

3D打印技术在人工手指关节置换中的应用现状

许靖, 黄文华

南方医科大学基础医学院人体解剖国家重点学科/广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心/广东省医学生物力学重点实验室, 广东 广州 510515

【摘要】人工手指关节置换术是临床手指关节功能障碍疾病的重要治疗手段,经过多年的发展,人工手指关节无论在外形还是功能上都有不少改进,但是由于手指关节结构的复杂性和特殊性,传统制造的人工手指关节仍存在不少问题,其远期效果不佳与并发症的发生限制了其更大的推广与应用,其中的重要原因就是假体材料选择与假体设计的不完善。3D打印技术的出现与发展,带来了优化人工手指关节材料选择以及完善假体设计与安装的新方法,并且与传统人工手指关节假体相比具有个性化、精准化、低成本的优势,更加符合我国医疗实际情况。本文从人工手指关节的发展与研究现状、人工手指关节置换术的基本应用情况及3D打印技术在人工手指关节置换术的应用现状及前景等方面作一综述。

【关键词】人工手指关节;3D打印;关节置换术;假体;综述

【中图分类号】R319

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)09-0950-05

Current status of three-dimensional printing technology in artificial finger joint replacement

XU Jing, HUANG Wenhua

Department of Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Southern Medical University/Guangdong Engineering Research Center for Translation of Medical 3D Printing Application/Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics, Guangzhou 510515, China

Abstract: Artificial finger joint replacement is considered as an important treatment for finger joint disorders. After years' development, much improvement has been made on both shape and function of artificial finger joint. Because of the complexity and particularity of finger joint, the traditional artificial finger joint is still associated with many problems such as unsatisfied long-term outcomes and high incidence of complications which restrain the promotion and application of artificial finger joint arthroplasty. One of the most important reasons for this phenomenon is the unmatched choice of the material and design for the prosthesis. The development of three-dimensional printing technology provides a better choice of material and improvement for the design and installation of prosthesis. Three-dimensional printed prosthesis has the advantages of more personalized and accurate design and lower cost of the product, which conforms to the current medical situation in China. Herein, we reviewed the development and research status of artificial finger joint, the application of artificial finger joint arthroplasty, and the application and prospects of three-dimensional printing technique in artificial finger joint arthroplasty.

Keywords: artificial finger joint; three-dimensional printing; finger joint arthroplasty; prosthesis; review

前言

多种疾病或者创伤都可导致手指关节的慢性疼

痛、畸形或者运动障碍,随着此类疾病发生、进展及转归,在不同程度上影响手指关节运动,最终导致手指关节功能障碍,影响正常生活。在临床实践中,针对此类手指关节活动障碍的主要治疗方法有移植关节术、关节成形术、关节融合术及人工关节置换术。其中,作为多种手指关节活动障碍疾病治疗的最终手段,人工手指关节置换术可重建手指关节运动功能,恢复手指关节稳定性并矫正手指关节畸形,在改善手指关节外观的同时显著缓解病人疼痛,其开展已超过半个世纪并为人们所广泛接受。经过长期的临床验证及研发人员实验改进,随着手指关节解剖

【收稿日期】2017-04-15

【基金项目】广东省科技计划项目(2015B010125005, 2016B090917001, 2016B090925001), 中国南方智谷引进创新团队项目(2015CXTD05),

【作者简介】许靖,博士,研究方向为临床解剖、医学3D打印、生物力学, E-mail: xujing163vip@163.com

【通信作者】黄文华,教授,博士生导师,研究方向为临床解剖、医学3D打印、生物力学, E-mail: 13822232749@139.com

研究的深入,手指关节生物力学研究的不断探索,传统人工指间关节假体在材料选择、设计、性能及远期效果上都较其初期发展阶段有明显改善,术后效果反应良好,并发症发生率也大幅下降。近年来,随着计算机辅助设计技术、逆向工程技术、增材制造3D打印技术相关学科的迅猛发展,由于其精准、个性化、低成本的优势,其在医疗领域尤其是人工关节假体的制造方面的应用不断拓展。

