

# 等离子抛光时间对 3D 打印多孔钛表面粗糙度的影响

崔祎赟<sup>1</sup>, 熊夏青<sup>1</sup>, 徐凯<sup>1,2</sup>, 王金武<sup>1,3</sup>, 万克明<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 转化医学研究院, 上海 200240)

(2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

(3. 上海交通大学医学院附属第九人民医院骨科 上海市骨科内植物重点实验室, 上海 200011)

**摘要:** 利用 3D 打印技术制作仿天然骨的多孔钛骨科植入物具有广阔的前景, 等离子抛光技术作为表面技术的一种, 可有效去除 3D 打印多孔钛零件表面附着的颗粒物, 降低表面粗糙度。采用三重扫描激光显微系统分析了不同等离子抛光时间下多孔钛零件外表面及内层孔结构外表面的表面形貌并测量其表面粗糙度值。结果表明, 抛光时间越长, 表面越顺滑, 表面粗糙度越低, 抛光时间是影响表面粗糙度的重要因素。根据抛光时间与表面粗糙度的拟合曲线, 得出了在保证零件内外表面的表面粗糙度在最优值范围下的抛光时间区间。

**关键词:** 等离子抛光; 多孔钛; 3D 打印; 表面粗糙度

**中图分类号:** TB383

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)06-2161-06

钛及钛合金因为其良好的生物相容性、耐蚀性和力学性能, 被广泛地应用于骨组织修复<sup>[1]</sup>。由于人体骨骼的弹性模量 (0.5~20 GPa) 远低于金属的弹性模量, 虽然钛合金的弹性模量比不锈钢或 Co-Cr 合金等临床上常用金属材料低, 但传统加工方法制造生产的致密钛合金材料相比人体骨骼仍拥有较高的弹性模量, 因此钛合金植入物内部应采用多孔微结构, 使其弹性模量降至与骨骼相匹配的水平, 避免应力遮挡效应<sup>[2,3]</sup>; 同时钛合金植入物内部的多孔结构为骨细胞的长入提供了物理空间<sup>[4]</sup>, 多孔结构可引导骨长入, 形成骨整合, 被认为是解决假体松动的有效途径<sup>[5]</sup>。传统多孔零件制作方法有液相法、固相法、沉积法等, 这些工艺方法无法精确控制孔径尺寸与孔隙分布<sup>[6]</sup>。3D 打印技术通过层层加工、逐层堆叠方式得到所需的三维实体, 具有很高的设计和制造自由度, 可快速、精准、定制化地加工出复杂结构的钛合金植入物, 在医用领域具有巨大的应用潜力<sup>[7]</sup>, 激光选区熔化 (selective laser melting, SLM) 和电子束熔化 (electric beam melting, EBM) 是 2 种最为常见的多孔钛植入物结构的 3D 打印制造技术<sup>[8,9]</sup>。

然而, 3D 打印加工过程使用钛合金粉末作为原材料, 常会出现钛合金植入物的表面黏附大量球形颗粒

物及未熔融粉末等情况<sup>[10]</sup>, 这些粉末颗粒物没有与基体形成一个整体, 从而形成一种特殊的表面缺陷, 不仅影响了尺寸精度, 还降低了植入物的疲劳性能。由于黏附的颗粒物与实体的结合并不紧密, 在植入过程或植入后与周围组织的磨损过程中, 会逐渐从植入物实体上剥离脱落, 引起炎症等不良反应, 带来新的生物学风险<sup>[11,12]</sup>。后处理抛光加工是去除 3D 打印多孔钛零件表面粉末颗粒物、改善表面质量的理想方式<sup>[13]</sup>, 目前电解抛光已被广泛用于 3D 打印金属件的表面处理<sup>[14]</sup>, 但其使用的强腐蚀性电解液, 可能会引发环境及安全问题<sup>[15]</sup>。电解质等离子抛光是一种针对金属件的全新绿色抛光方法, 既可高效处理形状复杂的工件, 又不会产生污染<sup>[16]</sup>, 在钛合金植入物后处理领域具有很大的发展潜力。

