

放疗过程中金属植入物入射面处剂量扰动影响因素的研究

韩卫^{1,2}, 赖万昌¹, 汤晓斌², 耿长冉², 李长楷¹, 朱峰¹ (1.成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610000; 2.南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏 南京 210016)

摘要:目的: 放射治疗过程中金属植入物会对体内剂量分布造成影响, 这种影响主要表现为散射电子背向散射造成的金属植入物入射面处剂量增强和由于金属植入物阻挡造成的出射面处剂量衰减。本文主要研究金属植入物入射面处剂量增强的影响因素及作用规律。方法: 利用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 建立内部含有金属块的水箱模型, 通过改变金属植入物材质、厚度、宽度、在水箱中的深度、测量点距金属表面距离以及入射光子能量、照射面积等因素参数, 研究以上因素对背散射因子的影响规律, 并根据射线与物质相互作用原理进行物理分析。结果: 通过模拟计算得到背散射因子与以上影响因素的关系。结论: (1) 背散射因子对金属植入物的材质、厚度、测量点距金属表面的距离以及入射线束的能量等因素变化较敏感, 而对金属植入物在水箱中的深度、宽度以及照射面积等因素的变化不太敏感。(2) 研究结果与前人实验结果相近, 证明 MCNP 程序能够很好地用于研究金属植入物入射面处的剂量扰动问题。

关键词: 放射治疗; 金属植入物; 背散射因子; MCNP

DOI 编码: doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2013.05.008

中图分类号: R730.55

文献标识码: A

文章编号: 1005-202X(2013)05-4373-05

Study of Dose Perturbation Factors on the Incident Surface of Metal Implant During Radiotherapy

HAN Wei^{1,2}, LAI Wan-chang¹, TANG Xiao-bin², GENG Chang-ran², LI Chang-kai¹, ZHU Feng¹

(1.Nuclear Technology and Automation Engineering Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610000, China; 2.Nuclear Science and Engineering Department, NanJing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: Objective: Metal implants would affect the dose distribution in the body when radiotherapy, this effect is mainly characterized by dose enhancement at the incident surface of metal implants caused by backscattering of scattered electron and dose attenuation at the exit of surface due to the block of metal implant. This paper mainly studies the factors and effect laws of dose enhancement of implant metal on incident surface. **Methods:** First, using MCNP Monte Carlo particle transport program establish a model with a metal block inside a water-filled phantom, then do research on the effect laws of material, thickness, width, depth in the water phantom of the metal implant and distance of measuring point from metal surface, as well as the incident photon energy, exposure area and other factors to the backscattering factor, And make physics analysis basing on the principle of interaction between radiation and matter. **Results:** Obtain the relation of backscattering factor with the foregoing factors through simulation and calculation. **Conclusions:** (1) Backscattering factor is sensitive to factors such as material, thickness, distance of measuring point from metal surface, as well as energy of incident beam, while show insensitive to depth of metal implants in the water phantom, width and exposure area and so on. (2) Results in this paper are similar to the previous experimental results, indicating MCNP program can be perfectly applied to research the problem of dose perturbation on the incident surface of metal implant.

Key words: radiation therapy; metal implant; influence factors; MCNP

前言

对体内存在金属植入物的肿瘤患者进行放射治疗时, 金属植入物会对入射束造成散射, 在其周围引起剂量扰动效应。物理师在制定治疗计划时, 主要考虑了金属植入物对入射线束的衰减造成靶区剂量

收稿日期: 2013-05-16

作者简介: 韩卫(1987-), 男(汉族), 山东菏泽人, 成都理工大学在读研究生, 专业: 核能与核技术工程。E-mail: hanwei0219@163.com。

减少的影响,而往往忽略了金属植入物入射面处剂量增强的现象。国内外已有研究工作表明,金属植入物入射界面处的剂量增强效应客观存在,并且在原子序数高的金属植入物存在时更加明显。这种剂量增强效应会对周围正常的组织器官造成不必要的伤害,在放射治疗中这种现象是不可忽视的。因此,研究放疗过程中金属植入物入射面处剂量增强现象的影响因素也是十分必要的。

