

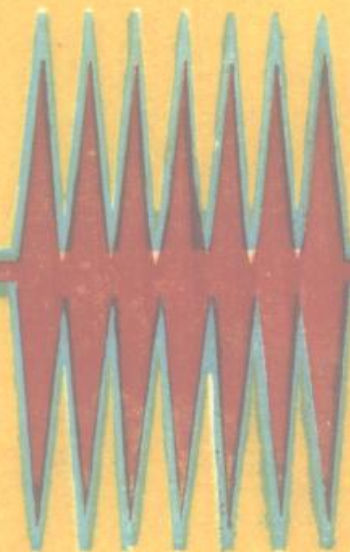
---

# 电感耦合等离子 体光谱法 原理和应用

---

陈新坤 编著

南开大学出版社



297791

# 电感耦合等离子体光谱法 原理和应用

陈新坤 编著



南开大学出版社

1987年

DUG 5

## 内 容 简 介

作为新兴分析方法电感耦合等离子体光谱法 (ICPS) 的基础论著, 本书全面论述了有关的历史、原理、仪器装置、应用技术、优缺点以及新近的进展与展望。在 ICP 放电中的分析物蒸发—原子化—激发机理、附随物干扰、检出限和精密度等方面作深入探讨。重点阐述常规 ICP—AES 技术, 并扼要介绍新发展的 ICP—AAS、ICP—AFS、ICP—MS 以及 GC—ICP—AES 和 HPLC—ICP—AES 等技术。收入有参考和利用价值的图 120 幅、表 62 个、主要文献题录 552 篇。可供光谱分析科学技术工作者, 地质、冶金、化工、环保、食品等厂矿分析化验人员以及有关专业的大专院校师生使用。

### 电感耦合等离子体光谱法原理和应用

陈新坤 编著

南开大学出版社出版

(天津八里台南开大学校内)

新华书店天津发行所发行

天津大邱庄印刷厂印刷

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.875

字数: 368千 印数: 1—3000

ISBN7—310—00003—x/O·1

统一书号: 13301.42 定价: 3.30元

# 前 言

本书初稿写于1979年底，原名《电感耦合高频等离子体光谱法原理和应用》，曾作为南开大学化学系研究生课程“原子光谱分析基础和新进展”及“等离子体光谱分析法”的主要教材。其中部分内容曾改编为《电感耦合等离子体原子发射光谱法基本原理讲义》，作为中国光学学会光谱专业委员会举办的第一期至第三期电感耦合等离子体原子发射光谱分析（ICP - AES）讨论班的基本教材。本书初稿（油印本）曾发往全国许多单位，广泛征求意见。1984年进行修改，充分考虑了使用中遇到的问题和各方面的意见，以及初稿脱稿后几年来ICP光谱法的新进展。1987年4月最后定稿。

本书是作为ICP光谱法的基础著作来编写的。加强理论基础介绍，是本书着意安排的。本书将比一般著作较深入地讨论与ICP放电中分析物蒸发 - 原子化 - 激发机理和附随物干扰机理有关的问题，对ICP光谱法的检出限和精密度亦进行了较深入的介绍。而对于原子光谱的起源和规律性，以及元素光谱化学性质与元素周期律的关系等原子光谱法的基础知识，本书有意加以省略，虽然这些知识对于ICP光谱法同样是重要的。关于这些问题，可参阅著者参与编写的其他著作<sup>①</sup>。对于仪器装置和应用方面，本书除进行必要的评介外，主要为读者提供较详细的文献信息，避免作过繁的叙述。

ICP光谱法现在已经发展成为一类以ICP作为激发源、原子

---

<sup>①</sup>戴树桂主编：《仪器分析》高等教育出版社，1984年；

陈新坤主编：《原子发射光谱分析原理》天津科技出版社（即出）。

化器和离子源的具有自身特点和门类比较齐全的专门技术。这种技术除了ICP-AES外,还包括ICP原子吸收光谱法(ICP-AAS)、ICP原子荧光光谱法(ICP-AFS)、ICP质谱法(ICP-MS),以及气相色谱(GC)和高效液相色谱(HPLC)与ICP-AES联用技术(即GC-ICP-AES和HPLC-ICP-AES)等。考虑到各种方法目前研究和应用情况以及发展前景,本书除了以较多篇幅介绍常规ICP-AES(主要是以Ar为工作气体)外,对于其他非常规方法(尽管目前应用尚不普遍),亦将给予较多的关注。

