

## 6 MV 医用电子直线加速器 轫致辐射谱研究

张松柏<sup>1</sup>, 黄斐增<sup>1</sup>, 韩树奎<sup>2</sup>, 赵洪斌<sup>1,3</sup>, 包尚联<sup>1</sup>

(1. 北京大学 物理学院 重离子物理研究所, 北京 100871;

2. 北京肿瘤医院, 北京 100036;

3. 北京医疗器械研究所, 北京 100011)

**摘要:**用衰减法对 6 MV 医用电子直线加速器的轫致辐射 X 射线能谱进行测量, 并利用模拟电子-光子耦合运输的 Monte-Carlo 程序 EGS4 对已知的治疗头几何结构、靶材料和电子源等特征的医用电子直线加速器轫致辐射谱进行研究。实验测量结果和 EGS4 模拟计算结果符合较好。

**关键词:**医用电子直线加速器; 轫致辐射谱; 衰减法; Monte-Carlo 模拟

**中图分类号:** O571.436; TL53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2003)03-0226-04

## Investigation of Bremsstrahlung Spectra of 6 MV Medical Linear Accelerator

ZHANG Song-bai<sup>1</sup>, HUANG Fei-zeng<sup>1</sup>,  
HAN Shu-kui<sup>2</sup>, ZHAO Hong-bin<sup>1,3</sup>, BAO Shang-lian<sup>1</sup>

(1. Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Tumor Hospital, Beijing 100036, China;

3. Beijing Medical Equipment Institute, Beijing 100011, China)

**Abstract:** The energy spectra of the bremsstrahlung X-rays from the 6 MV medical linear accelerator are measured by attenuation analysis of the transmission data. An universal Monte-Carlo program EGS4 is also used to calculate the bremsstrahlung spectra of the 6 MV medical linear accelerator. The measurement results are in good agreement with the calculation results.

**Key words:** medical linear accelerator; bremsstrahlung spectra; attenuation measurement; Monte-Carlo simulation

随着放射治疗技术的发展, 70% 以上的肿瘤患者采用放射治疗方式, 其中, X 射线放射治疗占绝大多数。然而, 医用电子直线加速器的标称能量并不能真实反映此加速器产生的 X

收稿日期: 2002-06-28; 修回日期: 2002-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10175004); 北京市自然科学基金重点合作资助项目 (3011002)

作者简介: 张松柏 (1976—), 男, 四川广安人, 在读硕士研究生, 核技术及应用专业

射线的全部性质, X 射线能谱研究对判定电子直线加速器的 X 射线品质及剂量分布是非常重要的。

如果已知电子直线加速器头部结构及材料,其 X 射线能谱可通过 Monte-Carlo 程序 EGS4 模拟计算得到。医院运行的电子直线加速器一般没有靶物质、治疗头的结构和材料等一系列 EGS4 计算时所必需的参数,其能谱只能通过测量得到。因此,为了建立切实可行的能谱测量方法,本工作使用 EGS4 模拟计算和衰减法测量对已知治疗头几何结构、靶材料和电子源等特征的 6 MV BJ-6 医用电子直线加速器进行研究。

### 1 实验测量

实验测量医用电子直线加速器的 X 射线能谱存在较多问题:医用 X 射线的强度高,使用直接测量法基本上不可能<sup>[1,2]</sup>;康普顿谱仪在医用 X 射线测量技术上很难实现,光活化测量仅能提供束流的光子特性<sup>[3,4]</sup>。为此,本工作使用衰减法进行测量。

窄平行束的 X 射线在透过物质时满足指数衰减规律。医用加速器的 X 射线透过厚度为  $y$  的物质后有如下关系:

$$T(y) = \int_0^{E_{\max}} \exp[-\mu(E)y] F(E) dE \quad (1)$$

其中:  $T(y)$  为 X 射线对穿过厚度为  $y$  的衰减物质的透射系数;  $E$  为 X 射线能量;  $E_{\max}$  为所测量 X 射线的最大能量;  $\mu(E)$  为物质对能量为  $E$  的光子的线性衰减系数;  $F(E) dE$  为能量  $E \sim E + E$  的 X 射线与所有能量的 X 射线在探测器上产生的响应的比值<sup>[5-7]</sup>,  $F(E)$  反应着能谱性质。

