

# 选区激光熔化用 TC4 合金粉末特性及成形性能

## 盘星新金属技术白皮书

盘星新金属对钛合金选取激光熔化应用进行了持续性研究，以确保材料性能及应用结果的稳定性。

钛合金中 Ti-6Al-4V (TC4) 合金材料应用最为成熟，TC4 钛合金是一种典型的 $\alpha+\beta$ 两相合金，其成分含有 6%的稳定 $\alpha$ 相元素 Al 及 4%稳定 $\beta$ 相元素 V，兼顾了 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相的优点。因其具有密度低、耐热和耐腐蚀性优异、比强度高特点，在航空航天、生物医疗等领域都得到广泛应用。选区激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)作为一种增材制造技术，可实现复杂结构金属构件的材料-结构一体化净成形，为航空航天、生物医疗高性能构件的设计与制造提供了新的工艺。

## 盘星新金属 TC4 粉末特性

盘星 TC4 粉末采用电极感应熔炼雾化 EIGA 技术进行制备，TC4 粉末成分要求及测试值如表 1 所示。

表 1 TC4 粉末化学成分

元素	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
技术要求	5.5-6.5	3.5-4.5	≤0.25	≤0.08	≤0.10	≤0.03	≤0.012	Bal.
测试值	6.37	4.28	0.19	0.017	0.0933	0.0085	0.0007	Bal.

制粉过程中，通过控制关键参数，实现连续、稳定、高效生产。收粉后，通过筛分、气流分级、合批等工序制备 15-53 $\mu$ m TC4 粉末。15-53 $\mu$ m 粉末粒度分布见下表 2 所示，粉末粒度分布呈正态分布，符合技术要求。

表 2 TC4 (15-53 $\mu\text{m}$ ) 粒度分布

粒度分布	D10/ $\mu\text{m}$	D50/ $\mu\text{m}$	D90/ $\mu\text{m}$
15-53 $\mu\text{m}$	20.4	37.1	56.9
技术要求	15-25	30-40	50-60

TC4 粉末具有优异的综合性能，流动性好，松装密度高、振实密度高，见表 3。

经过气流分级处理，0-53 $\mu\text{m}$  粉末去除掉 0-20 $\mu\text{m}$  细粉，粉末因物理吸附而产生的粘连情况和雾化过程中形成的卫星粉情况得到改善，粉末具有较好球形度，且球形粉表面变形量小，见图 1。

表 3 TC4 (15-53 $\mu\text{m}$ ) 粉末综合性能

综合性能	流动性/s/50g	松装密度/g/cm <sup>3</sup>	振实密度/g/cm <sup>3</sup>
检测数据	27	2.46	2.93
技术要求	< 42	> 2.35	> 2.70

