



碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究

张小芳 孟乾乾 戴中颖 陈卫强 刘新国 李强

Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation

ZHANG Xiaofang, MENG Qianqian, DAI Zhongying, CHEN Weiqiang, LIU Xinguo, LI Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019050>

引用格式:

张小芳, 孟乾乾, 戴中颖, 陈卫强, 刘新国, 李强. 碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(2):217–224. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019050

ZHANG Xiaofang, MENG Qianqian, DAI Zhongying, CHEN Weiqiang, LIU Xinguo, LI Qiang. Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(2):217–224. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019050

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

均匀磁场下碳离子笔形束的剂量变化分析及位置修正方法

Dose Variation Analysis and Position Correction Method for Carbon-ion Pencil Beams under Uniform Magnetic Fields

原子核物理评论. 2020, 37(1): 88–96 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019038>

低能离子注入育种中次级效应影响的模拟研究

Simulation of the Secondary Effect of Low Energy Ions Implanting in Seeds

原子核物理评论. 2017, 34(4): 779–783 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.779>

大分割碳离子放射治疗中相对生物学效应与剂量依赖关系的研究

Dependence of Relative Biological Effectiveness on Dose in Hypofractionated Carbon Ion Beam Radiotherapy

原子核物理评论. 2017, 34(4): 784–789 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.784>

基于MCNPX的重离子治癌相关问题研究

MCNPX-based Study on the Issues Related to Heavy Ion Cancer Therapy

原子核物理评论. 2017, 34(2): 236–241 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.236>

新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 85–90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

几种不同材料降能器对200 MeV质子放疗特性的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo Study on the Performance of 200 MeV Proton Therapy Energy Degraders Made of Different Materials

原子核物理评论. 2018, 35(1): 78–84 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.078>

文章编号: 1007-4627(2020)02-0217-08

碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究

张小芳^{1,2,3,4}, 孟乾乾^{1,2,3,4}, 戴中颖^{1,2,3,4}, 陈卫强^{1,2,3,4}, 刘新国^{1,2,3,4,†}, 李强^{1,2,3,4,†}

- (1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院重离子束辐射生物学重点实验室, 兰州 730000;
3. 甘肃省重离子束辐射医学应用基础重点实验室, 兰州 730000;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在碳离子放射治疗中, 碳离子束与治疗头设备和患者身体相互作用产生的次级粒子可以到达患者体内的许多区域, 在产生的次级粒子中以中子和 γ 射线的产额为最大。在不影响束流配送功能的情况下, 减少碳离子放疗中产生的次级中子和 γ 射线对于降低放疗后出现的正常组织并发症及二次肿瘤风险有着非常重要的意义。本文利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法模拟计算了被动式束流配送系统下, 400 MeV/u 碳离子束照射到由不同材料叶片构成的多叶光栅 (MLC) 形成典型的 10 cm \times 10 cm 方形射野时, 在水模体中产生的次级中子和 γ 射线所沉积的剂量及空间分布等。模拟结果显示: 碳离子束通过 MLC 形成射野后在水模体中产生的次级中子主要分布在水模体的入射端, 次级 γ 射线较为均匀的分布在整个水模体内, 且较多分布在具有展宽 Bragg 峰 (SOBP) 射野在水模体中贯穿时的坪区。对于 MLC 叶片材料的选择, 则需根据实际情况对叶片厚度以及次级粒子当量剂量的要求来确定。本文通过模拟研究不同 MLC 叶片材料产生次级粒子的情况, 为被动式束流配送系统中 MLC 叶片及其他元件的材料选择提供了科学依据。

关键词: 碳离子放射治疗; 被动式束流配送系统; 次级粒子; 剂量分布; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O571.33; Q691.4

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019050

1 引言

肿瘤放射治疗 (放疗) 的目的是让肿瘤靶区接受到致死剂量的照射, 同时使肿瘤靶区周围正常组织及危及器官受到的照射剂量尽可能低。碳离子束以其独特的物理学和生物学特性为治疗深部肿瘤提供了有利的条件^[1-2]。随着肿瘤治疗技术的不断进步, 通过放疗或结合手术与综合治疗 (化学药物、免疫和遗传) 后癌症患者的治愈率一直在稳步提高, 降低放疗后出现的正常组织并发症及二次肿瘤风险, 对于提高癌症患者的生活质量具有重要的意义^[3-5]。

在质子与碳离子放疗中, 由于离子束与束流配送系统中设备的相互作用, 不可避免地会产生一定的次级粒子^[6]。虽然次级粒子在远离靶区的正常组织中沉积的剂量要比靶区沉积的剂量低很多, 但是在评估正常组织并发症及二次肿瘤风险的时候是不可忽略的因素^[7-8]。在不影响束流配送系统功能的情况下, 减少放疗中次级中子与 γ 射线的产生是降低正常组织并发症几率和二次肿

瘤发生风险的重要措施。在被动式束流配送系统中, 多叶光栅 (MLC) 的叶片一般是由高原子序数的金属材料制成的, 可以阻挡射野之外的离子束进入患者体内。典型的 MLC 由 40 到 120 片叶片成对排列, 通过控制成对排列叶片的位置, 几乎可以生成所需的任何射野形状^[9-10]。MLC 自 1965 年首次使用以来发展迅速, 现已被广泛使用。MLC 可用在 X 射线调强放疗及质子和重离子放疗中^[11-12], 起适形放疗的作用, 在很大程度上节省了照射时间, 使适形放疗具有更高的成本效益。

