

# 3D 打印技术在主动脉夹层中的应用进展

曾岸轲<sup>1,2</sup>, 韦亚宁<sup>1</sup>, 张怡蒂<sup>1</sup>, 董雅倩<sup>1</sup>, 吴 励<sup>1</sup>

(1.上海健康医学院医学影像学院,上海 201318;

2.中山大学附属第三医院核医学科,广东 广州 510630)

**摘要:**主动脉夹层(AD)是常见的急性主动脉综合征,临床上通常采用 CT 血管造影(CTA)检查评估 AD。无论是开胸外科手术或腔内修复介入手术都需要手术医师对 AD 患者的主动脉及分支血管的解剖信息充分把握。但 CTA 影像只能通过电脑屏幕二维显示,需要医师在大脑中构建三维结构;其次,AD 患者的主动脉弓上分支血管也存在明显的个体性差异,以上两点对于临床经验丰富的医师都是很大的挑战。随着医学与技术的发展,3D 打印技术在临床医学中已得到广泛应用,近年来也逐渐应用于主动脉夹层这一疾病中。本综述主要阐述近年来 3D 打印技术在不同分型的主动脉夹层诊治中的应用进展,探讨 3D 打印技术在主动脉夹层疾病中的价值,为实现精确化、个体化疾病治疗提供参考。

**关键词:**3D 打印技术;主动脉夹层;CT 血管造影;腔内修复术

中图分类号:R543.1;R814.42

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1006-1959.2024.04.036

文章编号:1006-1959(2024)04-0188-05

## Application Progress of 3D Printing Technology in Aortic Dissection

ZENG An-ke<sup>1,2</sup>, WEI Ya-ning<sup>1</sup>, ZHANG Yi-di<sup>1</sup>, DONG Ya-qian<sup>1</sup>, WU Li<sup>1</sup>

(1.College of Medical Imaging, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China;

2.Department of nuclear medicine, the Third Affiliated Hospital, Suh Yat-Sen University, Guangzhou 510630, Guangdong, China)

**Abstract:** Aortic dissection (AD) is a common acute aortic syndrome. Clinically, CT angiography (CTA) is usually used to evaluate AD. Whether it is open thoracic surgery or endovascular repair interventional surgery, surgeons need to fully grasp the anatomical information of the aorta and branch vessels of AD patients. However, CTA images can only be displayed on a computer screen in two dimensions, which requires doctors to construct three-dimensional structures in the brain; secondly, there are also obvious individual differences in the branches of the aortic arch in AD patients. The above two points are great challenges for doctors with rich clinical experience. With the development of medicine and technology, 3D printing technology has been widely used in clinical medicine, and has been gradually applied to the disease of aortic dissection in recent years. This review mainly describes the application progress of 3D printing technology in the diagnosis and treatment of different types of aortic dissection in recent years, and discusses the value of 3D printing technology in aortic dissection, so as to provide reference for the realization of accurate and individualized disease treatment.

**Key words:** 3D printing technology; Aortic dissection; CT angiography; Endovascular repair

主动脉夹层(aortic dissection, AD)具有起病急、发展迅速、病死率高的特点,是最危重的主动脉疾病之一。有统计表明<sup>[1]</sup>,只有 39%的患者在症状出现后 24 h 内能得以确诊。国内主动脉夹层登记处(Sino-RAD)通过比对国内 AD 患者与国外 AD 患者数据信息,发现国内 AD 患者存在治疗策略选择差异大的特点<sup>[2]</sup>。AD 分类主要依据夹层的破口位置和主动脉受累范围。临床上常用分型包括 DeBakey 分型和 Stanford 分型,Stanford 分型较 DeBakey 分型更简洁,且与临床手术方法更为紧密,因而受到广泛使用。

