

γ 辐射煤灰分仪

张志康 卓韵裳 编 著
林 谦 衣宏昌

原子能出版社

前 言

我国是世界上规模最大的煤炭生产国,年产量达 12 亿吨以上,煤炭是我国的主要能源和重要化工原料。显然,提高煤炭的利用效率对发展我国的国民经济意义重大。

煤灰分是煤在一定温度下充分、完全灼烧后,氧化物残渣所占的质量分数(即重量百分比,记为 wt%)。煤灰分与煤的发热量密切相关,为提高煤的利用效率,必须严格控制煤产品的灰分。例如,焦炭中灰分的质量分数每增加 1%,将导致炼铁时焦比增加 2%~2.5%,相应地高炉单产将降低 2.5%~3%,炉渣增加 2.7%~2.9%。由此可见,控制作为焦炭原料的精煤的灰分有多么重要。但是,传统的灼烧化验法工序复杂、给出结果的滞后时间长,不能适应煤产品质量控制需要,对煤资源充分利用很不利。所以,在煤炭加工中非常需要在线、快速、准确的检测煤灰分的手段和设备。

自 60 年代以来,世界上许多国家,如澳大利亚、英国、美国、德国、俄罗斯、波兰等都在致力于以核辐射探测技术测量煤灰分的研究。根据有关杂志和会议文献记载,基于核辐射探测技术的煤灰分测量方法,归结起来有以下几种:

1) β 射线反散射法。 β 射线的饱和反散射强度与被照射物质的原子序数有关,而煤的平均原子序数与灰分大小有关,所以可以通过测量 β 反散射强度来测定煤的灰分。但由于 β 射线穿透能力差,必须把被测煤制成粒度小于 0.2 mm 的煤粉,压制成表面光滑的煤样,才能进行灰分测量;而且,与灼烧法相比,工序上只是以 β 反散射计数测量代替了灼烧和称量,并不能解决工序繁,给出结果滞后的缺点,不可能实现在线测量。

2) 低能 γ 射线反散射方法。低能 γ 射线的质量衰减系数与原子序数有关,如果把低能 γ 射线入射到煤中,反散射 γ 的强度将与煤灰

分有关,随着煤的灰分增高,按近似线性的规律减少,所以可以通过测量低能 γ 的反散射强度来测定煤的灰分。而且由于反散射计数与灰分之间关系简单,不需要复杂的计算,只需要用简单的模拟电路就能实现,所以在计算机技术尚未广泛应用的60、70年代,低能 γ 反散射方法是利用核探测技术测量煤灰分的切实可行的方法。但是这种方法要求被测量煤样表面与探测器之间的距离保持一定;要求煤样的松装度不变。因而,对被测煤的粒度要求严格,要求被测煤样的表面平整,煤样品表面与探测器之间相对位置保持不变。如果把它用于在线煤灰分测量,必须有复杂的采样、混合、破碎、制样的附加设备,而且要求这种设备能在现场连续地长时间运行,实现起来比较困难。所以,低能 γ 反散射方法从原理上决定了它难以满足煤质控制所要求的在线测量要求。

3)高能 γ 湮没辐射方法。高能 γ 射线在煤中产生的湮没 γ 辐射(511 keV)的强度与煤的平均原子序数有关,因而能反映煤的灰分大小。适宜于这种方案的高能 γ 放射源是 ^{226}Ra ,如果采用这种方案,存在 ^{226}Ra 的子体氡射气泄漏的潜在可能,而且辐射屏蔽和测量设备比较昂贵,相比之下不如双能量 γ 透射方法好。

4)天然 γ 放射性的煤灰分测量法。由于煤的矿物质中含有 ^{40}K 以及铀、钍系列的天然 γ 放射性,所以通过测量煤的天然 γ 放射性强度能测定煤中矿物质含量,也就是说能测定煤的灰分。这种方法的优点是不需要放射源。但是,对于含量只有百万分之几(几ppm)的天然放射性的准确测量是困难的;而且不同的煤,矿物质所含天然 γ 放射性的含量不一样,所以必须对不同煤种分别进行刻度。

