

[DOI]10.12016/j.issn.2096-1456.2017.04.003

· 基础研究 ·

纯钛个性化正畸托槽的设计与制造技术研究

张鹏¹, 张弓², 盛亚^{2,3}, 张春雨², 黄达鸿¹

1. 佛山市口腔医院, 广东 佛山(528000); 2. 广州中国科学院先进技术研究所, 广东 广州(511458);
3. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州(510006)

【摘要】 目的 应用计算机断层扫描(computed tomography, CT)、计算机辅助设计(computer aided design, CAD)和选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)技术,并结合有限元分析(finite element analysis, FEA)技术,设计制造与患者牙齿高度匹配的纯钛个性化正畸托槽,实现无模制造。**方法** 运用CT扫描与Pro/E三维建模软件,构建个性化正畸托槽模型,然后导入Ansys有限元分析软件,采用非线性接触的方式进行有限元仿真分析,最后将模型导入SLM成型设备中,采用高速扫描振镜,层层循环扫描,熔化钛粉层,成型为纯钛个性化自锁托槽。**结果** 自锁托槽的最大等效应力分布均匀合理,满足材料的力学性能要求,SLM成型后的纯钛个性化自锁托槽精度好,并且托槽底板与牙齿表面形状的相似度高,粘结致密性好。**结论** 将CT、CAD、FEA与SLM技术相结合,可实现自锁托槽的个性化无模制造,缩短制造周期。

【关键词】 自锁托槽; 纯钛; 个性化; 激光选择性熔化; 有限元分析

【中图分类号】 R783.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 2096-1456(2017)04-0216-07

【引用著录格式】 张鹏, 张弓, 盛亚, 等. 纯钛个性化正畸托槽的设计与制造技术研究[J]. 口腔疾病防治, 2017, 25(4): 216-222.

Research of design and manufacturing technology of titanium personalized orthodontic bracket ZHANG Peng¹, ZHANG Gong², SHENG Ya^{2,3}, ZHANG Chun-yu², HUANG Da-hong¹. 1. Foshan Stomatology Hospital, Foshan 528000, China; 2. Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 511458, China; 3. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
Corresponding author: ZHANG Gong, Email: gong.zhang@giat.ac.cn, Tel: 0086-020-22912753

【Abstract】 Objective A titanium personalized orthodontic bracket is designed and manufactured using the technology of computed tomography (CT), computer aided design (CAD), finite element analysis (FEA), and selective laser melting (SLM) to well match the patient tooth so as to realize mold-free manufacturing. **Methods** A model of a titanium personalized orthodontic bracket which is built by CT scanning machine and Pro/E software, is imported into Ansys software to carry out finite element simulation analysis with nonlinear contact method. Then, the titanium personalized orthodontic bracket is proposed after the model data above is imported to SLM molding equipment via titanium powder melted with layer by layer using a high-speed scanning galvanometer. **Results** The maximum equivalent stress of the titanium personalized orthodontic bracket is distributed uniformly and reasonably, the titanium personalized orthodontic bracket formed by SLM molding equipment can provide high accuracy and there is a high similarity between the bottom of the orthodontic bracket and the tooth surface shape. **Conclusion** The combination of CT, CAD, FEA, SLM technology can fulfill model-free manufacturing of the personalized orthodontic bracket and thus shorten the manufacturing cycle.

【Key words】 Orthodontic bracket; Titanium; Personalized; Selective laser melting; Finite element analysis

【收稿日期】 2016-04-05; **【修回日期】** 2016-10-10

【基金项目】 国家自然科学基金(51307170); 佛山市院市合作项目(2014HT10008)

