

医用发泡胶对粒子剂量影响的 模拟研究

肖 杨^{1,2} 张庆贤¹

1(成都理工大学 成都 610000)

2(重庆医科大学附属第二医院 重庆 400010)

摘要 目前发泡胶在放疗定位中运用广泛,但其对加速器基础剂量影响并无相关报道。研究不同厚度的发泡胶在医用电子直线加速器均整(Flattening Filter, FF)和非均整(Flattening Filter Free, FFF)两种模式对粒子剂量的影响,为临床使用提供参考。利用蒙特卡罗程序EGSnrc进行建模和计算,首先根据厂家提供的发泡胶参数建立PEGS4材料库与截面数据,利用BEAMnrc建立Varian True Beam系列不同射野的加速器机头模型并进行计算,生成对应的相空间文件;然后利用BEAMdp分析不同模型结构产生的射线能谱、能量注量的差异。最后利用Dosexyznrc计算分析不同厚度发泡胶在固定射野和固定厚度发泡胶在不同射野对粒子剂量的影响。结果表明:在有发泡胶时两种模式下的百分深度剂量(Percentage Depth Dose, PDD)都有不同程度的向前移动的现象,导致表面剂量增加,但对射线则影响不大。FF模式下当发泡胶厚度 ≤ 5 cm时,同一深度最大剂量偏差 $\leq 2\%$,而当发泡胶厚度达到10 cm时,同一深度最大剂量偏差高达6%,且两种模式下PDD₀都超过90%。在两种模式下发泡胶对射野离轴比和半影都有较大影响,射野越小对粒子剂量影响也越小。临床使用发泡胶时尽量将厚度控制在5 cm以内,当需要使用较厚发泡胶时,建议使用FFF模式;使用立体定向放射治疗时发泡胶对剂量影响不大。

关键词 发泡胶, 加速器, 剂量, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL53

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090302

Monte Carlo simulation of the influence of medical foam on particle dose

XIAO Yang^{1,2} ZHANG Qingxian¹

1(Chengdu University of Technology, Chengdu 610000, China)

2(The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

Abstract [Background] At present, styrofoam is widely used in radiotherapy positioning, but there is no relevant report on its impact on accelerator basic dose. [Purpose] This study aims to investigate the effects of different thicknesses of styrofoam on the particles dose of medical electronic linear accelerator flattening filter (FF) and flattening filter free (FFF), and provide guidance for clinical use. [Methods] The Monte Carlo program EGSnrc was used for modeling and calculation. First of all, the PEGS4 material library and cross-section data were established according to the parameters of the styrofoam provided by the manufacturer, and the BEAMnrc was used to establish accelerator head models of different shooting fields of Varian True Beam series and perform calculations to generate corresponding phase space files. Then, the BEAMdp was employed to analyze the differences in ray energy spectrum

第一作者: 肖杨, 男, 1992年出生, 2016年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器技术

通信作者: 张庆贤, E-mail: 512598780@qq.com

收稿日期: 2020-04-05, 修回日期: 2020-05-09

First author: XIAO Yang, male, born in 1992, graduated from Chengdu University of Technology in 2016, master student, focusing on accelerator technology

Corresponding author: ZHANG Qingxian, E-mail: 512598780@qq.com

Received date: 2020-04-05, revised date: 2020-05-09

and energy fluence generated by different model structures. Finally, the effect of different thickness foams on the fixed field and fixed thickness foams on the field was calculated and analyzed by using Dosexyznrc. **[Results]** In the presence of styrofoam, the percentage depth dose (PDD) in both FF and FFF modes has a phenomenon of moving forward to varying degrees, resulting in an increase in the surface dose whilst little effect on the quality of the radiation. In the FF mode, the maximum dose deviation at the same depth is $\leq 2\%$ when the thickness of the foam is ≤ 5 cm. When the thickness of the form reaches 10 cm, the maximum dose deviation at the same depth increases to 6%, and the PDD0 exceeds 90% in both modes. In both modes, the presence of styrofoam has a greater effect on the off-axis ratio and penumbra of the shot, the smaller the shooting field, the smaller the effect on the particle dose. **[Conclusions]** When using styrofoam for clinical purposes, try to control the thickness within 5 cm, and FFF mode is recommended for more thicker styrofoam. Styrofoam has little effect on dose of stereotactic radiation therapy.

Key words Styrofoam, Accelerator, Dose, Monte Carlo simulation

目前发泡胶在放疗体位固定中运用越来越广,黎文玲^[1]、黄清秀^[2]等报道了发泡胶相对于普通树脂头枕的摆位精度更高,原因为发泡胶采用主动塑性的方式形成个性化的固定装置,但是正是由于该特点,部分特殊体位患者,如脊柱弯曲、受肿瘤压迫不能平躺等使用的发泡胶相对较厚。由于发现在使用发泡胶进行治疗的患者其皮肤反应较其他使用普通树脂头枕患者更重,且无法预估发泡胶厚度对患者实际接受剂量的影响,覃仕瑞^[3]等通过治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)比较了发泡胶对于鼻咽癌剂量的影响,结果表明:使用发泡胶对靶区剂量和正常组织均有不同程度的降低,但在允许误差范围之内。通过对本科室15例发泡胶厚度实际测量,显示最厚在颈部C3-C4位置约8 cm,最薄在T6位置约3 cm,平均厚度5 cm,1例脊柱弯曲肺部肿瘤患者最厚达15 cm。所以关于发泡胶厚度对粒子剂量影响的探究显得尤为重要,而实际测量受制作均匀性、厚度准确性与测量设备的限制,所以通过蒙特卡罗方法来进行分析计算,金浩宇^[4]、Mohan^[5]等已经验证蒙特卡罗方法在模拟计算加速器产生的粒子剂量方面的可行性与优势,而且可从多方面、多角度等原始数据反映粒子剂量的变化。

