

港口环境放射性污染 监测与防治

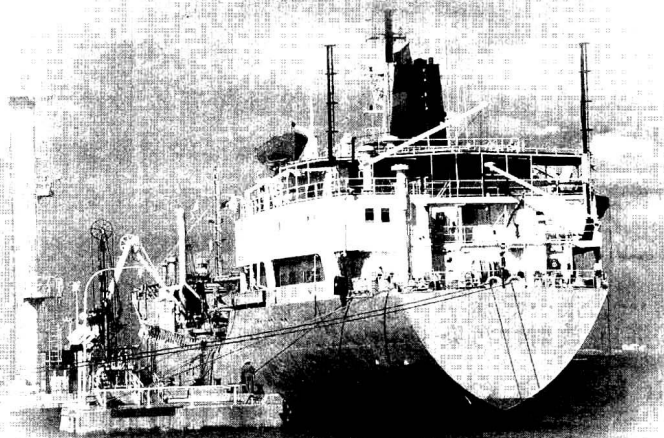
蒋江波 张立柱 唐谋生 编著



化学工业出版社

港口环境放射性污染 监测与防治

蒋江波 张立柱 唐谋生 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书详细分析了放射性污染来源及其对环境和人类造成的危害，重点介绍了港口环境放射性污染的监测技术与方法、放射性污染的洗消技术，具有较强的知识性、实用性和可操作性。

本书是对目前环境放射性污染监测与防治方面图书的一个重要补充，可供核工业部门、环境管理部门、港口管理部门及广大环境工作者和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

港口环境放射性污染监测与防治/蒋江波, 张立柱, 唐谋生编著. —北京: 化学工业出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-122-04720-5

I. 港… II. ①蒋…②张…③唐… III. ①港口-放射性污染-环境监测②港口-放射性污染-防治 IV. X591

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 010902 号

责任编辑: 徐 娟
责任校对: 周梦华

文字编辑: 丁建华 孙思晨
装帧设计: 关 飞

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: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 346 千字 2009 年 6 月北京第 1 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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

中国是一个陆地大国，也是一个濒海大国。浩瀚的海洋是人类的天然宝库，蕴藏着极其丰富的矿物资源和生物资源，是人类生存与发展的重要空间。开发利用海洋资源是解决人类当前面临的人口、资源、环境三大问题的主要途径。然而随着全球人口剧增，工业、农业、交通运输业、核能和海军核动力舰船的迅速发展，向海洋排放的污染物也日益增加，海洋和港口污染问题越来越受到国际社会的关注。港口环境放射性污染除了海洋自身原因以外，主要是人类活动造成的。特别是近代核武器的试验，核动力舰船的增加和核电站不断扩建，使放射性废物的排放增加；核能的其他利用包括太空航器中的辅助动力反应堆、同位素能源发生器，核爆炸掘港口、运河和创造地下水源，以及核事故和报废核装备的处理等会产生一些放射性废物，都有可能成为海洋与港口的污染源。

目前，沿海港口放射性污染还未得到人们的重视，无论是防止放射性污染物排放，还是其监测、治理以及防治等，研究得都比较少，其资料和信息是零乱的，欠缺系统的全面的整合资料。从目前出版的环境污染与治理的图书来看，很少涉及沿海放射性污染来源、监测、防治与洗消，一般为工业污染来源、监测、治理，有些书也提到放射性污染，但内容极为简要。本书全面论述了放射性污染来源主要是天然放射性来源、核武器爆炸产生的放射性污染、核潜艇内的辐射源、核动力舰艇与核电站放射性废物的排放、核事故造成的核污染及其他来源等，并指出这些放射性污染来源大部分集中在沿海港口。因此，港口环境放射性污染监测与防治的重点是对沿海港口环境放射性污染的监测方法、防治与洗消技术。该书最突出的就是集沿海港口放射性污染来源及其监测、防治与洗消技术于一体，力求突出科学性、知识性、实用性和可操作性。本书对港口环境放射性污染的监测、防治具有重要指导意义和参考价值，对宣传爱护海洋、防止港口污染的基本知识以及珍惜港口资源具有重要社会意义，也为广大环境工作者和有关人员提供了了解和研究环境放射性污染来源及其监测、防治与洗消技术的重要参考资料。

本书共分七章，由蒋江波编著第二、五章；张立柱编著第三、四章；唐谋生编著第一、六、七章。编著过程得到了中国人民解放军海军某基地军港管理处和中国人民解放军湛江地区环境监测站全体同志的大力支持，在此表示衷心的感谢！

尽管本书的编著筹备时间较长，搜集了国内外有关海洋和港口环境污染的历史和现实资料，放射性污染的监测、处理、防治和洗消方法，以及编著者在实际工作中的经验材料，但由于编著者水平有限，在资料选择、方法考证、文学水平、内容编排等方面难免有不妥之处，望读者予以指正。