1 人工手指关节的发展及研究现状

Burman^[1]于1940年首先开展合金掌骨头半关节置换术,可视为手部小关节置换技术的雏形,其设计灵感来自于人工髋关节假体中的金杯式设计并在材料上借鉴了牙科所采用的钴铬钼合金。1959年Brannon等^[2]设计的掌指关节及近指间关节金属铰链式全关节置换假体在临床上一经推广应用则正式使得人工关节置换术得到了广泛的开展,但随着远期出现的假体疲劳断裂、松动及各种并发症的出现,人们对其工艺技术的改进提出了更高的要求。此后,多位学者针对早期人工指间关节存在的问题进行了研究^[3]。20世纪60年代,人工假体聚合物材料的研制成功,推动了该领域了快速发展。其中,1962年Swanson等^[4]设计的硅胶间隔式假体,提出了人工手指关节假体的新理念。该装置为有弹性的硅胶间隔设计,其关节部向指背侧凸起,从而提高假体的使用寿命。此后1969年Niebauer等^[5]、ChiaRi等^[6]在Swanson设计的基础上,针对置换关节不稳与假体周围组织机械损伤等问题做出了改进。改进后的硅胶假体早期效果满意,但远期随访发现,有些患者可并发假体折断、骨质进行性破坏、手指关节进行性僵直、硅胶性滑膜炎、远隔硅胶淋巴结病等并发症^[7]。并发症的出现一方面与所使用假体材料有关,另一方面与假体设计本身也有关系。Swanson的设计会在髓腔内形成磨损颗粒,刺激异物反应,骨质吸收与破坏加剧,从而引起硅胶性滑膜炎与远隔硅胶结节病^[8],而且Swanson假体及早期金属铰链式假体属于限制式假体,与正常关节相比,其解剖学形态及生物力学性能有较大差异,造成关节畸形与假体断裂的情况时有发生。

随着材料与技术的不断探索与进步,进入20世纪70年代,假体的设计从完全限制型-铰链式发展到半限制型-球窝式假体,更加符合生物力学及接近正常关节解剖形态的假体应运而生。球窝式假体常见的有Candamin等假体^[9],此类假体有远近两部分假体组成,关节活动范围有所提高,但也增加了关节半

脱位或者全脱位的危险。另外,半限制性假体窝部塑料部分容易产生裂隙,头部金属连接颈部部分易发生金属疲劳性折断。另一类假体如Griffith等假体则将球部与窝部的位置对调,其与正常关节相反的设计势必会影响到关节的活动范围^[9]。

经过前期假体的应用及研究,人们发现理想的人工手指关节设计应尽可能在解剖形态以及生物力学性能方面接近正常的手指关节。膝关节表面置换技术的成熟发展与良好效果,其设计理念值得人工手指关节的研究人员加以借鉴,非限制型假体也是手指关节假体今后重要的发展方向。目前,已有多款人手工关节表面置换假体应用于临床,包括Linsheid等假体^[10]。此类假体形态近端尽量接近正常掌、指骨头形状,远端尽量接近正常关节窝形状,整体形状更接近正常关节形态,手术时骨质切除破坏减少,更多骨质得以保留从而增大假体接触面积,减少假体应力分布。手术时切除部分少,有助于尽可能保留侧副韧带,使得关节侧方稳定性增强。更重要的一点,此种设计可减少因假体与骨质之间相互力学作用所导致的骨、假体表面骨降解与吸收,从而解决假体松动问题,延长使用时间。

2 人工手指关节置换术基本应用情况

2.1 人工手指关节置换术手术原则与手术适应证

在医疗水平不断发展的现代社会,各类外伤或者慢性疾病所导致的严重影响手指关节功能的疾病,在其他治疗方式无效的情况下可以采取人工手指关节置换术进行治疗,老年患者、类风湿性关节炎患者及单一关节受累者为该治疗方式的首选人群^[11]。人工手指关节置换术应遵循1969年Flatt和Fischer提出的小关节置换原则^[12]:恢复良好的手指关节运动功能,重建手指关节的稳定性,接近正常手指关节活动要求的假体机械性能,牢固的固定,便于术者操作以及大小合适。另外,由于手指关节假体与手指关节功能的特殊性,在进行人工手指关节置换时,还应注意假体材料的生物友好性、抗张力特性及耐磨损性能,而且对于手指关节软组织的重建应引起重视。

2.2 人工手指关节假体材料及固定

在选择人工手指关节假体材料时首先应注意材料的生物相容性,作为放置于体内的植入体,材料应具有生物友好性,耐受体液的强化学腐蚀,弹性模量接近于手的皮质骨及密度适当。现有人工手指关节假体的材料基本是在借鉴髋膝等大关节假体的材料演变而来,金属材料包括钛和钛合金、钴铬合金,非金属材料包括

