

• 剂量学基础 •

不同计算模型对水中 γ 射线吸收剂量 累积因子的影响

赵 原 李 华 刘立业 肖运实 熊万春 卫晓峰

(中国辐射防护研究院 太原 030006)

摘 要: 为了开展不同计算模型对累积因子的影响研究,本文基于蒙特卡罗程序 Geant4,分别使用无限大介质模型及无限大平板模型对水中的吸收剂量累积因子进行了计算,比较分析了不同计算模型下累积因子数据之间的差异,最终建立了水中无限大平板模型下累积因子与无限大介质模型下的累积因子之间的定量关系。该关系不受光子能量和自由程数的影响,可通过较少的参数和无限大介质下的累积因子值计算出无限大平板下的累积因子,能有效地减少累积因子在实际使用时由于模型不同而引起的误差,提高了累积因子的实用性。本文工作可为其他介质材料的相关研究提供参考。

关键词: 累积因子; 平板模型; 无限大介质

中图分类号: TL72

文献标识码: A

近年来,为了进一步提高核设施现场的辐射防护最优化水平,提高作业效率,以及降低工作人员的剂量,美国、法国、比利时等国家相继开展了作业现场三维剂量模拟与评估系统研究^[1-3],考虑到现场源项及屏蔽体的变化,需要对变化空间下的辐射场进行快速计算,上述系统所使用的核心算法是点核积分方法。剂量场的点核积分计算值的误差大小受累积因子值的准确性的影响。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,不同的物理量具有不同的累积因子,常用的累积因子有照射量累积因子和吸收剂量累积因子。

目前国内外的点核积分程序采用的累积因子数值均是在无限大介质模型下计算而来的,而在实际问题中的计算模型往往与无限大介质模型相差较大,这也是导致累积因子偏于保守的原因之一。除了无限大介质模型外,无限大平板模型在屏蔽设计与辐射场计算时应用也较为广泛,不同的模型会对累积因子影响较大,在计算时如果忽

略介质模型的影响,而直接采用无限大介质模型下的累积因子数据,会给计算结果引入较大误差,使其过于保守。在以往的屏蔽设计与计算中,为了保证核设施工作人员的辐射安全,偏于保守的设计是合理的^[4],而目前在计算辐射场时,虽然偏于保守的计算同样有利于安全,但对准确性的要求明显更强一些,并且累积因子数值的准确性越高,越有利于节约屏蔽设计的成本。因此,很有必要开展不同计算模型对累积因子数值的影响研究,扩展累积因子的实用性。

中国辐射防护研究院曾开展了无限大介质模型的吸收剂量累积因子计算方法研究,在研究中采用了较新的截面数据库和材料的质量能量衰减系数库^[5]。本文基于 Geant4,利用无限大介质模型和无限大平板模型分别对水中的吸收剂量累积因子数值进行了计算,并对计算结果之间的差异进行了分析,同时建立了它们数值之间的定量关系,提高了累积因子在实际计算中的实用性。Geant4 是由欧洲核子研究组织 CERN 等实验室联合开发的一种大型的关于中子、光子和电子运

收稿日期: 2018-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 11305146、11275174)。

作者简介: 赵原(1987—),男,2009年本科毕业于清华大学核工程与核技术专业,2012年硕士毕业于中国辐射防护研究院辐射防护及环境保护专业,助理研究员。E-mail: zhaoyuan881@163.com

通讯作者: 刘立业。E-mail: liuliye@cirp.org.cn

• 274 •

的蒙特卡罗开源程序包^[6], 广泛应用于核物理领域的计算中。计算时, 使用的版本为 Geant4_10_3, 采用了较新的截面数据库 G4EMLOW6.50, 线衰减系数和质量衰减系数使用 NIST (Standard Reference Database 126) 数据库, 物理过程考虑了韧致辐射和相干散射。

