

FANGSHEXING CEJING JICHU
YU ZHONGZI SHOUMING CEJING

放射性测井基础 与中子寿命测井

肖培琛 李耀文 万舒 等编著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

放射性测井基础与中子寿命测井

肖培琛 李耀文 万舒 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书总结了放射性测井与中子寿命测井的基本原理和方法。重点讲述了基本概念、射线的测量、射线测量的误差、放射性测井、放射性防护、中子寿命测井基础、中子寿命测量原理、中子寿命测井仪工作原理及中子寿命测井解释。

可供高校师生、科研院所和油田现场技术与管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

放射性测井基础与中子寿命测井/肖培琛等编著.

北京:石油工业出版社,2007.4

ISBN 978-7-5021-5933-7

I. 放…

II. 肖…

III. ①放射性测井

②中子测井

IV. P631.8 TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 011218 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京晨旭印刷厂

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8

字数:200 千字 印数:1—800 册

定价:48.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

我国注水开发的油田占 88%，水淹后弥补自然递减和增加采收率所进行的调整挖潜等措施以开发测井资料为依据对地下油水分布评价、确定方案，主要应用裸眼井水淹层测井和套管井动态监测的解释结果。随着开发期的延长，地下压力和采油井的产状，流态化（尤其是脱气井）导致油井分层找水测试结果产生误差甚至较大误差，此类井已占一定比例，将会影响方案设计和措施效果，此时，这类井利用综合调整、检泵等作业间隙，使动态条件改变为静态关井状态，进行中子寿命测井，不乏为解决问题的好方法。

2003 年 7 月，中国石油天然气集团公司在北京召开“服务工程公司技术交流会”，公司各级领导强调要发展剩余油饱和度测井，指出了中子寿命测井的作用和地位。面对大庆油田综合含水已达到 88%，进入了高含水开发末期，为了实现“百年油田”这一目标，发展中子寿命测井等剩余油测井方法，提供油水动态变化齐全准确的资料，具有现实和长远的意义。

由于此项测井应用有限，收集的资料较少而且个人理论与实践水平有限，本书仅提供初始从事此项测井人员参考，不足和错误之处请批评指教。

书中参考了董载纲、吴世旗等专家学者的论文和著作，在此表示感谢。

大庆油田测试技术服务分公司李耀文、万舒、郑春山、郭振雷、郑辉、杨玉、王桂霞、王兴杰、杨伟民、赵云鹏、王东红、唐续胜、李静、潘振宏、曲淑英参加了部分内容的写作，在此一并表示感谢。

目 录

第一部分 放射性测井基础

第一章 原子核的放射性	(3)
第一节 物质的组成与放射性	(3)
一、物质组成的基本单位	(3)
二、元素及元素周期表	(3)
三、原子及原子核的结构	(3)
四、天然放射性同位素	(5)
五、核反应与人工放射性	(6)
第二节 射线和物质的相互作用	(9)
一、带电粒子与物质的相互作用	(9)
二、不带电粒子与物质的相互作用	(10)
第二章 放射性射线的测量	(20)
第一节 闪烁计数器	(20)
一、闪烁计数器的工作原理	(20)
二、闪烁体	(21)
三、光电倍增管	(23)
第二节 NaI(Tl) 晶化钠探头测量的谱	(28)
第三节 中子的探测	(31)
一、中子的探测方法	(31)
二、慢中子探测器	(32)
第三章 射线测量的误差	(34)
第一节 泊松分布	(34)
第二节 高斯分布	(36)
第三节 放射性测量误差表示方法	(37)
第四节 标准误差的计算	(38)
一、计数的标准偏差	(39)
二、计数率的标准偏差	(39)
三、多次测量的标准误差	(40)
四、关于函数的标准误差	(42)
第四章 放射性测井	(46)
第一节 自然伽马测井	(46)
一、用自然伽马曲线划分厚度	(47)

