

分析化学手册

〔美〕 J.A.迪安 主编



科学出版社

www.sciencep.com

第 11 章 放射化学方法

11.1 概述	11.3
11.1.1 放射性衰变的模式	11.3
表 11.1 放射性衰变的几种模式	11.3
表 11.2 核素表	11.4
11.2 放射性活性单位	11.13
11.2.1 放射性衰变	11.13
表 11.3 放射性核素的衰变	11.13
11.2.2 半衰期	11.15
表 11.4 恒速产生的核素增长	11.16
11.3 放射性测量	11.16
11.4 检测器	11.17
11.4.1 闪烁计数器	11.17
11.4.2 比例计数器	11.17
11.4.3 流动放射性检测器	11.17
11.5 放射性测量中的统计学	11.18
11.5.1 分数误差	11.18
表 11.5 相对误差常数	11.18
11.5.2 计数时间分布	11.18
11.5.3 预置时间与预置计数	11.18
11.6 液体闪烁计数(LSC)	11.19
表 11.6 液闪计数法可以测定的同位素	11.19
表 11.7 LSC 闪烁剂特性	11.21
11.6.1 液闪溶剂	11.21
表 11.8 闪烁溶剂的特性	11.22
11.6.2 样品管	11.22
11.6.3 颜色及化学猝灭	11.22
11.6.4 仪器	11.22
图 11.1 液体闪烁计数器的能量传递方框图	11.23
11.6.5 契伦科夫辐射的计数	11.23
11.7 放射性示踪剂的应用	11.24

11.8 同位素稀释分析	11.24
11.9 活化分析	11.24
11.9.1 原理.....	11.24
表 11.9 中子活化分析的推定灵敏度.....	11.26
11.9.2 快中子活化分析.....	11.29
表 11.10 可用 14MeV 中子活化分析的元素	11.30
11.9.3 仪器方法(非破坏性测定).....	11.30
图 11.2 锰-56 的 γ 能谱	11.30
11.9.4 放射化学分离.....	11.31
11.10 放射性安全事项	11.31
11.10.1 放射性核素的辐射特性	11.31
11.10.2 放射性物质的标志	11.31
11.10.3 放射性物质的操作	11.32
11.10.4 放射性物质的贮存	11.32
参考书目.....	11.32

11.1 概 述

放射活性是伴随有放射性辐射产生的原子自发裂变. 许多放射性元素是非放射性元素的同位素(且有相同原子序数但原子质量不同), 某原子的放射性同位素与其非放射性同位素一样含有相同的核外电子分布, 通常的化学及生物行为也一致, 因此在实验、临床诊断及分析过程中可用放射性同位素作为示踪剂, 放射性同位素与非放射性同位素的区别在于其原子核中的中子数不同, 而质子数及电子数相同(有些元素有两个以上的同位素).

11.1.1 放射性衰变的模式

所有放射性核素都存在辐射出一种或多种放射性的放射衰变现象, 不同衰变模式列于表 11.1, 多数情况下衰变后产生的核处于激发态(电子捕获, EC), 通过辐射出伽马(γ)辐射后而趋于稳定, 有时此过程很快发生, 而有时 γ 辐射会延后产生甚至几天后才产生. 后一种情况称为异质转换, 相应核称为亚稳核, 在质量数后标以 m.

表 11.1 放射性衰变的几种模式

模 式	反 应	辐 射
阿尔法(α)	$^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + ^4\text{He}$	α
负电子(β^-)	$^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \beta^-$	β^-
正电子(β^+)	$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \beta^+$	β^+
电子俘获(EC)	$^{188}\text{Pt} \rightarrow ^{188}\text{Ir} + \text{X 射线}$	铀 X 射线
伽马(γ)	$^{110\text{m}}\text{Ag} \rightarrow ^{110}\text{Ag} + \gamma$	γ

α , β 及 X 射线辐射具有特征能量, 这些能量可由合适方法作为光子峰而检测, β 粒子为带负电荷的高能电子(负子)或带正电荷的电子(正子), 其动态能量在一定范围内分布, 最大的能量称为其 $E_{\max}$, 各核的 $E_{\max}$ 列于表中, 例如由 ^{32}P 裂变产生的粒子能量分布范围为 $0 \sim 1.71\text{MeV}$, 平均能量为 0.69MeV .

所有正子的衰变均会因其裂解而产生“湮灭辐射”, 此辐射能量为 0.511MeV , 而每个正子裂解产生两个光子. 电子捕获或内转换过程均伴随有 X 射线产生.

辐射正子的原子可由捕获一个其 K 轨道电子(K 捕获或内转换)而衰变, 多余能量由 γ 辐射释放. 其子元素(原子序数比其母元素小 1)则有一空的 K 轨道, 当 L 或 M 层电子跃迁至 K 轨道时产生出子元素特征 X 射线辐射.

核素衰变常生成处于激发非稳态的子核素, 在子核素由激发态转变至低能态时, 一般都会以 γ 辐射形式的电磁能来释放能量. 这种变化是一种异构转换, 因为核素衰变不涉及原子质量及原子序数变化.

