

· 综 述 ·

3D 打印个性化矫形器制作技术进展[△]

阮贝特, 颜威, 马泓泓, 奚小冰*

(上海交通大学医学院附属瑞金医院, 上海 200001)

摘要: 逆向工程 (reverse engineering, RE) 是个性化矫形器制作的重要部分, 根据测量数据重构患处 3D 模型, 通过计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 方法设计矫形器, 再利用快速成型技术 (rapid prototyping, RP) 制作。3D 打印个性化外固定矫形器目前是“医工”交叉学科研究的热门领域, 具有高贴合度、轻便透气、定制结构等优点, 有助于功能恢复。近年来, 对于个性化矫形器制造流程的效率、成本及舒适度的研究逐年增加, 本文侧重于 RE 方法, 按照制造流程从光学扫描、CAD 建模、镂空最后到 3D 打印成型的相关技术优化研究进展进行概述。

关键词: 逆向工程, 3D 打印, 支具, 矫形器, 快速成型

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 02-0162-05

Development of 3D printing personalized orthoses manufacturing technology // RUAN Bei-te, YAN Wei, MA Hong-hong, XI Xiao-bing. Ruijin Hospital, School of Medicine, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200001, China

Abstract: Reverse engineering (RE) is an important part of the manufacturing of personalized orthoses, which including reconstructing 3D model of the involved area according to the measured data, the orthoses are designed by computer aided design (CAD) method, and then made by rapid prototyping technology (RP). The 3D printing personalized orthoses are currently popular interdisciplinary research in ‘medical-engineering’, which with advantages of suitable, light weight, customized structure can be helpful for functional recovery. In recent years, in order to accelerate the application, the research on the efficiency, cost and comfort of personalized orthoses manufacturing has been increasing year by year. Therefore, this article focuses on the RE method, and summarizes the research on related technology improvement of manufacturing process from optical scanning, CAD modeling, hollow-carved design to RP.

Key words: reverse engineering, 3D printing, splint, orthoses, rapid prototyping

在急性骨折及损伤临床领域, 矫形器的改进始终是最首要和最具有学科交叉活跃度的, 根据美国矫形与修复学会的数据, 使用矫形器的人数预计将至少增加 31%^[1]。目前对于 3D 打印矫形器的综述往往停留于讨论快速成型技术 (rapid prototyping, RP) 的应用, 而忽略了 RP 技术前重要且必要的模型制作阶段。逆向工程 (reverse engineering, RE) 是指用一定的测量手段对实物或模型进行测量, 根据测量数据通过三维几何建模方法重构实物的计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 模型的过程。这种手段近年来广泛用于医学领域, 尤其是骨重建假体置入、手术工具、医疗培训等方面^[2]。本文将立足于从 RE

技术到 RP 技术的制造顺序, 对近年来国内外的 3D 打印矫形器文献中制作技术研究的进展进行综述。

1 个性化矫形器制作过程

基于逆向工程的外固定矫形器一般由光学扫描、CAD 建模、二次设计、3D 快速成型 4 个步骤组成。这种 3D 打印的矫形器具有定制化、个性化、信息化的特点, 因模型完全取自于被扫描者, 并通过搜集的个体数据进行力学结构调整。苏晨等^[3]综合评价后认为强度、透气性、轻量化以及贴合度等因素在用户间具有较高的权重, 因此, 个性化定制矫形器的研究

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.02.12

△基金项目: 上海申康发展中心促进市级医院临床技能与临床创新能力三年行动计划项目 (2020-2022 年) (编号: SHDC2020CR3016A); 上海市卫生健康委员会中医药科研项目 (编号: 2020 LZ008); 上海市青年科技英才扬帆计划项目 (编号: 20YF1427400); 上海市临床重点专科建设项目 (编号: SHSLCZDZK04802); 海派中医流派传承创新团队建设项目 (编号: 2021LPTD-003)

作者简介: 阮贝特, 硕士研究生, 研究方向: 中医外固定技术的现代化研究, (电话) 18846924631, (电子信箱) ruanbeite@126.com

