

## 3D打印个性化康复矫形器的设计制作

廖政文<sup>1,2,3</sup>, 莫诒向<sup>2</sup>, 张国栋<sup>2,4</sup>, 林晖<sup>2,4</sup>, 黄国志<sup>3</sup>, 黄文华<sup>1,2,4</sup>

1. 广西医科大学基础医学院, 广西 南宁 530021; 2. 南方医科大学基础医学院, 广东 广州 510515; 3. 南方医科大学附属珠江医院康复医学科, 广东 广州 510280; 4. 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】目的:**基于3D打印技术个性化康复矫形器的数字化设计制作研究,提出一种3D打印制作康复矫形器的可行性方案。**方法:**(1)用MRI的T1-mDIXON-W扫描模式扫描上肢,采集上肢肘以下前臂部分DICOM格式影像数据刻录成光盘,将光盘的数据导入Mimics软件重建出皮肤轮廓模型并导出STL格式文件,将STL格式文件导入Geomagic studio软件进行表面优化、网格划分、精确曲面等操作实体模型后保存为STP格式文件,将STP格式模型文件导入到Abaqus软件进行有限元结构的优化分析,设置10组不同的优化数值(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%)分别进行拓扑优化,从而找到合适的优化数值,实现模型结构的优化,根据优化结果图和应力云图,指导模型的挖孔设计,设计好矫形器的模型,最后用尼龙材料通过3D打印机打印出来;(2)通过30个志愿者[男15人,女15人,年龄(24.26±2.38)岁,体重质量(59.67±10.63) kg]佩戴该方案设计制作的3D打印个性化矫形器和传统方法手工制作的矫形器,填写魁北克辅助科技满意度评估调查表,将表格数据用SPSS 19.0软件进行统计学分析。**结果:**(1)通过有限元拓扑优化分析,经过多次尝试,发现优化的体积参数设置在10%~20%之间,模型的生物力学性能影响较小,对照有限元优化结果指导模型的挖孔设计;(2)分析30个志愿者填写的魁北克辅助科技使用者满意度评估量表,可见矫形器使用的舒适度、矫形器使用的简易度、矫形器的性价比、矫形器的重量、外表美观性、矫形器的透气性均呈现出显著性( $P<0.05$ ),意味着矫形器这6项指标有着统计意义上的差异,得出3D打印的矫形器在透气性和重量等方面优于传统矫形器。**结论:**本研究开发的3D打印康复矫形器的设计制作方案是可用的,能够为将来3D打印康复矫形器的大量临床应用提供参考。

**【关键词】**3D打印; 康复矫形器; 数字化设计; 个性化

**【中图分类号】**R312; R197.39

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)04-0470-08

## Design and development of three-dimensional printing personalized rehabilitation orthosis

LIAO Zhengwen<sup>1,2,3</sup>, MO Yixiang<sup>2</sup>, ZHANG Guodong<sup>2,4</sup>, LIN Hui<sup>2,4</sup>, HUANG Guozhi<sup>3</sup>, HUANG Wenhua<sup>1,2,4</sup>

1. College of Basic Medical Sciences, Guangxi Medical University, Nanning 530021, China; 2. College of Basic Medical Sciences, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 3. Department of Rehabilitation Medicine, Zhujiang Hospital Affiliated to Southern Medical University, Guangzhou 510280, China; 4. Guangdong Medical Center for 3D Printing Application Conversion Engineering, Guangzhou 510515, China

**Abstract: Objective** To propose a feasible scheme for making rehabilitation orthosis using three-dimensional (3D) printing technology based on research of digital design and manufacture of personalized rehabilitation orthosis with the use of 3D printing technology. **Methods** We used the T1-mDIXON-W scanning mode of magnetic resonance imaging to scan the upper limbs, collected DICOM format image data of the upper arm elbow and burned them into CD-ROM, imported the data of the CD-ROM into Mimics software to reconstruct the skin contour model, and exported the STL format file. The STL format file was imported into Geomagic studio software for surface optimization, meshing, precise surface manipulation, and the results were saved as STP format files which were imported into Abaqus software for optimization analysis of the finite element structure. Ten sets of different optimization values were set, namely 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, which were applied for topological optimization, respectively, in order to determine the appropriate optimization value and optimize the model

