

## 激光粉末床熔融成形内部质量缺陷及其调控方法

宋长辉<sup>1\*</sup>, 付厚雄<sup>1</sup>, 严仲伟<sup>1</sup>, 曾永杰<sup>2</sup>, 周瀚翔<sup>1</sup>, 杨永强<sup>1</sup><sup>1</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641;<sup>2</sup>华南理工大学图书馆, 广东 广州 510641

**摘要** 激光粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)成形工艺的特殊性决定其在生产过程中存在巨大的温度梯度、剧烈的物相变化以及极不稳定的熔池,易使零件产生内部质量缺陷,而这些缺陷会直接影响零件的成形质量和力学性能。从致密度和残余应力两个角度出发,对 LPBF 成形零件的内部质量缺陷进行分类并对其典型特征、形成机理及其造成的影响进行论述。此外,分别讨论了成形工艺调控方式和新型复合制造调控方式对缺陷的调控作用,其中激光波长和光斑形貌的调整、增减材复合和多能量场复合的调控方式在未来有望成为 LPBF 成形工艺内部缺陷调控的重要研究方向。

**关键词** 激光技术; 激光粉末床熔融成形; 内部缺陷; 工艺优化; 复合调控

**中图分类号** V261.8 ; TN249 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1402801

## 1 引言

增材制造(Additive Manufacturing, AM)是一种对三维模型进行切片分层后逐层堆积材料制造零件或实物的加工方法<sup>[1]</sup>。相较于传统减材和等材加工方法,增材制造能够在生产结构复杂、个性化高的轻量化零件<sup>[2]</sup>的同时,简化繁杂的加工步骤和工艺流程,目前已被广泛应用于航空航天、医疗、汽车和核电等领域<sup>[3-5]</sup>。

在过去几十年内,金属 AM 技术得到了极大的提升,激光粉末床熔融(LPBF)技术便是其中之一。LPBF 又称激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)<sup>[3]</sup>,成形过程中铺粉装置在基板上铺设一定厚度的金属粉末,激光根据切片轮廓选择性地扫描、熔化金属粉末,从而加工出一层细薄的金属结构,接着基板下降一定的高度(一个切片层厚),然后不断重复以上步骤直到最终完成金属零件的加工。LPBF 加工中金属粉末以极高的速度熔化和凝固,引起熔池温度和物相的剧烈变化,零件极易产生内部缺陷,从而影响零件的成形质量。

对于 LPBF,较优的成形质量主要表现为较小的表面粗糙度、较高的致密度和尺寸精度、较低的残余应力以及较高的拉伸强度、硬度、疲劳强度等,且组织成分均匀<sup>[6-9]</sup>。而 LPBF 成形缺陷会使零件性能变差,其中一些缺陷会引起致密度降低,从而进一步降低零件

的其他性能,例如微孔和未熔合会导致零件致密度减小,从而降低其强度、硬度和疲劳强度等<sup>[10-11]</sup>,而造成未熔合的球化和飞溅现象还会影响零件的表面形貌和组织成分<sup>[12-14]</sup>。此外,加工过程中产生的残余应力还会引起裂纹和翘曲变形,前者会影响零件性能,后者会影响尺寸精度。上述常见缺陷如图 1 所示。

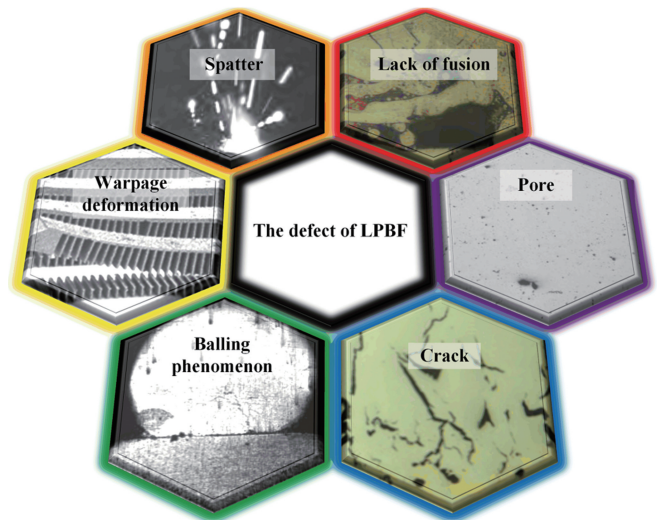


图 1 LPBF 成形缺陷<sup>[15-20]</sup>

Fig. 1 Internal defects of LPBF<sup>[15-20]</sup>

缺陷在很大程度上会直接影响零件的成形质量。为此,许多研究人员对缺陷的形成机理和调控方式展开了研究。本文讨论并总结了 LPBF 过程中常见的缺

**收稿日期:** 2021-12-20; **修回日期:** 2022-01-18; **录用日期:** 2022-02-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(U2001218)、广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120013)、广东省重点领域研发计划(2020B090923001)、首都卫生发展科研专项(2020-2-5131)、北京市自然科学基金(L192066)、广东省特支计划(2019TQ05Z110)

**通信作者:** \*song\_changhui@163.com

陷,阐述了缺陷特征、形成机理以及对应的调控方式,分类探讨了成形工艺调控方式和复合制造调控方式对缺陷的影响规律。

## 2 成形缺陷

零件的成形缺陷主要有影响致密度的未熔合和微孔以及残余应力引起的裂纹和翘曲变形等。其中,致密度是 LPBF 中衡量零件质量的重要参数,对零件的力学性能、表面质量都有很大影响,而对致密度有影响的主要缺陷包括未熔合和微孔。LPBF 成形过程中金属迅速熔化、凝固产生的残余应力容易造成翘曲变形和裂纹等缺陷。未熔合、微孔、裂纹会在零件中形成应力集中,降低产品力学性能,翘曲变形会影响产品的尺寸精度,严重的成形缺陷甚至会导致零件打印的失败。因此了解成形缺陷的特征、形成机理是研究缺陷调控

方式的重要前提。

### 2.1 未熔合

未熔合缺陷是指扫描过程中能量密度不足、熔池不稳定或者搭接率不足导致的层内或层间未完全熔合的孔隙。这类孔隙内一般会存在未熔化粉末或飞溅颗粒,从而降低零件的致密度,进而影响零件的力学性能。未熔合缺陷的产生可以归因于三种现象:欠熔合、球化和飞溅。

#### 2.1.1 欠熔合

欠熔合主要是指熔池轨迹搭接不足引起的层间或层内熔合不充分的物理现象<sup>[21]</sup>,该现象一般伴随着未熔化粉末的出现。如图 2 所示,欠熔合空腔形状不规则<sup>[22]</sup>,常常会成为零件中的薄弱环节,在残余应力或者外界负载作用下,易成为裂纹的起始部位。当欠熔合严重时,层间结合不良,零件的力学性能严重下降。

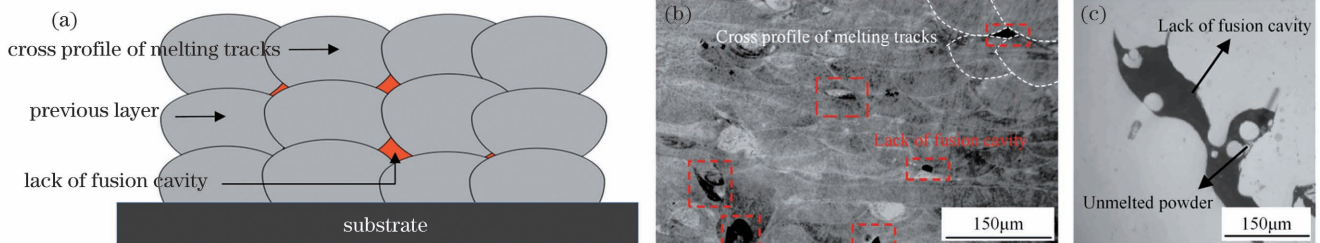


图 2 欠熔合缺陷。(a)欠熔合示意图;(b)熔道搭接率不足导致的欠熔合缺陷<sup>[16]</sup>;(c)欠熔合空腔包含的未熔合粉末<sup>[16]</sup>

Fig. 2 Lack of fusion defects. (a) Schematic of lack of fusion; (b) lack of fusion caused by insufficient overlap rate of melting tracks<sup>[16]</sup>; (c) unmelted powder included in lack of fusion cavity<sup>[16]</sup>

是否存在欠熔合一般可通过单道熔池深度与铺粉层厚的比值关系来判断,研究人员提出,当熔池深度与层厚的比值小于等于 0.667 时,可认定为欠熔合<sup>[23]</sup>。但是该数值的大小也与熔池的整体形状有关,应当结合具体情况判断。除此之外,欠熔合现象还与层厚和扫描间距存在密切关系。合理调节扫描路径和激光输入能量,能够扩大熔池尺寸,提升熔池重叠率,减少欠熔合的出现,进而提高零件的致密度和力学性能。

#### 2.1.2 球化

球化现象是指凝固过程中熔池中的金属液表面在其所接触的气体 and 固体介质间的界面张力作用下收缩成球的现象,这种张力的存在是为了满足体系的最小表面能<sup>[24-25]</sup>。吴伟辉等<sup>[25]</sup>研究发现,熔池可分为熔化粉末所形成的上部分熔池和再熔化固体基体所形成的下部分熔池,如图 3(a)所示。上部分熔池与气体介质间形成气液界面,在界面张力作用下,金属液表面具有

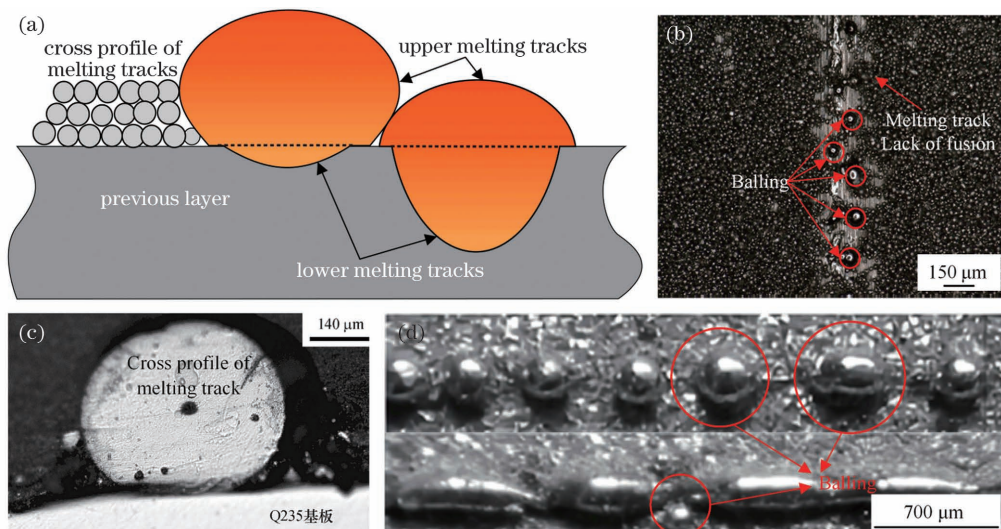


图 3 球化现象。(a)球化示意图;(b)熔道上的球化现象<sup>[26]</sup>;(c)熔道截面形貌<sup>[25]</sup>;(d)球化对熔道连续性的影响<sup>[29]</sup>

Fig. 3 Balling phenomenon. (a) Schematic of balling; (b) balling phenomenon occurring on melting track<sup>[26]</sup>; (c) cross-sectional morphology of melting track<sup>[25]</sup>; (d) influence of balling on continuity of melting tracks<sup>[29]</sup>

收缩成球的趋势。下部分熔池与固体介质形成固液界面,金属液受到的黏附牵引作用对球化有抑制作用,当这种抑制作用相对较弱时,便会发生球化现象,如图 3(b)所示<sup>[26]</sup>。球化现象在单道上一表现为多个不连续球体,球体截面如图 3(c)所示<sup>[25]</sup>。造成球化现象的主要原因包括能量密度过低、熔融金属的润湿性差、激光穿透能力不足等<sup>[27-28]</sup>。

