doi:10.11659/jjssx.04E025025

·心血管外科专栏·

3D打印主动脉根部模型在经导管主动脉瓣置换术前评估中的应用

马五艳[1],李 辉[2],刘子君[3] (1.临汾市人民医院影像科,山西 临汾 041000;2.临汾市人民医院心脏大血管外科,山西 临汾 041000;3.临汾市人民医院心内科,山西 临汾 041000)

[摘 要] **目的** 构建基于CTA的主动脉根部3D打印模型,并探讨其在经导管主动脉瓣置换术(TAVR)前评估中的应用价值。**方法** 选择临汾市人民医院21例主动脉瓣病变患者,入院后行主动脉+冠状动脉CTA扫描,利用Mimics医学三维建模软件对主动脉根部进行三维建模和3D打印,测量3D打印模型和CTA上的主动脉瓣环,主动脉窦和窦管交界处的最长径、最短径,主动脉瓣面积、周长,左右冠状动脉开口-瓣环距离等数据,并对2组数据进行统计学分析。在3D打印模型上测量瓣环及冠状动脉开口参数、评估钙化情况及血管入路情况等,并基于上述评估情况进行术前规划以规避手术风险。比较手术前后心脏超声、心电图等数据。**结果** 所有患者在CTA和3D打印模型上测量的主动脉瓣环直径、主动脉瓣面积、主动脉瓣周长、左右冠状动脉开口-瓣环距离、主动脉窦和窦管交界处的各项数据比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。21例患者中,经TAVR治疗18例,TAVR+冠状动脉介入治疗3例,术前根据3D打印模型预判高风险冠状动脉阻塞5例,在术中对冠状动脉进行保护,术中未发生冠状动脉阻塞并发症。根据3D打印模型预选瓣膜型号尺寸与术中实际置入瓣膜型号尺寸相符率90.5%(19/21),围术期无瓣周漏发生。术后3个月、6个月、12个月患者主动脉瓣跨瓣压差、左室射血分数(LVEF)、左室舒末期内径、纽约心脏协会(NYHA)心功能分级Ⅳ级比例与术前相比,差异具有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 基于CTA构建的主动脉根部3D打印模型可较好地还原主动脉根部结构。基于3D打印模型进行术前规划,可以有效减少术中冠状动脉阻塞风险及术后瓣周漏的发生率。

[关键词] 瓣膜;主动脉瓣;模型;主动脉瓣置换术;3D打印

[中图分类号] R654.2 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-04-07

Application of 3D-printed aortic root model in preoperative evaluation of transcatheter aortic valve replacement surgery

MA Wu-yan[1], LI Hui[2], LIU Zi-jun[3] (1. Imaging Department, Linfen People's Hospital, Linfen Shanxi 041000, China; 2. Department of Cardiovascular Surgery, Linfen People's Hospital, Linfen Shanxi 041000, China; 3. Department of Cardiovascular Medicine, Linfen People's Hospital, Linfen Shanxi 041000, China)

Abstract: Objective To construct 3D-printed models of the aortic root based on contrast-enhanced CT angiography (CTA) data and to explore their application value in the preoperative evaluation of transcatheter aortic valve replacement (TAVR). **Methods** Twenty-one patients with aortic valve disease were enrolled from Linfen People's Hospital. All patients underwent CTA of the aorta and coronary arteries. The aortic root was reconstructed using Mimics medical imaging software and subsequently printed into 3D models. Parameters including the aortic annulus maximum and minimum diameters of junction of the aortic sinus and the sinus canal, as well as the aortic valve area and perimeter, and the distance from the coronary ostia to the annulus, were measured on both the CTA images and the 3D-printed models. Statistical analysis was performed to compare the two sets of measurements. The parameters of the aortic annulus and coronary ostia were measured and the calcification and vascular access conditions were evaluated on the 3D-printed model, and preoperative planning was carried out based on the above evaluation results to avoid surgical risks. Echocardiographic and electrocardiographic data before and after surgery were compared. **Results** There were no statistically significant differences in terms of the diameter of the aortic annulus, the aortic valve area and perimeter, the distance from the coronary ostia to the annulus, or the diameter of junction of the aortic sinus and the sinus canal between CTA and 3D-printed models ($P>0.05$). Among the 21 patients, 18 cases underwent TAVR alone, while 3 cases received TAVR combined with coronary intervention. Based on the 3D-printed models, high risk of coronary obstruction was predicted in 5 cases, and protective measures were successfully implemented during surgery, with no coronary obstruction occurring. The agreement rate between the valve size preselected using the 3D-printed models and the size actually implanted was 90.5% (19/21), no perivalvular leakage occurred during the perioperative period. There were significant differences in the transvalvular pressure gradient, left ventricular ejection fraction

