

3D打印在假肢矫形器领域中的应用与发展

胡航帆¹ 周 娅¹ 陈茉弦¹ 刘 巍¹ 石田真¹ 敖丽娟^{1,2}

3D打印技术是以电脑辅助设计的三维数据为基础,将材料通过喷头一层一层堆叠起来形成实体结构的制造方法,故此也称之为增材制造技术^[3]。3D打印技术从诞生到现在已经经历了30多年,得益于近年来相关核心技术的专利保护陆续解除^[4],这项技术才逐渐引起了人们的关注。在临床医学及口腔医学领域,3D打印技术在手术器械与人体内植入物方面的发展尤为迅速^[5],在生物工程领域例如皮肤、软骨、骨等组织的打印制造已经成为医学领域中3D打印技术发展应用的热点^[6-7],而在假肢与矫形器领域,3D打印技术有潜力在常见的假肢、矫形器与其他辅具的结构和制造上提出独特的解决方案。

1 3D打印在假肢领域的应用

1.1 下肢假肢

在传统的假肢制作工艺中,一个人的残肢的独特形状是需要类似于石膏等材料通过手工制作出来的^[8]。在传统制作工艺所制作的假肢的使用过程中,95%的截肢患者有时候会感觉不适^[9]。所以假肢领域的研究人员正在评估3D打印技术会如何改进假肢的制作工艺。

我国在3D打印下肢假肢的尝试开始于2013年,最早的探索是从给下肢畸形的鸭子制作3D打印的下肢假肢开始的^[10]。而早在2005年Herbert等^[9]在研究中就使用了3D打印技术制作了假肢接受腔,在这项研究中作者详细的描述了他们是如何针对同时经胫骨截肢和腓骨截肢的患者制作一个3D打印接受腔的过程。该项研究强调制作3D打印接受腔是需要对残肢进行3D扫描,这有助于将受试者肢体三维重建数据储存下来以跟踪受试者的身体结构的变化。同时也可以与其他受试者的数据相比较。而在传统制作过程中,制作完假肢后所取得石膏阳模只能被丢弃无法重新使用,如果需要进行更改或者重做时,只能按照传统工艺流程从头开始。Hsu等^[11]开发了一款用树脂材料制作的3D打印假肢接受腔,并且通过步态分析测试压力数据时,发现它与标准接受腔的表现很相似。而Sengeh等^[12]使用了更先进的打印技术来制造多种材料复合的假肢接受腔,这些假肢接受腔可以

减少残肢端骨突部位的接触压力,同时提升了受试者使用假肢以后的步行速度。除了制作假肢接受腔以外,Fey等^[13]在他们的研究中使用3D打印技术制作在不同平面上有不同龙骨和足跟刚度的足部假肢,并研究了这些变化在步态上有怎样的生物力学上的改变。通过对比正常步态和12个受试者发现改变足跟的刚度提升了支撑相中期势能的储存以及支撑相末期势能的释放,并且这样的改变在统计学上是显著的。

1.2 上肢假肢

在上肢假肢的研究领域中,3D打印技术的应用相比较下肢假肢的发展显得更为迅速。我国在2016年已经有第一例应用了3D打印制作的上肢假肢的临床病例报告^[14]。而这样使用3D打印部件拼接而成的功能性假手,可以通过屈伸腕关节来实现手部抓握。这样的假手虽然不像商业上产品那样的高科技,但是对于因为成本问题无法使用最先进假肢的截肢患者而言,3D打印的功能性假手可能会改变他们的一生。现在美国很多的公益性组织致力于在网上提供开源的3D设计假手的源文件。Gretsch等^[15]的一项研究中展示了他们所开发的可以改进功能性假手的一种独立装置的过程。具体来说作者发现功能性假手需要通过屈腕来提供手指的抓握力量但是只能是全部手指握紧,而他们的设计是通过肩部驱动针对于没有腕关节屈伸功能的患者实现单个手指的屈曲。虽然这项案例研究缺乏对该设计的临床对照试验,但是这不失为一个好的想法和开端。在这项研究中有一位受试者是个13岁的小女孩,作者强调他们的设计可以很容易的进行调整以适应受试者残肢快速的生长。对于需要假肢的儿童能够适应残肢的快速生长,或者轻易的替换掉一个损坏的假肢配件这就突出了3D打印技术在儿童康复过程中的经济优势。Zuniga等^[16]在一个案例研究中描述了一个低成本肩前臂假肢的制作过程。在临床上高水平截肢者可供选择的假肢多数是有限而且昂贵的,这项研究给予了他们更多选择和可能,并且在受试者身上还发现应用了假肢以后还阻止了脊柱向健侧弯曲的趋势。Zuniga等^[17]的另一项研究发现,在早期24周的时候使用低成本3D打印假手进行过度,显著改善了先天性或者后天上肢缺如和截肢的患儿的手

