

## 0.5 ~ 2.5 MeV 辐射加工电子加速器 X 射线发射率的 MCNP5 计算

洪天祺 戴瑜

江苏省辐射环境保护咨询中心,江苏 南京 210019

**摘要:** 目的 研究辐射加工用 0.5 ~ 2.5 MeV 电子加速器的 X 射线发射率。方法 通过 MCNP5 计算 0.5 ~ 2.5 MeV 工业辐照电子加速器轰击铅靶、铁靶、铝靶时,在  $0^{\circ}$  ~  $180^{\circ}$  方向的 X 射线发射率,与 NCRP-51 报告给出 X 射线发射率常数进行比较。结果 MCNP5 计算得到的 X 射线发射率与 NCRP-51 报告中的数据基本一致。结论 MCNP5 计算得到的 X 射线发射率对于辐射影响分析具有一定的参考作用。

**关键词:** 电子加速器; MCNP5; 韧致辐射

中图分类号: R815.6 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2015)03-03-0293

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.03.045

低能电子加速器在工业辐射加工中应用广泛,电子能量有 2.5、2.0、1.5、1.0、0.8、0.5 MeV 等,束流一般为 40 ~ 100 mA,束功率一般为 50 ~ 100 kW,主要用于对电子线路板、预硫化轮胎胴体、薄膜的泡沫辐射、热缩材料辐射交联、环保阻燃辐射交联等<sup>[1]</sup>。辐射加工产品通过机械装置自动传送进出辐照室,电子束固定朝下进行辐射加工。加速电子辐射加工时,受到加工产品、线缆、传输装置或其他物质阻挡时会产生韧致辐射。对一定原子序数的靶物质,单位束流强度辐射加工产生相应的 X 射线发射率随加速电子的能量增高而显著增大,并且 X 射线发射率的角分布也随电子能量的增加而变化。NCRP-51 报告给出了对于高原子序数的靶材料和不同能量电子打靶时,在不同方向上的 X 射线率常数;但未给出低原子序数的靶材和不同能量电子打靶时,在  $0^{\circ}$  ~  $180^{\circ}$  方向完整的 X 射线发射率<sup>[2]</sup>。

## 1 X 射线发射率的 MCNP5 模拟计算

根据辐射加工时电子可能轰击的不同原子序数的靶物质,本文选取材质分别为铅、铁、铝的靶体,靶体几何尺寸为直径(1 ~ 4) mm、厚度(0.05 ~ 3) mm 的圆柱体,进行 MCNP5 模拟计算。电子束垂直向下方向为  $0^{\circ}$  方向,以靶体上表面中心为圆心,从  $0^{\circ}$  方向开始,每间隔  $15^{\circ}$  布设一个环形探测器,至  $180^{\circ}$  方向共布设 13 个探测器,探测器上每点距离圆心均为 1 m,模拟计算几何模型见图 1。使用 MCNP5 中的 F5z 卡(环形探测器,通过 DE/DF 卡修改 F5z 卡计数实现粒子注量率与

剂量率的转换,通量剂量转换因子选择 MCNP5 附表 H.2<sup>[3]</sup>中数据,电子和光子截断能量为 0.05 MeV,跟踪样本总数为  $1 \times 10^6$ ) 分别计算了 0.5 ~ 2.5 MeV 电子轰击铅靶、铁靶、铝靶时,在  $0^{\circ}$  ~  $180^{\circ}$  方向的 X 射线发射率,计算得到归一化的  $0^{\circ}$  ~  $180^{\circ}$  方向 1 m 处的 X 射线发射率结果分别见表 1、表 2、表 3 和图 2、图 3、图 4。