5)通过测量中子与煤中各种元素的非弹性散射和俘获辐射产生的瞬发 γ ,可以对煤作多元素分析,这种瞬发 γ 中子活化技术可以同时确定煤中主要元素的含量以及煤的灰分。但是,基于这种技术而做成的煤的多元素分析及灰分测量设备比较复杂,所使用中子源活度很高,价格也很昂贵。

6)双能量 γ 射线透射方法。利用低、中两种能量 γ 束透射被测

煤,可以在煤层厚度随机变化情况下测定煤的灰分。按这种基本原理做成的灰分仪能够直接对传送带上的散煤实现灰分在线测量,不需要分流、取样、制样等附加设备;对煤的粒度没有严格要求;不存在垂直偏析,煤层上、下灰分分布不均匀不会影响测量结果;所用的 γ 放射源是中、低能量,容易屏蔽,辐射安全性好;虽然需要复杂的计算,但在目前计算机技术水平下,并不是什么困难。这种形式的 γ 辐射煤灰分仪总体性能好,能满足生产实际对煤灰分在线测量的要求,而且价格适中,所以得到广泛的应用。

清华大学工程物理系在80年代,就立项开展了双能量 γ 射线透射法煤灰分在线测量的研究,并于90年代初通过了技术鉴定,成果被批准列入为'95国家级科技成果重点推广计划项目。并已在该科研成果基础上,研制了ZZ-89A型在线式 γ 辐射煤灰分仪,和ZZ-89B型扫描式 γ 辐射煤灰分快速测定仪两种产品。

1996年以来,这两种型式 γ 辐射煤灰分仪陆续地应用于选煤厂精煤产品的检测,入厂煤灰分的监测和原煤按灰分分级入仓控制等。应用情况表明,对指导煤炭生产和提高管理水平,都很有好处,经济效益十分显著。随着我国社会主义市场经济的发展,对煤产品的灰分的要求会越来越严格、准确,预期对 γ 辐射煤灰分仪的需求会进一步增加。

编写这本书的主要目的是为了满足不同煤炭应用领域的需要。 γ 辐射煤灰分仪的主要技术基础是核探测技术,而主要是在煤炭、冶金、化工等部门应用。这些部门的技术人员以及操作、管理人员对 γ 辐射及其探测技术不熟悉,影响对 γ 辐射煤灰分仪的掌握和使用,需要有一本系统介绍 γ 辐射煤灰分仪的书,供他们参考、阅读。随着 γ 辐射煤灰分仪的推广应用,这种需求日益迫切。此外, γ 辐射煤灰分仪是一种二元混合物的成分测定仪,在工业检测用核仪表中是技术要求比较高的;由于它的灵敏度很低,而测量的计数率变化范围又很大,使用环境也比较差,所以,这种测量仪是在一个测量条件比较苛刻,而稳定性、准确度要求都很高的测量场合中使用的测量仪器。ZZ-89

型 γ 辐射煤灰分仪中,以客观需要为标准,采取各种技术措施,比较好地解决了有关技术难题,成为一种具有在线、快速特点,长期工作稳定,测量准确,功能齐全,能满足煤炭加工、利用中各种灰分测量需求的工业检测核仪表。所以本书介绍的内容可供从事工业检测用核仪表的技术人员借鉴和参考,也可以作为高等院校有关专业学生的参考读物。

本书的内容,除了第一章和第二章是讲述核物理, γ 射线与物质相互作用和NaI(Tl) γ 闪烁探测器等基础知识外,其余各章都是结合ZZ-89型 γ 辐射煤灰分仪的具体情况讲述的,但是涉及的内容,对 γ 辐射煤灰分仪来说有普遍意义。

