

2021—2024年中国银分析测定的进展

陈永红^{1,2}, 苏广东^{1,2}, 芦新根^{1,2}, 郭嘉鹏^{1,2}, 王菊^{1,2}

(1. 长春黄金研究院有限公司; 2. 国家金银及制品质量检验检测中心(长春))

摘要: 查阅2021—2024年国内发表的银分析测定文献, 分类综述了地质样品、矿石、精矿、其他含银物料、水质、银制品/饰品等样品中银的分析测定, 并介绍了测量不确定度评定在银测定分析中的应用。针对银分析方法, 从技术提升、标准引领、智能检测等方面进行了展望, 以期对银的准确测定提供参考。该文引用文献146篇。

关键词: 银; 分析测定; 进展; 测量不确定度; 智能检测; 综述

中图分类号: TD926.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)04-0001-07

doi: 10.11792/hj20250401

引言

银作为独特的贵金属, 因具有优异的物理性能、化学性能、光学性能、抗菌性和生物相容性, 被广泛应用于各行各业。银可与其他金属形成合金, 最常见的是与铜形成925银, 应用于首饰和珠宝领域。银具有良好的导电性、导热性、反射率, 广泛用于电子和电气行业、光学设备; 具有极佳的延展性, 可被压成薄片(银箔)或拉成细丝(银线)。银具有抗菌特性, 能够抑制细菌与其他微生物生长, 并具有极佳的生物相容性, 被用在人造器官、缝合线及外科植入物中, 在医疗器械和生物材料等领域得到广泛应用。在危机时期, 银作为贵金属还可作为避险资产, 许多国家和企业都关注银的储备和投资。

银主要存在于银矿石和其他矿物中, 主要分布于含银矿床, 常与金、铜、铅、锌和其他金属矿物共生。银资源的开采、选矿、冶炼、提纯、回收利用及贸易等各环节涉及的地质样品、矿石、精矿、冶炼中间产品、纯银及银饰品、含银废水、含银材料等, 均需要准确分析银含量, 银含量对探矿、工艺调节、资源回收利用、贸易结算等方面具有十分重要的影响。

关于银分析测定的方法较多, 根据样品类别的不同, 选择的分析方法也不同。银饰品大多数用作佩戴, 可采用X射线荧光光谱法进行非破坏性检测; 针对银行或上海黄金交易所抽检的银制品, 需对样品中银的结果进行合格判定, 推荐采用破坏性检测, 大多采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES法)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS法)、原子吸收光谱法(AAS法); 针对粗银、银合金样品, 可采用火试金重量法、滴定法分析检测; 针对含银矿物及含银物料, 大

多采用火焰原子吸收光谱法(FAAS法)和ICP-OES法。针对不同类型、用途的样品, 采取的分析检测方法也截然不同, 甚至需要开发新的分析方法来满足日益复杂的含银样品检测。

本文对2021—2024年度不同类型样品中银含量的分析方法进行分类归纳和分析, 综述了地质样品、矿石、精矿、其他含银物料、水质、银制品/饰品等样品中银分析测定的研究及应用, 并对未来银分析检测行业进行展望。

1 银的分析测定

关于银量分析方法测定综述已有报道, 样品基体成分不同, 选择的分析方法不同, 对于基体干扰大或品位低的含银样品, 可通过分离富集技术消除基体干扰, 提高方法的灵敏度和准确度^[1-2]。

1.1 地质样品

地质样品是指从自然地质环境中采集并用于研究和分析的物质, 主要包括岩石、矿物、土壤、沉积物等。从地质工作的目的划分, 其可分为地球化学调查样品、区域地质调查样品、矿产地质勘查样品等。地质样品的采集遵守相关的规范和标准, 确保样品具有代表性和可靠性, 对于不同类型的地质样品其采集方法也不同。地质样品分析测试方法较多, 按照样品前处理方法划分为: ①经过酸溶解制备成溶液, FAAS法^[3]、石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS法)^[4-5]、ICP-MS法^[6-16]分析测定; ②采用固体粉末直接进样的方式, 发射光谱法(ES法)^[17-28]分析测定, 该方法操作简单, 具有极佳的稳定性和绿色环保等特点, 有效简化了前处理流程, 提高了分析效率, 实现了对目标元素的快速测定。地质样品测定结果应满足DZ/T 0130.4—

2006《地质矿产实验室测试质量管理规范 第4部分:区域地球化学调查(1:50 000和1:200 000)样品化学成分分析》要求。

ICP-MS法分析地质样品中银,会受到 $^{90}\text{Zr}^{16}\text{O}^+\text{H}$ 、 $^{91}\text{Zr}^{16}\text{O}$ 、 $^{93}\text{Nb}^{16}\text{O}$ 、 $^{92}\text{Zr}^{16}\text{O}^+\text{H}$ 等多原子重叠干扰,造成银的测量结果偏高,可采用标准模式下数学方程校正法、碰撞池模式(KED)和反应池模式(DRC)消除干扰,也可通过分离干扰元素实现富集银的方法,提升测定的准确性^[6]。氦气可作为反应气消除地质样品中铈、锆对 ^{107}Ag 和 ^{109}Ag 测定的干扰^[7]。刘彤彤等^[11,14]采用王水溶解样品,加入磷酸将铈和锆转换为难溶解的磷酸盐化合物与银分离,化探样品含二氧化硅超过77%时,硅酸盐会包裹银,可采用硝酸、高氯酸和氢氟酸溶解样品的方式消除硅对银的包裹。张宇婷等^[15]研究了在王水提取过程中去除样品中超过90%锆,溶液中剩余少量的锆采用在线氦气稀释的方式消除干扰。王顺祥等^[20]采用升级的CCD-1型光电直读发射光谱仪测定地质样品,节约了试剂和材料,提高了检测效率。兰明国等^[23]研究了含碳高的有机土壤样品经高温除碳后,采用交流电弧光电直读发射光谱法测定银结果的稳定性显著提升。