1 计算模型

常见的累积因子计算模型有无限大介质模型和无限大平板模型。目前较为权威的累积因子数据库是来自美国标准 ANSI/ANS-6.4.3—1991^[7], 该标准在计算累积因子时所使用的无限大介质模型。本文计算采用的无限大介质模型如图 1 所示, 介质为无限大, 点源和测量点均处于介质之中。由于点源的各向同性发射粒子, 在以点源为球心, 固定的自由程为半径的球面上, 累积因子的计算值均相同, 因此可以采用面探测来进行数据统计。

但是值得注意的是利用无限大介质模型计算得到的累积因子值, 在大多数情况下是偏保守的, 通常现实中的介质尺寸并不是无限大的, 并且测

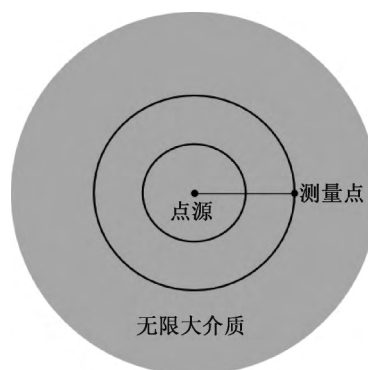


图 1 无限大介质模型

Fig.1 The infinite medium model

量点都处于屏蔽层外(空气中), 受到来自测量点后方的反散射影响较小, 可以忽略。

无限大平板模型是屏蔽设计中的典型模型, 主要用来分析屏蔽体对源项的屏蔽效果。与无限大介质模型相比, 其最大的区别是点源和测量点均在屏蔽体的外部。为了分析点源在介质内与介质外之间的区别, 本文将无限大平板模型分为两种, 如图 2 所示, 其中 a 模型的点源紧贴屏蔽层一侧, b 模型的点源在屏蔽层中心。

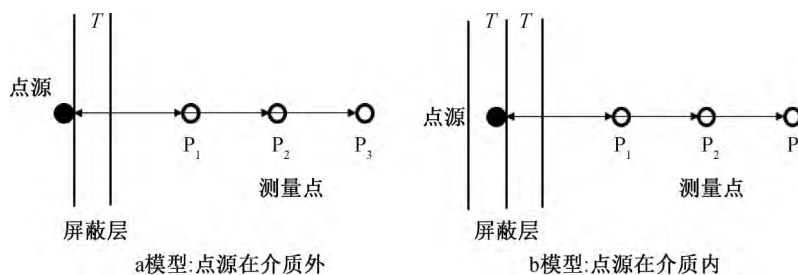


图 2 无限大平板模型的两种情况

Fig.2 Two cases of the infinite plate model

基于上述不同的计算模型, 本文利用蒙特卡罗软件对介质水中的吸收剂量累积因子进行了计算, 对两个模型之间的区别与联系进行了分析研究。

2 计算结果与分析

2.1 无限大介质模型

利用 Geant4 模拟计算时, 统计各个探测球面的粒子注量, 同时引入注量-吸收剂量转换系数, 将计算结果转换为吸收剂量, 从而计算出相应的

累积因子值。参考美国标准 ANSI/ANS-6.4.3—1991^[7], 考虑的能量范围为 0.015 MeV ~ 15 MeV, 自由程数(MFP) 范围为 0.5 ~ 10。将本文的计算结果与美国标准 ANSI/ANS-6.4.3—1991 给出的数据进行比较, 如图 3 所示, 为了更清楚地显示累积因子的变化趋势, 图中横坐标和纵坐标采用对数刻度。由图 3 中可以看出, γ 光子能量在 0.05 ~ 0.5 MeV 区间内水中的吸收剂量累积因子数值较大, 峰值也出现在该能量区间, 说明在介质水中该能量区间下 γ 光子的康普顿散射较为明显。利用

Geant4 计算出的水中吸收剂量累积因子值与标准 ANSI/ANS-6.4.3—1991 给出的值差异不是太大, 平均偏差为-2.3%, 偏差的标准差为 4.8%。