Stanford A 型主动脉夹层(TAAD)指凡是累及升主动脉的夹层,主要的治疗方式是开胸外科手术。Stanford B 型夹层(TBAD)指近端破口位于且累及左锁骨下动脉以远的降主动脉夹层,其主要的治疗方式是胸主动脉腔内修复术(TEVAR)。CT 血管造影(CTA)能够明确 AD 诊断,并获取夹层的范围、破口位置、分支血管供血情况等信息,具有空间分辨率高、多种后处理方式等优势,是可疑 AD 患者的首选影像学检查方法<sup>[3]</sup>,但 CTA 等影像数据只能在通过工作站屏幕二维显示,术者需要自行在大脑中构建血管的真实模型。尤其 TAAD 患者,开胸外科手术具有耗时长、手术技术难度大、患者术后并发症和病死率相对较高的特点,只有当术者完全了解解剖结构,充分准备正确合适的手术器械,才有可能实现精准手术操作,减少手术期间的造影次数,最终达到提高手术成功率的目的。3D 打印模型能够 1:1 地呈现患者夹层病变的真实情况。无论是夹层的破

基金项目:国家级大学生创新训练计划项目(编号:202210262016)

作者简介:曾岸轲(2001.1-),男,广东梅州人,本科,技师,主要从事医学影像技术研究

通讯作者:吴励(1979.6-),女,湖南湘潭人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事医学 3D 打印、影像新技术临床应用研究

口、累及范围,抑或是锚定区及开窗的部位、大小和角度等关键信息都能呈现在模型上,有利于制定手术方案。随着技术的发展和临床需求的日益增多,3D 打印技术在心血管领域中的应用发展迅速,凭借立体直观、打印精准、个体化的特点,有望成为临床诊治 AD 的最有效工具之一。本文主要探讨 3D 打印技术在 AD 外科诊疗、介入治疗以及在临床教学和医患沟通中的应用方法和价值,为实现精确化、个体化疾病治疗提供参考。

### 1 3D 打印在 TAAD 中的应用

TAAD 的外科治疗术式主要是孙氏手术,即全弓置换和象鼻支架置入术,该手术因需要处理主动脉根部与弓部,大多情况下需要依靠体外循环,深低温停循环进行根部与弓部的置换或是血运重建。目前,孙氏手术在临床上已取得较好的临床治疗效果。但该术式具有创伤大、耗时长,术中操作较复杂、并发症较多的特点,且多数情况下只能在大型心血管中心完成。其次,每个患者的夹层撕裂位置及范围、主动脉弓上分支的血管内径、开口间距及角度都存在个体化差异<sup>[4]</sup>,仅仅凭借术前影像资料难以对患者血管信息作全面了解。

3D 打印技术可以将患者血管情况进行 1:1 精确打印,可全方位观察病变部位形态,帮助制定开胸手术的方案,并预测术中可能发生的情况,尽可能减少手术时间,提高患者预后效果。王成等<sup>[5]</sup>选取 3D 打印辅助的个体化组合覆膜支架辅助手术及孙氏手术各 20 例 Stanford A 型病例进行比较,结果显示 3D 打印辅助的个体化组合支架组体外循环时间、深低温停循环时间、主动脉阻断时间、ICU 住留时间均优于孙氏手术,有良好的近期临床效果。张靓等<sup>[4]</sup>对比分析了 3D 打印技术辅助制作组合支架手术组与常规孙氏手术组的手术效果,结果显示 3D 打印模型的存在有效提高了手术效率,避免了对开胸手术时间的浪费。另外,在手术操作期间,个体化支架的定制避免了分支血管与人工血管多个端口吻合的操作,明显地减少了术中端口缝合时间,降低了出血的可能性。两组对比显示,使用 3D 打印模型辅助组合支架制作手术组总的手术时间、体外循环或停循环时间均明显低于观察组,可见 3D 打印技术在临床中的应用已取得了较好的成效。个体化支架的准确组合意味着支架的相对位置、相对大小并充分考虑个体情况,因此规避了支架移位、内漏的风险。

TAAD 病情进展迅速,若患者发病后未及时接受治疗,超急性期(<24 h)病死率每小时增长 1%~

2%,24 h 病死率为 20%左右,48 h 病死率可达 30%<sup>[6]</sup>。研究表明<sup>[7]</sup>,急性 TAAD 术后早期发生并发症的风险较高,包括肾功能不全、呼吸功能不全、肝功能不全、低心排综合征以及神经系统问题。

