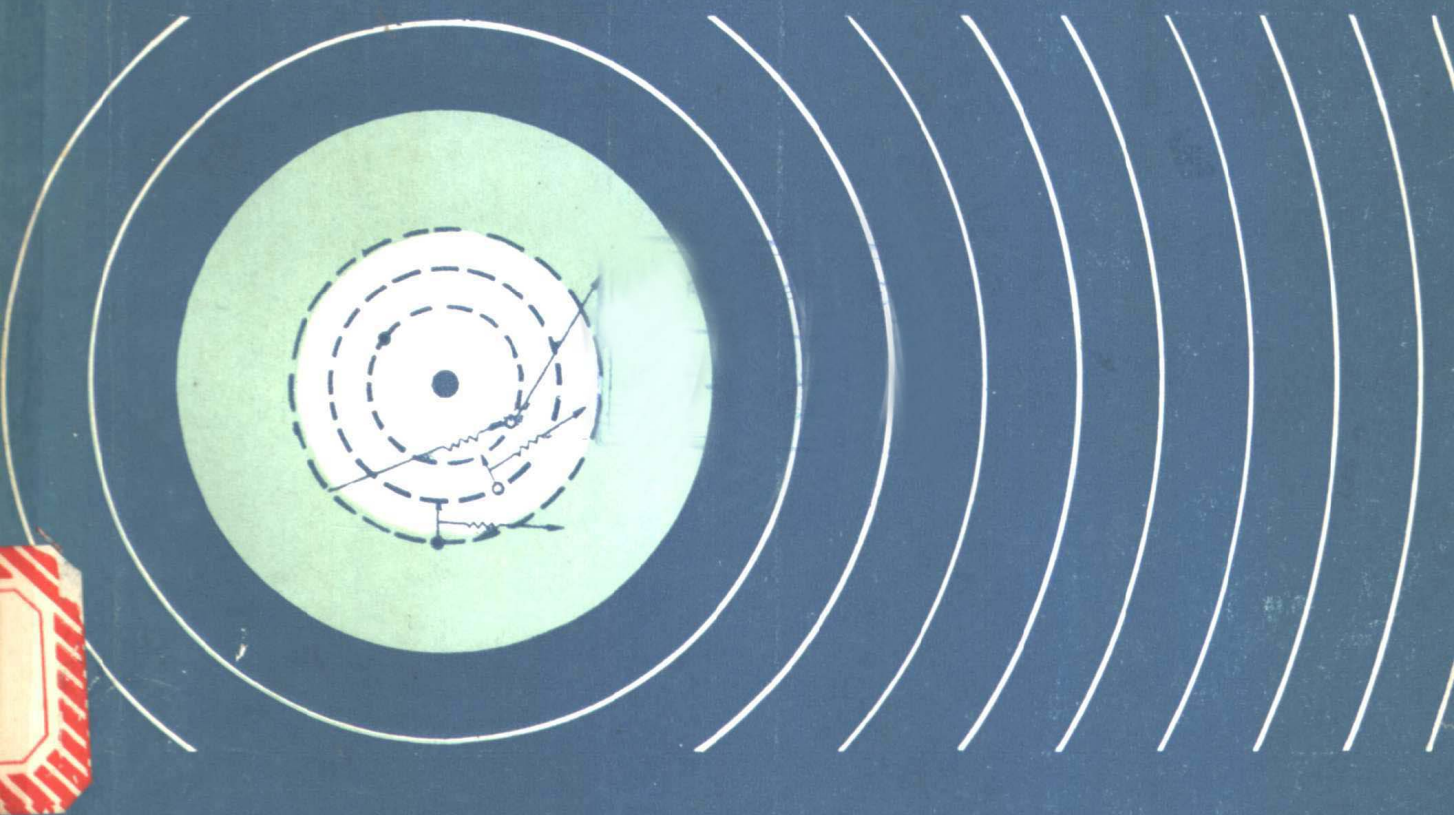


X 射线 荧光 探 矿 技 术

章 晔 等 编 著



地 质 出 版 社

X射线荧光探矿技术

章 晔 等 编著

地 质 出 版 社

内 容 简 介

X射线荧光探矿技术是最近十多年迅速发展起来的一种新兴技术。本书系统地论述了它的物理基础、探测器、射线电子学电路、室内分析方法、现场测量方法、X射线荧光测井等。可供地质、冶金、石油、化工、海洋、建材、水利、环保以及核工业等有关部门的专业人员参考，亦可作高等学校有关专业的教学参考材料。

本书由章晔、谢庭周、曹利国、梁致荣、程业勋同志编写。

X 射线荧光探矿技术

章 晔 等 编 著

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑：张怀素

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：19¹/₈ 字数 446,000；
1984年10月北京第一版·1984年10月北京第一次印刷

印数：1—2,530册 定价：3.85 元

统一书号：15038·新1070

绪 言

四十年代,原子核科学技术在国际上得到了很大发展。一九五五年,在国际原子能机构在日内瓦举办的第一次和平利用原子能国际会议上,法国萨克莱研究所的一个研究小组首先提出了采用放射性同位素源的X射线荧光分析技术的可能性。

当时,虽然用X射线管的X射线荧光分析技术已有所发展,它的有效性在学术界和工业界有了高度评价,但是在X射线荧光分析技术中仅由X射线管换成放射性同位素而作为激发源,在原理上认为有可能,在技术上付诸实施却有很大困难。

六十年代中期,在国际原子能机构举办的萨尔兹堡及华沙讨论会上,以及在美国原子能委员会(AEC)举办的芝加哥讨论会上,英、法、美、苏、日、加、波、澳等国学者在会上作了报告并进行了讨论,展示了不少新进展,特别是矿业部门实用的例子十分引人注目。英国地质调查所、英国原子能局、美国原子能委员会等合作,于一九六四年至一九六六年研制成携带式放射性同位素X射线荧光仪。

