

# 介质尺寸对水中 $\gamma$ 射线吸收剂量累积因子的影响

李 华<sup>1,2</sup>, 赵 原<sup>2</sup>, 刘立业<sup>2</sup>, 肖运实<sup>2</sup>, 李君利<sup>1</sup>

(1. 清华大学 工程物理系, 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 高能辐射成像重点学科实验室, 北京 100084;

2. 中国辐射防护研究院 保健物理所, 剂量学室, 太原 030006)

**摘 要:** 目前所使用的累积因子是在无限大介质模型下计算得到的, 与现实模型差异较大。为了提高累积因子在实际计算中的精度, 基于 Monte Carlo 方法和圆柱模型对水中的  $\gamma$  射线吸收剂量累积因子随介质尺寸的变化进行了研究。结果显示: 水中的累积因子值会随着圆柱半径的变大而先增大, 后趋于稳定。其在趋于稳定值时对应的圆柱半径数值与能量和介质厚度无关, 仅与点源和测量点到介质表面的距离有关。在累积因子达到稳定值之前, 其大小随圆柱半径的变化较大, 在一定自由程数范围内符合线性变化规律, 并且随着介质厚度的增大, 符合线性规律对应的自由程数范围也会增大。该研究可为使用点核积分方法进行屏蔽设计时分析计算误差提供参考。

**关键词:** 辐射防护; 累积因子; 介质尺寸; 影响因素

中图分类号: TL72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2017)05-0525-05

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.032

## Effect of medium size on the $\gamma$ -ray buildup factor for energy absorption in water

LI Hua<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuan<sup>2</sup>, LIU Liye<sup>2</sup>, XIAO Yunshi<sup>2</sup>, LI Junli<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of High Energy Radiation Imaging Fundamental Science, Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Radiation Dosimetry Laboratory, Department of Health Physics, China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:**  $\gamma$ -Ray buildup factors calculated using an infinite medium model can differ greatly for actual finite models. The precision of the buildup factors used in the actual calculations is improved using Monte Carlo simulations to study the variation of the energy absorption buildup factors as a function of the medium size for water using a cylindrical model. The results show that as the cylinder radius increases, the buildup factors in water first increase up to a maximum. The corresponding radius values for the maximum buildup factors are not influenced by the  $\gamma$ -ray energy or the medium thickness, but are only related to the distance from the point source to the measured point on the medium surface. The differences between the buildup factors as the cylinder radius increases are larger

than for the maximums, and the variation is linear for some mean free paths. As the medium thickness increases, the corresponding range of the mean free paths where the variation is linear also increases. This work provides a reference for analyzing calculational errors in shielding designs.

**Key words:** radiation protection; buildup factor; medium size; influence factors

累积因子是描述散射光子的物理量, 它是指在所考察点处, 某一辐射量的真实值与初级射线直接造成的同一辐射量的比值。常用的累积因子有照射量累积因子和吸收剂量累积因子<sup>[1-2]</sup>。累积因子的大小取决于  $\gamma$  源和屏蔽条件, 如光子能量、介质的原子序数及厚度、介质组合、源和介质的形状大小等<sup>[3]</sup>。在屏蔽设计中, 累积因子十分重要。准确的累积因子数值不仅可以确保设计的安全, 还能节约屏蔽所用的材料, 满足辐射防护的最优化要求<sup>[4]</sup>。

目前, 点核积分方法中所使用的累积因子数据均是在无限大介质模型下计算而来的, 比较权威的数据是来自美国标准 ANSI/ANS-6.4.3-1991<sup>[5]</sup>, 该标准给出了不同材料在无限大介质模型下的吸收剂量和照射量累积因子。国外对累积因子的相关工作开展比较多, 主要是进行新材料累积因子的计算或多层材料下的累积因子计算<sup>[6-9]</sup>, 对累积因子的影响因素研究开展较少。在实际应用时, 文<sup>[5]</sup>标准给出的累积因子数据与现实情况存在较大出入, 这使得计算结果往往偏于保守。现实问题中的累积因子与文<sup>[5]</sup>标准给出的数据最主要差别之一在于, 现实中的介质都具有一定的体积大小, 与假设的无限大介质不同。对于较大尺寸介质可以认

收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11305146, 11275174)