能谱可由下式得到:

$$F(E) = KF(E)C(E)/((\mu_{en}/\rho)_{\text{air}} E) \quad (2)$$

式中:  $(\mu_{en}/\rho)_{\text{air}}$  为空气的质能吸收系数;  $K$  为归一化因子;  $C(E)$  为探测器的照射量对能量的响应因子;  $F(E)$  可通过求解式(1)得到。

实验测量装置示意图示于图 1。实验用衰减物质 Al、Cu 的线性衰减系数应在所测量的加速器 X 射线能区范围内单调递减<sup>[6]</sup>。对 Al、Cu 衰减片的衰减系数和纯 Al、Cu 衰减系数进行归一处理,得到 Al、Cu 在整个测量能区的衰

减系数。纯 Al、Cu 的衰减系数则采用 IAEA 标准数据库给定的数据。

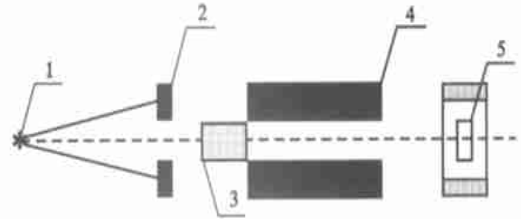


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

1——源;2——加速器下光阑;

3——衰减片;4——准直器;5——探测器

$T(y)$  的测量结果示于图 2。从图 2 可以看出:Cu 的  $T(y)$  值比 Al 的  $T(y)$  值减小得快,这是因为在相同厚度的 Cu 和 Al 中,同一能量的 X 射线在 Cu 中的衰减系数比 Al 中的大。

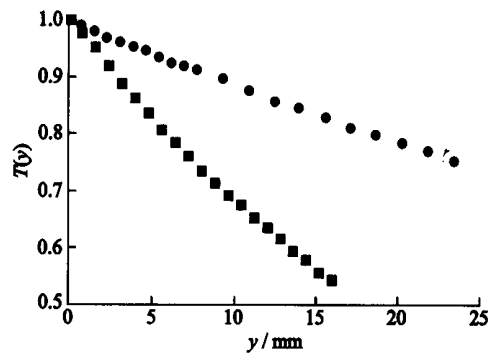


图 2  $T(y)$  的实验测量值

Fig. 2 Measured  $T(y)$  values

——Cu; ——Al

### 2 能谱重建

根据实验测量的  $T(y)$  值,用加权最小二乘叠代法对初始谱(本文谱的初值为 0)进行修正,直至由修正后的特征谱计算得到的  $T(y)$  在实验精度范围内与实验测量值一致,进而求得能谱。

考虑测量误差后,式(1)<sup>[7]</sup>可表示为:

$$T(y) = \int_0^{E_{\max}} \exp[-\mu(E)y] F(E) dE + R(y) \quad (3)$$

式中:  $R(y)$  为测量误差。

把厚度及能量离散化后,上式可表示为:

$$T = AEF + R \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{pmatrix} t(y_1) \\ t(y_2) \\ \dots \\ t(y_n) \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} f(E_1) \\ f(E_2) \\ \dots \\ f(E_n) \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} r(y_1) \\ r(y_2) \\ \dots \\ r(y_n) \end{pmatrix}; \\
 A &= \begin{pmatrix} e^{-u(E_1)y_1} & \dots & e^{-u(E_n)y_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{-u(E_1)y_N} & \dots & e^{-u(E_n)y_N} \end{pmatrix}; \\
 E &= \begin{pmatrix} E_1 & \dots & 0 \\ \dots & E_i & \dots \\ 0 & \dots & E_n \end{pmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  个能区的能量间隔。