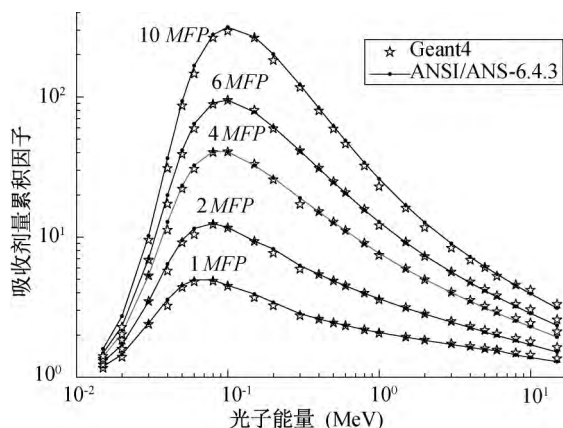


图 3 水中吸收剂量累积因子的
计算值与标准值的对比

Fig.3 Comparison between the calculated values
and the standard values of energy absorption
buildup factors in water

2.2 无限大平板模型

计算水中累积因子时选取了 0.5、0.6、0.8 及 1.0 MeV 4 个能量, 自由程数选取了 0.5~10。对于平板模型, 点源与测量点的位置都会对累积因子的计算结果产生影响。为了方便计算, 设屏蔽体以外的空间为真空, 图 2 中的 a 模型中点源紧靠屏蔽体一侧, 多个测量点的位置按照 $r = nT$ 布置, 其中 r 是点源与测量点之间的距离, T 为屏蔽体的厚度 n 取 1、1.5、2、4、8、16、64 和 256。这样的取值主要是基于研究同一介质厚度下, 测量点的位置不同而引起的累积因子的变化规律。

利用 Geant4 模拟计算时, 对于平板模型, 使用点探测器统计不同距离测点处的粒子注量, 采用注量-吸收剂量之间的转换系数, 将计算的粒子注量转化为吸收剂量。为了便于比较分析, 本文将图 2 所示的 a 模型计算出的累积因子记为 B_1 , 将 b 模型计算出的累积因子记为 B_2 , 同时将无限大介质模型的计算结果记为 B_0 。图 4~图 7 给出了不同能量下比值 B_1/B_0 和比值 B_2/B_0 随测量点位置的变化规律。

