

选区激光熔化医用 Ti6Al4V 粉末循环利用及其对成型质量的影响

唐光东¹⁾✉, 段红平¹⁾, 张良¹⁾

1) 北京纳通医疗科技控股有限公司, 北京 100086

✉通信作者, E-mail: 2444979219@qq.com

摘要 金属粉末循环使用是选区激光熔化工艺中节约成本、缩短制备周期的重要方式, 但循环次数对粉末特性及成型件性能的影响规律仍不明确。本文研究了不同循环次数对钛合金粉末粒度分布、形貌、化学成分、流动性等物化特性的影响, 并对其成型试样显微组织和力学性能进行表征和分析。研究表明: 循环使用 30 次后, 粉末粒度分布范围集中, 粒径增大, 颗粒粘附团聚减少, 化学成分中铝、氧含量发生变化, 粉末流动性和球形率略有波动, 堆积和振实密度微量增加。随着循环次数增加, 成型试样的显微组织未受影响, 由细片层状 $\alpha+\beta$ 相组成, 密度和硬度值保持稳定, 拉伸强度均有提升, 断裂特性未变。

关键词 选区激光熔化; 钛合金; 循环使用; 粉末特性; 力学性能

分类号 TG665; TF122

The recycling of selective laser melting medical Ti6Al4V powder and its impact on forming properties

TANG Guangdong¹⁾✉, DUAN Hongping¹⁾, ZHANG Liang¹⁾

1) Beijing Naton Medical Technology Holding Co., Ltd., Beijing 100086, China

✉Corresponding author, E-mail:2444979219@qq.com

ABSTRACT Recycling of metal powder constitutes an important means to save costs and shorten the preparation cycle in the selective laser melting process. However, the influence of the recycling times on the physical and chemical properties of the powder as well as the performance of the formed parts remain unclear. This article investigated the impact of different recycling times on the particle size distribution, morphology, chemical composition, fluidity, and other physical and chemical properties of the titanium alloy powder. It also characterizes and analyzes the microstructure and mechanical properties of the formed samples. The research findings indicate that after 30 recycling times, the particle size distribution becomes more concentrated, the particle size increases, the adhesion and agglomeration of the particles decrease. The contents of aluminum and oxygen in the chemical composition change, the fluidity and sphericity rate of the powder fluctuate slightly. The bulk density and tapped density increase marginally. As the number of recycling times increases, the microstructure of the formed samples is not affected, consisting of fine lamellar $\alpha+\beta$ phases. The density and hardness values remain stable, the tensile strength improves, and the fracture characteristics remain unchanged.

KEY WORDS selective laser melting; titanium alloy; recycling; powder characteristics; mechanical properties

收稿日期:

基金项目: 无

在现代医疗领域,个性化医疗需求的日益增长,选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术作为一种先进的金属增材制造技术,已经成为定制化医疗器械制造的重要手段。尤其是对于骨科植入物等关键医疗产品,SLM技术能够提供精确的几何形状和优异的力学性能,满足临床应用的严格要求^[1]。

在SLM技术发展早期,研究重点在于制备样件结构复杂度、效率、成型质量和使用性能。随着技术的成熟和稳定,批量生产成为可能,人们开始更加注重生产成本和资源消耗。除了设备本身折旧外,原材料粉末的价格一直是生产成本的主要组成部分。尤其是因生物相容性和力学性能优异而广泛应用于医疗领域医用Ti6Al4V合金材料,使用要求严格,制备工艺复杂,原材料成本一直居高不下。同时,SLM工艺选区成型的特点,其制备过程中只有部分金属粉末经历熔化凝固成型,若未进行回收会直接造成大量损失,所制造零件的成本预计会更高,从而削弱了增材制造的经济优势。因此提高粉末材料的利用率、降低生产成本成为亟需解决的问题^[2]。

为提高粉末材料使用率,通常会对未熔化成型的粉末进行回收,经筛分后再次用于生产制造^[3-5]。然而,这部分粉末在重复使用过程中受到热循环,回收过程中暴露于空气中,使粉末的物理和化学特性可能会发生变化,这些变化可能会影响SLM成型件的质量和性能^[6]。特别是在医用Ti6Al4V合金的应用中,任何微小的粉末特性变化都可能对最终产品的安全性和可靠性产生重大影响^[8]。粉末循环使用并非易事,既要符合粉末质量要求,又要保证成型零件的力学性能^[9]。因此对粉末循环使用次数的控制就成为了质量控制的关键。

目前,国内外学者对金属粉末循环的研究涵盖了粉末特性演变、成型试样性能变化等多个方面^[10-12]。Weiss C^[13]等人研究发现,经过11次循环使用的AlSi10Mg粉末,其化学成分和颗粒形状无显著变化,但粉末粒径粗化、流动性增加,成型件的机械性能有所提高。Koushik T^[14]等人对Ti6Al4V粉末进行10次重复利用,结果显示粉末性能及成型件的拉伸性能在循环利用过程中未发生显著变化。Gruber H^[15]等人研究了718合金的粉末再循环使用后的冲击性能,发现多次循环过程中的粉末降解与断裂表面上观察到的损伤数量之间存在明显相关性。郭雨萌^[16]等研究了GH3536粉末在SLM制造过程中的循环利用对试样力学性能和粉末化学成分的影响,结果表明循环20次内成型试样的拉伸强度未有显著变化,但粉末中氧元素和氮元素含量上升。对于不同种类粉末循环使用的研究已取得阶段性进展,进一步说明在不影响零件质量的情况下,对SLM成型工艺中金属粉末再利用是切实可行的。尽管已有一定研究成果,但大多数研究集中于几次或十几次的短期少量粉末循环,所得结果的相关性不明显。实际生产应用中往往涉及更大体量粉末,不同的应用场景对循环使用的要求也有不同。因此,本文开展粉末循环使用对SLM成型医用Ti6Al4V合金的研究,分析粉末特性变化对成型件微观结构和力学性能的影响。该研究对于优化生产工艺、提高产品质量、降低制造成本以及推动增材制造技术在医疗领域的发展具有重要的实际意义,并为临床应用提供科学依据和技术支持。

