

## 3D打印技术在足踝外科的临床应用进展

林文杰<sup>1</sup>, 邹其声<sup>1</sup>, 黄文华<sup>1,2</sup>, 欧阳汉斌<sup>1</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 孙欣<sup>1</sup>

1. 广东医科大学附属第一医院骨科中心, 广东 湛江 524001; 2. 南方医科大学基础医学院人体解剖学国家重点学科/广东省医学生物力学重点实验室/广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515

**【摘要】**在足踝外科领域, 由于解剖结构涉及多个关节和骨骼, 足踝疾病和创伤的诊断及治疗方案相对复杂, 3D打印技术作为一种辅助实现外科修复重建的个性化和精准化治疗的新方法, 在足踝外科中显示出了极高的临床价值及应用前景。本文将对3D打印的原理及流程进行概述并从术前规划、医患沟通、手术器械设计及术后辅助支具等方面回顾3D打印技术在足踝外科领域的临床应用进展及局限性, 为相关研究提供参考。

**【关键词】**3D打印; 数字医学; 足踝外科; 综述

**【中图分类号】**R318; R684

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)04-0524-05

## Advances in clinical application of three-dimensional printing technology in foot and ankle surgery

LIN Wenjie<sup>1</sup>, ZOU Qisheng<sup>1</sup>, HUANG Wenhua<sup>1,2</sup>, OUYANG Hanbin<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, SUN Xin<sup>1</sup>

1. Orthopedics Center, Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Zhanjiang 524001, China; 2. Guangdong Engineering Research Center for Translation of Medical 3D Printing Application/Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics/National Key Discipline of Human Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

**Abstract:** The anatomical structures of foot and ankle involve multiple joints and bones, which makes the diagnosis and treatment schemes of foot and ankle diseases and traumas relatively complex. Three-dimensional printing technology, as a new method to assist in realizing personalized and accurate treatment of surgical repair and reconstruction, shows high clinical value and application prospect in foot and ankle surgery. Herein the principle and process of three-dimensional printing are summarized, and the clinical application progress and limitations of three-dimensional printing technology in foot and ankle surgery are reviewed from the aspects of preoperative planning, doctor-patient communication, surgical instrument design and postoperative auxiliary braces, so as to provide references for relevant researches.

**Keywords:** three-dimensional printing; digital medicine; foot and ankle surgery; review

### 前言

3D打印, 也称为快速成型制造、实体自由成型制造或增材制造等, 被认为是推动新一轮工业革命的核心, 是一种基于离散-堆积原理, 将数字三维模型分

层切割为二维横截面形状, 并通过各种材料(如塑料聚合物、金属和生物材料等)逐层叠加而产生单一实体的技术<sup>[1]</sup>。这项技术最早可追溯于20世纪80年代由 Charles Hull 教授提出, 而在1988年, 第一台商用3D打印机的推出, 标志着3D打印技术的正式诞生<sup>[2]</sup>。与传统制造方式相比, 3D打印技术具有快速成型、高设计自由度、可定制性等优势, 并能精确控制宏观和微观结构, 目前在医学领域中, 正广泛应用于教育培训、手术模拟、手术导航模板、内植物假体和辅助支具等方面。足踝部作为人体最为复杂解剖结构之一, 其涉及胫骨下端和胫、腓内外踝基底部以下的所有骨与关节、韧带与肌腱、肌肉、血管、神经等结构, 是人体重要的负重器官和运动器官<sup>[3]</sup>。由于足踝部解剖与生物力学特殊性、致病因素多样性, 导致

**【收稿日期】**2021-11-20

**【基金项目】**广东省科技计划项目(2018B090944002); 深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队(SZSM201612019); 广东省医学科研基金(B2021213); 湛江市科技发展专项资金竞争性分配项目(2020A01025, 2020A01042); 广东医科大学大学生创新实验项目(FZZY001)