在以往的研究中,Asghar Mesbahi 等人用 MC-NP4C 程序建立内部含有金属块的水箱模型,测量入射线束方向水箱中的百分深度剂量(PDD)变化,结果表明在金属植入物入射面处有很明显的剂量增强现象^[1]。Hsiao -Hua Hsu 等通过实验同样发现了这种现象,并分析总结了入射光子能量和金属植入物材质对它的影响规律^[2]。J. Dutreix 等人研究了金属植入物的厚度对入射面处剂量增强效应的影响规律^[3]。Indra J. Das 等人较全面地研究了多种影响因素对金属植入物入射界面处剂量增强效应的作用规律,但采用的是平板电离室测量方法,无法精确地反映出入射面 10⁻¹ mm 级距离处的散射电子影响程度^[4]。国内方面,刘明等人用 6 MV X 射线分别照射体内植有不锈钢板和钛合金板的人体标本,使用热释光仪测量得到金属植入物入射面处的吸收剂量比不植入金属时增强 21.65% 和 15.46%^[5]。邓小武等人用 8 MV X 射线照射体内含有镍钛合金支架的体膜,通过薄窗电离室和热释光仪对镍钛合金支架前点进行测量,结果发现比单纯空腔情况下剂量增强 1.4%^[6]。倪昕晔等人通过蒙特卡罗方法模拟 6 MV X 射线照射水下 5 cm 处的不锈钢板,发现金属植入物入射面处剂量比不植入时增加 19.6%^[7]。

虽然前人已经做过很多相关研究,但他们只是考虑了其中一种或者两种影响因素,更为详实的研究工作有待开展。本文将通过蒙特卡罗方法,利用 MCNP 程序,研究除入射光子角度之外的包括金属植入物材质、厚度、宽度、在水箱中的深度、测量点距金属表面距离以及入射光子能量、照射面积等诸多因素对金属植入物在放疗过程中入射面处剂量增强效应的影响规律。

1 蒙特卡罗方法与 MCNP

蒙特卡罗方法,又称随机抽样方法。基本思想是根据所求问题,建立一个概率事件或者随机过程,使它的参数等于所求问题的解。通过试验的方法,得出该事件发生的频率,或者该随机变量若干个具体观察值的算术平均值,通过它得到问题的解^[8,9]。

本文使用蒙特卡罗程序是 MCNP 程序。MCNP 全名为 Monte Carlo Neutron and Photo Transport Code,它是由美国 Los Alamos 国家实验室应用理论物理部(X部)的 Monte Carlo 小组(X-6X 小组)经过

数十年的研究开发的一个基于蒙特卡罗方法的大型多功能 Monte Carlo 粒子输运程序。MCNP 是一个多功能的蒙特卡罗程序,可用于计算中子、光子、中子-光子耦合输运的问题,也可计算临界系统的特征值问题,可应用于:反应堆设计、核临界安全、辐射屏蔽和核防护^[10]、医学物理与放射性治疗^[11-13]、探测器的设计与分析、核测井、个人剂量与物理保健^[14,15]、加速器靶的设计、射线探伤等领域。

2 理论分析

2.1 引起剂量增强的粒子来源

当入射光子从高原子序数物质进入低原子序数物质时,在交界面的前面电子通量会减少,而当光子从低原子序数物质进入高原子序数物质时,在高原子序数物质的前面电子通量会增加^[16,17]。物质中能量的沉积和电子的通量成正比,所以体内植入高原子序数的金属材料时,在金属植入物的入射面处会产生大量的散射电子,引起明显的剂量增强效应。除了背散射电子,经金属植入物反射的光子也有可能对剂量扰动造成影响^[18]。因此引起剂量增强效应的粒子可以分为三类:(1)被金属植入物反射的光子、韧致辐射光子和特征 X 射线;(2)在水中产生并被金属植入物反射的次级电子;(3)在金属植入物中产生并被反射的次级电子^[4]。如图 1 所示,假设各类粒子的运动方向都平行于入射线束,粒子在交界面处的微观运动过程中背散射电子是造成金属植入物入射面处剂量扰动的主要原因^[19]。因此,背散射电子也是本文研究的重点。

