

# 无损检测用15MeV电子直线加速器主束内 光中子剂量的测量与MC模拟计算\*

黄蔚玲<sup>1;1)</sup> 李泉凤<sup>1;2)</sup> 林郁正<sup>1</sup> 骆亿生<sup>2</sup>

1(清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

2(军事医学科学院放射学剂量研究室 北京 100850)

**摘要** 通过实验和模拟计算研究了无损检测用15MeV电子直线加速器X射线主束内的中子剂量. 加速器采用了铜复合靶和钨加含硼聚乙烯的屏蔽结构, 能够有效地减少光中子的产生, 中子产额在 $\frac{1}{1000}n/\gamma$ 以下. 但由于主束内光子剂量很大, 中子的绝对强度也不容忽视. 针对加速器周围强X射线脉冲辐射场的特点, 采用了被动型的中子剂量测量方法, 加速器正常工作情况下, 使用CR-39片和双电离室测量了等中心处中子对X射线的剂量当量比率, 分别为0.19mSv/Gy X-ray和0.060mSv/Gy X-ray. 利用MCNP5模拟计算了实验相应点的中子对X射线的剂量当量比率, 为0.092mSv/Gy X-ray, 与实验测量结果在数量级上一致. 加速器主射束上 $D_n/D_\gamma < 1/1000$ , 小于辐射防护标准对中子泄漏剂量的规定值, 从而验证了屏蔽结构的安全性.

**关键词** 光中子 中子测量 Monte-Carlo MCNP5

## 1 引言

电子直线加速器作为X射线源被广泛地应用在医用放射治疗、工业无损检测、辐射成像等领域. 在一般的工业用或医用电子加速器中, 韧致辐射靶、用于屏蔽和准直光子的材料多是高原子序数的材料. NCRP79(1984)报告<sup>[1]</sup>中指出, 将中子从原子核中分离出来的阈能 $E_{th}$ 为6MeV—16MeV( $Z > 6$ ), 当电子打靶产生的X射线的能量高于此阈值时, 就会发生 $(\gamma, n)$ 等反应, 产生光中子.

台湾新竹清华大学对一台西门子PRIMUS直线加速器产生的15MV X射线带来的光中子污染进行了测量, 在等中心处(isocenter, 即靶前方向1m处)热中子通量为 $1.258 \times 10^5 n/cm^2 \cdot s$ , 快中子通量为 $1.745 \times 10^4 n/cm^2 \cdot s$ . 当采用一疗程7000cGy X射线进行治疗时, 病人获得的光中子累计剂量当量为20mSv, 相对于中子对光子的剂量当量比率为0.286mSv/Gy

X-ray<sup>[2]</sup>. 根据美国斯坦福直线加速器中心采用EGS4程序对Varian Clinac 2100C/2300C加速器中子产额进行计算的结果, 当电子能量为14.9MeV时, 等中心处中子产额为 $6.8 \times 10^{11} n/Gy$  X-ray<sup>[3]</sup>. 因此对于15MeV电子直线加速器加速电子打靶后的韧致辐射X射线来说, 会有相当一部分的光中子污染, 值得认真考虑, 它不仅有关放射安全的问题, 还会相应的带来影响无损检测图像质量的问题.

电子直线加速器韧致辐射靶传统上采用高Z(原子序数)材料, 如钨、金、钽等. 但是高Z材料原子核内中子富余程度比较高, 中子的平均分离能比中等核素要低一些,  $(\gamma, n)$ 反应阈能较低, 反应截面也较中等核素大. 已建成的无损检测用15MeV电子直线加速器采用以铜为基本材料的复合靶, 屏蔽第1层为钨, 第2层为含硼聚乙烯, 能够明显地减少光中子, 并对钨屏蔽中产生的中子有效地再屏蔽. 但由于主束内光子强度很大, 光中子的绝对强度也不容忽视, 需要相应的实

\* 国家自然科学基金(10135040)资助

1) E-mail: huangwl00@mails.tsinghua.edu.cn

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

验及模拟计算对光中子的剂量进行评估. 本文针对15MeV电子直线加速器主束内强X射线脉冲混和场的特点, 采用了被动型的中子剂量测量方法, 分别使用Unidos剂量仪、TE和C电离室、CR-39片测量了不同情况下, 加速器束流方向距靶1m处的光子剂量和光中子剂量当量. 用Monte-Carlo程序MCNP5模拟了整个加速器系统中的辐射物理过程, 计算了实验相应点的中子对光子的剂量当量比率. 对比实验和模拟计算的结果, 在数量级上一致.