球化现象的出现不仅会影响熔道连续性,如图 3(d)所示<sup>[29]</sup>,还会导致层间结合不足<sup>[30]</sup>,从而引发未熔合缺陷,甚至引起分层现象<sup>[31]</sup>,导致打印的失败。同时球化现象还会影响表面质量,增大表面粗糙度。

### 2.1.3 飞溅

飞溅是 LPBF 过程中十分常见且无法避免的一种现象,飞溅的形成可以归因于反冲压力、马兰戈尼效应和热效应三种效应的综合作用,作用机理如图 4(a)所示<sup>[32]</sup>。一方面,高能量激光使得表面金属

和金属粉末气化,形成高温蒸汽,这种蒸汽的膨胀会在熔体表面形成反冲压力<sup>[33]</sup>,而反冲压力会进一步挤压熔池形成喷射直流,熔池也因此向外扩展。另一方面,熔池在温度梯度引起的表面张力驱动下产生马兰戈尼效应,底部的液体向侧壁和边缘剧烈流动,并在反冲压力的作用下产生液滴和粉末飞溅。熔池的热效应加剧了上述两种现象,会进一步促进熔池内金属液体和周边粉末的溅出,高速摄影下飞溅的形貌如图 4(b)所示。飞溅会在加工表面形成图 4(c)所示的金属颗粒。飞溅一般分为液滴飞溅和粉末飞溅<sup>[34]</sup>。其中粉末飞溅颗粒较小,一般对加工过程的影响不大。而液滴飞溅颗粒较大,尺寸甚至能大于层厚和扫描间距,会严重影响 LPBF 的加工过程。虽然液滴在空中会由于表面张力作用而具有球化的趋势,但是飞溅颗粒会因落地时间不同而具有各种不规则的形状。

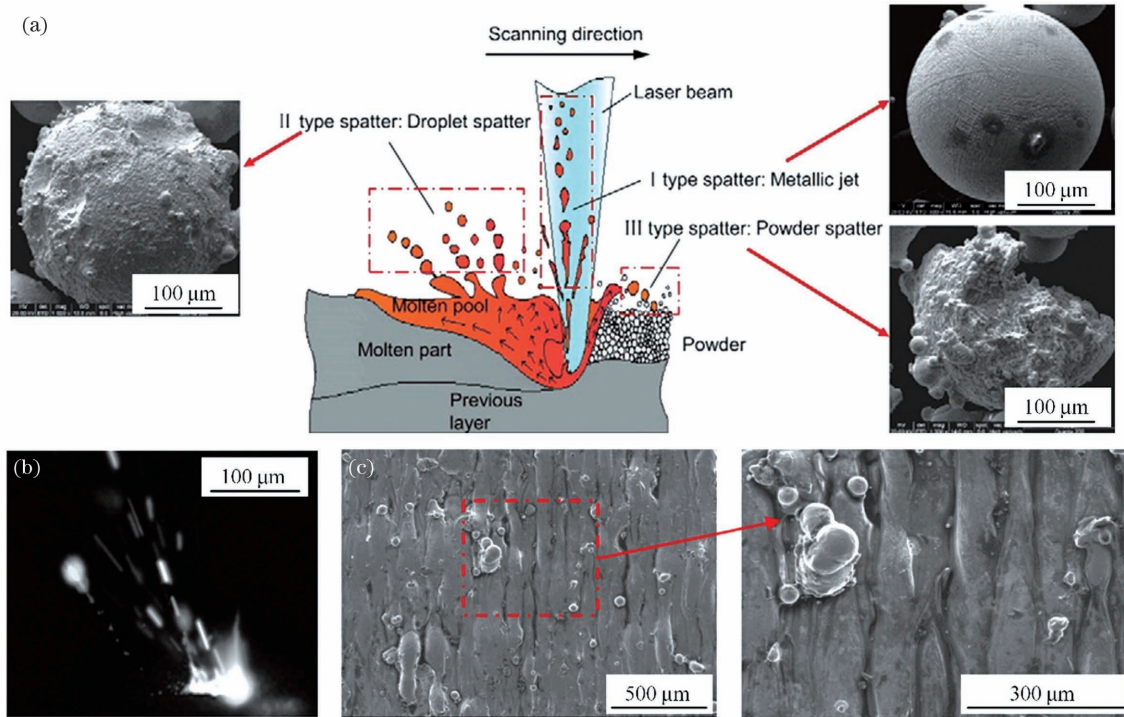


图 4 飞溅现象。(a)飞溅示意图<sup>[32]</sup>;(b)高速摄影下的飞溅现象<sup>[17]</sup>;(c)表面的飞溅颗粒<sup>[32]</sup>

Fig. 4 Spatter phenomenon. (a) Schematic of spatter<sup>[32]</sup>; (b) spatter phenomenon in high-speed photography<sup>[17]</sup>; (c) surface spatter particles<sup>[32]</sup>

如果不能很好地控制飞溅,飞溅颗粒将会对加工过程、零件质量甚至加工设备造成巨大的不良影响。首先,飞溅颗粒在吸收激光能量的同时还会造成熔池内金属的损失,从而导致熔池尺寸的减小。当大颗粒落到金属层时,较小的熔池难以穿透到下一层,从而造成未熔合缺陷,常常还伴随着未熔化粉末,如图 5(a)所示。其次,由于飞溅物在空中更易发生氧化现象<sup>[35]</sup>,落在金属层上的飞溅颗粒还会增加金属层中的氧含量,导致熔池的流动性变差,使球化现象更容易发生。如图 5(b)所示<sup>[36]</sup>,飞溅颗粒粒径不均匀,

当其溅射到粉床上时会影响粉末质量。当溅射颗粒到达加工表面且颗粒直径大于粉末层厚时,不仅会导致夹杂现象,还会影响铺粉的均匀性,如图 5(c)所示<sup>[36]</sup>。最后这些飞溅颗粒会分别嵌入到零件的表面和内部,从而对零件的表面质量和内部质量都造成一定的影响,如图 5(d)、(e)所示<sup>[37]</sup>。除此之外,飞溅过程中产生的烟雾还会在场镜上累积,使激光的透过率降低,导致熔池能量输入的降低或者不稳定,同时还会使场镜因温度上升而形变,严重时会导致场镜破碎。

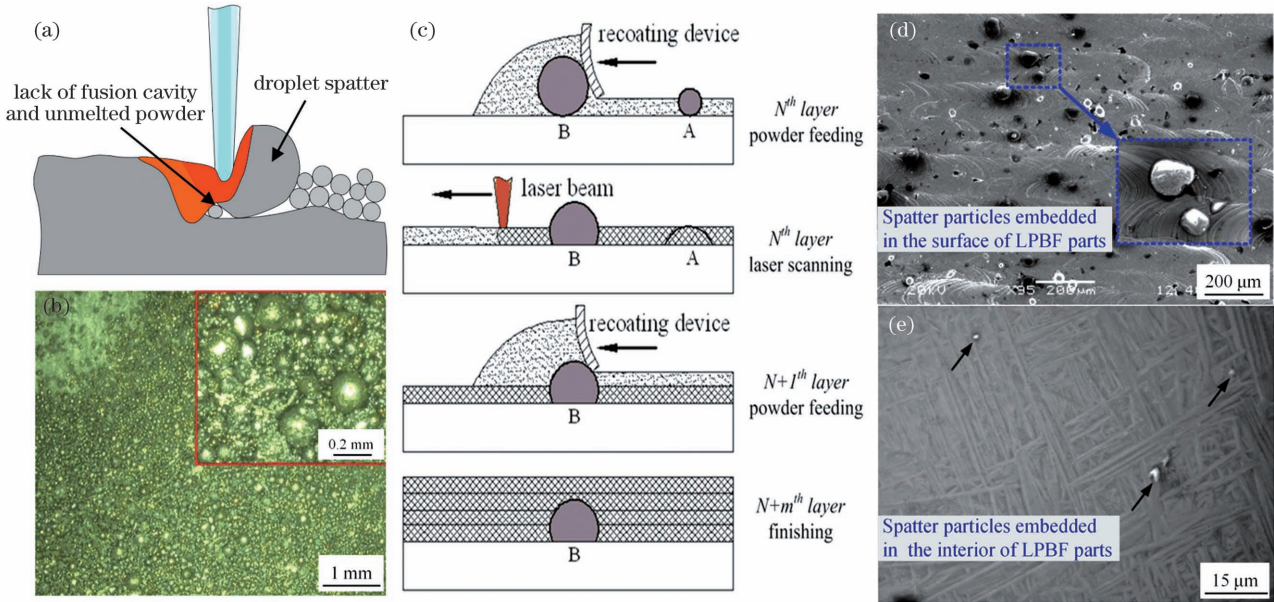


图 5 飞溅对致密度的影响。(a)飞溅引起未熔合示意图；(b)粉末中筛出的飞溅颗粒<sup>[36]</sup>；(c)飞溅颗粒导致夹杂现象<sup>[36]</sup>；(d)嵌入零件表面的飞溅颗粒<sup>[37]</sup>；(e)嵌入零件内部的飞溅颗粒<sup>[37]</sup>

Fig. 5 Effect of spatter on density. (a) Schematic of lack of fusion caused by spatter; (b) spatter particles screened out from powder<sup>[36]</sup>; (c) inclusion phenomenon caused by spatter particles<sup>[36]</sup>; (d) spatter particles embedded in surface of parts<sup>[37]</sup>; (e) spatter particles embedded in interior of parts<sup>[37]</sup>

### 2.2 微孔

微孔是指零件内部存在的气体孔隙。这些气体一般包括粉末中夹杂的气体、成形腔中的保护气、金属粉末升华或者金属液气化形成的金属气<sup>[38-39]</sup>。

如图 6 所示，微孔根据形成机理分为气孔和锁孔两种，气孔大多为规则的小圆孔，而锁孔体积较大且位于熔池底部。气孔一般是熔池在熔化过程中捕获了保护气或者粉末中夹杂的气体，且气体在金属液后续凝

固过程中来不及溢出形成的。除此之外，在高温时，气体在金属液中的溶解度高，更容易富集在液相中，在金属固化过程中析出也会形成气孔<sup>[38]</sup>。图 6(a)是拍摄的熔池内气孔的动态运动过程。在熔池形成过程中，如果能量输入过大，将导致过大的反冲压力，形成高深宽比的熔池<sup>[40]</sup>。此时，熔池底部的金属气体难以排出，随着熔池上方前后壁的塌陷，金属气被包裹后凝固<sup>[41]</sup>，便形成了锁孔。图 6(c)为拍摄的锁孔形成过程。

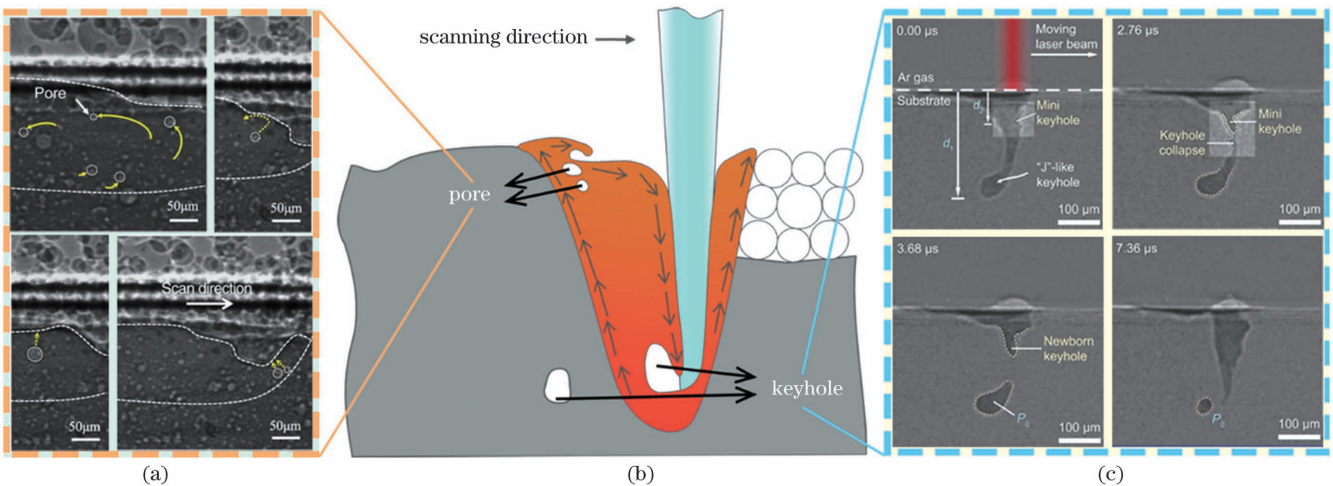


图 6 微孔形成机理。(a)熔池内气孔的动态运动<sup>[42]</sup>；(b)微孔示意图；(c)锁孔的形成过程<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Formation mechanism of micropores. (a) Dynamic pore motion within molten pool<sup>[42]</sup>; (b) schematic of micropores; (c) formation process of keyhole pore<sup>[43]</sup>

