

个性化钛合金假体的激光金属直接成形制造工艺

秦 勉¹, 刘亚雄¹, 王 玲¹, 李涤尘¹, 靳忠民¹,
刘彦普², 白石柱², 王晓毅³, 宣 鸣³

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

(2. 第四军医大学, 陕西 西安 710032)

(3. 四川大学 华西口腔医院口腔疾病研究国家重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要: 将激光金属直接成形技术应用于个性化钛合金假体的制造, 能根据假体的三维模型直接制造出相应的零件, 具有制造过程周期短和加工出的个性化假体力学性能好的优点。通过研究激光金属直接成形的曲率效应和倾斜角度对几何精度的影响, 为激光金属直接成形的工艺模型设计准则提供参考, 使假体成形件具有较高的精度。制造出的个性化假体的力学性能和化学成分经过检测, 均符合假体的相关国家和医药行业标准, 有两例个性化钛合金假体已经成功应用于临床并取得良好的效果。

关键词: 激光金属直接成形; 个性化; 假体

中图分类号: TG146.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-1924-05

对于骨缺损的修复, 现在被外科医生广泛接受的修复方法是为患者量身定制个性化假体。然而, 单纯依靠机械加工方法难以适应单件个性化假体的制造。3D 打印突破了传统机械加工的局限, 特别适合制造形状复杂的个性化假体等零件, 能实现患者缺损的个性化精确修复^[1,2]。

西安交通大学在国内率先将 3D 打印与精密铸造技术相结合, 于 2001 完成了国际首例个性化假体的设计与制造, 并成功应用于临床。该方法具有成本低和形态适配性好的优点^[3-5], 但是要涉及到光固化快速成形工艺和铸造工艺的控制, 过程复杂、周期长, 不能满足部分患者(特别是肿瘤、车祸患者)的快速修复需求。

激光金属直接成形技术能根据零件的 CAD 模型, 实现金属零件的快速、近净成形, 极大地缩短了加工周期。并且制造出的零件致密度高、力学性能好。因此, 在个性化假体等复杂零件的制造上有广阔的应用前景^[6-8]。

颌面修复假体对力学和形状的要求最高, 本研究主要针对颌面修复假体的制造, 采用生物相容性好的 Ti6Al4V 合金, 研究了用激光金属直接成形制造个性化钛合金下颌骨假体的工艺方法, 通过实验得出了曲率效应和倾斜角度对成形件几何精度的影响, 为工艺模型设计准则的建立提供参考, 并对成形件的力学性能和化学

成分进行了检测和评价。结果表明, 制造的个性化假体满足力学性能和化学成分的要求, 并取得了良好的临床修复效果。

1 激光金属直接成形的制造工艺

个性化钛合金假体的激光金属直接成形原理主要包括个性化假体的工艺模型设计, 激光金属直接成形制造和后处理这 3 个过程。

首先根据在医院获取的螺旋 CT 数据, 利用图像处理软件重建出下颌骨的三维模型。然后根据医生的手术方案, 在三维软件上对患者进行截骨等模拟手术。最后利用人颌面左右两侧的自然对称性, 将健侧的模型镜像后进行布尔运算, 再经过适当的修剪、光顺等就得到个性化下颌骨假体的 CAD 模型^[9,10], 如图 1 所示。

在用激光金属直接成形系统加工零件时, 倾斜角度较大的部分, 熔池容易悬空造成塌陷, 因此个性化假体的模型设计好之后, 还需要设计用于激光金属直接成形的工艺模型。

工艺模型的设计过程主要分为假体模型的定位与支撑添加。个性化假体的定位就是使模型尽可能多的部分与工作台 Z 轴的夹角小于极限倾斜角度的过程。但由于个性化假体特殊的自由曲面, 不能保证所有部分与

收稿日期: 2016-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51275387); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 秦 勉, 男, 1991 年生, 硕士生, 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054, 电话: 029-83395386, E-mail: qinmian0928@stu.xjtu.edu.cn

