 谢磊¹, 徐志豪¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

高纯石英 (HPQ) 是微电子、光纤通信、航空航天等高端科技领域的关键性基础原料, 要求 SiO_2 纯度 $\geq 99.9\%$ 。自然界石英分布广泛, 资源非常丰富, 但可以加工为高纯石英的高端资源却非常稀少。伟晶岩是石英的重要载体之一, 少有伴生或共生矿物, 是重要的高纯石英原料来源 (王登红等, 2024)。喜马拉雅淡色花岗岩带是全球淡色花岗岩和伟晶岩最发育的地区之一, 本次研究对喜马拉雅 I、II 和 III 岩体中伟晶岩开展了石英原位 LA-ICP-MS 微量元素分析, 探讨石英中微量元素含量变化以及影响石英纯度的主要因素。I、II 和 III 岩体中伟晶岩主要有钾长石、斜长石和石英等矿物组成, 含少量白云母、石榴子石、电气石。本次研究对三个岩体中石英颗粒进行原位微量元素分析。I 岩体伟晶岩中石英杂质元素含量分别为: $\text{Li } 2.77 \times 10^{-6} \sim 8.38 \times 10^{-6}$ 、 $\text{B } 0.37 \times 10^{-6} \sim 2.33 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Na } 0.31 \times 10^{-6} \sim 6.69 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Al } 21.91 \times 10^{-6} \sim 43.21 \times 10^{-6}$ 、 $\text{P } 21.14 \times 10^{-6} \sim 98.19 \times 10^{-6}$ 、 $\text{K } 0.67 \times 10^{-6} \sim 3.46 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ca } 43.89 \times 10^{-6} \sim 463.05 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti } 0.49 \times 10^{-6} \sim 4.60 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Fe } 0.06 \times 10^{-6} \sim 7.47 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值为 355.96×10^{-6} ($n=14$); II 岩体中 $\text{Li } 16.62 \times 10^{-6} \sim 23.62 \times 10^{-6}$ 、 $\text{B } 0.97 \times 10^{-6} \sim 2.08 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Na } 0.50 \times 10^{-6} \sim 9.83 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Al } 74.24 \times 10^{-6} \sim 99.55 \times 10^{-6}$ 、 $\text{P } 1.17 \times 10^{-6} \sim 38.77 \times 10^{-6}$ 、 $\text{K } 0.22 \times 10^{-6} \sim 0.88 \times 10^{-6}$ 、 Ca 低于检测限 $\sim 178.05 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti } 8.00 \times 10^{-6} \sim 15.79 \times 10^{-6}$ 和 Fe 低于检测限 $\sim 2.98 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值 384.35×10^{-6} ($n=9$);

III 岩体中 $\text{Li } 45.05 \times 10^{-6} \sim 72.24 \times 10^{-6}$ 、 $\text{B } 1.33 \times 10^{-6} \sim 5.27 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Na } 0.06 \times 10^{-6} \sim 16.80 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Al } 282.88 \times 10^{-6} \sim 407.83 \times 10^{-6}$ 、 P 低于检测限 $\sim 190.86 \times 10^{-6}$ 、 $\text{K } 1.71 \times 10^{-6} \sim 6.62 \times 10^{-6}$ 、 Ca 低于检测限 $\sim 315.87 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti } 4.61 \times 10^{-6} \sim 11.74 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Fe } 0.05 \times 10^{-6} \sim 2.17 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值为 1107.87×10^{-6} ($n=9$)。Müller 等 (2012) 提出高纯石英定义为: 石英中杂质元素 $\text{Li } 5 \times 10^{-6}$ 、 $\text{B } 1 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Na } 8 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Al } 30 \times 10^{-6}$ 、 $\text{P } 2 \times 10^{-6}$ 、 $\text{K } 8 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ca } 5 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti } 10 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Fe } 3 \times 10^{-6}$, 总杂质元素含量低于 50×10^{-6} 。Al 和 Ti 是石英中最常见的微量元素, 它们作为晶格微量元素存在于石英中, 在石英原料提纯过程中很难被去除, 因此 Al 和 Ti 是评估石英质量的关键指标。I 岩体中 Al 含量多低于 30×10^{-6} , 而 Ti 明显低于 10×10^{-6} , 满足了高纯石英单元素指标, 而 II 和 III 岩体 Al 含量均显著高于 30×10^{-6} , 而 Ti 有满足高纯石英的低于 10×10^{-6} 。三个岩体中 Li、B、Na、K、Fe 杂质元素具有达到高纯石英单元素要求, 而 P、Ca 含量变化大, 均有明显高的数据, 可能是样品中极细的磷灰石包裹体造成, 也是造成三个岩体中石英总杂质元素含量偏高的主要因素。综上所述, 三个岩体中 I 岩体伟晶岩中石英达到了中高端高纯石英标准, 具有作为高纯石英原料的潜力, 且后期要关注原矿中磷灰石微细包裹体赋存状态和净化处理。