【作者简介】 张鹏, 副主任医师, 博士, Email: zpw2007@sina.com

【通讯作者】 张弓, 副研究员, 博士, Email: gong.zhang@giat.ac.cn

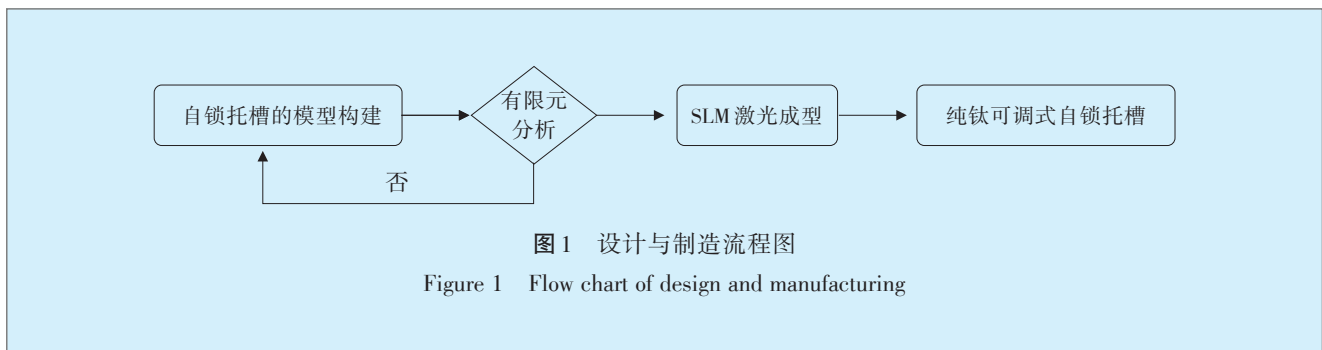
随着成年正畸患者的日益增多,美观、快捷成为现代矫治器设计理念的首要特征^[1]。自20世纪70年代以来,正畸托槽广泛应用于牙齿矫正治疗中。自锁托槽的治疗周期较传统托槽短,而且不需要结扎丝进行固定,大大减少椅旁操作时间,有效提高正畸效率。但自锁托槽结构比较复杂,其加工属于高精密加工制造,要求精度高。因为牙齿表面是不规则的曲面,而且每颗牙齿的形状大小都不一样,因此采用传统方法加工的正畸托槽难以满足患者的个性化需求。近年来,快速制造技术被广泛应用于各种微型、高精密医疗器械的加工生产中^[2-3]。为此,本文采用计算机断层扫描(computed tomography, CT)、计算机辅助设计(computer aided design, CAD)和选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)技术,并结合有限元分析(finite element analysis, FEA)技术,设计与制造和患者牙齿高度匹配的

纯钛个性化自锁托槽,实现无模制造,为自锁托槽的个性化设计与制造提供新方法。

1 材料和方法

1.1 技术流程

自锁托槽的设计与加工,首先是进行托槽实体模型构建,然后采取Pro/E与有限元软件Ansys Workbench无缝连接技术,直接把在Pro/E建立的模型导入有限元分析软件中,进行结构静力学分析,验证设计的正畸托槽在口腔复杂受力情况下的应力分布,检验粘结在牙齿表面上的托槽在口腔内复杂受力情况下能否保持稳定的形态并且不产生破损。如果有限元分析结果不满足要求,则返回第一步更新模型,如果满足则进入下一步。第三步是把个性可调式正畸托槽运用SLM成型技术直接打印成型。流程如图1所示。

