

高基体样品进样系统-电感耦合等离子体质谱法 测定进口铜精矿中稀土元素的含量

王 斌^{1,2}, 郑少锋², 李伟才², 钟康华², 甘久林¹, 杨中民¹, 宋武元^{3*}

1. 发光材料与器件国家重点实验室, 华南理工大学, 广东 广州 510641
2. 国家消费品安全检测重点实验室, 黄埔海关技术中心, 广东 东莞 523070
3. 广州海关技术中心, 广东 广州 510623

摘 要 铜精矿的铜含量在20%~30%,是冶炼铜的基础矿物原料,由于地质因素和冶炼技术的差别,世界各矿区铜精矿的等级存在差异,加之近年来,铜精矿掺假造假、伪报瞒报、有毒有害元素超标等案件多发,对国家和人民的的生活和经济发展造成了危害,建立进口铜精矿产地溯源和特征成分分析方法,在口岸执法方面可以提供有效技术支持。本研究应用电感耦合等离子体质谱仪测定铜精矿样品中的钇、镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铈、镉、铟、铊、铋、钨、钼、钽、铌、铪、铀、钍等15种稀土元素含量。铜精矿的物理化学性质相对稳定,针对铜精矿中稀土元素的消解方法有碱熔法、微波消解酸溶法和常压酸溶法,实验采用改进的常压酸溶法对样品进行消解,选取具有代表性的5#,6#,13#,16#和18#不同稀土元素含量的铜精矿样品,通过对氢氟酸、高氯酸、勒福特王水三种强酸的加入顺序和用量进行试验,得到了所有铜精矿样品能够完全溶解,而且用量合理的混合强酸体系最佳方案为3 mL 氢氟酸-1 mL 高氯酸-3 mL 勒福特王水。铜精矿属于高基体样品,其硅酸盐、碳酸盐等高盐化合物会对稀土元素分析带来基体干扰,本研究比较了电感耦合等离子体质谱仪的普通模式和高基体样品进样模式下样品的分析效果,普通模式时稀土元素工作曲线的一元线性结果较差,高基体进样模式时工作曲线的线性相关系数都在0.999 4以上,定量范围在2.25~110.00 mg·kg⁻¹,检出限在0.008 1~0.072 5 μg·L⁻¹。选取13#铜精矿样品进行方法的回收率试验,回收率在97.4%~103.0%,精密度小于3.1%。同时,选用与铜精矿样品组成相似的GBW07105玄武岩岩石成分分析标准物质和GBW07234铜矿石标准物质,按照本实验方法,对稀土元素含量进行测定,考察了在本方法测定范围内的稀土元素Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd和Dy的含量,测定值都在标准物质标准值范围内。该方法快速、有效、准确,易于操作,可以为进口铜精矿的矿区辨识提供有力技术支撑。

关键词 铜精矿;电感耦合等离子体质谱仪;稀土

中图分类号: O657.31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1822-05

引 言

铜是人类最早发现和使用的金属之一,在金属材料消费量中仅次于铁和铝,成为国计民生和国防工程乃至高新技术领域中不可缺少的基础材料和战略物资。铜精矿作为冶炼铜的重要矿物基础资源,不同矿区产出的铜精矿由于地质成因差异,加之冶炼工艺的差别和含量造假等情况,会导致进口铜精矿的伪报、掺假、有毒有害元素超标等案件发生^[1]。因

此,建立进口铜精矿产地识别方法,将为口岸执法提供有效技术支持。

本实验按照不同的方法^[2-5]对智利、秘鲁、菲律宾、西班牙、纳米比亚、伊朗、马来西亚和阿尔巴尼亚等八个国家,不同矿区的铜精矿样品中的稀土元素含量进行了分析,结合前期工作的研究^[6-8],提出了氢氟酸(H)-高氯酸(P)-勒福特王水(L)混合强酸(MA)高温常压消解体系处理铜精矿样品的方法,同时结合电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)高基体进样系统(HMIs),建立了MA-HMIs-ICP-MS法测定铜精

收稿日期: 2021-04-20, 修订日期: 2021-07-16

基金项目: 国家重点计划研发项目(2018YFF0215400)资助

作者简介: 王 斌, 1981年生, 黄埔海关技术中心高级工程师 e-mail: abin230@163.com

* 通讯作者 e-mail: swyciq@126.com

矿中稀土元素含量的方法。作为前期工作的延续和发展, 本实验论述了混合强酸消解体系最优用法的确定过程, 同时, 通过对 ICP-MS 工作曲线的分析, 阐述了 HMI 对于铜精矿样品中稀土元素含量测定的优势。