**【作者简介】**林文杰, 硕士研究生, 研究方向: 足踝外科、骨科3D打印, E-mail: 704185800@qq.com

**【通信作者】**孙欣, 主任医师, 研究方向: 数字骨科, E-mail: sunxin20088@126.com

足踝外科疾病谱较广,诊断及治疗方案相对复杂,预后往往欠佳,而随着个体化及精准化治疗的愈发重视,作为医学数字化技术的集中体现,3D打印技术在足踝外科中显示出了极高的临床价值及应用前景。因此,本文就现有国内外文献对3D打印技术在足踝外科领域的临床应用进展及局限性作一综述。

## 1 3D打印技术的流程

在医学领域,3D打印流程通常由三维建模、分层离散及3D打印3个步骤组成。首先是数字化三维模型的创建,目前临床上主流方法包括:①计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD),通过各种CAD软件,外科医生可在计算机上进行导航模板、内固定或假体等设计,该过程通常用于设备或工具的快速成型制作;②医学影像数据三维重建,利用患者薄层医学影像数据,如计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)或磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)在医学图像处理软件中进行三维几何模型重建,以用于后续设计或模型3D打印,此种方法在临床中更为常用;③三维扫描仪,使用三维扫描仪对人体或物件表面结构进行连续测量,进一步获取物体表面点云数据通过第三方软件转换为虚拟三维模型,与医学影像数据三维重建不同,该技术只针对物体表面的形态进行模型重建,故临床上用途有限,主要用于实体模型的虚拟转换、体积测量和辅助支具的设计等。其次,将上述数字三维模型以立体光刻(STereoLithography, STL)格式输出至分层切片软件中,进一步将模型“切割”成一系列二维横截面,分层后STL文件称为G代码。最后,将上述步骤获取的G代码输入打印机中,选择各种刚性或柔性可粘材料,通过添加连续的材料层再现虚拟横截面,从而制作出3D物理模型。

## 2 术前讨论、手术模拟及医患沟通

充分、精确的术前规划是获得良好手术疗效的前提与保证。然而,限于传统尸体解剖教学的条件,大部分足踝外科医师仅能依靠其自身的知识经验结合二维医学图像进行术前规划,如X光、CT等。尽管上述影像学检查可以作为诊断疾病的类型及严重程度的辅助手段,但它们无法准确反映复杂的三维空间结构并提供触觉反馈,使得手术团队成员之间难免出现不同程度上的认知差异<sup>[4-5]</sup>。随着3D打印设备的不断革新以及打印材料的多样化发展,3D打印速度和精度得以不断提高,同时打印成本的下降使定制化3D打印解剖模型在复杂病例的使用愈发普

遍<sup>[6]</sup>。3D打印模型能更真实地反映骨折的形态及骨折碎片的相对位置,有助于提高住院医师对骨折类型理解的程度,缩短学习曲线,增加他们对于术前讨论的自信心<sup>[7]</sup>。进一步来说,外科医生可以利用三维模型进行模拟骨折复位及内固定的置入,包括精准预测最佳手术入路、复位步骤、植入物的种类及规格、螺钉钉道方向、植入物放置位置、骨移植的需要等,这有助于制定合理的个性化手术计划和优化手术方案<sup>[8]</sup>。Zhang等<sup>[9]</sup>回顾比较了常规手术和三维打印模型辅助手术治疗高能踝关节骨折脱位的疗效和预后,相对于常规手术组,在3D打印组中,借助1:1实体模型,外科医生能在体外提前进行钢板预选择及塑形,同时标记螺钉的植入位置及方向,明显减少手术时间、术中出血量、透视次数,并在术后随访中显示出较高的功能恢复率。Yao等<sup>[10]</sup>类似地根据计算机断层成像数据构建跟骨骨折的三维重建模型,进而在软件中模拟螺钉的置入和获取螺钉钉道参数,并进行实物模型验证,以确保方案的准确性,他们发现通过此项技术的运用,明显提高内固定植入的准确性以及骨折的复位率,同时达到手术微创化的效果。Chen等<sup>[11]</sup>首次将3D打印模型应用于矫正严重烧伤后踝关节挛缩手术设计中,发现与传统手术计划相比,3D打印模型辅助手术设计能显著缩短手术时间,提高患者满意度。此外,在术前谈话中,由于足踝部结构自身的复杂性,且受制于患者的受教育程度以及对医学领域知识的理解度,即使采用通俗易懂的语言向患者进行讲解病情、手术的必要性和风险性,也难免涉及专业医疗词汇,因此,对于手术方案的解释和选择均较为困难<sup>[12]</sup>。在这种情况下,医患双方的信息不对称以及对于手术的高期望值,极易引起医疗纠纷<sup>[13]</sup>。对此,3D打印技术的应用可以较好地解决上述问题,借助实物仿真模型为媒介,患者及家属可以直接观察到病损的部位、范围及严重性,更加充分地理解手术方案的步骤、难点和对应的处理方法,在一定程度上有效地提高术前谈话的满意度,增加患方在治疗期间的依从性<sup>[14]</sup>。