[基金项目] 山西省高等学校科技创新计划项目(2022L217)

[通信作者] 李 辉,E-mail:18903579747@163.com

(LVEF), left ventricular end-diastolic diameter, and the proportion of patients with NYHA cardiac function classification Ⅳ 3 months, 6 months, 12 months after surgery compared with those before surgery (P<0.05). **Conclusion** 3D-printed model of the aortic root constructed based on CTA can accurately replicate aortic root anatomy. Preoperative planning utilizing these models can effectively reduce the risk of intraoperative coronary obstruction and the incidence of postoperative paravalvular leakage.

Keywords: valve; aortic valve; model; transcatheter aortic valve replacement; 3D printing

随着介入技术的不断发展,经导管主动脉瓣置换术(transcatheter aortic valve replacement, TAVR)的临床应用越来越广泛[1-3],该手术需要术者熟悉主动脉根部结构,并在术前定量测量主动脉根部各项参数。3D打印技术作为数智医学的重要组成部分,其在术前解剖评估、体外模拟与器械选型、并发症预判、术后验证及教学培训等方面发挥重要作用。3D打印模型不仅具有直观性和精准性,还能够对主动脉瓣和主动脉根部的数据进行定量测量[4-5],这对制定手术方案、选择术中器械、规避冠状动脉阻塞风险至关重要。本研究通过术前重建并打印主动脉根部3D模型进行术前评估、手术方案制定、手术演练、效果预测等,综合评估基于CTA数据构建的3D打印模型在TAVR治疗中的可靠性及应用价值。

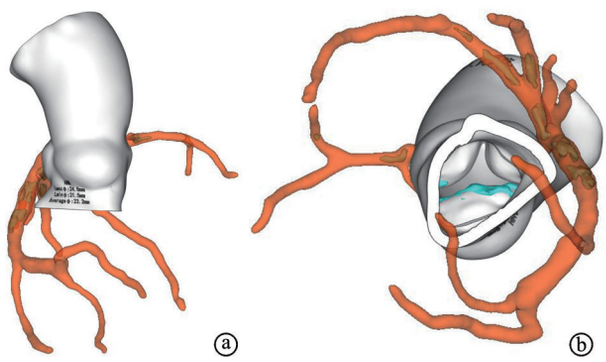
1 资料与方法

1.1 临床资料

选择临汾市人民医院2017年7月至2024年12月收治的21例主动脉瓣病变患者为研究对象,其中男15例,女6例;年龄51~83岁,平均(62.1±10.4)岁;主动脉瓣狭窄15例,主动脉瓣关闭不全6例,合并冠状动脉病变5例;病因包含风湿性心脏病患者9例,退行性变患者12例;合并高血压6例、糖尿病2例、冠心病5例。本研究已获得临汾市人民医院伦理委员会批准(批准号:E20251229001),患者对本研究知情并签署同意书。

1.2 建模方法

入院后对患者进行主动脉根部CTA增强平扫,胸部薄层CTA扫描参数:层厚0.625 mm,电压120 kV,周期0.6 s,获取DICOM格式CTA图像。Mimics建模:将患者DICOM格式的CTA图像文件导入Mimics医学三维建模软件,软件自动读取图片序列所包含的信息,选择合适的阈值,区分骨骼、内脏和软组织,建立包括主动脉根部、主动脉瓣、冠状动脉等不同组织的蒙版,利用draw和erase等功能,去除模型上的噪点,填充空洞,使组织结构边界清晰,结构完整。通过重复上述操作建立完整的主动脉根部模型,再将模型导出为STL格式保存(图1)。



a:3D模型矢状位图;b:3D模型轴位图

图1 主动脉根部+冠状动脉三维模型图

1.3 3D模型打印

将前期构建完成的主动脉根部STL文件输入至3D打印机器,根据实际需要打印主动脉根部、主动脉瓣、钙化组织、冠状动脉等不同组织,打印材料选择光敏树脂材料,不同的组织设置不同的颜色,以便观察。