当时,用放射性同位素源的方法并不是把它简单地看成代替X射线管,而是企图去占领老方法所不能适用的领域。

一九六八年,国际原子能机构(IAEA)在维也纳举行了核技术与矿物资源的学术会议,各国学者就获得实用的新技术及其经济效果进行了交流,并给予很好的评价。一九七〇年,会议的资料汇编成册,由国际原子能机构出版。在一九六八年的会议上,不仅报导了在地面应用的携带式放射性同位素X射线荧光仪,而且由美国的J. R. 罗兹报导了放射性同位素X射线荧光测井探头的成果。同年,苏联E. П. 列曼等也报导了放射性同位素X射线荧光测井的应用。继后,除美、苏外,英、加、瑞典、芬兰、西德等国也应用了X射线荧光测井技术。

一九七四年,国际原子能机构举行了核技术用于地球化学与地球物理的学术会议;一九七七年,国际原子能机构还举行了核技术与矿物资源的学术会议,交流了经验。

放射性同位素X射线荧光技术,早期都采用闪烁计数器或正比计数器以及单道或双道脉冲高度分析器等技术。后来在射线探测上,迅速发展了射线能量分辨率很高的硅(锂)半导体探测器和高纯锗半导体探测器,配上多道脉冲高度分析器和微处理器,形成了一个崭新的灵敏度较高的一次测量多元素的轻便型X射线荧光仪。

一九七八年,美国R. F. 希尔(Hill)等在ORTEC公司研制成一台应用 ^{109}Cd 源、高纯锗半导体探测器及微处理器构成的新型的X射线荧光仪,定名为携带式找金仪。

一九七八年,苏联B. A. 梅耶尔等报导了应用 ^{109}Cd 源和硅(锂)半导体探测器构成的井下探头直径为36毫米的X射线荧光测井仪,已在银矿井孔中实测了银的品位。

综上所述,放射性同位素X射线荧光技术已从只能在实验室里应用的笨重设备,发展到可用于野外现场的携带式仪器;继后,又从地面的轻便型放射性同位素X射线荧光仪,发展到井下的X射线荧光测井仪、海底使用的仪器以及星际探测的仪器。

在国际上,这门技术发展十分迅速,而且颇有成效。在国内,一九六三年成都地质学院

三系（原北京地质学院三系）应用 ^{90}Sr - ^{90}Y 的 β 射线源照射不同物质的金属材料，射线探测器使用钟罩形正比计数器，进行了实际测量。一九七二年至一九七四年重新开始研制并完成了携带式放射性同位素X射线荧光仪，组装了小批量的同类型仪器销售。一九七五年至一九八〇年研制完成了携带式找磷仪；一九七七年至一九七九年研制完成了X射线荧光测井仪。一九八〇年。成都地质学院与地质部重庆地质仪器厂合作设计了工艺样机JXY-1 X射线荧光测井仪和HYX-1轻便型X射线荧光仪，由该厂投入生产供应用户。成都地质学院在实验室里应用了Scorpio-3000系列的多道分析器计算机系统。它应用 ^{55}Fe 、 ^{238}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{57}Co 等同位素源，并配有硅（锂）、高纯锗、锗（锂）半导体探测器，在室内从事能量色散X射线荧光分析和中子活化分析的工作。

放射性同位素X射线荧光技术的基本原理是，当岩石矿物中各个元素受到放射性同位素放出的某个能量辐射的激发后，可发射出具有一定特征的X射线谱线（或称荧光）。测出该谱线的能量，即可知是何种元素；测得其强度，即可知该元素的含量。

无论国际或国内，X射线荧光技术已用于找矿勘探或采矿阶段等，其特点是仪器轻便，操作容易掌握，便于现场使用，测量速度快，分析元素范围广（从原子序数13号铝到92号铀），能立即获得元素的品位。它可以测定岩矿粉末样品、液体样品，更重要的是可以在岩矿露头、山地工程表面、钻孔岩心以及在钻孔中直接定性、定量测量岩矿品位，确定矿化地段，确定矿层厚度，确定矿与非矿界限。传统的方法是在原产地刻槽取样作化学分析求得品位，不仅速度慢，成本高，而且刻槽工人的矽肺病得不到根治。放射性同位素X射线荧光技术则可在现场直接求得品位，从而有可能消除矽肺病。苏联应用X射线荧光技术在地面和钻孔内求取某些矿产的品位及划分矿层厚度，计算储量，获得了苏联储量委员会的批准与推广应用。近年来，X射线荧光技术在地质工作中的应用正日益扩大。

在普查找矿阶段，X荧光技术作为现场测量手段，可用以对某些地质远景地段及时进行检查，加速岩体评价。在化探工作中，可作中等强度以上的测量对象和水系底部沉积物的淘洗重矿物的定量或半定量测量，及时发现和验证异常。由于硅（锂）半导体探测器的应用，在化探工作中测量疏松沉积物和水系底部沉积物已成为可能的现实。在矿床勘探工作中，X荧光技术可作为野外地质队实验室的快速分析手段，在探槽、探井、坑道等山地工程表面直接测定元素品位，划分矿层厚度，圈定矿与非矿界限，以及指导山地工程的进展。它可以代替或部份代替刻槽取样，直接计算出用作储量计算的线储量。用钻孔岩心测量和X射线荧光测井，可以及时查明矿化地段，划分矿层，测得元素品位，为钻探进度和岩心取样及时提供依据。目前这种手段已开始用于海洋地质调查，以及作为星际探测的工具。

此外，在采矿工业中应用X荧光技术可及时查明矿体情况，指导开采；在选矿作业中，用于流程分析；在冶金工业中，用于炉前分析和金属材料的分析和成份检查；在电子工业中，用于测定金属材料上的镀层厚度；在建材工业中，用于对水泥和材料结构的分析；在水利工程中，用于对水系沉积物的分析；在化学工业中，用于对溶液中元素成份的分析；在石油工业中，用于对石油产品附加物和不纯度的分析；在海洋开发和环境保护部门，用于进行现场测量，等等。

