

文章编号:1673-0062(2013)03-0006-04

光子注量到周围剂量当量转换系数的 Monte-Carlo 模拟

花正东¹,王德忠²,刘 诚²,陈继亮³,王 方²

(1. 上海市奉贤区环境监测站,上海 201400;2. 上海交通大学 机械与动力工程学院,
上海 200240;3. 上海市环境保护局,上海 200003)

摘 要:本文采用蒙特卡罗程序 EGS5 计算了 10 keV ~ 10 MeV 光子注量到周围剂量当量的转换系数. 模拟计算中考虑了两种情况:1) 不带次级电子模拟;2) 带次级电子模拟. 把两种情况下的计算值与前研究者的计算值及 ICRP 74 号报告中的建议值进行了比较. 并给出了用于计算光子注量与周围剂量当量间的转换系数的拟合公式.

关键词:蒙特卡罗;EGS5;光子注量;周围剂量当量

中图分类号:0572.31 **文献标志码:**B

Monte-Carlo Simulation of Conversion Coefficient for Ambient Dose Equivalent from PhotonFluence

HUA Zheng-dong¹, WANG De-zhong², LIU Cheng², CHEN Ji-liang³, WANG Fang²

(1. Environmental Monitoring Station of Fengxian District, Shanghai 201400, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Environmental Protection Bureau, Shanghai 200003, China)

Abstract: The conversion coefficients for ambient dose equivalent from photon fluence were calculated using Monte-Carlo code EGS5 with photon energy 10 keV ~ 10 MeV. The two cases were considered in the simulation: 1) without the secondary electrons in transport; 2) with the secondary electrons in transport. Our results shows good agreement with prior study and the data recommended by ICRP 74 Report. The fitted formulae for calculating the conversion coefficients in the photon energy 20 keV ~ 10 MeV were given based on the data obtained by EGS5 code.

key words: Monte-Carlo; EGS5; photon fluence; ambient dose equivalent

周围剂量当量作为辐射剂量学的一个基本 量,已被广泛用于外照射探测器检定和外照射剂

收稿日期:2013-05-10

作者简介:花正东(1984-),男,江苏淮安人,上海市奉贤区环境监测站工程师. 主要研究方向:辐射安全监督管理及辐射环境监测.

量测量,防护效果评价以及屏蔽设计、计算中^[1-3]. 为研究光子注量与周围剂量当量间的转换系数,本文采用蒙特卡罗程序 EGS5^[4] 对 ICRU 球模型^[5]中的感兴趣点的辐射量进行模拟.

1 材料及方法

周围剂量当量 $H^*(10)$ 是辐射场分布为扩展齐向场的辐射粒子在 ICRU 球内、逆扩展齐向场的半径上深度 10 mm 处产生的剂量当量^[5]. ICRP 60 号报告中建议对于任何能量的光子、电子,其辐射权重因子取 1^[6]. ICRU 球内、逆扩展齐向场的半径上深度 10 mm 处产生的剂量当量在数值上等于该深处的吸收剂量. 根据吸收剂量的定义,吸收剂量是辐射粒子沉积在单位质量内的能量^[6]. 因此,可以采用蒙特卡罗程序对辐射粒子沉积于 ICRU 球内、逆扩展齐向场的半径上深度 10 mm 处小记录体内的能量进行计算. ICRU 球的密度取 1.0 g/cm^3 ,材料成分及质量比分别为:H: 10.1%; C: 11.1%; N: 2.6%; O: 76.2%,直径为 30 cm; ICRU 球内的记录体半径取 1 cm,厚度取 0.2 cm;光子的扩展齐向场半径为 15 cm 的圆盘,光子在圆盘内均匀分布、方向一致;扩展齐向场与 ICRU 球间设置为真空. 模拟计算模型 a (见图 1). 当入射光子能量为 E_g ,沉积在记录体内的能量为 E_d ,则光子注量与周围剂量当量间的转换系数可采用公式(1)表示:

$$\frac{H^*(10)}{\Phi(E_\gamma)} = \frac{E_d \times 1.602 \times 10^{-13}}{\frac{\pi \times 1.0^2 \times 0.2 \times 1.0 \times 10^{-3}}{1} \times 10^{12}} \times w_{e,\gamma}$$

(1)

式中 $w_{e,\gamma}$ 为电子、光子的辐射权重因子,其值为 1.0.