作者简介: 李华(1989—), 男, 博士研究生。

通信作者: 李君利, 教授, E-mail: lijunli@tsinghua.edu.cn

为它接近无限大介质, 此时使用无限大介质下的累积因子所引入的计算误差较小; 而对于较小尺寸介质, 若仍使用文[5]标准给出的无限大介质下的累积因子值, 则会引入较大的误差。这在一定程度上制约了累积因子的使用。

MCNP (Monte Carlo N particle transport code) 是由美国洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 国家实验室开发的一种大型的关于中子、光子和电子输运的 Monte Carlo 程序, 广泛应用于核物理领域的计算中<sup>[10]</sup>。本文以介质水为例, 使用 MCNP 软件重点开展了水中  $\gamma$  射线吸收剂量累积因子随介质尺寸变化的研究工作, 并考察了不同尺寸近似无限大所引入的误差大小, 旨在为实际剂量计算提供一定的参考。

## 1 计算方法

在实际计算时, 除介质尺寸外, 源项到介质表面的距离以及测量点到介质表面的距离等也会对累积因子产生较大的影响。因此, 累积因子的计算相当于一个多元函数。为了研究介质尺寸的影响, 需要合理假设及简化模型。

在研究介质尺寸对累积因子的影响时, 采用如图 1 所示的计算模型, 考虑介质的形状为圆柱体, 点源和测量点均在真空中, 且处于圆柱体的中心轴线上, 点源距离介质足够远。为了进一步简化模型, 计算时假设介质的外部空间为真空。当圆柱半径很大时, 该模型近似为无限大平板模型。

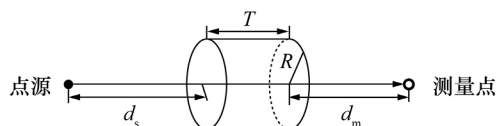


图 1 介质尺寸对累积因子影响的计算模型

之所以选择圆柱体而非长方体作为计算模型, 是因为除了介质厚度  $T$  外, 圆柱体只含有一个参数, 即半径  $R$ , 而且圆柱面对于在中心轴线上的点源, 各方向均匀。即便如此, 在该计算模型中, 能够影响累积因子的因素仍然较多, 有介质厚度  $T$ 、光子能量  $E$ 、半径  $R$ 、点源位置离介质表面的距离  $d_s$  及测量点位置离介质表面的距离  $d_m$ 。为了研究介质尺寸对累积因子的影响, 首先固定圆柱的厚度  $T$  和光子的能量  $E$ , 改变半径  $R$ , 建立  $R$  对累积因子的影响曲线。然而, 点源与测量点的位置同样也会对计算结果有影响, 但随着测量点位置到介质表面的距离的增大, 累积因子值会趋于稳定。故在模

拟计算时, 暂取测量点到圆柱表面的距离  $d_m$  为  $16\lambda$ 。 $\lambda$  是光子在水中的平均自由程, 它与能量有关。本文在计算过程中,  $R$  的取值为

$$R = n\lambda. \quad (1)$$

其中,  $n$  取 0.5、0.75、1.0、1.5、2、4、8、16 及 64。点源到圆柱表面的距离  $d_s$  取值为

$$d_s = m\lambda. \quad (2)$$

其中,  $m$  取 0.5、1、2、3、4、8、16、32、64、128 及 1000。

利用 MCNP 模拟计算时, 采用 F5 计数卡统计测量点处的粒子注量<sup>[11-12]</sup>, 同时引入注量-吸收剂量转换系数, 将计算结果进行转换, 从而求出该点处的吸收剂量累积因子值<sup>[13]</sup>。本文采用的注量-吸收剂量转换系数是由介质的质量能量吸收系数计算得到的, 而质量能量吸收系数取自于美国国家标准和技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 的数据。

## 2 计算结果与讨论

本文使用 MCNP 计算了不同能量和不同自由程下水中的吸收剂量累积因子随圆柱半径  $R$  的变化情况, 同时考虑了点源到介质表面的距离  $d_s$  和测量点到介质表面的距离  $d_m$  对累积因子的影响。通过对累积因子的计算数据进行细致的分析, 得到了以下几点结果:

1) 对于不同的能量  $E$  和介质厚度  $T$ , 水中的吸收剂量累积因子值随着半径  $R$  的变化规律相似, 即累积因子值都会随着半径  $R$  的增大而先增大, 后趋于稳定值, 如图 2 和 3 所示。为了清楚显示变化规律, 图 2 和 3 中的横坐标均采用的是对数刻度。