本书采用国际制单位及国际纯粹和应用化学联合会IUPAC推荐的术语,以及《英汉物理学词汇》(1978年版)和《英汉化学化工词汇》(1984年版)推荐的译名。无标准译名者加注英文。

在编写和出版过程中,受到北京钢铁学院钱振彭教授,北京大学孙德中副教授,南开大学出版社王真副编审,天津化工研究院杨增田工程师和宫锡殿工程师的大力支持、鼓励和帮助;南开大学化学系何炳林教授和沈含熙教授,对本书的出版亦提供过重要的帮助。在此一并表示衷心感谢。

本书可供有关厂矿和研究单位光谱分析工作人员使用,亦可作为大专院校有关专业师生和研究生的教学参考书。

由于著者水平所限,书中出现的缺点和错误,恳请读者批评指正。

陈新坤

1987年4月

# 目 录

1 导论	
1.1 电感耦合等离子体光谱法内容和分类	(1)
1.2 ICP光谱法发展历史和文献增长情况	(2)
1.3 ICP光谱法与经典光谱法等其他光谱法分析性能比较	(8)
1.3.1 经典光谱法及其优点和局限性	(8)
1.3.2 ICP光谱法的分析性能	(10)
1.3.3 ICP光谱法与其他光谱法优缺点比较	(13)
1.4 ICP光谱法应用范围	(16)
1.5 ICP光谱法发展趋势	(19)
2 ICP放电的一般性质	
2.1 ICP装置原理和一些专门术语	(23)
2.2 ICP环状结构形成原因	(26)
2.3 ICP放电的功率平衡	(31)
2.4 ICP放电温度、电子密度及其空间分布	(32)
2.5 等离子体温度和电子密度的测量	(36)
2.6 ICP放电的热平衡性质	(44)
3 ICP光谱法仪器装置	
3.1 概述	(53)
3.2 高频发生器	(53)
3.2.1 高频发生器类型及工作原理	(54)
3.2.2 负载线圈, 功率转换效率及其测量	(62)
3.2.3 高频防护	(66)
3.3 炬管和工作气体	(68)

3.3.1	炬管结构和性能.....	(68)
3.3.2	工作气体和ICP放电类型.....	(74)
3.3.3	气路控制系统.....	(79)
3.4	溶液气溶胶进样系统.....	(81)
3.4.1	进样方法一般介绍.....	(81)
3.4.2	气动雾化器和超声雾化器.....	(81)
3.4.3	雾化效率及其测量.....	(93)
3.5	分开气化进样系统.....	(95)
3.5.1	化学发生气化进样系统.....	(95)
3.5.2	石墨管和钼片等电热气化进样系统.....	(97)
3.5.3	激光、火花和电弧气化进样系统.....	(100)
3.6	固体及粉末直接进样系统.....	(105)
3.7	ICP发射光谱仪.....	(108)
3.7.1	ICP光谱仪一般介绍.....	(108)
3.7.2	ICP摄谱仪.....	(109)
3.7.3	ICP光量计和扫描单色仪.....	(112)
3.7.4	ICP中阶梯光栅光谱仪.....	(116)
4	ICP放电中发生的过程和分析物蒸发-原子化-激发-电离机理	
4.1	ICP放电中发生的过程一般介绍.....	(123)
4.2	蒸发-扩散迁移过程和气态分析物浓度.....	(125)
4.3	LTE条件下激发-电离-离解过程和谱线发射强度、吸光度和荧光强度.....	(134)
4.3.1	激发、电离和离解过程.....	(134)
4.3.2	谱线发射强度、吸光度和荧光强度.....	(141)
4.3.3	谱线强度-温度分布曲线和标准温度.....	(147)
4.4	ICP放电的超热布居效应.....	(151)
4.4.1	亚稳态氩原子的作用和Penning电离激发.....	(152)
4.4.2	辐射俘获和副电离效应.....	(158)
4.4.3	离子-电子复合效应.....	(164)

