

利用放射性同位素的 自动检查装置理论基础

Н. Н. 舒米洛夫斯基 Л. В. 密里特采尔

科学出版社

631

利用放射性同位素的 自动检查装置理论基础

И. И. 舒米洛夫斯基 Л. В. 密里特采尔 著

朱 宝 琮 译

科学出版社



Н. Н. ШУМИЛОВСКИЙ, Л. В. МЕЛЬТЦЕР
ОСНОВЫ ТЕОРИИ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Изд. Академии наук СССР, Москва, 1959

內 容 簡 介

本书系统地研究了各种基于利用核辐射的自动检查装置的原理图及其理论和计算方法,并对在具体设计和试制中所出现的一些特殊问题,作了详细的研究。对于在自动检查装置中所使用的各种核辐射及接收器,也作了较详细的介绍。

本书可供科学研究人员、工程技术人员以及高等学校的教学人员阅读参考。

利用放射性同位素的
自动检查装置理论基础

Н. Н. Шумиловский Л. В. Мельтцер 著

朱宝琛 译

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1961 年 11 月第一版

书号: 2414 字数: 145,000

1961 年 11 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

(京) 0001—8,000

印张: 7 1/3

定价: 0.92 元

前 言

利用放射性同位素的自动检查仪表近年来得到了广泛实际的应用。利用这些仪表,在许多场合下可以使生产过程自动化,解放工人的手工操作,因此也就提高了劳动生产率。同时还能大大地提高产品的质量。所有这些都将带来巨大的国民经济效果。

我国过去在这一领域中发表的理論研究著作,較知名的有:Г. Г. 約尔丹——关于利用放射性同位素的仪表制造之一般問題及液面計;Б. И. 魏尔霍夫斯基——关于提高輻射強度測量精確度的方法及厚度計;А. К. 塔托琴柯——关于自动 γ -探伤器及动态补偿;Н. И. 施泰因波克——关于利用 α -輻射的仪表;К. С. 富尔曼——关于密度測定法;В. А. 雅鲁希可夫斯基、А. Г. 瓦西里耶夫——关于繼电检查法;Б. И. 叶尔莫納耶夫——关于利用 β -輻射逆散射的仪表;以及其他等等。

遺憾的是所有这些已发表的著作一般都是单篇的論文形式,不能够对利用放射性輻射源的仪表之一般理論作出連貫性的叙述。

沒有相应的教程,就会从一开始阻碍着这一門技术的发展,并且在实践中有时会导致盲目的經驗主义。本文作者早就有决心根据个人多年来的工作經驗和綜合这一方面的最新成就創作这一教程。

由于本书篇幅所限,因而不可能对核輻射的属性及特性作出很全面的論述。也不能对輻射接收器的計算及設計問題作出詳細的分析研究。按照所列举的各种問題,本书引有一些优秀的教程^[1,2,3,4,5]和参考資料^[6,7,8]等等可供讀者查閱。我們对于在核子物理中一般所采用的电子綫路[例如,可參看文献(9,10)]也沒有进行詳細的分析研究。本书也不打算对目前利用放射性同位素的大多数的自动检查仪表的結構及綫路进行詳細的描述,因为已有專門的文献^[11,12]对这类問題作了詳細的分析研究。这样,我們就有可能針对某些在研究試制和設計仪表时所产生的專門性問題进行較詳細的論述。概論中所包含的关于在自动检查装置中应用核輻射以及輻射源及輻射接收器的簡要論述,只是为以后的叙述提供理論上的依据,因此要求讀者对这些问题根据相应的教程作較詳細的了解,此外,也要求讀者能熟悉概率論的原理。

作者对于 Б. И. 魏尔霍夫斯基和 Л. К. 塔托琴柯两位同志所提出的宝贵意見和批評以及 Л. А. 皮沃瓦諾夫同志协助完成手稿表示感謝。

目 录

前言.....	v
概論.....	1
§ 1. 核輻射.....	1
§ 2. 輻射接收器.....	8
§ 3. 輻射調制.....	14
§ 4. 測量綫路.....	15
§ 5. 測量誤差.....	20
第一章 按放射性輻射的吸收測量材料的厚度或密度	
§ 6. 一般理論.....	32
§ 7. 用补偿法測量液体密度.....	34
§ 8. 按动态补偿法測量材料厚度.....	40
§ 9. 自动 γ -探伤器.....	50
第二章 按輻射的逆散射測量材料和复盖层的厚度	
§ 10. β -輻射的逆散射.....	54
§ 11. 复盖层厚度測量.....	57
§ 12. γ -輻射的逆散射及其在检查材料厚度中的应用.....	61
第三章 繼电作用裝置	
§ 13. 一般理論.....	66
§ 14. 繼电器的动作時間.....	70
§ 15. 繼电器的工作可靠度.....	73
第四章 液 面 測 量	
§ 16. 检查液面的方法.....	76
§ 17. 自动补偿的液面計.....	78
第五章 液体流量測量	
§ 18. 基于輻射通量强度变化的方法.....	84
§ 19. 頻率法.....	88