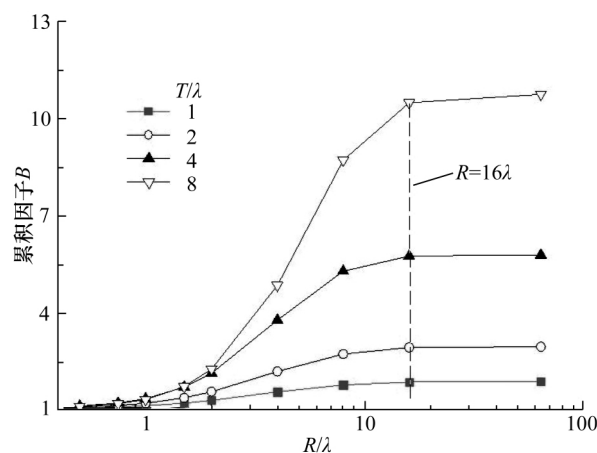


图 2 不同厚度下累积因子随半径  $R$  的变化  
( $d_s = 4\lambda$ ,  $E = 0.6 \text{ MeV}$ )

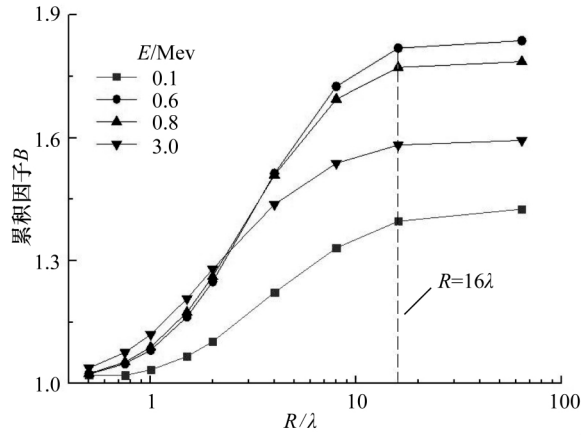


图3 不同能量下累积因子随半径  $R$  的变化  
( $d_s = 4\lambda$ ,  $T = 1\lambda$ )

同时,累积因子开始趋于稳定值时所对应的  $R$  值与  $\gamma$  光子能量  $E$  和介质厚度  $T$  几乎无关。这是因为随着半径  $R$  的增大,各向同性点源发出的  $\gamma$  光子经过介质后发生散射的程度也会随着增大,当介质尺寸增大到一定程度后,散射光子的数量逐渐趋于饱和,此时介质可近似认为无限大。

2) 累积因子开始趋于稳定值时所对应的  $R$  (记为  $R_w$ ) 与  $d_s$  密切相关。分析水中累积因子的计算结果表明:一般来说,当  $d_s \leq 4\lambda$  时,  $R_w = 16\lambda$ ,即当介质尺寸大于或等于  $16\lambda$  时可认为介质近似无限大,如图 4a 所示。同时,这里给出  $\gamma$  光子能量  $E$  为  $0.6 \text{ MeV}$  和介质厚度  $T$  为  $1\lambda$  下,  $R = 16\lambda$  与  $R = 1000\lambda$  时水中累积因子数值之间的差异如表 1 所示,最大偏差不到 1%;当  $4\lambda < d_s \leq 32\lambda$  时,  $R_w = 32\lambda$ ,如图 4b 和表 2 所示;当  $d_s > 32\lambda$  时,  $R_w = 64\lambda$ ,如图 4c 和表 3 所示。为了清楚显示变化规律,图 4 中的横坐标均采用的是对数刻度。本文中将  $R = 1000\lambda$  时的介质尺寸当作为无穷大的情况,表 1—3 中给出的偏差为将  $R_w$  近似为无穷大时所引入的误差。同时,  $d_s = 1000\lambda$  时可认为点源位置近似无穷远,即此时点源可近似为平行束源。

表 1 将  $R_w = 16\lambda$  近似为无限大所引起的偏差  
( $E = 0.6 \text{ MeV}$ ,  $T = 1\lambda$ )

$d_s/\lambda$	累积因子 $B$		相对偏差/%
	$R_w = 16\lambda$	$R = 1000\lambda$	
0.5	1.902	1.903	0.06
1	1.883	1.886	0.14
2	1.857	1.863	0.36
3	1.836	1.848	0.65
4	1.819	1.837	0.98