首先对发泡胶的物理性质进行描述和建模,发现其是一种具有发泡特性和粘结特性的胶,其材质主要是聚氨酯预聚体(Polyurethane Foam Sealing Agent, PU FOAM),其化学分子式为 $(C_{10}H_8N_2O_2C_6H_{14}O_3)_x$,密度为 $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,实际使用时通过A料(异氰酸酯)与B料(复合聚醚类多元醇)混合,然后与空气反应,迅速发泡冷却定型,时间约为10 min,在发泡过后由于受发泡均匀性的影响,通过实际测量20组定型后的发泡胶,显示其在密度范围为 $0.09 \sim 0.11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,所以本次模拟取均值 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。目前发泡胶都用于头、颈和胸部的固定,而大脑、肺部和肝部肿瘤又都采用立体定向放射治疗,所以研究不同厚发泡胶

对加速器不同模式剂量影响对临床使用有一定参考作用。

1 材料与方法

1.1 模型建立

使用加拿大国家研究院(National Research Council of Canada, NRCC)开发的EGSnrc系列程序^[6]进行模拟计算,首先建立发泡胶的材料数据库,利用EGSgui通过PEGS Data生成相应材料的反应截面以及系统能够识别的材料数据;然后利用BEAMnrc^[7]建立加速器模型(图1),本次加速器模型采用Varian公司(美国)提供的True Beam系列参数进行建模,机头主要由靶材料、初级准直器、均整器、监测电离室^[8-9]、反射镜、次级准直器、多页光栅^[10]和十字膜组成,同时首次将发泡胶模型纳入到加速器结构底端,保证相空间结构为100 cm,利用生成的相空间文件和BEAMdp进行能谱(Spectral Distribution, SD)和能量注量(Energy Fluence Distribution, EFD)计算,再利用Dosexyznrc^[11]进行体素能量沉淀计算,最后利用statdose进行数据提取。

1.2 参数设置

选择在源皮距SSD=100 cm处生成加速器相空间文件,射野大小 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,BEAMnrc模拟粒子数 10^9 个,采用进行高斯分布半峰全宽FWHM=0.075 cm的6 MeV^[12-13]电子源,利用辐射光子分裂技术(Bremstrahlung Photon Splitting, BPS)提高剂量产生效率,全局范围的电子截止能量(E_{cut})=0.7 MeV,全局范围的光子截止能量(P_{cut})=0.01 MeV,边界穿越算法(Boundary Crossing Algorithm, BCA)采用PRESTA-I以提高高能粒子的利用效率,利用直接韧致辐射(Directional Bremsstrahlung Splitting, DBS)技术减小误差^[5],以生成的相空间文件作为入射源,

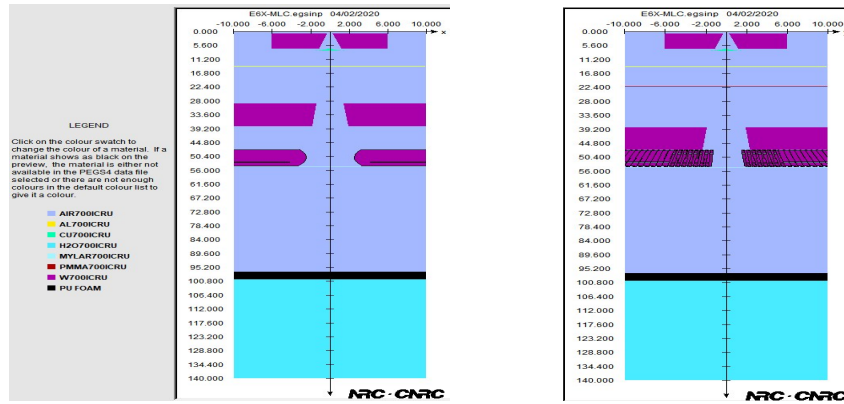


图1 模型结构(坐标单位:cm)
Fig.1 Model structure (Coordinate unit: cm)