第六章 气体流量测量

§ 20. 相对法	92
§ 21. 标记分子法	95

第七章 气体压力测量

§ 22. 基本规律性	102
§ 23. 测量范围的限制	105

第八章 物质成份的检查

§ 24. 气体分析	108
§ 25. 按辐射的吸收或散射检查物质成分	110
§ 26. 能谱仪式的检查法	115
§ 27. 中子通量的利用	117

第九章 根据仪表的动态特性选择最小的辐射源活性

§ 28. 被检查量以恒定速度变化	120
§ 29. 被检查量以阶跃形式变化	121

参考文献	123
------------	-----

概 論

§ 1. 核 輻 射

在自动检查装置中采用着各种核辐射： α -辐射、 β -辐射、 γ -辐射以及中子辐射。

天然放射性同位素和人工放射性同位素都是核辐射源。放射性同位素的原子核本身会逐渐地发生衰变。在这种衰变下，一类化学元素的同位素将嬗变成为另一类元素的同位素，同时发射出核辐射。

天然放射性同位素一般属于門捷列夫周期表最后的一些元素，但这些同位素用在自动检查装置中是比较少的。

人工放射性同位素是由一些稳定的同位素在核反应堆或加速器中受到辐照而获得的，或者是由原子核燃料的衰变产物中分离出来。这类同位素价格低廉，使用方便，目前得到了极其广泛的应用。

现在已知道的各种放射性衰变和核辐射，計有：

A. 在 α -衰变下，放射性同位素的原子核辐射出氦原子核 ${}^4_2\text{He}$ ，或者称之为 α -粒子。同时，該原子核則嬗变成序数較原来的原子核小2而质量数小4个单位的元素的原子核。 α -衰变主要地可作为那些位于門捷列夫周期表上最后元素的特征。

由原子核所发射出的 α -粒子，基本上都具有一定的能量。例如，在钋的 α -粒子能譜中，能量为5.3兆电子伏的主綫要比其他11条綫的任一条在强度上約大 5×10^3 倍。这样，实际上我們便可将钋看成是一个单能辐射源。

α -粒子在空气中和在物质中的射程 l (单位为厘米)是由下列关系式来确定的：

$$l = 0.318E^{3/2}, \quad (1)$$

$$l_{\text{вещ}} = l_{\text{возд}} \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{вещ}}} \sqrt{\frac{A_{\text{вещ}}}{A_{\text{возд}}}}; \quad (2)$$

式中： E ——粒子的初始能量(单位为兆电子伏)，

$\rho_{\text{возд}}$ 和 $\rho_{\text{вещ}}$ ——空气和物质的密度，

$A_{\text{возд}}$ 和 $A_{\text{вещ}}$ ——空气和物质的平均原子量。

α -粒子的射程在空气中不超过几厘米，而在固体物质中則不超过数十微米。

α -粒子入射到物质中,例如入射到气体介质中,便与物质中原子及分子的电子壳层相互作用。 α -粒子给予某些电子以足够脱离原子的能量,同时生成自由电子和正的离子。在生成离子偶时, α -粒子要消耗其本身一部分能量。

由于大量的这种相互作用的结果, α -粒子将失掉其全部能量而被停止运动(制止)。

在气体中, α -粒子在单位路程上所生成的离子偶数目要比其他种辐射多得多。因此, α -辐射在自动检查装置中的主要应用范围是气体分析、气体的压力和流量测量以及其他基于电离气体介质的方法^[13]。

B. 电子或 β -衰变与原子核中的一个中子嬗变为质子相关联。此时,原子核放出一个电子,这个电子一般称之为 β -粒子。原来元素的原子核则嬗变为原子序数增一个单位的元素的原子核。正电子衰变也是为我们所熟知的。在正电子衰变下,原子核中的一个质子嬗变为中子而同时辐射出一个正电子;此时,原来的原子核的序数便减小一个单位。与电子衰变正好相反的现象则称为K-俘获。在此情况下,原子核从靠近它的K-层上俘获一个电子,因而原子核中的一个质子嬗变为中子;电子由离开原子核更远的壳层到转为原子核俘获电子的地方,在这种嬗变的同时,便发射出特征伦琴辐射。

