

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2020.01.007

医学放射物理

## 3D打印技术在电子线挡铅中的应用

吴冰,张才勋,付敬国,马广栋,王陆洲,张军  
武汉大学人民医院肿瘤诊疗中心,湖北 武汉 430060

**【摘要】目的:**建立一套基于3D打印技术制作个体化电子线挡铅的实现方法,为电子线挡铅的制作提供一种新方法。**方法:**在患者需要进行电子线照射区域的体表上贴上一圈铅丝,并在Varian Acuity模拟定位机上采集该区域的图像数据,在自行研发的图像处理软件中,基于患者图像数据勾画出相对应的铅丝轮廓并建模为3D打印模型。采用3D打印机打印出该模型,再结合传统的铅块灌铸技术,制作出电子线挡铅模块。**结果:**该方法制作的铅块接触面平整、光滑,模块在Varian 23EX电子线托盘上验证,光影形状与放疗医生在皮肤表面的勾画形状完全吻合。同时模块制作成本低廉,制作时间在可接受范围内。**结论:**基于3D打印技术制作个体化电子线挡铅步骤简单、快速,铅块精度高,该方法为放疗电子线挡铅的制作提供一种新思路。

**【关键词】**3D打印;电子线挡铅;放射治疗;模块

**【中图分类号】**R319

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)01-0033-05

### Application of 3D printing technology in manufacture of lead shielding for electron beams

WU Bing, ZHANG Caixun, FU Jinguo, MA Guangdong, WANG Luzhou, ZHANG Jun  
Cancer Diagnosis and Treatment Center, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China

**Abstract: Objective** To establish an implementation method of individualized lead shielding for electron beams based on 3D printing technology for providing a new method for the manufacture of lead shielding for electron beams. **Methods** A circle of lead wire was placed on the patient's body surface where needed to be irradiated with electron beams, and the image data of this area were collected by Varian Acuity simulator. Based on the obtained image data, the contour of lead wire was delineated in the self-developed image processing software and modeled as a 3D printed model. The obtained model was printed out by a 3D printer, and then was combined with a traditional lead block casting technique to manufacture a lead shielding for electron beams. **Results** The contact surface of the lead shielding made by the proposed method was smooth and flat. The model was verified on Varian 23EX electronic tray and the shape of the light and shadow were perfectly matched the skin delineations by radiologists. Meanwhile, the model manufacture was low-cost and the time for manufacture was in an acceptable range. **Conclusion** The manufacture of individualized lead shielding for electron beams based on 3D printing technology has the advantages of simple steps and fast-speed, and the obtained lead shielding has a high precision. The proposed method provides a new idea for the manufacture of lead shielding for electron beams.

**Keywords:** 3D printing; lead shielding for electron beams; radiotherapy; model

### 前言

3D打印又称快速成型技术,是一种基于计算机三维数字成像技术和多层次连续打印技术的新兴应

用技术,该技术可以精细制作出各种复杂几何形状的实体,极大降低了复杂结构产品的制造难度。3D打印技术以其个性化、精准化和远程化等优点,在临床上取得广泛的应用,主要包括在外科手术辅助、个性化医疗器械打印以及组织工程学、医学教育和基础科研等<sup>[1-5]</sup>。在放射治疗中,针对特定的病变部位,结合3D打印技术,Madamesila等<sup>[6-8]</sup>开展了3D打印应用于放疗质控方面的研究。Park等<sup>[9-11]</sup>针对不同疾病分别设计出个性化3D打印补偿模,开展3D打印技术在临床上的应用研究。丁继平等<sup>[12-13]</sup>利用3D打印技术设计出个体化的放疗口腔支架,能有效降低口

**【收稿日期】**2019-08-12

**【基金项目】**武汉大学人民医院2018年度1级新技术项目(2018-X-14)

**【作者简介】**吴冰,主管技师,主要从事肿瘤放射治疗工作,E-mail: zqw@163.com

**【通信作者】**张军,高级工程师,主要从事放射物理、智能系统设计开发方面的研究工作,E-mail: seezhangjun@163.com

腔粘膜炎的发生。张琛等<sup>[14]</sup>研究不规则体表3D打印组织补偿物对患者剂量学的研究,具有一定的临床应用价值。

随着我国放疗技术的快速发展,调强放疗技术已经成为主流放疗技术,适形放疗已经成为一种常规的治疗手段,低熔点铅块的制作越来越少。但是,对于特定的疾病,如皮肤表浅肿瘤和术后电子线照射,低熔点铅块依旧必不可少,控制和提高铅块的质量对于精确放疗依旧非常重要。传统铅块制作流程复杂,涉及热丝切割机的质量控制和切割过程中热丝温度的设定<sup>[15]</sup>。虽然可以通过控制金属丝的温度和泡沫的切割速度以及浇灌铅水的温度(约75℃)来减少挡铅制作中的误差<sup>[16]</sup>。但是,热丝切割后不可避免会导致阴模泡沫表面粗糙,待热铅水冷却后,容易在与阴模接触面上形成小气泡甚至空腔,从而影响挡铅的精度。

