



SSMPF 上海科技专著出版资金资助

舰艇辐射危害 医学防护

JIANTINGFUSHE WEIHAI
YIXUE FANGHU

主编 蔡建明 李百龙 沈先荣



第二军医大学出版社
Second Military Medical University Press

“走向大洋海军的卫生勤务”系列
上海科技专著出版资金资助

舰艇辐射危害医学防护

主 编 蔡建明 李百龙 沈先荣
副主编 高 福 崔建国 任东青



第二军医大学出版社
Second Military Medical University Press

内 容 简 介

本书重点介绍舰艇艇员核武器损伤的特点及其防护,核潜艇及核武器等电离辐射所致主要伤病的防治,核潜艇放射卫生防护和核事故医学应急救援,舰艇非电离辐射对健康的影响及医学防护,以及各种辐射损伤的发生机理、病理特点、临床表现、伤情判断、救治和预防。全书共 12 章,并附 5 个附录,贯彻“以海为主、海陆结合”“以军为主、军民两用”的指导思想,内容丰富,科学性和实用性强。

本书可作为军队医学院校教材,也可作为海军部队医务人员继续教育用书。对地方从事放射卫生防护、放射损伤防治的卫生管理人员和相关医务人员也有重要参考指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

舰艇辐射危害医学防护/蔡建明,李百龙,沈先荣

主编. —上海:第二军医大学出版社,2015.3

ISBN 978-7-5481-0806-1

I. ①舰… II. ①蔡… ②李… ③沈… III. ①军用
船—辐射防护 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043335 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

出 版 人 陆小新

责任编辑 陆小新 高 标 刘 向

策划编辑 高 标

舰艇辐射危害医学防护

蔡建明 李百龙 沈先荣 主编

第二军医大学出版社出版发行

上海市翔殷路 800 号 邮政编码:200433

发行科电话/传真:021-65493093

<http://www.smmup.cn>

全国各地新华书店经销

江苏天源印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:472 千字

2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5481-0806-1/T·035

定价:80.00 元

编委会名单

主 编 蔡建明 李百龙 沈先荣

副主编 高 福 崔建国 任东青

编 委 (以姓氏笔画为序)

第二军医大学

孙 顶 刘 聪 李百龙

闵 锐 周传丰 倪 瑾

高 福 崔建国 韩 玲

程 赢 蔡建明

第四军医大学

任东青 谢学军

海军医学研究所

王海军 沈先荣 何 颖

李珂娴 侯登勇 蒋定文

前 言

海洋蕴藏着极其丰富的天然资源,已成为 21 世纪资源竞争的重要战场;海上运输已成为我国发展国民经济最重要的交通生命线,海洋经济建设正处于大发展的历史时期,海洋战略已上升为国家战略。人类在海上从事生产实践或军事活动,不可避免地会遇到航海特殊复杂环境对人员健康的影响,辐射环境就是对健康影响的重要因素之一。舰艇辐射危害医学防护,是研究从事海上劳动作业和军事斗争所涉及航海环境条件下辐射对人体健康的影响及医学防护问题的一门特殊医学,对维护海军官兵的身心健康,提高军事作业能力和部队战斗力,挽救指战员的生命,具有十分重大的作用。我国向远洋进军和形成遂行远海作战的卫勤保障能力,离不开舰艇辐射危害医学防护等军事航海医学知识和技术的支撑。

本书秉承“以海为主、海陆结合”“以军为主、军民两用”的指导思想,顺应我国海军武器装备的发展以及海军战略转型对人才培养的新要求,针对新形势下的海上辐射危害医学防治知识需求和实际工作需要,重点介绍舰艇艇员核武器损伤的特点,核潜艇及核武器等电离辐射所致主要伤病的防治,核潜艇放射卫生防护和核事故医学应急救援,舰艇非电离辐射对健康的影响及医学防护,以及各种辐射损伤的发生机制、病理特点、临床表现、伤情判断、救治和预防。全书阐述航海环境下舰艇艇员所涉及的辐射医学防护问题,在继承核武器海上爆炸对人员的杀伤特点及其防治等传统知识的基础上,以现代舰艇各种辐射对人体健康的影响及其医学防治问题为主线,以培养读者学习掌握舰艇辐射危害及其损伤防治的科学知识为目标,将辐射医学防护落实到舰艇这个特定的环境中,同时具体内容上结合近年来的研究成就,吸纳了近几年国内外在这一领域的最新研究成果,紧密联系部队的现状和发展形势,是配合我国海洋经济快速长期发展和我军“走向深蓝”战略转变对医学保障新需求的重要举措之一,有助于提高我国航海特殊条件下各种有害因素的医学防护能力,保障人员身心健康,促进我国海洋经济建设又快又好发展,提高远洋作战卫勤保障水平。