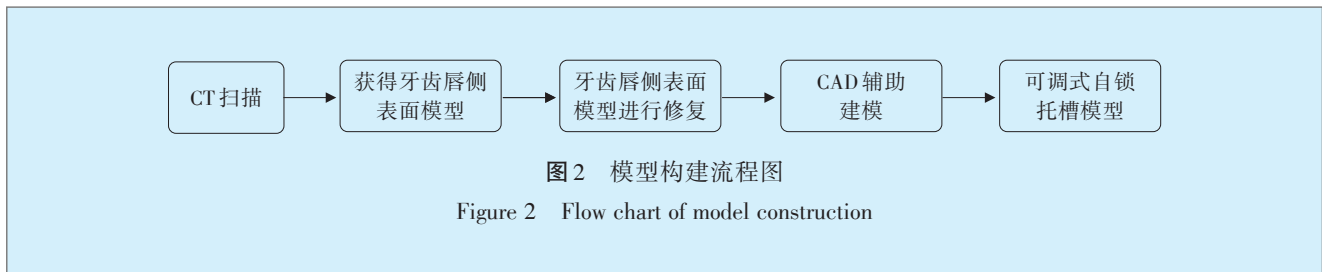


1.2 模型构建

运用CT扫描技术与CAD技术进行托槽实体模型构建,对比于传统的正向模型建模方式,数字化模型,其优点是造型获取比较容易,修改容易,

能实时根据需要对模型外形做出较优的修改。

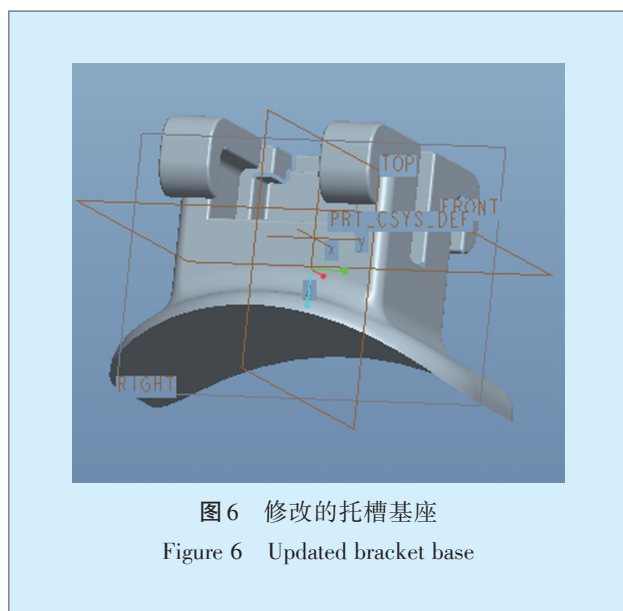
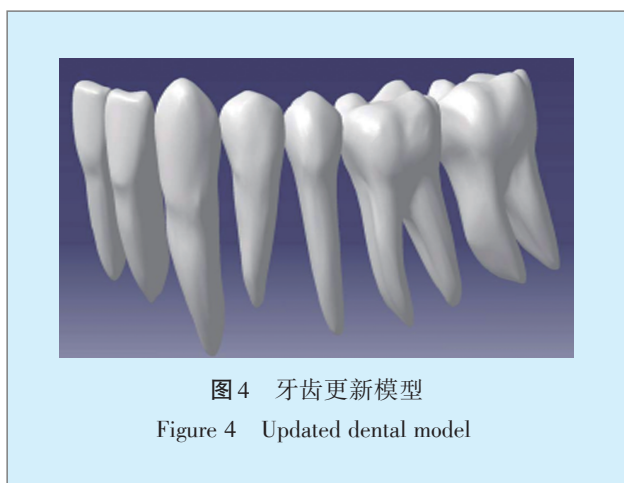
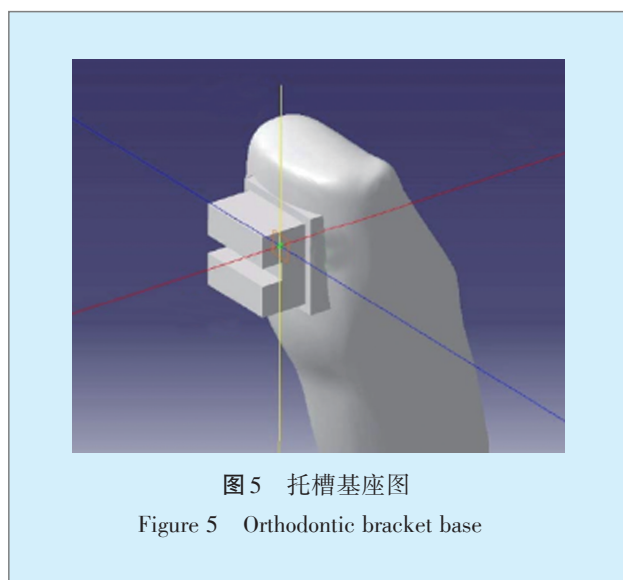
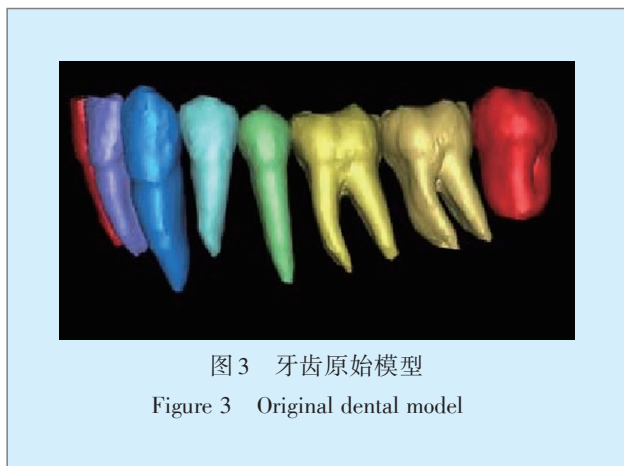
设计与错颌牙齿唇侧曲面高度匹配的个性化可调式自锁托槽,其建模是一个逆向建模与正向建模相结合的过程。主要流程如图2。



首先要获得患者的牙齿数据,构建牙齿唇侧面的数字模型作为托槽的底板基准曲面。本实验中,选取一名健康的男性年轻志愿者模拟患者,采用64层螺旋CT机对志愿者颅骨进行扫描。然后将得到的断层图像数据,用获得的原始图像数据

