

国家科技基础条件平台建设项目
“全国分析检测人员能力培训与考核体系”成果

全国分析检测人员能力培训委员会(NTC)系列培训教材

ATC 017

电感耦合等离子体 质谱分析技术

李冰 陆文伟 主编



中国质检出版社
中国标准出版社

国家科技基础条件平台建设项目
“全国分析检测人员能力培训与考核体系”成果



全国分析检测人员能力培训委员会(NTC)系列培训教材

ATC 017

电感耦合等离子体质谱分析技术

李 冰 陆文伟 主编

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

ATC 017 电感耦合等离子体质谱分析技术/李冰,
陆文伟主编. —北京:中国标准出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5066-8315-9

I. ①A… II. ①李… ②陆… III. ①电感耦合等
离子体光谱法—技术培训—教材 IV. ①O657.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 167318 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 68533533 发行中心: (010) 51780238

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 16.75 字数 420 千字

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月第一次印刷

*

定价: 60.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010)68510107

全国分析检测人员能力培训委员会 (NTC)

主任 吴波尔
副主任 刘卓慧 吴学梯 张 泽
委员 (按姓氏笔画排序)
马晋并 方 向 王海舟 乔 东 庄乾坤
许增德 宋桂兰 张渝英 李文龙 葛红梅

全国分析检测人员能力培训委员会 (NTC)

系列培训教材编审委员会

总 编 审 张渝英
副总编审 王海舟 乔 东
常务编审 符 斌 佟艳春
编 审 (按姓氏笔画排序)
马燕文 马振珠 于世林 邓 勃 邓星临 邓志威
王光辉 王明海 王春华 王 滨 王福生 王 蓬
尹 明 田 玲 白伟东 刘虎威 刘国詮 刘丽东
刘咸德 刘 正 刘 英 刘卫平 刘 挺 江超华
再帕尔 吕 杨 吴牟天 吴惠勤 吴淑琪 吴国平
冯先进 孙素琴 孙泽明 齐美玲 朱衍勇 朱跃进
朱林茂 朱生慧 朱锦艳 朱 斌 汪正范 汪聪慧
李 冰 李 小 佳 李丛笑 李红梅 李华昌 李重九
李继康 李寅彦 李国会 李万春 李美玲 沈学静
沈建忠 牟世芬 杨啸涛 杨春晟 邹汉法 罗立强
罗倩华 张 中 张 庄 张之果 张学敏 张锦茂
张伟光 张克顺 张东生 张 亮 张慧贤 林崇熙
谢孟峡 者冬梅 周志恒 周巍松 周艳明 郑国经
卓尚军 屈文俊 贾云海 柯以侃 柯瑞华 柯晓涛
陈江韩 陈吉文 胡国栋 胡净宇 胡洛翡 胡晓燕
赵 雷 徐友宣 徐本平 徐经纬 高介平 高宏斌
高怡斐 唐凌天 谭晓东 郭永权 侯红霞 崔秋红
蒋士强 蒋仁贵 蒋子江 梁新帮 陶 琨 黄业茹
傅若农 詹秀春 蔡文河 臧慕文 魏若奇

序

分析测试技术作为科技创新的技术基础，国民经济发展和国际贸易的技术支撑，环境保护和人类健康的技术保障，正受到越来越多的关注，而分析测试体系的建设在科技进步和经济发展中正发挥着举足轻重的科技基础条件平台的作用。从1999年以来，科技部先后组织建设并形成了分析测试方法体系、全国检测资源共享平台，大型仪器共享平台，标准物质体系以及应急分析测试体系等分析测试相关的基础条件平台。2005年在科技基础条件平台建设中，又启动了《机制与人才队伍建设——全国分析测试人员分析测试技术能力考核确认与培训系统的建立与实施》项目。从而形成了“人员、方法、仪器、标准物质、资源”等组成的完整系统的分析测试平台体系。

为加强分析检测人员队伍的建设，确保分析检测人员技术能力的培训与考核工作的科学性、规范性、系统性和持续性，完成国家科技基础条件平台建设的相关任务。中华人民共和国科学技术部、国家认证认可监督管理委员会等部门共同推动成立了“全国分析检测人员能力培训委员会”（简称“NTC”）负责对分析检测人员技术能力的培训与考核工作。由科技部及国家认证认可监督管理委员会的领导共同主持了启动仪式。