由于编著者水平所限,本书中一定会有欠妥之处,敬请批评指正。

编 著 者

1999年7月

于清华大学工程物理系

目 录

前言	(-1-)
第一章 放射性基础知识	(1)
1.1 放射性和放射性衰变	(1)
1.1.1 原子核和核素	(1)
1.1.2 放射性和原子核衰变	(2)
1.1.3 α 、 β 、 γ 衰变	(2)
1.1.4 放射性衰变规律	(4)
1.1.5 连续衰变	(5)
1.1.6 放射性活度及单位	(7)
1.2 γ 射线与物质的相互作用	(9)
1.2.1 光电效应	(9)
1.2.2 康普顿效应	(12)
1.2.3 电子对产生	(13)
1.2.4 γ 射线透射物质的衰减规律	(14)
1.3 γ 辐射煤灰分仪所用的放射源及其辐射安全性	(21)
1.3.1 适用于 γ 辐射煤灰分仪的放射源	(21)
1.3.2 γ 辐射煤灰分仪的放射性剂量计算	(23)
1.3.3 γ 辐射煤灰分仪的辐射安全性估计	(26)
第二章 NaI(Tl)探测系统的 γ 射线测量	(29)
2.1 NaI(Tl) γ 探测系统的基本组成	(29)
2.1.1 NaI(Tl)闪烁体	(29)
2.1.2 光电倍增管	(31)
2.2 NaI(Tl)闪烁谱仪测量 γ 能谱	(32)
2.2.1 低能 γ 能谱	(33)
2.2.2 中能 γ 能谱	(35)
2.2.3 高能 γ 能谱	(36)
2.3 NaI(Tl)闪烁 γ 谱仪测量 γ 能谱的基本方法	(38)
2.4 ^{137}Cs 同 ^{241}Am 的混合 γ 能谱	(41)
2.5 放射性测量中的统计误差	(42)

2.5.1	测量误差的一些基本概念	(42)
2.5.2	核辐射测量中统计误差的表示和计算	(44)
2.6	NaI(Tl)闪烁探测器应用于 γ 辐射煤灰分仪的优点	(46)
第三章 测量煤灰分的双能量γ射线透射法		(47)
3.1	基本原理	(47)
3.1.1	测量煤灰分的双能量 γ 透射法的简化模型	(47)
3.1.2	双能量 γ 透射法的基本公式	(49)
3.1.3	斜率系数 A 和截距系数 B	(51)
3.1.4	双能量 γ 透射法中 ^{241}Am 和 ^{137}Cs 计数的获取	(54)
3.1.5	双能量 γ 透射法煤灰分测量的灵敏度 E	(56)
3.2	γ 辐射煤灰分仪的几个指标	(58)
3.2.1	γ 辐射煤灰分仪指标的特殊性	(58)
3.2.2	灰分仪自身的测量精度(偶然误差 σ_m)	(59)
3.2.3	灰分仪的长期稳定性	(59)
3.2.4	γ 辐射煤灰分仪的准确度 δ 和系统偏差	(60)
3.2.5	灰分仪的测量精度 σ 和偶然误差	(61)
3.2.6	多次操作重复性 σ_R	(62)
3.3	影响 γ 辐射煤灰分仪测量结果的各种因素	(63)
3.3.1	煤灰中元素相对含量变化对测量结果的影响	(63)
3.3.2	重介选煤工艺中残介量的影响	(67)
3.3.3	煤的C/H比例变化对测量结果的影响	(70)
3.3.4	煤的水分对测量结果的影响	(73)
3.3.5	煤的颗粒度对煤灰分测量结果的影响	(76)
3.4	γ 射线测量系统和煤流条件的影响	(79)
3.4.1	对 γ 射线测量系统的要求	(79)
3.4.2	γ 计数的采样时间间隔	(80)
3.4.3	煤灰分在线测量对煤流的要求	(81)
3.5	“标准测块”及其用处	(82)
第四章 γ辐射煤灰分仪的组成		(85)
4.1	概述	(85)
4.2	γ 辐射煤灰分仪的 γ 射线探测系统	(86)
4.2.1	γ 放射源及其屏蔽准直铅罐	(87)

