

引用格式:项明力,杨天勤,郭子豪,毋立芳.一种基于混色3D打印的个性化医疗模型间接制造方案[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(03):50-56.

文章编号:1673-4793(2023)03-0050-07

一种基于混色3D打印的个性化医疗模型间接制造方案

项明力,杨天勤,郭子豪,毋立芳*

(北京工业大学,北京 100124)

摘要:提出了一种个性化医学模型间接制造方案——将混色FDM3D打印技术和DLP面曝光3D打印技术相结合,能够完整保留医疗模型的外部轮廓特征和内部实体结构;同层换色FDM混色打印技术方案,可以实现内部复杂结构模型的彩色打印,具有多色彩突出、透明并易于观察内部结构的特征。基于本方案进行了复杂心脏结构的彩色打印验证,打印精度和颜色逼真度均符合要求,显示了该方案在医疗模型低成本制造上的应用潜力。

关键词:3D打印;混色FDM;医疗模型;模具制造

中图分类号:TP334.8;R319;TP391.73 **文献标识码:**A

An indirect manufacturing scheme for personalized medical models based on mixed-color 3D printings

XIANG Mingli, YANG Tianqin, GUO Zihao, WU Lifang*

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper proposes a personalized medical model indirect manufacturing scheme that combines mixed-color FDM 3D printing technology with DLP surface exposure 3D printing technology. This approach can fully retain the external contour features and internal solid structure of the medical model. The proposed same-layer mixed-color FDM printing technology scheme enables color printing of internal complex structure models, with multiple colors and transparent observation of internal structures. A complex cardiac structure was printed and verified using the proposed scheme, demonstrating high printing accuracy and color fidelity. This highlights the potential of the proposed scheme in low-cost manufacturing of medical models.

Keywords: 3D printing; color mixing FDM; medical model; casting mold

1 引言

随着3D打印技术的不断进步,它在医疗领域也有着越来越广泛的应用。从医学影像数据的CAD处理到3D打印实物,现代数字化设计与制造技术的结合,为医疗模型的制造和功能拓展提供了极大的可

能,推动了3D打印技术与医学的深度融合。制造的医疗模型可以应用于医疗教育、手术规划、手术演示和医疗研究等领域^[1]。相比传统的二维医学影像的观察模式,3D打印的模型提供了逼真的多感官反馈,医生可以更好地了解患者的病情,制定更准确的治疗方案,提高手术成功率和安全性;利用医疗模型,医生可

基金项目:北京市教委科技计划重点项目(KZ202110005007)

作者简介(*为通讯作者):项明力(1997-),男,硕士研究生,主要从事3D打印研究。Email:xiangm11115@163.com;毋立芳(1970-),女,博士,教授,主要从事3D打印研究。Email:lfwu@bjut.edu.cn

以和患者家属更加顺畅地沟通手术方案,减少医患矛盾;医疗模型还可以在医疗教育中使用,让医生更加深入地了解人体器官的结构和功能,提高他们的实际操作能力。全球每年有数以千万计的人口死于器官类疾病,使用医疗模型可以为有效治疗各类疾病提供帮助,具有极大的现实意义。国内外的众多研究学者也在他们的研究中肯定了3D打印医疗模型在医疗领域的积极作用。

选择合适的3D打印技术进行医疗模型的打印是非常重要的^[2],同一模型中应用不同的3D打印方法,可以清楚地体现出其差异。在具体应用中评估3D打印方法的质量时,无论该方法的精度和打印速度有多高,成本都是必须考虑的因素。在对群众的采访中发现,如果考虑成本因素,人们更倾向于选择经济实惠的熔融沉积成型(Fused Deposition Model, FDM)技术打印的模型作为术前参考,可见成本在一定的情况下可以补足精度和效果上的差距。过往的研究中,学者们专注于实现高精度的模型制造方法,忽略了普通民众的切实需求,高昂的设备成本和耗材成本劝退了大部分的临床应用者,使医疗模型的临床应用仍停留在小范围。