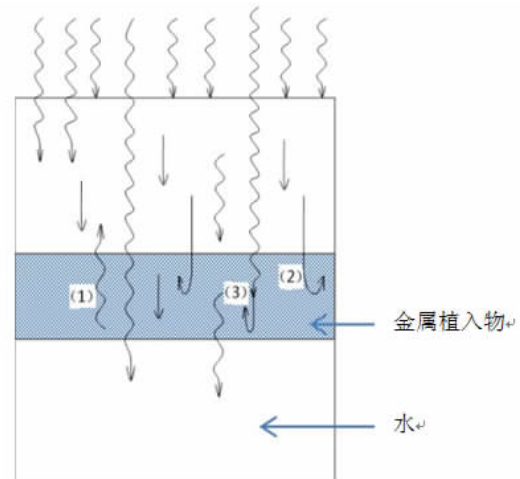


图 1 引起界面剂量增强的粒子作用示意图

Fig.1 A schematic representation of particles cause dose enhancement at interfaces

2.2 背散射因子定义

Das、Khan 等人使用平板电离室测量和理论分析的方法研究了入射光子在高原子序数物质界面的背向剂量增强效应,定义这一背向剂量增强系数为背散射因子(BSDF)^[4]。指出影响它的因素包括金属植入物

的材质、宽度、厚度、位置,入射线束的能量、照射面积、入射角度。根据定义,BSDF可由下式表示:

$$\text{BSDF}(E,A,w,d,t,x,Z,\Theta)=\frac{D_i}{D_1} \quad (1)$$

其中 D_i 、 D_1 分别是有无金属植入物时相同位置处的剂量值。 E 是入射线束的能量, A 是入射线束照射到水膜表面的面积, w 是金属植入物的宽度, t 是金属植入物的厚度, x 是测量点到金属植入物前表面的距离, d 是金属前表面到水膜的距离, Z 是金属植入物的原子序数, Θ 是入射光子的角度。

3 模型和方法

与人体组织器官相比,金属植入物属于原子序数较高的物质。入射线束从组织器官进入金属植入物的过程相当于射线束从低原子序数的物质进入高原子序数物质的过程。因此,本文将人体简化为水箱,金属植入物简化为金属方块,进而研究金属块的入射面处剂量增强效应的影响因素及作用规律。通过 MCNP 程序,建立如图 2 所示的模型。水箱的大小是 30 cm×30 cm×30 cm,金属块大小是 4 cm×4 cm×2 cm,计数单元选用半径为 1 cm、厚度为 0.2 cm 的圆柱体。采用点源照射,源与水箱表面的距离(SSD)为 100 cm。

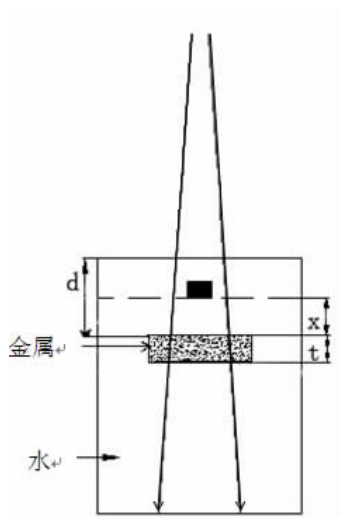


图 2 建立的含有金属块的水箱模型

Fig.2 A water-filled phantom model contain a metal block

本文主要研究金属植入物材质、厚度、宽度、在水箱中的深度、测量点距金属表面距离以及入射光子的能量、照射面积等因素对 BSDF 的影响规律。分别测量水箱中有无金属块时同一位置处的剂量,利用公式(1)计算出背散射因子。

在研究金属材质对 BSDF 的影响规律时,选用铝、铁、钛、锶、银、铂、铅等六种金属单质。在 MCNP 程序里通过改变物质卡(Mn)的内容实现水箱中放置不同材质的金属植入物。在研究入射光子的能量对

BSDF 的影响规律时,分别选用了能量为 1.25 MeV、4 MeV、6 MeV、10 MeV、15 MeV 的光子对水箱进行照射,在 MCNP 程序里通过改变源变量参数 ERG 的值改变入射光子的能量。金属植入的厚度、宽度以及在水箱中的深度等变量可以通过 MCNP 程序的几何卡进行更改,多次模拟计算获得金属植入物存在时入射面处剂量的增强比,试图寻找其对 BSDF 的影响规律。

