

CT靶物质的辐射特性研究*

李泉凤¹⁾ 程诚 严慧勇 杜泰斌 陈怀璧

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 采用 Monte Carlo 模拟程序 MCNP4B 对电子-光子在 CT 靶物质中的耦合输运进行了模拟. 对几种靶的光子效率和 X 射线前向性随靶厚度变化进行了计算和分析. 模拟计算结果表明, 与电子加速器中常用的 Au, W 等高 Z 靶相比, Cu 靶具有特殊的辐射物理性质: 1) 光子效率对 Cu 靶厚度不敏感. 通常, 对于高 Z 靶, 光子效率在靶厚度为某特定值时达到最高值, 然后随靶厚度增加而迅速减小; 而对于 Cu 靶, 光子效率在达到最大值后, 靶厚度再增加时, 光子效率仅略有减小, 且变化趋于平缓. 2) 电子束轰击 Cu 靶时, 虽然光子效率较低, 但是角分布具有很好的前向性, 且前向剂量率可与 Au 靶、W 靶相当. 实验结果表明, 用能量为 20MeV 的电子轰击 Cu 靶时, 前向 0° 附近的 X 射线剂量率达到并超过了用 W 靶时的结果, 而且剂量率角分布比 W 靶的前向性好.

关键词 MCNP4B Cu 靶 光子效率 前向性 角分布

1 引言

经加速后的电子束轰击靶时产生的 X 射线具有很好的穿透性, 常可用作无损检测系统的射线源示意图可用图 1 表示. 入射电子束能量越高, 打靶产生的 X 射线的前向性越好, 光子效率 (或韧致辐射效率) 也越高. 当入射电子束能量一定时, 对于不同材料的靶, 光子效率和 X 射线的前向性也是不同的^[1]. 通常, 高 Z 材料靶的光子效率高, 低 Z 材料靶的光子效率较低, 因此, 一般常采用 Au, W 和 Ta 等高 Z 材料作靶. 在无损检测或工业 CT 射线源中, 只需要利用束流发射方向在锥角 θ 以内的那部分 X 射线, 希望 X 射线有较好的前向性, 锥角 θ 以内的剂量尽量高, 以提高 X 射线的利用率, 同时也为屏蔽层的设计带来方便. 因此, 在靶的设计中, 需要综合考虑靶的光子效率和 X 射线的剂量率角分布, 使锥角 θ 以内的剂量尽量高.

本文利用 Monte Carlo 程序 MCNP4B^[2] 对电子-光子在靶中的耦合输运进行模拟, 对 Au, W 和 Cu 等靶产生的光子效率和其产生的 X 射线剂量率角分布情况进行分析. 模拟计算结果表明: 与电子加速器中常用的 Au, W 靶相比, Cu 靶具有特殊的辐射物理特性,

满足了工业 CT 所需靶产生的高剂量和角分布的要求.

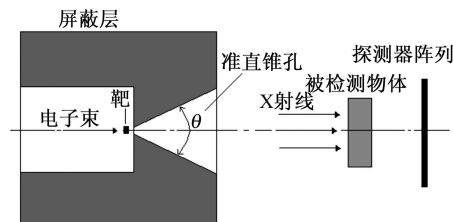


图 1 X 射线无损检测系统示意图

2 模拟计算

下面对 Au, W, Cu 靶光子效率随靶厚度变化与剂量率角分布规律分别进行模拟计算分析. 计算中, 靶的直径取 10mm, 电子束束斑直径为 1.5mm, 假设入射电子束是单能的, 垂直入射到靶面上. Au, W 和 Cu 的密度分别取 19.66g/cm³, 18.3g/cm³ 和 8.9g/cm³.

2.1 光子效率随靶厚度变化规律

为便于讨论, 需引出光子效率的定义, 它为任一时间内出射光子的能量之和与入射电子的能量之和的

2006 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10135040)资助

1) E-mail: liquanfeng@mail.tsinghua.edu.cn

比值,也就是入射电子动能中转换为出射光子能量的份额,其表达式为

$$f_p = \frac{\sum_{i=0}^m E_{pi}}{nE_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 n 为某一时间内的入射电子数, m 为 n 个入射电子打靶时,从靶中射出的光子数, E_0 为入射电子的动能, E_p 为出射光子的能量.

当靶厚不同时,光子效率 f_p 是不同的;对于不同材料的靶,光子效率 f_p 随靶厚变化的规律也不同.以 9MeV 和 15MeV 电子束轰击 Au, W 和 Cu 靶为例,其光子效率 f_p 随靶厚 d 变化的趋势,如图 2 所示.