## 2 光中子产生机理

15MeV电子入射靶后, 发生一系列复杂的电磁级联反应. 电子在靶中通过电离和辐射损失能量, 辐射能量损失占总能量损失的30%以上, 韧致辐射光子的能谱是一个连续谱, 光子的最高能量与入射电子的能量相等, 当光子能量高于光核反应阈能, 便能产生中子、质子、 $\alpha$ 粒子等. NCRP79号报告指出随着原子序数的增加, 中等核素和重核的平均巨共振能量降低, 同时 $(n, \gamma)$ 反应的截面增加<sup>[1]</sup>. 对于传统上采用高Z靶材料, 如钨、金、钽等, 就不适于应用在无损检测用的电子直线加速器上. 因此, 在能量达到15MeV的无损检测用的加速器的靶中, 需考虑选用中等重量的核素(如Cu), 以使光中子产额减少. 在屏蔽X射线用的钨层外还包有含硼聚乙烯, 以慢化吸收光中子, 如图1所示.

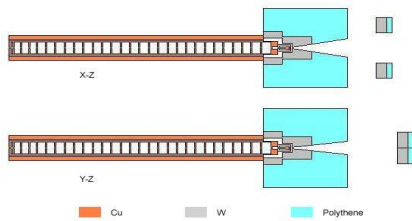


图1 15MeV电子直线加速器X-Z方向及Y-Z方向示意图

## 3 光中子的测量与模拟计算

无损检测用15MeV电子直线加速器主束内是一个比较复杂的强X射线脉冲混合场, 中子产额相对于光子的强度在1/1000以下, 但是由于X射线剂量很大, 中子的绝对强度并不小, 如果采用主动型探测器在线实时测量, 探测器漏计数现象非常严重, 而且脉冲型的探测器对 $\gamma$ 的甄别能力也会因强X射线的影响变坏. 这样中子的测量就无法采用主动型探测器, 而只能通过径迹蚀刻、气泡探测器、活化法等被动测量的方法.

15MeV电子直线加速器置于加速器平台上, 平台高度下降到最低位. 靶点距地面1250mm. 前准直器为水平方向全开, 后准直器竖直方向开度为3mm. 测量光子剂量的Unidos剂量仪和军事医学科学院TE和C电离室测量时都处在与靶同高、距靶1m远的位置. 同时在电离室表面粘贴CR-39片, 用于中子的累积剂量测量. 加速器正常工作, 主射束上未加屏蔽. 电子平均流强为150 $\mu$ A. 距加速器靶点1m远Unidos剂量仪测量束流中心处加速器的X射线剂量率为192.98Gy/min; 相同条件下TE和C电离室测量X射线剂量率为198.49Gy/min, 中子剂量率为3.845cGy/min. CR-39片测量中子在1min内的累积剂量为1.157cGy.

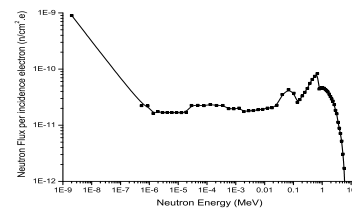


图2 15MeV电子直线加速器距靶1m处光中子能谱(MCNP5模拟结果)

为了验证实验结果的可信性, 根据图1所示的结构建立Monte-Carlo模拟计算的模型, 利用MCNP5计算了距靶1m处1个入射电子产生的X射线剂量为 $3.42 \times 10^{-15}$ Gy. 模拟计算的光中子的能谱如图2所示. 能谱中的热中子主要是光中子经过屏蔽和准直器中的含硼聚乙烯慢化后产生的. 由中子能谱计算中子剂量, 按公式(1)可以算得<sup>[4]</sup>

$$\dot{H} = \int \varphi dH, \quad (1)$$

式中 $\dot{H}$ 为中子剂量当量,  $\varphi$ 为中子注量率,  $dH$ 为子的注量-剂量当量换算因子. 根据MCNP5手册中的中子的注量-剂量当量换算因子表和模拟计算得到的中子能谱, 计算出距靶1m处每入射电子产生的中子剂量当量为 $3.16 \times 10^{-16}$ mSv. 加速器正常工作时平均电流为150 $\mu$ A, 即 $5.625 \times 10^{16}$ e/min. 对比实验测量和模拟计算的结果, 如表1所示.

