

β 测厚仪

刘以思

(清华大学核能技术设计研究院, 北京, 102201)

本文介绍了透射式 β 测厚仪的原理及实际应用, 详细介绍了影响精度的因素和设计中应考虑的主要问题。并对探测器的选择进行了比较。

关键词: 电子 β 射线 测厚仪 电离室

β 测厚仪在橡胶、造纸、塑料等工业生产中得到了广泛的应用, 将测厚仪与工控机配合则可完成工业生产过程中的自动控制。由于工业生产中质量要求的不断提高和国内条件及价格的限制, 使得测厚仪的使用精度受到影响, 因此对于测厚仪的设计及研制过程中的每个环节都要仔细考虑, 以求测厚仪的综合性能达到用户要求。

1 原理^[1~3]

β 射线通过物质时强度减弱, 利用这一原理制成测厚仪。由于 β 射线为连续能量的电子, 所以必须对电子通过物质时造成强度减弱的机制进行仔细研究。

电子通过物质时强度减弱由两部分组成, 即电离能量损失和散射。

1.1 电子的能量损失

1.1.1 电离损失

电子通过物质时与物质原子的核外电子发生非弹性碰撞, 使物质原子电离或激发, 因而损失其能量称为电子的电离损失, 这是电子在物质中损失能量的重要方式。电离能量损失的公式为:

$$(dE/dx)_{\text{ion}} = \frac{2\pi e^4 N Z}{m_0 V^2} \left[\ln \frac{m_0 V^2 E}{Z I^2 (1 - \beta^2)} \right.$$

$$\left. - \ln 2(2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta) + (1 - \beta^2) + (1/8)(1 - \sqrt{1 - \beta^2})^2 \right]$$

V 为入射电子的速度; N 、 Z 和 I 分别为靶物质单位体积的原子数、原子序数和平均激发能; dE/dx 的单位为 erg/cm 。

物质的原子在退激过程中还将产生俄歇电子或它的特征 X 射线荧光, 称为次级辐射。

1.1.2 辐射损失

当电子通过物质时与物质的原子核发生非弹性碰撞时产生的一种能量损失为辐射损失。当电子接近原子核时速度迅速减低, 发出电磁波(光子), 这种电磁辐射称为轫致辐射。

公式为:

$$(dE/dx)_{\text{rad}} \propto \frac{z^2 Z^2}{m^2} N E$$

E 为入射粒子能量; z 和 Z 分别为入射粒子的电荷数和靶核的原子序数; N 为单位体积中物质的原子数。

由上式看出, 辐射损失率与入射电子能量成正比, 对于高能电子辐射损失就比较重要了。

辐射损失与电离损失之比为:

$$\frac{(-dE/dx)_{\text{rad}}}{(-dE/dx)_{\text{ion}}} = ZE/800 \quad (E \text{ 以 MeV 为单位})$$

设 $E=2\text{MeV}$, 对于聚酯膜比值为 0.016, 对于 Al 为 0.035, 对于 Pb 则为 0.21。

因此, 在一般有机薄膜测厚中, 电子在样品中韧致辐射的份额是比较小的, 主要是电离损失。但是在源屏蔽室的设计和准直器的设计中对韧致辐射必须认真考虑, 尽可能地减弱韧致辐射。

1.2 电子的散射

电子在物质中与物质原子核库仑场作用只改变运动方向, 而不辐射能量, 这种过程为弹性散射。由于电子质量很小, 因而散射角很大, 而且会发生多次散射, 偏离原来的方向, 入射电子能量越低、靶物质原子序数越大, 散射就越厉害; 电子在物质中经过多次散射, 其最后散射方向与入射方向的夹角可以大于 90° , 这种散射称为反散射。

反散射的份额与样品的厚度有关, 样品越厚反散射的份额越大, 当样品达到一定的厚度时, 反散射份额不变, 此时的厚度称为饱和反散射厚度。

图1给出几种材料表面的反散射系数 η 与入射电子能量关系曲线, η 为反散射电子与入射电子之比 (电子为垂直入射)。由曲线上可以看出反散射系数 η 与物质的 Z 及电子的 E 有很大的关系。低能电子在高 Z 物质上的反散射可达到 50% 以上。