由图 4 和图 5 可以看出, 所有的 B_1/B_0 值均小于 1, 这意味着平板 a 模型的计算结果要比球型模型的结果小。原因主要有两个方面, 一是源的

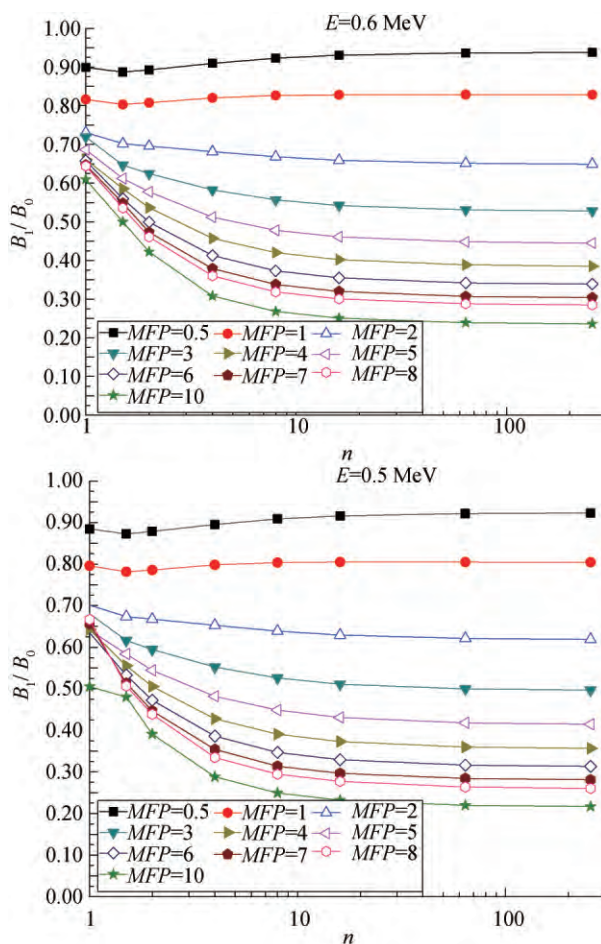


图 4 水中能量为 0.5 MeV 和 0.6 MeV 时 B_1/B_0
随测量点位置的变化规律

Fig.4 The values of B_1/B_0 as the positions of
measuring points changed when the energies
are 0.5 MeV and 0.6 MeV in water

散射, 无限大介质模型中的点源处于介质内, 在与入射方向相反的方向上产生的次级粒子, 仍有可能由于散射而到达测量点处, 而平板 a 模型则不存在这种情况; 二是测量点处的散射, 无限大介质模型中的测量点也在介质内, 来自测量点后方的散射粒子仍有可能到达测量点处, 而平板 a 模型则不存在该情况。

图 6~图 7 给出了不同能量下比值 B_2/B_0 随测量点位置的变化规律。由图 6 和图 7 可以看出, 大多数 B_2/B_0 值小于 1, 且 B_2/B_0 值均比 B_1/B_0 值大; 这是因为平板 b 模型受来自点源两侧屏蔽散射光子的影响, 而且当屏蔽体较薄时, b 模型的反散射屏蔽体比相对应的球状反散射屏蔽体体积大, 此时 B_2/B_0 略大于 1。

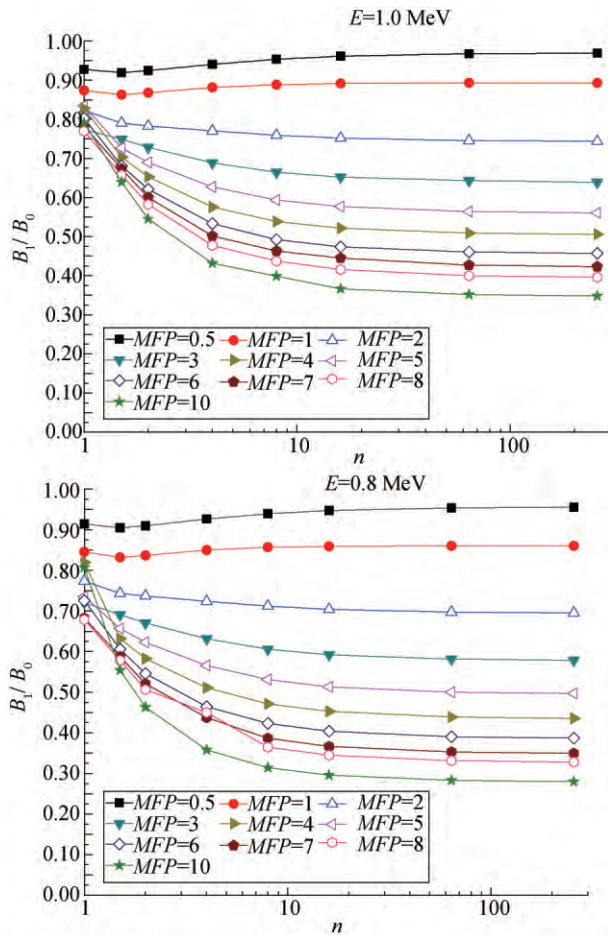


图5 水中能量为 0.8 MeV 和 1.0 MeV 时 B_1/B_0 随测量点位置的变化规律

Fig.5 The values of B_1/B_0 as the positions of measuring points changed when the energies are 0.8 MeV and 1.0 MeV in water