编著者

2009年1月

作者简介

蒋江波，男，浙江温岭人，中国人民解放军海军湛江保障基地军港管理处处长，海军中校。毕业于武汉海军工程大学天津校区军港战勤系，后攻读中国人民解放军后勤工程学院建筑与土木工程专业，获工程硕士学位，在读博士。历任军港营房助理员、工程师、营房科科长、军港处副处长、处长等职，具有丰富的基层、机关工作经验。先后参加多项海军、舰队、基地组织的港营区规划、环境监测与治理等科研工作；组织和参与了《质量管理手册》、《程序文件》的编写和审核；组织和参与了由全军环境质量监督总站及广东省质量技术监督局组织的军港监督环境监测站“三合一”认证考核和复评工作，并顺利通过了评审。在军内外刊物发表学术论文十余篇，因表现突出，四次荣立个人三等功。

张立柱，男，天津宁河人，中国人民解放军海军湛江地区环境监测站站长、工程师，海军少校。毕业于济南大学应用化学系，后攻读河海大学交通学院港口与航道工程专业，获工程硕士学位。参与《质量管理手册》、《程序文件》的编写；参与了“治理油污水的一种新型复合絮凝剂的研制”、“沿海港口放射性本底调查的探讨”等课题研究工作，其中“治理油污水的一种新型复合絮凝剂的研制”被评为中国环境科学学会2008年学术年会优秀论文；多次参加地方和军队兴建项目的环境影响评价工作，如湛江东海岛钢铁厂新建、南三大桥建设等项目，受到了有关单位和专家的高度评价。在军内外刊物发表学术论文8篇，2008年入选湛江市环境影响评价专家库。

唐谋生，男，湖南祁阳县人，中国人民解放军海军南海舰队防化技术室高级工程师、专业技术大校。毕业于中国人民解放军防化兵工程学院。现任中国人民解放军湛江地区环境监测站技术顾问和技术负责人，从事军港环境监测和治理研究工作。获全军科技成果进步奖16项，其中二等奖2项，三等奖10项；发表学术论文70余篇，其中国外两篇；主编或参与编写《海军防化实用分析检验手册》、《化学和军事》、《核生化武器的危害与防护》、《化学灾害与救援》、《舰船核化生防御技术》、《核安全知识读本》、《港口环境污染治理技术》、《核化生灾害与救援》等书。1985年和1990年分别被评为南海舰队先进科技干部和海军先进科技干部，荣立二等功一次，享受政府特殊津贴。

目 录

第一章 核物理基本概念与物质的放射性	1
第一节 原子、原子核与核素的基本概念	1
一、原子的基本概念	1
二、原子核的基本概念	1
三、核素的基本概念	2
第二节 核辐射与物质的放射性	3
一、常用的核辐射类型	3
二、物质放射性的基本概念	3
三、放射性的性质	5
四、放射性污染对人体的危害	9
第三节 常用辐射量与单位	14
一、吸收剂量和吸收剂量率	14
二、照射量及其单位	15
三、照射量和吸收剂量的关系	16
四、放射性活度 A 与照射率 $\dot{X}$ 的关系	18
五、剂量当量及其单位	20
第二章 海洋与港口环境放射性污染源及其危害	21
第一节 港口环境特点、组成及其污染源	21
一、港口环境特点	22
二、港口功能区	23
三、港口环境污染来源	26
第二节 港口环境天然放射性来源	29
一、三大天然放射系	29
二、宇宙射线与大气元素或其他物质作用的产物	31
三、单独存在于海洋中并且有稳定同位素的长寿命核素	31
第三节 海洋与港口环境人工放射性来源	35
一、核武器爆炸产生的放射性污染	35
二、核动力舰艇放射性废物的排放	38
三、核潜艇艇内的辐射源	40
四、核电站放射性废物的排放	42
五、核事故造成的核污染	53
六、其他来源	57
第四节 放射性废物排放的污染和危害	58
一、放射性对空气、水源、食物、装备和人员的污染	58

二、放射性污染对海洋与港口环境的危害	60
三、放射性废物进入人体的各种途径及其危害	63
第三章 港口环境放射性污染的监测技术与方法	65
第一节 个人辐射剂量监测与人员剂量当量限值	65
一、个人外照射剂量监测	65
二、个人内照射剂量监测	66
三、核辐射剂量限值规定	66
四、核战争或重大核事故的辐射剂量限值规定	68
第二节 放射性本底调查	70
一、沿海港口环境放射性本底调查的必要性	70
二、沿海港口环境放射性本底调查的范围	72
三、沿海港口环境放射性本底调查的内容	72
第三节 放射性测量样品源的处理和制备	75
一、样品的处理	75
二、总 α 、总 β 放射性测量的制样方法	82
三、放化分析测量样品的制备	85
四、 γ 能谱分析样品的制备	88
第四节 放射性样品总 α、总 β 的测量	91
一、低本底测量装置	91
二、放射性气溶胶样品中总 α 和总 β 活度测量	92
三、样品的总 α 放射性测量	95
四、样品中总 β 放射性测量	98
第五节 部分核素的放化分析	100
一、 ^{90}Sr 的放化分析	100
二、 ^{131}I 的放化分析	107
三、 ^{137}Cs 的放化分析	110
四、水中 ^{60}Co 的放化分析	113
五、 ^{95}Zr 的放化分析	115
六、 ^{103}Ru 和 ^{106}Ru 的放化分析	118
第六节 γ 能谱测量技术	121
一、放射性核素的检测	121
二、测量方法和系统选择的考虑	122
三、 γ 能谱分析系统	124
四、 γ 能谱分析样品的采集和制备	126
五、测量和计算	130
第四章 港口环境放射性污染的防护技术与方法	133
第一节 放射性污染的可防性及其防护的原则	133
一、放射性污染的可防性	133
二、辐射防护的原则	133
第二节 辐射防护的基本方法	134
一、外照射防护的基本方法	134