## 3 个性化导航模板及截骨导板

在传统手术中,为了螺钉置入的准确性,术中往往依靠术者手术经验多次在透视下进行徒手置钉,这难免会导致周围骨质的改变、引起螺钉固定强度降低,且对手术部位邻近血管、神经、韧带等重要结构也会构成重大风险<sup>[15]</sup>。针对上述不足,目前临床上主要应对手段包括计算机辅助导航系统与3D打印个性化导航模板等。其中,前者可通过空间定位系



统将影像数据与现实人体相匹配,通过不同方位的断层图像,可以直观地分析病变与周围组织的立体空间关系,同时有效保证螺钉置入,缩短手术时间,减少X线辐射损伤<sup>[16]</sup>。然而,尽管手术导航系统具有许多优点,但是一方面受制于前期投入成本过高、定期的软件更新以及设备的维护,使得该技术难以在国内欠发达地区进一步开展,另一方面,其使用难度大、学习曲线过长和导航技术固有的不足也成为临床骨科医生尚未普遍接受的主要障碍<sup>[17]</sup>。而3D打印个性化导航模板并不依赖于规模化的工业基础,制作成本较低,面对难度较大的手术时,也能提供良好的置钉准确性及适用性,更利于基层医院开展<sup>[18]</sup>。Duan等<sup>[19]</sup>基于距下关节薄层CT数据制作了3D打印定制导板,以用于距下关节融合术中,结果发现使用个性化导板可以根据术前计划准确地将克氏针钻入合适的位置,有效缩短手术时间,减少术中放射次数。黄雯洁等<sup>[20]</sup>在一项3D打印个体化导板辅助解剖重建踝关节外侧韧带带的研究中,指出个体化钻孔导板既能保证手术安全可靠,防止术中意外的发生,又可以达到个性化解剖重建,且疗效肯定。

此外,在足踝矫形手术中,足部、踝关节和下肢畸形往往是多平面的,术中任何对线不良的矫正可能导致持续的异常应力产生,加剧相邻关节的退行性变,因此,在术前规划和模拟手术过程中,评估每个平面的位置,获得特定的角度关系对于确定畸形程度及其对肢体功能的影响显得尤为重要<sup>[21]</sup>。X光片和计算机断层扫描是重要的辅助方法,但仍然无法提供多平面复杂畸形的三维量化,导致术中截骨操作难度较大,容易引起步态异常、应力性骨折、假体磨损、骨吸收以及假体松动等术后并发症<sup>[21]</sup>。而个性化3D打印截骨导板的运用,可显著降低术中截骨操作难度,缩短反复截骨时间,提高截骨的精确度,减少力学纠正不良的可能性<sup>[23]</sup>。Chen等<sup>[24]</sup>报道了一个罕见的足部多趾畸形病例,其多趾起源于畸形的跟骨,术前步态分析显示患足存在异常负重区,考虑到传统手术无法达到恢复正常解剖形状的同时保证足功能性完整,因此,基于3D打印技术设计出符合多趾畸形和跟骨间解剖关系的截骨导板,并成功实施截骨术,术后X光显示跟骨修复至正常形状,而步态分析显示左脚负荷均匀,疼痛区域得以消除。董谢平等<sup>[25]</sup>对于严重踝关节内骨折畸形愈合患者,采用自行设计接力方式的截骨导板辅助在较小的显露或操作空间内完成多平面截骨,展示了3D截骨导板辅助截骨技术的高效性和准确性。Giardini等<sup>[26]</sup>回顾了接受Infinity型人工踝关节置换术的17例患