地质样品的制备流程通常包括破碎、过筛、混匀、缩分等步骤,应保证样品的均匀性和代表性,并避免地质样品交叉污染;将加工后的样品用于测试分析,重点关注基体元素的干扰情况,选择合适的去除干扰手段;实验室做好质量控制,根据同批次地质样品的数量插入合适的质控样品或标准样品,确保质控样品的合格率满足要求。

1.2 矿石

矿石中银品位是指单位矿石中所含银的质量百分比,通常以每吨矿石中含银的克数表示(g/t),是评价矿石价值的重要指标之一,也是其开采价值的重要依据。根据文献,银分析检测方法有FAAS法^[29-37]、火试金重量法^[38-39]、ICP-OES法^[40-43]、ICP-MS法^[44-45]、电极循环伏安法^[46]、X射线荧光光谱法^[47]等。邓碧霞等^[29]对比了金银矿石不同前处理方式和不同仪器背景校正方式,发现酸性介质前处理样品结合塞曼扣除背景方法测得的高含量银结果更稳定。微波消解法处理样品具有用酸量少、绿色环保、高准确度等优势^[31]。全自动石墨消解仪与火焰原子吸收光谱法联用,具有消解效率高、样品处理量大、操作安全、精准控温等优点,实现了样品前处理流程的自动化^[32]。赵凯等^[38]通过硝酸溶解含铋矿物,硫氰酸钾沉淀银使银与矿物中杂质元素分离,采用火试金重量法实现了银的准确测定。孟宪伟等^[48]建立了银物相分析方法,包

括含铁锰矿物中银、菱锌矿中银、硫化银、自然银、硅酸盐中银和硫铁氧化物中银等6相。李方^[49]通过对火试金重量法、原子吸收光谱法和X射线荧光光谱法3种方法进行优化设计,改善了测定条件,可为矿山开采、选矿过程金属成分分布测定提供技术支持。刘金东等^[50]将迭代稳健统计法应用于银含量测定的实验室间比对中,有效评价了实验室测定金矿石中银含量的能力,有助于实验室根据实验室间结果发现问题、查找问题,采取相应措施提高实验室的管理水平。

含银矿石种类繁多且成分复杂,溶解方法不同,高氯酸可消解矿石中硫化物和有机物,氢氟酸可消解矿石中硅,也可结合微波消解法溶解复杂矿石;单一测定矿石中低品位银首选火焰原子吸收光谱法,但需保证溶液中的介质酸度,防止氯化银沉淀形成。最佳的分析检测方法可为选矿工艺、矿产交易提供准确可靠的数据。

1.3 精矿

精矿是指含有价金属的低品位矿石经过富集(如重选、浮选等选矿处理)获得的高品位有价金属矿物,是选矿厂的最终产品,一般作为冶炼前的重要原料。精矿的主要成分和杂质含量达到相应国家标准规定,才能成为合格的精矿;其加工过程包括矿石的破碎、磨矿、选矿等步骤去除杂质,从而得到高品位精矿,这一过程有助于提高矿物资源的利用率,降低后续加工的难度和成本。含银精矿产品包括铂钯精矿^[51]、锡精矿^[52]、铜精矿^[53-56]、铅精矿^[57-58]、锌精矿^[59-60]、铋精矿^[61]、银精矿^[62]等,而银是精矿中主要的计价金属,直接影响了矿产贸易价格。黄雅娟等^[51]通过铅试金富集铂钯精矿中银形成铅珠,经硝酸溶解后用丁二酮肟沉淀并分离钯,消除了钯对硫氰酸钾滴定银的干扰。邹雯雯等^[55]按照微波消解程序采用盐酸、硝酸和高氯酸消解铜精矿,ICP-OES法测定标准溶液配制的与样品等量的铜和铁,有效消除了铜、铁基体的干扰。周专^[62]研究了火试金重量法测定银的改进,得到的金银合粒差减金量和分金液中杂质得到银量,并结合银量的系数补正法,极大地优化了实验流程。

精矿中银品位大于1 000 g/t时,首选火试金重量法和火试金富集-硫氰酸钾滴定法测定;银品位为10~1 000 g/t时,建议采用火焰原子吸收光谱法测定,该方法快速准确且抗干扰强;银品位低于10 g/t时,可考虑电感耦合等离子体质谱法测定。

1.4 其他含银物料

1.4.1 冶炼中间产品

不仅矿产资源中具有丰富的银,冶炼中间产品也含有大量的银,且其产量较高,因此国内生产银的矿

山企业及冶炼企业均对冶炼中间产品中银进行回收。冶炼中间产品主要包括冰铜^[63-65]、碲化铜^[66-69]、粗铜^[70-71]、粗硒^[72-74]、粗铋^[75]、粗铅^[76]、含银渣^[77-80]、烟道灰^[81]、铜阳极泥^[82]、白烟尘^[83]、含铜物料^[84-85]等。由于冶炼中间产品回收的银品位较高,分析测定更倾向于火试金法富集银联合硫氰酸钾滴定法和ICP-OES法测定杂质法等手段保证测试结果的准确性。王佳俊等^[63]采用火试金法富集含铂钯冰铜样品中的银,硝酸溶解富集后的合粒,合粒中的铂不被硝酸溶解而分离,溶解的钯采用丁二酮肟掩蔽,电位滴定法和伏尔哈特法准确测定含铂钯冰铜样品。胡忠强等^[75]将粗铋经900℃焙烧氧化,200 mL(1+1)乙酸溶解粗铋氧化物,过滤分离铋,采用火试金重量法测定银含量,该方法可消除铋对银测定的干扰,适合各种含量粗铋产品中银的分析检测。乔丽娜等^[80]采用火焰原子吸收光谱法测定回转窑渣中银,实验发现样品经过500℃焙烧10 min,可去除试样中碳、硫、砷、硒等杂质,测试溶液酸度为15%时的银测定结果最稳定。罗联诗等^[84]研究了火试金法测定铜冶炼物料中银量的修正方法,采用一次试金法和二次试金法计算物料中银修正系数,实验结果表明:含银小于200 g/t时,修正系数为1.03;含银为200~500 g/t时,修正系数为1.025;含银为500~1 000 g/t时,修正系数为1.02;含银大于1 000 g/t时,修正系数为1.01。