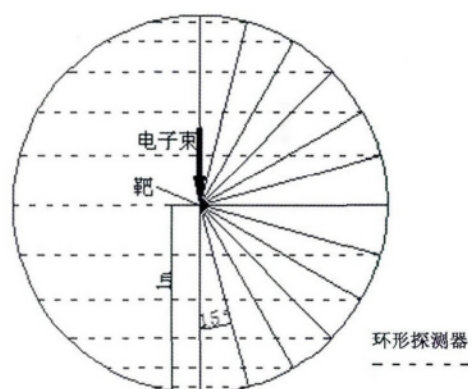


图 1 MCNP5 模拟计算几何模型

## 2 MCNP5 计算结果分析

由表 1 ~ 表 3 计算结果和图 2 ~ 图 4 知:(0.5 ~ 2.5) MeV 电子轰击铅靶、铁靶、铝靶时,在  $0^{\circ}$  方向的 X 射线发射率最大,随着出射方向角度增大而减小,减缓趋势比较明显;轰击铅靶时在  $90^{\circ}$  方向附近会随着角度的增大而增大,轰击铝靶和铁靶时这一现象不是很明显;  $115^{\circ}$  方向后随着角度增大而减小,但减小趋势放缓。这与 NCRP-51 附录 E.2 附图中的数据基本一致,因而本文使用 MCNP5 计算结果可以用于(0.5 ~ 2.5) MeV 辐射加工用电子加速器的辐射影响分析。

表 1 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铅靶 X 射线发射率( 单位: Gy · m<sup>2</sup> · mA<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>)

角度	0.5 MeV	0.8 MeV	1.0 MeV	1.5 MeV	2.0 MeV	2.5 MeV
0°	1.33E -01	4.33E -01	7.63E -01	1.75E +00	4.09E +00	8.38E +00
15°	1.27E -01	4.00E -01	6.87E -01	1.43E +00	3.17E +00	5.97E +00
30°	1.10E -01	3.31E -01	5.42E -01	1.07E +00	2.21E +00	3.88E +00
45°	8.79E -02	2.61E -01	4.47E -01	7.55E -01	1.58E +00	2.86E +00
60°	6.70E -02	2.27E -01	3.93E -01	5.90E -01	1.24E +00	2.11E +00
75°	5.59E -02	2.07E -01	3.76E -01	5.33E -01	1.09E +00	1.84E +00
90°	5.29E -02	1.94E -01	3.47E -01	4.74E -01	9.51E -01	1.59E +00
105°	1.26E -01	3.08E -01	4.72E -01	9.63E -01	1.56E +00	2.34E +00
120°	1.39E -01	3.37E -01	5.03E -01	1.02E +00	1.67E +00	2.41E +00
135°	1.40E -01	3.39E -01	5.02E -01	1.03E +00	1.58E +00	2.34E +00
150°	1.40E -01	3.38E -01	4.96E -01	1.01E +00	1.58E +00	2.23E +00
165°	1.42E -01	3.35E -01	4.85E -01	9.86E -01	1.55E +00	2.16E +00
180°	1.38E -01	3.34E -01	4.88E -01	9.80E -01	1.57E +00	2.17E +00

表 2 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铁靶 X 射线发射率( 单位: Gy · m<sup>2</sup> · mA<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>)

角度	0.5 MeV	0.8 MeV	1.0 MeV	1.5 MeV	2.0 MeV	2.5 MeV
0°	9.10E -02	3.14E -01	5.29E -01	1.56E +00	3.72E +00	7.51E +00
15°	8.69E -02	2.73E -01	4.60E -01	1.25E +00	2.72E +00	4.87E +00
30°	7.52E -02	2.17E -01	2.54E -01	8.29E -01	1.69E +00	2.87E +00
45°	5.92E -02	1.64E -01	2.02E -01	5.51E -01	1.12E +00	1.86E +00
60°	4.70E -02	1.32E -01	1.67E -01	4.04E -01	7.85E -01	1.26E +00
75°	3.89E -02	1.11E -01	1.42E -01	3.24E -01	6.10E -01	9.61E -01
90°	3.54E -02	9.48E -02	1.41E -01	2.73E -01	4.90E -01	7.52E -01
105°	3.63E -02	9.39E -02	1.28E -01	3.09E -01	4.99E -01	7.09E -01
120°	3.46E -02	8.53E -02	1.28E -01	2.99E -01	4.45E -01	6.51E -01
135°	3.26E -02	8.07E -02	1.20E -01	2.66E -01	4.16E -01	5.94E -01
150°	3.05E -02	7.58E -02	1.15E -01	2.50E -01	3.91E -01	5.31E -01
165°	2.93E -02	7.34E -02	1.12E -01	2.38E -01	3.59E -01	5.05E -01
180°	2.94E -02	7.20E -02	1.07E -01	2.36E -01	3.50E -01	4.85E -01