由图 4~图 7 可以看出: (1) 当 $MFP \leq 1$ 时, 随着点源与测量点的距离 r 的增大, B_1/B_0 与 B_2/B_0 的值, 均先增大, 后趋近于某一稳定值; 当 $MFP \geq 2$ 时, B_1/B_0 与 B_2/B_0 的值, 均先减小, 后趋近于稳定值。 B_1/B_0 与 B_2/B_0 的值均在 $r > 4T$ 时趋于稳定, 记稳定值分别为 B_1^*/B_0 和 B_2^*/B_0 。(2) 结合图 3 可以看出, 随着 MFP 的增大, B_0 增大, 同时 B_1/B_0 与 B_2/B_0 的值均变小, 而且, 随着 MFP 的增大, B_1/B_0 与 B_2/B_0 的值越小于 1, 即 B_1 和 B_2 与 B_0 之间的偏差变大, 有的甚至在 50% 以上。

根据水中 4 种能量下不同 MFP 对应的 B_1^*/B_0 和 B_2^*/B_0 的数据(各 40 个)作拟合曲线, 其中 B_1^*/B_0 和 B_2^*/B_0 是取 $n = 16$ 时所对应的值, 如图

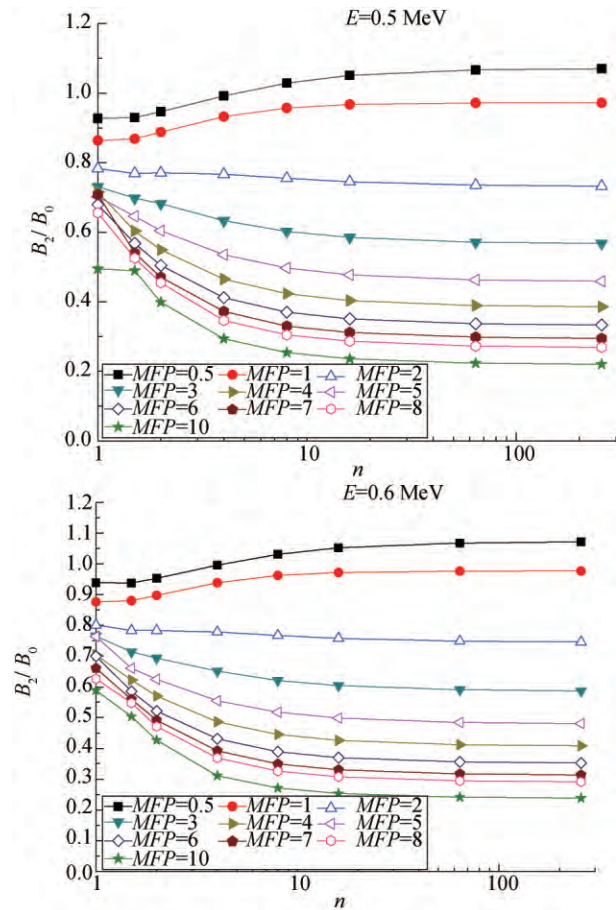


图6 水中能量为 0.6 MeV 时 B_2/B_0 随测量点位置的变化规律

Fig.6 The values of B_2/B_0 as the positions of measuring points changed when the energy is 0.6 MeV in water

8 和图 9 所示。发现 B_1^* 和 B_2^* 与 B_0 呈幂指数关系。值得说明的是, B_1^*/B_0 和 B_2^*/B_0 是图 2 中两种屏蔽模型在较远的测量点处的累积因子与图 1 中无限大介质模型的累积因子的比值, 该值在做曲线时已包含了所有光子能量和屏蔽体 MFP (或厚度 T) 不再有关。那么该曲线就建立了从 B_0 到 B_1^* 和 B_2^* 的转换关系, 在将来进行点核积分计算时, 可不再需要重新计算无限大平板模型下对应的累积因子数据库, 仍可使用无限大介质模型下的累积因子数据库, 经修正后, 可以使累积因子更贴近实际屏蔽情况, 从而降低使用无限大模型的累积因子而引入的偏差。