1 实验部分

1.1 样品

将铜精矿样品用切割式研磨仪和超离心研磨仪粉碎, 过孔径 0.07 mm 筛, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下烘干 2 h 后, 称取铜精矿样品 0.1 g, 精确至 0.000 1 g, 置于消解罐中, 加入 3 mL HF 后置于石墨消解器, 升温至 $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$, 加入 1 mL HClO_4 , 升温至 $(160 \pm 10)^\circ\text{C}$, 加入 3 mL 勒福特王水, 升温至 $(230 \pm 10)^\circ\text{C}$, 待溶液几近蒸干, 冷却定容至 50 mL, 待测, 同时做基体空白。

1.2 仪器及参数

7700s 型电感耦合等离子体原子发射质谱仪(ICP-MS), 配有高基体样品进样系统(HMI), He gas 和 No gas 两种碰撞模式可选(美国 Agilent 公司); Lab Tech EHD54 型石墨消解器(北京莱伯泰科公司); ZM 200 超离心研磨仪(德国 Retsch 公司); SM2000 切割式研磨仪(德国 Retsch 公司)。

发射功率 1 660 W; 采样深度 10.0 mm; 载气 $0.35 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 蠕动泵 0.10 rps; 雾化室温度 2°C ; 稀释气体 $0.61 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 氦气流量 $5.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 检测系统^[8]为 HMI, He gas 碰撞模式。

1.3 试剂

钇(Y)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、铥(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu), $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 混合元素标准溶液(国家有色金属及电子材料分析测试中心); 高氯酸(HClO_4)、硝酸(HNO_3)、氢氟酸(HF)、盐酸(HCl)均为优级纯试剂; 实验用水为二次超纯水, 电阻率 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 高基体样品进样(引入)系统

高基体样品进样(引入)系统(HMI)是将 ICP-MS 的稳定性等性能对于高溶解固体的耐受能力与气溶胶稀释法相结合, 使 ICP-MS 对高基体样品中元素分析能力进一步提高, 由于是采用氦气(Ar)气体稀释原理, 既消除了液体稀释的步骤, 提高了效率, 又维持了高温、更稳定的等离子体, 同时, 选择 He gas 碰撞模式, 在反应池中不会形成新的干扰物, 待测元素也不因副反应而损失, 提高了准确度^[9]。选取铜精矿样品中高含量元素 La 和低含量元素 Eu 为例, 比较使用 HMI 前后的工作曲线上各浓度点的强度, 见表 1。

表 1 中所示, 在进行 La 和 Eu 元素分析时, 选择了 HMI 模式的同浓度点的强度值都小于未选用 HMI 模式(普通模式)的强度, 说明 HMI 对进样浓度确是进行了气溶胶稀释。在浓度为 0.00 和 5.00 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 普通模式的强

度约为 HMI 模式的两倍, 理论上, $10.00 \sim 200.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 这 5 个浓度点在不同模式下的强度关系应该也是类似比例, 但是随着浓度增大, 两种模式下的强度倍数关系逐渐缩小, 这并不是说明普通模式中 La 和 Eu 的强度值随着浓度增大而减小, 而是随着进样时间和进样量的增加, 高基体样品的高盐成分逐渐堆积在采样锥、截取锥和离子透镜等部件上, 阻碍检测器对特征信号的采集。选择 HMI 模式可以大大提高等离子体的耐受性、并且减少基体的抑制效应。同时, 本实验对 ICP-MS 普通模式下的 La 和 Eu 的浓度与强度关系进行了拟合分析, 见图 1。

表 1 La 和 Eu 各浓度点的强度

Table 1 Intensity of La and Eu at each concentration

浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	La		Eu	
	强度(普通 模式) /CPS	强度 (HMI) /CPS	强度(普通 模式) /CPS	强度 (HMI) /CPS
0	142	76	58	31
5	25 131	13 040	20 981	11 084
10	48 131	26 024	40 660	21 575
25	105 228	62 628	98 347	52 236
50	199 843	117 676	178 384	98 627
100	368 915	223 061	338 759	186 521
200	675 916	469 414	602 837	393 496