二、内照射防护的基本方法	138
第三节 同位素辐射源及其防护措施	140
一、密封源与开放源	140
二、辐射源的防护	143
三、放射性废物的处置	144
第五章 放射性废物的处理	145
第一节 放射性废物分类及其处理原则	145
一、放射性废物的产生	145
二、放射性废物分类法	145
三、放射性废物处理目标与原则	147
第二节 低、中放废物的处理与处置	149
一、废气的净化处理与排放监控	149
二、废液的净化处理	150
三、废物的固化（固定）处理和固化体性能要求	152
四、废物的减容处理	155
五、废物的包装与贮存	158
第三节 高放废物的处理与处置	159
一、高放废液的贮存	159
二、高放废液的固化	160
三、高放废物的分离-嬗变	161
四、高放废物的地质处置	161
第四节 核设施退役的管理	163
一、退役的废物管理	163
二、退役的安全管理	164
三、核设施退役技术处理	166
第六章 放射性污染的洗消技术	169
第一节 放射性污染消除剂	169
一、洗涤剂	169
二、络合剂	171
三、溶剂	172
第二节 港口放射性污染的消除方法	173
一、自然衰减消除法	173
二、封闭法	173
三、排除法	174
第三节 对人员、食物、水、大型设备的洗消（消除）	176
一、对人员的洗消	176
二、对食物的消除	178
三、对饮用水的消除	179
四、大型设备的消除	180
五、对港口码头、舰船甲板、舱室的消除	180

第七章 放射性污染辐射损伤与救治 182

第一节 放射性污染外照射损伤与救治 182

一、 γ 射线外照射的损伤和救治 182

二、 β 射线外照射对皮肤的损伤和救治 184

第二节 放射性污染内照射损伤与救治 187

一、放射性污染物进入体内的途径与损伤 187

二、放射性污染内照射的救治 188

第三节 急性放射病综述 190

一、急性放射病病因和发病学特点 190

二、急性放射病的分型和临床表现 191

三、急性放射病的治疗 197

附表 204

表 1 计量单位的名称和符号对照 204

表 2 SI 词头 204

表 3 常用试剂的饱和溶液（20℃） 204

表 4 市售酸碱试剂的浓度及相对密度 205

参考文献 206

第一章 核物理基本概念与物质的放射性

要讨论港口环境放射性污染源及其监测与防治，就要牵涉到物质放射性的基本知识、辐射剂量单位、辐射生物效应及辐射防护、洗消与救治等有关内容，这些内容来源于核物理基本概念。所以，本章简要地讨论原子、原子核、核素、物质的放射性及其对人体的危害等，同时介绍常用辐射量与单位。

第一节 原子、原子核与核素的基本概念

一、原子的基本概念

自然界中的物质通常是由分子组成的，分子是由原子组成的，而原子又是由原子核和若干核外电子组成的（见图 1-1）。原子核位于原子的中心。电子分布在原子核的周围，并以极高的速度在不同的轨道上绕着原子核旋转，好像很多人造地球卫星在不同的轨道上绕着地球旋转一样。

原子核带正电荷，电子带负电荷。在正常情况下，由于原子核所带的正电荷数与核外电子所带的负电荷数相等，所以整个原子不显电性。原子的半径大约是 10^{-8}cm （一亿分之一厘米），原子核的半径大约只有原子半径的十万分之一，而电子比原子核还小。此外，由于电子的质量只有最轻的原子核（氢原子核）的 $1/1840$ ，所以原子的质量几乎全部集中在原子核上。在所有的原子中，氢原子最轻，而铀原子是自然界存在的原子中最重的原子，其质量也只有 $3.95 \times 10^{-22}\text{g}$ 。

为了应用方便，原子的质量用原子质量单位表示。原子质量单位定义为一个 ^{12}C 中性原子处于基态时静止质量的 $1/12$ ，记作 u 。这种原子质量单位又称碳单位。

$$1u = 1.6605655 \times 10^{-24}\text{g} = 1.6605655 \times 10^{-27}\text{kg}$$

以原子质量单位（ u ）表示的元素的原子质量都接近一个整数，此整数就称为该元素原子的质量数，它表示原子核中的核子数目，通常用 A 表示。

具有相同核电荷数（即相同质子数）的同类原子总称为元素。例如，氧分子中的氧原子，水分子中的氧原子，或者其他物质分子中的氧原子，它们都是属于同一种类的原子，统称氧元素。到目前为止，已经发现的元素包括有固态、液态、气态共 114 种，其中，原子序数大于 92 的元素（称为超铀元素）是由人工制造出来的。各种不同的元素互相化合，就形成了自然界中成千上万种不同性质的物质。