Jiang 等^[13]模拟计算了质子放疗中次级中子对器官特异性患者造成的有效剂量, 研究结果表明, 对肺癌和鼻窦旁肿瘤 (PNS) 的两种质子治疗方案产生的次级中子沉积在患者全身的有效剂量分别为 0.162 Sv 和 0.0266 Sv, 主要来源是质子治疗头中产生的中子。Yonai 等^[14]利用蒙特卡罗方法模拟计算了日本千叶医用重离子加速器 (HIMAC) 被动式束流配送系统的碳离子放疗中次级中子的来源, 并且探究了如何减少次级粒子的产生, 研究发现在被动式束流配送系统中, 用作初级准直的四叶

收稿日期: 2019-09-30; 修改日期: 2019-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2017YFC0108500); 国家自然科学基金资助项目 (11875299, 61631001, U1532264)

作者简介: 张小芳 (1992-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 从事重离子束治疗技术基础研究;

E-mail: zhangxiaofang@impcas.ac.cn

† 通信作者: 刘新国, E-mail: liuxinguo@impcas.ac.cn; 李强, E-mail: liqiang@impcas.ac.cn.

准直器 (FLC) 产生的次级中子是放疗中次级中子的主要来源, 其在次级中子环境总剂量中的贡献超过 70%。通过 FLC 的改进可以使束流轴线附近的次级中子剂量降低 70%。但是他们的研究仅探讨了四种材料用作 FLC 时产生次级粒子的情况, 且并未探究在靶区位置次级中子沉积的剂量及分布情况。本文基于中国科学院近代物理研究所自主研发的医用重离子加速器示范装置 (HIMM) 的被动式束流配送系统, 拟通过蒙特卡罗方法的模拟计算, 探究多种常用金属材料包括 Al、Fe、Ni、Cu、W 以及铜锌合金与钨铜合金作为 MLC 叶片材料时, 产生的次级中子与 γ 射线在水模体中沉积的当量剂量以及在水模体中的空间分布, 目的在于为 HIMM 被动式束流配送系统中 MLC 叶片及其他元件的材料选择提供科学依据。

2 材料与方 法

2.1 模拟工具

本文模拟计算采用的蒙特卡罗软件 Gate (GEANT4 Application for Tomographic Emission), 是基于高能物理学常用的蒙特卡罗软件 GEANT4 开发的用于辐射层析成像系统与模拟放射治疗过程的一款软件 [15]。本文采用 GATE v8.2/GEANT4-10-05-patch-01 模拟平台, 物理过程调用 QGSP_BERT_HP_EMY 强子物理模拟包, 该物理过程被广泛地应用在辐射防护及生物医学的蒙特卡罗模拟计算中。

2.2 模型参数设置

本文模拟的 HIMM 被动式束流配送系统如图 1 所示。碳离子束的能量为 400 MeV/u, 纵向上利用脊形过滤器将单能束流的 Bragg 峰展宽 6 cm, 形成展宽的 Bragg 峰 (SOBP), 横向上通过扫描磁铁对束流进行均

匀扫描, 横向扩展为 20 cm×20 cm 的方形照射野。其中脊形过滤器 (RF) 材料为铝, 密度为 2.7 g/cm³; MLC 最大开野尺寸为 30 cm×30 cm, 在本文的蒙特卡罗模拟计算时 MLC 开野设为 10 cm×10 cm; 叶片厚度根据所选用的材料而定, 取 400 MeV/u 碳离子在该材料内的射程的 2 倍再加 1 cm, 模拟计算所选用 MLC 叶片材料的厚度及其性质如表 1 所列。为简化模拟, 真空膜窗、初级准直器、射程移位器、补偿器、剂量探测器及束流位置探测器均设为空。在等中心位置放置一个大小为 20 cm×20 cm×30 cm 长方体水模体, 模拟粒子数为 10⁷, 使用服务器工作站上的 CPU(Intel® Xeon® CPU E5-2690 V3 @2.60 GHz×48, OS: Scientific Linux release 7.6) 进行模拟计算。

2.3 模拟方法

束流从真空窗出射, 穿过 RF 后照射在 MLC 上后形成 10 cm×10 cm 的射野, 该射野照射在水模体上与水相互作用沉积能量, 超出 MLC 射野构形外的束流被 MLC 叶片阻挡, 被阻挡的束流照射在 MLC 叶片上产生次级粒子。次级粒子具有一定的能量和强度, 利用水模体内绑定的剂量探测器探测次级粒子在水模体中沉积的能量, 从而判断模拟所用的金属材料作为 MLC 叶片材料时产生的次级粒子。

2.4 次级粒子当量剂量计算

当选用不同的金属材料作为 MLC 叶片材料时, 碳离子照射到 MLC 叶片材料产生的次级中子与 γ 射线在水模体中沉积的剂量与空间分布等都有很大的区别。为了比较不同类型的辐射引起的生物效应, 评估次级粒子在水模体中沉积的剂量对于靶区周围正常组织及器官造成的损伤, 需要将水模体中次级中子与 γ 射线沉积的吸收剂量转化为当量剂量进行统一比较, 当量剂量的计算公式为:

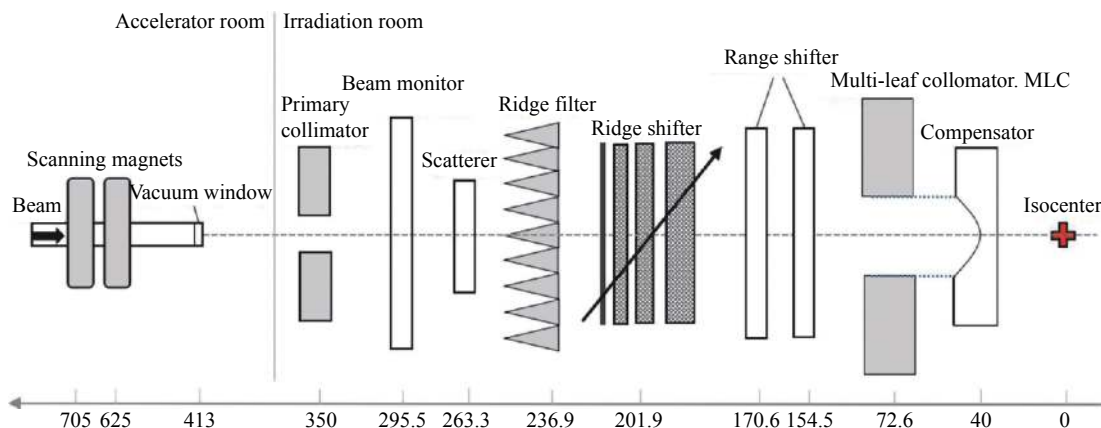


图 1 (在线彩图) 蒙特卡罗模拟计算中的束流线设置

表 1 模拟 MLC 叶片所用材料及其材料性质 [16-17]

MLC叶片材料名称	质量分数	密度/(g/cm ³)	MLC叶片厚度/cm	MLC叶片材料名称	质量分数	密度/(g/cm ³)	MLC叶片厚度/cm
Al	100%	2.70	27.0	H96	Cu-59% Zn-41%	8.85	10.2
Fe	100%	7.87	11.0	WCu1	W-50% Cu-50%	12.25	8.32
Ni	100%	8.90	9.6	WCu2	W-55% Cu-45%	12.71	8.14
Cu	100%	8.96	10.0	WCu3	W-60% Cu-40%	13.22	7.96
W	100%	19.30	6.24	WCu4	W-65% Cu-35%	13.76	7.76
H59	Cu-59% Zn-41%	8.40	10.6	WCu5	W-70% Cu-30%	14.36	7.56
H62	Cu-62% Zn-38%	8.50	10.4	WCu6	W-75% Cu-25%	15.00	7.36
H68	Cu-68% Zn-32%	8.50	10.4	WCu7	W-80% Cu-20%	15.70	7.14
H80	Cu-80% Zn-20%	8.66	10.4	WCu8	W-85% Cu-15%	16.48	6.92
H85	Cu-85% Zn-15%	8.70	10.2	WCu9	W-90% Cu-10%	17.34	6.70
H90	Cu-90% Zn-10%	8.73	10.2				
SS304	Fe-69.5%Cr-19%Ni-9.5%Mn-2%	7.92	10.8				

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R}, \quad (1)$$

其中： $H_{T,R}$ 为R类辐射在组织器官(T)中所致的当量剂量； $D_{T,R}$ 为R类辐射在组织或器官(T)中所致的平均吸收剂量； W_R 是R类辐射的辐射权重因数。

考虑到多种类型和能量的射线，总的当量剂量 H_T 为

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}。 \quad (2)$$

由于高能碳离子束照射到不同材料的MLC叶片上会产生不同能量的次级中子和 γ 射线，因此必须得到不同能量次级粒子沉积的剂量，再借助于公式(1)将吸收剂量转化为当量剂量，最后利用式(2)计算次级粒子总的当量剂量，其中 W_R 取值可参考表2。

表 2 辐射权重因数 W_R

辐射类型	能量范围	W_R
光子	所有能量	1
电子和 μ 介子	所有能量	1
中子	<10 keV	5
	10 keV-100 keV	10
	100 keV-2 MeV	20
	2 MeV-20 MeV	5
	20 MeV	5
α 粒子, 裂变碎片, 重核	所有能量	20

根据表2所提供的辐射权重因数与式(1)，可计算得到不同材料的MLC叶片产生的次级中子与 γ 射线在水模体中沉积的当量剂量。 γ 射线的辐射权重因数为1，适用于所有能量的次级 γ 射线，所以不需要在计算时考

虑具有不同能量次级 γ 射线沉积的吸收剂量。但是，对于不同能量的次级中子，需根据式(1)与表2中对应的辐射权重因数计算得到次级中子沉积在水模体中的当量剂量。最终利用式(2)将两种次级粒子的当量剂量相加，得到所有次级粒子在水模体中沉积的总当量剂量。

3 结果

3.1 不同材料的MLC叶片产生的次级粒子在水模体中的沉积剂量分布

3.1.1 碳离子束在水模体中的深度剂量分布及横向剂量分布

图2是400 MeV/u碳离子束经所模拟的束流配送系统后在水模体中的剂量分布结果。从图中可以看出，碳离子束穿过RF照射在由叶片构形射野的MLC上后，在水模体中纵向上形成展宽6 cm的SOBP，入射水模体表面处横向上形成10 cm×10 cm的射野。

3.1.2 次级粒子在水模体中的深度积分剂量分布

图3是400 MeV/u碳离子束照射不同材料的MLC叶片形成射野时，产生的次级 γ 射线在水模体中的深度积分剂量分布(图3中的W均指钨材料)。可以看到，不同的MLC叶片材料产生的次级 γ 射线在水模体中沉积的剂量非常相近，其中钨和钨铜合金材料作为MLC叶片材料时产生次级 γ 射线较少。并且次级 γ 射线沉积的剂量主要集中于射野在水模体中贯穿时的坪区。Al、Ni、Fe、Cu与不同含量的铜锌合金产生的次级 γ 射线沉积的剂量非常相近从图中无法直接比较，具体差异将在3.2节中定量分析。