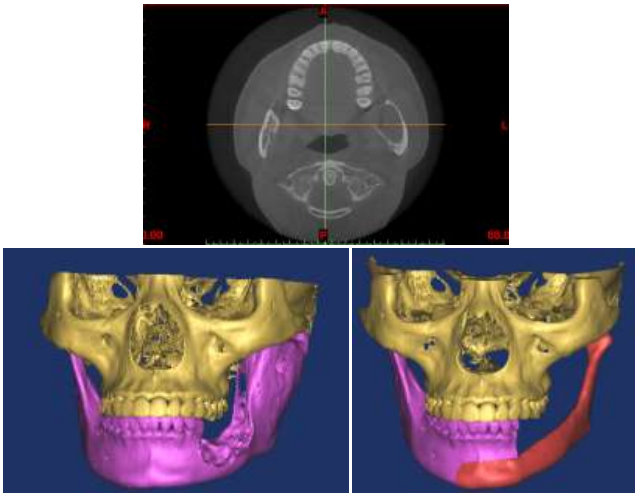


图 1 个性化下颌骨假体原位设计

Fig.1 *In situ* design of the customized mandible implant model

Z 轴的夹角都小于极限倾斜角度，因此要适量添加支撑。为了提高假体的精度，个性化假体的关键部位（如定位板内侧）不能添加支撑。同时要最大限度减小支撑的体积，从而减少成形及后处理的时间^[11]，如图 2 所示为添加支撑后的工艺模型。

选用 Ti6Al4V 粉末，颗粒直径为 50~150 μm，粉末为球形雾化粉末，具有很好的流动性。基板材料为 Ti6Al4V，几何尺寸为 150 mm×100 mm×3 mm。

西安交通大学激光金属直接成形系统，主要包括 Nd: YAG 激光器、数控系统、三轴联动工作台、同轴送粉系统和冷却系统。

开始加工前，要在真空干燥箱内将钛合金粉末在温度 120 °C 下干燥 6 h，去除水分，以增强其流动性。将基板用砂纸打磨光滑，并用无水乙醇清洗干净，然后将基板固定在工作台上。将个性化假体的工艺模型用分层切片软件处理，分层厚度为 0.1 mm，得到加工路径数据，把加工路径导入激光金属直接成形设备的计算机内开始加工。为防止钛合金氧化，在工作台上安装有惰

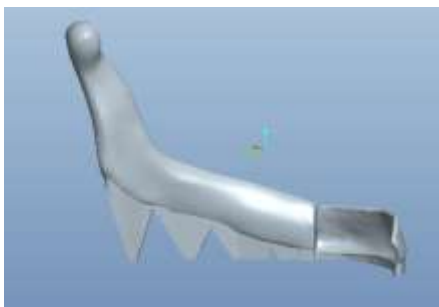


图 2 添加支撑后的个性化假体模型

Fig.2 Customized implant model with support

性气体保护箱，通入氩气进行保护^[12]。根据前期的实验探索，本设备成形 Ti6Al4V 合金的成形工艺参数如表 1 所示。

由于激光金属直接成形是通过高功率的激光将金属粉末熔覆成形的，因此成形件内有较大的残余内应力，为避免产生形变，对成形件要进行去应力退火。退火后用线切割将钛合金假体从基板上切割下来，经过机械打磨、化学腐蚀、打孔、喷砂和抛光后得到钛合金假体的成品。术前体外模拟之后，经过清洁和消毒处理后的假体就可以植入患者体内。

2 几何精度研究与评价

个性化假体的修复效果取决于假体的精度，因此研究假体成形件的精度至关重要。在现有成熟的钛合金成形工艺基础上，由于个性化假体具有形状不规则的特点，影响其精度的 2 大重要因素是曲率和倾斜角度。

2.1 曲率对精度的影响

为了研究曲率对成形件尺寸精度的影响，在优化的钛合金成形工艺参数下，分别加工出平面板结构（尺寸为 15 mm×10 mm×5 mm 的长方体），和曲率半径分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm 的圆柱各 3 组，圆柱的高度均为 5 mm。用游标卡尺测量每个样件上中下 3 个部位的实际尺寸并求平均，然后再将 3 组样件的数据求平均值，得出平均尺寸。由于平面板结构得到的是系统误差，因此将圆柱的尺寸误差减去系统误差后得到曲率造成的误差，结果如图 3 所示。