4.4.4	ICP放电中原子和离子激发模型.....	(167)
4.5	谱线强度的时间分布和空间分布.....	(169)
4.5.1	ICP放电的强度-时间曲线和预雾化效应.....	(169)
4.5.2	谱线强度的空间分布和双极扩散效应.....	(171)
4.6	自吸收效应和光谱线轮廓.....	(182)
4.6.1	单纯吸收层自吸收和发射-吸收层自吸收.....	(182)
4.6.2	ICP放电中的自吸收效应.....	(185)
4.6.3	光谱线轮廓和变宽效应.....	(190)
5	干扰效应	
5.1	干扰及其分类, ICP光谱法干扰的一般图像.....	(193)
5.2	雾化去溶干扰.....	(195)
5.3	挥发和原子化干扰.....	(198)
5.4	激发和电离干扰.....	(201)
5.4.1	附随物对温度的影响.....	(203)
5.4.2	附随物对电子密度的影响和电离干扰.....	(205)
5.4.3	亚稳态和辐射态氩原子猝灭效应.....	(210)
5.5	减少和消除非光谱干扰的途径.....	(212)
5.6	背景和谱线重叠干扰及其校正原理.....	(216)
5.6.1	背景辐射和背景干扰.....	(217)
5.6.2	带光谱及多线光谱发射和谱线重叠干扰.....	(221)
5.6.3	减小和消除光谱干扰的途径.....	(224)
5.6.4	光谱干扰校正原理.....	(226)
5.7	ICP光谱法干扰水平低的原因.....	(235)
6	检出限和精密度	
6.1	与检出限和精密度有关的几个术语.....	(239)
6.2	ICP-AES 检出限及其测量.....	(243)
6.2.1	IUPAC检出限定义的不同表示式.....	(244)
6.2.2	摄谱法检出限的测量.....	(255)
6.2.3	摄谱法目视估计检出限.....	(257)
6.3	ICP-AES 检出限与分析过程基本参数和元素性	



质的关系 .....	(258)
6.3.1 检出限与分析过程基本参数的关系 .....	(258)
6.3.2 元素的ICP - AES 检出限与周期律关系 .....	(264)
6.3.3 ICP - AES 检出限与其他光谱法检出限比较 .....	(269)
6.4 ICP - AES 精密度及标准偏差的测量 .....	(270)
6.4.1 精密度和分析结果表示方法 .....	(270)
6.4.2 分析结果标准偏差的测量 .....	(274)
6.5 ICP - AES 精密度与分析过程基本参数及分析物 浓度的关系 .....	(275)
6.5.1 精密度与分析过程基本参数及其波动误差的关系 .....	(276)
6.5.2 分析结果精密度与分析物浓度的关系 .....	(280)
7 ICP - AES应用的一般问题	
7.1 样品的溶解和稀释处理 .....	(287)
7.1.1 无机固体样品的溶解 .....	(287)
7.1.2 有机物的分解 .....	(289)
7.1.3 液体样品的稀释处理 .....	(290)
7.2 干扰物分离和痕量杂质富集方法 .....	(293)
7.3 参比样品制备 .....	(299)
7.4 分析校准技术 .....	(300)
7.5 ICP放电操作参数的选择 .....	(305)
8 ICP - AES在无机和有机元素分析中的应用	
8.1 水质分析 .....	(309)
8.2 环境物料和生物物料分析 .....	(311)
8.3 地质物料和一般非导体材料分析 .....	(319)
8.4 金属合金分析和薄层分析 .....	(336)
8.5 高纯物质分析 .....	(347)
8.6 有机物分析和有机元素分析 .....	(357)
9 ICP光谱法若干新进展	
9.1 非 Ar - ICP - AES .....	(370)

9.1.1	N <sub>2</sub> -Ar-ICP及N <sub>2</sub> -ICP.....	(370)
9.1.2	空气-Ar-ICP.....	(376)
9.1.3	He-ICP.....	(377)
9.2	色谱-ICP-AES 联用技术.....	(378)
9.2.1	GC-ICP-AES联用及其应用.....	(378)
9.2.2	HPLC-ICP-AES联用及其应用.....	(383)
9.3	ICP-AAS、ICP-AFS和ICP分子荧光.....	(388)
9.3.1	ICP-AAS及其应用.....	(389)
9.3.2	ICP-AFS及其应用.....	(394)
9.3.3	ICP分子荧光.....	(405)
9.4	ICP-MS.....	(405)
9.5	各类ICP光谱法性能比较.....	(412)
	主要文献.....	(417)

