

DOI: 10.11973/jxgccl202011006

# 金属粉末床熔融增材制造粉末循环使用研究现状

何艳丽<sup>1</sup>, 雷力明<sup>2</sup>, 侯慧鹏<sup>1</sup>

(1. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201306;

2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

**摘要:** 粉末床熔融增材制造技术可快速成形复杂结构零件, 尺寸精度高, 在诸多领域得到广泛关注, 但相比于传统制造方法, 其成本较高; 金属粉末的循环使用则可以有效降低制造成本。结合增材制造金属粉末的研究进展, 对常用的 316L 不锈钢、Ti6Al4V 合金和 IN718 合金粉末在循环使用过程中的化学性能、物理性能和成形件性能变化进行了概述, 并基于民用航空零部件增材制造需求, 分析了金属粉末循环使用时存在的若干问题, 提出了解决思路。

**关键词:** 粉末床增材制造; 循环使用; 金属粉末

中图分类号: TG14

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)11-0029-06

## Research Status on Powder Recycling of Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing

HE Yanli<sup>1</sup>, LEI Liming<sup>2</sup>, HOU Huipeng<sup>1</sup>

(1. AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Powder bed fusion additive manufacturing technique can quickly form complex structural parts with high dimensional accuracy, and has received extensive attention in many fields. However, compared with traditional manufacturing methods, its cost is higher. The recycling of metal powder can effectively reduce manufacturing costs. Combined with the research progress on additive manufacturing metal powders, changes of the chemical properties, physical properties and parts properties of commonly used 316L stainless steel, Ti6Al4V alloy and IN718 alloy powders in the recycling process are summarized. On the basis of demand for additive manufacturing of civil aviation parts, several problems existing in metal powders recycling are analyzed, and solutions are proposed.

**Key words:** powder bed additive manufacturing; recycling; metal powder

## 0 引言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 是一种基于分层制造的快速成形技术, 其突破了传统减材制造方法固有的局限性, 无需模具, 能够直接利用计算机辅助设计的模型进行复杂几何形状零件的近净成形, 具有制造周期短、小批量零件生产成本低等特点。其中: 定向能量沉积如激光直接沉积 (Laser Melting Deposition, LMD) 法生产效率且可进行零件修复; 粉末床熔融 (Powder Bed Fusion, PBF) 技术则能够成

形较为复杂的结构, 尺寸精度更高, 因此得到了更为广泛的关注, 在民用航空领域发展迅速<sup>[1-2]</sup>。相比于传统制造方法, 粉末床熔融技术成本较高, 其中粉末成本占据了重要部分。粉末的重复循环使用是粉末床增材制造的关键环节之一, 即将单次成形后未烧结/熔化的金属粉末收集后进行干燥、筛分, 然后用于再次成形。粉末冶金和喷涂等虽然同样以金属粉末为原材料, 但其单次成形消耗金属粉末较多, 剩余材料无需进行重复使用。然而, 粉末床增材制造存在一个显著的特点: 即使仅成形一个零件, 也需根据零件高度准备能覆盖成形仓相应高度的金属粉末 (对于有供粉仓的成形设备, 同样需将金属粉末填充至所需高度), 粉末利用率并不高。有研究发现, 单次粉末床增

收稿日期: 2020-08-25; 修订日期: 2020-10-05

基金项目: 科技部重点研发项目 (2018YFB1106400)

作者简介: 何艳丽 (1987—), 女, 湖北十堰人, 工程师, 硕士

材制造时仅有质量分数 2%~3% 的粉末熔化为金属部件<sup>[3]</sup>,可见将粉末回收进行重复使用是降低成本、缩短生产周期的最有效的手段<sup>[4-5]</sup>。