电解质等离子抛光 (以下简称等离子抛光) 是将多孔钛零件 (阳极) 浸入中性抛光液 (阴极) 中, 并对其施加 250~400 V 电压, 抛光液首先进入电解状态, 同时整个电路形成瞬时短路<sup>[17]</sup>。抛光液电解产生的气体与瞬时短路蒸发产生的水蒸气形成了一个包围零件的气层, 电解产生的电子在电场力驱动下向阳极零件运动并击穿气层形成放电通道, 撞击零件表层, 使零件表面金属熔化。同时, 气层在热膨胀与放电电流产

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 国家科技部重点研发计划 (2018YFB1105600, 2018YFA0703000); 国家自然科学基金 (82072412, 81772326); 上海市科委项目 (19XD1434200, 18431903700); 上海交通大学医学院双百人计划 (20152224); 转化医学国家重大科技基础设施 (上海) 开放课题 (TMSK-2020-118)

作者简介: 崔祎赟, 女, 1991 年生, 硕士, 上海交通大学转化医学研究院, 上海 200240, E-mail: cyysjtu@sjtu.edu.cn

生的磁场作用下产生气爆而将表面金属熔化去除<sup>[18]</sup>。由于零件粉末颗粒物残留的凸起位置从微观上看阳极与阴极距离短，电子达到时间短，更易产生放电现象，该微观凸起优先被去除<sup>[19]</sup>，且抛光时间越长，去除量越大，表面粗糙度越低<sup>[20]</sup>，然而，大多数植入物的表面粗糙度建议在 1~2 μm 之间<sup>[21]</sup>，因此控制多孔钛植入物零件的抛光时间尤为重要。

### 1 实验

采用 SLM 技术制备多孔钛零件。试验采用加拿大 AP&C 公司生产的 23 级 Ti-6Al-4V 粉末，化学成分如

表 1 所示，粉末粒径为 15~45 μm，如图 1 所示。多孔钛零件的 SLM 成形设备采用美国 3D Systems 公司生产的型号为 ProX320 的金属 3D 打印机，该打印机配备 500 W 单模连续光纤激光器，激光波长为 1070 nm，光斑尺寸为 75 μm，本实验的多孔钛零件成形工艺参数如表 2 所示。

多孔钛零件由若干个杆件宽度(W)为 0.2 mm、杆件长度(L)为 0.5 mm 的钻石分子结构单元与一个外径为 8 mm、高度为 2 mm 的圆柱体进行布尔运算求得（见图 2）。

试验首先将 3D 打印的多孔钛零件，如图 3 所示，

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金粉末的化学成分

**Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy powder (wt%)**

N	C	H	Fe	O	Al	V	Y	Ti
0.03	0.08	0.012	0.25	0.13	5.5~6.5	3.5~4.5	0.005	Bal.

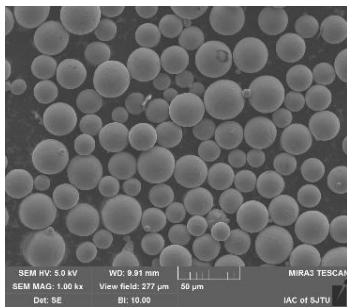


图 1 钛合金粉末形貌

Fig.1 Morphology of Ti-6Al-4V powder

表 2 Ti-6Al-4V 钛合金 SLM 成形工艺参数

**Table 2 Forming parameters of Ti-6Al-4V alloy produced by SLM**

Laser power, P/W	Velocity, v/mm s <sup>-1</sup>	Scan strategy	Layer thickness, d/μm	Oxygen content/μg g <sup>-1</sup>
125	2800	Partitioned orthogonal scanning	30	25

在超声波清洗去除表面污渍后进行喷砂处理，喷砂以 0.6 MPa 压缩空气为动力，将二氧化硅砂料喷射到零件表面，完成初步清洁；最后进行等离子抛光处理，其使用的抛光液 pH 值为 6.1、抛光盐浓度为 4% 的硫酸铵溶液，抛光电流设定 100 A，抛光液温度设定 98.2 °C。利用二维影像测量仪观察未处理、喷砂处理、等离子抛光处理后零件的表面质量，如图 4 所示。

