

Advances in Research and Application of Atomic Fluorescence Spectrometry

Yue Sun

College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan
Email: 841434453@qq.com

Received: Jul. 21st, 2018; accepted: Aug. 9th, 2018; published: Aug. 16th, 2018

Abstract

Atomic fluorescence spectrometry has the advantages of high sensitivity, low detection limit, simple spectral line, wide linear range and simultaneous determination of multiple elements. In this paper, the research progress of atomic fluorescence spectrometry is described in detail from the aspects of development history, instrument research and technology research. The application progress of atomic fluorescence spectrometry in the field of food safety and environmental detection in recent years is summarized briefly. Additionally, the deficiencies and future development trend is discussed.

Keywords

Atomic Fluorescence Spectrometry, Research Progress, Application

原子荧光光谱的研究及应用进展

孙悦

西南石油大学化学化工学院, 四川 成都
Email: 841434453@qq.com

收稿日期: 2018年7月21日; 录用日期: 2018年8月9日; 发布日期: 2018年8月16日

摘要

原子荧光光谱法具有灵敏度高、检出限低、谱线简单、线性范围宽、多元素同时测定等诸多优点, 是一种性能优异的痕量分析检测技术。本文从发展历史、仪器研究、技术研究等不同方面具体阐述了原子荧光光谱法的研究进展, 简要梳理了近年来该方法在食品安全和环境检测领域的应用情况, 并对原子荧光光谱法的不足之处和未来发展趋势做了简要探讨。

关键词

原子荧光光谱法, 研究进展, 应用

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

原子荧光光谱法(AFS)发展于原子发射光谱法(AES)和原子吸收光谱法(AAS)基础之上,在兼具 AAS、AES 优点的同时,也摒弃了二者的不足[1],具有灵敏度高、选择性高、结构简单等优势,是一种较好的痕量元素分析方法。原子荧光光谱法的基本原理是:待测物质在原子化器中变为基态原子蒸汽,基态原子蒸汽吸收光源的特征辐射后激发到高能态,然后在去激发的过程中发射出与原激发波长相同或不同的原子荧光,最后根据荧光强度来确定待测元素含量。1964年, Winefordner 和 Vickers 首先提出将原子荧光光谱法作为一种分析化学方法[2]。1969年, Holak 研究出氢化物发生-火焰原子吸收光谱联用技术,并将其应用于砷的测量[3]。1974年, Tsujiu 和 Kuga 将原子荧光光谱法和氢化物发生技术相结合,提出了氢化物发生-非色散原子荧光光谱测定砷的方法[4],这种联合技术为现代的氢化物发生-原子荧光光谱(HG-AFS)研究奠定了基础。国内对原子荧光光谱法的研究起步较晚,但发展迅速。杜文虎首先总结了原子荧光法测汞的研究状况,指出了利用原子荧光法测汞的优点及前景[5],并与其他工作者一起同研制出一种商品的、适合于测定痕量砷、硒、碲、锡、铅、铋、秘、汞等元素的新型非色散原子荧光光度计[6]。此外,郭小伟团队对原子荧光光谱法做了大量卓有成效的开创性研发[7]-[12]。比如,其致力于氢化物-无色散原子荧光法(HG-AFS)的研究,为 HG-AFS 技术发展成世界领先的中国特色分析方法做出了极大贡献;率先研制出溴化物无极放电灯,避免了铋的光谱干扰;发明断续流动技术,实现了仪器自动化;研制双道氢化物无色散原子荧光装置,实现了双元素的同时测定等。这些研究成果都极大地推动了我国原子荧光光谱技术的发展,并使该技术逐渐走向了实际应用前沿。目前,我国研发的原子荧光光谱仪和相关技术方法均处于国际领先水平,在地质、冶金、食品、环境、生物技术等各大领域都得到了广泛应用。