硅酮聚合物、超高分子聚乙烯及氧化铝陶瓷。在假体制造中有不同的应用,应根据材料性能进行假体部件不同部分的设计与生产。碳质假体-热解碳作为一种弹性模量与人类皮质骨接近的新型材料,其生物相容性好,具有质量轻、强度高和耐磨损的特性,是比较理想的人工手指关节假体材料^[13]。

作为植入人体的内植入物,假体的固定在人工关节置换手术中亦占有十分重要的地位,非限制性表面置换假体设计本身应具备牢固的自身稳定性。根据髓腔的空间结构,柄的长度、形状及作用于骨面的部位和程度,进行髓内柄的设计,是目前假体固定的最好办法。作为髌髌关节置换手术中常规使用的骨水泥,因聚合热反应对指骨脆性产生影响及导致假体松动,骨水泥尚未在人工指关节假体置换中得到广泛应用。受牙科固定义齿技术的启发,1986年Hargert等^[14]将钛与骨整合的原理应用到掌指关节置换术中,利用钛表面氧化作用实现永久固定的作用。此种固定方式,硅胶假体不与骨直接接触,硅胶假体柄在钛螺丝通道中滑动,因而不会出现进行性骨吸收与破坏。患者可以早期进行手指关节活动,避免手指关节不活动造成僵硬的同时,也实现了假体永久性固定的目标^[15]。

2.3 人工手指关节假体置换术并发症及对策

人工手指关节假体置换术后并发症的发生首先取决于术前软组织情况,其次最重要的就是假体材料的选择及假体的设计。假体使用过程中所产生的磨损颗粒由于其溶骨作用,是大关节假体松动中的主要原因,同样,此类现象在小关节中也会发生。对于完全限制式与半限制式假体而言,其应力集中易导致发生假体折断,而非限制式假体由于其应力分布相对合理,其假体断裂的现象较为少见。此外,硅胶假体及不锈钢假体发生断裂的几率明显高于其他合金假体^[16]。而且,硅胶类假体容易发生颗粒诱导性滑膜炎,患者手指关节局部疼痛、肿胀、僵硬,严重影响患者手指关节功能^[7-8]。随着目前患者对治疗的期望越来越高,提高人工手指关节假体置换的远期效果需要从根本上进行设计理念、制造材料的工艺改良。作为近年来迅速发展的新技术,3D打印技术被视为第3次工业革命的核心技术,其在各行业领域的应用日益广泛,尤其在医疗领域,精确化、个性化的优势使得医学3D打印技术在形态打印、数字手术导航模板、个性化内植入物设计与制造、个性化康复支具等方面的应用发展迅速。对人工手指关节假体而言,精确化的设计匹配及个性化的生产制造,能从根本上改变目前人工手指关节假体存在的问题。

3 3D打印技术在人工手指关节置换中的应用现状及前景

3.1 3D打印优化人工手指关节假体材料的选择

实验研究表明手指在用力捏和握时,掌指关节承受的压力相当于下肢负重大关节平均承受的压力^[16]。中长寿命的手指关节假体在最大负荷下要能承受1万次的屈伸运动,这对于假体制造材料的力学强度、抗疲劳性、抗磨损及抗腐蚀等特性提出了很高的要求。目前,金属3D打印技术已面世并在临床进行了金属3D打印假体的前期实验。裴延军等^[17]利用金属3D打印技术制造出与患者肩胛骨和锁骨完全符合的钛合金个性化假体,并成功植入肿瘤患者体内,效果良好。Dai等^[18]采用金属3D打印技术为骨盆截骨术患者定制个性化半骨盆假体,术后随访效果良好。Xu等^[19]利用金属3D打印技术定制个性化寰枢椎假体,并成功为1名尤文氏肉瘤患儿进行了治疗。以上研究表明:金属3D打印人工假体已经能基本满足人体运动要求,并与传统铸造工艺生产的假体性能相当。在多种满足人工手指关节假体制造的金属材料中,钛合金多孔结构人造骨的研究日益增多。日本京都大学通过钛合金3D打印技术为4位颈椎间盘突出患者制作出不同的人造骨并成功移植^[20]。此外,钴铬合金因其具备良好的生物相容性,由其制备而成的烤瓷牙已成为非贵金属烤瓷牙的首选。选择性激光熔化技术(SLM)制作的合金烤瓷牙真正能够做到“私人订制”。以上材料对于3D打印人工手指关节假体具有良好的参考价值。杨萃等^[21]对骨替代材料聚乳酸(PLA)-2-甲基丙烯酸氧基胆碱新型复合材料(MPC)进行力学性能研究,发现PLA-MPC复合材料较PLA材料具备更加优异的抗压抗弯曲及耐磨损等力学性能。杨永超等^[22]对碳化硅-碳复合材料用于小关节假体的生物力学研究及三维有限元分析,发现碳化硅-碳复合材料改进了传统碳/碳复合材料的不足,在力学性能方面更加符合小关节假体的要求。此外,在生物3D打印技术快速发展的情况下,借助生物材料进行生物3D打印,或者会从根本上颠覆之前的传统观念和认识^[23]。因此,利用3D打印技术可在制备人工手指关节假体时,最优化选择相应打印材料进行个性化人工手指关节假体的打印。