某些放射性核素及其特性列于表 11.2, 在生物器官中天然存在的各种元素的放射性

同位素,如 ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S 及 ^{131}I 等,在生物及医学研究中常用做示踪剂或作为标记化合物以替代含这些元素的处于基态的化合物。

表 11.2 核素表

表头解释

核素:每一核素以元素名称及原子质量数 A 标示, A 为质子数与中子数之和,质量数后带 m 标志的,如 ^{69m}Zn ,表示为亚稳同位素,质量数后以“ $*$ ”标示出天然放射性核素,数值后括号中的数据表示为所列数值最后一位的标准偏差。

半衰期:时间单位缩写如下: y =年、 d =天、 h =小时、 m =分、 s =秒;

天然丰度:地壳中天然存在的一同位素的“原子百分比”;

热中子吸收截面:简称为截面,表示指定核素吸收热中子(能量 $\leq 0.025\text{eV}$)而形成新核素的容易程度,此处所列吸收截面单位为巴恩斯(Barns)($1\text{b}=10^{-24}\text{cm}^2$),若反应不为 (n,γ) 反应,则另行标示。

主要辐射:列出辐射的主要形式,并在括号中标出辐射的能量(MeV),不同符号代表的衰变模式分别为

α α 粒子辐射 K 电子捕获
 β^- β 粒子(负子) IT 异构转移
 β^+ 正电子 X 指定元素的 X 射线(例如 O-X 氧的 X 射线)
 γ 伽马辐射

β,β^+ 辐射的 $E_{\max}$ 值亦予列出,除有特定用途之外,非常不重要的辐射类型和能量均予略去,若需要了解衰变的详细情况,请参阅相关文献。

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
氢	1		99.985(1)	0.332	
	2		0.015(1)	0.0005	
	3	12.33(6)y			β^- (0.0186)
铍	7	53.29(7)d			K, γ (0.478)
	9		100	0.009	
	10	$1.51(6)\times 10^6\text{y}$			β^- (0.555)
硼	10		19.9(2)	3837(n, α)	
	11	20.385(20)m			β^+ (0.961)
	14	5730(40)y			β^- (0.156)
碳	13	9.965(4)m			β^+ (1.190); γ (0.511)
	14		99.63(2)	1.81(n, p)	
	16	7.13(2)s			β^- (10.40, 4.27); γ (6.13)
氧	19	26.91(8)s			β^- (4.60); γ (0.197, 1.37)
	18	109.77(5)m			β^+ (0.635); K, O-X
	20	11.00(2)s			β^- (5.41), γ (1.63)
氟	22		8.82	0.04	
	23	37.24(12)s			β^- (0.438); γ (0.439)
	22	2.6088(14)y			β^+ (0.545, 1.83); K Ne-X, γ (1.275)
钠	23		100	0.53	
	24	14.9590(12)h			β^- (1.39); γ (2.75, 1.37)
	25		10.00(1)	0.3	
镁	27	9.46(1)m			β^- (1.75), γ (0.84, 1.01)
	28	20.91(3)h			β^- (0.46); γ (1.34, 0.94, 0.40, 0.031)
	27		100	0.235	
铝	28	2.2414(12)m			β^- (2.85); γ (1.780)
	30		3.10(1)	0.11	
	31	153.3(3)m			β^- (1.48); γ (1.27)
硅	32	172(4)y			β^- (0.213)

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
磷	31		100	0.19	
	32	14.262(14)d			β^- (1.71)
	33	25.34(12)d			β^- (0.25)
硫	34		4.21(8)	0.27	
	35	87.51(12)d			β^- (0.167)
	36	3.08×10^5 y		100	β^- (0.714)
	37	5.05(2)m			β^- (4.7, 1.6); γ (3.09)
氯	38	170.3(7)m			β^- (1.0, 3.0); γ (1.94)
	35		75.53(5)	44	
	36	$3.01(2) \times 10^5$ y			β^- (0.71); K, S-X
	37		24.23(5)	0.4	
氩	38	37.24(5)m			β^- (4.81); γ (2.17, 1.60)
	39	55.6(2)m			β^- (1.91, 2.18, 3.45); γ (1.27, 0.25, 1.52)
	37	35.04(4)d			K, Cl-X
	41	1.822(2)h			β^- (1.20, 2.49); γ (1.29)
钾	* 40	$1.28(1) \times 10^9$ y	0.0117(1)	70	β^- (1.34); K, Ar-X; γ (1.46)
	41		6.730(3)	1.2	
	42	12.360(3)h			β^- (3.52, 1.97); γ (1.46)
	43	22.3(1)h			β^- (0.83, 1.22, 1.82); γ (0.618, 0.373, 0.39, 0.59)
钙	44		2.086(5)	0.7	
	45	163.8(8)d			β^- (0.255)
	47	4.536(2)d			β^- (1.98, 0.67); γ (1.30)
	49	8.71(2)m			β^- (1.95); γ (3.10, 4.1)
钪	46	83.81(1)d			β^- (0.357); γ (1.12, 0.889); Ti-X
	46m	18.75(4)s			γ (0.142)
钛	45	3.08(1)h			β^+ (1.044); K, Sc-X
	50		5.4(1)	0.14	
	51	5.76(1)m			β^- (2.14); γ (0.320, 0.928)
钒	48	15.973(3)d			β^+ (0.696); γ (0.983, 1.312)
	52	3.75(1)m			β^- (2.47); γ (1.434)
铬	51	27.702(4)d			K, V-X; γ (0.32)
	52		83.7(1)	0.8	
锰	52	5.591(3)d			β^+ (0.575), γ (0.744, 0.935, 1.434)
	54	312.1(1)d			γ (0.835)
	55		100	13.3	
	56	2.5785(2)h			β^- (2.84), γ (0.847, 1.81, 2.11)
铁	55	2.73(3)y	2.1(1)		K, Mn-X
	56		91.72(15)		
	59	44.496(7)d			β^- (0.273, 0.475), γ (1.10, 1.29)
	57	271.80(5)d			K, Fe-X; γ (0.136, 0.122)
钴	58	70.82(3)d			K, β^+ (0.474), Fe-X; γ (0.811)
	59		100	19	
	60	5.2714(5)y			β^- (0.318); γ (1.173, 1.332)
	60m	10.47(4)m			β^- (1.55); γ (0.059)
镍	63	100(2)y			β^- (0.067)
	64		0.926(1)	1.5	