对于不必更换主动脉弓的 TAAD 患者,可通过腔内介入治疗或微创杂交手术进行治疗。部分累及弓部和升主动脉的 TAAD 患者通过杂交手术进行治疗,取得了不错的疗效<sup>[8]</sup>。常用的介入手术方法包括以下 3 种:原位开窗技术、烟囱技术和预开窗技术。原位开窗技术在解剖复杂的主动脉内重建难度较高;烟囱技术内漏率较高,易发生中远期逆行性 A 型夹层(RTAD)<sup>[9]</sup>。相比之下,体外预开窗虽无以上缺点,但其对开窗位置准确度要求较高。杨晗等<sup>[10]</sup>报道了 2 例应用 3D 打印技术辅助腔内治疗并进行原位开窗的案例,术前基于患者前期影像资料进行血管模型的 3D 打印,评估入路血管情况和夹层大小及角度等情况,完成支架尺寸及型号选择、开窗位置等手术方案内容的制定;术中操作阶段,根据 3D 打印模型调整 DSA 球管的位置、方向和角度并进行原位开窗、支架植入或覆膜支架预开窗操作;2 例患者术后各影像资料显示各分支通畅良好,夹层破口封闭,假腔内血流明显消失,各内脏器官动脉及远端髂动脉血流开放。

束颈技术是腔内介入手术的补充,通过将支架临时缩小,从而调整支架方向以对准窗位<sup>[9]</sup>,它与 3D 打印技术的结合能够获得更高的手术精准度。刘昭等<sup>[9]</sup>报道了 1 例两技术相结合引导主动脉弓预开窗治疗 TAAD 的案例,该患者夹层破口位于头臂动脉,并发生逆撕至升主动脉的情况;手术过程中,在未阻断颈动脉血流或建立相关临时转流的条件下完成了主动脉弓的三开窗;术后患者行胸腹主动脉 CTA 显示弓上分支血流通畅,无支架移位及神经系统并发症的发生。

### 2 3D 打印在 TBAD 中的应用

TEVAR 是 TBAD 的主要治疗方式,相较于其他治疗方式具有安全性高、并发症少、恢复快的特点。其原理是采用覆膜支架覆盖原发破口,阻止血液持续流入假腔,促进假腔血栓吸收机化;真腔血流恢复,远端器官及肢体的血供得到改善,最终达到血管重塑、功能恢复的目的。TBAD 患者一经确诊,进行基本的药物治疗后,应尽早施行手术干预。国内专家共识指出<sup>[1]</sup>,TEVAR 较单纯药物治疗能够更好的重构主动脉并降低远期主动脉不良事件的发生风险。TEVAR 同其他介入手术一样,无法直观血管的真实形态,只能

通过透视、造影等术前影像资料进行操作判断。3D 打印模型能够在影像资料的基础上更好呈现患者的血管情况,帮助术者预判术中支架大小、释放位置和角度,并帮助术者理解关键解剖结构,进一步明确手术过程、细化手术预案,从而实现精准定位、测量和植入,对于 AD 腔内介入治疗意义重大<sup>[10,11]</sup>。

相较于常规外科开胸手术,TEVAR 操作简便、创伤小、病死率和术后并发症发生率低,但因其于腔内进行,仍然存在血管内漏、神经系统紊乱发生的可能,甚至可能会出现术后支架近端新发破口(SINE)引起 RTAD 发生,从而大大增加患者病死的可能性。而覆膜支架与主动脉壁严密贴合能够减少内漏情况的发生;支架管径的缩放准确能够减少远端 SINE 的发生<sup>[3]</sup>。因此,合理的支架技术及合适的支架尺寸是手术成功实施的关键。结合 3D 打印技术,医师能够在模型上进行术前关键数据的测量,从而选择合适的支架尺寸和支架技术,避免术中反复探查,从而减少手术时间,提高手术成功率。