关键词: 喜马拉雅, 伟晶岩, 高纯石英

资助项目: “战略性矿产资源开发利用”重点专项: 高纯石英原料矿床成矿机制与提纯关键技术 (2024YFC2910100)

第一作者简介: 胡欢 (1972-), 副教授, 研究方向: 成岩成矿矿物学. Email: huhuan@nju.edu.cn

通讯作者简介: 王汝成 (1962-), 教授, 研究方向: 稀有金属矿物学和成矿学研究. Email: rcwang@nju.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

中国四川梭罗沟造山型金矿成矿作用过程研究: 来自元素赋存状态和微量元素的证据

刘春花^{1*}, 王登红¹, 陈振宇¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京市西城区百万庄大街 26 号 100037

梭罗沟金矿位于甘孜-理塘成矿带南段, 是目前中国四川省查明资源量最大的金矿床, 累计探明金资源量超 60 t, 平均品位约 3.7 g/t。主要发育浸染状和细脉状硫化物两种矿化样式。阐明金的赋存状态、特征矿物组合及黄铁矿与金红石等关键矿物内的微量元素含量, 对于限定四川梭罗沟金矿成矿作用过程及揭示矿床成因至关重要。电子探针微区分析 (EPMA) 与激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 研究表明, 该矿床中的金以不可见金形式赋存于黄铁矿和毒砂中。矿床中黄铁矿可分为四个世代 ($\text{Py}_1 \sim \text{Py}_4$), 平均含金量依次为 26.2×10^{-6} 、 107×10^{-6} 、 87.8×10^{-6} 和 5.1×10^{-6} 。矿床中有三个世代的石英和白云石; 有两个世代的毒砂、金红石、绢云母及磷铈铝石。毒砂可被命名为第二与第三世代 (Apy_2 、 Apy_3), 其平均含金量分别为 260×10^{-6} 和 414×10^{-6} 。黄铁矿中金 (Au) 与砷 (As) 呈显著正相关性, 且毒砂 (Apy) 的平均含金量高于黄铁矿, 表明砷在金富集过程中起关键作用。通过 Ti、Nb、W、V、Zr 等微量元素示踪, 金成矿作用可划分为四个阶段, 其中第二与第三阶段为主要成矿期。第一阶段: 黄铁矿与 A1 脉阶段; 第二阶段: 黄铁矿与 A2 脉阶段, 富含 Ti、Nb、W、

V、Zr、Co、Ni、Au 等成矿元素的流体沿近东西向主断裂贯入, 因流体强活动性, 此阶段矿物多呈细粒结构; 第三阶段: 黄铁矿-毒砂 (Apy)-A3 脉-B1 脉阶段, 随着流体流动性减弱, 矿物结晶环境趋于稳定, 形成大量中-粗粒矿物。第四 (最终) 阶段以碳酸盐-B2 脉-B3 脉组合为标志。金矿化涉及的水-岩反应主要包括以下过程: ①第一世代金红石发生溶解-再结晶作用, 生成锐钛矿及第二世代金红石; ②第一世代磷铈铝石通过溶解-再结晶作用形成第二世代磷铈铝石; ③钾长石与水反应生成蚀变钾长石; ④热液作用再结晶的石英混合了 Al、Mg、Ca、K、Ti、Fe 及水等组分。此外, 碳酸盐化作用导致成矿流体中 CO_2 含量急剧减少。随着硫化物结晶, 热液中的 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 络合物稳定性被破坏, 促使金元素发生沉淀。矿石内第一世代金红石的变质-热液成因特征, 表明梭罗沟金矿属于具有变质热液成因的造山型金矿床。锐钛矿作为典型的低温成因矿物, 其存在指示主成矿阶段发生于低温环境。