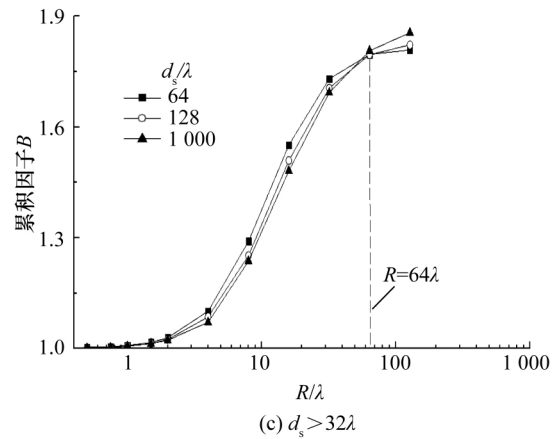
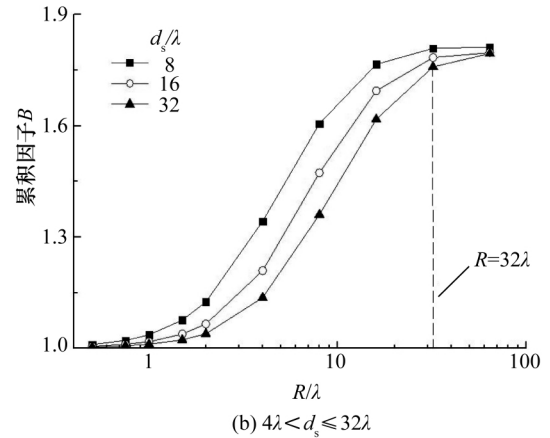
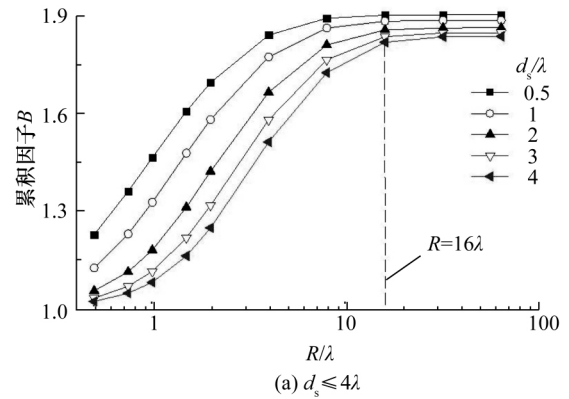


图 4 厚度为  $1\lambda$  时不同  $d_s$  下  
累积因子随半径  $R$  的变化

表 2 将  $R_w = 32\lambda$  近似为无限大所引起的偏差  
( $E = 0.6 \text{ MeV}$ ,  $T = 1\lambda$ )

$d_s/\lambda$	累积因子 $B$		相对偏差/%
	$R_w = 32\lambda$	$R = 1000\lambda$	
8	1.809	1.813	0.22
16	1.784	1.798	0.78
32	1.759	1.798	2.19

表3 将  $R_w=64\lambda$  近似为无限大所引起的偏差  
( $E=0.6\text{ MeV}$ ,  $T=1\lambda$ )

$d_s/\lambda$	累积因子 $B$		相对偏差/%
	$R_w=64\lambda$	$R=1\ 000\lambda$	
64	1.796	1.809	0.73
128	1.795	1.827	1.70
1 000	1.806	1.884	4.12

同时,  $R_w$  值还与  $d_m$  值有关, 一般  $d_m$  值越小, 累积因子值越早趋于稳定值, 即  $R_w$  值也越小, 如图5所示, 图5中横坐标采用的是对数刻度。考虑到现实因素,  $d_m$  取  $16\lambda$  较为实用。