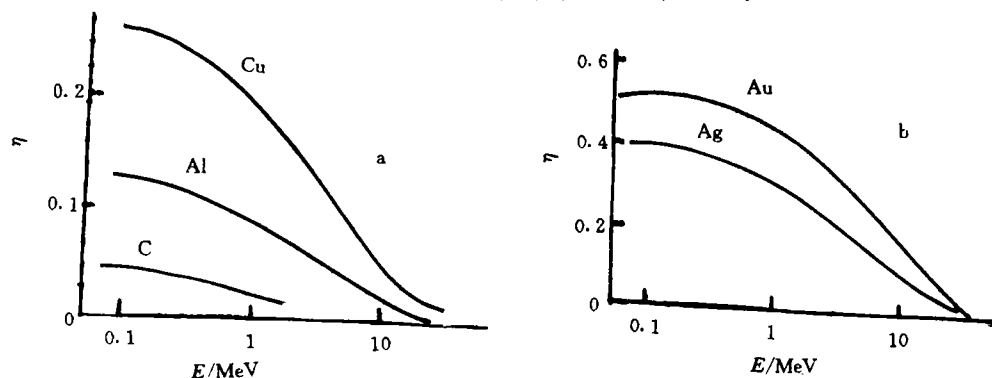


图1 单能电子在不同靶物质上的反散射系数

反散射效应可用来测量金属镀层的厚度, 制成反散射式的测厚仪。

当 β 粒子进入探测器时, 也可能由于探测器窗的反散射造成漏计数, 降低探测器的探测效率, 在 β 测厚仪的设计中必须给予充分重视。当然在 β 粒子通过样品时也会产生散射, 尤其是对于原子序数高的样品影响就更大了。样品中的次级辐射、韧致辐射和 β 散射对测量精度有很大影响, 因此在测厚仪的设计中应给予充分地重视, 设法将其影响降至最低。

1.3 β 射线的射程

粒子在初始入射方向上穿过物质的最大距离称为该粒子在物质中的射程。 β 粒子在物

质中的射程对于 β 测厚仪的设计是十分重要的。由于 β 粒子是电子，所以 β 粒子的射程首先还要由电子射程的研究开始。

电子质量很小，在电离损失、辐射损失其能量过程中及与靶核的弹性散射过程中，电子运动的方向有很大的改变，这样电子穿过物质时走过的路程是十分曲折的，因而电子在物质中的路程轨迹长度大大超过电子在物质中的射程。

β 射程因能量为连续分布，故没有确定的射程可言，一般用 β 射线能谱中最大能量的电子所对应的射程表示 β 射线的射程，称为 β 射线的最大射程 R_β 。

如果 R_β 用质量厚度表示 (g/cm^2)， β 粒子在穿过相同质量厚度不同物质时，由于与 β 粒子发生碰撞的电子数目大体相同，所以用质量厚度表示时， β 粒子的射程近似相等。因为对 Z 相差不太大的物质，其电离阻止本领 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 正比于 Z/A ，对于绝大多数的元素 $Z/A \approx 1/2$ ，所以对那些原子序数相近的物质，如：空气、铝、塑料和石墨等，尽管它们的密度差异很大，以质量厚度为单位的射程值却近似相同。

铝作为吸收体、 β 粒子与能量之间的关系有下面的经验公式：

$$R_\beta = 0.407 E_{\beta\text{max}}^{1.38} \quad 0.15\text{MeV} < E_{\beta\text{max}} < 0.8\text{MeV}$$

$$R_\beta = 0.542 E_{\beta\text{max}} - 0.133, \quad 0.8\text{MeV} < E_{\beta\text{max}} < 3\text{MeV}$$

$E_{\beta\text{max}}$ 以单位为 MeV 数值， R_β 以单位为 g/cm^2 数值。

上面的经验公式对于原子序数与铝相近的物质都近似适用。这一关系对于 β 测厚仪的物理设计是十分有用的。

1.4 β 射线通过物质的吸收曲线

β 射线因其电子能量连续分布，它的吸收曲线与单能电子的吸收曲线有明显不同。单能电子的吸收曲线粗略地认为是线性变化，而 β 射线即使吸收片很薄时，则 β 射线谱中低能电子被吸收，因此 β 射线的吸收曲线的开始部分斜率变化很大。在 β 射线谱中每一能量间隔内的电子可以认为遵循线性吸收规律，但由于 β 射线谱中电子能量连续分布和不同能量的电子其吸收曲线的斜率的不同。迭加后对于 β 射线谱的主要部分而言，其吸收曲线近似地为指数曲线，如图2、图3所示。