本书共分七章。第一章为X射线荧光物理基础；第二章为探测器；第三章为射线电子学电路；第四章为滤片；第五章为室内分析方法；第六章为X射线荧光现场测量；第七章

为X射线荧光测井。书后的附录^①中列有：一、原子能级图和特征X射线；二、元素的K吸收限和主要的K系特征X射线；三、元素的L吸收限和主要的L系特征X射线；四、光子的质量吸收系数；五、低能范围的光子质量吸收系数；六、元素对特征X射线的质量吸收系数；七、K吸收限和L吸收限的突变比；八、硫、铁、铜、钼、锡和铅的X射线作用截面；九、空气、P₁₀气和聚酯膜、聚乙烯醇缩甲醛膜对光子的质量吸收系数；十、 ϕ 200铁框分样筛的规格；十一、 e^+ 和 e^- 值表。

本书的撰写工作从一九七六年开始，参加的同志有章晔、谢庭周、曹利国、梁致荣、滕树昆。一九八〇年在第一稿的基础上，由程业勋、章晔对某些章节进行了修改和重写。一九八二年前二稿的基础上，又进行了重新编写。绪言、第一章、第七章、附录由章晔编写；第二章、第三章由谢庭周编写；第四章、第五章由曹利国编写；第六章由梁致荣编写。最后由章晔定稿。

本书的编写过程中，得到了有关单位和人员的支持和协助。地质科技情报研究所崔霖沛同志和武汉地质学院北京研究生部蔡柏林同志审查了原稿并提出许多宝贵意见，在此深表谢意。由于我们的知识水平有限，实际工作经验不多，书中的内容定有不少缺点和错误，恳切地希望读者批评指正。

^① 附录引自张家骅等编的《放射性同位素X射线荧光分析》，原子能出版社，1981。

目 录

绪言

第一章 X射线荧光的物理基础	1
1.1 放射性概论	1
1.2 X射线激发源	4
1.3 原子的电子壳层结构	10
1.4 X射线荧光产生及其性质	13
1.5 X射线与物质的相互作用	17
1.6 荧光产额和X射线总产额	36
1.7 激发源, 样品和探测器的相对几何关系	39
1.8 轻便式X射线荧光仪的一般结构和电路要求	41
第二章 探测器	44
2.1 闪烁探测器	44
2.2 正比计数器	54
2.3 半导体探测器	61
2.4 探测器的性能比较	64
第三章 射线电子学电路	66
3.1 前置电路	66
3.2 线性脉冲放大器	69
3.3 单道脉冲幅度分析器	75
3.4 多道脉冲幅度分析器	79
3.5 脉冲计数器	82
3.6 定时电路及控制电路	87
3.7 计数率计电路	90
3.8 电源电路	92
第四章 滤片	105
4.1 原理和滤片物质的选择	105
4.2 滤片厚度的理论计算	106
4.3 成形工艺	108
4.4 滤片平衡性的测定	110
4.5 调整滤片平衡性的方法	111
4.6 对滤片的评价	113
第五章 室内分析方法	117
5.1 室内分析方法的基本内容和基本公式	117
5.2 基体效应	119

5.3 样品的制备	120
5.4 样品的测量方法	122
5.5 测量条件的控制	128
5.6 基体效应的校正方法	131
5.7 测量结果的评价	140
第六章 X射线荧光现场测量	144
6.1 X射线荧光现场测量的工作原理	144
6.2 X射线荧光现场测量的工作方法	146
6.3 X射线荧光现场测量的地质效果	151
6.4 山地工程表面岩矿露头的X射线荧光现场测量	153
6.5 钻孔岩心X射线荧光现场测量	164
6.6 普查找矿中X射线荧光方法的应用	166
6.7 半导体探测器X射线荧光谱仪的应用	172
6.8 X射线荧光技术在海洋地质和宇宙地质中的应用	175
6.9 X射线荧光技术在选矿和石油工业等领域的应用	176
6.10 X射线荧光现场测量的影响因素及其消除方法	184
第七章 X射线荧光测井	191
7.1 概述	191
7.2 基本原理	191
7.3 X射线荧光测井仪器装备	192
7.4 X射线荧光测井技术	199
7.5 X射线荧光测井方法技术	200
7.6 应用实例	214
附录一 原子能级图和特征X射线	223
附录二 元素的K吸收限和主要的K系特征X射线	224
附录三 元素的L吸收限和主要的L系特征X射线	226
附录四 光子的质量吸收系数	228
附录五 低能范围的光子质量吸收系数	235
附录六 元素对特征X射线的质量吸收系数	237
附录七 K吸收限和L吸收限的突变比	286
附录八 硫、铁、铜、钼、锡和铅的X射线作用截面	287
附录九 空气、P₁₀气和聚酯膜、聚乙烯醇缩甲醛膜对光子的质量吸收系数	294
附录十 ϕ 200铁框分样筛的规格	295
附录十一 e^+及e^-值表	295

第一章 X射线荧光的物理基础

1.1 放射性概论

1.1.1 放射性同位素

元素的基本单位称为原子。原子很小，它的直径只有 10^{-8} 厘米左右，原子的质量也很小，如氢原子质量为 1.6733×10^{-24} 克。

原子的中心有一个核心，称为原子核；外围有一定数目的电子（称束缚电子或壳层轨道电子）围绕原子核运动。原子核的直径比起原子的直径来小得多，它为 10^{-13} — 10^{-12} 厘米数量级，但是却集中了原子的绝大部分质量。例如，氢核的质量为 1.67×10^{-24} 克，电子的质量为 9.1×10^{-28} 克，二者比值近似为 $1/1840$ 。

原子核带正电荷，电子带负电荷，一个电子所带的电荷为 4.8028×10^{-10} 静电单位，通常用字母 e 来表示，而且原子核所带正电荷恰好与核外电子电荷总和相等，构成中性原子。通常用字母 Z 表示各元素原子核所带的正电荷数（以 e 为单位），它等于核外绕行的电子数，俗称原子序数。

原子核由质子和中子结合构成。质子通常以“ p ”表示，它带的电荷量和电子带的电荷量相等，但符号相反而带正电，它的质量为 1.6726×10^{-24} 克，是电子的1840倍。原子核所带的电荷数由质子的数目决定，因此原子序数 Z 就表明了原子核里质子的数目。中子通常以符号“ n ”来表示，中子不带电，质量为 1.6749×10^{-24} 克，比质子略为重一点。中子一般束缚在原子核中，不能独立地稳定存在，只是在原子核受到外来粒子的轰击而引起变化时才从核里释放出来。