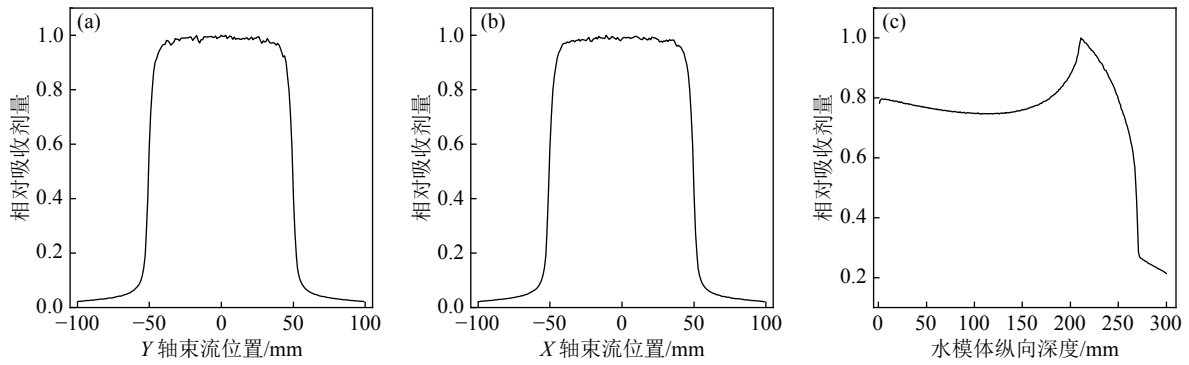


图 2 400 MeV/u 碳离子束在水模体表面的横向剂量分布和在水模体中的深度剂量分布

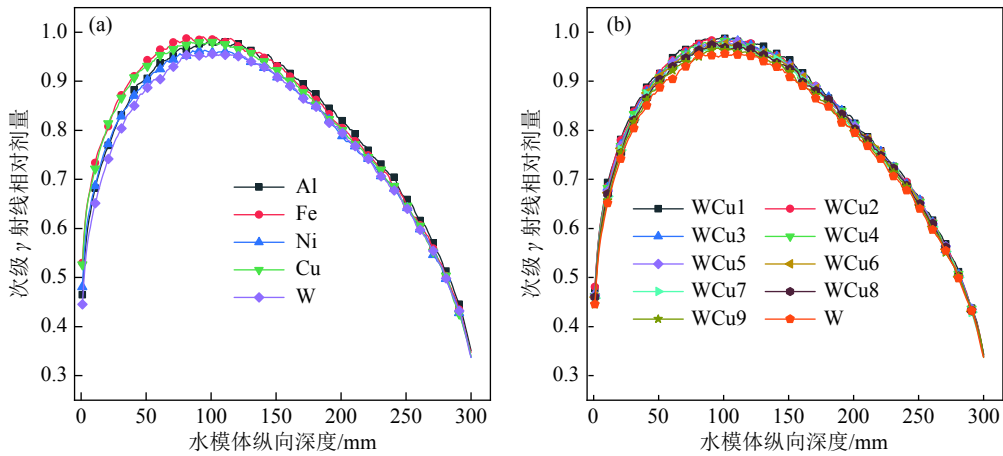


图 3 (在线彩图) 部分 MLC 叶片材料产生的次级 γ 射线在水模体中的深度积分剂量分布

图 4 是由不同材料叶片的 MLC 对 400 MeV/u 碳离子束照射形成射野时，产生的次级中子在水模体中的深度积分剂量分布 (图 4 中左右两幅图中的 W 均指钨材料)。可以看到，不同 MLC 叶片材料产生的次级中子在水模体中沉积的剂量，随着 MLC 叶片材料原子序数的增高逐渐增多。并且次级粒子在水模体沉积的剂量，主要集中于射野穿过水模体时的入射端。在模拟的材料中 Al 产生的次级中子最少，W 产生的次级中子最多。

钨铜合金产生的次级中子沉积的剂量随着钨含量的增加也逐渐增加。

3.1.3 次级粒子在水模体中沉积剂量的空间分布特性

图 5 是由不同材料叶片的 MLC 对 400 MeV/u 碳离子束照射形成射野时，产生的次级 γ 射线在水模体中沉积的二维相对剂量分布。可以看到，不同的 MLC 叶片材料产生的次级 γ 射线在水模体中沉积的剂量分布比较均匀，且较多分布在 SOBP 射野在水模体中贯穿时的坪