1 实验

实验采用原材料为医用Ti6Al4V合金粉末材料,其化学成分如表1所示。实验中将原始粉末记为“循环0次粉末”,完成1次制备过程的粉末记为“循环1次粉末”,以此类推,循环次数共计30次,此过程中不添加新粉。使用Mastersizer 3000激光粒度仪测量粉末粒度及分布;通过FlexSEM 1000 II扫描电子显微镜观察粉末形貌;采用HYL-1001型多功能粉体物理特性测试仪测量粉末流动性、振实密度和松装密度;依据YS/T1297-2019标准中的扫描电子显微镜法对钛合金粉末颗粒进行统计并计算球形率。

表1 钛合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of titanium alloy powder (mass fraction, %)

化学元素	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
质量分数	6.28	4.07	0.031	0.098	0.0066	<0.005	<0.002	Bal.

采用 EOS M280 选区激光熔化设备制备钛合金试样。成型工艺参数为: 激光功率为 280 W, 扫描速率为 1200 mm/s, 扫描间距为 0.1 mm, 扫描层厚为 0.03 mm, 扫描方式为逐层旋转, 旋转角度为 67 °。循环粉末每次成型的工艺参数相同, 保护气体为氩气。

成型试样分别为拉伸试样、密度试样和硬度试样, 其中拉伸试样尺寸见图 1 所示, 密度和硬度试样尺寸均为 10×10×10 mm。在真空热处理炉中对试样进行热处理, 热处理工艺为 800 °C, 保温 2 小时, 随炉冷却至室温。通过显微镜观察试样显微形貌, 在 INSTRON 万能力学实验机上进行拉伸测试, 利用阿基米德排水法测量密度, 采用 HVS-1000Z 显微维氏硬度计测试成型试样硬度。

