

医用诊断X射线能谱的MCNP模拟

孔 燕¹ 卓维海² 陈 波² 赵 超³

1(江南大学附属医院 无锡市第四人民医院 无锡 214062)

2(复旦大学 放射医学研究所 上海 200032)

3(上海市计量测试技术研究院 上海 201203)

摘要 掌握医用诊断X射线的能谱是开展图像质量和人员所受辐射剂量评估等工作的重要前提。本研究应用MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code)软件开展医用诊断X射线能谱的计算机蒙特卡罗模拟。构建了X射线机头简化的几何模型,计算管电压为50~150 kV_p、总滤过为0.5~5 mm(Al)、阳极角度为6°~14°时,在出束口的X射线能谱结果。同时分析了X射线的阳极脚跟效应特性,并得到含有阳极效应的X射线面源数据文件集,可用于后续应用计算。能谱的模拟计算结果与现有能谱软件结果符合较好,表明通过电子打靶的计算机蒙特卡罗模拟可较准确得到X射线源特征参数,为后续其应用建立了较好的源项基础。

关键词 诊断X射线, X射线能谱, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110301

MCNP simulations of medical diagnostic X-ray spectra

KONG Yan¹ ZHUO Weihai² CHEN Bo² ZHAO Chao³

1(Department of Radiation Oncology, Affiliated Hospital of Jiangnan University (Wuxi 4th People's Hospital), Wuxi 214062, China)

2(Institute of Radiology, Fudan University, Shanghai 200032, China)

3(Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract [Background] In medical diagnostic radiology, detailed knowledge of X-ray spectra is required for evaluating the image quality and patients' or staff's radiation dose. [Purpose] This study aims to simulate medical diagnostic X-ray spectra by using Monte Carlo method. [Methods] First of all, a simplified X-ray machine head geometry model was constructed in MCNP (A general Monte Carlo N-Particle transport code) software. Then, the X-ray spectra and surface source data files in the output window were calculated under tube voltage ranging from 50 kV_p to 150 kV_p, filter ranging from 0.5 mm (Al) to 5 mm (Al) and anode angles ranging from 6° to 14°. [Results] Database of medical diagnostic X-ray spectra and surface sources in the output window are obtained by various machine X-ray head parameters. The calculated spectra are comparable to those of other X-ray spectra software. [Conclusions] X-ray source and its spectra can be correctly simulated by electronically hitting the target through Monte Carlo simulation, providing a basis for future applications.

Key words Diagnostic X-ray, X-ray spectra, Monte Carlo simulation

无锡市卫生计生委科研项目(No.Q201767)资助

第一作者: 孔燕, 女, 1987年出生, 2014年于复旦大学获博士学位, 研究领域为辐射防护与剂量学

通信作者: 卓维海, E-mail: whzhuo@fudan.edu.cn

收稿日期: 2019-09-10, 修回日期: 2019-09-20

Supported by Wuxi Health Care Commission Project (No.Q201767)

First author: KONG Yan, female, born in 1987, graduated from Fudan University with a doctoral degree in 2014, focusing on radiation protection dosimetry

Corresponding author: ZHUO Weihai, E-mail: whzhuo@fudan.edu.cn

Received date: 2019-09-10, revised date: 2019-09-20

医学放射影像诊断系统中,具有一定能谱的X射线在机头产生,经准直后照射人体,携带人体不同组织结构的衰减信息后,在介质中沉积能量并生成图像。根据辐射防护的ALARA(As Low As Reasonably Achievable)原则,在提高图像质量的同时,应尽可能降低受检者所受辐射剂量^[1]。而X射线源作为成像源头,准确掌握其能量和分布是基础。