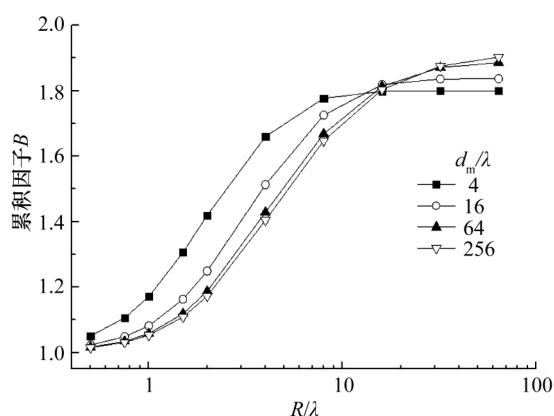
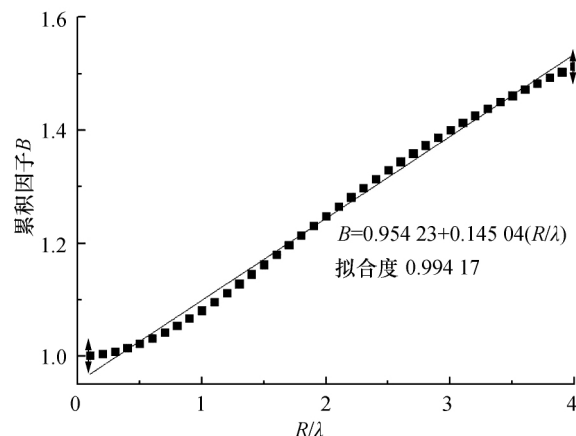
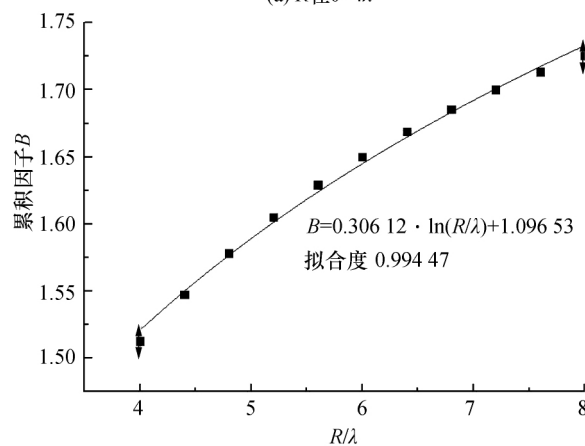


图5 不同  $d_m$  值对累积因子的影响  
( $E=0.6\text{ MeV}$ ,  $d_s=4\lambda$ ,  $T=1\lambda$ )

3) 从图2和3中还可以看出, 水中累积因子随半径  $R$  的变化快慢程度与  $\gamma$  光子能量  $E$ 、介质厚度  $T$  及  $d_s$  值均相关, 因此很难统一地建立累积因子在趋于稳定值之前随半径  $R$  的定量变化规律。这里仅给出  $\gamma$  光子能量为  $0.6\text{ MeV}$ 、介质厚度  $T=1\lambda$  及  $d_s=4\lambda$  时, 水中吸收剂量累积因子值随半径  $R$  变化的定量拟合曲线, 以供参考。考虑到计算的实用性, 取  $R$  的变化范围为  $0\sim 8\lambda$ , 如图6所示。  $R$  在  $0\sim 4\lambda$  时, 线性拟合效果较好, 由拟合公式求出的累积因子数值与实际值之间的偏差不超过  $1\%$ ;  $R$  在  $4\lambda\sim 8\lambda$  时, 对数拟合效果较好。在实际计算中, 可根据具体条件建立累积因子与介质尺寸的定量关系, 得到更加符合实际的累积因子  $B$ 。此外, 通过比较发现, 介质厚度  $T$  越厚, 符合线性关系对应的  $R$  范围也越大。图7给出的是能量为  $0.6\text{ MeV}$ 、厚度为  $8\lambda$  及  $d_s$  为  $4\lambda$  时, 累积因子随  $R$  变化的拟合曲线,  $R$  在  $0\sim 8\lambda$  内, 均较符合线性关系。



(a)  $R$  在  $0\sim 4\lambda$



(b)  $R$  在  $4\lambda\sim 8\lambda$

图6 累积因子随半径  $R$  变化的拟合曲线  
( $E=0.6\text{ MeV}$ ,  $d_s=4\lambda$ ,  $T=1\lambda$ )

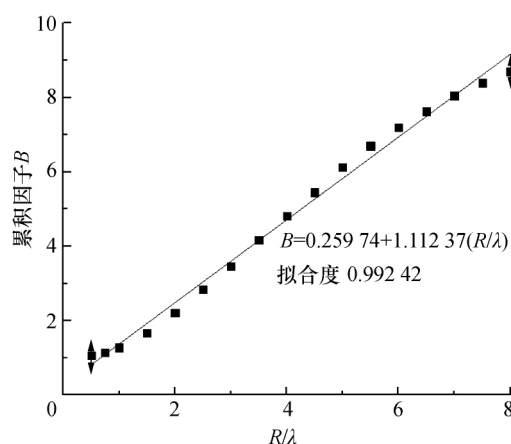


图7 介质厚度为  $8\lambda$  时累积因子随半径  $R$  变化的拟合曲线( $E=0.6\text{ MeV}$ ,  $d_s=4\lambda$ ,  $T=8\lambda$ )