目前,相近题材“辐射损伤的医学防护”虽有多册,而专门论述舰艇辐射医学防护的图书未见出版。因此,本书编写过程中编者参阅了大量资料,同时邀请了军内相关学科一些著名专家共同参加编写,使之可以更有针对性地为舰艇部队官兵防治辐射损伤提供理论指导和技术参考。尽管编写过程中尽了很大努力,但鉴于作者学识有限,内容难免存在瑕疵,敬请广大读者斧正。

编 者

2014 年 10 月

目 录

第一章 辐射物理基础及舰艇常见辐射	1
第一节 辐射种类	1
第二节 原子核与原子核的转变	3
第三节 射线与物质的相互作用	8
第四节 辐射量及其单位	12
第五节 舰艇常见辐射	15
第二章 核武器对舰艇人员的损伤及其防护	19
第一节 核武器概述	19
第二节 核武器杀伤破坏因素及致伤作用	26
第三节 核武器对舰艇人员的损伤	38
第四节 舰艇部队对核武器损伤的防护	43
第三章 电离辐射生物学效应	48
第一节 辐射生物学效应的分类	48
第二节 电离辐射对生物大分子的作用	49
第三节 电离辐射对细胞的作用	55
第四节 组织器官的辐射效应	66
第五节 电离辐射生物学效应的影响因素	71
第六节 电离辐射的远期生物效应	74
第四章 急性放射病	77
第一节 概述	77
第二节 骨髓型急性放射病	79
第三节 肠型和脑型放射病	87
第四节 诊断	91
第五节 治疗	97
第六节 急性放射病研究进展	105
第五章 小剂量外照射生物效应	115
第一节 低剂量照射概述	115
第二节 低剂量外照射生物效应	116
第三节 慢性放射病	120

第六章 内照射放射损伤	125
第一节 概述	125
第二节 临床特点	128
第三节 诊断	130
第四节 预防、急救和治疗	131
第七章 皮肤放射性损伤	135
第一节 概述	135
第二节 临床表现	136
第三节 诊断	140
第四节 治疗	141
第八章 核爆炸复合伤	144
第一节 概述	144
第二节 临床特点	146
第三节 诊断	150
第四节 急救和治疗	152
第九章 核动力舰艇电离辐射卫生防护	154
第一节 核动力舰艇电离辐射特点	154
第二节 舰艇电离辐射监测	157
第三节 舰艇环境与人员电离辐射控制限值	160
第四节 舰艇电离辐射防护主要措施	162
第五节 舰员医学检查及健康管理	165
第十章 舰艇非电离辐射对机体的影响与防护	168
第一节 概述	168
第二节 舰艇高频电磁场对机体的影响与防护	170
第三节 舰艇微波辐射对机体的影响与防护	173
第四节 电磁脉冲对机体的影响与防护	177
第十一章 核与辐射突发事件的危害	182
第一节 核事故与放射事故分级及危害特点	182
第二节 核反应堆事故及其危害	187
第三节 放射源丢失事故及其危害	190
第四节 辐照单位意外照射事故	193
第五节 核动力舰艇与核武器事故	194
第六节 医源性照射事故及其他核事故	196

第七节 核恐怖活动及主要危害	198
第十二章 核潜艇核事故医学应急救援	200
第一节 核事故医学应急救援概述	200
第二节 核潜艇核事故主要伤类伤情	205
第三节 核潜艇核事故检伤分类	207
第四节 核潜艇核事故医学应急救援	209
第五节 核潜艇核事故人员放射性污染防护	215
附录一 旧用单位与法定计算单位的换算	222
附录二 核武器杀伤破坏因素参数表.....	223
附录三 各种放射病诊断标准及处理原则	230
附录四 健康管理及卫生防护标准	257
附录五 放射性核素的常用数据表	288

第一章 辐射物理基础及舰艇常见辐射

第一节 辐射种类

辐射(radiation)是以波动形式或运动粒子形式向周围介质传播能量,是一种能量的传播方式。根据辐射物理形态的不同,通常将辐射分为电磁辐射(electromagnetic radiation)和粒子辐射(particle radiation)两大类。根据有无电离能力,又将辐射分为电离辐射(ionizing radiation)和非电离辐射(non-ionizing radiation)。

