

文章编号: 1001-3806(2010)01-0001-04

选区激光熔化直接成型个性化牙冠牙桥研究

何兴容¹, 杨永强^{1*}, 王迪¹, 孔卫东², 吴伟辉¹, 苏旭彬¹, 黄伟红³

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640; 2. 暨南大学附属第一医院口腔科, 广州 510010; 3. 广州瑞通激光科技有限公司, 广州 510380)

摘要: 为了探索应用数字化反求设计结合选区激光熔化快速成型技术制作个性化牙冠牙桥的可行性, 通过 Laser-denta 扫描系统测量牙列模型并 3 维重建其数字化外形, 采用计算机辅助设计了牙冠牙桥。利用自主研发的选区激光熔化快速成型设备 Dimetal-280 进行了 316L 不锈钢粉末的正交实验工艺研究, 获得优化参量, 并用该参量加工设计了牙冠牙桥。结果表明, 该方法能快速而精确地制造出形状复杂的个性化牙冠牙桥, 且成型速度快、尺寸精度高、表面质量好, 误差在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内, 未经打磨表面粗糙度达到 $20\mu\text{m}$; 与传统加工方式相比, 反求工程结合选区激光熔化快速成型的方法能快速而精确地制造出形状复杂的个性化金属牙冠牙桥, 为其应用于口腔修复体的计算机辅助设计与制造提供了科学依据。

关键词: 激光技术; 快速成型; 牙冠牙桥; 选区激光熔化; 反求工程; 个性化

中图分类号: R783.3; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.001

Direct manufacturing of customized crowns and fixed bridge by selective laser melting

HE Xing-rong¹, YANG Yong-qiang¹, WANG Di¹, KONG Wei-dong², WU Wei-hui¹,
SU Xu-bin¹, HUANG Wei-hong³

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Department of Stomatology, First Affiliated Hospital, Jinan University, Guangzhou 510630, China; 3. Guangzhou Riton Laser Co. Ltd., Guangzhou 510380, China)

Abstract: To evaluate the feasibility of designing and fabricating crowns and fixed bridge by means of the digital reverse engineering and selective laser melting rapid prototyping technology, an optical scanning system, Laserdenta was used to measure the dental cast and reconstruct its three-dimension digital profile. The shape of crowns and fixed bridge was designed by computer based on the digital dental cast. By using the Dimetal-280 selective laser melting rapid prototyping system, the crowns and fixed bridge of 316L stainless steel was made through orthogonal experiments for parameter optimization. The results show that the crowns and fixed bridge of 316L stainless steel have good surface quality, high accuracy of $\pm 0.15\text{mm}$ in dimension, good roughness of about $20\mu\text{m}$. The technology of reverse engineering and direct manufacturing of complex customized metallic crowns and fixed bridge by selective laser melting shows obvious superiority with high speed, precise profile and good accuracy in size comparing with the traditional one so as to offer some evidence for its application in CAD/CAM of oral prosthesis.

Key words: laser technique; rapid prototyping; crowns and fixed bridge; selective laser melting; reverse engineering; customized

引言

近年来,随着科学技术的不断发展与进步,计算机辅助设计和计算机辅助制造以及快速原型技术已广泛应用于口腔医学领域,特别是口腔修复学领域^[1-3]。口腔医学领域中常用的快速成型技术主要有立体光刻、选择性激光烧结、分层实体制造等方法^[4]。但是,以上的快速成型技术制造的成型件,虽有良好的外形精度,但不具备机械强度和机械性能^[5]。还需要经过铸

基金项目:广州市粤港关键领域重点突破中标项目(2007Z1-D6091);广东省教育部产学研合作专项资金资助项目(2007A090302004);广东省自然科学基金资助项目(8151063201000071)

