

激光与光电子学进展

激光粉末床熔融技术中铺粉致密度的影响因素研究

张鹏^{1,2}, 张少明^{1*}, 毕中南², 谈震³, 王瑞², 王睿²¹钢铁研究总院有限公司, 北京 100081;²北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081;³北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124

摘要 激光粉末床熔融(LPBF)技术具有成形精度高、表面粗糙度低、成形件性能优异等特点,是目前金属增材制造领域中应用最广泛的一种成形技术。其中,铺粉过程作为LPBF技术的关键环节,粉末床铺粉质量对铺粉致密度及成形件性能具有重要影响,基于此,本文综述了LPBF技术中铺粉致密度的影响因素。首先,总结了粉末床铺粉质量的表征评价方法,如图像分析法、X射线原位监测法和取样器法等。在此基础上,从粉末特征和铺粉工艺出发,分别阐述了粉末粒度、粉末形貌、粉末制备方法、粉末再循环及铺粉工艺参数对粉末床铺粉致密度的影响规律。其中,粉末的粒度分布和形貌是影响铺粉致密度关键因素,较宽的单峰分布和粗细颗粒混合的双峰分布有利于提高粉末堆积密度。粉末的形貌越接近球形,粉末流动性越好,越有利于提升粉末铺展性和铺粉均匀性。粉末堆积密度和铺粉均匀性共同作用将提升粉末床铺粉致密度和成形样品的致密度。铺粉工艺条件的变化可以影响粉末床的铺粉质量及密度,其中控制合理的铺粉速度、选用滚筒类型的刮刀和增大基体的粗糙度将进一步提升粉末床的铺粉致密度。最后,本文对进一步提升粉末床的铺粉致密度的方法和技术进行了展望。

关键词 激光技术; 激光粉末床熔融; 铺粉致密度; 粉末粒度; 粉末形貌; 离散元模拟; 成形缺陷

中图分类号 TB31

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223069

Influences of Powder Packing Density in Laser Powder Bed Fusion Metal Additive Manufacturing

Zhang Peng^{1,2}, Zhang Shaoming^{1*}, Bi Zhongnan², Tan Zhen³, Wang Rui², Wang Rui²¹Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;²Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China;³Laser Engineering Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Laser powder bed fusion (LPBF) technology is one of the most widely used forming technologies in the field of metal additive manufacturing because of its high forming accuracy, low surface roughness, and excellent performance of the formed parts. In this paper, we review the factors influencing powder packing density in LPBF technology, which is a key part of LPBF technology. First, the methods of powder bed quality characterization and evaluation, such as image analysis, X-ray *in-situ* monitoring, and sampling method, are summarized. On this basis, the influence of powder particle size, powder morphology, powder preparation method, powder recycling, and powder recoating process parameters on the powder bed packing density is described from powder characteristics and powder recoating process, respectively. Among them, the particle size distribution and morphology of the powder are the key factors affecting the powder packing density, and the wider single-peak distribution and the bimodal distribution of coarse and fine particles are favorable to improve the powder packing density; the closer the powder morphology is to spherical shape, the better the powder flowability is, which is favorable to improve the powder spreading homogeneity. The powder packing density and spreading homogeneity together will improve the powder bed packing density and the density of formed samples. The change of powder recoating process conditions can influence the powder spreading quality and packing density, among

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-11-20; 录用日期: 2022-12-01; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702500)、国家自然科学基金(51901004)

通信作者: *shmzhang@cisri.com

which controlling reasonable recoating speed, choosing roller type scraper, and increasing the roughness of substrate will further improve the powder bed packing density. Finally, this paper presents the prospect of methods and techniques to further improve the powder bed density.

Key words laser technique; laser powder bed fusion; powder packing density; powder size distribution; powder morphology; discrete element simulation; deposition defects

1 引言

激光粉末床熔融工艺(LPBF)属于增材制造技术中的一种,其基本原理为铺粉装置将金属粉末均匀铺展在成形平台上形成几十微米的粉末薄层,激光选择性地熔化粉末,通过逐层堆叠的方式成形金属部件。与其他增材制造技术相比,LPBF 技术成形的部件具有晶粒细小、成分均匀、表面粗糙度低以及综合力学性能优异等优势,特别适合制备具有精细复杂结构的金属零部件,已经成为先进制造技术的前沿研究热点之一。在航空航天、生物医药及汽车模具等领域具有重要的应用价值^[1-7]。

激光粉末床熔融工艺涉及激光-粉末/熔池/金属蒸气交互作用,在成形过程中,由于粉末特征或成形参数等变化,熔池中熔体状态的变化及其他不稳定现象,成形件内部产生各种冶金缺陷,例如气孔^[8-9]、未熔合^[10-11]、裂纹^[12-13]等,这些缺陷会显著影响增材制造成形件的内部质量,进而影响其力学性能。当前通过优化成形的工艺参数,例如,激光功率、扫描速度、扫描间距和铺粉层厚等,可以实现成形部件致密度及性能的提升^[14-17]。但是在一些合金中,工艺参数的调整又会引入新的问题,例如,激光功率的提升会导致合金元素的蒸发而引入气孔缺陷,以及在打印表面发生球化现象^[18]。尤其针对一些难焊或者不可焊接材料,例如 CM247LC、IN738LC 等高温合金材料^[19],增材制造成形的工艺窗口本身较窄,仅通过工艺参数的优化很难实现成形质量及性能的提升,需要通过粉末铺粉特性的优化来弥补工艺参数调整的不足。

LPBF 工艺高度依赖于激光和粉末层颗粒之间的相互作用,粉末床的铺粉质量是直接影响成形缺陷及性能的关键因素之一^[20-24]。粉末床铺粉质量的提升可以减少粉末颗粒间空隙和粉末床内部铺粉缺陷,使得相同工艺参数下成形致密度更高,同时相同成形质量条件下,可拓宽成形工艺窗口范围,提升成形效率。粉末床的质量主要受粉末粒度、形貌、表面化学性质、流动性及铺粉工艺等条件的制约,这些因素会影响粉末在动态条件下的铺粉行为^[25-29]。目前在粉末特征变化对成形的致密度、表面质量及力学性能影响方面的研究取得了较大进展,例如,通过粉末粒度形貌的变化对粉末的流动性、堆积密度进行调控来提升试样的成形质量及性能^[27]。但是,粉末床作为粉末原材料与成形性能之间的重要桥梁,粉末特征变化及铺粉过程对粉末床的铺粉质量的影响规律及机制认

识尚不明晰。

近年来,基于离散元的数值模拟技术(DEM)在增材制造领域已经被广泛应用。例如,通过 DEM 模拟增材制造过程中粉末床的生成过程以及激光的熔化成形过程^[30-31]。DEM 可以模拟大量离散粒子的分布行为及物理现象,尤其 DEM 可以提供颗粒在运动过程中的轨迹和作用在单个颗粒上的力的信息,因此,DEM 技术也逐渐被应用于 LPBF 工艺的铺粉过程研究,目前已经利用 DEM 在铺粉工艺对铺粉行为及铺粉质量的影响规律研究方面取得了重要的进展^[32]。

本文聚焦于 LPBF 工艺中的铺粉过程,首先从单层铺粉、动态铺粉过程及多层铺粉粉末床三个方面阐述了粉末床铺粉质量的表征评价方法。在此基础上,一方面从粉末特征出发,阐述了粉末粒度、粉末形貌、粉末制备方法及粉末再循环对粉末床铺粉致密度及成形缺陷的影响规律,另一方面针对粉末在铺粉过程中的铺粉工艺参数,总结了铺粉器类型、铺粉速度及基体的表面粗糙度对粉末床铺粉致密度及成形缺陷的影响研究进展,为厘清 LPBF 铺粉过程中粉末床铺粉质量的影响因素及规律、提高成形构件的内部质量及性能提供可靠的途径。此外,本文对未来进一步提升粉末床的铺粉致密度进行了展望。

2 粉末床铺粉致密度试验表征

在 LPBF 的实际成形过程中,粉末的铺粉过程会受到粉末特征及设备的铺粉类型及工艺参数等因素综合影响,实际的粉末铺粉过程更加复杂,因此,对粉末实际铺粉过程的试验表征评价是认识粉末床铺粉质量影响因素的前提。本节重点从单层铺粉效果、动态铺粉过程以及多层铺粉后的粉末床三个方面对铺粉质量表征研究进展进行了总结。

在粉末床铺粉过程中,粉末床的形成是由单层的铺粉层累积叠加形成,对粉末单层铺粉的质量评估是表征粉末床铺粉的重要方面之一。Ahmed 等^[33]提出了一种采用图像分析法评估单层粉末铺展性的方法,用来评价粉末的均匀铺展而不形成空隙的难易程度,具体方法为通过截取实际过程中的部分刮刀来手动均匀铺展粉末,采用扫描电镜(SEM)图像法分析空隙形成的频率及大小。图 1 为装置铺粉粉层的图片以及局部截取的放大 SEM 图。从图 1 中可以看出,图像法可以清楚表征出单层粉末铺粉后粉末中的空隙分布及大小,图 1(b)和(c)中深色区域显示了粉末的铺粉孔隙

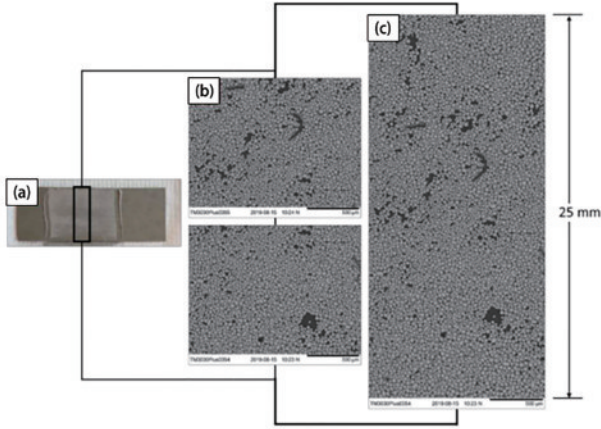


图 1 沿铺粉方向铺粉粉层的背散射图。(a) 铺粉粉层图片；(b) 铺粉层的局部 SEM 图片；(c) 图(a)矩形框内的铺粉图像组合^[33]

Fig. 1 Backscatter diagram of powder layer along the spreading direction. (a) Photo of the powder layer; (b) SEM images of the powder layer; (c) powder laying image combination in rectangle of Fig. (a)^[33]

缺陷, 多层孔隙缺陷的叠加会降低粉末床的铺粉致密度。进一步的研究表明, 当铺粉层厚增大时, 粉末的铺

粉缺陷数量减少, 同时球形度更高、流动性更好的粉末铺展性更好, 单层铺粉缺陷数量也会相应减少, 有利于提升粉床的铺粉致密度。

相比于单层铺粉的评价表征, 对粉末床铺粉的动态可视化表征可以更直接来评价粉末的铺粉过程, 有利于充分理解粉末的动态铺展机制。然而, 在实际铺粉过程中, 由于铺粉速度快、粉末颗粒尺寸小以及设备和基板的不透明, 铺粉打印过程中, 要实现粉末的铺粉过程的动态可视化是比较困难的, Escano 等^[34]为了在真实的增材制造条件下研究粉末铺展动力学, 提出了一种采用高速高能 X 射线原位成像设备来研究铺粉过程中颗粒的动态行为。图 2(a) 为粉末动态铺粉原位监测装置, 该系统由一个铺粉系统、一个 X 射线成像系统、激光系统和一个真空室组成。在试验过程中, 可见光摄像机用于监测真空室中的铺粉系统。该设备可以用来直接观察单个颗粒或团聚颗粒体在铺粉过程中的运动行为以及不同的运动条件(刮刀类型、基体表面粗糙度、铺粉速度等)下的粉末动态铺展机制。从图 2(f)、(g) 可以看出, 由于粉末颗粒的黏附作用形成的软团聚粉末在铺粉过程中的颗粒运动速度波动比硬