2. 仪器研究

1969年,美国 Technicon 公司研制出 AFS-6 型多道非色散原子荧光光谱仪,该仪器可实现六通道同时测量,但因使用了火焰原子化器,存在荧光猝灭、发射背景高、原子化效率低等缺陷,并未得到推广。1975年,英国 Thompson 等以碘化物无极放电灯为激发光源,通过氢化物发生-原子荧光光谱法测定了砷、铋、硒、铅等元素[13],但由于碘谱线会激发出试样中的铋原子荧光,产生严重光谱干扰,阻碍了该方法的实际应用。1983年,美国 Baird 公司推出 AFS-2000 型 12 道原子荧光光谱仪,但因其检测灵敏度低、费用高、技术不够完善而很快停产。1988年,Perkins 等用自制的 TM010 谐振腔和原子荧光及微波诱导等离子体(MIP)原子化器组成了 MIP-AFS 装置[14],其可检测 14 种元素,具有功率小、背景干扰小、气体消耗量少等优点,但易受外界干扰,对水蒸气承受能力不足。综上所述,国外在上世纪对原子荧光光谱仪开展了大量研究,但总体效果不佳,所研发仪器仍存在一些待完善的问题。

我国的仪器研究始于上世纪七十年代。杜文虎团队于 1975 年成功研制冷原子荧光测汞仪[15],而后于 1980 年成功研制一种商品的、适合于测定痕量砷、硒、碲、锡、铅、铋、秘、汞等元素的新型非色散原子荧光光度计。郭小伟、杨密云等于 1979 年研制出溴化物无极放电灯,其作为激发光源应用于氢化物

发生-原子荧光光谱装置，成功地解决了国外碘化物无极放电灯引发的铋光谱干扰问题[16]。1981~1982年郭小伟和张锦茂研究小组合作研制出世界上首台以溴化物无极放电灯作为激发光源的“WYD-2型双道氢化物-无色散原子荧光光谱仪”[8]，该仪器用氢化物反应的氢气来产生氫氢焰，用溴化物无电极放电灯代替碘化物灯来消除铋光谱干扰，通过切光器的光源切光、讯号分离器的信号分离，实现了两种可形成氢化物元素的同时测定，具有检测速率提高一倍，氢气用量节省一倍的优点。其结构原理图如图1所示。

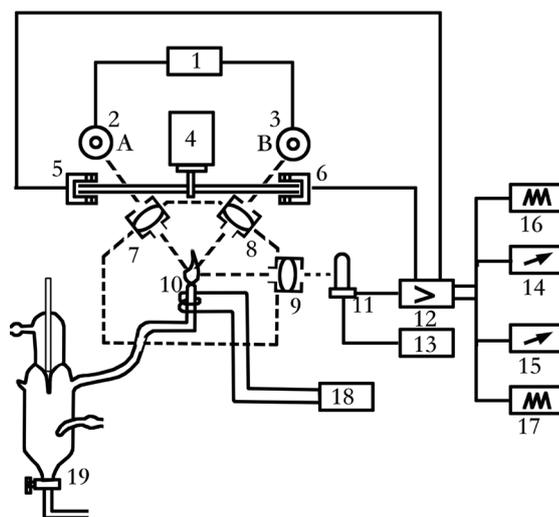
近年来，原子荧光光谱仪在多通道技术上不断发展，在测量范围上不断拓宽，在辅助功能上不断加强。周志恒等基于通道合并设计思想和通道间干扰消除技术，制造出多通道原子荧光光谱仪[17]。李海涛等研发出化学蒸汽发生-四通道原子荧光光谱法，可用于同时测定水样中的痕量砷、锑、硒、汞[18]。北京吉天仪器有限公司通过结合有色散和无色散两种技术，研制出全谱多通道蒸汽发生原子荧光光谱仪，大大拓宽了现有蒸气发生-无色散原子荧光光谱仪的测量范围[19]。刘海涛等设计的智能环保型光源漂移自动校正原子荧光光谱仪，可自动校正激发光源产生的漂移，提高了分析准确性[20]。刘霁欣、冯礼公开了一种电热蒸发原子荧光光谱仪，它具有消除基体干扰的功能，可实现镉的精确测量[21]。

