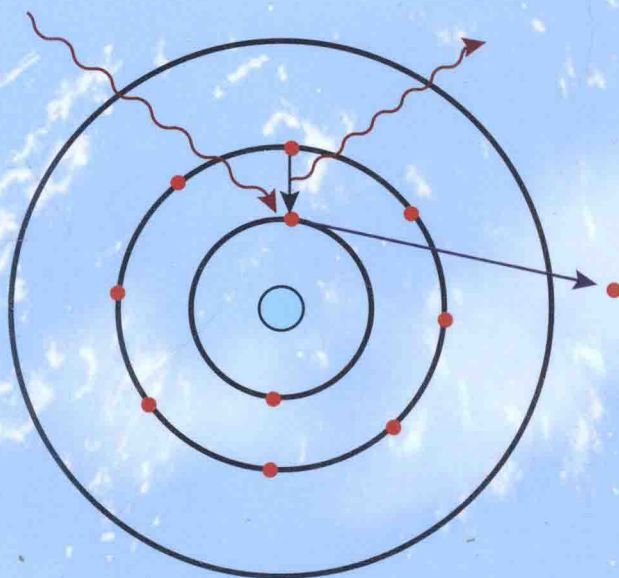


罗立强 詹秀春 李国会 编著

X射线 荧光光谱分析

X-Ray Fluorescence
Spectrometry

第二版



化学工业出版社

罗立强 詹秀春 李国会 编著

X射线 荧光光谱分析

X-Ray Fluorescence
Spectrometry

第二版



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统阐述了X射线荧光光谱分析(XRFS)基本原理,介绍了XRFS光谱仪及主要组成部件,特别是X射线激发源和X射线探测器的工作原理,强调了新型X射线激发源和探测器如聚焦毛细管X射线透镜、硅漂移探测器和超导探测器等的研究进展和特征性能。对开展XRFS分析所需的定性定量分析方法、元素间基体校正、化学计量学计算等做了较详细的描述,评介了各方法的特点、局限及选用原则。在XRFS分析中,样品制备技术具有特殊的重要性,因此单独成章,以使读者对其有深刻认识并能灵活运用。在仪器与维护方面,分析了不同仪器的特性,提供了一定的具有共性的仪器校正方法、日常维护知识和故障判断原则。近年来,微区XRFS技术发展迅速,因此本书也分别介绍了同步辐射X射线荧光光谱分析技术与应用、微区X射线荧光光谱分析与应用。同时还综述了XRFS在地质、冶金、材料、考古、生物与环境等领域的研究进展及实际应用。

本书可供X射线荧光光谱分析工作者尤其是地质、冶金光谱分析工作者学习参考,同时也可作为高等学校分析化学、分析仪器及相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

X射线荧光光谱分析/罗立强,詹秀春,李国会编
著. —2版. 北京:化学工业出版社,2015.3
ISBN 978-7-122-22651-3

I. ①X… II. ①罗…②詹…③李… III. ①X射线
荧光光谱法—光谱分析 IV. ①O657.34

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第016403号

责任编辑:杜进祥

文字编辑:向东

责任校对:王素芹

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京盛通印刷股份有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 插页1 字数340千字

2015年5月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

京化广临字2015—7号

前 言

十二年前，笔者受化学工业出版社之邀，开始撰写《X射线荧光光谱仪》一书。在两位同行的协作下，历时五年，完成了该书的初稿，并于2008年1月正式出版。两三年前，出版社即开始邀约商谈再版事宜。无奈几位编著者皆忙于手头事务，一再拖延，去年，本书编著者放下手中的一些杂事，开始致力于本书的再版工作。在大家的共同努力下，在化学工业出版社的坚持和诚意感召下，经过一年多的努力，本书第二版得以完成。并改名为《X射线荧光光谱分析》。