粉末重复使用最为理想的情况是回收粉末(或原始粉末和回收粉末的混合物)的物理、化学性能与原始粉末无显著差异,且成形件性能与原始粉末制件相比也没有明显差异。但是,这部分未熔化凝固为零件的金属粉末与热源进行了一系列动态热交互作用,每次成形均会造成部分粉末质量变差,其物理、化学特性不可避免地会在重复循环使用中发生一定变化。因此,有必要对其重复用于增材制造是否会导致零件性能下降进行验证,尤其是将粉末循环制件用于质量要求较高的航空航天和某些生物医学等风险较高的行业时。为此,作者结合增材制造领域金属粉末的研究进展,选取近年来业内研究较多的 316L 不锈钢、Ti6Al4V 合金和 IN718 合金 3 种粉末材料,对循环使用过程中粉末的化学性能、物理性能、制件性能变化进行了概述,并基于民用航空零部件增材制造需求,分析了金属粉末循环使用时存在的若干问题,提出了解决思路。

## 1 增材制造金属粉末研究进展

随着金属增材制造技术的发展应用,研究人员投入大量精力致力于增材制造成形及后处理工艺的研究,以减少成形件内部缺陷、降低表面粗糙度、提高力学性能和生产效率。近年来,人们逐渐认识到,金属粉末作为金属增材制造的原材料,其化学性质及粒径分布、孔隙率、流动性和松装密度等物理性能对成形件表面粗糙度、力学性能等有着重要影响。

通常,金属粉末主元素及杂质元素如碳、氢、氧、氮等满足既定的技术要求或标准则认为粉末合格。金属粉末各元素对增材制造成形件最终性能的影响多是进行定性分析,改变某些化学元素的含量有利于得到更好的力学性能和成形性。魏菁等<sup>[6]</sup>研究发现,降低氧、氮、硅含量可以提高激光选区熔化成形 Hastelloy X 合金的持久性能,增加碳元素含量则会提高其强度。随着增材制造成形特点和机理的逐渐明晰,部分学者开始进行面向增材制造工艺的新材料设计,通过粉末物理性能和成分调控来适应成形工艺以提高成形件的性能<sup>[7-8]</sup>。

粉末粒度是增材制造工艺优化和参数调整的重要依据。在其他参数相同的情况下,粉末直径过大可能导致成形件致密性下降;粉末直径越小,在成形

过程中则越容易出现过热现象,且颗粒越细,其比表面积越大,由于表面摩擦作用,粉末流动性变差,同时还可能会出现团聚现象。但是粒径小、粒度分布范围窄的粉末能够获得稳定的熔池,从而提高成形件的致密性<sup>[9-10]</sup>。球形度会影响粉末流动性进而影响铺粉质量<sup>[11-13]</sup>,卫星球、长条颗粒均会降低粉末的流动性。此外,潮湿环境会增加粉末湿度,使其表面氢键增加,相互作用力增大,从而降低流动性,增加成形件的孔隙率<sup>[14-16]</sup>。

现阶段普遍采用的气雾化制粉方式不可避免会导致空心粉末的存在,使成形件中出现较多孔隙缺陷,影响合金的强度、持久寿命和疲劳性能等<sup>[17]</sup>。因此,减少空心粉末占比一直是粉末研发人员的重要目标之一。

## 2 金属粉末在循环使用中的变化

### 2.1 化学成分的变化

#### 2.1.1 316L 不锈钢粉末

316L 不锈钢粉末与其他金属粉末最明显的区别为其表面存在一层  $\text{SiO}_2$  氧化层,随着不断的重复使用,粉末表面氧含量上升,氧化层厚度增加<sup>[18-21]</sup>,铬、锰、铁元素等向粉末表面扩散,氧化层成分由  $\text{SiO}_2$  转变为  $\text{MnCr}_2\text{O}_4$ <sup>[22]</sup>。多次重复使用后,粉末中一些原始元素,如铬、镍、锰、磷、硫、氮等轻微增加,碳、铁、钼、硅等略有下降,但从统计学角度而言,各元素变化均在测量误差范围内。此外,不规则、粗糙颗粒表面的硅、镍、硫、氧含量在多次重复使用后有所增加<sup>[19]</sup>。

诸多研究表明,316L 不锈钢粉末元素的整体变化比较微小,可以近似认为其基本保持不变,这可能是由于粉末表面氧化层的存在阻碍了部分元素的变化。颗粒表面出现的一些非氧化物组成元素,则是因部分金属粉末在激光作用下局部熔化后发生成分偏析所致<sup>[19]</sup>。