者,其中7例采用传统的髓外对准截骨器械(STD组),其余10例采用患者专用辅助截骨器械(PSI组),术后与STD对照组相比,PSI组疼痛评分有着更大的改善,且尚无假体撞击综合征的出现,影像学结果显示PSI组置换位置更为准确且具有更大的植入重复性。

#### 4 个性化植入物设计

骨缺损的修复重建仍然是足踝外科领域的一大挑战。尽管如今已有诸多方法实现骨修复重建,然而,对于复杂骨缺损的修复重建,如创伤后骨缺损、骨缺血坏死、全踝关节置换失败、骨肿瘤和骨髓炎等,利用传统的结构性移植术进行缺损填补常因无法根据骨缺损的大小、形状进行精准配对而受到限制<sup>[27-28]</sup>。另外,此类结构性移植术也难以承受足踝部的高负荷应力,从而导致骨不愈合、结构塌陷、节段性重建力学强度不足、植入物松动失效等并发症<sup>[29]</sup>。因此,临床上亟需一种能解决传统标准化植入物形态不匹配问题以及提供长期在体稳定性的修复植入体。3D打印技术使得定制金属植入物的开发成为可能,这种植入物提供了优越的机械稳定性,同时其独特的“私人”定制性能精准实现骨缺损的形态学匹配。王碧波等<sup>[30]</sup>通过一项尸体力学试验证明,使用3D打印技术定制的距骨假体,其大小形态及关节面弧度能达到与切除的距骨部分完全一致,植入后与受体距骨形态高度匹配,修复处局部所受压强无明显变化,并不会产生异常应力,提示其临床应用的可行性。Dekker等<sup>[31]</sup>应用3D打印个性化钛笼对15例具有严重骨缺损、畸形或骨不连的患者施行足踝重建手术,并进行1年以上随访,影像学检查示15例患者中有13例(87%)融合成功。So等<sup>[32]</sup>报道了3例足踝术后失效、骨不连的患者使用定制3D钛桁架植入物进行修复重建,术后6个月的CT扫描显示,种植体和填充的骨移植物的骨整合率>50%,在17.33个月的平均随访时间内,患者疼痛明显改善,成功恢复日常生活活动,并未发现沉降、种植体塌陷或矫正丧失的早期迹象。随着3D金属打印制造工艺的发展,多孔金属植入物已成为足部和踝关节重建手术中的一种可行选择。研究表明,应用3D打印技术制造的多孔金属植入物其高孔隙率和互连孔的特性保证了其良好的骨整合及骨诱导能力,有效减少了既往因结构性移植失败而引起的骨不连、骨溶解和移植术塌陷等问题<sup>[33-36]</sup>。Fang等<sup>[37]</sup>采用三维打印模块化假体为1例距骨间叶肉瘤患者进行全距骨置换重建,假体由超高分子量聚乙烯上部组件和多孔钛合金下部组件制成,6个月后患者可在无辅助支具的情况下自主行走,并未出现足部疼痛,X线片显示假体和螺钉位置稳定,周围骨骼无异常。杨钱东等<sup>[38]</sup>自

主设计了具有生物学功能的个性化三维打印距骨假体,对8例严重距骨坍塌性坏死患者进行假体置换,结果显示该距骨假体解剖结构与健侧距骨完全一致,适配性良好,在平均23.2个月的随访时间内,并未出现再次骨折、皮肤愈合不良或感染、假体移位、力线不良等并发症。