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.02.024

1 昆明医科大学,云南省昆明市,650500; 2 通讯作者

第一作者简介:胡航帆,男,硕士研究生,初级康复治疗师; 收稿日期:2018-05-28

部总灵活性。Tanaka等^[18]的一项研究中针对儿童上肢假肢的研究提出,儿童处于生长发育的快速期残肢端的尺寸也随之发生飞速变化,而应用3D打印技术提供低成本可替换的假肢无疑相比较传统方法更具有优势。Jones等^[19]致力于使用3D打印技术制作无传感器的电动假手,在他的一项研究中研制了一种可以实现手指关节操控的开关有限状态机(COFSM),为了实现特定抓握创建了3个扭矩和速度的控制器,这个电动假手可以实现10种常见的抓握,并可以抓住一些常见物体。Lee等^[20]的一项对照研究中对使用压力传感器的3D打印上肢假肢和传统上肢肌电假肢在经桡骨截肢的患者身上发现虽然相比较传统肌电假肢,使用压力传感器的3D打印假肢握力较低,灵敏度也较低,但是制造成本显著下降。Lee等^[21]的另一项病例报告中使用了3D打印技术简单的制作了一个手套样拇指假体,为一个拇指外伤截肢的患者恢复了对指的功能。同年Portnova等^[22]的一项研究中,制作了一款针对脊髓损伤患者使他可以实现抓握和书写的手部假肢,在恢复以往功能的同时还具有降低手部痉挛的功能。

1.3 假耳

在传统的上肢和下肢假肢的领域以外,五官和头面部的假体也随着3D打印技术的发展而兴起。在2017年马来西亚的研究人员B Jamayet N^[23]和他的同事就研究了使用3D打印技术制作头面部修复假体这一崭新的技术,并且初步评估这一技术是相对容易而且廉价的,患者对于所达到的美学效果也是满意的。同年,台湾Chen等^[24]应用3D扫描进行镜像重建,使用3D打印制作耳廓支架,来纠正单侧的小耳畸形。同样在2017年印度的研究人员Yadav^[25]通过一个临床病例报告详细的阐述了使用CT扫描,CAD等技术构建3D打印的假耳这一过程。在2017年Unkovskiy^[26]和他的团队就不同的增材制造技术进行了对比,认为熔融材料堆积技术(FDM)在制作假耳的过程中,具有较高的尺寸精度和最佳的皮肤触感,但是3D数据的采集,和CAD的后处理相比较成型技术更加重要。而在2018年Unkovskiy等^[27]就针对同一个患者使用包含3D打印技术和传统制造工艺制作不同的假耳来对比在美学上的差异,发现使用3D打印技术制作的假耳在美学效果上要更加优秀。

2 3D打印在矫形器领域的应用

2.1 踝足矫形器(AFO)

在假肢矫形器领域中,最常见的踝足矫形器的制作方法是使用石膏制作一个踝足的阳模,然后再使用高温热塑板材或者具有热固性的玻璃纤维与树脂覆盖在石膏阳模上,随后通过真空成型法形成一个踝足矫形器的雏形^[8]。在热固性材料降温固化以后,去除多余的部分并且进行抛光和去毛刺,在关键位置加上垫片以及相关固定装置(例如尼龙搭扣),最

后完成整个踝足矫形器的制作。然而这样还并不是一个成熟的矫形器,还需要花费更长的时间,在患者身上进行适配并再做修改,这一过程最多需要花费1—2周的时间。而3D打印技术的应用可以简化制作过程中繁琐的步骤,并减少制作矫形器的时间成本。