此外，为满足现场快速检测需要，北京瑞利分析仪器有限公司通过对进样系统、气路系统、气液分离系统、原子化系统、光学系统、检测系统进行微型化、低功耗设计，成功开发出首台便携式原子荧光光谱仪(PAF-1100)。该仪器的工作原理与蒸汽发生非色散原子荧光结构系统相似，具有功耗低、体积小、重量轻、工作时间长等优点，其性能指标与实验室常规的原子荧光光谱仪相同，可用于As、Sb、Bi、Se、Te、Pb、Sn、Hg、Cd、Ge、Zn、Au、Cu、Ag、Co、Ni等十六种元素的测定，填补了国内外便携式原子荧光光谱仪的空白。其实物图如图2所示。

发展到现在，原子荧光光谱仪已经成为我国少数具有自主知识产权、技术水平超过进口的分析仪器。

3. 技术研究

为不断优化原子荧光光谱法的性能，实现样品充分利用、分析准确性增强；分析干扰消除、检测灵



1—双道微波发生器；2、3—光源、谐振腔和无极灯；4—机械切光器；5、6—光电同步信号装置；7、8、9—聚光镜；10—石英炉；11—光电倍增管；12—检测系统；13—负高压电源；14、15—表头；16、17—双笔记录仪；18—炉温控制器；19—氢化物发生器

Figure 1. WYD-2 Two-channel hydride-dispersion-free atomic fluorescence spectrometer
图1. WYD-2型双道氢化物-无色散原子荧光光谱仪结构原理图



Figure 2. PAF-1100 portable atomic fluorescence spectrometer

图 2. PAF-1100 便携式原子荧光光谱仪

灵敏度提高；检测装置简化、检测效率提高，科研工作者们研发出了一系列相关技术。

3.1. 样品消解技术

如何实现样品消解完全，避免待测元素损失和玷污，提高分析准确性是样品消解的主要任务。消解方法主要包括干法灰化法，湿法消解法和微波消解法。但是，干法灰化法和湿法消解法分别存在易丢失元素、消解效果不稳定和消解液量要求多、消解速度缓慢等缺陷。微波消解法是一种利用微波能量，直接在样品内部进行消解的新技术。其基本原理为：在微波电磁场中，极性分子快速旋转、离子快速迁移，它们之间相互摩擦，使反应物温度迅速升高，激发分子并使之处于反应的准备态或亚稳态，促进物质与相关试剂反应而消解。相较于前两种方法，微波消解有着快速、稳定、准确等优点，并且原子荧光光谱法所测元素大都易挥发，而微波消解技术具有消解效率高、避免挥发损失等特点，故其在 AFS 中可以较好应用。其工作原理图如图 3 所示。

郑英等通过微波消解法分解样品，为后续氢化物发生-原子荧光法快速测定人发中的痕量 As 提供了良好条件[22]。毛红等对不同样品使用不同的微波消解方法，达到了较好效果[23]。王志嘉等联用微波消解和原子荧光光谱法，测定了中药材中铅、镉、砷、汞、锑含量，该法具有快速、简便、准确、灵敏度高等优点，是中药材中重金属含量测定的较好方法[24]。此外，为进一步提升消解性能，浙江大学王雪芹首次提出微波消解样品，尿素除去微波消解液中亚硝酸，氢氧化钠中和过量硝酸，L-半胱氨酸在低酸度下预还原砷(V)到砷(III)的预处理方法，该方法避免了赶酸所引起的样品玷污和底物挥发所引起的待测元素损失，实现了食品中痕量砷的快速准确测定[25]。

3.2. 干扰消除技术

研发干扰消除技术，降低原子荧光光谱法的干扰敏感性，对提高分析准确度具有重要意义。原子荧光光谱法的干扰主要包括分析信号分离不完全和产生原子蒸气不能代表样品成分。第一种干扰是因荧光信号与其他辐射分离不完全所致，一般情况下使用单色器、滤光片或只对有限光谱区有响应的检测器，即可实现有效信号的分离。第二种干扰与原子蒸气的产生技术关系较大，目前比较常用的原子蒸气产生技术是氢化物发生技术，其对应于研究较多的氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)。