熔融沉积成型(FDM)技术通过将丝状热熔性材料加热融化,按照预设的路径沉积在打印平台上冷却成型。单台FDM打印机的售价低至300美元,热塑性长丝材料的售价约为每公斤20美元,成为最易获取、最低成本3D打印方法^[3]。为了解决医疗模型3D打印成本高昂的问题,采用FDM技术为主要手段,将是低成本制造技术的首要选择。本文提出了一种基于低成本FDM技术的新型术前医疗模型3D打印方案^[4],以肝脏模型为例初步验证了该方案的有效性(如图1),所打印的肝脏模型具有彩色、透明外壳,易于观察模型内部结构的特征,符合医疗模型应用的打印需求。然而,打印肝脏模型较为简单,因其内部仅由单一的红色血管结构组成,通过最基本的FDM打印机即可完成内部血管模型的打印。复杂的医疗模型如心脏,其内部结构复杂,同一层截面上需要打印多种颜色,是最难打印的3D打印医疗模型,已有方法很难实现。同时现有FDM技术对心脏模型的打印,仍然停留在单色打印阶段,模型色彩的呈现效果极差^[5]。目前最易获得的彩色FDM打印方案是三进一出的混色打印,能够满足目标模型任意单色的打印需求,但是其仅能在不同层高位位置切换打印颜色,不能同时完成多色模型的打印任务^[6]。

针对以上的研究背景与难点的分析,本文提出了

一套更加完善的医疗模型制造方案。对传统混色FDM控制方案进行优化设计,通过设置虚拟打印头实现同层换色,克服了传统混色FDM打印机仅能在层间变色打印的局限性,实现完全意义上的全彩打印。论文主要创新工作包括如下:

(1)提出了一套基于混色FDM的医疗模型间接制造方案,有机结合不同3D打印方法完成制造需求,充分发挥各自的优势。

(2)研究了一种虚拟打印头控制技术,实现混色FDM3D打印的同层换色,为复杂医疗模型制造提供技术支持。

(3)基于提出方案实现了心脏模型制造,制造模型的精度符合要求,模型效果能满足实际应用需求。

2 医疗模型制造

2.1 医疗模型制造方案

面向高质量、低成本、个性化医疗模型制造需求,本文研制了一种基于3D打印的医疗模型低成本制造技术。为了保证医疗模型功能性需求,应保证打印实物与医疗模型具有高度一致性;为了保证医疗模型的可观赏性,应保证打印实物彩色透明;为了保证医疗模型的经济性,应尽量降低打印成本。

对绝大多数的医疗模型来说,模型本身对外表现为一个较大的腔体结构,内部由组织液等填充物充斥。为了表现医疗模型内部特征,希望将该医疗模型的外部特征透明化,重点突出显示内部的实体结构对象。

本文将人体脏器医疗模型分为三个部分:内部实体结构、内部组织填充物、整体器官外轮廓形状。不同部分有不同的特点和不同的制造需求,内部实体结构一般为彩色,内部组织填充物一般为透明。虽然市面上存在透明耗材在售,但是该透明耗材在被加热熔化成型之后透明效果极差,不符合本文的预期目标。

为此,本文采取分别制造、集中组装的分步制造方案,最大限度保障医疗模型的可视化效果。首先通过FDM技术低成本打印模型内部实体结构;其次借助DLP面曝光技术打印速度快、打印质量高的优势^[7],快速打印较大尺寸的外壳模具;最后采用传统灌注手段,利用透明硅胶配合已有的内部实体结构和外壳模型,一次性灌注出完整的人体器官模型。该方案充分发挥不同3D打印技术各自的优势,灵活巧妙地实现了彩色、透明、光滑的医疗模型打印。