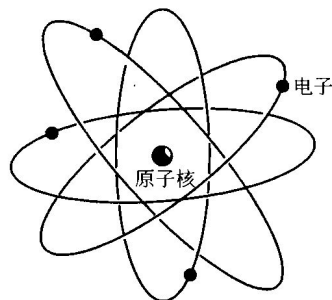


图 1-1 原子结构示意图

二、原子核的基本概念

原子核是原子中的带正电荷的核心，其大小约是 10^{-12}cm 的数量级，其体积仅为原子

的万分之一，但质量却占原子质量的 99.9% 以上，核物质的密度达到 10^{14} g/m^3 的数量级。原子核所带电量等于原子中核外电子的总电量，但符号相反。如果每个原子有 Z 个电子，每个电子电荷 $e=1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，则核外电子的总电量为 Ze ，而原子核带有正电荷为 Ze 。

原子核是由中子和质子组成的，中子和质子统称为核子。质量数为 A ，电荷数为 Z 的原子，其核含有 Z 个质子， $A-Z$ 个中子。质子就是氢原子的核，带一个正电荷（电量与电子电量相等），静止质量 $m_p=1.6726485 \times 10^{-27} \text{ kg}$ （或 1.007276470 u ）；中子是一种不带电的中性粒子，静止质量 $m_n=1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg}$ （或 1.008664904 u ）。

原子核的组成情况，可用原子核符号来表示，其写法如下：



其中， A 为质量数（质子数+中子数）； X 为元素符号； Z 为原子序数（即电子数或核电荷数）。

根据原子核符号，就可以知道该原子核内质子和中子的组成情况。如 ${}^{235}_{92}\text{U}$ ，就表示铀原子核的质量数是 235，核内有 92 个质子和 143 个中子。

三、核素的基本概念

核素这一术语在辐射防护中经常用到，它定义为具有特定原子序数、质量数和核能态的一类原子。例如 ${}^7_3\text{Li}$ 是元素锂的一种核素， $A=7$ ， $Z=3$ ； ${}^{40}_{19}\text{K}$ 是元素钾的一种核素， $A=40$ ， $Z=19$ 。它们又可写作 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{40}\text{K}$ 。现在已经知道大约有 2000 种核素，其中约 300 种是稳定的。

核素根据其质量数、原子序数及所处能态的差异又可分为同位素、同核异能素（同质异能素）、同量异位素（同质异位素）。

（一）同位素

具有相同原子序数，而质量数不同的核素，称为同位素，通常是在其元素符号左上角上注明质量数来表示。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 是氢的三种同位素； ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 是铀的两种同位素。每种元素可能包括几种或几十种同位素。

同位素可分为放射性同位素和稳定同位素两种。有些同位素的原子核是不稳定的，它们会自发衰变，放出射线，并转变成其他元素的原子核。这种不稳定的、具有放射性的同位素称为放射性同位素。与放射性同位素相反，有些同位素并没有放射性，其原子核是稳定的，这种同位素称为稳定同位素。

按原子质量的不同，同位素通常又分为轻同位素和重同位素。凡在元素周期表内占较前位置的元素，它们的原子质量较小（原子序数较小），其同位素叫做轻同位素，例如 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 等。在元素周期表内占较后位置的元素，它们的原子质量较大（原子序数较大），其同位素叫做重同位素，例如 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 等。

（二）同核异能素（同质异能素）

具有相同质量数和原子序数，但处于不同能态的核素，通常在其核素符号质量数后标上 m 或 m_1 、 m_2 …例如 ${}^{68m}_{29}\text{Cu}$ 是 ${}^{68}_{29}\text{Cu}$ 的同核异能素； ${}^{124m}_{51}\text{Sb}$ 是 ${}^{124}_{51}\text{Sb}$ 的同核异能素。

（三）同量异位素（同质异位素）

具有相同质量数，而原子序数不同的核素称为同量异位素。例如 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ 、 ${}^{40}_{19}\text{K}$ 和 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ； ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ 和 ${}^{90}_{39}\text{Y}$ 。

第二节 核辐射与物质的放射性

一、常用的核辐射类型

辐射是以波或粒子的形式向周围空间或物质发射并在其中传播的能量（如声辐射、热辐射、电磁辐射、粒子辐射等）的统称。例如，物体受热向周围介质发射热量叫做热辐射；受激原子退激时发射的紫外线或 X 射线叫做原子辐射；不稳定的原子核发生衰变时发射出的微观粒子叫做原子核，简称核辐射。通常论及的“辐射”概念是狭义的，仅指高能电磁辐射和粒子辐射。这种狭义的“辐射”又称射线。

核辐射粒子就其荷电性质可以分为带电粒子和非带电粒子；就其质量而言，可以分为轻粒子和重粒子，以及处于不同能区的电磁辐射。主要有 α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射和中子辐射等。一些核辐射的静态性质见表 1-1。四种辐射在空气中和在生物组织中的特性见表 1-2。

表 1-1 核辐射的静态性质

类 型	粒子	符号	电荷	静止质量		稳定性
				/u	/(MeV/C ²)	
重带电粒子	质子	P(¹ H)	+1	1.007	938.26	稳定
	氘	d(² H)	+1	2.014	1876.52	稳定
	氚	t(³ H)	+1	3.015	2809.19	不稳定
电子	α 辐射	α (⁴ He)	+2	4.002	3728.81	稳定
	负 β 辐射	β^- (e ⁻)	-1	4.586×10^{-4}	0.511	稳定
	正 β 辐射	β^+ (e ⁺)	+1	4.586×10^{-4}	0.511	稳定
中性粒子	γ 辐射	γ	0	0	0	稳定
	中子	n	0	1.009	939.55	不稳定