***通信作者:** 奚小冰, (电话) 13061728031, (电子信箱) skxiaobing@163.com

在临床领域具有较好的前景。

2 光学扫描技术的进展

非接触式测量法进行 RE 数据采集目前是主流, 如 CT 重建、手持扫描仪、箱式扫描仪, 以及更为便携的扫描配件等。目前大部分研究者采用手持式 3D 扫描仪来即时获得患肢表面点云信息^[4,5], 王勉等^[6]指出经测试扫描获得的桡骨远端三维重建模型精度偏差值可以用于精准重建, 三维重建的精度可以指导 3D 打印矫形器的制造和临床应用需求^[7,8]。该方法相较于传统 CT 重建更为快速、伤害性小^[9], 无接触体表光学扫描可较好避免患者信息伦理问题, 但对扫描人员的技术、周边环境与光照条件有较高要求, 同时 3D 扫描仪产品众多且良莠不齐, 导致数据精度不一, 不能很好地进行统一的统计分析。

为解决以上问题, Lazzeri 等^[10]在收集数据时采用 8 台英特尔光学环形相机组成箱式扫描系统, 相较于手持扫描仪存在的患者手部抖动与医务人员专业性不足的问题, 能更快速精确地得到模型。考虑到箱式扫描的价格昂贵, 扫描时间较长, Dombroski 等^[11]尝试使用微软 kinect 扫描仪去获得手部信息, 鲁德志等^[12]使用便携式 ipad 扫描仪 Structure Sensor, 以上扫描过程为 5~8 min^[13], 两者均基于红外线深度传感, 与传统扫描仪对比误差不大, 成本及使用条件较低, 可更利于 RE 方法的推广。目前来说, 在医院内使用手持扫描仪快速取得表面数据仍是首选, 同时因为患肢维度会随时间变化, 能否快速及时准确取得数据仍是主要研究方向, 但进行研究需求的条件较高, 因此对此方面的研究者较少, 更多的是选择采取现成的扫描方案。

3 CAD 建模技术的进展

得到患肢表面数据后, 存在许多破损和粗糙部分, 需依靠 CAD 方法进行修复工作, 得到贴合患肢的光滑矫形器模型。如何选择最合适的 3D 处理和建模工具取决于很多因素。通过对现有文献的分析, 有两种方法: (1) 大部分研究者可以遵循传统工业的 RE 方法, 使用相对较复杂且获取较昂贵的通用 CAD 建模软件对矫形器进行设计和后期处理, 如 Geomagic、Rhinoceros 等软件^[14, 15]; (2) 可以为 3D 打印矫形器专门开发特定的 CAD 应用软件^[16], 优点是可对不同操作人群和应用场合进行适应, 如适用于医务

人员的矫形器制作系统。Li 等^[17]使用基于 grasshopper 软件的可编程建模系统, 提出可以在几小时内完成建模到打印的过程, 大大缩短了患者等待的时间, 同时可再编程的系统留给了工程师更多的自动化空间。半预制模型目前也有研究者尝试, Marzola 等^[18]利用 SSM 统计学模型, 通过预先设计好的模型, 根据患者扫描信息, 在程序内进行一定微调来达到合适的模型以期提高建模速度。邹诚实等^[19]使用外固定矫形器预编程设计模板来制作下肢矫形器, 依据患者下肢体表特征点快速建模, 同时评估医务人员能否适应非专业的模具制造流程, 来减少信息在工程师与医务人员之间传递的时间, 达到院内制造下肢 3D 矫形器的结果。初步结果显示, 较为可行, 但存在样本量较小的问题。Servi 等^[20]构建了一种集成建模系统, 名为 Oplà, 此系统可完全在院内情况下完成 3D 矫形器的制作过程, 但仍然需要 24~28 h, 且该期间需要传统石膏临时固定。无论是集成扫描、控制、建模或是利用预制模型根据患者特征点快速生成矫形器的系统, 其目的是加速逆向工程建模这一过程, 同时简化软件操作, 更好地降低成本, 方便非专业人员使用, 利于临床推广。

4 二次设计技术的进展

完成矫形器基础建模后, 进入到二次设计阶段, 形成进一步定制模型, 基于 RE 方法运用 CAD 软件可对结构、外观进行定制。因镂空工艺可增加透气性及舒适度, 减少材料使用, 加快打印速率, 减轻重量等^[21], 因此对于如何依据临床进行镂空以及快速镂空成为了近期的热点。

采用简单镂空孔洞的方式, 可达到轻量化的目标^[22]。Wang 等^[23]编写了一种半自动化镂空建模系统, 通过 PYTHON 语言自动化软件的镂空及后期处理的过程, 从而达到普及逆向工程的 3D 矫形器的目的, 但简单镂空方法存在不合理的材料删减, 需要更为科学的镂空方案。