## 图 表 目 录

图1—1	1961—1980年ICP光谱法论文发表篇数—年度曲线.....	(8)
图1—2	ICP-AES与火焰-AAS测定Ca时K、Al和P的干扰 曲线比较.....	(12)
图1—3	土壤中某些元素ICP-AES与火焰-AAS测定浓度相关 图.....	(13)
图1—4	ICP-AES与火焰(F)-AAS测定Mn时分析校准曲线 线性范围比较.....	(14)
图1—5	各领域中ICP光谱法论文发表数量比较(1964—1981年) .....	(17)
图1—6	ICP光谱法测定的元素在周期表中的位置.....	(18)
图2—1	ICP装置原理和放电形状示意图.....	(24)
图2—2	高频电流(i)及功率(P)趋肤曲线.....	(27)
图2—3	Ar气的电导率—温度曲线.....	(28)
图2—4	不同形状ICP放电中样品粒子的行径.....	(30)
图2—5	ICP放电温度—功率曲线(a)和温度—频率曲线(b)	

.....	(34)
图2—6 两种典型Ar-ICP放电温度空间分布图 .....	(35)
图2—7 不同观测高度及载气流量时Ar-ICP电子密度径向分布 轮廓 .....	(37)
图2—8 谱线径向强度 $I(r)$ 与横向强度 $I(x)$ 关系示意图 .....	(42)
图2—9 不同载气流量时Ar-ICP放电激发温度( $T_{exc}$ )、电离 温度( $T_{ion}$ )和气体温度( $T_g$ )径向分布轮廓 .....	(47)
图2—10 不同工作气体及流量的工业用ICP(单管炬)电子温度 ( $T_e$ )和气体温度( $T_g$ )竖向分布轮廓 .....	(49)
图2—11 Ar-ICP放电偏离LTE区域示意图 .....	(51)
图3—1 ICP-AES仪器组成框图 .....	(54)
图3—2 自激式高频发生器振荡电路示意图 .....	(55)
图3—3 高频发生器振荡频率与等离子体半径关系曲线 .....	(56)
图3—4 低功率(a)及高功率(b)他激式高频发生器阻抗匹配网 路 .....	(59)
图3—5 等效负载法测量等离子体功率装置示意图 .....	(63)
图3—6 几种常用炬管结构示意图 .....	(69)
图3—7 压缩空气外冷炬管装置示意图 .....	(73)
图3—8 侧臂炬管及其与真空ICP光谱仪连接装置示意图 .....	(74)
图3—9 端视式ICP放电形状 .....	(77)
图3—10 $N_2$ (a)和Ar(b)等离子体成分—温度曲线 .....	(78)
图3—11 一种典型ICP装置气路系统(QVAC127系统) .....	(80)
图3—12 ICP-AES进样方法框图 .....	(82)
图3—13 (a) 玻璃同心雾化器及双层雾室示意图 .....	(83)
图3—13 (b) 直角型气动雾化器及单层雾室示意图 .....	(84)
图3—13 (c) GMK雾化器结构 .....	(86)
图3—13 (d) 具有旋流雾室的沟槽型雾化器组合 .....	(86)
图3—14 气溶胶粒子大小分布图 .....	(87)
图3—15 具有气溶胶收集漏斗雾室的雾化器组合 .....	(87)
图3—16 微量样品流动注入雾化装置(FIA-AES技术) .....	(89)
图3—17 去溶装置示意图 .....	(90)