1.4 数据测量与术前规划

在Mimics软件及3D打印实体模型上测量以下数据:①瓣环核心参数。精准测量瓣环直径、周长、面积,明确瓣环平面与升主动脉的夹角,避免传统影像测量中因投影角度导致的误差,为瓣膜尺寸选择提供核心依据。②钙化灶细节评估。定位钙化灶累及范围(瓣环/瓣叶/窦部)、最大厚度及分布密度,判断钙化灶是否压迫冠状动脉开口或阻塞输送路径。③窦部与冠状动脉开口参数。测量左/右冠状动脉开口至瓣环的垂直距离、开口直径,明确窦部高度、直径及形态,量化冠状动脉阻塞风险。④升主动脉与输送路径评估。记录升主动脉直径、走行迂曲度、血管壁钙化和斑块分布,评估输送鞘管及瓣膜通过的可行性,预判血管损伤风险。⑤合并解剖异常识别。如二叶式主动脉瓣的瓣叶融合类型、室间隔肥厚对瓣膜释放的影响、既往外科瓣膜置换术后的支架位置等,为复杂病例手术规划提供直观依据。

1.5 手术过程

选择气管插管+静脉全身麻醉,术前规划选择合适的入路(心尖/股动脉),根据术前3D打印模型测量数据,选择最佳尺寸的瓣膜型号和合理的瓣膜置入深度,根据术中主动脉根部造影的情况选择释放人工瓣膜,瓣膜选用自膨瓣膜或球扩瓣;对于评估存在冠状

动脉阻塞风险的患者,予以冠状动脉保护(送入指引导管、指引导丝或延长导管、球囊/冠状动脉支架)。

1.6 观察指标

比较基于CTA和3D打印模型测量的主动脉根部数据。计算根据3D打印模型预选瓣膜型号尺寸与术中实际置入瓣膜型号尺寸的相符率。分析3D打印模型应用于TAVR的治疗情况。分别于术后3、6、12个月随访心脏超声,之后每年随访1次,比较患者手术前后的主动脉瓣跨瓣压差、左室射血分数(left ventricular ejection fraction,LVEF)、左室舒末期内径、纽约心脏病协会(New York heart association,NYHA)心功能分级Ⅳ级比例。

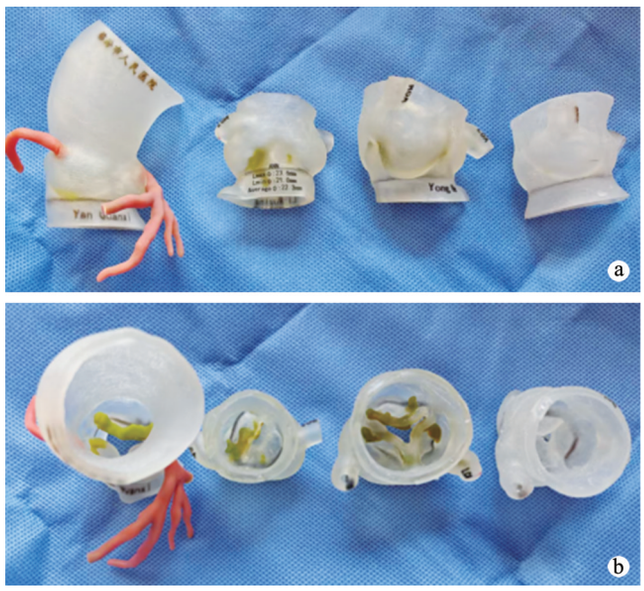
1.7 统计学分析

采用SPSS 22.0软件进行统计学分析。计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,计数资料以率(%)表示,*K-S*检验分析所有数据为正态性分布;组间比较采用配对t检验,计数资料采用χ^2检验或*Fisher*确切概率检验,以$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模型构建与3D打印

