原子吸收光谱法测定金矿石中金含量的测量不确定度评定①

许彬[1]，刘春艳[2]，杨炳红[1]，彭颖[1]，刘艳花[1]，杨林[1]，张志勇[3]
（1.长沙矿冶院检测技术有限责任公司，湖南 长沙 410012；2.湖南化工职业技术学院，湖南 株洲 412000；3.湖南安全技术职业学院，湖南 长沙 410151）

摘　要：依据 GB/T 20899.1—2019 标准，针对火试金-原子吸收光谱技术测定金矿石中金含量的试验，通过构建数学模型，分析并计算了多种来源的测量不确定度。经过合成计算，当金矿石的金含量为 2.28 g/t 时，该方法的标准不确定度为 0.04 g/t，包含因子 k 为 2 时，扩展不确定度为 0.08 g/t。通过对比各来源的不确定度发现，样品重复性测量、标准曲线拟合对不确定度结果的影响较大。因此，建议确保测量仪器处于较佳状态，并增加重复测量次数，以降低测量不确定度。

关键词：原子吸收光谱；金矿石；金；不确定度；化学分析
中图分类号：TF831　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.030
文章编号：0253-6099(2026)03-0204-06

Evaluation of Measurement Uncertainty in Determining Gold Content in Gold Ore by Atomic Absorption Spectrometry

XU Bin[1], LIU Chunyan[2], YANG Binghong[1], PENG Ying[1], LIU Yanhua[1], YANG Lin[1], ZHANG Zhiyong[3]
(1. *Testing Technology Company of Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2. *Hunan Chemical Vocational Technology College*, *Zhuzhou* 412000, *Hunan*, *China*; 3. *Hunan Vocational Institute of Safety Technology*, *Changsha* 410151, *Hunan*, *China*)

Abstract: In accordance with GB/T 20899.1-2019, a mathematical model was established to analyze and calculate uncertainties from various sources in determining gold content in gold ores by fire assay combined with atomic absorption spectroscopy. Based on the combined calculation, it is shown that when the gold content of the ore samples is 2.28 g/t, the standard uncertainty of this method is 0.04 g/t, and with a coverage factor k = 2, the expanded uncertainty is 0.08 g/t. Comparison of uncertainty contributions indicates that repeatability of sample measurement and standard curve fitting are the major influencing factors. Therefore, it is recommended that measuring instruments should be kept in optimal condition, and the number of replicate measurements be increased to reduce measurement uncertainty.

Key words: atomic absorption spectroscopy; gold ore; gold; uncertainty; chemical analysis

不确定度用于表征被测量值的分布广度（分散性），是反映测量结果质量的重要指标[1]。较低的不确定度意味着测量结果品质更高，表明结果具有更高的可信度。当不确定度增高时，测量结果的品质和精确性下降，其使用效益也随之减少。科学合理地评估测量结果的不确定度，既可系统梳理检测全流程误差来源，进而完善检测方法、提升分析准确度与可靠性，又能客观评估检测数据可信度，还可为不同检测方法间和不同实验室间的数据比对与结果评价提供依据[2-4]。

原子吸收光谱法测量结果不确定度的来源主要包括：校准、样品前处理、曲线修正、仪器综合稳定性及样品重复测试的不确定性[5-10]。黄金是国家的关键战略储备资源，准确测定矿石中的金含量，并提供相应的测

① **收稿日期**：2025-12-20
基金项目：湖南省自然科学基金(2024JJ8042)
作者简介：许彬(1982—)，女，湖南华容人，高级工程师，主要从事矿物化学成分分析、化学物相分析。E-mail：83260714@qq.com
通信作者：张志勇(1979—)，男，湖南茶陵人，博士，正高级工程师，主要研究方向为岩矿与冶金材料分析测试、矿物资源综合利用。E-mail：394105549@qq.com

量不确定度,对于金矿勘查、储量评估与矿山经济核算非常重要[11]。本文根据 GB/T 27418—2017[2],采用 GB/T 20899.1—2019《金矿石化学分析方法　第 1 部分:金量的测定》[12]对湖南某矿区金矿石样品进行分析试验,评估原子吸收光谱法测定金矿石中金含量的测量不确定度。在分析评估不同不确定度来源贡献的基础上,提出火试金-原子吸收法测定金矿石中金含量测试条件改进的建议。