工程学常用的拓扑结构优化算法逐渐被创新应用于矫形器的轻量化改进^[24], 这种方法在保持结构强度的同时节省材料。廖政文等^[25]使用拓扑优化方法指导腰部矫形器镂空设计, 利用 Abaqus 软件进行结构优化, 根据结果布尔运算出 3 mm 的圆形孔洞用于透气。Yan 等^[26]通过压力传感器取得压力分布信息对桡骨骨折矫形器实行拓扑优化, 镂空后增加晶格网络进行结构补强, 减少了 42%重量和材料; 彭志鑫

等^[27]则应用有限元验证了利用拓扑优化轻量化矫形器方法的可行性。另外,从散热角度,Zhang 等^[28]使用热成像仪器调整镂空孔洞分布,同时构建自动化系统,在保证结构强度的情况下达到最佳散热效果,提高佩戴舒适感,减少并发症。总之,从不同角度改进镂空方式,利用编程自动化技术,达到镂空快速、优质,同时轻量化的目标,是工程师和医学研究者正在努力的方向。

5 3D 打印技术的进展

RE 方法形成的成熟模型的快速应用更是受限于 3D 打印技术自身的发展。有研究者指出,3D 打印技术的产品质量与打印速率存在着此消彼长的动态关系^[29],同时还被成型工艺、打印机本身功率、材料溶解率、扫描路径算法等众多因素影响^[30]。作为非主要应用场合的医院,研究者能够选择的往往只有成型工艺和材料,以及部分路径算法。

成型工艺方面,常用于 3D 矫形器的成型工艺包括熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)、选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)及光固化立体印刷(stereo lithography appearance, SLA),其中在可接受的细节质量范围内,SLS 的扫描速度较快,可达 3 500 mm/h^[31],该种工艺其表面质量较低,且前期投入成本昂贵。在材料方面,根据文献,目前常用于 3D 打印矫形器及矫形器的材料有树脂、聚乳酸、尼龙等^[32],Chen 等^[33]认为树脂的拉伸模量超过 2 000 MPa,制成的矫形器可能会让人产生不适,应使用拉伸模量较低的尼龙为前臂骨折的患者打印腕部矫形器。张文林等^[34]使用预制模型与可塑性材料低温热塑板,通过人体构造的相似性,得到适用于大部分人群的预制矫形器,而后使用加温进行二次塑型,减少了塑型时间和难度,是较为有效的解决打印建模时间过长的方案。复合材料的应用也是目前聚焦的研究方向^[35]。Munoz-Guijosa 等^[36]采用天然纤维和碳纤维聚合物,利用热压罐的高压环境,结合 3D 打印模具,快速生成牢固的矫形器,认为复合材料在矫形器制作领域具有较好的前景。路径算法方面,林洁琼等^[37]通过自适应算法根据曲率及要求精度优化分层厚度,可以有效保证精度及质量的流程简化,对于曲面较多的 RE 矫形器速率优化有一定的借鉴价值。因此借助交叉学科的能量,设计和选择一种更适用于矫形器打印的 3D 打印机,可以达到快速临床应用的目的。

6 小 结

上述基于 RE 的 3D 打印矫形器制作技术研究中:在扫描方面,应用于人体表面扫描的改进研究较少,但临床研究均倾向于便携式扫描仪,如何做到精度和方便的均衡尚待进一步的探索;CAD 建模方面,半自动建模系统可以很好地减少人员培训和软件的时间成本,但对 CAD 方法建模时间的估计均较为乐观,可用性研究也基本是个例研究和刚刚起步;二次设计方面,研究者利用镂空进行结构优化,可以一步达到多个优化目标,但力学测量方面多依赖计算机模拟,仍缺乏一定的客观性;3D 打印方面,通过及时更新最新的打印技术和材料,优化喷头路径或分层算法,也可达到快速应用,减少成本的同时提高疗效的目的。

综上所述,结合优化算法的自动化制造系统是目前 3D 打印矫形器应用临床的最佳途径,可提高患者的依从性并且提高疗效^[38]。最新文献指出,光固化 3D 打印机生产一副支具时间约为 161 min,加上扫描和建模的过程,流程最少 10 h^[39, 40],此前研究忽略了从采集到 CAD 方法的时间,相对于 3D 打印时间,这部分时间更难以估计,但也更容易通过方法的简化进行压缩。如在光学扫描阶段,采用便携式扫描仪;在 CAD 建模阶段,构建适用于医务场所的自动化建模系统;在 3D 打印阶段,改进工艺和材料以及自适应算法均可减少生产时间。集成以上自动化系统,目前仍是临床应用较大的难关,但是一项新技术的开展这些问题都会出现,会随着医院设施的逐步完善而得到解决。