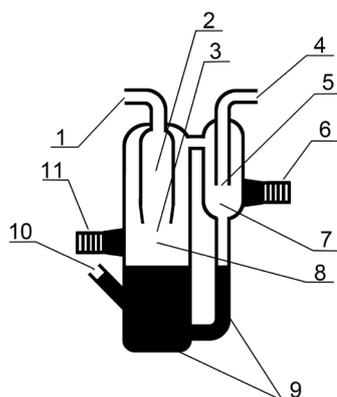
HG-AFS 的干扰分为液相干扰和气相干扰。液相干扰主要是因转化为氢化物的百分比改变所致，具体包括：干扰离子消耗 KBH_4 而造成 KBH_4 不足；待测元素被转化为难以形成氢化物的价态[26] [27]；干扰离子与氢化物反应，生成稳定复合物或难溶解化合物[28]；过渡金属离子与 KBH_4 反应生成的金属小颗粒、硼化物小颗粒，可分解氢化物或与氢化物共沉淀，导致氢化物发生效率降低或停止[29] [30] [31] [32]。气相干扰主要是由于干扰元素可产生气态氢化物，其消耗氢基，造成原子化器中氢基缺乏，进而抑制了原子态的产生效率[33]。

解决液相干扰的方法主要包括：第一，加入络合剂或掩蔽剂，与干扰元素形成稳定络合物，降低其氧化还原电位，常使用的有：EDTA + 硫脲 + 抗坏血酸消除造岩元素和 Cu、Co、Ni、Zn 对测定 As、Sb、Bi、Hg、Se 的干扰[34] [35]；三价铁盐 + 硫脲 + 碘化钾掩蔽 Cu、Co、Ni、Fe、Au、Pt 等元素对测定 Bi、Cd、Te 的干扰[36]；硫脲 + 抗坏血酸掩蔽 Cu、Ni、Fe 对测定 Sn 的干扰[37]。第二，适当增加待测液和载流的酸度，可有效消除过渡金属离子的干扰。第三，前处理样品时，通过化学手段分离干扰元素。于力用锌粉在 500℃ 条件下富集锡形成 Zn-Sn 合金，用氯化铵与 Sb_2O_3 反应生成 $SbCl_3$ 除去锑，实现了三氧化二锑中锡的准确测量[38]。第四，改变氢化物发生方式，采用连续流动、断续流动或顺序注射的进样方式干扰较小[39]。对于气相干扰的消除，主要是通过阻止干扰元素生成气态化合物或减少干扰元素氢化物的传输效率来实现。郭小伟等采用 $HgCl_2$ 微型柱在线吸附的方法，彻底消除了 As、Sb、Bi、Sn、Pb、Se、Te 对 Ge 的气相干扰。

目前，使用气液分离器是消除气液干扰的最好方法，特别是对有机质含量较高的样品进行测量时，气液分离器对于阻止其伴生泡沫影响测定结果起着至关重要的作用[40]。图 4 为梁敬等[41]研发的气液分离器结构原理图，该仪器包括合并的一级分离区和二级分离区，在实现较好气液分离的同时，用两个电



Figure 3. Microwave digestion schematic
图 3. 微波消解原理示意图



1—进液管；2—压力释放区；3—喷流口；4—出气管；5—二级分离后的进气口；6—第二液位传感器；7—二级分离区；8—一级分离区；9—废液区；10—出口；11—第一液位传感器

