

# 6 MV X 射线能谱的实验测定

肖开宇 崔高显 刘浩才 赵林 赵敏智

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都, 610003)

用穿透系数数值分析的叠代最小二乘法对稳态加速器的 X 射线能谱进行了实验测定, 编写了叠代最小二乘法的计算程序。

关键词 穿透系数 叠代最小二乘法 热释光

中图法分类号 TL 543 TL 816.1

当 X 射线脉冲加速器用作  $\gamma$  探头刻度的辐射源时, 为研究被刻度探头的能量响应和估算由 X 射线能谱的不确定度引起的刻度因子的误差, 要求能较准确地测定  $\gamma$  射线能谱。高能电子韧致辐射能谱的理论计算因需要引入许多难以确知的初始条件而变得很困难, 因此, 谱的实验测定就成为很有意义的工作。文献[1]、[2]用穿透系数数值分析的叠代法成功地测定了 4 MV 的 X 射线谱, 测量穿透系数时采用了铅和铝 2 种吸收体。铅的质量减弱系数在光子能量高于 4 MV 后随光子能量增加而上升, 在测量能量高于 4 MV 的能谱时, 计算出的能注量谱会出现 2 个峰这种不尽合理的结果<sup>[3]</sup>。为此, 本工作选用 1 种材料——聚四氟乙烯作吸收体来测量 6 MV 的 X 射线谱。

## 1 高能电子韧致辐射谱测算——穿透系数数值分析的叠代最小二乘法

穿透系数数值分析的叠代最小二乘法的原理是: 在一假定的初始特征谱(它可按一定物理条件进行合理的约束)的基础上根据实测的穿透系数用叠代最小二乘法对该初始特征谱进行修正, 直至由修正后的特征谱算得的穿透系数值在实验精度范围内与穿透系数实测值一致, 继而求得光子能注量谱和光子的平均能量。

### 1.1 穿透系数

探测器置于一准直的 X 射线束中, 经厚度为  $x$  的吸收体后, 穿透系数  $T(x)$  定义为:

$$T(x) = \frac{\int_0^{E_{\max}} e^{-\mu(E)x} F(E) dE}{\int_0^{E_{\max}} F(E) dE} \quad (1)$$

式中:  $F(E)$  是中值能量为  $E$  的单位能量间隔的光子未经任何吸收体减弱的情况下探测器中产生的信号。

## 1.2 叠代最小二乘法

**1.2.1** 设定初始特征谱 $\{F(E_j)\}$  将光子按能量分群,用 $\{E_j\} = E_1, E_2, \dots, E_j, \dots, E_n$  表示以能量为标志的光子能质的集合,  $\{F(E_j)\} = F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_n$  表示式(1)中  $F(E)$  的离散型谱,这里称它为“特征谱”。可以根据物理上有意义的结果和施加某些约束来设定一初始特征谱 $\{g(E_j)\} = g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_n$  作为特征谱 $\{F(E_j)\}$  的估计值。考虑到光子最大能量不可能超过加速器的最大激发电位所对应的加速器电子能量,对于高能电子的韧致辐射,特征 X 射线对谱的贡献可以忽略,谱中的低能成分更多地被加速器出射窗的固有过滤滤掉,初始特征谱的设定应满足以下一些要求:

- 1)  $g_j$  不能为负值;
- 2) 在指定的能量范围内,  $g_j$  不等于 0, 但可无限地趋于 0;
- 3)  $g_j$  单调地上升到一选定的光子模式能量对应的值,然后再单调地下降。