NTC宗旨为提高我国分析检测人员整体的检测能力和水平，促进分析检测结果的准确性和可靠性，为国家科技进步、公共安全、经济社会又好又快发展服务。

NTC依据国家相关法律法规，按照分析检测的相关国际和国家标准、规范等开展培训工作，遵循客观公正、科学规范的工作原

则开展考核工作。

分析检测技术的分类系以通用分析测试技术为基点，兼顾专用技术，根据相关学科分类标准及分析检测技术设备原理划分，形成每项技术分别覆盖材料、环境资源、食品以及能源等领域化学成分和性能表征的分析测试技术能力分类系统，首批纳入了58项技术。

每项分析检测技术由四个技术部分组成，即分析检测技术基础、仪器与操作技术、标准方法与应用以及数据处理。

通过相关技术四个部分考核的技术人员将由全国分析检测人员能力培训委员会颁发分析检测人员技术能力证书，是对分析检测人员具备相关分析检测技术（方法）或相关部分的技术能力的承认，可以胜任相关分析检测岗位的检测工作；该证书可作为计量认证、实验室认可、相关认证认可以及大型仪器共用共享的能力证明。

为规范各项技术考核基本要求，委员会正式发布了各项技术的考核培训大纲。为便于培训教师、分析检测人员进一步理解大纲的要求，在全国分析检测人员能力培训委员会统一领导下，由全国分析检测人员能力培训委员会秘书处负责组织成立了 NTC 教材编审委员会，系统规划教材的系统设置方案、设计了教材的总体架构、与考核相结合规定了每项技术各部分内容的设置，并分别组织了各分册项技术分编委会，具体负责各项技术的培训教材的编写，经编审委员会负责编审后，由中国质检出版社出版，以服务于全国分析检测人员的技术培训与考核工作。

全国分析检测人员能力培训委员会

NTC 通用理化性能分析检测能力技术分类

1 ATC——化学分析测试技术

- ATC 001 电感耦合等离子体原子发射光谱分析技术
- ATC 002 火花源/电弧原子发射光谱分析技术
- ATC 003 X 射线荧光光谱分析技术
- ATC 004 辉光放电发射光谱分析技术
- ATC 005 原子荧光光谱分析技术
- ATC 006 原子吸收光谱分析技术
- ATC 007 紫外-可见吸收光谱分析技术
- ATC 008 分子荧光光谱分析技术
- ATC 009 红外光谱分析技术
- ATC 010 气相色谱分析技术
- ATC 011 液相色谱分析技术
- ATC 012 毛细管电泳分析技术
- ATC 013 固体无机材料中碳硫分析技术
- ATC 014 固体无机材料中气体成分 (O、N、H) 分析技术
- ATC 015 核磁共振分析技术
- ATC 016 质谱分析技术
- ATC 017 电感耦合等离子体质谱分析技术
- ATC 018 电化学分析技术
- ATC 019 物相分离分析技术
- ATC 020 重量分析法
- ATC 021 滴定分析法
- ATC 022 有机物中元素 (C、S、O、N、H) 分析技术
- ATC 023 酶标分析技术

2 ATP——物理检测技术

- ATP 001 金相低倍检验技术
- ATP 002 金相高倍检验技术
- ATP 003 扫描电镜和电子探针分析技术
- ATP 004 透射电镜分析技术
- ATP 005 多晶 X 射线衍射分析技术
- ATP 006 俄歇电子能谱分析技术
- ATP 007 X 射线光电子能谱分析技术
- ATP 008 扫描探针显微分析技术
- ATP 009 密度测量技术
- ATP 010 热分析技术

- ATP 011 导热系数测量技术
- ATP 012 热辐射特性参数测量技术
- ATP 013 热膨胀系数测量技术
- ATP 014 热电效应特征参数测量技术
- ATP 015 电阻性能参数测量技术
- ATP 016 磁性参数测量技术
- ATP 017 弹性系数测量技术
- ATP 018 声学性能特征参数测量技术
- ATP 019 内耗阻尼性能参数测量技术
- ATP 020 粒度分析技术
- ATP 021 比表面分析技术
- ATP 022 热模拟试验技术