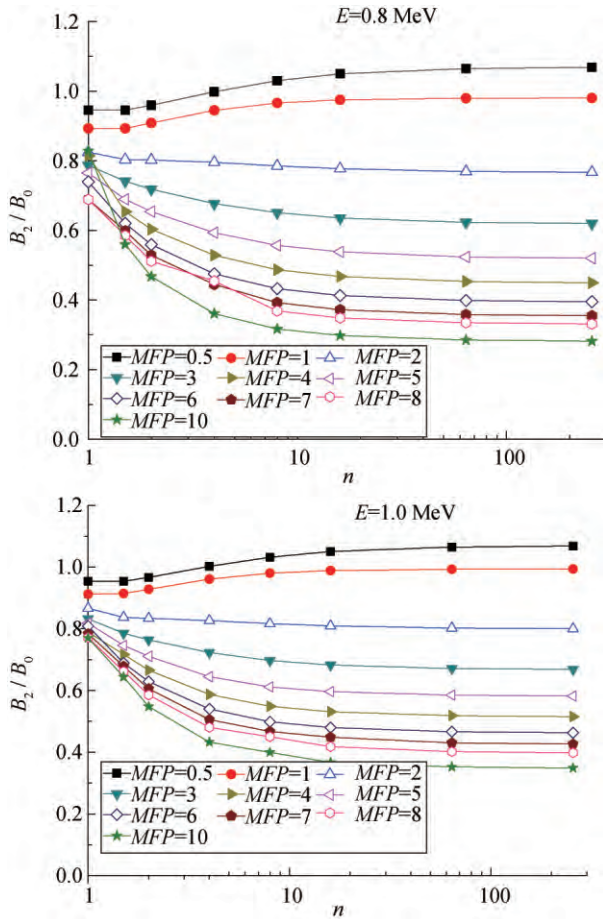


图 7 水中能量为 1.0 MeV 时 B_2/B_0 随测量点位置的变化规律

Fig.7 The values of B_2/B_0 as the positions of measuring points changed when the energy is 1.0 MeV in water

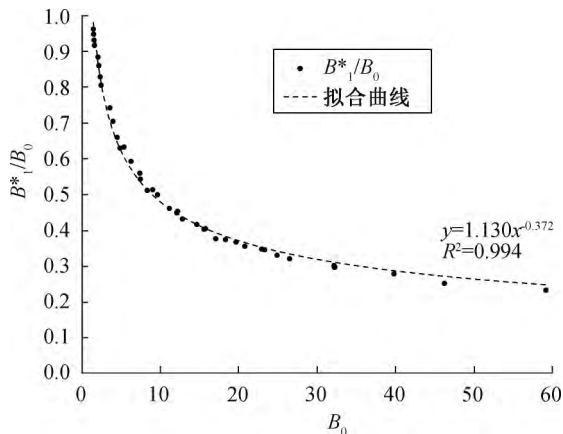


图 8 水中 4 种能量下 B_1^*/B_0 与 B_0 的关系曲线

Fig.8 The relationship curve between B_1^*/B_0 and B_0 under 4 kinds of γ -ray energy in water

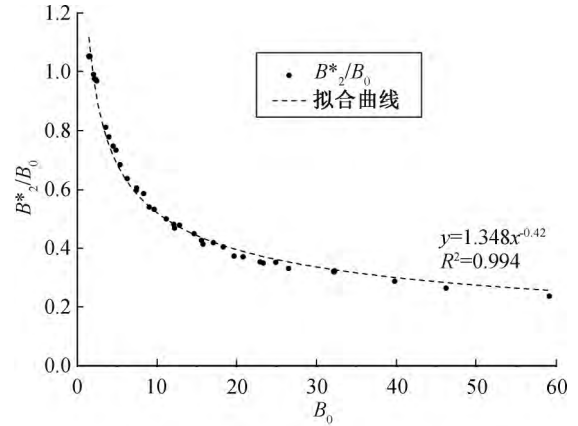


图 9 水中 4 种能量下 B_2^*/B_0 与 B_0 的关系曲线

Fig.9 The relationship curve between B_2^*/B_0 and B_0 under 4 kinds of γ -ray energy in water

