

工艺矿物学在地质冶金学中的应用及问题

王玲¹, 赵战锋²

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:地质冶金学是基于矿山绿色高效生产实践发展起来的新兴学科,其核心内容是统筹地质、采矿、选矿、冶金及环境等多门学科为矿业开发服务。工艺矿物学由于其与各专业的相关性紧密,且研究方法直观简单,逐步成为地质冶金学建模中的优势学科。工艺矿物学研究样品采集数量少,但又能代表矿床的变化规律。将工艺矿物学参数作为划分矿化域,实现分采分选的依据,可实现矿产资源节能高效的综合利用。工艺矿物学参数中矿物含量和元素赋存状态可以直接参与模型估值,而嵌布粒度和共生关系表征的是一个统计的组合信息,组合信息需要拆分估值然后进行配比矫正,是参数模拟中的难点,亟待深入研究。样品的工艺矿物学参数是一个空间的点参数,点参数扩展为空间的体参数就是常说的参数模拟。参数模拟方法日新月异,常见的方法有最近距离法、距离幂指数反比法、普通克里金法和多元回归法等,选择适当的方法进行工艺矿物学参数模拟是地质冶金学建模的重要内容。

关键词:地质冶金学;工艺矿物学;样品采集;参数化;参数模拟

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.02.006

中图分类号:TD951 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2020)02-0037-06

地质冶金学是一门服务于矿山开发的综合性学科,其内容涉及地质、地质统计学、工艺矿物学、采矿、选矿、冶金、技术经济、环境等多门学科,目的是通过建立地质冶金学模型对地质、采矿、选矿和冶金等信息进行空间分类,实现空间上矿体分采分选(冶)和废石尾矿的有效处理,时间上实现矿山生产的合理规划,从而取得较佳的经济和社会效益。地质冶金学模型可以相对准确地预测生产流程,增强地质资源利用率,并提高能源、药剂和水等生产材料的效率,其动态特征对于市场波动和新技术的引进具有较快的反映能力^[1-6]。

工艺矿物学是应用矿物学的分支,同时也是介于地质学与选矿、冶金学的边缘科学,是一门以研究天然矿石原料和矿石加工工艺过程产品的化学组成、矿物组成和矿物性状为目的的传统学科,随着科学技术的不断发展,矿物自动分析仪

器(例如MLA等)等新手段的应用也为这门传统学科注入了新的活力。工艺矿物学研究成果中矿物组成及含量、粒度、单体解离度、相互共生关系及元素赋存状态等对于地质冶金学建模中空间域的划分、采矿方法的选择、选矿(冶)工艺的制定、回收率的预测、废石堆存方式和尾矿库的建设方案等矿山整体生产环节均具有重要的指导意义。凭借样品采集简单、研究结果直观可靠、信息量大、成本费用低廉和自动分析技术日趋成熟等优势特征,工艺矿物学已经较多应用于地质冶金学建模中。本文是在介绍地质冶金学建模过程的基础上,归纳工艺矿物学研究参数,讨论地质冶金学建模中工艺矿物学研究的取样和参数模拟方法,旨在为地质冶金学建模中工艺矿物学的应用提供参考。

收稿日期:2018-11-09

作者简介:王玲(1974-),女,教授,长期从事选冶工艺矿物学研究及矿产资源可利用性评价工作。

1 地质冶金学建模的研究现状

地质冶金学建模的主要流程包括地质建模、样品采集、样品测试、预测模型和动态模拟(图1),其中的样品测试的一项重要内容是工艺矿物学研究,当然还包括岩石的物理参数等方面的信息,以及相关的选冶试验。