Faustini等^[28]通过粉床融合在制作一个静态AFO的过程中比较了三种3D打印材料的生物力学特性。作者指出静态的踝足矫形器的设计依赖于所使用材料的材料特性、组件的厚薄程度、AFO的形状、并以此形成AFO的弯曲与转动的刚度特性来调节机械能的储存与释放,通过在步行的支撑阶段对于踝关节的不同程度的支撑,实现流畅高效的步行。Mavroidis等^[29]在制作AFO的过程中使用了两种不同的3D打印材料,并且在一个正常被试者身上进行了步态分析的比较。结果显示通过3D打印技术所制作的AFO与市面上同类产品性能上相类似。Schrack等^[30]开发了一个全新的架构来制作静态AFO,并且验证了这个架构所获得的尺寸精度是在可以接受的误差范围内。尽管上述研究都是在现有的矫形器设计基础上研究3D打印材料与制作过程,但是还有一些研究在探究使用3D打印技术进行新型矫形器的开发。Telfer等^[31]研发了一款可调刚度的AFO,这种AFO可以根据不同活动需求进行相应的调整。例如将AFO的刚度增加来适应平面上的行走,或者是减少刚度以方便上下楼梯。Harper等^[32]应用3D打印技术来发现AFO的刚度与步态参数之间的相关性。通过使用3D打印技术对13例被试者提供两种不同刚度的AFO,一种有80%的常规刚度、一种有120%的常规刚度、然后通过步态分析做对比,发现刚度并没有对步态产生明显的影响。刘震等^[33]通过临床研究来探索3D打印技术制作AFO在临床上应用的可行性,通过一个真实病例说明了使用3D打印制作一个静态AFO在临床上是可行的,并且相比较传统制作流程,成本要更加低廉。在三星医学中心,Cha等^[34]为AFO的3D打印制作流程提出了新的可能,他们开发了一款针对AFO的自动设计软件,只需要将扫描过后的文件加载到这一款软件中便可以导出成熟的可以直接用于打印的“STL”文件,并且进行了初步的临床验证,患者均表示满意。上述研究都表明了3D打印技术在踝足矫形器的制作中无论是在减少成本、缩短制作时间、简化适配过程、提升用户体验上都具有积极的一面。然而Roberts等^[35]所开展的一项随机对照试验中,对比了使用激光扫描进行3D打印和传统工艺制作AFO的差异,发现两种方法所制作的AFO在疗效上和时间成本上没有显著性差异。并且在2018年Desery等^[36]在对比手动测量以及使用低成本3D扫描仪和使用低成本3D扫描仪来进行AFO的制作时,发现3D扫描仪确实是可以提供更多的信息,但是可靠性取决于3D扫描仪的本身,也就是它扫描的精度。这也就说明3D打印

出来的产品会受到外在因素的干扰和限制,使用不好的扫描仪可能会增加制作过程中的时间成本,也可能因为扫描的不精确使得打印出来的矫形器疗效下降。

2.2 足矫形器(FO)

2013年,Telfer等^[37]的一项研究中对每一个被试者在使用9个后足距离不断增加的FO的过程中,进行步态分析对比,发现了FO后足距离与步态分析中生物力学数据之间的相关性。在2014年Telfer等^[38]使用3D打印技术制作了一款新的具有内置温度传感器的FO,可以通过温度传感器跟踪步行活动周期。在2017年Telfer等^[39]的另一项研究中使用数值模拟的虚拟仿真技术将足部的生物力学特征客观地整合到矫形鞋垫的设计中,选取了20例糖尿病高危足被试者,通过进行对照研究发现将虚拟优化整合到鞋垫的设计中,与以往基于形状的设计相比明显改善了足部受力的卸载功能。早在2010年Pallari等^[40]就探究了为类风湿性关节炎患者进行大规模定制FO的可行性。大规模定制就意味着低成本的同时高度个性化。在这项研究中Pallari等人对传统的FO与3D打印制作的FO在步态参数进行了评价,然而结果在统计学上并没有差异。Salles等^[41]将3D打印的FO与传统FO置于跑步者身上作比较,通过在3个月的步态分析发现当穿着3D打印的FO时,受试者在足背屈、最大足外翻,以及在足跟下平均峰值压力都有明显的数值减小,这将会显著降低跑步者受伤的风险。

2.3 上肢矫形器(ULO)