中子和质子统称为核子，原子核内质子和中子之和称为核子数。如以 N 表示中子数，以 Z 表示质子数，以 A 表示核子数或称质量数，显然 $A = Z + N$ 。

中子和质子的数目构成了原子核的主要特征，若 X 为元素的符号，原子核表示为 ${}_Z^AX$ 。例如，氢原子核为 ${}_1^1\text{H}$ ，原子核只有一个质子，质量为 1.6747×10^{-24} 克。但是重氢或氘的原子核由一个质子和一个中子组成，质量为 3.3439×10^{-24} 克。还有一种氢原子核，由一个质子和两个中子组成，质量为 4.99×10^{-24} 克，称为超重氢或叫氚。三者只是重量不同，而核电荷都是1个正电荷，即 $Z = 1$ ；在原子周期表中占有同一个位置，俗称同位素。氢和氘是稳定的，而氚是不稳定的，它会自发地放出 β 粒子而蜕变为氦。这种自发蜕变放出 β 粒子或 α 粒子或 γ 射线的同位素，称为放射性同位素。这种自发的由一种“核”蜕变为另一种“核”的现象，叫作核衰变（或核蜕变）。

与X射线荧光有关的核衰变^[1]，主要有以下几种：

1. α 衰变

由一个不稳定的原子核自然地放出 α 粒子，衰变成另一个原子核，称为 α 衰变。

α 衰变的放射性同位素在衰变之后，它的原子质量数降低4个单位（即两个质子和两

个中子的质量数之和), 原子序数降低 2 个单位, 产生了新的同位素。

α 衰变时从原子核放出的 α 粒子实际上就是氦原子核 (${}^4_2\text{He}$), 由两个中子和两个质子组成, 带两个正电荷。

有的同位素 α 衰变时放出单一能量的 α 粒子, 有的同位素放出几种不同能量的 α 粒子。当 α 衰变不只放出一种能量的 α 射线时, 还伴随有 γ 射线放出。例如, ${}^{238}\text{Pu}$ 同位素 α 衰变时, 伴随放出的 γ 射线为 45.0 keV; ${}^{241}\text{Am}$ 同位素 α 衰变时, 伴随放出的 γ 射线主要有 59.6 keV、33.2 keV、26.35 keV。

2. β 衰变

由一个不稳定的原子核自发地放出 β 粒子, 衰变成另一个原子核, 称为 β 衰变。

β 粒子实际上就是电子, 它的静止质量等于电子质量, 并带有一个负电荷。每个同位素放出的 β 粒子能量分布是一定的。例如, 氚经过 β 衰变变为氦同位素时, 放出最大能量为 18.6 keV 的 β 粒子。 β 衰变前后母体与子体的质量数相同, 但子体原子序数提高一位。例如, $Z=55$ 的 ${}^{137}\text{Cs}$, 经 β 衰变后, 变为 $Z=56$ 的 ${}^{137}\text{Ba}$ 。

3. β^+ 衰变

β^+ 衰变是放射性同位素原子核里一个质子转变为一个中子, 放出 β^+ 粒子。它的质量和电子相等, 是一个正电子。例如, $Z=27$ 的 ${}^{56}\text{Co}$ 经 β^+ 衰变转变为 $Z=26$ 的 ${}^{56}\text{Fe}$ 。

4. 电子俘获

原子核俘获了一个轨道电子, 使核里的质子转变成中子和放出中微子, 产生的子体原子核的原子序数减少一位, 质量数不变, 称为电子俘获。因为 K 层电子靠近核, K 层电子被俘获的几率比其它壳层都大 (自 L 层吸收电子的可能性比 K 层小 100 倍左右), 这种衰变叫作 K 电子俘获 (简称 K 俘获)。

例如, ${}^{55}\text{Fe}$ 以 100% 的几率俘获 K 层电子, 衰变为 ${}^{55}\text{Mn}$ 的稳定态。这时由于 Mn 的 K 层有一个电子空位, 当被外层电子充填时, 发射 $\text{Mn}K_{\alpha,\beta}$ X 射线 ($K_{\alpha}=5.898$ keV, $K_{\beta}=6.5$ keV)。又如, ${}^{109}\text{Cd}$ 经过 K 电子俘获, 衰变为 ${}^{109}\text{Ag}$ 的稳定态, 并放出 $\text{Ag}K_{\alpha,\beta}$ X 射线 ($K_{\alpha}=22.1$ keV, $K_{\beta}=25.0$ keV)。

放射性同位素的核衰变绝大多数都不是单一地放出一种射线, 通常都是在放出 α 或 β 粒子或者在上述其它形式衰变过程中同时放出 γ 射线。例如, ${}^{109}\text{Cd}$ 发生 K 电子俘获, 同时还放出一组能量为 88.0 keV 的 γ 射线; ${}^{137}\text{Cs}$ 在 β 衰变时放出一组能量为 661 keV 的 γ 射线。

原子核放出的 α 、 β 、 γ 射线与核外绕行的轨道电子相互作用, 将全部或一部分能量转移给电子, 使电子逐出原子之外, 使壳层 (主要是 K 层) 出现电子空位, 邻近壳层的电子给予补充, 从而发射特征 X 射线。这个作用完全发生在原子自身的内部, 称为内转换。发射出的电子叫内转换电子。

1.1.2 衰变规律

放射性同位素在衰变前的原子核, 称为母核; 衰变后的原子核, 称为子核。母核衰变, 使它的数量随时间而减少。实验证明, 这个数量是按指数规律而随时间减少的。

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

式中 N_0 ——衰变开始时母核的数量;

N ——衰变 t 时间后未衰变的母核数量；

λ ——比例系数，称为衰变常数，表示单位时间内每一个核衰变的几率。

每一种放射性同位素都有固定的衰变常数。 λ 数值大的放射性同位素衰变得快； λ 数值小的衰变得慢，所以 λ 是用来衡量放射性同位素寿命长短的一个参数。更直观地说，常用表示放射性同位素衰变快慢的参数叫半衰期，用符号 T 表示。它的物理意义是：某放射性同位素的原子核，因衰变而减少到原来数量的一半所需要的时间。当 $t=T$ 时， $N=\frac{1}{2}N_0$ ；

