

地质样品中微量元素分析的 ICP-MS 技术探索

张丹^{1*} 侯乐错² 任智卉¹

(1. 西北大学化学与材料学院 陕西西安 710069; 2. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院 陕西西安 710016)

摘要: 随着地球科学研究的深入,对地质样品中微量元素分析的需求日益增长。这些微量元素的分析对于揭示地球内部过程、环境变化和资源探索具有重要意义。ICP-MS 技术因其出色的检测限、高分辨率和分析速度在地质样品分析中占据重要位置。本研究探讨了 ICP-MS 在地质样品微量元素分析中的应用,包括样品前处理、标准物质选择、数据校正等关键技术问题。通过比较不同方法和条件下的分析结果,展示了 ICP-MS 在精确度、准确度以及检测限方面的优势。同时,针对 ICP-MS 分析中可能遇到的干扰问题,提出了相应的解决策略。研究表明,通过优化分析条件和数据处理方法,ICP-MS 能够有效提高地质样品中微量元素检测的准确性和效率,对于地球科学领域的研究具有重要的实际应用价值。

关键词: ICP-MS 技术; 地质样品; 微量元素分析; 精确度; 干扰问题

引言

在地球科学领域,对地质样品中微量元素的精确分析一直是一个挑战和焦点。微量元素不仅是地球物质的重要组成部分,而且在揭示地球演化历史、环境变化及资源评估方面发挥着关键作用。ICP-MS 技术作为一种高灵敏度、高通量的微量元素分析手段,为我们提供了一种高效且可靠的解决方案。它能够在短时间内完成大量样品的分析,且检测限低,准确性高,是地质样品分析中不可或缺的技术。然而,在应用过程中,如何处理样品、选择合适的标准物质、克服分析干扰等问题成为提高分析质量的关键。本文将围绕 ICP-MS 技术在地质样品微量元素分析中的应用展开,探讨其在提高分析效率和精确度方面的策略和成果,旨在为地球科学研究提供更加深入和精确的数据支持。

一、ICP-MS 技术在地质样品分析中的重要性

ICP-MS 技术,全称为电感耦合等离子体质谱技术,自 20 世纪 80 年代初期引入分析化学领域以来,因其出色的分析性能在地质样品分析中扮演着越来越重要的角色。地质样品的微量元素分析是理解地球内部构造、地质演变历史以及环境变化的关键。ICP-MS 技术以其高灵敏度、宽广的动态范围、快速的分析速度和较低检测限,能够满足地质样品中痕量至超痕量元素分析的需求,对于推动地球科学研究具有重大意义^[1]。

地质样品的组成复杂,含有的元素种类繁多,浓度差异极大,从主量元素到微量及痕量元素,其浓度可覆盖几个数量级。ICP-MS 技术能够在短时间内对这些元素进行快速准确的定量分析,极大提高了分析效率。特别是在分析微量和痕量元素时,ICP-MS 展现出了

其他技术难以比拟的优势,检测限可达 ppt 级别甚至更低,这对于地质样品中那些含量极低的元素分析尤为重要。

除了高灵敏度和低检测限,ICP-MS 技术的另一个显著特点是具有极高的元素覆盖范围,几乎可以分析地球上所有的元素,包括稀土元素和放射性同位素等。这一特性使得 ICP-MS 成为研究地球化学、环境科学以及其他相关领域不可或缺的工具。通过对地质样品中这些元素的分析,可以揭示岩石形成的环境和条件,理解地质过程,甚至对地球早期的环境和气候变化进行重建。ICP-MS 在地质样品分析中的应用也面临一定的挑战,如样品的复杂性往往伴随着多种干扰因素,包括基体效应、同位素干扰以及多元素干扰等。为了克服这些干扰,提高分析的准确性和可靠性,研究者们开发了一系列的技术和方法,如内标法、同位素稀释法以及多元素校正技术等。

应用这些高级方法和技术,ICP-MS (电感耦合等离子体质谱)技术在地质样品分析方面的能力得到了显著增强,不仅能够提供更加精确和可靠的分析结果,还能有效应对分析过程中遇到的各种复杂挑战。通过采用内标法、同位素稀释法以及多元素校正技术等方法,ICP-MS 能够准确地衡量样品中的微量元素,即便是在极低的浓度水平下也能保持高精度和高准确性。这些方法帮助研究人员克服了样品基质效应、同位素干扰以及多种其他潜在的分析干扰因素,确保了结果的可靠性。随着技术的不断创新和优化,ICP-MS 已经能够更好地适应地质样品分析的复杂需求,包括高吞吐量分析和对极低检测限的要求。

二、样品前处理与标准物质的选择

样品前处理和标准物质的选择是 ICP-MS 技术在地质样品中微

量元素分析中的两个关键步骤。这些步骤直接影响到分析结果的准确性和可靠性,因此在执行过程中需谨慎操作。样品前处理涉及样品的收集、保存、运输、准备和消解等多个环节。对于地质样品而言,这些步骤尤为重要,因为样品的物理和化学性质决定了所需的处理方法。例如,岩石、矿石或沉积物样品通常需要经过研磨和粉碎,以确保在后续的消解过程中能够完全分解,从而释放出待测的微量元素^[2]。

