

# 电极感应熔炼气雾化制备 Ti-6Al-4V 合金粉末的性能及其表征

黄传收<sup>1</sup>, 柳中强<sup>1</sup>, 吴苑标<sup>1</sup>, 温利平<sup>1</sup>, 陈进<sup>2</sup>, 肖志瑜<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广州 510640)

(2. 佛山市岁之博新材料科技有限公司, 广东 佛山 528231)

**摘要:** 采用自行研制的无坩埚电极感应熔炼气体雾化设备制备 Ti-6Al-4V 合金粉末。使用环孔型和环缝型两种气雾化喷嘴, 改变雾化压力和熔炼功率, 设计 4 组工艺参数, 研究雾化工艺对粉末性能的影响规律。根据激光选区熔化(SLM)对粉末的要求, 将筛分得到的粒径小于 53  $\mu\text{m}$  的粉末进行表征, 采用 MASTERSIZE 2000 激光粒度分析仪分析不同雾化工艺制备粉末的粒度分布, 采用欧奇奥 500NanoXY+HR 型粒度粒形分析仪对粉末的粒形进行量化表征分析。结果表明, 采用环缝型喷嘴、5 MPa 的雾化压力和 25 kW 的熔炼功率的工艺参数组合制备的粉末效果最佳, 得到的粉末粒径较小且分布集中, 粉末粒度呈近似正态分布,  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$  分别为 19.4、31.9 和 51.5  $\mu\text{m}$ ; 粉末的球形度较高, 粉末圆度的平均值为 90.6%, 欧奇奥钝度的平均值为 92.7%, 超过 80% 粉末的赘生物指数为 0, 卫星粉较少。通过 XRD、SEM、EDS 能谱和氧氮仪等手段对粉末进一步分析, 发现粉末内部组织为不同取向的针状  $\alpha'$  马氏体, 空心粉含量较少, 粉末成分无损耗且氧含量较低。对该粉末进行 SLM 成形, 成形件致密度达到 99.02%, 表面粗糙度为 4.98  $\mu\text{m}$ , 显微硬度  $\text{HV}_{0.5}$  为 3525 MPa。

**关键词:** EIGA; Ti-6Al-4V 合金; 球形粉末; SLM; 性能

中图分类号: TG146.23; TF123.7<sup>3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3302-07

钛合金具有比强度高、耐腐蚀、生物相容性好等优异特性, 使其在航空航天、化工航海以及生物医疗等领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。但钛合金导热系数低、比热小、弹性模量低、化学活性高等特点使其难于机加工<sup>[4]</sup>, 直接近净成形的制造技术在钛合金加工领域具有明显的优势。

增材制造技术近几年发展迅猛, 其成形特点使其对原料具有特殊要求, 松装密度高、流动性好以及易于铺粉均匀的球形粉末是增材制造的理想原料<sup>[5]</sup>。ASTM F3049-14 标准<sup>[6]</sup>对 3D 打印金属粉末进行了规范, 球形度高、流动性好、氧含量低、粒径分布范围窄的粉末最适合于增材制造技术。合金粉末的性能对增材制造过程及最终性能起着至关重要的作用, 开发低成本、高质量粉末制备技术是普及增材制造的必经之路<sup>[7]</sup>。

目前工业上用的激光选区熔化成形金属粉末制备难度大, 昂贵的价格极大地限制了该技术的发展与应用。很多学者采用真空气雾化和旋转电极开展了 3D

打印球形粉末的研究, 取得了一定的进展, 但获得的粉末较粗且没有定量的表征<sup>[8,9]</sup>。电极感应熔炼气雾化 (electrode induction melting gas atomization, EIGA) 法因采用无坩埚感应熔炼, 可以避免引入 C、O 等间隙元素, 在制备活性金属粉末方面具有节约材料、生产灵活以及细粉产出率高等优点, 适宜微细球形粉末的生产<sup>[10]</sup>, 但相关的研究较少, 通常只是一些简要报道。Guo 等<sup>[11]</sup>采用热等静压成形 EIGA 和 PREP (旋转电极) 粉末, 发现 EIGA 粉末成形试样的拉伸和疲劳性能优于 PREP 法粉末成形的试样。Wei 等<sup>[12]</sup>研究了雾化压力对 EIGA 法制备 TA15 合金粉末破碎机理的影响规律, 但没有研究粉末制备的工艺优化和粉末的表征。为了获得更加适用于 SLM 工艺的 Ti-6Al-4V 合金粉末, 本实验采用自行研制的 EIGA 法雾化设备, 制备 Ti-6Al-4V 合金微细球形粉末并进行定量表征, 采用 SLM 成形并对其性能进行初步研究, 为 3D 打印用钛合金球形粉末的应用提供技术参考。