$N=\frac{1}{2}N_0=N_0e^{-\lambda T}$ ； $T=\ln 2/\lambda=0.693/\lambda$ 。半衰期为 T 的放射性同位素，若 λ 小，说明衰变慢；或者说 T 大，寿命长。反之，半衰期 T 数值小的放射性同位素， λ 大，说明衰变快，寿命短。

1.1.3 放射性单位

放射性同位素（或 X 射线管）放出的射线强度的度量单位，从物理意义上讲，可以用通量来表示，即每平方厘米面积上每秒通过的光子数的多少，以光子数/厘米²·秒的形式表示。

国际辐射单位与测量委员会规定的衡量放射性强度的单位，称为居里。它的定义是放射性元素每秒衰变 3.7×10^{10} 次数的放射性总量，叫一个居里，用符号 Ci 表示；1 个毫居里（mCi）等于 10^{-3} 居里；一个微居里（ μ Ci）等于 10^{-6} 居里。

规定放射性剂量单位为伦琴。它的定义为，在 0.001293 克空气（0℃，760 毫米水银柱高）中由射线电离生成正负电荷各为一个静电单位的 X 射线（或 γ 射线）的照射空气的剂量，称为一个伦琴。

单位时间内照射的剂量，称为剂量率。常用单位有 $\frac{\text{伦琴}}{\text{小时}}$ 或 $\frac{\text{微伦琴}}{\text{小时}}$ ，又称 $1 \frac{\text{微伦琴}}{\text{小时}} = 1$ 伽马。

1.1.4 射线的防护

携带式 X 射线荧光仪和 X 射线荧光测井仪一般使用放射性同位素作为激发源，必须注意防护。只要认真对待，使用正确的工作方法，就可以减小甚至完全避免射线对人体的影响。

射线对生物机体的危害程度与物体吸收的辐射能量有关。物体单位质量吸收的能量称为吸收剂量。吸收剂量的专用单位为拉德 (rad)。一拉德 = 10^{-2} 焦耳/千克 = 100 尔格/克。

在相同的吸收剂量下，由于射线性质与照射条件不同，对生物机体的危害程度也不同。例如，在吸收剂量相同时， α 射线的危害性比 γ 射线大十倍。为此在防护中通常采用剂量当量来统一衡量各种射线的危害性。剂量当量 H 的专用单位为雷姆 (rem)，计算公式为 $H=D \cdot Q \cdot N$ 。式中 D 为吸收剂量，单位是拉德； Q 为性质系数，对 β 或 γ 射线内外照射而言， $Q=1$ ，对 α 射线内照射而言， $Q=10$ ； N 为其它修正系数，对外照射而言， $N=1$ 。

接受的剂量当量越大，对人体的损害也就越显著。为了确保安全，制定了一个可以容许人体接受的最大剂量，即最大容许剂量。它是根据射线对人体伤害的资料和对动物进行实验的结果确定的。从现代科学知识来看，这样的剂量在人的一生中不会引起人体的显著损伤。根据目前规定，最大容许剂量有年累积剂量和周累积剂量，如 5 雷姆/年，0.3 雷姆/

周等。这些规定不是一成不变的，随着科学技术的发展和对辐射防护知识的不断深化，可以规定新的更合理的标准。

放射性同位素放出的射线，主要是 α 射线、 β 射线、 γ 射线和X射线。这些射线与人体组织相互作用时，会使细胞中分子电离和激发，造成细胞的病变和死亡。 α 射线和 β 射线在其路程上电离密度大，即在很短距离上形成大量的离子，对细胞组织的伤害严重，但其穿透作用很小。几厘米的空气，一层纸就可以吸收 α 射线，穿的衣裳就可以吸收 β 射线，避免它们对身体的影响。 γ 射线的穿透能力很强，不易防护，但在单位距离上形成的离子很少。只要不是十分强的 γ 射线源，对人体的伤害是很小的。X射线的性质和 γ 射线相似，只是其能量较小，较易防护，一般只需要7毫米厚的玻璃，5毫米厚的铁，2毫米厚的铅，就能完全吸收。在X射线荧光测量中，常用的放射性同位素是软 γ 射线和X射线。

人体受射线照射后，大部分机体组织都能够自行恢复，就像我们平时受伤以后会自行愈合一样。有些组织如脑细胞、肾脏、眼睛的水晶体、女性生殖腺等不容易恢复，对这些部分要注意防护。特别是眼睛的水晶体直接暴露并常常接近放射源，要十分注意防护。

携带式X射线荧光仪和X射线荧光测井仪使用的同位素放射源，都是用铍片或不锈钢片密封的，放射性物质不会散落在仪器上。由于采取了必要的防护措施，X射线荧光仪在探测器窗口的背面和加屏蔽的窗口正面都能保证安全。

需要提醒使用者注意的是：

1. 注意保护放射源密封窗不致破坏，以免放射性物质散落。特别 是用铍片（一般厚为200微米左右）封装时，由于铍片性脆，容易破损，要十分注意。

2. 在封装破损或使用其它未加密封的放射性源时，要注意防止放射性物质通过饮食、伤口等渠道进入体内。因为放射性物质进入体内后，一部分会被人体吸收，长期留在体内，这时 α 射线、 β 射线会直接与人体组织发生作用而造成严重的伤害。

3. 在安装、检查放射源时，应事先作好各种准备，如夹放射源工具等，以缩短操作时间，也就是缩短射线直接照射的时间。

4. 在安装、检查放射源时，应使用较长的镊子操作，避免用手直接接触放射源的放射性部分。

5. 在可能的情况下，配备和坚持使用防护设备。例如，在铅玻璃板（或较厚的普通玻璃板）的后面操作放射源，使用放射源时戴上铅玻璃眼镜，以保护眼睛的水晶体不受照射。

1.2 X射线激发源^[2]

放射性同位素X射线荧光测量中所需的放射源主要是X射线源或 γ 射线源，还有 β 射线转换为X射线的韧致辐射源，以及小功率的X射线管。

1.2.1 放射性同位素激发源

X射线荧光仪使用的激发源是放射性同位素。它的突出优点是：体积小，重量轻，不像X射线管那样消耗较大的电能，而且成本低。可以使用放射性同位素直接放出的 α 射线、 β 射线、 γ 射线或X射线来激发被测对象，也可以将初级射线照射靶物质而产生次级光子的组合源。