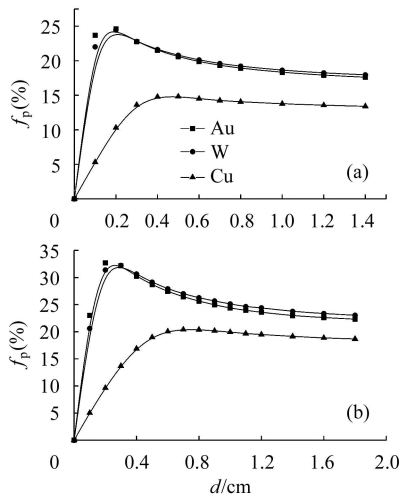


图 2 光子效率 f_p 随靶厚 d 变化
(a) 入射电子束能量为 9MeV; (b) 入射电子束能量为 15MeV.

从图 2 可以看出, Au 靶和 W 靶的光子效率随靶厚变化的规律很相似: 当靶厚度增加时,光子效率也随之增加,当靶厚度为某值时,光子效率达到最高值,此后光子效率随靶厚度增加而迅速减小.而对于 Cu 靶,在光子效率达到最大值后,靶厚度再增加时,光子效率仅略有减少,且变化趋于平缓,即光子效率对 Cu 靶的厚度不敏感.这是由于 Cu 的密度比 Au, W 低得多,对光子的自吸收很少^[3]所致. Cu 靶这一物理特性,为靶的设计和加工带来了很大的方便.

2.2 X 射线的前向性分析

电子束打靶时,产生的 X 射线会以一定的角分布射向各个方向,前方的剂量率大,角度大的方向剂量率低,也就是说, X 射线有一定的前向性.打靶电子束能量越高,产生的 X 射线前向性也越好,另外, X 射线的前向性还与靶材料有关.为了表征 X 射线的这种前向性,引入 X 射线能量前向性系数 f_{forward} , 即,在锥角

θ 以内的光子的能量之和与打靶产生的所有出射光子的能量之和的比值,其表达式为

$$f_{\text{forward}} = \frac{\sum_{i=0}^l E_{pi}}{\sum_{i=0}^m E_{pi}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 l 和 m 分别为 n 个电子打靶时落在锥角 θ 以内的光子数和打靶产生的所有出射光子数,其余符号意义同式(1).显然, f_{forward} 越大, X 射线的前向性越好, X 射线剂量利用率越高.对于 9MeV 和 15MeV 工业 CT 系统,锥角 θ 一般取 30° 和 15° .

下面就以 9MeV 和 15MeV 电子束轰击 Au, W 和 Cu 靶为例,分析 X 射线的前向性随靶厚度变化的情况,并对这 3 种靶产生的 X 射线的前向性进行比较.模拟计算结果如图 3 所示.

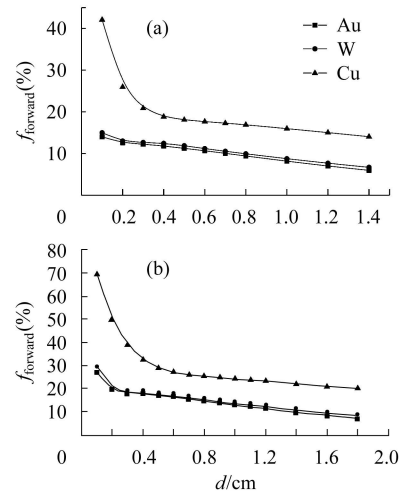


图 3 X 射线能量前向性系数 f_{forward} 随靶厚 d 变化
(a) 入射电子束能量为 9MeV; (b) 入射电子束能量为 15MeV.

图 3 表明: 当入射电子束能量一定时, Cu 靶的 f_{forward} 比 Au, W 靶大得多,且随着靶厚度的增加 f_{forward} 逐渐减小的变化趋势也比 Au, W 靶较缓些.也就是说,电子束轰击 Cu 靶时, X 射线的前向性比 Au, W 靶好得多.这是 Cu 靶的又一个很好的辐射物理特性.