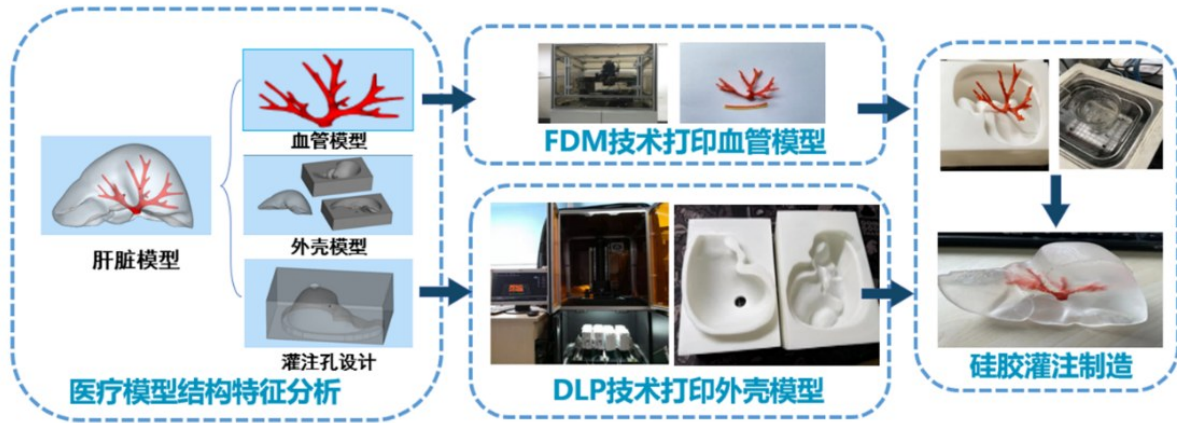


图1 医疗模型制造框架图

2.2 外壳模具设计

制造方案当中提到,需要通过数字光处理技术打印出一个精细的人体器官外壳模具,而后将各打印部分组装到内部完成整体模型的制造。为此在可打印三维数字模型生成之后还需要进行外壳模具的设计,要求该模具具有可以被灌注、不漏液、能静立放置等特征。

首先,对原始医疗模型进行AABB包围盒生成,并将该包围盒四周外扩20mm,得到一个比实际包围盒更大的长方体模型。然后,我们通过三维布尔运算对长方体和整体器官模型进行减法计算,得到内部中空的器官轮廓包围盒模型(如图2所示)。

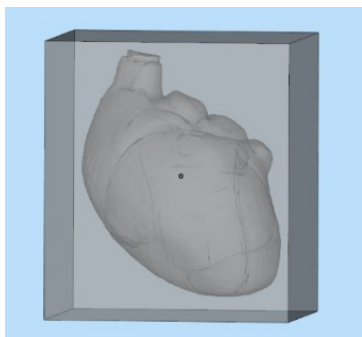


图2 内部中空的外壳模具

其次,对该中空包围盒模型进行二维切片(见图3),然后对所得到的二维切片图像进行区域面积计算分析。为使得内部实体结构能够完全嵌入模具中,模具上半壳体的底部开口需要足够大以能够容纳实体结构的最大截面,即选择最大轮廓面积的切片高度作为外壳模具的上下两部分的分割面(见图4)。

