

Mobetron 术中放疗加速器的物理测试和操作技术

陈 毅, 沈文同, 赵胜光, 张毅斌, 段隆焱, 许 赅

(上海交通大学医学院附属瑞金医院 放疗科, 上海, 200025)

摘要: **目的** 探讨 Mobetron 1000 移动式术中放疗加速器电子线的剂量学特性和操作技术。**方法** 对 Mobetron 加速器所配套的 47 个不同形状、尺寸的限制光筒进行 4、6、9、12 Mev 共 4 种能量的物理数据测量分析, 总结临床 32 例患者的术中放射治疗操作经验。**结果** 直径 10 cm、端面 0° 的限制光筒的 4、6、9、12 Mev 能量的最大深度剂量分别是 0.6、1.2、1.6、2 cm, 治疗深度分别为 0.9、1.8、2.5、3.4 cm。32 例患者术中放射治疗剂量正确, 操作顺利, 无意外发生。**结论** 应用移动式术中放疗加速器具有正常组织保护好、治疗时间短、生物效应高等优势。

关键词: 放疗加速器; 物理测试; 操作技术; Mobetron

中图分类号: R 815 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2353(2016)05-088-04 **DOI:** 10.7619/jcmp.201605027

Physical testing and operation technique of Mobetron mobile linear accelerator for intra-operative radiation therapy

CHEN Yi, SHEN Wentong, ZHAO Shengguang, ZHANG Yibin, DUAN Longyan, XU Cheng

(Department of Radiotherapy, Ruijin Hospital Affiliated to College of Medicine of Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200025)

ABSTRACT: Objective To explore the dosimetric characteristics and operation technique of the Mobetron 1000 mobile linear accelerator for intra-operative radiation therapy. **Methods** The 47 calimeters with different shapes and sizes of the Mobetron accelerator were tested by 4, 6, 9, 12 and Mev. The experience of intra-operative radiation therapy in 32 patients was summarized. **Results** The maximum depth doses of calimator with diameter of 10 cm and 0° end surface tested by 4, 6, 9, 12 Mev were 0.6, 1.2, 1.6 and 2 cm respectively, and the clinical treatment depth were 0.9, 1.8, 2.5 and 3.4 cm respectively. The 32 patients were treated with correct dose for intra-operative radiation therapy and the correct operation, and no accidents occurred. **Conclusion** Application of mobile linear accelerator for intra-operative radiation therapy has the advantages of good protection for normal tissue, short treatment time and high biological effect.

KEY WORDS: accelerator for intra-operative radiation therapy; physical testing; operation technique; Mobetron

术中放射治疗(IORT)是指在肿瘤手术过程中,对不能切除的暴露瘤体或切除后的瘤床和淋巴引流区域,在直视条件下利用限光筒进行精确定位并实施的单次大剂量放射治疗。其优点是能根据术中情况来决定放疗的适合性,能使肿瘤组织与正常组织得到分离^[1]。这种方法在 20 世纪 60 年代由 Abe^[2]首次成功应用于临床,当时的术中放疗是利用常规直线加速器,这需要将在

手术中的患者转移至放疗科接受术中放疗,这一过程对麻醉技术、患者体位、手术时间控制、无菌环境的保证等提出严格要求,极大地增加了手术风险。1997 年,世界首台移动式术中放疗加速器在加利福尼亚大学投入使用。2009 年本院购进 Mobetron 1000 术中放疗加速器,现将 5 年来本科积累的该设备的物理数据测量和操作管理经验总结如下。