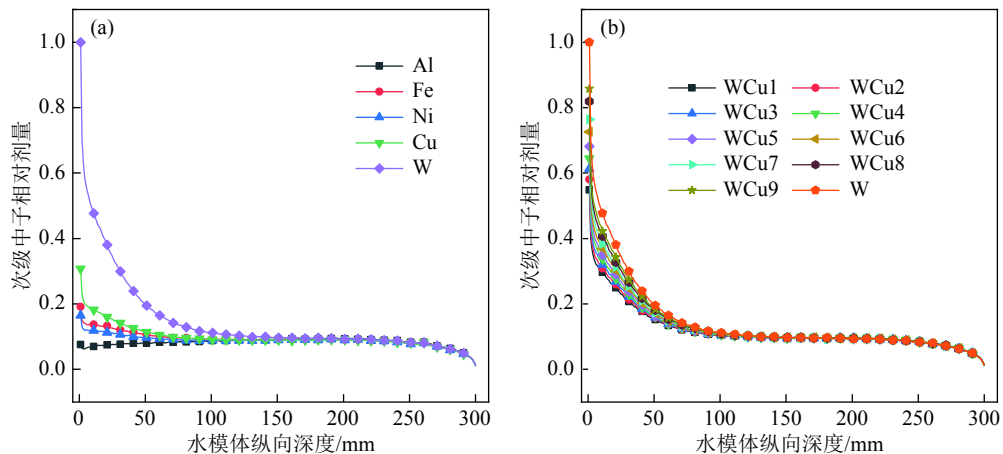


图 4 (在线彩图) 部分 MLC 叶片材料产生的次级中子在水模体中的深度积分剂量分布

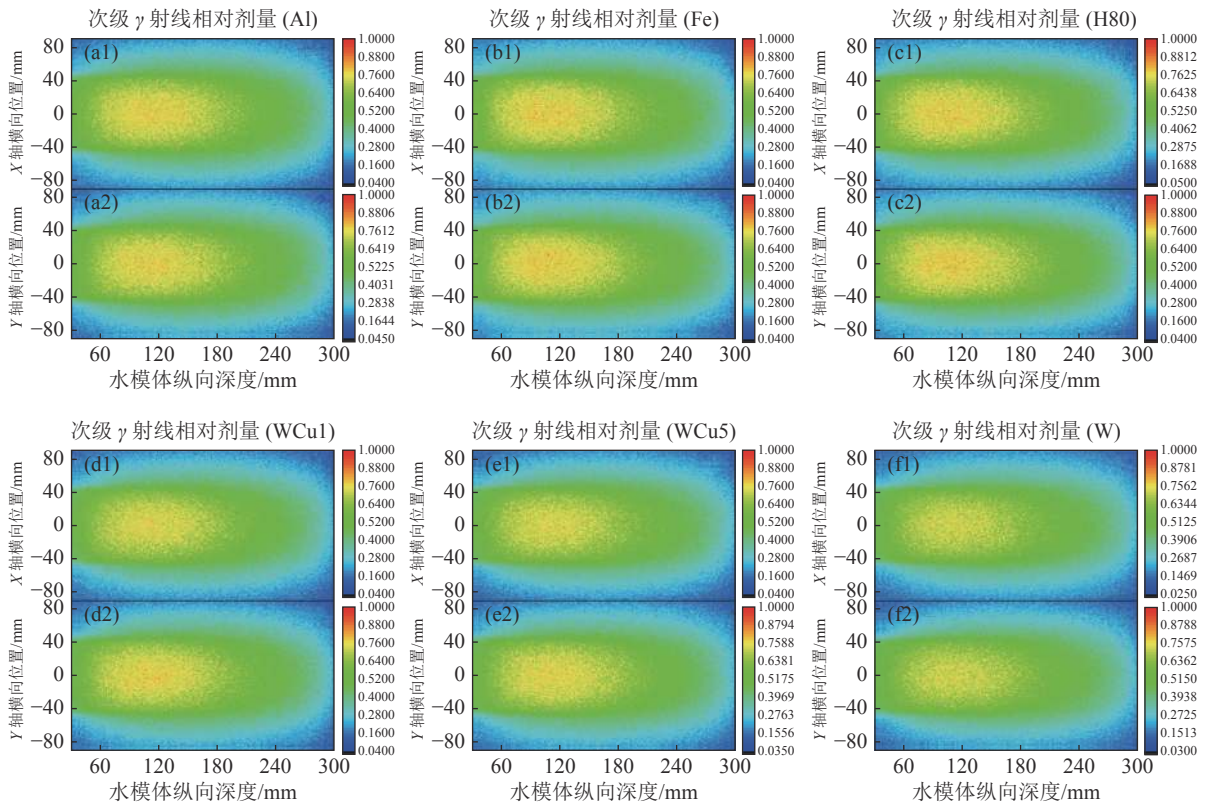


图 5 (在线彩图) 部分 MLC 材料产生的次级 γ 射线在水模体中的二维剂量分布

(a~f) 代表 MLC 叶片材料 Al、Fe、H80、WCu1、WCu5、W；1, 2 分别代表 MLC 叶片材料产生的次级 γ 射线在水模体中的 X-Z 面二维剂量分布与 Y-Z 面二维剂量分布。

区。钨与钨铜合金材料比其他材料产生的次级 γ 射线，在水模体中沉积的剂量要少。不同比例的钨铜合金材料之间产生的次级 γ 射线，在水模体中的分布相差不大。

图 6 是由不同材料叶片的 MLC 对 400 MeV/u 碳离子束照射形成射野时，产生的次级中子在水模体中沉积的二维相对剂量分布。可以看到，随着 MLC 叶片材料原子序数逐渐增加，其产生的次级中子在水模体中沉积的剂量也在不断增加，与其他材料相比，钨材料与钨铜合金材料产生的次级中子在水模体中沉积的剂量更多，且由于次级中子与水发生弹性散射与非弹性散射作用，使得次级中子较多分布在离子束在水模体中贯穿时的入射端。

3.2 临床治疗相关情况下产生的次级粒子平均当量剂量

根据 2.4 节中次级粒子当量剂量的计算方法可计算得到，当模拟粒子数为 10^7 时，不同 MLC 叶片材料产生的次级中子与次级 γ 射线在水模体中沉积的平均当量剂量。但是在模拟粒子数为 10^7 时，400 MeV/u 碳离子束经 RF 形成的 SOBP 处的生物剂量并未达到临床治疗情况下典型的处方剂量 (如 4 Gy(RBE))。为了给出临床