Figure 4. Gas-liquid separator
图 4. 气液分离器

容式液位传感器分别实时监测分离区的液位高度变化,可有效避免废液进入原子化器的潜在危险,具有结构简单、成本低廉、可操作性强等优点。

3.3. 简化技术研发

在不影响原子荧光光谱分析准确性的前提下,促进其装置和检测技术的简化,可有效提高仪器的检测效率。近年来,许多科研工作者致力于这方面的研究,取得了许多专利技术。马聪等研制的用于原子荧光光谱仪的光源热插拔装置,结构简单、安全可靠,简化了光源更换流程,为实验人员提供了极大便利[42]。宋雅东等设计的用于原子荧光的氢化物发生系统,改变了原有原子荧光进样系统的进样方式,在极大程度简化原子荧光仪器结构的同时,还提高了仪器检测时的灵敏度和稳定性[43]。刘霁欣等研制出一种直接进样并同时测定汞和镉的仪器,该仪器整在结构上实现了小型化,便于常规分析和应急需求,可车载野外使用,具备现场检测的应用前景[44]。张勤等研发的气动式流动注射气体发生自动装置,实现了进样、定量取样、气体推送、混合反应、气液分离以及清洗等自动功能,简化了人工操作步骤,提高了检测效率[45]。郑逢喜等研制的用于原子荧光光谱仪的氢化物发生装置,能够全自动配置含待测样品的不同浓度的系列标准溶液,大大简化了标准加入法的测试过程,缩短了检测时间,降低了试剂消耗[46]。

4. 原子荧光光谱法的应用研究

原子荧光光谱法最开始是应用于冶金工业和地质分析领域。近年来,随着人们生活水平的提高和对生态环境的日益重视,原子荧光光谱法逐渐在食品安全和环境检测方面得到较多应用。本节主要总结了近五年(2014-2018) AFS 技术在食品安全和环境检测领域的应用研究。

4.1. AFS 在食品安全领域的应用

刘存丽等建立了氢化物发生原子荧光法检测蒜薹中痕量硒的分析体系,实验结果表明,在该体系在最优条件下,痕量硒检出限为 $5 \mu\text{g}/\text{kg}$,线性范围为 $2.0\sim 50 \mu\text{g}/\text{L}$,相对标准偏差 3.1% ,回收率介于 $98.3\%\sim 103.5\%$ 之间。该分析体系具有简便、快速、灵敏度高的优点,提供了一种蔬菜中有机硒和无机硒测定的较为完善的检测方法[47]。韩张雄等通过优化微波消解技术逐级升温来消解样品,建立了苹果中痕量硒的微波消解-氢化物发生-原子荧光法测定体系,经多次检测证实,该方法较为稳定,检出限为 $0.217 \text{ ng}/\text{g}$,不同苹果类型的检测精密密度介于 $1.55\%\sim 8.55\%$ 之间,回收率为 $93.2\%\sim 105.7\%$,能满足分析要求[48]。董喆等联用高效液相色谱和氢化物发生原子荧光法,检测了不同基质食品中的砷含量及其形态,结果表明,该方法具有操作简单,灵敏度高,重现性好等优点,对食品中砷形态含量的定量检测较为适用[49]。林长钦等采用液相色谱-原子荧光光谱法(LC-AFS)测量了食品中无机砷的含量,该方法对检测质量浓度为 $5 \mu\text{g}/\text{L}$ 的 As(III)和 As(V)标样具有高的检测灵敏度,对 $5.0\sim 100.0 \mu\text{g}/\text{L}$ 范围内的无机砷检测具有良好的线性,相关系数可达到 0.999 以上,是一种高效测定食品中无机砷含量的方法[50]。

4.2. AFS 在环境检测领域的应用

汞、砷、硒作为环境检测分析中涉及最多的元素,是环境风险评价的重要依据。戴礼洪采用固相萃取-高效液相色谱-原子荧光光谱法联用技术测定了水样中无机汞和有机汞的含量,汞(II)、甲基汞和乙基汞的检出限依次为 $1.6 \text{ ng}/\text{L}$ 、 $0.5 \text{ ng}/\text{L}$ 和 $1.2 \text{ ng}/\text{L}$,加标回收率在 $71.2\%\sim 95.2\%$ 之间[51]。陈邵鹏建立了微波辅助萃取-高效液相色谱-原子荧光光谱(HPLC-AFS)联用技术分析土壤中4种形态砷的方法[52]。王丹君建立了微波消解样品,On-Guard H小柱过滤去除消解液中金属元素,原子荧光光谱法测定土壤中硒的方法,该方法消解性能良好,避免了测定元素的挥发损失,准确度和灵敏度较高,可用于土壤中微量硒的测定[53]。此外,为实现环境中的重金属监测,有效发挥原子荧光光谱法的特点,王建伟等在进行仪器

