

# 基于原子荧光法的工业硫磺砷含量检测技术 及其实验经济性分析

罗 铭 袁安定 苏 赢 (广西钢铁集团有限公司, 广西 防城港 538000)

**摘要:** 在工业产品质量与环保监管双重压力持续加大的宏观背景下, 工业硫磺中砷含量的精准检测已成为保障下游产品安全性和企业合规运营的关键环节。高效、灵敏且具备经济可行性的检测技术需求日益凸显。本文围绕原子荧光法在工业硫磺砷含量检测中的应用展开研究, 重点分析其在检测流程、成本构成与运行效率等方面的经济表现。通过对设备采购与维护费用、试剂耗材支出、人工投入及方法性价比的系统性评估, 明确了该技术在不同实验场景下的经济负担与优势。

**关键词:** 原子荧光法; 经济指标; 流程; 检测

中图分类号: TE-9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 018-0052-03

## Detection technology of industrial sulfur arsenic content and its economic analysis

Luo Ming, Yuan Anding, Suying (Guangxi Iron and Steel Group Co., LTD., Fangchenggang Guangxi 538000, China)

**Abstract:** Under the macro background of the increasing dual pressure of industrial product quality and environmental protection supervision, the accurate detection of arsenic content in industrial sulfur has become a key link to ensure the safety of downstream products and enterprise compliance operation. The demand for efficient, sensitive and economically feasible detection technology is increasingly prominent. This paper focuses on the application of atomic fluorescence method in industrial sulfur and arsenic content detection, focusing on its economic performance in the detection process, cost composition and operation efficiency. Through the systematic evaluation of equipment procurement and maintenance costs, reagent consumable expenditure, labor input and cost performance of methods, the economic burden and advantages of the technology in different experimental scenarios are clarified.

**Key words:** atomic fluorescence method; economic indicators; process; detection

在当前工业产品质量标准不断升级与环保法规日趋严格的双重驱动下, 工业硫磺中有毒元素砷的控制问题逐渐受到企业和监管机构的高度重视。砷作为一种剧毒重金属, 即使含量微小, 也可能在后续使用过程中引发环境污染、设备腐蚀或人体健康风险, 直接影响企业产品的市场准入、品牌声誉与合规经营。原子荧光光谱法 (AFS) 因其灵敏度高、线性范围宽、抗干扰能力强而逐步替代传统方法, 成为痕量砷检测的主流手段, 尽管 AFS 在技术性能方面具有显著优势, 其在实验经济性层面的应用研究仍相对滞后, 尤其是在设备投资、耗材支出、人力成本与运行效率之间的经济效益评估方面, 尚缺乏系统化分析。

### 1 基于原子荧光法的工业硫磺砷含量检测流程

为了准确地测出工业硫磺中的微量砷成分, 需要选用检测灵敏高、选择性好等能够满足微量砷分测出条件的分析方法。原子荧光光谱法 (AFS) 属于专门用于痕量金属含量分析的一种方法。此方法应用于分析砷时, 具有更高的使用性能, 基本的检出过程主要分为以下几步: 第一步是样品的预处理; 第二步为还原反应; 第三步是气体发生; 第四步为原子化与荧光

的测定。

考虑到工业硫磺本身是难溶性的固体, 因此需要采用酸消解法 (主要是采用浓  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HClO}_4$  的混合酸) 还原溶解出砷, 且此步骤要在通风橱中 (需具有耐酸性) 且规范的操作条件下进行, 防止有危险及错误操作的发生。然后, 添加适量的还原剂, 主要是加入硼氢化钾 ( $\text{KBH}_4$ ) 将其氧化性的五价砷 ( $\text{As}^{5+}$ ) 还原成还原性的三价砷 ( $\text{As}^{3+}$ ), 供给氢化物反应基态, 在氢化物发生器中三价砷还原成易挥发的砷化氢 ( $\text{AsH}_3$ ) 气体, 并随载气 (如  $\text{Ar}$ 、 $\text{He}$ ) 快速进入原子化器内, 在石英原子化器中接受波长  $\lambda=228\text{nm}$  的空心阴极灯发出的共振波长, 使  $\text{AsH}_3$  分解成自由的 As 原子并发出荧光, 由光电倍增管检出, 放大后测得含砷量。此方法选择性好、灵敏度高, 对工业硫磺中的砷含量测定非常有现实意义。

### 2 基于原子荧光法的工业硫磺砷含量检测技术的关键经济指标

#### 2.1 设备采购与维护成本分析

原子荧光光谱仪是进行砷元素检测的关键设备, 设备的购置费用是构建检测实验室的重要经济因素。

原子荧光光谱仪的主机因品牌不同和不同的配置，价格在人民币 20 万元到 60 万元左右，对小型检测实验室来说是较为昂贵的固定资产投入。而设备在运行过程中需要的一些维护费用，如石英原子化器需要更换、空心阴极灯需进行使用寿命管理、气路系统的清洁维护等费用都需要考虑，每年设备的维护费用约为原售价的 5%~10%，加之设备运行所需的氩气等高纯气体也是一笔固定的运营成本。设备使用率低，则抬高单位样品成本的分摊，影响单位效率。所以，从经济角度考虑，提升设备稼动率，合理利用工作时间段，促进设备投资的回收，另外设备与供货商签订长期战略合作优惠政策，尽量在质保期间高强度运行以降低成本。