治疗相关情况下不同 MLC 叶片材料产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量，本文计算了当 SOBP 的生物剂量达到 4 Gy(RBE) 时 (即 SOBP 中点的物理吸收剂量为 2.38 Gy)，次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量。当 SOBP 的生物剂量为 4 Gy(RBE) 时，不同 MLC 叶片材料产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量如表 3 所列。

由表 1 与表 3 中的数据可得到不同 MLC 叶片材料的厚度与产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量分布，如图 7 所示。图 7(a) 显示，不同密度与种类的金属作为 MLC 叶片材料时所需要的厚度差别很大，其中 Al、Fe、Ni、Cu 及铜锌合金作为 MLC 叶片材料时，所需的厚度基本都处于 10 cm 左右 (Al 厚度 27 cm，图中未画出)，而钨铜合金与钨材料作为 MLC 叶片材料时，厚度从 6.5~8.6 cm 变化。图 7(b) 显示，Al、Fe、Ni、Cu 及铜锌合金作为 MLC 叶片材料时，产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量较小。钨铜合金与钨材料比其他金属材料产生更多的次级粒子平均当量剂量，且随着钨铜合金中钨含量的增加，产生的次级粒子平均当量剂量也在逐渐增加。

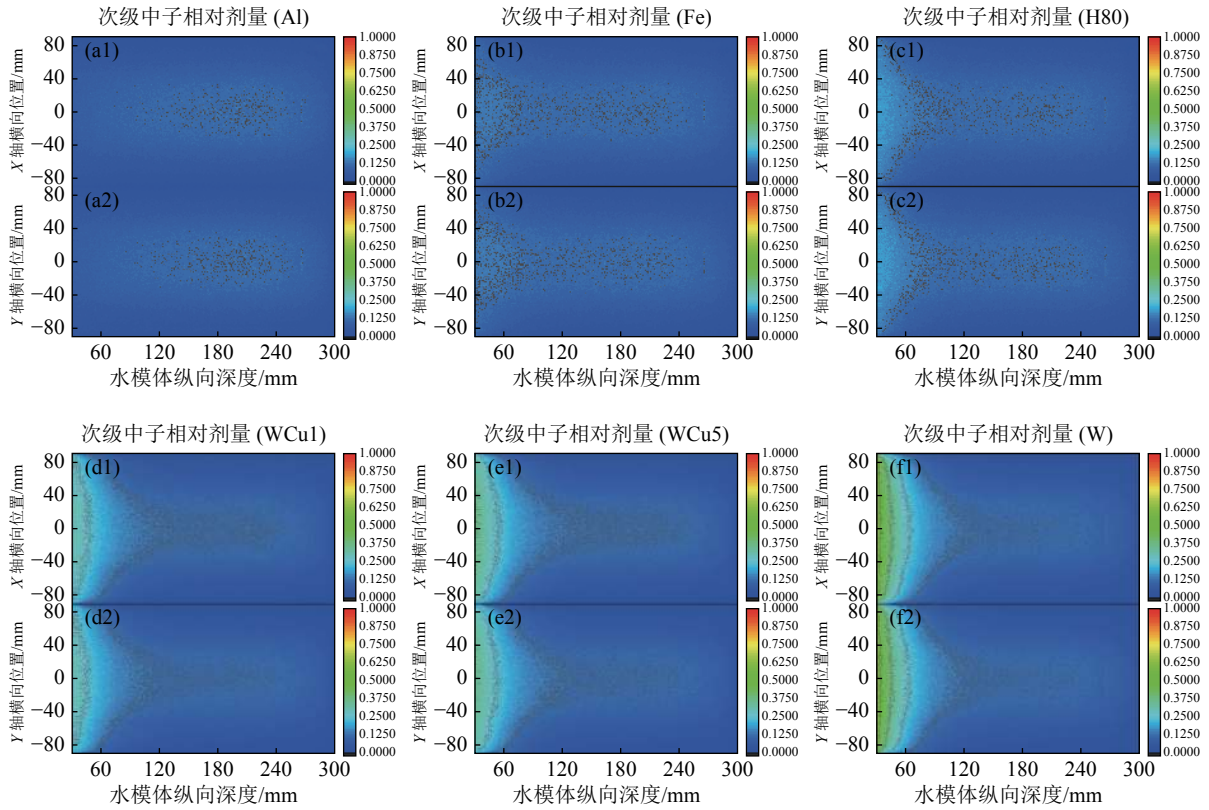


图 6 (在线彩图) 部分 MLC 材料产生的次级中子在水模体中的二维剂量分布

(a~f) 代表 MLC 叶片材料 Al、Fe、H80、WCu1、WCu5、W；1、2 分别代表 MLC 叶片材料产生的次级中子在水模体中的 X-Z 面二维剂量分布与 Y-Z 面二维剂量分布。

表 3 当 SOBP 的生物剂量为 4Gy(RBE) 时不同 MLC 叶片材料产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量