针对上述问题,结合3D打印机购置成本低、通用性强、精度高、打印出的模体外表面光滑平整的特点而研发一套软件系统使其能应用在放疗铅块制作中,本研究采用3D打印技术制作电子线挡铅的阴模,探索3D打印技术在电子线挡铅制作中的技术方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及设备

Varian Acuity 模拟机,用于确定照射位置、照射面积、机架旋转角度和等中心位置等参数,同时能产生X射线用于拍摄定位片;Varian 23EX 放疗加速器,能产生4、6、9、12、15以及18 MeV共6挡电子线,用于治疗不同深度的表浅肿瘤;Cure 14.07 切片软件,将3D打印模型转化为3D打印机的动作数据(GCode);自行研发的图像处理软件,该软件使用VC++2013编写,具有很强的图像处理能力,直接读取DR平板的图像或者导入DICOM图像进行二维靶区勾画和导出功能,能将体表标记轮廓作为靶区进行勾画并且转化为3D打印模型文件(STL文件);极光尔沃A8型3D打印机及配套打印材料;自动温控融化炉;低熔点铅;放疗专用枕头,包括医用软枕以及A~F专用枕;有机玻璃板;画线用墨水;医用胶带;铅丝。

### 1.2 方法和步骤

第一步:嘱患者以尽量舒适的方式躺在Varian Acuity 模拟机病床上,依据患者病情和躺卧姿势选取合适的放疗专用枕头。放疗医生根据患者病情,在患者皮肤上用墨水划线,标注出需要进行电子线照射的射野形状。

第二步:待墨水干燥后,按照医生的标记线在患者身上贴上一圈铅丝,用医用胶带将铅丝在患者身上固定牢靠。调节病床的位置,让患者需要照射的中心尽可能位于模拟机SSD=100 cm的位置,调节Varian Acuity 模拟机Gantry的角度,使照射野方向和患者受照表面尽量垂直,记录下此时Gantry的角度。拍摄该角度病人的定位片,定位片的参数为90 kV、50 mA,保存该定位片,之后将定位片传输到自行研发的图像处理软件中。由于铅丝密度高,在定位片中,铅丝图像显示清晰,如图1所示。