1　试验部分

1.1　试验样品

试验样品为湖南某矿区的金矿石原矿。此金矿石的主要矿物包括石英、白云母和黄铁矿,其化学多元素分析结果见表 1。

表 1　金矿石原矿多元素分析结果(质量分数)

Table 1　Multi-elemental analysis results of gold ore　%

Au[1)]	S	Fe	As	C	K_2O
2.28	1.02	3.75	0.80	0.20	4.40
Na_2O	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	
0.66	0.069	0.59	65.16	15.79	

1) 单位为 g/t。

1.2　主要仪器和试剂

主要仪器及设备包括:AG135 型电子天平(梅特勒-托利多),最大允许误差±0.1 mg;XP06 型电子天平(梅特勒-托利多),最大允许误差±0.01 mg;SPX622ZH 型托盘天平,最大允许误差±0.01 g;SX-6-13 型箱式电阻炉;SL-12-13SJYW 型箱式电阻炉;WYS2000 型火焰原子吸收分光光度计(附金空心阴极灯);试金坩埚,材质为耐火黏土,容积约 300 mL;镁砂灰皿,容积约 15 mL。

关键试剂包括工业纯试剂碳酸钠、玻璃粉、氧化铅、硼砂、二氧化硅、硝酸钾,分析纯试剂盐酸、硝酸;王水由盐酸、硝酸按体积比 3∶1混合而成。试验用水为一级水[13]。

金标准储备母液和金标准溶液的制备:按照 GB/T 20899.1—2019制备 1.00 mg/mL 金标准储备母液和 100 μg/mL 金标准溶液。

1.3　分析步骤

称取 30.0 g 样品,精确至 0.01 g,将其与碳酸钠、氧化铅、玻璃粉、二氧化硅、硼砂和硝酸钾混合均匀,放入黏土坩埚内,接着加入 1.0 mL 硝酸银溶液,并覆盖大约 10 mm 厚的碳酸钠和硼砂混合物。置于800 ℃电阻炉中,升温至 930 ℃并保持 15 min,然后继续升温至 1 100 ℃,维持 10 min 后取出。将容器旋转几次,然后将其倒入已预热的铸铁模具中。待其冷却后,将铅扣从熔渣中分离出来。将试金铅扣置于镁砂容器中,加热至 900 ℃进行灰吹,以形成合粒。使用王水在较低温度下溶解合粒,然后用盐酸将溶液定容至 50 mL,准备进行检测[12]。

1.4　标准溶液的配制

在一系列 100 mL 容量瓶中,依次加入 0、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 mL 金标准溶液(质量浓度 100 μg/mL),随后加入 5 mL 盐酸溶液(1+19),用水稀释至刻度,充分混匀,得到一组标准溶液,浓度分别为 0、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 μg/mL。

2　结果与讨论

2.1　数学模型的建立

原子吸收光谱法测定金矿石中金含量的计算公式为:

$$\omega_{Au} = \frac{(\rho - \rho_0) \times V}{m} \tag{1}$$

式中:ω_{Au}为金含量,g/t;ρ 为自工作曲线上查得的试液的金质量浓度,μg/mL;ρ_0 为自工作曲线上查得的空白试液的金质量浓度,μg/mL;V 为试液的总体积,mL;m 为试料质量,g。

分析结果小于 10.0 g/t 时,结果保留两位小数;分析结果大于 10.0 g/t 时,结果保留一位小数。

2.2　不确定度来源分析

利用原子吸收光谱法测量金矿石中金含量时,不确定度主要源于 5 个方面:① 金标准储备溶液配制的不确定性;② 样品在称重过程中带来的不确定性;③ 待测溶液在定容时产生的不确定性;④ 样品测量的重复性引起的不确定性;⑤ 标准曲线拟合产生的偏差。