3.2 3D打印技术完善人工手指关节假体的设计与安装

手指关节作为人体解剖复杂性及对运动要求最高的关节,早期的手指关节假体关注的是关节的活动范围及稳定性,今后的设计应致力于如何实现关节功能的重建及提高植入物的骨结合能力。因此在

新的设计中以下3个方面应引起重视^[24]:解剖形态的匹配程度、功能活动的协调程度以及假体材料的生物相容性。在解剖形态学匹配方面,3D打印采用的数据文件是根据患者真实手指关节高精度扫描数字化重建优化处理而获得。许靖等^[25]利用3D打印技术解剖学形态匹配真实受伤手指的优势,在手指再造手术中用以辅助术前手术供区设计。因此,较传统制造工艺而言,3D打印具有解剖学形态高度接近正常人体手指关节解剖形态的优势,解剖形态匹配程度极高有利于人工手指关节的个性化形态设计。此外,手术实施的不恰当也可能会影响关节功能的恢复,好的假体设计要正确安装才可能发挥出最大作用。本团队其他研究人员最新的研究成果显示:借助3D打印,人们得以更简便精确地处理复杂情况下的骨折复位与手术施行^[26-28],同样,利用3D打印技术打印出人工手指关节假体、病变手指关节模型,并进行术前生物力学应力检测以及有限元建模分析,可以术前分析3D打印植入假体的应力分布集中区域,并进行重新优化设计改进假体设计^[29]。在3D打印实物模型上可术前模拟人工手指关节置换手术过程,完善术前规划,在进行手术时可最大限度保留假体受区骨量,并对关节周围软组织进行合理松解与重建,优化重建手指关节功能。在手指小关节置换技术尚未成熟的情况下,3D打印可以提高手术实施质量及手术的精细化操作。

3.3 3D打印人工手指关节假体较传统人工关节假体的优势

传统人工关节的制造,基于大样本人群的统计数据,采用数控机床加工等工业生产手段进行生产,但是目前,我国所采用的人工手指关节多是从国外引进,其制造依据更多的是针对外国人的手指关节情况而进行生产,容易出现假体不匹配而手术不理想的情况,并且由于其技术垄断,此类进口假体的价格也较为昂贵,难以真正满足我国庞大的医疗需求。因此,根据国人的解剖数据建立符合中国国情的人工手指关节,并参考建立可供选择的假体库是目前当务之急^[30]。3D打印人工手指关节的制造原理是基于患者个性化的扫描数据,根据数字化精准设计进行高精度3D打印^[31]。在精准医疗的大环境下,该种方式可最大程度体现针对患者的精准化、个性化治疗。目前,受制于相关医疗政策及技术水平的局限,3D打印人工手指关节的应用还停留在研究阶段,随着3D打印个性化人工手指关节假体制造技术的成熟和全面推广,未来,“私人订制式”的人工手指关节将会逐渐取代传统人工关节,成为人工手指关

节置换技术的主流,并为患者提供更多、更经济的假体选择。我国是世界上手工劳动者最多的国家,每年由于各类外伤、疾病所导致的手指功能活动障碍、缺失的患者众多,其中大量的患者需要进行人工手指关节置换,但是很多患者并未选择该治疗方式,原因包括现有关节置换并发症较多、关节假体远期效果不理想、假体价格昂贵等。可以预见,随着技术的发展与材料改进,人工手指关节假体在我国拥有巨大的发展潜力,而3D打印技术将是实现这一目标的关键。