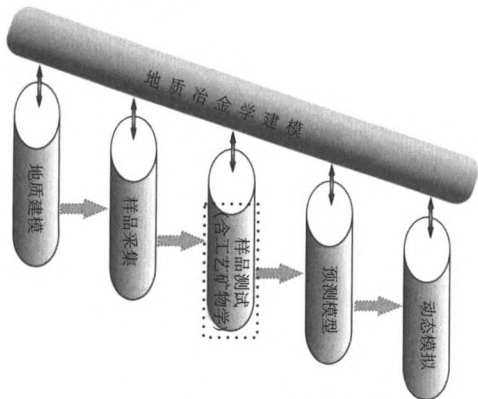


图1 地质冶金学建模流程
Fig.1 Geometallurgy modeling process

地质建模是在地质、勘查工程、地球物理和地球化学资料和各种解释结果或者概念模型进行综合分析的基础上,利用计算机图形技术,生成的三维定量模型。该模型是地质冶金学模型的基础,其不但限定了地质冶金学模型的范围,同时其参数也是地质冶金学模型参数的重要组成部分;样品采集是选取现有工程(或者新设计工程)中能够代表矿体变化规律的样品进行工艺矿物学研究和相关物性参数的测定,是地质冶金学建模中最为关键的步骤,决定着整个研究的成败关键;地质冶金学模型的开发需要大量矿石样品加工性能的信息,通过钻探岩芯收集的基本信息还不足以支撑模型的构建,需要额外的分析测试,例如矿物含量、赋存状态、矿物粒度、磨矿参数、浮选参数、体重参数、磁性参数、浮选回收率、浸出率等等;预测模型是结合前期的矿体模型和测试结果,创建一个预测模型,常用的参数包括品位、矿物含量、矿化类型(结构构造)、矿石类型、围岩、生产信息(回收率、精矿质量、尾矿参数)、技术经济参数等等;动态模拟是预测模型中参数

随时间变化而引起其他参数变化的规律研究,其已经广泛应用于矿山生产和矿业风险评估^[8]。

地质冶金学模型相当于一个开源的平台,任何和矿山开发有关的学科都可以融合进来,从而影响矿山的综合管理,融合进来信息量的大小就决定了地质冶金学模型的研究深度。Lishchuk(2016)根据全球矿山地质冶金学建模的应用情况建立了研究方法和深度的矩阵,将研究的方法分为传统、间接和矿物学三种,将研究的深度从没有研究到应用地质冶金学的全面矿山管理等8个层次,基本反映了目前地质冶金学研究的状况(图2)。

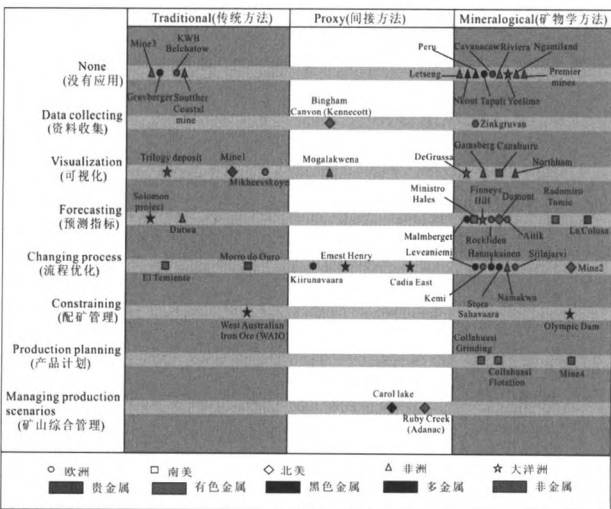


图2 矿山应用地质冶金学建模方法与研究深度矩阵
Fig.2 Selected mines arranged in classification matrix

Lishchuk 的研究深度分类是基于建模流程而来,根据实际操作过程的难易程度也可以将地质冶金学建模分为传统地质研究、工艺矿物学研究和大量试验研究三类^[9]。

2 地质冶金学建模中工艺矿物学研究内容

2.1 工艺矿物学样品采集

工艺矿物学样品是用来测试矿石样品的元素赋存状态、矿物含量、粒度解离度和共生关系等工艺矿物学参数,样品一般来源于矿山勘查和生产的相关工程。

样品采集就涉及代表性的问题,地质冶金学

建模中工艺矿物学样品不同于传统的工艺矿物学研究样品，传统的工艺矿物学研究样品和选矿试验样品一致，其代表选矿试验样品，一般是代表待采矿体的平均指标，而地质冶金学建模的样品要代表空间变化规律。因此地质冶金学建模中工艺矿物学样品要在研究空间的变异性基础上采集，样品要求尽量代表矿石的空间变异性。

工艺矿物学样品的采集一般是在地质建模完成之后进行，地质建模一般都会区分不同的矿化类型，称之为矿化域，工艺矿物学研究会矿化域进行验证和纠偏，因此矿化域界限附近的样品设计密度应该大于矿化域内部。