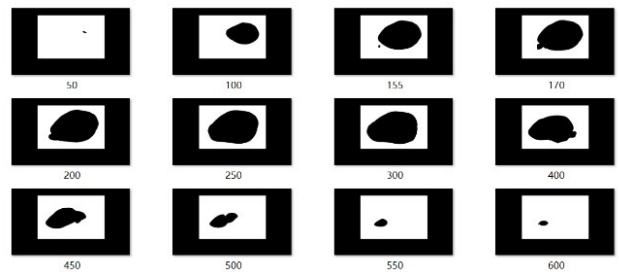


图3 模型二维切面图分析

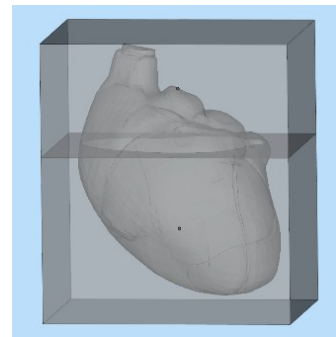


图4 外壳模具最大面积处切割

为了保证灌注液体之后不漏液,通过在上下两部分外壳模型设置合理的插销结构保证模具内部的密封完整性(如图5)。

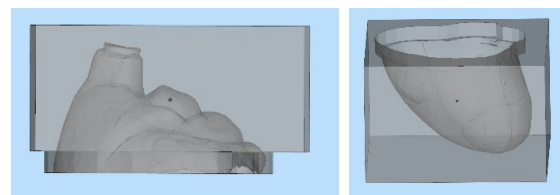


图5 外壳模具内嵌插销结构示意图

同时,为了保证可以向内部灌注液体,需要在模

具外壳的顶部预留出灌注孔。灌注孔的位置选择在模具顶部最薄的位置,浇口的形状选择类似漏斗的形状(如图6)。

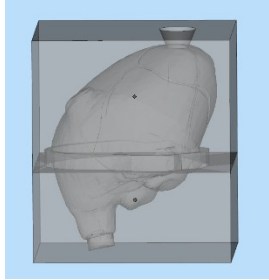


图6 外壳模具灌注孔示意图

3 按需取色的混色FDM技术

现有的混色FDM打印技术存在着颜色切换不灵活的限制,只能实现层间颜色切换和层间渐变色的效果,无法在同一层内同时按一定顺序打印多种颜色,即无法同层换色。为解决这一问题,提出了按需取色FDM技术,实现多色模型的打印。

3.1 混色FDM介绍

把不同颜色的原料混合起来形成新的颜色的过程称为混色。在混色FDM技术中,采用一种特殊的打印头,将不同种颜色的耗材共同装载至混合腔中混合,从而混合出目标颜色实现彩色打印。如图7所示,该打印头通常采用三进一出的挤出形式,基于自然光混叠的原理,选用三基色耗材作为打印头的原始输入,通过混合三基色实现三基色之外的颜色创建。在打印机控制主板中,通过混色控制算法自动计算出目标颜色的三基色耗材的混合比例。并将该混合比例转化为对应挤出机步进电机的控制脉冲,从远端通过送料管将三种颜色的PLA材料送入200℃的打印喷头中,最后由直径0.4mm的喷嘴挤出成型。

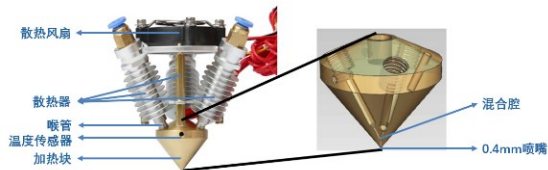


图7 三进一出打印头结构图

实际操作中,选用CMY的减色原理实现颜色的混叠。该方法原色叠加后减少了被反射的可见光,降低了亮度,在印刷和艺术领域中应用广泛。CMY的

三个字母C、M、Y分别指代青色、品红和黄色三种色彩,由于市面上专门用于混色打印的品红色、青色的PLA耗材较少,本文选用红色与蓝色的PLA耗材将其替换。如下图8所示,本文所选用的三基色耗材。



图8 三基色耗材选用

通过RGB与CMYK的转换公式获取目标颜色以及三基色耗材的C、M、Y分量值,而后进一步建立起颜色与三基色耗材混合比例之间的对关系。在混合比例的计算之前,有必要进行三基色耗材的颜色标定。先用三种基色耗材打印纯色小方块,然后通过自然光下的图像像素分析,获取三基色的CMY三个分量,以此为基准进行混色比例的计算,图9是测试打印的纯色小方块以及两两交叉等比率混合的混色的结果。