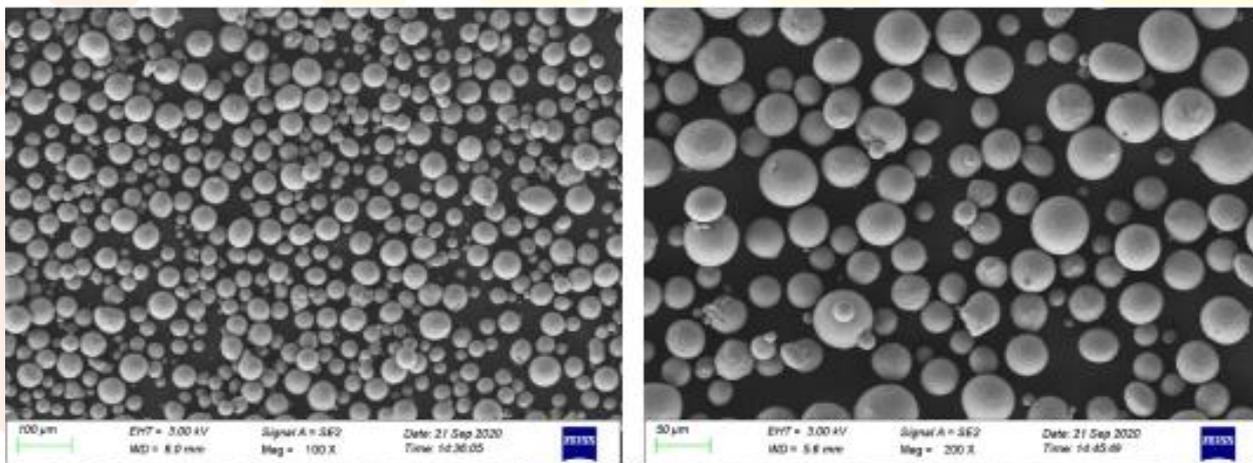


图 1 TC4 (15-53 $\mu\text{m}$ ) 粉末形貌 ( $\times 100$ 、 $\times 200$ )

## 盘星新金属 TC4 粉末选区激光打印

采用 GE Concept Laser M2 型打印机完成 TC4 标准试样的打印，保护气为高纯度氩气，成形前将基本预热至 200 $^{\circ}\text{C}$ ，参数设置见表 4。采用 NB 380M 型真空热处理炉完成 TC4 标准试样的热处理，热处理制度为 800 $^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 4h，随炉冷至室温，如下图 2 所示。

表 4 SLM 打印主要工艺参数

打印参数	设定值
激光功率/kw	350-380
扫描速度/mm/s	1600-1800
扫描间距/ $\mu\text{m}$	90-110
打印层厚/ $\mu\text{m}$	50-60



图 2 M2 打印机与真空热处理炉

TC4 粉末以直接成形的方式打印成标准试样，其尺寸如下图 3 所示。

在标准试样的打印过程，粉末共计循环 6 次进行循环打印试验。如下表 5 所示，6 次循环打印试样的抗拉强度极差值为 22MPa、屈服强度的极差值为 37MPa，每次强度之间的差异小于 5%，无明显差异。延伸率之间极差值 1.2%，均值为 14.4%，可判断 6 次循环打印试样的延伸率无明显差异，见图 4。

因而，在 6 次循环打印过程中，打印试样的力学性能无明显差异，即 TC4 粉末至少可以循环打印 6 次而试样性能不发生明显变化。打印试样抗拉强度的均值为 1027MPa，屈服强度的均值为 938MPa，延伸率的均值为 14.4%。

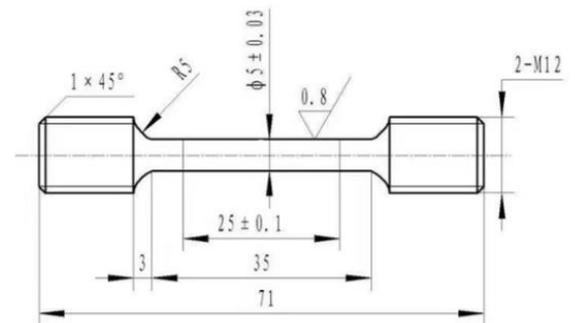


图 3 标准试样尺寸图

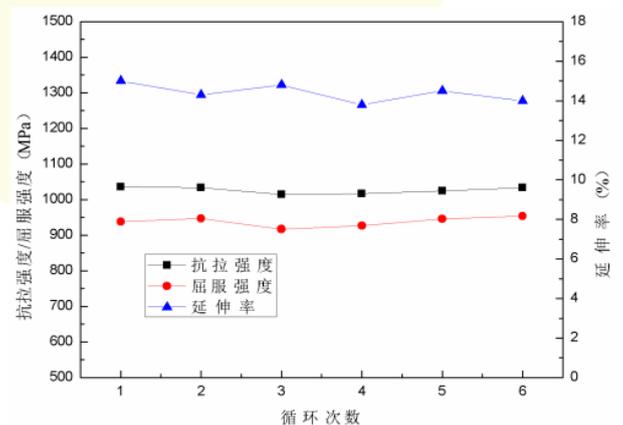


图 4 TC4 循环 6 次力学性能稳定性

表 5 循环打印试样性能参数表

循环次数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
1	1036	938	15.0
2	1034	947	14.3
3	1014	917	14.8
4	1017	927	13.8
5	1025	946	14.5
6	1034	954	14.0
均值	1027	938	14.4