2.2.1　金标准储备溶液配制的不确定度

金粒的纯度 P 为(99.99±0.01)%,以均匀分布估算[1],由金的纯度引入的标准不确定度 $u(P)$为:

$$u(P) = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.005\,8\%$$

则相对标准不确定度 $u_{rel}(P)$为:

$$u_{rel}(P) = \frac{0.005\,8}{99.99} = 0.000\,058$$

本实验用梅特勒-托利多 XP06 型电子天平称取纯金,最大允许误差±0.01 mg,称量误差落在此区间概率以均匀分布估算。前后 2 次称量,先称量空烧杯,再称总重,则由称量引入的标准不确定度 $u(m_{Au})$为:

$$u(m_{Au}) = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.01}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.008\,2(\text{mg})$$

$m=0.50$ g时,相对标准不确定度 $u_{rel}(m_{Au})$ 为:

$$u_{rel}(m_{Au}) = \frac{0.008\,2}{500} = 0.000\,016$$

采用A级500 mL容量瓶,根据JJG 196—2006[14],其容量允许误差为±0.25 mL,则容量误差分布区间半宽取0.25 mL,按三角分布估算[4],$k=\sqrt{6}$,使用500 mL容量瓶定容2次,容量瓶容量校准引起的标准不确定度 $u_1(V_{500})$ 为:

$$u_1(V_{500}) = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.25}{\sqrt{6}}\right)^2} = 0.14(\text{mL})$$

室内温度变动±5 ℃,容量瓶和溶液的体积膨胀系数均为 2.1×10^{-4} ℃$^{-1}$,由此产生的体积波动分布区间半宽 $\alpha = V_{500}\times5\times2.1\times10^{-4}$(mL),以矩形分布估算[4],$k=\sqrt{3}$。500 mL容量瓶定容2次,温度变化引起的标准不确定度 $u_2(V_{500})$ 为:

$$u_2(V_{500}) = \sqrt{2 \times \left(\frac{500 \times 5 \times 2.1 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.43(\text{mL})$$

综上,由容量瓶引入的合成标准不确定度 $u(V_{500})$ 为:

$$u(V_{500}) = \sqrt{u_1^2(V_{500}) + u_2^2(V_{500})} = \sqrt{0.14^2 + 0.43^2} = 0.45(\text{mL})$$

则2次定容500 mL容量瓶的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(V_{500}) = \frac{0.45}{500} = 0.000\,9$$

以上各项不确定度分量相互独立,所以金标准储备液配制的合成相对标准不确定度 $u_{rel}(A)$ 为:

$$u_{rel}(A) = \sqrt{u_{rel}^2(P) + u_{rel}^2(m_{Au}) + u_{rel}^2(V_{500})} = \sqrt{0.000\,058^2 + 0.000\,016^2 + 0.000\,9^2} = 0.000\,9$$

2.2.2 样品称量环节的不确定度

根据DZ/T 0130—2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》[15]规定,样品经球磨后过0.07 mm筛,混合均匀后再取样,可认为样品均匀,代表性好,因此可忽略由样品代表性引入的不确定度。

试验采用SPX622ZH型托盘天平,最大允许误差±0.01 g。称量2次空盘及总重,按均匀分布计算,样品称量引起的标准不确定度 $u(M)$ 为:

$$u(M) = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.01}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.008\,2(\text{g})$$

称取样品30 g时,相对标准不确定度 $u_{rel}(M)$ 为:

$$u_{rel}(M) = \frac{0.008\,2}{30} = 0.000\,27$$

2.2.3 待测溶液定容时产生的不确定度

分离银后的金溶液移入经鉴定为A级的50 mL容量瓶中定容待测。

由校准产生的标准不确定度为 $u_1(V)$。根据JJG 196—2006,A级50 mL容量瓶允许误差为±0.05 mL,按三角分布估算,$k=\sqrt{6}$,则 $u_1(V)=\frac{0.05}{\sqrt{6}}=0.020(\text{mL})$。

由温度变化产生的标准不确定度为 $u_2(V)$。该容量瓶已在20 ℃校准,而实验室温度在±5 ℃变动。温度变化引入的不确定度可通过温度偏差和体积膨胀系数来进行计算。液体的体积膨胀明显大于容量瓶的体积膨胀,因此,只需考虑前者。

水的体积膨胀系数为 2.1×10^{-4} ℃$^{-1}$,据此求出产生的体积波动为 $\pm50\times5\times2.1\times10^{-4}$,即±0.053 mL。以矩形分布估算,$k=\sqrt{3}$,则 $u_2(V)=\frac{0.053}{\sqrt{3}}=0.031(\text{mL})$。

