

核燃料工艺技术丛书

核燃料循环分析技术

丛书主编 王俊峰

主 编 贾瑞和 丁戈龙

副主编 赵海新 梅家文

中国原子能出版社

核燃料工艺技术丛书

核燃料循环分析技术

丛书主编 王俊峰
主 编 贾瑞和 丁戈龙
副主编 赵海新 梅家文

本书由中核四〇四有限公司资助出版

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核燃料循环分析技术/贾瑞和,丁戈龙主编.

—北京:中国原子能出版社,2013.12

(核燃料工艺技术丛书/王俊峰主编)

ISBN 978-7-5022-6140-5

I. ①核… II. ①贾… ②丁… III. ①核燃料-
燃料循环-分析方法 IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 308891 号

内 容 简 介

本书系统地描述了核燃料循环中所采用的分析技术,介绍了重量分析、容量分析、光学分析、电化学分析、色谱分析、质谱分析、放射测量分析、量热分析、在线分析等方法的原理和装置,并重点介绍了用该方法测定各种目标物质的应用技术。此外,本书还对样品的采集及管理,核分析实验室厂房的基本要求、仪器设备的防护措施、样品试剂与废物管理等进行了介绍。

本书可供从事核燃料分析和教学的人员参考。

核燃料循环分析技术

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 卫广刚 王 丹

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 35.625 字 数 889 千字

版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6140-5 定 价 164.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

《核燃料工艺技术丛书》

编委会

编审委员会

主 编	王俊峰						
副 主 编	张天祥	姚守忠	胡晓丹	韩建平	李江颖	张燕春	
常务副主编	张天祥	胡晓丹					
委 员	(按姓氏笔画为序)						
	丁戈龙	于红箭	王 健	王春生	王剑英	车明生	
	卢明义	任凤仪	刘坤贤	闫心智	李天福	杨掌众	
	吴 伟	吴印清	吴秋林	张 伟	张文祥	张慧忠	
	陆治美	陈永红	周镇兴	栗万仁	贾瑞和	高义伦	
	高天祥	陶精言	第五永清	章泽甫	梁淑珍	董俊明	
	韩秉魁	惠宏伟	景风坤	程沁澄			

办公室

主 副 成	任	丁戈龙						
	主 任	刘文彬 代云水						
	员	(按姓氏笔画为序)						
		王 邵	王海峰	刘大伟	吴艳平	余东昌	徐玉杰	
		蒋建国						

《核燃料工艺技术丛书》

编辑出版委员会

(中国原子能出版社)

主 任	侯惠群						
副 主 任	杨树录						
成 员	(按姓氏笔画为序)						
	丁怀兰	卫广刚	王 丹	王 青	王艳丽	刘 岩	
	刘 朔	张关铭	张铤清	赵志军	侯茸方	韩 霞	
	谭 俊						

《核燃料循环分析技术》

编 审 人 员

主 编 贾瑞和 丁戈龙

副 主 编 赵海新 梅家文

参与编写人员 (按姓氏笔画为序)

丁士伟	马中军	王良清	代云水	白 骁	牟 凌
何海静	张立辉	张庆桂	汪南杰	邹会军	陆文博
陈庆云	杨 杰	罗 煜	蒙秀君	郭建锋	曹 希
鹿东峰	梁正安	梅家文	蒋军清	翟虎刚	

审 校 人 员 (按姓氏笔画为序)

刘永福	吴王锁	吴学周	吴继宗	张世翊	汪世军
辛仁轩	林跃武	罗文宗	金立云	侯朝勤	柴之芳
高良才	梁正安	梁俊福	梁淑珍	章泽甫	焦荣洲
董俊明					

总 序

核燃料循环产业是核工业发展的基础。核燃料循环产业的工业体系建设是核工业核心能力的重要组成部分。掌握核燃料循环工业体系各环节的专门工艺和技术是实现核燃料循环的理论向实践、科研实验向工业生产转化的关键环节。