图3—18	Olson - Fassel型超声雾化器结构	(91)
图3—19	GPW型超声雾化器结构示意图	(92)
图3—20	一种气溶胶收集装置框图	(95)
图3—21	连续氢化法进样装置示意图	(96)
图3—22	石墨棒电热气化进样装置	(99)
图3—23	金属丝电热气化装置	(100)
图3—24	激光 - ICP - AES装置示意图	(104)
图3—25 (a)	火花 - 粉末直接送样装置示意图	(106)
图3—25 (b)	双高频 - 粉末直接送样装置示意图	(106)
图3—25 (c)	射流卷吸 - 粉末直接送样装置示意图	(107)
图3—26	样品直接插入装置示意图 (DSID技术)	(107)
图3—27	ICP摄谱分析装置及入射光学系统	(111)
图3—28	WP - 2L高频等离子体摄谱仪外形图	(113)
图3—29	ICP光量计示意图 (Paschen - Runge装置)	(114)
图3—30	ICP程序扫描单色仪光学系统示意图 (Czerny - Turner装置)	(115)
图3—31	ICP中阶梯光栅光谱仪光学系统示意图 (Czerny - Turner装置)	(118)
图4—1	分析物在ICP放电中发生过程框图	(124)
图4—2	样品在ICP放电通道中加热情况与能量加入区的依赖关系示意图	(127)
图4—3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 样品微粒 (5μm) 在ICP放电通道中的加热行为	(127)
图4—4	ICP放电与N <sub>2</sub> O - C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 焰轴向温度分布轮廓比较	(129)
图4—5 (a)	Ca I和Ca II发射强度 - 温度曲线 (——) 及Ca电离度 - 温度曲线 (.....)	(149)
图4—5 (b)	Mg I和Mg II发射强度 - 温度曲线 (——) 及Mg电离度 - 温度曲线 (.....)	(149)
图4—6	Ar和Ar <sup>+</sup> 若干辐射态 (r) 和亚稳态 (m) 能量	(155)
图4—7	Ar <sup>m</sup> 的吸光度 - 功率及吸光度 - 载气流量曲线	(157)
图4—8	不同载气流量时Ar <sup>m</sup> 密度径向分布轮廓	(158)

图4—9	氩原子部分能级图及辐射跃迁线·····	(160)
图4—10	大气压下Ar等离子体放电的 $n_e-T_e$ 曲线及等离子体分类图·····	(166)
图4—11	若干元素谱线的发射强度—时间曲线·····	(171)
图4—12	不同盐酸浓度时Cd I的“预雾化”曲线·····	(172)
图4—13	Ar-ICP放电中若干“软线”(a)和“硬线”(b)发射强度竖向分布轮廓·····	(173)
图4—14	若干原子线的峰值观测高度—标准温度曲线·····	(174)
图4—15 (a)	不同离轴位置Ar-ICP激发温度竖向分布轮廓·····	(175)
图4—15 (b)	不同观测高度Ar-ICP激发温度径向分布轮廓·····	(175)
图4—16	气态分析物密度(a)和等离子体温度(b)径向分布曲线(数学模型)·····	(178)
图4—17	若干极限情况下不同激发能的原子或离子布居径向分布曲线(数学模型)·····	(179)
图4—18	不同观测高度时Mg I 285.3nm的激发态原子布居径向分布曲线(数学模型)·····	(180)
图4—19	Ar-ICP放电中若干谱线及谱带强度的横向分布轮廓·····	(181)
图4—20	谱线发射强度—光学厚度曲线·····	(185)
图4—21	ICP放电中不同观测高度时Ca I 422.7nm自吸收情况比较·····	(188)
图4—22	不同观测高度(h)时若干Ca谱线分析校准曲线形状比较·····	(186)
图5—1	ICP-AES干扰一般图像(溶液气溶胶进样)·····	(195)
图5—2	乙醇浓度对溶液粘度( $\eta$ )、吸出速率( $F_t$ )、有效吸出速率( $F_t$ 有效)和雾化效率( $\epsilon_n$ )的影响曲线·····	(198)
图5—3	碱金属对若干元素谱线发射强度竖向分布轮廓的影响·····	(202)
图5—4	不同观测高度时激发温度( $T_{exc}$ )和电离温度 $T_{ion}-Cs$ 浓度曲线·····	(204)
图5—5	ICP激发温度—乙醇浓度曲线·····	(206)
图5—6	两种典型的Ar-ICP放电Na对若干元素谱线的干扰效应—观测高度曲线·····	(208)