研究照射面积对 BSDF 的影响规律时,不断改变照射野面积进行模拟计算 BSDF 的值,观察其变化规律。本文采用的放射源是点源,在 MCNP 程序里,通过改变点源发射粒子的张角来控制照射野面积。MCNP 实现代码为:sdef erg=4 vec=100 dir=d1,si1 0.99504 1,sp1 0 1,其中 0.99504 是点源发射粒子半张角的余弦值。研究测量点距金属表面不同距离对 BSDF 的影响时,将计数单元填充到 lat=1 的晶格内,用 U 卡 Fill 卡实现一次计算即可得到不同深度处的剂量值。

采用 MCNP 程序模拟计算时,采用详细物理处理过程(包括光电效应、电子对效应、相干散射、非相干散射等反应)。因考虑散射电子对剂量的影响,计数卡采用 *F8 卡。每个程序模拟计算的粒子数为 10^8 个。由于 MCNP 程序在模拟电子的输运过程中耗时较长,因此本文采用并行运算以提高模拟计算速度。

4 结果及分析

图 3 描述的是 BSDF 与金属植入物原子序数的关系。从图中可以看出,BSDF 随金属植入物原子序数的增大而增大,二者近似成线性关系。通过与 Sang Hyun Cho 和 IndraJ.Das 的研究结果比较,发现结果一致。产生这样结果的原因是由于高原子序数金属植入物的原子核外电子较多,相同能量的入射光子与其作用会产生更多的次级散射电子,导致 BSDF 值增大。另外,入射光子与高原子序数金属植入物作用过程中产生的荧光和韧致辐射光子份额增大,也会对入射面处的剂量产生扰动效应。

图 4 描述的是 BSDF 与入射线束能量的关系。从图中可以看出,在一定能量范围内,BSDF 随入射光子能量的增大而增大,达到一定值后,BSDF 随能量的增大而减少。整体来看,BSDF 随能量的变化曲线为一个开口向下的“抛物线”,而这条“抛物线”的峰值所对应的入射光子能量对于不同的金属植入物也不完全相同。从图中可以看出对于高原子序数的金属植入物(铅),其峰值对应的能量较高(10 MeV 左右),而对于低原子序数金属植入物(铝),在 4 MeV 能量左右处 BSDF 就达到了最大值。