2.2 工艺矿物学参数

工艺矿物学在地质冶金学模型中的参数主要包含目标元素分布及赋存状态、重要矿物分类及定量，矿物嵌布粒度和共生关系，还应包含严重影响选冶工艺的有害矿物信息，以及砷、镉等对于环境有较大影响的有害元素的赋存状态等。

矿床的元素分布在地质建模中已经有了较为清晰的研究，工艺矿物学研究中化学成分的分析其实是对地质建模中元素分布的一种验证，类似于地质勘查中的组合分析，因此地质冶金学建模中可以利用工艺矿物学化学元素分析对地质模型进行优化，也为后续构建更为完善的模型打好基础。

元素的赋存状态一般利用化学物相分析来完成。化学物相分析是基于各种矿物或物相在化学溶剂中的溶解度和溶解速度的差异，采用化学选择性溶解的方法，测定样品中某一目标元素在不同种类矿相或矿物中的分布率。赋存状态是地质冶金学模型的重要参数，对后续的选冶工艺和环保均有较大的参考意义。例如对于某复杂铜矿石资源来说，铜的总氧化率，铜在不同的氧化铜矿物（如赤铜矿、孔雀石、假孔雀石等），不同的硫化铜矿物（如黄铜矿、砷黝铜矿等），以及在褐铁矿、硬锰矿或高岭石等粘土质矿物中的分布

率与铜的选冶工艺制定密切相关，可预先根据铜的赋存状态进行矿化域的划分。再比如针对某锡矿石资源，锡如果是锡石形式存在则优先选择重选回收，如果是黄锡矿形式存在则可以考虑浮选回收。在某矿石中砷含量较高，如果砷是以毒砂形式存在，其对环境的危害较小，如果是活性较大的氧化状态存在，其对环境的危害较大。

矿物分类及定量是工艺矿物学研究的基本内容，也是地质冶金学模型的基本参数。传统的矿物定量一般是在显微镜、扫描电镜考察基础上，通过化学分析及化学物相分析计算获得。近年来随着自动化分析技术的发展，矿物自动分析仪可以完成大部分矿石的矿物自动定量。矿物分类及定量对于矿山生产具有直接的指导意义，是划分矿化域，实现分采分选的基本参数。例如中部非洲常见的氧化钴矿，主要的钴矿物有水钴矿、铜钴锰氧化结合物、钴白云石和含钴绢云母及含钴绿泥石等，将其分为适宜磁选、适宜浮选、适宜浸出和不易回收4类，并分别定量，利用三维矿业软件将4类钴矿物类型进行了空间插值，在此基础上进行了选冶空间域的划分，然后在选冶空间域中取样进行验证性试验，试验结果表明分采分选可以有效改善钴的回收率。

工艺矿物学中矿物的嵌布粒度是指根据选别的需要而测定的矿物或者矿物集合体的粒度，一般指矿物工艺粒度，是指导磨矿工艺和流程结构制定的依据，对于同种矿物不同嵌布粒度的矿石进行分采分选，实现节能减排，也是地质冶金学的核心思想之一。

工艺矿物学中矿物共生关系是指目标矿物和其它矿物的连接紧密程度，其作为参数之一进入地质冶金学模型对于后续工艺和生产也有较大帮助。但目前，共生关系在原矿石中多采用定性描述，还没有统一的量化标准。

2.3 参数模拟方法

样品的工艺矿物学参数可以认为是一个空间点的参数，点参数扩展为空间的体参数就是常说的“参数模拟”。随着计算机技术的发展，参数模拟的方法也越来越丰富，一般常见的方法有最近距离法 (NN)、距离幂指数反比法 (IPD)、普通克里金 (OK) 和多元回归法 (MR) [10-13]。

(1) 最近距离法 (NN)

最近距离法 (NN) 是待估矿块的值由距其最近的样品参数值给出。利用这种方法，首先计算搜索椭球体内样品与待估矿块的距离。

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

取距离最近的样品参数值即为矿块参数

$$d_{min} = \min_{i=1}^n (d(s_i))$$

在最近距离法中，也可以考虑从样品到块中心是各向异性，距离用各向异性椭球体来计算，各向异性椭球体的确定方法与搜索椭球体相同。

(2) 距离幂指数反比法 (IPD)