表 1 Ti6Al4V 合金的成形工艺参数
Table 1 Process parameters of Ti6Al4V forming

Measured laser power, P/W	Scan speed, V/mm s ⁻¹	Gas velocity, Q/L min ⁻¹	Powder delivery speed, M/g min ⁻¹	Filling spacing, H/mm
115~135	8~10	4	2~3	0.32

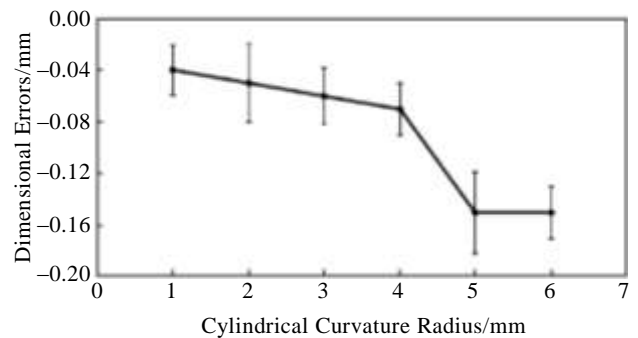


图 3 曲率半径对成形件尺寸误差的影响

Fig.3 Influence of the radius on the dimensional error of the formed parts

由图可知，曲率造成的误差都在-0.04~0.15 mm 之间，且随着曲率半径的增大而减小。相对于平板状结构，有一定曲率结构的成形件不存在边角处的散热死区，散热效率高、熔池温度低、热影响区小，粉末熔覆时会有较多的粉体掉落，因此成形尺寸较小。同理，曲率半径增大时，金属体积增大，熔池与金属之间的传导散热所占比例大，由于传导散热效率高于熔池与空气间的对流散热，因此热影响区减小，成形尺寸也减小。由于个性化假体模型具有一定的曲率，在建立工艺模型时，应该使整个模型过渡均匀，避免形状突变，以便于补偿系统误差。

2.2 倾斜角度对精度的影响

为了研究倾斜角度对成形件尺寸精度的影响，选用长 10 mm，法向厚度 2 mm，高 10 mm 的长方体成形件进行试验，倾斜角度分别为 0°、15°、30°，各加工 3 组样件，每个样件测量上中下 3 个部位的实际尺寸并求平均，然后再将 3 组样件的数据求平均值，得出每组的尺寸误差。最后将每组的尺寸误差减去倾斜角度为 0° 时的系统误差得到结果如图 4 所示。

由图可知，尺寸误差和标准差都随着倾斜角度增加而增加。原因是倾斜角度增大后，倾斜侧形成散热死区，熔池温度很高，粘粉量增大，尺寸误差增大，同时粗糙度增加也造成标准差增大。因此在建立工艺模型时，应该避免出现较大的倾斜角度，关键部位要尽量与 Z 轴平行，这样能减小成形件的尺寸误差，从而保证个性化假体的修复效果。

3 力学与化学性能评价

3.1 力学性能

通过拉伸试验测量成形件的力学强度，检测结果如表 2 所示^[11]。可知，经过去应力退火的钛合金零件的屈服极限达到 922 MPa，高于中华人民共和国医药行

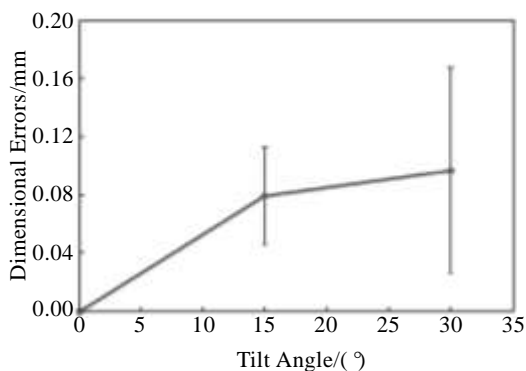


图 4 倾斜角度对尺寸误差的影响

Fig.4 Influence of the inclined angle on the dimensional error of the formed parts

表 2 钛合金金属直接成形件力学性能

Table 2 Mechanical properties of the Ti6Al4V parts manufactured by laser metal direct forming