成功构建并打印完成包括主动脉根部、主动脉瓣、钙化组织、冠状动脉等不同组织的3D模型。该模型几何相似度高,可在三维空间角度反映病变与正常组织的毗邻关系(图2)。



a:主动脉根部、主动脉瓣、钙化组织、冠状动脉侧面观;b:主动脉根部、主动脉瓣、钙化组织、冠状动脉正面观

图2 3D打印模型

2.2 数据测量

分别测量CTA和3D模型上主动脉根部的数据。两种测量方式在左右冠状动脉开口-瓣环距离、主动脉瓣面积、主动脉瓣周长、主动脉瓣环直径、主动脉窦和窦管交界处的各项数据方面差异均无统计学意义($P>0.05$),见表1。

表1 CTA与3D模型数据测量表($\bar{x}\pm s$)

项目	CTA	3D模型	t	P
左冠状动脉开口-瓣环距离(mm)	14.46±2.84	14.02±2.56	0.64	0.52
右冠状动脉开口-瓣环距离(mm)	15.66±2.35	15.98±3.69	1.30	0.21
主动脉窦最大径(mm)	32.53±7.25	33.07±6.54	1.03	0.35
主动脉窦最小径(mm)	30.97±5.66	31.41±3.63	0.45	0.72
窦管交界处最大径(mm)	26.21±4.08	27.17±3.83	1.57	0.13
窦管交界处最小径(mm)	25.09±5.31	25.93±4.84	0.32	0.84
主动脉瓣环最大径(mm)	23.97±5.66	24.34±6.28	1.43	0.18
主动脉瓣环最小径(mm)	21.82±3.71	20.69±4.56	0.77	0.49
主动脉瓣面积(mm^2)	437.28±34.91	406.22±28.07	1.43	0.17
主动脉瓣周长(mm)	78.49±5.45	75.27±9.28	1.94	0.08

2.3 3D打印模型应用情况与术后随访

纳入的21例患者均行手术治疗,经股动脉入路20例,心尖入路1例,手术时间61~284 min,平均(954±14.8)min,出血量40~200 mL,平均(85.2±24.7)mL,跨瓣时间6~15 min,平均(7.4±3.5)min,X射线照射时间17~42 min,平均(19.3±7.7)min。单纯行TAVR治疗的患者18例,同期行TAVR+冠状动脉介入术治疗的患者3例,根据3D打印模型术前预判高风险冠状动脉梗阻5例,术中置入瓣膜前均对冠状动脉进行保护,术中未发生冠状动脉梗阻。根据3D打印模型预选瓣膜型号尺寸与术中实际置入瓣膜型号尺寸相符率90.5%(19/21)。21例患者手术过程均顺利,无术中死亡病例。患者手术前后的主动脉瓣跨瓣压差、LVEF、左室舒末期内径及NYHA心功能分级Ⅳ级比例比较,差异具有统计学意义($P<0.05$),见表2。术后随访发生瓣周漏1例(4.7%),传导阻滞1例(4.7%),瓣周漏行介入封堵治疗后好转,传导阻滞患者置入起搏器后好转。

