

12 MeV 无损检测用电子直线加速器靶的验证计算

马淑栋, 张入通, 郭彦斌, 周媛, 李学先, 陈岩

(北京机械工业自动化研究所, 北京 100120)

摘要: 本文研究 12 MeV 无损检测用电子直线加速器靶的验证计算。首先通过具体分析无损检测用电子直线加速器中电子与靶相互作用的物理机理, 由经验公式计算推得最佳靶厚及对应的靶产额、剂量率分布、X 光子的转换效率; 其次运用 MCNP 对常用靶材 W、Au、Ta 产生的 X 光子剂量率分布和转换效率进行对比计算, 确定最佳靶材及靶厚; 最后与实验结果对比, 验证了靶计算过程的正确性。

关键词: 12 MeV 无损检测用电子直线加速器; 靶厚; 转换效率; MCNP; 剂量率分布

中图分类号: O59

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)03-0364-06

Confirm Calculation of 12 MeV Non-destructive Testing Electron Linear Accelerator Target

MA Shu-dong, ZHANG Ru-tong, GUO Yan-bin, ZHOU Yuan, LI Xue-xian, CHEN Yan
(Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100120, China)

Abstract: The confirm calculation of 12 MeV non-destructive testing (NDT) electron linear accelerator (LINAC) target was studied. Firstly, the most optimal target thickness and related photon dose yield, distributions of dose rate, and related photon conversion efficiencies were got by calculation with specific analysis of the physical mechanism of the interactions between the beam and target; Secondly, the photon dose rate distribution, converter efficiencies, and thickness of various kinds of targets, such as W, Au, Ta, etc. were verified by MCNP simulation and the most optimal target was got using the MCNP code; Lastly, the calculation results of theory and MCNP were compared to confirm the validity of target calculation.

Key words: 12 MeV non-destructive testing electron linear accelerator; target thickness; conversion efficiency; MCNP; dose rate distribution

具有动能的电子与物质相互作用时, 动能衰减至零, 停止运动。电子束与物质相互作用的主要形式有非弹性碰撞(包括电离和激发)及韧致辐射, 这两个过程密切相关, 一起构成碰撞能量

损失(本文忽略其他损失)。X 射线在无损检测或辐照处理时, 需确定电子打靶韧致辐射(产生连续谱 X 射线)的产额、角分布、剂量率分布、最佳靶厚及靶的转换效率, 必要时需确定能谱分

布。在应用电子束辐照时,主要利用电子动能中由碰撞、电离激发方式损失的能量,因此,须了解电子沿入射方向深度上的剂量率分布及射程。

本文拟通过整理和验证电子与物质相互作用的经验公式和结论,推得靶产额、剂量率分布及 X 光子转换效率;然后根据北京机械工业自动化研究所 12 MeV 无损检测用电子直线加速器的物理尺寸和实验测量条件建立模型,运用 MCNP 对产生的 X 光子剂量率和转换效率进行验证计算;最后对比中国计量科学研究院对北京机械工业自动化研究所 12 MeV 无损检测用电子直线加速器性能指标的测试结果及北京机械工业自动化研究所实验测得的数据结果,来验证靶的计算结果。

1 基本原理

1.1 电子与物质作用的基本微分关系^[1]

电子与物质作用的基本微分关系式为:

$$dE = dE_r + dE_i \quad (1)$$

$$\frac{dE_r}{dx} / \frac{dE_i}{dx} \approx \frac{ZE_c}{800} \quad (2)$$

$$dE_r = -\frac{E_c}{l_R} dx \quad (3)$$

$$dE = -dE_c \quad (4)$$

式中: E_c 为电子的动能, MeV; E 为电子的总能量损失, MeV; E_r 为电子在物质中韧致辐射的能量, MeV; E_i 为电子在物质中碰撞电离损失能量, MeV; x 为电子沿入射方向的路径长度, cm; l_R 为辐射长度, cm。

$$l_R = \frac{1}{\frac{4Z^2 N}{137} r_e^2 \ln \frac{183}{Z}} = \frac{716A}{\rho Z^2 \ln \frac{183}{Z}} \quad (5)$$

