

窄束 X 射线半价层测量法标定 电子直线加速器的能量

严慧勇, 唐传祥, 李泉凤, 石成玉
(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: X 射线半价层测量法是一种常用的低能电子直线加速器能量标定方法, 本文对窄束 X 射线半价层的测量方法进行了讨论。利用 Monte-Carlo 程序 MCNP4B 对窄束 X 射线半价层进行了计算和分析, 并与实测数据进行了比较, 测量数据与 MCNP4B 计算结果符合得很好。此外, 还讨论了准直锥的长度和材料、准直缝的尺寸、靶的厚度和材料等因素对半价层的影响。

关键词: 半价层; 窄束; 宽束; MCNP4B 程序

中图分类号: TL53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2003)04-0372-04

Calibration of the Energy of an Electron Linac by Measuring the Narrow-beam X-ray Half-value Layer

YAN Hui-yong, TANG Chuan-xiang, LI Quan-feng, SHI Cheng-yu

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The half-value layer (HVL) of the broad-beam X-ray is often used to calibrate the energy of an electron linac, but in some cases the measurement of the broad-beam X-ray HVL is not convenient. Therefore, the measurement of the narrow-beam X-ray HVL as a method to calibrate the energy of an electron linac is discussed in the paper. The Monte-Carlo code, MCNP4B is used to calculate and analyze the narrow-beam X-ray HVL, meanwhile the narrow-beam X-ray HVLs are measured for the 2.5, 4, 6 and 9 MeV electron linacs. There is a good agreement between the measured HVLs and the MCNP4B-calculated results. Also, the length of a primary collimator, the width of a collimator slot, the thickness of a target and such other factors' influence on HVL is discussed, and some useful suggestions are given to reduce the measuring errors of the narrow-beam X-ray HVL used to calibrate the energy of an electron linac.

Key words: half-value layer; narrow-beam; broad-beam; MCNP4B code

X 射线半价层测量法是一种常用的低能电子直线加速器能量标定方法, 即测量出电子束

收稿日期: 2002-06-03; 修回日期: 2002-12-11

作者简介: 严慧勇(1977—), 男, 四川仁寿人, 在读硕士研究生, 核技术及应用专业

打靶产生的 X 射线在物质中的半价层(HVL), 然后与参考数据(如 Varian 公司公布的宽束半价层参考数据)进行比较, 推得电子束的能量, 从而达到定标加速器能量的目的。但是 X 射线半价层测量法测量打靶电子束的能量受 X 射线空间分布的影响很大, 因此, 对于同一电子束打靶, 在宽束和窄束情况下得到的 X 射线半价层不同。随着以加速器作为 X 射线源的实时成像及工业 CT 等应用的发展, 加速器的 X 射线一般通过准直缝变成窄束射出(图 1)。因此, 在实际测量中, 希望在不拆除准直锥的情况下测量 X 射线的半价层, 即测量窄束 X 射线半价层, 但目前发表的实测半价层数据基本上为宽束下的测量结果。与宽束 X 射线半价层测量法类似, 将测量出的窄束 X 射线半价层与参考数据进行对照便可标定电子加速器的能量。然而, 由于很多因素均可能影响窄束 X 射线半价层的值, 不同的加速器系统, 即使电子束能量相同, 窄束 X 射线半价层的值也可能不同, 因此, 各研究机构均未提供通用的窄束 X 射线半价层参考数据。Monte-Carlo 方法能有效地解决复杂几何体中的粒子输运问题^[1], 被称作“理论上的实验”。文献[2]中曾用 EGS4 对半价层进行过一些计算, 但是数据尚欠准确。因此, 本文拟采用通用 Monte-Carlo 程序 MCNP4B^[3]模拟计算提供窄束 X 射线半价层的参考数据, 从而利用窄束 X 射线半价层测量法实现电子加速器能量的标定。本文中的“窄束”是相对于“宽束”而言——在没有拆除准直锥时, X 射线束有一定的宽度, 在空间成扇形分布, 称为窄束^[2,4]。