对于出现破裂或存在破裂征象、灌注不良以及锚定区不足 15 mm(主动脉夹层原发破口或主动脉瘤瘤体近端与左锁骨下动脉开口之间的距离<15 mm)的复杂性主动脉夹层(BC)患者,单纯的 TEVAR 往往不能达到最大限度的治疗效果,需要结合烟囱技术、开窗技术等技术的实施,以确保 LSA 的血供。近年来,体外开窗技术在 TBAD 的治疗中已经取得了显著效果。临床上通常基于 CT 和造影等影像数据对覆膜支架进行体外开窗定位,定位偏差往往会增加手术难度和时间并提高手术的风险。3D 打印技术的发展使得其在模拟复杂主动脉的解剖形态结构上有明显的优势,可以在 3D 打印模型上进行预开窗,从而精准实现体外开窗定位。有研究表明<sup>[12]</sup>,使用 3D 打印模型辅助体外开窗,相较于传统的开窗定位能够获得更精准的匹配效果,短期的随访也能证明前者的安全性与可靠性。有报道了 3D 打印技术指导下体外开窗的可行性和应用效果<sup>[13]</sup>,10 例患者均在 3D 打印模型指导下进行体外开窗并完成 TEVAR,1 例同期行 PCI 术,术后患者均无并发症发生,无围术期死亡病例,证明 3D 打印技术融合体外开窗在 TEVAR 中的实际应用价值。多项研究均表明<sup>[14-17]</sup>,应用 3D 打印技术指导不同分型如慢性、亚急性 AD 以及复杂主动脉病变的腔内介入手术,能准确放置支架,取得满意的手术效果。

累及内脏分支的夹层患者,通常有较高的病死率和并发症发生率<sup>[18]</sup>。预开窗及分支支架腔内修复

术(f/bEVAR)除了能够完成血管的腔内修复外还能兼顾内脏分支的血管重建,在治疗累及内脏分支的主动脉疾病中已得到广泛应用,并取得了良好的效果<sup>[19]</sup>。在扭曲严重的主动脉中,支架植入后会导致内膜片发生明显移动,使得开窗位置与对应分支之间无法精准匹配。因此,提高 f/bEVAR 手术成功率的关键步骤就是开窗位置的评估。如果仅仅通过影像手段进行术前评估,将难以确定支架的展开位置。李逢时等<sup>[19]</sup>通过熔融沉积的方式 3D 打印出 5 例解剖病变复杂的 AD 患者的透明血管模型,在模型上术前测量,并在标记相关血管的预开窗位置及支架膜上的相应位置后进行手术,术后无相关并发症及围手术期死亡病例的发生。

在临床应用方面,临床医师需在较高精度的 3D 打印模型下观察解剖结构或进行准确的术前手术规划。3D 打印模型的精准度越高,提供的术前规划方案就越具备临床价值。张文卿等<sup>[20]</sup>分享了基于 CT 增强数据 3D 打印 TBAD 模型的经验,分析总结了在打印精度方面存在的问题:一是对于各个阶段的对象(患者、CT 图像、重建模型、3D 打印模型)进行数据测量时,测量点的选择可能存在较大误差;二是使用不同软件对各阶段图像或模型测量也会影响模型精准度;三是假腔内不同程度的血栓化会影响真正血管腔的勾画,这种误差会在之后 STL 格式模型生成或是 3D 打印阶段逐渐放大。由此可见,如何进一步改善 3D 打印模型精准度的问题,提供更精确的测量数据也将成为日后研究的方向。

此外,3D 打印技术还可用于评估 TEVAR 术后患者的长期疗效和预后情况<sup>[21]</sup>。在患者术后长期随访的过程中,对每次发生并发症或再次干预的血管进行 3D 打印,以更好地解释多年随访中不同的干预措施,并作为医学教育的实际操作工具。

吴励等<sup>[22]</sup>的研究显示,区别于局部 3D 打印的血管模型,一体化 3D 打印的血管模型打印范围更全面(弓上三支至双侧股动脉),能够更好地帮助医师术前评估及制定手术方案。此外术者也可根据患者所需,3D 打印出具备不同特点的模型(实体模型、模糊整体打印模型、透明分段打印模型、拼接模型),满足各自的教学或辅助诊疗等需要。其中,拼接模型可根据手术方案选择拼接位置,但需更长的模型制作时间。所有模型的打印用时 9 h 至 3 d,均能够满足亚急性期及慢性期 TBAD 患者行 TEVAR 的术前评估需求。