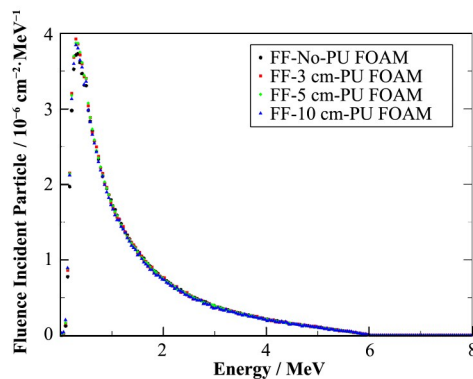
其余采用默认设置。Dosexyznrc 设置水箱尺寸为 20 cm×20 cm×40 cm,体素大小为 0.1 cm×0.1 cm×0.2 cm,水箱位置与发泡胶相接,模拟粒子数 10^9 个。引入深度剂量衰减百分(Dose Reduction Percentage, DRP)^[14]。

$$DRP = PDD(E, FS, \rho_{\text{water}}) - PDD(E, FS, \rho_{\text{PU FOAM}})$$

表示同一深度的PDD差值,差值绝对值越大表示该厚度对剂量影响越大。

2 结果

2.1 不同厚度发泡胶对机头结构能谱和能量注量的影响



的影响

首先比较了两种模式在 10 cm×10 cm 射野下对 SD 和 EFD 的影响,图 2、3 显示两种模式下有发泡胶对于 SD 不同能量区域所占份额都有不同程度的减小,高份额对应能量区域并无明显前移或者后移现象,但是可看出 FF 模式在 0.5~2 MeV 区域受厚度影响较 FFF 明显,而该区域正是射线能量份额最高和平均能量的区域。同时由两种模式 EFD 结果可以看出,都有增加低能射线能量注量的现象,射野范围内的粒子注量随发泡胶厚度的增加呈逐渐降低的趋势,且 FF 模式较 FFF 更加明显。

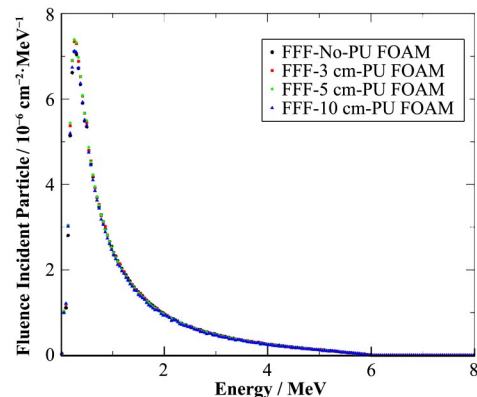


图2 不同厚度发泡胶对X射线能谱的影响
Fig.2 Effect of different thickness of styrofoam on X-ray spectral distribution

2.2 不同厚度发泡胶对射野剂量的影响

由两种模式在 10 cm×10 cm 固定射野下水中 PDD 曲线(图 4、5,左)可以看出,随着厚度增加,PDD 曲线都有向前移动的趋势,PDD₀ 明显增大,表 1 显示最大高达 96%, D_{max} 显著降低, D_{20}/D_{10} 变化不大,说明对射线质影响不大,但在实际治疗过程当中会增加发泡胶处的皮肤剂量。FF 模式下,当发泡胶厚度 ≤ 5 cm 时,最大 DRP 为 1%(一般分析建成区域后

方),低于允许剂量误差 2%,对应深度为水下 5 cm;当发泡胶厚度为 10 cm 时,最大 DRP 为 6%,对应深度为 4.8 cm,不同厚度 DRP 差值较大处位于 2~10 cm。选择在水下 DRP 较大处进行 Profile 分析,由水下 5 cm、10 cm 处 Profile(图 4、5,右)结果可以看出,发泡胶对于射野的平坦度和半影都影响较大,随射野深度的增加影响逐渐减小。FFF 模式下在发泡胶 ≤ 5 cm 的情况下对 PDD 的影响普遍较 FF 模式

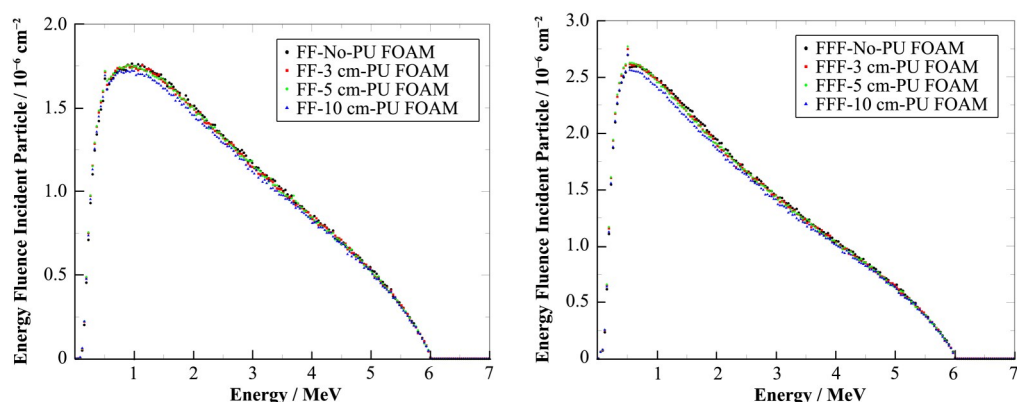


图3 不同厚度发泡胶对X射线能量注量的影响

Fig.3 Effect of different thickness of styrofoam on X-ray energy fluence distribution