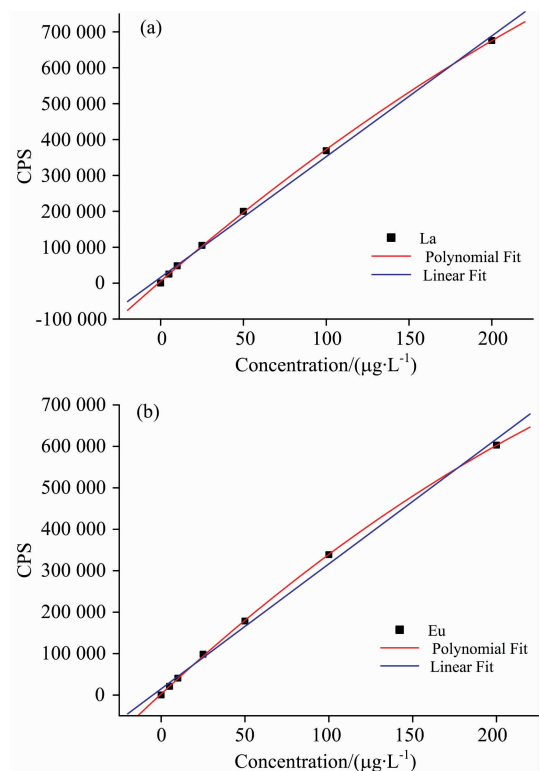


图 1 拟合曲线

(a): La; (b): Eu

Fig. 1 The fitting curves

(a): La; (b): Eu

在 ICP-MS 元素定量分析研究中,标准工作曲线的拟合可以用一元线性方程($Y=a+bX$),如果一元线性拟合结果不满意(一般是线性相关系数在 0.999 0 以下),就可以考虑到二元曲线方程($Y=a+bX+cX^2$)。图 1 中蓝色直线为一元线性方程: $Y=15\ 963.216\ 18+3\ 362.983\ 3X$ 和 $Y=14\ 917.921\ 14+3\ 014.360\ 39X$, 线性相关系数 0.998 5 和 0.997 7, 一元线性拟合结果不理想; 红色曲线为二元拟合曲线, 拟合方程为: $Y=5\ 277.113\ 35+3\ 995.971\ 46X-3.231\ 22X^2$ 和 $Y=2\ 762.559\ 98+3\ 734.379\ 64X-3.675\ 49X^2$, 线性相关系数 0.999 8 和 0.999 9, 拟合结果看似满意, 由曲线趋势看, La 和 Eu 的强度随浓度增加而增大, 但其实这种现象的发生是因为随着进样时间和进样量的增加, 高基体对信号采集系统的阻碍而造成, 属于不同的概念, 二元拟合曲线不能用于稀土元素定量分析。

2.2 混合强酸消解体系的选择

混合强酸的加入顺序和加入量对于成分复杂的铜精矿的消解有着重要作用^[10]。HF 用于消解铜精矿中主量的硅酸盐类、碳酸盐类等物质和部分金属单质, 需要第一步加入。第二步加入 $HClO_4$ 可以在 HF 反应后除去残留的非金属单质。然后, 加入勒福特王水(Lefort aqua regia)溶解残余的金属单质、硫化物。

随着每种强酸加入量由少到多的变化, 铜精矿样品中稀土元素的溶解量是逐渐增加的。为了确定每种酸的最优加入量, 采用序贯试验法^[11], 变换其中一种酸的用量, 另外两种酸的用量保持不变, 加入量的变化梯度为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 和 4.0 mL, 计算目标元素的含量, 用以考察消解效果。以 Ce 为例, Ce 的含量作为研究对象, 随着用于消解的强酸加入量的增加, 铜精矿样品的溶解趋于完全。选取编号为: 5[#], 6[#], 13[#], 16[#] 和 18[#] 的 5 种不同含量的铜精矿样品。首先, 加入 0.5 mL HF, 然后, 加入过量(5.0 mL 以上)的 $HClO_4$ 和特福特王水, 为了减少污染和浪费, 此步确定加入 $HClO_4$ 和特福特王水的量都为 6.0 mL, 以样品中 Ce 元素含量的测定值达到稳定时的用量为 HF 的最优加入量, 见图 2。依次考察 $HClO_4$ 和特福特王水的最优加入量。