4.2.2	NaI(Tl)闪烁探测器	(88)
4.2.3	稳峰器	(90)
4.2.4	计数接口电路	(94)
4.3	γ 辐射煤灰分仪的附属部件	(95)
4.3.1	两种型式灰分仪的相同附属部件	(95)
4.3.2	在线式 γ 辐射煤灰分仪的附属部件	(99)
4.3.3	离线式 γ 辐射煤灰分仪的附属部件	(102)
4.3.4	γ 辐射煤灰分仪与其他系统的数据通信	(105)
第五章	γ 辐射煤灰分仪的计算机系统	(107)
5.1	计算机技术在 γ 辐射煤灰分仪中的地位	(107)
5.2	γ 辐射煤灰分仪的计算机接口电路	(108)
5.3	γ 辐射煤灰分仪的功能	(110)
5.3.1	灰分测量功能	(110)
5.3.2	参数校验和传送带参数测量功能	(111)
5.3.3	灰分仪所处状态的监测和控制功能	(111)
5.3.4	制定测量计划功能	(112)
5.3.5	4~20 mA 工业标准的电流输出功能	(113)
5.3.6	设置煤种参数功能	(113)
5.3.7	数据查询功能	(114)
5.4	γ 辐射煤灰分仪的菜单操作程序框图	(115)
5.5	软件组成和有关文件说明	(118)
5.5.1	系统软件	(118)
5.5.2	记录文件	(119)
第六章	γ 辐射煤灰分仪的刻度和比对	(120)
6.1	γ 辐射煤灰分仪的刻度和比对的必要性	(120)
6.2	γ 辐射煤灰分仪的刻度	(121)
6.2.1	什么是煤灰分仪的刻度	(121)
6.2.2	刻度用的煤样组	(121)
6.3	γ 辐射煤灰分仪的比对	(123)
6.3.1	经常性的比对	(123)
6.3.2	专门的比对实验	(124)
6.3.3	采样误差的估计和控制	(126)

6.3.4	比对实验时煤流的煤质代表性检验	(128)
第七章 γ 辐射煤灰分仪的应用及其维护		
7.1	ZZ-89 型 γ 辐射煤灰分仪的优点	(132)
7.2	选煤过程中煤灰分的在线检测	(133)
7.2.1	选煤厂中精煤灰分的在线检测	(133)
7.2.2	人洗原煤的灰分在线检测	(135)
7.2.3	为选煤过程自动化提供灰分反馈信息	(135)
7.2.4	实现精煤灰分在线检测时应注意的问题	(136)
7.2.5	测灰仪的测量结果与“小时快灰”的关系	(138)
7.3	在线式测灰仪在配煤中的应用	(140)
7.3.1	选煤厂装车配煤时灰分的在线检测	(140)
7.3.2	动力配煤时灰分的在线检测	(141)
7.4	应用在线式 γ 辐射煤灰分仪实现原煤按灰分大小分别入仓	(142)
7.5	应用扫描式 γ 辐射煤灰分快速测定仪控制进厂煤的质量	(143)
7.6	应用扫描式 γ 辐射煤灰分快速测定仪作多种煤样的快灰测定	(144)
7.7	应用 ZZ-89 型 γ 辐射煤灰分仪时的注意事项及其日常维护	(145)
7.7.1	应用 A 型在线式 γ 辐射煤灰分仪的注意事项及其日常维护	(145)
7.7.2	应用 B 型离线扫描式 γ 辐射煤灰分快速测定仪的注意事项及其日常维护	(148)
参考文献		(150)

第一章 放射性基础知识

1.1 放射性和放射性衰变

1.1.1 原子核和核素

物质由原子组成。原子中带正电的核心是原子核，它由中子和质子组成。原子核的直径仅是原子直径的 $1/10\ 000$ ，但其质量却占原子质量的 99.9% 以上。原子核外有电子绕核不停地运动，就像行星绕太阳一样。质子和中子统称为核子。原子呈电中性，原子核带正电，其电量等于核外电子的总电量，但两者的符号相反。核外电子数为该原子的原子序数 Z ，因此核内质子数也等于 Z 。