改进和方法优化后,研发出适合于在线监测要求的原子荧光重金属监测仪器,从结果来看,原子荧光光谱法在重金属在线监测领域中应用较好,为重金属在线监测提供了一种较为可靠且实用的分析方法[54]。

5. 结语和展望

原子荧光光谱法自 1964 年诞生以来,经过四十余年的研究和改进,其实验仪器和技术方法均得到了较程度的发展完善。原子荧光光谱仪结构简单、性能较好、成本较低,具有重要的实用价值。近年来,我国研发的首台便携式原子荧光光谱仪,可实现现场的快速分析检测。微波消解技术有效促进了样品的完全消解,气液分离技术有效消除了气液干扰,仪器简化设计较好地提高了分析检测效率。在应用方面,原子荧光光谱法展现出蓬勃生机,与其他方法联立的技术更是优化了它的分析检测效果。但目前,原子荧光光谱法仍存在一些不足,比如:理论研究滞后,氢化反应机理等有待于深入探讨;存在荧光猝灭效应和散射光干扰问题;由于样品含量低、测试偶有喷溅、易发生记忆效应(特别是汞的测量)等,使仪器测定的重现性较差;相比于 AAS 和 AFS,原子荧光光谱法的测量范围稍逊;此外,灵敏度有待进一步提升等。因此,在深入探究相关机理的基础上,拓宽测试元素范围,增加应用领域,减少检测误差,提高灵敏度、重现性、稳定性,同时研发性能优异、成本低廉、应用效果突出的原子荧光光谱仪是未来的发展方向。

基金项目

西南石油大学“助力飞翔”课外素质能力拓展重点项目(2018~2019)。

参考文献

- [1] 肖元芳,王小华,杭纬. 中国原子光谱发展近况概述[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2377-2387.
- [2] Winefordner, J.D. and Vickers, T.J. (1964) Calculation of the Limit of Detectability in Atomic Emission Flame Spectrometry. *Analytical Chemistry*, **36**, 1939-1946. <https://doi.org/10.1021/ac60216a018>
- [3] Holak, W. (1969) Gas-Sampling Technique for Arsenic Determination by Atomic Absorption Spectrophotometry. *Analytical Chemistry*, **41**, 1712-1713. <https://doi.org/10.1021/ac60281a025>
- [4] Tsujii, K. and Kuga, K. (1974) The Determination of Arsenic by Non-Dispersive Atomic Fluorescence Spectrometry with a Gas Sampling Technique. *Analytica Chimica Acta*, **72**, 85-90. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)82951-2](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)82951-2)
- [5] 杜文虎. 原子荧光测汞法[J]. 分析化学, 1978, 6(4): 313-319.
- [6] 杜文虎,何幼雪,夏璐秀,马龙宝. 一种新型的非色散原子荧光光度计的研制[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1980(4): 41-49.
- [7] 郭小伟,杨密云. 氢化物-无色散原子荧光法在分析中的应用[J]. 分析化学, 1980, 8(5): 466-470.
- [8] 郭小伟,杨密云,吴堂,张锦茂,许志诚,李养荣. 双道氢化物五色散原子荧光光谱仪的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 1983(2): 122, 124-129.
- [9] 郭小伟,郭旭明. 断续流动氢化物发生法在 AAS/AFS 中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 1995, 15(3): 97-102.
- [10] 张锦茂, 范凡, 郭小伟, 杨密云. 双道氢化物原子荧光法同时测定地球化学样品中的微量砷和铋[J]. 物探与化探, 1984(3): 150-161.
- [11] 郭小伟,李立. 氢化物-原子吸收和原子荧光法中的干扰及其消除[J]. 分析化学, 1986(2): 151-158.
- [12] 刘明钟,郭小伟,张锦茂. 脉冲空心阴极灯作为氢化物发生非色散原子荧光法的光源的研究[J]. 分析化学, 1988(1): 34-39.
- [13] Thompson, K.C. (1975) The Atomic Fluorescence Determination of Antimony Arsenic Selenium and Tellurium by Using the Hydride Generation Technique. *Analyst*, **100**, 307-310. <https://doi.org/10.1039/an9750000307>
- [14] Perkins, Larry, D. and Long Gary, L. (1988) Evaluation of Line and Continuum Sources for Atomic Fluorescence Spectrometry Using a Low-Powered Argon Microwave Induced Plasma. *Applied Spectroscopy*, **7**, 1285-1289.
- [15] 杜文虎. 原子荧光测汞法[J]. 分析化学, 1978, 6(4): 314-318.
- [16] 郭小伟,杨密云. 氢化物-无色散原子荧光法在分析中的应用 I 氢化物-无色散原子荧光法的装置及应用展望[J].