MLC 叶片材料	中子平均当量剂量/(10 ⁻⁴ Sv)	γ 射线平均当量剂量/(10 ⁻⁵ Sv)	次级粒子平均当量剂量/(10 ⁻⁴ Sv)	MLC 叶片材料	中子平均当量剂量/(10 ⁻⁴ Sv)	γ 射线平均当量剂量/(10 ⁻⁵ Sv)	次级粒子平均当量剂量/(10 ⁻⁴ Sv)
Al	2.106 0	4.478 3	2.553 8	SS304	2.376 7	4.464 2	2.823 1
Fe	2.371 2	4.482 5	2.819 4	WCu1	2.961 6	4.323 3	3.394 0
Ni	2.258 6	4.378 3	2.696 4	WCu2	3.012 0	4.310 0	3.443 0
Cu	2.521 5	4.500 8	2.971 6	WCu3	3.067 4	4.296 7	3.497 1
H59	2.486 1	4.491 7	2.935 2	WCu4	3.124 3	4.287 5	3.552 9
H62	2.495 2	4.505 0	2.945 7	WCu5	3.186 0	4.278 3	3.613 8
H68	2.500 7	4.505 0	2.951 2	WCu6	3.250 0	4.269 2	3.676 9
H80	2.511 6	4.496 7	2.961 3	WCu7	3.305 9	4.241 7	3.730 1
H85	2.519 7	4.510 0	2.970 8	WCu8	3.391 3	4.224 2	3.813 7
H90	2.521 1	4.505 0	2.971 6	WCu9	3.452 6	4.219 2	3.874 5
H96	2.524 8	4.514 2	2.976 2	W	3.627 9	4.187 5	4.046 7

4 讨论

本文运用蒙特卡罗方法模拟计算了大多数常见的可用作 MLC 叶片材料。从模拟的结果可以看出，Al、Fe、Ni、Cu 及铜锌合金产生的次级粒子总当量剂量都远远小于钨铜合金与钨材料所产生的总当量剂量，因而使用 Al、Fe、Ni、Cu 及铜锌合金等材料作为 MLC 的

叶片会大大减少次级粒子的产生。当 SOBP 的生物剂量为临床治疗相关的 4Gy(RBE) 时，铝金属材料相比于钨金属材料产生的次级粒子，在水模体中沉积的平均当量剂量最大可减少 1.4929×10^{-4} Sv。考虑到束流配送系统中的 MLC 叶片在动态放射治疗中需要随着照射过程中靶区的形状划分精确移动，以便治疗体积都获得精

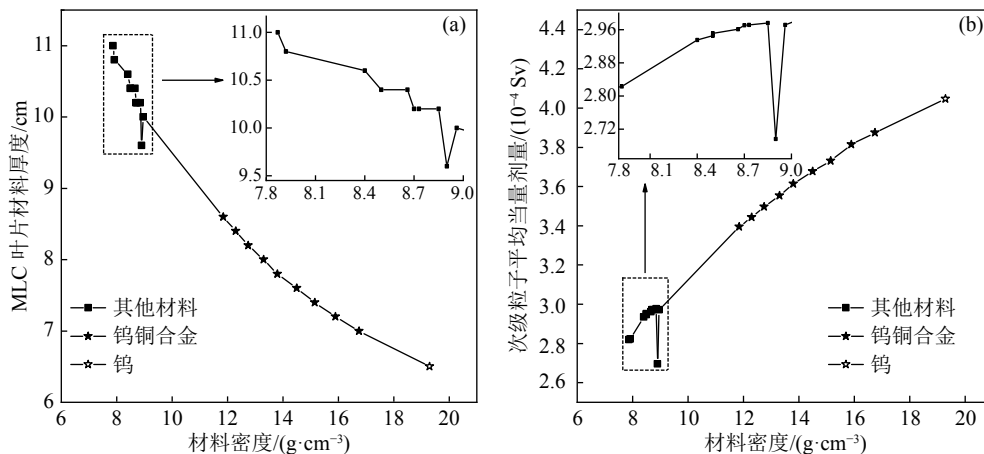


图7 不同MLC叶片材料厚度与产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量分布

(a) 为不同MLC叶片材料对应的厚度; (b) 为不同MLC叶片材料产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量。

确的照射剂量^[18]。MLC叶片越厚对叶片移动的精确性影响也越大,因此作为MLC叶片材料就要其厚度尽可能小。从图7(a)中可以看出,Al、Fe、Ni、Cu及铜锌合金的厚度远远大于钨铜合金与钨材料。故虽然Al、Fe、Ni、Cu及铜锌合金材料产生的次级粒子在水模体中沉积的平均当量剂量非常少,但考虑其厚度太厚会使得在照射中控制MLC叶片运动的难度增大,故在采用被动式束流配送系统的碳离子放射治疗当中作为MLC叶片材料排除了这几种金属材料,剩下只考虑钨铜合金材料与钨材料作为候选。

钨合金的物理性能:密度高,熔点高,硬度高,极限拉伸强度高,易切削,弹性模量高,能有效地吸收X射线和 γ 射线(X射线和 γ 射线的吸收比铅高30%~40%),无毒,无污染,耐腐蚀性强,具有良好的导热性和导电性,价格合理。钨合金与传统的屏蔽材料相比,屏蔽性能要好很多。钨合金与铅的屏蔽性能相当,但是由于其密度高,体积比铅小1/3。钨合金屏蔽件是屏蔽的首选,可用于医疗、工业等领域^[19]。本文模拟的钨铜合金材料中钨的含量从50%~90%,从图7(b)中可以发现,当钨含量不断升高时次级粒子沉积的剂量也在不断升高。考虑到作为MLC叶片材料对于材料厚度以及产生次级粒子当量剂量的要求,钨铜合金材料与钨材料更能满足MLC叶片材料对于厚度的要求。对于MLC叶片材料的选择,则需根据实际情况对于MLC叶片厚度以及次级粒子的要求而定。