经过五十多年的努力奋斗,特别是经过老一辈核燃料循环专家的刻苦攻关,我国相继突破了铀转化、核燃料后处理、铀钚冶金、氟生产等核燃料循环中的关键工艺环节,取得了一大批创新成果,积累了大量的宝贵经验和工艺技巧,为我国核工业的快速发展奠定了坚实的基础。

为了系统地总结我国核燃料循环领域工艺技术的自主创新成果,借鉴吸收国外同行的最新进展,在广泛吸取我国核燃料各领域专家意见的基础上,中国核工业集团公司所属中核四〇四有限公司、中国原子能科学研究院联合清华大学,历时四年,终于将《核燃料工艺技术丛书》编辑出版。

作为一名长期从事核燃料循环领域科研和生产的科技工作者,我对于核燃料循环技术在向工业化转化中突破工艺和掌握技术的复杂性和艰巨性有着深刻的体会,对于殚精竭智、献身于我国核燃料循环的众多专家学者怀有由衷的敬意和深厚的感情,对于我国核燃料循环产业的发展壮大充满无限的期望和信心。

我相信,此套丛书的出版必将促进我国核燃料循环领域工艺技术的系统化和科学化发展,推动核燃料循环产业的不断技术创新与进步,鼓舞和激励核燃料循环科研生产一线的广大干部职工,薪火相传,奋发图强,为我国核燃料循环产业的持续健康发展做出更大的贡献。

最后,感谢长期以来大力支持中国核工业集团公司核燃料循环产业的国家相关部委和地方政府的各级领导,感谢长期关心指导中国核工业集团公司核燃料循环产业发展的各领域的专家学者。

祝我国核燃料循环领域的工艺技术不断取得新的突破,我国核燃料循环产业取得更大的发展。

中国核工业集团公司总工程师

雷增光

2011年12月

序

我国核事业早期以军用为主,第一个发展高峰在 1958 年至 1978 年,在经历了“原子弹”、“氢弹”的辉煌之后,陷入了 20 年的低谷。随着全球范围内由于控制温室气体和不断增长的能源需求,核能现已进入了复兴阶段。核能作为安全高效的基荷能源在民用领域发挥了越来越重要的作用。我国的核能建设从 21 世纪开始,也走出了低谷,迎来了新的发展时期。尽管 2011 年 3 月发生了日本福岛核事故,但世界各国的核能计划除少数国家外,仍在继续推进之中。国际原子能机构最新报告指出,核能前景依然光明。

在核燃料循环体系中,分析技术一直起着极其重要的作用,在发展核燃料先进工艺的同时,也要发展先进的核燃料循环分析技术,分析是科学技术的基础。《核燃料循环分析技术》一书的出版适逢其时,对于提高核燃料循环分析技术水平,满足核能事业发展的需求,以及培养核科技人才将起到积极作用。

本书立足实践,既介绍了适合于核燃料循环的分析方法和原理,同时又重点介绍了该方法在相关目标物质中的应用情况。本书内容系统完整,涵盖了核燃料循环中的特定取样、化学分离、仪器分析、质量控制、实验室技术等各个方面,不仅介绍了核燃料循环分析技术领域的基本知识和最新成果,还融入了编者多年来在实践中积累的丰富经验和创新成果,是我看到的国内出版的一本比较重要的核燃料循环分析专著。

我衷心祝贺《核燃料循环分析技术》一书的出版发行,并向广大读者推荐本书。

中国科学院院士



2011 年 12 月

前 言

在核燃料的生产、使用、储存、转运、监管及其有关的各种科研活动中,经常需要对其成分进行定性和定量分析。核燃料循环中的工艺人员需要根据分析结果调节工艺参数,确定物料品质和走向;核设施的管理者需要为核设施配置分析资源,包括取样-分析系统、方法和人力;核材料监督部门需要根据分析结果确定核材料的受控情况。为了及时获得和运用各种核物料的成分分析数据,除分析专业人员必须掌握可靠的分析技术外,核设施的工艺人员、管理人员以及设计人员也应该对相关的分析技术有一定深度的了解。