	Yield strength /MPa	Elongation/%	Reduction of area/%
Ti6Al4V parts			
manufactured by laser metal direct forming	922	4.6	17.9
YY0117.1 (requirements for mechanical properties of forgings)			
for mechanical properties of forgings	860	10	Not required
YY0117.2 (requirements for mechanical properties of castings)			
for mechanical properties of castings	835	5	10

业标准《外科植入物 骨关节假体锻、铸件》YY0117.1-2005^[13]和 YY0117.2-2005^[14]中对锻件和铸件假体强度的要求，延伸率虽然稍低于标准对铸件假体的要求，但差距不大，且断面收缩率大于铸件的要求。因此，金属成形件整体的力学性能是满足植入物要求的。

3.2 化学成分

由西北有色金属研究院对钛合金粉末及激光金属直接成形样块各成分的质量分数进行化验，其结果如表 3 所示。将样块与金属粉末的化学成分相比，可见氧含量的增加量最大，达 0.03%。尽管加工时用氩气进行保护，但钛合金非常活跃，存在一小部分被氧化的情况。参考中华人民共和国医药行业标准《外科植入物 骨关节假体锻、铸件》中对假体化学成分的要求，可知成形件及粉末的化学成分都符合标准要求。

4 临床应用案例

两位患者都患有下颌骨成釉细胞瘤，为了阻止肿瘤的扩散，需行下颌骨成釉细胞瘤扩大切除术，截骨的切口在肿瘤外侧 5 mm 处。肿瘤切除后，需要植入个性化假体修复缺损的下颌骨。经数字化三维设计和激光金属直接成形制造得到个性化下颌骨假体，然后经过后处理得到个性化下颌骨假体成品件，分别如图 5、图 6 所示。

表 3 样品的元素含量

Table 3 Element content of the samples (ω/%)

Sample	Al	V	Fe	C	O	N	H
Powder	6.32	4.39	0.15	0.014	0.15	0.022	0.0085
Block	6.34	4.41	0.15	0.015	0.18	0.027	0.004

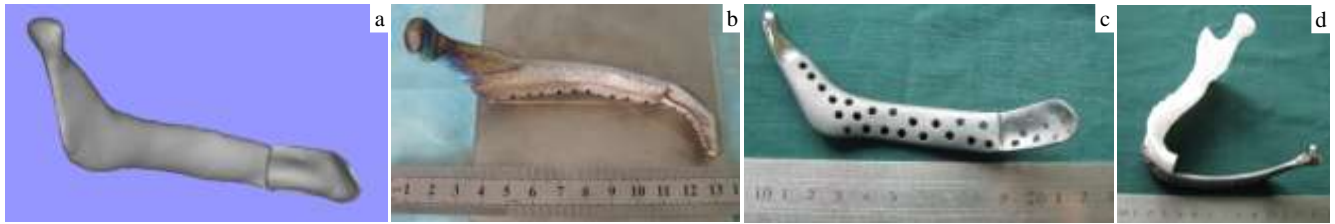


图5 患者一

Fig.5 Patient 1: (a) three-dimensional model, (b) formed implant, (c) finished implant, and (d) fitted with the original model

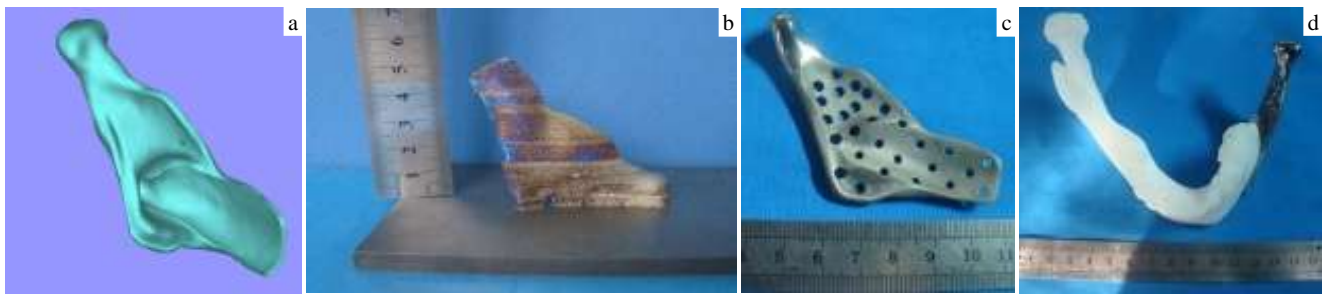


图6 患者二

Fig.6 Patient 2: (a) three-dimensional model, (b) formed implant, (c) finished implant, and (d) fitted with the original model