2.4 典型病例

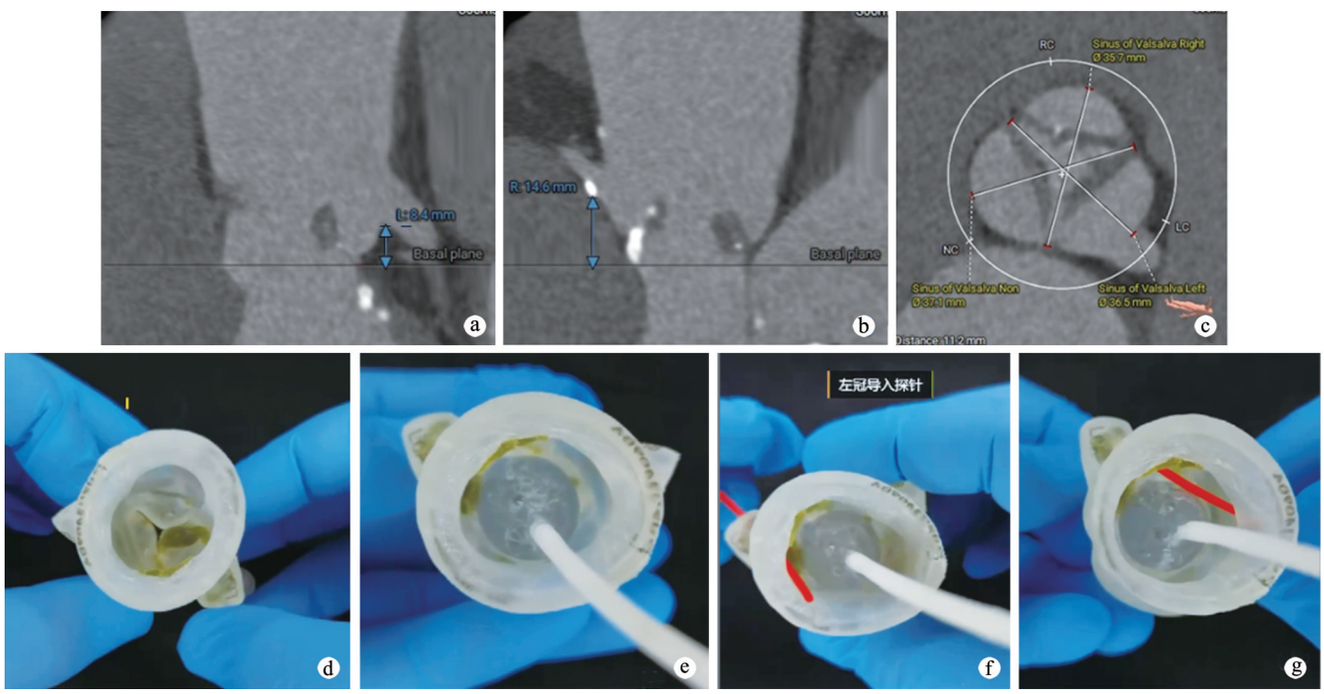
患者,女,76岁,主动脉瓣三叶瓣,轻度钙化,瓣叶增厚,法式窦结构大,左冠开口高度约8.4 mm(图3a),

表2 患者手术前后心功能情况

时间	跨瓣压差(mmHg)	LVEF(%)	左室舒末期内径(mm)	NYHA心功能分级Ⅳ级[例(%)]
术前	41.46±2.84	38.54±5.22	65.03±8.25	14(66.66)
术后3个月	10.21±3.15*	45.08±4.34*	58.01±9.40*	5(23.81)*
术后6个月	9.85±2.33*	47.84±8.41*	57.28±9.35*	4(19.05)*
术后12个月	9.51±1.08*	46.64±5.33*	55.07±6.71*	4(19.05)*

*:与术前比较,$P<0.05$

右冠开口高度约14.6 mm(图3b);窦管交界高度约22.7 mm、直径约38.4 mm(图3c),升主动脉可见明显扩张,最宽处约52.3 mm。左冠开口较低,左冠瓣瓣叶较长,开放时容易遮挡左冠状动脉,CTA分析综合考虑冠状动脉遮挡风险较高。遂根据CTA的影像数据进行仿真3D打印模型(图3d),采用模拟置入内径23 mm介入主动脉瓣膜(图3e),探针显示左右冠状动脉通畅(图3f、g),排除了冠状动脉梗阻风险。



a:右冠开口高度;b:左冠开口高度;c:CTA测量主动脉窦直径;d:3D打印主动脉根部模型;e:球囊扩张3D模型主动脉瓣;f、g:左右冠状动脉探针测试冠状动脉梗阻