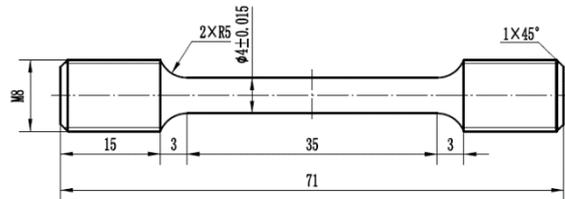


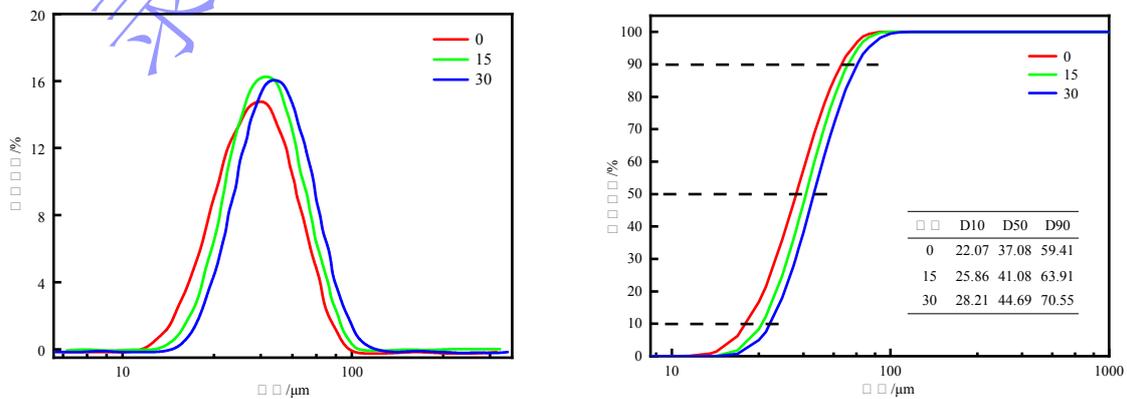
图 1 拉伸试样
Fig. 1 Tension sample

2 结果分析

2.1 不同循环次数钛合金粉末性能

2.1.1 粉末粒度分布

在 SLM 工艺中, 粉末粒径的均匀性直接关系到铺粉质量和激光吸收率, 影响材料在熔化和凝固过程中的行为, 进而决定成型件的质量和性能。图 2 为医用钛合金粉末不同循环使用次数的粒度分布曲线, 由图 (a) 粉末粒度微分分布曲线可以看出, 曲线呈高斯分布, 随循环次数的增加, 曲线宽度变窄, 峰值增高, 曲线水平向右侧偏移, 说明循环使用次数增加后, 粉末粒径范围更加集中, 同时还表明小尺寸粉末颗粒 (小于 15 μm) 数量减少, 大尺寸颗粒 (大于 40 μm) 数量增加, 这与文献^[7]中的研究结果一致。由图 (b) 粉末粒度累积分布曲线可知, 粉末粒径分布特征值 D10、D50、D90 值均随着循环使用次数的增加而升高, 粉末循环使用 30 次后, 粒径分别增加了 6.14 μm、7.61 μm 和 11.14 μm。图 3 为粉末变化示意图, 由于每次成型过程中都经历铺粉过程, 铺粉时体积小的粉末颗粒在铺粉板的推力作用下填充到尺寸较大颗粒间的空隙, 图 3 (a) 所示。图 3 (b) 为粉末循环使用 SLM 成形过程, 相较于大颗粒, 小颗粒具有更高的吸热效率和较低的熔化温度, 更容易被激光束捕捉并完全熔化, 粉末逐层叠加成型和多次循环使用使得小颗粒粉末先被消耗, 导致整体粉末颗粒逐渐变大, 粒径分布发生偏移。同时高能激光扫到粉末颗粒上产生的飞溅以及热影响区周围的粉末发生粘连形成大尺寸颗粒, 并随着粉末循环次数的增加而上升。此外, 在循环使用过程中, 粉末颗粒经历多次摩擦、碰撞, 导致部分颗粒表面破碎, 掉落的碎屑与小颗粒彼此粘连或者附着在大颗粒上形成更大的复合颗粒, 进而使粉末颗粒粒径增大, 如图 3 (c) 所示。



(a) 微分分布

(b) 累积分布

图2 不同循环次数钛合金粉末粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of titanium alloy powder with different recycling times

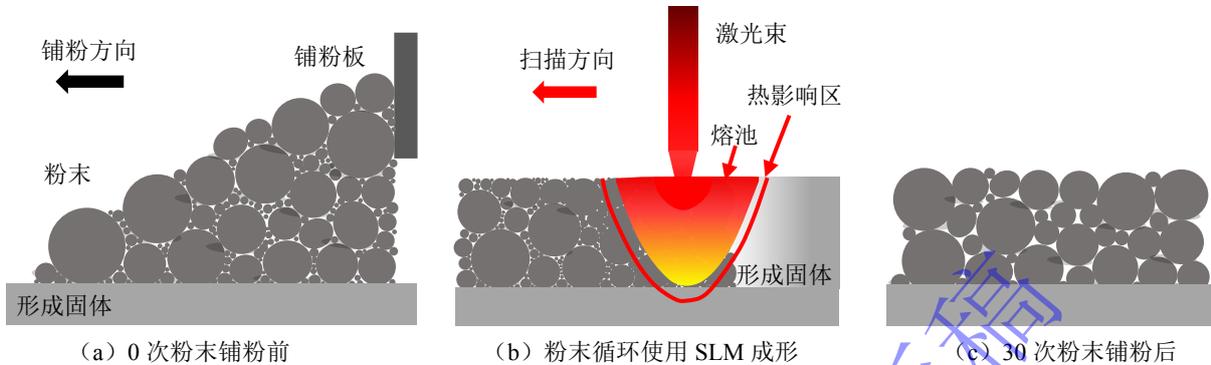
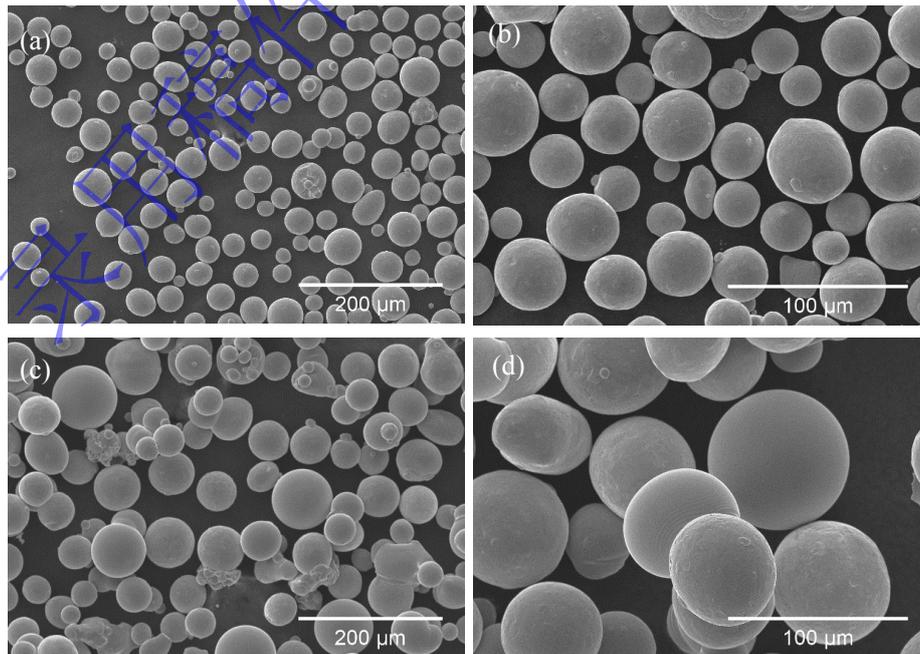


图3 钛合金粉末变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of titanium alloy powder