#### 2.1.2 Ti6Al4V 合金粉末

Ti6Al4V 合金粉末主要应用激光选区熔化<sup>[23]</sup>(Selective Laser Melting, SLM)和电子束选区熔化(Electron Beam Melting, EBM)两种粉末床熔融技术成形,其成分研究主要集中于氧、氮、铝、钒等元素的变化。在循环使用过程中,EBM 成形用 Ti6Al4V 合金粉末中氧元素含量有所增加<sup>[24-28]</sup>,而 SLM 成形时各元素含量基本保持不变<sup>[29-31]</sup>。

#### 2.1.3 IN718 高温合金粉末

近年来有关 IN718 高温合金增材制造工艺的

研究数量有所增加,然而其粉末循环使用相关报道较少,仅有 SLM<sup>[32-34]</sup>、EBM、LMD 修复<sup>[35-36]</sup>等 3 种方式少量涉及。

SLM 成形用 IN718 高温合金粉末在循环使用时,化学成分基本无明显变化,因具有高纯氩气保护气氛,在不添加新粉末的情况下可重复使用 10 次以上,添加新粉末时可重复使用达 38 次<sup>[23]</sup>。但也存在氧元素含量上升,重复使用次数减少的情况<sup>[33-34]</sup>。

综上所述,粉末循环使用过程中应重点关注氧元素的含量变化,虽然有研究表明成形件中的氧含量低于粉末原料的<sup>[37]</sup>,但粉末表面氧化物的增加会影响粉末对激光的吸收,从而影响成形质量。此外,在粉末循环使用过程中还需对其中的亲氧元素和易烧损元素进行监控。

## 2.2 物理性能的变化

在粉末粒度方面,上述 3 种材料无论通过 SLM 还是 EBM 方式成形,平均粒径均增大,整体粒度分布变窄或基本不变。其主要原因为铺粉时小颗粒填充至大颗粒间隙中,随着成形的不断进行,小颗粒逐渐消耗减少;而成形过程中的飞溅、黏连、重熔等使得大颗粒数量增加。已有研究表明,不锈钢粉末多次使用后颗粒长径比增加,形状不规则颗粒数量上升<sup>[18-20]</sup>,且存在较多的附属颗粒和黏结颗粒<sup>[38]</sup>。随着重复使用次数的增加,卫星球的数量先减少后增加,但也有多次使用后卫星球数量仍不断减少的报道。

在粉末形貌方面,EBM 成形用 Ti6Al4V 和 IN718 合金粉末在多次成形后明显出现球形度下降、表面粗糙度增大的现象,甚至出现拉长和变形颗粒;SLM 成形方式下,颗粒表面仅在使用次数较多时变得更为粗糙<sup>[30]</sup>,球形度基本无变化;而部分 316L 不锈钢粉末在重复使用后出现球形度提高、表

面更加光滑的现象<sup>[19,21]</sup>,这可能是由于增材制造过程中的熔化和凝固使一些原本受热影响粗糙化的颗粒表面受到破坏所致。

鉴于重复使用后粉末中小颗粒数量减少、卫星颗粒占比降低,其流动性普遍得到提高;但当使用次数过多,卫星颗粒数量再次上升时,流动性提高的趋势会有所减弱直至稳定。

此外,316L 不锈钢粉末在循环使用过程中出现了磁性颗粒,并且含有大量细小的  $\delta$  铁素体晶粒和一些完全或几乎完全奥氏体化的单晶粉末颗粒,而原始粉末中仅存在多晶奥氏体颗粒<sup>[19,21]</sup>。推测相变是不锈钢粉末磁性发生变化的原因,在重复使用过程中需要将带有磁性的金属粉末进行筛选去除。RENDEROS 等<sup>[35]</sup>在 IN718 合金粉末重复使用过程中也有类似发现,具体原因尚需进一步研究。由于磁性颗粒的存在会导致粉末团聚,降低铺粉质量,如何避免该现象将成为未来增材制造粉末循环利用的一个重要研究方向。

## 2.3 成形件力学性能的变化

随着循环使用次数的增加,粉末流动性、表面形貌和化学成分等均发生一定变化,成形件的力学性能亦会受到影响。目前,相关研究主要集中在拉伸性能、疲劳性能和冲击性能等方面。