为了研究等离子抛光时间对多孔钛零件外表面及内层孔结构外表面（以下简称内部表面）的形貌特征及表

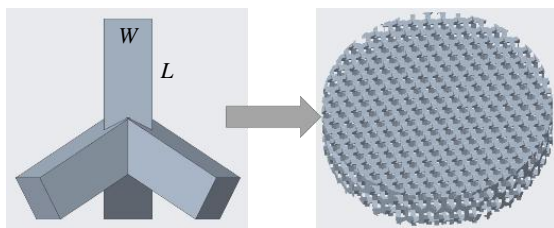


图 2 由钻石分子结构单元组成的多孔钛模型

Fig.2 Model of the porous titanium composed of units with diamond molecule structure

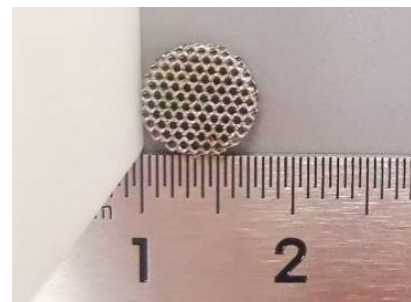


图 3 多孔钛合金零件

Fig.3 Porous titanium part

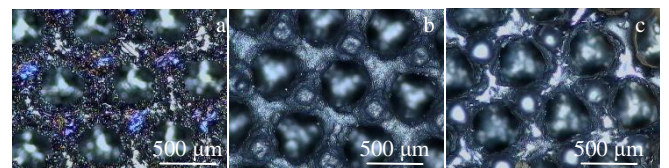


图 4 多孔钛零件表面图像

Fig.4 Surface images of porous titanium part: (a) 3D printing, (b) sand blasting, and (c) plasma polishing

面粗糙度影响, 试验分别对相同参数打印的 10 个多孔钛零件进行不同时间的抛光, 如表 3 所示。

3D 打印多孔钛零件的表面形貌及表面粗糙度采用基恩士 VK-X3000 的三重扫描激光显微系统进行测量。测量表面粗糙度过程, 在每个零件的外表面及内部表面各随机取样 3 处进行测量, 并求取 3 次测量结果的平均值。测试时物镜选用 20×, 测试分辨率 1080×720。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌

图 5 是等离子抛光处理不同时间后的多孔钛零件外表面形貌的 3D 图像。图 6 是等离子抛光处理不同时间后的多孔钛零件内部表面形貌的 3D 图像。其中图 5a、6a 分别为经过喷砂处理的零件外表面及内部表面形貌。

由图 4 和图 5a 可以得出, 喷砂处理利用高速砂流的冲击作用清理和粗化基体表面, 可以去除多孔钛零件表面的粉末颗粒物, 但无法去除由 3D 打印加工而形成的熔道轨迹。同时, 由图 6a 可得, 喷砂处理对内部表面颗粒物的去除效果劣于外表面, 内部表面仍有较多球状结构。

由图 5b~5j、图 6b~6j 可知, 等离子抛光可有效去除零件外表面及内部表面的颗粒物, 且随着抛光时间的增加, 零件外表面及内部表面滑顺。根据图 5 可知, 在 0~12 min 内, 零件外表面上的熔道搭接特征随着抛光时间的增加而逐渐消失, 外表面变顺滑, 表面形貌随抛光时间的

变化较明显; 在抛光 15 min 后, 外表面形貌几乎没有改变。由图 6 可知, 在 0~15 min 内, 零件内部表面的粉末颗粒、熔道搭接特征随着抛光时间的增加而逐渐变弱直至消失, 内部表面变顺滑; 在抛光 18 min 后, 内部表面形貌几乎不再改变。

### 2.2 表面粗糙度测定

等离子抛光处理不同时间后零件外表面、内部表面的表面粗糙度见表 4, 其实验曲线如图 7, 其中  $R_a$  表示平均表面粗糙度值。多孔钛零件喷砂处理后外表面的  $R_a$  为 6.81  $\mu\text{m}$ 、内部表面的  $R_a$  为 9.428  $\mu\text{m}$ ; 等离子抛光处理 27 min 内, 零件外表面的  $R_a$  最优可达 0.597  $\mu\text{m}$  (抛光 27 min), 内部表面的  $R_a$  最优可达 1.95  $\mu\text{m}$  (抛光 21 min)。