5 结 论

1) 利用激光金属直接成形制造个性化钛合金假体有周期短、速度快的优点。能根据个性化假体的 CAD 模型直接成形出相应的零件,经过少量后处理后就可以得到成品。

2) 对于个性化假体的成形,模型的曲率和倾斜角度是影响几何精度的 2 个重要因素。建立工艺模型时,避免出现较大的形状突变和减小关键部位的倾斜角度,是保证成形零件几何精度的重要措施。

3) 激光金属直接成形制造出的个性化钛合金假体,力学性能和化学成分均符合国家医药行业标准的 要求。

参考文献 References

[1] Qiu Weiliu(邱蔚六). *China Reconstructive Surgery*(中国修复重建外科杂志)[J], 2006, 20(4): 339

[2] Giannatsis J, Dedoussis V. *Int J Adv Manuf Technol*[J], 2009, 40: 116

[3] Liu Yaxiong(刘亚雄), He Jiankang(贺健康), Qin Mian(秦 勉) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(S1): 339

[4] Liu Yaxiong, Li Dichen, Lu Bingheng et al. *Rapid Prototyping* [J], 2003, 9(3): 167

[5] Singare S, Dichen L, Bingheng L et al. *Medical Engineering & Physics*[J], 2004, 26(8): 671

[6] Zhang Anfeng(张安峰), Li Dichen(李涤尘), Lu Bingheng(卢秉恒). *Ordnance Mat Sci Eng*(兵器材料科学与工程)[J], 2007, 30(5): 68

[7] Huang Weidong(黄卫东), Lin Xin(林 鑫), Chen Jing(陈 静) et al. *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 10

[8] Liu Yong(刘 勇), Li Yanmin(李延民), Huang Xiaoping(黄小平) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2007, 34(S1): 163

[9] Wang Qian(王 千), Liu Yaxiong(刘亚雄), Du Rukun(杜如坤) et al. *Xi'an Jiaotong University Xuebao*(西安交通大学学报)[J], 2009, 43(1): 43

[10] Liu Yaxiong(刘亚雄), Li Dichen(李涤尘), Lu Bingheng(卢秉恒) et al. *J Pract Stomatol*(实用口腔医学杂志)[J], 2002, 18(5): 395

[11] Xie Hang(谢 航). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013

[12] Zhu Gangxian(朱刚贤), Zhang Anfeng(张安峰), Li Dichen(李涤尘) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2009, 29(4): 275

[13] YY0117.1-2005[S]. 2005

[14] YY0117.2-2005[S]. 2005

Laser Metal Direct Forming of the Customized Titanium Implants

Qin Mian¹, Liu Yaxiong¹, Wang Ling¹, Li Dichen¹, Jin Zhongmin¹,
Liu Yanpu², Bai Shizhu², Wang Xiaoyi³, Xuan Ming³

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

(2. The Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

(3. State Key Laboratory of Oral Diseases, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Laser metal direct forming technology was applied to manufacture customized titanium implants, and then titanium implants can be directly formed according to their CAD models. This method possesses a short manufacturing cycle. Additionally, the customized titanium implants manufactured in this method have good mechanical properties. The influences of curvature effect and inclination angle on the geometric precision of laser metal direct forming parts were studied for the establishment of the model design criteria. Therefore, the formed titanium implant could achieve high precision. Both mechanical properties and chemical composition of the manufactured customized titanium implants comply with relevant national and pharmaceutical industry standards. Two cases of customized titanium implants manufactured by laser metal direct forming have been successfully applied in clinical and have achieved good results.

Key words: laser metal direct forming; customized; implant

Corresponding author: Liu Yaxiong, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086-29-83395387, E-mail: yaxiongliu@mail.xjtu.edu.cn