1.4.2 含银合金

含银合金是以银为基础与其他金属混合的合金,主要包括银钨合金^[86-87]、铅铋合金^[88-89]、银铜合金^[90]、银钯合金^[91]、银锡合金^[92-93]、锡铅合金^[94]、铅铋合金^[95]、铅合金^[96]、无铅焊料^[97-98]、合质金^[99]、铝合金^[100]、铜基钎料^[101]、钴基合金^[102]等。含银合金的检测方法包括火试金重量法、电位滴定法、X射线荧光光谱法、ICP-MS法、FAAS法及ICP-AES法。陈守剑等^[90]采用X射线荧光光谱法测定银铜合金中银,对比了不同校准曲线,结果表明:二元比例法的稳定性和抗干扰能力优于直接校正法,该方法测试结果与原子吸收光谱法结果一致。何龙波等^[92]对焊锡的前处理方法、样品制备过程、实验条件和数据分析等方面进行分析,得出了影响ICP-AES法测定银准确性的因素,并提出了改进措施。陈旭光等^[101]提出了快速检测铜基焊料中银的方法,5 mL硝酸和氢氟酸溶解样品,加入5 mL 40 g/L硼酸络合氟离子,采用铜基体匹配标准溶液的方式进行ICP-AES法测定。

1.4.3 其他物料

除了冶炼中间产品、含银合金外,银也存在于化学药品、凝胶、食品材料、橡胶、树脂和催化剂等材料中,其检测分析方法包括紫外分光光度法^[103]、ICP-

AES法^[104-108]、ICP-MS法^[109-112]、FAAS法^[113-114]、火试金重量法^[115-117]、滴定法^[118-121]等。含银物料的种类众多,且基体成分复杂,可采用X射线荧光光谱法作为物料成分的首选预分析手段,之后针对物料组成成分选择合适方法。采用一种分析方法无法获得准确数据时,可利用多种方法联合测定,去除基体、杂质的干扰,提升方法测试准确度。例如:火试金法富集与ICP-AES法结合,火试金法富集与电位滴定法结合,或采用湿法溶解样品去除杂质后火试金重量法测定;采用湿法溶解样品,仪器法测定银物料中银,可选择基体匹配标准溶液的方式。

1.5 水质

水体包括地表水、地下水、污水、废水等。银冶炼及精炼工艺中会产生含银废水,银作为重金属离子对环境和生命健康产生严重影响。因此,工业废水中银的检测备受环保部门关注,GB 8978—1996《污水综合排放标准》规定排放废水中银质量浓度小于0.5 mg/L;工业废水排放量大,实现银的回收不仅有助于环境保护,而且可增加企业经济效益。因此,准确分析工业废水中银至关重要。水质中银的分析方法包括FAAS法^[122-125]、ICP-OES法^[126-127]、ICP-MS法^[128-129]等,3种仪器分析法均具有灵敏度佳、精密度高、准确性好等特点;ICP-OES法和ICP-MS法具有较宽线性范围且操作简单,可实现多元素同时测定,更适合于样品量大且测定元素多的情况;FAAS法具有抗干扰性强的特点,可实现单个元素的批量快速测定。郭晶等^[124]针对水质中银含量较低而无法直接测定的难题,开发了溶胶-凝胶法制备的介孔碳来富集水中痕量银的方法,降低了方法测定下限。韩剑等^[127]研究了硼浓度对水中银测定的影响,结果表明:当水中硼质量浓度大于1 mg/mL时,硼影响银的分析测定,采用硼基体匹配的方式去除干扰,该方法测定下限为3 μg/L,回收率为90%~110%。钱藏藏等^[128]采用ICP-MS法测定铬电解液中痕量银,通过氦气碰撞模式可消除样品中质谱干扰。李世鹏等^[130]开发了一种便携、快速、简单的试纸法检测镀液银的程序,通过试纸变色长度与银离子浓度的线性关系计算样品中银含量,其测定范围为5~1 000 μg/mL。

1.6 银制品/饰品

含银矿石和物料经过选矿、冶炼、精炼等一系列工艺制备纯银制品,也可将其加工成各种款式的银饰品,包括项链、吊坠、手镯、戒指、耳环等,备受广大消费者青睐。银制品的检测方法主要有X射线荧光光谱法^[131]、FAAS法^[132]、ICP-OES法^[133-137]和ICP-MS法^[138-140]。X射线荧光光谱法是银饰品无损检测的最常用方法,但受样品基材材质、仪器测量时间、样品形