## 5 个性化踝足矫形器

踝足矫形器(Ankle-Foot Orthose, AFO)作为足踝矫形中一种常见的外固定器械,可以起到减少压力、缓冲疼痛、矫正畸形以及提高足踝部稳定性等作用,常用于预防因各种疾病造成的足下垂引起的跌倒,减轻因关节畸形引起的慢性疼痛以及控制地面反作用力,减轻足底疲劳等<sup>[39]</sup>。相比于传统的AFO制造工艺复杂、生产周期长、容易引起患者不适等缺点,依托3D打印技术的个性化AFO拥有设计自由、制造时间短、零件数目小、轻量化结构、材料成本低等天然优势,此外,在CAD软件帮助下,工程师可根据患者足部的形状,结合步态周期内足底压力分布数据,对个性化AFO进行生物力学优化设计,以提供更好的行走性能、贴合度与舒适度<sup>[40-42]</sup>。Liu等<sup>[43]</sup>介绍一种以工程级热塑性塑料PA12制作而成的个性化踝足矫形器,位于小腿及足底的圆孔轻量化设计,在减轻重量并节省材料同时,为患者提供更为舒适、透气的穿着环境,随后的临床试验证明,该AFO对脑卒中患者的步速和步长有显著的改善。Xu等<sup>[44]</sup>将60名足底筋膜炎患者随机分为两组,对照组佩戴传统预制AFO,而实验组佩戴定制的3D打印AFO,足底压力测试结果显示,与对照组相比,定制AFO组更加符合患者实际足部状况,能在较短时间内产生矫形效果,并且随着时间的推移矫形效果逐渐增强。Tarrade等<sup>[45]</sup>通过3D扫描技术对34名足部疼痛的站立工作者进行个性化足部矫形器设计并搭配定制鞋垫,佩戴3周后患者疼痛、不适感、下肢沉重感明显减轻;此外,力学测试表明定制化足部矫形器可更好地平衡足底峰值压力分布,将压力从后足转移到中足。Tenten-Diepenmaat等<sup>[46]</sup>利用鞋内足底压力测量的反馈,开发了一种用于评估和调整足部矫形器的优化方案,并对38例有足部症状的类风湿关节炎患者进行疗效评估,结果表明,佩戴足部矫形器可显著改善疼痛和身体功能,并有效降低前足底压力。

## 6 3D打印技术在足踝外科的局限性与未来展望

虽然3D打印技术在足踝外科中有多方向的应用,但仍存在一些需要解决的问题。首先,受制于定制化植入物成本高、设计制造时间长的影响,患者仍更倾向于使用标准化植入物,因此,如何提高打印速度以及减

少制造成本已成为扩展3D打印应用规模的下一步研究方向;其次,临床中3D打印的植入物大部分用于骨性手术中,而鲜有关节软骨、皮肤软组织结构的应用报道,尽管已有不少体外及动物试验研究表明生物3D打印技术已经能够制备生物相容性良好、机械强度足够的三维支架模型,以适应细胞黏附生长以及组织器官再生修复,但仍需对其临床有效性和安全性进行更进一步的探索;再者,3D打印工作流程中常涉及多个独立的工程软件相互协作,往往需要医工之间进行详尽的规划,为求缩短医工之间的理解差异,进一步降低时间成本,有必要开发一个集成整合的一体化计算机平台,以便于不同的医护工作者与生物医学工程师之间进行无缝交流。此外,3D打印技术的安全性和规范性是另一个考虑因素,目前行业内对该技术与定制产品仍缺乏监控与管理体系,也尚无统一标准以对3D打印产品进行安全性评估,亟需相应的应用指南和法律法规的出台。相信随着相关研究的深入开展、新型材料的研发以及法律制度的完善,上述不足将会得到逐步解决,而3D打印技术也将成为推动足踝外科领域持续发展的关键。