表 1-2 四种辐射在空气中和在生物组织中的特性

辐 射	质量(原子质量单位)	电 荷	在空气中的射程	在生物组织中的射程
α	4	+2	0.03m	0.04mm
β	1/1840	-1	3m	5mm
γ	0	0	很大	有可能穿过人体
快中子	1	0	很大	有可能穿过人体
热中子	1	0	很大	0.15m

在核电站，除非出现燃料包壳破裂事故，一般不存在 α 辐射危害，产生的放射性物质中大都具有 β 放射性， γ 辐射是核电站主要的外照射辐射，中子只存在于运行中的反应堆厂房中。核潜艇与核电站相同，主要中子源是反应堆运行时的裂变中子（瞬发中子），一是只限于堆内，二是只限于堆运行时。 γ 辐射一是反应堆放出；二是停堆后裂变产物和活化产物衰变时放出；三是反应堆冷却剂中活化核素；四是反应堆舱室空气中的辐射源；五是一回路系统辐射源。

二、物质放射性的基本概念

（一）放射现象的发现

1896 年，法国物理学家贝可勒尔发现，某些铀盐能放射一种人的眼睛看不见的射线，

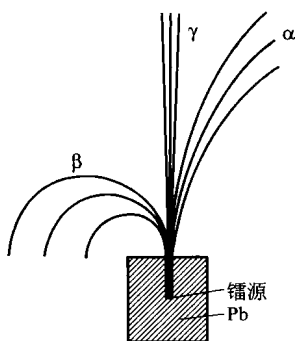


图 1-2 镭源放射的三种射线

它能透过黑纸、玻璃、金属箔等使照相底片感光。1899 年后，吉赛尔、维拉德、卢瑟福和斯特拉特等相继对射线的性质进行了研究。他们发现镭放出三种射线。这三种射线在磁场中表现出不同的偏转行为，如图 1-2 所示。图中磁场系自纸而向外。当射线通过强磁场时，被分为三束，分别称它们为 α 射线、 β 射线、 γ 射线。向左偏转角度较大的称做 β 射线，是高速运动的电子流；向右偏转角度较小的称做 α 射线，是具有很高速度氦原子核 (${}^4_2\text{He}$) 流，即 α 粒子流；不发生偏转的成分称做 γ 射线，是波长比 X 射线还短的电磁波，即光子流。这些射线概括如下性质。

① 能使气体电离。作用以 α 射线最强， β 射线次之， γ 射线最弱。

② 具有较强的穿透本领。穿透本领以 γ 射线为最强， β 射线次之， α 射线最弱。

③ 能使照相底板感光。

④ 能激发荧光，例如在硫化锌 (ZnS) 中掺入极微量的镭可制成夜光物质。

⑤ 能破坏有机体的细胞组织。

⑥ 能使吸收射线的物质发热。

(二) 放射性

某些物质的原子核能够自发地放出看不见、摸不着的射线，物质所具有的这种特性，就叫做放射性。具有放射性的物质叫做放射性物质。

(三) 射线的类型及种类

已经发现的天然存在的和人工生产的核素约有 2000 多个，其中天然存在的核素约有 332 个，其余皆为人工制造的。天然存在的核素可分为两大类：一类是稳定的核素，例如 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ 、 ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ 等，自然存在的稳定核素约有 270 个；另一类是不稳定的核素。不稳定的核素是指其原子核会自发地转变成另一种原子核或另一种状态并伴随一些粒子或碎片的发射，它又称为放射性原子核，例如 ${}^{210}_{80}\text{Po}$ (发射 α 粒子)、 ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ (发射 α 粒子、 β 粒子)、 ${}^{198}_{79}\text{Au}$ (发射 β 粒子)。

1. 天然放射性

地球年龄为 46 亿年 (即 $4.6 \times 10^9 \text{a}$)。那些半衰期比较短的核素，现在已经衰变完了。目前还能存在于地球的放射性核素都能维系在三个处于长期平衡状态的放射系中。这些放射系的第一个核素的半衰期都很长，与地球的年龄相近或更长。如钍系的 ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ，半衰期为 $141 \times 10^{10} \text{a}$ ；铀系的 ${}^{238}_{92}\text{U}$ ，半衰期为 $4.47 \times 10^9 \text{a}$ ；锕-铀系的 ${}^{235}_{92}\text{U}$ ，半衰期为 $7.04 \times 10^8 \text{a}$ 。虽然在三个放射系中的其他核素单独存在时，衰变都较快，但它们维系在长期平衡体系内时，都按第一个核素的半衰期衰变，因此可保存至今。三大天然放射系分别为钍系 ($4n$ 系)、铀系 ($4n+2$ 系) 和锕-铀系 ($4n+3$ 系) (详见第二章第二节)。

2. 人工放射性

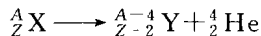
在天然存在的放射系中，缺少了 $4n+1$ 系。后来，由人工方法才发现了这一放射系，以其中半衰期最长的 ${}^{237}_{93}\text{Np}$ (镎) 命名，称为镎系 ($4n+1$ 系)。 ${}^{237}_{93}\text{Np}$ 的半衰期为 $2.14 \times 10^6 \text{a}$ 。