植入物零件的  $R_a$  为 1~2  $\mu\text{m}$  时, 理论上最适合实现植入物与骨组织的快速牢固结合。 $R_a$  高于 2  $\mu\text{m}$  的植入物会产生骨畸形或达不到结合效果,  $R_a$  过低则不适合细胞黏附<sup>[22]</sup>, 因此表面处理后植入物零件的  $R_a$  应控制在一定数值范围内。根据表 4 及图 7 可知, 当抛光时间为 12、15、18 min 时, 零件外表面  $R_a$  分别为 1.786、1.58、1.103  $\mu\text{m}$ , 内部表面  $R_a$  为 3.46、3.035、2.691  $\mu\text{m}$ , 内部表面  $R_a$  高于 2  $\mu\text{m}$ , 内部表面的  $R_a$  偏高; 当抛光时间为 21 min 时, 零件外表面  $R_a$  为 1.076  $\mu\text{m}$ , 内部表面  $R_a$  为 1.95  $\mu\text{m}$ , 该内外表面粗糙度值理论上较为符合理想植入物的表面粗糙度值。当继续增加抛光时长, 外表面  $R_a$  继续下降, 低于 1  $\mu\text{m}$ , 外表面的  $R_a$  偏小。

从微观角度看, 等离子抛光主要由于表面金属受到高速电子冲击产生热量引起熔化与气层发生气爆去除熔化金属的过程<sup>[23]</sup>, 由于多孔钛零件的内部表面电子的可达性不如外表面, 在实现对内部表面抛光的过程可能存在对外表面过抛的现象, 因此在抛光工艺不变的情况下, 抛光时间应控制在合理范围内。

表 3 10 个多孔钛零件的等离子抛光时间

**Table 3 Electrolytic plasma polishing time of 10 porous titanium parts**

Part No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Polishing time/min	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27

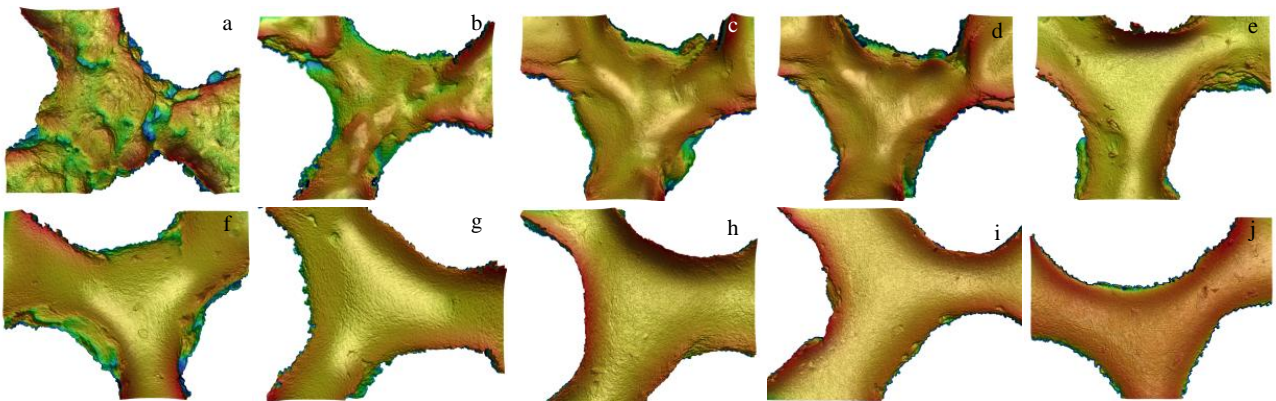


图 5 抛光处理不同时间零件外表面的 3D 图像

Fig.5 3D images of the external surface after polishing for different time: (a) 0 min, (b) 3 min, (c) 6 min, (d) 9 min, (e) 12 min, (f) 15 min, (g) 18 min, (h) 21 min, (i) 24 min, and (j) 27 min