### 3 3D 打印在临床教学和医患沟通中的应用

3.1 临床教学 3D 打印模型不仅在不同 AD 疾病的诊治过程中有着重大价值,在临床教学与医患沟通方面也有着显著意义。通过 3D 打印技术进行患者局部组织器官的精准模型制作,不仅有利于临床医生提高对患者复杂解剖区域的直观理解,形成组织的 3D 直观认识,而且在面对特殊的复杂病例时,可以进行个性化 3D 模型定制,在手术开始前提前规划方案,模拟手术过程<sup>[23]</sup>。

正是由于 3D 打印模型个性化、立体化定制等显而易见的特点,使其在医学教学和培训中有着较为广泛的应用。有相关研究调查显示<sup>[24]</sup>,当 3D 打印模型介入到心血管相关专业知识的教学考核中,通过 3D 模型辅助教学会比传统教学形式下的学生成绩更优异。在心血管科室的临床教学与培训中,通过选取不同的颜色、不同性质的材料对心脏及心血管进行 3D 打印,3D 打印模型能够帮助医师及医护人员更加直观地理解复杂的解剖结构。比如,通过用不同颜色对真腔、假腔、内膜片等结构上色,可以十分直观地了解主动脉夹层的破口位置、大小、撕脱长度等基本术前数据<sup>[25]</sup>。通过某些实心材料可以增加模型的硬度,更利于对主动脉空腔结构的支撑,但却不利于破口的显示;而透明材料就可以解决这一问题,上色后也更为美观;但当追求更贴近实际的手术体验时,就需要寻找一种柔软的材料,使得模型更贴近真实血管,但模型支撑性就将是一种挑战。由此可见,不同材料有着不同的优缺点,当仅仅应用于教学时,3D 模型也可以适当降低对材料要求和打印精准度。

在医学生的教育中,由于心血管相关疾病手术的复杂性,以及医学生本身就缺乏实际实践能力,这极大程度限制了医学生对实际手术的了解,而 3D 打印模型通过模拟手术过程,让医学生有机会操作每一种不同分型的 AD 的手术流程,不仅能进一步加深复杂的解剖知识、拓宽医学生在 AD 中的研究视野,还能进一步提高医学生的实际操作能力<sup>[26]</sup>。多个实验得出将 3D 打印 AD 模型应用于心血管外科住院医师的培养教学,能够增加住院医师对 AD 病变特点的理解和认识,加深临床教学中住院医师对于复杂血管病变的学习效果<sup>[27,28]</sup>。依据患者个体制定的 3D 打印模型能够更加真实、准确地反映其个体化的 AD 特点,更直观地反应治疗策略地选择依据。对于特殊复杂的病例,体外模拟能更直观地体现出术中可能出现的问题,有利于完善手术策略方案。

不仅如此,3D 模型还有助于为血管外科医师提供学习新技术、训练特定手术的教学实操机会。通过 3D 打印技术对某特殊病例的需要手术介入的解剖区域的器官或组织进行打印,医师可以利用三维、立体的模型进行新技术、特殊手术方案的演练,同时这些模型还可以用于培训心血管外科医师<sup>[29]</sup>。与此同时,在某些难度较高的手术和特殊病例下,3D 打印模型模拟的手术过程对于缺乏经验的年轻医师来说,有着更显著的帮助<sup>[30]</sup>。

3.2 医患沟通 对于医务工作者而言,医患沟通在临床工作中是一项不可避免的医疗活动。医患之间良好的沟通可以帮助患者更清楚地了解病情,积极配合治疗,减少医疗纠纷,提高患者满意度。在 AD 手术的术前沟通过程中,由于心血管的解剖、生理和心外空间之间关系的复杂和手术的操作难度,对于毫无医学背景的患者及其家属在手术方案和手术治疗的认识上通常存在困难。但医师可以基于形态结构上更为直观的 3D 模型对患者家属进行术前谈话,通过通俗易懂的讲解再结合直观的模型使医学知识不足的患者或家属更易于理解,有助于医患沟通,方便向患者及家属展示患者的病情情况。同时,在心脏外科某些高风险手术中,疾病的病理及解剖改变也可以利用 3D 模型与患者和家属进行讲解,利用模型告知其病变区域、手术方式的选择及目的,以及手术风险的存在情况,增加患方对疾病以及手术过程的了解和认知,以此有效地减少由于医疗知识的不对称所造成的医患矛盾和纠纷<sup>[23]</sup>。