物质在中子 (或其他射线) 的作用下产生的放射性，叫做感生放射性，其中，人工放射性同位素所具有的放射性，又叫做人为放射性。在目前已发现的 1000 多种同位素中，有 100 多种是具有放射性的。

3. 射线的种类

(1) α 射线

通常也称 α 粒子，它是氮的原子核，由两个质子和两个中子组成；核电荷数为 +2，质量数为 4。 α 粒子以符号 ${}^4_2\text{He}$ 表示。天然的 α 粒子来源于较重原子核的自发衰变，叫做 α 衰变。 α 衰变的过程如下：

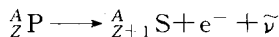


式中， ${}^A_Z\text{X}$ 为母核， ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ 为子核。

(2) β 射线

原子核发出的 β 射线有两类： β^+ 射线和 β^- 射线。 β^- 射线就是通常的电子，带有一个单位的负电荷，以符号 e^- 表示，负电子是稳定的。 β^+ 射线是正电子，带有一个单位的正电荷，以符号 e^+ 表示。两种电子静止质量相同，其质量约为质子质量的 1/1846。

β 粒子来源于原子核的衰变， β 衰变有三种类型： β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获。 β^- 衰变、 β^+ 衰变发射的电子或正电子的能量是连续的，从 0 到极大值 $E_{\beta, \max}$ 都有。以 ${}^{32}\text{P}$ 而言，其 $E_{\beta, \max} = 1.17\text{MeV}$ ， β^- 衰变其半衰期为 14.3 天，衰变过程如下：



式中， ${}^A_Z\text{P}$ 为母核， ${}^A_{Z+1}\text{S}$ 为子核， e^- 为电子， $\bar{\nu}$ 为微电子。

(3) X 射线和 γ 射线

X 射线和 γ 射线都是一定能量范围的电磁辐射，又称光子。光子静止质量为 0，不带任何电荷。单个光子的能量与辐射的频率 ν 成正比，即 $E = h\nu$ ， h 为普朗克常数，它的数值等于 $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。每个光子的能量都是确定的，任何光子在真空中的速度都是相同的，即为光速 C ($3 \times 10^8 \text{m/s}$)。X 射线和 γ 射线的唯一区别是起源不同。从原子来说 X 射线来源于核外电子的跃迁，而 γ 射线来源于核本身高激发态（或基态）的跃迁或粒子的湮灭辐射。例如常用 γ 放射源 ${}^{137}\text{Cs}$ 和 ${}^{60}\text{Co}$ 都是由于母核发生 β^- 衰变后，子核处于较高激发态能级，在向较低能态或基态跃迁时便发出 γ 光子。 ${}^{137}\text{Cs}$ 的 γ 射线能量为 662keV； ${}^{60}\text{Co}$ 放出两个 γ 射线，其能量分别为 1.17MeV 和 1.33MeV。

(4) 中子 (n)

中子是原子核组成成分之一，它不带电荷，质量数为 1，比质子略重。自由中子是不稳定的，它可以自发地发生 β^- 衰变，生成质子、电子和反中微子，其半衰期为 10.6min。

中子在核科学的发展中起过极其重要的作用。由于中子的发现，提出了原子核是由质子和中子组成的假说：中子不带电，当用它轰击原子核时容易进入原子核内部引起核反应。人们用核反应制造出了许多新的核素。随着中子活化分析、中子测水分、中子测井探矿、中子照相、中子辐射育种和中子治癌等技术广泛的应用，对中子的需求越来越多。

中子的产生主要是通过核反应或原子核自发裂变，基本上有三种方法：同位素中子源，加速器中子源和反应堆中子源。

在用中子源产生中子时往往伴有 γ 射线或 X 射线产生，有的可能比较强。因此，在应用和防护上不仅要考虑中子，而且也要考虑 γ 射线或 X 射线。

三、放射性的性质

(一) 放射性衰变

放射性同位素的原子核自发地放出射线而转变成另一种新原子核，或转变成另一种状态的过程，称为放射性衰变。放射性衰变是放射性同位素本身的特性。放射性同位素不同，其衰变的快慢也不相同。任何外界作用，如温度、压力、电场等，都不能改变放射性同位素的

衰变性质及其放射性减弱的速度。

放射性衰变通常分为甲、乙、丙三种形式，或分别称为 α 、 β 、 γ 衰变。 α 衰变是指放出 α 射线的放射性衰变，这种衰变还常有 γ 射线伴随放出。 β 衰变是指放出 β 射线的放射性衰变，这种衰变也常有 γ 射线伴随放出。 γ 衰变是指单独放出 γ 射线的放射性衰变。

放射性同位素的原子核经过一次衰变后，生成的新原子核可能是稳定的，也可能是不稳定的。如果新原子核不稳定，则它将以一定的形式继续进行衰变，直到最后成为稳定的原子核为止。