本书第一版编著之初，X射线光谱学领域正出现一些新的技术和新的发展方向。最典型的代表就是聚焦X射线透镜、X射线激光以及超导和硅漂移X射线探测器等的研制与应用的兴起。因而，当初编著者对之予以了特别的关注，并在文中泼以重墨。十多年过去了，其中的几项技术已渐成熟壮大。今日之时，聚焦X射线透镜和硅漂移X射线探测器已在X射线荧光光谱分析领域得到广泛应用，并且这两项技术已改变了X射线光谱分析的发展方向，使得微区X射线光谱分析和能量色散X射线荧光光谱分析成为了当今X射线光谱分析领域的研究和应用重点，并推动了整个学科进步，其应用范围之广、探索程度之深更是令人瞩目。为此，除对本书第一版原有章节进行修订外，我们在本书中将微区X射线光谱分析和同步辐射X射线光谱分析单独成章，并增加了两章XRFS应用内容，供大家参考。

本书再版后，改名为《X射线荧光光谱分析》，以更全面反映本书内容。同时，随着X射线光谱分析技术的发展，学科间的融合日益密切，X射线吸收谱的研究与应用价值也愈加凸显，因此我们把X射线吸收谱也纳入本书之中。这样，我们的这本书就由十六章组成。第一～五章阐述X射线光谱分析基本原理和光谱仪基本结构；第六～九章介绍定性、定量分析技术和数据处理方法，第十章详细分析并介绍X射线光谱分析中的样品制备技术；第十一、十二章介绍常用X射线荧光光谱仪的特性与参数选择及仪器检定、校正与维护基本技巧等；新增第十三～十六章，分别介绍同步辐射X射线光谱分析、微区X射线光谱分析和X射线光谱分析应用。本书第一～九章由国家地质实验测试中心罗立强研究员修订；第十章由国家地质实验测试中心詹秀春研究员修订；第十一、十二章由廊坊物化探研究所李国会高级工程师修订；第十三章由国家地质实验测试中心沈亚婷编著，罗立强审定；第十四章由国家地质实验测试中心柳检编著，罗立强修改审定；第十五章由国家地质实验测试中心刘洁、袁静、孔亚飞、劳昌玲、蔺

雅洁编著，罗立强修改审定；第十六章由国家地质实验测试中心孙建伶、曾远、马艳红、孙晓艳、储彬彬编著，罗立强修改审定。

在本书编著和修订中，编著者认真工作，但仍有待完善和不尽如人意的地方，敬请读者指出，以便修订时改正。本书编著者们特别感谢读者们的厚爱 and 选择，感谢化学工业出版社的信任和支持，使本书得以再版。同时也感谢本书的编著者为本书付出的艰辛努力，没有你们的大力支持和孜孜不倦的追求，本书的完成和再版将是难以想象的，让我们大家一同携手前行！

罗立强

2014年8月28日

北京

第一版前言

X 射线光谱分析技术作为直接应用 X 射线的一门分支学科和一种实用分析技术，目前已在地质、冶金、材料、环境、工业等无机分析领域得到了极其广泛的应用，是各种无机材料中主组分分析最重要的首选手段，各种与 X 射线荧光(XRF)光谱相关的分析技术，如同步辐射 XRF、全反射 XRF 光谱技术等，在痕量和超痕量分析中发挥着十分重要的作用。尤其是在无损分析和原位分析方面，X 射线荧光光谱技术具有无可替代的地位。

X 射线荧光光谱分析技术在近几年已取得显著进展，特别是在新型能量探测器研发方面，成就显著。各种商品化仪器也实现了高度集成，通过采用多种高新技术，使得能量色散 X 射线光谱仪的分辨率和适用性都具有了真正的实用价值。微区、原位、形态分析及多维信息获取等是目前的研究热点。在应用领域，活体分析、环境与健康等越来越受到人们的关注。