图9 纯色、混色小方块测试打印结果

表1 三基色耗材颜色分量测定结果

	RGB值	CMY值
红色	216,10,28	0,100,97
黄色	224,206,0	0,8,100
蓝色	17,87,237	93,63,0

在测量得到三种原始输入耗材的CMY值后,可通过设计比例系数进行混合,尽可能达到目标颜色值。假设红、黄、蓝三种耗材分别是 α 、 β 、 γ ,三种耗材的混合比率分别是 k_α 、 k_β 、 k_γ ,混合之后颜色为T,则混合后的颜色计算公式如式(1)所示,易求解出三基色耗材的混合比例:

$$\begin{cases} k_\alpha + k_\beta + k_\gamma = 1 \\ C_T = k_\alpha \times C_\alpha + k_\beta \times C_\beta + k_\gamma \times C_\gamma \\ M_T = k_\alpha \times M_\alpha + k_\beta \times M_\beta + k_\gamma \times M_\gamma \\ Y_T = k_\alpha \times Y_\alpha + k_\beta \times Y_\beta + k_\gamma \times Y_\gamma \end{cases} \quad (1)$$

3.2 多色打印控制方案

通过调节三基色耗材对应挤出机的挤出比率,从

而混合出想要的挤出成型颜色。3D打印机的混色控制的关键在于定义一种混色指令,形成一套标准的机器行为规范,将耗材混合比例自动转换为42步进电机的驱动脉冲数量。

一般多进一出的混色打印机在固件参数上被限制为单个打印头,对应底层代码中只有一组颜色缓存区保存着当前设定的挤出机混合比例。在需要切换颜色的时候,依靠M165指令不断刷新该缓存区的变量值来实现颜色切换。

不同于一般混色FDM打印机的做法,本文效仿多打印头切换的控制模式,预先设定挤出机工作组的混合比例,而后通过切换挤出机工作组的方式实现打印颜色的切换,即虚拟多头的控制策略。

在底层代码中表现为创建多个虚拟打印头,这些打

印头是代码逻辑上存在而在现实中不存在的,在真实机器上仅存在一个物理打印头。每个挤出机工作组对外表现为虚拟的单色打印头,每个虚拟打印头独享一组颜色缓存区,即每个虚拟打印头都有一组变量保存该打印头的挤出机的混合挤出率,不同的挤出率组合代表不同的颜色。可以通过修改该打印头的颜色缓存区的混合比例,修改该单色打印头的打印颜色。

控制方案流程图见图10。打印前,通过M163、M164指令配置虚拟打印头对应挤出机的混合比例,并切片过程中建立分块模型同虚拟打印头的一一对应的责任链关系,将不同的打印区域分配给不同的虚拟打印头专门负责。随着打印头运动区域的轮转,不断通过T0、T1、T2等指令切换虚拟打印头,实现打印过程中打印颜色的有序切换。

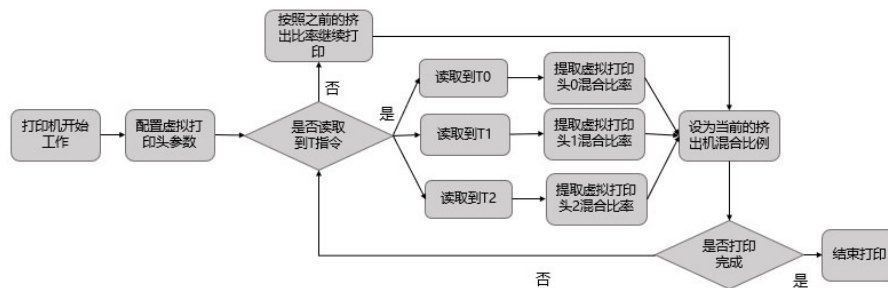


图10 虚拟多头控制方案流程图

3.3 G-code代码生成

3D打印机的工作过程全程由G-code文件决定,因此混色控制的重点在于调整G代码,在合适的位置上添加3D打印机可以识别的混色指令M165。过去混色G代码的生成主要依赖于切片软件支撑的后处理脚本插件实现,该脚本通过获取G代码中的Z轴坐标高度,从而在模型的指定层高位置插入一条混色指令,实现Z轴方向上的自定义混色。

这种生成方式的矛盾点在于混色的指令是通过后处理方式插入的。而在切片完成之后,G代码中并未携带模型的颜色信息,留下的仅仅是三维坐标点信息。难以通过后处理的手段,对三维坐标特征点进行识别,从而在正确的坐标点插入对应的混色控制指令。