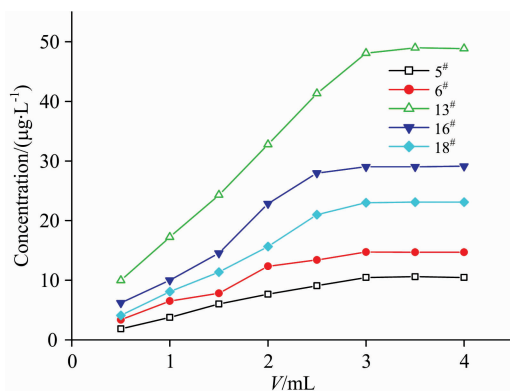


图 2 氢氟酸加入量对消解效果的影响

Fig. 2 Influence of the amount of Hydrofluoric acid on the effect

从图 2 可以看出, HF 加入量为 3 mL 时, 所选样品中 Ce 的含量测定值趋于稳定, 说明 3.0 mL 为 HF 最佳加入量。按照此方法确定 $HClO_4$ 、勒福特王水的加入量分别为 1.0 和 3.0 mL 时为最佳加入量。然后, 按照上述混合强酸的加入量对其他铜精矿样品进行消解, 样品完全消解, 溶液澄清透明, 所以, 当 HF(H)、 $HClO_4$ (P)、勒福特王水(L)的加入量分别为 3.0, 1.0 和 3.0 mL 时, 为最佳混合强酸体系最佳加入量。

2.3 工作曲线和检出限

用实验空白溶液对稀土混合元素标准溶液进行逐级稀释, 绘制工作曲线, 浓度点为 0.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00 和 200.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 以最高与最低浓度点扩展 10% 计算线性范围为 4.50~220.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 按照实验方法, 各稀土元素定量范围为 2.25~110.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时, 对基体空白溶液进行 9 次平行测定, 计算相对标准偏差, 以相对标准偏差的 3 倍作为各元素的检出限。各元素的线性回归方程、相关系数、检出限, 见表 2。

表 2 线性回归方程、检出限

Table 2 Linear regression equation and detection limit

元素	线性回归方程	相关系数	检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Y	$Y=46.666\ 7+767.984\ 6X$	0.999 5	0.013 0
La	$Y=75.556\ 7+2\ 327.407\ 4X$	0.999 4	0.038 5
Ce	$Y=322.230\ 0+3\ 178.348\ 5X$	0.999 5	0.011 9
Pr	$Y=67.780\ 0+2\ 898.777\ 2X$	0.999 5	0.010 5
Nd	$Y=24.443\ 3+566.801\ 1X$	0.999 4	0.072 5
Sm	$Y=10.000\ 0+484.723\ 4X$	0.999 5	0.054 6
Eu	$Y=31.110\ 0+1\ 950.188\ 7X$	0.999 4	0.018 0
Gd	$Y=22.220\ 0+1\ 099.016\ 6X$	0.999 5	0.022 8
Tb	$Y=98.890\ 0+5\ 707.955\ 8X$	0.999 4	0.008 1
Dy	$Y=30.003\ 3+1\ 292.468\ 7X$	0.999 5	0.013 4
Ho	$Y=103.336\ 7+5\ 543.168\ 2X$	0.999 5	0.021 3
Er	$Y=36.666\ 7+1\ 969.866\ 3X$	0.999 6	0.010 1
Tm	$Y=105.556\ 7+6\ 527.218\ 6X$	0.999 5	0.010 2
Yb	$Y=41.110\ 0+1\ 536.956\ 4X$	0.999 6	0.042 3
Lu	$Y=48.890\ 0+2\ 900.869\ 4X$	0.999 4	0.010 6

表 2 所示, 选择 HMI 模式建立的铜精矿中稀土元素工作曲线, 其相关系数都在 0.9994 以上, 线性良好, 检出限在 0.008 1~0.072 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 本方法可以用于铜精矿中稀土元素的定量分析。

2.4 回收率、精密度和准确度

按照实验方法, 选取 13[#] 铜精矿样品进行加标回收率试验, 加标量为 50.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时测定 9 次, 计算回收率在 97.4%~103.0%, 精密度均低于 3.1%, 见表 3。

由表 3 可知, 回收率实验采用铜精矿样品作为基体, 很好的与实际样品的前处理和稀土元素的测定条件保持一致, 可以考察本方法的有效情况。但是, 实际样品的测定值不是经过鉴定的标准值^[12], 需要用标准物质或标准样品进行本实验方法的准确度评估, 选用与铜精矿样品组成相似的 GBW07105 玄武岩岩石成分分析标准物质和 GBW07234 铜