表1 不同厚度发泡胶对射野剂量的影响

Table 1 Effects of styrofoam with different thicknesses on dose

	剂量参数 Dose parameters							
	PDD ₀ / %		D _{max}		D ₂₀ /D ₁₀		DRP / %	
	FF	FFF	FF	FFF	FF	FFF	FF	FFF
No-PU FOAM	47	63	1.35	1.5	0.55	0.52	—	—
3 cm-PU FOAM	82	86	1.15	1.2	0.55	0.52	1	2
5 cm-PU FOAM	88	92	0.75	0.5	0.55	0.52	1	2
10 cm-PU FOAM	95	96	0.35	0.3	0.54	0.51	6	4

大,最大DRP为2%,对应深度为3 cm,但是当发泡胶厚度为10 cm时,最大DRP为4%,对应深度为2.7 cm,不同厚度DRP差值较大处位于水下1.5~7 cm。由水下3 cm、5 cm处Profile结果可以看出,发泡胶对于射野的平坦度和半影都影响较大,随射野深度的增加影响逐渐减小。

2.3 不同射野下发泡胶对剂量的影响

由表2及图6~图11可以看出,随着射野的减小,对PDD和Profile的影响也在降低,影响较大主

表2 厚度为5 cm的发泡胶在不同射野下对剂量的影响

Table 2 Effect of 5 cm thick styrofoam on dose under different shooting fields

射野 Shooting fields	剂量参数 Dose parameters							
	PDD ₀ / %		D _{max}		D ₂₀ /D ₁₀		DRP / %	
	FF	FFF	FF	FFF	FF	FFF	FF	FFF
5×5 No-PU FOAM	48	50	1.45	1.32	0.54	0.53	—	—
5 cm-PU FOAM	89	90	0.73	0.72	0.54	0.53	1	1
3×3 No-PU FOAM	44	49	1.30	1.30	0.51	0.50	—	—
5 cm-PU FOAM	86	90	0.9	0.70	0.51	0.50	0.8	0.8
1×1 No-PU FOAM	46	49	1.10	1.10	0.50	0.50	—	—
5 cm-PU FOAM	73	76	0.90	0.90	0.50	0.50	0.5	0.5

要体现在PDD₀和D_{max}。DRP偏差均在允许误差范围之内,射野为5 cm×5 cm时最大DRP为1%,对应深度均为3 cm,射野为3 cm×3 cm和1 cm×1 cm时最大DRP分别为0.8%和0.5%,对应深度均为2 cm。DRP差异集中在水下1~5 cm,在水下13 cm后,PDD趋于一致。射野为5 cm×5 cm时选择在水下3 cm处

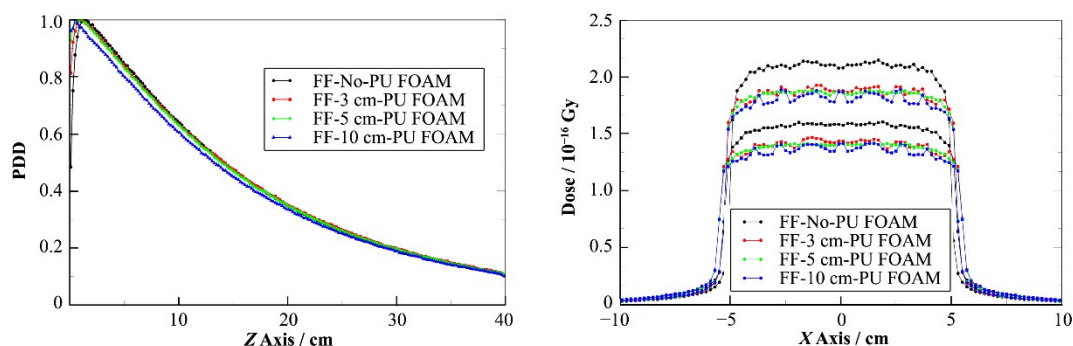


图4 FF模式下不同厚度发泡胶对射野剂量的影响

Fig.4 The effect of different thickness of styrofoam on the field dose in FF mode

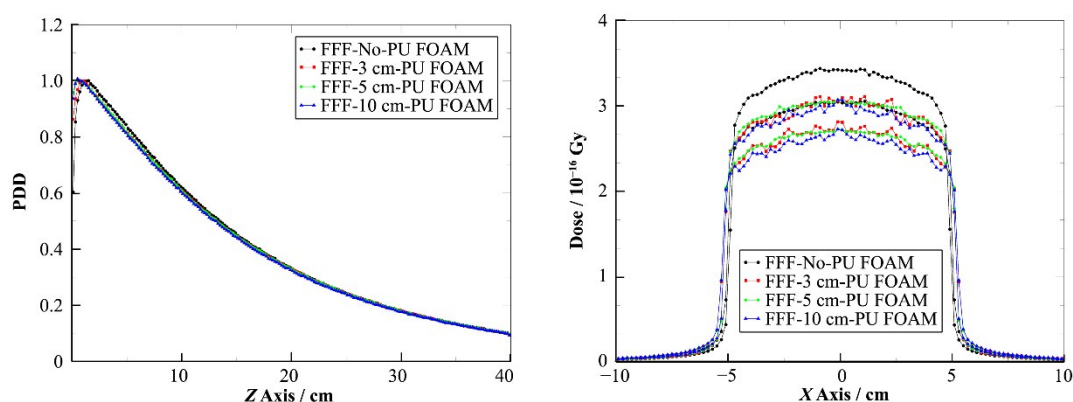


图5 FFF模式下不同厚度发泡胶对射野剂量的影响

Fig.5 The effect of different thickness of styrofoam on the field dose in FFF mode