关键词: 金、黄铁矿、金红石、磷铈铝石、造山型金矿、梭罗沟

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

工艺矿物学研究在贵金属浸出效率评价中的应用

叶小璐^{1*}

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628

某金矿硫精矿制酸后的烧渣采用水洗提金工艺, 通过浸出提取烧渣中的金、银等贵金属, 生产中始终存在金、银浸出率低于设计指标、尾渣含银偏高等问题。针对浸出工艺的给料硫酸烧渣以及浸渣开展的工艺矿物学研究, 围绕影响金、银浸出率的矿物学因素进行了系统分析, 为评价金、银浸出指标, 给出优化方向提供矿物学依据。烧渣中 Au 的品位为 2.56 g/t, Ag 的品位为 34.8 g/t。金矿物为自然金和银金矿, 其中 53.52% 的金矿物包裹于三氧化二铁和脉石矿物中, 46.48% 的金矿物以裸露金的形式存在。银矿物主要为辉银矿, 少量硫铜银矿, 微量的银金矿、自然银, 50.45% 的银包裹于三氧化二铁和脉石矿物中, 49.55% 的银矿物以裸露银的形式存在。金矿物的嵌布粒度较集中于 20 μm 以下, 其中小于 1 μm 的金矿物占比高达 29.25%; 银矿物嵌布粒度较集中于 30 μm 以下, 其中小于 1 μm 的银矿物占比为 24.41%。浸渣中 Au 的品位为 1.42 g/t, Ag 的品位为 26.70 g/t。金矿物主要以自然金和银金矿的形式存在, 高达 95.07% 的金以包裹金的形式存在, 且嵌布粒度细, 均小于 20 μm , 其中 43.21% 的金矿物颗粒小于 1 μm 。银矿物主要以辉银矿和硫铜银矿的形式存在, 少量以

分散形式存在于硫酸铅中。这部分以含银硫酸铅形式存在的银较难在氰化浸出过程中得以回收。另外, 少量辉银矿嵌布粒度达 20 μm 以上, 且辉银矿与氰化浸出液的反应速度较慢, 需要延长氰化浸出时间才能较好的浸出。对比烧渣和浸渣中金、银矿物种类、粒度和嵌布特征的变化, 可以确定损失的金矿物主要为微细粒被三氧化二铁致密包裹的自然金和银金矿; 银矿物主要为辉银矿和硫铜银矿, 少量含银硫酸铅。因此, 通过延长浸出时间, 或对该浸渣细磨后再浸出, 可以一定程度提高金、银的回收率, 但是提升幅度不会太大。造成包裹金、银占比过高的原因是硫酸化焙烧时过高的焙烧温度造成部分三氧化二铁烧结未形成蜂窝状、多孔状结构, 而直接形成了致密状三氧化二铁, 并包裹金、银矿物。在这种嵌布特征下, 金、银矿物较难与氰化浸出液接触, 影响最终浸出回收, 提高金、银浸出回收率的最根本方法是优化焙烧条件, 避免出现三氧化二铁烧结现象的发生。

关键词: 工艺矿物学, 贵金属, 浸出, 矿物学评价

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

新疆屈库勒克东金锑矿工艺矿物学研究

蔡镠璐^{1*}, 杨晗¹, 李文娟¹, 陈高杨¹, 屈伟¹, 刘爽¹, 李倩¹

1. 有研资源环境技术研究院(北京)有限公司, 北京 101407

新疆屈库勒克东金锑矿工艺矿物学研究

摘要: 屈库勒克东金锑矿位于新疆南部青藏高原北东缘东昆仑地区洒阳沟-屈库勒克一带, 隶属新疆巴音郭楞自治州且末县, 已有研究表明屈库勒克东锑金矿体主要产出于上石炭统哈拉米兰河群下亚群碳酸盐岩-沉积碎屑岩组合中, 岩性为灰色砂岩、岩屑砂岩、粉砂岩、灰岩等。对新疆地区金锑矿床的成因一直是众多研究的主题, 然而, 对该地区的金锑的工艺矿物学特征尚未得到详细研究。本研究旨在对该地区金锑矿床的不同区域进行详细的工艺矿物学研究, 以确定金和锑的分布及赋存状态以及工艺矿物学特征, 为充分利用其有价金属提供有力的数据支持。研究采用 BPMA 工艺矿物学参数自动分析系统, 结合化学分析、显微镜、电子探针等研究手段, 对矿石的矿物含量、金的赋存状态和嵌布特征等进行研究。结果表明, 金颗粒以金银互化物形式赋存, 区域 1 样品中金平均品位为 8.16 g/t, 锑含量为 3.14%, 金颗粒粒度主要分布在 0.003~0.100 mm, 88.38% 的金粒度大于 0.020 mm。区域 2 中金平均品位为 3.09 g/t, 锑含量为 0.18%, 金颗粒粒度主要小于 0.010 mm, 其中粒度小于 0.005 mm 的金占 78%。