这些微孔会降低零件致密度，并对力学性能产生不良影响。孔隙会影响零件的应力分布，因此在承受外界压力时，孔隙处产生应力集中，孔隙进一步发展为裂纹等缺陷，成为零件破坏的根源。

### 2.3 裂纹

LPBF 加工过程中，熔池会发生快速的熔化和凝固，该过程中温度梯度巨大，会在固化的金属层内留下较大的残余应力<sup>[44-45]</sup>。残余应力在零件成型过程中不

可避免,当残余应力高于抗拉强度时,材料会在应力集中处产生裂纹<sup>[46]</sup>。如图 7(a)所示。Tan 等<sup>[47]</sup>发现了两种裂纹现象:1)在冷却过程中,巨大的温度梯度和不同的热膨胀系数使得柱状晶粒产生不均匀的塑性变形,从而形成裂纹,这些裂纹会通过柱状晶粒扩展,跨

越多个熔池层<sup>[48]</sup>;2)溶质的偏析在柱状晶粒之间提供了晶间液体通道<sup>[49]</sup>,这些液体通道作为易变形的脆弱区域,最终被拉伸应力撕裂,形成裂纹。如图 7(b)、(c)所示,裂纹也常常发生在异质材料的结合界面处,且一般为断续裂纹或者枝状裂纹。

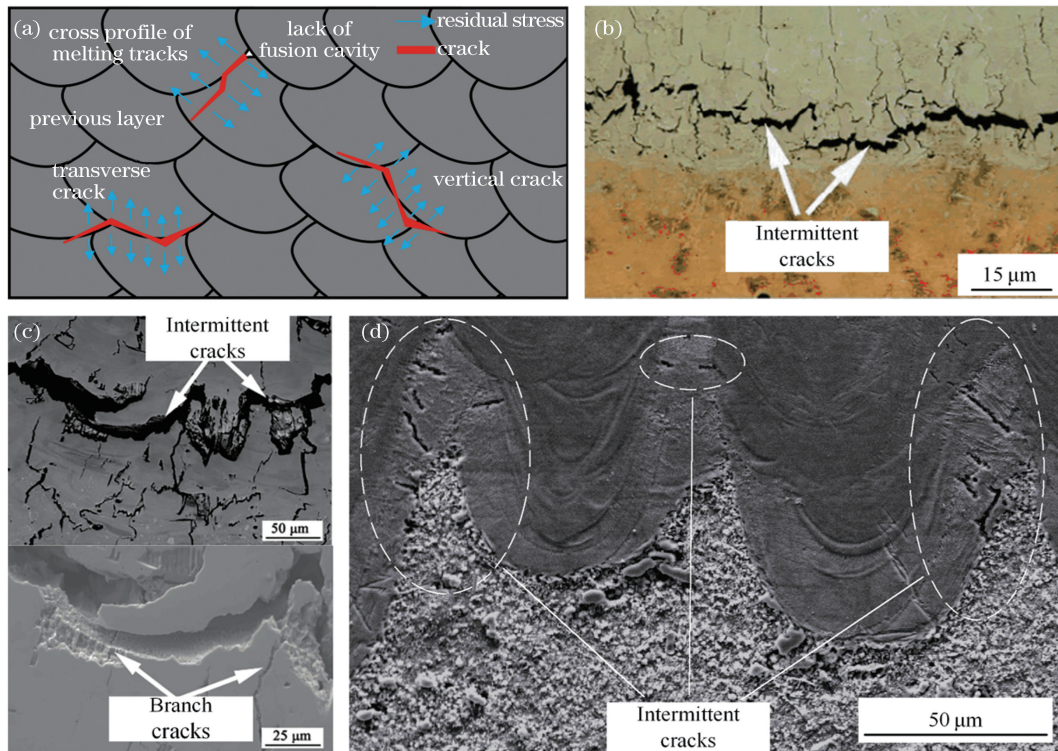


图 7 裂纹。(a)裂纹示意图;(b)铜钢界面间的裂纹缺陷<sup>[50]</sup>;(c)断续裂纹与枝状裂纹<sup>[49]</sup>;(d)熔池边缘处形成的裂纹<sup>[51]</sup>  
Fig. 7 Cracks. (a) Schematic of cracks; (b) crack defects between copper and steel interfaces<sup>[50]</sup>; (c) intermittent cracks and branch cracks<sup>[49]</sup>; (d) cracks formed at edge of molten pool<sup>[51]</sup>

除材料微观组织的影响外,不规则孔隙、层间结合较弱区域也会随着残余应力的连续叠加而成为裂纹,进而成为零件断裂的起始部位。如图 7(d)所示,熔池边界在残余应力的作用下也会产生裂纹,这种裂纹容易沿着结合界面扩展,这也是裂纹往往出现在熔覆层之间的原因<sup>[45]</sup>。裂纹对零件的影响很大,尤其是零件的力学性能和疲劳性能<sup>[52]</sup>。裂纹具有方向性且存在尖锐的边界,所以往往会成为零件的薄弱环节,大大降低零件的强度。实际上,裂纹往往出现在零件最脆弱的部位,零件最脆弱的部位即使没有残余应力的影响也会产生裂纹,也会在零件使用过程中的各种负载作用下最先发生开裂甚至断裂。因此,控制裂纹最重要的是加强零件的薄弱环节。

## 2.4 翘曲变形

当零件内的残余应力低于抗拉强度但高于屈服强度时,翘曲变形便成为零件另一种释放残余应力的方式。长薄壁状零件更容易发生翘曲变形,如图 8(a)所示。翘曲变形的变形量会随着残余应力的累积而增加,也会随着孔隙率的增加而减小,这是因为孔隙收缩有助于残余应力的释放<sup>[53]</sup>。在实际生产过程中,翘曲变形一般发生在支撑与零件结合处,如图 8(b)所示。如图 8(c)、(d)所示,加工长薄壁件或者零件支撑不足

时,容易发生翘曲变形,翘曲变形会影响加工零件的尺寸和形状精度或导致打印的失败。

翘曲变形是一种常见但危害很大的缺陷,当其发生在打印过程中时,一方面会导致打印面不平整,翘曲突出部位会因无法铺上粉末而被重熔,翘曲进一步加剧;另一方面,翘曲突出部位会损坏刮刀,导致无法正常铺粉,带来更多的缺陷。

## 3 成形工艺调控

对于 LPBF 而言,致密度、残余应力都对零件的性能、外观和功能有着巨大的影响,因此对上述缺陷的调控极为重要。许多研究人员在了解常见缺陷的特点和形成机理后,通过分析缺陷的影响因素及各因素的作用,总结出了一些有效的调节方式来抑制缺陷的产生。LPBF 成形的影响因素大约有 100 多种,其中加工参数和扫描策略是影响零件内部质量的重要因素,也是研究重点。然而,随着 LPBF 技术的发展以及人们对成形质量越来越高的要求,加工环境、粉末床以及激光等因素也引发了越来越多的关注。因此我们在这里把调控方式归为加工环境、粉末床、激光参数、加工参数、扫描策略五类,如图 9 所示。

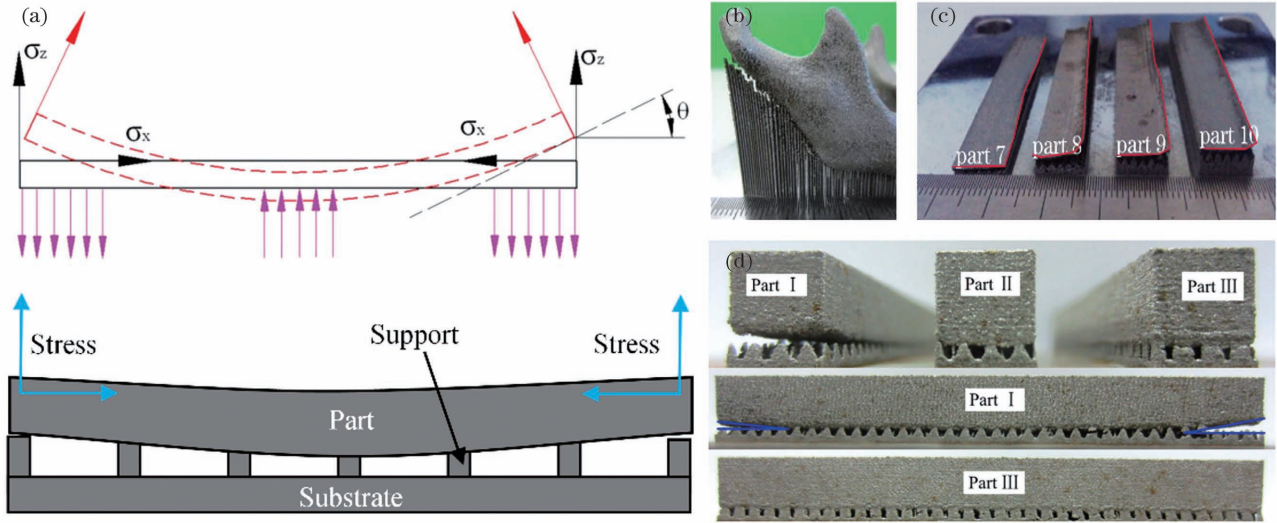


图 8 翘曲变形。(a)翘曲变形示意图<sup>[54]</sup>;(b)翘曲变形的零件<sup>[37]</sup>;(c)不同高度支撑成型效果<sup>[55]</sup>;(d)不同大小支撑下大高宽比的成型效果<sup>[53]</sup>

Fig. 8 Warping deformation. (a) Schematic of warping deformation<sup>[54]</sup>; (b) part with warping deformation<sup>[37]</sup>; (c) shaping effect of different height supports<sup>[55]</sup>; (d) shaping effect under different size supports with large aspect ratio<sup>[53]</sup>