并且3D打印生成G代码的过程是将三维模型按照层高厚度进行切片,得到Z轴方向上的二维横截面图片,并依据二维截面的形状轮廓生成相应的打印头

运动路径代码。在整体切片过程中,并未引入对二维切片图像的运动区域的划分,缺少了对同色区域合并后的单独的运动路径规划,致使其生成的运动规划对打印颜色而言是无序的。

为此在切片生成的G-code文件中,引入了颜色标签的概念。我们通过T0、T1、T2等颜色标签标识当前的G代码运动路径是在执行哪一个分块模型的打印任务,从而明确此时应该打印什么样的颜色。借助现有成熟的切片软件完成对每个颜色分块模型的单独路径规划,生成多份G代码,而后对这些多份G代码执行后处理拼接操作。

多色模型打印G代码结构见图11。Python脚本代码对输入的多份G代码进行文本处理,按照模型的层高位置有序合并多份G代码。最终的G代码按照实际需要打印的颜色顺序,在文本中交替内嵌入T0、T1、T2等指令,最终串联起整个打印过程。同一层的打印中依次完成T0、T1、T2等分块模型的打印过程,实现在同一层中交替打印头的挤出颜色进行多色模型的打印。

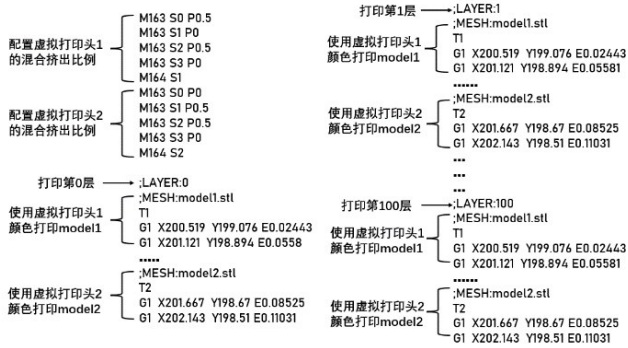


图 11 多色模型打印 G 代码结构

值得一提的是,多份G代码的按Z轴高度拼接在实现上并不是简单的文本合并。一方面我们需要考虑到将多份G代码中独立的E轴挤出机的行程统一起来,另一方面需要协同多份G代码中各自的温度控制、风扇控制以及挤出机回抽控制和运动速度控制等逻辑。考虑到混色打印过程中的精准换色与防堵头问题,还需要在后处理过程中引入了擦嘴塔最小体积和防堵头微挤出策略。将混合腔中残留的耗材在模型外挤出或打印在模型内部填充,使该部分在最终模型上不可见;防止混合腔中熔化的耗材倒灌而导致溢料,在挤出机不工作的时候也提供微弱挤出,保持混合腔的流体平衡向下流出。

4 打印验证

4.1 实验条件

如图 12 所示,自主搭建有 FDM、DLP 打印机各一台,同时配备有硅胶试剂、超声波清洗池、烧杯、玻璃棒、电子秤等试验仪器。FDM 打印机是由普通 FDM 打印机升级改造而来,具备同层换色、按需取色功能的彩色 FDM 打印机;DLP 打印机同样为我们自主搭建的基于投影光源的面曝光 3D 打印设备,具有大尺寸、快速、高质量的成型特征;其次是我们的硅胶试剂与催化剂,以及超声波清洗池,用来对添加催化剂后的硅胶产生的气泡问题进行消除。

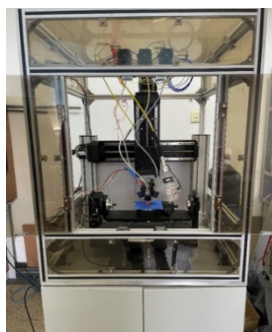


图 12 按需混色 FDM 打印机

4.2 全彩多结构心脏模型打印

(1) 内部实体结构打印

完成三基色耗材的标定后,为每个心脏模型的房室结构选择目标打印颜色,并依据选择的目标颜色,自动计算得到三基色挤出机的混合比例。通过自主研发的按需取色 FDM 打印机完成心脏内部多房室结构的一体打印,无须分块打印而后拼接,利用连续打印过程中的热残留直接自动拼接,见下图 13。