参考文献

- [1] Abreu DSM, Schmitz C, Marega PM, et al. Proposal of custom made wrist orthoses based on 3D modelling and 3D printing [J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2017, 2017: 3789-3792. DOI: 10.1109/EMBC.2017.8037682.
- [2] Negi S, Dhiman S, Sharma RK. Basics and applications of rapid prototyping medical models [J]. Rapid Prototyping J, 2014, 20 (3): 256-267. DOI: 10.1108/RPJ-07-2012-0065.
- [3] 苏晨,杨圣林,许德骅,等.基于 Kano/AHP-熵权法的 3D 打印脊柱矫形器设计 [J]. 机械设计, 2022, 39 (11): 126-132. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2022.11.010.
Su C, Yang SL, Xu DH, et al. Design of 3D printed spine orthosis based on Kano/AHP-entropy weight method [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39 (11): 126-132. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2022.11.010.

- [4] 李家豪, 刘森, 师铂, 等. 3D 打印个性化支具与铰链式支具治疗内侧副韧带损伤的疗效对比研究 [J]. 创伤外科杂志, 2022, 24 (8) : 619-624. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2022.08.012.
Li JH, Liu S, Shi P, et al. Comparative study on the efficacy of 3D printing personalized brace and hinged brace in the treatment of medial collateral ligament injury [J]. Journal of Trauma Surgery, 2022, 24 (8) : 619-624. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2022.08.012.
- [5] 赵维维, 万冕, 赖华兵. 计算机辅助制作矫形器矫正青少年特发性脊柱侧弯 [J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30 (11) : 983-988. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.11.05.
Zhao WW, Wan D, Lai HB. Computer-aided manufactured orthoses for correction of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Orthopedic Journal of China, 2022, 30 (11) : 983-988. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.11.05.
- [6] 王勉, 邓羽平, 谢普生, 等. 桡骨远端 3D 打印模型精度的三维偏差分析 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2018, 20 (1) : 50-56. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2018.01.009.
Wang M, Deng YP, Xie PS, et al. Symmetry analysis of a 3D printed model of distal radius [J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2018, 20 (1) : 50-56. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2018.01.009.
- [7] Volonghi P, Baronio G, Signoroni A. 3D scanning and geometry processing techniques for customised hand orthotics: an experimental assessment [J]. Virt Phy Prototyping, 2018, 13 (2) : 105-116. DOI: 10.1080/17452759.2018.1426328.
- [8] Wong MC, Ng BK, Kennedy SF, et al. Children and adolescents' anthropometrics body composition from 3-D optical surface scans [J]. Obesity (Silver Spring), 2019, 27 (11) : 1738-1749. DOI: 10.1002/oby.22637.
- [9] 俞芳, 程志全, 唐举玉, 等. 基于结构光扫描手部软组织三维模型的准确性研究 [J]. 中国临床解剖学杂志, 2020, 38 (6) : 657-660. DOI: 10.13418/j.issn.1001-165x.2020.06.007.
Yu F, Cheng ZQ, Tang JY, et al. Study on validity of 3D surface structured light scanner for measuring hand morphology [J]. Chinese Journal Of Clinical Anatomy, 2020, 38 (6) : 657-660. DOI: 10.13418/j.issn.1001-165x.2020.06.007.
- [10] Lazzeri S, Talanti E, Basciano S, et al. 3D-printed patient-specific casts for the distal radius in children: outcome and pre-market survey [J]. Materials, 2022, 15 (8) : 2863. DOI: 10.3390/ma15082863.
- [11] Dombroski CE, Balsdon ME, Froats A. The use of a low cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study [J]. BMC Res Notes, 2014, 7: 443. DOI: 10.1186/1756-0500-7-443.