相比较下肢矫形器而言,上肢矫形器并不多涉及承重功能,并且上肢矫形器个性化程度要高于下肢矫形器,所以3D打印技术在上肢矫形器领域的应用与发展要快于下肢。Paterson等^[42]针对上肢矫形器领域专门开发了一款CAD软件。该软件帮助那些不熟悉CAD的假肢矫形器师能够自己设计和打印个性化的上肢矫形器,降低了这一领域进入的门槛。这一研究主要注重于3D打印技术如何改变整个矫形器制作的工作流程,以及帮助提高工作效率,这项研究并没有为现状提供强有力的建议,而是探索了未来研究的领域。而在国内也有同类型的研究,2017年天津大学的侯贺^[43]从扫描到成型提出了一套基于3D扫描和3D打印的医用外固定支具快速生成系统,简化整个外固定支具的设计流程,让临床医生更容易使用,避免在复杂的专业CAD软件上投入过多精力。Paterson等^[44]的另一项研究比较了四种不同的3D打印成型的方法在制作上肢矫形器上的优缺点。结果显示采用选择性激光烧结技术(SLS)、立体光刻技术(SLA)和喷墨式光固化成型技术在目前的临床应用是可行的,而熔融材料堆积技术(FDM)由于制作出来表面质量仍需改善,所以并不建议用于临床。Paterson指出下一个阶段就是进行临床试验去评估最终应用到患者身上的矫形器。可以推测的是,3D打印的

矫形器比现有方法制造的矫形器更加容易使用,同时也更美观,更容易被患者接受,并且镂空的设计可以极大地提升透气性^[42]。针对这一点在2018年廖政文等^[45-46]已经将3D打印矫形器投入临床试验进行舒适度评估,选取30例被试者通过与传统手工矫形器相比较,使用魁北克辅助科技满意度调查表进行评估发现两者之间存在统计学上的显著差异,说明通过3D打印制作的矫形器舒适度要优于传统手工矫形器。针对手部痉挛或者畸形的患者进行3D扫描不便这一问题,Bronio等^[47]制作了一款扫描支架可以将患手固定到需要的位置,便于进行3D扫描。在2017年Abreu de Souza等^[48]通过对两个病例的研究提出了尽管在大多数情况下使用3D打印技术和3D建模是可以成功改善医疗效果的,但是调查以后发现只有14%的研究支持这样的说法,大多数对于可以改善医疗效果的认知是主观的。因此需要更多关于3D打印制作的矫形器的功效评估和耐用性分析,Abreu de Souza等同时也提出了一种方法,这种方法能够通过技术评估对比针对同一问题的不同矫形器的设计与制造风格,并且提出了通过创建共享端口,实现在网上快速免费的下载各种上肢矫形器的3D设计,通过进行简单的数据测量就可以完成定制。使用可拆卸,可清洗,可生物降解的材料制作,简化以往复杂的制作过程,使之更快速更便捷。

3 小结

3D打印技术作为一项崭新的制造技术,虽然在假肢矫形器领域的应用相比较骨科与口腔方面起步较晚,但是3D打印技术的应用所呈现的不管是廉价化,定制化,还是缩短制造的时间成本都预示着3D打印技术在假肢矫形器领域极大的应用前景。并且随着3D打印技术带来的制作产品的精细化,在假体/假肢制作的领域里,已经向头面部假体这一领域发展,甚至于制作听骨链假体用以恢复听力,只不过受限于材料而暂时无法实现^[49]。但是,有明确的随机对照试验证明相比较传统工艺,3D打印技术的产品并没有在质量和时间成本上有所改善,2018年一份系统综述也证明了在上肢假肢领域,缺乏针对3D打印假肢的严格的有效性评价^[2]。而且在上肢假肢领域,3D打印的个性化定制潜力并没有完全实现^[2]。在2017年针对3D打印技术在脊柱外科领域的一份系统评价阐述了大多数证明3D打印对于现在状况有所改善的证据多来源于低质量的文献,存在因为新技术所带来的内在偏见^[50]。这一问题不仅仅停留在脊柱外科领域,假肢矫形器领域同样存在。相比较3D打印的成型技术对于现实状况的改变而言,3D扫描技术和后续的CAD设计对于产品效果的影响更加巨大^[26]。