距离幂指数反比法属于常用加权平均插值方法，其是利用搜索椭球体内的样品与待估矿块之间的距离计算不同权重，从而计算矿块加权参数。

$$P = \sum_{i=1}^n W_i * G \quad W_i = L_i * \frac{D_i}{D_i^p}$$

(其中 L_i 是样品间距； D_i 是样品 i 的权重； P 为次幂)

(3) 普通克里金法 (OK)

克里金法是地统计学的重要组成部分，它是根据一个搜索椭球体内若干样品的品位特征数据，对该区域同类特征的未知数据作线性无偏、最小方差估计的方法。待估样品参数是搜索椭球体样品乘以其权重之和。

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (\lambda_i \text{ 为权重})$$

参与估算样品的权重利用变异函数 $\gamma(x, h)$ 经过拟合后获得。

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} Var[Z(x) - Z(x + h)]$$
$$= \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x + h)]^2 - \frac{1}{2} \{E[Z(x)] - E[Z(x + h)]\}^2$$

$$= \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x + h)]^2 = \gamma(h)$$

(其中 x 为距离， h 为滞后距)

(4) 多元回归法 (MR)

研究一个因变量、与两个或两个以上自变量的回归。亦称为多元线性回归，是反映一种现象或事物的数量依多种现象或事物的数量的变动而相应地变动的规律。建立多个变量之间线性或非线性数学模型数量关系式的统计方法。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x \wedge 2 + \dots + \beta_k x \wedge k + \varepsilon$$

3 亟待深入研究的问题

作为一个新兴的学科，地质冶金学建模过程有很多问题需要研究，例如空间的样品分布密度和位置，样品的测试方法和质量的管理体系，地层、矿化等定性的信息如何使用，磨矿参数和工艺指标如何使用，地质冶金学域应该如何划分，模型的可靠性如何验证等等 [10-13]，本文主要讨论工艺矿物学研究在地质冶金学建模过程中亟待深入研究的问题。

(1) 样品的采集

地质冶金学产生和发展的基础是地质信息空间分布的复杂性，要将这种复杂性转化为规律性就需要采集样品来研究这种复杂性，而采集样品是否能代表这种地质复杂性就成为问题的关键。采集样品是否有代表性无非是两个问题，一是样品的数量，二是样品的位置。各个矿床根据其不同的特点需要不同的样品数量，如果采样的数目过少，不具备代表性，模型可靠性差；较大样品数量可以提供更高的预测精度，但成本费用和试验时间又可能存在较大的浪费。Williams 和

表 1 某矿石中某矿物的嵌布粒度 /%

Table 1 D issemination size of a mineral in some ore

粒径 /mm	>2	2-0.833	0.833-0.074	0.074-0.038	0.038-0.010	<0.010
分布率 /%	0.80	4.78	51.57	31.78	7.20	3.87
累计率 /%	0.80	5.58	57.15	88.93	96.13	100.00

Richardson (2004) 认为一般的地质冶金学建模需要 1000 个工艺矿物学研究样品^[17], David (2014) 推荐一般矿山需要 30 个以上的选冶试验样品, 采样的目的和用途决定了样品的重量^[18], 但事实上采样数量需要一个复杂的论证过程, 在研究矿区地质和矿体特征的基础上, 着重研究地质和选冶的变异性 and 抽样的误差^[19-20]。在实际生产中地质冶金学建模是一个庞大的系统工程, 对于一个矿山不可能在短时间内完成, 因此取样的数量也可以参考矿产勘查的基本原则, 即“由疏及密, 由未知到已知”, 在首采地段或者近两年的采矿范围内样品加密布置, 外围适当抽稀, 在生产过程中继续采样研究, 完善模型。

(2) 研究成果的参数化

工艺矿物学在地质冶金学模型中的主要参数中化学元素分析、矿物含量和赋存状态可以根据分析结果直接转为参数进行空间估值, 而嵌布粒度和共生关系直接参与估值就有一定的困难。嵌布粒度表征的是一个集合体的组合信息, 一般用一系列连续粒径的分布率来表示, 例如某样品中目标矿物的粒度表示方法见表 1。