二、“统计起伏”与自然伽马曲线	(47)
第二节 伽马—伽马测井	(49)
一、伽马—伽马测井原理	(49)
二、伽马—伽马测井的横向探测深度	(52)
第三节 中子测井	(53)
一、中子测井概述	(53)
二、中子—中子测井及中子— γ 测井的一些影响因素	(55)
三、中子—中子测井及中子— γ 测井的解释和应用	(56)
第五章 放射性防护	(58)
第一节 放射性防护的原则	(58)
一、实践的正当性	(58)
二、放射防护的最优化	(58)
三、个人剂量的限制	(58)
第二节 剂量的定义	(59)
一、剂量	(59)
二、常用放射线剂量单位	(59)
第三节 剂量率与射线强度的关系	(60)
一、放射性强度的单位	(60)
二、剂量率和光子流量的关系	(63)
三、放射性最大允许浓度	(64)
四、物体表面沾污的允许强度	(65)
第四节 放射性的安全防护	(65)
一、防护的基本原则	(65)
二、射线的防护	(66)

第二部分 中子寿命测井

第六章 中子寿命测井基础知识	(73)
第一节 中子与物质的作用	(73)
一、中子与物质的作用	(73)
二、地层的热中子俘获截面	(74)
第二节 中子寿命测井及发展	(76)
一、中子寿命测井	(76)
二、中子寿命测井的发展	(78)
三、硼—中子寿命测井施工方法及条件	(79)
第三节 用硼化物做指示剂的测井单井设计	(80)
一、硼溶液比浓度设计	(80)
二、注入硼溶液量的设计	(80)
三、替注工艺技术及要求	(81)

四、储集层内替挤硼溶液的压力与流量设计	(81)
五、测井施工的工艺设计要求	(82)
六、硼—中子寿命测井 HSE 的基本要求	(82)
七、硼—中子寿命测井资料质量验收评价要点	(82)
第七章 中子寿命测量原理	(84)
第一节 热中子寿命测量方法和影响因素	(84)
一、热中子寿命测量方法	(84)
二、井眼影响	(85)
三、分层能力与测量深度	(86)
四、统计起伏	(87)
五、扩散效应	(87)
六、相关物质的 Σ 值	(87)
第二节 中子寿命的测量	(88)
第八章 中子寿命测井仪工作原理	(96)
第一节 下井仪器工作原理概述	(97)
第二节 地面面板工作原理	(100)
一、硬件部分	(100)
二、软件部分	(102)
第三节 室内试验与现场测量程序	(103)
一、室内检查或维修	(103)
二、现场测井注意事项	(104)
三、安全与保养	(105)
第九章 中子寿命测井解释基础	(106)
第一节 中子寿命测井解释基本概念和定性解释	(106)
一、解释模型方程	(106)
二、解释方程	(106)
三、中子寿命测井的定性解释	(107)
第二节 中子寿命测井的定量解释	(108)
一、纯砂岩层的定量解释	(108)
二、含泥质砂岩地层的定量解释	(111)
第三节 基本测井的解释方法	(114)
一、几种基本测井的解释方法	(114)
二、硼中子寿命求剩余油饱和度测井的解释	(115)
附图	(118)

第一部分 放射性测井基础

第一章 原子核的放射性

第一节 物质的组成与放射性

一、物质组成的基本单位

自然界的一切物质,都是由各种不同的分子组成,分子的种类是无限的。在一定的外界条件下,分子可单独存在,是保持物质基本化学性质的最小单位,如水分子 H_2O ,它保持着水的基本化学性质。当把水分子用化学方法分割,所得到的是氧原子和氢分子。

如果某种物质只是由一种原子组成,那么这类原子叫做化学元素。例如氢是由氢原子构成的,我们就把氢原子称氢元素。目前,世界上已知 103 种不同的元素,由此可知,原子是构成分子的基本粒子。不同的原子具有不同的化学性质,不同的体积,不同的质量。在化学上,为了方便起见,用字母代表元素的原子,如 H(氢)、O(氧)、C(碳)、U(铀)等。因为一个水分子是由两个氢原子和一个氧原子构成的,所以水分子就用 H_2O 表示,称之为水的分子式。氢气 H_2 和氧气 O_2 化合成水的化学反应可用下面的化学方程式表示: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ 。