**【收稿日期】**2018-03-11

**【基金项目】**国家自然科学基金(61427807); 广东省科技计划项目(2016B090917001, 2015B010125005); 中国南方智谷引进创新团队项目(2015CXTD05)

**【作者简介】**廖政文, 硕士在读, 主要研究方向: 临床应用解剖学及医学3D打印, E-mail: 960984540@qq.com

**【通信作者】**黄文华, 博士生导师, 教授, 主要研究方向: 临床应用解剖学、医学3D打印应用转化、数字医学, E-mail: 13822232749@139.com; 黄国志, 博士生导师, 主任医师, 主要研究方向: 信息技术在康复医学中的应用、神经骨骼肌肉疾病的康复等, E-mail: drhuang66@163.com

structure. According to the optimization result map and stress cloud map, we guided the dig hole design of model, designed a model of the orthosis, and finally used a nylon material to print it out through a 3D printer. A total of 30 volunteers aging ( $24.26 \pm 2.38$ ) years old and weighing ( $59.67 \pm 10.63$ ) kg, including 15 male and 15 female, wore 3D printed personalized orthoses designed and manufactured using this program and traditional hand-made orthoses, and then filled in Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology. Finally, SPSS 19.0 software was applied to analyze the evaluation data. **Results** After finite element topology optimization analysis and several attempts, it was found that the optimized volume parameter was set between 10% and 20%, and the biomechanical performance of the model was less affected, and the digging hole design was guided by the finite element optimization results. The Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology filled by 30 volunteers was analyzed, and the results revealed that the comfort, simplicity, cost performance, weight, aesthetic appearance, and breathability of the orthosis were all significant ( $P < 0.05$ ), implying that the indicators of the 6 items of the orthosis had statistically significant differences. 3D printed orthosis was proven to be superior to traditional orthotics in some aspects, such as breathability and weight. **Conclusion** The 3D printing rehabilitation orthosis design and production program developed in this study is available, which can provide reference for the future clinical application of 3D printing rehabilitation orthosis.

**Keywords:** three-dimensional printing; rehabilitation orthosis; digital design; personalized

## 前言

根据美国矫形学和假肢学会预测到2020年,使用矫形器的人数预计将增加至少31%,这一数字估计将达到730万<sup>[1]</sup>。文献报道我国康复医疗产业情况,2013年我国康复医疗市场仅为200亿元,只是美国的3%。虽然市场规模看起来很小,但是潜在的康复需求却是越来越大<sup>[2]</sup>。统计数据显示:2010年末,中国的残疾人数量已达8 502万人,其中5 000多万人有康复需求。截止2015年,我国60岁及以上老年人口已达2.22亿,而需要康复治疗的老年人约有7 000万人。同时每年都有上亿人次伤病员,因此我国是世界上康复矫形器需要人数最多、市场潜力最大的国家<sup>[3]</sup>。

3D打印又称增材制造、积层制造技术,是把经过计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)软件设计好的模型文件<sup>[4]</sup>,输入到3D打印机中,选用不同的打印材料,通过叠加成型的方式,完成模型的实体构建<sup>[5]</sup>。随着3D技术的进步、打印速度加快、打印费用降低,医疗行业3D打印的产品也越来越多,3D打印可以满足个性化定制的医疗需求<sup>[6]</sup>。国内的相关研究也证实3D打印产品在构建个性化医疗产品的可行性,比如3D打印的骨折模型用于术前规划及预弯钢板、3D打印的个性化矫形器用于骨折术后患者的康复治疗等。国家食品药品监督管理总局也已经批准了3D打印的部分产品进入临床使用<sup>[7]</sup>,3D打印在医疗上的应用越来越多,是未来的发展趋势。

在康复上我们虽然有这么大量的矫形器需求,但目前主要以石膏矫形器和塑性矫形器为主,传统石膏矫形器吸水后笨重而且凝固后不能再改变形

状,如果技师经验不足的话,错误的包扎容易造成筋膜室综合症,会发生肌肉缺血坏死挛缩,同时石膏材料本身带有刺激性,长时间的固定后,患者的皮肤容易出现皮炎、溃疡等问题<sup>[8]</sup>;塑性矫形器虽然在临床上用的非常多,但是边缘容易压迫皮肤,引起患者不适,存在骨折固定后再发生移位的风险,同时石膏和塑性矫形器外表不美观,一些幼儿及心理障碍较大的患者使用后容易自卑、不愿意外出、弃用率高、不利于康复等<sup>[9-10]</sup>。反之,3D打印康复矫形器有着重量轻、透气性好、外表美观等特点,国外研究也证实个性化的3D打印矫形器优于传统的矫形器<sup>[11]</sup>。然而目前3D打印个性化矫形器在康复的临床应用还是很少,主要原因:(1)3D打印技术涉及的软件比较多,需要会用CAD等工程类软件<sup>[4,12-14]</sup>,而临床医生会这些软件的非常少,目前也没有一套成熟的设计制作方法;(2)生产制造3D打印需要的设备成本比较高,打印的材料费用比较贵,同时目前3D打印的速度有局限,制造一个3D打印的时间比传统制造的时间长;(3)3D打印在医院没有收费项目,没有纳入医保,收费方面比较困难。