5 结论

本文利用GATE蒙特卡罗软件模拟计算了在基于被动式束流配送系统的碳离子放疗中,选用不同材料的MLC叶片时,产生的次级中子与 γ 射线在水模体中

沉积的当量剂量。模拟结果显示,MLC叶片作为水模体中产生次级粒子的主要来源之一,不同的金属材料作为MLC叶片材料时产生的次级粒子在水模体中沉积的当量剂量及空间分布都有明显的区别。碳离子束通过MLC构形的射野,在水模体中产生的次级中子与水发生弹性散射与非弹性散射,使得次级中子较多分布在离子束在水模体中贯穿时的入射端。次级 γ 射线较为均匀地分布在整个水模体中,且较多分布在具有SOBP射野在水模体中贯穿时的坪区。Al、Fe、Ni、Cu以及铜锌合金产生的次级粒子在水模体中沉积当量剂量很低,但是由于其作为MLC叶片厚度太厚等原因被排除。在现用的钨铜合金及钨金属材料中,模拟计算发现,随着钨含量的增加,产生的次级粒子在水模体中沉积的当量剂量也呈逐渐增加的趋势。对于MLC叶片材料的选择,则需根据放疗中对叶片厚度以及次级粒子的要求来确定。

参考文献:

- [1] LI Q, WEI Z Q. *Nuclear Physics Review*, 1999, 16(4): 262. (in Chinese)
(李强, 卫增泉. *原子核物理评论*, 1999, 16(4): 262.)
- [2] HELYER S J, HEISIG S. *Radiotherapy and Oncology*, 1995, 37(1): 61.
- [3] JOHN N, LGOR S. *Cancer Management and Research*, 2015, 7: 1.
- [4] BURT L M, YING J, POPPE M M, et al. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2015, 93(3): 107.
- [5] CHU W T, LUDEWIGT B A, RENNER T R. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(8): 2055.
- [6] ROBERT C, DEDES G, BATTISTONI G, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2013, 58(9): 2879.
- [7] JARLSKOG C Z, PAGANETTI H. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2008, 72(1): 228.

- [8] HALL E J. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2006, 65(1): 1.
- [9] LOW D A, SOHN J W, KLEIN E E, et al. *Medical Physics*, 2001, 28(5): 752.
- [10] CORVÒ R, FOPPIANO F, ORSATTI M, et al. *Radiologia Medica*, 1997, 94(5): 512.
- [11] TAKAHASHI S. *Acta Radiologica Diagnosis*, 1965, 242: 1.
- [12] BREWSTER L, MOHAN R, MAGERAS G, et al. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 1995, 33(5): 1081.
- [13] JIANG H, WANG B, XU X G, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2005, 50(18): 4337.
- [14] YONAI S, MATSUFUJI N, KANAI T. *Medical Physics*, 2009, 36(10): 4830.
- [15] CARRIER J F, ARCHAMBAULT L, BEAULIEU L, et al. *Medical Physics*, 2004, 31(3): 484.
- [16] Densities of Metals and Elements Table[EB/OL]. [2019-09-30]. https://www.engineersedge.com/materials/densities_of_metals_and_elements_table_13976.htm.
- [17] Tungsten Copper Alloy [EB/OL]. [2019-09-30]. <https://www.tungsten.com/wp-content/uploads/2014/02/tungsten-copper-alloy.pdf>.
- [18] JERAJ M, ROBAR V. *Radiol Oncol*, 2004, 38(3): 235.
- [19] YIH S W H, WANG C T. *Tungsten-Sources, Metallurgy Properties and Application*[M]. New York: Plenum Press, 1979: 340.

Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation

ZHANG Xiaofang^{1,2,3,4}, MENG Qianqian^{1,2,3,4}, DAI Zhongying^{1,2,3,4}, CHEN Weiqiang^{1,2,3,4},
LIU Xinguo^{1,2,3,4,†}, LI Qiang^{1,2,3,4,†}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Key Laboratory of Heavy Ion Radiation Biology and Medicine of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

3. *Key Laboratory of Basic Research on Heavy Ion Radiation Application in Medicine, Gansu Province, Lanzhou 730000, China;*

4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: In carbon ion radiotherapy, secondary particles produced through the interaction of carbon ion beam with the treatment head devices and the patient's body can reach many areas in the patient's body. Among the secondary particles, the yield of neutrons and γ -rays is largest. Without affecting the beam delivery function, reducing secondary neutrons and γ -rays produced in carbon ion radiotherapy is very important to decrease the normal tissue complications and secondary cancer risk after radiotherapy. In the present work, the Monte Carlo method was used to calculate the dose and spatial distributions of secondary neutrons and γ -rays deposited in water when multi-leaf collimators (MLC) made from different material leaves were adopted to form a typical 10 cm \times 10 cm square irradiation field for 400 MeV/u carbon ion beam. The simulation results showed that the secondary neutrons produced were mainly distributed at the incident end in the water phantom when the carbon ion beam passed through the MLC, while the secondary γ -rays were uniformly distributed in the entire water phantom and more dose of the secondary γ -rays appeared in the plateau when the irradiation field with spread-out Bragg peak (SOBP) travelled in the water phantom. The selection of MLC leaves should be determined according to the actual conditions of MLC leaves thickness and secondary particle equivalent dose requirements. The simulation study presented in this paper provides scientific evidence for the material selection of MLC leaves and other components in carbon ion radiotherapy using passive beam delivery system.

Key words: carbon ion radiotherapy; passive beam delivery system; secondary particle; dose distribution; Monte Carlo simulation

Received date: 30 Sep. 2019; Revised date: 06 Nov. 2019

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0108500); National Natural Science Foundation of China (11875299, 61631001, U1532264)

† Corresponding author: LIU Xinguo, E-mail: liuxinguo@impcas.ac.cn; LI Qiang, E-mail: liqiang@impcas.ac.cn.