316L 不锈钢、Ti6Al4V 合金和 IN718 合金 3 种粉末循环使用后成形件的拉伸性能与原始粉末制件的相差不大,抗拉强度有时呈上升趋势<sup>[27,31,38]</sup>;Ti6Al4V 合金成形件的疲劳性能虽然整体没有显著变化,但高循环应力条件下表现出较高的疲劳寿命<sup>[31]</sup>;IN718 合金成形件的断裂韧性和断裂应变变化较大,但与重复使用次数并不存在明显的关联性<sup>[32,34,35]</sup>。具体研究结果见表 1。

表 1 3 种粉末成形件力学性能随循环使用次数的变化

Table 1 Changes of mechanical properties of three powder molded parts with the number of cycles

粉末材料牌号	循环使用次数	循环使用方式	性能变化(与新粉末成形件相比)	文献
316L	30	—	抗拉强度、屈服强度基本不变	[19]
316L	>10	—	硬度轻微上升	[20]
Ti6Al4V	7	每次添加新粉末	拉伸性能基本不变	[25]
Ti6Al4V	21	不添加新粉末	拉伸性能基本不变	[26]
Ti6Al4V	—	—	屈服强度基本不变,抗拉强度略有上升	[27]
Ti6Al4V	31	不添加新粉末	抗拉强度、屈服强度、伸长率基本不变	[30]
Ti6Al4V	15	不添加新粉末	抗拉强度、屈服强度基本不变	[31]
Ti6Al4V	12	不添加新粉末	屈服强度基本不变,抗拉强度略有上升	[38]
IN718	14	不添加新粉末	断裂韧性变化幅度大,且与循环次数无关联	[32]
IN718	10	—	拉伸性能基本不变	[33]
IN718	—	—	抗拉强度、屈服强度基本不变,伸长率和断裂韧性降低	[34]
IN718	—	—	伸长率和断裂韧性降低,抗拉强度基本不变	[36]

综上,粉末多次重复使用并不会使成形件拉伸性能明显下降。成形件性能与内部缺陷有关。目前其他性能与粉末重复使用的相关研究十分有限,也没有建立缺陷与粉末重复使用次数的关系,因此无法表明粉末重复使用是否会导致其他性能或波动程度的变化。

### 3 增材制造粉末循环使用存在的问题

(1) 粉末特性表征及测量方法亟待完善。增材制造用粉末材料的性能指标众多,相互之间的关系如图1所示。粉末流动性<sup>[39]</sup>作为一个综合性指标,与粉末的物理性能和环境湿度存在强相关性,其对增材制造成形过程的铺粉效果有着重要影响。粉末流动性可以使用流速、休止角、雪崩角、豪斯纳比(HR)<sup>[23]</sup>等参数进行表征,也有学者通过定义的粉末分布、粒度等表征粉末的流动性<sup>[40]</sup>。由此可见,行业内各研究机构或研究人员之间对粉末特性解析角度尚未达成一致,这主要是由于目前尚缺乏更好的表征和测量方式。

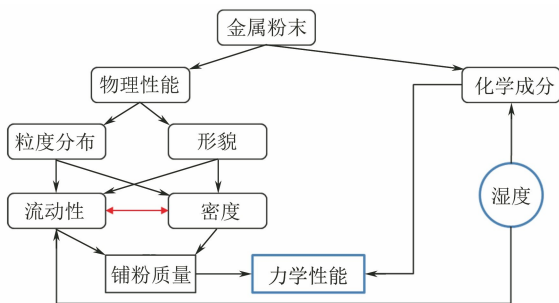


图1 增材制造金属粉末性能间的关系

Fig. 1 Relationship between properties of metal powder for additive manufacturing

不同牌号金属粉末在循环使用过程中的表现不尽相同,因此探明特定粉末的具体性能对于评估粉末循环使用对工艺和产品的影响至关重要。美国国家标准与技术研究所(NIST)的研究人员在一份报告中阐述了粉末床增材制造的科学测量需求<sup>[41]</sup>,并致力于开发用于原始金属粉末特性描述的标准试验方法。CHANDRASEKAR等<sup>[42]</sup>提出了一种原位分析方法,在铺粉过程中对粉末行为进行检测,证明了Ti6Al4V和IN718合金粉末的原位行为存在差异。