- 图5—7  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、 $\text{H}_2\text{BO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 引起Y I 谱线强度相对变化与其“ $E_{\text{ion}} + E_{\text{exc}}$ ”的关系曲线 ..... (211)
- 图5—8 K对若干元素谱线的干扰效应—载气流量曲线 ..... (213)
- 图5—9 不同观测高度时Na对Ca I和Ca II的干扰效应—功率曲线 ..... (214)
- 图5—10 ICP—AES测定Ca用与不用 $C_0$ 参比元素时 $\text{PO}_4$ 的干扰曲线比较 ..... (214)
- 图5—11 ICP—AES测定Ca用与不用Na缓冲剂时Al的干扰曲线比较 ..... (215)
- 图5—12 ICP放电连续背景发射强度—波长曲线与轫致辐射及黑体辐射理论曲线比较 ..... (218)
- 图5—13 水和高浓度 $\text{Ca}^{2+}$ 溶液背景水平和受干扰谱线 ..... (220)
- 图5—14 (a) Ar ICP放电中若干常见谱线、谱带和连续背景发射强度竖向分布轮廓 ..... (222)
- 图5—14 (b) Ar—ICP放电中不同观测高度时OH带(306.4nm)相对强度径向分布轮廓 ..... (223)
- 图5—15 不同载气流量时Cr I和Cr II发射强度—功率(1, 3)和信背比—功率曲线(2, 4) ..... (224)
- 图5—16 不同观测高度时Mn I和Mn II信背比—载气流量曲线 ..... (225)
- 图5—17 端视式ICP装置若干元素谱线及背景黑度横向分布轮廓 ..... (226)
- 图5—18 低电子增益Ar ICP—AES空白溶液光谱图 ..... (238)
- 图6—1 Ar—ICP—AES  $\lambda < 300\text{nm}$ 区域(RSD)<sub>b</sub>— $X_b$ 曲线 ..... (260)
- 图6—2 若干元素的ICP—AES检出限—观测高度曲线 ..... (262)
- 图6—3 As的ICP—AES检出限—光谱仪倒线色散率曲线 ..... (263)
- 图6—4 元素ICP—AES检出限—原子序数曲线及其与DCA—AES和XRFS相应曲线比较 ..... (266)
- 图6—5  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 中若干稀土杂质元素测定时信背比例数(1/SBR)—样品溶质浓度曲线(摄谱分析法) ..... (269)
- 图6—6 光电光谱法相对标准偏差(RSD)—分析物浓度(C/CL)曲线 ..... (282)

图6-7	土壤中Cu、Zn、Ni及Co的ICP-AES分析精密度 (RSD) - 分析物含量实验曲线.....	(283)
图6-8	摄谱分析法相对标准偏差与分析物浓度关系示意图 .....	(285)
图7-1	用于共沉淀富集的浮选池和样品管结构.....	(295)
图9-1	气相色谱进样-ICP-AES装置示意图 (GC-ICP-AES联用技术) .....	(379)
图9-2	微量高效液相色谱进样-ICP-AES装置示意图(HPLC-ICP-AES联用技术) .....	(384)
图9-3	某些样品中As、Hg及汽油中Pb存在状态的高效液相色谱图 .....	(386)
图9-4	不同观测高度时Ca I和Ca II的发射强度/吸光度比值径向分布轮廓.....	(390)
图9-5	碱金属对Ca I及Ca II发射强度和吸光度径向分布轮廓的影响.....	(392)
图9-6	空心阴极灯(HCL)激发源-ICP原子荧光装置示意图(HCL-ICP-AFS系统) .....	(395)
图9-7	不同载气流量时若干谱线激光激发ICP荧光强度 $I_F(1, 2)$ 和ICP发射强度 $I_E(3, 4)$ 竖向分布轮廓比较.....	(397)
图9-8	ICP激发源-火焰共振单色器原子荧光装置示意图(ICP火焰-AFS系统) .....	(400)
图9-9	ICP-MS装置示意图(a)及采样器末端截面图(b) .....	(406)
图9-10	四极滤质器原理示意图.....	(407)
图9-11	若干元素的ICP-MS相对响应-电离能曲线.....	(408)
图9-12	ICP-MS边界层采样(a)和连续采样(b)所得到的U质谱图.....	(409)
图9-13	连续采样ICP-MS空白溶液质谱图.....	(410)
图9-14	ICP-MS测定 $^{50}\text{Cr}$ 和 $^{59}\text{Co}$ 时Na的干扰曲线.....	(410)
图9-15	ICP-MS与MIP-MS测定 $^{40}\text{Ca}$ 时 $\text{PO}_4^{3-}$ 的干扰曲线比较.....	(411)