- [12] 鲁德志, 梅钊, 李向磊, 等. 3D 打印脊柱侧凸矫形器的数字化设计及效果评估 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25 (9) : 1329-1334. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.3758.
Lu DZ, Mei Z, Li XL, et al. Digital design and effect evaluation of three-dimensional printing scoliosis orthosis [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2021, 25 (9) : 1329-1334. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.3758.
- [13] 陈平, 王海东, 苏俊杰, 等. 3D 打印腕手矫形器在类风湿性关节炎腕关节病变康复治疗中的临床应用 [J]. 中国康复, 2022, 37 (8) : 489-492. DOI: 10.3870/zgkf.2022.08.010.
Chen P, Wang HD, Su JJ, et al. Clinical application of 3D printing wrist hand orthosis in rehabilitation treatment of rheumatoid arthritis wrist joint lesions [J]. China Journal of Rehabilitation, 2022, 37 (8) : 489-492. DOI: 10.3870/zgkf.2022.08.010.
- [14] Blaya F, Pedro PS, Silva JL, et al. Design of an orthopedic product by using additive manufacturing technology: the arm splint [J]. J Med Syst, 2018, 42 (3) : 54. DOI: 10.1007/s10916-018-0909-6.
- [15] 张爱平, 刘羲, 刘志峰, 等. 基于 3D 打印的定制脊柱侧弯矫形器设计制造与舒适度评价 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43 (4) : 518-525. DOI: 10.11936/bjtxb2016060026.
Zhang AP, Liu X, Liu ZF, et al. Manufacture of customized orthosis in adolescent idiopathic scoliosis and comfort evaluation based on 3D printing [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43 (4) : 518-525. DOI: 10.11936/bjtxb2016060026.
- [16] Paterson AM, Donnison E, Bibb RJ, et al. Computer-aided design to support fabrication of wrist splints using 3D printing: A feasibility study [J]. Hand Ther, 2014, 19 (4) : 102-113. DOI: 10.1177/1758998314544802.
- [17] Li J, Tanaka H. Rapid customization system for 3D-printed splint using programmable modeling technique - a practical approach [J]. 3D Print Med, 2018, 4 (1) : 5. DOI: 10.1186/s41205-018-0027-6.
- [18] Marzola A, Buonamici F, Guariento L, et al. Enhanced statistical shape model: a statistical-based tool to design custom orthopaedic devices [M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021: 27-38. DOI: 10.1007/978-3-030-91234-5-3.
- [19] 邹诚实, 李开成, 张弛, 等. 基于预编程模板的个体化外固定支具的 3D 设计 [J]. 医学理论与实践, 2022, 35 (5) : 735-739. DOI: 10.19381/j.issn.1001-7585.2022.05.005.
Zou CS, Li KC, Zhagn C, et al. 3D Design Method of Individualized External Orthosis Based on Preprogrammed Template [J]. The Journal of Medical Theory and Practice, 2022, 35 (5) : 735-739. DOI: 10.19381/j.issn.1001-7585.2022.05.005.
- [20] Servi M, Volpe Y, Uccheddu F, et al. A preliminary usability assessment of a 3D Printable Orthosis Design System [C]. 20th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International) : 2018: 273-280. DOI:10.1007/978-3-319-92270-6_39.
- [21] 许苑晶, 高海峰, 吴云成, 等. 定制式增材制造膝关节矫形器间室减荷效果的有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57 (5) : 560-569. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.194.
Xu YJ, Gao HF, Wu YC, et al. Finite element analysis of decompression effect of custom additively manufactured knee orthosis compartments [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57 (5) : 560-569. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.194.
- [22] 刘非, 邱冰, 薛向东, 等. 基于 3D 打印技术的个性化外固定支具设计 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24 (24) : 2260-2263. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.24.11.