本研究目的是:通过有限元分析的验证,找到合适的优化参数,指导挖孔等设计,实现结构优化、节省材料、增加透气性的方法,开发一种简单的适合临床医生使用的3D打印个性化康复矫形器的设计制作方案。

创伤类型中四肢的比例占到一半以上<sup>[15]</sup>,其中桡骨远端骨折是四肢创伤中常见的类型之一,其中累及桡腕关节和下尺桡关节的骨折占63%~90%,对于复杂的桡骨远端关节内骨折,不当的治疗方式会导致桡腕关节出现严重的并发症和功能障碍<sup>[16]</sup>。本

研究以上肢手腕部桡骨远端骨折患者为例,用3D打印技术设计及制作个性化的康复矫形器,旨在探讨该方案的可行性,以期将来3D打印技术在康复矫形器制作上的大量临床应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器设备及相关软件

戴尔 T7910 图形工作站(DELL 公司, 美国), 处理器为英特尔至强 E5-2650v4, CPU 主频为 2.20 GHz, 内存 64.0 GB, Windows 7 旗舰版 64 位操作系统(Microsoft 公司, 美国); Philips- Medical- Systems-Ingenia 3.0 T MRI(Philips 公司, 荷兰)(南方医科大学附属第三医院影像科提供); 1 TB SATA 移动硬盘; 软件系统包括: Windows 7 专业版操作系统(Microsoft 公司, 美国)、医学图像三维重建软件 Mimics19.0(Materialise 公司, 比利时)、逆向工程建模软件 Geomagic Studio(Geomagic 公司, 美国)、CAD 辅助设计软件 UG NX(Siemens 公司, 德国)、有限元分析软件 Abaqus(SIMULIA 公司, 美国)、模型添加支撑软件 MakerBot Desktop(MakerBot 公司, 美国)。3D 打印机: 桌面级 3D 打印机 MakerBot Replicator Z18(MakerBot 公司, 美国), 打印尺寸 305 mm×305 mm×457 mm, 层分辨率 100 μm, 喷嘴直径 0.4 mm; 3D 打印的材料是 PLA(聚乳酸)一种热塑性材料, 由玉米淀

粉、蔗糖、木薯等为原料制成, 有良好的机械加工性能, 高质量高精度, 环保无毒。

### 1.2 数据采集及扫描方法

选取 1 例女性志愿者, 采用 Philips- Medical- Systems-Ingenia 3.0 T MRI(南方医科大学附属第三医院影像科提供)进行扫描。患者采取仰卧位, 患者身体中轴线与扫描床轴线平行, 上肢伸直置于头顶侧, 手处于一种准备进行功能活动的状态也就是手的功能位, 其腕部背伸角度约为 25°~30°, 拇指充分外展与食指对掌位, 掌指关节和近指间关节分别屈曲 45°, 并远指间关节屈曲 10°~15°, 各指间关节的屈曲度数相似, 手指间略为分开, 以桡骨中段作为扫描中心, 扫描双上肢范围包括肱骨下端至掌骨以远, 选用 T1-mDIXON-W 扫描模式, 层厚 2 mm, 层距 1 mm, 重建矩阵 512, 每一次曝光时间为 1.5 s。获得连续横断面 MRI 图像, 单层图像分辨率为 512×512 pixel, 在影像工作站上将 MRI 图像原始数据以 DICOM 标准格式刻录光盘。

### 1.3 建模及设计过程

模型的数字化设计以 CAD 软件为主, 结合了其它的 3D 建模软件、有限元分析软件等, 图 1 是一个总的流程图, 介绍怎样把 CT、MRI 或者 3D 扫描仪的数据经过软件处理后输入到 3D 打印机中打印出产品过程的工作流程图。