分析化学, 1980(5): 466-470.

- [17] 周志恒, 冯武, 王智宏, 林君. 基于多道原子荧光光谱仪的通道平衡设计[J]. 计量学报, 2006(3): 273-276.
- [18] 李海涛, 李中玺, 杨张莹, 冯晓明, 郭跃安, 玉怀. 化学蒸气发生-四通道原子荧光光谱法同时测定水样中的痕量砷、锑、硒和汞[J]. 分析试验室, 2009, 28(4): 9-13.
- [19] 刘明钟, 陈志新, 刘霁欣, 裴晓华, 陈红军. 全谱多通道蒸气发生原子荧光光谱仪[P]. 中国专利, CN2826411. 2006-10-11.
- [20] 刘海涛, 李明章, 宫博, 闫京山, 李金虎, 王威, 林建奇. 智能环保型光源漂移自动校正原子荧光光谱仪[P]. 中国专利, CN107389547A. 2017-11-24.
- [21] 刘霁欣, 冯礼. 测定镉的电热蒸发原子荧光光谱仪[P]. 中国专利, CN201732064U. 2011-02-02.
- [22] 郑英, 罗方若, 郎春燕. 微波炉分解试样无色散原子荧光法测定痕量砷[J]. 岩矿测试, 1990(1): 65-67.
- [23] 毛红, 杨志滨, 康健. 微波消解-AAS、ICP、AFS 法测定食品和生物试样中多种元素的研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 1997(2): 29+31-32.
- [24] 王志嘉, 尤海丹, 吴志刚. 微波消解 - 原子荧光光谱法测定中药材中铅、镉、砷、汞、锑的含量[J]. 沈阳药科大学学报, 2008(5): 388-392.
- [25] 王雪芹. 氢化物发生-原子荧光法快速测定食品中痕量砷[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [26] 张宝松. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定铁镍基高温合金中微量硒的研究[J]. 光谱实验室, 1999(4): 25-30.
- [27] 姜能座. 氢化物 - 非色散原子荧光法测定饲料矿物添加剂中的砷[J]. 光谱实验室, 2002(5): 672-676.
- [28] 刘汉东, 等. 流动注射氢化物发生 - 原子荧光光谱法直接测定土壤有效态砷(III)和砷(V)的研究[J]. 光谱学和光谱分析, 2002, 22(5): 862-865.
- [29] 柴昌信, 陈世焱, 陈月源. 氢化物发生 - 原子荧光光谱法直接测定多金属矿中的硒和砷[J]. 岩矿测试, 2009, 28(2): 143-146.
- [30] 杨理勤. Fe~(3+)、砷对硒的氢化物化学干扰机理的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 1999(3): 144-146.
- [31] Feng, X.J. and Fu, B. (1998) Determination of Arsenic, Antimony, Selenium, Tellurium and Bismuth in Nickel Metal by Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, **371**, 109-113. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00291-8](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00291-8)
- [32] 吴琨, 李鸿钢, 苏涛, 卜玲丽. 氢化物发生 - 原子荧光光谱法测定纯锌中铅、锡、镉、锑[J]. 新疆钢铁, 2005(3): 44-47.
- [33] 郭小伟, 李杰. HG-AFS, AAS 中干扰及消除[J]. 分析化学, 1986, 14(2): 151-154.
- [34] 陈占生, 李玄辉, 朝银银. 原子荧光光谱法快速测定化探样品中的砷、锑、铋、汞[J]. 黄金科学技术, 2009, 17(2): 51-53.
- [35] 郭敬华, 马辉, 王水锋. 原子荧光光谱法测定土壤和水系沉积物国家标准物质中砷[J]. 岩矿测试, 2009, 28(2): 182-184.
- [36] 李金莲, 邱海鸥, 席永清. 蒸气发生 - 原子荧光光谱法测定痕 Cd(II)的研究[J]. 分析科学学报, 2006, 22(6): 739-740.
- [37] 蔡秋, 龙梅立. 氢化物发生 - 原子荧光光谱法测定蔬菜罐头中的痕量锡[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 198-200.
- [38] 于力, 汤淑芳. 氢化物发生 - 原子荧光光谱法测定三氧化二锑中锡[J]. 岩矿测试, 2009, 28(2): 185-187.
- [39] 苏明跃, 陈广志, 王晶, 姚传刚. 水浴消解 - 顺序注射 - 氢化物发生原子荧光光谱法测定铁矿石中砷和汞[J]. 岩矿测试, 2011, 30(2): 210-213.
- [40] 杨莉丽, 李娜, 张德强, 高丽荣, 康海彦. 蒸气发生 - 原子荧光光谱法测定中草药中不同形态的汞[J]. 光谱学与光谱分析, 2005(2): 286-289.
- [41] 梁敬, 王庆, 陈璐, 董芳, 侯爱霞, 杨名名, 张锦茂. 用于便携式原子荧光光谱仪的微型气液分离系统[P]. 中国专利, CN203148750U. 2013-08-21.
- [42] 马聪, 丁志国, 谭周勇. 一种用于原子荧光光谱仪的光源热插拔装置[P]. 中国专利, CN201497704U. 2010-06-02.
- [43] 宋雅东, 杨波, 张春宇. 用于原子荧光的氢化物发生系统[P]. 中国专利, CN202092958U. 2011-12-28.
- [44] 刘霁欣, 冯礼, 郑逢喜, 路东, 李俊伟. 一种直接进样同时测定汞和镉的方法和仪器[P]. 中国专利, CN102967590A. 2013-03-13.
- [45] 张勤, 李可, 施苏利, 赵志华, 窦智, 魏建山. 一种气动式流动注射气体发生自动装置[P]. 中国专利,