表1 15MeV电子直线加速器距靶1m处光子及中子剂量

	实验测量			MCNP5 模拟计算
	电离室	CR-39	Unidos	
$D_\gamma$ /(Gy/min)	198.49		192.98	192.38
$D_n$ /(mSv/min)	38.45	11.57		17.78
$\frac{D_n}{D_\gamma}$ /(mSv/Gy)	0.19		0.060	0.092

## 4 结论

在无损检测用电子直线加速器中, 15MeV 电子打靶后发生一系列复杂的电磁级联反应. 光中子在加速器的靶、屏蔽、准直器、均整块等结构中都会产生, 造成主束中的中子污染. 加速器主束内是一个比较复杂的强 X 射线脉冲混合场, 针对辐射场的特点, 采用了被动型的中子剂量测量方法, 在加速器正常工作情况下, 分别使用 TE 和 C 电离室、Unidos 剂量仪和 CR-39 片, 测量了等中心处光子剂量和中子的剂量当量, 得到中子对光子的剂量当量比率为 0.19mSv/Gy X-ray 和 0.06mSv/Gy X-ray. 利用 Monte-Carlo 程序

MCNP5 模拟计算了实验相应点的中子对 X 射线的剂量当量比率, 为 0.092mSv/Gy X-ray, 与实验测量结果在数量级上一致. 参考台湾新竹清华大学对一台西门子 PRIMUS 直线加速器产生的 15MV X 射线带来的光中子污染进行测量的结果, 中子对光子的剂量当量比率为 0.286mSv/Gy X-ray, 在同一量级水平, 证明实验和模拟计算结果可靠. 加速器主射束上  $D_n/D_\gamma < 1/1000$ , 小于辐射防护标准对中子泄漏剂量的规定值, 从而验证了屏蔽结构的安全性.

感谢加速器实验室的杜泰斌、程诚老师及辐射防护实验室的张辉老师对光中子测量实验的大力协助.

## 参考文献(References)

- 1 Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators, NCRP REPORT, No. 79. 1984. 1—8
- 2 Jao-Perng L, Chua T C, Lina S Y et al. Applied Radiation and Isotopes, 2001, **55**: 315—321
- 3 LIU J C, Nelson W R, MAO X S et al. Health Phys, 1997, **72**(4): 524—529
- 4 Nuclear Radiation Measurement and Protection. WANG Ru-Shan, ZHUO Yun-Shang. Beijing: Atomic Energy Press. 1990. 20(in Chinese)  
(核辐射测量与防护. 王汝瞻, 卓韵裳. 北京: 原子能出版社. 1990, 20)

# Measurement and Calculation of Photoneutrons Produced in the Electron Accelerator for Radiography Application \*

HUANG Wei-Ling<sup>1:1)</sup> LI Quan-Feng<sup>1:2)</sup> LIN Yu-Zheng<sup>1</sup> LUO Yi-Sheng<sup>2</sup>

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

2(Institute of Military Medical Science, Beijing 100850, China)

**Abstract** Photoneutrons produced in the 15MeV electron accelerator for radiography application were measured and calculated. With passive methods of CR-39 and TE/C ion chamber, the photoneutron dose at the isocenter was 0.19mSv/Gy X-ray and 0.06mSv/Gy X-ray. For comparison, the whole accelerator system was simulated by Monte-Carlo method of MCNP5. The ratio or the neutron dose and the photon dose was 0.092mSv/Gy X-ray, less than the limited value of radiation protection standard. The results of the measurement and the calculation agreed well in the same order.

**Key words** photoneutron, neutron measurement, Monte-Carlo, MCNP5

\*Supported by NSFC (10135040)

1) E-mail: huangwl00@mails.tsinghua.edu.cn

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