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
镍	65	2.520(1)h			β^- (2.14, 0.65, 1.02), γ (1.48, 0.367, 1.12)
铜	63		69.17(2)	4.5	
	64	12.701(2)h			β^- (0.571); β^+ (0.657); Ni-X; γ (0.511)
	66	5.10(1)m			β^- (2.63), γ (1.039)
锌	64		48.6(3)	0.46	
	65	243.9(1)d			K, β^+ (0.325), Cu-X; γ (1.12)
	68		18.8(4)	1.0	
	69m	13.76(2)h			IT, Zn-X, γ (0.439)
	69	55.4(9)m			β^- (0.90)
镓	67	3.261(1)d			K, Zn-X; γ (0.093, 0.184, 0.30)
	69		60.108(6)	1.9	
	70	21.14(3)m			β^- (1.65); γ (0.173)
	71		39.892(6)	5.0	
	72	14.10(2)h			β^- (3.17); γ (0.835, 0.63, 0.894)
锗	74		35.94(2)	0.3	
	75	82.78(4)m			β^- (1.19), γ (0.265, 0.199)
	75m	47.7(5)s			γ (0.139)
	77	11.30(1)h			β^- (2.2), γ (0.21, 0.268, 0.368, 0.417, 0.568, 0.632, 0.73)
砷	75		100	4.5	
	76	26.32(7)h			β^- (2.97), γ (0.559, 0.657)
	78	90.7(2)m			β^- (4.1), γ (0.614, 0.70, 0.83, 1.31)
硒	74		0.89(2)	30	
	75	119.779(4)d			K, γ (0.265, 0.136, 0.280, 0.121, 0.401); As-X
	77m	17.36(5)s			γ (0.161)
	80		49.6(3)	0.5	
	81	18.5(1)m			β^- (1.58); γ (0.28)
	81m	57.28(5)m			γ (0.108)
溴	79		50.69(5)	8.5	
	80	17.68(2)m			β^- (1.997); K, β^+ (0.85), Se-X; γ (0.616, 0.667)
	80m	4.42(1)h			IT, Br-X; γ (0.037)
	81		49.31(5)	3	
	82	95.30(2)h			β^- (0.444); γ (0.554, 0.619, 0.698, 0.777, 0.818, 1.04, 1.32, 1.48)
氪	81m	13(1)s			IT, Kr-X; γ (0.19)
	84		57.3(3)	0.10	
	85	10.756(18)y			β^- (0.67); γ (0.514)
	85m	4.480(8)h			β^- (0.84); γ (0.151, 0.305)
铷	85		72.17(1)	0.9	
	86	18.63(2)d			β^- (1.78, 0.71); γ (1.08)
	86m	61.0(2)s			γ (0.56)
	87		27.83(1)	0.12	
	88	17.8(1)m			β^- (5.080); γ (1.863, 0.898)

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/McV
铯	85	64.84(2)d	100	1/3	K,Rb-X; γ (0.514)
	85m	67.63(4)s			γ (0.150,0.231)
	87m	2.804(3)h			IT, γ (0.388)
	90	29.1(3)y			β^- (0.546)
钷	89		100	1/3	γ (0.909)
	89m	16.06(4)s			γ (0.202,0.482)
	90m	3.19(1)h			β^- (0.89,0.396); γ (0.724,0.756)
铈	95	64.02(4)d	100	1	β^- (1.91); γ (0.743)
	97	16.90(5)h			
铈	93		100	1	γ (0.871)
	94m	6.26(1)m			β^- (0.160); γ (0.765)
	95	34.97(3)d			
钼	98		24.13(6)	0.51	β^- (1.214);Tc-X; γ (0.181,0.740,0.780)
	99	2.7477(4)d			β^- (2.23); γ (0.191,0.51,0.59,0.70,0.89,1.02,1.18,1.39,1.56,2.08)
	101	14.6(1)m			K,Mo-X; γ (0.766,0.84)
钨	95	20.0(1)h	5.54(2)	0.2	K,Mo-X; γ (0.778,0.813,0.850,1.12)
	96	4.28(6)d			K,Mo-X
	97	$2.6(4) \times 10^6$ y			β^- (0.292)*
	99	$2.111(12) \times 10^5$ y			IT,Tc-X; γ (0.141)
	99m	6.01(1)h			
钨	96		31.6(2)	1.4	γ (0.216,0.324)
	97	2.9(1)d			
	102				β^- (0.12,0.22); γ (0.497)
	103	39.26(1)d			β^- (1.187); γ (0.469,0.724)
铪	105	4.44(2)h	100	144	
	103				IT,Rh-X; γ (0.129)
	103m	56.12(1)m			β^- (2.44); γ (0.56)
	104	42.3(4)s			γ (0.051)
	104m	4.34(5)m			β^- (0.568,0.249); γ (0.306,0.319)
钨	105	36.35(6)h	27.33(3)	0.29	β^- (3.53); γ (0.512,0.622)
	106	29.80(8)s			
	106				γ (0.321)
	107m	21.3(3)s			
	108				β^- (1.028);Ag-X; γ (0.088,0.311,0.636)
银	109	13.7(1)h	51.839(5)	35	γ (0.188)
	109m	4.69(1)m			
	107				β^- (1.64); β^+ (0.90); γ (0.434,0.511,0.614,0.632)
	108	2.37(1)m			
	109				γ (0.088)
镉	109m	39.6(2)	48.161(5)	89	β^- (2.89); γ (0.658)
	110	24.6(2)s			β^- (0.087,0.53);IT, γ (0.658)
	110m	249.76(4)d			γ (0.159,0.247)
	111m	48.6m			
	113				
			12.22(8)	20 000	