4 总结

传统的人工手指关节假体经过半个世纪多的发展,对手指关节的解剖研究的深入,以及手指关节生物力学性能研究的不断探索,传统人工手指关节假体的设计、性能也在不断改进,但是目前的人工手指关节假体在临床应用中仍存在某些不足。作为近年来迅速发展的新技术,3D打印技术可以完善人工手指关节假体的设计与安装,优化材料的选择,以及随着其技术的不断成熟与发展将在人工手指关节假体发展中占据越来越重要的地位。并且,由于其个性化、精准化、微创化的优势,术后远期效果改善可期,在将来甚至可能会代替传统人工手指关节成为主流。

【参考文献】

- [1] BURMAN M S. Vitalium cup arthroplasty of metararpalaneal joints of fingers[J]. Bull Joint Dis, 1940, 1: 79-89
- [2] BRANNON E W, KLEIN G. Experiences with a finger-joint prosthesis[J]. Plast Reconstr Surg, 1959, 24(2): 224.
- [3] BRAVO C J, RIZZO M, HORMEL K B, et al. Pyrolytic carbon proximal interphalangeal joint arthroplasty: results with minimum two-year follow-up evaluation[J]. J Hand Surg Am, 2007, 32(1): 1-11.
- [4] SWANSON A B, PELTIER L F. Silicone rubber implants for replacement of arthritic or destroyed joints in the hand[J]. Clin Orthop Relat Res, 1997, 342: 4-10.
- [5] NIEBAUER J J, SHAW J L, DOREN W W. Silicone-dacron hinge prosthesis: design, evaluation, and application[J]. Ann Rheum Dis, 1969, 28(Suppl 5): 56.
- [6] CHIARI C, TRIEB K. Metacarpophalangeal joint arthroplasty in rheumatoid arthritis[J]. J Bone Joint Surg Am, 2004, 86(8): 1832.
- [7] PEIMER C A, MEDIGE J, ECKERT B S, et al. Reactive synovitis after silicone arthroplasty[J]. J Hand Surg Am, 1986, 11(5): 624-638.
- [8] LINSCHIED R L. Implant arthroplasty of the hand: retrospective and prospective considerations[J]. J Hand Surg Am, 2000, 25(5): 796-816.
- [9] TAKIGAWA S, MELETIOU S, SAUERBIER M, et al. Long-term assessment of swans on implant arthroplasty in the proximal interphalangeal joint of the hand[J]. J Hand Surg Am, 2004, 29(5): 785-795.
- [10] LINSCHIED R L, MURRAY P M, VIDAL M A, et al. Development