作者简介:何兴容(1985-),女,硕士研究生,研究方向为激光加工及先进材料成型技术。

* 通讯联系人。E-mail: meiyqiang@hotmail.com

收稿日期:2009-05-08;收到修改稿日期:2009-06-01

造才能得到金属件,工艺繁琐,精度难以保证。由于激光快速成型金属零件技术发展时间较短,类似技术应用到口腔医学的报道较少。第四军医大学与西北工业大学合作,率先将激光快速成型技术应用到口腔修复学领域,WU等人^[6]应用激光快速成型技术制作了全口义齿钛基托,但所采用的是同轴送粉融覆的方法,该方法所采用的设备是专门加工工业大型零件的大功率激光快速成型设备,光斑尺寸大,不能满足牙冠牙桥这种精密件的制造需求,且切片厚度大,成型最大聚合角范围有限制。对于弧形板的制作超过一定弧率范围就不能成型。不能满足制作精确的个性化牙冠牙桥等外形复杂的修复体。

目前,口腔修复领域制作修复体如牙冠牙桥等都是手工操作,过程耗时长且需反复印模取模,过程繁琐并给病人带来很大的不便。其精确性和质量因操作人员的不同存在很大差异。加工方式主要是铸造成型,已不能满足当前高性能、自动快速的修复体制作要求。因此,拟采用反求工程结合选区激光熔化快速成型的方法来直接制造一次成型出所需要的金属修复体。

Table 1 Chemical composition and property of 316L stainless steel

chemical composition (mass fraction)	w(C)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)	w(Sr)	w(Fe)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(O)
	0.0003	0.1753	0.1206	0.0216	0.0086	balance	0.0038	0.0002	0.0001	0.0013
grain size distribution (mass fraction)	0 μm ~ 10.48 μm			10.48 μm ~ 27.63 μm		27.63 μm ~ 49.43 μm			>50 μm	
	0.0807			0.1101		0.5055			0.3037	
apparent density/(g·cm ⁻³)	4.04									

表1所示。316L不锈钢为奥氏体不锈钢,总体性能优良,在工业与医疗领域有广泛应用。采用A3钢加工成100mm×100mm×10mm的正方块作为基板,采用氮气作为保护气体。

1.1 牙模数据的采集与处理

将石膏牙模固定于 Laserdenta 非接触式五轴自转3维激光扫描仪工作台上,然后将平台固定在扫描盘里。启动扫描程序,进行全方位扫描,直到激光覆盖整个牙模表面,然后选择计算功能让影像转换成数据,最后检查扫描效果并输出为.Stl 开放3维格式,如图1所示。非接触式五轴全自动旋转平台可以让激光触及

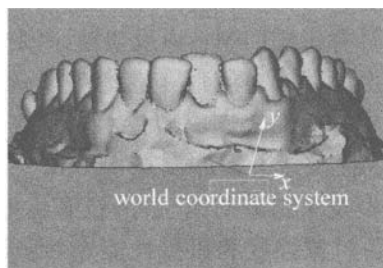


Fig. 1 Dental cast in stl form

1 实验设备与方法

实验中采用的设备有扫描系统;由瑞士及德国共同研发生产的 Laserdenta 非接触式五轴自转3维激光扫描仪及配套软件。Laserdenta 非接触式五轴自转3维激光扫描仪具备先进激光测量及数控驱动定位技术,此系统运用激光反射原理将牙齿与窝洞影像传输至计算机,能快速扫描牙模外形然后将影像转换成3维数据。牙冠牙桥设计软件:由JIE牙科设计建模软件。激光快速成型系统为自主研发的选区激光熔化快速成型机 Dime-tal-280。选区激光熔化(selective laser melting, SLM)快速成型技术基于一般快速成型原理,是一种离散/堆积成型。其原理为:将设计好的3维模型离散成一层一层的轮廓信息,控制激光束逐层扫描金属粉末。成型过程中,粉末完全熔化,达到冶金结合,从而得到致密度接近100%的实体。使用选区激光熔化成型金属植入体,无需制作模具,可以节省大量的时间和成本;同时不受零件几何尺寸的限制,可以实现与原组织的形状匹配^[7]。

实验材料为-500目316L不锈钢球形粉,成分如

任何角度位置包括倒凹等,不用破开牙模便可扫描整个半口牙模型。整个扫描时间只需7min~15min,激光精度达到20 μm 。

1.2 牙冠牙桥的设计

以往研究所用的设计软件都是逆向工程通用软件,针对性不强,效率也不高,而且难以将口腔修复学知识融入其中,因此,采用 Laserdenta 配套的供牙科建模用的 CAD 软件可以在不到1min的时间之内设计出牙冠牙桥。所有参量(内冠厚度、大小、桥体宽度、厚度和舌侧加强带)都按照顾客需求的类型型和材料进行计算,也可以由用户进行编辑。默认设计参量与特定