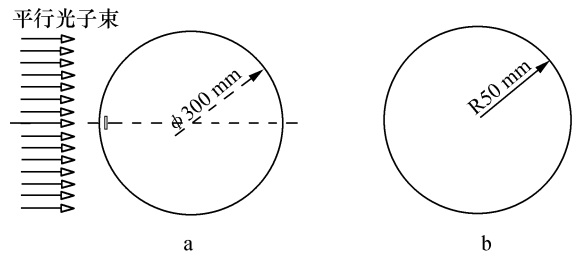


图 1 模拟计算模型

Fig. 1 The model used in Monte-Carlo simulation

不带次级电子模拟时,次级电子动能 Cut-off 值设置得比入射光子能量大,以使模拟中产生的电子就地损失 100% 动能^[7]. 带次级电子模拟时,次级电子动能 Cut-off 值设置为 50 keV. 两种模拟条件下光子的 Cut-off 值均设置为 5 keV. 因在带次级电子模拟中,若电子动能 Cut-off 值设置得太低,模拟时间会比较长,如相同模拟粒子数下,电子动能 Cut-off 值为 10 keV 时的运输耗时约为 50 keV 的一倍. 为此在带次级电子模拟前得确定一个比较合理的 Cut-off 值,在计算中采用模型 b (见图 1) 先来确定次级电子的动能 Cut-off 值,即建立一个半径仅 0.005 cm,材料组成与 ICRU 球组分一样的球,初始电子位于球心,次级电子及次级光子的 Cut-off 值设置为 1 keV. 根据损失于球内的能量与电子初始动能之间的比值来确定本计算中次级电子动能的 Cut-off 值.

2 模拟计算结果及比较

在模型 b 中,初始电子损失于半径为 50 mm 球中的能量与初始电子动能的比值随初始电子动能的变化曲线见图 2. 从图 2 中可以明显看出,在带次级电子模拟时,次级电子动能的 Cut-off 值设置为 50 keV 较为合理.

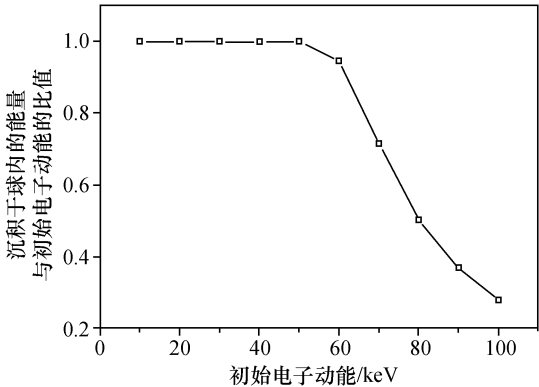


图 2 沉积于球中的能量与初始电子动能的比值

Fig. 2 The ratio between the energy deposited in sphere and the kinetic energy of primary electron

采用 EGS5 程序模拟得到的光子能量范围为 10 keV ~ 10 MeV 的光子注量到周围剂量当量的转换系数见表 1. 不带次级电子模拟时,在 10 keV 这个能量点的计算值与 ICRP 74 号报告中的建议值^[8](下文称建议值)间的偏差大于 10%,其余能量点的计算值与建议值间的偏差均在 $\pm 3.0\%$ 以内. 考虑次级电子模拟时,光子能量低于 3 MeV

时的转换系数与不考虑次级电子模拟得到的值差别不大,在 $\pm 3\%$ 以内,与建议值间的偏差也均在 $+3\%$ 以内;光子能量高于 3 MeV 的转换系数与建议值间的差别程度随光子能量增加而变大. 主要是因为能量高于 3 MeV 的光子与 ICRU 球相互作用过程中的康普顿散射、电子对效应随光子能量的增加而不断增加. 尽管建议值在光子能量高于 3 MeV 时与 Osamu^[9]等给出的 ICRU 球轴向上最大值较接近,但依据 ICRU 报告中^[5]给出的周围剂量当量的定义,该建议值对于能量高于 3 MeV 的光子而言是保守的,已不在适用于精确的周围剂量当量的计算. 带次级电子模拟所得的转换系数与 Ferrari and Pelliccioni^[10]采用 FLUKA 程序和 J. O. Kim and J. K. Kim^[11]采用 EGS3 程序的模拟值间的偏差均较小,见图 3.

为便于使用光子注量到周围剂量当量的转换系数,依据 EGS5 的模拟值采用 Origin 软件给出了光子能量 $20\text{ keV} \sim 10\text{ MeV}$ 的转换系数计算拟合公式(2)和公式(3),公式中 E 表示光子的能量(keV); c 表示转换系数($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$); z 表示修正系数. 公式中的参考系数值见表 2.

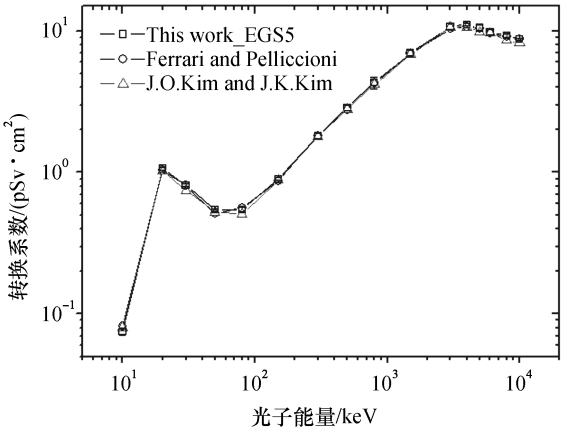


图 3 光子注量与周围剂量当量间转换系数的模拟值
Fig.3 The conversion coefficient of calculations between F and H * (10)

$$c = \frac{H * (10)}{\Phi} = a_1 + \frac{a_2}{E + a_3} + a_4 \times E^{a_5} + a_6 \times E. \tag{2}$$

$$\xi = \begin{cases} 1.0 & E \in [30, 3000\text{ keV}] \\ b_1 + \frac{b_2}{b_3 + E} & E \in [3000, 10000\text{ keV}] \end{cases} \tag{3}$$