### 4 总结

3D 打印技术于上世纪 90 年代初开始在医学中逐步应用,目前在心血管疾病中的应用也逐渐走向成熟。本文概述了 3D 打印在 AD 中的应用进展。借助 3D 打印技术能进行术前模拟,获取关键手术信息,制定个体化的精准手术方案;并进行临床教学,提高学员对于疾病和手术的认识;更好的进行医患沟通,增加家属的理解和配合。3D 打印的在打印精度、打印准备时间和打印成本方面存在明显局限,并且为了提高心血管外科领域 3D 打印的效率和准确率,需要心血管外科医生、心血管介入医生、放射医生及工程师组成的多学科团队进行指导或提出关键意见;此外,大多 3D 打印的应用研究样本量较小,无法得出可靠性结论或建议。因此,受限于成本及材料,3D 打印技术主要用于辅助复杂 AD 患者的手术治疗,制定个体化的 3D 打印模型。对于撕裂程度小、病变结构简单的 AD 患者,无需 3D 打印辅助治疗。

随着 3D 打印技术的不断发展, 计算机建模及后处理软件的迭代升级, 医生获取的血管图像及 3D 模型的打印质量和精细程度也会获得明显提高。在临床与数字化、信息化的完美融合下, 3D 打印技术将在心血管疾病中有更广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Liu J, Yang F, Chen L, et al. Management and Outcomes of Non-A Non-B Aortic Dissection [J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2022, 64(5): 497-506.
- [2] Wang W, Duan W, Xue Y, et al. Clinical features of acute aortic dissection from the Registry of Aortic Dissection in China [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2014, 148(6): 2995-3000.
- [3] 周旻, 符伟国. Stanford B 型主动脉夹层诊断和治疗中国专家共识 (2022 版) [J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42 (4): 370-379, 387.
- [4] 张靓, 严中亚, 申运华, 等. 3D 打印辅助的个体化组合支架在 A 型主动脉夹层手术中的应用 [J]. 临床心血管病杂志, 2022, 38 (6): 444-448.
- [5] 王成, 严中亚, 卢中, 等. 3D 打印辅助的个体化组合覆膜支架在 Stanford A 型主动脉夹层中应用观察 [J]. 临床心血管病杂志, 2023, 39(8): 632-636.
- [6] Hagan PG, Nienaber CA, Isselbacher EM, et al. The International Registry of Acute Aortic Dissection (IRAD): new insights into an old disease [J]. JAMA, 2000, 283(7): 897-903.
- [7] 周炜, 李白翎, 刘洋, 等. 急性 A 型主动脉夹层术后早期的常见并发症及处理 [J]. 国际心血管病杂志, 2020, 47(3): 129-131.
- [8] 罗黎, 解鑫隆. 主动脉弓去分支杂交手术治疗 Stanford A 型主动脉夹层的疗效分析 [J]. 中国现代手术学杂志, 2022, 26(4): 286-289.
- [9] 刘昭, 李旭冉, 张明, 等. 3D 打印结合支架束径技术预三开窗治疗 Stanford A 型主动脉夹层 1 例 [J]. 中国血管外科杂志(电子版), 2019, 11(2): 142-144.
- [10] 杨晗, 胡明, 黄群, 等. 3D 打印辅助覆膜支架修复术在复杂主动脉疾病腔内治疗中的应用 [J]. 中国血管外科杂志(电子版), 2018, 10(1): 4-9.
- [11] 杨勇, 刘洋, 金振晓, 等. 3D 打印技术在 Stanford B 型主动脉夹层腔内隔绝治疗术前评估中的作用 [J]. 心脏杂志, 2021, 33 (6): 628-632.
- [12] Harmon TS, Ghannam A, Meyer TE, et al. Covered or Not, Here I Come: Stanford Type B Aortic Dissection Repair With a Covered and Uncovered Stent Hybrid Technique [J]. Cureus, 2020, 12(11): e11729.
- [13] 吴智勇, 侯金承, 刘雪凯, 等. 3D 打印辅助体外开窗在 TEVAR 中的应用 [J]. 中华胸心血管外科杂志, 2022, 38(10): 586-589.