进行 Profile 比较,结果显示射野平坦度和对称性并无明显差异,半影稍有增大;射野为 3 cm×3 cm 和 1 cm×1 cm 时选择在水下 2 cm 处进行 Profile 比较,

结果显示射野平坦度、对称性和半影并无明显差异。

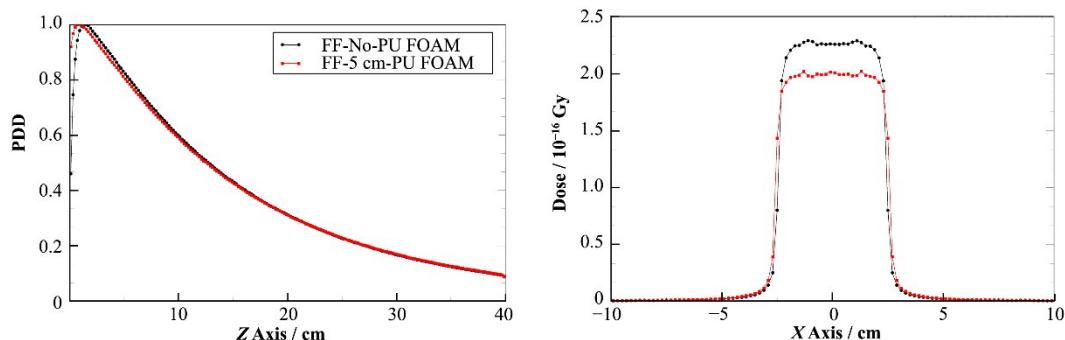


图6 FF模式下射野为 5 cm×5 cm 时 5 cm 发泡胶对剂量的影响

Fig.6 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is 5 cm × 5 cm in FF mode

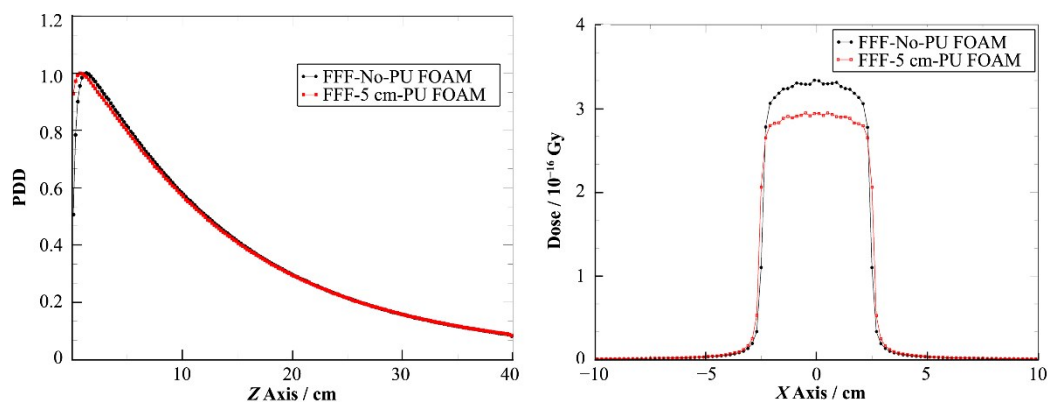


图7 FFF模式下射野为 5 cm×5 cm 时 5 cm 发泡胶对剂量的影响

Fig.7 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is 5 cm × 5 cm in FFF mode

2.4 结果分析

综上所述,发泡胶对射线质影响不大,使用发泡胶时会使 PDD 曲线向前移动,主要体现在增加表面剂量,降低同一深度接收剂量。图 12 显示了两种不同模式下随厚度增加 PDD₀ 的差值与 DRP 值的变化趋势。总的可以看出,FF 模式较 FFF 模式更大,尤

其体现在较厚发泡胶。主要原因考虑为 FF 模式下使用均整器过滤掉了 SD 的低能部分,提高了射线的平均能量,增加了康普顿散射与电子对效应所占概率,从而增加了散射线与次级电子带来的能量沉淀。但该分析仅限于 6 MeV 电子直线加速器产生的 X 射线,对于高能 X 射线或带电粒子有待进一步探究。