选择同位素激发源时必须考虑以下几点：

1. 激发源放出的 γ 射线或X射线的能量，必须大于待测元素的K层或L层的吸收限。能激发K层最好，因为它的荧光产额高，不得已才利用L层的吸收限。理想的条件是，X射线能量稍大于吸收限，激发截面最高，相应荧光产额也高。单一能量的X射线源更为有利。

2. 半衰期需足够长，价格便宜，也不必因半衰期短而进行校正。

3. 应有适当的几何形状（如圆片状或环状），以便提高激发效率。

放射性同位素激发源在能量色散X射线荧光技术中已普遍采用。现分述如下：

1. 放射性同位素 γ 源或X射线源

在能量色散的X射线荧光测量中常用的放射性同位素源，一般都选用半衰期比较长的源，如 ^{238}Pu 源、 ^{241}Am 源。最理想的是选用单一能量的激发源，或者带有发射强度很弱的高能 γ 射线的激发源。激发源的形状分圆片状（图1.1）和环状（图1.2）。

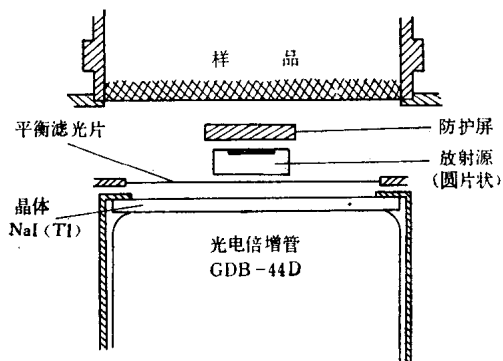


图 1.1 圆片状源

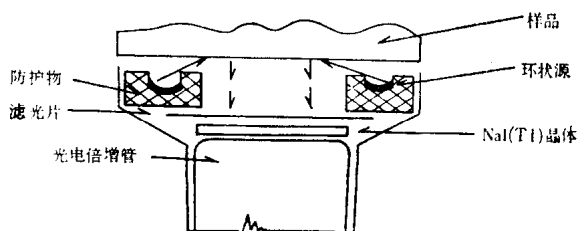


图 1.2 环状源

2. β 射线源和韧致辐射源

β 射线与靶物质相互作用产生电离激发、弹性散射，以及次生辐射，如韧致辐射等，逐渐损失能量直至 β 射线完全被吸收。由于 β 射线和原子内壳层束缚电子之间的静电作用，使束缚电子产生加速运动，获得足够能量而抛出原子之外，内壳层出现电子空位。 β 射线的这种电离作用，由于它的运动速度大，与相同能量的 α 粒子相比，电离作用的几率要小得多，因此 β 射线直接用作X射线激发源时激发效率比较低，需要很高的放射源强度。 β 射线激发源的另一缺点是样品中产生的韧致辐射增大了本底计数，降低了X射线荧光测量的灵敏度。

电子进入靶物质后，运动到原子核附近，受到核库伦场作用，产生减速度。根据经典力学原理，电子逐渐损失的能量将转化为连续能量谱的电磁辐射。这种电磁辐射称为韧致辐射。

所谓韧致辐射源，就是用放出 β 射线的放射性同位素与相应的靶物质组成的放射源。由 β 射线与靶物质相互作用，既产生韧致辐射，也同时产生靶物质的特征X射线。它可以作为X射线荧光分析的激发源，如 $^3\text{H}/\text{Ti}$ 源； $^3\text{H}/\text{Zr}$ 源。

3. α 射线源和 α 激发的X射线源

利用放射性同位素放出的 α 粒子激发物质而产生的特征X射线，可构成X射线源。常

见的 α 射线源有 ^{210}Po 源、 ^{238}Pu 源等。

α 射线和低能X射线在通道上的空气吸收不能忽视，故适于在真空室内照射样品。

4. γ 射线激发的X射线组合源

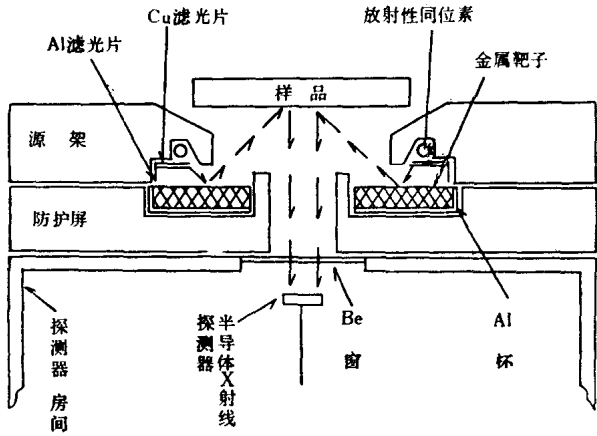


图 1.3 γ 射线组合源

为了取得较高的激发效率，要求激发源的光子能量接近于待测元素的吸收限，因此希望激发源的光子能量有比较多的选择性，为此制造组合放射源。使用放射性同位素放出的 γ 射线，照射到一个选择好的纯元素的靶物质上，而以该靶物质发射出的特征X射线源作为激发源。这种把放射性同位素和靶物质构成几何形状，组合产生的X射线源就叫组合源，如 $^{241}\text{Am}/\text{Ag}$ 组合源。组合源的形状见图1.3。