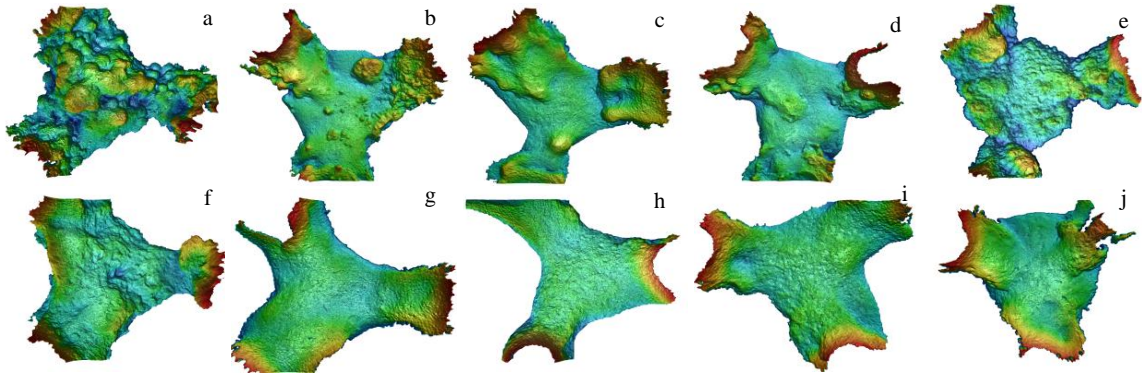


图 6 抛光处理不同时间零件内部表面的 3D 图像

Fig.6 3D images of the inner surface after polishing for different time: (a) 0 min, (b) 3 min, (c) 6 min, (d) 9 min, (e) 12 min, (f) 15 min, (g) 18 min, (h) 21 min, (i) 24 min, and (j) 27 min

表 4 等离子抛光不同时间后零件外表面、内部表面的表面粗糙度均值

Table 4  $R_a$  of the external and inner surface after different polishing time

Polishing time/min	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
External surface, $R_a/\mu\text{m}$	6.81	4.047	3.253	2.991	1.786	1.58	1.103	1.076	0.706	0.597
Inner surface, $R_a/\mu\text{m}$	9.428	5.221	4.113	3.815	3.46	3.035	2.691	1.95	1.953	2.083

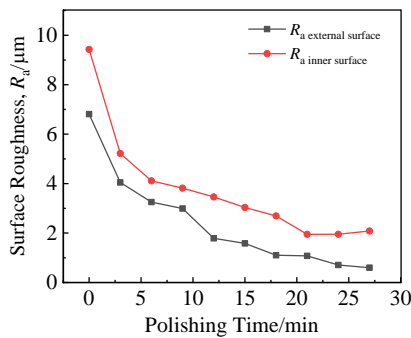


图 7 不同抛光时间下表面粗糙度实验曲线

Fig 7 Curves of surface roughness vs different polishing time

### 2.3 模型建立与曲线拟合

在实验中，设定抛光液浓度、温度、电流等抛光条件不变，则放电去除率和放电坑深可认为不变，那么，可以认为粗糙度下降速度只和零件表面形貌有关，即粗糙度下降速度随着粗糙度的变化而变化。从实验曲线来看，原始粗糙度越大，曲线下降得越快，在其他因素不变的情况下，粗糙度的下降速度随着粗糙度的下降而下降。此外，抛光 12 min 后，曲线趋于平坦，粗糙度的下降速度变缓，在抛光 21 min 后，粗糙度变化较少，粗糙度的下降速度趋于 0。由于单次放电坑深的存在，等离子抛光理论上存在一个最小粗糙度，当零件表面粗糙度等于最小粗糙度时，抛光时间的增加不会改变零件表面粗糙度。

基于上述分析，可以得到零件表面粗糙度与抛光时间的微分方程为：

$$\begin{cases} \frac{dR_a}{dt} = -k(R_a - R_0) \\ R_a(0) = R_{a0} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $k$  表示粗糙度的下降速度  $\frac{dR_a}{dt}$  与表面粗糙度与最小粗糙度的差值  $(R_a - R_0)$  的比例系数， $R_0$  表示抛光过程的最小粗糙度值。

该微分方程的通解为：

$$R_a = R_0 + C \exp(-kt) \quad (2)$$

将  $R_a(0) = R_{a0}$  代入公式(2)，得  $C = R_{a0} - R_0$ ，若令  $R = R_{a0} - R_0$  为零件原始粗糙度与抛光过程最小粗糙度的差值。该微分方程的特解为：

$$R_a = R_0 + R \exp(-kt) \quad (3)$$

使用 origin 软件以  $R_a = R_0 + R \exp(-kt)$  作为拟合公式进行非线性拟合得到零件外表面、内部表面  $R_a$  与时间  $t$  的拟合曲线如图 8 所示。