矿石标准物质，按照实验方法，对稀土元素含量进行测定，见图 3。

表 3 回收率及精密度

Table 3 Result of recovery and precision

元素	计算值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	测定值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	回收率/ %	精密度/ %
Y	88.85	90.45	101.8	2.7
La	72.82	74.74	102.5	1.8
Ce	84.41	86.97	103.0	2.3
Pr	55.54	56.14	101.1	2.1
Nd	73.26	75.01	102.4	2.0
Sm	55.31	55.14	99.7	2.5
Eu	51.91	50.97	98.2	2.7
Gd	56.82	56.16	98.8	2.7
Tb	50.73	50.48	99.5	2.4
Dy	56.10	55.24	98.5	3.1
Ho	51.29	50.37	98.2	2.4
Er	53.74	53.29	99.2	2.6
Tm	50.51	49.92	98.8	3.0
Yb	53.17	51.77	97.4	2.5
Lu	50.16	49.15	98.0	2.8

图 3 表明，准确度实验选取了与铜精矿样品中稀土含量相似的标准物质，考察了在本方法测定范围内的稀土元素 Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd 和 Dy 的含量，测定值都在标准物质标准值范围内，说明本方法准确、有效。

3 结 论

在碱熔法、微波消解法等方法研究工作的基础上，采用序贯试验法确定了可靠、有效的高温常压混合强酸消解体系，提高了工作效率，也减少了对环境的污染。应用 ICP-MS 的 HMI_s He gas 模式大大降低了复杂高基体对稀土元素分析的影响，对普通模式和高基体样品进样系统进行了比较，

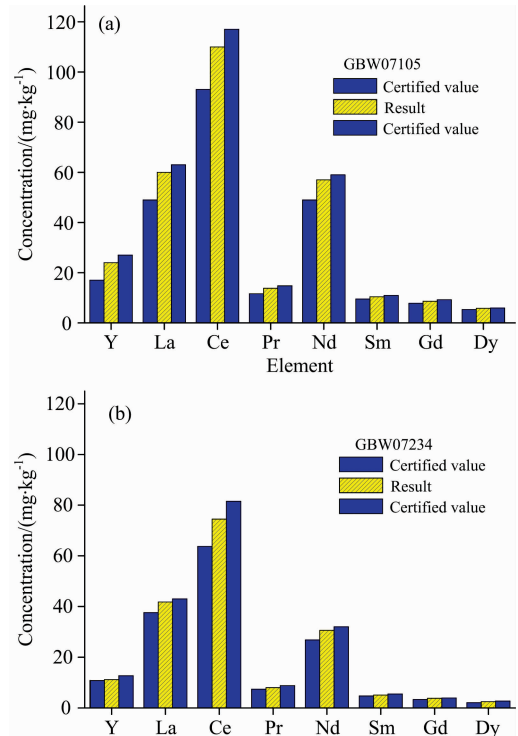


图 3 测定结果

(a): GBW07105; (b): GBW07234

Fig. 3 Determination results

(a): GBW07105; (b): GBW07234

提供了铜精矿中稀土元素分析的思路与做法。从方法的回收率、检出限、精密度、准确度的分析结果来看，本方法既达到了铜精矿样品完全消解的目的，又可以进行准确的稀土元素定量分析，可以为进口铜精矿产地溯源提供有力依据，为后续的 X 射线荧光光谱法和激光诱导击穿光谱法测定铜精矿中稀土元素含量奠定基础，也为铜精矿中稀土元素含量梯度标准样品的研制提供技术支撑。

References

- [1] LIU Qian, QIN Ye-qiong, LIU Shu, et al(刘倩, 秦晔琼, 刘曙, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(9): 2884.
- [2] GB/T 14506.29—2010 Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks-Part 29: Determination of 22 Elements Including Rare Earth Elements(GB/T 14506.29—2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第 29 部分: 稀土等 22 个元素量测定).
- [3] YANG Yue-heng, ZHANG Hong-fu, LIU Ying, et al(杨岳衡, 张宏福, 刘颖, 等). Acta Petrologica Sinica(岩石学报), 2007, (2): 227.
- [4] FENG Xian-jin(冯先进). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2020, 40(6): 21.
- [5] GONG Hai-juan, WANG Yu, HAN Jian, et al(巩海娟, 王玉, 韩健, 等). Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry(中国无机分析化学), 2020, 10(2): 42.
- [6] WANG Bin, ZHANG Jiang-feng, WEN Jian-chang, et al(王斌, 张江峰, 温健昌, 等). Journal of the Chinese Society of Rare Earths(中国稀土学报), 2015, 33(1): 124.
- [7] WANG Bin, ZHANG Jiang-feng, JIANG Xiao-liang, et al(王斌, 张江峰, 蒋小良, 等). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2015, 51(5): 707.
- [8] WANG Bin, LIU Ying-qing, JIANG Xiao-liang, et al(王斌, 柳映青, 蒋小良, 等). China Dyeing & Finishing(印染), 2014, 40(11): 41.
- [9] LI Bing, HU Jing-yu, ZHAO Mo-tian, et al(李冰, 胡静宇, 赵墨田, 等). Journal of Chinese Mass Spectrometry Society(质谱学报),