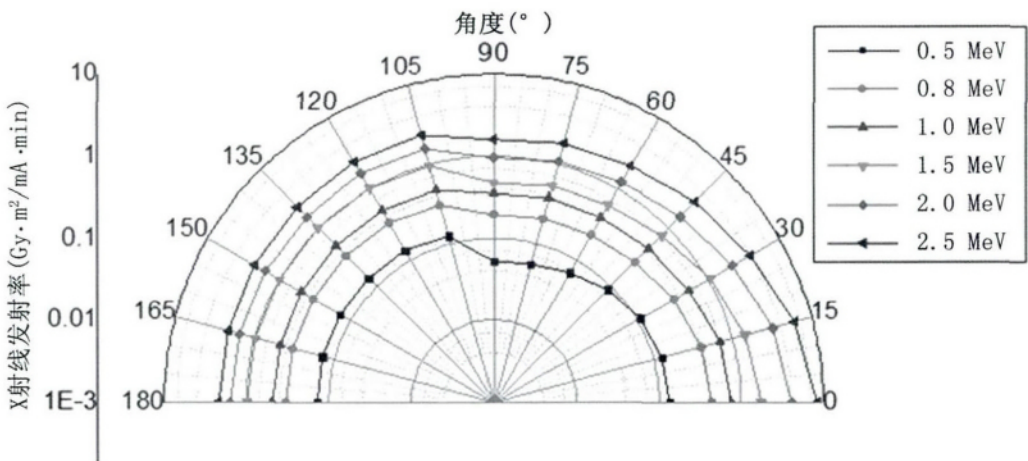


图 2 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铅靶 X 射线发射率

表 3 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铝靶 X 射线发射率( 单位: Gy · m<sup>2</sup> · mA<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>)

角度	0.5 MeV	0.8 MeV	1.0 MeV	1.5 MeV	2.0 MeV	2.5 MeV
0°	8.62E -02	3.06E -01	3.14E -01	1.82E +00	4.20E +00	8.16E +00
15°	8.21E -02	2.69E -01	2.73E -01	1.43E +00	3.02E +00	5.23E +00
30°	7.00E -02	2.10E -01	2.17E -01	9.77E -01	1.88E +00	3.22E +00
45°	5.53E -02	1.57E -01	1.64E -01	6.84E -01	1.31E +00	2.06E +00
60°	4.69E -02	1.20E -01	1.32E -01	4.89E -01	9.15E -01	1.42E +00
75°	3.99E -02	1.01E -01	1.11E -01	3.33E -01	6.87E -01	1.04E +00
90°	3.56E -02	8.68E -02	9.48E -02	2.24E -01	5.39E -01	8.35E -01
105°	3.55E -02	8.89E -02	9.39E -02	2.78E -01	4.49E -01	6.46E -01
120°	3.34E -02	8.19E -02	8.53E -02	2.53E -01	3.83E -01	5.74E -01
135°	3.07E -02	7.78E -02	8.07E -02	2.32E -01	3.46E -01	5.03E -01
150°	2.92E -02	7.31E -02	7.58E -02	2.17E -01	3.28E -01	4.55E -01
165°	2.80E -02	7.34E -02	7.34E -02	2.05E -01	3.12E -01	4.34E -01
180°	2.78E -02	7.02E -02	7.20E -02	2.03E -01	3.01E -01	4.31E -01