对于核燃料循环中某些重要的锕系元素(如铀、钚、镅、钷等)和裂变元素的分析技术,国内已经出版了一些专著,如《铀的分析化学》、《钚的分析化学》、《镅的分析化学》、《裂变产物分析技术》等。这些著作对于核燃料循环中从事分析工作的人员,无疑是重要的参考资料。

本书在介绍某类分析方法的原理和装置之后,着重介绍方法的应用。这样,读者可以在较短时间内较为全面地了解某种分析技术在核燃料循环分析中的应用。所涉及的分析物主要是已获得工业规模应用的“核燃料”——铀和钚,也涉及核燃料循环牵涉的其他锕系元素、裂变元素,以及各种工艺过程中所用的主要介质(酸、碱、溶剂、氧化还原剂)和化学反应产物、辐射分解产物等。因此,本书与上述分析化学著作在内容上是互补的。

本书共有14章。第1章,绪论。第2章,样品的采集与初步制备。核物料大多具有放射性,有的价格极其昂贵,所以要求取样量要小。然而取样量越小,其代表性越差。所以,专门用一章阐明样品采集、分取和固体样品初步制备的技术。不同的测量方法,可能要求相同的化学分离步骤,为了避免在介绍分析方法时的重复,在第3章专门叙述各种化学分离技术。第4章至第12章具体介绍各种分析技术。其中,重量分析(第4章)和容量分析(第5章)是最基本的技术;光学分析(第6章)用得最为广泛,核物料中的很多种物质可以用分光光度法测定,荧光法测定铀最为灵敏,原子发射光谱是分析核燃料中微量杂质的主要手段;电化学分析(第7章)的应用虽然在逐渐减少,但个别分支(如库仑分析)仍在起着重要作用;色谱分析(第8章)虽然目前在核燃料循环中应用不够广泛,但其发展不容忽视;质谱分析(第9章)在物料分析中有着特殊的地位,它在完成同位素组分分析的同时,也可以进行元素含量的准确测定;放射测量分析也可称为放射性分析(第10章),在核燃料循环分析中的应用也较为广泛,其特点是测

量过程不易受其他化学组分干扰,灵敏度高,便于实现非破坏性分析;量热分析(第11章)现仅应用于大量样品的测量,有的分析化学家将其纳入放射性分析;在线分析(第12章)也叫流线分析,其分析方法无外乎上述第6章至第10章所述的方法,只是不用取样,将传感装置安装于工艺生产线,直接获取物料成分的信息;核分析实验室(第13章)主要介绍了核分析实验室的基本要求、仪器设备的防护措施、样品试剂与废物管理等;分析数据的处理(第14章)是分析工作的重要组成部分,其中误差理论与不确定度评定在核燃料分析技术中得到了广泛应用。

本书尽量介绍新的分析技术,这些内容可以为核设施的设计人员、管理人员、工艺操作人员提供参考。对于核燃料循环生产和科研领域的各种专业分析人员,本书内容亦有助于他们全面了解核燃料循环分析技术。本书也可以供高等学校分析专业学生参考。