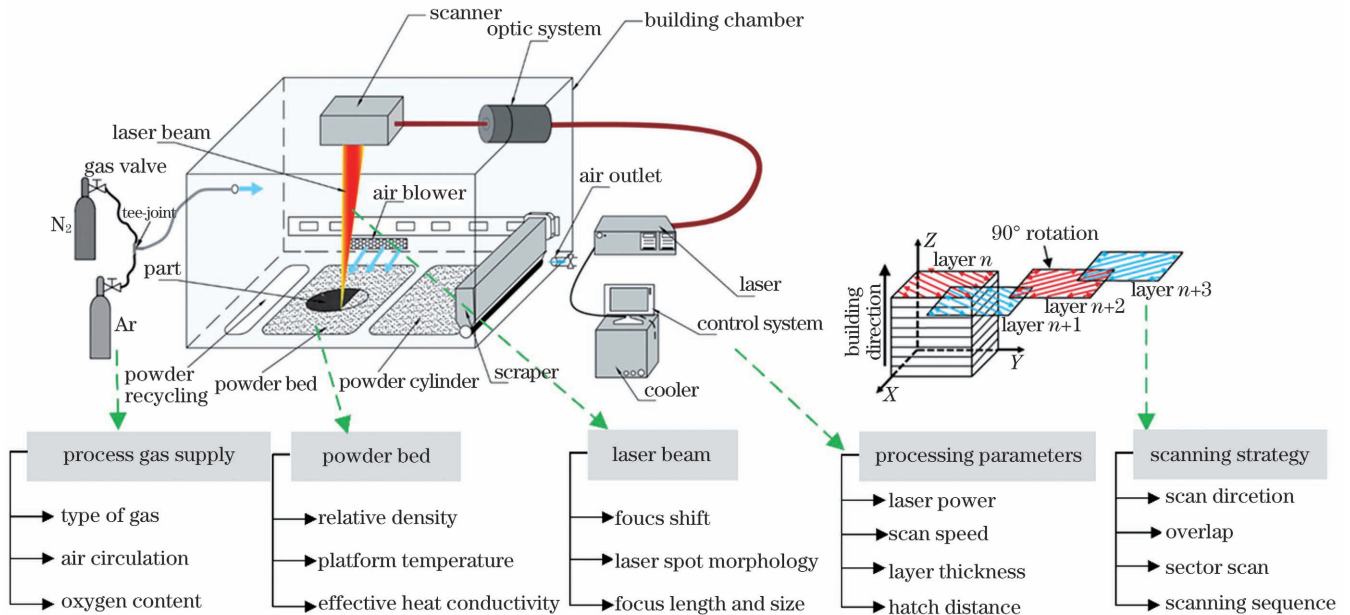


图 9 LPBF 技术及其主要工艺因素

Fig. 9 LPBF technology and main process factors

### 3.1 加工环境

与传统机械加工不同,LPBF 加工过程中金属会吸收大量热能,熔池形貌、金属溶液的化学成分在此过程中都会变得极不稳定,这也对加工环境提出了较高的要求。一般而言,LPBF 加工会在一个密闭腔体中进行,腔体中充满氩气或其他保护气,腔体环境中的含氧量、气流、气压被严格控制,以实现缺陷调控。

在 LPBF 加工过程中,温度剧烈变化,熔池中的某些元素极易被氧化或汽化析出,影响零件的元素成分。Li 等<sup>[56]</sup>发现,降低氧气含量能有效抑制球化现象。这是因为金属氧化物会降低熔池的润湿性,从而引发球化现象。

LPBF 加工的风场虽然能够带走大部分飞溅颗粒,但也会引起局部的压力变化,从而影响熔池的稳定性。Liu 等<sup>[34]</sup>研究发现,当风场气流过大时,会导致粉末被吹飞,甚至造成更多的液滴飞溅,而一些较大的飞溅颗粒又很难被风场气流带走,最终落在加工层影响后续加工。Zhou 等<sup>[57]</sup>研究发现,当气流方向和激光束运动方向一致时,熔道轨迹不稳定,而激光束与气流在相反方向上移动时熔道轨迹相对稳定,并据此提出了环向向下输送气体的环形流动系统设计,以减小气流对熔道轨迹稳定性的影响。

还有部分学者通过改变气压来改善熔池的形貌和增强熔池中气体的溢出能力,从而抑制缺陷的产生,提

高零件的致密度。Tan 等<sup>[41]</sup>研究发现,在亚大气压下,熔池表面温度降低,表面平均反冲压力增加,这虽然会使 LPBF 过程中形成高深宽比的熔池,但也使熔池更加稳定、不易塌陷,因此亚大气压有助于防止锁孔现象的出现。

目前,绝大多数的 LPBF 加工设备通过加入保护气来降低加工环境中的氧含量,保证熔池的稳定性并抑制缺陷的产生。还有学者在真空环境中进行 LPBF 加工,他们发现在真空条件下熔池无法捕捉环境中的气体,可大大降低孔隙率。但是真空环境下粉末的导热性能变差,需要更大的能量熔化粉末<sup>[58]</sup>。同时,真空环境下 LPBF 无法通过加入气流来带走飞溅颗粒,因此对飞溅现象的控制要求变得更加严格。

LPBF 的加工环境主要是指成形腔体内的气体环境,通入保护气以保证含氧量处于极低水平甚至为 0 是保证 LPBF 快速熔凝不被氧化的基本前提,对于特殊材料甚至需要改变保护气种类。风场循环是避免飞溅物掉落在成形表面的重要举措,风场的气流速度、气流激光之间的相对运动方向、风场气流的均匀性都对飞溅以及成形表面质量具有重要影响。此外,腔体内的正负压对熔池也会产生不同的作用,所以控制腔体环境是缺陷调控的重要手段。

### 3.2 粉末床

粉末床在 LPBF 加工中具有储存和运输粉末的作用。粉末床系统对缺陷的影响因素包括粉末粒径、粉末床粉末的松装密度、基板温度与粉末自身物理性质等。粉末床粉末的松装密度既受到粉末种类、粉末粒径分布等自身因素的影响,也受到铺粉刮刀类型的影响。Jing 等<sup>[59]</sup>研究发现,采用柔性刮板能够增加零件的致密度,配合良好的工艺参数可以打印出相对密度超过 99.9% 的 300M 钢零件。这是由于柔性铺粉刮刀能够减少粉末床上飞溅颗粒和球化颗粒对铺粉平整性的影响,有效提高了铺粉的稳定性。此外,对粉末床进行预热能够减小加工过程中的温度梯度,降低零件

内部的残余应力。Ma 等<sup>[60]</sup>发现,对基板进行 400 °C 预热可以有效消除 MoSiB 合金零件的裂纹,邓国威等<sup>[61]</sup>在加工高体积比陶瓷增强的马氏体钢时同样发现,预热基板能抑制裂纹的产生。除此之外,Narvan 等<sup>[62]</sup>认为,基板的预热不仅拓宽了 LPBF 制造 H13 工具钢的安全加工窗口(即扩大了无缺陷加工参数的范围),还能够提高零件的致密度。Tan 等<sup>[63]</sup>还发现,通过将隔热材料添加到基板下方的方式,可以控制温度场,消除 7075 铝合金零件中的裂纹。因为,此方法能够减小熔池冷却速率和凝固过程中的温度梯度,进而降低零件中的残余应力。

粉末床是 LPBF 加工的作用区域,也是决定 LPBF 加工成败的重要因素,保持其稳定性即保证加工粉末层的稳定,可以使 LPBF 加工出质量均匀的零件。此外,对粉末床进行预热可以减小激光能量输入,进而降低加工的剧烈程度,减小金属熔凝过程中的温度梯度,对于减少缺陷和降低残余应力具有重要作用。

### 3.3 激光参数

激光作为 LPBF 的能量源,对熔池的能量输入、形貌及状态具有关键作用。目前,最常用的激光光束类型为高斯光束。高斯光束的能量在光斑中心处最高,并向周围逐渐降低,在单个直径截面上呈高斯曲线分布。

离焦量是指焦点偏移加工平面的距离。McLouth 等<sup>[64]</sup>发现,随着离焦量的增大,光斑直径会变大而功率密度会减小,从而降低温度梯度和冷却速率,这有利于枝晶生长,但会导致大柱状晶的产生和元素向枝晶间偏析的发生,进而促进裂纹等缺陷的产生。还有研究人员发现,随着离焦量的增加,熔池宽深比增加,因此适当调节离焦量可以有效提升熔道的搭接率,改善组织均匀性<sup>[65-66]</sup>。与此同时,不少的研究人员开始探索激光光束形貌对缺陷的影响。如图 10 所示,Tumkur 等<sup>[67]</sup>使用贝塞尔光束加工 316L 不锈钢,发现其能够提高熔池的稳定性并增加熔池的凝固时间,减少了飞溅以及欠熔合现象的发生。同时他们还提

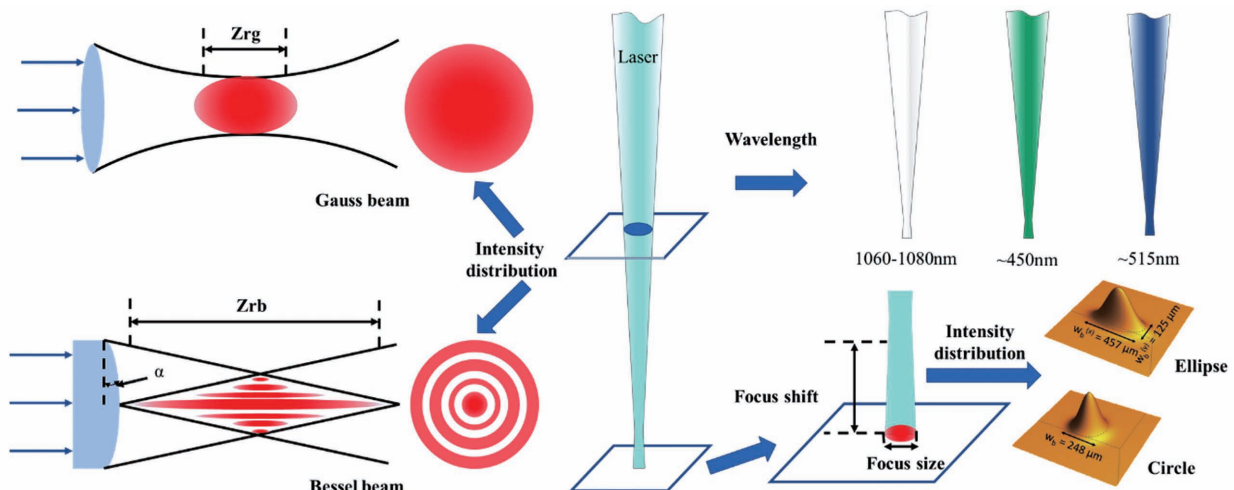


图 10 激光参数<sup>[67-68]</sup>

Fig. 10 Laser parameters<sup>[67-68]</sup>

出,贝塞尔光束对聚焦平面定位具有更大的容忍度。

不同尺寸、不同光强分布的光斑对缺陷也有影响。如图 10 所示,Roehling 等<sup>[68]</sup>研究了不同光斑尺寸、不同光强分布形状(圆形、纵向椭圆形和横向椭圆形)的 9 种高斯光束对成形质量的影响,发现三种光斑形状的最小尺寸光束都会出现锁孔现象,且圆形光斑最为明显。同时他们发现,中间尺寸和大尺寸的椭圆形光强分布的激光光束改善了轨道的连续性、平整度和基材附着力,还有效抑制了飞溅和球化的产生,但熔道高度有所降低。同时椭圆光束更容易产生等轴晶或等轴晶与柱状晶混合的晶粒,Matthews 等<sup>[69]</sup>也发现了同样的现象。

此外,也有研究人员研究了不同激光波长对缺陷的影响,如图 10 所示。常见的 LPBF 大部分采用红外激光,但是在加工纯铜等红外高反金属材料时面临巨大挑战<sup>[69-70]</sup>,加工过程中熔池稳定性差,容易产生欠熔合等现象。Hori 等<sup>[71]</sup>开发了一款 200 W 的 450 nm 蓝光激光器,并通过工艺优化,打印出了致密度高达 99.1% 的高密度纯铜零件。通快公司开发的 TruPrint 1000 金属 3D 打印机也装备了 515 nm 的绿光激光器,相比于红外激光,铜对绿光激光的能量吸收率提高了 8 倍。能量吸收率的提高使得加工过程更加稳定而且高效,同时也拓宽了加工工艺窗口,大大提升了纯铜零件的力学性能和电导率。

激光是 LPBF 加工的主要影响因素之一,适当的离焦量、光斑大小、光强分布不仅能提高熔池的稳定性,还能改善熔池形貌以及零件的微观组织。此外,不同材料对不同波长激光的能量吸收率不同,根据材料对激光的吸收率选择合适波长的激光不仅能提高激光的能量利用率,还能有效抑制未熔合缺陷的产生。

### 3.4 加工参数

加工参数主要包括激光功率、扫描速度、扫描间距和铺粉层厚,这四个参数会在不同程度上影响 LPBF 的成形质量。加工参数的调控是控制缺陷的常见方法,同时这些参数的调控也是加工人员调控缺陷的最直接的方法。