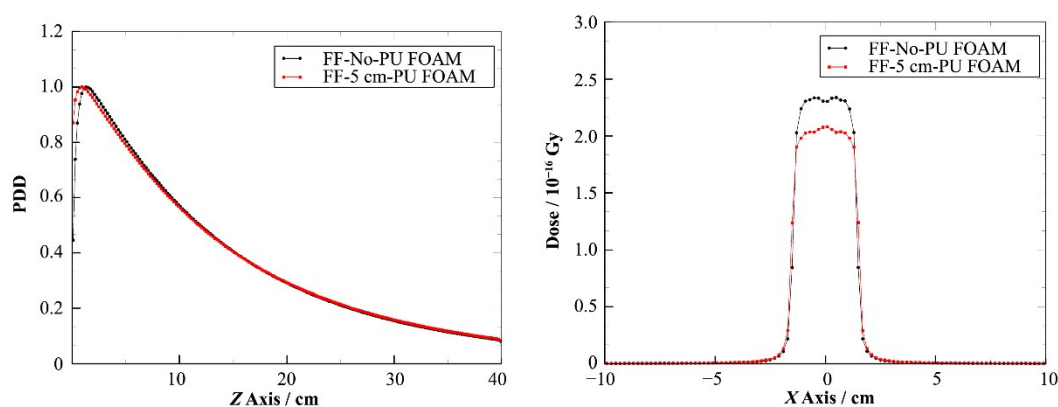


图8 FF模式下射野为3 cm×3 cm时5 cm发泡胶对剂量的影响
Fig.8 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is 3 cm × 3 cm in FF mode

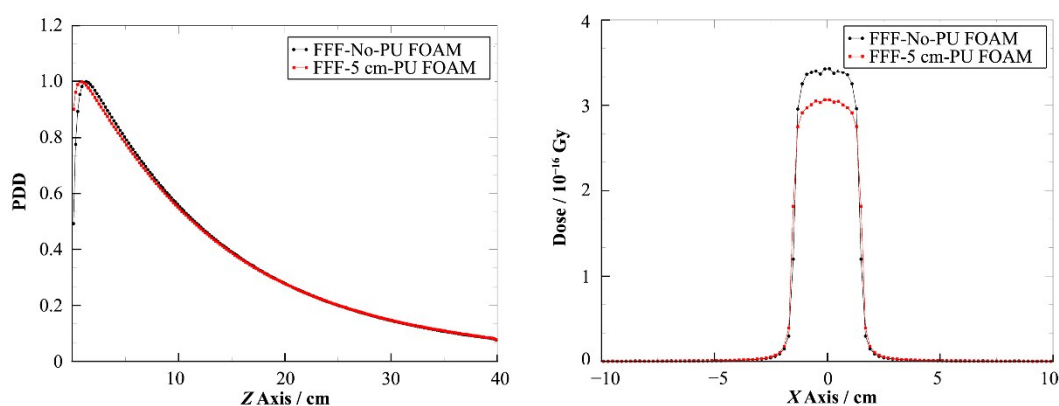


图9 FFF模式下射野为3 cm×3 cm时5 cm发泡胶对剂量的影响
Fig.9 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is 3 cm × 3 cm in FFF mode

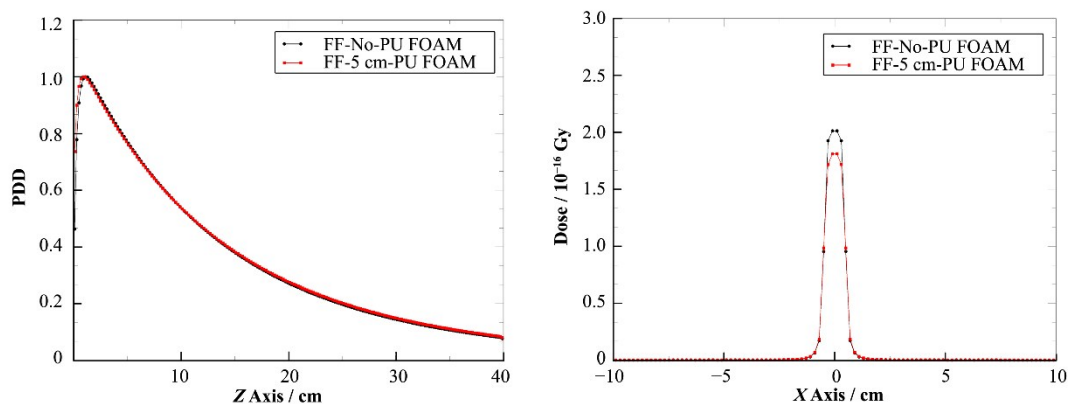


图10 FF模式下射野为1 cm×1 cm时5 cm发泡胶对剂量的影响
Fig.10 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is 1 cm × 1 cm in FF mode

3 讨论

目前国内外有不少报道比较了发泡胶与其他固定装置的摆位精度,结果表明:发泡胶在体位固定方面具有一定优势,为精准放射治疗起了一定的推动作用,但是却鲜有关于其对基础剂量影响的报道。不同类型的材料对于患者接受剂量的影响主要体现在材料的密度和材料的元素构成^[18],但是后者往往被忽略,潜意识认为低密度材料对射线能量沉淀影

响不大。尽管本次分析选取的材料厚度和射野大小不具有普遍的代表性,但是也能看出其厚度变化对剂量的影响趋势。可以看出随发泡胶使用厚度的增加而不同程度地降低靶区剂量,并提高皮肤剂量,同时对靶区剂量的适形度和均匀性有一定影响。所以建议在靶区较大时,发泡胶厚度控制在5 cm以内,如果因患者体位需求发泡胶较厚时,应尽量选择FFF模式。均整器的使用在于提高较大射野的平坦