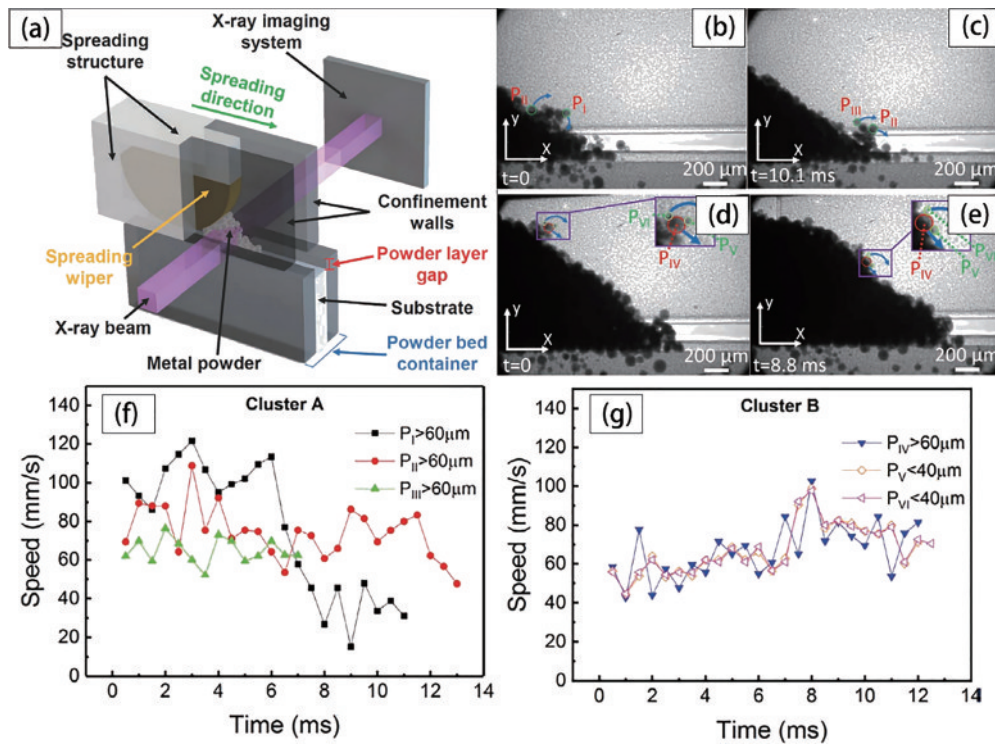


图 2 试验结果。(a) 粉末动态铺粉原位监测装置及对平均直径为 $67 \mu\text{m}$ 的 316L 不锈钢粉末团聚颗粒追踪；(b) (c) 软团聚颗粒中的 PI、PII 和 PIII 颗粒的移动；(d) (e) 硬团聚中的 PIV、PV 和 PVI 颗粒的移动；(f) 软团聚粉末在运动中速度和时间关系；(g) 硬团聚粉末在运动中速度和时间关系^[34]

Fig. 2 Test results. (a) Tracking of individual particles of different sizes within the powder clusters during the spreading of 316L stainless-steel powder with an average diameter of $67 \mu\text{m}$; (b) (c) dynamic X-ray images showing the motion of particles PI, PII, and PIII within the soft powder cluster; (d) (e) dynamic X-ray images showing the motion of particles PIV, PV, and PVI within the hard powder cluster; (f) speed over time for particles within the soft powder cluster; (g) speed versus time for particles within the hard powder cluster^[34]

团聚颗粒大,这种速度的波动变化是粉末在铺展过程中形成空隙缺陷的关键。Le 等^[35]也提出了一种原位动态评估粉末床质量的新方法,通过借助粉床扫描技术,在铺粉过程中,可以得到整个粉层的颗粒级分辨率图像,通过对图像的数值分析,定义了粉层厚度均匀性、表面粗糙度和表面颗粒密度三个指标来评价粉床铺粉质量。该铺粉结构评估的原理图如图 3(a)所示,作者在铺粉刮刀的后端安装了 CIS 图像传感器,

如图 3(b)所示,其中(b1)和(b2)分别为 EOS 的金属刮刀和 SLM Solutions 的橡胶刮刀,图 3(c)为通过图像传感器收集的粉层的彩色扫描图,可以清楚观察到单个粉末颗粒。结果表明,不同的颗粒表面状态、形态在不同的铺粉速度和刮刀类型条件下,可产生不同质量的粉层,该方法具有测量便捷性和准确性,对不同粉末材料的铺展性研究提供了思路,以指导 LPBF 工艺。

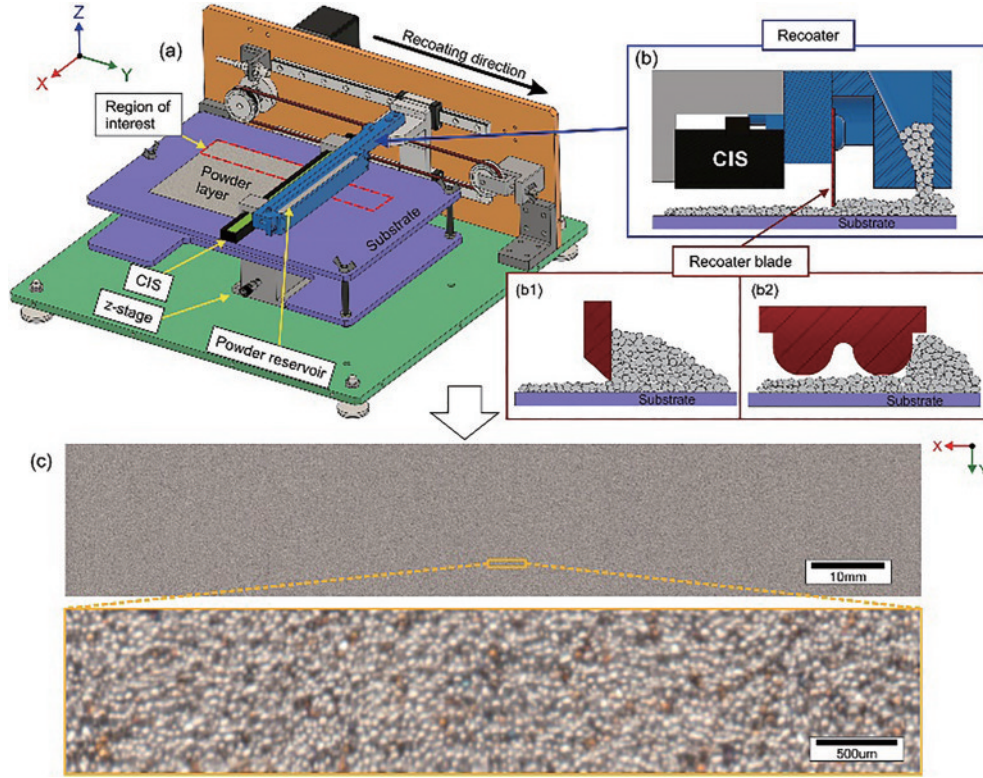


图 3 原理图和扫描结果。(a)计算机辅助设计的粉层扫描(PBS)平台;(b)刮刀模块和附加的图像传感器(CIS)单元的横截面图[刮刀模块两种类型:(b1)模仿 EOS DMLS 设计的金属刮刀;(b2) SLM500(SLM Solutions)的橡胶刮刀];(c)以 4800 DPI 扫描粉层(通过对原始扫描的数字放大,可以看到单个粉末颗粒。由于 CIS 单元获取彩色扫描图,氧化的粉末显示为橙色/红色/蓝色)^[35]

Fig. 3 Schematics and scan results. (a) Computer aided design of the PBS platform; (b) cross-section view of the recoater module and the attached CIS unit [recoater module can mount 2 types of recoater blade: (b1) a metal blade that mimic the design of the EOS DMLS; (b2) a rubber blade from the SLM500 (SLM Solutions)]; (c) an example powder layer scan at 4800 DPI (individual powder particles are visible by digital zoom of the raw scan. Since the CIS unit acquires colored scans, oxidized powders appear in orange/red/blue)^[35]

当多层粉末铺展堆积形成粉末床时,对粉末床的铺粉质量及致密度的评价也是反映零部件成形致密度的重要因素之一。Farzadfar 等^[36]开发了粉末床密度评估取样器法,通过在平台上成形特定体积的圆锥取样器试样,如图 4 所示,粉末床的密度通过空腔内部包含的粉末质量与空腔的设计体积之比计算得到。该取样器模型对粉床密度评估结果显示,通过调控粉末粒度可以进一步提高粉末床铺粉致密度,从而对成形的质量有利,这点会在第 3 节中讨论。Haferkamp 等^[37]通过自主设计的铺粉装置来模拟实际铺粉过程,调查了 6 种 316L 粉末和 8 种 AlSi10Mg 粉末的球形度、松装振

实密度特征及其对粉末床密度(PLD)的影响之间的关系。自主设计的铺粉装置如图 5 所示,结果显示,PLD 和 Hausner 比率的 Pearson 相关系数(PCC)为-0.89, Hausner 比率和球形度的 PCC 为-0.67,而球形度和 PLD 的 PCC 为 0.72。

根据本节所述,对粉末床铺粉致密度的表征是充分认识和理解粉末床铺粉致密度影响因素的重要前提,从对单层铺粉效果、动态铺粉过程以及多层铺粉后的粉末床三个方面进行表征评价后,可以看出,粉末特征(粒度分布和形貌等)和铺粉过程参数是影响粉末床铺粉质量的两个主要因素。本文在后续综述中,将围

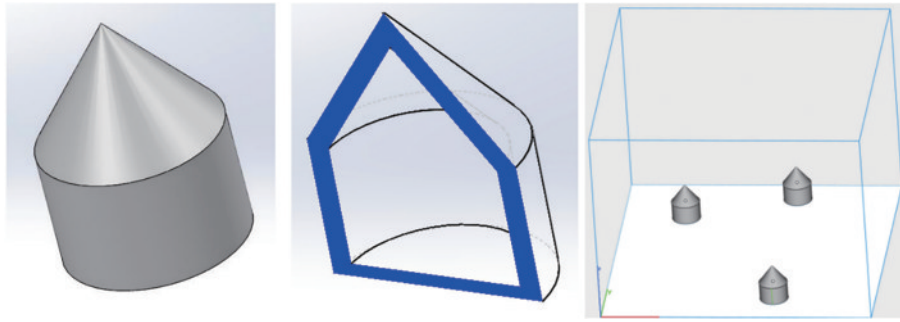


图 4 用于评估粉末床密度的圆锥取样器试样及在成形平台上的摆放位置^[36]

Fig. 4 Cone sampler sample for evaluating powder bed density and placement on forming platform^[36]

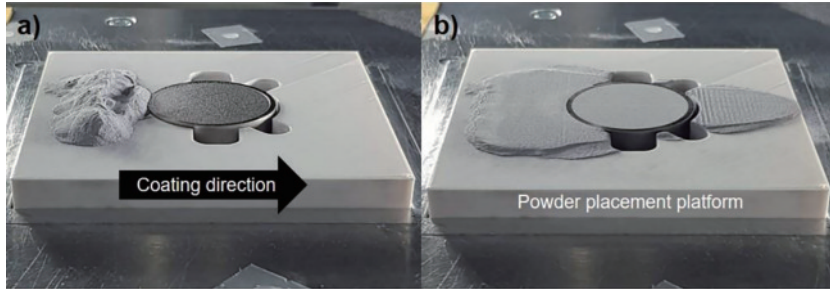


图 5 铺粉装置图。(a)铺粉前;(b)刮刀铺粉后^[37]

Fig. 5 Drawing of powder laying device. (a) Before powder laying; (b) after powder laying with scraper^[37]

绕这两个方面来阐述当前的研究进展。

3 粉末粒度分布对铺粉致密度及成形缺陷的影响

粉末粒度分布用于表征粉末颗粒体系中粒径大小不同的颗粒组成及变化情况,也是用来描述粉末颗粒特征的重要参数。在 LPBF 工艺中,粉末粒度受制粉工艺、筛分、混合、粉末回收循环等多个因素影响,因此本部分将从颗粒的堆积原理、粒度宽窄及粗细颗粒混合、粉末制备方法及粉末再循环等方面综述粒度的分布及变化对铺粉致密度及成形缺陷的影响研究进展。

3.1 颗粒的堆积原理

如图 6 所示,对于单一的理想等径球体,在随机松散堆积状态下,其堆积密度通常小于 60%,若将等径球体按照原子的面心立方或密排六方进行紧密排列并逐层堆垛,则单一尺寸球体的最大堆积密度仅能达到

74%,紧密堆积单层排列模型如图 6(a)所示,当体系中存在大小不同的球体时,大球体堆积空隙中可以填充更小的球体,这样的堆积方式将会突破单一球体的紧密堆积原则,堆积密度也会提升到 74% 以上。在理想情况下,对于大小两种尺寸颗粒存在的体系,当小颗粒直径与大颗粒堆积形成的孔隙直径相等时,体系的堆积密度达到最大,根据几何关系,大颗粒与小颗粒的直径比 $D_L:D_S=2.41:1$,如图 6(b)模型所示,在颗粒数量比例为 1:1 时,体系的最大堆积密度为 92%。同时,当体系中的颗粒尺寸增加到三种尺寸时,更小的颗粒进一步填充大小颗粒剩余的空隙形成紧密堆积,如图 6(c)模型所示,这时,大中小三种颗粒的直径比 $D_L:D_M:D_S=9.23:3.83:1$,在颗粒数量比例为 1:1:4 时,体系的最大堆积密度可达到 95.7%。依此类推,直至颗粒间的空隙率达到最小,这时体系的堆积密度将接近 100%^[38]。

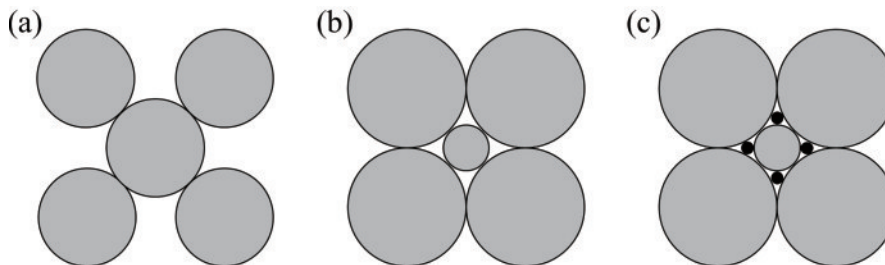


图 6 颗粒紧密堆积示意图。(a)单一尺寸球体紧密排列模型;(b)双尺寸球体排列模型;(c)三尺寸球体排列模型^[38]