2.1.2 粉末形貌

图4为不同循环使用次数钛合金粉末的SEM形貌图。从整体上看,经过多次循环使用后粉末颗粒仍呈现出较好的球形度,但随着循环次数增加,粉末颗粒表面出现了一些变化。0次粉末形貌如图4(a)、(b),其大部分颗粒形貌呈球形,少量颗粒表面上占有小卫星球颗粒,还有少数颗粒呈非规则形状。经过15次循环使用后,如图4(c)、(d),粉末颗粒间出现粘附和团聚现象,颗粒表面的卫星颗粒经过多次烧结粘连在大颗粒上,呈现非规则状态堆积在一起,且粒径尺寸增加。这是由于经过筛粉后,筛出尺寸大的残渣、颗粒,保留了尺寸更细小的粉末颗粒。在激光熔化过程中,体积较小的粉末颗粒由于飞溅、重熔、假烧结等形成了粘附和团聚,发生相互粘连呈现出团聚现象。经过循环30次,如图4(e)、(f),小颗粒团聚成型的大颗粒不断消耗或筛出,粉末颗粒间出现粘附和团聚的颗粒减少,卫星球颗粒几乎消失,有少量的非规则颗粒,粉末颗粒球形度基本没有变化。但与0次粉末颗粒相比,表面稍变粗糙,如图(f)中标记所示,粉末颗粒轮廓毛糙、呈现微小锯齿状,表面上有细小的纹理,粒径尺寸增加,进一步验证了图2中多次循环后粉末粒径增加的现象。



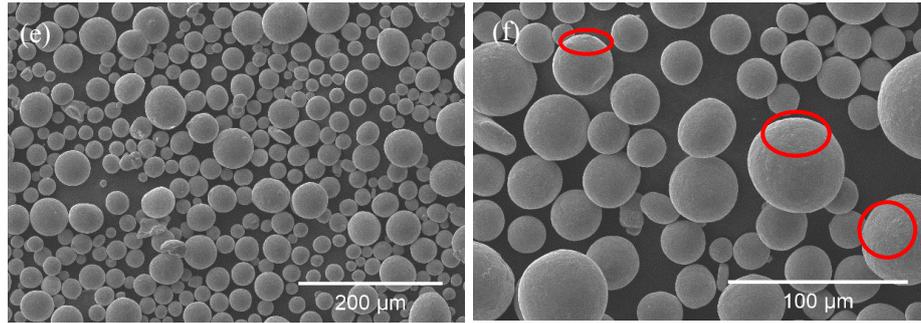


图 4 不同循环次数钛合金粉末形貌

Fig. 4 Morphology of titanium alloy powder with different recycling times (a, b) 0 time (c, d) 15 times (e, f) 30 times

2.1.3 粉末物化性能

图 5 为不同循环次数钛合金粉末的化学成分, 表 2 为具体结果。综合分析图和表可知, 粉末循环使用 15 次后主要元素铝微量增加, 循环 30 次后含量下降且低于 0 次粉末。铝含量的增加可能原因是在粉末循环使用过程中, 低熔点的铝元素相较于其他金属元素更容易与氧气反应形成氧化铝, 氧化铝附着在粉末颗粒表面, 并在粉末混合过程中重新分布。当循环 15 次粉末颗粒出现黏附团聚时且未达到筛出尺寸时, 氧化铝发生聚集。SLM 设备舱室内, 尽管熔池及其周围一部分铝元素在高温下蒸发, 但铝元素蒸发速率小于氧化速率, 而且先形成的氧化层还可能会阻碍铝元素的蒸发, 所以铝聚集于颗粒表面导致其微量增加。当循环次数增加到 30 次, 氧化铝层的厚度逐渐达到一个饱和状态, 并在反复铺粉、混合、筛分过程中剥落或在高温下分解, 随着粉末间粘附和团聚的颗粒被不断破碎和筛出, 粉末流动性增加, 铺展的粉末颗粒暴露在高温舱室中, 促进了铝元素的蒸发, 进而导致铝含量的降低^[18]。另一主要元素钒的含量变化微弱, 并不明显。其他微量元素中, 随循环次数增加变化相对明显的是氧元素。多次循环后, 氧元素含量稍有上升, 一方面是在制备过程中混入舱室内的残留空气, 另一方面可能是筛分和存储过程中与空气接触, 成型过程中空气中的氧元素在高温下氧化分离出来被粉末颗粒吸收^[18]。同时有文献^[18]报道, 氧含量的适量增加可能会对成型试样的力学性能产生影响。结合表 2 中具体的元素含量分析, 虽然铁元素含量也存在先升后降的变化, 但是变化数值都极小并远低于标准要求的阈值, 碳、氮和氢元素几乎没有变化, 与阈值的数量级相差较大, 可忽略不计。与 ISO5832-3 标准规定的植入物 Ti6Al4V 元素含量相比, 循环 30 次后粉末化学成分均在规定的限定范围内。

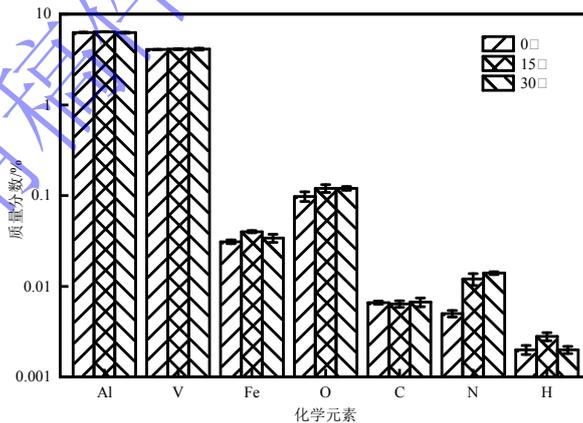


图 5 不同循环次数钛合金粉末化学成分

Fig.5 Chemical elements of titanium alloy powder with different recycling times

表 2 钛合金粉末化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of titanium alloy powder (mass fraction, %)