2010, 31(1): 1.

- [10] YIN Chang-hui, YUAN Yong-hai, YANG Feng(尹昌慧, 袁永海, 杨 锋). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2020, 56(5): 532.
- [11] LUO Zi-yi, HUANG Lin, LIU Mu-hua, et al(罗子奕, 黄 林, 刘木华, 等). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析实验室), 2018, 37(12): 1384.
- [12] GB/T 15000.2—2019 Directive for the Work of Reference Materials-Part 2: Selected Terms and Definitions(GB/T 15000.2—2019 标准样品工作导则 第 2 部分: 常用术语及定义).

Determination of Rare Earth Elements in Imported Copper Concentrate by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry With High Matrix Injection System

WANG Bin^{1,2}, ZHENG Shao-feng², LI Wei-cai², ZHONG Kang-hua², GAN Jiu-lin¹, YANG Zhong-min¹, SONG Wu-yuan^{3*}

1. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China
2. State Key Testing Laboratory of Consumer Products, Huangpu Customs Technology Center, Dongguan 523070, China
3. Guangzhou Customs District Technology Center, Guangzhou 510623, China

Abstract Copper concentrate has a copper content of 20%~30%, which is the basic mineral raw material for copper smelting. Due to the difference between geological factors and smelting technology, the grade of copper concentrate in various mining areas in the world is different. In recent years, copper concentrate adulteration, false report and concealment, toxic and harmful elements exceeding the standard cases frequently occur, causing harm to the country and people's life and economy. Establishing the origin traceability and characteristic component analysis method of imported copper concentrate can provide effective technical support to port law enforcement. The contents of 15 rare earth elements, such as yttrium, lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium and lutetium, in copper concentrate samples were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. The chemical and physical properties of copper concentrate is relatively stable, aiming at the digestion method of rare earth elements in copper concentrate with acid-soluble alkali fusion method, microwave method and the method of atmospheric acid-soluble. This experiment adopts the samples improved atmospheric acid-soluble method to eliminate and select a representative sample of 5#, 6#, 13#, 16#, 18# samples of different rare earth elements content of copper concentrate, Through the tests on the addition order and dosage of hydrofluoric acid, perchloric acid and Lefter aqua regia, the best solution of the mixed strong acid system with reasonable dosage was 3 mL hydrofluoric acid-1 mL perchloric acid-3 mL Lefter aqua regia, which could completely dissolve all copper concentrate samples. Copper concentrate was a high substrate samples that silicate and carbonate salt compounds can bring matrix interference analysis of rare earth elements. In this study, the analysis results of the common mode of ICP-MS and the high matrix sample injection mode were compared. The unary linear results of rare earth elements working curves in common mode were poor, and the linear correlation coefficients of rare earth elements working curves in high matrix mode were above 0.999 4. The quantitative range was 2.25~110.00 mg·kg⁻¹, and the detection limits were 0.008 1~0.072 5 μg·L⁻¹. The recovery rate of 13# copper concentrate was 97.4%~103.0%, and the precision was less than 3.1%. At the same time, GBW07105 basalt rock composition analysis reference material and GBW07234 copper ore reference material, which are similar to the copper concentrate sample composition, are selected to determine the content of rare earth elements according to this experimental method. The contents of rare earth elements Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd and Dy within the determination range of this method are investigated. The measured values are within the range of standard values of reference materials. This method is rapid, effective, accurate and easy to operate and can provide strong technical support for identifying imported copper concentrate.

Keywords Copper concentrate; Inductively coupled plasma mass spectrometry; Rare earth

* Corresponding author

(Received Apr. 20, 2021; accepted Jul. 16, 2021)