## 2.2 实验试剂与耗材成本评估

原子荧光检测的费用属于营业成本，固定开支，随着分析样品的次数增加，耗材的支出就比较大了，其中砷元素检测主要耗材为高纯还原剂（硼氢化钾）、掩蔽剂、缓冲溶液、标准砷溶液，这部分消耗性材料多且价格较贵，一次使用不可回收利用，导致单位消耗呈逐批次递增的变化；按照常规检测量估算，检测一个样品会消耗 10 个样品，每次检测 10 个大约要消耗 80~120 元试剂，如果不统一采购或者集中批量配置试剂，那么年度试剂成本支出就会很高；除此之外，像反应器膜片、试剂瓶、密封接头等一些零配件都是容易耗损的器件，更换周期短、价格高，造成营业成本较大。故从费用成本管控的方面来说，需要考虑降低耗材的成本，通过试剂集中采购、与国产试剂代替进口试剂、合理调节试剂浓度等途径降低成本。

## 2.3 人工成本与操作效率分析

原子荧光检测的方法，在具体的检测过程中，涉及诸如前期样水制备、试剂配制、检测仪器设备的操作等过程中，仍然需要人工干预，或者说是人工操作的过程，当检测样品批次较多时，检测人员所需付出的成本、检测能力等因素，都会对检测结果产生相当重要的影响。据相关企业研究数据显示，较为熟悉标准检测手段的操作人，在一定的时间下，一天能够完成 40~50 个批次的完整检测分析工作，按照批次对应的检测人员总投入成本，成本可在 3~5 元/批次，如不考虑中间控制及样品空白、检测分析方法测定范围外的校正测定等全过程自动操作所对应的产品中的人力成本的节省，进行一次或二次的实验分析过程，则会导致一定比例的浪费，相应的检测仪器的“空闲”时间相应增加，从而对相应的投入物、人员、设备等方面经济成本又增加了不必要的浪费，而对标准操作的制订、操作人员的操作训练、操作标准化体系的

建设、检测任务指标的考核与检测任务经济性的绩效评定，就成为以降低人为成本、提高检测效率的有效手段。另外，在其他条件不变的情况下，采用一些自动化元件（例如自动进样装置）会减小人工干预的频次，无形中就能节省掉一部分人力成本。从成本分析的角度出发，看似不是多大的问题、不直观的人力投入要素，在这样的分析过程中，就会发现会对最终检测分析的过程耗时及单位工作效率和单位产出效益有非常大的影响，不能仅从实物或无形态的成本因素进行分析，在检测的效率及单位产出的经济性分析中，一定要突出对人力因素带来的影响。

## 2.4 检测方法的成本效益对比分析

原子荧光法在各种工业硫磺中砷含量检测技术当中具有技术性能高、专属性强的优势，而且整体的经济性能优势也很大。相较于原子吸收法（AAS），原子荧光法用于检测低浓度砷可以得到较低的检测水平，其前处理工艺相对原子吸收法更为简单，减少前处理的耗时及前处理所用的试剂费用，降低了操作费。相较电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS），虽然对多种元素的检测可以实现很高通量的检测能力，但是单套设备的购买价格通常在 100 万元左右，而其使用的高纯氩气、冷却系统以及质谱部件维修等使用成本费用昂贵，造成总体的检测费用较昂贵，因此在检测仅单一元素（砷）时，不具有较高性价比。一些价格低廉的比色法，虽然在成本方面优势很大，但是缺少高的检测灵敏度，易干扰，对痕量砷的确定检测定量不十分准确。

## 3 基于原子荧光法的工业硫磺砷含量检测技术的实验经济性优化策略

### 3.1 仪器设备的高效利用与维护策略

高额的设备采购支出若不能通过高频次、长周期的稳定运行来摊销，将极大压缩检测单位的利润空间，提高设备的利用率与运行周期，是经济性优化中的首要策略。

首先，应建立合理的使用调度机制，根据样品检测批次、检测周期与客户需求，进行集中式检测安排，避免零散化运行造成的能源与人力浪费。其次，可以采用设备共用机制，将仪器资源与其他实验项目共享，实现跨部门协同检测，提升单台设备的服务价值。此外，设备维护策略对于延长使用寿命、降低非计划停机损失也至关重要。应定期执行预防性维护，包括管路清洁、光源检查、关键部件润滑与替换，避免故障导致的临时停机、数据重测与客户流失，间接节省大量人力物力。针对易损件如石英炉、空心阴极灯等，可采用备品备件制度，防止采购周期拖延造成检测中