定容体积为50 mL时,合成标准不确定度 $u(V)$ 为:

$$u(V) = \sqrt{u_1^2(V) + u_2^2(V)} = \sqrt{0.020^2 + 0.031^2} = 0.037(\text{mL})$$

则待测溶液定容引起的相对标准不确定度 $u_{rel}(V)$ 为:

$$u_{rel}(V) = \frac{0.037}{50} = 0.000\,74$$

2.2.4 样品重复性测量引起的不确定度

在重复性试验条件下,对金矿样品进行了7次独立测试,结果依次为:2.19,2.30,2.35,2.21,2.25,2.27,2.42,算术平均值为2.28,单位为g/t。

单次测量结果的标准不确定度 $u(w)$ 为:

$$u(w) = S(w) = \sqrt{\frac{\sum (w_i - w_{平})^2}{n-1}} \quad (2)$$

计算可得:$u(w) = 0.081$(g/t)。

平均值的标准不确定度 $u(w_{平})$ 为:

$$u(w_{平}) = \frac{0.081}{\sqrt{7}} = 0.031(\text{g/t})$$

则相对标准不确定度 $u_{rel}(w_{平})$ 为:

$$u_{rel}(w_{平}) = \frac{0.031}{2.28} = 0.014$$

2.2.5 标准曲线拟合带来的不确定度

金标准溶液的浓度与吸光度数据见表2。根据

表 2 数据,用最小二乘法拟合标准溶液的吸光度 A 与浓度 ρ,所得标准曲线如图 1 所示。

表 2　金标准溶液的浓度与吸光度

Table 2　Concentration and absorbance of gold standard solutions

标准溶液质量浓度 ρ_{Au}/(μg·mL^{-1})	吸光度				
	A_1	A_2	A_3	$A_{平均}$	$A_{理论}$
0	0	0	0	0	0.001 2
1.0	0.101 2	0.100 1	0.100 6	0.100 6	0.101 2
2.0	0.202 3	0.204 9	0.204 6	0.203 9	0.201 2
3.0	0.301 2	0.299 8	0.301 5	0.300 8	0.301 2
4.0	0.403 0	0.402 9	0.403 1	0.403 0	0.401 2
5.0	0.499 9	0.500 0	0.498 5	0.499 5	0.501 2

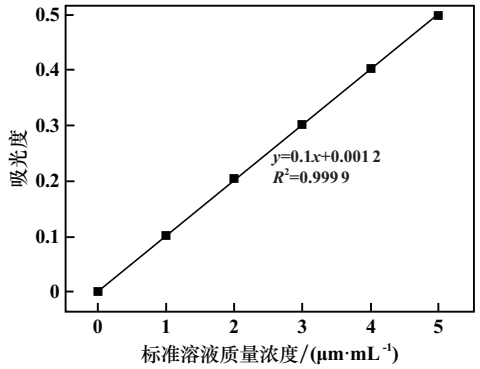


图 1　金标准溶液的吸光度与浓度的拟合曲线

Fig. 1　Fitting curve of absorbance versus concentration for gold standard solution

由图 1 可得,A-ρ 的最小二乘法拟合方程为:

$$A = a + b\rho = 0.001\,2 + 0.1\rho \qquad (3)$$

相关系数 R^2 达到了 0.999 9,表明标准曲线具有极为优异的线性特征。

根据标准溶液的浓度 ρ,利用标准曲线求得金矿石样品吸光度的理论值,标准溶液吸光度存在两种“残差”,一是每项测量值与其组内平均值的偏差,即纯随机误差,二是每组平均值与拟合直线间的偏差,即模型拟合误差。将二者合并,得到一个更稳健的残差标准偏差估计值,即“合并标准偏差”,计算公式[1]为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m}(y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^{k} m[\bar{y}_i - (a + b\rho_i)]^2}{k \cdot m - 2}} \qquad (4)$$

第一部分 $\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m}(y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ 是组内平方和,它计算的是每个浓度水平下,所有重复测量值与其自身平均值的偏差平方和,它反映了测量的重复性误差。该部分的计算结果为 7.74×10^{-6}。