可见金粒度随着金的含量变低而变细。区域 1 中金和辉锑矿关系密切, 难以分离。在磨矿产品中, 除了单体解离的金外, 区域 1 中的金主要嵌布在辉锑矿中, 而区域 2 中的金则主要在黄铁矿、毒砂、石英等矿物中。金在不同区域的嵌布特征具有明显差异, 可能与成矿时期流体中金和锑的流体浓度和络合形式有关。在高金高锑的区域 1 中, 锑浓度较高, 金与锑形成金锑络合物 HAuSbS^{3-} 离子, 随着温度降低和辉锑矿的沉淀, 金锑络合物分解, 金和锑同时析出, 形成了金和辉锑矿形成密切交代共生的特征, 磨矿产品中金与辉锑矿难以完全解离, 金主要与辉锑矿连生。低金低锑区域中锑浓度较低, 金主要以金的硫氢络合物 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 离子形式迁移, 在沉淀析出过程中金与其他硫化物同时析出, 形成金和其他硫化物交代共生的特点, 磨矿产品中金多与黄铁矿、毒砂、石英等矿物连生。该矿区不同区域的金特征具有明显差异, 为实现有价金属金和锑的充分回收利用, 应通过适当调整选矿工艺流程来提高金锑的回收率。

关键词: BPMA 系统、工艺矿物学、金的赋存状态、地球化学成因

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于拉曼光谱的月壤矿物学研究：对非月海溅射物 复杂岩性组成的指示

师爽¹, 曹克楠¹, 余振兵^{1*}, 汪在聪¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院 行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 武汉 430078

激光拉曼光谱分析具有高精度、原位、无损和快速特点, 使之成为地球科学基础研究中的一项重要研究手段, 近年来在行星矿物识别和表征方面显示和很好的应用前景。“嫦娥六号”(CE-6)任务首次带回月球背面月壤样品, 这对了解月球背面地质多样性和演化历史具有重要意义。本研究采用基于拉曼的自动矿物分析系统, 对 CE-6 月球土壤对矿物组成和粒度进行了研究, 并与嫦娥五号(CE-5)月球土壤样品进行了比较。结果表明, CE-6 月壤平均粒度为 4.4 μm , 其玻璃物含量明显高于 CE-5 月壤, 而辉石和橄榄石含量均低于 CE-5。拉曼光谱进一步揭示了 CE-6 橄榄石相比 CE-5 橄榄石, 镁(Mg)元素明显富集(Fo=40-90)。

此外, 在嫦娥六号(CE-6)的一块岩屑中观察到了明显的橄榄石成分分带, 这很可能代表了具有复杂岩浆相互作用的月亮溅射物质。这些发现揭示 CE-6 月壤中存在大量非月海成分, 与 CE-5 样品显著不同。由于 CE-6 着陆点玄武岩中橄榄石含量极低, 月壤中橄榄石显著的成分范围指示了该区域基性月亮可能具有复杂的岩石组成。本研究显示, 拉曼光谱技术在无损、快速和粒度-矿物成分同步测定方面具有很大潜力, 为未来天体原位探测和返回样品分析提供了技术支撑。

关键词: 激光拉曼光谱, 嫦娥六号, 月壤, 矿物组成, 粒度

基金项目: 国家自然科学基金项目(42441802, 42241156)和中国地质大学(武汉)优秀青年团队项目(G1323523042)

第一作者简介: 师爽(1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学, 矿物学. Email: 373007131@qq.com

*通信作者简介: 余振兵(1979-), 教授, 研究方向: 前寒武纪地球生物学及天体生物学. Email: zbsher@cug.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

图像识别技术在矿物自动识别中的发展与应用

方明山^{1*}

1. 矿冶科技集团有限公司 矿产资源研究设计所, 北京 102628

矿物识别是矿物学研究和矿山生产中的重要环节,传统方法依赖人工在光学显微镜下肉眼观察和分析,存在效率低、成本高、主观性强等问题。随着计算机技术的发展,图像识别技术逐渐应用于矿物识别领域,经历了从基于灰度处理、色彩空间系统模型到结合人工智能技术的演变。在矿物识别应用中,图像识别技术展现了高精度、自动化的优势,并已开发出基于扫描电镜和能谱仪、光学显微镜的矿物自动识别