激光功率、扫描速度会影响激光能量密度,从而影响熔池的形状和残余应力的分布,因此可以通过改变激光功率、扫描速度来抑制缺陷的产生。激光能量密度过高会导致在 LPBF 成形过程中形成高深宽比的熔池,易导致锁孔的产生<sup>[72-73]</sup>,还会引起熔池的不稳定和温度梯度的增大,导致更严重的飞溅<sup>[34]</sup>和纵向裂纹<sup>[74]</sup>。激光能量密度过低,则难以熔化全部粉末以形成合适尺寸的熔池,容易产生欠熔合缺陷<sup>[72]</sup>。Wang 等<sup>[16]</sup>发现,在过高或过低的扫描速度下,加工过程中都会产生更多飞溅颗粒。过低的扫描速度会导致激光能量密度过高,此时飞溅主要表现为与扫描方向垂直的剧烈喷射;过高的扫描速度会导致熔池长度增加,此时液滴更容易从熔池尾部逃逸,从而形成液滴飞

溅<sup>[75]</sup>。由此可见,激光能量密度并不能完全反映熔池演变过程中各种物理现象对 LPBF 过程的影响。通过分析激光能量和扫描速度对缺陷的影响,得到一个缺陷经验分布图,如图 11 所示。

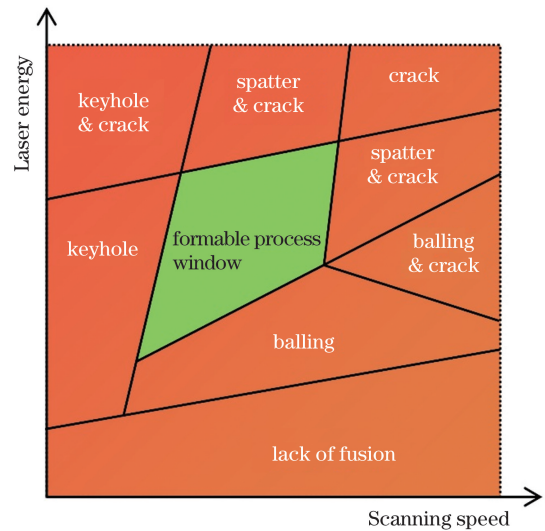


图 11 缺陷经验分布

Fig. 11 Region of empirical defect

当激光功率过低时,能量密度不足容易造成未熔合、球化等缺陷,而激光功率过高则存在发生锁孔、开裂和严重飞溅的风险,只有在合适的激光功率下找到合适的激光扫描速度才能得出最佳的工艺参数。所以在调整激光功率和扫描速度时,并不能仅仅以能量密度作为参照标准,而是在保证足够的能量密度的前提下,寻找到合适的激光功率与扫描速度组合。

扫描间距是指相邻扫描轨道之间的距离,它会影响到熔道的搭接率。Aboulkhair 等<sup>[76]</sup>研究发现,随着扫描间距的不断增大,缺陷产生的位置逐渐规律化,且致密度逐渐降低,缺陷种类也从低扫描间距下的微孔缺陷变为高扫描间距下的未熔合缺陷。Waqar 等<sup>[9]</sup>还发现,适当提升扫描间距可以减少熔道数和重熔产生的收缩,从而减小残余应力。此外,铺粉层厚是影响层间结合的重要参数,过大的铺粉层厚会导致零件出现未熔合缺陷和未熔化颗粒<sup>[77]</sup>,还会导致更严重的飞溅<sup>[32]</sup>。但也有研究人员发现,在不同的层厚参数下,都可以优化出使零件接近致密且性能优越的激光加工参数,但较小的铺粉层厚组织排布密集,裂纹扩展难度较大,因此较小的铺粉层厚有利于制造出性能最佳的零件,在成形质量相近的情况下,高层厚的成形效率约为低层厚的 2.7 倍<sup>[78]</sup>。

加工参数是 LPBF 加工过程中调控缺陷最灵活的方式,可通过改变激光能量密度、热分布、熔道的搭接率以及层间结合来影响零件最终的内部质量。除此之外,在实际生产中,LPBF 加工效率也是研究人员重要关注的因素之一,而加工参数是影响加工效率的最重要因素。因此,探索可高效生产无缺陷零件的加工参数也是内部缺陷调控的重要研究内容。



### 3.5 扫描策略

扫描策略是指在 LPBF 过程中对扫描路径的规划,这些规划包括对扫描方向、扫描分区、扫描顺序的规划以及是否进行轮廓扫描或者是否重复扫描重熔等。

扫描方向的交错排列能够有效地对前一层熔道间

的凹谷进行填充,改变熔道的重叠状态,而缺陷的延续在很大程度上取决于重叠状态。Zhou 等<sup>[57]</sup>通过对比之字形策略和交叉策略来制造 CoCrMo 合金零件,前者扫描方向始终不变,后者扫描方向会在每层扫描后会旋转 67°,如图 12(a)所示。经对比发现,交叉策略生产出的零件缺陷更少。

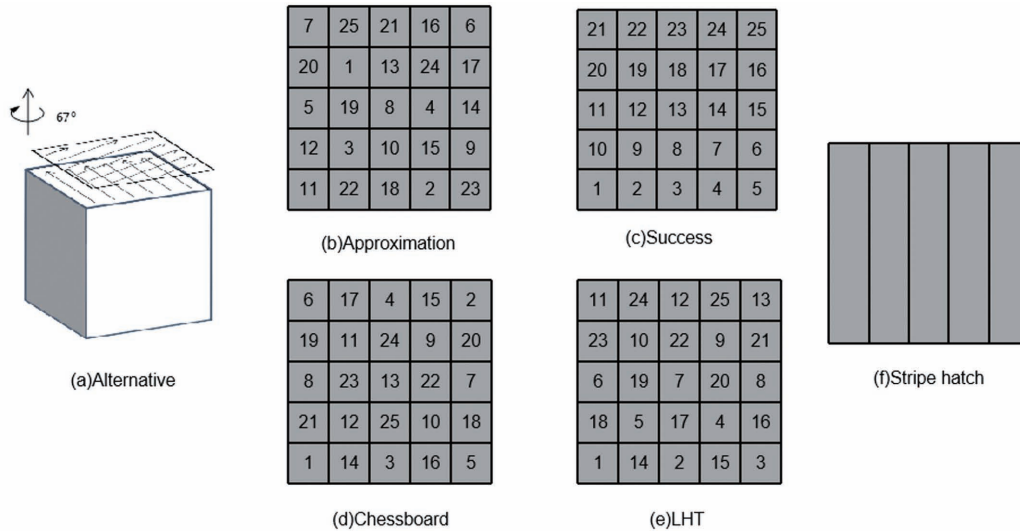


图 12 扫描策略示意图。(a)交叉<sup>[57]</sup>;(b)~(e)岛屿分区四种扫描顺序(随机、连续、棋盘和最小热影响)<sup>[79]</sup>;(f)条纹分区<sup>[79]</sup>  
 Fig. 12 Schematics of scanning strategy. (a) Cross<sup>[57]</sup>; (b)~(e) four scanning sequences of island sectors (approximation, successiveness, chessboard, and LHT)<sup>[79]</sup>; (f) stripe hatch sectors<sup>[79]</sup>

随着扫描路径的增长,残余应力会逐渐增加<sup>[37]</sup>,而采用分区扫描的方式能够有效缩短熔道长度,使得应力分布更加均匀<sup>[80]</sup>,从而降低翘曲变形和裂纹发生的风险。除此之外,调整分区扫描中不同分区的扫描顺序能够改变热场的分布以调控残余应力。Mugwagwa 等<sup>[79]</sup>研究了五种扫描策略对残余应力的影响,其中四种扫描策略的分区方式均为岛屿分区且分别采用了随机、连续、棋盘、最小热影响(Least Heat Influence, LHI)四种扫描顺序,另一种为条纹分区,如图 12(b)~(f)所示。结果显示,在棋盘顺序的岛屿分区策略下,加工的零件残余应力最小,翘曲变形也最小,而条纹分区策略下的翘曲变形则相对较大。

重熔即对同一加工层进行多次激光扫描,可分为预烧结式重复扫描(即同一轨道连续扫描两次,前一次采用较低的激光功率进行预烧结,第二次采用正常加工的激光功率进行熔化凝固成形)、交错扫描(即前后两次扫描轨迹错位半个扫描间距)、同位重熔(即同一轨道扫描两次)以及正交重熔(即两次扫描方向相互垂直)。采用预烧结方式在一定程度上可以减少缺陷和降低表面粗糙度<sup>[81]</sup>。而在两次扫描方向相反和相同的同位重熔扫描研究<sup>[82]</sup>中,发现两种重熔扫描方式对孔隙的抑制作用相似,只是对孔隙的位置分布有一定影响,因为重熔能够使气孔、锁孔中的气体逸出,未熔化粉末重新熔化。除此之外,重熔还能对球化颗粒进行二次熔化和润湿<sup>[79]</sup>,以抑制球化现象。Aboulkhair 等<sup>[76]</sup>研究了交错扫描、同位扫描、正交扫描和预烧结

式重复扫描等方式在不同扫描速度下对成形零件相对密度的影响,发现重熔可以有效提升致密度。同时,不同扫描策略下的最优工艺参数并不相同,因此在分析扫描策略的优劣时,应考虑不同的加工参数,因为同一组加工参数下不同扫描策略的成形质量的好坏并不能完全说明扫描策略的优劣。

扫描策略不仅能够改变加工过程中的重叠率和应力分布以抑制缺陷的产生,还能有效抑制缺陷的延续甚至能够消除已产生的缺陷。而采用分区策略和调整分区扫描顺序可以减少残余应力的累积,降低翘曲变形和开裂的风险。重熔则可以减少孔隙出现,提高零件致密度的同时降低表面粗糙度。因此,在加工过程中,选择合适的扫描方向和分区扫描策略并辅以预烧结等重熔方式能有效减少零件成形过程中的缺陷。

## 4 复合制造调控

随着 LPBF 技术的发展,常规的成形工艺调控方式得到了充分发展,而新的复合制造调控方式也在兴起。新型复合制造调控方式利用更先进的手段例如复合多种工艺或能量场的方式对 LPBF 加工过程进行改良,也被称为“复合制造”。国际生产工程科学会(The International Academy for Production Engineering, CIRP)将其定义为“一种基于若干种工艺/工具/能量源同步工作、相互作用可控且对工艺/零件性能有显著影响的技术”<sup>[83]</sup>。以 LPBF 为主体的复合制造工艺在加工过程中不能达到严格的“同步工作”,而是采用交

替的“协同工作”模式<sup>[84]</sup>对零件进行加工。为了更好地对 LPBF 进行调控,增减材复合制造调控方式和多能量场复合制造调控方式等成为 LPBF 缺陷调控的前沿手段。

#### 4.1 增减材复合制造调控

增减材复合制造调控即在 LPBF 加工过程中辅以减少材加工,也称为增减材复合加工(Additive-Subtractive Hybrid Manufacturing, ASHM),常见的复合方式为铣削加工复合 LPBF。在增减材复合加工中,常常将零件制造过程分为若干个机加层,一个机加

层会进行若干层的 LPBF 加工和一次铣削加工,从而得到具有复杂内部结构和高表面质量的零件,加工过程如图 13(a)所示<sup>[85]</sup>。ASHM 通过机加工能够有效防止飞溅、球化这类大颗粒缺陷的进一步扩展,如图 13(b)所示。此外,Bai 等<sup>[86]</sup>研究了 LPBF 成形零件的应力分布,发现零件表面一般处于压应力状态,深处则处于拉应力状态,而铣削加工会使表面压应力增大。章媛洁等<sup>[87]</sup>发现,当铣削深度增大时,表面压应力会逐渐减小直至变为拉应力,在这个变化过程中,存在一个使整体应力最小的铣削深度。