本书由多位具有丰富理论知识和实践经验的技术人员合作编写。第1章由贾瑞和执笔;第2章由陆文博执笔;第3章由郭建锋执笔;第4章由丁戈龙执笔;第5章由牟凌、曹希、杨杰执笔;第6章由郭建锋、梅家文、蒋军清、翟虎刚执笔;第7章由张立辉执笔;第8章由王良清、蒙秀君执笔;第9章由邹会军、梅家文、张庆桂、马中军执笔;第10章由贾瑞和、鹿东峰、汪南杰执笔;第11章由梅家文、梁正安、陈庆云、张庆桂执笔;第12章由贾瑞和执笔;第13章、第14章由赵海新执笔;附录1、附录2由陆文博编写;附录3由贾瑞和编写;附录4、附录5由赵海新编写。贾瑞和、丁戈龙、梅家文、赵海新、焦荣洲、陆文博、白骁、代云水等同志对全书进行了统稿,梁正安、杨杰、郭建锋、丁士伟、何海静、严煜、鹿东峰、张庆桂、寇子琦等同志对部分章节进行了顺改。杨掌众、刘青为本书提供了资料支持。

中国科学院院士、著名的核科学家柴之芳先生为本书作了序。柴之芳、辛仁轩、吴王锁、吴学周、吴继宗、张世翊、罗文宗、金立云、梁俊福、刘永福、侯朝勤、梁淑珍、章泽甫、焦荣洲、董俊明、汪世军、高良才、林跃武、梁正安等专家分别对全书或部分章节进行了认真审阅,提出了许多宝贵的建议和修改意见。杨杰、吉头杰、孙媛媛和中核四〇四有限公司核信息中心、分析检验中心的同志为本书的出版做了大量的工作。对此我们一并表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,也得到了有关领导和专家的大力支持和帮助,中核四〇四有限公司资助了本书的出版,谨向他们表示谢意。

由于编者水平有限以及检索到的资料有限,某些领域未能列入更新颖和重要的分析技术。对于各种错误和遗漏,敬请读者批评指正。

编著者

2011年12月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 核能与核燃料	(1)
1.2 核燃料循环	(1)
1.3 分析在核燃料循环中的作用	(3)
1.4 核燃料循环中分析的特点	(4)
1.5 核燃料循环中分析方法的选择	(5)
第 2 章 样品的采集与初步制备	(11)
2.1 样品的采集	(11)
2.1.1 采样通则	(11)
2.1.2 样品采集技术及应用	(20)
2.2 固体样品初步制备	(37)
2.2.1 固体样品的缩分	(37)
2.2.2 固体试样的分解	(39)
第 3 章 核燃料循环分析中的化学分离技术	(49)
3.1 沉淀和共沉淀分离	(50)
3.1.1 常量组分的沉淀法分离	(50)
3.1.2 微量组分的共沉淀法分离	(54)
3.2 溶剂萃取分离	(57)
3.2.1 概述	(57)
3.2.2 溶剂萃取体系分类	(60)
3.2.3 萃取剂与溶剂的选择	(65)
3.2.4 几类重要萃取剂在核燃料循环分析中的应用	(68)
3.3 离子交换分离	(83)
3.3.1 离子交换树脂	(83)
3.3.2 离子交换技术	(86)
3.3.3 离子交换分离法在核燃料循环分析技术中的应用	(86)
3.4 萃取色谱分离	(87)
3.4.1 萃取色谱的原理	(88)
3.4.2 萃取色谱分离技术	(89)
3.4.3 萃取色谱在核燃料循环分析中的应用	(90)
3.5 其他分离技术	(92)
3.6 新型萃取分离技术	(94)
3.6.1 固相萃取技术	(94)
3.6.2 液膜分离技术	(94)