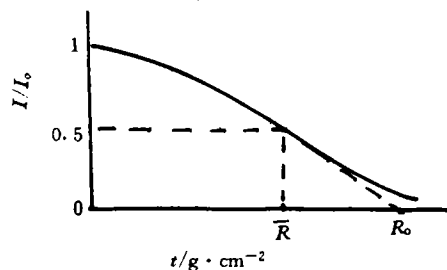


图2 单能电子吸收曲线

注： \bar{R} 为平均射程； R_0 为外推射程

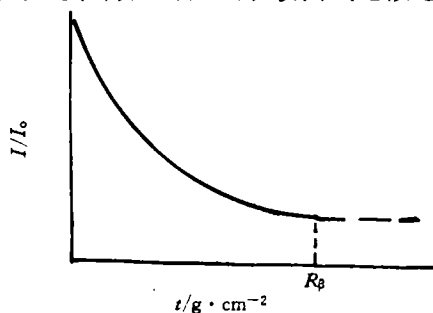


图3 β 射线的吸收曲线

注： R_β 为 β 射线的最大射程

β 射线在物质中的吸收规律近似地遵守

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

I_0 为无吸收的强度， I 为通过厚度为 t 的吸收片后透射强度， μ 为线性吸收系数，如果 t 的单位为 cm ，则 μ 的单位为 cm^{-1} 。

如果用质量厚度为单位

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho) \rho t} = I_0 e^{-\mu_m \rho t}$$

$\mu_m = \mu/\rho$ 单位为 cm^2/g , $t_m = \rho t$ 单位为 g/cm^2 ;

ρ 为物质的密度, 单位为 g/cm^3 ;

对于不同吸收物质, μ_m 随原子序数 Z 的增加而缓慢增加; 对于同一种吸收物质 μ_m 与 $E_{\beta\text{max}}$ 有关。对于铝有

$$\mu_m = \frac{17}{E_{\beta\text{max}}^{1.48}} \quad 0.15\text{MeV} < E_{\beta\text{max}} < 3.5\text{MeV}$$

μ_m 单位为 cm^2/g , $E_{\beta\text{max}}$ 单位为 MeV

指数关系对于测厚仪的数据处理是十分有用的。

β 射线测厚仪的测量范围与辐射源发出的 β 射线的最大能量有关, 表1给出不同 β 同位素辐射源测量的厚度范围。

表1 常用同位素源的厚度测量范围^[4]

同位素	$T_{1/2}/\text{a}$	$E_{\text{max}}/\text{MeV}$	$R_\beta/\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	可测厚度范围/mm		
				Al	Fe	聚 脂
^{47}Pm	2.623	0.225	50	0.004~0.12	0.001~0.04	0.008~0.24
^{85}Kv	10.7	0.647	240	0.04~0.6	0.01~0.25	0.08~1.0
^{204}Tl	3.78	0.763	280	0.04~0.8	0.01~0.25	0.08~1.6
$^{90}\text{Sr}-\text{Y}$	28.5	0.546/2.274	1100	0.3~3	0.1~1	0.6~6
$^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$	369 d	0.92 (70%)	1600	0.6~4.5	0.2~1.5	1.2~9

2 测厚仪的具体设计

测厚仪主要由三部分组成: 辐射源、探测器和二次仪表。

它们的正确选择是保证 β 测厚仪性能指标的关键。下面将分别介绍选择原则:

2.1 辐射源

同位素 β 放射源主要参数是 β 射线最大能量 $E_{\beta\text{max}}$, 半衰期 $T_{1/2}$ 和活度 A 。

2.1.1 β 射线的最大能量 $E_{\beta\text{max}}$

它决定测量样品的厚度范围, 待测样品厚度的上限必须小于 R_β , 如果满足指数规律则厚度应 $\ll R_\beta$ 。

一般可取 $\mu_t \sim 0.1$ 到 3 之间, 当 $\mu_t = 1$ 时精度最高。

2.1.2 同位素 β 放射源的活度 A

由测厚仪所测样品的运动速度而定, 也与测量精度有关。

当探测器用累积电离室时, 样品运动的速度决定响应时间常数 τ 。

$$\tau = RC$$

R 为电离室负载电阻, C 为电容。

测量的统计涨落反比于 $\sqrt{\tau A}$, 而统计涨落直接影响测量精度。所以在保证同一统计涨落条件下, τ 与 A 成反比。

当探测器是计数管和闪烁探测器时, 一般采用脉冲计数, 采样时间间隔为 Δt , Δt 也是

由样品运动速度决定，而每次采样的计数 $N=n\Delta t$ ， n 为计数率，正比于源的活度 A 。

统计涨落反比于 $\sqrt{N}=\sqrt{n\Delta t}=\sqrt{KA\Delta t}$

K 是与探测效率有关的常数，所以在保证同一统计涨落条件下 Δt 与 A 成反比。

2.1.3 半衰期 $T_{1/2}$

放射源的半衰期也是一个重要参数，在工业上使用的仪表半衰期一般则要一年以上。因为每过一个半衰期则放射源活度将减弱一半，所以对于短半衰期的源要注意放射源活度随时间变化的修正。

此外，还应考虑放射源的安全性、均匀性、稳定性及价格等因素。

放射源的选择可以参照表1。

聚脂膜对于 ^{147}Pm 、 ^{85}Kr 和 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 的吸收曲线如图4所示。

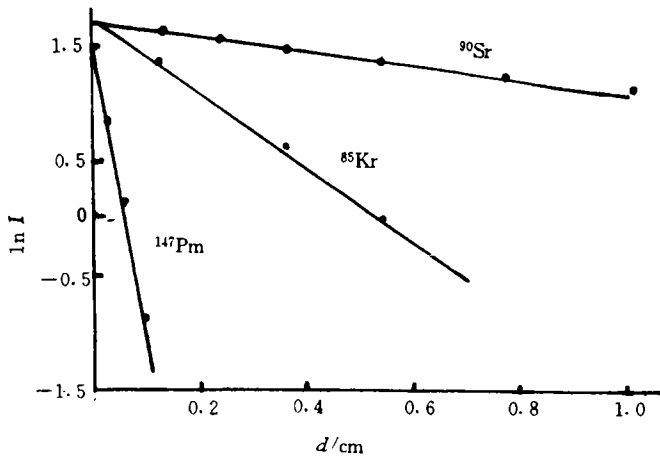


图4 聚脂膜对于 ^{147}Pm 、 ^{85}Kr 和 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 的吸收曲线

由于有时选不到合适的源，测量范围保证不了一定落在表中所列数据之内，在偏离不大的情况下，精心设计二次仪表，特别是提高前放的稳定性、提高信噪比，仔细选择时间常数，增加源的活度，减小统计涨落的影响，也可以达到预期的效果。

2.2 探测器

可供 β 测厚仪选择的探测器的种类很多，一般有计数管、闪烁探测器和电离室。

2.2.1 计数管

β 计数管有正比计数管和 G-M 计数管两种，它们都是充气型辐射探测器。

正比计数管工作在气体电离放电伏安特性曲线的正比区，工作电压高，输出信号与入射粒子能量有关，对工作电压稳定度要求高，一般不常用。

G-M 计数管工作在气体电离放电伏安特性曲线的 G-M 区。只要入射粒子在它的灵敏体积内产生一对离子对，就能触发雪崩式的自持放电而被记录，灵敏度很高。其输出信号与入射粒子能量无关。G-M 计数管放电过程很长，计数的死时间长达 $100\mu\text{s}$ ，为了提高计数率和延长计数管寿命，要使用猝灭电路，这样不仅可以使死时间缩短到 $2\sim3\mu\text{s}$ ，也可以延长寿命10倍以上。探测器的窗可用云母、铍等做成，探测器制造方便、价格便宜，可做成各种需

要的形状。由于输出脉冲幅度大，后接电子线路可以做得比较简单。

G-M 计数管分有机管和卤素管，表2列出了它们的性能

表2 不同类型 G-M 计数管的性能

	有 机 管	卤 素 管
起始电压/V	~1000	~300
工作电压/V	~1150	~400
坪长/V	>200	>80
坪斜/V	<0.1%	~0.1%
计数寿命	~10 ⁸ 脉冲	~10 ⁹ 脉冲