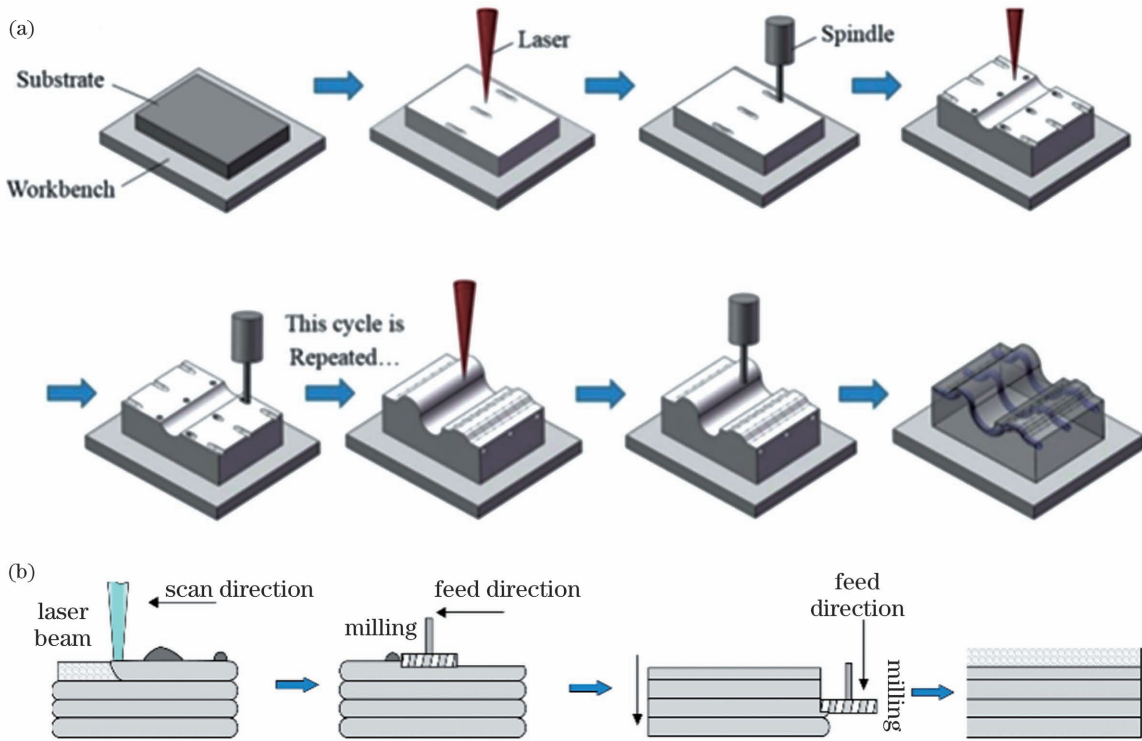


图 13 增减材复合加工。(a)典型工艺方法<sup>[85]</sup>;(b)对 LPBF 工艺的影响

Fig. 13 Additive-subtractive hybrid manufacturing. (a) Typical technical process<sup>[85]</sup>; (b) influence on LPBF technique

增减材复合加工也存在一些问题,侧面铣削会减小机加层的轮廓尺寸,使后续的 LPBF 加工边缘出现悬垂结构,造成层间结合不良、变形等缺陷。其次,冷热加工的交替会引起相邻两个机加层的热分布不均匀和变形不连续,会在边缘处形成周期性台阶,这些台阶

容易因应力集中而形成裂纹。对此,Furumoto 等<sup>[88]</sup>提出了一种新型的激光扫描策略,即在铣削加工完后光束向内轮廓偏移一定的距离,并在后续的 LPBF 过程中逐渐减少向内的偏移量,在下次机加工之前恢复到原有切片轮廓大小,如图 14(a)所示。这种扫描

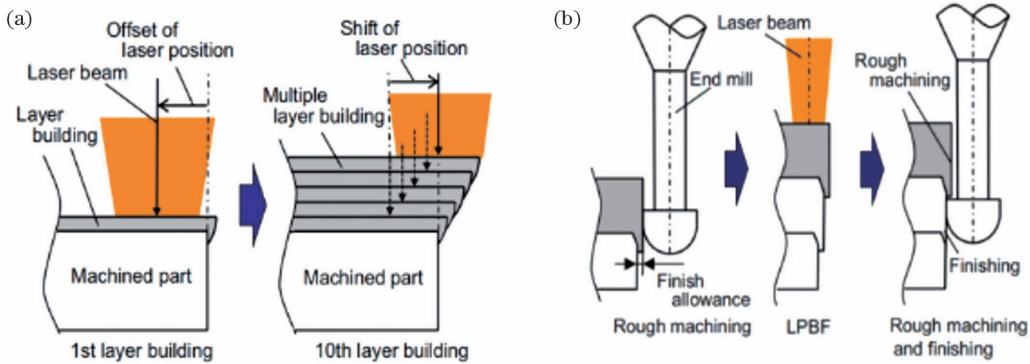


图 14 增减材复合加工策略<sup>[88]</sup>。(a)新型激光扫描策略;(b)增减材复合方式

Fig. 14 Additive-subtractive hybrid manufacturing strategy<sup>[88]</sup>. (a) Novel laser scanning strategy; (b) additive-subtractive hybrid method

策略可以减小 LPBF 过程中突出边缘的累积,但是向内偏移量过大则会引起未熔合缺陷并导致表面质量变差。同时他们将侧面铣削分为粗加工和精加工两个步骤,对当前机加层进行留有余量的粗加工,对前一个机加层进行精加工,这种方式几乎能完全消除上述台阶现象,如图 14(b)所示。

增减材复合加工不仅具备了增材制造的灵活性,还具备了铣削加工消除内部缺陷、提高零件的内部质量的能力。但不可避免的是,增减材的交替加工会极大地降低零件的加工效率,所以更加高效的增减材复合方式亟待被发掘。

#### 4.2 多能量场复合制造调控

多能量场复合制造调控是指在 LPBF 成形过程中外加超声波、磁场等能量场对熔池和微观组织进行调控。

静态磁场 (Static Magnetic Field, SMF) 辅助 LPBF 成形是目前研究的重点之一,研究人员发现 SMF 能均匀化晶粒<sup>[89]</sup>、降低柱状晶粒数量<sup>[90]</sup>。Zhu 等<sup>[91]</sup>认为,这是由于 SMF 作用下产生的热电磁力 (Thermoelectric Magnetic Force, TEFM) 会使得柱状晶粒转变为等轴晶粒,同时还发现,SMF 还能抑制 Inconel625 中 Laves 相和 Nb 元素的析出。细化晶粒和抑制偏析都有助于提高零件的局部强度,从而抑制

裂纹的产生。除此之外,SMF 对降低孔隙率也有一定的作用。帅三三等<sup>[92]</sup>研究发现,在横向磁场作用下,零件的气孔缺陷得到明显的改善,致密度从 87.89% 提高到 95.47%,但是 SMF 会减低熔池的流动性,这与胡勇等<sup>[93,94]</sup>的研究发现一致。

目前超声复合 LPBF 研究较少。Zhang 等<sup>[95]</sup>将超声冲击处理 (Ultrasonic Impact Treatment, UIT) 系统结合到 LPBF 设备当中,每完成两层的打印,并待表面温度低于 50 °C 时对表面进行一次超声波冲击处理。这样可以有效地减少零件表面的颗粒黏附,既有助于提高表面质量,也对增强层间的结合、减少残余应力有一定的帮助。同时还有研究人员将超声波施加在成形基板上,发现超声振动可以提高材料的硬度,减小晶粒的纵横比,改善 LPBF 成形零件的各向异性<sup>[96]</sup>。

磁场辅助 LPBF 成形具有均匀组织、细化晶粒、抑制偏析和减少孔隙的作用;超声辅助 LPBF 成形在减小残余应力、改善零件各向异性和提高零件性能上具有积极作用。此外,在定向能量沉积中超声波还展现出细化晶粒、减少孔隙裂纹等缺陷的能力<sup>[97-99]</sup>。国内华南理工大学增材制造团队针对磁场和超声波对 LPBF 成形质量的影响研究也搭建了相关设备,如图 15 所示,并开展了一些探索性工作,研究结果表明,超声波和磁场可以提升成形质量,相关成果也将陆续发表。

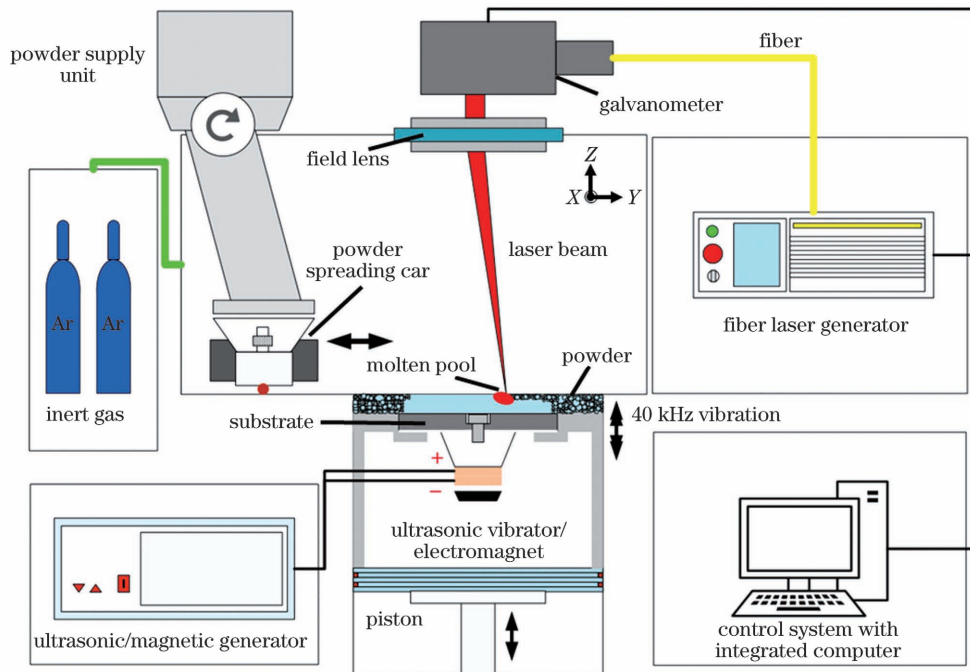


图 15 华南理工大学增材制造实验室搭建的磁场/超声辅助 LPBF 设备

Fig. 15 Magnetic field/ultrasonic assisted LPBF equipment built by additive manufacturing laboratory of South China University of Technology

## 5 结论与展望

重点阐述了与致密度相关的未熔合和微孔以及与残余应力相关的翘曲变形、裂纹缺陷的特点、形成机理和影响,并结合国内外研究现状,论述了成形工艺调控

和新型复合制造调控两类调控方式对缺陷的调控作用。

其中,造成未熔合缺陷的主要原因有熔池搭接率不足导致的欠熔合以及球化、飞溅所产生的大颗粒粉末粘附,未熔合现象常常伴有夹杂和粘粉现象。微孔主要包括形状规则的小圆形气孔和由高深宽比熔池塌

陷形成的锁孔。微孔会影响致密度并成为工程应用中的力学失效源。过大的残余应力会导致宏观翘曲变形和裂纹,而裂纹的出现还与零件内部的脆弱区域有关。对不同的缺陷应采用不同的缺陷抑制策略,归纳了一些常规的抑制策略,如对加工环境、粉末床、激光束、加工参数和扫描策略进行调控。随着技术的进步,新型复合制造调控方式也引起了研究人员的关注,在工艺过程中,复合减材、超声波、磁场可以消除缺陷或调控加工过程中的热场分布及零件组织性能结构以抑制缺陷的产生。然而,由于复合制造调控方式的复杂性,需要考虑复合制造调控方式对 LPBF 工艺带来的各种影响,比如增减材复合会引起加工时间的增加、能量场复合会带来设备成本和维护成本的增加。