外表面  $R_a$  拟合曲线的  $R_0 = 0.54$ 、 $R = 5.99$ 、 $k = 0.126$ ，得到拟合曲线  $R_{a \text{ external surface}} = 0.54 + 5.99 \exp(-0.126t)$ ；从图 8 可直观观察到，实验数据的各点均落在拟合曲线上或者附近，曲线校正决定系数为 0.9698，该值约接近 1，表示拟合程度好，说明外表面曲线的拟合效果较好。

内部表面  $R_a$  拟合曲线的  $R_0$  取值 2.06、 $R$  取值 6.81、 $k$  取值 0.212，得到拟合曲线  $R_{a \text{ inner surface}} = 2.06 + 6.81 \exp(-0.212t)$ ；

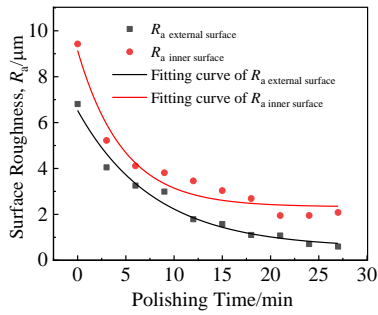


图 8 不同抛光时间下表面粗糙度拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of surface roughness vs different polishing time

曲线校正决定系数为0.947, 小于外表面拟合曲线的校正决定系数, 说明内部表面曲线的拟合效果劣于外表面曲线的拟合。多孔钛零件孔径较小, 外表面对内部表面存在遮挡, 高速电子对内部表面的摩擦碰撞受到外表面的干扰, 对表面抛光处理产生了一定影响; 同时由于遮挡, 对内部表面的表面粗糙度的测量也产生了一定误差。但是, 内部表面的校正决定系数较接近1, 可接受此拟合效果。

根据 $R_{a \text{ external surface}}$ 、 $R_{a \text{ inner surface}}$  2个拟合公式, 计算得到在0~30 min内, 内外表面的表面粗糙度结果见表5。

表 5  $R_a$  拟合值

Table 5 Fitting values of  $R_a$

t/min	$R_{a \text{ external surface}}/\mu\text{m}$	$R_{a \text{ inner surface}}/\mu\text{m}$
0	6.530	8.870
1	5.821	7.569
2	5.196	6.517
3	4.645	5.665
4	4.159	4.977
5	3.730	4.419
6	3.353	3.969
7	3.020	3.604
8	2.726	3.309
9	2.467	3.070
10	2.239	2.877
11	2.038	2.721
12	1.861	2.595
13	1.704	2.493
14	1.566	2.410
15	1.445	2.343
16	1.338	2.289
17	1.243	2.245
18	1.160	2.210
19	1.087	2.181
20	1.022	2.158
21	0.965	2.139
22	0.915	2.124
23	0.870	2.112
24	0.831	2.102
25	0.797	2.094
26	0.766	2.087
27	0.740	2.082
28	0.716	2.078
29	0.695	2.075
30	0.677	2.072

根据表5的 $R_a$ 拟合值可知, 在此等离子抛光工艺参数条件下, 抛光时间在12~20 min时对外表面的表面粗糙度位于1~2  $\mu\text{m}$ 之间; 当抛光时间大于20 min时, 内部表面的 $R_a$ 趋于2.1  $\mu\text{m}$ 。

### 3 结 论

1) 等离子抛光可有效去除多孔钛零件表面附着的颗粒物, 降低表面粗糙度, 并且在抛光一段时间后, 表面形貌和表面粗糙度趋于稳定。

2) 针对多孔钛植入物结构, 等离子抛光存在过抛现象, 抛光时间的控制至关重要。抛光时间的控制, 可保证零件内外表面的粗糙度值在合理范围内。针对多孔钛零件外表面、内部表面的 $R_a$ 与抛光时间 $t$ 的关系, 得到校正决定系数接近1的拟合曲线, 拟合效果较好。根据拟合曲线, 可得到在此抛光工艺及装夹方式下最优的抛光时间范围。

3) 后续将进一步研究优化抛光工艺参数及改变装夹位置来控制外表面粗糙度及降低内部表面粗糙度。

### 参考文献 References

[1] Li S J, Zhao S, Hou W T *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2016, 18(1): 34