导入到MIMICS 10.0软件中,选取合适的密度阈值,经过简单调整去除噪音后,即可得到牙齿的模型(图3)。经过简单的光滑处理,将建立的模型以点云的形式输出到逆向三维建模软件Pro/E中,构建牙齿曲面模型,并进行光滑处理,使模型更接近

真牙的外形(图4),再通过布尔操作就可以得到牙齿的唇侧曲面形状。

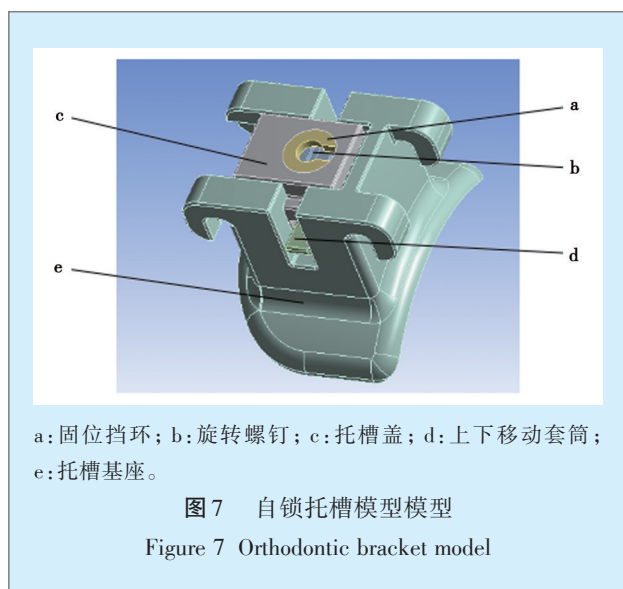


获得某一牙齿唇侧曲面的数字模型后,将数据导入 Pro/E 软件中,对唇侧面进行修复处理,得到一个表面光滑的曲面,通过在此曲面上建立正畸托槽模型的底座(图5),进行托槽的底板外观形状修改即可获得具有与牙齿唇侧面相匹配的自锁托槽底板(图6)。获得匹配的托槽底座后,然后根据自锁托槽的特性,建立相应的其他零部件,并组成装配体,如图7所示。

1.3 有限元分析

有限元分析技术是利用数学近似的方法对真实物理系统(在一定的几何和载荷工况下)进行模拟。利用简单而又相互作用的单元,用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统^[4]。这样就能有效地预测自锁托槽在一定的载荷工况下是否会造成破坏而失去作用。

自锁托槽相对于一般的直丝弓托槽复杂,因此,托槽在口腔里受到复杂的外力作用时,能否保



a: 固位挡环; b: 旋转螺钉; c: 托槽盖; d: 上下移动套筒; e: 托槽底座。

持完好的外观及不产生破损,是发挥其功能的关键。为了检验可调式自锁托槽的可靠性,以保证托槽不会在使用期间断裂或者大的变形而失去作用,需要进行有限元分析,以模拟可能带来的问题,增加治疗过程的可预见性。

1.3.1 有限元建模 针对已经构建了自锁托槽的数字模型,为了提高有限元模型的相似度,增强结果的可靠性,采取Pro/E与有限元软件Ansys Workbench无缝连接技术,直接把在Pro/E建立的装配体模型导入有限元分析软件Ansys Workbench 15.0中,进行分析。考虑到人体正常的咬合过程中不会有太大的载荷,故本次实验中对托槽的受力分析采用静力学分析,采用solid186单元。

1.3.2 材料及边界载荷条件 本研究假设模型中装配体的零部件材料均为质、连续、各向同性的线性弹性材料,材料受力为小变形^[5]。采用四面体单元进行网格划分,模型的单元数和节点数分别为240、853和377、975。

采用的是纯钛材料,其弹性模量为110 GPa,泊松比为0.35^[6]。除托槽盖与固位挡环之间采用绑定(bonded)连接,其它表面之间都采用有摩擦(frictional)接触,参考了常用材料的摩擦系数^[7],可得相互间摩擦系数为0.35。

由于口腔内受力状态比较复杂,托槽在口腔内的各个方向上都有可能受力,而且受力的大小和作用方式都可能会有所不同,但是在生理状态下,一般人体的咀嚼压力不会超过200 N^[8]。

在托槽基座的底面施加固定约束,在托槽的上部结构中心(即托槽盖上表面)从0°~180°加载200 N的表面载荷,属于外部加载工况,然后从托槽沟内部向托槽盖的中心0°~180°加载200 N的表面载荷(即模拟正畸治疗过程中弓丝对托槽的施力情况),属于内部加载工况^[9]。任意一个施加的边界载荷模型如图8,4个典型角度工况下的应力分析如图9。