至今已发展了基于实测、经验、半经验或者蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模型建立的X射线能谱数据^[2-7],可方便快捷得到大多数固定机头参数时的能谱,但也有其局限性。当源、靶或滤过这些参数不在数据库内时,不能准确得到相应能谱。同时,对于医用诊断X射线球管,通过电子束轰击楔形靶在同侧产生轫致辐射X射线,在靠近阳极端输出的X射线因通过相对更长的靶材料而强度相对降低,即具有阳极脚跟效应(Anode heel effect)。而利用现成数据库的能谱做光子点源较难准确体现X射线源输出窗口平面的这种不均匀性。通过蒙特卡罗方法可直接模拟电子束打靶得到X射线源,因而首先可以进行个性化的源模型研究,其次也可更真实地体现其源输出的脚跟效应。本研究利用通用MC软件MCNP,开展医用诊断X射线能谱的计算机模拟,同时分析了阳极脚跟效应,得到涵盖平面不均匀性的面源数据文件集。

1 材料与方法

MCNP是一种通用的蒙特卡罗模拟程序包^[8]。在输入文件中用特定的卡来描述几何、物质材料、输运粒子及其物理过程、记录统计结果等,还提供了各种提高计算效率的减方差技巧。为考虑光子和电子的产生和与物质相互作用的所有物理过程,物理卡设置为缺省。

参考医用诊断X射线机机头的真实结构,在程序中构建简化的机头几何模型,包括钨靶、Al总滤过窗口等,周围填充真空,见图1。电子点源束流直线轰击钨靶,用通量卡(F1卡)和能量箱(E卡)相结合的方式记录过滤窗口下平面的X射线能谱,计算结果表示每个能量区间内的X射线光子数,类似于多道能谱统计方法。

由于电子打靶产生轫致辐射X射线的效率很低,因而要得到相对光滑的能谱需要较长时间。本研究利用面源记录卡SSW(Surface Source Write),输出不同机头参数下的面源数据文件,然后可用面源读出卡SSR(Surface Source Read)读入后,开展后续各种照射情形时的蒙特卡罗计算,节约了每次打靶计算的时间。

考虑医用X射线的实际使用情况,设置电子源能量范围为50~150 keV(对应管电压50~150 kV_p),滤过的范围为0.5~5 mm(Al),阳极角范围为6°~14°。

为观察X射线的脚跟效应,在阴阳极轴线方向上选取分别偏向阴、阳极角度为3°、6°、9°和12°处,用点探测器(F5卡)记录点通量。同时,在距离X射线焦点45 cm,12 cm×12 cm的视野内的X射线输出窗口平面上,设置点探测器阵列用以记录光子通量的平面相对分布情况,并与常用光子点源锥形束源所致相同平面位置处光子通量分布的蒙特卡罗计算结果比较。

每一例计算的粒子数为10⁸,可以达到能谱曲线基本光滑,每次计算的时间随计算参数的变化而浮动,例如对于70 kV_p、3.5 mm(Al)时进行单线程计算(Intel Core i5-3210M CPU,主频为2.5 GHz)的时间约为660 min。当kV_p值增大,计算时间增加。MCNP的计算结果默认归一化到每一个发射源粒子。

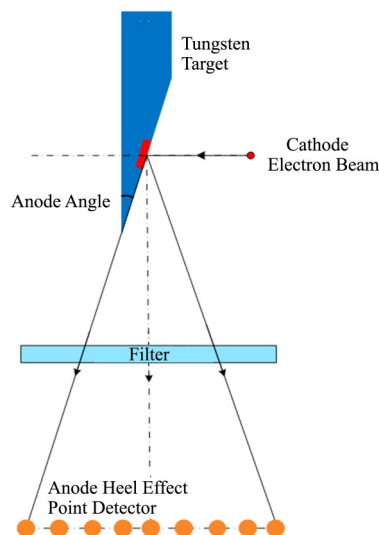


图1 X射线简化机头模型示意图
Fig.1 Diagram of simplified X-ray machine head

2 结果与讨论

计算得到了不同机头配置时的X射线能谱结果,并与现有半经验模型数据库XComp5r软件^[9]进行对比。如图2所示,在3.5 mm(Al)滤过、12°阳极角,管电压分别为90 kV_p和140 kV_p时的X射线能谱,为了方便比较,每个能量区间内的光子数归一至总光子数,本研究与数据库结果相比,曲线形状和吸收峰的位置都基本符合。

