

· 综述 ·

3D 打印技术在骨科临床与基础研究应用的现状[△]

米发棹¹, 杨如意², 赵天宝², 王建峰¹

(1. 庆阳市人民医院, 甘肃庆阳 745000; 2. 西华大学材料科学与工程学院, 四川成都 610039)

摘要: 近年来, 3D 打印技术迅猛发展, 成为一种新型的快速成形及快速制造技术, 可将患者的 CT 和 MR 等影像快速转换成三维实物, 可以实现材料结构的个性化定制和与病变的解剖匹配。它已广泛应用于骨科疾病和康复的诊断和治疗, 应用前景非常广阔。本文旨在综述 3D 技术在骨科临床及基础研究的前沿研究, 总结存在的问题, 展望未来。

关键词: 3D 打印, 骨科临床实践, 基础研究, 综述

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 09-0810-05

Current application of 3D printing technique in orthopaedic clinical practice and basic research // MI Fa-duo¹, YANG Ru-yi², ZHAO Tian-bao², WANG Jian-feng¹. 1. Qingyang People's Hospital, Qingyang 745000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China

Abstract: In recent years, the rapid development of 3D printing technology has become a new type of rapid prototyping and rapid manufacturing technology. It can quickly convert the CT and MRI images taken from patients into real three-dimensional objects, and realize the personalized material structure customization to meet the anatomy of the diseased parts of the patient. This technique have been widely used in the diagnosis, treatment and rehabilitation of orthopedic diseases, with broad application prospects. This article aims to review the cutting-edge research of 3D printing technology in orthopedics clinical practice and basic research, summarize the existing problems, and look to the future.

Key words: 3D printing technique, orthopedics clinical practice, basic research, review

3D 打印技术, 又称为 3D 印刷技术或快速制造技术。该技术结合了快速自动成形系统与计算机数据模型, 可以制造任意不规则的工业产品, 且不需要额外的常规模具制造和机械加工^[1]。3D 打印技术于 20 多年前首次提出, 当时难以应用于临床, 认为价格昂贵且无法实现^[2]。3D 打印随着打印技术和打印墨水的发展成熟取得了突破性的进展。目前, 3D 打印成形的主要原理包括: 光固化成形、激光烧结、熔融沉积成形、选择性熔融、生物打印等^[3]。3D 打印技术可以将虚拟的三维设计快速、自动地转化为实物模型, 具有个性化设计、精准定制、复杂制造、节省材料、缩短制造时长等优点^[4]。目前, 3D 打印在生物医疗领域主要应用于 3D 生物材料打印、3D 打印植入物、解剖模型、康复器械和药物研究^[5]。而在骨科领域中, 主要用于制作实体模型、手术导向板、假体及内置物, 也用于学术研讨及教育等, 并且在临床已

经成功应用于患者。

1 基于骨科应用的 3D 打印原理及技术

3D 模型可克服缺乏直观性和可操作性的困难, 逐渐扩大在骨科领域的应用。逆向工程 (reverse engineering, RE) 和快速成形技术 (rapid prototyping, RP) 是基于骨科应用的 3D 打印原理及技术关键, 其基本流程是: 首先建立 3D 模型, 然后将模型导入生成 STL 文件格式, 而后将该格式文件导入 3D 打印机进行分层切片, 打印出来并对其进行后处理, 最后得到想要的产品^[6]。

1.1 逆向工程

逆向工程技术是指在计算机系统的控制下, 借助各种机电信息一体化装备对既有实物进行扫描与测量, 将所得数据信息传给计算机分析处理, 再用各类

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.09

△基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (编号:51603170); 四川省科技厅重点研发项目 (编号:2019YFG0251); 大学生创新创业训练计划项目 (编号:201510623006); 四川省“三区专家”