原子核内中子数和质子数之和称为质量数 A 。由于质子和中子的质量都接近于 1 原子质量单位 [$1\ u$ (原子质量单位) = 一个处于基态的 ^{12}C 中性原子静止质量的 $1/12$]，所以原子核的质量接近于 A 个原子质量单位。 A 和 Z 以及原子核所处的能态是识别核素的标志，习惯将 A 和 Z 标在元素符号的左上、下角，例如 ^{12}C 。

核素是指具有特定质量数 (A)，原子序数 (Z) 和核能态 (m)，而且其平均寿命长得足以被观察的一类原子。质子数或中子数不同的原子是不同的核素。例如 ^{39}K 的核是由 19 个质子和 20 个中子组成，它与 ^{40}K (核有 19 个质子， 21 个中子)，或与 ^{27}Al (核有 13 个质子， 14 个中子) 是不同的核素。有些原子核尽管质子数、中子数相同，但能态不同且放射性不同，也是不同的核素。

核素通常用元素符号表示，左上标表示质量数，左下标表示质子数或原子序数 (也可不标)，右下标表示中子数 (也可不标)。因为知道元素符号就可知质子数 Z (也即原子序数)，又知质量数 A ，自然就知

道了中子数 $N=A-Z$ 。同质异能素,在左上标处的质量数后面标有 m ,例如 ^{234m}Pa 为 ^{234}Pa 的同质异能素。

核素不是同位素的同义语,同位素是具有相同原子序数(质子数相同)、但质量数不相同的核素,它是同一种元素而中子数不同的核素。例如 ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 是氢元素的三种同位素。

中子数相同,质子数不同的核素称为同中子素,例如 $^2_1\text{H}_1$ 和 $^3_2\text{He}_1$ 。

质量数相同,质子数不同的核素称为同量异位素,例如 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 、 $^{40}_{19}\text{K}$ 、 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 。

1.1.2 放射性和原子核衰变

放射性就是指某些核素自发地放出粒子或 γ 射线,或在俘获轨道电子后放出 X 射线,或发生自发裂变的性质。它是法国物理学家 H. 贝可勒尔(H. Becquerel)在 1896 年研究铀矿的荧光现象时发现的。能自发地放射各种射线的核素称为放射性核素。

放射性有天然放射性和人工放射性之分。天然放射性是指天然存在的放射性核素所具有的放射性。用人工办法(例如用核反应堆和加速器)生产的放射性核素所具有的放射性,叫人工放射性。目前 1 700 多种放射性核素中,人工放射性核素占绝大多数。

1.1.3 α 、 β 、 γ 衰变

放射性与放射性物质的原子核衰变有密切关系。原子核衰变是指原子核自发地放射出 α 或 β 等粒子而其本身转变为另一种原子核的过程。放射性核素衰变的快慢常用半衰期来表示,即一定量的原子核衰变掉一半所需要的时间。每一种放射性核素都有其特定的半衰期,半衰期的分布范围非常大,长的可达 10^{10} a(年),短的只有 10^{-9} s(秒)。原子核衰变的形式有多种,主要有 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变、同质异能跃迁及自发裂变等。

1.1.3.1 α 衰变

α 衰变是指原子核(母核)自发地放出 α 粒子(氦核)而转变为电

荷数减 2、质量数减 4 的原子核。表示为



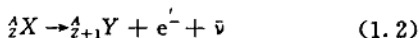
式中 X 为母核, Y 为子核, A 为原子核的质量数, Z 为原子核的电荷数。

1.1.3.2 β 衰变

原子核自发地放射出电子或正电子或俘获一个轨道电子而发生转变, 统称为 β 衰变。可区分为三种类型:

1) β^- 衰变

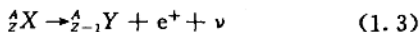
原子核自发地放射出电子而转变为电荷数加 1、质量数不变的原子核时称为 β^- 衰变。表示为