1 材料与方法

1.1 设备简介

美国 IntraOP 公司生产的 Mobetron1000 加速器。该设备由 3 部分组成: ① 调制单元(加速器本地控制系统和电源系统), 用于机器维护调试状态下的出束控制和剂量率调节; ② 控制单元(加速器远程操作控制系统及射野监控系统), 用于实际治疗时的出束控制和监控治疗射野情况; ③ 治疗单元(射线发生主机装置), 包括治疗头、真空系统、冷却系统、驱动系统等, 是放射治疗的实施装置。术中放射治疗时, 调制单元置于手术室相邻的加速器机房内, 提供后台维护支持; 治疗单元通过蓄电池动力驱动, 挪移至手术床旁进行治疗; 控制单元则推至手术室外的安全距离处, 进行出束控制和监视。与常规直线加速器(S 波段, 3 GHz)相比, 它采用更高频率的 X 波段高频磁控管(10 GHz)^[3], 加速管的尺寸和重量都大大降低。整个射线发生装置被集成在机头内, 机头安装在一个可多方向转动的 C 型臂机架上。在电机驱动下, 治疗机头能够沿 C 型臂做等中心旋转, 包括左右旋转 $\pm 45^\circ$, 前后倾斜 $\pm 30^\circ$, 最高旋转速度为 $0.75^\circ/\text{s}$, 上下方向可垂直升降 30 cm, 整个底盘可以做前后左右 10 cm 平移, 移动速度最高为 2 mm/s, 激光软到位的操作即通过这些部位方向运动完成。整个治疗单元重量仅为 1.26 吨, 可以在手术室内自由移动。在治疗机头的下方安放有联动功能的射线阻挡装置(Beam stopper), 使射线污染和散射降到一个很低的水平。治疗头配有 45 个圆形不锈钢限光筒, 直径为 3 ~ 10 cm, 端面倾角分别为 0、15、30°。1 个 9 cm × 12 cm 的椭圆形筒和 1 个 8 cm × 15 cm 的矩形筒。1 套 10 cm 的 QA 限光筒和适配器, 1 套电离室模块共 8 个, 分别对应不同能量的 D_{\max} 和 D_{50} 。1 套大小与限光筒尺寸相对应的 0.5 cm 和 1 cm 厚的组织补偿器。消毒隔离帽等附件。

1.2 性能参数

Mobetron 1000 仅产生电子射线用于治疗。有效源皮距 SSD(虚源到限光筒末端的距离)为 50 cm。能量为 4、6、9、12 Mev, 剂量率为 250 cGy/min 和 1 000 cGy/min。

1.3 物理数据测量

治疗前测量一套详细反映射线性质的物理数据。测量工具包括测量限光筒底座, 47 个限光

筒、三维水箱、电离室、气压计、温度计、剂量仪及相关的测量分析软件。测量内容包括每个限光筒 4 种能量的百分深度剂量(PDD)、离轴比、野因子。由于 Mobetron 加速器的机头下方是 Beam stopper, 不能直接放置三维水箱, 因而将特制的木质矮桌子(长 × 宽 × 高为 80 cm × 80 cm × 50 cm)置于 Beam stopper 上方, 再将水箱放置在桌子上进行测量。测量时限光筒底面与水面相切。当测量 30° 斜面限光筒时, 要保证有较高的水位, 以防止机架与三维水箱侧壁发生碰撞。测量受环境、温度、气压和水位等影响, 尽可能较短时间内一次性完成。

1.4 治疗过程

术中放疗是一项多学科联合治疗肿瘤的技术。治疗的顺利进行需要放疗科医师、物理师、技师、外科手术医师、麻醉师和手术护士来配合完成。物理师在治疗前 1 d 对机器进行预热检查, 确保各项参数指标在正常范围内。利用质控限光筒进行吸收剂量测量校准, 保证输出剂量误差在 $\pm 3\%$ 以内。手术当天, 护士提前 0.5 h 通知放疗医师到场, 当外科医生将肿瘤暴露或切除后, 放疗医师要探查肿瘤位置, 确定照射范围深度, 选择射线能量和剂量。将限光筒置入病灶部位, 确认将邻近重要脏器组织推移限光筒外, 并拍照存档, 最后利用管夹系统将限光筒固定在手术床沿的支架上。放射对位前, 护士先将无菌隔离帽罩在 Mobetron 治疗机头上, 技师将加速器移动至手术床上方, 执行激光软到位操作, 最终使 LED 灯指示面板中间的方形绿灯闪亮, 即表示可以出束。麻醉师确认电路、气路、输液管路、麻醉系统和监护系统处于最佳工作状态。所有工作人员撤离手术室, 手术室门切换到手动状态。技师控制单元输入治疗参数, 开机出束治疗。治疗完毕迅速进入手术室, 复核设备状态后撤离 Mobetron 加速器。手术医生按常规完成后续的手术工作。

2 结果

经测量得出电子线 4、6、9 和 12 Mev 共 4 种能量在特定百分剂量处的深度值, 见表 1。表面剂量以照射部位表面下 0.5 mm 处^[4]的剂量表示。以直径 10 cm、端面 0° 限光筒为例, 4 Mev 表面剂量为 77.2%, 6 Mev 是 83.4%, 9 Mev 是 88.4%, 12 Mev 是 92.3%。表面剂量随能量升高而增加, 与常规外照射电子线类似^[5]。将 90%