作者简介: 米发棹, 副主任医师, 研究方向: 关节外科, (电话)13909342386, (电子信箱)1151493303@qq.com

可粘合材料进行精准3D打印。现在医学领域，主要的逆向工程技术有Mimics软件、E3D软件、Geomagic、Imageware等，能显示和修改医学图像，并对数据进行修补，并高效重建医学CT数据。精准3D打印的主要技术包括：选择性激光熔化成形（selective laser melting, SLM）、选择性激光烧结（selective laser sintering, SLS）、光固化立体印刷技术（stereo lithography appearance, SLA）、熔融沉积成形技术（fused deposition modeling, FDM）、叠层实体制造（laminated object manufacturing, LOM）、选择性电子束熔炼（selective electron beam melting, SEB）^[7]。

1.2 快速成形技术

快速成形技术是在计算机的控制下，通过计算机辅助设计软件创建实物的数字化成形技术^[8]。该技术于20世纪80年代兴起后得到广泛的应用，在医学领域如组织和器官的制造等颇受青睐。该技术以计算机科学为基础，结合机械、自动化、材料、CAD等学科，按照“分层制造、逐层叠加”原理，通过3D系统将可粘合材料（高分子材料、金属粉末等）等采取不同方法逐层堆积打印叠加，从而获得预先设定形状产品的新型数字化成形技术，其具有个性化、定制化、数字化、网络化的特点。各国均投入大量精力着力于3D打印的前沿研究，并将其作为战略化新兴产业给予大力支持，在骨科领域中对于术前策划、个体化治疗及生物制造潜力十足、前景光明。基于骨科治疗的成熟快速成形技术主要包括分层固体制造技术（LOM）、三维光固化成形技术（SLA）、选择性激光熔化技术（SLM）和熔融沉积技术（FDM）等。其中SLA成形因成形精度高、成形速度快而在骨科领域应用较多。

2 3D打印在骨科领域的应用

随着材料科学及医学的发展，3D打印技术在骨科中的应用也实现了巨大飞跃，依托于CT、磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）越来越多的骨科医生开始关注影像学，影像学已经从最初的3D打印模型扩展到三维打印导板、三维打印假体、康复机械等。该技术的应用优化了手术方案，减少了对人体的损伤，提高了手术质量，为临床诊断提供了新思路，为临床治疗开辟了新方法^[9]。

2.1 3D打印在骨科临床的应用

2.1.1 术前实体模型

以往医师在制定手术计划时，通常通过分析X

线片、CT、MRI或其他影像学检查结果来了解患者的解剖结构，得到的是二维平面信息，缺乏三维视觉触感。3D打印技术可以将CT的扫描数据重建成3D模型，然后输入3D打印机，制作1:1物理模型，视觉和触觉的体验更直观形象地显示患者特定的病变情况，病状重现也方便了医生与患者及家属交流；并且术前研究病例模型有助于医生精确制定手术方案、熟悉演练手术操作，实现个性化方案设计、精准治疗实施，应用前景非常广阔。王琪等^[10]对脊柱肿瘤患者在术前进行CT扫描，收集22例患者数据进行三维建模，通过3D打印制作1:1的模型，并以此制定了手术方案，通过模拟手术操作和内置物预处理精确又完整地切除病灶，缩短了手术时间。Wang等^[11]对9例应用了3D打印技术的骨盆骨折病例进行分析，发现术前计划与术后X线检查之间均具有良好的相关性，术后没有出现切口延迟愈合、感染或不愈合的情况。冀旭斌等^[12]对13例寰枢椎脱位合并复杂颅颈交界畸形患者行3D打印辅助单边椎弓根螺钉内固定治疗，术前利用3D打印出的1:1模型，分析畸形情况，评估手术风险，制定个体化手术方案，选择置钉侧别，并进行模拟手术。术中根据术前3D打印模型规划方案，于单一侧分别进行寰椎和枢椎椎弓根探查和置钉。对于合并复杂颅颈交界区畸形的寰枢椎脱位患者，3D打印辅助下应用椎弓根探查技术单边内固定可有效提高术中置钉准确率，减少术中神经和椎动脉损伤的风险，提高了手术安全性。