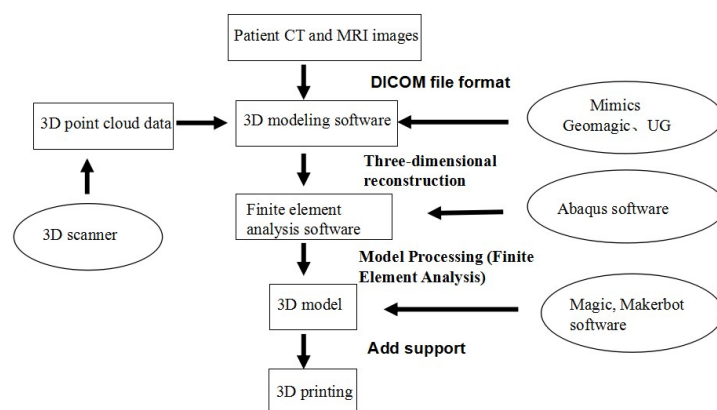


图1 CAD软件处理及3D打印过程流程图

Fig.1 CAD software processing and three-dimensional (3D) printing process flow chart

**1.3.1 Mimics 建模过程** 将志愿者 MRI 扫描的 DICOM 格式数据, 导入到 Mimics 软件(Materialise 公司, 比利时), 首先选择 Thresholding 模块, 分别进行前臂和手部的阈值分割, 确定分割的灰度值范围是 34~195, 这个范围的灰度值刚好可以把皮肤的轮廓分割出来, 分割出来的前臂和手掌的整个部分保存为初始蒙版(Mask), 对提取的初始蒙板利用 Edit

Masks 模块和 Multiple Slice Edit 模块进行修补, 把粗糙或者破损的地方填补好, 然后利用 Smooth mask 模块进行光滑, 最后利用 Calculate 3D 模块处理计算出前臂和手部的 3D 模型, 导出为 STL 格式文件保存, 如图 2 所示。

**1.3.2 模型表面处理与矫形器模型的建立** 将 Mimics19.0 软件中计算得到的前臂和手部模型 STL



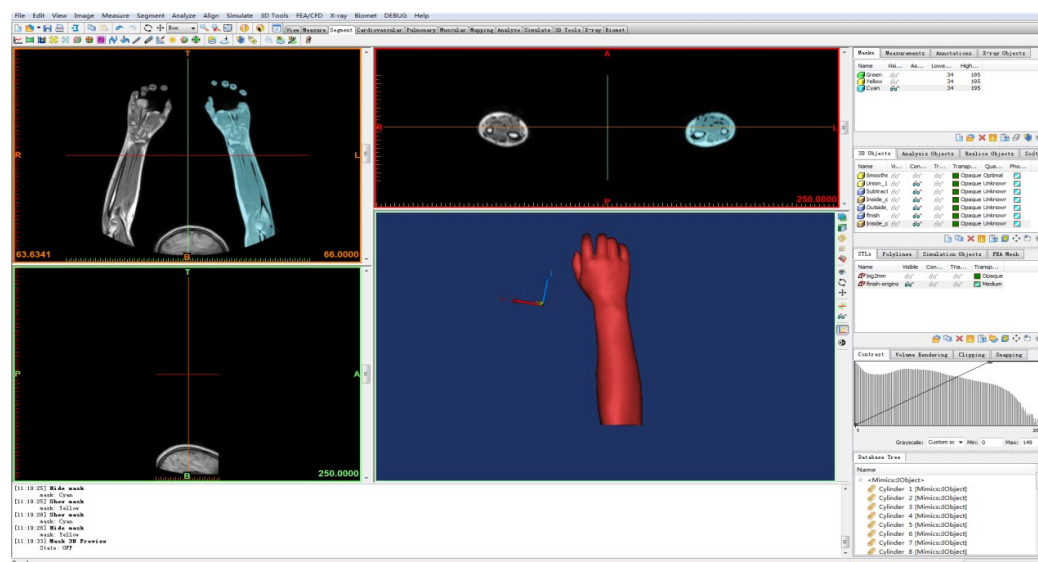


图2 前臂及手部结构3D重建

Fig.2 3D reconstruction of forearm and hand structure

文件,导入Geomagic Studio(Geomagic公司,美国)软件中在多边形模块中进行模型的表面去特征、切割、表面平滑处理、加厚得到厚度为2 mm的矫形器模型,同时把整个矫形器扩大2 mm,目的是佩戴时候能够使矫形器和皮肤间保留一定的距离,方便打印出来后容易加衬垫,在桡骨茎突的部位,向外突出2 mm,从而避免桡骨茎突部位的卡压和摩擦导致疼痛等,然后在软件的精确曲面模块依次进行探测轮廓线、构造曲面片、构造格栅、拟合曲面操作、偏差分析,在精确曲面模块处理完成后,构造出的即为NURBS曲面,最终拟合曲面完成实体建模并以STP文件格式导出保存(图3)。