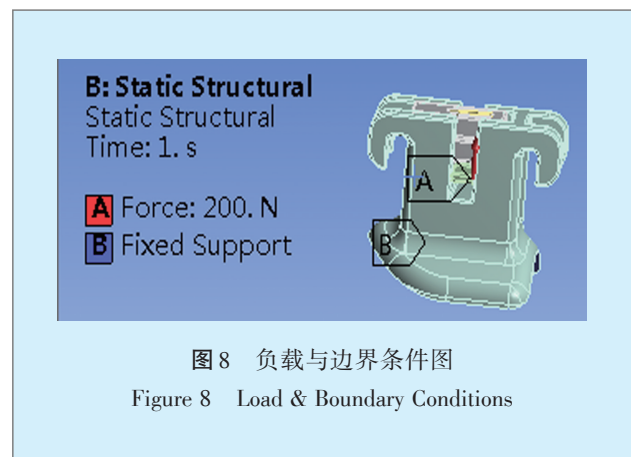
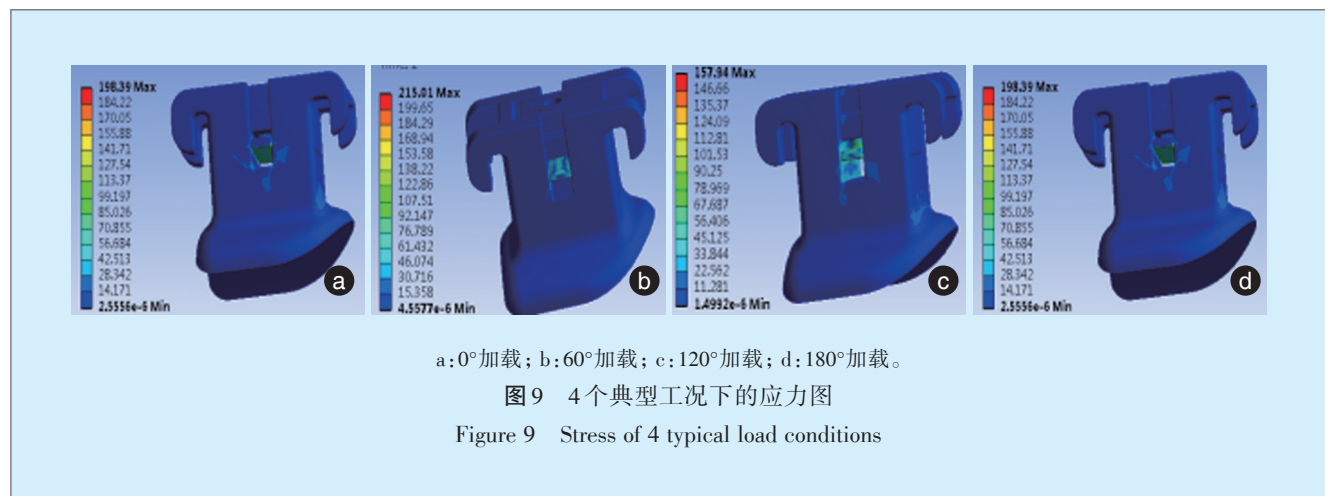


图8 负载与边界条件图
Figure 8 Load & Boundary Conditions



a:0°加载; b:60°加载; c:120°加载; d:180°加载。

图9 4个典型工况下的应力图
Figure 9 Stress of 4 typical load conditions

2 结果

分析结果是采用第四强度理论准则即等效应力来衡量,只要不超过材料的许用等效应力,则认为是安全的。基于前文所述的边界及载荷条件,通过Ansys Workbench 15.0分析后,得到不同角度下,两种工况下的模型最大等效应力分

布图,分别如图10和图11所示。可以看出,自锁托槽的受力相对均匀,都是集中在托槽盖和托槽沟以及其他零部件与它们相互接触的部位。

2.1 SLM成型

SLM技术被认为是近年来制造领域的一次重

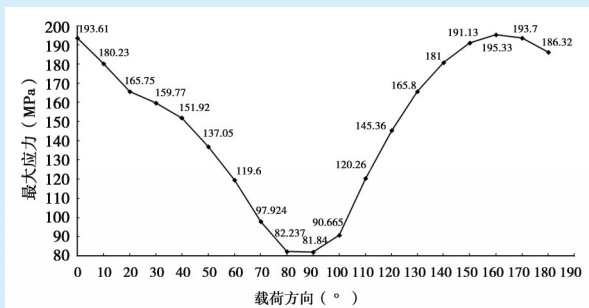


图 10 不同载荷角自锁托槽的最大等效应力分布(外部加载)