CN204989023U. 2016-01-20.

- [46] 郑逢喜, 叶建平, 赵萍. 用于原子荧光光谱仪的氢化物发生装置[P]. 中国专利, CN205958458U. 2017-02-15.
- [47] 刘存丽, 宣芳. 氢化物发生 - 原子荧光法测定蒜薹中无机硒和有机硒[J]. 化工时刊, 2014, 28(6): 29-30+34.
- [48] 韩张雄, 董亚妮, 王曦婕, 马娅妮, 陶秋丽, 邢云. 微波消解 - 氢化物发生 - 原子荧光法测定苹果中的硒[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 377-379.
- [49] 董喆, 高明义, 李梦怡, 张会亮, 张庆生, 曹进. 高效液相色谱 - 氢化物发生原子荧光联用法检测不同基质食品中的砷含量及其形态[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(3): 927-932.
- [50] 林长钦, 黄朝耿, 周雷. 液相 - 原子荧光光谱法测定食品中无机砷[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(3): 101-103.
- [51] 戴礼洪, 刘潇威, 王迪, 蒋梦. 固相萃取-高效液相色谱 - 原子荧光光谱法联用测定水中无机汞(II)及有机汞[J]. 理化检验(化学分册), 2015, 51(8): 1178-1182.
- [52] 陈邵鹏, 仲雪. 微波辅助萃取-HPLC-AFS 联用技术检测土壤样品中砷的化学形态[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 159-162.
- [53] 王丹君. 原子荧光光谱法测定土壤中的硒[J]. 理化检验(化学分册), 2014, 50(7): 914-915.
- [54] 王建伟, 朱金伟, 杨子恒, 岳立. 原子荧光光谱法在水环境重金属在线监测中的应用[J]. 分析仪器, 2017(2): 74-77.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-1557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aac@hanspub.org