状等因素影响较大,需要有与样品相同基质的标准样品建立校准曲线,大多采用直接测定法、归一化法或差减法测定银饰品中银含量;该方法仅测定饰品的表层,无法准确测定镀层银饰品内部材质,因此其不可作为仲裁方法检测分析。银制品中银含量通常采用破坏性检测方法,仪器法测定银中杂质元素,差减法计算银含量。食品接触用的银制品有银茶具、银酒具等,按照 GB/T 28021—2011《饰品 有害元素的测定 光谱法》对银制品的有害元素进行分析。郝莉花等^[137]研究了食品模拟物、重金属含量、迁移温度及迁移时间对食品接触用银制品中银、砷、铅、镉、铬、镍、锑、锌等 8 种重金属元素迁移量的影响,结果发现,重金属迁移量随其在银制品中含量的增加而变大,且接触酸性食物时的银和铬元素容易超标。蔡薇等^[141]对银制品中有害元素限量及安全性检测进行分析,儿童银饰品除了规定有害元素限量外,还建议规定物理机械性风险及物理安全性检测方法。为提升食品接触用银制品产品的质量,监管部门需要加大监督力度,定期检查和抽查,构建追溯体系,保障消费者合法权益。

2 银的测量不确定度评定

测量不确定度是对测量结果可靠性和可信度的评估,它表示测量结果可能存在的误差,用于表征合理赋予被测量值的分散性。通过对银测定结果进行不确定度评定,可分析得到对不确定度影响较大的因素,然后采取合理的质量控制措施确保测定结果准确可靠。完整的结果应包括测定结果和测量不确定度,测量不确定度与误差相关,不确定度的来源可从误差的影响因素考虑。狭义而言,测量不确定度表示测量结果的偏差范围;广义而言,测量不确定度表示对测量结果的可信程度。不确定度通常分为 2 类:A 类不确定度和 B 类不确定度,A 类不确定度是采用贝塞尔公式计算实验标准差,计算各分量的不确定度;B 类不确定度不是由直接测定数据分析得出的不确定度,而是通过其他方式获得;最终合成测量结果的不确定度。测量不确定度已广泛应用于质量检测、质量控制和质量监督。相关学者对 FAAS 法、ICP-OES 法和滴定法测定银的不确定度进行评估^[142-146],发现不确定度来源主要包括天平称量、定容体积、标准溶液的配制过程、标准曲线、测量重复性等方面,测量重复性和标准曲线的变动性对结果的不确定度贡献较大。在日常分析检测中,采取增加重复测量次数、准确配制标准溶液、优化仪器参数等措施可提高检测结果的准确度。

3 结 语

银作为一种关键战略资源,其多元应用在现代经济体系中扮演重要角色,尤其在新兴技术、健康医疗和可再生能源等领域。随着银需求持续增加,银的分析测定发挥着重要作用。

1) 技术提升。银的测定方法以仪器法为主,复杂含银物料、冶炼中间产品及回收材料的组成成分越来越复杂,给分析测定带来了极大挑战。未来需提高检测人员技术水平,掌握复杂样品的基体成分,利用多种检测手段联合测定,确保检测结果的准确性。

2) 标准引领。随着检测技术的升级,检测设备的更新换代,同步制修订分析方法标准,并积极参与银相关国际标准的制定,谋求国际标准话语权,推动白银优势技术和产品创新性“走出去”。

3) 智能检测。加大智能检测设备研发力度,与实验室信息管理系统深度融合,促进检测从自动化、数字化向智能化的转变,从而提高实验室效率、合规性和精准度,以实现实验室无人值守检测为目标,推动白银行业高质量绿色健康发展。

[参 考 文 献]

- [1] 陈永红,韩冰冰,洪博,等.2019—2020 年中国银分析测定的进展[J].黄金,2022,43(2):104-110.
- [2] 索云肖,谢大伟.几种常用的银含量分析方法述评[J].中国资源综合利用,2021,39(8):115-116,123.
- [3] 孙新海.地质样品银、铜、铅、锌测定过程中应用试液称重火焰原子吸收分光光度法的研究[J].世界有色金属,2024(9):31-33.
- [4] 程光磊,王学江.悬浮液进样-石墨炉原子吸收光谱法测定土壤中的微量银[J].化学研究与应用,2022,34(7):1 680-1 684.
- [5] 胡然.微波消解-石墨炉原子吸收法测定土壤中的铅、镉和银[J].轻工科技,2021,37(8):93-94.
- [6] 张晨芳,刘献锋,胡建,等.电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中银的研究进展[J].中国无机分析化学,2022,12(3):68-74.
- [7] 王振伟,王维宇,郭朝,等.电感耦合等离子体串联质谱氨气模式测定土壤中的银[J].环境化学,2021,40(4):1 285-1 287.
- [8] 冯慧林,单程堃,何汉江,等.电感耦合等离子体质谱法测定多目标地质样品中银[J].化工矿产地质,2024,46(3):249-253.
- [9] 袁惠.电热板消解-动能歧视模式-电感耦合等离子体质谱法测定化探样品中银量[J].当代化工研究,2023(18):34-36.
- [10] 潘倩妮,刘伟,何雨珊,等.混合酸消解-电感耦合等离子体质谱法测定区域地球化学样品中的银[J].岩矿测试,2024,43(3):459-467.
- [11] 刘彤彤,钱银弟,黄登丽.磷酸沉淀分离-电感耦合等离子体质谱法测定化探样品中的痕量银[J].岩矿测试,2021,40(5):650-658.
- [12] 刘跃,林冬,王记鲁,等.四种碰撞/反应模式-电感耦合等离子体串联质谱法测定土壤和水系沉积物样品中的银[J].岩矿测试,2022,41(6):1 017-1 028.
- [13] 刘海明,武明丽,成景特.酸溶分解-电感耦合等离子体质谱内标法测定地质样品中的痕量银[J].岩矿测试,2021,40(3):444-450.