然而目前,国内学者大多致力于增材制造件缺陷的无损检测方法以及检测准确性研究,仅有少部分关注粉末材料自身性能的检测和表征。对于从事增材制造生产的企业而言,粉末循环使用过程中如何快速进行影响成形件质量的关键性能的检测是亟

待解决的问题,这一方面需要对粉末关键性能进行快速识别,另一方面需要开发出适用于生产现场的简易有效的检测装置,并制定相应的检测标准。

(2) 粉末特性对增材制造件性能的影响没有定量描述。在粉末冶金中,通常先选择认为合适的粉末,然后对工艺参数进行优化来提高零件质量,很少直接探讨金属粉末如何影响最终产品的微观结构和性能,对粉末形态、微观结构等特性进行完整全面的表征则几乎从未涉及。增材制造成形过程以及制件质量与粉末原料的各项性能有极大的相关性。粉末粒度改变会对铺粉质量产生影响,但何种粒度分布能获得更好的铺粉效果和产品质量尚无定论,目前默认使用的 $D_{10}$ , $D_{50}$ , $D_{90}$ 等粒度分布参数源自早已成熟应用的传统粉末冶金行业,其是否足以表征增材制造用金属粉末粒度分布特征尚不确定。对于化学成分如何影响成形件性能,因材料牌号差异以及可能的保密需求等原因,相关研究仅表明某些元素的降低或升高会对拉伸、持久、疲劳等性能产生某种趋势性的影响,也分析了变化的原因,但没有给出明确的上限或下限。

从当前金属粉末循环使用研究现状可以发现,研究者对于粉末颗粒的某些特性对后续产品性能的影响有获得相同或类似结论的,也有获得完全相反结论的。可见,将单个粉末颗粒的特性与粉末整体性能、加工过程和最终成形件性能联系起来,建立相互间的定量关系仍是一项具有挑战性的任务。

(3) 尚未明确如何控制成形过程副产物。增材制造成形时在热源与粉末交互作用过程中会形成较多的副产物:由于激光照射至金属粉末表面会产生一定冲击力,部分金属粉末在该作用力下飞射而出;高温熔池使得金属熔化甚至气化,熔融和尚未熔化的金属粉末在金属蒸气作用下形成飞溅物,这些飞溅物可能会成为满足粉末粒度要求的颗粒,也可能形成较大颗粒,或者黏附在金属粉末表面形成卫星球;此外,飞溅而出的金属液滴与气氛中的残余氧气相互作用后会形成氧化物。以上情况均会对金属粉末产生不良影响,从而在后续循环使用过程中影响成形件的性能。因此,如何避免在增材制造过程中产生过多的副产物,或对其进行有效排除至关重要。

(4) 成形设备对粉末循环使用性能衰减的影响不清晰。增材制造成形过程中,除复杂的热交互作用外,设备自身激光在成形区域的一致性、定位精度、成形气氛、飞溅物及烟尘排除等也对粉末性能和

成形件质量有着重要影响。例如,SLM成形由于处于非真空状态,通常需要填充保护气,出风口位置、内部风场情况等均会对成形过程中飞溅物的形成及分布产生影响,从而影响成形质量。

已有研究表明,设备的工艺性、参数等对循环使用后粉末成形件性能的影响已超过粉末自身特性变化的影响<sup>[3,29]</sup>。为提高生产效率,降低生产成本,增大激光选区熔化成形件尺寸,多光束增材制造设备逐步研发成熟,部分产品已投入市场。然而,多激光束也使得成形设备内部环境更加复杂,此种条件下粉末循环使用规则可能会发生变化,而循环使用极限是否会提前到来尚未可知。