在过去的若干年中，我国 X 射线荧光光谱分析技术在一些关键技术和数据处理及各种应用领域也取得了令人瞩目的进展，特别是在微束毛细管聚焦透镜研制和化学计量学应用方面，在国际 XRF 界受到普遍尊重和认可。在仪器研发和制造方面，也取得了一些进展，但在大型商品仪器的制造方面，与国际上还存在差距。X 射线光谱技术的发展前景与应用潜力是巨大的。研发高性能、多功能、具有自主知识产权的大型仪器是我们的共同目标，需要国内同仁加倍努力，集体攻关，实现该领域的突破。

本书共分十二章，第一～五章阐述了 X 射线光谱分析的基本原理和光谱仪基本结构，第六～九章介绍定性、定量分析技术和数据处理方法，第十章详细分析并介绍了 X 射线光谱分析中的样品制备技术，并可应用于相关分析技术领域；第十一～十二章介绍了常用 X 射线荧光光谱仪的特性与参数选择及仪器检定、校正与维护基本技巧等。本书第一～九章由国家地质实验测试中心罗立强研究员编写，第十章由国家地质实验测试中心詹秀春研究员编写，第十一～十二章由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所李国会教授级高级工程师编写。

编写时我们参考了诸多文献，并采用了其中的部分图片，还有一些图片来源于互联网，在各章最后列出了主要的参考文献，在此一并致以谢意。尽管编写中我们力求准确，但不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2007 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 X射线荧光光谱的产生及其特点	1
第二节 X射线荧光分析技术的新应用	2
一、在生物、生命及环境领域中的应用	2
二、在材料及毒性物品监测中的应用	2
第三节 X射线荧光光谱仪研制进展	2
参考文献	3
第二章 基本原理	5
第一节 特征X射线的产生与特性	5
一、特征X射线	5
二、特征谱线系	6
三、谱线相对强度	8
四、荧光产额	9
第二节 X射线吸收	10
一、X射线衰减	10
二、吸收边	11
三、吸收跃变	11
四、质量衰减系数的计算	12
第三节 X射线散射	12
一、相干散射	12
二、非相干散射	12
第四节 X射线荧光光谱分析原理	14
第五节 X射线衍射分析	15
参考文献	16
第三章 激发源	17
第一节 常规X射线光管	17
一、光管结构与工作原理	17
二、连续X射线谱	18
三、特征X射线谱	19
四、光管特性	19
第二节 液体金属阳极X射线光管	20
第三节 冷X射线光管	21

第四节 单色与选择激发	22
一、滤光片	22
二、二次靶	22
第五节 同位素源	23
第六节 同步辐射光源与粒子激发	24
第七节 聚束毛细管 X 射线透镜	24
第八节 X 射线激光光源	26
参考文献	27
第四章 探测器	28
第一节 波长色散探测器	28
一、流气式气体正比计数器	28
二、NaI 闪烁计数器	29
三、波长色散探测器的逃逸峰	30
第二节 能量探测器	31
一、能量探测原理	31
二、能量探测器组成与特性	32
三、能量探测器的逃逸峰	33
第三节 新型能量探测器	33
一、Ge 探测器	34
二、Si-PIN 探测器	35
三、Si 漂移探测器	37
四、电耦合阵列探测器	38
五、超导跃变微热量感应器	39
六、超导隧道结探测器	40
七、CdZnTe 探测器	42
八、钻石探测器	43
九、无定形硅探测器	44
第四节 各种探测器性能比较	45
一、波长色散与能量色散能力	45
二、探测器分辨率比较	46
三、探测器的选用	46
参考文献	48
第五章 X 射线荧光光谱仪	52
第一节 波长色散 X 射线荧光光谱仪	52
一、X 射线光管、探测器与光谱仪结构	52
二、分光晶体及分辨率	53
三、脉冲放大器和脉高分析器	54
第二节 能量色散 X 射线荧光光谱仪	56