原子和分子的质量是极小的,即使是几万甚至几十万个原子组成的特别巨大的蛋白质分子,也只能在几十万倍的显微镜下才能看到。科学研究证明,一个氢原子的质量是 $1.673 \times 10^{-24} \text{g}$,氧原子的质量是 $2.6563 \times 10^{-23} \text{g}$ 。显然,原子的质量用克做单位不合适,因此在化学上采用氧单位,取氧原子质量的十六分之一作为一个单位,某种元素的原子质量是多少个氧单位就是其原子量。

例如,2.016g 氢和 16g 氧化合成 18.016g 水,已知水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的,这样就确定出氢的原子量等于 1.008,分子量就等于分子中所有原子量总和。

二、元素及元素周期表

元素的化学性质和基本性质与原子序数有密切的关系。按照原子序数递增的次序排列所有元素则发现一个周期性变化规律,即每经过一定的间隔就有化学性质相似的元素出现。也就是说,元素的性质随着元素原子序数的递增而周期性变化,这就是化学上最重要的定律之一——元素周期律。

把所有的元素按照周期律排成表,为周期表(表 1-1)。元素在周期表上的次序叫做原子序数,原子序数的符号用 Z 来表示,与该原子的原子核中的质子数相同。例如氢是第一号元素,它的原子序数就是 1,铀是九十二号元素,它的原子序数就是 92。

三、原子及原子核的结构

原子虽然很小但是结构十分复杂,随着科学的发展,证实了原子内的电子存在,通过进一步的研究发现了原子核,明确了原子是由电子和原子核构成。

表 1-1 元素周期表

	I _A			碱金属	碱土金属	过渡元素											0	
1	H	II _A		主族金属	非金属	稀有气体						III _A	IV _A	V _A	VI _A	VII _A	He	
2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B		IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Uub						
镧系	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
锕系	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

电子是质量极小同时也是带电量非常小的粒子。电子的质量大约等于 $9.106 \times 10^{-28} \text{g}$ ，与最轻的氢原子相比，只有一千八百四十分之一。电子带有负电荷，每个电子的带电量为 4.803×10^{-10} 静电单位。在研究原子内部时，所涉及的电量都很小，为方便起见，规定了一种新的电量单位“电子单位电量”，某种物质带电量是电子的几倍，称之为几个电子单位电量。

原子的中央有一个带正电荷的原子核，原子核所带的电量，等于该元素在周期表上的原子序数 Z 。它的体积比原子小很多，整个原子的直径为 10^{-8}cm ，原子核的直径只有 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{cm}$ ，所以原子核的大小，只占原子大小的万分之一，但是原子核的质量近似等于原子的质量。

原子内的电子和原子核之间的相对运动和原子核内部结构与性质是比较复杂的。研究表明电子和原子核的运动已经不遵循普通宏观物体的力学规律，而有着自我的运动规律，即电子力学规律。我们用一个简单的原子模型来粗略地说明它们的运动情况：原子是一个小而重的带正电的核，周围有若干个小而轻的带负电荷的电子，不间断地绕核高速旋转，原子核的带电量与核外电子的总带电量大小相等（均等于原子序数 Z ）符号相反，正因如此，所有正常的原子都是不带电的。

原子核外围的电子，都有圆的或椭圆型的固定轨道而且分成若干层轨道，叫电子层，距原子核最近层叫 K 层，依次称 L 层等。每一层中都有几个轨道，每个轨道上只能有一个电子， K 层只有两个轨道，容纳两个电子。第二层最多可容纳 8 个电子，第三层最多可有 18 个电子，第四层最多可有 32 个电子，但是最外层的壳层却有严格的限制，最多发现 8 个电子，次外壳层没超过 18 个电子。

电子在一定的轨道上运动时，本身有一定的能量，在正常状态下，也不吸收能量，也不向外辐射能量，电子的位置愈处于外层，能量愈大，这些不同能量的状态，称为能级。电子由一层跳到另一层，将释放或吸收能量。当从外层跳到内层时，是由高能级过渡到低能级，原子放出能量，放出的能量即为电磁辐射。电子由内层跳到外层，即由低能级过渡到高能级，需吸收外界能量，这种现象叫原子的激发。所以，使电子脱离原子，需给予能量，使电子脱离原子的过程叫