图 5 描述的是 BSDF 与金属植入物厚度的关系。从图中可以看出,在一定厚度范围内,BSDF 随着植入物厚度的增大而增大,达到一定厚度后,不再随其

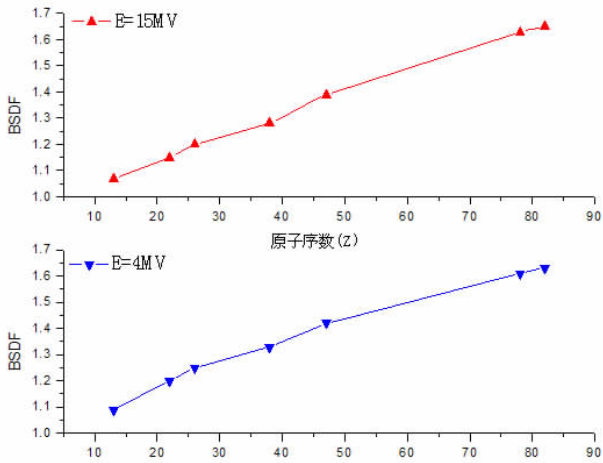


图3 BSDF与原子序数Z的关系
Fig.3 BSDF vs atomic of metal implants

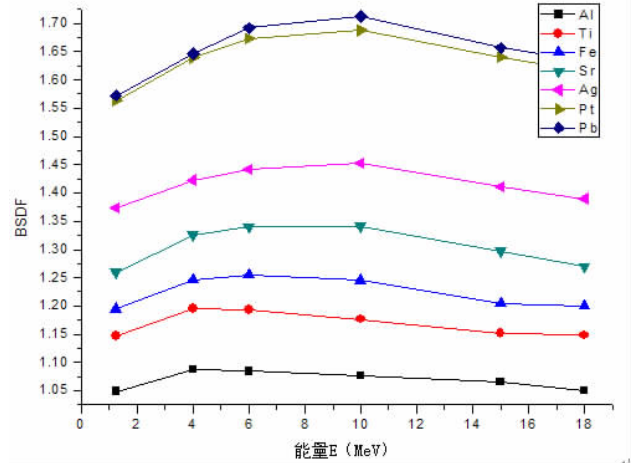


图4 BSDF与入射线束能量E的关系
Fig.4 BSDF vs energy of incident beam

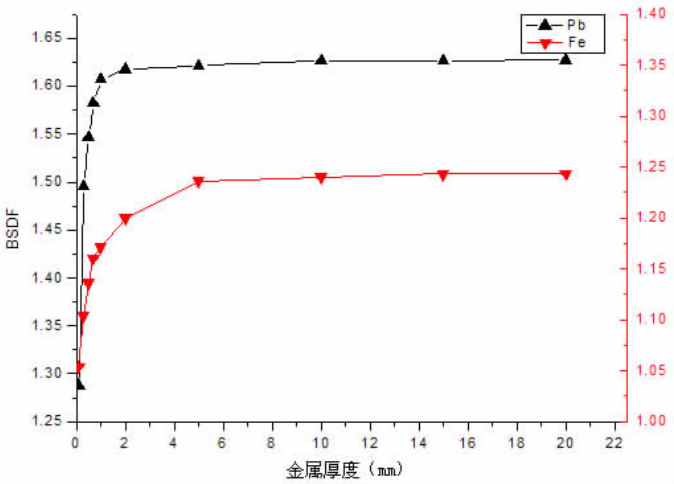


图5 BSDF与金属厚度t的关系
Fig.5 BSDF vs thickness of metal implants

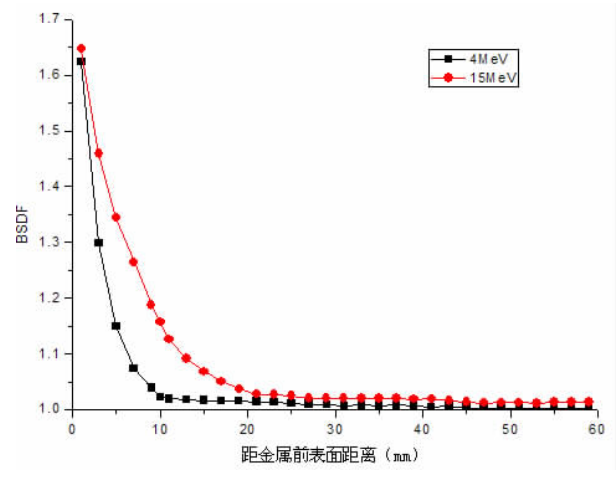


图6 BSDF与测量点距离x的关系
Fig.6 BSDF vs distance of measuring point from metal surface

增大而增大而是趋于常数。假定 BSDF 达到稳定时的厚度为 " 饱和厚度 ", 则对于不同金属植入物, 其 " 饱和厚度 " 也不相同。图中铅块做金属植入物时在 1.5 mm 处达到 " 饱和厚度 ", 而铁块在 5 mm 处才达到 " 饱和厚度 "。可以看出, 在相同能量入射线束照射下金属植入物原子序数越高其 " 饱和厚度 " 越小, 原因是金属植入物内部产生的电子反向散射的过程中, 高原子序数的金属植入物对电子的作用截面较大导致内部产生的反散射电子不易到达交界面, 使其 " 饱和厚度 " 较小。

图 6 描述的是 BSDF 与测量点到金属表面距离的关系。可以看出, BSDF 随测量点到金属表面距离的增大而减少, 且在几个毫米距离内骤减到常数。说明背散射电子的能量一般较低。假定 BSDF 趋于常数时计数点距金属表面的距离为 x_0 , 则 x_0 代表了背散射电子的散射范围。散射电子的散射范围因入射光子能量、金属植入物原子序数的不同而不同, 图 6 中, 相比 15 MeV 能量的入射光子, 4 MeV 能量的光子与金