常用的X射线荧光分析用的放射性同位素源列于表1.1。

表 1.1 X射线谱分析常用的放射性同位素源

核素	半衰期	蜕变类型	光子能量 (keV)	发子产额 (光子/蜕变)	参考强度 (mCi)	激发元素范围	
						K	L
^{109}Cd	453天	E	22.1; 24.95; $\text{AgK}\alpha_1\beta$ 2.98; 3.35; $\text{AgL}\alpha_1\beta$ 88.0	1.01 0.016 0.04	1—5	(22)26—44 14—17 (40)50—81	(57)70—92
^{238}Pu	86年	α	13.5 $\text{UL}\alpha$ 16.43 $\text{UL}\beta_2$ 17.22 $\text{UL}\beta_1$ 20.16 $\text{UL}\gamma_1$ 45.0 γ	0.130	10—30	24—35	56—92
^{241}Am	458年	α	11.89 NpL 13.76 $\text{NpL}\alpha_2$ 13.95 $\text{NpL}\alpha_1$ 16.84 $\text{NpL}\beta_2$ 17.74 $\text{NpL}\beta_1$ 20.77 $\text{NpL}\gamma_1$ 26.35 γ 33.2 γ 59.56 γ	0.008 0.135 0.184 0.05 0.025 0.359	2—30	24—38 (35)42—69	56—92
^{65}Fe	2.7年	E	5.898 $\text{MnK}\alpha$ 6.5 $\text{MnK}\beta$	0.25	5—20	(13)17—23	40—58
^{125}I	60	E	27.4 $\text{TeK}\alpha$ 30.99 $\text{TeK}\beta$ 35.4 γ	1.41 0.07	2—5	(26)30—49	74—92

续表

核素	半衰期	蜕变类型	光子能量 (keV)	光子产额 (光子/蜕变)	参考强度 (mCi)	激发元素范围	
						K	L
⁵⁷ Co	270天	E	6.4 FeK α 7.1 FeK β 14.4 γ 121.9 γ 136.3 γ	0.48 0.08 0.85 0.11	2—5	20—24 } (55) 67—92	
¹⁵³ Gd	242天	E	41.3 EuK α 47.03 EuK β 69.7 γ 97.4 γ 103.2 γ	1.1 0.026 0.3 0.2	1—5	(31) 40—58 } (50) 64—87	
²¹⁰ Pb	22年	β	10.8 BiL α 13.01 BiL β 15.24 BiL γ 46.5 γ	0.24 0.04	10—20	(22) 24—31	(50) 55—79
¹⁷⁰ Tm	127天	E, β	52.1 YbK α 59.3 YbK β_1 84.3 γ	0.045 0.033	50—500	} (40) 50—80	
²⁰⁴ Tl	4.1年	β , E	70.82 HgK α_1 68.89 HgK α_2 80.26 HgK β_1	0.015			
⁵⁹ Ni	8×10^4 年	E	6.93 CoK α 7.65 CoK β	0.99		(17) 20—25	(41) 51—62
⁴¹ Ca	8×10^4 年	E	3.31 KK α 3.59 KK α	0.129		10—17	
⁴⁸ V	330天	E	4.51 TiK α 4.93 TiK β	0.2		12—21	
⁴⁴ Ti	48年	E	4.09 ScK α 4.46 ScK β 67.8 γ 78.4 γ	0.174		12—20	

注：在蜕变类型栏中，E—电子俘获衰变； α — α 衰变； β — β 衰变。

现将放射性同位素的激发源的谱线表示在图1·4中。

各种放射性同位素所放出的射线每组能量和能够激发的元素范围在表1.1中已有注明。

“上限元素”是取它的K或L层临界吸收能略小于激发源放出的射线能量，再高一个原子序数的元素（指K或L层）已不能被激发。“下限元素”从原理上讲是可以任意的，只是原子序数愈高，射线能量距吸收限能量愈远，激发效率越低。一般取某能量X射线的激发效率降低到“上限元素”激发效率的五分之一时作为被激发的“下限元素”。原子序数再往下作为低激发效率使用。表1.1中激发元素范围一栏中带括号的原子序数就是作低激发效率使用。

表 1.2 初 致 辐 射 源

同位素源	发射光子能量 (keV)	蜕变 类型	半衰期	光子产额 (光子/蜕变)	典型强度 Ci	激发源范围	
						K	L
$^3\text{H}/\text{Ti}$	TiK α 射线4.5; 4.9最大到18.6	β	12.3年	$10^{-4}-10^{-5}$	0.5—10	13—21	37—52
$^3\text{H}/\text{Zr}$	ZrL α 射线2.05; 2.13最大到18.6	β	12.3年	$10^{-4}-10^{-5}$	0.5—10	12—30	31—71
$^{147}\text{Pm}/\text{Al}$	10—100最大到225	β	2.62年	2×10^{-3}	0.5—1	25—56	
$^{147}\text{Pm}/\text{Si}$	同上	β	2.62年	2×10^{-3}	0.5—1		