收稿日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项 (516227805); 广东省自然科学基金团队项目 (2015A030312003); 广东省科技攻关项目 (2014B010129003, 2016B090931006, 2017B090901025); 广州市科技攻关项目 (201604016049)

作者简介: 黄传收, 男, 1992 年生, 硕士, 华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广东 广州 510640, 电话: 020-61551266, E-mail: 1764049725@qq.com

# 1 实验

实验用 EIGA 法原理示意图如图 1 所示。原料是长为 300 mm，直径 50 mm，一端为 45°锥角的钛合金棒，其化学成分如表 1 所示。将棒料夹持在送料室，对熔炼室和雾化室抽真空至  $10^{-3}$  Pa，将原料棒材锥头部分完全送入熔炼室的圆锥形感应线圈中。棒料在感应线圈加热下熔化为连续下落的液滴，经过雾化喷嘴时被高纯氩气破碎成细小液滴，快速冷却凝固成球形和近球形粉末。分别采用环孔和环缝型喷嘴，研究主要雾化参数对微细粉末收得率和性能的影响，雾化参数如表 2 所示。

将收得的粉末用标准泰勒筛进行筛分，对收集的细粉进行表征。采用 MASTERSIZER 2000 激光粒度分布仪分析合金粉末的粒度及其分布；采用扫描电镜 (SEM, FEI Quanta 200) 观察粉末表面形貌；使用欧奇奥 500Nano XY+HR 型粒度粒形分析仪量化分析粉末粒形及其分布；使用能量色散光谱仪 (EDS) 分析粉末表面和剖面的元素分布；使用 X 射线衍射仪 (XRD, D8 ADVANCE) 分析粉末的相组成，靶材为 Cu，扫描角度为  $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ；使用氧氮仪 (TC-500) 分析粉末的氧含量；将粉末通过热镶机镶嵌后机械打磨抛光，采用 Kroll 试剂腐蚀并观察内部组织。

采用 SLM Solutions 公司的配备两个 400 W IPG 光纤激光器的 SLM 280 HL 设备对制备的粉末进行 SLM 成形，激光光斑直径约为  $100\ \mu\text{m}$ ，其能量呈高斯分布。

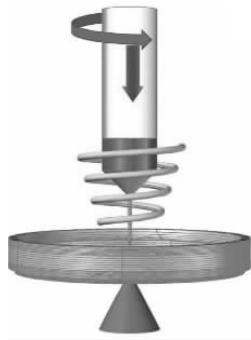


图 1 EIGA 雾化原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrode induction melting gas atomization

表 1 钛合金原料棒化学成分

Table 1 Chemical composition of titanium alloy rods ( $\omega/\%$ )							
Al	V	Fe	O	N	H	C	Ti
6.24	4.21	0.21	0.08	0.01	0.001	0.01	Bal.

表 2 EIGA 法雾化参数

Table 2 Atomization parameters of EIGA method			
Process	Nozzle type	Pressure/MPa	Power/kW
1	Ring-hole	6	25
2	Ring-slit	4	25
3	Ring-slit	5	25
4	Ring-slit	6	25

SLM 成形工艺参数选为激光功率  $P=275\ \text{W}$ ，扫描间距  $h=100\ \mu\text{m}$ ，扫描速度  $v=1100\ \text{mm/s}$ ，铺粉层厚  $t=30\ \mu\text{m}$ 。激光路径采用相邻层之间旋转  $60^{\circ}$  的扫描策略，如图 2 所示。成形前将 Ti-6Al-4V 基板预热到  $200\ ^{\circ}\text{C}$ ，保护气体为氩气，氧含量控制在  $0.02\%$  以下。成形试样为  $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$  的方块，采用扫描电镜 (Quanta 200) 观察样品表面形貌，并用型号为 RTEC Up Dual-mode 的 3D 表面轮廓仪测量试样的表面粗糙度，采用莱卡光学显微镜观察试样侧面的显微组织，并用传统阿基米德排水法测试试样的致密度。用 DHV-1000Z 型显微维氏硬度计测试试样的显微硬度。