Fig. 6 Schematic diagram of particle compact packing. (a) Single-size spherical arrangement model; (b) bimodal of spherical arrangement model; (c) trimodal of spherical arrangement model^[38]

从上述颗粒堆积模型可以看出,随着颗粒尺寸级配数的增多,颗粒粒度分布范围的增大,颗粒的堆积密度将持续增大并无限接近全致密。但是,在实际 LPBF 工艺中,粉末的堆积密度一般仅能达到 50%~60%,远低于模型预测值。主要有两方面原因:1) LPBF 工艺中采用的粉末颗粒大小是连续变化的,想要实现相同大小的颗粒排列填充是很困难的;2) LPBF 工艺采用的粉末粒度受铺粉层厚、粉末流动性的影响,一般单层铺粉层厚限制在 0.02~0.1 mm 范围内,其中粉末最大颗粒尺寸应小于铺粉层厚。若采用 Trimodal 甚至更多级配模型,则小于 20 μm 的细颗粒比例增加,这会增大颗粒之间的团聚,严重影响粉末的流动性,导致粉末的堆积密度下降。因此,这些因素综合起来限制了粉末颗粒范围和级配数,不能无限扩大。虽然粉末堆积理论模型和 LPBF 实际过程差别较大,但颗粒堆积模型给出了如何通过调整粒度更好地实现粉末颗粒对空隙的填充从而实现成形过程中粉末床铺粉致密度提升的方向。

3.2 粉末制备方法

粉末的粒度分布和粉末的生产工艺直接相关^[39-40],等离子旋转电极法(PREP)采用棒料端部液膜

在离心力作用下被甩出形成微小液滴,进而凝固形成金属粉末,该工艺生产的粉末的粒度范围窄,并且粉末粒度整体偏粗。通过筛分后应用于 LPBF 工艺的 PREP 粉,小于 30 μm 的细粉占比很少,这有利于降低颗粒间的团聚,提升粉末流动性和松装密度。而雾化工艺(GA)通过高压气流破碎金属熔液,该过程可获得 30 μm 以下细小粒径的粉末,因此 GA 工艺制备的粉末粒度范围比 PREP 更宽,相同筛分粒度下的 GA 粉末的细粉占比要比 PREP 多^[41]。粉末的制备工艺和对应的粒度分布如图 7 所示,PREP 工艺制备的粉末由于细粉含量少、颗粒之间无黏连,粉末表现出最优的流动性和更高的松装密度,在铺粉过程中,粉末更容易流动和铺展,容易获得更高的粉末堆积密度和粉末床铺粉致密度。而 GA 工艺制备的粉末还有一定比例的 30 μm 以下的细粉,颗粒之间存在一定的黏连和团聚,这将导致粉末的流动性和松装密度下降,进而降低粉末床铺粉致密度。等离子雾化(PA)工艺制备的粉末,虽然具有更高的细粉收得率,但是原始粉末中 30 μm 以下的细粉含量低于 GA,颗粒之间的黏连少,该工艺粉末也表现出优异的流动性和较高的松装密度,可获得较高的粉末床致密度。

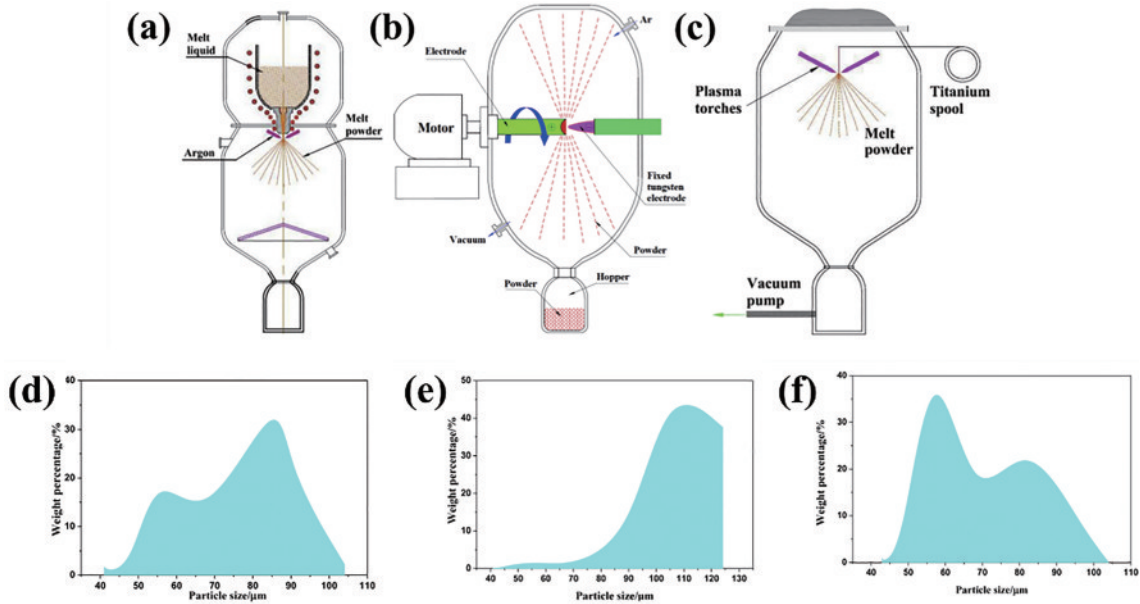


图 7 三种粉末雾化工艺原理及 Ti-6Al-4V 粉末粒度分布。(a) (d) GA; (b) (e) PREP; (c) (f) PA^[41]

Fig. 7 Principle of three kinds of powder atomization process and particle size distribution of Ti-6Al-4V powder. (a) (d) GA; (b) (e) PREP; (c) (f) PA^[41]

3.3 粒度分布

根据颗粒的堆积原理,粉末粒度分布对粉末堆积特性及铺粉致密度具有重要的影响。一方面,在 LPBF 工艺通用粒度范围条件下,采用更宽的粒度分布,可以增加小尺寸颗粒对大尺寸颗粒堆积空隙的填充,提高粉末在铺粉过程中的粉末床密度。通过比较 0~45 μm 和 15~45 μm 两种粒度分布的 316L 不锈钢粉末发现,更宽的 0~45 μm 粒度粉末表现出更高的粉

末床密度、更高的零件致密度及表面质量^[42]。通过研究不同粒度的 316L 粉末发现,与粒度偏窄的粉末相比(20~41 μm),含有一定比例 20 μm 以下细颗粒的粉末对粉床的填充效果更好,成形零件的表面粗糙度更低^[43-45]。Lutter-Günthe 等^[46]研究了粒度分布对 AlSi10Mg 粉末堆积特性的影响,更宽粒度 AlSi10Mg 粉末将提高粉末堆积密度。另一方面,依据 Bimodal 模型,采用粗细粉末颗粒混合(其中,粗细颗粒直径比

大于或等于图 6 模型中最优堆积直径比, 细颗粒填充粗颗粒的空隙) 时, 可以达到最优的堆积密度。LPBF 粉末填充示意图如图 8 所示: 当粗颗粒占优时, 粉末颗粒之间空隙大, 由于缺少细颗粒的填充, 粉末堆积密度低; 当细颗粒占优时, 细颗粒在填充空隙的同时, 多余的细颗粒会对粗颗粒产生楔形作用而推开粗颗粒粉末, 造成堆积密度下降, 并且越细的颗粒由于比表面积更大, 颗粒之间的范德瓦尔斯力、黏附力更突出, 粉末

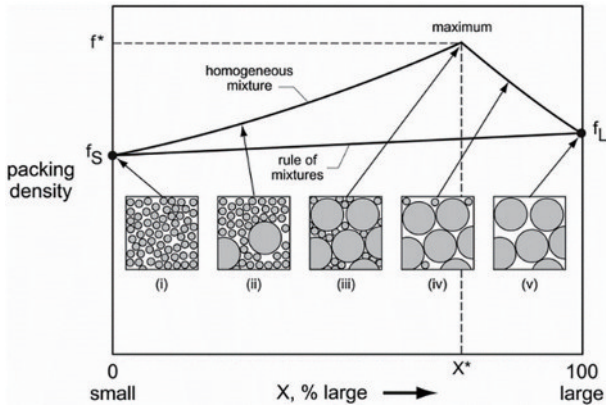


图 8 粗细粉末颗粒混合的粉末堆积密度与粗细颗粒占比的关系^[36]

Fig. 8 Relationship between bulk density of coarse and fine powder particles and proportion of coarse and fine powder particles^[36]

形成松散团聚结构的趋势增大, 造成铺粉致密度下降。

Farzadfar 等^[36] 基于颗粒最密堆积模型, 在 IN718 粉末 ($D_{10}=26.5 \mu\text{m}$, $D_{50}=35.5 \mu\text{m}$, $D_{90}=50.5 \mu\text{m}$) 中加入了不同比例的细颗粒 ($D_{10}=6.2 \mu\text{m}$, $D_{50}=10.5 \mu\text{m}$, $D_{90}=16.9 \mu\text{m}$), 粗细颗粒的粒径比在 3~4 之间, 结果如图 9 所示, 从图 9(a) 可以看出, 在粗粉中添加一定比例的细粉, 通过细颗粒填充粗颗粒间的空隙, 从而提高粉末的松装密度和振实密度, 并通过试验测试并兼顾粉末的流动性, 得到了最优的粗细混合体积比 83.75:16.25, 粉末的粒度分布如图 9(b) 所示, 通过 LPBF 工艺成形后, 如图 9(c)、(d) 所示, 相比原始粉末颗粒, 添加体积分数 16.25% 细颗粒的粉末成形相对致密度更高, 另外, 在更高的成形效率下, 粗细混合粉末成形的最大缺陷尺寸更小, 表现出更高的抗拉强度, 更低的各向异性。值得注意的是, 采用粗细颗粒混合的双峰粒度分布情况下, 在更大能量密度的激光参数输入时, 细粉会存在气化现象而导致成形致密度下降。Coe 等^[47] 的研究也证实了这一现象的存在, 通过采用单峰 ($D_{50}=36.31 \mu\text{m}$) 和双峰 ($D_{50}, L=36.31 \mu\text{m}$, $D_{50}, S=5.52 \mu\text{m}$) 粒度分布的粉末, 在氮气环境下对 316L 不锈钢进行成形, 结果如图 10 所示, 在低激光功率范围下 (107~178 W), 相比于单峰分布粉末, 双峰分布粉末的成形孔隙率更低, 致密度更高但是在高激光功率下 (203 W), 双峰分布粉末的

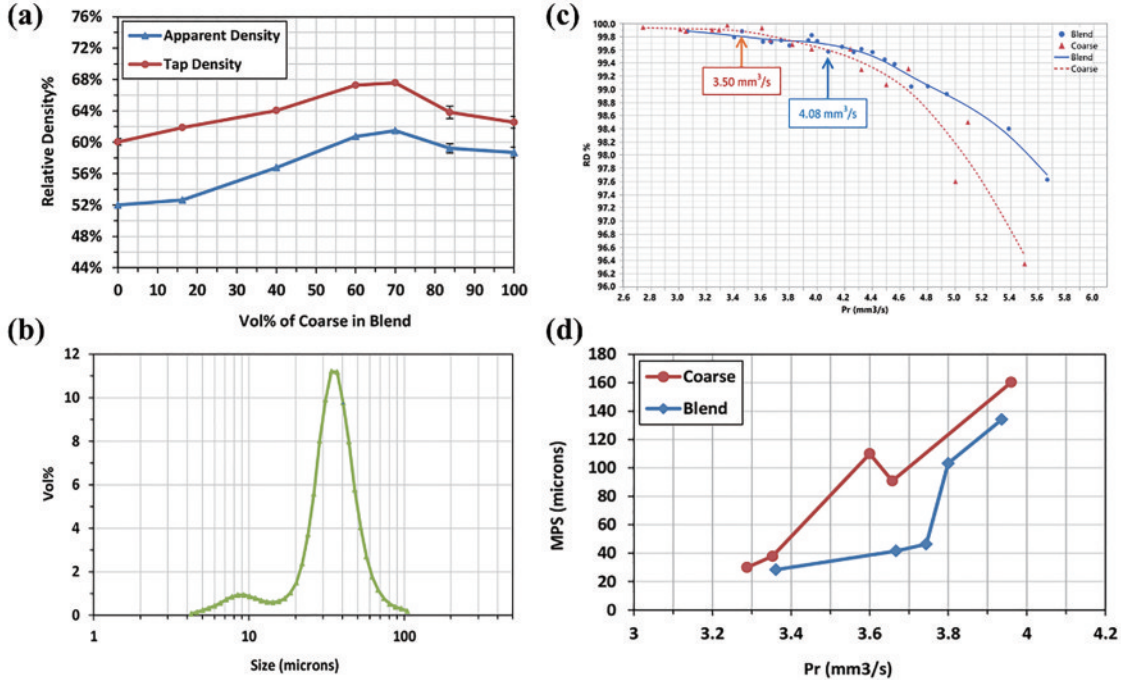


图 9 粗细粉末混合对粉末松装密度及成形缺陷的影响。(a) 细粉添加比例对粉末松装振实密度影响; (b) 最优混合比例下粉末的粒度分布; (c) 不同生产效率下, 粗粉和粗细混合粉成形相对致密度变化; (d) 不同生产效率下, 粗粉和粗细混合粉成形最大缺陷尺寸变化^[36]