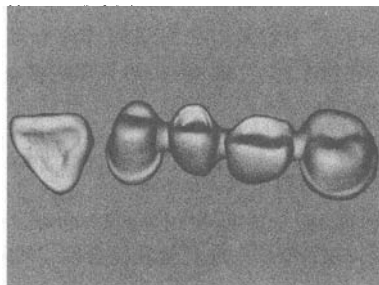


Fig. 2 CAD model of crowns and fixed bridge

材料和制造技术相结合,这保证了可靠的结果和实际生产中不断提高的生产力。而JIE牙冠牙桥设计软件独特的边线识别运算法保证了生产力和精准度,设计出的牙冠牙桥如图2所示。

1.3 牙冠牙桥的激光快速成型

牙冠牙桥为细小的薄壁复杂曲面零件。对于薄壁复杂曲面零件,如何选择合适的成型工艺对保证其成型精度和表面质量至关重要,影响快速成型效果的因素很

Table 2 Parameters of SLM

laser power/W	scanning speed/(mm · s ⁻¹)	scanning space/mm	layer thickness/μm	oxygen content	defocus amount/mm
150	200	0.06	20	1.5 × 10 ⁻⁴	0

用ZEISS spectrum表面粗糙度测量仪测量样品表面粗糙度,用卡尺测量激光加工后所得实体牙冠尺寸厚度等参量,分别测量5次取平均值。

2 结果与分析

在反求工程中,影响最终成型零件的精度因素包括测量仪的精度、测量数据后处理的精度和机械再加工的精度。其中每个环节都是相互影响相互制约着,对最终零件的精度都起着至关重要的作用。据此作者提出“实体模型-数字化模型-快速成型件”的两步骤比较策略。“实体模型-数字化模型”比较用以评价模型的重构精度,其结果可反馈给模型重构过程;采用专业的统计分析软件SPSS16.0对大量数据进行统计学分析,比人工分析更加简捷、科学和可靠。“数字化模型-快速成型件”比较用来评价制造件的加工精度,其结果可用于指导改进加工过程。通过这种两步骤的比较策略,既能更精确地分析原型和制造件之间的形状误差,又能清晰地表明误差的来源,有利于采取有目的改进措施。

2.1 反求工程中的精度分析

分别用卡尺与电脑软件自带测量工具测量14颗牙的舌侧与唇侧临床冠中心间的距离。测得牙模14颗牙的相关参量用SPSS16.0进行统计学分析的结果见图3。

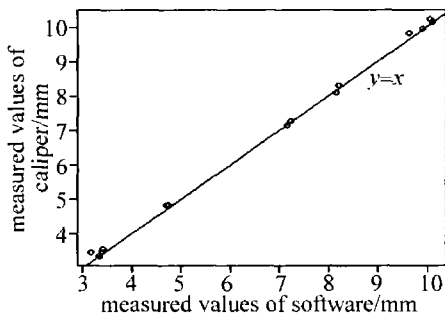


Fig. 3 Regressive analysis of measured data

统计学分析结果显示:回归方程为 $y = 0.127 + 0.994x$,其中 y 为卡尺测量值, x 为电脑测量值。 y 与 x 的相关系数为 0.9995393, $p < 0.001$, p 表统计学意义。

多,主要有激光能量、光斑直径、铺粉层厚、扫描速度、扫描间距等^[8-11]。因为牙冠牙桥尺寸较小,结构复杂,对于尺寸精度与形状精度要求都要高,整个过程质量不好控制,根据加工需求分析决定采用正交实验,对加工参量进行优化,选取成型表面质量好尺寸精度高的参量为植入体的加工参量。采用6因素5水平正交实验表优化工艺参量,通过统计软件SPSS16.0进行实验数据分析,确定316L不锈钢植入体的最佳加工参量,见表2。