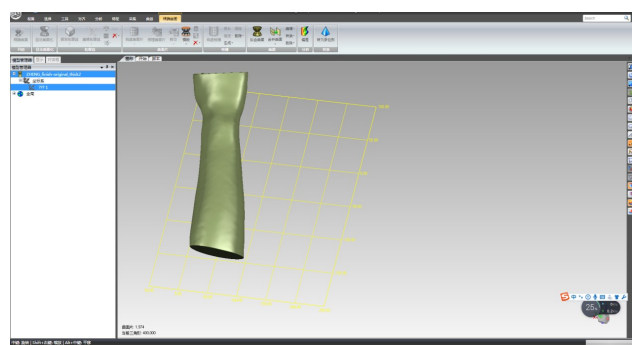


图3 矫形器3D模型的处理与实体建模

Fig.3 Processing and entity modeling of 3D model of the orthosis

**1.3.3 矫形器的有限元分析** 将上一步处理得到的STP格式的矫形器模型导入Abaqus软件(SIMULIA公司,美国)中进行如下操作:特性设置(Property)、建立装配体(Assembly)、划分网格(Mesh)、定义分析步(Step)、界定相互作用(Interaction)、落实载荷边界

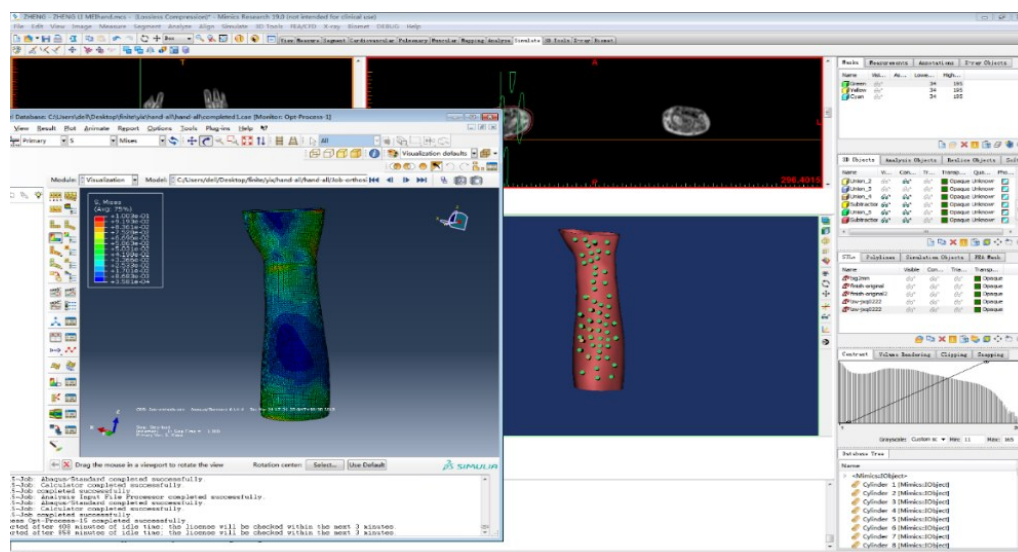
(Load)、提交运算(Job)以及后处理(Visualization)等有限元操作(图4),计算得到优化的结构,从而进行优化设计。其中特性设置步骤中,参考既往文献数据对其采用均一材料属性赋值,并且材料性质方面为各向同性,其弹性模量为1 300 MPa,泊松比取值0.46<sup>[17-18]</sup>。

根据文献数据,模拟病人穿戴矫形器时矫形器受到魔术贴对其表面施加的表面压力49 N<sup>[17]</sup>。另外,对矫形器远端和近端设置约束的边界条件,建立1个分析步,同时于矫形器远端和近端施加其所受到的魔术贴的表面压力。在接触设置方面,于矫形器与魔术贴相接触处设置为耦合约束,以将该接触面上的所有曲面片关联起来。最后,提交模型到Abaqus求解器进行运算。