(二) 放射性衰变规律

放射性核素每一个核的衰变并非同时发生，而是有先有后的，是一个统计过程。实验表明，任何放射性物质在单独存在时都服从指数衰变规律，即

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-1)$$

式中， N 为经过 t 时间放射性物质的量； N_0 为 $t=0$ 时刻的放射性物质的量； λ 为衰变常数。

1. 衰变常数 λ

描述放射性核素特性的一个物理量，它定义为某种放射性核素的单位时间内进行自发衰变的概率，其大小决定了衰变的快慢。衰变常数 λ 可由式(1-1)微分给出：

$$\lambda = -\frac{1}{N} \times \frac{dN}{dt} \quad (1-2)$$

式中， N 为在 t 时刻存在的该核素的数目； $-dN$ 为原子核在 t 到 $t+dt$ 的时间间隔内衰变数； $-dN/N$ 为每个原子核的衰变概率。 λ 是常数，表示每个原子核不论何时衰变，其概率是相等的，衰变是独立的。

2. 半衰期 $T_{1/2}$

描述放射性衰变的快慢除了用衰变常数 λ 以外，通常还用半衰期 $T_{1/2}$ 。它定义为：在单一的放射性过程中，放射性原子核的数目衰减到原来数目的一半（或其放射性活度降至其原有一半）所需的时间。对某一种放射性同位素来说，半衰期是一个常数，它基本上不随外界条件的变化和同位素所处状态的不同而改变。半衰期与衰变常数的关系可以从它的定义和放射性衰变指数衰减规律得到。由式(1-1)，当 $t = T_{1/2}$ 时，放射性原子核数目为：

$$N = N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T}$$

从而

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-3)$$

放射性同位素的半衰期越长，它衰变得就越慢，反之它衰变得就越快。各种放射性核素的半衰期差别很大，例如 ^{60}Co 、 $^{252}_{99}\text{Th}$ 、 $^{226}_{86}\text{Ra}$ 、 $^{214}_{82}\text{Pb}$ 、 $^{212}_{84}\text{Po}$ 的半衰期分别为 5.3a、 $1.41 \times 10^{10}\text{a}$ 、1600a、26.8min 和 $3.0 \times 10^{-7}\text{s}$ 。

(三) 放射性强度

放射性强度是指放射性物质在单位时间内衰变的原子核数。单位时间内衰变的原子核数目多，放射性就强，反之放射性就弱。对于两种放射性物质，放射性强度相同，只表示同一单位时间内衰变的原子核数目相同，但并不表示放出射线中粒子的种类和数目相同。放射性强度的单位是衰变数/s，或是衰变数/min。在实用中还常用居里 (Ci)、毫居里 (mCi)、微居里 (μCi) 等单位 ($1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ 衰变数/s = 1000mCi, $1\text{mCi} = 1000\mu\text{Ci}$)。

(四) 射线对物质的作用

1. 电离作用和贯穿作用

放射性同位素放出的射线具有一定的能量，它能贯穿到物质内部，并产生电离作用。在射线对物质作用的过程中，射线就逐渐损耗能量而被削弱，或者被物质所完全吸收。

(1) 电离作用

射线对物质作用的主要形式是电离作用。由于射线的作用，使原子的外围电子获得一定的能量，克服原子核的吸引力而脱离轨道，成为自由电子。这样，中性的原子就变成了一对带电的粒子，一个是带负电的自由电子，另一个是原子失去电子后形成的带正电的正离子。原子的这种变化过程叫“电离”，电离产生的正离子和自由电子称为离子对。

在电离过程中，射线把一部分能量传递给核外电子，射线本身的能量就减少了，同时也改变了运动的方向。但是，它可能还有足够的能量再次对其他原子进行电离。另外，脱离了原子的自由电子，当其速度（动能）较大时，也可能引起其他原子电离。

α 、 β 、 γ 三种射线贯穿到物质内部时，都能引起物质的电离。但是，它们电离作用的强弱是不同的。三种射线相比较， α 射线的电离作用最强，它穿过空气时，在 1cm 的路程上约能产生 2 万~6 万个离子对； β 射线的电离作用较弱，它穿过空气时，在 1cm 的路程上约能产生 40~300 个离子对； γ 射线的电离作用最弱，它穿过空气时，在 1cm 的路程上只能产生 1~2 个离子对。

(2) 贯穿作用

由于原子内部很空，而 α 、 β 、 γ 三种射线的粒子比起整个原子来又小得多，并且它们都具有一定的能量，所以射线能够贯穿到物质内部去，这就是射线的贯穿作用。

射线贯穿到物质内部，由于电离作用，就要损失能量，当其能量耗尽时，射线就完全被吸收了。显然，电离作用强的射线，能量消耗快，贯穿能力就弱，反之贯穿能力就强。

在 α 、 β 、 γ 三种射线中， α 射线的贯穿能力最弱，它在空气中仅能穿过几厘米的路程，连人皮肤都穿不过去。因此，对 α 射线防护比较容易，一张纸块便能完全挡住它（见图 1-3）。

α 辐射对人不构成外照射伤害的危险。如果一个人要通过一块放射性落下灰污染的场地，那么地面 α 污染物发射的大部分 α 粒子在到达人的皮肤以前将被空气所吸收。即便皮肤上沾染了 α 粒子，它也会只伤害第一层表皮（见图 1-3）。而且，这种伤害不会是严重的，这主要是因为这层皮总是不断地死亡和被取代。