- [14] 刘彤彤,黄登丽.王水溶样-电感耦合等离子体质谱法测定化探样品中痕量银[J].冶金分析,2021,41(7):61-66.
- [15] 张宇婷,孙丰月,李予晋,等.王水提取-在线氦气稀释-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地质样品中的银[J].中国无机分析化学,2023,13(3):249-255.
- [16] 刘向磊,孙文军,任彧仲,等.微波消解-混合模式电感耦合等离子体质谱法测定土壤或沉积物中银、锡、硼[J].质谱学报,2022,43(4):522-531.
- [17] 何涛,王鹏,邓攀直,等.平面光栅电弧发射光谱法测定地球化学样品中银硼锡的影响因素探讨[J].冶金分析,2022,42(10):63-69.
- [18] 张琳.发射光谱法测定地球化学样品中银、硼、锡的方法比较[J].世界有色金属,2021(7):151-152.
- [19] 谷秀艳.发射光谱法同时测定地球化学样品中银锡铅[J].吉林地质,2023,42(4):50-55.
- [20] 王顺祥,龚仓,吴少青,等.固体进样-CCD光电直读发射光谱法测定地球化学样品中微量银、硼和锡[J].中国无机分析化学,2023,13(8):863-868.
- [21] 李志雄,陆迁树,张连凯,等.固体进样发射光谱载体蒸馏法测定区域地球化学勘查样品中银硼钼锡的研究[J].光谱学与光谱分析,2023,43(7):2 132-2 138.
- [22] 杨曲,钱玲瑶,余联凤,等.交流电弧发射光谱法测定碳酸盐岩石样品中银、硼、锡[J].天津化工,2023,37(2):42-44.
- [23] 兰明国,李飞,陈贵仁,等.交流电弧光电直读发射光谱法测定有机土壤中银锡硼[J].冶金分析,2024,44(9):45-52.
- [24] 祁雨凡.交流电弧原子发射光谱测定地质样品中银、硼、锡效果研究[J].世界有色金属,2021(21):123-124.
- [25] 王应平,李鑫雯,施白妮,等.交流电弧直读原子发射光谱法测定碳酸盐岩石样品中的银、锡[J].世界有色金属,2023(8):135-137.
- [26] 王亚娇,张随安,杨春,等.电弧直读发射光谱法测定地球化学调查样品中银硼锡含量[J].应用化工,2024,53(6):1 478-1 480,1 485.
- [27] 刘宇,岑敏,李梧庆,等.全谱交直流发射光谱仪在土壤、岩石中银锡硼等元素测定中的应用[J].分析仪器,2021(5):30-34.
- [28] 李玲.全谱直读型电弧发射光谱仪测定化探样品中的痕量元素[J].中国金属通报,2023(6):237-239.
- [29] 邓碧霞,王莘仙,余联凤,等.原子吸收光谱法测定金银矿中高含量银的方法研究[J].化学工程与装备,2022(12):221-223.
- [30] 贾书朝,冯卫,李倩.原子吸收法分析测定四方金矿原矿石中铜铅锌银[J].新疆有色金属,2022,45(5):5-6.
- [31] 贾炳超,王虹程,赵毅波,等.微波消解-火焰原子吸收光度法测定矿石中的银[J].当代化工研究,2024(15):72-74.
- [32] 杨红玉,赵志虎,段爱霞,等.全自动石墨消解-火焰原子吸收光谱法测定矿石中银的含量[J].理化检验(化学分册),2022,58(1):110-112.
- [33] 谷周雷,许晓慧,刘卫,等.火焰原子荧光光谱法测定矿石样品中的银[J].中国无机分析化学,2023,13(2):149-154.
- [34] 冯媛.火焰原子吸收光谱法测定金属矿物中的高含量银[J].世界有色金属,2022(16):93-95.
- [35] 辛文.火焰原子吸收光度法测定矿物岩石中的高含量银[J].冶金与材料,2023,43(4):44-46.
- [36] 曲小洁,赵小帆.火焰原子吸收光谱法测定矿石中银的含量[J].世界有色金属,2024(7):31-33.
- [37] 李杰阳.三酸溶样-复杂多金属铜硫矿物中银铋含量的测定[J].云南冶金,2022,51(4):126-132.
- [38] 赵凯,郝明阳,赵可迪,等.火试金重量法测定含铋矿物中金、银[J].化学分析计量,2024,33(8):84-90.
- [39] 王国栋,陈健.火试金-重量法测定硫铁矿中的金和银[J].中国资源综合利用,2022,40(6):13-16.
- [40] 陈尤和.电感耦合等离子体发射光谱法测定钴镍矿中银铜铅锌铝铁镁[J].世界有色金属,2023(14):129-131.
- [41] 游大虎.电感耦合等离子体发射光谱法测定矿石中银的研究[J].福建分析测试,2021,30(1):42-46.
- [42] 张玲玲.ICP-OES测定铜尾矿中的铜铅锌银[J].化工时刊,2023,37(4):29-31,40.
- [43] 赵芳芳,诸望,文芳.超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱测银矿石中的银[J].四川地质学报,2024,44(1):167-170.
- [44] 成景特.动能歧视-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定铅、锌矿石中银量[J].云南化工,2024,51(2):100-102.
- [45] 姚玉玲,李刚,赵朝辉,等.碰撞池-电感耦合等离子质谱法测定镍矿中痕量银[J].矿产综合利用,2021(3):205-210,204.
- [46] 雷龙文,潘雨欣,董彦杰.钙钛矿修饰玻碳电极循环伏安法测定银离子的研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2021,37(1):57-61.
- [47] 陈晓科,贾子仪,杨星国,等.波长色散型X射线荧光光谱法测定J矿山矿样中银、铜、铅、锌含量[J].云南冶金,2024,53(5):135-139,152.
- [48] 孟宪伟,葛仲义,陈永红,等.矿石中银物相分析方法研究[J].黄金,2024,45(7):106-110.
- [49] 李方.金属矿山中银元素测定方法的优化研究[J].冶金管理,2023(9):90-92.
- [50] 刘金东,张雨,芦新根,等.迭代稳健统计法用于金矿石中银含量测定的实验室间比对[J].化学分析计量,2021,30(2):73-76.
- [51] 黄雅娟,刘芳美,甘聪,等.铅试金-硫氰酸钾滴定法测定铂钯精矿中银[J].冶金分析,2022,42(12):60-65.
- [52] 陈健,王国栋,宋蒙蒙.火试金-重量法测定锡精矿的金、银含量[J].中国资源综合利用,2022,40(5):36-39.
- [53] 赖承华.火试金法测定铜精矿中金、银含量影响因素分析[J].江西化工,2021,37(2):120-122.
- [54] 钟秀琴,周建红,文辉,等.探讨火焰原子吸收光谱法检测铜精矿中银含量的影响因素[J].南方金属,2023(1):28-30.
- [55] 邹雯雯,管嵩,孙博,等.微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定铜精矿中银、铅、镉、汞和砷的含量[J].理化检验(化学分册),2021,57(12):1 099-1 103.
- [56] 余晓,贾劲捷,杨赞金,等.原子吸收光谱法测定富含锡铜精矿中的银[J].云南冶金,2023,52(2):108-112.
- [57] 温建安,吴慧君.多金属异型磁铁矿生产铅精矿中银含量的测定[J].云南冶金,2021,50(2):85-88.
- [58] 代利,刘凤芹.灰吹留铅-硫氰酸钾滴定联合原子吸收测定铅精矿银量[J].有色矿冶,2021,37(2):55-56.
- [59] 程飞,谢大伟,秦龙.火试金法测定锌精矿的金银含量[J].中国资源综合利用,2021,39(8):13-15.
- [60] 陈忠,王勇,刘祥骞.原子吸收光谱法连续测定锌精矿中的银铅镉[J].化工管理,2021(3):95-96.
- [61] 吴卓葵,张胜.湿法消解-火焰原子吸收光谱法测定铋精矿中银含量[J].中国有色冶金,2024,53(5):54-59.
- [62] 周专.火试金富集重量减杂法测定银精矿中的银量[J].化工管理,2023(4):41-44.
- [63] 王佳俊,陈永红,芦新根,等.含铂和钯的冰铜中银量的测定方