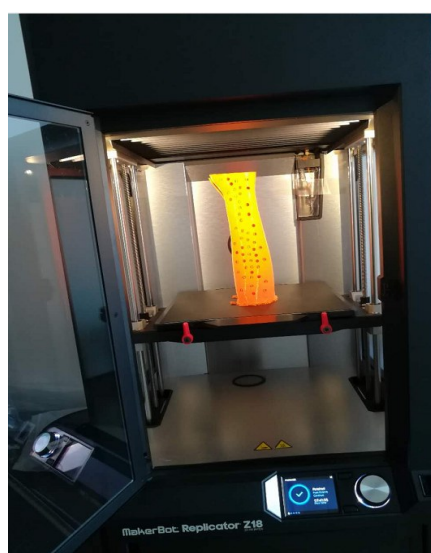
有限元分析是CAD的基本组成部分,它提供更快捷和低成本的方式评估设计的概念和细节,检验设计的性能,缩短设计周期,大大减少原型试验的成本,提供详细的应力应变情况。

**1.3.4 矫形器优化** 利用Abaqus软件中的优化模块,对矫形器进行优化。优化区域为远端魔术贴至近端魔术贴之间的矫形器部分。然后根据设计需要,优化过程(Optimization)的目标函数确定为 $\text{Min}F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,其中 $F=\text{weight}$ , $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是力学参数,优化重量和体积,使其达到优化并保证其刚度符合要求;在优化过程的几何约束步骤中,冻结边界和魔术贴所在的曲面部分,以免其在优化过程中遭到破坏。设置10个优化参数(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%),将优化模型提交到Abaqus中优化求解器进行运算,优化后模型如图5所示。





a: Optimized design



b: 3D printing



c: 3D printing physical model

图6 矫形器优化设计及3D打印过程

Fig.6 Optimization design and 3D printing process of the orthosis

矫形器后直接填写调查满意度评估量表,然后汇总志愿者对所列项目的认同度。本量表依据魁北克辅助科技使用者满意度评估量表特点的基础上依据人和产品适配模式设计,由选择题和填空题组成。本量表共12道题,包括矫形器使用的舒适度、使用简易度、性价比、重量、外表美观性、透气性以及志愿者的身高体重等相关内容。采用李克特五点计分法量表,即5=很满意,4=满意,3=一般,2=不满意,1=很不满意。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结果

(1)有限元分析步骤优化的结果,本组模型在优



a: 3D printed left orthosis



b: 3D printed right orthosis

图7 志愿者佩戴矫形器的图片

Fig.7 Pictures of volunteers wearing orthosis



化过程中共完成了30次迭代计算,最终达到了满足生物力学的收敛状态。用Abaqus有限元分析软件进行模型结构的分析优化,路径上的节点的应力相应有所增大,这表明对矫形器的部分挖空影响到了矫形器本身的受力情况,但是对比优化分析前后的数据,可以知道两者的差别并不大,优化后模型镂空,限定的优化控制在10%~20%区域,能够保证生物力学性能,力学变化较小,这说明我们的矫形器在提升一定的透气性、节省材料、美观的同时与优化前的矫形器在结构稳定性上面没有太大的差异。有限元分析实现3D打印康复矫形器模型结构的优化、减少体积、增加透气性,同时也节省了大量的材料。

(2)满意度评价量表的数据经SPSS 19.0软件计算,结果是:矫形器使用的舒适度分布来看,志愿者大部分都选择为“满意”,共有22个,占比为73.3%,超过了7成;从矫形器使用的简易度来看,样本中有超过6成的样本为“满意”,占比为63.3%;从矫形器的性价比来看,样本中“一般”相对较多,比例为46.7%,可见志愿者对价格比较关注;从矫形器的重量来看,样本中有超过6成的样本为“满意”,占比为60%;从外表美观性分布上,大部分样本为“满意”和“很满意”,占比都为46.7%;对于矫形器的透气性来讲,“很满意”占比最高为83.3%,已经超过了八成,可见志愿者透气性方面都是非常满意的。

## 2.2 讨论

本次研究提出便捷的3D打印康复矫形器设计制作品方案,并且详细介绍3D打印康复矫形器的设计制作品过程,主要步骤为:用MRI扫描摆好体位的患者,收集的影像数据存储为DICOM格式,导入到3D建模软件进行表面处理和结构优化<sup>[19]</sup>,最后输入到3D打印中选用不同的材料进行打印。既往国外研究已经证实3D打印康复矫形器的可行性,通过有限元分析及结构优化设计的矫形器力学指标能够达到甚至优于传统的矫形器<sup>[13,20]</sup>。影像学检查是复杂骨折患者术前的常规项目,本方案直接使用患者影像学检查的DICOM格式数据,不需要使用其他文献报道的用光三维扫描仪<sup>[21]</sup>,既充分利用影像学数据,避免了光三维扫描仪的扫描环节,又帮患者节省费用且减少设计人员的工作量;在CAD软件设计环节方面,只需要用到软件中一些基本的表面处理和切割功能,临床医生只需要进行适当的培训就可以学会使用;在3D打印机打印环节方面,只需要把设计好的模型文件输入打印机即可智能化地进行自动打印。