骨科手术中螺钉置入、截骨过程容易伤及周围神经、血管、器官等重要结构，同时在术中需多次透视确认螺钉位置，存在手术时间长、螺钉松动失效的风险。3D打印手术可以根据患者术前的CT数据进行三维重建，准确确定手术针的进入点、方向和深度，设计个性化的手术导板，并在手术中根据导板的方向直接放置指甲，可以大大简化操作，提高操作精度和效率^[13]。基于3D打印的骨科手术导板主要用于复杂关节矫形手术、复杂骨折手术、整形或修复重建手术、骨肿瘤手术等。其中，导板常用于骨盆、关节、脊柱等手术部位。李凡等^[14]利用快速逆向工程技术和3D打印技术设计制造导向器，并行全膝关节置换截骨术，并对患者的临床应用进行了研究。在三维视图中，使用工程建模软件确定下肢的力线，并据此设计个体股骨髁、胫骨平台截骨术和膝关节假体安装置入简化了术中操作步骤，下肢力线矫正更精确，获得了良好的手术效果。刘浩等^[15]利用3D打印技术及快速成形技术设计出个性化股骨远端截骨导向器，

该导向器可应用于全膝关节置换手术,与传统手术相比,具有可以改善术后假体力线、明显缩短手术时间、简化操作的优势,但其远期效果需长时间随访大样本量来验证。倪鹏辉等^[16]利用3D打印技术为20例拟行全膝关节置换术的患者设计膝关节置换截骨导向板,并采用髓内定位法进行截骨后成功置入膝关节假体。对比传统机械定位手术组得出结论:3D打印技术有助于骨科医生对膝关节的术前了解诊断,有利于精确指导手术方案制定,通过模拟手术操作也提高了手术的精准性。Zhang等^[17]将通过传统手术及3D打印导板对20例患者进行全髌关节表面置换手术,对比研究表明3D打印导板组的患者手术时间短、出血量少,术后前倾角和髌臼杯外展角等误差显著优于传统组。赵永辉等^[18]采用3D打印手术导板辅助强直性脊柱炎截骨矫形的手术技术,对16例强直性脊柱炎患者术前设计对应的手术导板,3D打印实体导板并消毒,术中辅助手术截骨矫形,证明3D打印手术导板辅助强直性脊柱炎截骨矫形是一种安全可行且精确性较高的手术方法。

2.1.2 手术内置物及假体

骨科临床工作中常常面临个体解剖差异或发育畸形等特殊情况,此时标准化的内置物难以满足患者需求。将3D印刷技术应用于骨外科,可以根据患者的个人情况设计并精确定制适合患者的假体和内置物,不同于传统内置物的标准化生产,其与个体匹配度更高,有助于促进患者骨骼的修复与生长^[19]。Xu等^[20]将3D打印的轴向椎体用于1例患有C₂尤文肉瘤的12岁患者。在切除术后,根据计算机模型使用钛合金粉末制造定制人工椎体并插入,以替代C₁和C₃之间的缺陷。该技术优化了置入物的微观结构,使得人工脊椎拥有更好的生物力学稳定性,促进了骨愈合。刘路坦等^[21]在兔体内置入含有不同孔隙率的3D打印多孔钛板,研究发现新生骨能够在多孔钛板的孔隙结构长入,并且其长入效果受多孔钛板孔隙率大小影响。Fan等^[22]对位于锁骨尤文肉瘤采取3D打印技术进行治疗。置入假体具有多孔结构,降低了弹性模量,相邻结构通过不可吸收缝线固定在假体的孔隙中,患者恢复迅速且无并发症。李宁等^[23]通过有限元分析法在站立态及步行态下对3D打印钛合金骨盆假体的生物力学性能进行分析,发现3D打印个性化钛合金骨盆假体基本满足人体生物学要求,能够有效恢复骨盆环的应力传导,其治疗效果具有有效性和稳定性。Zhang等^[24]依靠熔融沉积成形制造技术,利用聚醚醚酮(PEEK)制备PEEK肋软骨假体,该假

体具有替代天然肋软骨的潜力,接受胸壁重建的患者可具有更好的呼吸功能。李科伟等^[25]探讨了个性化3D打印髌臼垫块和白杯在髌关节翻修中的临床效果,采用个性化3D打印模型术前规划,术中应用3D打印金属垫块和白杯翻修治疗30例髌臼松动并骨缺损患者,个性化的匹配髌臼松动与骨缺损情况,优化手术操作,近期临床效果满意。