- 法研究[J].云南冶金,2024,53(5):116-121.
- [64] 刘金东,张雨,姜莹,等.火试金重量法测定铅冰铜中的金和银[J].化学分析计量,2023,32(4):40-43.
- [65] 刘秋波,李华昌,姜求韬.铅试金富集-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定冰铜中金、银、钯[J].中国无机分析化学,2023,13(8):894-898.
- [66] 方玉,吴妹.电感耦合等离子体原子发射光谱法测定碲化铜样品中的银含量[J].山西冶金,2023,46(3):35-36,39.
- [67] 刘娜,刘芳美,赖秋祥,等.火试金重量法测定碲化铜中的金和银[J].中国有色冶金,2022,51(6):65-70.
- [68] 任月凤,韩晓,史博洋.火焰原子吸收光谱法测定碲化铜中低含量的银[J].山西化工,2023,43(10):30-31,37.
- [69] 刘芳美,陈杭,衷水平.火焰原子吸收光谱法测定碲化铜中银[J].黄金,2023,44(4):91-93.
- [70] 刘金东,郝明阳,张雨,等.火试金富集-硫氰酸钾滴定法测定粗铜中的银[J].云南冶金,2021,50(4):116-119.
- [71] 叶翠情.火试金重量-湿干法测定粗铜中的金量和银量[J].山西冶金,2022,45(6):30-31,111.
- [72] 黄树婷.火焰原子吸收光谱法测定粗硒中银含量[J].化工管理,2023(10):47-50.
- [73] 符招弟,熊方祥,郭恒煜,等.硫酸挥发除硒-火试金法连续测定粗硒中金量和银量[J].矿冶工程,2023,43(5):132-135.
- [74] 黄雅娟,刘芳美,陈兴发,等.氧化焙烧-铅试金-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定粗硒中金银铂钯[J].黄金,2024,45(3):94-97.
- [75] 胡忠强,周宏鼎.乙酸除铋-火试金法测定粗铋中的金、银含量[J].中国无机分析化学,2021,11(3):79-83.
- [76] 张俊峰,栾海光,王飞虎.直接灰吹-ICP-AES测定粗铅中的金、银、铂和钯[J].贵金属,2021,42(4):66-70.
- [77] 尹良晨,陈涛,周宏鼎,等.火试金法测定卡尔多炉渣中金、银含量[J].山东化工,2021,50(13):93-94.
- [78] 刘芳美.火试金重量法结合电感耦合等离子体原子发射光谱法测定分金渣中金银铂钯[J].冶金分析,2022,42(3):26-32.
- [79] 吴卓葵,邱彩淋,周世豪.火焰原子吸收光谱法测定铋渣中银的含量[J].理化检验(化学分册),2023,59(12):1460-1462.
- [80] 乔丽娜,杨伟,孔凡丽,等.火焰原子吸收光谱法测定回转窑渣中银的含量[J].云南冶金,2024,53(3):161-164.
- [81] 游大虎.电感耦合等离子体发射光谱法测定烟道灰中铅锌铜银钢的研究[J].福建分析测试,2023,32(5):20-23.
- [82] 周宏鼎,武守忠,胡忠强,等.火试金-佛尔哈德法测定铜阳极泥中银[J].理化检验(化学分册),2021,57(11):1045-1047.
- [83] 王佳俊,陈永红,芦新根,等.火试金重量法测定白烟尘中的金和银[J].云南冶金,2024,53(2):109-113.
- [84] 罗联诗,刘芳美,赖秋祥,等.火试金法测定铜冶炼物料中银补正系数研究[J].中国有色冶金,2021,50(1):62-69.
- [85] 陈林.铅试金富集称量法测定含铜物料中金和银[J].云南冶金,2022,51(1):116-119.
- [86] 张晓,徐青,于磊,等.电位滴定法测定银钨合金中银[J].冶金分析,2022,42(12):66-71.
- [87] 黄秋玲,李肖瑶,张晓,等.铅试金-重量法测定银钨合金中的银[J].材料研究与应用,2022,16(2):311-315.
- [88] 陈涛,尹良晨,武守忠.火试金法测定铅铋合金阳极中金、银含量[J].山东化工,2021,50(6):93-95.
- [89] 熊方祥,杨炳红,符招弟,等.酸分离-火试金法连续测定铅铋合金中的金、银[J].湖南有色金属,2021,37(5):69-71.