β -辐射具有连续的能谱,由零开始到表征该同位素的某一最大能量 $E_{\text{макс}}$ 。 β -辐射具有连续的能谱,这是因为在 β -衰变下生成了中微子,而中微子则带走了 ΔE 的能量而使 β -粒子达不到其最大能量 $E_{\text{макс}}$:

$$\Delta E = E_{\text{макс}} - E, \quad (3)$$

式中: E —— β -粒子从原子核中所带走的能量。

β -粒子(电子)入射到物质中便与物质中的电子和原子相互作用。这种相互作用通常为弹性的和非弹性的。在弹性的相互作用下,电子的能量不受到损失,但它们会急剧地改变飞行的方向——散射出去。

在非弹性的相互作用下,当 β -粒子与原子中的电子撞击时, β -粒子的能量将因电离物质的原子而受到损失(电离损失)。当 β -粒子受到库伦场的制止时,原子核中将产生制止伦琴辐射(辐射损失)。第一种损失和第二种损失之比,可以近似地由关系式 $1000/ZE$ 来确定,此处 E (β -辐射的能量)的测量单位为兆电子伏, Z ——物质的原子序数。因而,随着 β -辐射所通过的物质的原子序数和辐射能量 E 的增加,电离损失将减低,而辐射损失则增加。 β -粒子的能量损失决定着它们在物质中的射程。具有最大能量 $E_{\text{макс}}$ (兆电子伏)的 β -粒子在任一物质中的射程,均可近似地按下列经验公式来确定:

$$l_{\rho \text{ макс}} = \rho d = 0.412 E_{\text{макс}}^{(1.205 - 0.0954 \ln E_{\text{макс}})}; \quad (4)$$

式中: ρ ——吸收物质的密度(单位为克/厘米³),

d ——吸收物质层的厚度(单位为厘米),

$l_{\rho \text{ макс}}$ ——射程(单位为克/厘米²).

β -粒子在气体中的射程可达数米,而在液体和固体中则达几毫米。

β -辐射通量将因穿过物质层而受到衰减。这种衰减可以近似地用下列指数定律来描述:

$$J = J_0 e^{-\mu_{\text{л}} d}, \quad (5)$$

式中: J_0 ——入射到吸收体的辐射通量强度,

J ——穿过厚度为 d (厘米)的吸收层后的辐射通量强度,

$\mu_{\text{л}}$ ——线性吸收系数。

实验证明 $\mu_{\text{л}}/\rho$ 比值几乎与吸收体的化学成份无关。这个比值称为质量吸收系数 $\mu_{\text{м}}$, 并具有厘米²/克的量纲:

$$\mu_{\text{м}} = \frac{\mu_{\text{л}}}{\rho}. \quad (6)$$

对于 β -辐射来说, $\mu_{\text{м}}$ 值可以近似地用下列经验关系式来确定:

$$\mu_{\text{м}} = 22 E_{\text{макс}}^{-4/3}. \quad (7)$$

将式(6)的 $\mu_{\text{л}}$ 值代入式(5)中,则得到

$$J = J_0 e^{-\mu_{\text{м}} \rho d}. \quad (8)$$

恒等式(5)和(8)给出了 β -辐射的吸收与吸收体的厚度或密度之间的关系,它们是设计大多数自动检查装置的基础。

β -辐射在自动检查装置中的应用范围主要是:根据 β -辐射的吸收,测量材料的厚度、密度或重量;根据 β -辐射的逆散射,测量复盖层的厚度或物质中各个组分的浓度。 β -辐射体现在正被广泛地应用到放射性继电器中。 β -辐射的电离能力非常大,因此,有时它可以用来检查气体的流量。

B. γ -辐射发生于放射性的嬗变而生成的原子核(例如,在 β -衰变的情况下)具有剩余的能量。当失掉这一能量后,原子核便由受激状态转到基本的、非受激的状态,而以一个或数个 γ -量子的形式发射出电磁 γ -辐射。

我们可以 Co^{60} 的原子核衰变为例。 Co^{60} 的原子核当发射出 β -粒子时便嬗变为 Ni^{60} 的原子核,但是后者是处于受激状态,因而将失掉其剩余的能量,而相继地发射出两个 γ -量子。

γ -辐射在穿过物质时,将被物质的原子所散射和吸收。窄的单能 γ -辐射束的衰

減可用公式(5)或(8)所描述的指数定律来进行計算。对于很寬的 γ -輻射束在大多数物質中的衰減來說,下列公式是正确的:

$$J = J_0 e^{-\mu_{MY} \rho d} (1 + k_1 \mu_{MY} \rho d + k_2 \mu_{MY}^2 \rho^2 d^2); \quad (8a)$$