化学成分	Al	V	Fe	O	C	N	H
分							

0次	6.28	4.07	0.031	0.098	0.0066	<0.005	<0.002
15次	6.39	4.1	0.04	0.12	0.0064	0.012	0.0028
30次	6.25	4.12	0.034	0.12	0.0067	0.014	<0.002
ISO5832-3	5.5-6.75	3.5-4.5	≤0.3	≤0.2	<0.08	≤0.05	≤0.015

图6为不同循环次数粉末的物性参数。从图中可以看出，整体上粉末循环15次和30次后的结果几乎无差别，但是与0次粉末相比略有不同。0次时粉末流速为34.0 s/50 g，经30次循环后降到30.6 s/50 g，说明粉末流动性有所提高。与0次粉末相比，循环30次后粉末球形率从98%降至93%，粉末松装密度和振实密度均略有增加。

粉末的流动性是受到包括粉末的粒径分布和颗粒形状、粉末表面状态、粉末密度、粉末的形态特征以及卫星颗粒的存在等多种因素共同影响的。粉末球形率下降，粉末流动性未受影响，说明循环30次后粉末颗粒球形率下降程度未对粉末流动性产生负面影响。产生这种现象的原因有：（1）在循环过程中，部分粉末颗粒在经历飞溅、重熔和烧结后，导致颗粒形态变得不规则，不规则形状的颗粒在一定条件下相互嵌合更好，减少颗粒间的摩擦和阻力，从而提高粉末的流动性。（2）在SLM循环过程中，粉末颗粒的表面变得粗糙（如图4中（f）），这种粗糙增加了颗粒表面的摩擦力，从而降低了粉末的球形率。但同时粗糙的颗粒表面会减少颗粒间的静电作用和范德华力，并减弱架桥现象，使得颗粒更容易流动，增加流动性。（3）在循环过程中，小粉末颗粒容易被带出或优先消耗掉，卫星颗粒占比降低，从而降低粉末整体表面积，使得颗粒间的摩擦和粘附作用减少，并降低粉末在流动过程中的阻力，进一步提高流动性。

对于循环使用30次后，粉末松装密度和振实密度也略有增加。虽然粉末粒径随着循环次数增加的变化不明显，但是微弱的变化在总体质量上有所呈现。因此，在相同体积下，与0次粉末相比，经过30次循环的粉末质量较大，其松装密度和振实密度也相应提高。松装密度和振实密度的增加有利于提高粉末流动性，在铺粉过程中更易获得较为致密的粉末薄层，减小粉末颗粒间的空隙，进而在熔化凝固后形成更致密的实体结构^[20]。同时在循环使用过程中经过不断地铺粉和筛粉，使得粉末重新混合，消耗小颗粒，筛出尺寸大、不规则颗粒，保留粒径范围适中的颗粒，增加颗粒间的接触面积，也促进了松装密度和振实密度的上升。

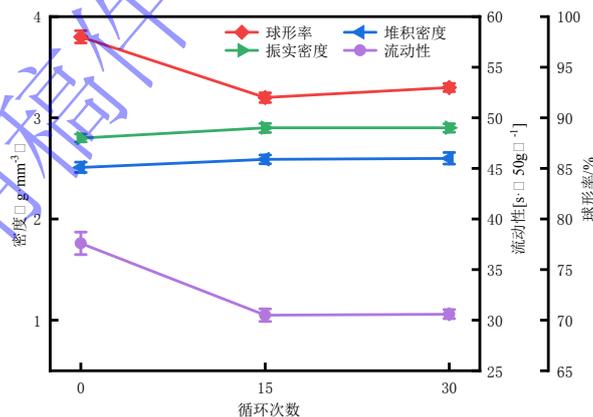


图6 不同循环次数钛合金粉末物理性能

Fig.6 Physical properties of titanium alloy powder with different recycling times

2.2 不同循环次数钛合金成型件的性能

2.2.1 显微形貌

使用不同循环次数粉末制备试样的显微组织形貌如图7所示。从图中可以看出，不同循环次数下的成型试样均具有良好的致密性，未出现孔隙、微裂纹等缺陷。说明经过30次循环使用后粉末的粒径分布及物化性能上的变化并未对成型试样的致密性和显微组织产生影响。从图中可以看到，试样显微组织为细片

层状 $\alpha+\beta$ 结构, 白色区为 α 相, 其周围深色区为 β 相, β 相晶粒更细小^[21], 且随着循环次数增加, 晶粒形态、大小没有明显差异, 与文献^[21]得到的结论相同。细层状 α 相和细小的 β 相可有效抵抗外力作用时内部原子发生位错滑移, 分散应力, 提高试样抗拉强度和延伸率^[23]。同时, 金相组织主要受控于材料的化学成分、热处理过程以及冷却速率等因素, 由于粉末多次循环使用后合金成分并未发生明显改变, 故在相同 SLM 成型环境和热处理条件下试样微观组织结构和析出相特征也未发生变化, 稳定的显微组织能够确保钛合金成型试样具有良好的力学性能。