系统。这些系统能够高效处理矿物图像,提取矿物特征参数,为矿物学研究和矿山生产提供了强有力的技术支持。未来,随着人工智能技术的进一步发展,矿物图像识别技术将向更高精度、智能化和在线化方向迈进,持续赋能矿产资源的高效开发。

关键词: 图像识别技术; 矿物识别; 人工智能; 矿物参数自动分析

第一作者简介: 方明山 (1982-), 教授, 研究方向: 工艺矿物学。Email: fangmingshan@bgrimm.com

通信作者简介: 方明山 (1982-), 教授, 研究方向: 工艺矿物学。Email: fangmingshan@bgrimm.com

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

铁铜矿尾矿资源化利用现状数据库建设初探

陈彤^{1*}, 牛向龙^{1,2}, 赵立群¹, 周亚坤¹, 莫凌超¹, 牛斯达¹

1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘察院, 云南省昆明市盘龙区地址勘察院 650201

摘要: 目前, 数据库建设在很多领域得到广泛应用, 但在尾矿库管理方面, 仍存在一些问题。一方面, 数据分散存储, 缺乏统一的管理和规范, 导致数据的一致性和完整性难以保证。另一方面, 数据共享程度低, 不同部门和企业之间的数据难以互通, 影响了尾矿库的高效管理及技术的推广应用。本数据库通过将不同来源、地区、格式的尾矿库数据集中梳理存储, 统一管理和访问, 提升数据的一致性和完整性, 在此基础上数据库建库可以扩展出查询、分析功能, 进一步挖掘信息价值, 再通过数据共享和协作平台, 提高相关企业、部门的工作效率和信息的准确性。为尾矿库的监管、资源综合利用提供数据支持, 帮助相关部门和企业做出科学决策。本数据库建设流程包括:

历年勘查资料、行业年鉴、政府及企业公开资料收集整理, 数据库设计、数据标准化处理、数据录入编辑、质量检查及维护更新等。在建设过程中, 循科学性、规范性、一致性、适用与实用性原则, 明确数据格式、精度、属性字段规范等技术要求, 并选用 GIS 软件、数据库管理软件等。为更具针对性的服务铁铜尾矿矿物综合利用提出扩充方案, 包括矿山及尾矿库信息、尾矿理化性质、矿物特征数据等, 以全面梳理我国主要铁铜矿尾矿特性, 提高资源利用率, 减少环境污染。

关键词: 铁铜矿尾、尾矿资源化利用、数据库建设、尾矿库

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

川西可尔因稀有金属矿田李家沟锂辉石工艺矿物学特征研究

赖翔¹, 陈翠华^{1*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

四川金川李家沟锂辉石矿床位于川西可尔因稀有金属矿田东南部。经过最新的勘探评估工作, 李家沟矿床已被确定为超大型锂辉石矿床, 备受国内外学者关注, 且李家沟矿床矿石工艺特征随高程而变化, 急需正确评价李家沟矿床矿石的工业价值。为了确定矿石的工艺特性并评估其工业价值, 本研究基于详细的显微镜下和手标本观察, 综合运用 X 射线粉晶衍射 (XRD), 电子探针 (EPMA), 激光剥蚀等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS), 化学全元素分析, 化学物相分析, 矿物参数自动分析系统 (MLA) 等方法和技术, 揭示了矿石的工艺特性及 Li 的赋存规律, 为优化选矿工艺和资源综合利用提供了科学依据。

李家沟矿床形成于晚三叠世 (约 200 Ma), 与印支晚期岩浆热液活动密切相关, 属于典型的 Li-Cs-Ta (LCT) 型伟晶岩锂矿床。矿体呈脉状、透镜状, 赋存于钠长石锂辉石伟晶岩中, 矿石以钠长石锂辉石型为主 (占比>95%)。矿石结构主要为自形一半自形板柱状结构, 矿物组合以锂辉石、白云母、石英、钠长石为主, 含少量黄铁矿、石榴石等。锂辉石呈浅绿色或乳白色, 粒径差异显著 (0.01~20 mm), 常见蚀变及铁染现象。研究采集了 93 件样品 (63 件岩芯样品与 30 件拣块样品), 按深度分为 LJG-1 至 LJG-4 四组。矿石平均 Li_2O 品位为 0.86%, 属低品位矿石。锂主要赋存于锂辉石 (占比 84.1%), 其次以类质同象形式分布于云母类矿物 (15.8%)。伴生元素 (Nb、Ta、Sn 等) 无工业价值。全岩 SiO_2 含量达 73%, Al_2O_3