不同管电压时X射线能谱如图3所示。当滤过

固定为3.5 mm(Al)、阳极角为12°时,X射线的平均能量随管电压增加而显著递增;在50~150 kV_p的管电压变化范围内,平均能量范围为34.2~62.1 keV,计

算结果与 XComp5r 软件的结果比较,相对偏差为 $(-1.8 \pm 1.5)\%$ 。

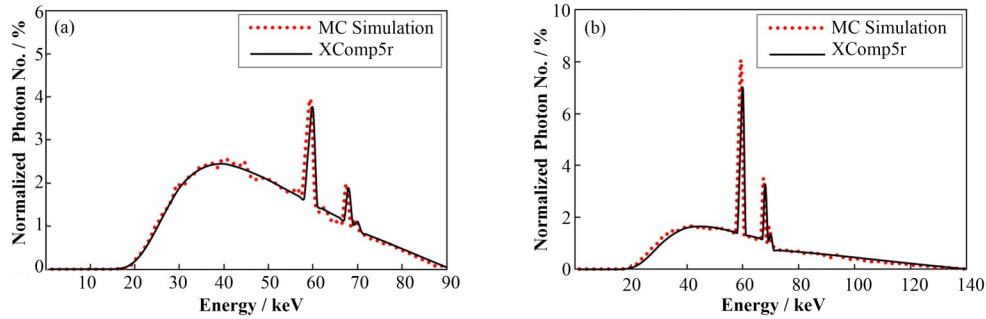


图2 管电压为90 kV_p (a)和140 kV_p (b)时MC计算与XComp5r软件的X射线能谱比较
Fig.2 Comparisons of X-ray spectra under 90 kV_p (a) and 140 kV_p (b) from MC simulations and XComp5r software

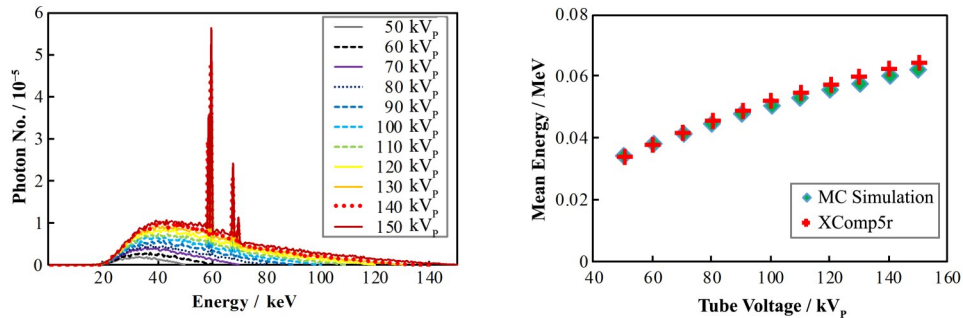


图3 不同管电压时的X射线能谱及其平均能量
Fig.3 X-ray spectra under different tube voltages and their mean energy

不同滤过时的X射线能谱如图4所示。当滤过增加时,能谱低能部分的份额减少,因而提高了能谱的平均能量。当管电压固定为70 kV_p时,X射线的

平均能量随滤过而增加;在0.5~5 mm(Al)的滤过变化范围内,平均能量范围为33.0~43.3 keV,计算结果与XComp5r的相对偏差范围为 $(-1.2 \pm 1.2)\%$ 。

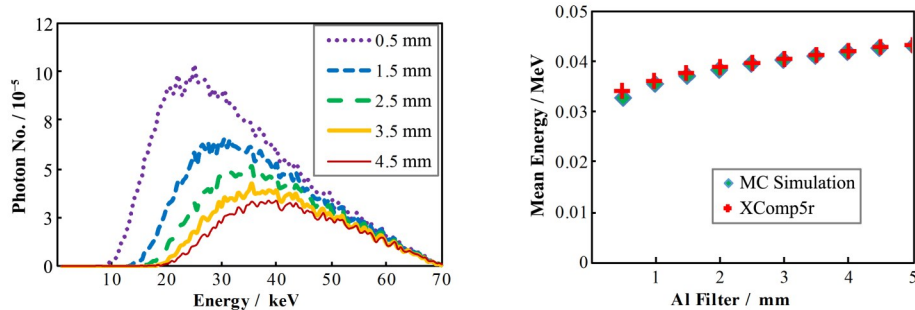


图4 不同滤过时的X射线能谱及其平均能量
Fig.4 X-ray spectra under different filters and their mean energy