度,从而提高靶区剂量分布的均匀性,但是在小野剂量方面,平坦度的意义不大,为立体定向放射治疗量身定做的FFF模式主要优点在于大大提高了剂量率,以满足单次或多次大剂量的照射,减少治疗周

期,这也将是未来放射治疗发展的趋势。而立体定向放射治疗由于单次接受剂量较大,所以对于患者体位固定精度要求较高,所以在针对于小野的立体定向放射治疗时采用发泡胶固定是较好的选择。

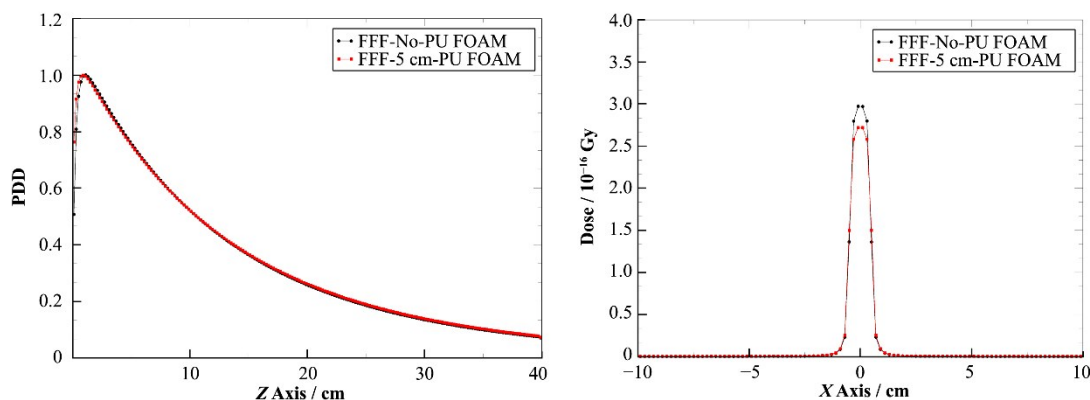


图 11 FFF 模式下射野为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 时 5 cm 发泡胶对剂量的影响
Fig.11 The effect of 5 cm styrofoam on the dose when the shooting field is $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ in FFF mode

在计划设计时,如果 TPS 能够识别发泡胶电子密度则可以考虑增加相应射野权重进行优化修正,如果 TPS 不能够识别就应该计算不同厚度发泡胶对射线影响系数,并生成相应模板导入 TPS 进行计算^[19-20]。由于目前越来越多的材料运用到放射治疗体位固定,其对射线的影响无法直接计算,也并非所有医院都有三维水箱能够实际测量。主要目的在于利用蒙特卡罗方法比较发泡胶对剂量的影响,同时也在于向一些条件不允许的医院分享如何利用开源的软件进行加速器建模和探索不同材料对于射线剂量的影响。

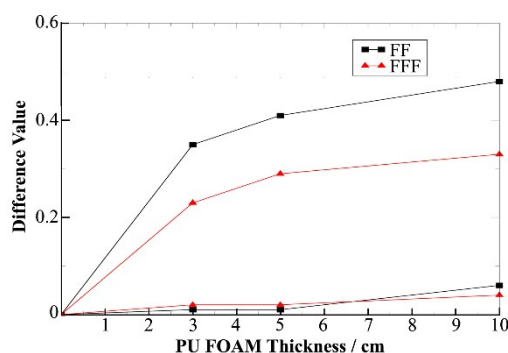


图 12 加速器两种不同模式下随发泡胶厚度增加对粒子剂量的影响趋势
Fig.12 The influence trend of the particle dosage with the increase of foam thickness under two different accelerator modes

参考文献

- 黎文玲. 头颈部肿瘤放疗患者发泡胶固定与常规体位固定技术的比较[J]. 医疗装备, 2018, 31(8): 35-36. DOI: CNKI:SUN:YLZB.0.2018-08-025.

- LI Wenling. Comparison of foam fixation and conventional posture fixation technique for patients with head and neck tumor radiotherapy[J]. Medical Equipment, 2018, 31(8): 35-36. DOI: CNKI:SUN:YLZB.0.2018-08-025.
- 黄清秀, 黄丽娜, 林赛云. 发泡胶垫+头颈肩热塑膜在固定鼻咽癌患者调强适形放射治疗中的应用[J]. 医疗装备, 2019, 32(15): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2019.15.019.
- HUANG Qingxiu, HUANG Lina, LIN Saiyun. Styrofoam pad + head, neck and shoulder thermoplastic film in the treatment of fixed-intensity conformal radiotherapy for patients with fixed nasopharyngeal carcinoma[J]. Medical Equipment, 2019, 32(15): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2019.15.019.
- 覃仕瑞, 王宏, 李秀粉, 等. 发泡胶在鼻咽癌放疗中对剂量分布的影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2020, 33(1): 46-50. DOI: SN 1674-0904.
- QIN Shirui, WANG Hong, LI Xiufen, et al. Effect of styrofoam on dose distribution in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy[J]. Tumor Prevention and Treatment, 2020, 33(1): 46-50. DOI: SN 1674-0904.
- 金浩宇, 周凌宏, 陈光杰, 等. 一种基于蒙特卡罗模拟的快速剂量计算模型[J]. 第四军医大学学报, 2006, 27(21): 2002-2004. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2790.2006.21.026.
- JIN Haoyu, ZHOU Linghong, CHEN Guangjie, et al. A fast dose based on Monte Carlo simulation computational models[J]. Journal of the Fourth Military Medical