图3 典型病例

3 讨论

3D打印技术自问世以来广泛应用于各个学科,例如骨科、颌面外科、胸外科、肝胆外科、心血管外科等[6-8]。近年来,随着软件的不断更新,模型细腻度和还原度得到了明显提升,使其在临床的应用愈加广泛,应用范围涵盖术前诊断、手术方案设计、手术演练以及术后评估、数据库建立等方面。TAVR作为治疗重度主动脉瓣狭窄的微创介入技术,已广泛应用于高风险、极高风险的患者,其手术成功率与预后高度依赖于术前对主动脉根部解剖结构的精准评估[9-10]。传统影像学评估手段,如CTA、心脏超声、磁共振成像等检查虽能提供二维或三维影像数据,但存在直观性不足、复杂解剖结构解读难度大等局限,难以完全满足个体化手术规划的需求。3D打印技术基于患者影像数据实现解剖结构的1:1实体化复刻,为TAVR术前评估提供了全新的可视化与实操平台[11-12]。

国内外对3D打印在复杂TAVR病例中的应用多有报道[13-15]。在二叶式主动脉瓣狭窄患者中,由于其解剖结构复杂,如存在瓣环椭圆化、钙化严重、瓣叶融合等情况,传统TAVR的手术并发症发生率较高。Russo等[16]使用3D打印精确重建TAVR手术相关解剖结构,并评估冠状动脉开口是否存在阻塞,结果发现3例(3/13)术中出现冠状动脉阻塞,这一结果均通过3D模型模拟得到了准确预测。本研究通过3D打印模型预测5例患者存在冠状动脉阻塞高风险,术中均进行冠状动脉保护,未发生冠状动脉梗阻,与上述研究结果相似。采用3D打印模型辅助术前评估的二叶式主动脉瓣患者,器械选择准确率明显提升,本研究预选瓣膜型号尺寸与术中实际置入瓣膜型号尺寸相符率达90.5%,并且术后3个月随访瓣周漏发生率4.7%,处于较低水平。此外,3D打印模型可对病变结

构高度还原,Ripley等[17]在一项关于基于CT图像打印的个体化主动脉根部复合体模型用于TAVR规划的可行性研究中,认为主动脉根部3D模型具有高度准确性,在3D模型上进行的瓣环测量与在相应CT数据上的测量结果一致性良好(平均差异为-0.34 mm)。本研究基于CTA数据构建的3D打印模型与CTA数据测量结果相似,对主动脉根部的结构还原度较好,与上述结论相似。

本研究的局限性在于,一方面纳入研究的样本量较少,原因在于现阶段三维重建和3D打印需要相关专业人员或机构完成,需要耗费一定的人力和财力,由于经费的限制,暂时无法进行大样本的研究;另一方面,本研究建模数据来源于CTA,虽然其具有较高空间分辨率,不受组织穿透力的限制,但X射线存在放射性,并且检查所注射的造影剂存在过敏、肾损害等风险,随着超声技术的发展,基于经食道超声心动图所构建的模型和3D打印可以有效避免辐射和造影剂带来的损害。

综上所述,3D打印主动脉根部模型通过将患者个体化解剖结构实体化,显著提升了TAVR术前评估的直观性与精准性,在复杂解剖结构评估、个体化器械选型、术前风险预判及多学科协作等方面发挥了重要作用[15,18-19]。然而,该技术仍面临制备效率低、制作成本高、材料仿真性不足及标准化缺失等挑战。未来,随着快速打印技术、AI算法与生物材料的发展,以及标准化体系的构建,3D打印主动脉根部模型将实现从“辅助评估工具”向“精准医疗核心技术”的跨越,进一步推动TAVR技术的个体化、精准化发展,使更多主动脉瓣狭窄患者获益。

[参考文献]

[1] 王裕星,杨 松,于 铭,等. TAVR对重度主动脉瓣狭窄患者心电重构的改善作用[J]. 中华心血管病杂志,2025,53(1):56-60. doi:10.3760/cma.j.cn112148-20241125-00732.

[2] 王 磊,贺吟歌. 经导管主动脉瓣置换术对中高危老年重度主动脉瓣狭窄患者心肌损伤及心室功能的影响[J]. 中华老年心脑血管病志,2024,26(12):1419-1423. doi:10.3969/j.issn.1009-0126.2024.12.008.

[3] 翟蒙恩,毛 予,刘 洋,等. 心血管3D打印技术在TAVR中围手术期间规划的应用进展[J]. 心脏杂志,2024,36(1):101-105. doi:10.12125/j.chj.202210062.