成形工艺调控方式中对激光的调控是一种新型的调控方式。调节激光波长可以有效解决材料对红外激光的能量吸收率低的问题,使得 LPBF 能够更加高效地加工纯铜这类红外高反金属材料,有效扩展 LPBF 的加工范围。调整光斑形貌能够改善加工过程中的热分布,具有改变熔池形状、提高熔池稳定性、改善零件应力分布的作用。因此,合适的光斑形貌能够有效扩展无缺陷产品的加工参数范围,对提升产品质量和产品加工效率都有巨大的作用。复合制造调控方式能够显著提升 LPBF 对微观组织和缺陷的调控能力,具有巨大的发展潜力。磁场辅助 LPBF 成形工艺具有细化晶粒和均匀组织成分的作用,能够有效改善零件各向异性、增强零件力学性能。这种作用随着磁场强度的变化而变化,因此若能合理调节 SMF 强度的空间分布便能对零件的微观组织进行调节,不仅能针对性地消除加工过程中出现的缺陷,还能进一步提高 LPBF 的灵活性和可控性。虽然超声辅助 LPBF 成形工艺的研究仍处于起步阶段,但是超声波细化晶粒、减少孔隙裂纹等缺陷的能力已在定向能量沉积中体现。未来若将超声波精确地施加到熔池中,超声波带来的空化和声流效应将有效地调控零件的组织性能。此外,若根据超声波对材料组织的作用规律来改变施加超声波的频率和振幅,则可能实现对组织的数字化调控。增减材复合加工能够有效抑制缺陷的扩展甚至消除缺陷,但是较低的加工效率限制了它的发展,因此高效的增减材复合方式和增减材复合工艺流程显得尤为重要。

大尺寸、高效率、高精度、多材料、高性能是未来 LPBF 发展的趋势<sup>[100-103]</sup>,多能场协同、多材料的组合等将为 LPBF 加工过程带来新的缺陷。LPBF 与其他技术的深度融合也将带来新的调控方式,如在线检测技术使得 LPBF 成形过程的实时反馈控制成为了可能<sup>[104]</sup>。而深入理解缺陷产生的机理和成形工艺调控方式对不同缺陷的影响,可以为在线检测和实时反馈控制技术提供理论和实践参考,使 LPBF 技术更加智能化。抑制缺陷形成的完整闭环控制将成为未来研究重点,但在有效检测缺陷的同时,也必须有丰富的手段

和策略来实现质量的调控,从而保证 LPBF 成形质量的稳定性和可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 增材制造 术语: GB/T 35351—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Additive manufacturing: terminology: GB/T 35351—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [2] Kranz J, Herzog D, Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S1): S14001.
- [3] Zhang M K, Yang Y Q, Song C H, et al. An investigation into the aging behavior of CoCrMo alloys fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 750: 878-886.
- [4] Awad A, Fina F, Goyanes A, et al. Advances in powder bed fusion 3D printing in drug delivery and healthcare[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2021, 174: 406-424.
- [5] Shen X F, Cheng Z Y, Wang C G, et al. Effect of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy fabricated by selective laser melting [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107312.
- [6] Gu D D, Hagedorn Y C, Meiners W, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium[J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [7] Xu S, Jiang W, Zhou Y N, et al. Comprehensive evaluation of the effect of dental unit on the dimensional accuracy of CoCr multi-unit fixed bridge[J]. Materials Express, 2020, 10(12): 2063-2069.
- [8] Nicoletto G. Smooth and notch fatigue behavior of selectively laser melted Inconel 718 with as-built surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 128: 105211.
- [9] Waqar S, Guo K, Sun J. FEM analysis of thermal and residual stress profile in selective laser melting of 316L stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 81-100.
- [10] de Jesus J, Martins Ferreira J A, Borrego L, et al. Fatigue failure from inner surfaces of additive manufactured Ti - 6Al - 4V components[J]. Materials, 2021, 14(4): 737.
- [11] Bai Y C, Zhao C L, Wang D, et al. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117328.
- [12] Mumtaz K A, Hopkinson N. Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(2): 279-287.
- [13] Koutiri I, Pessard E, Peyre P, et al. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 536-546.
- [14] Zhou X, Liu X H, Zhang D D, et al. Balling phenomena in selective laser melted tungsten [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 33-42.
- [15] Liu Y, Yang Y Q, Wang D. Investigation into the shrinkage in Z-direction of components manufactured by selective laser melting (SLM) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (9/10/11/12): 2913-2923.
- [16] Wang D, Ye G Z, Dou W H, et al. Influence of spatter particles contamination on densification behavior and tensile properties of CoCrW manufactured by selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105678.

- [17] Wang D, Dou W H, Ou Y H, et al. Characteristics of droplet spatter behavior and process-correlated mapping model in laser powder bed fusion [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 12: 1051-1064.
- [18] 韩善果, 杨永强, 蔡得涛, 等. 光纤位置对铝合金激光填丝焊接过程的影响[J/OL]. *激光技术*: 1-11[2021-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20210712.1518.002.html>. Han S G, Yang Y Q, Cai D T, et al. The influence of distance between laser and wire on the process of aluminum alloy welding with filler wire[J/OL]. *Laser Technology*: 1-11[2021-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20210712.1518.002.html>.
- [19] Wang D, Deng G W, Yang Y Q, et al. Interface microstructure and mechanical properties of selective laser melted multilayer functionally graded materials [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(4): 1155-1169.
- [20] Buchbinder D, Meiners W, Pirch N, et al. Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting[J]. *Journal of Laser Applications*, 2014, 26(1): 012004.
- [21] Kim W R, Bang G B, Park J H, et al. Microstructural study on a Fe-10Cu alloy fabricated by selective laser melting for defect-free process optimization based on the energy density [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 12834-12839.
- [22] Lü F, Liang H X, Xie D Q, et al. On the role of laser *in situ* remelting into pore elimination of Ti - 6Al - 4V components fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 854: 156866.
- [23] Seede R, Ye J H, Whitt A, et al. Effect of composition and phase diagram features on printability and microstructure in laser powder bed fusion: development and comparison of processing maps across alloy systems[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102258.
- [24] Kruth J P, Froyen L, Vaerenbergh J V, et al. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 616-622.
- [25] 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球形现象[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 110-115. Wu W H, Yang Y Q, Wang D. Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(5): 110-115.
- [26] 白玉超. 马氏体时效钢激光选区熔化成型机理及其控性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. Bai Y C. Research on the mechanism and properties controllability of selective laser melting of maraging steel [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [27] Mutua J, Nakata S, Onda T, et al. Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel[J]. *Materials & Design*, 2018, 139: 486-497.
- [28] Jia Q B, Gu D D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 585: 713-721. 吴伟辉, 杨永强. 选区激光熔化成型过程中熔线形貌的优化[J]. *铸造技术*, 2012, 33(11): 1308-1311.
- [29] Wu W H, Yang Y Q. Optimization of molten metal line morphology in selective laser melting[J]. *Foundry Technology*, 2012, 33(11): 1308-1311.
- [30] Aboulkhair N T, Maskery I, Tuck C, et al. On the formation of AlSi<sub>10</sub>Mg single tracks and layers in selective laser melting: microstructure and nano-mechanical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 88-98.
- [31] Attar H, Calin M, Zhang L C, et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 593: 170-177.
- [32] Wang D, Wu S B, Fu F, et al. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties[J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 121-130.
- [33] Ye D S, Zhu K P, Fuh J Y H, et al. The investigation of plume and spatter signatures on melted states in selective laser melting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 395-406.
- [34] Liu Y D, Zhang M, Shi W T, et al. Study on performance optimization of 316L stainless steel parts by high-efficiency selective laser melting[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106872.
- [35] 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.
- [36] Liu Y, Yang Y Q, Mai S Z, et al. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 797-806.
- [37] 刘洋. 激光选区熔化成型机理和结构特征直接制造研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. Liu Y. Research on the mechanism of selective laser melting and direct manufacturing of structural features [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [38] Zhang B, Li Y T, Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(3): 515-527.
- [39] 王迪, 钱泽宇, 窦文豪, 等. 激光选区熔化成形高温镍基合金研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(10): 49-60, 67. Wang D, Qian Z Y, Dou W H, et al. Research progress on selective laser melting of nickel based superalloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 49-60, 67.
- [40] Scipioni Bertoli U, Wolfer A J, Matthews M J, et al. On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 331-340.
- [41] Tan P F, Kiran R, Zhou K. Effects of sub-atmospheric pressure on keyhole dynamics and porosity in products fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 816-827.
- [42] Hojjatzadeh S M H, Parab N D, Yan W, et al. Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3088.
- [43] Zhao C, Parab N D, Li X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting [J]. *Science*, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [44] 李琛, 弭光宝, 冯艾寒, 等. 成形态选区激光熔融 Ti-6Al-4V 钛合金缺陷与微观组织研究进展[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(3): 44-51. Li C, Mi G B, Feng A H, et al. Research progress in defect and microstructure of as-built selective laser melting Ti - 6Al - 4V titanium alloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(3): 44-51.
- [45] 张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 21-27. Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 21-27.
- [46] Sames W J, List F A, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(5): 315-360.
- [47] Tan Q Y, Liu Y G, Fan Z Q, et al. Effect of processing parameters on the densification of an additively manufactured 2024 Al alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*,

- 2020, 58: 34-45.
- [48] Martin J H, Yahata B D, Hundley J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. *Nature*, 2017, 549(7672): 365-369.
- [49] Nie X J, Zhang H, Zhu H H, et al. Effect of Zr content on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Zr modified Al-4.24Cu-1.97Mg-0.56Mn alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 977-986.
- [50] Chen J, Yang Y Q, Wang D, et al. Effect of manufacturing steps on the interfacial defects of laser powder bed fusion 316L/CuSn10[J]. *Materials Letters*, 2021, 292: 129377.
- [51] 刘林青, 宋长辉, 杨永强, 等. 异种材料激光选区熔化界面结构强化机理研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 189-196.  
Liu L Q, Song C H, Yang Y Q, et al. Study on mechanism of strengthening interface structure of dissimilar materials by selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3): 189-196.
- [52] Harrison N J, Todd I, Mumtaz K. Reduction of micro-cracking in nickel superalloys processed by Selective Laser Melting: a fundamental alloy design approach[J]. *Acta Materialia*, 2015, 94: 59-68.
- [53] Mugwagwa L, Dimitrov D, Matope S, et al. Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 21: 92-99.
- [54] Liu Y, Yang Y Q, Wang D. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1/2/3/4): 647-656.
- [55] 张国庆, 杨永强, 张自勉, 等. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202002.  
Zhang G Q, Yang Y Q, Zhang Z M, et al. Optimal design of support structures in selective laser melting of parts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202002.
- [56] Li R D, Liu J H, Shi Y S, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(9/10/11/12): 1025-1035.
- [57] Zhou X, Wang D Z, Liu X H, et al. 3D-imaging of selective laser melting defects in a Co-Cr-Mo alloy by synchrotron radiation micro-CT[J]. *Acta Materialia*, 2015, 98: 1-16.
- [58] Sato Y, Srisawadi S, Tanprayoon D, et al. Spatter behavior for 316L stainless steel fabricated by selective laser melting in a vacuum[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106209.
- [59] Jing G Y, Wang Z M. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101831.
- [60] Ma W, Ning J, Zhang L J, et al. Regulation of microstructures and properties of molybdenum-silicon-boron alloy subjected to selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 69: 593-601.
- [61] 邓国威, 谭超林, 王迪, 等. 增材制造高体积陶瓷增强马氏体钢缺陷抑制与机理研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(17): 243-252.  
Deng G W, Tan C L, Wang D, et al. Defects suppression and mechanism in additive manufacturing high-volume SiC reinforced maraging steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(17): 243-252.
- [62] Narvan M, Al-Rubaie K S, Elbestawi M. Process-structure-property relationships of AISI H13 tool steel processed with selective laser melting[J]. *Materials*, 2019, 12(14): 2284.
- [63] Tan Q Y, Fan Z Q, Tang X Q, et al. A novel strategy to additively manufacture 7075 aluminium alloy with selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 821: 141638.
- [64] McLouth T D, Bean G E, Witkin D B, et al. The effect of laser focus shift on microstructural variation of Inconel 718 produced by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2018, 149: 205-213.
- [65] 张亮亮, 王敏杰, 张佳琪, 等. 离焦量对激光选区熔化 CX 马氏体时效不锈钢成形性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 2202020.  
Zhang L L, Wang M J, Zhang J Q, et al. Effect of defocus distance on formability of CX maraging stainless steel by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202020.
- [66] 张佳琪, 王敏杰, 刘建业, 等. 离焦量对 3D 打印 18Ni-300 马氏体时效钢组织和力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0502004.  
Zhang J Q, Wang M J, Liu J Y, et al. Influence of defocusing distance on microstructure and mechanical properties of 3D-printed 18Ni-300 maraging steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0502004.
- [67] Tumkur T U, Voisin T, Shi R P, et al. Nondiffractive beam shaping for enhanced optothermal control in metal additive manufacturing[J]. *Science Advances*, 2021, 7(38): eabg9358.
- [68] Roehling T T, Wu S S Q, Khairallah S A, et al. Modulating laser intensity profile ellipticity for microstructural control during metal additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2017, 128: 197-206.
- [69] Matthews M J, Roehling T T, Khairallah S A, et al. Spatial modulation of laser sources for microstructural control of additively manufactured metals[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 607-610.
- [70] Xia L Q, Chen G, Zheng L Y, et al. Explore the feasibility of fabricating pure copper parts with low-laser energy by selective laser melting[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(10): 106509.
- [71] Hori E, Sato Y, Shibata T, et al. Development of SLM process using 200 W blue diode laser for pure copper additive manufacturing of high density structure[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(1): 012008.
- [72] Chen J, Liao X Y, Shu J G, et al. Microstructure tailoring of Ti-15Mo alloy fabricated by selective laser melting with high strength and ductility[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 826: 141962.
- [73] Guraya T, Singamneni S, Chen Z W. Microstructure formed during selective laser melting of IN738LC in keyhole mode[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 151-160.
- [74] Chen J, Yang Y Q, Song C H, et al. Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 792: 139316.
- [75] 窦文豪. 粉末床激光熔融过程飞溅行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
Dou W H. Research on the spatter behavior in laser powder bed fusion process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [76] Aboulkhair N T, Everitt N M, Ashcroft I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1/2/3/4: 77-86.
- [77] 张双雷, 王建宏, 李晓峰, 等. 选区激光熔化成形铝合金的主要缺陷及调控方法[J]. *中国材料进展*, 2021, 40(4): 267-274.  
Zhang S L, Wang J H, Li X F, et al. Main defects and control methods of aluminum alloys fabricated by selective laser melting [J]. *Materials China*, 2021, 40(4): 267-274.
- [78] 闫泰起, 陈冰清, 唐鹏钧, 等. 铺粉层厚对选区激光熔化成形 AlSi10Mg 合金质量及效率的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002106.  
Yan T Q, Chen B Q, Tang P J, et al. Effect of layer thickness on forming quality and efficiency of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002106.