- Liu F, Qiu B, Xue XD, et al. Design of personalized external fixators based on 3D printing [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2016, 24 (24): 2260-2263. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.24.11.
- [23] Wang Z, Dubrowski A. A semi-automatic method to create an affordable three-dimensional printed splint using open-source and free software [J]. *Cureus*, 2021, 13 (3): e13934. DOI: 10.7759/cureus.13934.
- [24] 练伟, 王华山, 余嘉. 基于有限元分析的 3D 打印脊柱侧弯矫形器局部优化设计 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36 (6): 855-861. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.06.004.
- Lian W, Wang HS, Yu J. Local optimization design of three-dimensional printed scoliosis orthosis based on finite element analysis [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2021, 36 (6): 855-861. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.06.004.
- [25] 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 (4): 470-477. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.019.
- Liao ZW, Mo YX, Zhagn GD, et al. Design and development of three-dimensional printing personalized rehabilitation orthosis [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2018, 35 (4): 470-477. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.019.
- [26] Yan W, Ding M, Kong B, et al. Lightweight splint design for individualized treatment of distal radius fracture [J]. *J Med Syst*, 2019, 43 (8): 284. DOI: 10.1007/s10916-019-1404-4.
- [27] 彭志鑫, 闫文刚, 王坤, 等. 3D 打印前臂外固定支具的有限元分析与结构优化设计 [J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27 (9): 1340-1345. DOI: 10.12307/2023.208.
- Peng ZX, Yan WG, Wang K, et al. Finite element analysis and structural optimization design of 3D printed forearm braces [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2023, 27 (9): 1340-1345. DOI: 10.12307/2023.208.
- [28] Zhang XT, Fang GX, Dai CK, et al. Thermal-comfort design of personalized casts [C]. Quebec City, Canada: ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2017.
- [29] Mahamani A, Kumar P, Ismail K, et al. Mono and multi-response optimization of 3D printer parameters to attain improved hardness and surface roughness [C]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018.
- [30] 王素玉, 曾庆锁, 王瑶, 等. 3D 打印速度的影响因素及改善措施研究 [J]. *机床与液压*, 2020, 48 (7): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.07.011.
- Wang SY, Zeng QS, Wang Y, et al. Research on influencing factors and improvement measures of 3D printing speed [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48 (7): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.07.011.
- [31] 张瀚. 选择性激光烧结工艺参数对成型精度的影响及预测研究 [D]. 武汉科技大学, 2018.
- Zhang H. Research on the Influence and prediction of selective laser sintering process parameters on forming accuracy [D]. *Wuhan Science and Technology University*, 2018.
- [32] 郑坤, 宋艳, 邓迁, 等. 3D 打印在矫形器领域的应用和研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (14): 1300-1303. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.14.12.
- Zheng K, Song Y, Deng Q, et al. Application and research progress of 3D printing in orthoses [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (14): 1300-1303. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.14.12.
- [33] Chen Y, Lin H, Yu Q, et al. Application of 3D-printed orthopedic cast for the treatment of forearm fractures: finite element analysis and comparative clinical assessment [J]. *Biomed Res Int*, 2020, 2020: 9569530. DOI: 10.1155/2020/9569530.
- [34] 张文林, 成思源, 杨雪荣. 基于人体表面三维数据的医用支具逆向设计方法 [J]. *机械设计*, 2018, 35 (12): 120-123. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2018.12.022.
- Zhang WL, Cheng SY, Yang XR. Reverse design method of medical brace based on human body surface 3D data [J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35 (12): 120-123. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2018.12.022.
- [35] Cazon A, Kelly S, Paterson AM, et al. Analysis and comparison of wrist splint designs using the finite element method: Multi-material three-dimensional printing compared to typical existing practice with thermoplastics [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2017, 231 (9): 881-897. DOI: 10.1177/0954411917718221.
- [36] Munoz-Guijosa JM, Zapata MR, Martinez CA, et al. Rapid prototyping of personalized articular orthoses by lamination of composite fibers upon 3D-printed molds [J]. *Materials (Basel)*, 2020, 13 (4): 939. DOI: 10.3390/ma13040939.
- [37] 林洁琼, 孙超, 靖贤, 等. 增材制造技术中的自适应分层研究 [J]. *机械设计与制造*, 2017, 6: 70-73. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2017.06.019.
- Lin JQ, Sun C, Jing X, et al. Research on adaptive slicing in additive manufacturing technology [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017, 6: 70-73. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2017.06.019.
- [38] 于文强, 任富超, 郑坤, 等. 特发性脊柱侧凸矫形器的生物力学研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (17): 1582-1586. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.17.08.
- Yu WQ, Ren FC, Zheng K, et al. Advances on biomechanics of orthotic therapy for idiopathic scoliosis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (17): 1582-1586. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.17.08.
- [39] Factor S, Atlan F, Pritsch T, et al. In-hospital production of 3D-printed casts for non-displaced wrist and hand fractures [J]. *SI-COT-J*, 2022, 8: 20. DOI: 10.1051/sicotj/2022021.
- [40] Guida P, Casaburi A, Busiello T, et al. An alternative to plaster cast treatment in a pediatric trauma center using the CAD/CAM technology to manufacture customized three-dimensional-printed orthoses in a totally hospital context: a feasibility study [J]. *J Pediatr Orthop B*, 2019, 28 (3): 248-255. DOI: 10.1097/BPB.0000000000000589.

(收稿:2022-11-15 修回:2023-10-08)

(同行评议专家: 赵黎, 李四波, 殷磊)

(本文编辑: 宁桦)