## 【参考文献】

- [1] BEREDIKLIAN P K, WANG M, LUTSKY K, et al. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: technology and clinical applications[J]. J Bone Joint Surg Am, 2020, 102(10): 909-919.
- [2] MATTHEW W. The history of 3D printing in healthcare[J]. Bulletin of the Royal College of Surgeons of England, 2014, 96(7): 228-229.
- [3] 李光辉, 付涛. 足踝损伤临床诊疗的方法和现状[J]. 骨科, 2020, 11(5): 353-355.
- [4] LI G H, FU T. Methods and current situation of clinical diagnosis and treatment of foot and ankle injury[J]. Orthopaedics, 2020, 11(5): 353-355.
- [5] MONTGOMERY S J, KOONER S S, LUDWIG T E, et al. Impact of 3D printed calcaneal models on fracture understanding and confidence in orthopedic surgery residents[J]. J Surg Educ, 2020, 77(2): 472-478.
- [6] 朱亚会, 付炳金, 尹刚, 等. 不同年资足踝外科医师应用3D打印技术治疗足踝骨折效果的比较[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(19): 115-120.
- [7] ZHU Y H, FU B J, YIN G, et al. Treatment outcomes of three-dimensional printing technology for foot and ankle fractures by junior versus senior physicians [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2018, 22(19): 115-120.
- [8] PUGLIESE L, MARCONI S, NEGRELLO E, et al. The clinical use of 3D printing in surgery[J]. Updates Surg, 2018, 70(3): 381-388.
- [9] HASENSTEIN T, PATEL K P, MOORE J L, et al. Printed 3-dimensional computed tomography scanned ankle fractures as an educational instrument[J]. J Foot Ankle Surg, 2019, 58(6): 1081-1084.
- [10] XIE L Z, CHEN C H, ZHANG Y Y, et al. Three-dimensional printing assisted ORIF versus conventional ORIF for tibial plateau fractures: A systematic review and meta-analysis[J]. Int J Surg, 2018, 57: 35-44.
- [11] ZHANG Y W, XIAO X, XIAO Y, et al. Efficacy and prognosis of 3D printing technology in treatment of high-energy trans-syndesmotank ankle fracture dislocation-"log-splitter" injury[J]. Med Sci Monit, 2019, 25: 4233-4243.
- [12] YAO L F, WANG H Q, ZHANG F, et al. Minimally invasive treatment of calcaneal fractures via the sinus tarsi approach based on a 3D printing technique[J]. Math Biosci Eng, 2019, 16(3): 1597-1610.
- [13] CHEN Y B, NIU Z H, JIANG W Q, et al. 3D-printed models improve surgical planning for correction of severe postburn ankle contracture with an external fixator[J]. J Zhejiang Univ Sci B, 2021, 22(10): 1597-1610.