表 1 光子注量与周围剂量当量间的转换系数

Table 1 The conversion coefficients for ambient dose equivalent from photon fluence			
光子能量 /keV	不带次级电子模拟 /($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)	带次级电子模拟 /($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)	ICRP 建议值 /($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)
10	0.075 ± 0.003	0.077 ± 0.004	0.061
20	1.059 ± 0.020	1.059 ± 0.020	1.050
30	0.811 ± 0.018	0.811 ± 0.019	0.810
40	0.629 ± 0.019		0.640
50	0.541 ± 0.013	0.541 ± 0.013	0.550
60	0.523 ± 0.018		0.510
80	0.542 ± 0.021	0.546 ± 0.019	0.530
100	0.623 ± 0.021		0.610
150	0.902 ± 0.034	0.900 ± 0.022	0.890
200	1.204 ± 0.034		1.200
300	1.770 ± 0.134	1.804 ± 0.079	1.800
400	2.370 ± 0.050		2.380
500	2.913 ± 0.248	2.866 ± 0.132	2.930
600	3.371 ± 0.113		3.440
800	4.278 ± 0.089	4.312 ± 0.402	4.380
1000	5.068 ± 0.225		5.200
1500	6.960 ± 0.144	6.956 ± 0.359	6.900
2000	8.405 ± 1.008		8.600
3000	11.24 ± 0.29	10.73 ± 0.56	11.10
4000	13.43 ± 0.87	11.08 ± 0.28	13.40
5000	15.26 ± 0.54	10.50 ± 0.51	15.50
6000	17.41 ± 0.84	9.790 ± 0.476	17.60
8000	21.55 ± 1.25	9.277 ± 0.252	21.60
10000	25.18 ± 2.21	8.731 ± 0.100	25.60

表 2 公式(2)、公式(3)的参数值

Table 2 The parameters and its value within formula (2) and formula (3)

参数	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	b ₁	b ₂	b ₃
参数值	-4.883	135.27	21.38	1.064	0.3	0.001 34	-0.156	6 080	2 350

公式(2)可用于计算不带次级电子模拟时的转换系数.拟合值与模拟值、建议值间的偏差均在±4.0%以内.经公式(3)的修正,公式(2)可用于计算考虑次级电子贡献情况的转换系数.

3 结 论

采用 EGS5 程序在考虑不带次级电子和带次级电子两种情况下,对光子注量到周围剂量当量的转换系数进行了模拟计算.计算结果表明,光子低于 3 MeV 时,两种情况下的模拟值与建议值间的符合程度均较好;但当光子能量高于 3 MeV 时,不带次级电子模拟所得结果与带次级电子的差别较大,偏差程度随光子能量的增加而变大,与建议值间差别程度也随光子能量的增加而变大.为验证模拟值的合理性,把模拟值与前研究者的成果进行了比较,二者符合得较好.与此同时,为便于计算单位光子注量与周围剂量当量间的转换系数,依据 EGS5 的模拟值给出了用于计算光子能量 20 keV ~ 10 MeV 的转换系数的拟合公式.

参考文献:

[1] Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. 3rd ed. New York:John Wiley and Sons, Inc,2000.

[2] JJG 393—2003 辐射防护用 X、g 辐射剂量当量(率)仪和监测仪检定规程[S]. 北京:中国计量出版

社,2004.

[3] IAEA. Safety Guide No. RS-G-1. 1 Occupational radiation protection[S]. Vienna, Austria:IAEA,1999.

[4] Hirayama H, Namito Y, Bielajew A F, et al. The EGS5 code system SLAC-Report-730[R]. 2005.

[5] ICRU. ICRU 51:Data for use in protection against external radiation [R]. Oxford:Pergamon Press,1987.

[6] ICRP. ICRP 60:1990 recommendations of the international commission on radiological protection [R]. Pergamon Press, Oxford,1991.

[7] 花正东. 光子注量到空气比释动能转换系数的 Monte-Carlo 模拟[J]. 原子能科学技术, 2010, 44 (6): 647-649.

[8] ICRP. ICRP 74:Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation [R]. Oxford: Pergamon Press,1996.

[9] Sato O, Yoshizawa N, Takagi S, et al. Calculation of effective dose and ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy photons[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1999, 36(11):977-987.

[10] Ferrari A, Pelliccioni M. On the conversion coefficients from fluence to ambient dose equivalent[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1994, 51(4):251-255.

[11] Kim J O, Kim J K. Dose equivalent per unit fluence near the surface of the ICRU phantom by including the secondary electron transport for photons[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1999, 83(3):211-219.