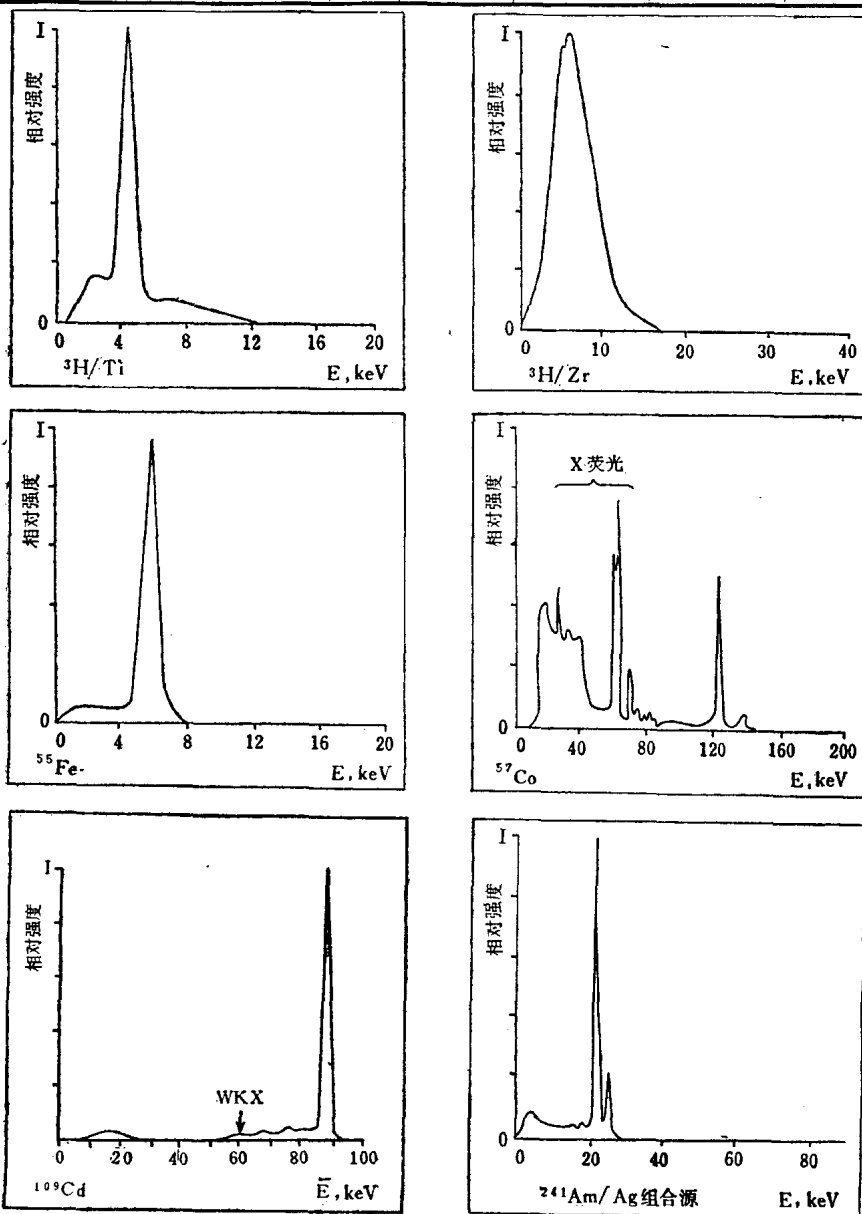
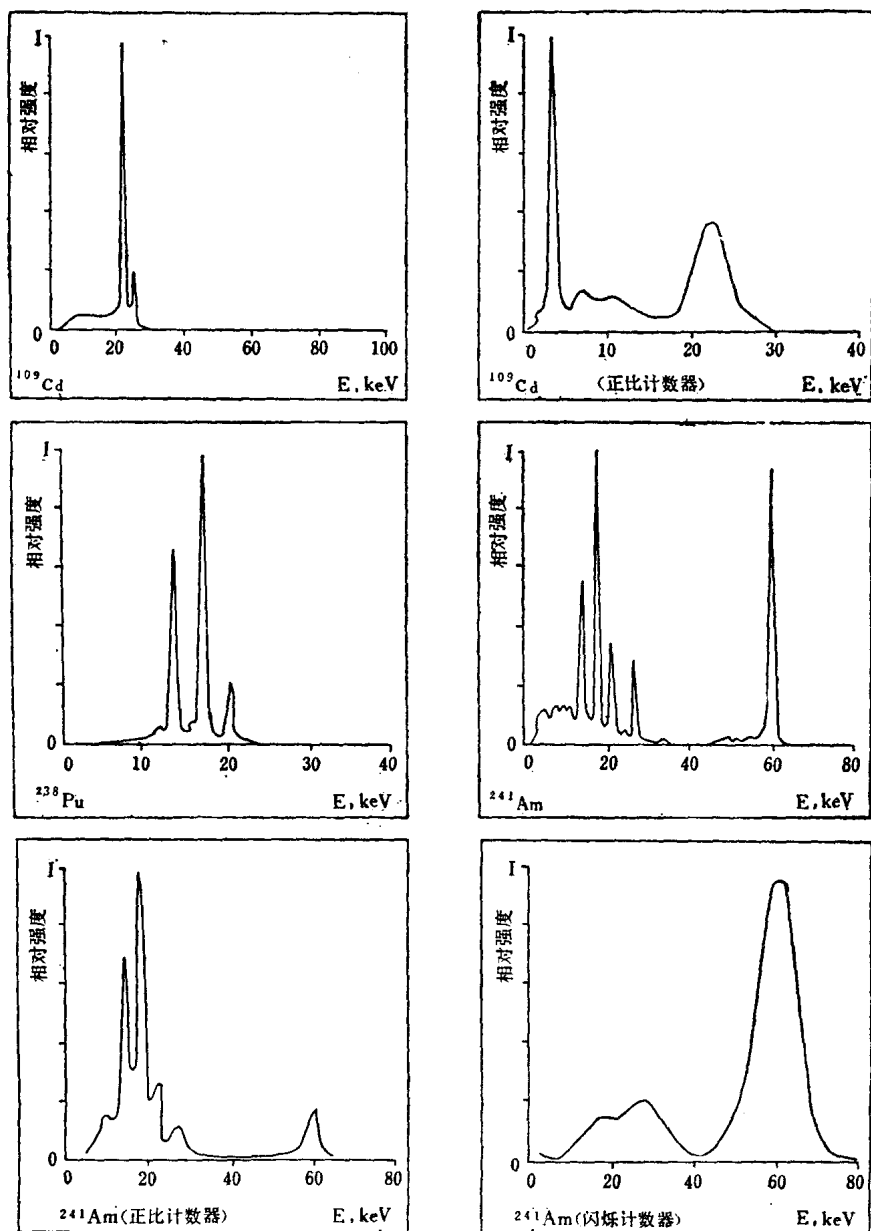


图 1.4 几种放射性同位素源的X射线谱



续图 1.4 几种放射性同位素源的X射线谱

为了进一步说明放射性同位素源的适用范围和激发效率,以放射性同位素 ^{55}Fe 、 ^{109}Cd 、 ^{241}Am 和 ^{238}Pu 源用Si(Li)半导体探测器测量为例,标绘了被照射元素的不同原子序数和相对X射线源强度的关系(图1.5和图1.6)。图中表明,对各激发元素的吸收限,离放射源放出射线能量越远,荧光效率减弱得越迅速。这个现象与理论分析结论一致。

1.2.2 场致发射X射线管

场致发射X射线管在国际上已用来作携带式能量色散X射线荧光仪的理想激发源。它的构造主要是一个半球状阴极靶,一个普通缝纫针做阳极,针尖半径小于0.0005英寸;另一端是铍窗(铍厚为0.025~0.125毫米)和一个玻璃圆筒外壳。管子全长5—6厘米,直径