- [79] Mugwagwa L, Dimitrov D, Matope S, et al. Evaluation of the impact of scanning strategies on residual stresses in selective laser melting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2441-2450.
- [80] 邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202003.
- Deng S S, Yang Y Q, Li Y, et al. Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202003.
- [81] Cao L. Mesoscopic-scale numerical investigation including the influence of scanning strategy on selective laser melting process [J]. Computational Materials Science, 2021, 189: 110263.
- [82] Yu W H, Sing S L, Chua C K, et al. Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi<sub>10</sub>Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 792: 574-581.
- [83] Lauwers B, Klocke F, Klink A, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 561-583.
- [84] 杨智帆, 张永康. 复合增材制造技术研究进展[J]. 电加工与模具, 2019(2): 1-7.
- Yang Z F, Zhang Y K. Research and development of hybrid additive manufacturing technology [J]. Electromachining & Mould, 2019(2): 1-7.
- [85] Du W, Bai Q, Zhang B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts [J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 1018-1030.
- [86] Bai Q, Wu B Z, Qiu X L, et al. Experimental study on additive/subtractive hybrid manufacturing of 6511 steel: process optimization and machining characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5/6): 1389-1398.
- [87] 章媛洁, 宋波, 赵晓, 等. 激光选区熔化增材与机加工复合制造 AISI420 不锈钢: 表面粗糙度与残余应力演变规律研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 170-178.
- Zhang Y J, Song B, Zhao X, et al. Selective laser melting and subtractive hybrid manufacture AISI420 stainless steel: evolution on surface roughness and residual stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 170-178.
- [88] Furumoto T, Abe S, Yamaguchi M, et al. Improving surface quality using laser scanning and machining strategy combining powder bed fusion and machining processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(11/12): 3405-3413.
- [89] Kang N, Coddet P, Wang J, et al. A novel approach to *in situ* produce functionally graded silicon matrix composite materials by selective laser melting[J]. Composite Structures, 2017, 172: 251-258.
- [90] Du D F, Haley J C, Dong A P, et al. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi<sub>10</sub>Mg alloy[J]. Materials & Design, 2019, 181: 107923.
- [91] Zhu W L, Yu S, Chen C Y, et al. Effects of static magnetic field on the microstructure of selective laser melted Inconel 625 superalloy: numerical and experiment investigations [J]. Metals, 2021, 11(11): 1846.
- [92] 帅三三, 林鑫, 肖武泉, 等. 横向静磁场对激光熔化增材制造 Al-12%Si 合金凝固组织的影响 [J]. 金属学报, 2018, 54(6): 918-926.
- Shuai S S, Lin X, Xiao W Q, et al. Effect of transverse static magnetic field on microstructure of Al-12%Si alloys fabricated by powder-blow additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(6): 918-926.
- [93] 胡勇, 王梁, 娄复兴, 等. 稳态磁场对激光熔注球形 WC 颗粒分布的影响机理研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 240-248.
- Hu Y, Wang L, Lou F X, et al. Mechanism study of steady magnetic field effect on spherical WC particle distribution during laser melt injection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 240-248.
- [94] 程坦, 张振雨, 刘演冰, 等. 在线稳恒磁场对激光选区熔化成形 GH3536 组织和性能各向异性的影响 [J/OL]. 中国激光: 1-19 [2021-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20211110.1001.034.html>.
- Cheng T, Zhang Z Y, Liu Y B, et al. Effects of online static magnetic field on anisotropy of microstructure and mechanical properties of GH3536 fabricated by selective laser melting[J/OL]. Chinese Journal of Lasers: 1-19 [2021-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20211110.1001.034.html>.
- [95] Zhang M X, Liu C M, Shi X Z, et al. Residual stress, defects and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted selective laser melting[J]. Applied Sciences, 2016, 6(11): 304.
- [96] Tilita G A, Chen W H, Leung C K L, et al. Influence of ultrasonic excitation on the mechanical characteristics of SLM 304L stainless steel[J]. Procedia Engineering, 2017, 216: 18-27.
- [97] Hu Y B, Ning F D, Cong W L, et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineering net shaping of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulk parts: effects on crack suppression, microstructure, and mechanical properties [J]. Ceramics International, 2018, 44(3): 2752-2760.
- [98] Wang H, Hu Y B, Ning F D, et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: effects of ultrasonic frequency on microstructural and mechanical properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 276: 116395.
- [99] 钦兰云, 王维, 杨光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103001.
- Qin L Y, Wang W, Yang G. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103001.
- [100] 岑伟洪, 汤辉亮, 张江兆, 等. 提升分区搭接质量的激光选区熔化扫描策略 [J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802018.
- Cen W H, Tang H L, Zhang J Z, et al. Scanning strategy to improve the overlapping quality of partition in selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802018.
- [101] Sing S L, Yeong W Y. Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2020, 15(3): 359-370.
- [102] Wei C, Li L. Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2021, 16(3): 347-371.
- [103] Zhang J L, Song B, Wei Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 270-284.
- [104] 曹龙超, 周奇, 韩远飞, 等. 激光选区熔化增材制造缺陷智能监测与过程控制综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524790.
- Cao L C, Zhou Q, Han Y F, et al. Review on intelligent monitoring of defects and process control of selective laser melting additive manufacturing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524790.

# Internal Defects and Control Methods of Laser Powder Bed Fusion Forming

Song Changhui<sup>1</sup>, Fu Houxiong<sup>1</sup>, Yan Zhongwei<sup>1</sup>, Zeng Yongjie<sup>2</sup>, Zhou Hanxiang<sup>1</sup>,  
Yang Yongqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;

<sup>2</sup> The Library of South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China

## Abstract

**Significance** Additive manufacturing (AM) has been widely used in aerospace, military, medical, automotive, nuclear power, and other fields due to its great potential in producing lightweight parts with complex structures and high personalization. As one of the most widely used AM technologies, laser powder bed fusion (LPBF), also known as selective laser melting, is characterized by huge temperature gradients, drastic phase changes, and extremely unstable molten pools. Because of its particularity in the manufacturing process, there easily exist internal defects of parts and harmful influence on forming quality and mechanical properties. Some of the defects cause the reduction of density, and further reduce other mechanical properties. For example, micropores and lack of fusion lead to the reduction of density, resulting in the decrease of its strength, hardness, and fatigue strength. The balling and spattering caused by lack of fusion also influence the surface morphology and phase composition. In addition, the residual stress generated in the machining process also causes cracks and warping deformation. The cracks influence the performance, while warping deformation influence the dimensional accuracy. Therefore, it is of great significance to understand the characteristics, formation mechanism, and influencing factors of defects, so as to explore the control mechanism of defects and control the quality and performance of parts.

**Process** This paper introduces the characteristics, formation mechanism, and influence of common defects on density, including unmelting caused by lack of fusion (Fig. 2), balling (Fig. 3), spatter (Fig. 5) and micropores (Fig. 6), and the crack (Fig. 7) and warping deformation (Fig. 8) caused by residual stress. The effects of control methods of forming process and composite manufacturing on defects are discussed. The control methods of forming process can be classified into five categories: process gas supply, powder bed, laser beam, processing parameters, and scanning strategy (Fig. 9). A suitable processing environment and powder bed are the basis to prevent defects. As one of the most important factors in LPBF, a laser has many controllable aspects (Fig. 10). Proper focus shift, spot size, and intensity distribution can not only enhance the stability of the molten pool, but also improve the morphology of the molten pool and the microstructures of the parts. In addition, choosing an appropriate wavelength of a laser according to the absorptivity of materials can both improve the energy utilization of the laser and effectively inhibit the generation of lack of fusion defects. Process parameters are the most flexible means to control defects. Scanning strategy can change the overlap ratio and stress distribution in the process to inhibit the generation of defects, effectively inhibit the continuation of defects, and even eliminate the defects ever generated (Fig. 12). The composite manufacturing control methods are divided into additive-subtractive hybrid manufacturing and the multi-energy assisted process. Additive-subtractive hybrid manufacturing has the flexibility of AM and the ability of milling to eliminate the internal defects and improve the internal quality of parts (Fig. 13). However, it is inevitable that the alternate processing of adding and reducing materials greatly reduces the processing efficiency of parts, so a more efficient way of additive-subtractive hybrid manufacturing needs to be explored urgently. Magnetic field assisted LPBF has the effects of homogenizing microstructure, refining grains, inhibiting segregation, and reducing density. Ultrasonic-assisted LPBF has a positive effect on reducing residual stress, and improving anisotropy and performance of parts.

**Conclusions and Prospects** Understanding the typical features, formation mechanisms, and influence of defects can discover the relationship between various factors in the forming process and defects or internal quality of parts more effectively, which is helpful for researchers to explore various control methods of the forming process. With the development of the LPBF technology, the adjustment of laser parameters in forming process and the new composite manufacturing control methods have also been investigated, providing some multi-dimensional and more advanced control methods of defects. For example, the problem that LPBF is difficult to process pure copper and other infrared high reflection metal materials is solved by adjusting laser wavelength. Meanwhile, these control methods have a great potential and play a great role in eliminating defects, improving product quality and processing efficiency, and regulating microstructure. Adjusting spot morphology can improve the heat distribution in the process, which has the potential to change the morphology and improve the stability of molten pools, and further improve the stress distribution of parts. The



magnetic field assisted LPBF forming process has the function of refining grains and homogenizing structures and compositions. The ability of ultrasound to refine grains and reduce defects has been demonstrated in directional energy deposition. In addition, the on-line inspection technology assisted LPBF is also a trend of defect control technologies. Finding the defects by on-line monitoring and combining with defect characteristics, formation mechanism, and control methods are able to achieve the closed-loop control of defects, which can greatly improve the stability and reliability of part forming quality and performance.

**Key words** laser technique; laser power bed fusion; internal defects; process optimization; composite control