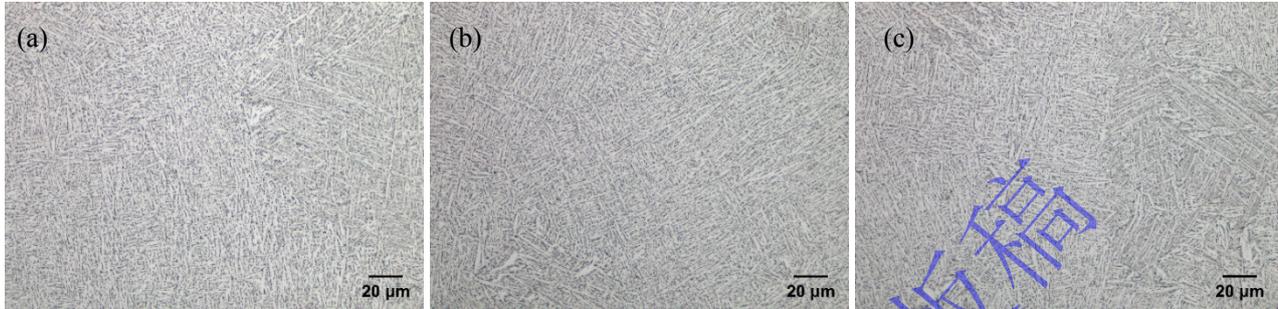


图 7 不同循环次数钛合金试样显微组织

Fig. 7 Microstructure of titanium alloy samples with different recycling times (a) 0 time (b) 15 times (c) 30 times

2.2.2 硬度和密度

图 8 为粉末循环使用后成型试样的硬度和密度测试结果。由图可知, 粉末在不同循环次数下制备的试样密度无变化, 均为 $4.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 说明试样致密度较高。这是由于粉末颗粒形貌、粒度分布的变化程度并不显著, 没有对试样成型密度产生影响。而且经历 30 次循环后成型试样内部仍保持致密且无气孔 (图 7 所示), 进一步说明试样致密度高的原因。由图还可看到, 随着粉末循环次数增加, 试样的显微硬度从 330 HV 到 323 HV, 变化并不明显。随着粉末循环使用次数增加, 粉末化学成分基本没有变化, 化学稳定性有助于维持成型试样的性能。而且成型试样的显微组织结构未受影响, 致密性较高, 因此显微硬度未发生明显的变化。表明试样密度和硬度与循环使用次数的关联性较小。

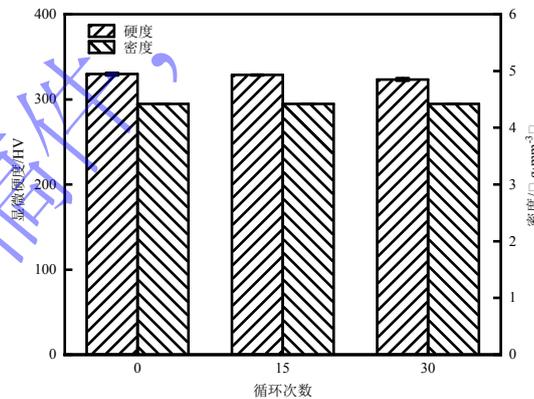


图 8 不同循环次数钛合金试样硬度和密度

Fig.8 Hardness and density of titanium alloy samples with different recycling times

2.2.3 拉伸性能

图 9 为不同粉末循环次数成型试样拉伸性能。由图可知, 与 0 次粉末相比, 循环次数增加到 30 次时, 抗拉强度、屈服强度和延伸率分别增加到 1003 MPa、919 MPa 和 15%, 相比于 0 次分别提高了 2.77%、5.63%和 25%。而且 0 次到 30 次循环粉末成型试样拉伸性能均高于 ISO5832-3 标准中规定最小值 (抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 860 MPa、780 MPa 和 10%), 满足实际使用要求。由 2.1.3 节粉末特性结果可知, 粉末循环使用 30 次后仍具有良好的流动性, 粉末能够均匀地铺展在基板上, 试样稳定成型、缺陷减少且致密性良好, 从而保证了试样良好的力学性能。同时也有相关研究报道表明^[2], 在一定范

围内适量的增加氧含量可以提高 SLM 钛合金试样的强度。本研究结果显示, 粉末循环 0 次到 15 次粉末中的氧含量上升, 对应的试样屈服强度和延伸率略有增加。这是由于微量氧可以溶解在 Ti6Al4V 合金中形成固溶体, 增加合金的晶格畸变, 提高位错运动阻力, 增强合金强度。微量氧元素还可以促进晶界处细小氧化物的形成, 即使宏观上的显微组织形貌和晶粒没有明显变化, 但是细小氧化物也能够钉扎晶界, 阻碍晶界滑移, 从而在一定程度上提高试样的屈服强度和延伸率^[25]。当粉末循环从 15 次到 30 次时, 氧含量未发生变化, 试样的屈服强度和延伸率也未发生变化, 进一步说明氧含量与拉伸性能之间存在着相关性。

图 10 为不同粉末循环次数成型试样拉伸断裂后的断口形貌。由图可知, 不同粉末循环次数试样断口形貌特征基本相似, 宏观形貌显示断口处呈暗灰色, 有明显缩颈和较宽的剪切唇, 中心位置放大后的微观形貌可观察到大小不一的韧窝 (图 10 中箭头标记), 且断口处无裂纹, 有少量微孔 (图 10 中三角形标记), 表明钛合金试样在拉伸过程中经历塑性变形, 形成了韧性断裂。