Figure 10 Maximum stress of different load angle of orthodontic bracket (External load)

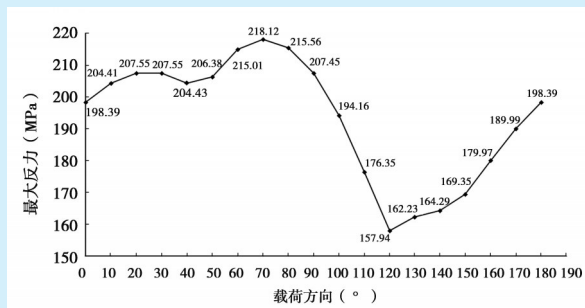


图 11 不同载荷角自锁托槽的最大等效应力分布(内部加载)

Figure 11 Maximum stress of different load angle of orthodontic bracket (Internal load)

大突破,SLM技术也逐渐应用于医疗器械中^[10],其加工过程中无需模具,高精度、高性能,加工个性化、小批量的零件方便,该技术通过激光根据相应的路径、区域,把材料熔化,层层堆叠,所制备的金

属件密度接近100%等优点^[11-13],是目前增材制造技术中的主要发展方向。自锁托槽的模型经有限元分析合格后,就可以将模型通过SLM成型机进行3D打印,SLM成型流程如图12。

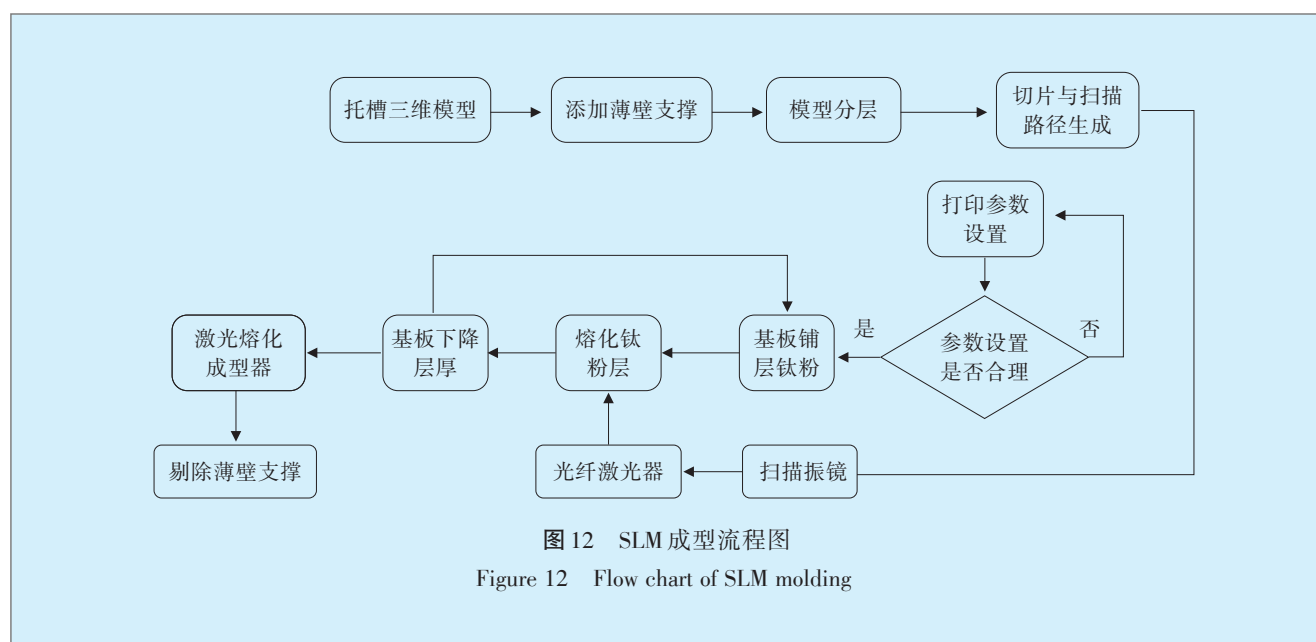


图 12 SLM成型流程图

Figure 12 Flow chart of SLM molding

将自锁托槽三维模型以STL格式保存,通过三维建模软件Pro/E,添加薄壁支撑,并将转换的文件导入增材制造设备的控制设备中,然后采用SLM快速成型控制软件对模型文件进行切片和扫描路径生成处理,并生成每层相应的路径文件。对增材制造设备成型过程的参数进行设置,选择合理的参数。本研究参数如表1。