Fig. 9 Effect of mixing coarse and fine powders on loose packing density and forming defects. (a) Effect of fine powder addition ratio on vibration density of loose powder; (b) particle size distribution of powder under optimal mixing ratio; (c) relative density of coarse powder and coarse and fine mixed powder under different production efficiencies; (d) maximum pore size of coarse powder and coarse and fine mixed powder under different production efficiencies^[36]

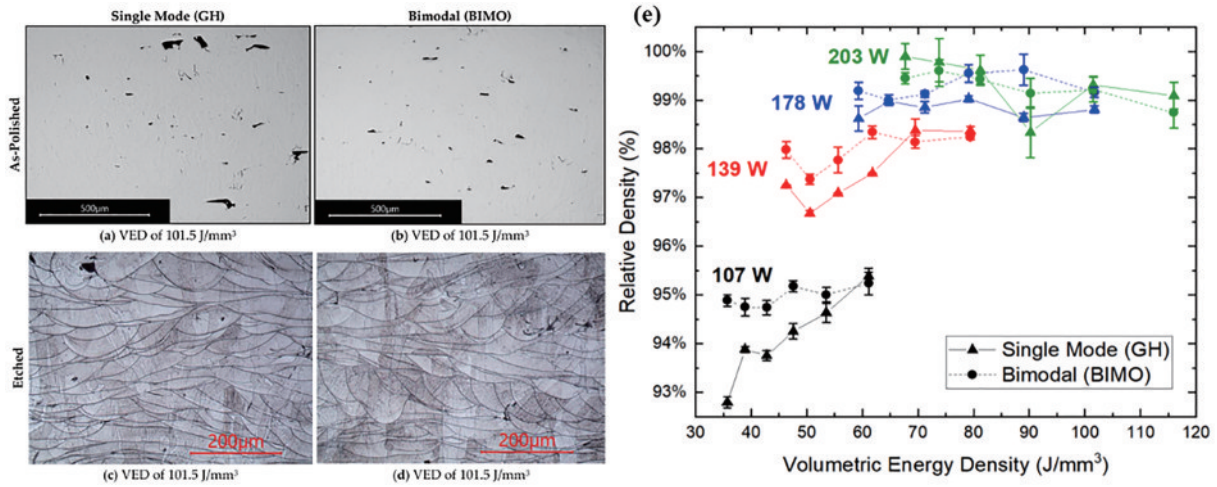


图 10 单峰和双峰粒度分布 316L 粉末 LPBF 工艺成形微观组织和相对致密度。(a)(c)单峰粒度分布粉末成形微观缺陷和熔池形貌；(b)(d)双峰粒度分布粉末成形微观缺陷和熔池形貌；(e)不同体能量密度下的成形致密度^[47]

Fig. 10 Microstructure and relative density of 316L LPBF-manufactured samples for single-mode and bimodal feedstock powder. (a) (c) Microscopic defects and melt pool morphology of single-peak mode of powder building; (b) (d) microscopic defects and melt pool morphology of bimodal-peak mode of powder building; (e) relative density at different volumetric energy density^[47]

成形致密度低于单峰分布粉末。Haferkamp 等^[48]采用两种 D50 分别为 20.3 μm 和 60.3 μm 的气雾化 316L 粉末按 3:1、1:1 和 1:3 的质量比进行混合,并对混合后的粉末进行激光熔化成形,结果表明,在激光扫描过程中,随着粗粉占比增多,熔池的波动性增大,造成凝固单道的不规则,样品中的孔隙率增大。

当粉末的最优粒度范围和粗细混合比确定后,粉末并不一定能达到理想的铺粉致密度,粉末的最优粒度分布还受铺粉过程的限制,通过模拟铺粉过程发现,粉末的铺展和堆积行为主要受三种机制主导:内聚效应、壁效应和渗流效应。其中,随着粉末粒度的减小,颗粒间的内聚力增加,会导致颗粒间黏附力增大而出现团聚,降低粉末的铺粉质量和铺粉致密度。随着粉末粒度的增大,壁效应也增加,将导致粉末铺粉层中的空隙增多。渗流效应主要存在于双峰颗粒中,由于大小颗粒尺寸差异大,颗粒在运动过程中存在偏析,将减小粉末的堆积密度。三种机制在整个铺粉过程中相互竞争,共同对粉末层的铺粉质量和粉床致密度产生影响^[49-50]。

3.4 粉末再循环

在整个成形循环过程中,包括粉末的储存、成形、回收、混合等,粉末粒度表现出动态变化,其中回收粉末的粒度变化是整个过程中关键的一个环节,主要原因在于经历成形之后,激光对粉末的熔化产生飞溅会在未熔化的粉末中引入飞溅颗粒,由于飞溅颗粒具有更大的颗粒尺寸和不规则的形貌,多次粉末循环后,飞溅颗粒的增多导致粉末的铺展性和铺粉致密度降低,成形孔隙增多,同时颗粒间的空隙增多导致熔池的导

热性变差,也会降低熔池的凝固速率,使得凝固微观组织发生变化,进而影响合金的开裂行为及成形性能^[51-53]。Rafieazad 等^[54]研究了回收粉对 LPBF 成形 AlSi10Mg 合金的凝固缺陷与微观组织结构的影响,结果发现,当粉末循环 5 次后,粉末的粒度从 $(8.8 \pm 7) \mu\text{m}$ 增加到 $(13.7 \pm 9) \mu\text{m}$,回收粉会导致 AlSi10Mg 成形内部孔隙和凝固微裂纹的体积分数占比增加,并且 AlSi 共晶组织增大,微观偏析趋势明显。显微组织的改变归因于粉末循环之后的粒度变化影响了粉末床颗粒的填充效果,激光与粉末床相互作用时,粉末床对激光的吸收率改变,进而影响了合金的凝固行为。

根据本节所述,粉末的制备方法是影响粉末粒度分布的最直接因素,PREP 工艺制备的粉末 30 μm 以下的微细粉末含量少、粒度分布集中,粉末更容易获得高的堆积密度和铺粉致密度。而 GA 工艺制备的粉末由于存在一定比例的微细粉末,一定程度上增大了颗粒间的黏附力,影响了粉末的流动性和铺展性,不利于获得更高的堆积密度和铺粉致密度。为了进一步优化提升粉末床的铺粉质量,可以通过调整粉末粒度来提升粉层的堆积密度和成形致密度。具体来说,一方面,针对单峰分布的粉末,通过适当扩宽粉末的粒度分布,来达到最优的粉末堆积密度,另一方面,可以通过粗细颗粒尺寸及配比优化形成双峰分布来达到最优的粉末堆积密度。此外,在整个成形循环过程中,粉末对细颗粒的消耗和飞溅颗粒在未熔化粉末中的累积,也会导致粉末粒度增大和不规则颗粒的增多,降低粉末的铺粉致密度,因此在粉末循环过程中,及时检测和调整粒度分布的变化是有必要的。

4 粉末形貌对铺粉致密度及成形缺陷的影响

粉末的形貌更接近球形,对粉末的流动性有利。如图 11 所示,粉末的球形度越高,流动性越好,粉末在铺粉过程中的动态流动性和铺展性更优,有利于提升粉末的堆积密度和粉末床的铺粉致密度^[55-56]。本节重点从不同粉末制备工艺下的粉末形貌特征出发,系统总结形貌对铺粉致密度及成形缺陷的影响研究进展。

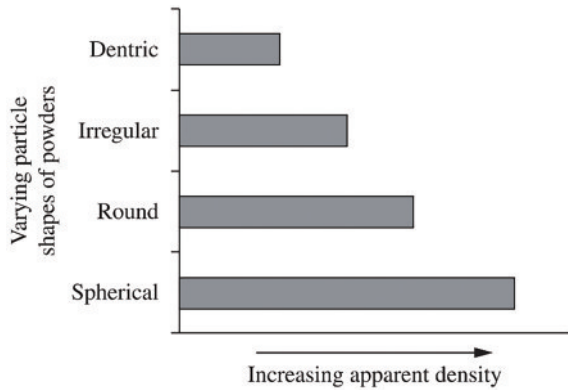


图 11 粉末颗粒形状对松装密度的影响^[55-56]

Fig. 11 Effect of particle shape on the apparent density of powders^[55-56]

粉末的形貌受制粉工艺影响,如 3.2 节所述,在目前主流的球形粉末制备工艺里面,GA、PREP 和 PA 工艺制备出的粉末球形度更高,对提升粉末床的铺粉致密度和成形部件的致密度更有利。Ruan 等^[57]对 GA 工艺和 PREP 工艺生产的 IN718 粉末的特征、成形质量及性能进行了比较研究,结果表明,在优化的 LPBF 工艺参数下,两种制备工艺下粉末形貌的差别并未对成形试样的力学性能产生明显影响,但是对该合金的可加工工艺窗口范围影响较大,其中,与 GA 粉末相比,PREP 粉末由于具有更高的球形度和更光滑的表面,粉末表现出更高的松装密度和更优的流动性,可获得更大的加工工艺窗口范围。Riener 等^[58]通过对比三种气雾化和一种等离子雾化的 AlSi10Mg 粉末发现,粉末的球形度更高,对成形致密度提升更有利。Brika 等^[59]通过比较两种 PA (Powder 2 和 Powder 3) 工艺制备与一种 GA (Powder 1) 工艺制备的 Ti6Al4V 粉末的特征及成形性能发现,粉末的球形度与粉末的流动性呈正相关,相比于 GA 粉末,PA 工艺制备的粉末球形度更高,粉末表现出更优的流动性。从图 12(a)可以看出,球形度、流动性更优的 Powder 2 的铺粉致密度最高,同时在 30 μm 和 60 μm 铺粉层厚下的成形致密度也更高,粉末的铺粉致密度和成形致密度呈现相关性,即随着铺粉致密度的提升,成形致密度也相应提高。

虽然上述三种制备工艺获得的粉末更有利于提升

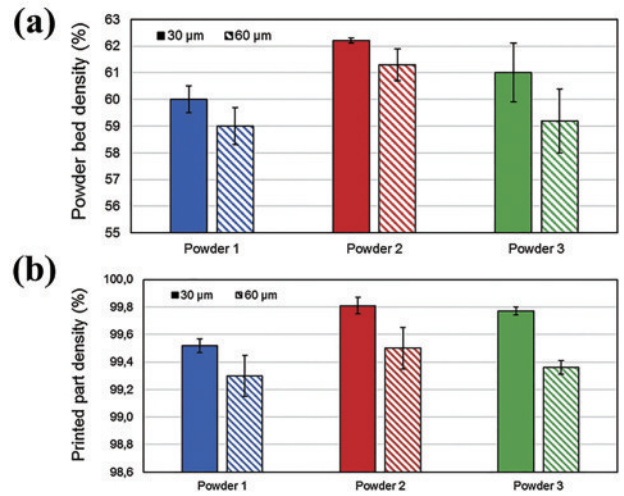


图 12 三种 Ti6Al4V 粉末在两种层厚下的铺粉致密度和成形致密度 (powder 1: GA 粉末; powder 2: PA 粉末; powder 3: PA 粉末)^[59]

Fig. 12 Powder bed densities and printed part density of Ti6Al4V three powder lots for two layer thicknesses (powder 1: GA powder; powder 2: PA powder; powder 3: PA powder)^[59]

铺粉致密度,但是粉末的成本还是普遍偏高,尤其是球形度更高的 PREP 和 PA 工艺,这限制了其在低成本制造中的应用。而水雾化(WA)工艺制备粉末成本更低,当前多位学者开展了 WA 粉末的特征及成形性能研究。Fedina 等^[60-61]对比了 WA 和 GA 两种工艺下低合金钢粉末的激光成形工艺研究,通过测量两种粉末的堆积密度与熔池形貌特征发现,由于 WA 颗粒的不规则形态,颗粒之间存在结块、架桥、嵌合的现象,粉末的松装密度和铺粉致密度低于 GA。在 WA 粉末成形时,铺粉致密度低,造成熔池的收缩较大,成形熔池高度比 GA 粉末低 15%,熔池的横截面积比 GA 低 31%,如图 13(a)~(d)所示。Engeli 等^[62]研究者通过对 8 个不同批次的 IN738LC 粉末制备样件的孔及裂纹进行对比分析发现,相同工艺参数下,GA 制备的试样孔隙率低于 1.2%,而 WA 粉末制备的试样孔隙率为 3.5%。另外,通过粉末之间对比,Hausner 值越低的粉末流动性表现更优,有利于获得更高的铺粉致密度,成形样件孔隙率更低,内部的裂纹数量更少。Irrinki 等^[63]研究了 3 种 WA 和 1 种 GA 制备的 17-4PH 不锈钢粉末,发现相同工艺条件下,GA 粉末球形度更好,粉末成形的部件致密度更高。但是,当提高 WA 粉末的成形能量密度时,两种粉末均可以达到相同的致密度水平。Abdelwahed 等^[64]通过对 WA 的 Fe-C-Cr-Mo 合金粉末成形,也得出一致的结果。另外,不同工艺制备的粉末对成形样品的微观组织也会不同,进而影响其性能。Akilan 等^[65]分别采用 GA 和 WA 两种工艺制备 25Cr7Ni 粉末,通过 LPBF 工艺制备样品评估其致密性和腐蚀性能,X 射线衍射(XRD)结果如图 14(a)和