式中: k_1 和 k_2 ——与輻射能量有关的常数,

μ_{MY} ——窄射束輻射的质量吸收系数。

括号中附加的几項是考慮到在一次射束的作用下在吸收体中所产生的二次輻射(散射的、輻制的、湮沒的等)的影响。在設計自动检查装置时,这几項一般可以略去不計,而利用与关系式(5)和(8)相似的式子。吸收系数 μ_a 和 μ_M ,在这种情况下将比相应的理想的窄射束的吸收系数小一些。

如果 γ -輻射譜是由 n 条綫所組成,則衰減定律可写成:

$$J = \sum_{k=1}^n J_{0k} e^{-\mu_{Mk} \rho d}; \quad (9)$$

式中: J_{0k} ——来自第 k 条譜綫的輻射通量强度,

μ_{Mk} ——第 k 条譜綫的质量吸收系数。

在吸收体的化学組分很复杂的情况下,质量吸收系数的表达式具有下列形式:

$$\mu_M = \sum_{i=1}^n K_i \mu_{Mi}, \quad (10)$$

式中: K_i ——物質中第 i 个組分的重量浓度,

μ_{Mi} ——物質中第 i 个組分的质量吸收系数。

γ -輻射的衰減是一个很复杂的过程。它基本上决定于以下三个因素:

光电效应 γ -量子被原子中电子壳层光电吸收或真实吸收的过程,是和由电子壳层上夺走电子同时发生的。电子一般是由靠近原子核的一层被夺走的。被騰空的能級則由离开原子核更远的层上的电子所填補,与此同时便发射出特征輻射。 γ -量子的能量轉变为光电子的动能和荧光輻射能。輻射能量愈低和吸收輻射的介质的原子序数愈大,則因光电效应而引起的 γ -輻射的衰減就愈显著。因光电效应而引起的质量吸收系数 $\mu_{M\phi}$ 与元素的原子序数 Z 及其质量数 A 之間的关系,可以初步近似地用下式来表征:

$$\mu_{M\phi} \approx f_1(E) \frac{Z^4}{A}. \quad (11a)$$

康普頓(Compton)效应 也是 γ -量子与电子相互作用的结果。由于这种相互作用, γ -量子便偏离其初始的方向并損失掉一部分能量,轉让給电子。于是被加速的电子便由原子的电子壳层掙脫出来,而与 γ -量子的飞行方向成某一角度飞离出去。

在大多数的自动检查装置中都采用能量约为 0.5—1.5 兆电子伏的 γ -辐射。在这种情况下，因康普顿效应而引起的辐射衰减则起着主要作用。因康普顿效应而引起的质量吸收系数可以初步近似地用下式来表征：

$$\mu_{\text{К}} \approx f_2(E) \frac{Z}{A} \quad (116)$$

«电子-正电子»偶的生成，当 γ -辐射以超过所生成的电子偶的静止能量（电子偶的静止能量接近于 1.02 兆电子伏）穿过物质时，便在物质中生成电子-正电子偶。这个过程的概率是随着 γ -辐射能量的增加而增大的，并且近似地与介质的原子序数的平方成正比。因生成电子偶而引起的质量吸收系数可以初步近似地用下式来表征：

$$\mu_{\text{и}} \approx f_3(E) \frac{Z^2}{A} \quad (11B)$$

根据上述三个基本过程， γ -辐射的质量吸收系数的总的表达式便具有下列形式：

$$\mu_{\text{м}} \approx f_1(E) \frac{Z^4}{A} + f_2(E) \frac{Z}{A} + f_3(E) \frac{Z^2}{A}; \quad (11r)$$

式中： $f_1(E)$ 、 $f_2(E)$ 和 $f_3(E)$ ——取决于辐射能量的系数。

γ -辐射被物质所吸收的比较少，因而它可以穿过厚度达数十厘米的固体。 γ -辐射的电离能力不大，主要是由二次电子来电离介质。

γ -辐射在那些要求高辐射穿透能力的各种自动检查装置中（探伤器、液面计、密度计、厚度计等）得到了广泛的应用。

Г. 中子辐射。用在自动检查装置中的中子源一般是基于 (α, n) 这种形式的核反应的，在此情况下，由于原子核受到 α -粒子的轰击而产生中子。一般所采用的是镭-铍或钋-铍源。（ $\text{Ra} + \text{Be}$ ）源为焊接在安瓿（ампула）中的镭和铍的粉末混合物。在镭的衰变下所产生的 α -粒子则轰击铍的原子核，此时，便发生核反应，飞出中子，而这些中子则在各个方向自安瓿中发射出去。