设定参数后,在激光快速成型设备的基板上均匀铺第一层金属粉末,使用刮板工具将金属粉末层分布均匀。接着在氮气环境中,使用高速扫描振镜,基于模型分层生成的路径文件进行扫描,利用光纤激光器将金属粉末熔化,形成平整的熔化层。

上一层扫描完毕后,基板下移一个层厚距离,接着输送一定量的金属粉末,重新铺一层金属粉

表1 SLM成型参数

Table 1 Parameters of SLM molding in this study

类型	数值
激光功率	Max. 100 W
金属颗粒大小	20 ~ 90 μm
金属粉层厚度	20 ~ 100 μm
扫描速度	Max. 2 m/s
定位速度	Max. 7 m/s
激光光束直径	70 μm
成型速度	15 cm^3/h
氮气保护	0.7 MPa, 20 m^3/h

末于已成形层之上,并使用刮板工具将该层金属粉末层分布均匀。然后再次采用扫描振镜,基于该层的路径代码,按照先前设定的路径进行扫描,利用光纤激光器聚集的能量将该层金属粉末熔化。如此循环,直至所有模型的切片层全部扫描完毕。这样,纯钛个性化自锁托槽三维模型经分层累加的方式生成医用自锁托槽。加工结束后,从设备中取出零件,并去除薄壁支撑,形成最终的自锁托槽,其纯钛实物如图13。

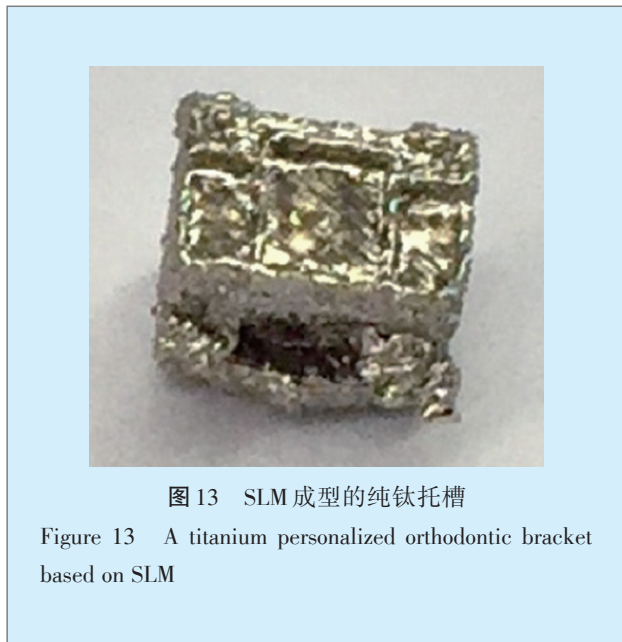


图13 SLM成型的纯钛托槽

Figure 13 A titanium personalized orthodontic bracket based on SLM

另外,对SLM成型的纯钛材料致密度、显微组织和拉伸力学性能进行了分析(图14),最终获得了近乎100%全致密度、拉伸屈服和断裂强度分别达到584 MPa和682 MPa的高强度纯钛材料。另外,其表面粗糙度为Ra 6.3,如表2所示。

3 讨论

本研究采用CT扫描和CAD辅助设计相结合

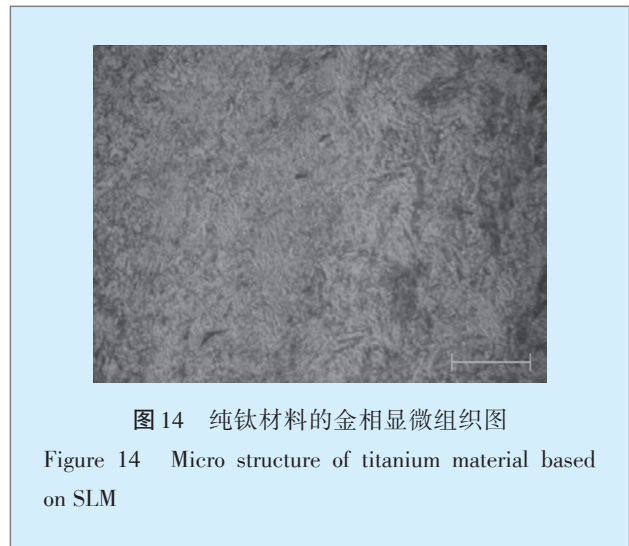


图14 纯钛材料的金相显微组织

Figure 14 Micro structure of titanium material based on SLM

表2 SLM打印纯钛材料的拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of titanium materials based on SLM