3.6.3	超临界流体萃取技术	(94)
3.6.4	膜分离技术	(95)
3.6.5	离子液体分离技术	(96)
3.6.6	其他新型分离技术	(96)
第 4 章	重量分析技术	(102)
4.1	典型重量分析技术	(103)
4.1.1	沉淀重量法	(103)
4.1.2	气化重量法	(104)
4.1.3	直接重量法	(104)
4.2	主要设备	(105)
4.2.1	天平的结构及原理	(105)
4.2.2	电子天平的校准	(105)
4.2.3	天平的使用	(106)
4.2.4	结果的浮力校正	(107)
4.3	重量法在核燃料循环分析中的应用	(108)
4.3.1	铀的重量分析	(108)
4.3.2	钚的重量分析	(115)
4.3.3	其他成分的重量分析	(122)
4.4	热重分析法	(124)
4.4.1	热重分析仪的构造和原理	(124)
4.4.2	热重曲线的分析	(125)
4.4.3	热重分析法在核工业中的应用	(125)
第 5 章	容量分析技术	(127)
5.1	容量分析法基本要求	(127)
5.1.1	容量分析法对化学反应的要求和滴定方式	(127)
5.1.2	容量分析法对基准物质和标准溶液的要求	(128)
5.2	容量分析法的分类及原理	(128)
5.2.1	酸碱滴定法	(128)
5.2.2	配位滴定法	(130)
5.2.3	氧化还原滴定法	(131)
5.2.4	沉淀滴定法	(133)
5.2.5	电位滴定法	(134)
5.2.6	电流滴定法	(134)
5.2.7	电导滴定法	(134)
5.2.8	光度滴定法	(135)
5.3	容量分析仪器及技术要求	(135)
5.3.1	滴定管	(135)
5.3.2	移液管	(136)
5.3.3	容量瓶	(136)

5.3.4	自动滴定管	(136)
5.3.5	电位滴定装置	(137)
5.3.6	电流滴定装置	(138)
5.3.7	光度滴定装置	(138)
5.4	容量分析法在核燃料循环分析中的应用	(139)
5.4.1	铀的容量分析	(139)
5.4.2	钚的容量分析	(145)
5.4.3	镅的容量分析	(149)
5.4.4	含铀、钚工艺溶液中游离酸的容量滴定	(149)
5.4.5	其他分析项目的容量滴定方法	(151)
第6章	光学分析技术	(154)
6.1	光学概论	(154)
6.1.1	光	(154)
6.1.2	光谱	(155)
6.2	原子发射光谱分析法	(157)
6.2.1	原子发射光谱基本原理	(157)
6.2.2	原子发射光谱仪	(158)
6.2.3	ICP 光谱法	(166)
6.2.4	分析方法	(170)
6.2.5	发射光谱分析技术在核燃料循环分析中的应用	(173)
6.3	原子吸收光谱法	(178)
6.3.1	原子吸收光谱法基本理论	(179)
6.3.2	原子吸收光谱仪	(180)
6.3.3	定量分析方法	(184)
6.3.4	原子吸收干扰的产生及消除	(185)
6.3.5	测量条件选择	(188)
6.3.6	原子吸收光谱法在核燃料循环分析中的应用	(189)
6.4	分光光度法	(190)
6.4.1	基本原理	(190)
6.4.2	分光光度计	(192)
6.4.3	分光光度法条件选择	(195)
6.4.4	定量分析方法	(197)
6.4.5	分光光度法在核燃料循环分析中的应用	(198)
6.5	红外光谱法	(202)
6.5.1	红外光谱基本原理	(202)
6.5.2	红外光谱仪	(203)
6.5.3	试样的要求及制备	(204)
6.5.4	红外光谱法在核燃料循环分析中的应用	(204)
6.6	荧光分析法	(205)