原子的电离。

原子核的构成是比其还小的基本粒子——中子和原子，一般统称核子。

质子是带正电荷的基本粒子，质量等于 $1.673 \times 10^{-24} \text{g}$ ，中子是不带电的粒子，质量为 $1.673 \times 10^{-24} \text{g}$ 。在原子核内，质子与中子是靠一种特殊的结合力吸引在一起的，这种结合力称为核力。核力的特点是：只能在 $3 \times 10^{-13} \text{cm}$ 的原子核范围内起作用。不同元素的原子核具有不同数量的质子和中子，如氢原子核就是 1 个质子，氦原子核由 2 个质子和 2 个中子构成，碳原子核由 6 个质子、6 个中子构成，而这三个元素的原子量恰好是 1、4、12，可见，任何一种化学元素的原子量的整数，就是该元素原子核内包含的质子与中子的数量总和。每一个原子核带有等于质子数的正电荷 Z ，即原子核所带的正电荷数等于周期表中的原子序数。

四、天然放射性同位素

所谓同位素就是原子序数 Z 相同（可以认为，在元素周期表上的位置相同）而质量数不同的元素，也就是质子数相同而中子数不同的元素。所以同位素的化学性质是相同的，只是在物理性能方面有所差异。在放射化学中，用一定格式的符号表示同位素如 ${}_Z X^A$ ， X 则是元素的代称， A 为原子量， Z 为核中质子数。质子用 ${}_1^1\text{P}$ 表示，中子用 ${}_0^1\text{n}$ 表示。例如 ${}_6^{12}\text{C}$ ， ${}_8^{16}\text{O}$ ， ${}_{92}^{238}\text{U}$ 等。

例如，氢有三种同位素：氕（ ${}_1^1\text{H}$ ），氘（ ${}_1^2\text{H}$ ）与氚（ ${}_1^3\text{H}$ ）；铀有 ${}_{92}^{234}\text{U}$ ， ${}_{92}^{235}\text{U}$ ， ${}_{92}^{238}\text{U}$ 。由于原子物理的发展，用人工方法来制造某种元素的同位素。例如用中子轰击钴（ ${}_{27}^{59}\text{Co}$ ）可获得放射性钴（ ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ）。到目前为止，在世界上已知的元素只有 100 多种，然而在地球上天然存在的和人工制造的同位素已经超过 1000 多种。进一步研究证明，大多数元素都是由若干种天然同位素不同比例混合而成，如氧中有 99.758% 的 ${}_8^{16}\text{O}$ ，0.037% 的 ${}_8^{17}\text{O}$ 和 0.2039% 的 ${}_8^{18}\text{O}$ 。

在化学上，原子量以氧单位为单位制，但是氧元素实际上包括三种同位素，在物理学上，为了更确切，用自然氧元素最多的一种同位素 ${}_8^{16}\text{O}$ 的原子量的 $1/16$ 为单位，这就是原子的质量单位。一个原子质量等于 $1.6598 \times 10^{-24} \text{g}$ ，比氧单位略小。本文涉及到的原子量都属物理学的原子量，提到的质量未注明单位就表示以原子质量单位为单位。

1896 年，实验发现了铀以及铀的化合物能释放出一种穿透力很强但肉眼看不见的射线，这种性质叫做天然放射性，随即又发现钍 232，也可自行放出不可见的射线，以后又发现钋 210、镭 226。经过进一步实验证明，这种不可见的射线就是钋、镭、钍、铀的原子核本身自行释放出来的，具有这种释放出射线性质的元素就称为放射性同位素。原子序数从 84 起的所有元素都具有天然放射性，原子序数比 84 小的某些元素也具有天然放射性。