由图3可见,电脑测量值普遍低于卡尺测量值,实际操作中可以人为控制误差补偿来达到更加精确。在电脑测量值与游标卡尺的测量结果比较中,二者的结果表现出高度的相关性,以游标卡尺为测量标准,回归计算得到系统的综合测量误差范围在 $\pm 0.08\text{mm}$ 以内,精确度较高,完全可以满足口腔修复中如重建基牙预备体的精度要求,且软件测量得到的数值普遍偏小,处理过程中的过度光滑会造成这种现象,这对于以后处理中尺度的把握以及误差补偿具有很好的指导意义。

2.2 激光加工过程精度分析

将设计好的数据模型输入激光快速成型系统Dimital-280中,调整系统中的各项参量为最佳参量,完成牙冠不规则曲面的加工,见图4。从图中可以看出,

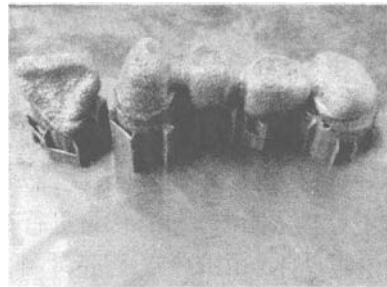


Fig. 4 SLM part of crowns and fixed bridge

表面比较光洁但是有少量粘粉,这是由于激光具有一个热影响区扫描点周围的粉末微粒部分熔融聚集而形成松散的粉粒聚集物^[12],影响了不锈钢牙冠牙桥的表面粗糙度和尺寸精度。打磨后的效果如图5所示。表面呈现金属光泽。对不锈钢牙冠进行测量,分别测量

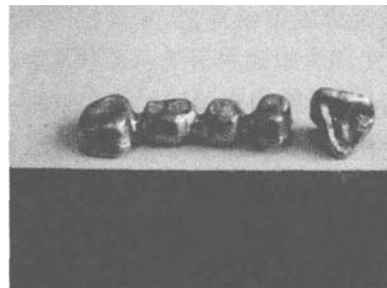


Fig. 5 Crowns and fixed bridge after buffing

x - y - z 方向尺寸, 和厚度测量 H 结果分别表示为 D_x , D_y , D_z , D_H , 其数值如表 3 所示。

Table 3 Results of dimension measurement

	D_x /mm	D_y /mm	D_z /mm	D_H /mm
SLM parts	10.62	9.12	6.36	0.27
CAD model	10.74	9.20	6.40	0.25

结果显示, 选区激光熔化快速成型技术制造出的个性化牙冠能达到很好的尺寸精度, 尺寸误差一方面是因为熔化后的粉末密度比起粉末松散态时 50% 的密度会发生较大体积改变, 可以改进铺粉装置以及选择粉末的类型来增加铺粉的紧实度; 更为有效的方法是通过多次实验结果, 设置合适的误差补偿。另一方面就是激光加工快速受热与快速冷却所产生的热变形, 可以通过优化扫描路径等方法来改善。所得试样密度达 $7.22\text{g}/\text{cm}^3$, 表面粗糙度为 $20\mu\text{m}$ 。冠底部的突起也能精确制造出, 细部特征也能更好地表现出来。加工过程中采用较快的扫描速度, 可以获得更窄的熔化宽度, 因而可通过提高扫描速度的方法提高成型精度^[13]。但是, 扫描速度过快, 如果离焦量、激光功率参量没匹配好, 因扫描所经单位面积上粉末所吸收能量减少, 可能会导致熔深不够, 这时熔池将无法形成连续线, 反而使熔化质量变差。因此, 在提高扫描速度的同时, 必须同步调配好相应的激光功率以及离焦量, 即在能形成连续熔池的前提下, 通过提高扫描速度同时减小层厚的方法来改进加工质量, 提高成型精度。同时研究还发现, 下表面的表面粗糙度比上表面质量要差, 这是因为光斑有穿透力, 在扫描向下的表面时, 由于存在的光斑的热影响区导致所有向下表面粉末粘结引起表面质量不好, 也存在尺寸误差, 因此, 需要在切片软件 MAGICS 中设置适当的 z 轴补偿量进行补偿。