一、电磁辐射

电荷周围有电力存在的空间称之为电场(electric field)。电荷的运动形成电流,在电流的周围,除了电场,还存在着一种特殊性质的场,它对静止电荷没有作用,而对运动电荷有作用力,这种场称为磁场(magnetic field)。

电场变动时可以产生磁场,磁场变动时又可以产生电场。也就是说,时变电场(是空间坐标和时间的函数,随时间变化的电场)和时变磁场(是空间坐标和时间的函数,随时间变化的磁场)相互联系、相互激发,形成了一个统一的不可分割的电磁场(electromagnetic field)。电磁场是物质存在的一种形式,具有能量和动量。

变化的电场与磁场交替地产生,由近及远,互相垂直,并以与自己的运动方向垂直的一定速度在空间里传播的过程,称之为电磁辐射(electromagnetic radiation),电磁辐射也称为电磁波(electromagnetic wave)。电磁辐射是以一种看不见、摸不着的特殊形态存在的物质。人类生存的地球本身就是一个大磁场,它表面的热辐射和雷电都可产生电磁辐射,太阳及其他星球也从外层空间源源不断地产生电磁辐射。围绕在人类身边的天然磁场、太阳光、家用电器等都会发出强度不同的辐射。

(一) 电磁辐射与波粒二象性

电磁辐射在空间的传播遵循波动方程;反射、折射、干涉、衍射、偏振等是电磁辐射波动性的表现。描述电磁波波动性的主要物理参数有:波长(λ)或波数(σ 或 K)、频率(ν)及相位(φ)等。波长是指波在一个振动周期内传播的距离。波数是指波在其传播方向上单位长度内波长的数目,亦即 λ 的倒数($1/\lambda$);有时也以 $2\pi/\lambda$ 作为波数。频率是指每秒钟内波振动的次数,单位为 Hz(赫兹)。相位是决定波在任一时刻(或位置)的状态的参数,其值关系到同频率的不同波束能否发生干涉等相互作用。

电磁波在真空中的传播速度(C)等于光速,约等于 3×10^8 m/s,它与波长(λ)和频率(ν)满足关系:

$$C = \lambda \nu$$

电磁波同时具有微粒性,即电磁波是由光子所组成的光子流。电磁波与物质相互作用,

如光电效应等现象是其微粒性的表现。描述电磁波微粒性的主要物理参数有：光子能量(E)和光子动量(p)等。

电磁波波动性与微粒性通过下列关系式相联系,即:

$$E = h\nu$$
$$p = h/\lambda$$

两式中： h ——Planck 常数, $h=6.626\times10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ 。

上述两式中,等式左边与右边分别为表示电磁辐射微粒性与波动性的参数。

(二) 电磁波谱

λ (或 ν)是决定电磁波性质的参数。按一定波长范围(谱域)将电磁波分为若干波谱区,各波谱区的电磁波具有不同的名称,它们的特性和作用有很大差异,产生方式也不尽相同。将各波谱区电磁波按波长(或频率)顺序排列即构成电磁波谱,如表 1-1 所列电磁波谱可分为 3 个部分:①长波部分,包括无线电波与微波,有时习惯上称此部分波谱为长波,辐射光子能量低,它与物质中间隔很小的能级跃迁能量相适应,如电子和原子核自旋分裂能级跃迁(顺磁共振和核磁共振)等。②中间部分,包括紫外线、可见光和红外线,统称为光学光谱,一般所谓光谱仅指此部分而言,此部分辐射光子能量与原子或分子的外层电子的能级跃迁相适应。③短波部分,包括 X 射线和 γ 射线(以及宇宙射线),此部分可称射线谱,是能量高的谱域。X 射线产生于原子内层电子能级跃迁,而 γ 射线产生于核反应(如核衰变)。