[4] Lind AY, Totzeck M, Rassaf T, et al. Aortic stenosis - selection of the appropriate TAVR patient[J]. MMW Fortschr Med, 2021, 163(7): 46-53. doi: 10.1007/s15006-021-9714-0.

[5] Bor WL, DChan Pin Yin DRPP, Brouwer J, et al. Assessment of the academic research consortium for high bleeding risk criteria in patients undergoing TAVR[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2021, 14(11): 1265-1267. doi: 10.1016/j.jcin.2021.01.007.

[6] 咸晓梦,孙 航,杨华瑜,等. 3D生物打印在肝细胞癌治疗中的研究进展[J]. 肿瘤,2023,43(6):534-540. doi:10.3781/j.issn.1000-7431.2023.2304-0176.

[7] Lal H, Patralekh MK. 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: a technological marvel[J]. J Clin Orthop Trauma, 2018, 9(3):260-268. doi: 10.1016/j.jcot.2018.07.022.

[8] 蒋光福,王 博,杨 城,等. 3D打印技术在脊柱侧凸中的临床应用及展望[J]. 中国医疗设备,2025,40(1):176-180. doi:10.3969/j.issn.1674-1633.20240282.

[9] 周国磊,尤 涛,杨 剑. 三维可视化与三维打印技术在结构性心脏病介入治疗中的应用[J]. 中华胸心血管外科杂志,2022,38(5):316-320. doi:10.3760/cma.j.cn112434-20200915-00421.

[10] 徐臣年,李 泽,刘 洋,等. 3D打印、计算机建模及人工智能在结构性心脏病中的应用[J]. 中国体外循环杂志,2022,20(1):59-64. doi:10.13498/j.cnki.chin.j.ecc.2022.01.14.

[11] Mendiz OA, No M, Fava CM, et al. Impact of cusp-overlap view for TAVR with self-expandable valves on 30-day conduction disturbances[J]. J Interv Cardiol, 2021:9991528. doi: 10.1155/2021/9991528.

[12] 经导管主动脉瓣置换术流程优化共识专家组. 经导管主动脉瓣置换术(TAVR)流程优化专家共识2022版[J]. 中华急诊医学杂志,2022,31(2):154-160. doi:10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2022.02.004.

[13] Ma Y, Mao Y, Zhu G, et al. Application of cardiovascular 3-dimensional printing in transcatheter aortic valve replacement[J]. Cell Regen, 2022, 11(1):35. doi: 10.1186/s13619-022-00129-4.

[14] Levin D, Mackensen GB, Reisman M, et al. 3D printing applications for transcatheter aortic valve replacement[J]. Curr Cardiol Rep, 2020, 22(4):23. doi: 10.1007/s11886-020-1276-8.

[15] Xenofontos P, Zamani R, Akrami M. The application of 3D printing in preoperative planning for transcatheter aortic valve replacement: a systematic review[J]. Biomed Eng Online, 2022, 21(1): 59. doi: 10.1186/s12938-022-01029-z.

[16] Russo JJ, Yuen T, Tan J, et al. Assessment of coronary artery obstruction risk during transcatheter aortic valve replacement utilising 3D-printing[J]. Heart Lung Circ, 2022, 31(8): 1134-1143. doi: 10.1016/j.hlc.2022.01.007.

[17] Ripley B, Kelil T, Cheezum MK, et al. 3D printing based on cardiac CT assists anatomic visualization prior to transcatheter aortic valve replacement[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10(1):28-36. doi: 10.1016/j.jcct.2015.12.004.

[18] Aigner P, Sella Bart E, Panfili S, et al. Quantification of paravalvular leaks associated with TAVI implants using 4D MRI in an aortic root phantom made possible by the use of 3D printing[J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1083300. doi: 10.3389/fcvm.2023.1083300.

[19] Crascì F, Cannata S, Gandolfo C, et al. Evaluating the accuracy of 3D printing and finite element analysis in transcatheter aortic valveimplantation: a comparative study against post-TAVI CT imaging[J]. J Med Eng Technol, 2025, 49(7): 315-324. doi: 10.1080/03091902.2025.2540127.

(编辑:杨 颖)