断。更进一步,实验单位可设立“设备维护成本池”,将年化维护费用纳入成本核算体系,明确其在整体实验成本结构中的比重,有助于更精细化的预算分配。

### 3.2 试剂和耗材的采购优化与替代方案

在原子荧光法中,消耗品成本主要集中于高纯酸、还原剂(如硼氢化钾)、标准溶液、试剂瓶、过滤耗材等,这些项目一旦采购计划不合理或使用方式不规范,便可能导致积压、浪费或过度开支。从经济管理角度出发,首先应建立科学的采购计划体系。通过分析检测批次与样品量的年度数据,实施精细化的材料需求预测与周期采购,避免因应急购买带来的高价与物流成本上升。

一方面,应引入集中采购与竞争性招标机制,尤其对常用试剂和耗材类品种,可通过与多家供应商比价协商,获取更具价格优势的长期供货协议。此外,建立稳定合作关系有助于获得试剂赠送、价格锁定、售后技术支持等附加经济利益,从而间接降低采购总成本。另一方面,对于部分价格昂贵或进口依赖度高的耗材,可开展国产替代评估,在确保数据稳定性的前提下优选国产化产品,从源头实现降本。针对标准溶液等短期易失效产品,实验室可自行批量配制,降低商业化制品的购买频率,提升成本控制能力。

### 3.3 实验流程优化与自动化提升

实验流程的组织效率直接影响人力投入、耗材使用效率与设备运行时间,是影响实验经济性的一个隐性却极为关键的因素。传统检测流程往往存在人工操作重复、步骤分散、信息记录不统一等问题,导致单位样本成本过高。因此,从经济性角度出发,优化实验流程并引入自动化手段,将显著提高资源利用效率。

在实验前期阶段应梳理各个操作环节中的关键瓶颈与冗余步骤,例如在样品前处理与试剂添加环节,通过模块化设计整合操作顺序,减少人工干预频次,提高单次操作容量。可以采用标准批量配液与批处理方式,避免“一个样一处理”的低效率模式,在不牺牲数据质量的前提下大幅提升通量。与此同时,配置自动进样器可显著减少人工操作时间,提高工作效率;引入条码化样品识别与自动数据采集系统,能够实现从样本接收到报告生成的全流程追溯管理,减少人为错误所导致的重复实验和试剂浪费。在信息化方面,可搭建实验室信息管理系统(LIMS),实现样本信息、实验状态与成本数据的同步记录与分析,为成本控制与绩效评估提供数据支持。实验员绩效可与实验效率、合格率等经济指标挂钩,建立激励机制进一步提高整体效率。

### 3.4 多方法联合使用的成本节约策略

在检测成本持续攀升、客户对检测效率与价格敏

感度不断提升的背景下,单一分析方法的投入产出比愈发受到挑战。尤其在砷含量检测中,虽然原子荧光法具备高灵敏度优势,但其全部样本均采用该方法将造成试剂成本、设备占用与人力资源的高强度投入。因此,实施多方法联合使用策略,在确保结果可靠性的同时实现资源优化配置,成为经济性提升的重要方向。

因此,需要在样品处理初期阶段引入低成本预筛选方法,如比色法、试纸法等半定量技术。通过对大批量样品进行初步风险筛查,仅对疑似超标或关键节点样品采用原子荧光法进行精确测定。此举可显著减少原子荧光设备的工作负荷与试剂消耗,使昂贵设备资源集中于高价值样品分析,从而提高单位设备产出效能,降低检测总成本。此外,针对常规批量检测任务,可结合不同检测任务的分析需求,设置“检测分层结构”,将样品按检测难度、重要程度进行分类处理。例如,对常规工业硫磺进行月度质量监测,可采用低频采样+集中检测策略,而对重点批次或出口批次实施高灵敏度分析,形成经济性与数据质量并重的组合模型。

在组织层面,实验室可与其他检测单位或上下游企业共建共享实验资源,通过项目外包、协作分工等方式,降低单方仪器投入压力与维护成本,实现规模化效应下的经济节约。多方法协同不仅可优化资源配置,缓解高成本压力,更有助于提高整体检测效率与服务灵活性,为实验室构建多层次、低成本、可持续运行的检测体系提供了现实可行的路径。

### 4 结语

在工业硫磺中砷含量的控制日益受到关注的背景下,原子荧光法因其在灵敏度与适应性方面的优势而逐步成为主流检测手段,而其经济性的优化已成为实现高质量检测与成本控制协同发展的关键。通过设备高效管理、试剂采购机制改革、流程自动化建设以及多方法协同使用等策略的系统部署,原子荧光检测体系不仅可在保持技术可靠性的同时显著降低单位检测成本,更有助于实验资源的集约利用与管理模式的经济转型。

#### 参考文献:

- [1] 戴昭珺.原子荧光法测定土壤中砷含量不确定度评定报告[J].山西化工,2025,45(02):84-87.
- [2] 王立波,崔勇.化工过程异常检测方法研究及应用[J].石化技术,2025,32(02):259-260.
- [3] 张毅华.全自动石墨消解-原子荧光法测定环境空气中的砷、锑和锡[J].化学工程师,2025,39(02):37-39+106.