参考文献

- [1] 彭齐峰,廖文波. 3D打印技术在康复工程中的应用[J]. 按摩与

- 康复医学, 2018, 9(6): 3—5.
- [2] Diment LE, Thompson MS, Bergmann JH. Three-dimensional printed upper-limb prostheses lack randomised controlled trials: A systematic review[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2018, 42(1): 7—13.
- [3] 杨继全, 徐李, 朱李. 3D 打印产业及技术发展趋势概述[J]. *机械设计与制造工程*, 2016, 45(3): 11—16.
- [4] Liaw CY, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine[J]. *Biofabrication*, 2017, 9(2): 024102.
- [5] Tack P, Victor J, Gemmel P, et al. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review[J]. *Biomed Eng Online*, 2016, 15(1): 115.
- [6] Campbell S. Engineering Tissues to Heal Themselves: Bioinks and Tendon Scaffolds Show Promise for Helping the Body Recover from Musculoskeletal Injury[J]. *IEEE Pulse*, 2017, 8(3): 19—24.
- [7] Vega SL, Kwon MY, Burdick JA. Recent advances in hydrogels for cartilage tissue engineering[J]. *Eur Cell Mater*, 2017, 33: 59—75.
- [8] 肖晓鸿, 李尚发, 杨梅, 等. 假肢与矫形器技术[M]. 复旦大学出版社, 2006: 492.
- [9] Herbert N, Simpson D, Spence WD, et al. A preliminary investigation into the development of 3-D printing of prosthetic sockets[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2005, 42(2): 141—146.
- [10] 3D 打印制作假肢助左脚畸形小鸭正常行走[J]. *工业设计*, 2013, (4): 41.
- [11] Hsu LH, Huang GF, Lu CT, et al. The development of a rapid prototyping prosthetic socket coated with a resin layer for transtibial amputees[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2010, 34(1): 37—45.
- [12] Sengeh DM, Herr HA. A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data[J]. *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2013, 25(3): 129—137.
- [13] Fey NP, Klute GK, Neptune RR. The influence of energy storage and return foot stiffness on walking mechanics and muscle activity in below-knee amputees[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2011, 26(10): 1025—1032.
- [14] 徐贵升, 徐猛贤, 区国集, 等. 中国首例3D打印假肢临床报告[J]. *中国矫形外科杂志*, 2016, 24(8): 766—768.
- [15] Gretsck KF, Lather HD, Peddada KV, et al. Development of novel 3D-printed robotic prosthetic for transradial amputees[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2016, 40(3): 400—403.
- [16] Zuniga JM, Carson AM, Peck JM, et al. The development of a low-cost three-dimensional printed shoulder, arm, and hand prostheses for children[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2017, 41(2): 205—209.
- [17] Zuniga JM, Peck JL, Srivastava R, et al. Functional changes through the usage of 3D-printed transitional prostheses in children[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2017, 14(1): 68—74.
- [18] Tanaka KS, Lightdale-Miric N. Advances in 3D-Printed Pediatric Prostheses for Upper Extremity Differences[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2016, 98(15): 1320—1326.
- [19] Jones GK, Rosendo A, Stopforth R. Prosthetic design directives: Low-cost hands within reach[J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2017, 2017: 1524—1530.
- [20] Lee KH, Bin H, Kim K, et al. Hand Functions of Myoelectric and 3D-Printed Pressure-Sensored Prosthetics: A Comparative Study[J]. *Ann Rehabil Med*, 2017, 41(5): 875—880.
- [21] Lee KH, Kim SJ, Cha YH, et al. Three-dimensional printed prosthesis demonstrates functional improvement in a patient with an amputated thumb: A technical note[J]. *Prosthet Orthot Int*, 2018, 42(1): 107—111.
- [22] Portnova AA, Mukherjee G, Peters KM, et al. Design of a 3D-printed, open-source wrist-driven orthosis for individuals with spinal cord injury[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(2): e0193106.
- [23] B Jamayet N, J Abdulah Y, A Rajion Z, et al. New Approach to 3D Printing of Facial Prostheses Using Combination of Open Source Software and Conventional Techniques: A Case Report[J]. *Bull Tokyo Dent Coll*, 2017, 58(2): 117—124.
- [24] Chen HY, Ng LS, Chang CS, et al. Pursuing Mirror Image Reconstruction in Unilateral Microtia: Customizing Auricular Framework by Application of Three-Dimensional Imaging and Three-Dimensional Printing[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2017, 139(6): 1433—1443.
- [25] Yadav S, Narayan AI, Choudhry A, et al. CAD/CAM-Assisted Auricular Prosthesis Fabrication for a Quick, Precise, and More Retentive Outcome: A Clinical Report[J]. *J Prosthodont*, 2017, 26(7): 616—621.
- [26] Unkovskiy A, Spintzyk S, Axmann D, et al. Additive Manufacturing: A Comparative Analysis of Dimensional Accuracy and Skin Texture Reproduction of Auricular Prostheses Replicas[J]. *J Prosthodont*, 2017, 28: e460—e468.
- [27] Unkovskiy A, Bron J, Huetig F, et al. Auricular Prostheses Produced by Means of Conventional and Digital Workflows: A Clinical Report on Esthetic Outcomes[J]. *Int J Prosthodont*, 2018, 31(31): 63—66.
- [28] Faustini MC, Neptune RR, Crawford RH, et al. Manufacture of Passive Dynamic ankle-foot orthoses using selective laser sintering[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2008, 55(2 Pt