该种组合信息难以在空间直接估值, 而采用什么样的方法将该类信息由点扩展到体是值得深入研究的问题。目前常见的处理方法是将集合信息拆分为单个信息进行空间估值, 然后再对每个集合体进行配比矫正。共生关系多数情况都是定性的描述, 有时候也可以用单体解离度表示。但单体解离度是碎磨加工后的工艺参数, 其数值与加工工艺的条件有关。总之, 工艺矿物学参数虽然丰富, 相对简单易获得, 但有些属于定性描述, 有些属于组合数据, 有些即使是可以直接参数化的数值, 但目前尚缺乏行业的统一标准。缺乏标准, 所获得数据的稳定性就差, 从而影响地质冶金学建模的准确性, 这是工艺矿物研究亟待解决的问题。

(3) 参数的模拟方法

工艺矿物学参数的确定是为模拟做准备, 而参数模拟的方法又多种多样, 实践中工艺矿物学参数用哪种方法估值更准确, 更具有执行率, 常常是地质冶金学工作者感兴趣的问题。化学元素分析作为基本参数估值时可以参考矿体模型中品位的估值方法和参数, 因为二者代表的含义接近, 常见方法可以是距离幂指数反比法 (IPD) 和普通克里金 (OK)。化学物相分析结果 (赋存状态) 和矿物含量做为参数估值时应该考虑品位和地质域的约束, 估值方法优先考虑普通克里金 (OK), 如果样品数量和空间的分布不足以反映参数的空间结构, 可以考虑其他方法, 在完成估值之后可以考虑利用多元回归法 (MR) 进行验证, 例如一般铜矿床的氧化矿物的含量和矿体埋深与构造发育程度的关系就可以利用多元回归法 (MR) 表示三者的关系。嵌布粒度参数可以利用化学分析估值的常用方法 (IPD 和 OK) 对于每个粒度区间含量进行估值, 然后再进行配比矫正, 也可以利用矿物含量、围岩特征等其他参数回归得出。共生关系如果用单体解离度表示, 估值方法可以参考嵌布粒度的方法^[21]。这些估值方法目前均初期探索阶段, 需要进一步完善及实践验证。

参考文献:

- [1] 周有勤. 金的地质冶金学及其应用 [J]. 黄金科学技术. 2013(5): 76-80.
Zhou Y Q. Geological Metallurgy of Gold and its Application [J]. Gold Science and technology. 2013 (5) : 76-80.
- [2] Philander C, Rozendaal A. A process mineralogy approach to geometallurgical model refinement for the Namakwa Sands heavy minerals operations, west coast of South Africa[J]. Minerals Engineering, 65(2014)9-16.
- [3] Ross J. A geometallurgical study at the Bingham Canyon Mine, Utah analyzing mineralogical and textural parameters impacting rock breakage[D]. Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library, 2007.

- [4] Lamberg P, Rosenkranz J, Wanhainen C, et al. Building a geometallurgical model in iron ores using a mineralogical approach with liberation data[C]. 2013,p.317-324.
- [5] Bhuiyan M, Kamran Esmaceli K E, David Eden D E. The Influence of Rock Foliation on the Correlation between the Point Load Strength Index and Comminution Indices at Kinross Tasiast Mine[C]. American Rock Mechanics Association, 2016.
- [6] Kumral M. Incorporating geo-metallurgical information into mine production scheduling[J]. Journal of the Operational Research Society, 62(2011), 1,p.60-68.
- [7] 贾木欣. 国外工艺矿物学进展及发展趋势 [J]. 矿冶. 2007, 16(2): 95-99.
- Jia M X. Progress and Development Trend of Process Mineralogy Abroad [J]. Mining and Metallurgy. 2007, 16 (2) : 95-99.
- [8] Deutsch J L, Palmer K, Deutsch C V, et al. Spatial modeling of geometallurgical properties: Techniques and a case study[J]. Natural Resources Research, 2016 (25) 2:161-181.
- [9] Lishchuk V, Lund C, Lamberg P. Development of a synthetic ore deposit model for geometallurgy[C]. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2016.275-286.
- [10] Nguyen K. A new texture analysis technique for geometallurgy[C]. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), 2013.187-190.
- [11] Lund C, Lamberg P, Lindberg T. A new method to quantify mineral textures for geometallurgy[C]. 2014.
- [12] Sepulveda E, Dowd P A, Xu C, et al. Multivariate Modelling of Geometallurgical Variables by Projection Pursuit[J]. Mathematical Geosciences, 2017 (49), 1:121-143.
- [13] Fernandes F G, Cabral I E. Regression model utilization to estimate the mass recovery of a phosphate mine in Brazil[J]. Rem: Revista Escola de Minas, 2016 (69) 1:75-77.
- [14] Lishchuk V, Lamberg P, Lund C. Evaluation of sampling in geometallurgical programs through synthetic deposit model[C]. 2016.
- [15] Valenta M, Mulcahy B. Development of a geometallurgical model for a copper concentrator[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2016(116) 6:539-545.
- [16] Mcclung C R. Molybdenite polytypism and its implications for processing and recovery: A geometallurgical-based case study from Bingham Canyon Mine, Utah.[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2016 (33) 3.
- [17] Williams S R, Richardson J M. Geometallurgical Mapping: A new approach that reduces technical risk[C]. 2004,p.241-268.
- [18] David D. Geometallurgical Guidelines for Miners , Geologists and Process Engineers Discovery to Design: The Second AusIMM International Geometallurgy Conference[Z]. 2014:129-132.
- [19] Coward S, Vann J, Dunham S, et al. The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables[J]. Alberta Report, 2009.
- [20] Helle S, Kelm U, Barrientos A, et al. Improvement of mineralogical and chemical characterization to predict the acid leaching of geometallurgical units from Mina Sur, Chuquicamata, Chile[J]. Minerals Engineering, 2005 (18), 13:1334-1336.
- [21] Lotter N O. Modern process mineralogy: an integrated multi-disciplined approach to flowsheeting[J]. Minerals Engineering, 2011 (24) 12:1229-1237.