根据这些中子的不同能量，可以分为快中子和慢中子。能量小于 0.02—0.05 兆电子伏的中子，一般被看成是慢中子；具有较大能量的中子，则为快中子。大多数的中子源都辐射出快中子。为了得到慢中子，而将中子源放在物质-慢化剂中，在物质-慢化剂中，由于中子与物质的原子核多次的碰撞，中子将损失其能量。具有能量约为 1/30 电子伏的中子，则称为热中子。中子与物质相互作用的概率是用某些相互作用效应的有效截面来表征的。有效截面具有面积量纲，并由下式来确定：

$$\sigma = \frac{n_{\text{вз}}}{n_{\text{а}}}; \quad (12)$$

式中: $n_{вз}$ ——单位路程上相互作用的次数,

n_a ——单位容积中的原子数目.

中子与物质的原子核相互作用的总的有效截面 (与电子相互作用的概率则非常少) 由中子的散射截面和俘获截面所组成, 亦即: $\sigma_{полн} = \sigma_{расс} + \sigma_{захв}$. 在快中子穿过物质的情况下, 中子受到物质原子核的散射起着主要的作用. 中子与原子核相碰撞, 将损失掉一部分能量, 因而便缓慢下来. 原子核的质量愈接近于中子的质量时, 中子转交给原子核的那部分能量就愈大, 因此, 当中子与氢原子核(质子)相碰撞时, 中子便受到最强的慢化. 在此情况下, 经过 15—18 次的碰撞, 就足以使具有几兆电子伏能量的快中子变为热中子. 重物质则是不良的慢化剂, 在这些物质中所需的碰撞数可达数百或数千次.

中子将其一部分能量转交给物质的原子核后, 便使这些原子核得到加速, 而生成所谓反冲原子核.

热中子在与物质相互作用时, 通常要被物质的原子核所俘获; 这就使得慢中子最易被多种物质所吸收. 某些元素, 例如硼, 具有很大的俘获截面, 因此, 有着特别佳的吸收中子的性能. 原子核俘获了中子后一般便嬗变成放射性的原子核, 并辐射出核粒子或 γ -辐射.

在自动检查装置中, 中子通量可用来测量含氢介质的湿度和液面, 以及根据所感应的活性检查物质的组成等.

对于自动检查装置来说, 最具有发展前途的是利用小型的、基于加速基本粒子的中子发生器. 这类发生器的主要优点是有可能用它们来得到可以随意终止其作用、调节其强度或能量的很强的单能中子通量.

*

*

*

在自动检查装置中所采用的辐射源的活性, 其测量单位一般为毫居里(辐射源具有 1 毫居里的活性, 是指在其中每秒钟发生 3.7×10^7 次衰变). 源的活性(亦即源的辐射强度)将随着时间按指数定律而减弱:

$$a = a_0 e^{-\lambda t}; \quad (13)$$

式中: a_0 ——初始活性,

a ——经过时间 t 后的活性,

λ ——放射性衰变常数.

辐射体的活性减弱至一半所需的时间称为半衰期($T_{\frac{1}{2}}$), 它与 λ 具有下列关系:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (14)$$

相应于 1 毫居里活性的放射性同位素的最小重量数(单位为克)可按下列公式来确定:

$$P = 2.79 \times 10^{-9} \times AT_{\frac{1}{2}}; \quad (15)$$

式中: A ——该同位素的质量数,

$T_{\frac{1}{2}}$ ——半衰期(单位为年)。

γ -辐射源的活性也是以镭的克当量来表示的。活性为 1 克当量镭的源,其所产生的 γ -辐射的强度,和与其本身的衰变产物处于放射性平衡的 1 克镭在相同条件下所产生的 γ -辐射的强度相同。

对于中子源来说,中子的输出也是一个很重要的因素。就一次衰变数而言,中子输出一般是不大的;当源的结构为最佳时,在 $Ra + Be$ 的源中,每 1 毫居里的活性在 1 秒钟内具有 10^4 数量级的中子,而在 $Po + Be$ 的源中,则每 1 毫居里的活性在 1 秒钟内具有 10^3 数量级的中子。

与物质相互作用的核辐射,其剂量是用伦琴来表示的。1 伦琴(r)就是在 1 (厘米)³ 的干燥空气中(在压力为 760 毫米水银柱、温度为 $^{\circ}C$ 的情况下)生成总电荷为一个静电单位的同性离子所需的辐射剂量。辐射剂量功率用伦琴/秒来表示。