由于式(4)的特异性,不能由一般的解矩阵方式得到解,但就物理特性而言,此方程组有唯一特征解<sup>[6]</sup>。

采用加权最小二乘叠代法求解。叠代过程中,为使  $F(E)$  收敛较快,能量用等间隔分区,这同时也保证了与  $F(E)$  的初值无关。按照下式进行叠代:

$$f_{i,k+1} = f_{i,k} + 2 A^T W (T - A E f_{i,k}) \quad (6)$$

式中:  $f_{i,k}$  为第  $k$  次叠代的  $f(E_i)$  的值;  $0 < \alpha < 1/\max$ ,  $\max$  为  $M$  矩阵的最大特征值,其中,  $M = E^{1/2} A^T W A E^{1/2}$ ,  $W$  为对角矩阵,对角线上元素  $w_{i,i} = 1/[t(y_i) + r(y_i)]^2$ ,此矩阵用作最小二乘法的叠代权重因子。

通过上述方法对实验数据进行处理,得到重建的  $F(E)$  (图3)和能谱(图4)。

为了验证能谱测量的可靠性,把 EGS4 模拟计算的结果和实验结果进行比较。

### 3 结果比较与分析

利用 EGS4 模拟计算的 BJ-6 头部结构示于图5。在模拟计算中,对 BJ-6 的电子源电子能量按其分布进行抽样<sup>[8]</sup>,电子最大能量为 6.3 MeV,计算的历史数为  $4 \times 10^7$ 。

从统计结果看,能够满足统计要求。

理论计算和实验测量均采用相同射野,其能谱比较示于图6。

从图6可以看出:在中间能区,理论计算值比实验测量值偏高。这是由于实验测量的只是

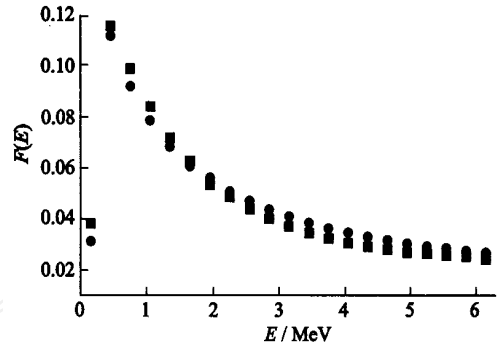


图3  $F(E)$  重建结果

Fig. 3 Reconstruction of  $F(E)$

—Cu; —Al

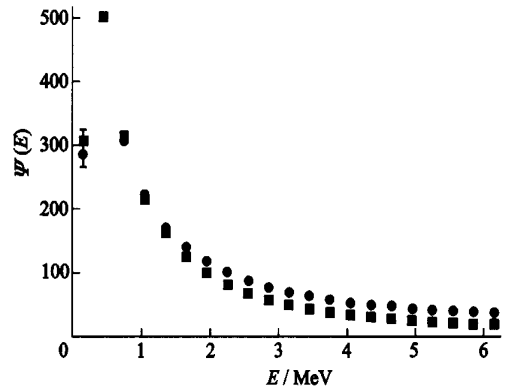


图4 能谱重建结果

Fig. 4 Reconstruction of energy spectra

—Cu; —Al

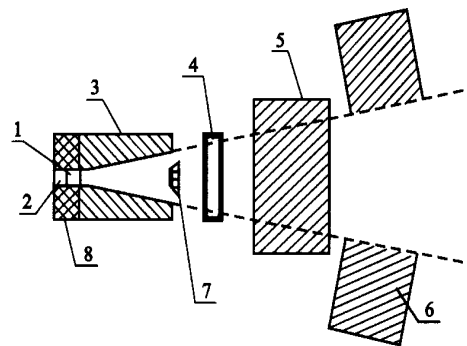


图5 加速器头部结构(BJ-6)