按以上要求,通常假定的初始特征谱为一简单的三角形谱(图 1)。

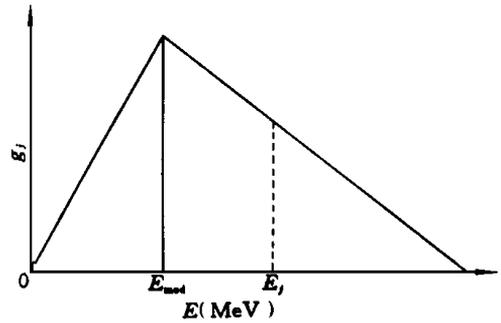


图 1 初始特征谱

Fig 1 Original characteristic spectrum

**1.2.2** 由 $\{g(E_j)\}$ 计算穿透系数 $\{T_i\}$  具有初始特征谱的 X 射线经序号为  $i$  的吸收体后的穿透系数  $T_i$  可用下式计算:

$$T_i = \prod_{j=1}^n A_{ij} g_j / \prod_{j=1}^n g_j \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$A_{ij} = \alpha_j e^{-\mu_j^* x_i}, \alpha_j = \begin{cases} 1 & \text{当 } j = 1 \text{ 和 } j = n \text{ 时} \\ 4 & \text{当 } j = 2, 4, \dots, (n-1) \text{ 时} \\ 2 & \text{当 } j = 3, 5, \dots, (n-2) \text{ 时} \end{cases}$$

上式中,  $n$  为奇数,  $x_i$  为测量第  $i$  个穿透系数值时所对应的吸收体厚度。在本文的计算中,  $n$  取 21,  $E_n$  取 6.1 MeV,  $E_1$  取 0.1 MeV, 相邻能质组元的能量间隔为 0.3 MeV。

**1.2.3** 叠代最小二乘法的计算程序 如前所述,叠代最小二乘法要求首先假定 1 个初始特征谱 $\{g(E_j)\}$ ,它是 $\{F_j\}$ 的最初估计值。为求得与实际情况相符合的特征谱,必须用叠代方法修改 $\{g(E_j)\}$ 。叠代过程如下: 1) 输入初始特征谱; 2) 置  $i = 1$ ; 3) 置  $j = 1$ ; 4) 用式(2)计算  $T_i$ ; 5) 计算  $\chi^2 = \sum_{i=1}^m [(T_i - T_i)/T_i]^2$ ; 6)  $g_j(T_i/T_i)$  替代  $g_j$ ; 7) 计算  $T_i$ ; 8) 计算  $(\chi^2) = \sum_{i=1}^m [(T_i - T_i)/T_i]^2$ ; 9) 如果  $(\chi^2) < \chi^2$ , 则进到 11; 10) 若  $(\chi^2) \geq \chi^2$ , 则取消步骤 6) 的替代过程, 进到 11); 11)  $j$  增加 1, 返回到步骤 3); 若  $j+1 > n$ , 则进到 12); 12)  $i$  增加 1, 返回到步骤 2); 若  $i+1 > m$ , 则 1 次叠代过程结束, 从而得到修正后的 $\{g(E_j)\}$ 。

通过以上各步(及其循环),可得到 1 组新的 $\{g_j\}$ 值;重复以上的叠代计算,直至 $\{T_j\}$ 与 $\{T_j\}$ 在实验精度内一致,然后再改变模式能量重复以上步骤,最后取  $\chi^2$  值最小的那组 $\{g_j\}$ 作为特征谱的最佳估计值,并以此来计算能注量谱和光子的平均能量。

### 1.3 光子能注量谱计算

如用 $\{\Psi(E_j)\} = \Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_j, \dots, \Psi_n$  表示光子能注量谱, 总光子能注量为  $\Psi$ , 则有如下公式:

$$\{\Psi(E_j)\} = g_j / (\Psi(\mu_{en}/\rho)_{j, \text{Teflon}} K_j K_{0j}) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $(\mu_{en}/\rho)_{j, \text{Teflon}}$  系能量为  $E_j$  的光子在 Teflon 中的质能吸收系数;

$$K_j = (1 - e^{-\mu_j \cdot R_j}) / (\mu_j \cdot R_j) \quad (4)$$

$$K_{0j} = e^{-\mu_j \cdot (R - R_j)} \quad (5)$$

式(4)、(5)中:  $\mu_j$  系能量为  $E_j$  的光子在 Teflon 中的线性减弱系数;  $R_j$  为该光子在 Teflon 中产生的最大能量的次级电子的射程;  $R$  为能量为  $E_n$  的光子在 Teflon 中产生的最大能量的电子在 Teflon 中的射程(它刚好等于固体电离室的室壁厚度);  $K_j, K_{0j}$  两项分别为考虑了 X 射线在固体电离室壁中的吸收和满足电子平衡条件所引入的修正。