对镭释放的射线的电学试验中发现有三种不同性质的射线，向阴极电场偏转的称（甲种射线） α 射线，向阳极偏转的是 β 射线（乙种射线），不受电场影响的是 γ 射线。

α 射线是氦（ ${}_2^4\text{He}$ ）原子核流，它带两个正电荷，质量等于 4 个原子质量单位，是电子质量的 7000 倍，动能为 4 ~ 10 MeV，速度约 109 cm/s。运动的 α 射线在强电场或磁场中会发生偏转。 α 射线的电离性很强，穿透能力很弱，在空气中的射程仅几个厘米，一张普通的纸就可以有效防护，但是当 α 射线进入和其他生物体后，将造成很大的损伤，因为当 α 射线通过物质时，很快的把自身的能量传给电子，使其电离，直至能量全部耗尽为止，此时 α 射线即与物质中的电子结合而变成氦原子。

β 射线是原子核释放出的高速电子流，其速度接近光速，初速度约为 2000000 ~ 3000000 km/s，在空气中的射程有几米，所以穿透能力高于 α 射线，电离程度低于 α 射线。 β 射线是由于原子核内核子互相转化的结果，当中子转化为质子时，放出一个负电子，原子核的电

荷增加一个单位,相反当质子转化为中子时放射出一个正电子,因此,原子核的电荷减少一个单位。

β 射线与 α 射线不同, α 射线中每个粒子的能量都相同, β 射线中的电子能量大小不一,其粒子数 N 按能量连续分布,称为能谱。能谱曲线有最大能量 E_{\max} ,在能量约为 $1/3E_{\max}$ 处有一高峰,一般图表所给出的 β 能量都指 β 射线的最大能量 E_{\max} 。

对具有 β 放射性的所有同位素,其 β 射线的谱线的形状是相同的, β 粒子的最大能量是表示每种放射性同位素的一种特征数值。

γ 射线与 x 射线、可见光、紫外线均是属于电磁辐射,所不同者,它是从原子核内释放出来的,而且能量较高,一般在几十万 eV 以上,而一般的可见光能量仅几个 eV,所以 γ 射线是一种不带电的高能光子流,它的速度等于光速,为 $30 \times 10^4 \text{ km/s}$ 。

γ 射线的电离能力与 α 、 β 射线相比为最小,而穿透能力最强,比 β 射线大 50 ~ 100 倍,比 α 射线高 10000 倍,在空气中射程可达几百米。

放射性同位素释放射线的过程是原子核由不稳定状态向稳定状态转变过程,这种转变称为原子核的衰变或称蜕变,它具有自身的规律性。

原子核放射 α 射线叫 α 衰变,放射 β 射线称 β 衰变,衰变完成后,就形成了新的原子核。任何放射性元素的衰变都遵循下式:

$$N = N_0 e^{-0.693t/T}$$

式中 e ——常数 2.718;

T ——半衰期;

N_0 ——放射性元素的原子数;

t ——衰变时间,s;

N ——衰变后放射性元素的原子数。

半衰期 T 是放射性原子的数目衰减一半所需的时间,不同的元素 T 不同,如 1g 镭,经过 1590 年就剩下 0.5g 镭,再过 1590 年则剩下 1/4g。

在单位时间内发生衰变的原子核愈多,放射性就愈强。国际单位制中表示放射性强弱的单位为 Bq,物质每秒有 1 个原子衰变定义它的放射强度为 1Bq。过去常用 Ci 作为放射性强度单位,一块放射性物质每秒有 3.7×10^{10} 个原子衰变,强度称之为 1Ci。

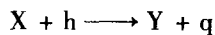
新老单位换算为:

$$1\text{Ci} = 10^3 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1\text{mCi} = 10^3 \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$$

五、核反应与人工放射性

用快速粒子轰击任何靶核而产生新核(核产物)及另一粒子的过程叫核反应,用公式表示:



式中 X ——任意一种核;

h ——被加速的粒子;