表 1-1 电磁辐射波谱

名称	波长(真空中)	频率(Hz)	能量(eV)
无线电波	$10^4\sim1\text{ m}$	$3\times10^4\sim3\times10^8$	$1.24\times10^{-10}\sim1.24\times10^{-6}$
微波	$1\text{ m}\sim1\text{ mm}$	$3\times10^8\sim3\times10^{11}$	$1.24\times10^{-6}\sim1.24\times10^{-3}$
红外线	$1\text{ mm}\sim0.8\text{ }\mu\text{m}$	$3\times10^{11}\sim3.7\times10^{14}$	$1.24\times10^{-3}\sim1.24\times1.55$
可见光	$800\sim380\text{ nm}$	$3.7\times10^{14}\sim7.9\times10^{14}$	$1.55\sim3.26$
紫外线	$380\sim10\text{ nm}$	$7.9\times10^{14}\sim3\times10^{16}$	$3.26\sim1.24\times10^2$
X 射线	$10\sim10^{-3}\text{ nm}$	$3\times10^{16}\sim3\times10^{20}$	$1.24\times10^2\sim1.24\times10^6$
γ 射线	$10^{-3}\sim10^{-4}\text{ nm}$	$3\times10^{20}\sim3\times10^{21}$	$1.24\times10^6\sim1.24\times10^7$

二、粒子辐射

粒子是指一些组成物质的基本粒子,或者由这些基本粒子构成的原子核。粒子辐射是一些高速运动的粒子通过消耗自己的动能把能量传递给其他物质。其中 α 粒子、电子、质子、中子、负 π 介子和带电重离子等被广泛应用于放射生物学和放射医学的研究和肿瘤的放射治疗。表 1-2 列举了部分粒子辐射。

表 1-2 粒子辐射的基本特性

辐射	静止质量 (kg)	电荷 (C)	应用的大致能量	
			(eV)	(J)
α 粒子或氦核	6.7×10^{-24}	3.2×10^{-19}	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-12}$
β 粒子或电子 (e^+ , e^-)	9.1×10^{-31}	$\pm 1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^1 \sim 1.5 \times 10^7$	$1.6 \times 10^{-15} \sim 2.4 \times 10^{-12}$
中子	1.7×10^{-27}	0	$2.5 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^4$	$4.0 \times 10^{-21} \sim 3.2 \times 10^{-15}$
质子	1.7×10^{-27}	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 4.8 \times 10^{-9}$
氘核	3.3×10^{-27}	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
重离子(^{14}N)	2.3×10^{-26}	$+1.1 \times 10^{-18}$	$1.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$	$1.6 \times 10^{-13} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
π^+ 介子	2.5×10^{-29}	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.0×10^8	1.6×10^{-11}
π^- 介子	2.5×10^{-29}	-1.6×10^{-19}	1.0×10^8	1.6×10^{-11}

三、电离辐射

物质的原子或分子从辐射吸收能量而导致电子轨道上的一个或几个电子被逐出的现象称为电离。高速的带电粒子,如 α 粒子、 β 粒子、质子等,能直接引起物质电离,属于直接电离粒子;X 射线、 γ 射线等光子、中子和某些不带电粒子,通过与物质作用产生带电的次级粒子,从而引起物质电离,属于间接电离。能量较高,可以引起物质中原子或分子电离的任何直接电离粒子和间接电离辐射统称为电离辐射(ionizing radiation)。所以电离辐射包括部分粒子辐射,也包括部分电磁辐射。

四、非电离辐射

能量较低,通常不能引起物质分子的电离,而只能引起分子的振动、转动或电子在轨道上能级改变的各种辐射称为非电离辐射(non-ionizing radiation)。紫外线和能量低于紫外线的所有电磁辐射都属于非电离辐射。在放射防护领域中,电离辐射和非电离辐射的分界线,有的国家把能量小于 12 eV 和波长大于 100 nm 的电磁辐射规定为非电离辐射。

第二节 原子核与原子核的转变

一、原子核组成

原子核(nucleus)是由带正电的质子(proton)和不带电的中子(neutron)组成,质子和中子统称为核子(nucleon)。原子核内质子数和中子数的总和称为质量数,通常用符号 A 表示;原子核内的质子数代表核电荷数,称为原子序数,用 Z 表示。原子核内的中子数即为 A - Z。若以 X 代表某种元素,则 ${}_Z^AX$ 表示元素原子核的组成。如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 表示铀原子核的质量数是 235,含 92 个质子和 143 个中子。

1. 元素

原子核内具有相同核电荷数的同一类原子称为元素(element)。如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$,它们质