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
镭	115	53.46(10)h			β^- (1.11, 0.58); In-X; γ (0.336, 0.528)
	115m	44.6(3)d			β^- (1.62); γ (0.934, 1.29, 0.485)
	117	2.49(4)h			β^- (2.33); γ (0.273, 0.314, 0.434, 1.303, 1.577)
铀	111	2.8049(1)d			K, Cd-X; γ (0.172, 0.247)
	113m	1.6582(6)h			IT, In-X; γ (0.393)
	114	71.9s			β^- (1.99, 0.67); K, β^+ (0.40), Cd-X, γ (1.30)
	* 115	$4.41(25) \times 10^{14}$ y			β^- (0.495)
	116m	54.41(3)m			β^- (1.00); γ (0.417, 0.819, 1.09, 1.293, 1.509, 2.111)
锡	124		5.79(5)	0.1	
	125	9.64(3)d			β^- (2.35); γ (1.067, 0.811)
	125m		9.52(5)m		γ (0.325)
铈	121		57.36(15)	6	
	122	2.70(1)d			β^- (1.414, 1.980, 0.723); γ (0.564); K, Sn-X
	123		42.64(15)	3.3	
	124	60.20(3)d			β^- (2.301); γ (0.603, 1.69, 0.722)
	127	9.35(7)h			β^- (0.70); I-X; γ (0.360, 0.418)
铈	129	69.6(2)m			β^- (1.453, 0.989, 0.69); I-X; γ (0.460, 0.487)
	131	25.0m			β^- (2.14, 1.69, 1.35); I-X; γ (0.150)
	131m	30(2)h			β^- (2.46); IT, Te-X, I-X; γ (0.150, 0.774, 0.794)
	123	13.2(1)h			K, Te-X; γ (0.159)
	125	60.14(11)d			K, Te-X; γ (0.035)
铈	127		100	6.4	
	128	24.99(2)m			β^- (2.12); γ (0.441)
	129	$1.57(4) \times 10^7$ y			β^- (0.150); Xe-X; γ (0.038)
	131	8.04(1)d			β^- (0.806, 0.606); Xe-X; γ (0.364)
	132		26.9(5)	<5	
铈	133	5.243(1)d			β^- (0.346); Cs-X; γ (0.081)
	134		10.4(2)	5	
	136		8.9(1)	0.15	
	137	3.82(1)m			β^- (4.1); γ (0.455)
铈	133		100	28	
	134	2.062(5)y			β^- (0.658); γ (0.605, 0.796, 0.57)
	134m	2.91(1)h			IT, β^- (0.55), Cs-X; γ (0.127)
	137	30.1(2)y			β^- (0.514, 1.18); Ba-X; γ (0.662)
钡	135		6.59(2)	5	
	135m	28.7(2)h			IT, Ba-X; γ (0.268)
	137		11.23(5)	4	
	137m	2.552(1)m			IT, Ba-X; γ (0.662)
	138		71.70(9)	0.4	
	139	83.06(28)m			β^- (2.38); La-X; γ (0.166, 1.421)

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
钡	140	12.752(3)d			β^- (1.02, 0.83); La-X; γ (0.537)
镧	139		99.9098(2)	8.9	
	140	1.6781(3)d			β^- (2.164, 1.680, 1.365); γ (0.487, 1.596)
铈	138		0.25(1)	1	
	139m	54.8(10)			γ (0.746)
	140		88.43(10)	0.6	
	141	32.501(5)d			β^- (0.582); Pr-X; γ (0.145)
	142		11.13(10)	1	
	143	33.10(5)h			β^- (1.40); Pr-X; γ (0.293)
	144	284.893(8)d			β^- (0.316); Pr-X; γ (0.080, 0.134)
镨	141		100	12	
	142	19.12(4)h			β^- (2.164); γ (1.576)
	143	13.5(2)d			β^- (0.932)
钕	146		17.19(8)	2	
	147	10.98(1)d			β^- (0.810, 0.369); γ (0.090, 0.531)
	148		5.76(3)	4	
	149	1.72(1)h			β^- (1.5); γ (0.114, 0.211, 0.27)
	150		5.46(3)	1.5	
	151	12.44(7)m			β^- (2.0); γ (0.110, 0.174, 0.256)
铈	144	363(14)d			K, Nd-X; γ (0.477, 0.618, 0.696)
	146	5.53(5)y			K, β^- (0.795); Nd-X; γ (0.453, 0.75)
	147	2.6234(2)y			β^- (0.224); γ (0.122)
	148m	41.29(11)d			β^- (0.69); γ (0.550, 0.630, 0.727)
	149	53.08(5)h			β^- (1.064, 0.784); γ (0.286)
	150	2.68(2)h			β^- (3.260); γ (0.344, 0.83, 0.88, 1.165, 1.33)
钐	151	90(8)y			β^- (0.076); γ (0.022)
	152		26.7(2)	210	
	153	46.27(1)h			β^- (0.81); γ (0.103)
	154		22.7(5)	5	
	155	22.3(2)			β^- (1.53); γ (0.104)
铕	151		47.8(5)	5 900	
	152	13.54(1)y			K, β^- (1.492); β^+ (0.727) Gd-X, Sm-X; γ (0.122, 0.344, 0.779, 0.964, 1.086, 1.112, 1.408)
	152m	9.274(9)h			β^- (1.89); γ (0.122, 0.84, 0.96)
	153		52.2(5)	320	
	154	8.592(8)y			β^- (0.843); γ (0.123, 1.00, 1.274)
钆	158		24.84(12)	3.4	
	159	18.56(8)h			β^- (0.95); Tb-X; γ (0.363)
	160		21.86(4)	0.8	
	161	3.66m			β^- (1.61); γ (0.102, 0.315, 0.361)
铽	159		100	46	
	160	72.3(2)d			β^- (1.76, 0.87); γ (0.299, 0.879, 0.966)
铈	164		28.2(2)	2 000	
	165	2.334(6)			β^- (1.305); γ (0.095, 0.362)