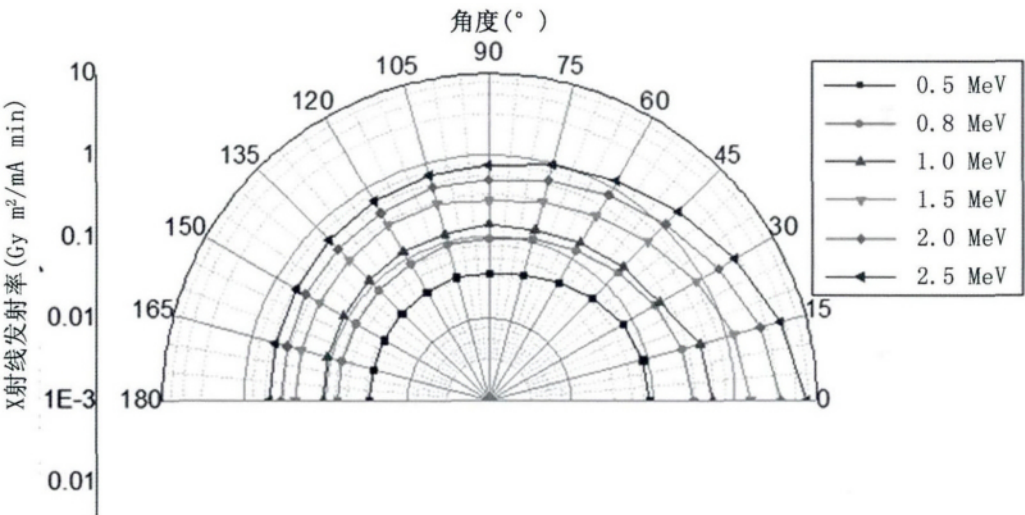


图 3 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铁靶 X 射线发射率

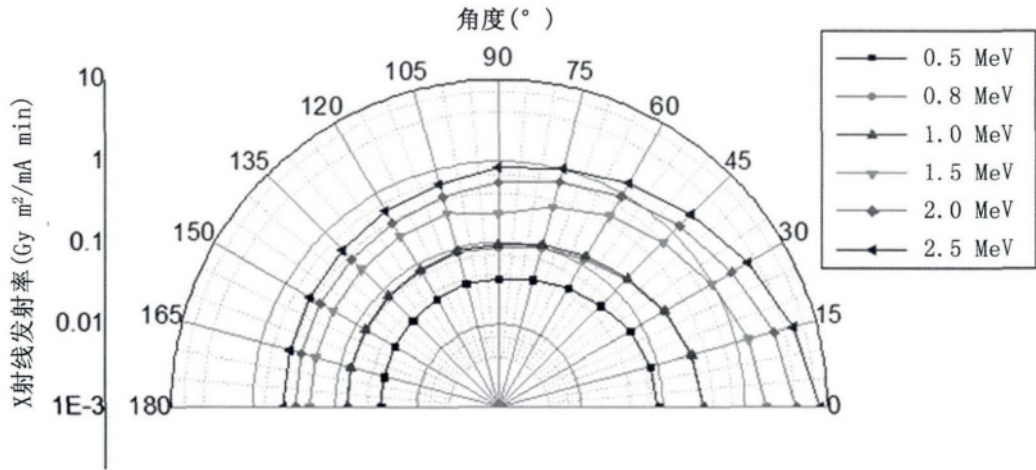


图 4 0.5 ~2.5 MeV 电子轰击铝靶 X 射线发射率

参考文献

[1] 洪天祺,戴瑜. 无锡爱邦辐射技术有限公司使用工业辐照电子加速器项目环境影响报告[Z]. 江苏省辐射环境保护咨询中心. 2014.

[2] NCRP. Radiation protection design guide lines for 0.1 ~ 100MeV particle accelerator facilities[R]. NCRP 1977.

[3] X - 5 Monte Carlo Team. MCNP — A General Monte Carlo N - Particle Transport Code[M]. Version 5. April 24 2003.

收稿日期: 2014 - 08 - 27 修回日期: 2014 - 11 - 19