量数虽然不同,但原子序数都是 1,属于同一类元素,统称为氢元素。

2. 核素

原子核内质子数、中子数和能量状态均相同的一类原子称为一种核素(nuclide)。质子数、中子数和能态这三者中,只要有任何一项特征不同即为不同的核素。核素按其稳定程度(一般以半衰期 10^9 年为界),可分为放射性核素(radioactive nuclide)和稳定性核素(stable nuclide)两大类。放射性核素能够自发地发生核内成分或能态的改变而转变成另一种核素,同时放出一种或一种以上的射线。而稳定性核素不会自发地发生核内成分或能态的改变,或者发生的概率很小。如 ^{235}U 和 ^{239}Pu 为放射性核素, ^{12}C 和 ^{16}O 为稳定性核素。

3. 同位素

原子核内质子数相同,而中子数不同的核素,彼此称为同位素(isotope)。同位素的化学性质相同,在元素周期表中居于同一位置,但是其物理性质可能不同。例如,氢的同位素包括 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 三种核素,三者化学性质相同,物理性质却决然不同, ^1H 和 ^2H 是稳定性核素, ^3H 则是放射性核素。目前发现的元素虽然有 118 种之多,但这些元素的天然同位素和人造同位素已达 2 000 种以上。其中约 300 种为稳定核素,其余都是不稳定的,即放射性核素。

二、原子核的转变

原子核的结构、性质和能量发生变化时,称之为原子核转变。原子核转变的类型有核衰变和核反应两大类。前者是自发的,后者通常是人工造成的。

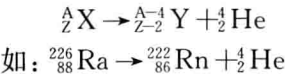
(一) 核衰变

放射性核素的原子核从一种状态转变成另一种状态或转变成另一种核素并自发地放出射线的过程称为核衰变(nuclear decay)。

1. 核衰变的类型

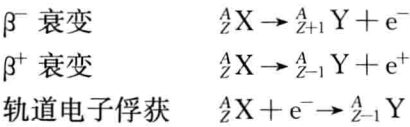
核衰变主要有 α 、 β 、 γ 衰变三种类型。放出的射线有 α 射线、 β 射线、 γ 射线和中微子等,极少数的衰变可放出质子、中子等粒子。

(1) α 衰变(alpha decay) 从原子核内放出 α 粒子的核衰变称为 α 衰变。 α 粒子实际上是氦原子核(^4_2He),它的质量数是 4,由两个质子和两个中子组成,带 2 个单位正电荷。通常把衰变前的原子核称为母核,衰变后形成的新原子核叫子核。放射性核素的原子核发生 α 衰变形成的子核较母核的原子序数减少 2,而质量数较母核减少 4,通式表示为:



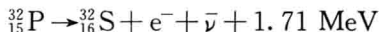
α 衰变多见于高原子序数($Z>82$)的放射性核素,衰变时放出的能量主要转变为发射 α 粒子的动能。

(2) β 衰变(beta decay) 原子核自发地放射出电子或正电子(positron),或俘获一个轨道电子(orbital electron)而发生的转变,统称为 β 衰变。发射电子的称 β^- 衰变,发射正电子的称 β^+ 衰变,俘获轨道电子的称轨道电子俘获。三种类型 β 衰变的通式如下:



式中 e^- 和 e^+ 分别代表电子和正电子。由上例各式可见,在 β 衰变中,子核与母核的质量数相同,只是电荷数相差 1。

β^- 衰变相当于原子核内一个中子转变成一个质子,故子核电荷数增加 1。衰变时除发射一个电子外,通常还伴随释放一个反中微子(antineutrino)。衰变能主要由电子(即 β^- 粒子)和反中微子所带走,如:



β^+ 衰变相当于原子核内一个质子转变成中子,故子核电荷数减 1。衰变时发射正电子(即 β^+ 粒子)和中微子,一般发生 β^+ 衰变的都是人造放射性核素,如:



β^- 粒子和 β^+ 粒子都是连续能谱,即衰变时放出的 β^- 和 β^+ 粒子的能量从零到最大值。通常 β 粒子的能量用最大能量和平均能量来表示。例如, ${}^{32}\text{P}$ 衰变释放的 β 粒子最大能量为 1.71 MeV,平均能量为 0.71 MeV(图 1-1)。

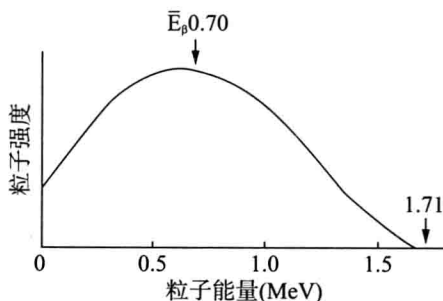
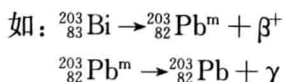