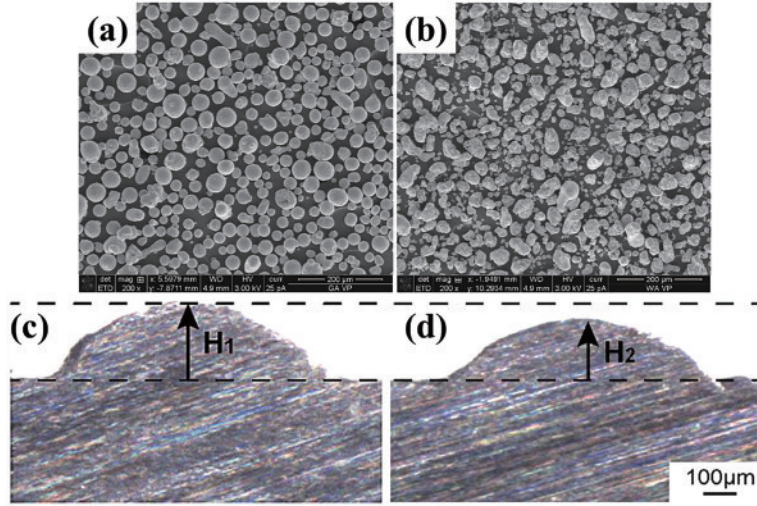


图 13 两种工艺制备的不锈钢粉末形貌和熔池高度。(a) (c) GA; (b) (d) WA^[60]

Fig. 13 Stainless steel powder morphology and molten pool height prepared by two processes. (a) (c) GA; (b) (d) WA^[60]

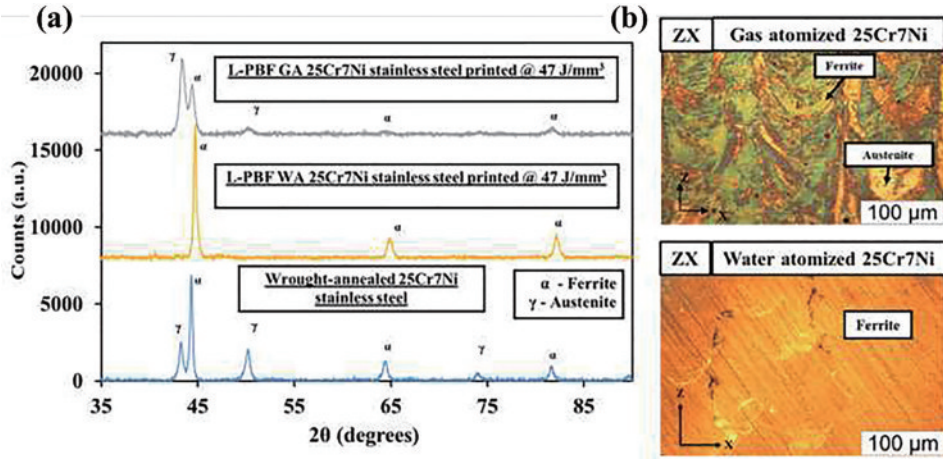


图 14 GA 和 WA 制备粉末成形 25Cr7Ni 试样。(a) XRD 图谱; (b) 显微组织^[65]

Fig. 14 GA and WA were used to prepare powder forming 25Cr7Ni samples. (a) XRD pattern; (b) microscopic structure^[65]

(b)所示,可以看出,与 WA 制备的样品相比,具有更高铺粉致密度的 GA 粉末制备出的样品具有更高的致密度,另外,样品的微观组织中出现了奥氏体相,使得试样表现出优异的耐腐蚀性能。

根据本节所述,粉末形貌是影响粉末堆积密度及铺粉致密度的另一重要因素。粉末形貌受不同粉末制备工艺影响,其中,相比于 GA 粉末,PREP 和 PA 工艺制备的粉末球形度高,颗粒表面光滑及卫星粉含量少,粉末表现出更优的流动性和更高的松装密度,在 LPBF 加工过程中,粉末的铺展性更好,容易获得更高的铺粉致密度,同时成形致密度与铺粉致密度呈正相关。另外,WA 粉末也逐渐在 LPBF 工艺上表现出了潜力,研究表明,WA 粉末颗粒形貌虽然为不规则形态,并且颗粒之间存在结块、架桥和嵌合现象,粉末的堆积密度和铺粉致密度普遍低于球形粉末,但通过工艺参数的优化调整,在部分合金中也可获得和球形粉末一致的致密度水平。

5 铺粉类型及工艺参数对铺粉致密度的影响

除粉末本身特征影响之外,粉末的铺粉类型及铺粉工艺参数也会影响粉末床的铺粉致密度。针对铺粉条件及工艺参数对铺粉质量及铺粉致密度的影响进行了研究,数值模拟方法是目前研究最主要的手段^[66-69]。本节从当前应用最广泛的两种铺粉类型的铺粉机制出发,重点综述铺粉器类型、铺粉速度及基体表面粗糙度对粉末颗粒的铺粉行为和粉末床铺粉致密度的影响研究进展。

5.1 铺粉机制

在 LPBF 工艺中,常用的有两种铺粉类型,如图 15(a)和(b)所示,分别为刮刀式铺粉和滚筒式铺粉。其基本原理为:在刮刀式铺粉过程中,刮刀固定在移动导轨上,沿着与基体平行的方向移动,推动粉末堆在基板上进行铺粉,通过调整刮刀与基体的间隙而形成薄的粉末层;在滚筒式铺粉过程中,圆柱形状的滚筒沿着与基体平行的方向移动的同时逆着铺粉方向旋

转,从而在粉床上形成薄的粉末层^[70-71]。

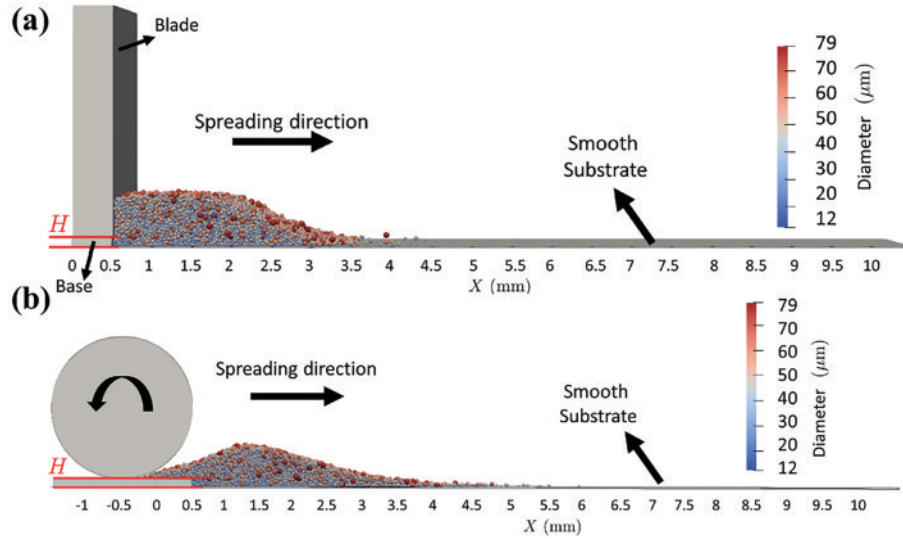


图 15 粉末的铺粉过程。(a)刮刀式铺粉过程;(b)滚筒式铺粉过程^[71]

Fig. 15 Powder spreading process. (a) Scraper spreading process; (b) roller spreading process^[71]

刮刀式铺粉过程主要由刮刀在推动粉末开始运动时的剪切扩张、粉末通过间隙运动引起的扩张和重新排列以及粉末层中颗粒的惯性三种机制作用,共同影响粉末的铺展性,通过铺粉工艺条件的改变,可以达到优化粉末床铺粉质量的目的^[72]。滚筒式铺粉过程则主要由滚筒对粉末颗粒的拖曳力、粉末颗粒与粉末床基体的摩擦力以及颗粒的配位数等方面的动态变化,共同影响粉末颗粒的铺展行为及铺粉致密度^[73]。

5.2 铺粉器类型

针对铺粉器的类型,目前研究热点主要聚焦在主

流应用的刮刀式铺粉器和滚筒式铺粉器,主要包括不同刮刀结构对粉末床铺粉致密度的影响。Haeri等^[74]利用DEM对AM过程中的颗粒铺展行为进行模拟,结果表明,与刮刀式铺粉器相比,滚筒式铺粉可以获得更高的粉末床质量。Haeri^[75]在前期刮刀式和滚筒式铺粉类型研究的基础上,优化出一种新的刮刀结构,通过优化的刮刀成形粉床的致密度和表面粗糙度结果如图16所示,优化后的刮刀结构可以产生更高的粉床致密度和更小的铺粉表面粗糙度。Liu^[76]对比了刮刀式、带倒角的刮刀及滚筒式(旋转和非旋转)三种铺粉器类

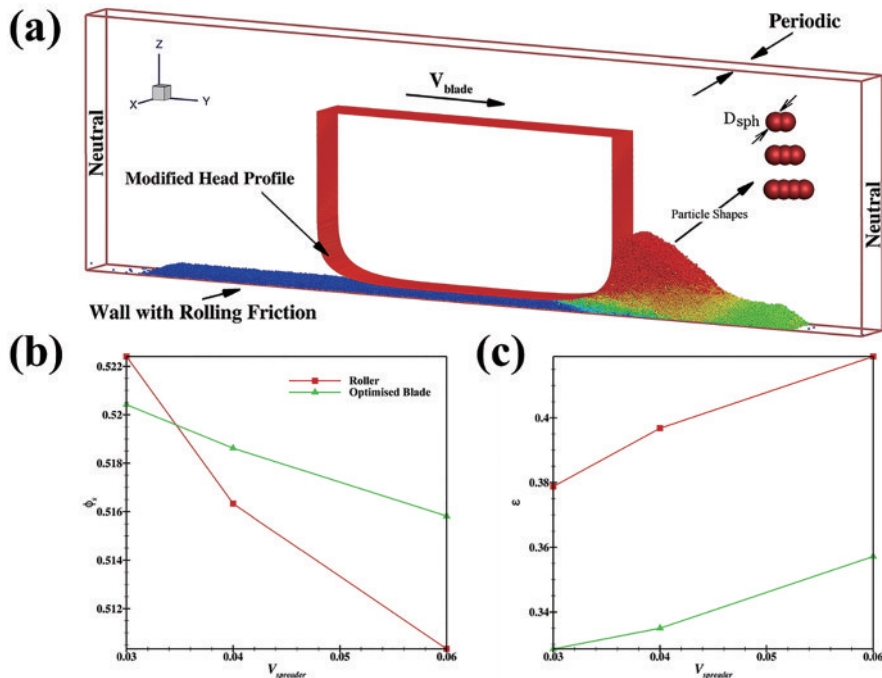


图 16 优化后的铺粉器模型及铺粉效果。(a)铺粉器;(b)铺粉体积百分比;(c)粉床表面粗糙度^[75]

Fig. 16 Optimized blade type spreader and powder spreading effect. (a) Powder spreader; (b) volume fractions; (c) surface roughness^[75]