## 2 穿透系数测量

### 2.1 吸收体选择

穿透系数测量值的精确度决定了谱的测算结果的精确度。根据吸收体材料的选择原则, 选取 Teflon 为吸收体。

### 2.2 穿透系数实验测量

实验中用以 LiF (Mg, Ti) M 热释光探测器为空腔, 以 Teflon 作室壁的固体电离室<sup>[4]</sup> 测量穿透系数。图 2 为根据穿透系数的实验测量结果绘制的穿透系数曲线图。

## 3 能注量谱

由上面计算的穿透系数经叠代计算而得的能注量谱示于图 3。计算出的光子平均能量为 1.63 MeV。

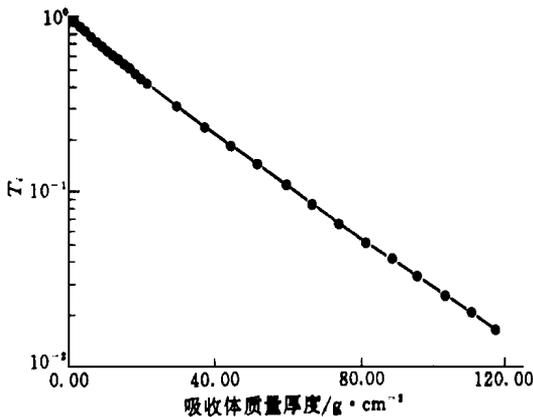


图 2 由实测的  $\{T_i\}$  绘制的穿透系数曲线

Fig 2 Measured curve of transmission data  $\{T_i\}$

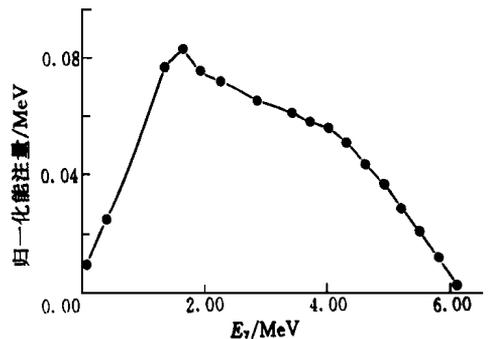


图 3 能注量谱的谱形图

Fig 3 Spectrum of energy fluence

#### 4 关于误差的讨论

本工作穿透系数 $\{T_i\}$ 的测量误差来源于LiF(Mg, Ti)M型热释光探测器灵敏度的重复性。在逐片刻度的情况下,它引起的 $T_i$ 的相对误差最大为2%,这其中包括热释光读出仪稳定性所致的误差。 $\{F_j\}$ 的叠代计算所采用的辛普森方法引入的误差可忽略不计。谱的不确定性程度的决定因素是 $(\mu/\rho)_{\text{Tef}}$ ,它在光子能量高时随能量变化的梯度不大,而光子能量群组是离散化的,相邻组元的能量间隔为0.3 MeV。由于光子群组中的有些组元所对应的 $(\mu/\rho)_{\text{Tef}}$ 系由内插而得,故大的能量间隔和 $(\mu/\rho)_{\text{Tef}}$ 的误差可能使特征谱谱形存在潜在误差,从而使本方法对谱的高能部分的测算不够灵敏。

#### 参 考 文 献

- 1 Huang Pinhua, Kenneth RK, Bengt EB. Simulation of 4-MV X-ray Spectral Reconstruction by Numerical Analysis of Transmission Data Med Phys, 1982, 9(5): 695
- 2 Huang Pinhua, Kenneth RK, Bengt EB. Reconstruction of 4-MV Bremsstrahlung Spectral From Measured Transmission Data Med Phys, 1983, 10(6): 778
- 3 肖开宇, 崔高显, 刘浩才, 等. 高能电子韧致辐射能谱测量 核电子学与探测技术, 1995, 15(6): 365
- 4 Victor H, Frank HA. A Solid State Bragg-gray Cavity Chamber. Symposium on Radiation Dosimetry, the Sixty-third Annual Meeting Vienna 1960

## EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF BREMSSTRAHLUNG SPECTRUM FROM 6 MV X-RAY

Xiao Kaiyu Cui Gaoxian Liu Haocai Zhao Lin Zhao Minzhi

(Chinese Academy of Engineering Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu, 610003)

#### ABSTRACT

The measurements of bremsstrahlung spectrum from 6 MV accelerator are carried out by an iterative least-square of numerical analysis of transmission data. The calculation program of an iterative least-square is written.

**Key words** Transmission data Iterative least-square Thermoluminescence