- 866-875.
- [12] 赵移吟, 金球. 3D骨科医患沟通软件的开发与应用[J]. 中国数字医学, 2015, 10(2): 38-40.  
ZHAO Y C, JIN Y. Development and application of 3D orthopedic doctor-patient communication software[J]. China Digital Medicine, 2015, 10(2): 38-40.
  - [13] 石高寒, 郭再萍. 沟通, 架起医患和谐的桥梁[J]. 医院管理论坛, 2011, 28(6): 15-16.  
SHI G H, GUO Z P. Communication and building a bridge for doctor-patient harmony[J]. Hospital Management Forum, 2011, 28(6): 15-16.
  - [14] YANG L, SHANG X W, FAN J N, et al. Application of 3D printing in the surgical planning of trimalleolar fracture and doctor-patient communication [J]. Biomed Res Int, 2016. DOI: 10.1155/2016/2482086. Epub 2016 Jul 3.
  - [15] MATSUKAWA K, KAITO T, ABE Y. Accuracy of cortical bone trajectory screw placement using patient-specific template guide system[J]. Neurosurg Rev, 2020, 43(4): 1135-1142.
  - [16] KUBICEK J, TOMANEC F, CERNY M, et al. Recent trends, technical concepts and components of computer-assisted orthopedic surgery systems: a comprehensive review[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(23): 5199.
  - [17] ZHENG G Y, NOLTE L P. Computer-aided orthopaedic surgery: state-of-the-art and future perspectives[J]. Adv Exp Med Biol, 2018, 1093: 1-20.
  - [18] JASTIFER J R, GUSTAFSON P A. Three-dimensional printing and surgical simulation for preoperative planning of deformity correction in foot and ankle surgery[J]. J Foot Ankle Surg, 2017, 56(1): 191-195.
  - [19] DUAN X J, FAN H Q, WANG F Y, et al. Application of 3D-printed customized guides in subtalar joint arthrodesis[J]. Orthop Surg, 2019, 11(3): 405-413.
  - [20] 黄雯洁, 余嘉, 黄若昆, 等. 3D打印个体化导板在踝关节外侧韧带解剖重建中的应用[J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(4): 334-338.  
HUANG W J, YU J, HUANG R K, et al. Application of 3D printed individualized guide plate in anatomical reconstruction of lateral ankle ligament[J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2020, 22(4): 334-338.
  - [21] LAMM B M, PALEY D. Deformity correction plan-ning for hindfoot, ankle, and lower limb [J]. Clin Podiatr Med Surg, 2004, 21(3): 305-326.
  - [22] GAUVAIN T T, HAMES M A, MCGARVEY W C. Malalignment correction of the lower limb before, during, and after total ankle arthroplasty[J]. Foot Ankle Clin, 2017, 22(2): 311-339.
  - [23] FUCENTESE S F, MEIER P, JUD L, et al. Accuracy of 3D-planned patient specific instrumentation in high tibial open wedge valgisation osteotomy[J]. J Exp Orthop, 2020, 7(1): 7.
  - [24] CHEN Y G, HAN Q, LIU H, et al. Accurate osteotomy for the treatment of a rare case of postaxial polydactyly of the foot that originated from a deformed calcaneus using a 3D-printed guiding plate [J]. J Foot Ankle Surg, 2019, 58(1): 171-175.
  - [25] 董谢平, 张大伟, 漆启华, 等. 3D打印截骨导板辅助治疗踝关节内骨折畸形愈合[J]. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(6): 511-517.  
DONG X P, ZHANG D W, QI Q H, et al. Osteotomy for malunion of intra-articular ankle fracture assisted by 3D printing relay template[J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2017, 19(6): 511-517.
  - [26] GIARDINI P, DI BENEDETTO P, MERCURIO D, et al. Infinity ankle arthroplasty with traditional instrumentation and PSI prophecy system: preliminary results[J]. Acta Biomed, 2020, 91(14-S): e2020021.
  - [27] SHNOL H, LAPORTA G A. 3D printed total talar replacement: a promising treatment option for advanced arthritis, avascular osteonecrosis, and osteomyelitis of the ankle[J]. Clin Podiatr Med Surg, 2018, 35(4): 403-422.
  - [28] CONTI S F, WONG Y S. Osteolysis of structural autograft after calcaneocuboid distraction arthrodesis for stage II posterior tibial tendon dysfunction[J]. Foot Ankle Int, 2002, 23(6): 521-529.
  - [29] JENG C L, CAMPBELL J T, TANG E Y, et al. Tibiotalocalcaneal arthrodesis with bulk femoral head allograft for salvage of large defects in the ankle[J]. Foot Ankle Int, 2013, 34(9): 1256-1266.