2.1.3 骨科术后康复器械

骨科康复器需要具备良好的舒适度及康复效果,但传统方法制备的器械难以实现因人而异,无法满足患者个体化的需求。3D打印可根据不同年龄、不同身高的患者进行精确模拟解剖结构,从而定制适合个人的康复器械。广泛应用于义肢及矫正器、康复治疗 and 训练辅助器中。张焯等^[26]设计了一台用于上肢手腕的康复矫正器,该矫正器使用时舒适度高、透气性强、外观美观,重量轻且安装简易,能够满足大多数用户的要求。Young等^[27]介绍1例72岁的白人男性左手近侧指间关节部分截肢的病例,为其安装3D打印的部分手指,当使用3D可打印材料时,与不使用假肢时相比,其运动表现得到改善,运动效率提高。孟强等^[28]首先制备出踝关节的3D模型,然后选取EVA复合材料、紫铜网、硅胶膜作为原材料,通过立体剪裁方法制备了可以有效防止踝关节内翻的防护型踝护具,该护具能够缓冲压力,还具有减震及正畸等作用,能够增强患者足部稳定性,提高其行走功能。Wei等^[29]使用3D打印为2例患儿制作了透明面罩,临床研究中显示,2例患儿平均瘢痕厚度在治疗3个月后大大减小,面部扭曲也有效改善,加大了重建手术的可能。采取3D打印技术制作骨科康复器械能够实现舒服佩戴,材料成本也较低,能满足个体化及个性化需求,但需要注意的是,它的设计和组装仍然很复杂,在制造单个部件时其生产成本会高于注射成形。

2.2 3D打印在组织工程的应用

组织工程中最大的难题是神经系统损伤的治疗,而不同组织类型的再生是目前解决该难题的有效策略。3D打印技术可采用天然材料、聚合物材料、生物陶瓷等生物活性材料对复杂组织超微结构进行仿生构建,并可通过对支架材料的力学性能调控及内部结构设计,构建适合细胞生长的微环境,在骨肌组织、关节、神经、心血管、脊椎的再生修复中得到广泛应用,具有促进细胞生长,血管化的作用,对解决骨肌组织构建难题展示了一种新的治疗途径^[30]。袁景等^[31]采用3D打印制备 β -磷酸三钙支架,将支架与

大鼠骨髓间充质干细胞共培养7d, 观察细胞黏附与形态变化。大鼠骨髓间充质干细胞黏附于 β -磷酸三钙支架表面, 并深入支架内部, 生长良好, 增殖活跃, 细胞碱性磷酸酶活性有提高, 该架具有良好的细胞相容性和骨修复性能。Yurie等^[32]采用选取人类纤维细胞通过3D打印出无支架材料的神经微导管, 实验证明该神经微导管对大鼠坐骨神经缺损的再生有促进作用。张广亮^[33]以人脐静脉内皮细胞(HU-VECs)和成纤维细胞为种子细胞, 纤维蛋白-明胶为支架材料, 通过3D打印组织血管化过程的观察分析、血管化调控相关分子及血管生成过程发现, 3D打印牵张力决定了打印组织中血管形成的走向, 细胞骨架和胶原均参与牵张力调控血管形成的过程。

3 展 望

3D打印技术应用范围不断扩大, 但在骨科领域的应用仍处于起步阶段, 存在的主要问题有: 临床置入材料要求高, 材料选择受限; 打印过程精度要求高, 效率低, 周期长; 3D打印设计交叉学科, 如医学、影像学、生物工程等, 对设备条件及人员要求高; 缺乏大样本和长时间随访数据; 尚无健全的法律法规和明确的行业标准。3D打印技术在医学领域具有极大价值, 其在各个科室的应用逐渐深入, 在骨科的运用更是走在前列。在未来的发展中, 三维组装活细胞、构建生物活性组织及人体器官、3D打印生物材料将是3D打印的研究热点, 骨科领域的突破关键是制备具有感知效应的康复器并且不断提高其感应灵敏度。随着材料科学的发展进步和科技的日新月异, 政策法规将日趋完善, 以保障和支持3D打印技术的发展和探索。