3 结论

使用 Geant4 软件 and 不同计算模型计算了水中的吸收剂量累积因子,采用较新的截面数据库和材料的质量能量衰减系数库,考虑了韧致辐射和相干散射的影响,使得计算结果精确可靠。同时,比较了无限大介质模型和无限大平板模型下水中吸收剂量累积因子之间的差异,建立了这两种模型下累积因子之间的定量关系。研究发现不同屏蔽模型下的累积因子数值差异较大,有的甚至在 50% 以上,因此在使用点核积分方法计算时应针对不同的屏蔽模型选择恰当的累积因子参数。而通过建立不同模型下的累积因子之间的定量转换关系能够将最通用的无限大介质模型的累积因子数据库利用起来,一套数据满足不同屏蔽模型计算的需求,同时保证计算的精度。本研究可为其他介质材料或计算模型下累积因子的关系研究提供参考。

参考文献:

- [1] EPRI(Electric Power Resrarch Institute) . Exposure reduction through optimized planning and scheduling: guidance on incorporating ALARA concepts [R]. Final Report , December 2005.
- [2] Vermeersch F. ALARA pre - job studies using the VISIPLAN 3D ALARA planning tool [J]. Radiation Protection Dosimetry , 2005 , 115(1-4) : 294.
- [3] Istvan Szoke , Louka M N , Bryntesen T R , et al. Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments [J]. Journal of Radiological Protection , 2014 , 34: 389-416.
- [4] 中国科学院工程力学研究所. γ 射线屏蔽参数手册 [M]. 北京: 原子能出版社 ,1976: 98.
Institute of Engineering Mechanics , Chinese Academy of Sciences. Handbook of gamma-ray shielding parameters [M]. Beijing: Atomic Energy Press , 1976: 98.
- [5] 李华 ,赵原 ,刘立业 ,等. 基于 MCNP 对 γ 射线吸收剂量累积因子的计算与研究[J]. 辐射防护 , 2017 , 37(3) : 161-168.
LI Hua , ZHAO Yuan , LIU Liye , et al. Research on gamma ray buildup factor for energy absorption based on MCNP [J]. Radiation protection , 2017 , 37(3) : 161-168.
- [6] Asai J M. Geant4-A simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research , 2007 , 506 (3) : 250-303.
- [7] ANSI/ANS. Gamma-ray attenuation coefficients and buildup factors for engineering materials: ANSI/ANS-6. 4. 3—1991 [S]. American Nuclear Society , La Grange Park , 1991.

Effect of different models on gamma-ray buildup factor for energy absorption in water

ZHAO Yuan , LI Hua , LIU Liye , XIAO Yunshi , XIONG Wanchun , WEI Xiaofeng

(China Institute for Radiation Protection , Taiyuan 030006)

Abstract: Using the Monte Carlo simulation code Geant4 , Energy absorption buildup factors in water under the infinite medium model and the infinite slab model were both calculated. The results of the two different kinds of buildup factors were compared and analyzed , and the quantitative relationship between them was established. The relationship is not influenced by the photon energy and mean free path (*MFP*) , and the buildup factors under the infinite plate model can be calculated by using the corresponding values under the infinite medium model through a few parameters , which can effectively reduce the errors caused by the different models in the actual calculation and improve the practicability of the buildup factors. The work in this paper can provide reference for the related research in other materials.

Key words: buildup factor; slab model; infinite medium