  - [30] 王碧菠, 陈博, 李星辰, 等. 3D打印距骨部件修复重建距骨病损的生物力学研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32(3): 5.  
WANG B B, CHEN B, LI X C, et al. Biomechanical study on repair and reconstruction of talar lesion by three-dimensional printed talar components[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2018, 32(3): 5.
  - [31] DEKKER T J, STEELE J R, FEDERER A E, et al. Use of patient-specific 3D-printed titanium implants for complex foot and ankle limb salvage, deformity correction, and arthrodesis procedures[J]. Foot Ankle Int, 2018, 39(8): 916-921.
  - [32] SO E, MANDAS V H, HLAD L. Large osseous defect reconstruction using a custom three-dimensional printed titanium truss implant[J]. J Foot Ankle Surg, 2018, 57(1): 196-204.
  - [33] SAMMARCO V J, CHANG L. Modern issues in bone graft substitutes and advances in bone tissue technology[J]. Foot Ankle Clin, 2002, 7(1): 19-41.
  - [34] KELLY C N, MILLER A T, HOLLISTER S J, et al. Design and structure-function characterization of 3D printed synthetic porous biomaterials for tissue engineering[J]. Adv Health Mater, 2018, 7(7): e1701095.
  - [35] SINCLAIR S K, KONZ G J, DAWSON J M, et al. Host bone response to polyetheretherketone *versus* porous tantalum implants for cervical spinal fusion in a goat model[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(10): E571-E580.
  - [36] EPPERSON R T, BARG A, WILLIAMS D L, et al. Histological analysis of a retrieved porous tantalum total ankle replacement: a case report[J]. JBJS Case Connect, 2020, 10(1): e0379.
  - [37] FANG X, LIU H, XIONG Y, et al. Total talar replacement with a novel 3D printed modular prosthesis for tumors[J]. Ther Clin Risk Manag, 2018, 14: 1897-1905.
  - [38] 杨钱冬, 陈万, 穆米多, 等. 个性化三维打印距骨假体治疗塌陷性距骨坏死的早期临床效果分析[J]. 中华外科杂志, 2021, 59(6): 470-476.  
YANG Q D, CHEN W, MU M D, et al. Early clinical effect analysis of personalized three-dimensional printing talus prosthesis in the treatment of collapsed talus necrosis[J]. Chinese Journal of Surgery, 2021, 59(6): 470-476.
  - [39] WOJCIECHOWSKI E, CHANG A Y, BALASSONE D, et al. Feasibility of designing, manufacturing and delivering 3D printed ankle-foot orthoses: a systematic review[J]. J Foot Ankle Res, 2019, 12: 11.
  - [40] SCHRANK E S, STANHOPE S J. Dimensional accuracy of ankle-foot orthoses constructed by rapid customization and manufacturing framework[J]. J Rehabil Res Dev, 2011, 48(1): 31-42.
  - [41] CHA Y H, LEE K H, RYU H J, et al. Ankle-foot orthosis made by 3d printing technique and automated design software[J]. Appl Bionics Biomech, 2017. DOI: 10.1155/2017/9610468. Epub 2017 Jul 30.
  - [42] CHOI H, PETERS K M, MACCONNELL M B, et al. Impact of ankle foot orthosis stiffness on achilles tendon and gastrocnemius function during unimpaired gait[J]. J Biomech, 2017, 64: 145-152.
  - [43] LIU Z, ZHANG P D, YAN M, et al. Additive manufacturing of specific ankle-foot orthoses for persons after stroke: a preliminary study based on gait analysis data [J]. Math Biosci Eng, 2019, 16(6): 8134-8143.
  - [44] XU R, WANG Z H, MA T J, et al. Effect of 3D printing individualized ankle-foot orthosis on plantar biomechanics and pain in patients with plantar fasciitis: a randomized controlled trial[J]. Med Sci Monit, 2019, 25: 1392-1400.
  - [45] TARRADE T, DOUCET F, SAINT-LÔ N, et al. Are custom-made foot orthoses of any interest on the treatment of foot pain for prolonged standing workers[J]. Appl Ergon, 2019, 80: 130-135.
  - [46] TENTEN-DIEPENMAAT M, DEKKER J, TWISK J W R, et al. Outcomes and potential mechanism of a protocol to optimize foot orthoses in patients with rheumatoid arthritis[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21(1): 348.

(编辑: 薛泽玲)