消解是样品前处理中的核心步骤,通常采用酸消解、熔融消解或微波消解等方法。酸消解适用于大多数地质样品,但对于含有难溶组分的样品,可能需要采用熔融消解。微波消解因其快速、高效和可控的特点而被广泛应用于地质样品的处理中。正确选择消解方法不仅能够提高微量元素释放的效率,还能降低样品中潜在的污染。

在样品前处理完成后,标准物质的选择成为确保分析结果准确性的另一个关键因素。标准物质用于校准 ICP-MS 设备,以及作为质量控制的基准,验证分析过程的准确性和重复性。在地质样品分析中,应选择与样品矩阵相匹配的标准物质,这意味着标准物质的化学和物理性质应与待测样品尽可能相似。标准物质中所含微量元素的浓度应覆盖待测元素的预期浓度范围,以保证分析的准确性。

选择合适的标准物质不仅关系到分析结果的准确度,还直接影响到数据的可比性和可信度。因此,在实际操作中,应综合考虑标准物质的来源、认证水平及其与待测样品的相似度,以确保分析结果的高准确性和高可靠性。定期对标准物质进行校验和验证,以监控分析过程的稳定性和可靠性,也是实现高质量分析结果的重要环节。

三、ICP-MS 分析过程中的干扰问题及解决策略

在地质样品的微量元素分析领域,ICP-MS 技术以其高灵敏度和

广泛的元素覆盖范围成为研究者的首选。然而,分析过程中经常会遇到多种干扰,这些干扰可能来源于样品本身、仪器的工作条件或是分析方法。识别和解决这些干扰是提高分析精度和准确度的关键^[3]。一类主要的干扰是物理干扰,包括基体效应和信号抑制或增强现象。基体效应通常由样品中的主要组分引起,影响分析结果的准确度。为应对此类干扰,采用内标法校正是一种有效策略。通过添加已知浓度的内标元素,可以补偿样品引入过程中的信号波动,从而提高分析结果的准确性。

化学干扰是另一种常见问题,尤其是在分析含有复杂基体的地质样品时。化学干扰主要来源于样品中元素的化学形态变化,导致分析信号的变异。针对这一问题,优化样品前处理过程,如采用适当的酸溶解或螯合剂,有助于减少化学干扰。调整 ICP-MS 的工作参数,比如反应/碰撞气体的引入,可以有效地降低或消除特定元素的化学干扰。

谱干扰是 ICP-MS 分析中最具挑战性的干扰类型,包括同位素重叠、多原子离子形成和谱线重叠等。例如,⁴⁰Ar¹⁶O⁺的形成会与⁵⁶Fe⁺的信号重叠,影响铁的准确测定。为了解决这类干扰,高分辨率 ICP-MS 或动态反应细胞技术(DRC)等先进技术被引入。通过设定适当的质量分辨率或使用特定的气体反应,可以有效地分离干扰物种和目标分析物的信号,显著提高分析的选择性和准确性。

实际应用中,采用多种策略组合对付干扰问题是常见且有效的方法。例如,在分析含高浓度铁的地质样品时,先通过酸溶解和稀释减少基体效应,然后使用内标物质校正物理干扰,最后通过高分辨率 ICP-MS 技术解决谱干扰问题,从而实现精确的微量元素定量分析。

表 1: 典型的干扰解决方案在地质样品分析中的应用示例

分析元素	干扰类型	解决策略	前处理方法	优化参数
Fe	谱干扰	高分辨率 ICP-MS	酸溶解稀释	质量分辨率调整
Sr	基体效应	内标法校正	酸溶解稀释	内标物质选择
As	化学干扰	反应/碰撞气体技术	适当螯合剂添加	反应气体类型和流量调整

通过综合利用上述策略,ICP-MS 技术在地质样品中的微量元素分析方面能够达到更高的准确度和可靠性,满足地球科学研究对数据质量的严格要求。

四、提高 ICP-MS 分析精确度与准确度的关键技术

ICP-MS (电感耦合等离子体质谱) 技术在地质样品分析中的广泛应用,凸显了其在处理复杂样品时的高效性和高灵敏度。然而,

要实现高精度与准确度的分析结果,需依赖于一系列关键技术的有效应用和优化。这些技术不仅涵盖了样品的前处理和干扰的解决策略,还包括仪器参数的精细调控和数据处理方法的选择^[4]。样品前处理是分析过程中的第一步,直接影响到分析的准确度和重复性。地质样品通常含有复杂的基质,可能会导致仪器读数受到影响。采用适当的溶解和稀释方法,能够有效减少基质效应,提高元素测定