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
铷	165m	1.257(6)m			β^- (1.04, 0.89); γ (0.108, 0.362, 0.514)
铈	165		100	64	
	166	26.80(2)h			β^- (1.85, 1.78); Er-X; γ (0.081)
铈	167m	2.269(3)s			γ (0.208)
	170		14.9(1)	9	
	171	7.52(3)h			β^- (1.49, 1.06); Tm-X; γ (0.112, 0.296, 0.308)
铥	169		100	125	
	170	128.6(3)d			β^- (0.968, 0.884); γ (0.084)
镱	168		0.13	11 000	
	169	32.022(8)d			γ (0.177, 0.198)
	174		31.8(4)	46	
	175	4.19(1)d			β^- (0.466); Lu-X; γ (0.114, 0.283, 0.396)
	176		12.7(1)	7	
	177	1.91h			β^- (1.40); Lu-X; γ (0.151)
镱	175		97.41(2)	18	
	176m	3.635(3)h			β^- (1.31); Hf-X; γ (0.0884)
	177	6.71(1)d			β^- (0.497); γ (0.113, 0.208)
铈	179		13.629(5)	65	
	179m	18.67(3)s			γ (0.217)
	180		35.1000(6)	10	
	180m	5.5(1)h			IT, Hf-X; γ (0.058, 0.215, 0.333, 0.444)
	181	42.39(6)d			β^- (0.408); Ta-X; γ (0.133, 0.346, 0.482)
铈	181		99.988(2)	21	
	182	114.43(3)d			β^- (1.713, 1.470); γ (0.068, 1.121, 1.189, 1.221)
	182m	15.84(10)m			γ (0.147, 0.172, 0.184)
铈	185	75.1(3)d			β^- (0.433); γ (0.125)
	186		28.6(2)	40	
	187	23.72(6)h			β^- (1.312, 0.622; Re-X; γ (0.480)
铈	185		37.40(2)	110	
	186	3.777(4)d			β^- (1.07, 0.933); K, W-X, Os-X; γ (0.137, 0.632, 0.768)
	187		62.60(2)	70	
	188	16.98(2)h			β^- (2.12, 1.96); Os-X; γ (0.155)
	188m	18.6(1)m			γ (0.092, 0.106)
铈	190		26.4(4)	8.6	
	190m	9.9(1)m			IT, Os-X; γ (0.187, 0.361, 0.502, 0.616)
	191	15.4(1)d			β^- (0.143); Os-X; γ (0.129)
	192		41.0(3)	1.6	
	193	30.5(4)h			β^- (1.13); Ir-X; γ (0.073, 0.139, 0.460)
铈	191		37.3(5)	750	
	192	73.831(8)d			β^- (0.672); γ (0.296, 0.308, 0.316, 0.468)
	193		62.7(5)	110	
	194	19.15(3)h			β^- (2.24); γ (0.328)
铂	195		33.8(3)	27	

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
铂	195m	4.02(1)d	25.3(5)	0.9	IT, Pt-X; γ (0.0311, 0.0991, 0.130)
	196				
	197m	95.41(18)m			IT, β^- (0.737); Pt-X, γ (0.279, 0.346)
	197	18.3(3)h	7.2(2)	4	β^- (0.719, 0.642, 0.451); Au-X, γ (0.077, 0.191)
	198				
	199	30.8(4)m			β^- (1.69); γ (0.475, 0.540) γ (0.393)
	199m	13.6(4)s			γ (0.393)
金	197		100	98.7	
	197m	7.73(6)s			IT, Au-X; γ (0.279)
	198	2.6935(4)d			β^- (1.371); γ (0.412, 0.676)
	199	3.139(7)d			β^- (0.296, 0.250, 0.462); Hg-X, γ (0.158, 0.208)
汞	196		0.15(1)	880	
	197	2.672(2)d			K, Au-X; γ (0.077, 0.191)
	197m	23.8(1)h			IT, K, Hg-X; γ (0.134)
	199		16.87(10)	2000	
	199m	42.6(2)m			γ (0.158, 0.375)
	202		29.86(20)	4	
	203	46.61(2)d			β^- (0.214); γ (0.279)
铊	205	5.2(1)m			β^- (1.7); γ (0.205)
	201	3.046(1)d			K, Hg-X; γ (0.135, 0.167)
	202	12.23(2)d			γ (0.439)
	203		29.524(9)	11	
	204	3.78(2)y			β^- (0.763); K, Hg-X
	205		70.476(9)	0.11	
	206	4.20(1)m			β^- (1.53)
铅	204m	67.2(3)m			IT, Pb-X, γ (0.375, 0.899)
	207m	0.805(10)s			γ (0.570, 1.064)
	209	3.253(14)h			β^- (0.645)
	210	22.3(2)y			α (3.72); γ (0.0465)
	212	10.64(1)h			β^- (0.569, 0.331); Bi-X; γ (0.239)
	214	26.8(9)m			β^- (0.59, 0.65, 1.03); γ (0.352)
	214				
铋	209		100	0.019	
	210	5.013(5)d			β^- (1.16); α (4.69, 4.65)
	212	60.55(4)m			β^- (2.25); γ (0.727), TI-X; (6.05, 6.09)
	214	19.9(4)m			β^- (3.26, 1.88, 1.51); γ (0.609); α (5.512, 5.448)
钋	208	2.898(2)y			α (5.11); K, Bi-X; γ (0.292, 0.571, 0.603, 0.862)
	209	102(5)y			α (4.88), I, Bi-X; γ (0.26)
	210	138.376(2)d			α (5.30); γ (0.803)
	212	298(3)ns			α (8.78)
	214	0.164(2)ms			α (7.69); γ (0.799)
	216	145(2)ms			α (6.78)
	218	3.10(1)m			α (6.00)