为使放电过程更早结束，防止因连续放电损坏计数管、G-M 管，特别是卤素管阳极输出回路的串联电阻应比较大,阳极系统对地电容应尽量小。所以一般在卤素管的输出端紧接一个高输出阻抗的射极跟随器。此外，卤素管的起始电压附近及坪曲线的中部有时会发生连续振荡放电，使用时应加以注意。计数管还应避光使用。

计数管的最大优点是价格低廉，致命的缺点是寿命短，就是加上猝灭电路长的寿命也不过10¹¹计数，如果每秒有10⁴次计数，也只能用100天。

2.2.2 闪烁探测器

闪烁探测器由闪烁体和光电倍增管两部分组成。 β 闪烁体一般是塑料闪烁体并应尽可能薄，以降低对其它射线的探测效率。市场有各类产品可供选择。光电倍增管的光阴极的吸收光谱应与闪烁体的发光光谱匹配。因闪烁探测器只需要光密而不要气密,所以闪烁探测器的窗只需用0.01~0.02mm 的 Al 薄即可达到光密要求。

光电倍增管的输出脉冲幅度与其工作电压紧密相关，所以，与 G-M 计数管、电离室不同，闪烁探测器本身并不具有坪特性。但是，在 β 测量中也可以得到一条形状类似于计数率随外加电源电压变化的“坪”曲线。坪曲线的甄别阈、工作电压及闪烁体等有关，尽管坪长较短、坪斜较大，并且在一定条件下才会出现，但对于 β 测厚仪的稳定性是十分重要的。应充分加以利用。影响闪烁探测器稳定性的因素很多，也十分复杂，如果用闪烁探测器作为 β 测厚仪的探测器，其稳定性始终是要严密注意的问题。

2.2.3 电离室

β 电离室有塑料窗、钛窗和铍窗。

电离室与卤素管比较，工作电压与卤素管相仿，坪长约为卤素管的十倍，坪斜比卤素管约低两个数量级，尽管价格高，但如果不漏气其寿命可达数年或十几年，由于当前弱电

流放大不成问题，所以电离室一直是工业测厚仪优先选择的探测器。

如果使用环境温度过高则电离室应加水冷却，如果温度变化大，则电离的温度系数也必须给予足够的重视并设法进行补偿。

2.3 二次仪表

工业控制微机和单片机都可使用。

工业控制微处理机价格虽高，但可实现一台微机同时与数台传感器相联。

(1994年7月10日 收到)

(下转第160, Continued on page 160)

中子所给出的信号可认为被清晰地记录下来而不受强 X 光干扰。与同尺寸的塑料闪烁探测器和 BF₃ 计数管相比, 液体闪烁探测器的 D-T 中子灵敏度可高出 1~2 个量级。

(1994 年 8 月 18 日 收到)

The Experimental Study of Photomultiplier With a High-Voltage Pulse Switch in the Strong X Ray Radiation Field

Chen Jiabin Jiang Wenmian Zheng Zhijian Tang Daoyuan Ding yiaonan

Liu Zhongli Su Chunxiao Hu Zhengwen Chen Xiaofeng

(Siuthwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry,

P. O. Box 525 (77), Chengdu, 610003)

Abstract

A photomultiplier with a high-voltage pulse switch was tested and studied at the LF—12[#] facility. The experimental results show that the restoring time of the phomultiplier increases with its saturation level. When an XP2040 type multiplier with a 2 μ s pulse switch is coupled to a liquid scintillator, the liquid scintillation detector can be used for the diagnosis of low-yield neutrons in the strong X ray radiation field.

(Key Words: Strong X ray radation field Photomultiplier High-voltage High-voltage pulse switch)

(上接第166页, Continued from page 166)

参 考 文 献

- 1 Siegbahn KAI. α , β , γ Ray Spectroscopy. North-Holland Publishing Company Amsterdam. 1965. 4.
- 2 复旦大学, 清华大学, 北京大学台编. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社. 1985.
- 3 马崇智等编著. 放射性同位素手册. 北京: 科学出版社出版. 1979. 12.
- 4 张家骅, 徐君权, 朱节清编著. 放射性同位素 X 射线荧光分析. 北京: 原子能出版社, 1981. 7.

(1995 年 1 月 22 日 收到)

β Thickness Gauge

Liu Yisi

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University,

P. O. Box 1021, Beijing, 102201)

Abstract

The theory of β ray gauging is analyzed and selection of radioactive source and detector is discussed.

(Key Words: Electron β ray Thickness gauge Ionization chamber)