式中 e^- 为电子, $\bar{\nu}$ 为反中微子。

2) β^+ 衰变

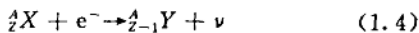
原子核自发地放射出正电子而转变为电荷数减 1、质量数不变的原子核时称为 β^+ 衰变。表示为



式中 e^+ 为正电子, ν 为中微子。

3) 轨道电子俘获

原子核俘获轨道电子而转变为电荷数减 1、质量数不变的原子核时称为轨道电子俘获。表示为



1. 1. 3. 3 γ 衰变

γ 衰变是指原子核发射 γ 辐射(或称为 γ 光子)的过程,往往是伴随 α 或 β 衰变产生的。 α 衰变或 β 衰变所形成的子核,有的全部或大部分处于激发态。激发态是不稳定的,当从激发态直接退激或级联退激到基态时,放出 γ 射线。这种现象称为 γ 衰变(或称 γ 跃迁)。 γ 衰变的子核和母核,其电荷数和质量数均相同,仅核的能量状态不同。

1. 1. 4 放射性衰变规律

任何一种放射性原子核在单独存在时,原子核的数目随时间呈指数衰减, t 时刻的原子核数为:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

式中: λ 为衰变常数; N_0 表示时间为零时刻,即起始时刻的母核数。

衰变常数 λ 的大小决定了衰变的快慢,它只与放射性核素的种类有关。每一种放射性核素都有自己的衰变常数。衰变常数的物理意义是某种放射性核素的一个原子核在单位时间内发生衰变的概率。因为 λ 是常数,所以每个原子核不论何时衰变,其衰变的概率均相同。这意味着,各个原子核的衰变是相互独立的,每个原子核何时衰变完全是随机事件。

半衰期 T 表示原子核数衰减到一半所需的时间。那么衰变常数 λ 与半衰期 T 成反比, λ 越大,表示放射性衰减得越快,也就是原子核衰减到一半所需的时间也就越短。它们的关系是

$$\lambda = \ln 2 / T = 0.693 / T \quad (1.6)$$

平均寿命 τ 是在某特定状态下原子或原子核系统的平均存活时间。对大量放射性原子核而言,有的核先衰变,有的核后衰变,各个核的寿命长短是不同的,从 $t=0$ 到 $t \rightarrow \infty$ 都有可能。但对某一种核素而言,平均寿命 τ 是常数。平均寿命 τ 和衰变常数互为倒数,即

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.7)$$

1.1.5 连续衰变

有的原子核经过一次衰变形成的子代原子核并不稳定,子代原子核仍能衰变,如果下一代原子核仍不稳定,衰变过程仍将继续进行,直到形成稳定原子核为止。其衰变规律较为复杂,这种衰变叫做连续衰变。连续衰变系列通称为放射系,在地壳中存在三个天然放射系。它们是铀系、钍系、和釷系。例如,釷系从母体 ^{232}Th 开始,经过10代连续衰变,最后到稳定核素 ^{208}Pb 为止。 ^{235}U 等裂变时生成的裂变产物常常要连续衰变,直至转变为稳定核素为止。例如, ^{140}Xe 要经过4次 β^- 衰变,最后转变到稳定核素 ^{140}Ce 。

连续衰变中,在满足一定条件下,可能出现放射性平衡。放射性平衡是指某一种连续衰变链中,各种核素放射性活度均按该链前驱核素的平均寿命随时间作指数衰减。现分三种情况来讨论。

1.1.5.1 暂时平衡

当前驱核素的平均寿命不是很长,但比该衰变链中其他任何一代子体核素的平均寿命都长,在经过足够长时间以后,这个衰变系列会达到暂时平衡。在暂时平衡时,各放射性核素的活度之比不随时间变化,各子体随前驱核素(母体)的半衰期(或平均寿命)而衰减,如图1.1所示。图1.1中曲线a表示母体的放射性活度随时间的变化;曲线b表示子体单独存在时活度随时间的变化;曲线c表示子体的放