- University, 2006, **27**(21): 2002 – 2004. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2790.2006.21.026.
- 5 Mohan R, Chui C, Lidofsky L. Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators [J]. *Medical Physics*, 1985, **12**(5): 592 – 597. DOI: 10.1118/1.595680.
- 6 Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport I: EGSnrc, the new EGS4 version[J]. *Medical Physics*, 2000, **27**(3): 485–498. DOI: 10.1118/1.598917.
- 7 Rogers D W O, Walters B R B, Kawrakow I. Beamnrc users manual[M]. Ottawa: National Research Council Canada, 2009: 18–114.
- 8 韩俊杰, 朱金汉, 张白霖, 等. 医用直线加速器主要部件对 X 射线能谱的影响[J]. *核技术*, 2015, **38**(10): 100202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100202.
HAN Junjie, ZHU Jinhan, ZHANG Bailin, *et al.* Effects of main components of clinical linac on X-ray energy spectra[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(10): 100202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100202.
- 9 Rogers D W O, Faddegon B A, Ding G X, *et al.* BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units [J]. *Medical Physics*, 1995, **22**(3): 503 – 524. DOI: 10.1118/1.597552.
- 10 熊绮丽, 石勇, 徐刚, 等. TrueBeam 加速器多叶准直器射野剂量特性[J]. *核技术*, 2015, **38**(10): 100203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100203.
XIONG Qili, SHI Yong, XU Gang, *et al.* Dose characteristics of multi-leaf collimator field for TrueBeam [J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(10): 100203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100203.
- 11 Walters B R B, Kawrakow I, Rogers D W O. Dosxyznrc users manual[M]. Ottawa: National Research Council Canada, 2009: 10–70.
- 12 韩俊杰, 庄永东, 刘小伟. 医用直线加速器入射电子束能量的快速模拟确定[J]. *核技术*, 2020, **43**(1): 010202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010202.
HAN Junjie, ZHUANG Yongdong, LIU Xiaowei. Fast confirmation of the incident electron energy by simulation for medical linac[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, **43**(1): 010202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010202.
- 13 张帆, 肖爱农, 伍海彪, 等. 基于蒙特卡罗方法确定医用加速器最优电子线参数[J]. *核技术*, 2018, **41**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.41.060201.
ZHANG Fan, XIAO Ainong, WU Haibiao, *et al.* Optimizing electron beam parameters of linear accelerator based on Monte Carlo simulation[J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.41.060201.
- 14 李洁, 汪晖, 汪冬, 等. 小野照射不同密度肺模体横向电子不平衡现象的蒙特卡罗模拟研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, **36**(4): 379–383. DOI: CNKI:SUN:YXWZ.0.2019-04-002.
LI Jie, WANG Hui, WANG Dong, *et al.* Monte Carlo simulation of lateral electron imbalance in lung phantoms with different densities[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, **36**(4): 379–383. DOI: CNKI:SUN:YXWZ.0.2019-04-002.
- 15 戴振晖, 招什武, 杨耕, 等. 瓦里安扩充型动态楔形板的蒙特卡罗模拟与验证[J]. *核技术*, 2017, **40**(12): 120302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120302.
DAI Zhenhui, ZHAO Shiwu, YANG Geng, *et al.* Monte Carlo simulation and validation of the enhanced dynamic wedge of Varian accelerator[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, **40**(12): 120302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120302.
- 16 廖浪, 宋瑞英, 程鹏. 6 MeV 医用电子直线加速器中束斑尺寸的计算与测量[J]. *核技术*, 2016, **39**(6): 060203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060203.
LIAO Lang, SONG Ruiying, CHENG Peng. Beam spot size calculation and measurement of 6-MeV medical linear accelerator[J]. *Nuclear Techniques*, 2016, **39**(6): 060203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060203.
- 17 Linthou N, Verellen D, Toumel K, *et al.* Six dimensional analysis with daily stereoscopic X-ray imaging of intrafraction patient motion in head-and-neck treatments using five points fixation masks[J]. *Medical Physics*, 2006, **33**(2): 504–513. DOI: 10.2307/4012760.
- 18 Gilbeau L, Octave-prignot M, Loncol T, *et al.* Comparison of set-up accuracy of three different thermoplastic masks for the treatment of brain and head and neck tumors[J]. *Radiotherapy And Oncology*, 2001, **58**(2): 155–162. DOI: 10.1007/s11232-006-0087-4.
- 19 Schneider U, Pedroni E, Lomax A. The calibration of CT hounsfield units for radiotherapy treatment planning[J]. *Physics In Medicine And Biology*, 1996, **41**(1): 111–124. DOI: 10.1088/0031-9155/41/1/009.
- 20 Wagner D, Vorwerk H. Treatment modeling in the treatment planning system eclipse[J]. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 2011, **3**(1): 7 – 12. DOI: 10.4172/1948-5956.1000049.