# 2 结果及讨论

## 2.1 粉末粒径与形貌分析

图 3 为激光粒度仪测试的 Ti-6Al-4V 合金粉末粒度分布图。4 组参数制备的粉末粒径都呈近似正态分布，且分布较为集中。从图 3a 可以看出，工艺 3 制备的粉末粒度分布最窄，而工艺 1、2、4 制备的粉末粒径分布较宽。从图 3b 粉末的累积分布图可以看出，工艺 1、2 制备的粉末较粗，而工艺 3、4 制备的粉末较细。

对比工艺 1、4 制备的粉末粒度分布，在雾化压力相同时，相较于环孔型喷嘴，采用环缝型喷嘴制备的粉末粒径更小。因为环孔型喷嘴等距离分布的圆孔间

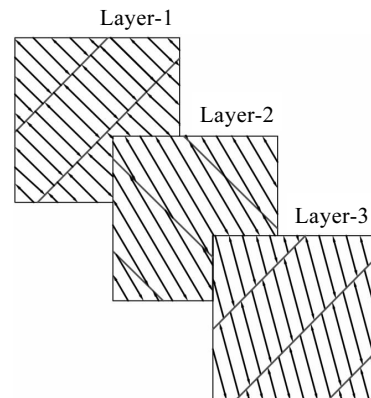


图 2 SLM 成形激光扫描策略示意图

Fig.2 Schematic illustration of laser scanning strategy in SLM process

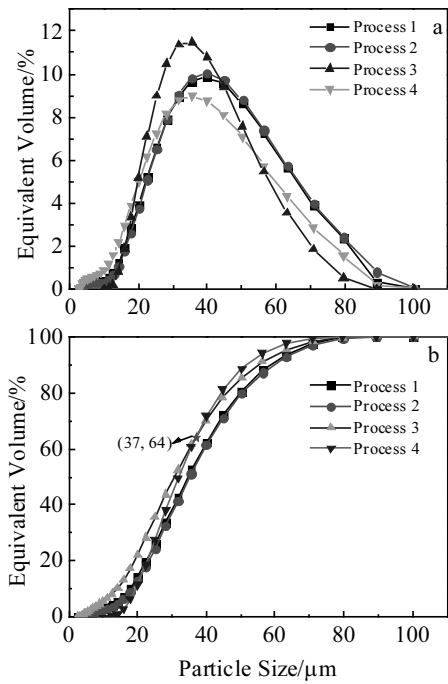


图 3 不同雾化参数制备 Ti-6Al-4V 粉末的粒径分布图

Fig.3 Particle size distribution of Ti-6Al-4V powder prepared by different atomizing parameters: (a) statistical distribution and (b) cumulative distribution

隙位置，雾化气体的动能较小，对熔滴的破碎不充分，而环缝型喷嘴气流均匀，可以将熔滴充分破碎，获得较细的粉末。从工艺 1、2 可以看出，采用环缝型喷嘴，雾化压力为 4 MPa 便可获得与压力为 6 MPa 的环孔型喷嘴制备的粒径几乎相同的粉末，可见环缝型喷嘴对气体消耗更少。

由图 3 可以看出，采用环缝型喷嘴，相较于工艺 2，雾化压力较大的工艺 3、4 制备的粉末粒径更小，分布更窄。因为压力越大金属液滴破碎越充分，进而球化凝固为粉末的粒径越小。但并非压力越大越好，当压力过大时，先雾化的细小粉末会在气流回旋作用下粘附在没来得及凝固的粉末上，反而会使粒径变大。从工艺 3、4 制备粉末的统计分析来看，雾化压力较低的工艺 3 制备的粉末粒径较窄，而用 6 MPa 雾化压力的工艺 4 制备的粉末，虽然累积体积接近 64% 的粉末粒径小于 37 μm，但其粒径分布较宽。综上可知工艺 3 制备粉末的粒径最佳，其  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$  分别为 19.4、31.9 和 51.5 μm。

图 4 为采用工艺 3 制备粉末的扫描电镜形貌，图 4b~4e 为制备粉末的典型形貌。大部分粉末如图 4b 所示，得到了充分的球化，球形度较高、表面光滑。但也有部分球化的粉末在气流作用下，与未开始凝固的