核辐射的能量,在很大程度上决定着它们的特性。某类辐射的能量愈大,其穿透能力就愈强。变化辐射的能量,就可以改变辐射与介质相互作用的特性。在自动检查装置中所采用的辐射能量,一般为几分之一或一个兆电子伏。

表 1

化学符号	元素名称	辐射种类	半衰期	能量(兆电子伏)	
				粒子	γ -量子
Co^{60}	钴	β, γ	5.3 年	0.31	1.17; 1.33
$\begin{Bmatrix} Sr^{90} \\ Y^{90} \end{Bmatrix}$	锶, 在衰变下生成钇	$\begin{Bmatrix} \beta \\ \beta \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 20 \text{ 年} \\ 2.54 \text{ 天} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.54 \\ 2.27 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} - \\ - \end{Bmatrix}$
$\begin{Bmatrix} Ru^{106} \\ Rh^{106} \end{Bmatrix}$	钌, 在衰变下生成铑	$\begin{Bmatrix} \beta \\ \beta, \gamma \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 290 \text{ 天} \\ 30 \text{ 秒} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.039 \\ 3.5 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} - \\ 0.52 \end{Bmatrix}$
Cs^{137}	铯	β, γ	33 年	0.52	0.66
$\begin{Bmatrix} Ce^{144} \\ Pr^{144} \end{Bmatrix}$	铈, 在衰变下生成镨	$\begin{Bmatrix} \beta, \gamma \\ \beta, \gamma \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 282 \text{ 天} \\ 17.5 \text{ 分钟} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.3 \\ 2.96 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.03-0.23 \\ 0.7-2.4 \end{Bmatrix}$
Tu^{170}	钍	β, γ	120 天	0.97	0.084
Ir^{192}	铱	β, γ	74 天	0.67	0.14—0.88
Tl^{204}	铊	β, γ	2.7 年	0.76	0.076
Po^{210}	钋	α, γ	138 天	5.3	0.8
$Po^{210} + Be^9$	钋+铍	n	138 天	4*	0.8
$Ra^{226} + Be^9$	镭+铍	n, γ	1590 年	5*	0.188; 0.5

* 表示平均的能量。

外在条件(压力、温度、电场和磁场等)对辐射的强度和能量没有任何影响,这是核辐射源的一个重要特性。这是因为放射性是不取决于原子中电子壳层的过程的,在那里相互作用的能量具有与一般物理现象的能量相同的数量级;而与原子核内部所发生的现象有关,在那里相互作用的能量要高3—4个数量级。

在表1中列出了某些广泛应用于自动检查装置中的放射性同位素及辐射源。

§ 2. 辐射接收器

用在自动检查装置中的辐射接收器,是基于核辐射在穿过介质时,具有电离介质的效应,或者是基于某些物质在核辐射的作用下发光的效应。下面列举出用在自动检查装置中几种主要形式的辐射接收器,并简要地分析在这些接收器中所发生的过程。

用作辐射接收器的有电离室(致电离作用)、气体放电计数器(致电离作用)和闪烁计数器(发光作用)两种。

对于自动检查装置来说,最具有发展前途的辐射接收器也是CdS, CdSe等(复晶的和单晶的)这类半导体的辐射接收器;这些接收器的工作原理是基于晶体的传导率在核辐射的作用下将发生变化。这一类辐射接收器的优点在于其测量线路十分简单(与光敏电阻的线路相似);但是它们也具有严重的缺点,即有着不可避免的惰性和相当坏的灵敏度,因此,这些接收器直到目前为止还没有得到广泛应用。

表征任一个辐射接收器的质量的重要因素乃是记录效率,亦即被接收器所记录的粒子数或量子数与通过接收器工作空间的总的粒子数或量子数之比。

A. 电离室。 电离室的主要部分为两个电极和在电极之间空间的充填气体。电位差加在两个电极上,而气体介质则在核辐射的作用下被电离。离子(以及自由电子)以速度

$$v = k\mathcal{E} \quad (16)$$

沿着电场的电力线而移动;

式中: k ——离子迁移率(单位为厘米²/伏·秒),

$\mathcal{E}$ ——电场强度(单位为伏/厘米)。

电流在电离室电极的电路中产生。核辐射的强度愈大,在电离室的空間中所生成的离子偶就愈多,因而所产生的电流也就愈强。电流 I 与加在电离室上的电压 U 之间的关系如图1所示。 Oa 段称为线性段或欧姆段。在这一段上,电离室的工作特点是:电场强度和离子的迁移速度都不大,一部分离子在迁移时得到复合,而只有部分的离子到达电极上;加在电离室上的电压愈大,离子的迁移速度就愈快,复合作用就