第三节 同位素源激发 X 射线荧光光谱仪	57
第四节 偏振激发 X 射线荧光光谱仪	57
第五节 全反射 X 射线荧光光谱仪	58
第六节 聚束毛细管透镜微束 XRF 光谱仪	60
参考文献	61
第六章 定性与定量分析方法	63
第一节 定性分析	63
第二节 定量分析	64
一、获取谱峰净强度	65
二、干扰校正	65
三、浓度计算	66
第三节 数学校正法	67
第四节 实验校正方法	68
一、标准化	68
二、内标法	69
三、标准添加法	69
四、散射线内标法	70
第五节 实验校正实例——散射线校正方法	70
一、散射效应与利用	70
二、滤光片对 Compton 峰和分析谱线的影响	71
三、准直器直径对谱线的影响	72
四、Compton 峰位随滤光片材料的原子序数增加而产生漂移	73
参考文献	75
第七章 基体校正	77
第一节 基本参数法	78
一、理论荧光强度	78
二、相关基本参数计算	81
三、基本参数法	82
第二节 理论校正系数	83
一、基本影响系数	83
二、理论校正系数	88
三、系数变换	91
参考文献	92
第八章 分析误差和统计不确定	94
第一节 分析误差和分布函数	94
一、分析误差	94
二、分布函数	95
第二节 计数统计学	95

第三节 灵敏度、检出限及 XRF 中的误差来源	96
一、灵敏度和检出限	96
二、XRF 中的误差来源	97
第四节 不确定度及不确定度计算	97
一、测量不确定度	98
二、统计不确定度	98
三、误差传递与不确定度	99
四、不确定度计算式	99
五、平均值的 uncertain 度计算	100
六、统计波动	101
参考文献	102
第九章 XRF 中的化学计量学方法和应用	103
第一节 曲线拟合与遗传算法	103
一、遗传算法	104
二、遗传算法在 XRF 中的应用	104
三、不同拟合方法的比较	106
第二节 基体校正与神经网络	106
一、神经网络的发展与学习规则	107
二、神经网络模型——误差反传学习算法	108
三、神经网络及相关化学计量学方法在 XRF 中的应用	109
第三节 模式识别	110
一、模式识别方法与特性	110
二、支持向量机	111
三、模式识别方法在 XRF 中的应用	111
参考文献	112
第十章 样品制备	115
第一节 制样技术分类	116
第二节 分析制样中的一般问题	117
一、样品的表面状态	117
二、不均匀性效应	118
三、样品粒度与制样压力	118
四、X 射线分析深度与样品厚度	120
五、样品的光化学分解	122
六、其他问题	122
七、试样装入	123
八、污染控制	124
九、测定时须小心的样品	124
第三节 金属样品的制备	125

一、取样	125
二、金属样品的制备方法	125
第四节 粉末样品的制备	126
一、粉末压片法	127
二、玻璃熔片法	130
三、松散粉末法	136
第五节 液体样品	137
一、液体法	137
二、点滴法	139
三、富集法	139
四、固化法	140
第六节 其他类型样品的制备	140
一、塑料样品的制备方法	140
二、放射性样品	141
第七节 微少量、微小样品的制备	141
第八节 低原子序数元素分析的特殊问题	143
第九节 样品制备实例	145
一、全岩分析	145
二、石灰、白云石石灰和铁石灰	149
三、石灰石、白云石和菱镁矿	150
四、天然石膏及石膏副产品	151
五、玻璃砂	154
六、水泥	156
七、氧化铝	157
八、电解液	158
九、煤衍生物——沥青	158
十、树叶和植物	161
参考文献	162
第十一章 X 射线荧光光谱仪的特性与参数选择	165
第一节 波长色散型 X 射线荧光光谱仪的特性与技术进展	165
第二节 X 射线高压发生器	166
第三节 X 射线光管特性与选择使用	166
第四节 滤光片、光阑和准直器	168
第五节 晶体适用范围及其选择	170
第六节 2θ 联动装置	173
第七节 测角仪	174
第八节 探测器特性与使用	175
一、闪烁计数器	176