为 15.64%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 6.20%, 与区域伟晶岩型锂矿特征一致。

锂辉石晶体多呈半自形-自形柱状 (粒度 2~8 mm), 但受后期热液蚀变影响形成大量共生结构 (如石英-钠长石-锂辉石蠕状交生体), 导致深部矿体锂辉石粒度细化 (0.04~0.26 mm)、自形程度降低, 且锂品位随深度增加呈递减趋势 (浅部样品 LJG-1 品位 1.74% Li_2O , 深部 LJG-4 降至 0.46%)。矿石非均质性显著, 锂辉石解离特性与粒度和蚀变程度密切相关: 浅部样品在 -0.075 mm 粒度下解离度达 92%, 而蚀变强烈的深部样品解离难度增大, 需通过多段磨矿 (首段磨至 0.15 mm, 终磨至 -0.075 mm) 结合脱泥工艺优化浮选效率。研究指出, 后成合晶结构中微米级蠕状锂辉石 (3~50 μm) 因 MLA 技术分辨率限制易被误判为脉石矿物, 是尾矿锂损失的主要因素; 同时, 黏土矿物沿锂辉石裂隙渗透引起的 Fe 杂质吸附及浮选药剂消耗需在选矿流程中针对性处理。选矿流程建议采用“粗磨—云母粗选—尾矿再磨—脱泥—锂辉石细选”的多段分选工艺, 以应对矿石粒级分布宽 (-2~-0.075 mm) 的特征及蚀变矿物干扰等。该研究为川西伟晶岩型锂资源的高效利用提供了关键矿物学依据, 对提升低品位锂矿综合回收率及精矿品质 (理论 Li_2O 品位 6.4%) 具有重要工程指导意义。

关键词: 后成合晶; 锂辉石; 解离度; 可尔因

第一作者简介: 赖翔 (1989-), 博士后, 研究方向: 矿物学, 矿床学. Email: laixiang@cdut.edu.cn

*通信作者简介: 陈翠华 (1972-), 教授, 研究方向: 矿物学, 矿床学, 地球化学. Email: chencuihua@cdut.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

毒重石对含钛无氟保护渣熔渣结构和析晶行为的影响

刘磊^{1,2}, 韩秀丽^{1,2*}, 张玓^{1,2}, 刘子瑶³, 郭静静³

1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北省唐山市 063210;

2. 河北省矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北省唐山市 063210;

3. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北省唐山市 063210

在连铸无氟保护渣的应用探索中, 含钛无氟保护渣以其独有析晶矿相的优势和改善保护渣物化性能的效果, 成为无氟保护渣领域的研究热点, 但由于高熔点矿物的存在, 导致保护渣熔点和黏度较高, 而毒重石中的钡可以改善含钛保护渣的理化性能, 使得含钛保护渣具有较好的应用效果。选用含钛高炉渣、石灰石、石英砂、硼砂、纯碱和毒重石作为主要原料制备含钛无氟保护渣, 对无氟保护渣熔渣结构和析晶行为进行了系统研究, 以查明毒重石作为氟替代物在含钛无氟保护渣中的作用机制, 从而实现含钛无氟保护渣的工业化应用。结果表明, 随着毒重石质量分数从 1%增加到 5%, 熔渣中 Ca-O 键和 Ba-O 键稳定性、硅氧四面体内部与外部有序

度以及硅酸盐结构聚合度均表现为先降低后升高, 而 Si-O 平均配位数和氧硅比呈现为先升高后降低的趋势; 含钛保护渣主要析出相为钙钛矿、霞石和硼硅酸钙, 开始析晶温度和钙钛矿占比变化较小, 岛状结构的硼硅酸钙含量先升高后降低, 架状结构的霞石含量先降低后升高, 当毒重石含量为 3%时硼硅酸钙占比达到峰值为 15%, 霞石占比为 18%。保护渣熔渣结构的改变会影响保护渣的析晶行为, 保护渣熔渣硅氧网络结构的复杂度升高, 会促进复杂结构的硅酸盐矿物含量升高。