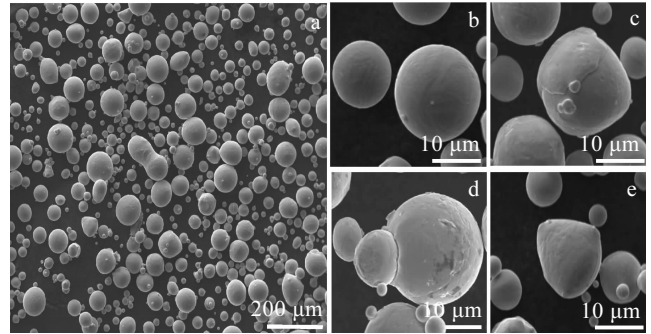


图 4 粉末的扫描电镜形貌

Fig.4 SEM morphologies of powders: (a) overall morphology, (b) spherical powder, (c) coated powder, (d) satellite powder, and (e) irregular powder

粉末撞击形成包覆粉，如图 4c 所示；两个未完全凝固的粉末相互撞击形成如图 4d 所示的卫星粉；有部分大粒径粉末球化速度较慢，当完全凝固后仍未完全球化，就会形成如图 4e 所示的不规则粉末。

## 2.2 粉末粒形分析

粒形度是 3D 打印粉末质量的一个重要指标，粒形不但影响粉末的流动性，对粉末的松装密度也起着重要作用。良好的流动性可以改善成形过程中的铺粉质量，均匀铺粉可以使成形件的精度和内部组织及其力学性能得到保证。粒形较好的粉末可以提高松装密度，使成形过程中产生的孔隙减少，成形件的致密度得到提升。为了更好地定量表征粉末的粒形，采用 500Nano XY 粒度粒形分析仪测试粉末的粒形。在无任何污染和破坏的情况下，真空分散样品，收集数以万计的颗粒图像。通过全自动 X-Y 平台，系统可以自动测量所有颗粒的粒径，并且引入了圆度(Circularity)、欧奇奥钝度 (Occhio bluntness) 以及赘生物指数 (Outgrow) 等指标，全面而准确的表征粉末的粒形。

### 2.2.1 粉末的圆度(Circularity)

圆度表示在综合考虑周长的平滑度的情况下，粉末颗粒的投影面积与圆形的相似程度。该参数用百分比表示，百分比越大说明粉末的球形度越高。检测结果表明，近 94% 的粉末的圆度大于 86%，总体圆度较高，说明粉末球形度较高，粉末圆度分布图如图 5 所示。

### 2.2.2 欧奇奥钝度(Occhio bluntness)

欧奇奥钝度是对球形度最灵敏的表征参数，目前依靠最新的离散几何学和数学形貌学发展以及强大的计算机能力，这种计算可以很快完成。通过计算颗粒的钝度值可以分析粉末颗粒的球形度，钝度值越低颗粒越不规则。图 6a 为 1941 年 Krumbein 设计的参照图<sup>[13]</sup>,

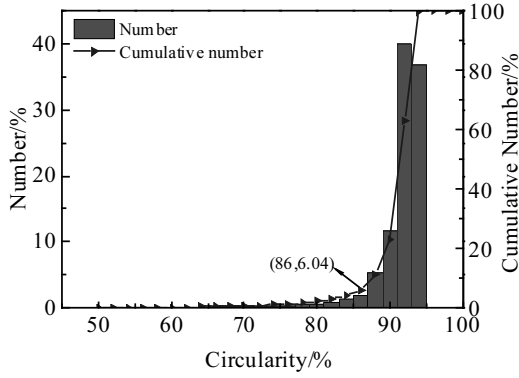


图 5 Ti-6Al-4V 合金粉末的圆度分布图

Fig.5 Distribution of circularity of Ti-6Al-4V powder

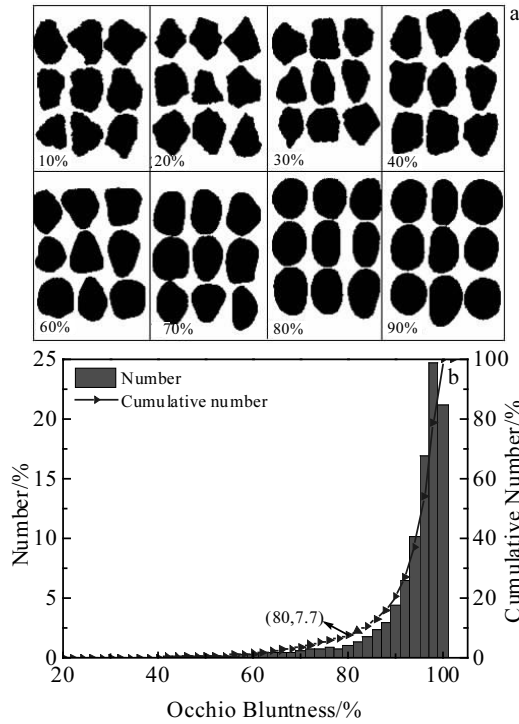


图 6 EIGA 制备的 Ti-6Al-4V 微细粉末的钝度

Fig.6 Occhio bluntness of fine Ti-6Al-4V powder prepared by EIGA method: (a) Krumbein diagram and (b) Occhio bluntness diagram