3 ATM——力学性能测试技术

- ATM 001 拉伸试验技术
- ATM 002 弯曲试验技术
- ATM 003 扭转试验技术
- ATM 004 延性试验技术
- ATM 005 硬度试验技术
- ATM 006 断裂韧度试验技术
- ATM 007 冲击试验技术
- ATM 008 疲劳试验技术
- ATM 009 磨损试验技术
- ATM 010 剪切试验技术
- ATM 011 压缩试验技术
- ATM 012 撕裂试验技术
- ATM 013 高温持久、蠕变、松弛试验技术

本书编委会

主 编 李 冰 陆文伟

编 委 (按姓氏笔画排序)

冯先进 邢 志 刘丽萍 刘 崑

宋娟娥 罗倩华 郑国经

前 言

本书是“全国分析检测人员能力培训委员会 (NTC)”组织的系列培训教材之一。按照 NTC 的培训教材要求,电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 技术编委会首先起草并确定了《ATC 017 电感耦合等离子体质谱分析技术考核与培训大纲》,然后按照大纲的框架编写了本教材。历经两年多的时间,在 ICP-MS 编委会全体成员的共同努力下,多次对大纲和教材进行研讨修改,在多方征求意见的基础上,几易其稿,终于完成了本书的编写任务。

本教材的目的是提高我国基层从事 ICP-MS 分析检测人员的检测能力和水平,希望通过以本书为教材的培训或学习,使分析检测人员了解 ICP-MS 分析技术的基本概念及基础理论知识,熟悉 ICP-MS 仪器的基本结构及工作原理,掌握 ICP-MS 仪器的实际操作能力,了解 ICP-MS 分析技术在相关领域的应用及发展,更好地发挥 ICP-MS 的作用。同时本教材也可作为科研院所和大专院校相关人员的参考书。为此,本书编委会兼顾普及和提高,既有长期从事该技术的教学和应用研究的专家,又有在基层实验室长期从事 ICP-MS 的应用研究和实际检测的具有丰富实践经验的检测工作者。

本教材的编写原则是力图使本书具有广泛的代表性、实用性和先进性。重点介绍四极杆 ICP-MS 技术的基本原理、基础知识和应用,但考虑到 ICP-MS 新仪器新技术快速更新换代,基础理论与应用也不断发展的趋势,对其他相关技术,比如扇形磁场高分辨质谱仪以及飞行时间质谱仪,碰撞反应池技术,串联质谱等也予以介绍。为了使广大读者更好地理解 and 掌握 ICP-MS 仪器的结构和工作原理,在第 1 章和第 2 章中插入了大量图件,这些插图和文字都是陆文伟老师 (上海交通大学) 亲自绘制、编写和反复修改而成。

本书按照大纲要求，共分四部分，第一部分为电感耦合等离子体质谱基础理论知识，主要包括 ICP-MS 的发展和仪器概况、基本原理、常规技术指标和分析方法基础知识等内容。第二部分为电感耦合等离子体质谱分析仪器设备与操作，主要包括 ICP-MS 仪器的基本结构和工作原理、仪器日常操作流程、仪器维护和安全操作、常用试剂和标准溶液配制等。第三部分为电感耦合等离子体质谱标准方法和应用技术，目的是了解 ICP-MS 在有关领域中的应用及标准方法，掌握方法使用范围、使用要求、具体分析步骤、结果计算、操作注意事项等。应用领域主要包括地质、黑色和有色金属材料、环境、食品和农业、生物、石油化工、微电子工业等领域中的痕量超痕量元素分析，砷、汞、溴、碘、锡等元素的形态分析等。第四部分是 ICP-MS 分析的误差统计和数据处理。

本书提供了 5 个实用的附录资料：天然同位素表；常用同位素标准物质比值；ICP-QMS 多原子离子干扰汇总表；同量异位素的数学干扰校正公式；EPA 方法中用到的一些数学校正公式。