二、气体正比计数器·····	176
三、探测器的选择标准·····	179
第九节 脉冲高度分析器·····	180
第十节 实验参数的选择·····	182
一、仪器参数的选择·····	182
二、光学参数的选择·····	183
三、探测器与测量参数的选择·····	185
第十一节 能量色散 XRF 光谱仪的特性和注意事项·····	187
第十二节 全反射 X 射线荧光光谱仪特性与设计要点·····	188
参考文献·····	189
第十二章 仪器检定、校正与维修·····	190
第一节 仪器检定·····	190
一、实验室条件·····	190
二、检验项目及测量方法·····	190
三、技术指标·····	193
第二节 脉冲高度分析器的调整及仪器漂移的标正·····	193
一、脉冲高度分析器的调整·····	193
二、仪器漂移的校正·····	194
第三节 日常维护·····	195
一、真空泵油位检查·····	195
二、P ₁₀ 气体的更换·····	195
三、高压漏气检测·····	195
四、密闭冷却水循环系统的检测·····	196
五、检查初级水过滤器·····	196
六、X 射线光管的老化·····	196
七、日常检查项目·····	197
第四节 常见故障及维护·····	197
一、机械问题·····	197
二、X 射线高压发生器·····	198
三、真空度不好·····	198
四、探测器的故障·····	199
五、样品室灰尘的清扫·····	199
第五节 仪器选型常用标准与判据·····	200
一、硬件·····	200
二、软件·····	200
参考文献·····	203
第十三章 同步辐射 X 射线荧光光谱分析技术与应用·····	204
第一节 同步辐射技术的特点与发展·····	204

一、同步辐射的特点	204
二、同步辐射装置的现状和发展	205
第二节 同步辐射原理	207
一、同步辐射装置	207
二、同步辐射基本线站及应用	209
第三节 同步辐射 X 射线荧光分析技术	211
一、SRXRF 技术的优势	211
二、SRXRF 实验装置	212
三、SRXRF 应用	215
第四节 同步辐射 X 射线吸收精细结构谱与应用	215
一、XAFS 原理	215
二、XAFS 谱测定方法	217
三、XAFS 实验方法	218
四、XANES 原理及应用	219
五、EXAFS	221
参考文献	221
第十四章 微区 X 射线荧光光谱分析与应用	222
第一节 发展历程与研究现状	222
第二节 实验装置	224
第三节 研究应用	226
一、颗粒物分析	226
二、生物样品分析	227
三、地质样品分析	228
四、考古样品分析	230
五、司法鉴定和指纹样品分析	230
六、三维信息获取	231
参考文献	231
第十五章 X 射线荧光光谱在地质冶金样品分析中的应用	234
第一节 冶金样品分析	234
一、合金样品	234
二、涂层分析	236
三、矿石原料	237
四、炉渣分析	238
五、添加剂	239
第二节 文物样品分析	239
一、古陶瓷分析	240
二、绘画颜料	240
三、古玻璃制品	241

四、古金属制品	242
第三节 地质样品分析	243
一、地质样品分析	243
二、现场分析	245
参考文献	247
第十六章 X 射线荧光光谱在生物和环境样品分析中的应用	251
第一节 生物样品分析	251
一、植物样品分析	251
二、动物样品分析	254
三、人体样品分析	255
四、细胞分析	258
五、金属蛋白质分析	259
第二节 环境样品分析	260
一、工业废弃物	260
二、矿山污染物	260
三、城市污染物	261
第三节 大气颗粒物分析	263
一、来源与危害	263
二、成分分析	264
三、元素形态分析	265
第四节 活体分析	265
一、活体分析装置	265
二、骨铅与骨镭分析	266
三、肾活体分析	267
参考文献	268