已得到广泛应用。图 6b 为 EIGA 法制备的微细 Ti-6Al-4V 合金粉末钝度值的分布图。由统计结果可知，欧奇奥钝度的平均值为 92.7%，粉末钝度低于 80% 的粉末仅占 7.7%，与 Krumbein 图对比可知粉末的球形度总体较高。

### 2.3 卫星化粉末与赘生物指数分析

流动性对于 3D 打印用粉末至关重要，表面粗糙

度和粒形对粉末流动性影响很大。为了研究粒形对粉末流动性的影响，引入卫星化指数和赘生物指数。根据 IS09276，颗粒形状和形态的描述可以分为归一化的粒径参数和宏观及介观的粒形描述参数。但是粒度无法区分卫星化粉末，圆形度是轮廓的二维参数，也很难区分卫星化粉末。要对粉末的卫星化程度进行分析，必须更加细致的描述微观颗粒形状，从而对粉体形状定量表征。

赘生物指数可以更加简便而实用地表征卫星化粉末颗粒。如果赘生物指数为 0，则没有颗粒粘连；如果为 10%，则粘连了一个微粒；如果为 20%，则粘连 2 个微粒；如果为 30%，则粘连 3 个微粒。采用欧奇奥 500NanoXY+HR 粒度粒形分析仪所测粉末的赘生物指数及其粉末投影图如表 3 所示。其中近 84% 的粉末没有粘连微粒，部分粉末有 1 到 2 个粘连微粒，几乎没有粘连 3 个微粒的情况。所制备的 Ti-6Al-4V 合金微细粉末的赘生物指数较低，粉末的卫星化情况不严重。

图 7 为 4 组工艺参数制备粉末赘生物指数的统计图。可见 4 组粉末赘生物指数都较低，其中工艺 4 对应粉末的卫星化现象最不明显，并且随着赘生物指数的增加，粉末数量下降最快。主要是因为雾化压力越大，存在二次雾化效应，有效地将粘连粉末分离，从而降低其赘生物指数。

### 2.4 粉末相组成与截面组织

Ti-6Al-4V 粉末的 XRD 图谱如图 8 所示。由图谱可以看出，该粉末存在的相结构是密排六方钛。在 Ti6Al4V 合金中密排六方相有  $\alpha$  和  $\alpha'$  相，并且两者的晶格常数很接近，二者的衍射峰高度差别细微，很难通过 XRD 图谱进行区分<sup>[14]</sup>。雾化过程冷却速度很快，更易于形成  $\alpha'$  相。该冷却速度足以产生非晶粉末，但 3 条主衍射峰无明显宽化，说明在该粉末中存在的量很少<sup>[15]</sup>。与标准卡片对比可以发现，所制得粉末的衍射峰向高角度偏移，由布拉格衍射方程可知是由晶体的面间距变小引起的。在  $\alpha$  相马氏体无扩散切变转变过程中，晶格会发生轻微畸变，密排六方相的  $c/a$  值低于理想密排六方晶格的  $c/a$  值。