减少;因而,电流将近似地以线性规律增加。 ab 段称为饱和段。在这一段上,处于工作状态下的电场强度以及离子的迁移速度是如此之大,以致实际上可使所生成的全部离子都到达电极上。此时,饱和电流和所加电压无关,而等于:

$$I_{\text{нас}} = eN_{00p}; \quad (17)$$

式中: e ——离子的电荷,

N_{00p} ——单位时间内在电离室中所生成的离子数目。

继续增大电压(b 点右边的一段)时,自由电子将被加速到这种程度,即当其与中性分子相碰撞时,可使这些中性分子电离化,而引起雪崩电离和气体放电。因此气体放电计数器是工作在 b 点右边的一段上,关于这类计数器的作用原理将在下面再进行详细的研究。电离室的工作范围为 oa 和 ab 两段。

在自动检查装置中,电离室是被用作 α -、 β - 及 γ -辐射接收器,同时,电离室的结构则与该电离室用于何种辐射有着极其紧密的联系。

在记录 α -辐射时,源经常是放在电离室的内部。如果把它放在外面,则在电离室的壁上做一小窗,窗口一般用一层很薄的膜挡住。在记录 α -辐射时,电离室的效率接近 100%。在记录 α -粒子时,要得到饱和状态是很困难的,这是因为离子是沿着粒子飞行的路线成柱状分布的,并在这一柱中进行很强烈的复合(“柱复合”)。在电离室中,粒子相对于电场的飞行方向具有重大意义,如果粒子是以垂直于电场的方向飞行,则电场将把离子从所生成的离子柱中“拉出”,因而复合将比在粒子的飞行方向与电场的方向相一致的情况减少。用于 α -辐射的电离室的电极具有各种不同的形状:片状的,圆柱形的,有时还用球状的。

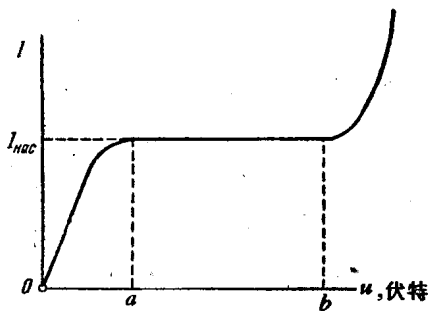


图1 电离室的电流与加在其上的电压之间的关系

用于记录 β -辐射的电离室,其容积要比用于记录 α -辐射的电离室大。一般采用容积为 1—2 升的电离室。辐射源一般是对着很细小的窗口放在电离室的外部,而辐射便通过这一窗口进到电离室中。用于记录 β -辐射的电离室,其效率也是接近于 100% 的。

用于记录 γ -辐射的电离室与用于记录 α -及 β -辐射的电离室有着很大区别,这是因为 γ -辐射的电离能力比较小,电离作用主要靠二次电子来产生。一般所采用的电离室或是在压力作用下充以气体大型电离室,或是增加其内部表面的多片电离室。

随着室内气体的容积和压力的提高, γ -量子的吸收将增强起来,因而记录这些量

子的效率也将提高。在較高的压力下,复合离子的数目将增多,因此需要在这类电离室上加上很高的电压。在多片电离室中,增加其内表面也可使二次电子数得到增加,亦即使记录效率得以提高。电离室的材料和壁的厚度,以及充填气体的种类及純度,在各种情况下都很重要。用于记录 γ -辐射的电离室,其效率一般是不大的,只有百分之零点几;在最佳的情况下也只有百分之一。

当记录 β -和 γ -辐射时,电离室的饱和状态只是在辐射通量强度不大的情况下才不难做到(当辐射通量的强度为很大时,离子的复合作用便开始急剧起来)。

对于自动检查装置来说,具有发展前途的是这样一类的电离室,即在这类电离室中,加在其上的电压是靠电极的接触电位差来产生。这类电离室不需要有外部电源,并具有很佳的特性曲线。

在电离室的输出端所得到的电流一般是很小的,约为 10^{-10} — 10^{-13} 安培。为了测量这类电流,而采用了在输入端带有高欧姆电阻的特殊电测线路。由于直流放大一般会因放大器的“漂移”而带来很大的误差,因此,通常采用将直流变为交流的变换器是使用机械断续器或动态电容器的。