在撰写本教材的过程中，引用了大量国内外公开发表的资料，在此亦向文献的原编著者表示感谢。

本书在确定编写大纲和修改过程中得到了各方面技术专家的指导和帮助，在此谨致谢忱。

本书在编写过程中吸取了各应用领域业内专家的意见，力求使本教材能满足该技术在各领域的应用和不同仪器类型用户的培训要求，但由于该技术涉及的应用领域越来越广，仪器类型及其性能在不断发展和提高，以及编者学识和能力所限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请专家和读者批评指正。

编著者

2016 年 5 月

目 录

1	电感耦合等离子体质谱技术基础知识	1
1.1	概况	1
1.2	ICP-MS 技术基本原理	4
1.3	等离子体质谱仪的常规技术指标	26
1.4	等离子体扇形磁场质谱仪	28
1.5	电感耦合等离子体飞行时间质谱仪	34
1.6	等离子体质谱分析方法	37
1.7	ICP-MS 分析方法的质量控制	52
2	ICP-MS 仪器设备与操作	65
2.1	ICP-MS 仪器基本结构	65
2.2	ICP-MS 样品分析流程	105
3	电感耦合等离子体质谱分析方法标准与应用	122
3.1	电感耦合等离子体质谱分析方法通则	122
3.2	地质样品 ICP-MS 分析方法与应用技术	134
3.3	黑色金属材料 ICP-MS 分析方法与应用技术	147
3.4	有色金属材料分析应用	150
3.5	环境样品中 ICP-MS 分析方法与应用技术	156
3.6	食品、农业、生物和医药样品中 ICP-MS 分析方法与应用技术	167
3.7	ICP-MS 在石油、化工中的应用	178
3.8	微电子工业 ICP-MS 分析方法及应用技术	185
3.9	元素形态分析方法与应用技术	202
4	电感耦合等离子体质谱分析结果的数据处理	216
4.1	概述	216
4.2	ICP-MS 分析的结果计算	216
4.3	分析结果的质量控制	218
4.4	ICP-MS 分析结果的不确定度	223

附录	233
附录 1 天然同位素表	233
附录 2 常用同位素标准物质比值 (引自 Nu instrument 资料)	242
附录 3 ICP-MS 多原子离子干扰汇总表	243
附录 4 同量异位素的数学干扰校正公式 (引用自 Thermo Fisher iCAP Q 仪器 软件)	249
附录 5 EPA 方法中用到的一些数学校正公式 (引用自美国 EPA 标准 200.8, 6020)	253

电感耦合等离子体质谱技术基础知识

1.1 概况

电感耦合等离子体质谱技术是以电感耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma) 为离子源, 以质谱计 (Mass Spectrometer) 进行检测的元素和同位素分析技术, 简称 ICP-MS。

ICP-MS 具有灵敏度高、检出限低、线性范围宽、可检测元素覆盖范围广等特点, 同时具备同位素和同位素比值分析等能力, 被认为是最强有力的痕量和超痕量多元素分析技术, 已被广泛地应用于地质、环境、冶金、生物、医学、化工、微电子和食品安全等各个领域。

1.1.1 ICP-MS 发展概况

1912 年, J. J. Thomson 在英国剑桥大学 Cavendish 实验室制作了第一台电场偏转类型质谱仪器。同年他发表了世界上第一张离子信号强度与相应质量数的质谱谱图。1953 年 W. Paul 和 H. S. Steinwedel 在德国自然科学杂志 (Naturforsch) 首次发表了一种新的四极场质谱仪器, 并在他们的专利说明书里描述了四极杆质量分析器和离子阱。1964 年 Greenfield 等描述了电感耦合等离子体源的优异特性, 并把等离子体光源成功应用于原子发射光谱仪器中。1980 年 R. S. Houk, V. A. Fassel, G. D. Flesch, A. L. Gray 和 E. Taylor 首次报道了 ICP-MS 技术的合作研究成果, 展示了 ICP 离子源与质谱技术相结合的巨大潜力。