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
砷	207	1.80(4)h			K, $\alpha(5.76)$; $\gamma(0.588, 0.814)$
砷	208	1.63(3)h			K, $\alpha(5.641)$; Po-X, $\gamma(0.177, 0.660, 0.685)$
	209	5.41(5)h			K, $\alpha(5.65)$, Po-X, $\gamma(0.545, 0.782, 0.790)$
	210	8.1(4)h			K, $\alpha(5.52, 5.44, 5.36)$, Po-X, $\gamma(0.245, 1.181, 1.483)$
	211	7.214(7)h			K, $\alpha(5.87)$, Po-X, $\gamma(0.67)$
氧	220	55.6(1)s			$\alpha(6.29)$; $\gamma(0.550)$
	222	2.8235(3)d			$\alpha(5.49)$; $\gamma(0.510)$
镭	* 224	3.66(4)d			$\alpha(5.68, 5.45)$; Rn-X; $\gamma(0.241)$
	* 226	1600(7)y			$\alpha(4.78, 4.60)$; Rn-X; $\gamma(0.187)$
	* 228	5.75(3)y			$\gamma(0.135)$
铀	* 227	21.773(3)y			$\beta^-(0.046)$, $\alpha(4.95)$; $\gamma(0.086, 0.100, 0.160)$
	* 228	6.15(3)h			$\beta^-(2.18, 1.85)$; Th-X; $\gamma(0.339, 0.911, 0.969)$
钍	228	1.913(1)y			$\alpha(5.43, 5.34)$; Ra-X; $\gamma(0.084, 0.132, 0.167, 0.214)$
	* 230	$7.54(3) \times 10^4$ y			$\alpha(4.68, 4.62)$, Ra-X; $\gamma(0.068)$
	* 232	$1.405(6) \times 10^{10}$ y			$\alpha(4.01, 3.95)$, $\gamma(0.059)$
	233	22.3(1)m			$\beta^-(1.23)$, $\gamma(0.029, 0.087, 0.171, 0.453)$
	* 234	24.10(3)d			$\beta^-(0.199, 0.104)$; Pa-X; $\gamma(0.063, 0.093)$
镤	* 231	$3.276(11) \times 10^4$ y			$\alpha(5.06, 4.95, 4.73)$; $\gamma(0.027, 0.284, 0.300, 0.303)$
	233	26.967(2)d			$\beta^-(0.257, 0.568)$; $\gamma(0.312)$
	234m	1.17(3)m			$\beta^-(2.29)$; IT, U-X; $\gamma(0.765, 1.00)$
铀	233	$1.592(2) \times 10^5$ y			$\alpha(4.82, 4.78)$; Th-X; $\gamma(0.042, 0.055, 0.097, 0.119, 0.146, 0.164, 0.22, 0.291, 0.32)$
	* 234	$2.45(2) \times 10^5$ y			$\alpha(4.77, 4.72)$; Th-X; $\gamma(0.053, 0.121)$
	* 235	$7.038(5) \times 10^8$ y			$\alpha(4.40, 4.37, 4.22)$; Th-X; $\gamma(0.186)$
	236	$2.3415(14) \times 10^7$ y			$\alpha(4.49, 4.44)$; $\gamma(0.049)$
	* 238	$4.468(3) \times 10^9$ y			$\alpha(4.20, 4.15)$; $\gamma(0.050)$
	239	23.50(5)m			$\beta^-(1.21, 1.29)$; Np-X; $\gamma(0.044, 0.075)$
镎	236	$1.15(12) \times 10^5$ y			K, β^- ; $\gamma(0.160)$
	237	2.141×10^6 y			$\alpha(4.79, 4.77)$; Pa-X; $\gamma(0.029, 0.086)$
钚	236	2.87(1)y			$\alpha(5.77, 5.66)$; U-X
	238	87.74(4)y			$\alpha(5.50, 5.46)$; U-X; $\gamma(0.0435, 0.998, 0.153)$
	239	$2.412(3) \times 10^4$ y			$\alpha(5.16, 5.14, 5.11)$; U-X; $\gamma(0.052, 0.129)$
	241	14.35(10)y			$\alpha(4.90, 4.85)$; U-X; $\gamma(0.149)$
	242	$3.733(12) \times 10^5$ y			$\alpha(4.90, 4.86)$; $\gamma(0.045, 0.103)$
镅	241	432.7(6)y			$\alpha(5.49, 5.44)$; Np-X; $\gamma(0.060)$
	243	7380(40)y			$\alpha(5.28, 5.23)$; Np-X; $\gamma(0.075)$
镅	242	162.79(9)d			$\alpha(6.12, 6.07)$; Pu-X; $\gamma(0.561, 0.605)$
镅	244	18.10(2)y			$\alpha(5.81, 5.77)$; $\gamma(0.043)$

续表

元素名称	A	半衰期	天然丰度/%	截面/b	辐射/MeV
镅	249	320(6)d			$\alpha(5.42); \beta^-(0.125); \gamma(0.327)$
锔	252	2.645(8)y			$\alpha(6.12, 6.08); \text{Cm-X}; \gamma(0.043)$
锎	253	20.47(3)d			$\alpha(6.64); \text{Bk-X}; \gamma(0.387, 0.389, 0.429)$
	254	275.7(5)d			$\alpha(6.44); \text{Bk-X}; \gamma(0.034, 0.036, 0.043)$
锿	257	100.5(2)d			$\alpha(6.52); \text{Cf-X}; \gamma(0.115, 0.241)$

资料来源: C. M. Lederer and V. S. Shirley, eds., *Table of Isotopes*, 7th ed., Wiley-Interscience, New York, 1978; V. S. Shirley, ed., *Table of Radioactive Isotopes*, 9th ed., Wiley-Interscience, New York, 1986; National Nuclear Data Center, *Nuclear Wallet Cards*, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1990.