- [90] 陈守剑,王黎明,黄近丹,等.X射线荧光光谱测定银铜合金中的银——二元比例法[J].福建冶金,2022,51(1):45-47.
- [91] 蒋建航,张承龙,蹇祝明,等.电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定银钯合金中银和钯[J].中国无机分析化学,2022,12(6):77-81.
- [92] 何龙波,马萍,刘雅如.ICP-AES法测定焊锡中金属银的研究分析[J].广州化工,2024,52(8):29-30,59.
- [93] 廖思远,颜君波,甘启达.能量色散型X荧光光谱仪测定银锡合金中的锡、铋、铜含量[J].电工材料,2022(6):12-15.
- [94] 段泽平,李丽,孙彪,等.含银铸造锡铅合金光谱标准样品的研制[J].云南冶金,2024,53(3):165-170.
- [95] 邓海航,刘晓玲,白利洲.火试金重量法测定铅锡合金中金、银含量[J].质量与认证,2024(11):32-34.
- [96] 阳珊珊.铝合金中银含量的测定研究[J].世界有色金属,2021(10):107-108.
- [97] 韩红兰,段泽平,李丽,等.硫氰酸钾-自动电位滴定法测定锡铋银系列无铅焊料产品中银含量[J].湖南有色金属,2023,39(6):96-100.
- [98] 韩红兰,黄慧兰,段泽平,等.原子吸收光谱法对系列无铅焊料中银的测定[J].云南冶金,2022,51(2):125-129.
- [99] 蓝丽.合质金中银量的测定方法改进[J].现代盐化工,2021,48(6):26-28.
- [100] 陆科呈,卢祥丰,顾沛沛,等.两种原子发射光谱法测定铝合金中高含量银的方法比较[J].理化检验(化学分册),2021,57(5):417-419.
- [101] 陈旭光,陈晓红,白梦莎.铜基钎料中银、锡和磷含量测定新方法[J].科技通报,2022,38(12):12-16,33.
- [102] 刘巍,黄丹宇,鄧惠博.微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定钴基高温合金中银、铋、铅、硼、镉的含量[J].理化检验(化学分册),2021,57(12):1132-1135.
- [103] 谭鑫,谭娟,刘颜,等.基于CuS负载Pt纳米花的类过氧化物酶活性抑制检测银离子[J].分析试验室,2021,40(11):1241-1246.
- [104] 王友鸣.电感耦合等离子体发射光谱测定磷酸氢钙中砷、银、铅、镉等8种元素[J].上海化工,2023,48(6):54-57.
- [105] 史博洋,刘宇,王皓莹,等.湿法预处理-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定低冰镍的金、银、铂、钯含量[J].中国资源综合利用,2023,41(12):41-44.
- [106] 陈思奇,叶汝汉,罗平,等.火法富集ICP-AES法测定电镀污泥中的金、钯、银[J].五邑大学学报(自然科学版),2022,36(3):9-15.
- [107] 史博洋,王皓莹,刘宇.火试金减杂-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定高冰镍中的金、银、铂、钯[J].中国无机分析化学,2021,11(4):63-66.
- [108] 陈嘉勋,何舒敏,曾莉,等.银离子抗菌聚酯纤维中银含量测定及抗菌性能[J].针织工业,2021(5):67-71.
- [109] 张慧,周姣,蒋莹.电感耦合等离子体质谱法测定儿童抗菌硅胶用品中的银[J].化学分析计量,2024,33(9):12-15,79.
- [110] 万曦,刘涌,郑玉婷,等.KED-ICP-MS法测定电子级丙二醇甲醚中的银、镉和铅[J].分析试验室,2024,43(3):420-424.
- [111] 禄春强,万峰,代亚男,等.ICP-MS法测定银系抗菌食品接触塑料中银含量与迁移量[J].食品工业,2022,43(5):326-329.
- [112] 谢明明,柴玉青,岳野,等.电感耦合等离子体质谱法测定钨中磷、钾、钛、钡、锆、铋、钽、银、硒的含量[J].中国钨业,2022,46(6):55-58.