传统石膏固定过程需要先给病人穿弹力袜,然后石膏衬垫,石膏绷带,整个过程主要取决于技师的

经验,如果技师经验不足,石膏衬垫太少会导致压疮,太多衬垫褶皱又会导致固定不充分;石膏在软化过程中会释放大量热量,可以导致皮肤灼伤,石膏材料越多灼伤风险越高;石膏绷带过紧的话,骨筋膜室综合症的风险也变大。随着3D打印技术的进步,现在完全可以用这种技术更快更好地制作康复矫形器<sup>[22]</sup>,既减少患者的痛苦,又可以降低并发症的风险,临床医生最担心的力学强度问题,国内外研究已经证实3D打印的康复矫形器在力学方面能够达到临床要求<sup>[12]</sup>。对比传统的石膏及塑性材料制作的矫形器,3D打印设计制作的矫形器,不需要在患者身上进行这么多操作,只需在患者入院做影像学检查后,拷贝检查部位的影像DICOM数据即可,然后在CAD及3D建模软件的支持下,设计出个性化的矫形器,然后输入到3D打印机中打印出来,流程简单。本研究开发的设计制作品方法,其中外表面的圆孔布局设计,既增加了透气性,又节省了材料和减轻了重量。当然孔也可以根据患者需求调整为更加美观的图案,查阅文献,女性的桡骨远端的骨折率远远高于男性<sup>[23]</sup>,一般年轻女性在保证矫形器效果的同时也会在意矫形器的外观,3D打印的矫形器外观可以在满足结构力学的前提下,根据患者的意愿进行私人定制,本研究为其他研究者进一步完善设计提供参考。

## 3 结论

本研究开发的3D打印康复矫形器设计制作品方法,经过有限元分析发现控制优化率在10%~20%之间,生物力学影响小,能实现结构优化,节省材料,增加透气性,经过满意度调查表统计学频数分析,单样本 $t$ 检验初步得出该方案是可用的,能够做出有实际用途的3D打印康复矫形器。

本研究重点在于提出设计制作3D打印康复矫形器的参考方案,本课题基于该方案申请了中国国家知识产权局的相关专利(公开号:CN106113497A)<sup>[24]</sup>。我们下一步将进一步完善设计制作品方案,开展临床应用,以期能够为将来3D打印康复矫形器的大量临床应用提供参考。

## 【参考文献】

- [1] ABREU D S, SCHMITZ C, MAREGA P M, et al. Proposal of custom made wrist orthoses based on 3D modelling and 3D printing[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2017: 3789-3792.
- [2] 黄翊. 康复医疗: 产业爆发性增长可期[J]. 股市动态分析, 2016(4): 48.
- HUANG Y. Rehabilitation medicine: the explosive growth of the industry can be expected[J]. Stock Market Dynamic Analysis, 2016 (4): 48.