图 1-1 ${}^{32}\text{P}$ 的 β 粒子能谱

轨道电子俘获是原子核内一个质子俘获核外一个轨道电子,使之转变成中子,同时放出一个中微子(neutrino),转变后子核的电荷数也减 1。这种转变虽然不发射电子,其原子核变化与 β^+ 衰变类似,故将其归入 β 衰变。如:



(3) γ 衰变(gamma decay) α 衰变和 β 衰变所形成的子核往往处于激发态。激发态是不稳定的,它要退激到基态。原子核通过发射 γ 光子,从激发态跃迁到较低能态的核转变叫 γ 衰变,又称 γ 跃迁(gamma transition)。 γ 衰变所产生的子核的质量数和原子序数仍与母核一致,只是能量状态发生改变。因此这种 γ 跃迁称为同质异能跃迁(isomeric transition, IT)。



2. 衰变规律

核衰变是自然发生的,任何外界因素,如温度、压力、磁场等,均不能改变衰变的性质和速率。每种放射性核素都有其自身的衰变速率。但无论哪一种放射性核素,其衰变都有一定的规律性,即放射性核素是按时间的负指数函数而衰减的,遵守放射性衰变定律(law of

radioactive decay)。放射性衰变定律可用公式表示如下：

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

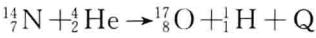
式中， N 为衰变后的原子核数， N_0 为衰变前的原子核数。 e 是自然对数的底，是一常数，等于 2.718。 t 为衰变所经历的时间。 λ 是衰变常数，它的意义是放射性核素每个原子核在单位时间内衰变快慢的物理量，不同核素有不同 λ 值。 λ 值越大，衰变越快，反之衰变就慢。利用这个公式，可以求出放射性核素衰变任何时间后尚存留的原子核数。

表征放射性核素衰变快慢的另一个物理量叫半衰期(half-life-time)，是指放射性核素衰变一半所需要的时间，通常用 $T_{1/2}$ 表示。半衰期与衰变常数互成反比，其关系式为：

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda$$

(二) 核反应

原子核由于受外来因素，如带电粒子的轰击，吸收中子或高能光子照射等引起核结构的改变，称为核反应(nuclear reaction)。例如，将 α 放射源放在氮气中时，氮原子核因受 α 粒子的轰击而放出质子，氮原子核($^{14}_7\text{N}$)则变成为氧原子核($^{17}_8\text{O}$)，这便是核反应，以下式表示：



与核武器密切相关的核反应是核裂变反应及核聚变反应，与核潜艇及核电站相关的是核裂变反应。

1. 核裂变(nuclear fission)

某些重核素，如 $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 等在中子轰击下，一次裂变可分裂成两块质量相近的核碎片(新的核素)，放出 2~3 个中子和大量的能量，这种反应叫核裂变。图 1-2 是铀原子核裂变示意图。每个铀原子核裂变，释放出约 200 MeV 的能量，举例如下：

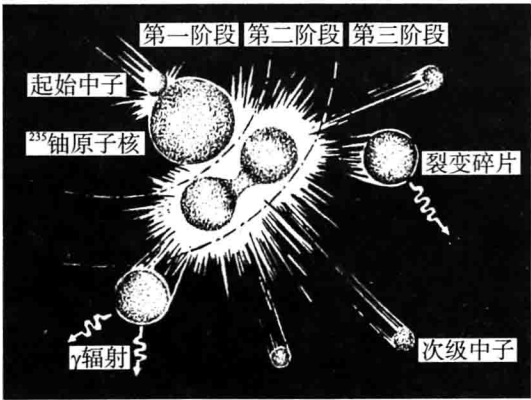
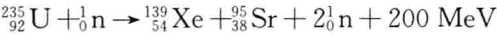


图 1-2 重核裂变

核裂变释放的能量比化学反应释放的化学能要大得多，是目前获取大量核能的主要途径。

2. 核聚变(nuclear fusion)

在几百万至几千万摄氏度高温下,质量轻的核素如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^6Li 等原子核运动速度非常之快,可以克服相互之间原子核的排斥力,聚合为中等质量的原子核,一次聚变反应可放出大量能量,这种反应则称为核聚变。图 1-3 是 ^2H 和 ^3H 聚变反应示意图。