的准确性。

数据处理方法的选择对于提高分析结果的准确度和精确度同样重要。内标法是一种常用的数据校正方法,通过添加已知浓度的内标元素,可以有效校正样品引入过程中的波动和仪器读数的不稳定性。采用合适的校准曲线和质量控制样品,能够进一步确保数据的可靠性和分析结果的重复性。

干扰的识别和处理是提高 ICP-MS 分析准确度的重要环节。通过选择合适的碰撞/反应气体,可以有效降低或消除特定类型的干扰,如同位素重叠和多原子离子干扰。利用高分辨率或多接收器 ICP-MS 技术,可以进一步提高分析的选择性,减少干扰的影响。

在实际应用中,提高 ICP-MS 分析精确度与准确度需要分析人员具备深入的仪器操作知识和丰富的实验经验。通过不断优化分析流程和条件,结合先进的数据处理技术,可以有效提升分析性能,满足地质样品微量元素分析的高标准要求。随着 ICP-MS 技术和配套软件的不断进步,未来在提高分析准确度和精确度方面将有更多的创新和突破。

五、ICP-MS 技术在地质科学研究中的应用与展望

电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术,以其卓越的检测灵敏度、广泛的元素覆盖范围和快速的分析速度,已经成为地质科学研究中不可或缺的工具。从岩石学、矿物学到环境科学,ICP-MS 技术的应用广泛,不仅促进了对地球深部结构的理解,也为环境监测和资源评估提供了重要的技术支持^[9]。

在岩石学研究中,利用 ICP-MS 分析岩石样品中的微量元素和稀土元素组成,可以揭示岩石的成因、演化历程以及地壳运动的信息。通过精确测定岩石样品中的微量元素,科学家们能够重构古环境条件,理解地球早期大气和海洋的化学性质。在矿物学领域,ICP-MS 技术用于分析矿物中的微量元素和同位素,这对于矿物的成分分析、成矿过程研究以及矿床的勘探具有重要意义。

环境科学是 ICP-MS 技术另一重要应用领域。通过分析土壤、水体和大气颗粒样品中的微量元素和重金属污染物,ICP-MS 为环境污染监测和评估提供了强有力的技术支持。

展望未来,随着 ICP-MS 技术的不断进步和创新,其在地质科学研究中的应用将更加广泛和深入。一方面,技术创新,如多接收器 ICP-MS (MC-ICP-MS) 和激光剥蚀 ICP-MS (LA-ICP-MS),将进一步提高分析的灵敏度和空间分辨率,使得单个矿物颗粒甚至是细胞级别的元素和同位素分析成为可能。另一方面,数据处理和解释能力的增强,将促进 ICP-MS 技术与地球科学其他领域,如地质

模型、地球化学循环及全球环境变化研究的深度融合。

随着对地球深部过程和环境变化理解的不断深入,ICP-MS 技术在揭示地球系统复杂性方面将扮演更加关键的角色。从微观到宏观,从古代到现代,ICP-MS 技术为地质科学研究提供了一扇窗口,透过这扇窗口,科学家能够更加精准地解读地球的语言,为人类的可持续发展提供科学依据和技术支持。

结语

ICP-MS 技术在地质样品中微量元素分析的应用已展现出其不可替代的优势,包括高灵敏度、广泛的元素覆盖范围和快速的分析速度。通过优化样品前处理、选择合适的标准物质、以及应用高级数据处理和干扰管理策略,ICP-MS 不仅提高了分析的准确度和效率,还扩大了其在地球科学研究中的应用范围。面对样品复杂性和分析挑战,ICP-MS 证明了其在揭示地球内部过程、环境变化和资源探索方面的重要价值。随着技术的不断进步和创新,ICP-MS 预计将在地质科学领域发挥更加关键的作用,为解读地球系统的复杂性提供更加精准的数据支持,进一步促进人类对地球深部秘密的探索和可持续发展策略的制定。

参考文献

- [1]安霖.微波消解-ICP-MS 在岩石矿物微量元素分析中的应用[J].山西冶金,2023,46(12): 245-247.DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2023.12.090.
 - [2]吴进轩,范伟兵,安子龙等.ICP-MS 法分析不同采收时期何首乌微量元素的动态变化[J].农业与技术,2023,43(18): 5-8.DOI: 10.19754/j.nyyjs.20230930002.
 - [3]徐玉全.LA-ICP-MS 应用于 BSO 晶体定量和微区成像分析方法的研究[D].上海应用技术大学,2023.DOI: 10.27801/d.cnki.gshyy.2023.000428.
 - [4]张红雨,赵青青,赵刚等.黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位微区分析方法及其在金矿床研究中的应用[J].矿床地质,2022,41(06): 1182-1199.DOI: 10.16111/j.0258-7106.2022.06.006.
 - [5]邓宁,徐正,周莉莉等.易腐叶菜类蔬菜中微量元素的 ICP-MS 半定量分析方法研究[J].中国果菜,2022,42(09): 16-20.DOI: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2022.09.003.
- 基金资助: 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院技术开发项目《煤岩气压裂用低分子高耐盐稠化剂合成与室内评价》(2304-4-10)