式中: $N = N_A \rho / Z$, 为单位体积内的原子数, cm^{-3} ; r_e 为电子经典半径, 2.8179×10^{-23} cm; A 为材料元素原子量; Z 为材料元素原子序数; ρ 为材料密度, g/cm^3 。

1.2 电子打靶时入射方向的射程

带电粒子从进入物质到完全被吸收,在原来方向上穿过的最大距离为该粒子在物质中的射程 $R^{[1]}$ 。由式(1)~(3),有:

$$R = l_R \ln \left(1 + \frac{ZE_0}{800} \right) \quad (6)$$

式中: E_0 为电子的初始动能, MeV。当入射电子能量为 2~10 MeV 时,随着 Z 的增大, X 辐

射产额不断增加,因此,采用高 Z 材料作靶材^[2];在 10 MeV 以上靶的具体设计中,电子轰击钨靶产生的 X 射线的发射率参见文献[3]。12 MeV 无损检测用电子直线加速器靶的材料常选择 W、Au、Ta。由式(6)推得的电子束在 W、Au、Ta 的射程列于表 1。

表 1 电子束在 W、Au、Ta 中的射程

Table 1 Range of electron beam in W, Au and Ta target

靶材	Z	A	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	l_R/cm	R/cm
W	74	184	19.3	0.330 2	0.246 6
Au	79	197	19.32	0.311 7	0.243 6
Ta	73	181	16.6	0.387 6	0.286 7

1.3 电子在靶中沿入射方向的剩余动能

由式(1)~(3)得电子在靶中 $x(x \leq R)$ 处的剩余动能 E'_0 为:

$$E'_0 = \left(E_0 + \frac{800}{Z} \right) e^{-\frac{x}{l_R}} - \frac{800}{Z} \quad (7)$$

即:

$$x = l_R \ln \left(\frac{800 + ZE'_0}{800 + ZE_0} \right) \quad (8)$$

1.4 韧致辐射能量、转换效率及最佳靶厚

1) 不考虑靶(靶厚为 d)对韧致辐射的自吸收时, E_r 为:

$$E_r = \begin{cases} E_0 - \frac{800}{Z} \ln \left(1 + \frac{ZE_0}{800} \right) & d = R \\ \left(E_0 + \frac{800}{Z} \right) \left(1 - e^{-\frac{d}{l_R}} \right) - \frac{800}{Z} \cdot \frac{d}{l_R} & d < R \end{cases} \quad (9)$$

对应的转换效率 η_r 为:

$$\eta_r = \frac{E_r}{E_0} = \begin{cases} 1 - \frac{800}{ZE_0} \ln \left(1 + \frac{ZE_0}{800} \right) & d = R \\ \left(1 + \frac{800}{ZE_0} \right) \left(1 - e^{-\frac{d}{l_R}} \right) - \frac{800}{ZE_0} \cdot \frac{d}{l_R} & d < R \end{cases} \quad (10)$$

2) 考虑靶对韧致辐射的自吸收时,利用式(1)~(3),并设定产生连续 X 射线谱韧致辐射在靶中对应的吸收系数为 μ ,取等效能量为 $E_0/3$ 的单能 X 射线的吸收系数,得:

$$E_r = E_0 \left(\frac{1 + \frac{800}{ZE_0}}{1 - \mu l_R} e^{-\frac{d}{l_R}} - \frac{1 + \frac{1}{\mu l_R} \cdot \frac{800}{ZE_0}}{1 - \mu l_R} e^{-\mu d} + \frac{800}{\mu l_R} \frac{800}{ZE_0} \right) \quad (11)$$

$$\eta_r = E_r/E_0 \quad (12)$$

最佳靶厚 d_0 为:

$$d_0 = \frac{l_R}{1 - \mu l_R} \ln \left(\frac{1 + \frac{800}{ZE_0}}{\mu l_R + \frac{800}{ZE_0}} \right) \quad (13)$$