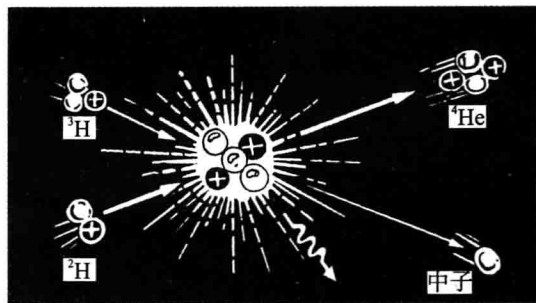
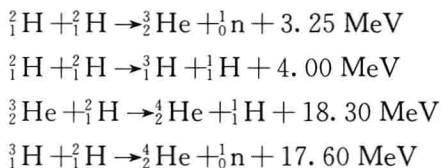


图 1-3 ^2H 和 ^3H 聚变反应示意图

核聚变反应必须在高温下进行,故又称热核反应(thermo-nuclear reaction)。下面是 ^2H 的几种聚变反应:



从以上各式可以看出,每 6 个 ^2H 参加聚变反应,共放出 43.15 MeV 的能量,平均每个 ^2H 释放约 7.19 MeV 的能量,每个核子平均释放 3.59 MeV,比 ^{235}U 裂变时每个核子平均释放的能量(200 MeV/235=0.85 MeV)要大 4.2 倍。所以对相等质量的核装料而言,核聚变可以获得比核裂变更大的能量。

三、质量、能量守恒和原子核结合能

质量和能量是物质同时具有两种属性。在微观世界,质量和能量不可分割,任何质量都与一定数量的能量相联系,任何能量也与一定数量的质量相联系,相互之间可以转换。它们的关系可用下式表示:

$$E = mc^2$$

式中 E 是能量(J), m 是质量(kg), c 是光速(3×10^8 m/s)。

对于微观世界,物质体系中任何质量的改变,必对应着能量的改变,反之亦然。在封闭系统内,质量和能量都是守恒的。

原子核由核子组成。经精确测定,一定数量的质子和一定数量的中子紧密结合组成原子核后,原子核的质量要小于组成前游离质子和中子质量的总和。设 m_A 、 m_P 、 m_N 分别代表核素 ^A_ZX 的原子核、质子、中子的质量,则:

$$\begin{aligned} m_A &< Zm_P + (A - Z)m_N \\ \text{或: } \Delta m &= [Zm_P + (A - Z)m_N] - m_A \end{aligned}$$

Δm 即为质子和中子组成原子核后的质量差额,称为质量亏损(mass defect)。根据质量能量守恒的定律,当质量改变 Δm 时,必定有 ΔE 的能量放出,可由下式算出:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

若干个核子结合成原子核时释放出来的能量称为该原子核的结合能(binding energy of

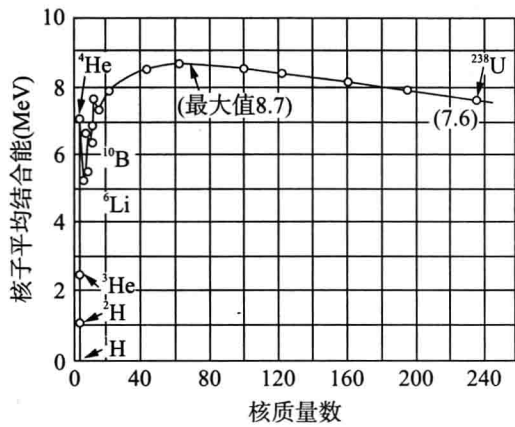


图 1-4 核子平均结合能曲线

子核时,要向外释放能量,这就是原子核能,简称核能(nuclear energy)。质量数小的轻核和质量数较大的重核,核子的平均结合能均较小,而质量数中等大小核的平均结合能都比较大,这就意味着,在一定条件下,质量数小的轻核聚合或质量数较大的重核裂变都将有能量释放出。

第三节 射线与物质的相互作用

一、带电粒子与物质相互作用

带电粒子通常指对外显示净电荷的一些基本粒子,如: α 、 β 、 β^+ 、质子等。带电粒子与物质作用通常产生电离、激发、散射、韧致辐射等效应。

(1) 电离(ionization) 带电粒子作用于物质的原子,使原子核外层的电子获得一定的能量,从而克服原子核对其的吸引力,脱离原子核的束缚成为自由电子,原子则因失去一个电子而成为正离子,这个过程称为电离。