第一章 绪 论

第一节 X 射线荧光光谱的产生及其特点

X 射线是一种波长较短的电磁辐射，通常是指能量范围在 $0.1 \sim 100\text{keV}$ 的光子。当用高能电子照射样品时，入射电子被样品中的电子减速，会产生宽带连续 X 射线谱。如果入射光束为 X 射线，样品中的元素内层电子受其激发，可产生特征 X 射线，称为二次 X 射线，或称为 X 射线荧光（XRF）。通过分析样品中不同元素产生的荧光 X 射线波长（或能量）和强度，可以获得样品中的元素组成与含量信息，达到定性和定量分析的目的。

自 1895 年伦琴发现 X 射线以来，对 X 射线及相关技术的研究和应用已经过了 100 多年。其中，1910 年发现的特征 X 射线光谱，为建立 X 射线光谱学奠定了基础；20 世纪 50 年代推出的商用 X 射线发射与荧光光谱仪，使得 X 射线光谱学技术进入实用阶段；60 年代发展了能量色散 X 射线光谱仪，促进了 X 射线光谱学仪器研发的迅速发展，并使现场和原位 X 射线光谱分析成为可能。近代则出现了全反射和同步辐射 X 射线荧光光谱仪、粒子激发 X 射线光谱仪、微区 X 射线荧光光谱仪等。根据分辨 X 射线的方式，X 射线光谱仪通常可分为两大类，即波长色散（WDXRF）和能量色散（EDXRF）X 射线荧光光谱仪。

X 射线荧光（XRF）分析技术的特点是适合于各类固体样品中主、次、痕量多元素同时测定，检出限在 $\mu\text{g/g}$ 量级范围内，制样方法简单，现已广泛应用于地质、材料、环境、冶金样品的常规分析。XRF 作为一种无损检测技术，可直接应用于现场、原位及活体分析，在涂层与薄膜分析、安检、珠宝文物、大型器件探伤等原位分析，以及核意外、太空探索等一些领域中占有重要地位。

X 射线荧光分析技术的缺点是检出限不够低，不适于分析轻元素，依赖标样，分析液体样品手续比较麻烦。由于电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）具有极佳的痕量、超痕量分析能力。因此目前国内外分析实验室一种流行的趋势是同时配备 X 射线荧光光谱仪和电感耦合等离子质谱仪，利用 XRF 分析含量较高的元素，而用 ICP-MS 分析低浓度的元素。

第二节 X 射线荧光分析技术的新应用

一、在生物、生命及环境领域中的应用

人类文明发展到现在,越来越重视人的生存环境和生活质量。开展生命起源、健康与疾病关系的研究,是世界关注的焦点之一。各国政府和科学家都付出了极大的努力进行研究,以达到减少疾病、增强健康的目的。健康、环境和材料,是目前 XRF 分析技术的主要应用研究领域。

农作物、饮用水、食品与食物链等与人类生命直接相关,而土壤是农作物生长的基础,土壤污染是全球化环境问题之一。大气飘尘、水资源、沉积物等是环境方面的重点研究对象。探索全球气候与环境变化对人类未来发展的影响,正日益受到关注。为了解决这些领域的相关问题,各国科学家正不懈努力,探索着各种可能的途径,其中,XRF 技术已成功应用于环境、食物链、动植物、农产品、人体组织细胞及器官、生物医学材料、组织细胞、医学试剂、动植物器官、代谢产物中的无机元素测定。

目前 XRF 分析专家们已普遍走出了单纯进行分析测试研究的范畴,广泛开展了分析数据与所包含信息的相关性研究,试图揭示出分析结果与疾病及环境变化等的内在联系,为疾病诊断与预防、环境预测与治理等提供科学依据。

核技术在医学研究与应用中占有重要地位,当应用于与人类生命直接相关的医疗领域时,一方面它可用于治疗和诊断,另一方面也可能损害健康的细胞,因此放射剂量学研究在国际上也受到了广泛重视。核技术应用与核材料安全由于与人类生存环境密切相关,目前更是引人注目。