型,发现在相同的铺粉参数条件下,滚动式的铺粉致密度优于刮刀式,另外滚动式(非转动)的铺粉方法可获得最高的致密度。Zhang等^[77]深入研究了滚筒参数对

铺粉致密度的影响,如图 17(a)和(b)所示,增大滚筒的直径有利于提升铺粉粉末床的致密度,但滚筒的旋转速度变化对粉末床密度的影响很小。

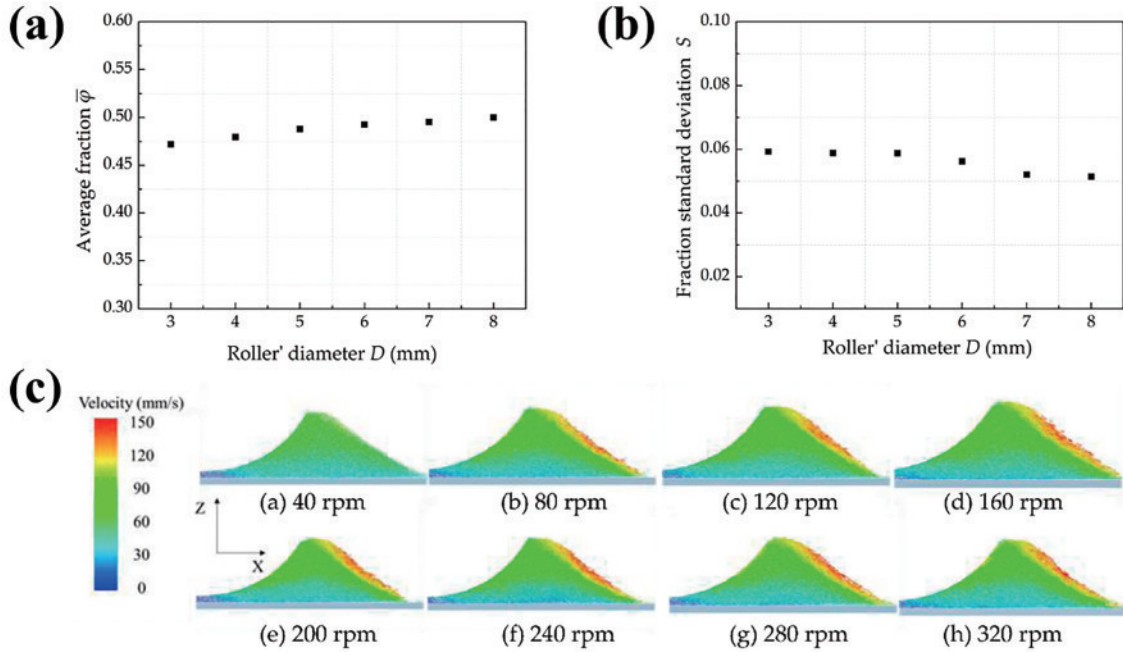


图 17 滚筒参数对铺粉致密度的影响。(a)(b)滚筒直径对粉末床密度的影响;(c)滚筒旋转速度对粉末堆前沿流动速度的影响^[77]
Fig. 17 Effect of roller-spreading parameters on the packing density of powder. (a) (b) Effect of roller's diameters on powder-bed density; (c) effect of roller's rotational speed on powder flow velocity at the front of powder stack^[77]

为了进一步探明滚筒式铺粉有利于提高铺粉致密度的内在机制,Zhang等^[78]通过模拟两种铺粉器类型的铺粉情况,从颗粒流动行为、颗粒接触力、铺粉器施加的力、颗粒的偏析和粉末层致密度等方面系统地对比两种铺粉器类型的铺粉机制进行了对比,结果发现,粉末的不同铺粉方式主要影响颗粒的运动轨迹、颗粒的接触力和对铺粉器施加的力。其中,滚筒式铺粉的颗粒在粉堆内会发生复杂的分散和循环运动,而刮刀式铺粉的颗粒分散性相对较弱,施加在滚筒上的法向力在粉堆上引入了压实效应,并形成了强大的力链均匀分布在粉堆中,因此对粉堆起到了压实作用,从而获得了较高的铺粉致密度。值得注意的是,滚筒式铺粉对粉堆的压实作用并不一定起到完全积极的作用,Wang等^[79]在对不同铺粉类型的研究中发现,滚筒式铺粉带来的压实作用一方面提高了铺粉致密度,另一方面也对底层粉末层施加了更大的力,这种力会引起粉末颗粒的爆裂现象,从而造成粉末层的不均匀,反过来降低了铺粉致密度。

5.3 铺粉速度

根据当前的研究结果,提高铺粉速度会降低粉末床的铺粉均匀性和致密度。Chen等^[80]通过试验和数值模拟系统研究了滚筒式铺粉的铺粉行为,重点研究了铺粉速度对粉床表面的粗糙度及铺粉致密度的影响。结果如图 18(a)、(c)所示,在滚动式铺粉过程中,

当铺粉速度较低时,粉末床与颗粒间的摩擦力增强,阻碍了滚筒转动对颗粒的拖曳力,当颗粒穿过滚筒与粉末床之间的间隙时,颗粒将立即被停留在粉末床上。随着铺粉速度的提高,滚筒转动对颗粒的拖曳力增强,当该拖曳力超过粉末床与铺粉颗粒间的摩擦力时,穿过间隙的粉末颗粒将继续运动一段距离后再停留在基体上,这将增大粉末床的表面粗糙度。另外,随着铺粉速度的增加,粉堆与粉末床基体的压力变大,由于粉末堆在动态运动中存在强大的力链,压力的增大使得颗粒的配位数减小,粉末堆变得更松散,最终降低了粉末床的铺粉致密度。Parteli等^[81]通过模拟的方法研究了不同的滚筒式铺粉速度下粉末的铺展过程发现,随着铺粉速度的提高,铺粉粉层中的空隙增多,粉层表面起伏增大,铺粉粉末床松散,增大了粉末床的表面粗糙度。其中,Si等^[82]通过模拟发现,当铺粉速度提高后,粉末颗粒由于惯性力的作用会继续向前运动,如图 19(a)、(b)所示,导致粉末床的厚度和铺粉致密度的下降。

另外,在提高铺粉速度的影响方面,研究人员根据最新的研究也提出了一些独特的观点。Chen等^[83]在最近的研究中发现,高速铺粉并不总是对成形缺陷和力学性能产生不利的影响,他们通过设计一系列逐层的粉末铺展和熔化试验来研究 LPBF 中铺粉速度的作用,从图 20(a)~(d)可以看出,当铺粉速度分别为 20 mm/s、120 mm/s 和 240 mm/s 时,在单层试验中,

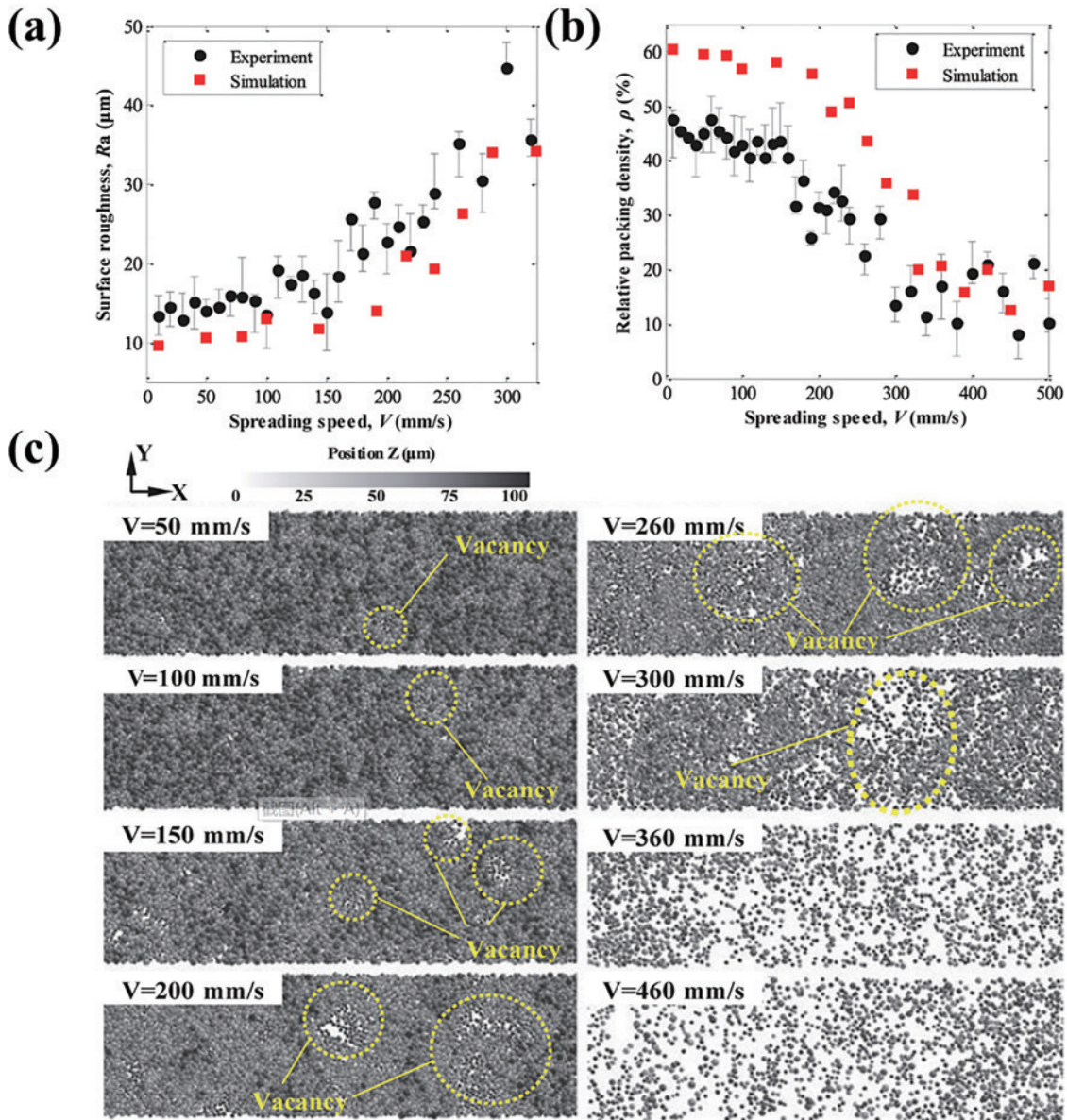


图 18 铺粉速度对粉末层表面粗糙度及铺粉致密度的影响。(a)粉末层表面粗糙度随铺粉速度变化;(b)铺粉致密度随铺粉速度变化;(c)不同铺粉速度下粉末层形貌模拟^[80]

Fig. 18 Effect of powder spreading speed on surface roughness and density of powder layer. (a) Surface roughness of powder layer changes with powder spreading speed; (b) density of powder spreading varies with the speed of powder spreading; (c) simulation of powder layer morphologies at different spreading speeds^[80]

高速铺粉确实降低了铺粉致密度,然而,在多层成形过程中,高速铺粉下,样品反而拥有更少的缺陷,同时获得了更优的力学性能,特别是疲劳寿命在高速铺粉下反而得到了进一步的提升,这项研究为LPBF中铺粉速度的作用提供了前所未有的见解,为提高LPBF的生产率和零件质量提供了更多的解决方案。另外,Shaheen等^[71]通过采用离散粒子法(DPM)模拟了复杂颗粒形状、表面粗糙度、颗粒内聚力和铺粉条件对铺粉质量的影响,研究也发现,提高铺粉速度虽然会降低非黏性和弱黏性粉末的铺粉质量,但是会改善强黏性粉末的铺粉质量。

5.4 基体的表面粗糙度

适当增大基体的表面粗糙度也有利于铺粉的致密度的提升。Xiang等^[84]通过DEM模拟基体表面粗糙度对动态铺粉的影响,如图21(a)、(b)所示,粉末床的相对密度随着基体的表面粗糙度增加而增大,这是由于更粗糙的基体表面有助于抑制颗粒从基体上脱落,可获得更均匀的粉末层,而基体的表面纹理方向也会对粉末的堆积密度产生影响,如图21(d)所示。从图21(c)的不同铺粉厚度对比可以看出,较高的铺粉速度和较大的层厚下,可以获得更高的铺粉致密度。

根据本节所述,铺粉器的类型和铺粉速度是影响粉末层铺展行为及均匀性的两个关键因素。在铺粉器

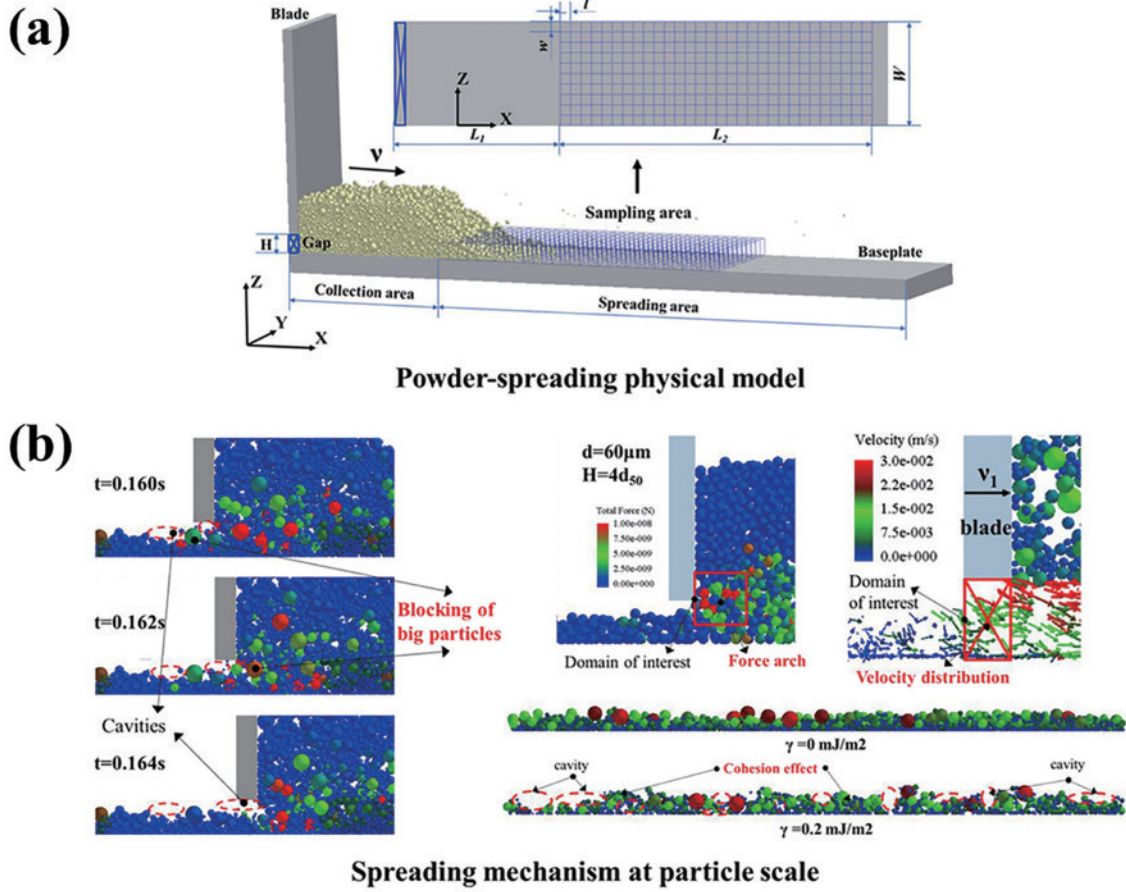


图 19 模拟结果。(a)粉末颗粒的铺粉物理模型;(b)铺展机制^[82]