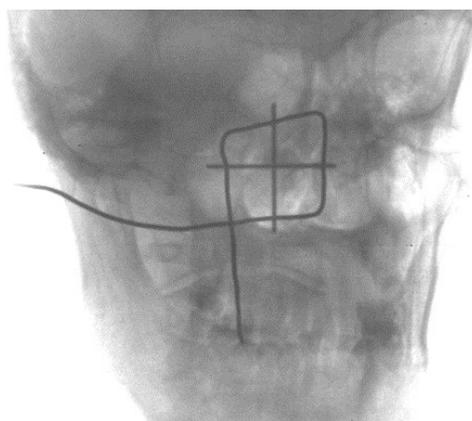


图1 铅丝在定位片中的图像

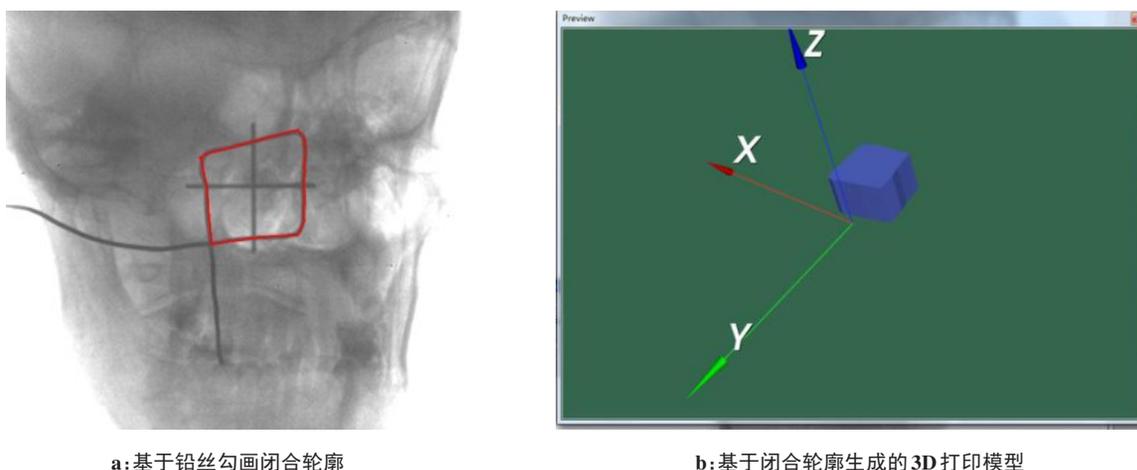
Fig.1 Lead wire in positioning image

第三步:根据铅丝的形状,在定位片图像中勾画出一个与铅丝形状吻合的闭合轮廓,如图2a中红线所示。基于该轮廓,在自行研发的软件导出功能中,输入源托距STD=95 cm和需要生成的高度=2 cm的立方体模型,如图2b所示。将该模型导出存为STL文件。

第四步:将模型文件导入Cure 14.07切片软件,并根据3D打印机的配置设置相关的打印参数,包括壁厚、层高、填充率等,3D打印参数见表1。基于该参数,生成相对应的GCode文件,之后导出。

第五步:将GCode文件导入极光尔沃A8型3D打印机,结合PLA耗材柔软、易粘黏以及容易降解等优点<sup>[17-18]</sup>,本次研究的打印耗材选择PLA材料,打印出所需要的阴模模型,该模型打印耗时119 min,使用3D打印耗材1.99 m。

第六步:将打印出的阴模模型放在有机玻璃托板上浇铸低熔点铅,生成阳模。为尽量减少气泡的产生,有机玻璃板要尽量干净;熔铅前,去掉铅块里的杂质,并使铅块充分熔化;浇铸时尽量均匀,并尽量一次浇铸完成<sup>[19]</sup>。待铅水冷却后拆模,即得到所需的电子线挡铅,如图3所示。



a: 基于铅丝勾画闭合轮廓

b: 基于闭合轮廓生成的3D打印模型

图2 基于铅丝勾画闭合轮廓以及基于闭合轮廓生成的3D打印模型

Fig.2 Closed contour based on lead wire and 3D printing model generated from the closed contour

表1 3D打印参数设定

Tab.1 3D printing settings

参数	设定
打印速度	50 mm/s
打印床温度	80 °C
挤出头温度	210 °C
层高	0.2 mm
壁厚	1.2 mm
底层厚度	0.3 mm
挤出头直径	0.4 mm
填充密度	30%
打印耗材直径	1.75 mm
挤出率	100%
支撑类型	全部支撑
平台附着类型	底层网格

## 2 结果与讨论

由图3可知,铅块横断面整齐、光亮,无任何气泡和气腔。与传统挡铅块相比,表面更加平整光滑,轮廓更加清晰。之后将制得的铅块放置于Varian 23EX电子线托盘上进行验证,灯光野形状和放疗医生在皮肤表面的勾画形状完全吻合,表明该系统在临床上具有可行性。同时自行研发图像处理软件在生成3D模型时根据源托距考虑到了光野的几何条件,生成有一定倾斜度的挡铅,使其和放疗的预期更加吻合,降低穿射半影,进一步提高放疗的精度。

同时,为了验证3D打印模体制作铅块的剂量特性。采用MapCHECK二维矩阵探测器、固体水(RW3水等效材料),以及配套MapCHECK软件分析采集的数据。在加速器床面放5 cm厚固体水用做散射模体,将二维矩阵探测器贴放在固体水上,升降床直至模体表面到源的距离为101 cm,移动模体,让光野十字叉丝和模体表面中心十字线准确重合,之后再在二维矩阵探测器上叠放1 cm厚度的固体水;此时,源到模体上表面的距离为100 cm,探测器平面位于模体下表面2 cm处。然后在加速器机头安装好托架和电子线挡铅,其中电子线挡铅的阴模是3D打印机打印出的6 cm×6 cm×2 cm的立方体。之后采集6 MeV电子线200 MU,为便于数据分析,将Y轴数据进行归一化处理,测量结果如图4所示。