第二部分 $\sum_{i=1}^{k} m[\bar{y}_i - (a + b\rho_i)]^2$ 是回归平方和,它计算的是每个浓度水平的平均响应值 $\bar{y}_i$ 与根据拟合直线计算的响应值 $a+b\rho_i$ 之差的平方和,并用重复次数 m 进行加权,它反映了测量值偏离直线的程度。该部分计算结果为 46.14×10^{-6}。

分母 $k \cdot m - 2$ 表示群体的总自由度数。k 为标准溶液的浓度水平数,m 为每个浓度水平的测量次数,总测量次数为 $k \cdot m$,由于估计了 2 个参数(截距 a 和斜率 b),需要减去 2。本试验的标准溶液测量包括空白在内共 6 个水平浓度,每份溶液测定 3 次,即 $k = 6$, $m = 3$, $k \cdot m - 2 = 16$。

将上述计算结果代入式(4),求得标准溶液吸光值残差的标准偏差 S 为 0.001 8。

浓度离差平方和 Scc 是标准曲线中所有校准点浓度值与其平均浓度值偏差的平方和,其定量描述了标准曲线浓度点的分散程度。Scc 的计算公式[1]为:

$$\mathrm{Scc} = \sum_{i=1}^{k}(\rho_i - \bar{\rho})^2 \qquad (5)$$

k 为浓度水平数,$k = 6$, $\bar{\rho} = (0+1.0+2.0+3.0+4.0+5.0)/6 = 2.5$ μg/mL, ρ_i 为对应的各点的标准溶液浓度值 ρ_{Au},经计算,Scc = 17.5 μg^2/mL^2。

标准曲线拟合时产生的标准不确定度 $u(\rho)$ 计算公式[1]为:

$$u(\rho) = \frac{S}{b}\sqrt{\frac{1}{P} + \frac{1}{n} + \frac{(\rho - \bar{\rho})^2}{\mathrm{Scc}}} \qquad (6)$$

式中:S 为标准溶液吸光值残差的标准偏差;b 为标准曲线方程斜率;P 为样品测量次数;n 为对标准曲线进行测量的总次数;ρ 为由直线方程求得的样品平均浓度;$\bar{\rho}$ 为标准溶液的平均浓度。

对样品溶液中金的含量平行测量 7 次,样品测定吸光度数据见表 3。

表 3　样品测定吸光度数据

Table 3　Measured absorbance of sample

测量次数	吸光度 A	ρ_{Au}/(μg·mL^{-1})
1	0.132 7	1.315
2	0.139 4	1.382
3	0.142 4	1.412
4	0.133 7	1.325
5	0.136 5	1.353
6	0.137 4	1.362
7	0.146 5	1.453
平均值	0.138 4	1.372

根据测得的样品吸光度平均值,利用标准曲线求

得$\rho=1.372$ μg/mL,同时将$S=0.001\ 8$,$b=0.1$ mL/μg,$P=7$,$n=3\times6=18$,Scc=17.5 μg²/mL²,$\bar{\rho}=2.5$ μg/mL代入式(6),求得$u(\rho)=0.009\ 4$ μg/mL,$u_{rel}(\rho)=u(\rho)/\rho=0.006\ 8$。

2.3 合成标准不确定度

金矿石样品金测量的相对标准不确定度一览表如表4所示。

表4 金矿石样品金测量的相对标准不确定度一览表

Table 4 Relative standard uncertainties for gold determination in gold ore samples

相对标准不确定度分量	不确定度来源	相对标准不确定度	不确定度来源分类
$u_{rel}(w_{平})$	样品重复性测量的不确定度	0.014	A
$u_{rel}(\rho)$	标准曲线拟合产生的不确定度	0.006 8	
$u_{rel}(A)$	金标准储备溶液配制的不确定度	0.000 9	
$u_{rel}(M)$	样品称量过程引入的不确定度	0.000 27	B
$u_{rel}(V)$	待测溶液定容引起的不确定度	0.000 74	

由于各类不确定度分量互不相关,将各相对标准不确定度分量进行合成:

$$u_{rel}(\omega)=[(u_{rel}^2(w_{平})+u_{rel}^2(\rho)+u_{rel}^2(A)+u_{rel}^2(M)+u_{rel}^2(V)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