6.6.1	基本原理	(206)
6.6.2	荧光仪	(207)
6.6.3	定性与定量分析	(209)
6.6.4	荧光分析法的影响因素与荧光淬灭	(210)
6.6.5	荧光分析法在核燃料循环分析中的应用	(211)
第7章	电化学分析技术	(222)
7.1	库仑分析法	(222)
7.1.1	控制电位库仑法	(222)
7.1.2	控制电流库仑法	(227)
7.1.3	微库仑法	(231)
7.2	离子选择电极法	(232)
7.2.1	离子选择电极	(232)
7.2.2	氟离子选择电极	(233)
7.2.3	氯离子选择电极	(233)
7.3	极谱分析法	(234)
7.3.1	经典极谱法	(234)
7.3.2	脉冲极谱法	(236)
第8章	色谱分析技术	(238)
8.1	概述	(238)
8.2	色谱分析法基本术语	(239)
8.2.1	色谱图	(239)
8.2.2	色谱分离的基本参数	(240)
8.3	色谱法的基本理论	(242)
8.4	色谱定性与定量分析	(243)
8.4.1	定性分析	(243)
8.4.2	定量分析	(243)
8.5	气相色谱法	(244)
8.5.1	气相色谱仪	(245)
8.5.2	气相色谱分离条件的选择	(248)
8.6	液相色谱法	(249)
8.6.1	高效液相色谱(HPLC)	(249)
8.6.2	离子色谱(IC)	(251)
8.7	色谱法在核燃料循环分析中的应用	(254)
第9章	质谱分析技术	(262)
9.1	概述	(262)
9.1.1	质谱分析法的原理	(262)
9.1.2	质谱分析法的分类	(262)
9.1.3	质谱分析法的特点	(263)
9.2	质谱仪器	(263)

9.2.1	基本结构	(263)
9.2.2	质谱仪各系统简介	(264)
9.2.3	质谱仪的主要技术指标	(275)
9.3	分析技术	(277)
9.3.1	定性定量技术	(277)
9.3.2	影响因素及消除	(279)
9.3.3	样品制备	(280)
9.4	质谱法在核燃料循环分析中的应用	(281)
9.4.1	热电离质谱法	(281)
9.4.2	电子轰击质谱法	(285)
9.4.3	电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法	(294)
9.4.4	共振电离质谱法(RIMS)	(301)
9.4.5	同位素稀释质谱法	(305)
第 10 章	放射测量分析技术	(312)
10.1	概述	(312)
10.2	放射测量分析术语	(317)
10.3	放射性核素分析一般方法及影响因素	(318)
10.3.1	放射性核素的定性分析	(318)
10.3.2	放射性核素的定量分析	(321)
10.4	核辐射探测器	(325)
10.4.1	闪烁探测器	(325)
10.4.2	半导体探测器	(329)
10.4.3	气体电离探测器	(330)
10.4.4	中子探测器	(331)
10.5	α 射线测量分析法	(331)
10.5.1	α 射线与物质的相互作用	(331)
10.5.2	α 射线测量的装置	(332)
10.5.3	α 源的制备	(336)
10.5.4	固体闪烁 α 计数法	(339)
10.5.5	α 能谱法	(345)
10.5.6	α 射线液体闪烁分析法	(351)
10.5.7	气体电离探测器在 α 核素测量中的应用	(354)
10.6	β 射线测量分析法	(355)
10.6.1	β 射线与物质的相互作用	(355)
10.6.2	β 射线液体闪烁分析法	(355)
10.6.3	β 射线固体闪烁分析法	(360)
10.7	γ 、X 射线测量分析法	(361)
10.7.1	γ 射线与物质的相互作用	(362)
10.7.2	γ 射线测量装置	(365)

10.7.3	γ 射线闪烁计数测量法	(368)
10.7.4	γ 能谱法	(369)
10.7.5	γ 射线吸收法	(379)
10.7.6	X 射线闪烁计数测量法	(380)
10.7.7	X 射线荧光(XRF)测量法	(381)
10.7.8	X 射线衍射(XRD)分析	(390)
10.8	中子测量分析技术	(391)
10.8.1	中子的性质	(391)
10.8.2	中子源	(391)
10.8.3	中子与物质相互作用	(392)
10.8.4	中子测量技术在核工业中的应用	(393)
第 11 章	量热技术	(399)
11.1	基本原理	(399)
11.2	量热计的分类	(400)
11.2.1	绝热量热计	(400)
11.2.2	半绝热量热计	(401)
11.2.3	潜热量热计	(401)
11.2.4	动态量热计	(401)
11.2.5	稳态量热计	(402)
11.3	量热计的标定	(404)
11.3.1	电气标定	(404)
11.3.2	放射性热源标定	(405)
11.4	功率测定	(405)
11.4.1	置换法	(405)
11.4.2	伺服控制法	(405)
11.4.3	差示法	(406)
11.5	量热技术在核材料定量测定方面的应用	(406)
11.5.1	钚总量的测定	(406)
11.5.2	氡活度的测定	(410)
第 12 章	在线分析技术	(413)
12.1	概述	(413)
12.2	γ 射线测量技术	(416)
12.2.1	闪烁计数法	(416)
12.2.2	γ 吸收法	(419)
12.2.3	γ 谱仪的在线应用	(423)
12.3	X 射线测量技术	(428)
12.3.1	X 射线闪烁计数法	(428)
12.3.2	X 射线荧光法	(430)
12.4	α 射线在线测量技术	(433)