从图6和7可以看出, 在介质还未接近无限大时, 水中  $\gamma$  射线的吸收剂量累积因子随介质尺寸的变化较大。介质尺寸较小且厚度较厚时的累积因子甚至要比相同条件下无限大平板介质下的累积因子小几倍。若现实计算时忽略介质尺寸对累积因子的

影响,将会引入很大的误差。

通过以上研究和结论,可以在实际使用累积因子计算时,估算出介质尺寸带来的误差,同时在具体条件下建立的定量曲线可以计算出更加符合实际的累积因子。

### 3 结 论

通过 MCNP 软件和圆柱模型对水中 $\gamma$ 射线的吸收剂量累积因子随介质尺寸的变化进行了研究,初步得到了累积因子随介质尺寸的变化规律如下:水中的吸收剂量累积因子会随着介质尺寸的增大而先变大,后趋于稳定值,且在累积因子开始趋于稳定值时所对应的介质尺寸与 $\gamma$ 光子的能量和介质厚度无关,仅与点源和测量点到介质表面的距离有关。同时,在累积因子未到达稳定值前,其数值随介质尺寸的变化有较大变化,介质较厚时,这种变化甚至会有好几倍,在一定尺寸范围内,该变化符合线性规律,且随着介质厚度的增大,符合线性变化规律对应的尺寸范围也会增大。

今后将继续对累积因子的其他影响因素展开研究,如多层介质、形状等,以进一步提高累积因子的可靠性,为屏蔽设计中的误差分析提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.  
LI Xinghong. Radiation Protection Foundation [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982. (in Chinese)
- [2] 中国科学院工程力学研究所.  $\gamma$ 射线屏蔽参考手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1976.  
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Gamma-Ray Shielding Reference Manual [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1976. (in Chinese)
- [3] 刘立坡, 刘义保, 王娟. 累积因子影响因素的蒙特卡罗模拟[J]. 辐射防护, 2008, 28(2): 108-111.  
LIU Lipo, LIU Yibao, WANG Juan. Monte Carlo simulation of corrected value of buildup factor [J]. *Radiation Protection*, 2008, 28(2): 108-111. (in Chinese)
- [4] 张雷, 赵兵, 王学新. 蒙特卡罗程序 EGS4 在 $\gamma$ 照射量累积因子计算中的应用[J]. 辐射防护, 2011, 31(2): 88-93.  
ZHANG Lei, ZHAO Bing, WANG Xuexin. Application of Monte Carlo code EGS4 to calculate gamma exposure buildup factors [J]. *Radiation Protection*, 2011, 31(2): 88-93. (in Chinese)
- [5] ANSI/ANS-6.4.3-1991. American National Standard for Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials [S]. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, 1991.
- [6] Singh V P, Badiger N M. Comprehensive study on energy absorption buildup factors and exposure buildup factors for photon energy 0.015 to 15 MeV up to 40 mfp penetration depth for gel dosimeters [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, 103: 234-242.
- [7] Singh V P, Badiger N M. Energy absorption buildup factors, exposure buildup factors and Kerma for optically stimulated luminescence materials and their tissue equivalence for radiation dosimetry [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, 104: 61-67.
- [8] Sharaf J M, Saleh H. Gamma-ray energy buildup factor calculations and shielding effects of some Jordanian building structures [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, 110: 87-95.
- [9] Alkhatib S F, Park C J, Jeong H Y, et al. Layer-splitting technique for testing the recursive scheme for multilayer shields gamma ray buildup factors [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 88: 24-29.
- [10] Briesmeister J F. MCNPTM: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code [M]. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 2010.
- [11] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用 [M]. 北京: 原子能出版社, 2006.  
XU Shuyan. Application of Monte Carlo Method in Nuclear Physics Experiment [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.  
PEI Lucheng, ZHANG Xiaozhe. Monte Carlo Method and Its Application in Particle Transport [M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [13] Luis D. Update to ANSI/ANS-6.4.3-1991 for Low-Z and Compound Materials and Review of Particle Transport Theory [D]. Las Vegas, NV: University of Nevada-Las Vegas, 2009.