关键词: 含钛无氟保护渣; 熔渣结构; 析晶行为; 毒重石; 钙钛矿

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774140); 河北省自然科学基金项目(E2024209062); 河北省省属高校基本科研业务费项目(JQN2022008); 唐山市科技计划项目(24130206C)

第一作者简介: 刘磊, 男, 36 岁, 副教授, 研究方向: 工艺矿物学及矿物材料, Email: heutliulei@163.com

通讯作者简介: 韩秀丽, 女, 58 岁, 教授, 博导, 研究方向: 工艺矿物学及矿物材料, Email: hanxl@ncst.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

华南震旦系-下寒武统磷块岩的工艺矿物学研究

余振兵^{1*}, 刘聪靓¹, 李天洋¹, 王伟¹, 黄康俊²

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

2. 西北大学, 西安 710069

采用偏光显微镜和矿物自动定量分析系统对湖北宜昌震旦系陡山沱组和云南东川、贵州织金下寒武统沉积磷块岩矿石及相关岩石的矿物组成、嵌布特征、嵌布粒度等进行了系统的工艺矿物学研究和对比。研究表明, 磷块岩矿石以条带状构造为主, 少数为块状构造, 主要为中-低品位硅质型和碳酸盐型矿石。宜昌陡山沱组磷块岩样品 P_2O_5 含量为 4.5%~31.5%, 平均含量 14.5%; 东川、织金下寒武统磷块岩样品 P_2O_5 含量分别为 6.4%~30.6%和 5.2%~31.3%, 平均含量 18.7%和 18.2%。由于条带状构造发育, 矿石在毫米级尺度上磷灰石含量从<10%可变为>80%。矿石中的有用矿物为碳氟磷灰石, 几乎全部以隐晶质集合体形式产出, 集合体常呈现粒度数十至数百微米的颗粒; 脉石矿物主要为硅质矿物(石英、玉髓)、碳酸盐矿物(白云石为主)及少量含铁矿物等。碳酸盐矿物常呈独立条带

或以磷质颗粒的基质或胶结物形式存在, 可根据样品中磷质颗粒的粒度设计对应的破碎和磨矿工艺进行较好的解离。硅质矿物除以独立条带形式存在以外, 在部分样品中还以微米级包裹体形式分散于磷质颗粒内部, 为选矿带来了较大困难, 需通过更复杂的工艺进行处理。总体而言, 华南沉积磷块岩的结构和构造多样, 矿物组成和嵌布分析比较复杂, 通过矿物自动定量分析系统精确测定矿物的嵌布特征和解离度, 可以帮助确定最佳的磨矿条件, 提高矿物的单体解离度的同时避免过磨导致的机械夹带和泥化问题, 并可为选矿药剂的选择和工艺流程的优化提供重要参考, 从而提高磷矿资源的回收率和产品质量。

关键词: 磷块岩, 矿物自动定量分析, 陡山沱组, 下寒武统, 矿物解离

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

都龙锌锡多金属矿床铟的赋存状态和富集机制

康东艳^{1*}, 肖仪武¹

1. 矿冶科技集团有限公司 资源所, 北京 102628

都龙锌锡多金属矿床是我国重要的铟资源产地, 其铟的赋存状态与富集机制对稀散金属成矿理论及勘查开发具有重要意义。该矿床的含铟矿石以磁黄铁矿、闪锌矿和磁铁矿为主, 含少量锡石、黄铜矿等, 非金属矿物以绿泥石、白云石及复杂硅酸盐组合为特征。本研究综合运用扫描电镜 (SEM)、矿物自动分析系统 (AMICS) 和电子探针 (EPMA) 等分析手段, 系统揭示了都龙锌锡多金属矿床铟的赋存规律及其控制因素。结果表明: 铟以类质同象形式均匀分布于铁闪锌矿中, 因此铟的高效回收利用取决于铁闪锌矿的处理; 发现闪锌矿存在“铟窗效应”, 当 Cd 含量介于 0.17%~0.20% 时, In 含量普

遍较高 (大于 0.08%), 可能暗示 Cd-In 协同富集的作用; In 与 Cu 呈显著正相关, 其替代机制遵循 $\text{In}^{3+} + \text{Cu}^+ \rightarrow 2\text{Zn}^{2+}$ 的耦合置换模式, Cu^+ 对电荷失衡的补偿作用或为铟富集的关键; 结合闪锌矿地质温度计及 Zn/Fe、Zn/Cd 和 Ga/In 比值, 确定成矿温度集中于中高温区间, 富铟环境需高温驱动元素扩散及充足的 Cd^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^+ 流体供给; 闪锌矿的微量元素特征与岩浆热液型矿床特征相似, 指示其成因与岩浆热液活动密切相关。