- [14] Tong YH, Yu T, Zhou MJ, et al. Use of 3D Printing to Guide Creation of Fenestrations in Physician-Modified Stent-Grafts for Treatment of Thoracoabdominal Aortic Disease [J]. J Endovasc Ther, 2020, 27(3): 385-393.
- [15] 李晓莉, 何平, 张大勇, 等. 3D 打印辅助复杂胸主动脉血管病变分支支架腔内修复手术治疗的临床分析 [J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2020, 27(2): 223-227.
- [16] 马磊, 刘纯, 郭小梅, 等. 3D 打印在复杂主动脉疾病个体化腔内治疗中的应用价值 [J]. 放射学实践, 2018, 33(9): 903-906.
- [17] 李辉, 李娟, 王东, 等. 计算机辅助个性化 3D 打印在治疗主动脉夹层中的应用研究 [J]. 中国介入心脏病学杂志, 2019, 27 (11): 628-632.
- [18] 王耿, 洪云恒, 陈志强, 等. 3D 打印辅助腔内治疗复杂主动脉疾病的临床疗效 [J]. 岭南现代临床外科, 2022, 22(3): 280-284.
- [19] 李逢时, 刘光, 刘晓兵, 等. 3D 打印辅助预开窗及分支支架腔内修复术治疗累及内脏分支主动脉疾病的早期结果 [J]. 上海交通大学学报(医学版), 2020, 40(10): 1388-1392.
- [20] 张文卿, 杨航, 夏洪涛, 等. 基于 CT 增强 3D 打印技术在腹主动脉瘤和 B 型主动脉夹层中的应用(附 2 例报道) [J]. 放射学实践, 2020, 35(4): 560-563.
- [21] Finotello A, Marconi S, Pane B, et al. 12-year follow-up post-TEVAR in type B aortic dissection shown by 3D printing [J]. Annals of Vascular Surgery, 2019, 55: 309.e13-309.e19.
- [22] 吴励, 韦亚宁, 曾岸轲, 等. CTA 多模式 3D 打印制作 Stanford B 型主动脉夹层模型 [J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(1): 134-136.
- [23] 郭睿霖, 白龙, 焦轩, 等. 3D 打印在心血管外科的临床应用 [J]. 心血管康复医学杂志, 2021, 30(3): 325-329.
- [24] 张章, 王磊, 郭松林, 等. 3D 打印技术在主动脉疾病临床教学中的应用 [J]. 中国医学教育技术, 2018, 32(5): 555-557.
- [25] 张超宇, 庄康乐, 张锡栋, 等. 3D 打印技术在心脏外科教学中的应用 [J]. 安徽医学, 2022, 21(2): 115-117.
- [26] Giannopoulos AA, Mitsouras D, Yoo SJ, et al. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases [J]. Nat Rev Cardiol, 2016, 13(12): 701-718.
- [27] 王慰敏, 马强, 田红燕, 等. 3D 打印模型结合课堂教学的综合教学模式在外周血管专业住院医师规范化培训中的应用研究——以主动脉瘤及主动脉夹层为例 [J]. 中国医学教育技术, 2018, 32(4): 434-437.
- [28] 刘戈, 孟金全, 刁文杰, 等. 3D 打印模型在心脏大血管外科住院医师规范化培训教学中的应用 [J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2020, 41(2): 202-203.
- [29] Ganguli A, Pagan-Diaz GJ, Grant L, et al. 3D printing for pre-operative planning and surgical training: a review [J]. Biomed Microdevices, 2018, 20(3): 65.
- [30] Wang C, Zhang L, Qin T, et al. 3D printing in adult cardiovascular surgery and interventions: a systematic review [J]. J Thorac Dis, 2020, 12(6): 3227-3237.

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-21

编辑/王萌