前面曾经提到,在 X 射线无损检测中,总是希望前方锥角 θ 以内的剂量率尽量大,入射电子动能得到充分利用,提高效率.为了衡量锥角 θ 以内的 X 射线剂量的大小并进一步说明 Cu 靶的前向性,再引入入射电子动能利用率 f_{eff} , 其表达式为

$$f_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=0}^l E_{pi}}{nE_0} \times 100\% = f_p \times f_{\text{forward}}, \quad (3)$$

式中各符号的意义与以上各式相同. 入射电子动能利用率 f_{eff} 和 X 射线能量前向性系数 f_{forward} 是不同的. f_{forward} 表示打靶产生的 X 射线的能量被有效的利用的份额, 而 f_{eff} 表示入射电子的动能被有效利用的份额. f_{eff} 越大, 表示前方锥角 θ 以内 X 射线的剂量也越大, 这正是无损检测中所期望的. 图 4 反映了 Au, W 和 Cu 靶的入射电子动能利用率 f_{eff} 随靶厚度 d 变化的规律. 从图 4 可以看出, 当靶厚度大于 0.3—0.4 cm 后, Cu 靶的入射电子动能利用率比 Au 和 W 靶都高. 因此, 虽然 Cu 靶的光子效率较低, 但是由于电子束轰击 Cu 靶时产生的 X 射线具有良好的前向性, 通过选择合适的靶厚度, 完全可以使其前方锥角 θ 以内的 X 射线的剂量与 Au 和 W 靶相当, 甚至更大.

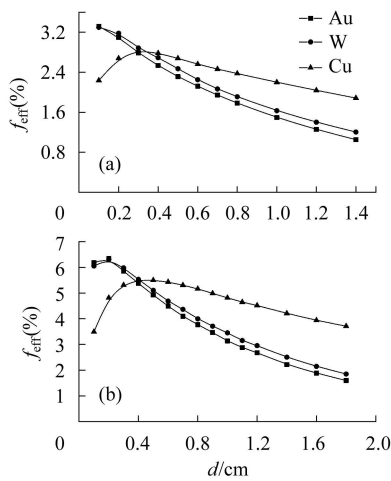


图 4 入射电子动能利用率 f_{eff} 随靶厚 d 变化
(a) 入射电子束能量为 9 MeV; (b) 入射电子束能量为 15 MeV.

下面再以 X 射线的剂量率角分布来说明 Cu 靶的前向性. 图 5 为 9 MeV 和 15 MeV 电子束打靶时的 X 射线相对剂量率角分布. 图 5(a) 中, Au, W 和 Cu 靶的厚度分别为 3 mm, 3.5 mm 和 7 mm; 图 5(b) 中, a 为复合靶 (由 W, Au, H_2O , Cu 和石墨组成), b 为 9 mm 的 Cu 靶, c 为 7 mm 的 Ta 靶.

从图 5 可以看出: 对于不同材料的靶, X 射线的剂量角分布是不同的; 对于 Cu 靶, X 射线具有非常好的剂量率角分布. 在 10° 极角 (20° 锥角) 以内, 各种靶产生的 X 射线的剂量率角分布基本相同. 但在极角大于 10° 后 Cu 靶的剂量率比常用的 Au, W 等高 Z 靶低, 且随极角的增大而越来越低. 这是由于 Cu 的原子序数 Z 比 Au, W 低很多而使其在电子束轰击靶时所产生的多次散射也小很多所致. 因此, 由于电子束轰击 Cu 靶时, 产生的 X 射线具有很好的前向性, 对于 10° 极角的工业 CT 系统而言, 用 Cu 靶既保障了所需的工作辐射

剂量率, 又满足了屏蔽设计所期望的工作极角外的低剂量率要求.

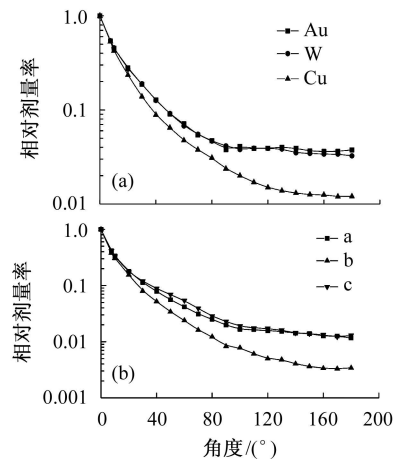


图 5 几种常用靶的 X 射线相对剂量率角分布
(a) 入射电子束能量为 9 MeV; (b) 入射电子束能量为 15 MeV.