## TC4 粉末选区激光打印的应用

有权威机构指出，航空航天是增材制造技术研发与工业应用最有望获得突破的领域，其应用范围已从零部件级（飞机、卫星、高超飞行器、载人飞船的零部件打印）发展至整机级（发动机、无人机、微/纳卫星整机打印）。

随着航空技术发展，飞机的设计越来越看重复杂大型整体化结构设计，这是飞机结构轻量化设计的重要发展方向。飞机传统设计受限于传统制造技术，一些创新存在“设计得出，造不出”的问题，而增材制造技术的发展为复杂创新结构制造的实现提供契机。选区激光熔化技术作为典型的增材制造技术，在轻量化高性能结构及结构一体化领域有明显优势，为复杂创新型结构“设计得出，造得出”提供途径。TC4 材料作为典型的中温钛合金，可应用于制造发动机机匣、进气口叶片、梁和承力结构件。如图 5 所示，TC4 材料应用于 C919 客机舱门机构部件。采用选区激光熔化技术，TC4 的材料利用率大幅提高，并为客机实现大幅减重，节约成本。

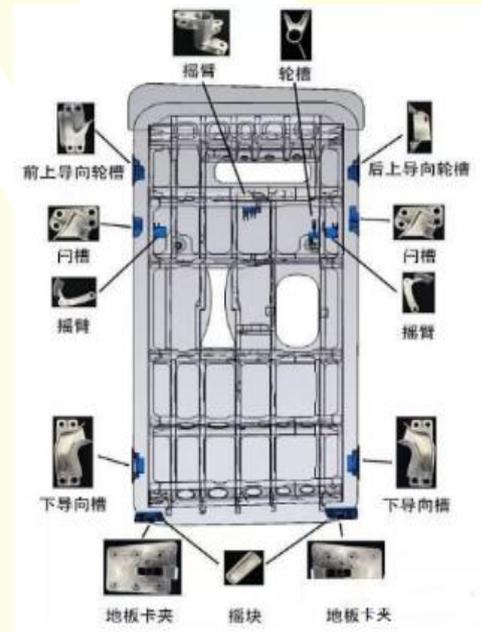


图 5 C919 舱门机构零件

从 20 世纪 80 年代起，钛合金就已经逐渐被用于口腔修复、牙体种植、义齿支架等领域。时至今日，钛合金作为生物医用植入材料研究热点，在医疗方面的应用已涉及到人工关节、血管支架、骨科器械等。TC4 作为一种常用生物医用钛合金，已经在我国临床应用。传统的钛合金加工方法是铸造法，操作复杂，精度差、成本高且污染环境。目前，选区激光打印钛及钛合金被广泛应用于制作冠桥修复体、牙种植、义齿支架、种植体基台等牙科领域，以及人工关节假体（如髌、膝踝、肩、肘等）、骨结合产品、骨创伤产品和脊柱内固定系统等骨科领域。

在牙科领域，SLM 技术能够进行定制化加工，可生产精密个性化修复体，临床应用效果最佳，该技术在制作牙科支架、冠桥方面已经较为成熟。如下图 6 所示：

在骨科领域，多孔钛合金抗腐蚀性能、生物相容性以及与人骨相匹配的力学性能优异，是人体理想的骨科替代物植入体。多孔钛材料设计独特的多孔结构和粗糙的内外表面，有利于成骨细胞的粘附、增值和分化，促使新骨组织生长，有利于植入体与骨之间形成一个整体。如下图 7 所示为 SLM 成形的 TC4 髌臼杯。



图 6 选区激光打印 TC4 在牙科领域的应



图 7 选区激光打印 TC4 在骨科领域的应用

选区激光打印技术模仿自然结构特定的复杂设计能力是传统制造方法无法比拟的，同时能够实现对患者进行定制化服务，可满足不同人群对精准医疗的需求。