- 1): 784—790.
- [29] Mavroidis C, Ranky RG, Sivak ML, et al. Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping[J]. J Neuroeng Rehabil, 2011, 8: 1.
- [30] Schrank ES, Stanhope SJ. Dimensional accuracy of ankle-foot orthoses constructed by rapid customization and manufacturing framework[J]. J Rehabil Res Dev, 2011, 48(1): 31—42.
- [31] Telfer S, Pallari J, Munguia J, et al. Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2012, 13: 84.
- [32] Harper NG, Esposito ER, Wilken JM, et al. The influence of ankle-foot orthosis stiffness on walking performance in individuals with lower-limb impairments[J]. Clin Biomech, 2014, 29(8): 877—884.
- [33] 刘震, 张盘德, 容小川, 等. 脑卒中踝足矫形器的 3D 打印研究[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(8): 874—878.
- [34] Cha YH, Lee KH, Ryu HJ, et al. Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software[J]. Appl Bionics Biomech, 2017, 2017: 9610468.
- [35] Roberts A, Wates J, Smith H, et al. A randomised controlled trial of laser scanning and casting for the construction of ankle-foot orthoses[J]. Prosthet Orthot Int, 2016, 40(2): 253—261.
- [36] Dessery Y, Pallari J. Measurements agreement between low-cost and high-level handheld 3D scanners to scan the knee for designing a 3D printed knee brace[J]. PLoS One, 2018, 13(1): e0190585.
- [37] Telfer S, Abbott M, Steultjens MP, et al. Dose-response effects of customised foot orthoses on lower limb kinematics and kinetics in pronated foot type[J]. J Biomech, 2013, 46(9): 1489—1495.
- [38] Telfer S, Munquia J, Pallari J, et al. Personalized foot orthoses with embedded temperature sensing: Proof of concept and relationship with activity[J]. Med Eng Phys, 2014, 36(1): 9—15.
- [39] Telfer S, Woodburn J, Collier A, et al. Virtually optimized insoles for offloading the diabetic foot: A randomized crossover study[J]. J Biomech, 2017, 60: 157—161.
- [40] Pallari JH, Dalgarno KW, Woodburn J. Mass customization of foot orthoses for rheumatoid arthritis using selective laser sintering[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2010, 57(7): 1750—1756.
- [41] Salles AS, Gyi DE. The specification of personalised insoles using additive manufacturing[J]. Work, 2012, 41: 1771—1774.
- [42] Paterson AM, et al. Computer-aided design to support fabrication of wrist splints using 3D printing: A feasibility study[J]. Hand Therapy, 2014, 19(4): 102—113.
- [43] 侯贺. 个性化医用外固定支具快速成型系统研究[D]. 天津大学, 2017.
- [44] Megan PA, Bibb R, Campbell RI, et al. Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(3): 230—243.
- [45] 廖政文. 基于解剖形态学的 3D 打印四肢康复矫形器的数字化设计制作[D]. 广西医科大学, 2018.
- [46] 廖政文, 莫诒向, 张国栋, 等. 3D 打印个性化康复矫形器的设计制作[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(04): 470—477.
- [47] Baronio G, Volonghi P, Signoroni A. Concept and Design of a 3D Printed Support to Assist Hand Scanning for the Realization of Customized Orthosis[J]. Appl Bionics Biomech, 2017, 2017: 8171520.
- [48] Abreu de Souza M, Schmitz C, Marega Pinhel M, et al. Proposal of custom made wrist orthoses based on 3D modeling and 3D printing[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2017, 2017: 3789—3792.
- [49] Kamrava B, Gerstenhaber JA, Amin M, et al. Preliminary Model for the Design of a Custom Middle Ear Prosthesis[J]. Otol Neurotol, 2017, 38(6): 839—845.
- [50] Wilcox B, Mobbs RJ, Wu AM, et al. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play[J]. J Spine Surg, 2017, 3(3): 433—443.