Application and Difficulties of Process Mineralogy in Geometallurgy Modeling

Wang Ling¹, Zhao Zhanfeng²

(1. University of Science & Technology Beijing, Beijing, China; 2. China Enfi Engineering Corporation, Beijing, China)

Abstract: Geological metallurgy is a newly developed subject based on the practice of green and efficient mine production. Its core purpose is to provide overall planning for the mining development involving geology, mining, beneficiation, metallurgy and environment. Process mineralogy, owing to its intuitive and simple research methods, has gradually made it a dominant subject in geological metallurgy modeling. The study of process mineralogy requires a small number of samples to be collected, but it represents the variation of the deposit. The process mineralogy parameters can be used as the basis to divide the mineralization area and realize the separate mining and separation, and finally, to realize energy – saving,

efficient and comprehensive utilization of mineral resources. The research results of process mineralogy, such as mineral content and the element occurrence state, can be directly used in model evaluation. While the disseminating size and relationship between minerals represent a statistical combination of information. The common method is to split the combined information and then perform the ratio correction, which is the main difficulty in parameter simulation and needs to be further studied. The process mineralogy parameter of the sample can be considered as a spatial point parameter. The point parameter expansion into the spatial body parameter is often referred to as parameter simulation. The parametric simulation method is developing rapidly. Common methods include the nearest neighbours method; the Inverse power exponent distance method; the ordinary kriging method; and the multiple regression method. Selecting the appropriate parametric simulation method for process mineralogy is one of the important contents of modeling.

Keywords: Geometallurgy; Process mineralogy; Sample collection; Process mineralogy parameters; Parameter estimation

////////////////////////////////////
(上接 48 页)

Research on Efficient Separation Mo for Cu-Mo Mixed Concentrate from Guangdong Copper-molybdenum Polymetallic Sulfide Ore

Yang Kaizhi¹, Chen Hongbing², Hu Zhen¹, Li Peilun¹

(1. Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Development and Comprehensive Utilization of Mineral Resource, Guangzhou, Guangdong, China;

2. Kafang Branch Co., Ltd., Yunnan Tin Group, Gejiu, Yunnan, China)

Abstract: In order to separate molybdenum from copper-molybdenum polymetallic sulfide concentrate with 1.62% Mo, the heating de-reagent - flotation process was explored. Through the process of heating de-reagent with the temperature of 90 °C and time of 2.5 hours and one roughing, four cleanings and one scavenging closed-circuit flotation process with the selective collector of MY, the Mo concentrate with 45.24% molybdenum and recovery of 86.88% was obtained, and other valuable metallic elements such as copper and bismuth were enriched into Mo tailings. The problem of difficult separation of molybdenum from copper-molybdenum polymetallic sulfide concentrate was solved effectively.

Keywords: Copper-molybdenum polymetallic sulfide concentrate; Mixed concentrate; Heating de-reagent; Flotation; Selective collector