最大转换效率 η_{\max} 为:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{\mu l_R} \left[\left(\frac{\mu l_R + \frac{800}{ZE_0}}{1 + \frac{800}{ZE_0}} \right)^{\frac{1}{1 - \mu l_R}} \cdot \left(1 + \frac{800}{ZE_0} \right) - \frac{800}{ZE_0} \right] \quad (14)$$

在 12 MeV 下,采用 W 靶时得到的 d_0 及 η_{\max} 列于表 2。

表 2 靶材 W 的最佳靶厚及最大转换效率

Table 2 Optimal thickness and maximum conversion efficiency of target W

靶材	μ/cm^{-1}	d_0/cm	η_{\max}	η_r
W	0.459	0.230 0	0.303 9	0.232 1

1.5 韧致辐射剂量率角分布

束流前向距靶 1 m 处中心点的剂量率为 $670IE_c^0$ (单位为 Gy/min, I 为打靶电子束流),对于 5~50 MeV 重金属靶,剂量率约为 $400IE_c^0$ 。

半值角^[4]为:

$$\theta_{1/2} \approx \frac{37}{E_c^{0.58}} \quad (15)$$

角分布^[4]为:

$$J_x(\theta) = \frac{J_x(0^\circ)}{1 + (\theta/\theta_{1/2})^2} \quad (16)$$

距靶 1 m 处,12 MeV 无损检测用电子直线加速器剂量率角分布为:

$$J_x(0^\circ) \approx 0.64 \text{ Gy/min} \quad (I = 1 \mu\text{A}) \quad (17)$$

实际测得的束流大小约 90 μA ,则 $J_x(0^\circ) \approx 57.6 \text{ Gy/min}$,有:

$$J_x(\theta) = \frac{J_x(0^\circ)}{1 + (\theta/\theta_{1/2})^2} = \frac{57.6}{1 + (\theta/\theta_{1/2})^2} \quad (18)$$

由式(18)得到的剂量率角分布列于表 3。

表 3 剂量率角分布

Table 3 Distributions of dose rate

$\theta/(\circ)$	$J_x(\theta)/(\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1})$	$\theta/(\circ)$	$J_x(\theta)/(\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1})$
0	57.6	22	7.883
2	54.746	24	6.772
4	47.662	26	5.872
7.5	33.237	28	5.135
8	31.407	30	4.525
10	25.009	40	2.636
12	20.024	50	1.715
14	16.206	60	1.202
18	11.030	90	0.540
20	9.272		

2 加速器指标的 MCNP 验证

2.1 模型的建立

模型的建立以北京机械工业自动化研究所 12 MeV 无损检测用电子直线加速器的相关物理尺寸及实验测量条件为依据。验证过程与计算过程结合理论探讨,主要考虑 3 种单质靶材的 X 光子的转换效率和剂量率分布,结合导热学的相关理论完成复合靶设计,并计算靶的感生中子剂量率空间分布。调整加速器模型计算得到的剂量学参数,一方面可改变准直锥或加速管出口处铜锥的几何尺寸、密度或空间位置;另一方面可调整电子束的束流参数。因物理与机械设计的需要,只研究束流参数的影响。各元件模块物理参数为:靶,2.4 mm 厚 W/Au;加速管头部铜锥,高度 11.5 mm,最小内径 9.9 mm,最大内径 39.9 mm。

由 12 MeV 无损检测用电子直线加速器的相关物理尺寸,运用 MCNP 建立的模型示于图 1。

实验中测量的剂量率是束流前向距靶 1 m 的球面上各相应点的分布。由于球对称性,选取计算任意过球心的截面构成的圆,并取 $[0, \pi]$ 范围内的值设定探测器的位置(MCNP 程序中,探测器位置通过球坐标系计算得到,图 2)。

球坐标系下有:

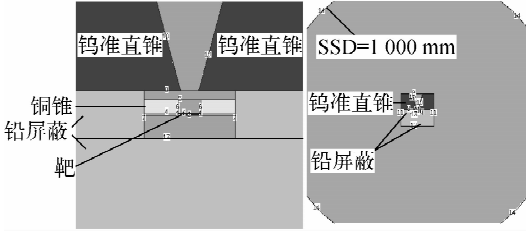


图1 MCNP 建立的模型
Fig.1 Map of MCNP model

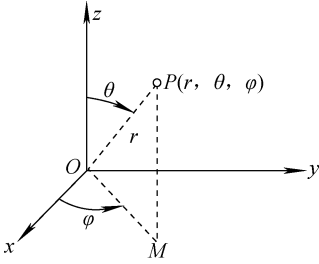


图2 MCNP 模型的坐标系
Fig.2 Coordinate system of MCNP model

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_r \\ e_\theta \\ e_\varphi \end{bmatrix} \quad (19)$$

故选取各探测器位置在 y 平面上,即:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \\ y &= 0 \quad \theta \in [0, \pi] \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (20)$$

改变靶的材料和厚度,计算 X 光子剂量率分布及总转换效率,选取最佳靶的材料和厚度。

实际研究工作中,更注重准直锥限定范围内用于无损检测部分 X 线的转换效率。其具体计算方法是根据轴对称性,得到不同靶厚的

剂量率分布曲线,然后在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 立体角内对剂量率分布求积分,最后进行相应的比值计算,得到准直锥限定范围内的转换效率。

2.2 数据处理与分析

1) MCNP 计算结果分析

改变靶的厚度和靶的材料得到束流前向距靶 1 m 处的 X 光子剂量率分布(图 3),进而得到 X 光子总的转换效率及准直锥限定范围内的转换效率(图 4)。

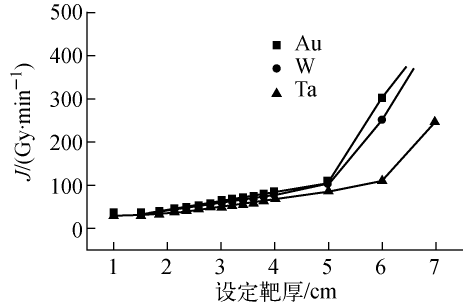


图3 W、Au、Ta 的 X 光子剂量率分布曲线
Fig.3 Distribution curves of X-ray dose rate for W, Au and Ta

由 W、Ta、Au 的 X 光子剂量率分布曲线及相应的剂量率分布曲线可知,12 MeV 无损检测用电子直线加速器最佳靶材为金,最佳靶厚为 2.4 mm。考虑到对流传热及各靶材的物理性质(熔点、热稳定性),靶选取钨与金的叠片(钨的熔点高,对热的稳定性较好,束流前依次是钨、金),靶厚选 2.4 mm。

电子在 2.4 mm 金靶(实际上不可取,仅用于计算)中 $x(x=0.24 \text{ cm} < R=0.2436 \text{ cm})$ 处对应的 E'_0 为:

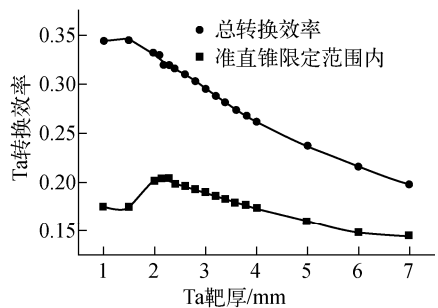
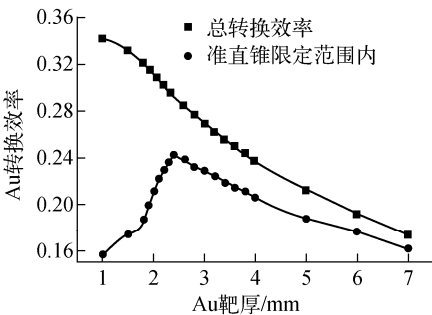