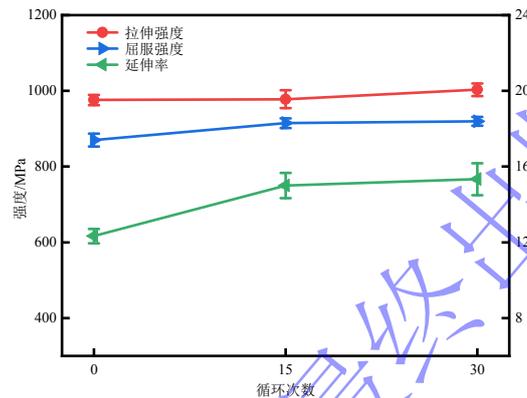


图 9 不同循环次数钛合金试样拉伸性能

Fig.9 Tensile properties of titanium alloy samples with different recycling times

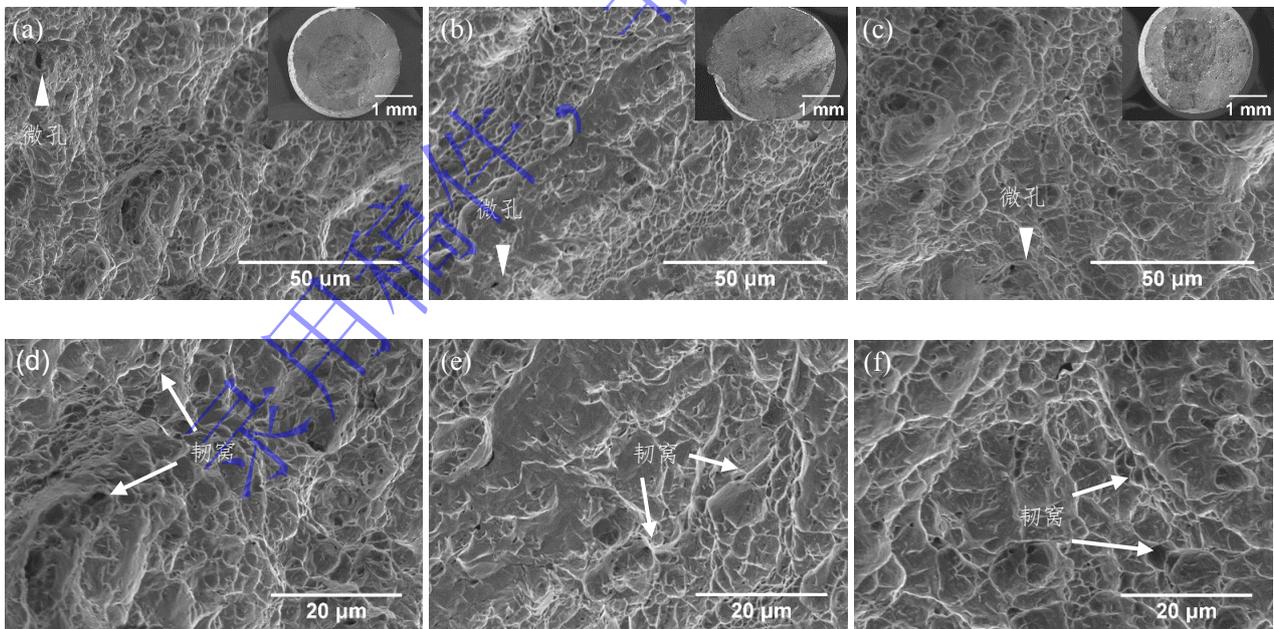


图 10 不同循环次数钛合金试样拉伸断口形貌 (a, d) 0 次 (b, e) 15 次 (c, f) 30 次

Fig.10 Tensile fracture morphology of titanium alloy samples with different recycling times (a, d) 0 time (b, e) 15 times (c, f) 30

times

3 结果分析

(1) 随着循环使用次数的增加, Ti6Al4V 钛合金粉末材料的粒度分布集中, 小尺寸颗粒比例下降, 大颗粒占比提高, 粉末粒度特征值均有增加, 颗粒出现粗化。循环 30 次后, 粉末颗粒间粘附和团聚现象减少, 粉末流动性提高, 球形率降低, 振实密度和松装密度变化微弱, 粉末成分中铝元素含量下降、氧元素含量上升, 其他元素成分保持稳定。

(2) 不同粉末循环使用次数下制备试样, 成型试样显微组织没有发生明显变化, 由细片层状 $\alpha+\beta$ 相组成。试样致密性良好, 未出现孔隙、微裂纹等缺陷, 不同循环次数下试样密度值未变, 均为 $4.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 试样显微硬度也没有受到明显影响。

(3) 粉末循环次数从 0 次增加至 15 次的过程中, SLM 制备试样的拉伸强度保持稳定, 屈服强度和延伸率略有上升。循环次数进一步增加至 30 次时, 试样的拉伸强度有所提高, 屈服强度和延伸率未变化。不同循环次数试样的拉伸断口形貌特征一致, 断裂类型均为韧性断裂。说明钛合金粉末经历 30 次循环使用, 仍能保持其良好的力学性能, 满足实际使用要求。