[2] Gao Ruining(高芮宁), Xiong Yinze(熊胤泽), Zhang Hang(张航) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50 (1): 249

[3] Roseti L, Parisi V, Petretta M *et al. Materials Science & Engineering C*[J], 2017, 78: 1246

[4] Li S J, Li X K, Hou W T *et al. Science China Materials*[J], 2018, 61(4): 525

[5] Zhang X Y, Fang G, Sander L *et al. Acta Biomaterialia*[J], 2019, 84: 437

[6] John B. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559

[7] Naoya T, Shunsuke F, Mitsuru T. *Materials Science and Engineering C*[J], 2016, 59: 690

[8] Li Z H, Liu C, Wang B F *et al. RSC Advances*[J], 2018, 8(22): 12 471

[9] Qin Mian(秦勉), Liu Yaxiong(刘亚雄), Wang Ling(王玲) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(7): 1924

[10] Ablyaz T R, Muratov K R, Radkevich M M *et al. Russian Engineering Research*[J], 2018, 38(6): 491

[11] Hollander D A, von Walter M, Wirtz T *et al. Biomaterials*[J], 2006, 27(7): 955

[12] Sun Jiayi(孙嘉怿). *Modern Instruments & Medical Treatment*(现代仪器与医疗)[J], 2020, 26(4): 1

[13] Frazier W E. *Journal of Materials Engineering and*

- Performance*[J], 2014, 23(6): 1917
- [14] Santana G A, Pessanha H G E, Alexandre Z R *et al. The Journal of Prosthetic Dentistry*[J], 2005, 93(4): 378
- [15] Birch M A, Johnson-Lynn S, Nouraei S *et al. Biomed Mater*[J], 2012, 7: 035 016
- [16] Bernhardt A, Schneider J, Schroeder A *et al. Materials Science & Engineering C*[J], 2021, 119: 111 631
- [17] Nestler K, Ottger-Hiller F B, Adamitzki W *et al. Procedia CIRP*[J], 2016, 42: 503
- [18] Parfenov E V, Yerokhin A, Nevyantseva R R *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2015, 269: 2
- [19] Zeidler H, Boettger-Hiller F, Edelmann J *et al. Procedia CIRP*[J], 2016, 49: 83
- [20] Wang J, Suo L C, Guan L L *et al. Advanced Materials Research*[J], 2012, 472: 350
- [21] Nicolas-Silvente A I, Velasco-Ortega E, Ortiz-Garcia I *et al. Materials*[J], 2020, 13(2): 314
- [22] Elias C N, Meirelles L. *Expert Rev Med Devices*[J], 2010, 7(2): 241
- [23] Zong X M, Wang J, Wang Y F *et al. Advanced Materials Research*[J], 2014, 989: 308

## Influence of Electrolytic Plasma Polishing Time on Surface Roughness of Porous Titanium by 3D Printing

Cui Yiyun<sup>1</sup>, Xiong Xiqing<sup>1</sup>, Xu Kai<sup>1,2</sup>, Wang Jinwu<sup>1,3</sup>, Wan Keming<sup>1</sup>

(1. School of Translational Medicine, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(3. Shanghai Key Laboratory of Orthopaedic Implant, Department of Orthopaedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** Porous titanium orthopedic implants fabricated by 3D printing have golden prospects. As one of the surface technologies, electrolytic plasma polishing can effectively remove the powder particles attached to the surface of 3D printed porous titanium parts and can reduce the surface roughness. In this paper, the surface morphology and surface roughness of the external and inner surface tested for different plasma polishing time were analyzed by triple scanning laser microscope. The results show that electrolytic plasma polishing is effective to reduce surface roughness. The longer the polishing time, the smoother the surface and the lower the surface roughness. The polishing time is an important factor affecting the surface roughness. By the fitting curve, the surface roughness of the external and inner surface can be guaranteed to be within a reasonable range by the control of polishing time.

**Key words:** electrolytic plasma polishing; porous titanium; 3D printing; surface roughness

---

Corresponding author: Wang Jinwu, Ph. D., Professor, Shanghai Key Laboratory of Orthopaedic Implant, Department of Orthopaedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, P. R. China, E-mail: jinwu\_wang@163.com