属植入物作用产生的散射电子的散射范围要小。

在研究金属植入物在水箱中的深度对 BSDF 的影响时, 分别将金属植入物放置在距水箱前表面 4 cm、8 cm、12 cm、20 cm 处, 利用 MCNP 程序模拟计算得到的 BSDF 值分别为 1.27、1.33、1.30、1.31; 在研究金属植入物的宽度对 BSDF 的影响时, 分别模拟计算了金属植入物的宽度为 2 cm、4 cm、8 cm、12 cm、15 cm 时的背散射因子, 得到的值分别为 1.30、1.31、1.30、1.29、1.28; 在研究照射面积对 BSDF 的影响时, 将照射野的半径分别调整为 4 cm、8 cm、10 cm、15 cm, 利用 MCNP 程序模拟计算得到的值分别为 1.22、1.24、1.25、1.27。可以看出, BSDF 对金属植入物在水箱中的深度、宽度以及照射面积等因素的变化不太敏感。

5 讨论

从以上研究结果可以看出, BSDF 对金属植入物的材质、厚度、测量点距金属表面的距离以及入射线束的能量等因素变化较敏感, 而对金属植入物在水箱

中的深度、宽度以及照射面积等因素的变化不太敏感。从定量角度进行分析,所得到的数值与前人研究有一些偏差,而且他们之间的研究结果也不尽相同。主要原因是由于所建的模型不同,以及选用的金属植入物材质有差异(本文金属全为金属单质),导致结果有一些偏差。但从定性角度来看,本文得到的结论与前人的研究完全吻合,说明 MCNP 程序能够很好的模拟光子-电子耦合输运过程。由于本文模型中的物质都是均质物体,且结构简单,下一步,建立带有特定金属植入物的非均质人体体素模型进行精细分析研究是今后工作的重点。

参考文献:

- [1] Asghar Mesbahi, et al. Dose attenuation effect of hip prostheses in a 9-MV photon beam: commercial treatment planning system versus Monte Carlo calculations[J]. *Radiat Med*, 2007, 25(5): 529-535. Asghar Mesbahi, 等. 髋关节假肢在 9MV 光子束照射下的剂量衰减影响: TPS 系统与蒙特卡罗计算[J]. *放射医学*, 2007, 25(5): 529-535.
- [2] Hsiao-Hua Hsu et al. Photon radiation dose enhancement at material interfaces[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 55(2001): 323-326. Hsiao-Hua Hsu 等. 材料界面处光子辐射剂量增强效应[J]. *辐射和同位素应用*, 55(2001): 323-326.
- [3] J. Dutreix. M.D, et al. Dosimetry at interfaces for high energy X and gamma rays. *MARCH*, 1966, 39, 205-210. J. Dutreix. M.D, 等. 高能 X 射线 γ 射线界面处剂量学[J]. *MARCH*, 1966, 39, 205-210.
- [4] Indra J. Das, et al. Backscatter dose perturbation at high atomic number interfaces in megavoltage photon beams[J]. *Med Phys*, 1989, 16 (3), 367-375. Indra J. Das 等. 兆伏级光子束在高原子序数物质界面处的背散射剂量扰动[J]. *医学物理*, 1989, 16 (3), 367-375.
- [5] 刘明, 李兴德, 等. 体内金属植入物对放疗剂量分布影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2010, 19(5), 459-461. Ming Liu, Xingde Li, et al. Impact of implanted metal plates on radiation dose distribution in vivo [J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2010, 19(5), 459-461.
- [6] 邓小武, 傅剑华, 等. 金属食管支架对放疗治疗剂量分布的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2003, 12 (03), 192-195. Xiaowu Deng, Jianhua Fu, et al. Impact of esophageal self-expandable metallic stent on radiotherapeutic dosage[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2003, 12(03), 192-195.
- [7] 倪昕晔, 汤晓斌, 等. 用蒙特卡罗方法模拟实验体内金属植入物对放疗剂量分布影响 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2011, 20 (5), 432-434. Xinye Ni, Xiaobin Tang, et al. Impact of implanted metal plates on radiation dose distribution in vivo by Monte Carlo code [J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2011, 20(5), 432-434.
- [8] 徐淑艳. 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. Shuyan Xu, Application of Monte Carlo method in nuclear physics experiments[M]. Bei Jing: Atomic Energy Press, 2006.
- [9] 汤晓斌, 毛玲, 等. 光子在生物组织中输运过程的模拟研究[J]. *科技咨询*, 2008(11), 11-12. Xiaobin Tang, Ling Mao, et al. Simulation study of photon transport processes in biological tissue [J]. *SCIENCE & TECHNOLOGY INFORMATION*, 2008(11), 11-12.
- [10] 陈飞达, 汤晓斌, 王鹏, 陈达. 基于蒙特卡罗方法的中子屏蔽材料设计 [J]. *强激光与离子束*, 2012, 24 (12), 3006-3010. Feida Chen, Xiaobin Tang, Peng Wang, Da Chen. Neutron shielding material design based on Monte Carlo simulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12), 3006-3010.
- [11] 刘云鹏, 汤晓斌, 谢芹, 等. 质子放疗过程中射束与人眼体作用的蒙特卡罗模拟[J]. *原子能科学与技术*, 2010(44), 602-607. Yunpeng Liu, Xiaobin Tang, Qin Xie, et al. Monte-Carlo simulation of proton radiotherapy for human eye [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010(44), 602-607.
- [12] 张福利, 郑明民, 等. 6MV 与 15MV X 射线在肺癌调强放疗中的剂量学比较[J]. *中国医学物理学杂志*, 2008, 25(5), 801-803. Fuli Zhang, Mingmin Zheng, et al. Dosimetric Comparison of 6MV and 15MV Photons for IMRT Treatment of Lung Cancer [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2008, 25(5), 801-803.
- [13] 甘咏谷, 黄斐增. 基于 GPU 的蒙特卡罗放疗剂量并行计算[J]. *中国医学物理学杂志*, 2012, 29 (6), 3715-3717. Yanggu Gan, Feizeng Huang. GPU-based Parallel Monte Carlo Simulation for Radiotherapy Dose Calculation[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2012, 29 (6), 3715-3717.
- [14] 汤晓斌, 耿长冉, 谢芹, 陈达. 基于 NHMAN 辐射仿真人体模型的蒙特卡罗方法剂量计算研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 29(2), 3216-3220. Xiaobin Tang, Changran Geng, Qin Xie, Da Chen. The study of Monte Carlo dosimetry calculator based on NHMAN radiation human phantom[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 29(2), 3216-3220.
- [15] 耿长冉, 汤晓斌, 谢芹, 陈达. 中国参考人系列模型的建立及外照射剂量学特征的研究[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46, 630-633. Changran Geng, Xiaobin Tang, Qin Xie, Da Chen. A Series of Chinese Mathematic Phantom and Study of Its External Radiation Dosimetry Character[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46, 630-633.
- [16] Garth, J.C. An algorithm for calculating dose profiles in multi-layered devices using a personal computer[J]. *IEEE Trans, Nucl Sci*, 1986, NS-33, 1266. Garth, J.C, 等. 一种使用个人电脑计算多层剖面剂量的算法[J]. *核科学*, 1986, NS-33, 1266.
- [17] Horowitz, Y.S, Moscovit ch. Incorporation of Monte Carlo electron interface studies into photon general cavity theory[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1986, 94, 233-240. Horowitz, Y.S, Moscovit ch, 等. 蒙特卡罗电子界面的光子腔理论研究 [J]. *核科学与工程*, 1986, 94, 233-240.
- [18] Manickam Ravikumar. Backscattered dose perturbation effects at metallic interfaces irradiated by high-energy X and gamma-ray therapeutic beams[J]. *Strahlenther Onkol*, 2004, 180: 173-8. Manickam Ravikumar 等. 高能 X 射线和伽马射线在金属交界处的剂量扰动效应[J]. *Strahlenther Onkol*, 2004, 180: 173-8.
- [19] Barry L. Werner, Indra J. Das. Dose perturbations at interfaces in photon beams: Secondary electron transport[J]. *Med Phys*, 1990, 17(2), 212-226. Barry L. Werner, Indra J. Das, 等. 光子束在界面处的剂量扰动: 次级电子运输[J]. *医学物理*, 1990, 17(2), 212-226.