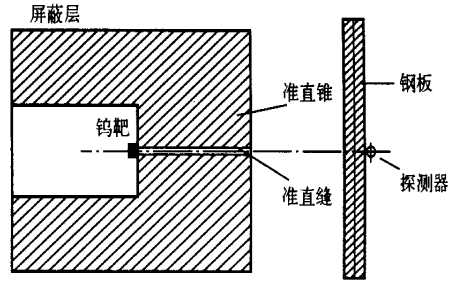


图 1 窄束 X 射线半价层测量装置

Fig. 1 Measurement set-up for narrow-beam X-ray HVL

据进行比较, 结果示于图 2。从图 2 可看出: 窄束 X 射线半价层比宽束 X 射线半价层小; 电子束能量 E 越高, 相应的 X 射线半价层越大。

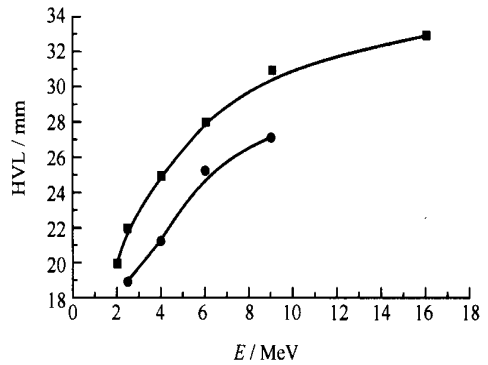


图 2 窄束 X 射线半价层测量值与 Varian 公司宽束 X 射线半价层参考值的比较

Fig. 2 X-ray HVL comparison

between the narrow-beam measurement and the broad-beam reference value

from Varian company

— Varian 宽束 X 射线半价层参考值;
- - - 窄束 X 射线半价层测量值

1 窄束 X 射线半价层的测量与计算

窄束 X 射线半价层测量装置示于图 1。探测器紧靠钢板后, 位于束轴上并距靶点 1 m。每块钢板相同, 厚度取 1~3 cm (视加速器电子束能量而定), 钢板边长大于 35 cm (大于屏蔽层的高度), 钢板密度 7.8~7.9 g/cm³。

采用如图 1 所示装置测量 2.5、4、6 和 9 MeV 电子直线加速器的窄束 X 射线半价层。这些加速器的准直缝宽度均为 3 mm, 屏蔽层和准直锥材料均为钨, 准直锥长度均约 143 mm。将测量结果与 Varian 宽束半价层数

利用 MCNP4B 对电子-光子的耦合传输进行模拟, 对上述 2.5、4、6 和 9 MeV 电子加速器的窄束 X 射线半价层进行计算。模拟计算条件(钢板的尺寸和密度、准直缝的尺寸、靶的厚度和材料、准直锥的长度和材料等)与实际测量环境相同。将计算结果与前面的测量值进行比较(表 1)。从表 1 中可看出, 计算值与测量值符合得很好, 测量值与计算值之间的偏差在 ±3% 以内。这说明用 Monte-Carlo 方法计算 X 射线半价层是可行和可靠的, Monte-Carlo 模拟计算可较准确地提供窄束 X 射线半价层的参

考值。只要测出窄束 X 射线半价层,然后将测量值与由 Monte-Carlo 方法计算出的窄束 X 射线层参考数据进行比较,便可推断出电子束的能量,从而实现电子直线加速器能量的标定。

表 1 窄束 X 射线半价层测量值与计算值的比较

Table 1 Comparison between the measured and MCNP4B calculated X-ray HVL

加速器能量 <i>E</i> / MeV	钨靶厚度 <i>d</i> / mm	HVL/ mm		HVL _测 / HVL _计
		测量值	计算值	
2.5	1.0	19.10	18.93	1.01
4	2.5	21.86	21.27	1.03
6	2.5	24.85	25.25	0.98
9	3.5	27.38	26.97	1.02

2 X 射线半价层的影响因素

由窄束比宽束 X 射线半价层小不难推断,准直缝尺寸与准直锥长度均会影响半价层,因为准直锥越短或准直缝越宽则越接近宽束条件。

以 9 MeV 电子直线加速器为例,应用 MCNP4B 进行模拟计算,求出准直锥长度和准直缝宽度对半价层的影响(图 3)。在计算中,屏蔽层和准直锥材料为钨,钨靶厚度为 3.5 mm。从图 3 可看出:准直缝越宽和准直锥越短,半价层越大。同样,准直缝张角也影响半价层。

靶的厚度对半价层亦有较大的影响。以 9 MeV 电子束轰击钨靶为例来说明靶厚度对半价层的影响。

在模拟计算中,准直缝宽度为 3 mm,准直锥长度为 143 mm。计算出的半价层随靶厚度 *d* 的变化(图 4a)表明:在一定范围内,靶越厚,半价层越大。这是因为,在一定范围内,当靶厚度增加时,靶对 X 射线的硬化作用增强,前方 X 射线的平均能量将越来越高,半价层因此也将越来越大。当 9 MeV 电子束轰击钨靶时,束轴上距靶 1 m 处光子平均能量 E_{ave} 随靶厚度 *d* 的变化情况示于图 4b。

靶的材料对半价层也有较大的影响。电子束轰击不同材料的靶时,产生的 X 射线的能谱不同,束轴上 X 射线平均能量各异,半价层因

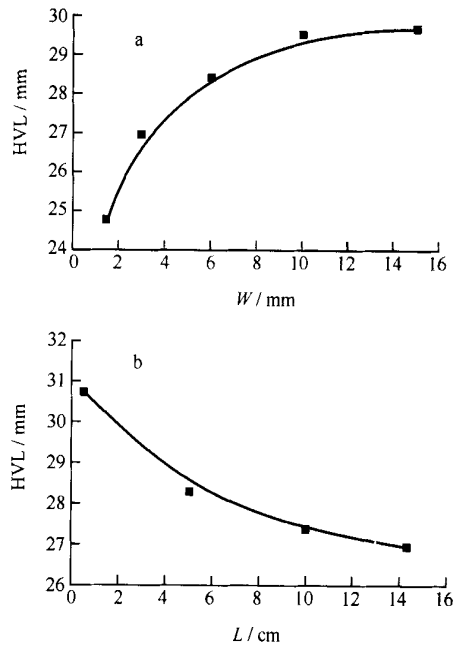


图 3 准直缝宽度 *W* (a) 和准直锥长度 *L* (b) 对半价层 HVL 的影响

Fig. 3 Effects of the collimators opening width *W* (a) and the collimator length *L* (b) on the X-ray HVL