图4 金靶、钨靶转换效率曲线

Fig.4 Conversion efficiency curves of target Au and Ta

$$E'_0 = \left(E_0 + \frac{800}{Z}\right)e^{-\frac{x}{R}} - \frac{800}{Z} = 0.119 \text{ MeV} \quad (21)$$

在束流参数对 X 光子剂量率分布的影响计算过程中靶材选金。设定的束流参数是束流的半径和束流的分布(均匀分布和高斯分布)。图 5 示出了束流半径依次设定为 0.4、0.5、0.65、0.7、0.85、1、1.1、1.2 mm 及考虑束流是高斯分布(束流半径 1 mm)计算得到的空间各点的 X 光子剂量率分布。图 6 给出了拟合曲线。

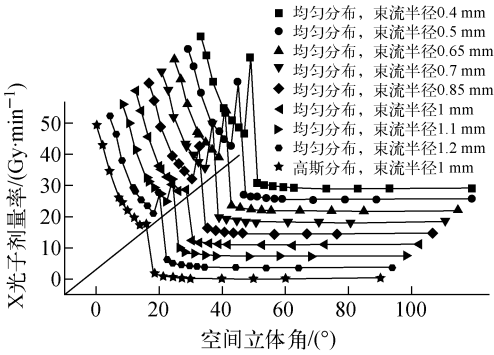


图 5 不同束流半径的 X 光子剂量率
Fig. 5 Distributions of X-ray dose rate of different electron beams

图 5 中束流半径为 1 mm 的均匀分布与束流为高斯分布, X 光子剂量率分布结果曲线无跳变尖峰, 波形波动小; 束流分布为均匀分布时, 不在剂量率分布曲线跳变处的 X 光子剂量率受束流半径变化影响较小, 即不在剂量率波动较大处改变束流半径对相应各点的剂量率分

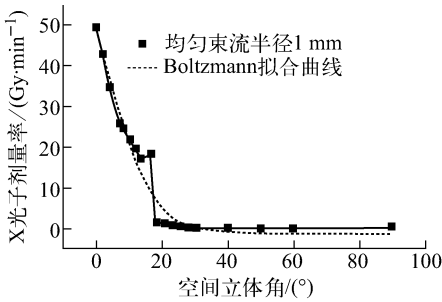


图 6 靶厚 2.4 mm 的 X 光子剂量率分布曲线及拟合曲线

Fig. 6 Distribution curves of X-ray dose rate for 2.4 mm target

布影响不明显, 差值在 0.001 Gy/min 内波动, 符合实验测得结果。因此, 在束流半径为 1 mm 时, 无损检测用电子直线加速器的束流分布可近似为均匀分布。上述探讨也验证了实际工程要求的半径 ≤ 1 mm。

2) 中国计量科学研究院测试 DZ-12 MeV 结果

输出剂量率实验测量条件: 加速器标称电子束能量, 12 MeV; 测量仪器, PTW-UNDOS 计量仪 + 2571-618 电离室; 校正因子, 85.8; 电离室几何中心距焦点 1 m, 测量时 2571 电离室外带 12 MeV 平衡帽。测量得到输出剂量率为 57.72 Gy/min。

感生中子测量条件: 中子周围剂量当量仪, 加速器标称电子束能量为 12 MeV, 加速器标定剂量率为 55.00 Gy/min, 加速器出口屏蔽 46 mm A3 钢板。测量结果列于表 4。

表 4 距靶 1 m 处中心点感生中子剂量率
Table 4 Induced neutron dose rate of the center away from target 1 m

剂量率测量值/(mSv · h ⁻¹)	剂量率平均值/(mSv · h ⁻¹)
14.88, 14.92, 14.92, 14.94,	14.946 ± 0.03 (相对标准偏差为 0.2%)
14.95, 14.96, 14.96, 14.97,	
14.98, 14.98	