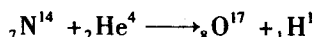
Y ——核 X 发生核反应后的产物;

q——反应的结果可能有 $q_1, q_2 \dots$, 许多粒子被释放出来。

q 不是放出一个粒子, q 可以是质子、中子、 γ 粒子、电子、光子等。如果反应生成的核 Y 及 q 的质量相差不大, 这种反应就叫做核裂变。

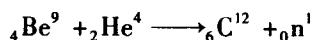
h 是被加速的粒子, 它可以是质子、中子、氘核也可以是光子。

天然放射物的 α 射线所产生的核反应首次是用 α 射线轰击氮核 (${}_7\text{N}^{14}$) 而产生快速质子, 反应式为:



式中 N——氮核;
He——氦核;
O——氧核;
H——氢核。

研究表明用天然 α 射线轰击各种元素的原子, 发现原子序数小于 19 的轻元素, 绝大多数都发生核反应而放出其他粒子, 例如下式的中子, 就是用 α 射线轰击铍的原子核而产生的。



和化学反应相类似, 并非所有的核反应的结果都放出大量能量, 有些核反应是吸收能量的, 如 $\text{N}^{14}(\alpha \cdot p)\text{O}^{17}$ 反应。



这一反应后粒子的动能比入射粒子 α 的动能还要小 1.19MeV。

实际上, 天然放射性所产生的核反应的几率是很小的, 首先原子核在原子中占很小的部分, 原子核的截面积只有原子的一亿分之一, 打中原子核比较困难, 另外 α 射线带两个正电荷而原子核也带正电, 因此原子核与 α 射线之间存在排斥的库仑力, α 射线要克服这个库仑力需足够的能量, 因此原子序数大于 20 的元素, 天然 α 射线将不能产生核反应。为了满足科研、生产的需要出现了人工加速粒子产生的核反应, 使核反应的可能性增加。

质子只带一个正电荷, 与原子核之间的斥力仅为 α 射线的二分之一, 因此更易于打进原子核, 而产生核反应。

用高能质子轰击锂的靶子, 当质子能量在 30000eV 时就开始了核反应, 反应方程式为:

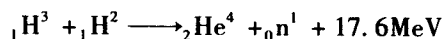


从方程式可知, ${}_0\text{n}^1$ 粒子的能量大于入射粒子的动能, 能量很显然是原子核释放出来的。

上式中的能量用 Q 表示, +Q 表示反应将释放能量, -Q 则吸收能量, 释放出的能量表现为反应产物的动能或产物原子核的激发态。

1. 氘核引起的核反应

人工加速的氘核, H^2 (重氢核 D) 轰击氚核, H^3 (超重氢核 T) 会产生 $\alpha - n$ 反应。反应方程式如下:



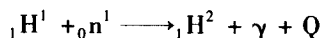
这个反应也写做 $\text{T}^3(\alpha \cdot n)\text{He}^4$ 反应。氚 T 是氢的同位素, 有时也写做 ${}_1\text{H}^3$ 。氘 D 也是氢的同位素。需要指出的是 $\text{T}(\text{D} - n)\text{He}$ 反应是强烈放热, 有显著的中子产额, 因此被作为产生

中子源的另一种方法。第一种方法前面在 $\text{Be}^9(\alpha \cdot n)\text{C}^{12}$ 反应已经讲到了,除此之外,产生中子源的方法还很多,不再赘述。

2. 中子引起的核反应

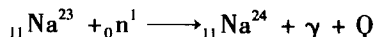
因为带电粒子和核之间有着很大的斥力,粒子不容易接近核。而中子不带电,不受核电荷的排斥。因此它是用来轰击原子核的很好的“炮弹”,即使一次没有打中原子核,它也会在物质里东碰西撞,最后总要闯进原子核里去,从而引起核反应。

当中子的能量不大时,俘获中子的核反应的几率较大。靶核俘获中子后,一般放出 γ 射线,这样的核反应即是最常见的 $(n-\gamma)$ 反应。例如慢中子(能量小于 1000eV)被氢原子核俘获的反应:



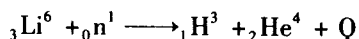
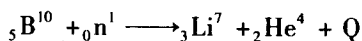
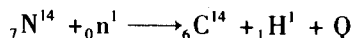
因为油层含有较多的氢原子,所以这个反应对放射性测井来说是最有意义的。

又如:

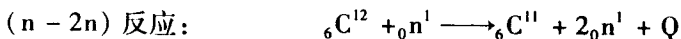


除 $(n-\gamma)$ 反应外,俘获中子的核反应也有少数是别种类型的,如:

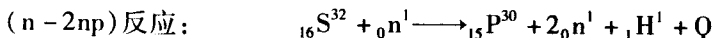
$(n-p)$ 反应:



利用快中子(能量大于 100 个 eV 以上)轰击靶核,也能产生核反应,例如:



能量更高的中子引起的核反应中,还会产生三个或三个以上的中子或相当的粒子,例如:



非常重的原子核,俘获中子后,形成不稳定的同位素,常常不是发射一个小粒子,而是分裂成质量差不多大小的裂块。这个过程叫做“裂变”,我们简称为 $(n-f)$ 反应。例如铀 235 裂变时生成的放射性同位素就有 170 种以上。

3. γ 射线和 β 射线与核的作用

高能量的 γ 射线,由于它和核子之间有电磁相互作用,因而也能引起核的反应,但效率不如质子、中子等那样高。

电子和核子之间只有电磁作用,电磁力比起核力来是小的非常多的,因此不易引起核反应,产生反应的效率极低。

4. 人工放射性

在研究人为的核反应的过程中,人们发现用射线轰击原子核还可以产生放射性同位素。这些具有放射性的同位素产物也能释放出各种类型的射线,例如:用中子轰击钴⁵⁹,则形成钴⁶⁰而能释放出 γ 射线。



Co_{60} 源在工业应用上很重要,它所放出的 γ 射线的能量为1.17MeV和1.33MeV,半衰期为5.3年。

对于所有元素,都能用人工方法得到他们的放射性同位素。

人工放射性的发现对人类具有重大的深远意义。一方面证明了人们控制大自然得到了进一步的发展;另一方面在各个科学和生产以及生活领域中为广泛利用放射性同位素创造了有利的条件。

第二节 射线和物质的相互作用

α 、 β 射线是带电粒子流,中子是一种粒子流但不带电荷, γ 射线是电磁辐射,它们与物质相互作用而产生的结果不同。

一、带电粒子与物质的相互作用

因静电作用, α 射线是吸引电子, β 射线是排斥电子,可以把物质中原来被束缚的电子打出来,使它获得足够的能量,变成自由电子,失去电子的原子成为离子,它与脱出的电子称为离子对,使物质的原子变成离子的现象叫电离。这样的电离过程,称为直接电离。若束缚电子所获能量不足,只是使之从内层轨道跳到外层即从低能跳到高能级,这个过程叫激发。带电粒子与物质相互作用后,由于电离和激发而损失了能量,称为电离损失。很显然,入射粒子的电数愈大,带电粒子与物质原子的静电相互作用越大,电离损失越大,而入射粒子速度越小,它和物质原子作用的几率就大,电离损失也越大,所以带电粒子的电离损失是与入射粒子的电荷数、入射速度、被作用物质的密度、原子序数大小密切相关。

带电粒子在物质中损耗掉全部能量后,粒子静止。带电粒子在物质内产生到最后停止的距离,称为该粒子在物质中的射程,单位为cm。

表1-2列出了 α 射线在3种物质中的射程

表1-2 α 射线在物质中的射程

单位:cm

吸收物质	0.5MeV	2.0MeV	5.0MeV	10.0MeV
空气	0.33	1.7	3.5	10.6
铝	0.00018	0.0006	0.0019	0.0055
铅	0.00011	0.0004	0.0012	0.0032

β 射线在空气中的射程随能量大小的不同,从几毫米到几米不等。射线通过物质时,电子在电离碰撞的过程中损失部分能量,在带正电的原子核的电场影响就形成明显的偏转,偏转时若能量改变,就可能伴生辐射,称韧致辐射。假如能量不变只是偏转方向改变,称库仑散射。入射粒子带电量愈大,辐射损失就愈大,即核的库仑场的作用力愈大,而入射粒子的质量越小,辐射损失也越小。可见辐射损失对高能电子穿过重物质具有很大的意义,若要防护高强度的 β 源,屏蔽厚度不仅要满足阻止 β 射线的通过而且要考虑由于韧致辐射产生的 γ 射线。