11.2 放射性活性单位

放射性活性单位为居里(Curie, Ci), $1\text{Ci} = 3700 \times 10^{10}$ 裂变/s(dps), 特定活性用来描述衰变物质的衰变速度, 而能量以百万电子伏特或兆电子伏(MeV)来表示, 表示的是单位重量或体积每秒时间内发生的裂变数, 或为每毫升、每克或每毫摩尔微居或毫居里数, 在标记化合物时常用每毫摩尔微(毫)居里。

11.2.1 放射性衰变

放射性核素衰变符合一级方程:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (11.1)$$

式中: N 为 t 时刻剩余的放射性核素的原子数目; λ 为特征衰变常数, 而观察或计算出的活度 A , 与 N 相关。

$$A = \lambda N \quad (11.2)$$

积分后, 衰变后活度为

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (11.3)$$

式中: A_0 为初始活度, A_t 为经过 t 时间后的活度, 表 11.3 列出了 A_t/A_0 , 或 $\exp(-\lambda t)$ 与半衰期的关系。

表 11.3 放射性核素的衰变

$F = \text{剩余分数} = e^{-\lambda t}$, 此处 $F_{a+b} = F_a F_b$, 故经 14 个半衰期之后剩余分数(F_{14})可以算出: $F_{10} \times F_4 = 0.000\ 98 \times 0.0625 = 0.000\ 061$ 。

半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F
0	1.000	0.06	0.959	0.12	0.920	0.18	0.883
0.02	0.986	0.08	0.946	0.14	0.908	0.20	0.871
0.04	0.973	0.10	0.933	0.16	0.895	0.22	0.859

续表

半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F
0.24	0.847	1.10	0.467	1.96	0.257	4.05	0.0604
0.26	0.835	1.12	0.460	1.98	0.253	4.10	0.0583
0.28	0.824	1.14	0.454	2.00	0.250	4.15	0.0563
0.30	0.812	1.16	0.447	2.05	0.241	4.20	0.0544
0.32	0.801	1.18	0.441	2.10	0.233	4.25	0.0525
0.34	0.790	1.20	0.435	2.15	0.225	4.30	0.0507
0.36	0.779	1.22	0.429	2.20	0.218	4.35	0.0490
0.38	0.768	1.24	0.423	2.25	0.210	4.40	0.0474
0.40	0.758	1.26	0.418	2.30	0.203	4.45	0.0458
0.42	0.747	1.28	0.412	2.35	0.196	4.50	0.0442
0.44	0.737	1.30	0.406	2.40	0.189	4.55	0.0427
0.46	0.727	1.32	0.401	2.45	0.183	4.60	0.0412
0.48	0.717	1.34	0.395	2.50	0.177	4.65	0.0398
0.50	0.707	1.36	0.390	2.55	0.171	4.70	0.0385
0.52	0.697	1.38	0.384	2.60	0.165	4.75	0.0372
0.54	0.688	1.40	0.379	2.65	0.159	4.80	0.0359
0.56	0.678	1.42	0.374	2.70	0.154	4.85	0.0347
0.58	0.669	1.44	0.369	2.75	0.149	4.90	0.0335
0.60	0.660	1.46	0.363	2.80	0.144	4.95	0.0324
0.62	0.651	1.48	0.358	2.85	0.139	5.00	0.0313
0.64	0.642	1.50	0.354	2.90	0.134	5.10	0.0292
0.66	0.633	1.52	0.349	2.95	0.129	5.20	0.0272
0.68	0.624	1.54	0.344	3.00	0.125	5.30	0.0254
0.70	0.616	1.56	0.339	3.05	0.121	5.40	0.0237
0.72	0.607	1.58	0.334	3.10	0.117	5.50	0.0221
0.74	0.599	1.60	0.330	3.15	0.113	5.60	0.0206
0.76	0.590	1.62	0.325	3.20	0.109	5.70	0.0192
0.78	0.582	1.64	0.321	3.25	0.105	5.80	0.0179
0.80	0.574	1.66	0.316	3.30	0.102	5.90	0.0167
0.82	0.566	1.68	0.312	3.35	0.0981	6.00	0.0156
0.84	0.559	1.70	0.308	3.40	0.0947	6.10	0.0146
0.86	0.551	1.72	0.304	3.45	0.0915	6.20	0.0136
0.88	0.543	1.74	0.299	3.50	0.0884	6.30	0.0127
0.90	0.536	1.76	0.295	3.55	0.0854	6.40	0.0118
0.92	0.529	1.78	0.291	3.60	0.0825	6.50	0.0110
0.94	0.521	1.80	0.287	3.65	0.0797	6.60	0.0103
0.96	0.514	1.82	0.283	3.70	0.0769	6.70	0.00962
0.98	0.507	1.84	0.279	3.75	0.0743	6.80	0.00897
1.00	0.500	1.86	0.275	3.80	0.0718	6.90	0.00837
1.02	0.493	1.88	0.272	3.85	0.0694	7.00	0.00781
1.04	0.486	1.90	0.268	3.90	0.0670	7.10	0.00729
1.06	0.480	1.92	0.264	3.95	0.0647	7.20	0.00680
1.08	0.473	1.94	0.261	4.00	0.0625	7.30	0.00635

续表

半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F
7.40	0.00592	8.10	0.00364	8.80	0.00224	9.50	0.00138
7.50	0.00552	8.20	0.00340	8.90	0.00209	9.60	0.00129
7.60	0.00515	8.30	0.00317	9.00	0.00195	9.70	0.00120
7.70	0.00481	8.40	0.00296	9.10	0.00182	9.80	0.00112
7.80	0.00449	8.50	0.00276	9.20	0.00170	9.90	0.00105
7.90	0.00419	8.60	0.00258	9.30	0.00159	10.00	0.00098
8.00	0.00390	8.70	0.00240	9.40	0.00148		

资料来源: L. Meites, ed., *Handbook of Analytical Chemistry*, McGraw-Hill, New York, 1963.