5. 气体放电计数器。在分析电离室的工作时,我們已经说过,如果将电离室的电压增加到高于 b 点的电压(图 1),则电子将被加速,以致当它与中性分子相碰撞时,要碰出二次电子来。雪崩电离的到来将使在雪崩情况下所生成的大量二次电子,归根到底相应于一个一次电子。这种一次电离过程的特殊《内部放大》的产生,正是说明了各种气体放电计数器的特点。此时,如果加在计数器上的电压只比 b 点的电压少许高一点,则将产生所谓具有某一完全确定的内部气体放大值的《比例状态》。在这种状态下,在计数器输出端上的一些微小脉冲将相应于初始电离的一些微小脉冲。由此便得到比例计数器的这个名称。这类计数器应用在自动检查装置中是比较少的,因此,我們就不作详细的论述。继续增大计数器的电压,则将过渡到自持放电状态。在这种状态下,在计数器的输出端将出现一个幅度为恒定的、不取决于初始电离值的脉冲。工作在自持放电状态下的气体放电计数器,我們称为盖革-弥勒(Geiger-Müller)计数器(简称 G-M 计数器)。

气体放电计数器一般做成圆柱形,沿着圆柱体的轴张拉一很细的金属丝。在圆柱体(阴极)上加一负电位,而在金属丝(阳极)上加一正电位。这种结构可以保证阳极附近的电场在计数器电压較小的情况下,有着很大的梯度(为雪崩电离所需要的梯度)。为了使 G-M 计数器中的放电在初始电离的电源消失后得到停止,就需要采取一些特殊的措施,利用外部线路来猝灭放电的 G-M 计数器(在最简单的情况下,是在计数器上串联一高欧姆电阻,当发生放电时该电阻将在计数器上引起一电压降),称

为 非自猝灭计数器。这类计数器的脉冲宽度很大(约 10^{-2} 秒), 因此, 目前几乎没有得到应用。

在自猝灭计数器中, 则采用了一些能够猝灭计数器中放电初阶段的特殊掺入物以猝灭计数器内部的放电。例如, 许多种原子的气体都可以作这类掺入物。自猝灭计数器的脉冲宽度一般不超过 10^{-4} — 10^{-5} 秒, 而死寂时间(亦即计数器在放电后得到恢复而不能记录辐射的时间)不超过 10^{-4} 秒。当采取某些特殊措施后(在阳极金属丝上加上许多能够限制放电区域的绝缘小球以截短计数器), 则这个时间还可以更加减小。充有多原子气体的计数器, 其缺点是使用期受到限制(一般为 10^8 — 10^9 个脉冲), 在使用期中, 多原子的分子将发生衰变, 因而使计数器不能正常工作。

在自动检查装置中得到特别广泛应用的是所谓充以惰性气体(氩、氦)及少量卤素(氯、溴)掺入物的卤素计数器。这类计数器的特点是使用期很长, 工作电压很低。卤素计数器的使用期之所以很长, 是由于猝灭放电的历程不会破坏气体的分子之故。

计数器的主要工作特性是其计数特性, 它表示着计数器的输出脉冲数与加在计数器上的电压之间的关系。图 2 绘出了电离辐射两种强度值 ($J_1 > J_2$) 情况下的计数器的计数特性曲线。c 点左边的一段为比例计数区。d 点右边的一段则相应于连续放电。cd 段为 G-M 计数器的工作段, 并称之为“坪”。坪愈宽和坪的斜率愈小, 则计数器的性能就愈好。在自动检查装置中所采用的卤素计数器一般具有的坪宽约为 60—100 伏, 坪的斜率则不大于每伏 0.125 %。

从 G-M 计数器所取下的电压脉冲具有约几伏的幅度, 因此, 不需要很大的放大。

在自动检查装置中采用了计数器的两种工作状态: 1) 平均电流状态; 在此状态下, 计数器的脉冲进到积分键中, 因此所测量的为计数器的平均电流; 2) 计数状态; 在此情况下, 计数器的脉冲一般要借助于一个多谐振器线路进行补充放大和整形, 而后再加到计数装置中。

G-M 计数器的效率是按下列公式由电离辐射在计数器空间内生成一个电子的概率确定的:

$$\eta = 1 - e^{-n_{ep}}; \quad (18)$$

式中: n_{ep} ——计数器中在电离剂的路径上所

产生的平均电子数, n_{ep} 的量可以被确定为比电离 n_y 、粒子在计数器中的路程 l_{eq} 和气体压力 p 之乘积:

$$n_{ep} = n_y l_{eq} p. \quad (19)$$

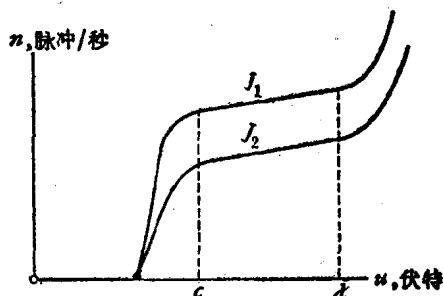


图 2 气体放电计数器的计数特性曲线