由图4可知,用3D打印模型制作的电子线挡铅,X轴和Y轴方向射野大小均能极好地满足射野设计要求,X轴和Y轴半影(20%~80%)分别为1.2和1.2 cm,进一步验证了3D打印电子线挡铅的准确性和系统在临床上的可行性。同时,为了与传统的挡铅进行对比,我们采用相同的测量条件,测量了采用常规

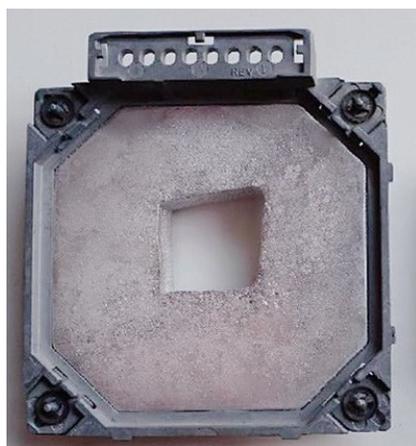


图3 基于3D打印模型生成的电子线挡铅

Fig.3 Lead shielding manufactured based on 3D printing model

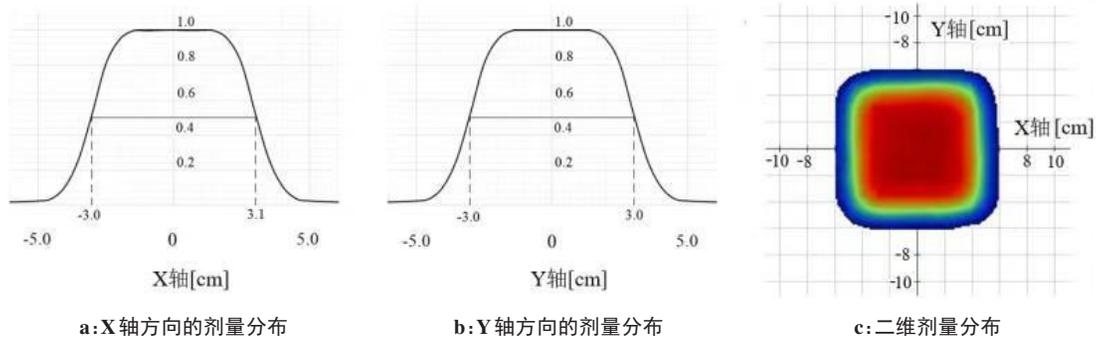


图4 基于3D打印模型生成的电子线挡铅采集的6 MeV电子线数据

Fig.4 6 MeV electron beam data collected by lead shielding manufactured based on 3D printing model

挡铅制作技术设计的6 cm×6 cm挡铅的数据,测量结果如图5所示。由图5可知,由于电子线挡铅泡沫在制作的过程中会存在一定的误差,导致电子线挡铅射野大小的精度没有采用3D打印技术生成的电子线

挡铅高。同时,传统方法制作的电子线挡铅的X轴和Y轴半影(20%~80%)分别为1.3和1.4 cm。两者对比结果表明,采用3D打印技术设计电子线挡铅的精度比常规方法要高。

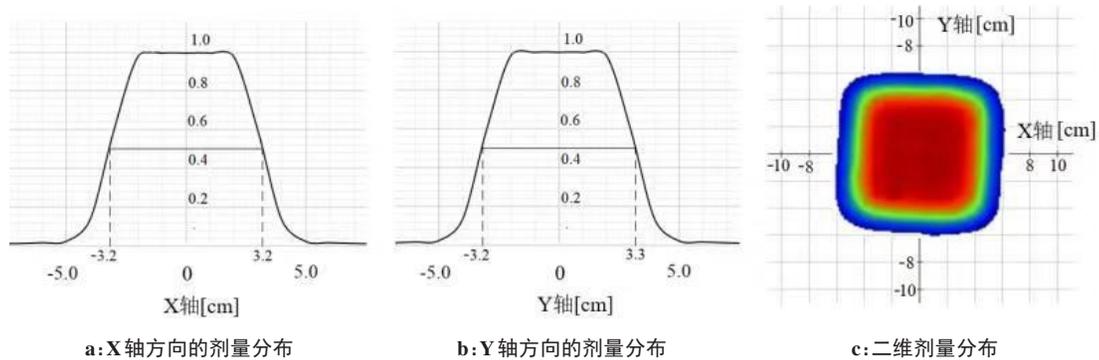


图5 基于常规方法生成的电子线挡铅采集的6 MeV电子线数据

Fig.5 6 MeV electron beam data collected by lead shielding manufactured based on traditional method