(2) 激发(excitation) 带电粒子作用于物质的原子,如果电子获得的能量不足以使它脱离原子核的束缚,而只是从电子的内壳层跃迁至外壳层,使整个原子处于更高的能阶状态,这一过程叫做激发。处于激发态的原子是不稳定的,它将以辐射的方式向外释放多余的能量,使之回到稳定状态。

上述带电粒子与物质作用时,可以直接与核外电子发生静电作用而使原子电离或激发,故称它们为直接电离粒子(direct ionizing particles)。直接作用引起的电离称初级电离(primary ionization),初级电离产生的电子称次级电子。次级电子若有足够能量,在物质中可引起再次电离,称次级电离(secondary ionization)。在带电粒子与物质作用中次级电离占有很重要的地位,可达总电离事件的 50% 以上。

(3) 散射(reflection) 当质量很轻的带电粒子通过介质时,还会受到原子核库仑场的作用,使运动方向发生偏转,称为散射(scattering)。散射的发生与吸收介质的原子序数 Z 成正比。 β 粒子在与原子序数高、较厚的介质作用时,可发生多次散射,部分粒子甚至可发生反向散射。

(4) 轫致辐射(bremsstrahlung) 高速电子在介质中运动时,受到介质原子核库伦场势垒的阻挡作用而减速,电子的动能转化为辐射能,以 X 射线的形式发射出,这种辐射称轫致辐射。轫致辐射的发生率与电子所作用介质的原子序数 Z 的平方成正比;与电子质量 m 的平方成反比;与入射电子的能量也有关系。对于同一介质,入射电子的能量较小时,轫致辐射的发生率较低;当入射电子的能量超过某一临界水平,轫致辐射的发生率升高,成为入射电子在介质中能量损失的主要方式。

二、中子与物质的相互作用

中子(neutron)是一静止质量略大于质子,不带电的粒子。中子与物质作用产生效应的类型与中子的能量大小有关。按能量不同中子可分为:慢中子(包括热中子),能量在 1 keV 以下;中能中子,能量为 1~500 keV;快中子,能量为 0.5~20 MeV;特快中子,能量在 20 MeV 以上。

不同能量的中子与物质作用可产生弹性散射(elastic scattering)、非弹性散射(inelastic scattering)和中子俘获(neutron capture)等过程。

1. 弹性散射

中能中子和快中子与物质作用,主要产生弹性散射(图 1-5)。即当中子与物质的原子核碰撞时,将部分能量传给原子核,使其成为反冲核(recoil nucleus),并摆脱电子壳层而单独运动,中子则损失部分能量改变运动方向。弹性散射碰撞后,反冲核和散射中子的动能之和等于入射中子的动能。

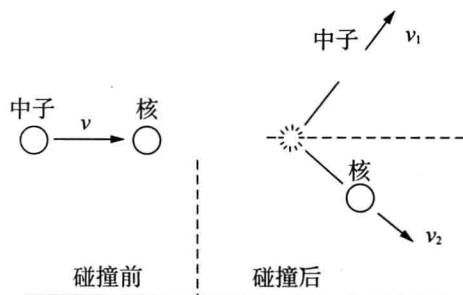


图 1-5 中子弹性散射

反冲核带一个或多个正电荷,是直接电离粒子,具有很强的电离能力。中子与质量相近的质子(氢核)碰撞,最易形成反冲核,所以损失能量最快,而与重核碰撞则不易形成反冲核,损失能量慢。所以防护中子应采用含氢多的物质,如水、石蜡等,而不用铅。

2. 非弹性散射

高能量的快中子与特快中子与重原子核作用时,可产生非弹性散射(图 1-6)。所谓非弹性散射是指中子在与核碰撞的瞬间,中子与核暂时合在一起,原子核此时处于激发态,碰撞后中子损失部分能量并从核中脱出,继续与物质作用,受激核则以发射 γ 射线的方式释放多余的能量而回到基态的过程。

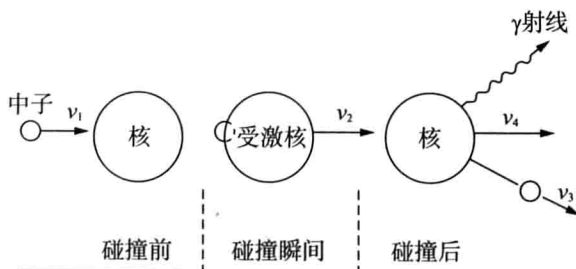


图 1-6 中子非弹性散射