放射性活度随时间的变化；直线 d 表示母、子体总放射性活度随时间的变化。

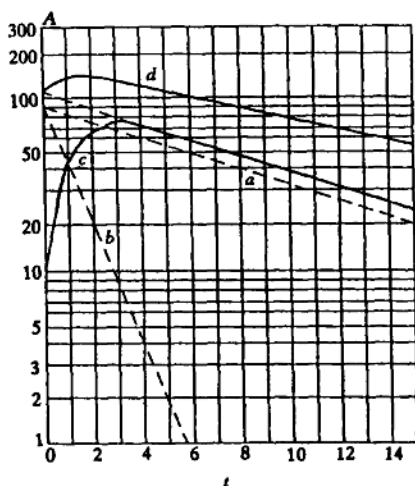


图 1.1 暂时平衡

1.1.5.2 长期平衡

如果前驱核素的平均寿命很长，以致在我们考察期间，前驱核素总体上的变化可以忽略不计，那么在相当长时间以后（一般为连续衰变系列中最长的子体半衰期的 5~7 倍以上），放射系列可达到长期平衡。在长期平衡时，各子体的放射性活度都等于母体的活度，如图 1.2 所示。在未达到平衡以前，子体的活度随时间而增长，一直到放射性平衡为止。

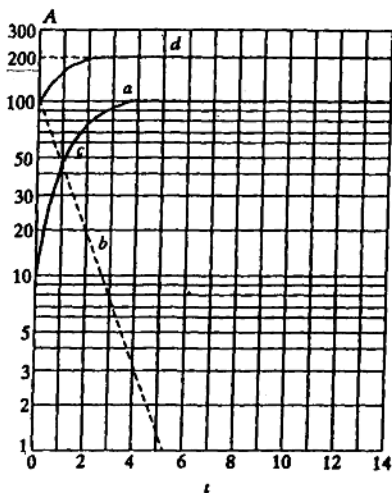


图 1.2 长期平衡

1.1.5.3 不平衡的情况

当前驱核素(母体)的平均寿命小于子体的平均寿命,则母体按指数规律较快衰减;而子体的原子核开始为零,随时间逐步增长,越过极大值后衰减,当时间足够长时,子体则按自己的平均寿命(或半衰期)衰减。这样就不可能出现子体与母体的任何平衡。

1.1.6 放射性活度及单位

可以用放射性核的数目来表示放射性的多少,但极不方便,也没有必要。习惯上采用放射性活度 A 来表示放射性的多少,其定义是:一定量的某种放射性物质,在一个适当短的时间间隔中所发生的自发衰变数除以该时间间隔所得的商,即衰变率 $-dN/dt$ 。实际上,当

有 N 个放射性原子核时,单位时间内发生的衰变数应为 λN , 所以放射性活度 A 表达式为:

$$\begin{aligned} A &= -dN/dt = \\ &\lambda N = \\ &\lambda N_0 e^{-\lambda t} = \\ &A_0 e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中 $A_0 = \lambda N_0$, 是 $t=0$ 时的放射性活度。所以放射性活度和放射性核数目有关系, 而且具有同样的指数衰减规律。

放射性活度的严格定义是: 处于特定能态的一定量放射性核素在给定时刻 t 时 dN 除以 dt 的商, dN 是在时间间隔 dt 内由该能态发生自发衰变或核跃迁数的期望值[在 ICRU report 33 (1980) 中, 仅用核跃迁一词, 其中已包含了核转变, 但按目前的习惯, 核转变应用较广, 在本书中说到放射性活度既可以指核衰变也可以指核跃迁两种情况]。

放射性活度单位是贝克勒尔(Becquerel), 简称贝可(Bq)其定义是

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} \quad (1.9)$$

Bq 是一个非常小的单位, 可以用千贝可 ($1 \text{ kBq} = 10^3 \text{ Bq}$) 和兆贝可 ($1 \text{ MBq} = 10^6 \text{ Bq}$)。

历史上放射性活度长期用过的单位是 Ci(居里), 与 Bq 的关系是

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (1.10)$$

$$1 \text{ Ci} = 10^3 \text{ mCi} = 10^6 \mu\text{Ci} \quad (1.11)$$