虽然3D打印在铅块制作精度上取得了明显的进步,但是相比较于传统铅块的制作,3D打印制作电子线挡铅的时间更长,主要体现在打印阴模模型上。对于制作电子线挡铅来讲,采用10%~20%的填充率,3D打印模体的强度已经足够。因此,选取常用挡铅阴模的大致尺寸,采用10%~20%的填充率,并基于Cure 15.03切片软件,以及表1中的参数设置,进行相关的统计,统计结果如表2所示。

同时针对制作电子线挡铅的各个步骤,统计两种方法在电子线挡铅制作中各个步骤的耗时,具体如表3所示。

由此可见,采用3D打印技术制作电子线挡铅虽然在制作阴模时较长,但是省去了热丝切割机的QA和预热时间。采用3D打印技术制作电子线耗时在可接受范围内,所需要的成本相对于肿瘤治疗费用非常低廉。

### 3 总结与展望

在一些浅表肿瘤,如皮肤癌、鼻咽癌等放射治疗中,

表2 不同条件下3D打印所需时间和费用

Tab.2 Time and cost for 3D printing in different conditions

模型尺寸 (长×宽×高)	填充率/%	打印时间/ min	打印物料 长度/m	材料费用/ 元
2 cm×2 cm×2 cm	10	87	1.48	0.6
	20	101	1.75	0.7
4 cm×4 cm×2 cm	10	251	4.15	1.6
	20	311	5.31	2.0
6 cm×6 cm×2 cm	10	493	8.01	3.0
	20	631	10.72	4.0

电子挡铅是必不可少的,且制作的铅板质量与精确放疗呈正相关<sup>[20]</sup>。传统的电子挡铅块制作方法较多,多是通过手动切割机或热金属丝切割泡沫制作阴模。在阴模制作过程中,手动操作会导致较大误差,且在灌铅时过高的温度降低了铅板的制作质量。然而,在本研究中通过使用3D打印技术,除了第一步中的人工标注

表3 3D打印技术和传统方法耗时比较  
Tab.3 Comparison of time consuming between  
3D printing and traditional method

步骤	3D打印技术/min	传统方法/min
热丝切割机质量保证	0	15
热丝切割机预热	0	15
阴模轮廓的获取	5	5
制作阴模	详见表2	30
浇灌及成形	45	45
挡铅后处理	2	5

照射野、第二步中的铅丝固定及照射野锁定的操作来自人工,后面4个步骤均采用软件和机器完成,操作误差更小。并且3D打印所用PLA材料的熔点为175~185℃,也能大大减少由于浇灌铅水温度过高对挡铅质量的影响,提高挡铅块的制作精度。

虽然我们通过3D打印技术成功制造出质量更好的铅板,为精确放疗提供更好的工具。但是,该方法也存在一些缺点,例如在患者体表上铅丝的固定和在定位片上勾画与铅丝形状吻合的闭合轮廓这两方面的误差是无法避免的。所以只能通过提高技师的工作经验和探索采用模式识别技术进行自动勾画闭合轮廓,从而不断降低此部分的误差。