(5) 缺乏统一的评价模型或标准,验证周期长、成本高。目前,粉末循环使用主要有3种方式,一是单纯使用回收粉末,二是将回收粉末与新粉末混合使用,三是将循环使用相同次数的粉末混合使用,前两种方式占主导地位。由于设备不同、粉末牌号、粉末混合方式和比例等存在差异,各机构和研究人员获得的结果可能会呈现不同的趋势。因此,当前研究通常需进行大量的粉末循环和材料性能测试,以建立粉末重复使用次数与零件结构强度的关系;但某种粉末的研究结果无法有效应用于其他粉末零部件的生产,必须对各粉末性能和成形布局进行重复验证,这种点对点的方法抑制了粉末的有效重复利用。因此,建立一种具有普适性的粉末重复使用评价模型或标准是加快粉末重复使用亟待解决的问题。CORDOVA等<sup>[23]</sup>提出了一种粉末重复使用过程中各项检测的结构化流程,确定了分析的最佳顺序,同时对每个步骤提出了具体检测指标以决策是否进行下一步检测或是否可继续使用该粉末。但该模型的完整性和普适性尚未经过验证,且其主要针对工艺参数方面,关于金属粉末特性的内容则较少。

#### 4 结束语

增材制造技术近年来得到了广泛关注,国内外学者从工艺、设计、材料、标准等方面开展了大量研究工作,各种应用案例不断涌现。然而,成本过高仍是制约其规模化应用的关键因素之一。金属粉末在源头上决定了增材制造的成本和产品质量,充分开展粉末循环使用研究对于控制成本、保障产品质量稳定性至关重要。由于增材制造金属粉末循环使用的影响因素众多、规律复杂,其研究和应用仍然面临着诸多问题。国内相关研究相比国外更为薄弱。建

议根据工艺特点和工艺路线,制定可行的方案和制度,加快增材制造金属粉末的全面管控和性能测试,扩展应用案例,建立相关标准,助推增材制造技术在航空航天等领域的工程化应用。

#### 参考文献:

- [1] 巩水利,锁红波,李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术,2013,56(13):66-71.
- [2] 刘业胜,韩品连,胡寿丰,等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术,2014,57(10):62-67.
- [3] SARTIN B, POND T, GRIFFITH B, et al. 316L powder reuse for metal additive manufacturing[C]//Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin TX: University of Texas, 2017: 351-364.
- [4] PINTO F C, SOUZA FILHO I R, SANDIM M J R, et al. Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by  $\delta$ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100979.
- [5] JELIS E, CLEMENTE M, KERWIEN S, et al. Metallurgical and mechanical evaluation of 4340 steel produced by direct metal laser sintering[J]. JOM, 2015, 67(3): 582-589.
- [6] 魏菁,李雅莉,何艳丽,等. Hastelloy-X粉末成分对激光选区熔化成形各向成形性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202011.
- [7] 杜金辉,赵光普,邓群,等. 中国变形高温合金研制进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 27-39.
- [8] 范立坤. 增材制造用金属粉末材料的关键影响因素分析[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(7): 480-482.
- [9] UHLMANN E, KERSTING R, KLEIN T B, et al. Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components[J]. Procedia CIRP, 2015, 35: 55-60.
- [10] PRASHANTH K G. Selective laser melting of Al-12Si[D]. Dresden: Technische Universität Dresden, 2014.
- [11] KEMPEN K, THIJS L, YASA E, et al. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Physics Procedia, 2011, 22: 484-495.
- [12] European Powder Metallurgy Association. Introduction to additive manufacturing technology: A guide for designers and engineers[EB/OL]. (2015-10-13). <https://www.epma.com/epma-news/introduction-to-additive-manufacturing-technology-brochure-launched>.
- [13] SPIERINGS A B, VOEGTLIN M, BAUER T, et al. Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2016, 1(1/2): 9-20.
- [14] LUTTER-GÜNTHER M, SCHWER F, SEIDEL C, et al. Effects on properties of metal powders for laser beam melting along the powder process chain[C]//Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference. Berlin, Germany: Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance, 2016.