二、在材料及毒性物品监测中的应用

在人们的日常生活中,许多材料都含有浓度不等的重金属元素,例如铅、铬、汞等。这些元素对人体有毒有害,其含量如超出允许范围,会极大损害人的健康,包括人的行为能力和智力水平。因此,欧盟针对塑料产品等的新标准已经生效,对有毒有害元素含量有了更为严格的限制。由于我国每年有大量塑材出口,这一标准的实施对我国原材料生产和出口有着极大的影响。而 XRF 技术则特别适合于用来监控相关材料中的有毒有害元素的含量,该技术已广泛应用于实际生产质量控制。

此外,XRF 在无损检测方面,具有其他分析技术无法比拟的优点,利用 X 射线扫描方法探测材料表层下面的缺陷是 X 射线无损检测技术的一个重要应用领域。

第三节 X 射线荧光光谱仪研制进展

在仪器研发方面,微区 XRF 分析光谱仪和新型能量探测器的研制发展很快,

并表现出了极大的实用潜力。

首先, X 射线能量探测器技术目前已取得显著进展, 甚至是突破, 并带来了能量色散 X 射线光谱仪的迅速发展。超导隧道节和微热量计的分辨率已达到或超过波长色散 X 射线光谱仪的分辨率, Si-PIN 和硅漂移探测器 (SDD)、电耦合阵列探测器 (CCD) 及四叶花瓣型 (低能量 Ge) 新型探测器等已实现了商品化, 不仅可获得理想的分辨率, 还可获得高计数率。目前这一领域的研究受到了广泛关注。

其次, X 射线毛细管聚焦技术目前在国际 X 射线荧光分析领域中已从研发走向实用。由于聚束毛细管 XRF 技术可提供无损、原位、微区分析数据和多维信息, 在材料科学的研究与检测技术中具有无可替代的作用, 例如硅晶片的无损检测等。目前国内在聚束毛细管研究方面, 与国际同步发展, 产品获得国际同行认可, 是国内具有发展优势的一个研究领域。

X 射线光谱仪除常规波长色散 X 射线光谱仪外, 能量色散 X 射线光谱仪在最近若干年已取得了长足进步, 随着探测器技术的显著进步和各种原位和现场分析的现实需求, 能量色散 X 射线光谱仪的实用价值越来越大, 其地位也日益重要。

总体来看, X 射线光谱分析领域的发展特点主要表现在三方面: 一是研究重点多已转至仪器与技术革新, 如新型探测器和聚束毛细管光源的研究; 二是特别关注分析技术的实际应用和可能揭示的因果关系, 如关于生命科学及全球环境变化的相关性研究等; 三是根据现时严峻的全球反恐形势和核分析技术无损检测的特点, 大力开展了爆炸物、毒品等危险物品的分析识别技术研究。而单纯进行分析方法的研究已经较少, 这对于我们选择今后的研究方向是值得借鉴的。

参考文献

- [1] Longoni A, Fiorini C, Guazzoni C, et al. A novel high-resolution XRF spectrometer for elemental mapping based on a monolithic array of silicon drift detectors and on a polycapillary X-ray lens. *X-Ray Spectrometry*, 2005, 34: 439-445.
- [2] Tianxi Sun, Xunliang Ding. Determination of the properties of a polycapillary X-ray lens. *X-Ray Spectrometry*, 2006, 35: 120-124.
- [3] Eggert T, Boslau O, Goldstrass P, Kemmer. J. Silicon drift detectors with enlarged sensitive areas. *X-Ray Spectrometry*, 2004, 33: 246-252.
- [4] Samek L, Ostachowicz B, Worobiec A, et al. Speciation of selected metals in aerosol samples by TXRF after sequential leaching. *X-Ray Spectrometry*, 2006, 35: 226-231.
- [5] Liqiang Luo. Chemometrics and its applications to X-ray spectrometry. *X-Ray Spectrometry*, 2006, 35: 215-225.
- [6] Liqiang Luo, Chettle D R, Nie H, et al. Curve fitting using a genetic algorithm for the X-ray fluorescence measurement of lead in bone. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2006, 269