ICP-MS 仪器早期研发工作来自于 3 个国家的实验室, 即美国爱荷华州立大学 (Iowa State university) 的 Ames 实验室、加拿大的 Sciex 实验室、英国萨里大学 (University of Surrey) 的 British Geological Survey 学院和 VG instrument 公司的合作实验室。早期的许多等离子体质谱技术研究报道和综述性文章主要来自于 Houk、Gray 和 Douglas 等人的研究团队。1983 年商品四极杆等离子体质谱仪器上市, 当时的加拿大 Sciex 公司和英国 VG 公司同时推出各自的第一代商品仪器 Elan250 和 VG Plasmaquad。这两种平行研制的商品仪器系统在细节上虽然有许多不同之处, 但基本上是相似的。ICP-MS 仪器所使用的 ICP 除了方位和线圈接地方式外, 与原子发射光谱中使用的基本相同。所使用的质量分析器、离子检测器和数据采集系统又与四极杆 GC-MS 仪器相类似。此后 30 年间, ICP-MS 仪器迅速发展, 分析性能大幅提升, 应用领域不断扩展。

采用 ICP 作为离子源的质谱仪器包括几种类型, 如电感耦合等离子体四极杆质谱仪 (ICP-Q-MS); 扇形磁场电感耦合等离子体质谱仪 (SF-ICP-MS) 或被称为高分辨率电感耦合等离子体质谱仪 (HR-ICP-MS); 多接收器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) (主要用于高精度的同位素比值分析); 电感耦合等离子体飞行时间质谱仪

(ICP-TOF-MS)。本书以电感耦合等离子体四极杆质谱技术原理及应用内容为主，同时对其他等离子体质谱仪器加以简介。

1.1.2 ICP-MS 仪器概述

ICP-MS 仪器系统可以分成几个部分 (图 1.1): 进样系统 (雾化器、雾化室、蠕动泵、半导体制冷装置等)、等离子体炬、接口 (interface), 又称锥口 (cone) (由采样锥、截取锥等锥体组成)、离子透镜、碰撞/反应池、四极杆滤质器、检测器、仪器控制和数据处理计算机系统, 另外辅助装置为真空系统和循环冷却水系统。

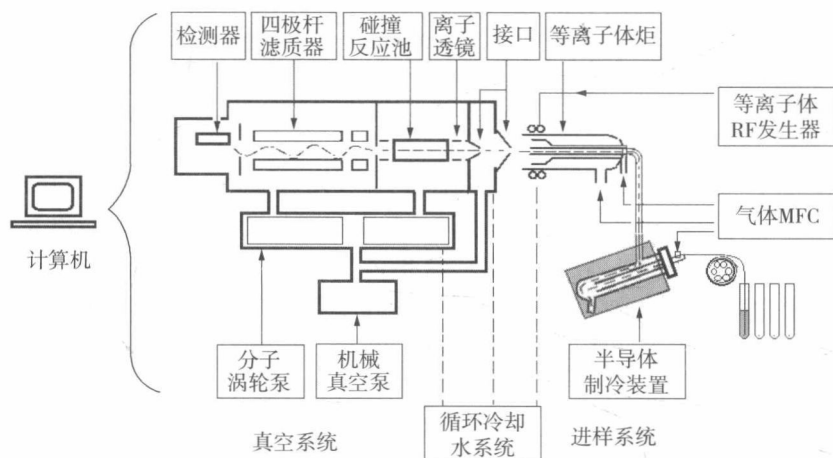


图 1.1 等离子体四极杆质谱仪结构示意图

电感耦合等离子体质谱仪器采用 ICP 作为离子激发源。等离子体提供了一种高温环境, 样品气溶胶 (sample aerosol) 通过其中心高温区时, 绝大多数分析物的分子都会产生键断裂, 生成原子团或原子, 而原子进一步被电离成离子和电子, 所以 ICP 是个电离效率很高 (95% 以上) 的离子源。

锥口是等离子体质谱仪器的重要部件, 它位于等离子体和高真空的质谱系统之间。质谱系统是通过锥口来有效地采集等离子体炬中心产生的离子, 同时锥口阻挡了大部分高温高密度气体分子, 减少它们进入质谱系统的机会。由于锥面直接接触高温, 所以安装锥口的不锈钢座中内置了水槽, 循环水冷系统的冷却水通过水槽和锥座对锥口进行冷却处理。

四极杆质谱器系统包括: 离子透镜系统, 四极杆滤质器以及检测器。离子透镜系统促使离子束聚焦和传输, 施加一定交直流电场的四极杆滤质器在一定的单位时间里只让特定质荷比的离子通过, 并被检测器同步检测。当施加的交直流电场变化时四极杆质谱即可以对不同质荷比的离子完成跳峰或扫描检测。