表1-1	四种典型ICP装置结构特征和操作参数比较	(5)
表1-2	ICP-AES与其他光谱法分析能力粗略比较	(15)
表1-3	ICP-AES与其他光谱法优缺点比较	(16)
表2-1	两种常规Ar-ICP放电功率平衡表	(32)
表2-2	若干Ar(I)谱线的 $gA$ 值	(40)
表2-3	若干Fe(I)谱线的 $\log gf$ 值	(41)
表2-4	若干离子-原子线对的 $gA\lambda^+ / g^+A^+\lambda$ 值	(43)
表2-5	若干Ar-ICP系统激发温度及电子密度测量值	(45)
表2-6	若干Ar-ICP和非Ar-ICP电子密度测量值比较	(46-47)
表2-7	不同Ar气流量和径向位置工业用ICP放电的电子温度和 气体温度	(48)
表2-8	不同等离子体激发温度和气体温度比较	(52)
表3-1	自激式振荡器三种工作状态比较	(57)
表3-2	若干典型高频发生器及其操作参数	(60)
表3-3	若干Ar-ICP系统功率转换效率测量值	(64)
表3-4	若干代表性炬管结构参数及操作条件	(75)
表3-5	若干典型ICP放电操作参数比较	(79)
表3-6	不同雾化器检出限比较	(94)
表3-7	各类原子光谱法的氢化法与气动雾化法检出限比较	(97)
表3-8	钨片、石墨棒和钨丝(或铂丝)电热气化的ICP-AES 检出限比较	(101)
表3-9	国内外生产ICP发射光谱仪主要厂家	(110)
表3-10	Spectra Span II A型中阶梯光栅光谱仪倒线色散率、闪 耀波长与光谱级之间的关系	(117)
表3-11	若干商品ICP光谱仪性能比较	(120)
表4-1	若干ICP系统中样品停留时间计算值	(131)
表4-2	不同电子密度时若干元素谱线标准温度计算值	(151)
表4-3	若干元素的离子-原子线对强度比的比较	(153)
表4-4	若干Ar谱线的吸光能级状态及吸光度	(159)
表4-5	考虑和不考虑副电离时Ar-ICP放电通道中的电子密度	(163)
表4-6	ICP和火焰中若干谱线的吸收系数等的比较	(187)



表5-1	Na浓度变化对Mg I285.2nm发射强度及吸光度的影响 .....	(208)
表5-2	Cs和H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 对Ca原子电离度的影响.....	(209)
表5-3	若干钇谱线的“激发能+电离能”.....	(210)
表5-4	若干分析线的净空白等效浓度(C <sub>eq</sub> )及干扰注释.....	(231)
表5-5	若干谱线的Ca、Mg、Fe、Mn、Al和Zn干扰系数.....	(232)
表6-1	折衷条件下Ar-ICP相对背景强度与波长依赖关系.....	(245)
表6-2	72个元素ICP-AES最灵敏线光电法和摄谱法检出限比 较.....	(247)
表6-3	若干非金属元素ICP-AES和MIP-AES绝对检出限 比较(包括GC-ICP-AES检出限).....	(271)
表6-4	不同置信概率(p)及自由度(n-1)时的t值(t分布表) .....	(273)
表7-1	若干元素谱线的有机ICP(MIBK溶剂)和水溶液ICP 的BEC及有机ICP检出限.....	(291)
表7-2	ICP摄谱分析法曝光计划.....	(301)
表7-3	Cd I 226.5nm谱线不同标度校准曲线所得分析结果比较 .....	(303)
表8-1	ICP-AES在水质分析方面应用情况及主要操作参数...	(312)
表8-2	ICP-AES在环境及生物物料分析方面应用的例子及相 应操作参数.....	(320)
表8-3	不同文献的Pt族元素和Au、Ag的分析线和检出限比较 .....	(328)
表8-4	岩矿分析方面不同文献的稀土元素ICP-AES检出限比 较.....	(331)
表8-5	若干杂多酸络合物母/杂比(原子比)实验值和理论值比 较.....	(335)
表8-6	ICP-AES用于地质物料和一般非导体材料分析的例子及 操作参数.....	(337)
表8-7	ICP-AES用于金属合金材料分析和薄层分析的例子及 操作参数.....	(348)