- [3] 樊瑜波. 抓住机遇 乘势而上 推动我国康复辅助器具产业大发展——关于对《国务院关于加快发展康复辅助器具产业的若干意见》的思考[J]. 中国民政, 2016(21): 40-42.
- FAN Y B. Take advantage of the opportunity and promote the development of China's rehabilitation auxiliary appliance industry—thoughts on the state council's opinions on accelerating the development and rehabilitation of auxiliary appliance industry[J]. Chinese Civil Affairs, 2016(21): 40-42.
- [4] WEISS H, TOURNAVITIS N, NAN X, et al. Workflow of CAD/CAM scoliosis brace adjustment in preparation using 3D printing[J]. Open Med Informatics J, 2017, 11(1): 44-51.
- [5] 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.
- LIU Z, ZHANG P D, RONG X C, et al. A study of 3D printing for stroke patients specific ankle-foot orthoses[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32(8): 874-878.
- [6] 邓滨, 欧阳汉斌, 黄文华. 3D打印在医学领域的应用进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(4): 389-392.
- DENG B, OUYANG H B, HUANG W H. Application progress of three-dimensional printing in medical field[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(4): 389-392.
- [7] 仰东萍, 蔡宏. 中国首个3D打印人体植入物获CFDA注册批准[J]. 北京大学学报(医学版), 2015(5): 845.
- YANG D P, CAI H. China's first 3D printed human implant was approved by the CFDA[J]. Journal of Peking University (Medical Edition), 2015(5): 845.
- [8] 范清宇. 矫形器在骨科临床康复领域中的应用进展[J]. 现代康复, 2001, 25(18): 5-7.
- FAN Q Y. Application of orthoses in the field of clinical rehabilitation in orthopaedics[J]. Modern Rehabilitation, 2001, 25(18): 5-7.
- [9] 何川. 辅助器具弃用的因素与对策[J]. 中国残疾人, 2009(2): 61.
- HE C. The factors and countermeasures for the abandonment of auxiliary equipment[J]. Disabled Chinese, 2009(2): 61.
- [10] RUSSO R N, ATKINS R, HAAN E, et al. Upper limb orthoses and assistive technology utilization in children with hemiplegic cerebral palsy recruited from a population register[J]. Dev Neurorehabil, 2009, 12(2): 92-99.
- [11] MAVROIDIS C, RANKY R G, SIVAK M L, et al. Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping[J]. J Neuroeng Rehabil, 2011, 8(1): 1.
- [12] WEISS H, KLEBAN A. Development of CAD/CAM based brace models for the treatment of patients with scoliosis-classification based approach *versus* finite element modelling [J]. Asian Spine J, 2015, 9(5): 661-667.
- [13] PALOUSEK D, ROSICKY J, KOUTNY D, et al. Pilot study of the wrist orthosis design process[J]. Rapid Prototyp J, 2014, 20(1): 27-32.
- [14] RIZZA R, LIU X, THOMETZ J, et al. Comparison of biomechanical behavior between a cast material torso jacket and a polyethylene based jacket [J]. Scoliosis, 2015, 10(2): S15.
- [15] 周伟梁, 苏磊, 秦伟毅, 等. 广州市10654例创伤急救患者的流行病学分析[J]. 中华急诊医学杂志, 2006, 15(9): 784-786.
- ZHOU W L, SU L, QIN W Y, et al. Analysis of epidemiologic characteristics of trauma in 10654 patients in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Emergency Medicine, 2006, 15(9): 784-786.
- [16] 熊宝林, 徐静. 上肢矫形器在骨科康复中的应用[J]. 中国医学工程, 2012, 20(6): 187-188.
- XIONG B L, XU J. The application of the upper limb orthoses in orthopaedic rehabilitation[J]. China Medical Engineering, 2012, 20(6): 187-188.
- [17] LIN H, SHI L, WANG D. A rapid and intelligent designing technique for patient-specific and 3D-printed orthopedic cast[J]. 3D Printing in Medicine, 2015, 2(1): 4.
- [18] PATERSON A M, BIBB R, CAMPBELL R I, et al. Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints [J]. Rapid Prototyp J, 2015, 21(3): 230-243.
- [19] 杨环, 杨如飞, 朱华昭, 等. 基于组织等效3D打印的多模椎骨体模设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(9): 924-929.
- YANG H, YANG R F, ZHU H Z, et al. Design of multi-modal vertebral phantom based on tissue equivalence and 3D printing technology [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(9): 924-929.
- [20] 聂文忠, 房光开, 闫勇增. 个性化三维矫形支具的设计及其生物力学研究[J]. 机械设计与制造, 2015(10): 237-240.
- NIE W Z, FANG G K, YAN Y Z. Design of individual brace for the three-dimensional correction and biomechanical study[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(10): 237-240.
- [21] JUMANI M S, SHAIKH S, SHAH S A. Fused deposition modelling technique (FDM) for fabrication of custom-made foot orthoses: a cost and benefit analysis[J]. Science International, 2014, 26(5): 2571-2576.
- [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.
- LIU F, QIU B, XUE X D, et al. Design of personalized external fixators based on 3D printing [J]. Orthopedic Journal of China, 2016, 24(24): 2260-2263.
- [23] 卢荟, 童培建. 桡骨远端骨折治疗概述与进展[J]. 浙江临床医学, 2011, 13(4): 446-450.
- LU H, TONG P J. Summary and progress of treatment of distal radius fracture[J]. Zhejiang Clinical Medical Journal, 2011, 13(4): 446-450.
- [24] 黄文华, 廖政文, 欧阳汉斌, 等. 一种个性化踝关节骨折支具的数字化设计及3D打印方法: CN106113497A[P]. 2016-11-16.
- HUANG W H, LIAO Z W, OUYANG H B, et al. Digital design and 3D printing of a personalized ankle joint fracture support: CN106113497A[P]. 2016-11-16.

(编辑:陈丽霞)