参考文献

- [1] 赵彪, 王文鹏, 张士超, 等. 3D打印技术的原理及应用[J]. 科技风, 2020, 5: 25.
- [2] Mulford JS, Babazadeh S, Mackay N. Three dimensional printing in orthopaedic surgery: a review of current and future applications [J]. ANZ J Surg, 2016, 86 (9): 648-653.
- [3] Zhang Y, Zhang F, Yan Z, et al. Printing, folding and assembly methods for forming 3D mesostructures in advanced materials [J]. Nat Rev Mater, 2017, 2 (4): 17019.
- [4] Huang Y, Leu CM, Mazumder J, et al. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations [J]. J Manuf Sci Eng, 2015, 137 (1): 014001.
- [5] Klein GT, Lu Y, Wang MY. 3D printing and neurosurgery-ready for prime time [J]. World Neurosurg, 2013, 80 (3-4): 233-235.
- [6] Zhong S, Lu QY, Chen JH. 3D printing technology in orthopedics application research progress [J]. J Wuzhou Univ, 2018, 28 (3): 1-7.
- [7] 杨道朋, 夏旭. 3D打印生物材料研究及其临床应用优势[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21 (18): 2927-2933.
- [8] 朱陈辉, 余刚, 杨水华, 等. 3D打印快速成型技术在泌尿外科领域中的应用进展[J]. 安徽医药, 2017, 21 (7): 4.
- [9] 王春鹏, 杨海娇, 张成, 等. 3D打印技术在骨科领域的应用进展[J]. 医学综述, 2020, 26 (1): 118-122.
- [10] 王琪, 刘军, 王亚楠, 等. 3D打印技术在脊柱肿瘤手术中的应用[J]. 解放军医药杂志, 2016, 28 (11): 16-19.
- [11] Wang JQ, Zhao CP, Sun X, et al. Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: initial results [J]. Chin Med J, 2015, 128 (4): 477.
- [12] 冀旭斌, 吴沁民, 徐兆万, 等. 3D打印辅助单侧椎弓根钉固定寰枢椎脱位[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28 (8): 739-743.
- [13] 李慧英, 杜立龙. 打印技术在骨科中的应用进展[J]. 天津医药, 2018, 46 (9): 1023-1026.
- [14] 李凡. 基于快速反求技术的全膝关节置换3D打印截骨导向器的设计与制造[D]. 新疆医科大学, 2018.
- [15] 刘浩, 吴博, 郑清源, 等. 个性化股骨远端截骨导向器与传统手术工具在全膝关节置换术中的对比研究[J]. 中华骨科杂志, 2018, 38 (19): 1170-1176.
- [16] 倪鹏辉. 3D打印个性化膝关节置换截骨导向板设计及应用[D]. 新疆医科大学, 2014.
- [17] Zhang YZ, Sheng L, Yong Y, et al. Design and primary application of computer-assisted, patient-specific navigational templates in metal-on-metal hip resurfacing arthroplasty [J]. J Arthroplasty, 2011, 26 (7): 1083-1087.
- [18] 赵永辉, 马宇龙, 罗浩天, 等. 3D打印手术导板辅助强直性脊柱炎截骨矫形[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28 (24): 2276-2280.
- [19] 朱诗白, 蒋超, 叶灿华, 等. 3D打印技术在骨科领域的应用[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2016, 9 (1): 6.
- [20] Xu N, Wei F, Liu X, et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with Ewing sarcoma [J]. Spine, 2015, 41 (1): E50-54.
- [21] 刘路坦. 3D打印多孔钛金属植入物不同孔隙率对骨长入影响的实验研究[D]. 蚌埠医学院, 2019.
- [22] Fan HB, Fu J, Li XD, et al. Implantation of customized 3-D printed titanium prosthesis in limb salvage surgery: a case series and review of the literature [J]. World J Surg Oncol, 2015, 13 (2): 308.
- [23] 李宁, 杨涵, 黄秋悦, 等. 3D打印钛合金个性化骨盆假体静态和步态有限元分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32 (6): 487-493.
- [24] Zhang CG, Wang L, Kang JF, et al. Bionic design and verification of 3D printed PEEK costal cartilage prosthesis [J]. J Mechanical Behavior Biomed Mater, 2019, 103 (6): 103561.
- [25] 李科伟, 王爱国, 王少华, 等. 3D打印髌白组件在髌白松动骨缺损翻修的应用[J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29 (14): 1330-