12.4.1	间隙式 α 测量装置	(434)
12.4.2	接触式 α 测量装置	(435)
12.5	光学在线分析方法	(436)
12.6	电化学在线分析方法	(439)
12.6.1	伏安分析法	(439)
12.6.2	溶液电导监测技术	(442)
12.6.3	离子选择电极法	(445)
12.7	其他在线监测方法	(445)
第 13 章	核燃料循环中的分析实验室	(449)
13.1	核分析实验室厂房的一般要求	(449)
13.1.1	放射性厂房的分类	(449)
13.1.2	核分析实验室内的分区及布置	(450)
13.1.3	放射性实验室的分级	(451)
13.1.4	核分析实验室的抗震	(452)
13.1.5	核分析实验室供电要求	(453)
13.1.6	核分析实验室给排水要求	(453)
13.1.7	核分析实验室密闭、通风与空气净化要求	(453)
13.1.8	核分析实验室辐射防护屏蔽设计与监测	(458)
13.2	核分析实验室仪器及设备	(460)
13.2.1	核分析实验室箱室设备	(460)
13.2.2	核分析实验室仪器设备	(469)
13.3	核分析实验室的试剂与样品	(471)
13.3.1	核分析实验室用水要求	(471)
13.3.2	核分析实验室化学试剂要求	(472)
13.3.3	核分析实验室样品的要求	(473)
13.4	核分析实验室的“三废”处理及要求	(476)
13.4.1	放射性废物处理的一般原则	(477)
13.4.2	放射性废液处理要求	(477)
13.4.3	放射性固体废物处理要求	(477)
13.4.4	放射性废气排放要求	(477)
13.5	实验室机器人的应用	(478)
13.6	核分析实验室分析仪器设备举例	(478)
第 14 章	分析数据的处理	(481)
14.1	基本概念	(481)
14.1.1	真值及平均值	(481)
14.1.2	误差的基本概念	(482)
14.1.3	测量数据的精准度	(483)
14.2	误差的传递及统计检验	(485)
14.2.1	误差的来源及分类	(485)

14.2.2	误差的传递	(486)
14.2.3	数据误差的统计检验	(486)
14.3	测量的置信度及不确定度评定	(492)
14.3.1	不确定度及其分量	(492)
14.3.2	不确定度来源	(493)
14.3.3	不确定度评定方式	(493)
14.4	有效数字的规则及结果的表示	(495)
14.4.1	有效数字规则	(495)
14.4.2	测量结果的表示	(496)
14.5	不确定度评定实例	(496)
14.5.1	铀 NDA 标样中铀含量定值不确定度的评定	(496)
14.5.2	电感耦合等离子体光谱法测定八氧化三铀中的镅、钆的不确定度 评定	(500)
附录		(505)
附录 1	涉核常用标准分析方法	(505)
附录 2	铀元素分析测量的标准物质	(518)
附录 3	核材料监督测量不确定度 2010 国际目标值(ITVs)	(531)
附录 4	常用的物理量及其单位	(539)
附录 5		(542)