计算可得:

$$u_{rel}(\omega)=[0.014^2+0.006\ 8^2+0.000\ 9^2+0.000\ 27^2+0.000\ 74^2]^{\frac{1}{2}}=0.016$$

合成标准不确定度$u_c(w)$为:

$$u_c(\omega)=0.016\times2.28\approx0.04(\text{g/t})$$

2.4 扩展不确定度

根据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》[1]规定,在95%置信概率下,取包含因子$k=2$,则扩展不确定度为:$U=0.04\times2=0.08$ g/t。则样品中金含量的测定结果为(2.28±0.08) g/t。

2.5 建议

通过评估金矿石样品中金含量测量结果的不确定度以及对5种不确定度来源的比较(见图2),确定影响测量不确定度的主要因素包括样品称量、待测溶液定容、金标液配制、标准曲线拟合及重复性测量。其中,由样品重复性测量、标准曲线拟合的偏差引起的溶液质量浓度的不确定度,对整个不确定度结果的影响较大。因此,为了提升火试金-原子吸收光谱法在检测金矿石样品中金含量的准确性,减少金矿石测定中出现的不确定性,首先要确保测量设备处于最佳工作状态,其次通过增加重复测量的次数来降低由此产生的不确定度。

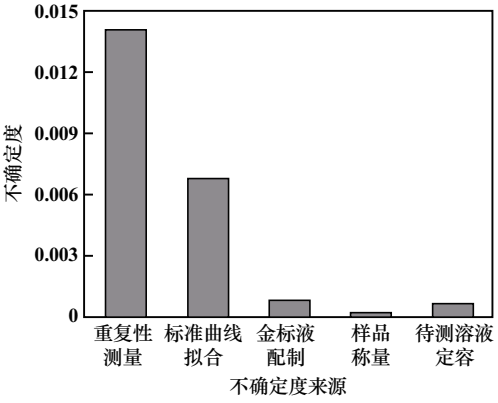


图2 金矿石样品金含量测定的相对标准不确定度来源分布图

Fig. 2 Sources of relative standard uncertainty for gold content in gold ore samples

3 结论

1)采用火试金-火焰原子吸收光谱法测定金矿石的金含量,金含量测定平均值为2.28 g/t,取$k=2$时扩展不确定度为:$U=0.08$ g/t。

2)对金含量测量结果进行了不确定度评估,影响测量不确定度的主要因素包括重复性测试、标准曲线拟合、金标液配制、样品称量和待测溶液定容,其中样品重复性测量、标准曲线拟合的偏差对整个不确定度的结果影响较大。

3)通过调整设备的工作状态和增加重复测量次数,可提升火试金-原子吸收光谱法检测金矿石样品中金含量的准确性,减少金矿石测定中出现的不确定性。

参考文献(References):

[1] JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].
JJF 1059.1—2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S].

[2] GB/T 27418—2017 测量不确定度评定和表示[S].
GB/T 27418—2017 Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement[S].

[3] CNAS GL006-2019 化学分析中不确定度的评估指南[S].
CNAS GL006-2019 Guidance on quantifying uncertainty in chemical analysis[S].

[4] RB/T 030—2020 化学分析中测量不确定度评估指南[S].
RB/T 030—2020 Guidance of quantifying measurement uncertainty in chemical analysis[S].

[5] 王祎亚,马生凤,许春雪,等. 波长色散X射线荧光光谱法测定少量生物样品中的CL及其分析结果不确定度的评估[J]. 中国无机分析化学, 2025,15(5):731-740.
WANG Yiya, MA Shengfeng, XU Chunxue, et al. Determination of

Cl in low-weight biological samples by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry and the evaluation of uncertainty with analytical results[J]. Chinese Jorunal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025,15(5):731-740.

[6] 张婷,丁锐,王静,等. 原子吸收分光光度法测定注射用重组人凝血因子Ⅷ中钙含量及不确定度评价[J]. 药物分析杂志, 2025(1):110-115.
ZHANG Ting, DING Rui, WANG Jing, et al. Determination of calcium content and uncertainty evaluation in recombinant human coagulation factor Ⅷ for injection by atomic absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2025(1):110-115.