不同阳极角时的X射线能谱见图5。当管电压为70 kV_p、滤过为2 mm(Al)、阳极角在6°~14°变化时,能谱的平均能量基本不变,为 (38.50 ± 0.06) keV,与XComp5r的结果偏差为 $(-1.7 \pm 2.0)\%$ 。

另外,管电压为70 kV_p、滤过为2 mm(Al)、阳极

角为12°的计算条件下,X射线能谱在阴阳极轴线方向上的相对光子通量的计算结果如图6所示。可见,沿着阴阳极方向上存在明显的阳极脚跟效应。当偏向阳极角度分别为12°、9°、6°、3°时,光子通量为0°位置的4%、69%、87%和95%,显著增加。当偏

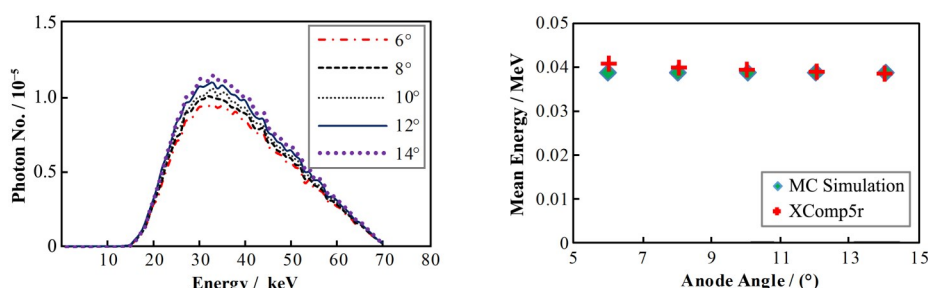


图5 不同阳极角时的X射线能谱及其平均能量
Fig.5 X-ray spectra under different anode angles and their mean energy

向阴极角度分别为3°、6°、9°、12°时,光子通量为0°位置时的102%、103%、103%和101%,逐渐趋于平缓。

X射线输出平面上光子通量的相对分布结果如图7所示,并与常用光子点源锥形束源所致相同位置处光子通量的蒙特卡罗计算结果比较。对于光子点源情形,其输出面上的通量分布较为均匀,不同位置的通量为 $(98.2 \pm 1.2)\%$,相对标准差仅为1.22%。而对于基于电子打靶源情形,则呈现出明显的阳极低通量和阴极高通量,在偏阳极6 cm、0点位置及偏阴极6 cm处的相对通量分别为76.9%、97.1%、99.6%左右,而在与阴阳极轴线方向垂直的方向上,则呈现明显的对称性,其对应位置处通量的差异仅为 $(0.2 \pm 1)\%$ 。脚跟效应仅在沿着阴阳极方向上,不同位置的通量为 $(92.3 \pm 8.0)\%$,相对标准差为

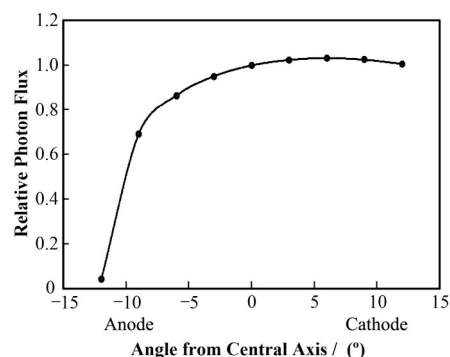


图6 阴阳极轴线方向上的相对光子通量
Fig.6 Relative photon flux in different directions relative to the central axis in anode-cathode axis