Fig. 19 Simulation results. (a) Physical model of powder particle spreading; (b) powder spreading mechanism^[82]

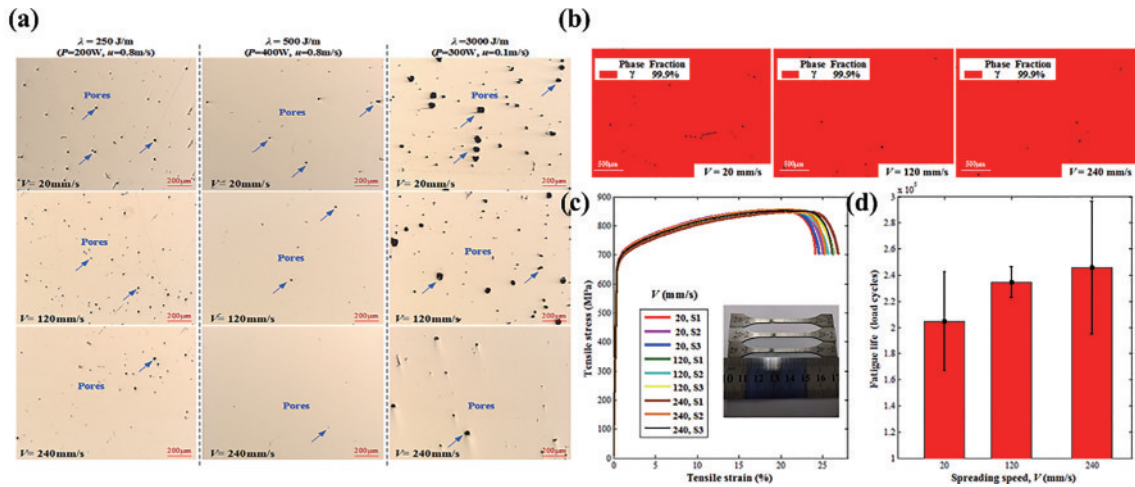


图 20 试验结果。(a)不同铺展速度和线能量密度下,Hastelloy-X 合金粉末制备的立方体试样的横截面光学显微镜图像;(b)试样电子背散射衍射结果中的相含量;(c)拉伸性能;(d)疲劳性能^[83]

Fig. 20 Test results. (a) Optical microscope images of the cross sections of the cubic specimens fabricated from Hastelloy-X alloy powder with different spreading speeds and linear energy densities; (b) phase content of samples from electron backscattered diffraction tests; (c) tensile test results; (d) fatigue test results^[83]

类型方面,与常规刮刀式铺粉器相比,采用滚动式的铺粉器,在粉末堆上引入了一定的压实效应,使得粉末床更容易获得更高的铺粉致密度。另外,在结合刮刀式和滚筒式铺粉器的基础上,通过优化刮刀的结构,可进

一步产生更高的粉末床致密度和更小的铺粉表面粗糙度。在铺粉速度方面,目前多数研究表明,提高铺粉速度,颗粒会在强大压力链和惯性力的作用下继续运动,在一定程度上降低粉末层的均匀性和铺粉致密度。但

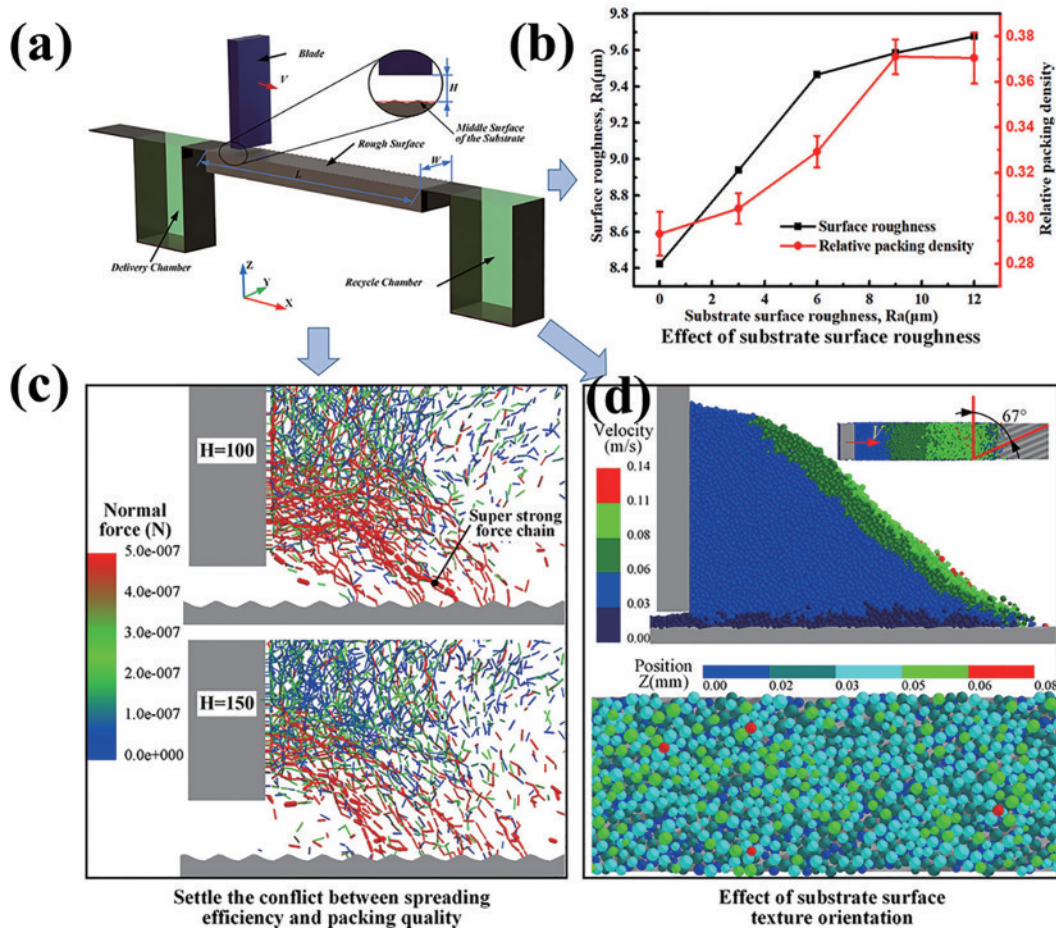


图 21 0.2 m/s 的铺粉速度下, 基体粗糙度对铺粉的影响。(a) 铺粉装置; (b) 基体粗糙度; (c) 铺粉层厚; (d) 基体纹理方向^[84]
 Fig. 21 Effect of substrate roughness on powder spreading at a speed of 0.2 m/s. (a) Powder spreading device; (b) substrate surface roughness; (c) spreading layer thicknesses; (d) surface texture orientation^[84]

是, 最新研究结果显示, 高速铺粉并不总是起到不利的效果, 其中, 提高铺粉速度虽然会降低非黏性和弱黏性粉末的铺粉质量, 但是也会改善强黏性粉末的铺粉质量, 在单层试验中, 高速铺粉确实降低了铺粉致密度, 然而, 在多层成形过程中, 高速铺粉下, 样品反而拥有更少的缺陷, 同时疲劳寿命在高速铺粉下反而得到了进一步提高。

6 结束语

在金属增材制造工艺中, LPBF 成形技术已经成为当前研究和应用的热点。粉末床作为 LPBF 工艺成形的重要组成部分, 如何提升粉末床铺粉致密度将会一直作为研究的重要主题之一。目前, 已经形成两条主要的技术途径来提升粉末床的铺粉致密度, 一是通过优化粉末特征来实现粉末床铺粉致密度的提升。基于颗粒最密堆积理论, 在一定的铺粉层厚下, 通过扩宽单峰分布的粒度范围和添加一定比例的细颗粒形成粗细混合的双峰分布粒度组成, 通过细颗粒填充基体颗粒的堆积空隙从而实现粉末床堆积致密度的提升。另外, 粉末的形貌越接近球形, 颗粒的表面越光滑, 粉末的流动性则越好, 有利于提升粉末床的

铺粉均匀性和致密度。二是通过优化铺粉过程中的铺粉类型来提升粉末床的铺粉致密度。粉末在铺粉过程中主要受刮刀在推动粉末开始运动时的剪切扩张、粉末通过间隙运动引起的扩张和重新排列以及粉末层中颗粒的惯性三种机制作用, 共同影响粉末的铺展性和铺粉致密度, 通过选用滚筒类型或优化的刮刀代替叶片式刮刀进行铺粉, 可以对粉末铺粉层产生更好的压实效果, 减小空隙率。另外, 合理增大铺粉层厚以减少颗粒通过间隙引起的扩张和重新排列、合理控制铺粉速度以减小颗粒中的惯性作用和适当增大基体的粗糙度, 均有利于进一步提升粉末床的铺粉致密度。

随着 LPBF 技术的发展, 更多的提升粉末床铺粉致密度的研究也得到了进一步的关注: 1) 更直观的粉末床动态铺粉可视化检测与评估。现有的对粉末床的铺粉过程研究大多仅从对单层静态粉层或铺粉后的粉末床进行评估, 文献[13]通过高速高能 X 射线成像设备实现了对粉末在铺粉过程中的动态铺展行为监测, 该技术也给出了研究粉末床铺粉的重要方向, 同时也希望出现更多的技术和铺粉方法, 实现对粉末床的动态铺粉行为机制及影响因素等方面更深入的研究。2) 粉末的表面化学状态对粉末铺展行为及粉末床铺粉致密

度的影响。相关研究发现,粉末颗粒表面的氧化物的含量对粉末颗粒的表面能及颗粒间的内聚力大小具有重要的影响,表面能及内聚力的变化会进一步影响粉末颗粒的团聚行为、粉末流动性及铺粉行为,最终改变粉末床铺粉质量。通过对粉末颗粒表面化学状态的调整优化以提升粉末床铺粉致密度及减少成形缺陷的研究应进一步深入。3)更高致密度的粉末床生成方式及工艺参数的研究。通过在粉末床增加辅助装置、改变粉末床温度、粉末床预处理等方式来提升粉末床的致密度,是突破粉末特征限制、形成更高致密度粉末床的重要途径。