图 9 为粉末的截面图。从图 9a 中可以看到少量气雾化典型的空心粉，有密闭孔和连通孔两种，主要是

表 3 粉末的赘生物指数及卫星粉投影图

Table 3 Occhio outgrowth of powders and corresponding projection

Outgrow/%	0	10	20	30
Number/%	83.827	8.045	7.558	0.571
Projection				

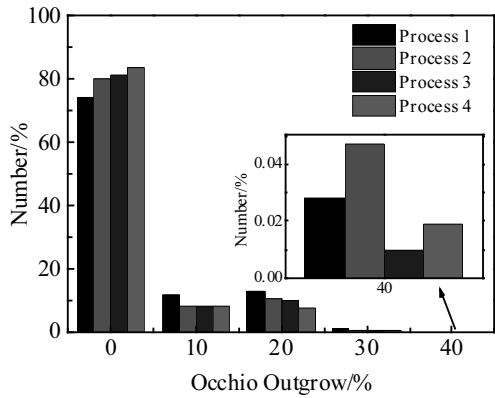


图 7 不同工艺制备粉末的赘生物指数

Fig.7 Occhio outgrow of powders prepared under different processes

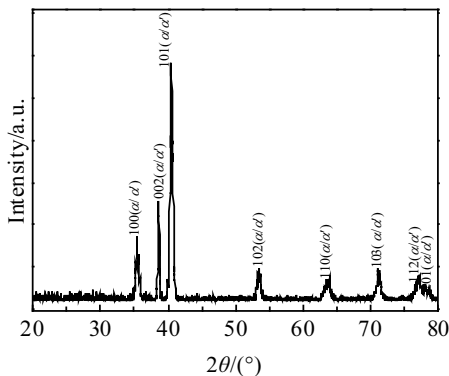


图 8 Ti-6Al-4V 合金粉末 X 射线衍射图谱

Fig.8 X-ray diffraction pattern of Ti-6Al-4V alloy powder

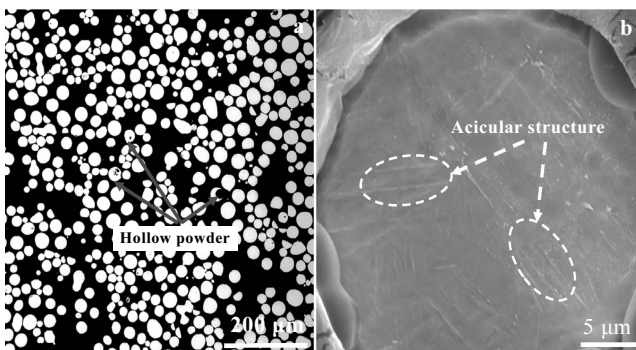


图 9 粉末截面组织图

Fig.9 OM (a) and SEM (b) images of cross section for powders

由于雾化过程气体的卷入。图 9b 为粉末截面放大组织图，细针状的  $\alpha$  相为典型的马氏体组织，针状组织的取向随机性说明了  $\beta$  相结晶过程为非均匀形核，然后快速冷却过程中在  $\beta$  相内转变为针状  $\alpha$  相。在截面上

可以看到浮凸现象，这是马氏体相变的宏观变形。

### 2.5 粉末成分与能谱分析

采用 EDS 可以对粉末化学成分进行半定量分析。图 10 为粉末表面 EDS 能谱。结果显示，粉末主要元素 Ti、Al 和 V 的质量比为 1:0.066:0.042，和棒材原材料的化学成分基本一致。说明采用 EIGA 法可以制备成分稳定的 Ti-6Al-4V 微细球形粉末，基本无元素损耗。使用氧氮仪测得粉末的氧含量为 0.12%，略高于原料 0.08% 的氧含量，满足 SLM 成形对氧含量的要求。氧含量的升高主要原因在于微细粉末的比表面积较大，当与不纯净干燥气体接触时会与其中的氧发生化合反应而增氧。可以采用提高粉末制备过程中的真空度，以及对粉末进行抽真空储存等手段降低其氧含量。

### 2.6 粉末的 SLM 成形性能

图 11 为 SLM 成形试样的上表面形貌及其粗糙度。影响其表面粗糙度因素主要有两个，一是熔道搭接处的起伏和熔道内部的纹路，从图 11b 可以看出，相邻熔道存在一定的起伏，对其粗糙度有一定的影响；其次，从图 11a 可以看到试样表面粘连部分飞溅粉末，有些是部分冶金结合的完整粉末颗粒，其是在熔道未完全凝固时粘连上去的；有些具有很好的冶金结合，其是快速运动的激光使完全熔融的液滴飞溅到已成形表面形成的。因粘连粉末较少，对粗糙度影响较小，所以表面粗糙度主要由熔道的平整度决定。采用 Gwyddion 软件对测得的表面粗糙度数据进行分析，得到面糙度  $R_a$  为 4.98  $\mu\text{m}$ 。

图 12 为打印试样侧面显微组织图。可以看到存在部分孔洞，这些孔洞是打印过程中保护气体的卷入导致的<sup>[16]</sup>。孔洞对试样致密度有一定的影响，通过传统阿基米德排水法测得试样的致密度为 99.02%，接近全致密状态。采用 Kroll 试剂腐蚀后可以看到初生  $\beta$  相的边界，并且基本平行于成形方向， $\beta$  相内是细小的