- 1332.
- [26] 张焯. 基于 3D 打印最优解决方法的康复产品设计研究 [J]. 科技创新导报, 2019, 16 (6) : 159-160.
- [27] Young KJ, Pierce JE, Zuniga JM. Assessment of body-powered 3D printed partial finger prostheses: a case study [J]. 3D Printing Med, 2019, 5 (1) : 7.
- [28] 孟强, 美国平, 牛文鑫, 等. 踝关节内翻防护型半刚性踝护具的力学特征 [J]. 医用生物力学, 2016, 31 (6) : 483-489.
- [29] Wei Y, Li-Tsang CW, Liu J, et al. 3D-printed transparent face-masks in the treatment of facial hypertrophic scars of young children with burns [J]. Burns, 2017, 43 (3) : e19-e26.
- [30] Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs [J]. Nat-Biotech, 2014, 32 (8) : 773-785.
- [31] 袁景, 甄平, 赵红斌. 高性能多孔 β -磷酸三钙骨组织工程支架的 3D 打印 [J]. 中国组织工程研究, 2014, 18 (43) : 6914-6921.
- [32] Yurie H, Ikeguchi R, Aoyama T, et al. The efficacy of a scaffold-free Bio 3D conduit developed from human fibroblasts on peripheral nerve regeneration in a rat sciatic nerve model [J]. PLoS One, 2017, 12 (2) : e0171448.
- [33] 张广亮. 3D 打印牵张力在调控组织血管化中的作用及机制研究 [D]. 苏州大学, 2018.
- (收稿: 2021-04-19)
(同行评议专家: 郭全文 郝永强)
(本文编辑: 宁 桦)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

郑重声明

——《中国矫形外科杂志》编辑部将依法追究
冒充编辑部开设网站、征集稿件、乱收费的相关机构和个人

近期,《中国矫形外科杂志》编辑部多次接到读作者的电话和 Email,发现有多个网站利用《中国矫形外科杂志》名义非法征稿及骗取有关费用,要求作者将费用汇入指定账户等方式骗取作者钱财,侵犯了广大作者的合法权益。《中国矫形外科杂志》编辑部在此提醒广大读作者,本刊编辑部从未委托任何代理机构为《中国矫形外科杂志》征稿。

为了确保作者的合法权益不受侵害,请广大读作者注意辨明真伪,谨防上当受骗。《中国矫形外科杂志》编辑部将依法追究冒充编辑部开设网站、征集稿件、乱收费的相关机构和个人。

请作者注意:

(1)《中国矫形外科杂志》网址: ZJXS.chinajournal.net.cn; Http://jxwk.ijournal.cn 为本刊唯一在线投稿系统,其他均为冒充者,稿件上传后自动生成编号,稿号为: 2021-xxxx。其他冒充者的稿件编号五花八门,多很繁琐,请广大作者注意辨别。

(2)稿件上传后需邮寄审稿费 100 元整,本刊不收复审费和中国知网论文查重检测费等。

(3)有关版面费和审稿费均需通过邮局汇款至:山东省泰安市泰山大街 366 号山东第一医科大学第二附属医院中国矫形外科杂志编辑部,邮局汇款为本刊唯一收取款项的方式,其他支付方式如网上支付、支付宝、网银转账、微信、汇款至个人账户等均为诈骗行为,请广大作者严防上当。

(4)本刊办公电话: 0538-6213228。专用电子信箱: jiaoxingtougao@163.com; jxwk1994@126.com; 财务专用信箱: jiaoxingwaikecaiwu@163.com; 邮编: 271000

特此公告!

《中国矫形外科杂志》编辑部