11.2.2 半衰期

每一核素有一特定半衰期, 物理或化学处理均不影响放射性物质衰变的统计规律, 测定这一速率的办法即是测定核素衰变至其原量一半所需的时间, 半衰期表示为

$$t_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A}{A/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (11.4)$$

半核素在 $t_{1/2}$ 内衰变, 而剩下一半的一半将在下一个 $t_{1/2}$ 时间内衰变, 依次类推, 经 10 个半衰期后, 只有约 0.1% 核素剩下, 当使用短半衰期核素时这一点十分重要, 因为要对操作过程中产生的衰变进行校正。

例 11.1 一个锰-56 ($t_{1/2} = 2.576\text{h}$) 样品在实验开始时放射性活性为 3.68×10^6 次/秒, 实验进行 2h 后的活性为多少?

解

$$A_t = 3.68 \times 10^6 \exp\left[-\frac{0.693 \times 2.0}{2.576}\right] = 2.153 \times 10^6 \text{ 次/秒}$$

实验过程中经常要对衰变进行校正, 而表 11.3 可用于此, 从表中可以查出经一定半衰期之后剩余的分数, $\exp(-\lambda t)$ 。

有些放射性核衰变成具有放射性的产物, 这些产物称为子核素, 源核素称为母核素。子核素的活度与衰变速率相关:

$$A_2 = \frac{\lambda_2 A_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + A_2^0 \exp(-\lambda_2 t) \quad (11.5)$$

式中: A_2 为子核活度; λ_1, λ_2 分别为母、子核素的衰变常数; A_1^0, A_2^0 分别为开始时母、子核素的活度。若母核素寿命较子核长很多, 上式可简化为

$$A_2 = A_1^0 [1 - \exp(-\lambda_2 t)] + A_2^0 \exp(-\lambda_2 t) \quad (11.6)$$

中括号([])中一项称为饱和因子, 若某核由长寿母核素或核反应稳定产生, 则饱和因子为指定时刻 t 时活度与无限长时间的活度之比。表 11.4 列出了子核素 0~10 个半衰期时的饱和因子值。

表 11.4 恒速产生的核素增长

 $F = 1 - e^{-\lambda t}$ = 饱和值分数(饱和因子).

半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F	半衰期	F
0.01	0.0069	0.72	0.393	1.46	0.636	2.45	0.817
0.02	0.0138	0.74	0.401	1.48	0.641	2.50	0.823
0.04	0.0273	0.76	0.410	1.50	0.646	2.55	0.829
0.06	0.0407	0.78	0.418	1.52	0.651	2.60	0.835
0.08	0.0539	0.80	0.426	1.54	0.656	2.65	0.841
0.10	0.0670	0.82	0.434	1.56	0.661	2.70	0.846
0.12	0.0798	0.84	0.441	1.58	0.666	2.75	0.851
0.14	0.0925	0.86	0.449	1.60	0.670	2.80	0.856
0.16	0.105	0.88	0.457	1.62	0.675	2.85	0.861
0.18	0.117	0.90	0.464	1.64	0.679	2.90	0.866
0.20	0.129	0.92	0.471	1.66	0.684	2.95	0.871
0.22	0.141	0.94	0.479	1.68	0.688	3.00	0.875
0.24	0.153	0.96	0.486	1.70	0.692	3.10	0.883
0.26	0.165	0.98	0.493	1.72	0.696	3.20	0.891
0.28	0.176	1.00	0.500	1.74	0.701	3.30	0.898
0.30	0.188	1.02	0.507	1.76	0.705	3.40	0.905
0.32	0.199	1.04	0.514	1.78	0.709	3.50	0.912
0.34	0.210	1.06	0.520	1.80	0.713	3.60	0.918
0.36	0.221	1.08	0.527	1.82	0.717	3.70	0.923
0.38	0.232	1.10	0.533	1.84	0.721	3.80	0.928
0.40	0.242	1.12	0.540	1.86	0.725	3.90	0.933
0.42	0.253	1.14	0.546	1.88	0.728	4.00	0.938
0.44	0.263	1.16	0.553	1.90	0.732	4.25	0.947
0.46	0.273	1.18	0.559	1.92	0.736	4.50	0.956
0.48	0.283	1.20	0.565	1.94	0.739	4.75	0.963
0.50	0.293	1.22	0.571	1.96	0.743	5.00	0.969
0.52	0.303	1.24	0.577	1.98	0.747	5.25	0.974
0.54	0.312	1.26	0.582	2.00	0.750	5.50	0.978
0.56	0.322	1.30	0.594	2.05	0.759	5.75	0.981
0.58	0.331	1.32	0.599	2.10	0.767	6.00	0.984
0.60	0.340	1.34	0.605	2.15	0.775	6.50	0.989
0.62	0.349	1.36	0.610	2.20	0.782	7.00	0.992
0.64	0.358	1.38	0.616	2.25	0.790	7.50	0.994
0.66	0.367	1.40	0.621	2.30	0.797	8.00	0.996
0.68	0.376	1.42	0.626	2.35	0.804	9.00	0.998
0.70	0.384	1.44	0.631	2.40	0.811	10.00	0.999

资料来源: L. Meites, ed., *Handbook of Analytical Chemistry*. McGraw-Hill, New York, 1963.

11.3 放射性测量

放射性衰变的随机性要求观察到大量衰变才能获及具有统计效应的计数速率或总样计数,在测量时必须注意以下几个问题:(1)辐射可能在传递过程中被空气或检测器壁所