β 射线的贯穿能力比 α 射线强得多。它在空气中能穿过几米到十几米的路程，能贯穿到人体内部去，但不能贯穿到骨骼内。因此， β 射线也较容易被削弱和吸收。服装对它便有一定的削弱作用。薄铝、铁板或稍厚一些的木板就能完全挡住它。但由于 β 射线有一定的贯穿能力和电离能力，所以也要防止 β 放射性物质进入体内和沾染皮肤。

γ 射线的贯穿能力最强，很难被物质完全吸收。它在空气中能穿过几百米以上的路程，能贯穿到人体的骨骼内。因此， γ 射线的体外照射危害大，服装对它没有什么实际的防护效果，只有厚实的物体对它才有明显的防护作用。

2. 中子与物质的相互作用

中子不带电，不能通过库仑力与物质原子的电子相互作用，而只能与原子核相互作用。

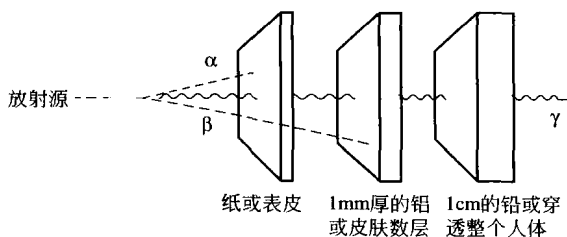


图 1-3 辐射贯穿能力示意

中子与原子核相互作用分为两大类，即散射和辐射俘获（吸收）。

(1) 散射

包括弹性散射和非弹性散射。这是快中子（能量 $100\sim 1000\text{keV}$ 范围）与物质相互作用过程中的主要能量损失。

① 弹性散射。快中子在轻介质中主要通过弹性散射损失能量。当中子和原子核（靶核）发生弹性碰撞时，中子把部分能量交给原子核，然后改变方向继续运动。中子与氢原子核发生一次“正向”碰撞，中子的能量几乎全部被损失掉。由于轻元素（物质是氢）可以作为良好的快中子减速剂，而且中子与重核的弹性散射能量损失很小，因此在中子的防护中，常选用含氢和原子量小的物质（如石蜡、石墨、氢化锂）作为快中子的减速剂。

② 非弹性散射。中子与靶核发生非弹性碰撞，靶核放出一个动能较低的中子并且处于激发态，然后放出 γ 光子回到基态。快中子与重核相互作用时，非弹性散射占优势。每发生一次非弹性散射中子损失很大一部分能量，经过几次非弹性散射后，中子能量降低到主要靠弹性散射损失能量。因此，在中子屏蔽层中往往掺入重元素与减速剂组成交替屏蔽。其中重元素具有吸引 γ 射线和使高能中子减速的双重作用。

(2) 辐射俘获

中子射入靶核后，与靶核形成激发态复合核，然后复合核发射 γ 光子回到基态，此过程称为辐射俘获，也称 (n, γ) 反应，这时中子就被靶核吸收。任何能量的中子，几乎都能与原子核发生辐射俘获。发生 (n, γ) 反应后的靶核，由于核内多了一个中子，一般是放射性的，但也有的是稳定的。图 1-4 为中子与核的弹性碰撞、非弹性碰撞及中子俘获过程示意。

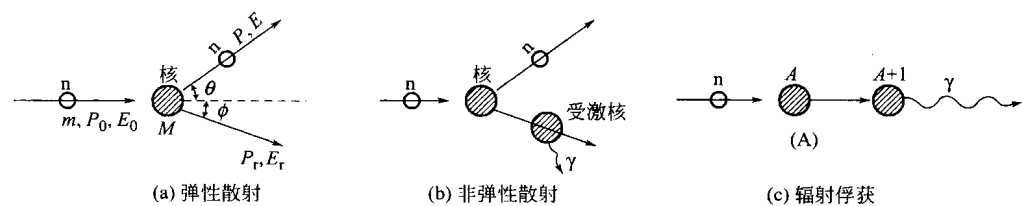


图 1-4 中子与核的弹性碰撞、非弹性碰撞及中子俘获过程示意

m —中子质量； P_r —碰撞后反冲击核动量； M —靶核质量；
 E_0 、 E —碰撞前、后中子能量； P_0 —碰撞前中子动量；
 ϕ —反冲击角； P —碰撞后中子动量； θ —碰撞后偏移角

3. 射线和中子相对危害性

① α 射线穿透能力很弱，射程很短，它对人体组织伤害远比其他外来辐射小。因而大多数 α 辐射源，不存在外照射危害；相反， α 放射性物质，一旦到体内， α 粒子射程短就变得非常重要，这意味着损伤高度集中在 α 粒子源点附近，器官就会受到严重的损伤。作为体内危害， α 粒子是值得重视的。

② β 射线比 α 射线具有较大的穿透能力。在空气中 β 射线的射程可以达到几米，大约 70keV 的 β 射线就能穿透人体皮肤角质层使组织受到损伤。因此 β 射线对人体可以构成外照射危害。但是 β 射线很容易被有机玻璃、塑料及薄铝片等材料屏蔽。高能 β 射线在重元素材料中会产生韧致辐射，因此屏蔽 β 射线时，内层材料应选用原子序数较低的物质，外面再用铝板或铁板。

③ γ 射线穿透能力比 α 射线、 β 射线要大得多，即使离开放射源相当远的地方也可能使人体受到照射，所以 γ 射线外照防护是最重要的。为了减少外照射造成的危害，最有效的办