- [15] HEBERT R J. Viewpoint: Metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(3): 1165-1175.
- [16] WEINGARTEN C, BUCHBINDER D, PIRCH N, et al. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 112-120.
- [17] 张义文. 高温合金粉末内部孔洞的研究概况[J]. *钢铁研究学报*, 2002, 14(3): 73-77.
- [18] GORJI N E, O'CONNOR R, BRABAZON D. XPS, XRD, and SEM characterization of the virgin and recycled metallic powders for 3D printing applications[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 591: 012016.
- [19] HEIDEN M J, DEIBLER L A, RODELAS J M, et al. Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 25: 84-103.
- [20] GORJI N E, O'CONNOR R, MUSSATTO A, et al. Recyclability of stainless steel (316L) powder within the additive manufacturing process [J]. *Materialia*, 2019, 8: 100489.
- [21] SUTTON A T, KRIEWEALL C S, KARNATI S, et al. Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 100981.
- [22] LUTTER-GÜNTHER M, GEBBE C, KAMPS T, et al. Powder recycling in laser beam melting: Strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency [J]. *Production Engineering*, 2018, 12(3/4): 377-389.
- [23] CORDOVA L, CAMPOS M, TINGA T. Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting by powder characterization[J]. *JOM*, 2019, 71(3): 1062-1072.
- [24] GHODS S, SCHULTZ E, WISDOM C, et al. Electron beam additive manufacturing of Ti6Al4V: Evolution of powder morphology and part microstructure with powder reuse[J]. *Materialia*, 2020, 9: 100631.
- [25] WEI C B, MA X L, YANG X J, et al. Microstructural and property evolution of Ti6Al4V powders with the number of usage in additive manufacturing by electron beam melting[J]. *Materials Letters*, 2018, 221: 111-114.
- [26] 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): 555-563.
- [27] SCHUR R. Effects of powder reuse on the mechanical properties of electron beam additively manufactured Ti-6Al-4V[D]. Seattle: University of Washington, 2019.
- [28] NANDWANA P, PETER W H, DEHOFF R R, et al. Recyclability study on inconel 718 and Ti-6Al-4V powders for use in electron beam melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(1): 754-762.
- [29] O'LEARY R, SETCHI R, PRICKETT P, et al. An investigation into the recycling of Ti-6Al-4V powder used within SLM to improve sustainability[J]. *The Journal of Innovation Impact*, 2016, 8(2): 377-388.
- [30] QUINTANA O A, ALVAREZ J, MCMILLAN R, et al. Effects of reusing Ti-6Al-4V powder in a selective laser melting additive system operated in an industrial setting[J]. *JOM*, 2018, 70(9): 1863-1869.
- [31] 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(3): 963-973.
- [32] ARDILA L C, GARCIANDIA F, GONZÁLEZ-DÍAZ J B, et al. Effect of IN718 recycled powder reuse on properties of parts manufactured by means of selective laser melting[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 99-107.
- [33] HANN B A. Powder reuse and its effects on laser based powder fusion additive manufactured alloy 718 [J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2016, 9(2): 209-213.
- [34] STRONDL A, LYCKFELDT O, BRODIN H, et al. Characterization and control of powder properties for additive manufacturing[J]. *JOM*, 2015, 67, 549-554.
- [35] RENDEROS M, TORREGARAY A, GUTIERREZ-ORRANTIA M E, et al. Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material[J]. *Materials Characterization*, 2017, 134: 103-113.
- [36] RENDEROS M, GIROT F, LAMIKIZ A, et al. Ni based powder reconditioning and reuse for LMD process[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 769-777.
- [37] VELASCO-CASTRO M, HERNÁNDEZ-NAVA E, FIGUEROA I A, et al. The effect of oxygen pickup during selective laser melting on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V lattices[J]. *Heliyon*, 2019, 5(12): e02813.
- [38] SEYDA V, KAUFMANN N, EMMELMANN C. Investigation of aging processes of Ti-6Al-4V powder material in laser melting[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 425-431.
- [39] PRESCOTT J K, BARNUM R A. On powder flowability[J]. *Pharmaceutical Technology*, 2000, 24(10): 60-84.
- [40] KIANIA N, BABAK L. 3D printing and additive manufacturing: State of the industry annual worldwide progress report[M]. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc. 2016.
- [41] MANI M, LANE B, DONMEZ A, et al. Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing powder bed fusion processes [R]. Gaithersburg: U.S. National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [42] CHANDRASEKAR S, COBLE J B, YODER S, et al. Investigating the effect of metal powder recycling in electron beam powder bed fusion using process log data[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 100994.