关键词: 铟; 都龙锌锡多金属矿床; 闪锌矿; 富集机制

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

元素赋存状态-连接成矿过程与选冶的桥梁: 以柿竹园矿床中锡为例

田明君^{1,2}, 肖仪武^{1,2*}, 尚衍波^{1,2}, 王中明^{1,2}, 王明燕^{1,2}, 刘方^{1,2}, 李磊^{1,2}

1. 矿冶科技集团有限公司 矿产资源研究设计所, 北京 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

元素的赋存状态是矿床学研究的核心内容之一, 不仅为探讨矿床形成过程、建立成矿模型提供关键依据, 同时对矿石选冶工艺制定具有重要指导意义。华南地区锡矿床常与高分异过铝质花岗岩相关, 且主要富集在矽卡岩型矿床中。然而, 该类矿床在开发过程中普遍面临选冶回收率低的难题。以典型矿床柿竹园为例, 其现场锡回收率仅为 12%~15%。因此深入研究锡的赋存状态, 成为连接矿床成因模型与实际选冶难题的重要纽带。本研究采用湿化学分析、选择性溶解、矿物自动分析系统 (AMICS) 和电子探针微区分析 (EPMA) 等综合技术手段, 对 III 矿带矽卡岩型矿石开展了系统的岩石学与矿物化学研究, 查明锡的赋存状态并进行定量表征。研究发现锡存在两种主要替代机制: (1) 石榴石和绿帘石中的八面体替代: $2\text{Fe}^{3+}_{(\text{oct})} = \text{Fe}^{2+}_{(\text{oct})} + \text{Sn}^{4+}_{(\text{oct})}$; (2) 韭闪石中的四面体替代: $\text{Sn}_{(\text{tetr})} = \text{Si}_{(\text{tetr})}$ 。石榴石和绿帘石中 SnO_2 与 Fe_2O_3 呈现相反的线性变化趋势, 指示前者为原始锡晶格替代, 而后者则反映了锡矿物蚀变后的重新分配过程。定量分析结果表明, 62.75% 的锡以锡石形式存在, 31.82% 赋存于石榴石中, 少量分布于韭闪石和绿帘石中, 微量存在于榍石中。结合前人流体包裹体研究成果, 本研究系统整合了矿床流体演化、氧化还原

态与锡地球化学行为, 建立了以温度为线的成矿模型: 在早期高温氧化阶段 (超临界流体), 锡主要赋存于石榴石中, 富氟环境有利于锡以 Sn^{4+} 氧化态存在, 晚期形成锡石与磁铁矿的嵌晶结构; 随着体系冷却, 富含氯化物的流体携带锡迁移, 随温度降低沉淀形成锡石, 并受到晚期硫化物 (如磁黄铁矿、闪锌矿) 的交代。综合考虑矿石性质 (包括伴生有价矿物的综合回收及其物理化学特性), 确定了选冶原则工艺流程: 首先进行磁铁矿磁选, 随后进行硫化物浮选, 最后对钨、锡进行浮选。研究团队创新性地提出了锡石理论回收率预测的经验公式 $\varepsilon_{\text{Sn}} = A_{\text{Cass}} \times B_{\text{Cass}} \times C_{\text{Cass}}$, 其中, A_{Cass} 代表锡石可选性系数; B_{Cass} 代表锡石结构影响系数; C_{Cass} 为锡石粒度影响系数。计算得到锡石理论回收率为 24.05%, 与实验室闭路流程试验结果高度吻合, 验证了公式的可靠性。该研究说明矽卡岩型锡矿床的经济性从根本上受控于锡的赋存状态, 即地质作用。这一认识可为类似矿床的地质研究、勘探策略和选冶工艺制定和优化提供了重要的理论指导和方法支撑。

关键词: 锡赋存状态; 柿竹园; 回收率预测; 锡成矿过程; 矽卡岩

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2905103)

第一作者简介: 田明君 (1989-), 高级工程师, 研究方向: 矿床学及工艺矿物学. Email: tianmj51@163.com

通信作者简介: 肖仪武 (1965-), 正高级工程师, 研究方向: 工艺矿物学及资源评价. Email: xiao_yw@bgrimm.com