例如把 P^{32} 放在一个玻璃瓶里,放出的 β 射线能量是1.72MeV,瓶的厚度可以达到防护目的,但由于韧致辐射放出 γ 射线,好像一颗伽马源,所以玻璃瓶外还要屏蔽铅。

多次库仑散射引起 β 射线运动方向的改变将影响到射程、强度的计量,因为电子的射线不象 α 射线为一条直线,而是弯弯曲曲、涨落较大的全射程,为了防止散射对测量的影响,周围物质尽量采用低原子序数的物质。像铅、有机玻璃。

由于 β 射线谱的连续及其粒子的散射现象, β 射线的射程与 α 射线不同,它不能用一个定值表示,通常定义 β 射线的射程在吸收曲线的延长线与横轴交点处的 R 值。

图1-1表示了 β 射线的吸收曲线。曲线1是单能电子1.9MeV。曲线2是具有连续能谱的 β 射线 $E_{\max} = 1.9\text{MeV}$ 。

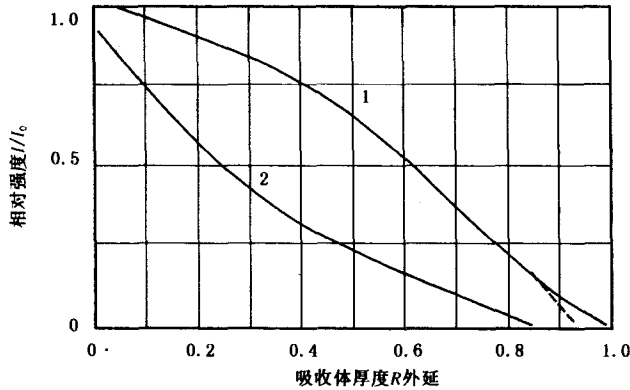


图1-1 β 射线的吸收曲线

电子能量在 $0.5\text{MeV} < E_{\max} < 6\text{MeV}$ 范围内, β 射线的吸收有: $I = I_0 e^{-ud}$ 的关系。

其中: I_0 是电子射入物质前的强度, I 是穿过厚度为 d 的物质后的 β 射线强度,如 d 的单位是 cm ,则 u 就是 $1/\text{cm}$, I 与 I_0 的单位相同。此时 d 称为线性厚度, u 是线性吸收系数。

当把 $I = I_0 e^{-ud}$ 改为 $I = I_0 e^{-u_m d_m}$, ρ 是密度,单位是 g/cm^3 ,则 $I = I_0 e^{-u_m d_m}$, u_m 称为质量吸收系数,单位是 cm^2/g , d_m 称为质量厚度,单位为 g/cm^2 。

二、不带电粒子与物质的相互作用

以下重点讨论 γ 射线与物质的相互作用。 γ 射线在通过物质时,主要产生以下现象:光电效应、康普顿散射及形成电子对。

高能级光子还可以产生核反应,前面曾介绍过,这里不再讨论。

1. 光电效应

光既是电磁波又具有粒子性。即 γ 射线和 β 射线相似,可以认识为一种粒子流,此种粒子称为光子。光子的能量与频率 γ 成正比, $E_\gamma = h\gamma$,比例系数 h 称为普朗克常数。当一个光子和原子碰撞时,它可能将其所有的能量交给原子中的一个电子,使它脱离原子而运动,光子被整体吸收,由于这种作用而释放出来的电子主要是 K 壳层上的电子,也可以是 L 层或其他壳层。被释放出来的电子称为光电子,这样的效应叫光电效应。如图1-2所示。

设 E_{bi} 为从 L 壳层打出一个电子所需的能量(原子的电离能),则光电子所带的能量由下式表示:

$$E_e = h\gamma - E_{\text{bi}} \quad (i = k \cdot l \cdots) \quad (1-1)$$

光电子的发射方向在 E_e 值小时基本和入射光子的方向垂直,在 E_e 大时,则和入射光子方