8.66%,与光子点源所致通量分布相比,更好地体现了脚跟效应的不均匀性。

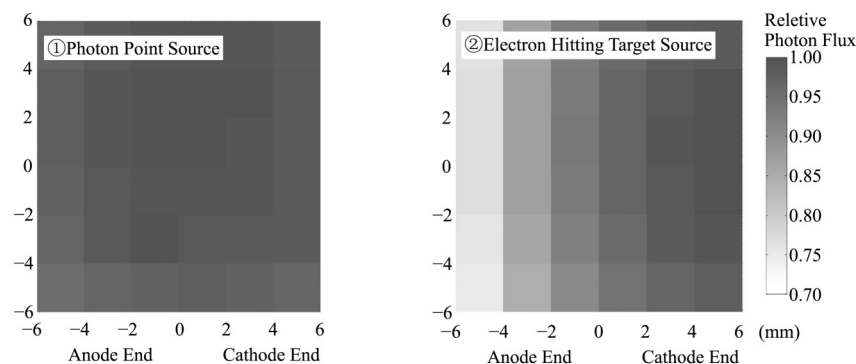


图7 X射线输出视野平面内的剂量分布
Fig.7 Distributions of relative photon flux at the X-ray output field

考虑到诊断用X射线机的阳极脚跟效应,在实际应用中,可将受检者成像的部位适当移动偏向阴极,也有利用该特性合理保护正常组织的研究^[10]。可见,从电子打靶得到的轫致辐射的X射线源,从剂量相对分布情况上也更接近真实的X射线机球管输出情形,可为后续开展诊断X射线影像和剂量评估提供更准确的源项。

3 结语

本研究利用蒙特卡罗软件MCNP计算了常见医用诊断X射线源及能谱。从能谱平均能量随各机头参数的变化可以看出,管电压是影响X射线能谱线质的最主要因素,其次是滤过。用蒙特卡罗模拟电子打靶得到的X射线源可体现出X射线输出平面上存在的阳极脚跟效应,因而比直接参考数据库能谱并作点源或均一面源发射,更接近真实情形。蒙

特卡罗模拟还适用于除能谱数据库中包含的机头参数以外的情形,包括不同的靶材料组合等。

本研究的计算结果与 XComp5r 能谱软件提供的能谱数据十分接近,验证了几何建模以及计算过程的准确性,可为后续开展诊断X射线工作条件时,图像质量及人员剂量的评价等研究建立了较好的源项基础。

参考文献

- 1 Martin U, Cornelia S P. Digital radiography: the balance between image quality and required radiation dose[J]. European Journal of Radiology, 2009, **72**(2): 202–208.
- 2 Fewell T R, Shuping R E. Photon energy distribution of some typical diagnostic X-ray beams[J]. Medical Physics, 1977, **4**(3): 187–197.
- 3 Boone J M, Seibert J A. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 kV to 140 kV[J]. Medical Physics, 1997, **24**(11): 1661–1670.
- 4 Ay M R, Shahriari M, Sarkar S, *et al.* Monte Carlo simulation of X-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C[J]. Physics in Medicine and Biology, 2004, **49**(21): 4897–4917.
- 5 Hernandez A M, Seibert J A, Nosratieh A, *et al.* Generation and analysis of clinically relevant breast imaging X-ray spectra[J]. Medical Physics, 2017, **44**(6): 2148.
- 6 Punnoose J, Xu J, Sisniega A, *et al.* Technical note: Spektr3.0 - a computational tool for X-ray spectrum modeling and analysis[J]. Medical Physics, 2016, **43**(8): 4711–4717.
- 7 Hernandez A M, Boone J M. Tungsten anode spectral model using interpolating cubic splines: unfiltered X-ray spectra from 20 kV to 640 kV[J]. Medical Physics, 2014, **41**(4): 42101. DOI: 10.1118/1.4866216.
- 8 MCNP5 - a general Monte Carlo N-particle transport code, version 5[R]. LA-UR-03-1987, LANL, Los Alamos, 2003.
- 9 Nowotny R, Höfer A. Ein programm für die berechnung von diagnostic Röntgenspektren[J]. Fortschr Röntgenstr, 1985, **142**(6): 685–689.
- 10 Fung K K, Gilboy W B. “Anode heel effect” on patient dose in lumbar spine radiography[J]. British Journal of Radiology, 2000, **73**(869): 531–536.