- [113] 李肖瑶,李展鹏,关耀威,等.火焰原子吸收光谱法快速测定低镍硫中微量银[J].材料研究与应用,2022,16(6):1 068-1 072.
- [114] 刘芳美,赖秋祥,廖彬玲,等.火焰原子吸收光谱法测定炭末中银[J].中国无机分析化学,2022,12(3):129-133.
- [115] 张雨.干湿法测定硒碲混合物中金、银含量的研究[J].化工设计通讯,2023,49(8):38-39,60.
- [116] 游玉萍,周凤飒,肖红新.火试金富集-重量法测定吸银树脂中银[J].黄金,2024,45(10):116-118.
- [117] 石奇超,崔行宪,陈涛,等.火试金湿-干联用测定废杂铜中金、银含量[J].山东化工,2021,50(8):96-98,101.
- [118] 王建军,刘晓杰,徐剑瑛,等.滴定法测定复杂基体氯化银中银含量[J].世界有色金属,2023(10):112-115.
- [119] 张兵.电位滴定法在银催化剂银含量测定中的应用[J].山东化工,2024,53(8):170-173.
- [120] 王慧,封亚辉,潘生林,等.火试金熔融-自动电位滴定法测定废银催化剂中银的含量[J].理化检验(化学分册),2024,60(5):492-494.
- [121] 刘千祥,冯虎林.自动电位滴定法测定锌冶炼电解沉积铅阳极板中银含量[J].新疆有色金属,2023,46(5):51-54.
- [122] 赵欣.《无火焰原子吸收分光光度法测定银》检测方法验证[J].化工设计通讯,2021,47(5):193-194.
- [123] 段雪梅,曾俊源,戴晓军,等.逆王水电热板方法消解水和废水中的银[J].中国环境监测,2022,38(3):157-162.
- [124] 郭晶,胡军凯,刘艳,等.介孔碳固相萃取-火焰原子吸收光谱法测定工业废水中痕量银[J].理化检验(化学分册),2023,59(8):978-980.
- [125] 林燕真.火焰炉原子吸收法和电感耦合等离子体发射光谱法测定水中银含量的比较[J].山西化工,2023,43(11):33-35,43.
- [126] 李娜,李晖,张健康,等.ICP-AES法测定工业含银污水中银量[J].湖南有色金属,2022,38(5):73-76.
- [127] 韩剑,程建华.电感耦合等离子体发射光谱法测定含硼水中银离子[J].化工设计通讯,2022,48(3):96-98.
- [128] 钱藏藏,陈晓玲,杨柳荫,等.ICP-MS检测铁铬电解液中8种痕量金属[J].化工技术与开发,2024,53(8):61-65.
- [129] 冯秀芳,吕建华,袁凯,等.实验室含银废液的回收利用[J].辽宁化工,2023,52(8):1 093-1 095.
- [130] 李世鹏,刘俊吉,李雪,等.试纸法测定镀液中银及智能检测程序的开发[J].化学工程师,2022,36(1):77-79.
- [131] 姜莹,张雨,刘金东,等.X射线荧光光谱法测量饰品中银含量的计算方法探究[J].中国检验检测,2023,31(6):41-44.
- [132] 牛金在,荣莎莎.原子吸收光谱法测定银中铜的检测范围的扩展[J].世界有色金属,2023(18):115-117.
- [133] 那勃,孟建华.基体分离-电感耦合等离子体发射光谱法测定高纯银中21种杂质元素[J].化学分析计量,2021,30(9):30-33.
- [134] 那勃,汪琳,张少强,等.异辛烷溶解-直接进样-电感耦合等离子体发射光谱法测定银制品涂层中8种有害元素[J].化学分析计量,2023,32(1):26-29.
- [135] 那勃,孟建华,张璐,等.电感耦合等离子体发射光谱法测定银饰品中镉、铈、钐、钕、钆[J].化学分析计量,2021,30(4):25-27.
- [136] 刘雪松,黄淮,李桂华,等.银瓷杯中银及有害元素的检测研究[J].黄金,2024,45(2):99-102.
- [137] 郝莉花,任悦,赵丽娜,等.食品接触用银制品中8种重金属元素迁移量研究[J].包装工程,2021,42(3):136-142.
- [138] 宁娜静,陈怡颖,张立新.ICP-MS测定银999.99‰中痕量铁铅元素[J].化学工程与装备,2023(2):226-227.
- [139] 黄博峻,王璇,朱勇,等.LA-ICP-MS法测定高含量银饰品中的杂质元素[J].贵金属,2021,42(4):71-75,86.
- [140] 王楠,周宇,任士远,等.高纯贵金属中杂质元素检测技术新进展[J].中国无机分析化学,2023,13(9):959-966.
- [141] 蔡薇,王鑫磊,张锦雯,等.银制品安全性检测标准探讨[J].中国标准化,2021(24):285-288.
- [142] 李园.ICP-OES法测定高纯金中银含量的不确定度评定浅析[J].世界有色金属,2022(14):138-141.
- [143] 贾祺,许丹,侯颖,等.导电银浆中银粉含量的测定与不确定度评价[J].中国口岸科学技术,2022,4(增刊2):64-68.
- [144] 颜廷来.电感耦合等离子体原子发射光谱法测定银中硒、碲含量的不确定度评定[J].福建分析测试,2022,31(1):53-58.
- [145] 麦纪战,张丽玉.火焰原子吸收分光光度法测定铅锌矿中的银含量不确定度评定[J].广东化工,2024,51(18):187-189.
- [146] 张秀,戴东情,袁敏,等.原子吸收分光光度法测定锌精矿中银含量的不确定度评定[J].世界有色金属,2022(4):111-113.

Advances in silver analysis and determination in China 2021-2024

Chen Yonghong^{1,2}, Su Guangdong^{1,2}, Lu Xingen^{1,2}, Guo Jiapeng^{1,2}, Wang Ju^{1,2}

(1. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.;

2. National Quality Inspection and Testing Center for Gold & Silver Products (Changchun))

Abstract: This comprehensive review examines advances in silver analysis and determination methodologies within China from 2021 to 2024, covering diverse sample types including geological samples, ores, concentrates, other silver-bearing materials, water quality, and silver products/jewelry. The study highlights the application of measurement uncertainty evaluation in enhancing the accuracy and reliability of silver quantification. The study prospects the silver analysis methods from perspectives such as technological innovations, standardization initiatives, and smart analysis systems. 146 references are cited in the paper.

Keywords: silver; analysis and determination; advances; measurement uncertainty; smart analysis; review