[7] 张林涛,罗兰,苏海涛,等. 火焰原子吸收光谱法测定铅合金中锌含量的不确定度评定[J]. 云南化工, 2025,52(10):75-78.
ZHANG Lintao, LUO Lan, SU Haitao, et al. Uncertainty evaluation of zinc content in lead alloys determined by flame atomic absorption spectrometry[J]. Yunnan Chemical Technology, 2025,52(10):75-78.

[8] 侯亚茹,陆继龙,范玉超,等. 原子吸收光谱法测定岩石中铜、铅和锌的不确定度评定及方法改进[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7):2101-2106.
HOU Yaru, LU Jilong, FAN Yuchao, FAN Yuchao, et al. Uncertainty evaluation and method improvement of determination of copper, lead, and zinc in rocks by atomic absorption spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(7):2101-2106.

[9] 罗海霞. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钴铬钨系合金粉末中钨含量的不确定度评定[J]. 冶金分析, 2023,43(11):90-96.
LUO Haixia. Uncertainty evaluation during determination of tungsten content in cobalt-chromium-tungsten alloy powder by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. Metallurgical Analysis, 2023,43(11):90-96.

[10] 姜欣,任莉慧,蒋卓亚. 火焰原子吸收分光光度法测定土壤样品中铜、锌、铅、镍、铬的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2023, 32(3):94-98.
JIANG Xin, REN Lihui, JIANG Zhuoya. Uncertainty evaluation of determination of copper, zinc, lead, nickel and chromium in soil samples by flame atomic absorption spectrophotometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2023,32(3):94-98.

[11] 张生辉,王振涛,李永胜,等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022,42(5):138-168.
ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022,42(5):138-168.

[12] GB/T 20899.1—2019　金矿石化学分析方法　第 1 部分:金量的测定[S].
GB/T 20899.1—2019　Methods for chemical analysis of gold ore: Part 1: Determination of gold content[S].

[13] GB/T 6682—2008　分析实验室用水规格和试验方法[S].
GB/T 6682—2008　Water for analytical laboratory use: Specification and test methods[S].

[14] JJG 196—2006　常用玻璃量器[S].
JJG 196—2006　Working glass container[S].

[15] DZ/T 0130—2006　地质矿产实验室测试质量管理规范[S].
DZ/T 0130—2006　The specification of testing quality management for geological laboratories[S].

引用本文:许彬,刘春艳,杨炳红,等. 原子吸收光谱法测定金矿石中金含量的测量不确定度评定[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):204-209.
XU Bin, LIU Chunyan, YANG Binghong, et al. Evaluation of measurement uncertainty in determining gold content in gold ore by atomic absorption spectrometry[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):204-209.

(上接第 203 页)

[11] JIANG Y, YUE J L, GUO Q B, et al. Highly porous Mn_3O_4 micro/nanocuboids within situ coated carbon as advanced anode material for lithium-ion batteries[J]. Small, 2018,14(19):1704296.

[12] WHITEHEAD C B, ÖZKAR S, FINKE R G. LaMer's 1950 model for particle formation of instantaneous nucleation and diffusion-controlled growth: A historical look at the model's origins, assumptions, equations, and underlying sulfur sol formation kinetics data[J]. Chemistry of Materials, 2019,31(18):7116-7132.

[13] OHTA H, SUITO H. Effects of dissolved oxygen and size distribution on particle coarsening of deoxidation product[J]. ISIJ International, 2006,46(1):42-49.

[14] 杨永斌,张晓萱,廖烺,等. 沉淀-焙烧法制备高振实密度四氧化三锰的研究[J]. 过程工程学报, 2024,24(10):1186-1195.
YANG Yongbin, ZHANG Xiaoxuan, LIAO Lang, et al. Research on the preparation of high tap density trimanganese tetraoxide by precipitation-roasting method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024,24(10):1186-1195.

引用本文:苏有权,张妮,薛兴勇,等. 金属锰粉悬浮氧化法制备锂电池用 Mn_3O_4 的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):199-203.
SU Youquan, ZHANG Ni, XUE Xingyong, et al. Preparation of Mn_3O_4 for lithium batteries by suspension oxidation of manganese metal powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):199-203.