3 实验结果

为了满足高能工业 CT 用 X 射线源的要求, 对 W 靶和 Cu 靶进行了实验研究. 在 20 MeV 电子驻波直线加速器出束时, 电子经过钛窗引出, 在窗后分别放置厚度 5.5 mm 的 W 和 10 mm 的 Cu 作为靶产生 X 射线, 测量了不同角度的 X 射线剂量率, 并对同样条件下的实验作了相应的模拟计算, 结果在图 6 中示出. 由于测量设备条件限制, 测量时指型电离室是放在沿束流方向距靶 30 cm 处, 并沿垂直束流方向移动同时读取数据. 图 6 中的实验数据是折合到距靶 1 m 处的剂量率.

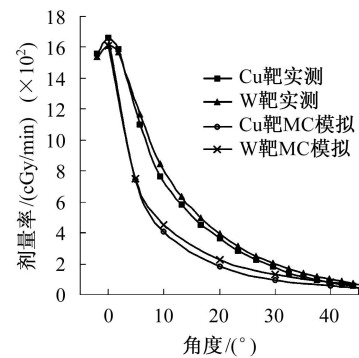


图 6 实测和 MC 模拟 Cu, W 靶的 X 射线剂量率角分布

在数据处理中没有考虑排除周围散射等因素对指型电离室实验数据的影响, 因此实验数据误差较大. 尽管如此, 实验数据仍能明显表现 Cu 靶的物理特性, 能量为 20 MeV 的电子束束流轰击 Cu 靶时, 0° 方向的剂量率可以达到甚至大于 W 靶产生的剂量率^[4], 且角分

布比 W 靶方向性好. 在此实验基础上, 用于工业 CT 系统的 15MeV 加速器正式启用了 Cu 复合靶, 在与 W, Au 复合靶相同功率、相同束流强度条件下, 距靶 1m 处的剂量率同样达到了 200Gy/min.

4 结论

计算和实验结果表明, Cu 靶的光子效率对靶的厚度不敏感, 即在光子效率达到最大值后, 靶厚进一步

增加时, 光子效率不会显著降低. 同时, 电子束轰击 Cu 靶时产生的 X 射线剂量率具有很好的前向性. 虽然 Cu 靶的光子效率较低, 但是通过选择合适的靶厚度, 可以使一定锥角内的剂量率与其他高 Z 靶或者复合靶相当; 由于 Cu 靶产生的 X 射线具有很好的角分布, 角度大的地方剂量小, 且光中子反应阈能较高, 反应截面很小, 这使设备的屏蔽变得容易. 此外, 由于 Cu 靶具有很好的导热性^[5], 因此, 对于中高能、大功率加速器而言, Cu 靶是一个较好的选择.

参考文献(References)

- 1 Swanson W P. Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, Technical Report Series No. 188. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1979
- 2 Bresmeister J F. MCNP—A general Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, Report No. LA-12625-M. Los Alamos (USA): Los Alamos National Laboratory, 1997
- 3 Nordell B, Brahme A. Phys. Med. Biol., 1984, **29**(7): 797—810
- 4 GUO Bing-Qi, LI Quan-Feng, DU Tai-Bin et al. HEP & NP, 2005, **29**(12): 1190—1195(in Chinese)
(郭冰琪, 李泉凤, 杜泰斌等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(12): 1190—1195)
- 5 Jallu F, Lyoussi A, Payan E et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1999, **B155**(4): 373—381

Study of X-Rays Generated by Target in CT*

LI Quan-Feng¹⁾ CHENG Cheng YAN Hui-Yong DU Tai-Bin CHEN Huai-Bi

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

Abstract The X-rays generated and transported in target bombarded by electron beams in CT have been simulated with Monte Carlo code MCNP4. Photon efficiencies and forward directional characteristics of X-rays for several kinds of often-used targets were calculated and analyzed. Calculations show that as the thickness of the target increases, the photon efficiency increases and reaches a maximum, and then drops sharply for gold and tungsten target, while drops gently for cooper target. Also, the photon efficiency for cooper target is relatively small, but the angular distribution shows good forward directional characteristics, with the dose rate in the forward direction equivalent to those of tungsten or gold target. Experiment results show that the dose rate in the forward direction of a copper target is higher than that of a tungsten target for 20MeV electrons, while the angular distribution presents better forward directional characteristics compared with a tungsten target.

Key words MCNP4B, copper target, photon efficiency, forward directional characteristics, angular distribution

Received 7 January 2006

* Supported by NSFC (10135040)

1) E-mail: liquanfeng@mail.tsinghua.edu.cn