束流前向距靶 1 m 处剂量率分布列于表 5。MCNP 计算 $\theta \in [0, \pi]$ 立体角范围内的剂量率分布情况, 在此只给出最佳靶厚在 $\theta \in [0, \pi/2]$ 的计算结果。

比较理论验证结果、实验测得的 X 光子剂量率分布及转换效率(包括准直锥限定范围内的转换效率), 12 MeV 无损检测用电子直线加速器靶的验证计算的理论计算(经验公式与 MCNP 仿真计算)与实验测得结果一致。

无损检测用电子直线加速器中子剂量率的计算实际是加速器中(p, n)反应计算。MCNP 使用手册指出其输运包括中子输运、中子耦合光子输运、光子输运、电子输运、光子和电子输运、中子耦合光子电子输运。但中子耦合光子输运只考虑中子耦合光子, 而不考虑中子效应, 所有核素的光子效应截面库并非都存在。在当前技术条件下, MCNP 无法实现无损检测用电

表5 MCNP 计算结果与测量结果对比
Table 5 Comparison of calculated results
with experimental results

立体角/(°)	剂量率/(Gy·min ⁻¹)	
	MCNP 计算结果	剂量科学院测量结果
0	4.90×10 ³	5.772×10 ³
2	4.28×10 ³	未测量
4	3.42×10 ³	未测量
7.5	2.52×10 ³	未测量
8	2.45×10 ³	未测量
10	2.19×10 ³	未测量
12	1.96×10 ³	未测量
14	1.72×10 ³	未测量
16	2.60×10 ³	未测量
18	1.54×10 ²	未测量
20	1.15×10 ²	未测量
22	8.45×10 ¹	未测量
24	5.78×10 ¹	未测量
26	4.09×10 ¹	未测量
28	3.01×10 ¹	未测量
30	2.28×10 ¹	未测量
40	7.25	未测量
50	4.43	未测量
60	4.99	未测量
90	3.30×10 ¹	未测量

子直线加速器感生中子剂量率物理过程的计算,本文选择 EGS4 程序计算。EGS4 (BEAMnrc) 计算得出距靶 1 m 处中心点感生中子剂量率为 13.94 mSv/h,符合实际测量结果。

3 小结

1) 无损检测用电子直线加速器靶的设计需考虑以下两个方面:一方面是靶的设计中需

依次考虑电子与物质的相互作用、X 光子与物质的相互作用(由以上二者衍生出相关的辐射防护和测量);另一方面是热的传导,需考虑如何将电子与物质相互作用的能量带走。

2) 在 12 MeV 无损检测用电子直线加速器及北京机械工业自动化研究所已研发的 DZ 系列加速器模拟计算无损检测用电子直线加速器靶设计的相关研究中,束斑可取均匀束模拟计算,且剂量率的空间分布受电子束流焦点(束斑)大小的影响不明显。

参考文献:

- [1] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册 [M]. 北京:原子能出版社,1990.
- [2] JALLU F, LYOUSSI A, PAYAN E, et al. Photoneutron production in tungsten, praseodymium, copper, and beryllium by using high energy electron linear accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1999, 155: 373-381.
- [3] 李泉凤,吴莹英,黄蔚玲. 电子加速器 X 射线发射率的 MCNP 分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(3):304-306.
LI Quanfeng, WU Yingying, HUANG Weiling. MCNP analysis of X-ray emissions in an electron accelerator[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2004, 44(3): 304-306(in Chinese).
- [4] 赖启基. 高能电子束转换成 X 射线技术及经济可行性[D]. 南京:南京大学物理系,2005.
- [5] 郭冰琪,李泉凤,杜泰斌,等. 韧致辐射靶的发射率及角分布分析[J]. 高能物理与核物理,2005, 29(12):1 190-1 195.
GUO Bingqi, LI Quanfeng, DU Taibin, et al. Analysis of angular distribution and photon yield from bremsstrahlung targets[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(12): 1 190-1 195(in Chinese).