现代等离子体质谱系统中绝大多数还包括了碰撞/反应池系统, 利用碰撞反应消除或减少多原子离子干扰, 扩大仪器的应用范围。

ICP-MS 仪器通常具有以下几种工作模式:

(1) 标准模式 (standard mode): 采用常规等离子体射频功率, 如 1000W 以上, 应用于一般常规样品的分析, 如地质样品、环境样品等。

(2) 冷等离子体模式 (cool plasma-mode): 采用较低等离子体射频功率 (如 500W ~ 600W) 的工作模式, 有的仪器需要采用屏蔽圈辅助装置, 有的需要换用不同的锥口或离

子透镜)。该模式利用较低等离子体射频功率,减少氩亚稳态离子的生成,降低氩基多原子离子的干扰以改善轻质量离子(如K、Na、Ca、Mg和Fe)的信背比,主要应用于高纯材料和高纯试剂等样品中特定元素的检测。

(3) 碰撞/反应池模式(collision/reaction cell mode):在四极杆滤质器前端加入碰撞/反应池装置,加入反应气体、碰撞气体或混合气体,用以解决质谱干扰问题。也有的采用特殊的碰撞/反应接口。

(4) 动能歧视模式(kinetic energy discrimination mode):在四极杆滤质器中的四极杆与碰撞/反应池中的多极杆上,加入不同的电压,形成一种电势的栅栏,产生一种离子的动能歧视效应,可应用于区分一些动能有所差别的面质荷比相同的离子,碰撞/反应池和动能歧视这二种模式都是用来抑制多原子离子的干扰,二者可以分别使用或配合使用,可应用于食品安全、冶金材料、临床医学、地质以及环境样品中一些困难元素的分析。

(5) 高灵敏度模式(high sensitivity mode):采用接地的屏蔽圈等离子体系统,促使生成离子的能量分布集中,以提高仪器的灵敏度。也可更换或增加一些装置(如更换锥口、离子透镜、高效雾化器以及增加机械真空泵等)来获得更高的灵敏度。高灵敏度模式主要应用于激光剥蚀进样联用系统或高纯材料分析。

(6) 串联质谱模式:在等离子体串联质谱仪器中,利用碰撞/反应池前置的四极杆带通滤除那些不需要的离子,以减小它们形成多原子干扰离子的机会。该模式根据碰撞/反应池前置四极杆与后置四极杆滤质器的不同配合作用,分成单四极杆模式(single quad mode)或质谱/质谱模式(MS/MS mode)。

各种工作模式有时也可以混合使用,以对付一些困难样品分析,抑制强的干扰信号,改善分析元素的信背比。如碰撞/反应池与动能歧视配合使用,又如冷等离子体工作模式和碰撞/反应模式混合使用。也有采用折中的工作条件来对付一些困难样品的分析,如对等离子体射频功率采用中等功率(如700W~800W)等。

等离子体质谱仪器可以与多种附件形成一种联用工作模式,比如采用色谱或激光系统,用时序分析软件来采集和处理瞬间信号,实现对元素的化学形态分析或元素微区分布分析。可以联用的附件包括色谱系统(如液相色谱、离子色谱、凝胶色谱、气相色谱和毛细管电泳等)、激光剥蚀系统、流动注射系统、快速进样系统以及电热蒸发系统等。

1.1.3 ICP-MS 分析技术的特点

ICP-MS拥有多元素快速分析的能力,例如在2min~3min内,对一个样品可以完成3次重复分析,同时完成的元素分析项目可达30种以上。

ICP-MS的元素定性定量分析范围几乎可以覆盖整个周期表,常规分析的元素大约为85种。质谱系统对所有离子都有响应,但部分卤素元素(如F、Cl),非金属元素(如O、N)以及惰性气体元素等由于电离势太高,在氩等离子体中(氩的电离势为15.76eV)电离度低因此信号太小,也有的因背景信号太强(如水溶液引入的H、O)等原因,而没有被包括在常规可分析元素的范围之内。