Dm 作为治疗深度,临床选择能量以 90% 等剂量线包围靶区为基准^[6],靶区厚度小于 1 cm 用 4 Mev,小于 1.5 cm 用 6 Mev,小于 2.5 cm 用 9 Mev,小于 3.5 cm 用 12 Mev。

表 1 直径 10 cm、端面 0°限光筒不同能量的特定百分剂量深度值 mm

D%	4 Mev	6 Mev	9 Mev	12 Mev
100%	6	12	16	20
95%	7.8	16.2	23	30.7
90%	8.6	17.9	25.2	34
85%	9.2	19.1	26.8	36.8
80%	9.9	20.1	28.2	36.8
50%	12.5	24.7	34.4	47.4
10%	16.4	31.3	43	58
1%	19.3	35.7	49	96

50% Dm 在体表投影为照射野范围,高能电

子束随深度增加,高值等剂量线向内侧收缩,所以在 90% 等剂量线的治疗深度处,其 50% 剂量线覆盖的范围较照射表面缩小,因此限光筒的选择根据靶区最深部位的直径再放大 0.5 ~ 1.5 cm。0.5% ~ 2% Dm 分别为 4 ~ 12 Mev 的 X 线污染区,应尽量使污染区避开重要脏器组织。剂量跌落的度量用 G 表示, $G = R_p / (R_p - R_q)$,该值一般在 2.0 ~ 2.5, G 值越大表明剂量跌落越快,12 Mev 在 6 cm 深度剂量已低于 10%。2011—2013 年本科 32 例术中放射治疗技术参数见表 2。

作者将 Mobetron 电子线深度剂量特性与直线加速器 Elekta precise 比较。因两种加速器结构形态有较大差异,测量时模拟各自常规治疗状态测量。选用相同能量(12 Mev)电子线比较,但在限光筒形状、源皮距和剂量率上均不同,见表 3。

表 2 32 例术中放疗病例治疗技术参数

病种	胰腺癌	直肠癌	结肠癌	后腹膜癌	甲状腺癌	乳腺癌	输尿管癌
总数列	32	14	10	3	2	1	1
能量/Mev	6		1		1	1	1
	9	4	10	2	1		
	12	10		1			
限光筒孔径/cm	3	1	1				
	4		2	1			1
	4.5		3				
	5	5	3	1	1	1	
	5.5	2		1			
	6	3		1			
	7	1	1				
	7.5	2					
限光筒角度/°	0			1	1		
	15	3	4	1			
	30	11	6	1	2	1	1
补偿块	1 cm			1		1	
处方剂量/Gy	8	2				1	
	10	4	3	1	1		
	14	6	2				1
	15			2	2		
	18	2	5				

表 3 Mobetron 与 Elekta precise 电子线剂量特性比较

加速器名称	限光筒	SSD	剂量率	能量 Mev	表面百分剂量/%	D _{max} 深度 /cm	D ₉₀ 深度 /cm	D ₅₀ 深度 /cm	D ₁ 深度 /cm
Mobetron 1000	直径 10 cm 圆筒	50 cm	1000/m	12	92.3	2	3.4	4.74	9.6
Elekta precise	10 × 10 方筒	100 cm	300/m	12	85.9	2.75	3.8	4.88	15

3 讨论

在普通外照射中,较低的表面剂量能保护皮

肤组织,而在术中放疗中,射线不通过皮肤直接照在暴露的肿瘤上,因此希望有较高的表面剂量,使整个肿瘤受照剂量更为均匀。Mobetron 的电子线

具备这种特性,且1%剂量深度仅9.6 cm,远低于Elekta的15 cm,更有利于保护靶区下方的正常组织。Mobetron采用1000 Mu/min的高剂量率,研究^[7-8]表明术中单次剂量18 Gy相当于常规照射(2 Gy/次)剂量50 Gy,相对生物效应较高,增强对肿瘤的杀伤效果,缩短治疗时间。激光软到位的操作是一个比较复杂的过程,它有5个方向的位置调节,治疗头与限光筒适配器存在4 cm的距离,利用激光的反射来确定相互位置偏差,其精度小于1 mm。系统通过探测激光位置来点亮其相对位置的LED灯,为操作者提供即时摆位参考。5个调节参数中,调节任一参数都会引起其他4个参数的变化,故需多次调整,不断缩小调整范围,最终使空间两轴线(射束中心线和限光筒中轴线)完全对接重合。熟练的技师一般能在15 min完成激光软到位操作。影响激光软到位的因素还有患者的呼吸运动。对靠近胸腔部位的术中放疗,麻醉师可在放疗前适当减小呼吸机的运动幅度并加深麻醉^[9],以防患者出现自主呼吸运动,引起限光筒晃动而使治疗中断。