- of a surface replacement arthroplasty for proximal interphalangeal joints[J]. *J Hand Surg Am*, 1997, 22(2): 286-298.
- [11] KIRSCHENBAUM D, SCHNEIDER L H, ADAMS D C, et al. Arthroplasty of the metacarpophalangeal joints with use of silicone-rubber implants in patients who have rheumatoid arthritis: long-term results[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1993, 75(1): 3-12.
- [12] JIMENEZ-BOJ E, NOEBAUER-HUHMANN I, HANSLIK-SCHNABEL B, et al. Bone erosions and bone marrow edema as defined by magnetic resonance imaging reflect true bone marrow inflammation in rheumatoid arthritis[J]. *Arthritis Rheum*, 2007, 56(4): 1118-1124.
- [13] COOK S D, BECKENBAUGH R D, REDONDO J, et al. Long-term follow-up of pyrolytic carbon metacarpophalangeal implants[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1999, 81(5): 635-648.
- [14] HAGERT C G, BRÄNEMARK P I, ALBREKTSSON T, et al. Metacarpophalangeal joint replacement with osseointegrated endoprostheses[J]. *Scand J Plast Reconstr Surg*, 1986, 20(2): 207-218.
- [15] GOMI T, HIRANO H. Clinical potential of digital linear tomosynthesis imaging of total joint arthroplasty[J]. *J Digit Imaging*, 2008, 21(3): 312-322.
- [16] PARKER W L, RIZZO M, MORAN S L, et al. Preliminary results of nonconstrained pyrolytic carbon arthroplasty for metacarpophalangeal joint arthritis[J]. *J Hand Surg Am*, 2007, 32(10): 1496-1505.
- [17] 裴延军, 吴智钢. 世界首例3D打印钛合金锁骨和肩胛骨植入手术在西京医院成功实施[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2014, 16(5): 10008. PEI Y J, WU Z G. World's first three-dimensional printed titanium alloy clavicle and scapula implant were successfully implanted to one patient in Xijing Hospital[J]. *Chinese Journal of Orthopaedic Trauma*, 2014, 16(5): 10008.
- [18] DAI K R, YAN M N, ZHU Z A, et al. Computer-aided custom-made hemipelvic prosthesis used in extensive pelvic lesions [J]. *J Arthroplasty*, 2007, 22(7): 981-986.
- [19] XU N F, WEI F, LIU X G, et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma[J]. *Spine*, 2016, 41(1): E50-E54.
- [20] MULLEN L, STAMP R C, FOX P, et al. Selective laser melting: a unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications[J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2010, 92(1): 178-188.
- [21] 杨萃, 王玉光, 杨永超, 等. 小关节假体新型聚乳酸复合材料力学性能研究[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2016, 10(1): 55-60. YANG C, WANG Y G, YANG Y C, et al. Mechanical properties research of PLA-MPC composite for joint prosthesis[J]. *Chinese Journal of Joint Surgery (Electronic Version)*, 2016, 10(1): 55-60.
- [22] 杨永超, 谈清, 杨萃, 等. 碳化硅-碳复合材料用于小关节假体: 生物力学研究及三维有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(16): 2333-2339. YANG Y C, TAN Q, YANG C, et al. Silicon carbide- carbon composites for small joint prosthesis: a three- dimensional finite element model for biomechanical study [J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2016, 20(16): 2333-2339.
- [23] TAYLOR E J, DESARI K, DARCY J C, et al. A comparison of fusion, trapeziectomy and silastic replacement for the treatment of osteoarthritis of the trapeziometacarpal joint[J]. *J Hand Surg Br*, 2005, 30(1): 45-49.
- [24] 谭海涛, 赵劲民, 黄文华. 3D骨科学[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2016: 539-540. TAN H T, ZHAO J M, HUANG W H. Three-dimensional orthopaedics [M]. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishing House, 2016: 539-540.
- [25] 许靖, 张国栋, 谭海涛, 等. 数字化设计结合3D打印技术在拇指再造中的应用[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 33(5): 541-544. XU J, ZHANG G D, TAN H T, et al. The application of digital design combined with 3D printing technology in thumb reconstruction[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2015, 33(5): 541-544.
- [26] 黄华军, 张国栋, 欧阳汉斌, 等. 基于3D打印技术的复杂胫骨平台骨折内固定手术数字化设计[J]. *南方医科大学学报*, 2015, 35(2): 218-222. HUANG H J, ZHANG G D, OUYANG H B, et al. Internal fixation surgery planning for complex tibial plateau fracture based on digital design and 3D printing[J]. *Journal of Southern Medical University*, 2015, 35(2): 218-222.
- [27] 吴章林, 林海滨, 张国栋, 等. 3D打印应用于髌白骨折数字化设计的实验研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2014, 32(3): 248-251. WU Z L, LIN H B, ZHANG G D, et al. The application of 3D printing technique in the research of acetabular fractures[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2014, 32(3): 248-251.
- [28] 严斌, 张国栋, 吴章林, 等. 3D打印导航模块辅助腰椎椎弓根螺钉精确植入的实验研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2014, 32(3): 252-255. YAN B, ZHANG G D, WU Z L, et al. Experimental study on accurate placement of the lumbar pedicle screws assisted by 3D printing navigation module[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2014, 32(3): 252-255.
- [29] 连岑, 庄佩, 边卫国, 等. 大尺寸关节支架的3D打印及应用[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(2): 248-258. LIAN C, ZHUANG P, BIAN W G, et al. 3D printing of large size joint holders and its applications[J]. *Science China: Information Science*, 2015, 45(2): 248-258.
- [30] 杨洋, 张国栋, 陈宣煌, 等. 基于薄层CT数据的胫骨近端接骨板标准件库的建立及意义[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 33(3): 291-294. YANG Y, ZHANG G D, CHEN X H, et al. The establishment and significance of standard parts library of proximal tibia plates based on thin-section CT image[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2015, 33(3): 291-294.
- [31] 张宇航, 祖罡. 3D打印技术在人工关节假体方面的应用与进展[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2016, 31(2): 223-224. ZHANG Y H, ZU G. The applications and progress of three-dimensional printing technology in artificial joint prosthesis [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Injury*, 2016, 31(2): 223-224.

(编辑:黄开颜)