牙冠牙桥修复体采用的材料包括牙科金、钛合金、钴铬合金、不锈钢等, 在选区激光熔化快速成型中都可以采用。修复体的精度要求很高, 且由于要满足修复后的咬合关系, 故表面形状复杂, 厚度一般在 0.4mm 以下, 因此需要高精度的制造过程。成型过程需要采用细粉, 粉末颗粒平均尺寸小于 $10\mu\text{m}$; 铺粉厚度约 $20\mu\text{m}$, 并采用层间累计误差补偿方式保证实际铺粉厚度。

3 结论

(1) 通过工艺参量实验, 进行了牙冠牙桥加工工艺参量的优化, 得到了加工参量的范围。(2) 应用激光快速成型技术制作了不规则形状的 316L 不锈钢牙冠牙桥, 验证了选区激光熔化快速成型技术制作 316L 不锈钢牙冠牙桥的可行性。(3) 评估了激光快速成型

技术的加工精度, 激光快速成型技术对不规则形状牙冠牙桥的加工表面粗糙度达到 $20\mu\text{m}$, 尺寸误差在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内, 密度达到 $7.22\text{g}/\text{mm}^3$ 。

作者对反求工程中的复杂曲面测量技术与选区激光熔化快速成型技术进行了比较系统的研究, 结果表明, 采用反求工程结合选区激光熔化快速成型制造口腔修复体, 能快速地直接成型口腔金属修复体, 该技术制备牙冠牙桥与临床常规方法相比, 节约时间和材料, 简化了工艺步骤, 实现了数字化、无模化近终成型, 为牙冠牙桥的自动化加工及该技术在口腔其它领域的应用提供了依据。在激光快速成型过程中经过工艺优化能不断改善其致密度与表面质量与精确度, 还有进一步研究改善的空间, 是未来的研究方向。

参考文献

- [1] WANG X B, YAO Y L, GAO B, *et al.* Three-dimensional reconstruction of posterior teeth by cutting and scanning layer-by-layer with an improved measurement system [J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2004, 20(1): 5-7 (in Chinese).
- [2] LIU X F, ZHAO Y M, WU G F, *et al.* Reliability of 3 dimensional laser surface scanner for nasal anthropometry [J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2004, 20(2): 211-213 (in Chinese).
- [3] AUNG S C, NGIM R C, LEE S T. Evaluation of the laser scanner as a surface measuring tool and its accuracy compared with direct facial anthropometric measurements [J]. *British Journal of Plastic Surgery*, 1995, 48(8): 551-558.
- [4] BERRY E, BROWN J M, CONNELL M, *et al.* Preliminary experience with medical applications of rapid prototyping by selective laser sintering [J]. *Medical Engineering Physics*, 1997, 19(1): 90-96.
- [5] ZHONG M L, NING G Q, LIU W J, *et al.* Fundamental aspects of laser rapid & flexible manufacturing of metallic components [J]. *Applied Laser*, 2001, 21(3): 76-78 (in Chinese).
- [6] WU J, GAO B, TAN H, *et al.* Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(8): 1139-1142 (in Chinese).
- [7] WU W H, YANG Y Q. Key techniques of selective laser melting rapid prototyping system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(8): 175-180 (in Chinese).
- [8] WANG C L, YANG Y Q, WU W H. Experimental study on rapid prototyping of Ti-Ni alloy by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(s1): 190-195 (in Chinese).
- [9] WU W H, YANG Y Q, WEI G Q. Direct manufacturing of precision metal parts by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(s1): 175-179 (in Chinese).
- [10] KRUTH J P, FROYEN L, VAERENBERGH J V, *et al.* Selective laser melting of iron-based powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/3): 616-622.
- [11] HU Q W, YANG T P, LI P, *et al.* Fabrication and affecting factors of metallic parts by means of laser freeforming [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 403-441 (in Chinese).
- [12] ZHAO J F, WU X M, TANG Y X, *et al.* Synthesis error analysis of rapid prototyping technology by using laser sintering [J]. *Journal of Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999(2): 26-29 (in Chinese).
- [13] YADROITSEV I, BERTRAND P, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8064-8069.