Mobetron的底盘宽度是110 cm,治疗头距底盘边缘的距离是55 cm,加左右5 cm的运动幅度,总共60 cm,这就要求手术切口与手术床底座之间的距离至少要60 cm才能满足放疗摆位要求^[10-13]。治疗时,加速器底盘要伸到手术床下面,与手术床底座紧邻。患者头侧要放置呼吸机、麻醉监护仪器设备,加之手术医生的操作习惯,患者在手术床上的头脚位置不能互换。这时要在放置限光筒前再将患者往头端移动,使头部放在一个另加的脑部手术专用头架上,必须保证切口距手术床底座60 cm以上。手术床应避开正对的无影灯支柱,以防碰撞使摆位受限^[14-15]。在放置好限光筒后,也可以适当调整手术床的左右倾斜和头脚高度,尽量使限光筒端面接近水平状态,以利于激光软到位的执行,节省激光软到位时间。

总之,Mobetron加速器的射线剂量特性适合对手术暴露肿瘤的治疗,其表面剂量高,达到最大剂量点深度后急剧衰减,使靶区剂量均匀,而靶区后正常组织得到较好保护。采用单野、单次的大剂量、高剂量率照射,生物效应是同剂量分次体外照射的2~3倍^[16],其优势不亚于调强治疗,值

得进一步推广应用。

参考文献

- [1] 汤钊猷. 现代肿瘤学[M]. 3版. 上海: 复旦大学出版社, 2011: 577.
- [2] Calvo F A, Meirino R M, Orecchia R. Intraoperative radiation therapy first part: rationale and techniques[J]. Crit Rev Oncol Hematol, 2006, 59(2): 106.
- [3] Mills M D, Fajardo LC, Wilson DL, et al. Commissioning of a mobile electron accelerator for intraoperative radiotherapy [J]. J Appl Clin Med Phys, 2001, 2(3): 121.
- [4] 姜瑞瑶, 黄国锋, 熊霏, 等. 三种不同方法测量术中放疗表面剂量的比较研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(1): 1625.
- [5] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 222.
- [6] 殷蔚伯. 肿瘤放射治疗学[M]. 4版. 北京: 北京协和医科大学出版社, 2008: 45.
- [7] Osti M F, Carnevale A, Bracci S, et al. Exclusive electron intraoperative radiotherapy in early-stage breast cancer: a monoinstitutional experience[J]. Anticancer Res, 2013, 33(3): 1229.
- [8] Vanderwalde N A, Jones E L, Kimple R J, et al. Phase 2 study of pre-excision single-dose intraoperative radiation therapy for early-stage breast cancers: six-year update with application of the ASTRO accelerated partial breast irradiation consensus statement criteria[J]. Cancer, 2013, 119(9): 1736.
- [9] 丁超, 孙莉, 承耀中, 等. 术中放疗病人的麻醉管理[J]. 中国医刊, 2010, 45(4): 33.
- [10] 王素珍, 孟维静, 安洪庆, 等. 平衡组间协变量后射频消融术和经皮穿刺无水乙醇瘤内注射治疗原发性肝癌效果的比较[J]. 吉林大学学报: 医学版, 2012, 38(6): 1068.
- [11] 随义, 韩杰, 严鹏程, 等. 三种介入治疗方案对原发性肝癌的疗效分析[J]. 海南医学院学报, 2014, 20(3): 421.
- [12] 辛宝琼, 伍平. 循证护理干预在肺癌三维适形放疗中的应用[J]. 中华全科医学, 2011, 9(8): 1308.
- [13] 杨舟. 应用射频消融术治疗老年原发性小肝癌的疗效评价[J]. 实用临床医药杂志, 2013, 17(24): 89.
- [14] 孟艳莉, 胡鸿涛, 黎海亮, 等. 三氧化二砷联合动脉化疗栓塞治疗原发性肝癌肺转移的临床疗效观察[J]. 中华内科杂志, 2012, 51(12): 971.
- [15] 罗虎, 宫亮, 陈永峰, 等. CIK维持治疗中晚期肺癌的临床观察及影响因素分析[J]. 第三军医大学学报, 2013, 35(6): 569.
- [16] 王成锋, 白晓枫, 张建伟, 等. 术中放疗在局部晚期胰腺癌治疗中的作用[J]. 中华医学杂志, 2011, 91(4): 243.