类型	数值
屈服强度(MPa)	584
断裂强度(MPa)	666
弹性模(GPa)	114.3
泊松比	0.31
断后延伸率(%)	16.9

来进行自锁托槽的三维建模,提高了模型结构复杂区域的几何相似性,最大程度地实现了与患者相匹配的个性化自锁托槽的设计与建模。

运用有限元技术,精确模拟了复杂口腔外力作用下的等效应力分布,从而避免托槽粘结在牙齿唇侧表面可能发生的失效问题,增加治疗过程的可预见性。

从图10也可以看出,外部加载时,等效应力的最大值为195.33 MPa,最小值为81.84 MPa。0°到90°之间的最大等效应力变化是逐渐减小的,90°到180°之间的最大应力变化逐渐增加,然后在160°以后开始减小;而内部加载时,0°到70°,最大等效应力总体趋势逐渐增加。70°~120°时,最大等效应力逐渐减小并达到最低值218.12 MPa,之后最大等效应力值逐渐增大。

通过比较两种加载方式下的应力值,可以看出,最大等效应力出现在从托槽沟内部向托槽盖中心加载的工况下,当表面载荷与模型Y轴呈70°时,模型的最大等效应力达到峰值,但是仍然远低于纯钛材料的屈服强度,因此设计的自锁托槽是安全的,不会因为正常受力而出现断裂或发生变形。

采用SLM成型的纯钛自锁托槽,实现了自锁托槽的个性化无模定制,可以大大缩短了制造周期,为自锁托槽的个性化设计与制造提供了一种新方法,实现了纯钛正畸托槽直接增材成形,可大大缩短新产品开发时间。

该方法获得的纯钛正畸托槽,其材料的致密度接近100%、拉伸屈服和断裂强度也均较高,接近铸造类纯钛材料的机械力学性能。另外,其表面粗糙度较小,接近常规车-铣机加工的等级。而且,在选择性激光溶化过程中,未扫描的钛粉,经由配套的粉末筛选系统,超过98%的钛粉材料可以循环使用,极大降低了耗粉量,为用户带来了实惠。

本研究提供一种采用CT扫描和CAD辅助设计相结合,基于SLM技术的纯钛正畸托槽及制造方法,能将口腔检查、正畸托槽的结构设计、有限元分析、选择性激光立体成型等有机结合起来,针对每位患者不同的口腔条件设计出最适合病人的个性化纯钛正畸自锁托槽。

参考文献

- [1] 夏琴香,常琛扬,蔡斌,等.个性化舌侧自锁矫治器咬合过程瞬态动力学分析及优化[J].医用生物力学,2013,28(6):659-664.
- [2] Richard B, Dominic E, Peter E. Rapid manufacture of custom-fitting surgical guides[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(5): 346-354.
- [3] 王淑范,杨永强.舌侧托槽的数字化3D打印技术[J].广东牙病防治,2013,21(8):408-411.
- [4] 许京荆. ANSYS Workbench 工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2015:7-12.
- [5] Sung SJ, Baik HS, Moon YS, et al. Comparative evaluation of different compensation curves in the lingual and labial techniques using 3D FEM[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2003, 123(4): 441-450.
- [6] Chen J, Lu X, Paydar N, et al. Mechanical simulation of the human mandible with and without an endosseous implant[J]. Med Eng Phys, 1994, 16(1): 53-61.
- [7] 徐灏. 机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,1991:23-29.
- [8] Kitamura E, Stegaroiu R, Nomura S, et al. Influence of marginal bone resorption on stress around an implant—a three-dimensional finite element analysis[J]. J Oral Rehabil, 2005, 32(4): 279-286.
- [9] 朱鲲.可调式自锁托槽的摩擦力研究及有限元分析[D].山东大学,2008:19-26.
- [10] Pham DT, Gault RS. A comparison of rapid prototyping technologies[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(10/11): 1257-1287.
- [11] Kruth J P, Froyen L, VanVaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology Research, 2004, 149(1-3): 616-622.
- [12] Wang F, Mei J, Jiang H, et al. Laser fabrication of Ti6Al4V/TiC composites using simultaneous powder and wire feed[J]. Journal of Materials Science, 2007, 44(6): 461-466.
- [13] Li P, Ji SQ, Zeng XY. Direct laser fabrication of nickel alloy samples[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(11): 1288-1294.

(编辑 张晟,全春天)