ICP-MS对常规元素分析的动态线性范围宽,可跨越8~9个数量级,可检测元素的溶液浓度范围为 $0. \times \text{ng/L} \sim \times 00 \text{mg/L}$ 。ICP-MS拥有高灵敏的元素检出能力,有些重元素的检出限甚至可以达到 $0.0 \times \text{ng/L}$,因此在高纯材料,微电子工业和科研单位得到广泛的应用。而等离子体质谱的常量元素分析主要是被应用在环境监测方面(如沉积物中含量在g/kg以上的K、Na、Ca、Mg、Al、Fe等),实际使用中可采用特殊结构的锥口适当地

抑制环境样品中浓度过高的过渡金属元素信号，也可以通过高浓度元素采用高分辨率设置来抑制一部分信号，而同时对微量元素采用标准分辨率的设置保持原有的检测能力。

ICP-MS 的另一个重要特征是离子按其质荷比分离和检出，因此具有同位素分析和同位素比值分析的能力。该功能可应用于核工业、地质、环境以及医药等领域的同位素示踪、定年或污染溯源等。基于同位素比值分析的同位素稀释法则常被用于标准物质定值分析和公认的仲裁分析。

ICP-MS 仪器作为高灵敏的元素检测器，可方便地与多种色谱仪器（如高效液相色谱、离子色谱、凝胶色谱、气相色谱及毛细管电泳等）联用，实现元素形态分析，拓宽了仪器的应用范围。

ICP-MS 也可以与固体进样技术（如激光剥蚀进样系统等）联用，直接进行固体样品的分析，既可以进行固体的成分含量分析，也可以进行一些固体样品的元素分布图像分析，比如表面分析、剖面分析、微区分析等。

与等离子体发射光谱的数十万条紫外及可见光谱线相比，等离子体质谱的同位素分析谱线相对要少得多，从最轻的元素氢到常规的重元素铀，才不到二百四十条同位素谱线。因此相对来说质谱干扰小一些，故可以方便地进行元素定性定量分析，实现各种样品的多元素快速检测。

1.2 ICP-MS 技术基本原理

1.2.1 ICP 离子源

电感耦合等离子体装置由等离子体炬管和高频发生器组成。通常使用的炬管由三个石英同心管组成，即外管、中间管和中心管或称为样品注入管（injector）。分别通入冷却气（cool gas）和辅助气（auxiliary gas）以及载气（carrier gas）。见图 1.2-1。ICP 大都由氩气形成的，也有采用混合气体的。当炬管外通过 RF 线圈加上高频电磁场的同时，采用点火装置（如高压的特斯拉（Tesla）线圈放电装置）产生电火花，可诱导 Ar 气产生氩正离子和电子。

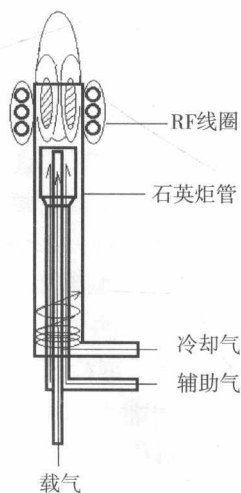
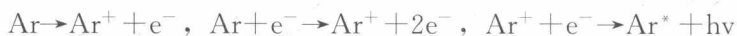


图 1.2-1 等离子体炬

在高频电磁场的作用下，离子与电子高速涡流运行，电子撞击其他氩原子产生雪崩连锁反应，瞬间形成大量的氩离子和电子。电子与原子的碰撞和解离，电子与离子的碰撞和聚合，使来自高频电源的能量以光和热的形式转化释放，形成等离子体炬焰。

等离子体炬焰在正常射频功率条件下的温度可达 5000K~8000K 以上，电子温度（electron temperature）在 8000K~10000K 左右，电子密度约在 $1 \sim 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

样品气溶胶一旦进入等离子体炬焰中心通道的高温区域内即可发生一系列复杂的物理化学反应。中间过程为去溶（desolvation）、蒸发（vaporization）、原子化（atomization）、激发（excitation）、离子化（ionization）等。样品溶液经去溶蒸发后，分子团离解成分子和原子团，进一步离解成单个原子，最终原子失去最外层的电子而成为带正电荷的离子。由于在特