## 【参考文献】

- [1] 邓滨, 欧阳汉斌, 黄文华. 3D打印在医学领域的应用进展[J]. 中国医学物理杂志, 2016, 33(4): 389-392.  
DENG B, OUYANG H B, HUANG W H. Application progress of three-dimensional printing in medical field[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(4): 389-392.
- [2] 杨新宇, 詹成, 李明, 等. 3D打印技术在医学中的应用进展[J]. 复旦学报(医学版), 2016, 43(4): 490-494.  
YANG X Y, ZHAN C, LI M, et al. Application progress of 3D printing in medical field[J]. Fudan University Journal of Medical Sciences, 2016, 43(4): 490-494.
- [3] 赵靖, 王笛, 刘继全, 等. 3D打印技术在医学领域应用的现状及问题[J]. 中国现代医学杂志, 2017, 27(12): 71-74.  
ZHAO J, WANG D, LIU J Q, et al. Current situation and problems in medical application of 3D printing technology[J]. China Journal of Modern Medicine, 2017, 27(12): 71-74.
- [4] YAN Q, DONG H H, SU J, et al. A review of 3D printing technology for medical applications[J]. Engineering, 2018, 4(5): 729-742.
- [5] WANG K, HO C C, ZHANG C, et al. A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ applications[J]. Engineering, 2017, 3(5): 653-662.
- [6] MADAMESILA J, MCGEACHY P, VILLARREAL BARAJAS J E, et al. Characterizing 3D printing in the fabrication of variable density phantoms for quality assurance of radiotherapy[J]. Phys Med, 2016, 32(1): 242-247.
- [7] RICOTTI R, CIARDO D, PANSINI F, et al. Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy[J]. Phys Med, 2017, 39: 25-32.
- [8] KAMOMAEA T, SHIMIZUB H, NAKAYA T, et al. Three-dimensional printer-generated patient-specific phantom for artificial *in vivo* dosimetry in radiotherapy quality assurance[J]. Phys Med, 2017, 44: 205-211.
- [9] PARK J W, YEA J W. Three-dimensional customized bolus for intensity-modulated radiotherapy in a patient with Kimura's disease involving the auricle[J]. Cancer Radiother, 2016, 20(3): 205-209.
- [10] CANTERS R A, LIPS I M, WENDLING M, et al. Clinical implementation of 3D printing in the construction of patient specific bolus for electron beam radiotherapy for non-melanoma skin cancer[J]. Radiother Oncol, 2016, 121(1): 148-153.
- [11] FUJIMOTO K, SHIINOKI T, YUASA Y, et al. Efficacy of patient-specific bolus created using three-dimensional printing technique in photon radiotherapy[J]. Phys Med, 2017, 38: 1-9.
- [12] 丁继平, 涂文勇, 胡海生, 等. 基于3D打印技术的个体化口腔放疗支架的设计[J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 46(2): 458-459.  
DING J P, TU W Y, HU H S, et al. Design of individualized oral radiotherapy stent based on 3D printing technique[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2017, 46(2): 458-459.
- [13] 丁继平, 涂文勇, 胡海生, 等. 3D打印口腔支架对舌癌术后调强放疗危及器官的剂量学影响[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2015, 22(15): 1211-1225.  
DING J P, TU W Y, HU H S, et al. Influence on normal tissue dosimetry in intensity-modulated radiotherapy of post-operative lingual carcinoma patients with 3D intraoral stent[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2015, 22(15): 1211-1225.
- [14] 张琛, 王志鹏, 张昊兆, 等. 利用3D打印颅脑辐射等效体模进行个性化适形放疗的剂量验证[J]. 中华医学与防护杂志, 2017, 37(6): 437-441.  
ZHANG C, WANG Z P, ZHANG H Z, et al. Personalized conformal radiotherapy dose verification with 3D printing cerebral radiation equivalent phantom[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2017, 37(6): 437-441.
- [15] 钟青松, 阮亚明. 低熔点铅制作的质量控制[J]. 肿瘤防治杂志, 2001, 8(4): 416.  
ZHONG Q S, RUAN Y M. Quality control of low melting point lead production[J]. China Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2001, 8(4): 416.
- [16] 肖贵珍. 精确放疗挡铅块制作误差分析[J]. 四川肿瘤防治, 2007, 20(1): 51-52.  
XIAO G Z. The error analysis of accurate radiotherapy leading block production[J]. Sichuan Journal of Cancer Control, 2007, 20(1): 51-52.
- [17] 张胜, 徐艳松, 孙姗姗, 等. 3D打印材料的研究及发展现状[J]. 中国塑料, 2016, 30(1): 7-14.  
ZHANG S, XU Y S, SUN S S, et al. A review on the progress of 3D Printing Materials[J]. China Plastics, 2016, 30(1): 7-14.
- [18] 程燕婷, 孟家光. 3D打印材料柔性PLA基本性能表征[J]. 标准与测试, 2017, 11: 109-111.  
CHEN Y T, MENG J G. Characterization of basic performance of flexible PLA 3D printing materials[J]. Test and Standard, 2017, 11: 109-111.
- [19] 林俊华. 放疗铅模制作中气泡产生原因及消除方法[J]. 医疗设备信息, 2007, 21(4): 100-101.  
LIN J H. Cause and elimination of air bubbles in moulding radiation leaden block[J]. Information of Medical Equipment, 2007, 21(4): 100-101.
- [20] 李贤富, 郭飞, 谢力, 等. 电子线挡铅的制作方法及其X射线加电子线照射剂量测试分析[J]. 川北医学院学报, 2013, 28(4): 349-353.  
LI X F, GUO F, XIE L, et al. The method of making electron beam lead block and analysis of dose testing in X-ray plus electron beam irradiated[J]. Journal of North Sichuan Medical College, 2013, 28(4): 349-353.

(编辑:陈丽霞)