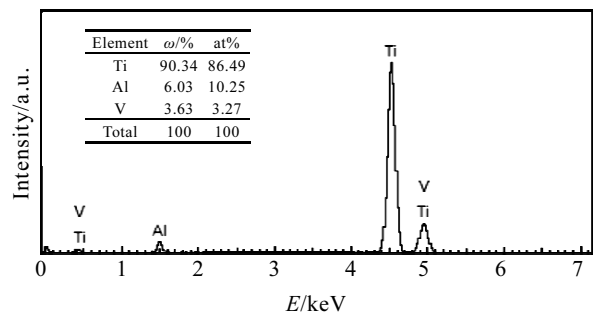


图 10 Ti-6Al-4V 合金粉末 EDS 能谱

Fig.10 EDS spectrum of Ti-6Al-4V alloy powder

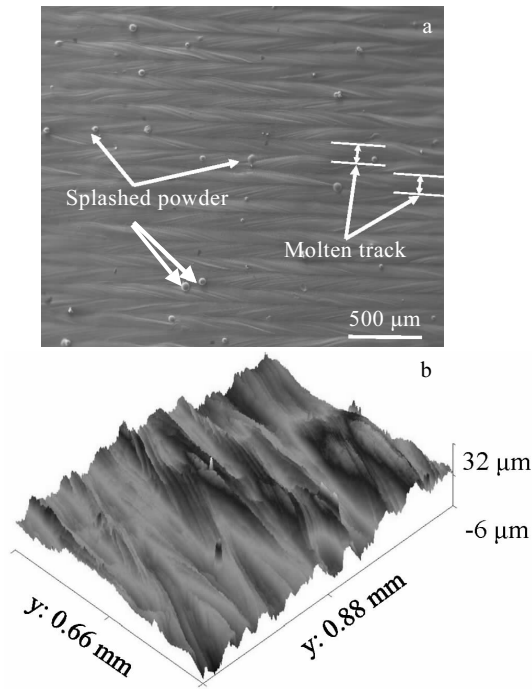


图 11 SLM 成形试样的上表面形貌及其粗糙度

Fig.11 Surface morphology (a) and roughness (b) of as-SLMed sample

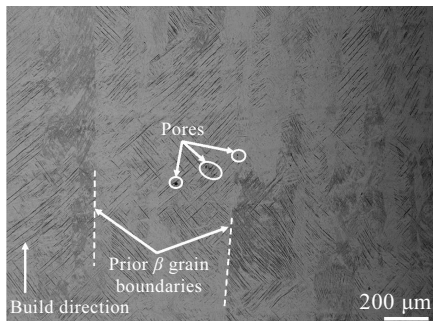


图 12 打印试样侧面显微组织

Fig.12 Microstructure in the side of as-fabricated sample

针状  $\alpha'$  马氏体。这是因为成形过程中散热方向与成形方向相反, 初生  $\beta$  相以外延型生长, 而冷却速度极快, 转变为亚稳态的  $\alpha'$  马氏体<sup>[17]</sup>, 测得成形样的  $HV_{0.5}$  显微硬度为 3525 MPa, 因  $\alpha'$  马氏体的存在硬度稍高于  $\alpha+\beta$  相 Ti-6Al-4V 合金。

### 3 结 论

1) 采用 EIGA 雾化设备制备 Ti-6Al-4V 合金粉末的最佳工艺为: 环缝型喷嘴, 雾化压力 5 MPa, 电源功率 25 kW。

2) 采用 EIGA 法最佳雾化工艺制备的 Ti-6Al-4V 微细合金粉末粒径分布集中, 呈近似正态分布,  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$  分别为 19.4、31.9 和 51.5  $\mu\text{m}$ ; 粒形总体比较规整, 粉末圆度的平均值为 90.6%, 欧奇奥钝度的平均值为 92.7%, 球形度较高; 赘生物指数较低, 卫星粉情况不严重, 理论上具有很好的流动性和松装密度, 适合 SLM 成形。

3) 由于初生  $\beta$  相的非均匀形核, 粉末内部为不同取向的针状  $\alpha/\alpha'$  马氏体, 粉末化学成分稳定, 和棒材原材料的化学成分基本一致, 氧含量为 0.12%, 相较于原料有所升高, 但仍满足 SLM 成形对含氧量的要求。

4) SLM 成形试样致密度达到 99% 以上, 上表面粗糙度较低, 粗糙度  $R_a$  为 4.98  $\mu\text{m}$ , 显微硬度  $HV_{0.5}$  达到 3525 MPa。