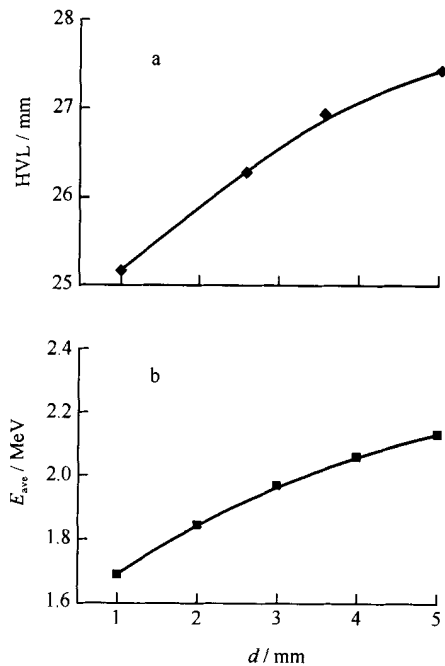


图 4 靶厚度 *d* 对 X 射线半价层 (a) 和平均能量 (b) 的影响

Fig. 4 Effects of target thickness on the X-ray HVL (a) and average energy (b)

此不尽相同。另外,准直锥的材料和钢板的密

度对半价层也有一定的影响。

3 X 射线半价层模拟计算与测量条件

准直锥的长度和材料、靶的厚度和材料、准直缝的宽度和张角以及钢板的密度等皆影响 X 射线半价层的值,在利用 MCNP4B 程序模拟计算提供窄束 X 射线半价层参考数据时,模拟计算条件应与实际测量条件一致方能准确标定加速器的能量。

在利用 MCNP4B 程序计算半价层时,必须采用适当的抽样数。Monte-Carlo 方法基于统计抽样的原理,抽样数越多,计算结果越准确。若抽样数过多,则占用太多计算机时间,而抽样数太少,计算结果又欠准确,因此,需确定合适的抽样数,以使计算结果较为准确而又不占用过多的计算机时间。

图 5 显示了半价层计算值随抽样数 n 的变化。在此模拟计算中,电子束能量为 2 MeV,钨靶厚度为 2.5 mm,准直锥长度为 143 mm,准直锥材料为钨,缝宽为 3 mm。从图 5 可看出:入射电子抽样数增加时,窄束 X 射线半价层计算值逐渐接近 16 mm;当入射电子抽样数为 200 万时,半价层计算值趋于稳定。因此,对于 2 MV X 射线窄束半价层的计算,比较合

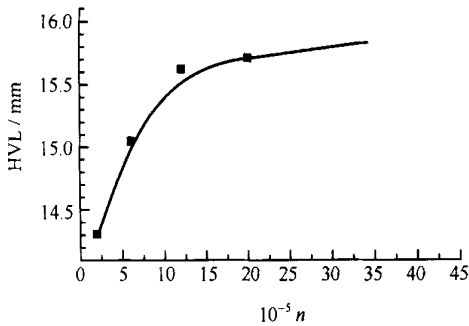


图 5 窄束 X 射线半价层 HVL 模拟计算值随入射电子抽样数 n 的变化

Fig. 5 Simulated X-ray HVL values varying with the sample number of injection electron

理的入射电子抽样数为 200 万。同样,对于 9 MV X 射线窄束半价层的计算,入射电子抽样数为 80 万的计算值已趋稳定。

在测量窄束 X 射线半价层时,应设法减小测量误差。为了减少来自屏蔽层的散射光子对探测器的影响,钢板边长应大于屏蔽层高度。另外,探测器应做得较小,使其尽量只探测束轴上的光子。同时还应采取措施减小来自钢板的散射光子对测量结果的影响。

4 结论

本文的计算和分析结果表明:窄束 X 射线半价层测量法能够较为准确地标定低能电子直线加速器的能量, Monte-Carlo 模拟计算能提供较为准确的窄束 X 射线半价层参考数据。将测量出的窄束 X 射线半价层与 Monte-Carlo 模拟计算出的窄束 X 射线半价层参考数据进行比较,便可推出电子束的能量,从而实现电子直线加速器能量的标定。计算分析结果还表明,准直锥的长度和材料、准直缝的宽度和张角、靶的材料和厚度等均影响 X 射线半价层。因此,在计算窄束 X 射线半价层时,计算条件应与实际测量环境一致。

参考文献:

- [1] 许淑艳. 蒙特卡洛方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社,1996. 7~10.
- [2] 石成玉,唐传祥,李泉凤,等. 半价层法测量电子束能量的模拟计算和分析[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(6): 508~512.
- [3] Bresmeister JF. MCNP—A General Monte-Carlo N-particle Transport Code, Version 4B: LA-12625 [R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [4] 李洪星. 辐射防护基础[M]. 北京:原子能出版社,1982. 118.