参 考 文 献

- [1] Paolini A, Kollmannsberger S, Rank E. Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100894.
- [2] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review[J]. Materials & Design, 2021, 209: 110008.
- [3] 李昂, 刘雪峰, 俞波, 等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 159-173.
Li A, Liu X F, Yu B, et al. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 159-173.
- [4] 曾晓雁. 金属零部件激光增材制造技术与装备的发展现状与展望[J]. 现代制造, 2021(13): 10-11.
Zeng X Y. Development status and prospect of laser additive manufacturing technology and equipment for metal parts[J]. Maschinen Markt, 2021(13): 10-11.
- [5] 张立浩, 钱波, 张朝瑞, 等. 金属增材制造技术发展趋势综述[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(1): 42-52.
Zhang L H, Qian B, Zhang C R, et al. Summary of development trend of metal additive manufacturing technology[J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(1): 42-52.
- [6] 樊思想, 刘小欣, 吴欢欢. 激光选区熔化增材制造技术的发展[J]. 机械制造, 2021, 59(8): 45-49.
Fan E X, Liu X X, Wu H H. Development of SLM additive manufacturing technology[J]. Machinery, 2021, 59(8): 45-49.
- [7] 郭绍庆, 刘伟, 黄帅, 等. 金属激光增材制造技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 56-62.
Guo S Q, Liu W, Huang S, et al. Development of laser additive manufacturing technology for metals[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 56-62.
- [8] Gong H J, Rafi K, Gu H F, et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. Additive Manufacturing, 2014, 1/2/3/4: 87-98.
- [9] Savitha U, Gokhale H, Reddy G J, et al. Effect of process parameters on porosity in laser deposited IN625 alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2012, 65(6): 765-770.
- [10] Vilaro T, Colin C, Bartout J D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(10): 3190-3199.
- [11] Liu Q C, Elambasseril J, Sun S J, et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V specimens fabricated using selective laser melting[J]. Advanced Materials Research, 2014, 891/892: 1519-1524.
- [12] Wang F, Wu X H, Clark D. On direct laser deposited Hastelloy X: dimension, surface finish, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 344-356.
- [13] Carter L N, Martin C, Withers P J, et al. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 338-347.
- [14] 方嘉铖, 刘洋, 李治国, 等. 工艺参数对 SLM 成形 NiTi 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1553-1559.
Fang J C, Liu Y, Li Z G, et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties of NiTi alloy by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12): 1553-1559.
- [15] 邹烜, 陈盛贵, 陈秋丹, 等. 工艺参数对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金组织与硬度的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(1): 74-79.
Zou X, Chen S G, Chen Q D, et al. Influence of process parameters on the structure and hardness of AlSi10Mg alloy formed by SLM[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57(1): 74-79.
- [16] 刘畅, 马行驰, 马海彬. 工艺参数对选区激光熔化成型 316L 不锈钢组织结构的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 3011-3016.
Liu C, Ma X C, Ma H B. Effect of technological parameters on microstructure of 316L stainless steel by selective laser melting[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 3011-3016.
- [17] 袁美霞, 华明, 陈欣祎, 等. 选区激光熔化工艺参数对钛合金 Ti-6Al-4V 成形质量的影响研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(17): 72-77.
Yuan M X, Hua M, Chen X Y, et al. Effect of selective laser melting process parameters on forming quality of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(17): 72-77.
- [18] 孙策, 盛文斌, 阎思锦, 等. 工艺参数对选区激光熔化 In625 合金表面形貌影响的研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 48-52.
Sun C, Sheng W B, Yan S J, et al. Research on influence of process parameters on surface morphology of In625 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 48-52.
- [19] Qiu C L, Chen H X, Liu Q, et al. On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 330-344.

- [20] Vock S, Klöden B, Kirchner A, et al. Powders for powder bed fusion: a review[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, 4(4): 383-397.
- [21] Boschetto A, Bottini L, Vatanparast S, et al. Part defects identification in selective laser melting via digital image processing of powder bed anomalies[J]. *Production Engineering*, 2022, 16(5): 691-704.
- [22] Wu Q, Qiao C, Wang J, et al. Adaptability investigations on bottom modified blade in powder spreading process of additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49: 102477.
- [23] Kan W H, Chiu L N S, Lim C V S, et al. A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(21): 9818-9865.
- [24] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [25] 樊恩想, 曹章轶, 廖文俊. 粉末特性对激光选区熔化三维打印成形的影响[J]. *机械制造*, 2022, 60(7): 51-54.
Fan E X, Cao Z Y, Liao W J. Influence of powder properties on selective laser melting 3D printing[J]. *Machinery*, 2022, 60(7): 51-54.
- [26] Mussatto A, Groarke R, O'Neill A, et al. Influences of powder morphology and spreading parameters on the powder bed topography uniformity in powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101807.
- [27] Tan J H, Wong W L E, Dalgarno K W. An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 18: 228-255.
- [28] 姚讯杰, 王佳玮, 杨雁程, 等. 金属构件激光增材制造缺陷产生机理及控制机制探究[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402802.
Yao X J, Wang J W, Yang Y C, et al. Review on defect formation mechanisms and control methods of metallic components during laser additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402802.
- [29] 杨怀超, 王学兵, 岳恩来, 等. 钨粉特性参量对铺粉均匀性和激光选区熔化打印件性能的影响研究[J]. *中国钨业*, 2022, 37(1): 20-26.
Yang H C, Wang X B, Yue E L, et al. Effect of tungsten powder characteristic parameters on the uniformity of powder spreading and the performance of selective laser melting 3D printing parts[J]. *China Tungsten Industry*, 2022, 37(1): 20-26.
- [30] Steuben J C, Iliopoulos A P, Michopoulos J G. Discrete element modeling of particle-based additive manufacturing processes[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, 305: 537-561.
- [31] Ganesan V V, Amerinatanzi A, Jain A. Discrete element modeling (DEM) simulations of powder bed densification using horizontal compactors in metal additive manufacturing[J]. *Powder Technology*, 2022, 405: 117557.
- [32] Sousani M, Pantaleev S. Understanding powder behavior in an additive manufacturing process using DEM[J]. *Processes*, 2022, 10(9): 1754.
- [33] Ahmed M, Pasha M, Nan W G, et al. A simple method for assessing powder spreadability for additive manufacturing[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 671-679.
- [34] Escano L I, Parab N D, Xiong L H, et al. Investigating powder spreading dynamics in additive manufacturing processes by *in-situ* high-speed X-ray imaging[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32(2): 9-13.
- [35] Le T P, Wang X G, Davidson K P, et al. Experimental analysis of powder layer quality as a function of feedstock and recoating strategies[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101890.
- [36] Farzadfar S A, Martin J M, Venugopal N. Impact of IN718 bimodal powder size distribution on the performance and productivity of laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. *Powder Technology*, 2020, 375: 60-80.
- [37] Haferkamp L, Haudenschild L, Spierings A, et al. The influence of particle shape, powder flowability, and powder layer density on part density in laser powder bed fusion[J]. *Metals*, 2021, 11(3): 418.
- [38] Zhu H H, Fuh J Y H, Lu L. The influence of powder apparent density on the density in direct laser-sintered metallic parts[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 294-298.
- [39] 侯维强, 孟杰, 梁静静, 等. 增材制造用高温合金粉末制备技术及研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(2): 131-138, 144.
Hou W Q, Meng J, Liang J J, et al. Preparation technology and research progress of superalloy powders used for additive manufacturing[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(2): 131-138, 144.
- [40] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 245-257.
Xu D, Gao H B, Dong T, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 245-257.
- [41] Chen G, Zhao S Y, Tan P, et al. A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization[J]. *Powder Technology*, 2018, 333: 38-46.
- [42] Liu B C, Wildman R, Tuck C, et al. Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process [EB/OL]. [2022-06-08]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/88351>.
- [43] Spierings A B, Herres N, Levy G. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts[J]. *Rapid Prototyping*

- Journal, 2011, 17(3): 195-202.
- [44] Badrossamay M, Yasa E, van Vaerenbergh J, et al. Improving productivity rate in SLM of commercial steel powders[J]. Technical Paper-Society of Manufacturing Engineers, 2009, TP09PUB17: 1-13.
- [45] Abd-Elghany K, Bourell D L. Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(5): 420-428.
- [46] Lutter-Günther M, Horn M, Seidel C, et al. Influence of particle size distribution on powder flowability and part properties in laser beam melting[EB/OL]. [2022-08-09]. <https://doi.org/10.3139/9783446454606.022>.
- [47] Coe H G, Pasebani S. Use of bimodal particle size distribution in selective laser melting of 316L stainless steel[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4(1): 8.
- [48] Haferkamp L, Liechti S, Spierings A, et al. Effect of bimodal powder blends on part density and melt pool fluctuation in laser powder bed fusion[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2021, 6(3): 407-416.
- [49] Si L, Zhang T, Zhou M, et al. Numerical simulation of the flow behavior and powder spreading mechanism in powder bed-based additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2021, 394: 1004-1016.
- [50] Chen H, Wei Q S, Zhang Y J, et al. Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: experiments and computational modeling[J]. Acta Materialia, 2019, 179: 158-171.
- [51] Wang Z Q, Wang X D, Zhou X, et al. Investigation into spatter particles and their effect on the formation quality during selective laser melting processes[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 124(1): 243-263.
- [52] 殷杰, 郝亮, 杨亮亮, 等. 激光选区熔化增材制造中金属蒸气与飞溅相互作用研究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402202.
- Yin J, Hao L, Yang L L, et al. Investigation of interaction between vapor plume and spatter during selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402202.
- [53] 路超, 肖梦智, 屈岳波, 等. 激光选区熔化成形 316L 循环使用粉末特性演变机理研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402009.
- 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.
- [54] Rafieezad M, Chatterjee A, Nasiri A M. Effects of recycled powder on solidification defects, microstructure, and corrosion properties of DMLS fabricated AlSi10Mg [J]. JOM, 2019, 71(9): 3328.
- [55] Carson J W, Pittenger B H, Jenike, et al. Bulk properties of powders[J]. Powder Metal Technologies and Applications, 1998, 7: 287-301.
- [56] Olakanmi E O. Effect of mixing time on the bed density, and microstructure of selective laser sintered (SLS) aluminium powders[J]. Materials Research, 2012, 15(2): 167-176.
- [57] Ruan G, Liu C, Qu H Q, et al. A comparative study on laser powder bed fusion of IN718 powders produced by gas atomization and plasma rotating electrode process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 850: 143589.
- [58] Riener K, Albrecht N, Imeier S Z, et al. Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF)[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101286.
- [59] Brika S E, Letenneur M, Dion C A, et al. Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100929.
- [60] Fedina T, Sundqvist J, Powell J, et al. A comparative study of water and gas atomized low alloy steel powders for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101675.
- [61] Hoeges S, Zwiren A, Schade C. Additive manufacturing using water atomized steel powders[J]. Metal Powder Report, 2017, 72(2): 111-117.
- [62] Engeli R, Etter T, Hövel S, et al. Processability of different IN738LC powder batches by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 484-491.
- [63] Irrinki H, Dexter M, Barmore B, et al. Effects of powder attributes and laser powder bed fusion (L-PBF) process conditions on the densification and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel[J]. JOM, 2016, 68(3): 860-868.
- [64] Abdelwahed M, Bengsston S, Casati R, et al. L-PBF processing of steel powders produced by gas and water atomization[J]. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2021, 166(1): 40-45.
- [65] Akilan A A, Nath S D, Enneti R K, et al. Mechanical and corrosion properties of gas and water atomized laser-powder bed fusion fabricated 25Cr7Ni stainless steel[J]. Manufacturing Letters, 2022, 31: 60-63.
- [66] Yao D Z, An X, Fu H, et al. Dynamic investigation on the powder spreading during selective laser melting additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101707.
- [67] Wu S B, Lei Z L, Jiang M, et al. Experimental investigation and discrete element modeling for particle-scale powder spreading dynamics in powder-bed-fusion-based additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2022, 403: 117390.
- [68] Chen H, Sun Y, Yuan W, et al. A review on discrete element method simulation in laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1): 100017.
- [69] Sehhat M H, Mahdianikhotbesara A. Powder spreading in laser-powder bed fusion process[J]. Granular Matter, 2021, 23(4): 89.

- [70] Forderhase P F, Deckard C R, Klein J M. Apparatus and method for producing parts with multi-directional powder delivery: US5252264[P]. 1993-10-12.
- [71] Shaheen M Y, Thornton A R, Luding S, et al. The influence of material and process parameters on powder spreading in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2021, 383: 564-583.
- [72] Fouda Y M, Bayly A E. A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing[J]. Granular Matter, 2020, 22(1): 10.
- [73] Miao G, Du W, Pei Z, et al. A literature review on powder spreading in additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2022: 103029.
- [74] Haeri S, Wang Y, Ghita O, et al. Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2017, 306: 45-54.
- [75] Haeri S. Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in Additive Manufacturing using DEM simulations[J]. Powder Technology, 2017, 321: 94-104.
- [76] Liu C. Study on the numerical simulation of laying powder for the selective laser melting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5): 2253-2269.
- [77] Zhang J T, Tan Y Q, Bao T, et al. Discrete element simulation of the effect of roller-spreading parameters on powder-bed density in additive manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(10): 2285.
- [78] Zhang J T, Tan Y Q, Xiao X W, et al. Comparison of roller-spreading and blade-spreading processes in powder-bed additive manufacturing by DEM simulations[J]. Particuology, 2022, 66: 48-58.
- [79] Wang L, Yu A, Li E, et al. Effects of spreader geometry on powder spreading process in powder bed additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2021, 384: 211-222.
- [80] Chen H, Chen Y, Liu Y, et al. Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 153: 103553.
- [81] Parteli E J R, Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2016, 288: 96-102.
- [82] Si L, Zhang T F, Zhou M Y, et al. Numerical simulation of the flow behavior and powder spreading mechanism in powder bed-based additive manufacturing [J]. Powder Technology, 2021, 394: 1004-1016.
- [83] Chen H, Cheng T, Li Z W, et al. Is high-speed powder spreading really unfavourable for the part quality of laser powder bed fusion additive manufacturing? [J]. Acta Materialia, 2022, 231: 117901.
- [84] Xiang Z W, Zhang M D, Yan R, et al. Powder-spreading dynamics and packing quality improvement for laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2021, 389: 278-291.