### 参考文献 References

- [1] Fousová M, Vojtěch D, Kubásek J *et al.* *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2017, 69: 368
- [2] Anoshkin N F, Demchenkov G G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1): 263
- [3] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003: 513
- [4] Li Fuchang(李富长), Song Zuming(宋祖铭), Yang Dianjun(杨典军). *New Technology & New Process(新技术新工艺)*[J], 2010(5): 66
- [5] Le Guomin(乐国敏), Li Qiang(李 强), Dong Xianfeng(董鲜峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(4): 1162
- [6] *Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes*, ASTM F3049- Standard [S]. 2014
- [7] Qian M, Yang Y F, Yan M *et al.* *Key Engineering Materials*[J], 2012, 520: 24
- [8] Mao Xinhua(毛新华), Liu Xin(刘 辛), Xie Huanwen(谢焕文) *et al.* *Materials Research and Application(材料研究与应用)* [J], 2017(1): 13
- [9] Ahsan M N, Pinkerton A J, Moat R J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(25-26): 7648
- [10] Zhang Fei(张 飞), Gao Zhengjiang(高正江), Ma Teng(马 腾) *et al.* *Industrial Technology Innovation(工业技术创新)*[J], 2017(4): 59
- [11] Guo R, Xu L, Zong B Y *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2017, 30(8): 735

- [12] Wei M, Chen S, Liang J *et al. Vacuum*[J], 2017, 143: 185  
*Powder Technology*[J], 2015, 26(5): 1335
- [13] Krumbein W C. *Journal of Geology*[J], 1941, 49(5): 482  
[16] Kasperovich G, Haubrich J, Gussone J *et al. Materials & Design*[J], 2016, 105: 160
- [14] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T *et al. Acta Materialia*[J], 2010, 58(9): 3303  
[17] Agius D, Kourousis K, Wallbrink C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2017, 701: 85
- [15] Birt A M, Champagne V K Jr, Sisson R D Jr *et al. Advanced*

## Properties and Characterization of Ti-6Al-4V Alloy Fine Powders Prepared by Electrode Induction Melting Gas Atomization (EIGA) Technique

Huang Chuanshou<sup>1</sup>, Liu Zhongqiang<sup>1</sup>, Wu Yuanbiao<sup>1</sup>, Wen Liping<sup>1</sup>, Chen Jin<sup>2</sup>, Xiao Zhiyu<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Material,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Foshan SZB New Material Technology Co., Ltd, Foshan 528231, China)

**Abstract:** Ti-6Al-4V alloy powders were prepared by a self-developed electrode induction melting gas atomization (EIGA) equipment. Two kinds of gas atomizing nozzles, ring-hole type and ring-slit type, were used in the experiment. Different atomization pressures and power inputs were used. Four sets of processing parameters were designed and their effect on the powder properties was studied. The powder were sieved by 270 standard mesh (powder particle size  $\leq 53 \mu\text{m}$ ) and the size distribution was analyzed by MASTERSIZE 2000 Laser Particle Size Analyzer. The powder particle shape was quantified with Occhio 500NanoXY+HR Particle Size and Shape Analyzer. Results show that optimal results are achieved with good sphericity by the combination of ring-slit nozzle with atomization pressure of 5 MPa and smelting power of 25 kW. A normal distribution of powder size is attained and the  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{90}$  are 19.4, 31.9 and 51.5  $\mu\text{m}$ , respectively. The mean Circularity and Occhio bluntness are 90.6% and 92.7%, respectively. It is found that more than 80% of powders have Occhio outgrow of 0. The powder was further analyzed by XRD, SEM, EDS and oxygen and nitrogen analyzer. The microstructure of the powder is acicular  $\alpha'$  martensite with random orientations. The amount of hollow powder is extremely small. The powder composition is practically same as that of the ingot and a low oxygen content is found, which satisfies the requirements of the SLM process. The Ti-6Al-4V powder achieved by optimal process was used for Selective Laser Melting and the relative density, surface roughness and  $\text{HV}_{0.5}$  microhardness are 99.02% and 4.98  $\mu\text{m}$ , and 3525 MPa, respectively.

**Key words:** EIGA; Ti-6Al-4V alloy; spherical powder; SLM; properties

---

Corresponding author: Xiao Zhiyu, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Material, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China, Tel: 0086-20-61551266, E-mail: zhyxiao@scut.edu.cn