参考文献

- [1] Xiong Y, Tang Y L, Zhou Q, et al. Intelligent additive manufacturing and design state of the art and future perspectives [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103139.
- [2] Denti L, Sola A, Defanti S, et al. Effect of powder recycling in Laser-based powder bed fusion of Ti-6Al-4V[J]. *Manufacturing Technology*, 2019, 19(2): 190.
- [3] Wang W, Liu B Y, Li C F, et al. Aging behavior of TC4 titanium alloy powder recycled in selective laser melting process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 279.
(王维,柳宝元,李长富,等. TC4 钛合金粉末在 SLM 工艺中的循环老化行为[J].稀有金属材料与工程,2019,48(1):279.)
- [4] Song W, Zhu Y P, Liang J J, et al. Effect of powder recycling on microstructure and tensile behavior of GH4169 alloy fabricated by selective laser melting[J].*Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10): 171.
(宋巍,朱玉平,梁静静,等.粉末循环使用对激光选区熔化 GH4169 合金组织及拉伸行为的影响[J].中国激光,2024,51(10): 171.)
- [5] Hu J, LV X F, Shen L D, et al. Research progress on metal powder reuse of powder bed fusion[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2022, 32(3): 44.
(胡娟,吕新峰,沈理达,等.粉末床熔融金属粉末回收再利用研究进展[J].粉末冶金工业,2022,32(3):44.)
- [6] Li K F, Shi Q, Mao X H, et al. Effect of metallic powder properties on selective laser melting technology and component performances[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(6): 499.
(李克峰,施麒,毛新华,等.金属粉末特性对选区激光熔化工艺及其制件性能影响[J].粉末冶金技术,2022,40(6):499.)
- [7] Contaldi V, Corrado P, Del Re, F. et al. Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V parts with reused powder[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2022, 120: 1013.
- [8] He Y L, Lei L M, Hou H P. Research status on powder recycling of metal powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(11): 29.
(何艳丽,雷力明,侯慧鹏.金属粉末床熔融增材制造粉末循环使用研究现状[J].机械工程材料,2020,44(11):29.)
- [9] Fernando J. A, Jessica S, Kirsten K, et al. Effect of powder reuse on mechanical properties of Ti-6Al-4V produced through selective laser melting[J].*International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, 91: 105273.
- [10] Delacroix T, Lomello F, Schuster F, et al. Influence of powder recycling on 316L stainless steel feedstocks and printed parts in laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 50: 102553.
- [11] Lan M B, Hren M, Kosec T. The microstructure, mechanical and electrochemical properties of 3D printed alloys with reusing powders[J]. *Scientific reports*, 2023, 13(1): 1.
- [12] Yáñez A, Fiorucci M P, Martel O, et al. The influence of dimensions and powder recycling on the roughness and mechanical

- properties of Ti-6Al-4V parts fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5787.
- [13] Weiss C, Haefner C L, Munk J. On the influence of AlSi10Mg powder recycling behavior in the LPBF process and consequences for mechanical properties[J]. *JOM*, 2022, 74: 1188.
- [14] Koushik T, Shen HP, Kan WH, et al. Effective Ti-6Al-4V powder recycling in LPBF additive manufacturing considering powder history[J]. *Sustainability*, 2023, 15(21): 1.
- [15] Gruber H, Karimi P, Hryha E, et al. Effect of powder recycling on the fracture behavior of electron beam melted alloy 718[J]. *Powder Metallurgy Progress*, 2018, 18(1): 40.
- [16] Guo Y M, Ding R C, Yao J, et al. Effect of GH3536 powder recycling on mechanical properties of SLM parts[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023, 7: 301.
(郭雨萌,丁若晨,姚俊,等. GH3536 粉末循环利用对 SLM 成型件力学性能的影响[J].机械设计与制造,2023,7:301.)
- [17] O'Leary R, Setchi R, Prickett P W. An investigation into the recycling of Ti-6Al-4V powder used within SLM to improve sustainability[J]. *InImpact: The Journal of Innovation Impact*, 2015, 8: 377.
- [18] Tang H P, Qian M, Liu N, et al. Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting[J]. *JOM*, 2015, 67(3): 555.
- [19] Soundarapandiyam G, Johnston C, Khan R, et al. The effects of powder reuse on the mechanical response of electron beam additively manufactured Ti6Al4V parts[J]. *Additive manufacturing*, 2021, 46:102101.
- [20] Lu C, Xiao M Z, Qu Y B, et al. Evolution mechanism of powder properties of recycled 316L stainless steel in selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402009.
(路超,肖梦智,屈岳波,等.激光选区熔化成型 316L 循环使用粉末特性演变机理研究[J].中国激光,2021,48(14):1402009.)
- [21] Zhao P P, Song Y W, Dong K H, et al. Synergistic effect mechanism of different ions on the electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2023, 59(7): 939.
(赵平平,宋影伟,董凯辉等.不同离子对 TC4 钛合金电化学腐蚀行为的协同作用机制[J].金属学报,2023,59(7):939.)
- [22] Carrion P E, Soltani-Tehrani A, Phan N. et al. Powder recycling effects on the tensile and fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts[J]. *JOM*, 2019, 71: 963.
- [23] Yu L X, Zhang R J, Tan F B. Influence of heat treatment technology on mechanical properties of 3D printed titanium alloy specimens [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2024.28 (29): 4741.
(于露翔,张若槿,谭发兵.热处理技术 3D 打印钛合金试件机械性能的影响[J].中国组织工程研究,2024,28 (29):4741.)
- [24] Barba D, Alabort C, Tang Y T, et al. On the size and orientation effect in additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Materials & Design*, 2019, 186:108235.
- [25] Skalon M, Meier B, Leitner T, et al. Reuse of Ti6Al4V Powder and Its Impact on Surface Tension, Melt Pool Behavior and Mechanical Properties of Additively Manufactured Components[J].*Materials*, 2021, 14(5):1251.