Fig. 5 Geometrical structure of the accelerator head(BJ-6)

1—铜片;2—钨靶;3—准直器;4—电离室;5—上光阑;6—下光阑;7—均整块;8—法兰盘

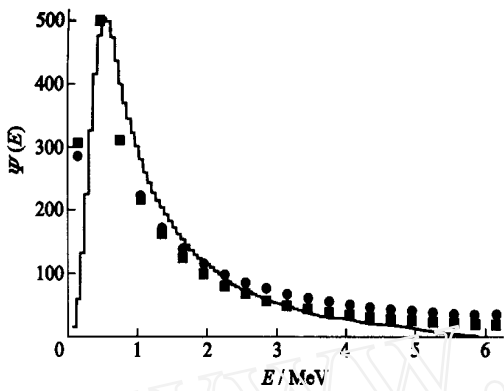


图6 实验测量和理论计算的能谱比较

Fig. 6 Comparison of the measured and calculated energy spectra

实线——理论计算; ———Cu; ———Al

直径为 1 cm 的中心轴区域上原射线的能谱,而理论计算则包括了原射线和散射线的能谱总和。散射线主要来源于加速器的均整块,散射线的能量偏低而使得中间能量的理论计算较实验结果偏高。在能量较高的能区,理论计算结果较实验测量结果偏低。这是因采用的 FAMER 剂量仪对于能量的响应因子  $C(E)$  随能量的增加而变大所引起。能量从 30 keV 到 10 MeV,  $C(E)$  因子会有 6% 的增加<sup>[9]</sup>,但在实验过程中,  $C(E)$  被看作常数,因而使得理论计算结果较实验测量结果在较高能区偏低。

实验测量和理论计算结果作为剂量计算的输入数据均处在可接受的偏差范围内。

#### 4 结论

本工作通过对 BJ-6 加速器能谱的理论计算值和实验测量值进行比较,证实这种衰减测量方法是可靠的。所采用的加权叠代的能谱重建方法不需要给定能谱初值。实验测量简单可行,可用于未知几何结构、靶材料和电子源等特

征的加速器能谱测量。

#### 参考文献:

- [1] Landry DJ, Anderson DW. Measurement of Accelerator Bremsstrahlung Spectra With a High Efficiency Ge Detector[J]. Medical Physics, 1991, 18:572~532.
- [2] Faddegon BA, Ross CK, Rogers DWO. Forward directed Bremsstrahlung of 10 to 30 MeV Electrons Incident on Thick Targets of Al and Pb[J]. Medical Physics, 1990, 17:773~785.
- [3] Nath R, Schulz RJ. Photoactivation Ratio for Specification of High-energy X-ray Quality: Part I, 15—40 MV X-ray[J]. Medical Physics, 1977, 4:36~41.
- [4] Prado KL, Anderson DW. Photonuclear Activation Ratios in Fluorine Compounds: an Index of Bremsstrahlung Quality [J]. Medical Physics, 1984, 11:474~479.
- [5] Huang PH, Kase KR, Bjarngard BE. Spectral Characterization of 4 MV Bremsstrahlung by Attenuation Analysis[J]. Medical Physics, 1981, 8:368~374.
- [6] Huang PH, Kase KR, Bjarngard BE. Simulation Studies of 4 MV X-ray Spectral Reconstruction by Numerical Analysis of Transmission Data [J]. Medical Physics, 1982, 9:707~710.
- [7] Tominaga S. The Estimation of X-ray Spectral Distributions From Attenuation Data by Means of Iterative Computation [J]. Nucl Instrum Methods, 1981, 192: 88~92.
- [8] 裴鹿成,张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子运输问题中的应用[M]. 北京:科学出版社,1980. 88~92.
- [9] Piermattei A. A Study of Quality of Bremsstrahlung Spectra Reconstructed From Transmission Measurements[J]. Medical Physics, 1990, 17:227~233.