图 13 心脏内部房室结构多色打印

(2) 大尺寸外壳模具打印

如图 14 所示,接下来将心脏的心肌外壁模型导入系统中,生成符合要求的外壳模具模型,并使用面曝光 3D 打印机进行快速、细粒度的外壳模具制造。随后将上步打印的内部心脏模型嵌入到模具模型中,整体组装起来等待灌注透明材料。



图 14 外壳模具制造与组装

(3) 透明材料选择

如图 15 所示,透明材料选用道康宁 DC 184 硅橡胶,它是由液体组分组成的双组分套件产品,包括基本组分与固化剂,基本组分与固化剂按 10:1 重量比完



图 15 道康宁 DC184 硅橡胶

全混合。无论厚薄,混合液将在25~150°C的温度范围内固化成为具有韧性的透明弹性体,无放热现象,无需二次固化。固化过程完成后,可立即在-55~200°C的温度范围内使用,可以很好地充当医疗模型内部组织液填充物。

在将双组分搅拌混合的过程中,搅拌液当中混入了大量的气泡。为解决该问题得到澄澈的混合液,我们通过超声波清洗池对气泡进行消除。如图16所展示的可以看到,超声波清洗池在消泡上取得了十分明显的效果,大量小气泡在超声波震动下相互聚合成较大体积的气泡而上浮,从而达到消除气泡的效果。



图16 超声波消除气泡效果

(4)打印实物展示

等待气泡排出后将硅胶灌入模具中,静置24小时后拆除模具模型,完成最终心脏模型的制造(见图17)。



图17 模具灌注与拆卸

5 结论

3D打印是一项令人兴奋的新技术,使人们能够方便快捷地制作出各种解剖结构复杂的实体器官模

型。过去学者针对3D打印医疗模型的研究通常侧重于创建高质量但昂贵的模型,很少有文章考虑成本因素对推广应用的现实意义,发掘低成本FDM制造技术在医疗模型场景下的应用潜力。本文所提出的一套新型的、完备的医疗模型制造方案,可以对绝大多数医疗模型取得良好的打印效果。3D打印对象由于有了透明、全着色等属性,将越来越受到医疗机构和医生的重视和青睐,从而促进3D打印技术在医疗领域的应用。在交叉学科时代,同类领域先进技术的融合不可避免,FDM技术与DLP技术深度融合、取长补短,将推动器官模型向更高维度发展,为未来人们的生命健康带来革命。

参考文献(References):

- [1] 张慧梅,冯淑莹. 3D打印在医学中的应用及其发展前景[J]. 科学技术创新, 2020(24): 183-184.
- [2] Jin Z, Li Y, Yu K, et al. 3D printing of physical organ models: recent developments and challenges[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(17): 2101394.
- [3] 辛增念. 熔融式3D打印的研究现状及发展应用[J]. 科学技术创新, 2020(21): 51-53.
- [4] Yang T, Xiang M, Zhao L, et al. A novel solution to manufacturing multi-color medical preoperative models with transparent shells[C]// SA '22: SIGGRAPH, 2022: 1-2.
- [5] Chen M Y, Skewes J, Woodruff M A, et al. Multi-colour extrusion fused deposition modelling: a low-cost 3D printing method for anatomical prostate cancer models[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1).
- [6] 张帆,许亚婷,谢双楠. FDM全彩3D打印的混色延迟处理方法研究[J]. 科技与创新, 2022, 196(04): 157-160.
- [7] 毋立芳,赵立东,邱健康,等. 面向面曝光3D打印的模型自适应光照均匀化方法[J]. 信号处理, 2017, 33(10): 1308-1316.

编辑:王谦