

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.02

影响激光粉末床熔融金属成形件质量的关键变量研究进展

高银涛, 胡娟, 张栋兵, 鲍军

国家增材制造产品质量检验检测中心(江苏), 江苏 无锡 214000

摘要: 金属激光粉末床熔融技术成形件的质量受到设计、原材料、设备及成形过程等多环节关键变量的综合影响。本文系统梳理了上述环节中影响成形件质量的关键变量及其研究进展,旨在为建立该工艺的过程控制要求与质量管理体系奠定技术基础。综述表明,现有研究主要聚焦于单变量的独立影响,缺乏多变量耦合作用的系统分析。据此提出,未来应根据不同应用要求对成形件进行分级分类,探索建立相应的过程控制与审核标准规范,实现“生产即合格”的质量目标,从而构建可靠、高效、健康的产业发展生态。

关键词: 激光粉末床熔融; 关键变量; 金属成形件; 研究进展

中图分类号: TG665, TF124 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0020-10

Research Progress of Key Factors Affecting the Quality of Laser Powder Bed Fusion Metal Parts

GAO Yintao, HU Juan, ZHANG Dongbing, BAO Jun

National Center of Inspection and Testing for Additive Manufacturing Product Quality, Wuxi 214000, China

Abstract: The quality of metal parts fabricated by laser powder bed fusion is comprehensively influenced by key variables in multiple stages, including design, raw materials, equipment, and the forming process. This paper systematically reviews the key variables affecting part quality in the above stages and their research progress, aiming to lay a technical foundation for establishing process control requirements and a quality management system for this technology. The review indicates that existing studies mainly focus on the independent effects of single variables, with a lack of systematic analysis of multi-variable coupling effects. Accordingly, it is proposed that future work should classify parts according to different application requirements, explore and establish corresponding process control and audit standard specifications, achieve the quality goal of "once parts are produced, they are qualified right now", and thereby build a reliable, efficient, and healthy ecosystem for industrial development.

Keywords: laser powder bed fusion; key variables; metal part; research progress

引用格式: 高银涛, 胡娟, 张栋兵, 等. 影响激光粉末床熔融金属成形件质量的关键变量研究进展[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 20-29.

Citation: GAO Yintao, HU Juan, ZHANG Dongbing, et al. Research Progress of Key Factors Affecting the Quality of Laser Powder Bed Fusion Metal Parts[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 20-29.

0 引言

金属激光粉末床熔融技术是利用高能激光束

将金属粉末逐层熔化并固化,从而构建出三维实体零件的一种增材制造技术,在成形过程中,金属粉末质量、设备及工艺条件均是影响成形件质量的关

收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2026-01-06

基金项目: 江苏省前沿技术研发计划(BF2024077)

作者简介: 高银涛(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事增材制造检测认证及标准化工作。E-mail: gaoyintao@126.com。

通讯作者: 胡娟。E-mail: 247470673@qq.com。

键因素,此外,制造前的设计是否合理也是影响成形件质量的关键要素。近几年,金属激光粉末床熔融设备可成形尺寸越来越大,成形精度及效率也越来越高,各种功能结构一体化零件的成形案例越来越多,因此,越来越多应用领域开始对该技术密切关注,但尽管如此,该技术的产业化应用还尚未大规模铺展开来,其重要原因是打印零件的可重复性和再现性较差,为此,国内外不同研究机构开展了该技术工艺流中影响打印成形件质量的关键变量研究以更好理解该工艺,本文主要对不同研究机构的相关研究成果进行系统梳理分析,为金属激光粉末床熔融技术过程控制文件及质量管理体系的建立奠定技术基础,进而提高打印件的质量可靠性,促进技术的应用深度和广度,有力支撑我国制造业的转型升级。

1 设计

设计是增材制造技术发展及应用中最核心的牵引力量,决定了技术潜力的释放程度,因此,金属激光粉末床熔融成形件的设计应综合考虑产品几何特征、全流程生产经济成本、数据处理及产品使用等因素,良好的设计是确保产品生产顺利、成本可控及质量达标的关键环节,尤其是具有设计制造一体化优势的增材制造技术,必须将其设计与制造深度融合。

点阵蒙皮结构和复杂流道结构在设计时往往需要考虑粉末清除,若未设计中空的排粉孔或排粉孔设计不合理,残留的粉末不仅会污染后续的热处理,也可能会影响到成形件的使用安全性,为此,Mazur^[1]等在激光粉末床熔融打印的支架上设计了2 mm的排粉孔,如图1所示。

激光粉末床熔融技术成形工艺过程中熔池温度高、冷却速度快、温度梯度大、制造过程中存在多个热循环,因此,打印成形件的微观组织与传统的铸锻件存在明显差异,这些微观组织的差异将影响到制件的性能,为消除/减少缺陷,同时改善成形件的微观组织提高其性能,业界通常采用热处理的方法对成形件进行热处理,但热处理过程中,金属成

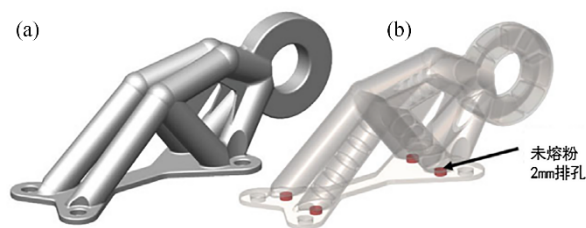


图1 金属激光粉末床熔融技术制备的(a)空心支架,(b)设计的2 mm排粉孔

形件可能会变形,因此,在设计阶段应考虑是否需要添加一定量的坯料来弥补因零件变形而导致的不能满足规定尺寸公差的情形,图2为增材制造成形件不同表面坯料量设计的示例。

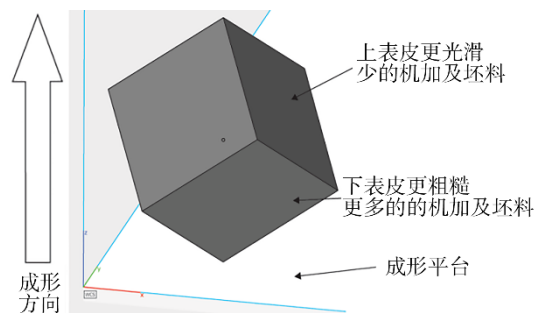


图2 增材制造成形件不同表面坯料量设计的示例

Fig. 2 Example of designing different material quantities for different surfaces of additive manufacturing parts

成形取向会影响成形件的制造时间、支撑结构、尺寸精度及表面光洁度等,Nematollahi等^[2]研究了成形取向对成形件微观结构及力学性能的影响,研究表明所有试样沿成形方向均形成较强的(001)纹理,然而,沿着加载方向则观察到不同的纹理,45°制备的试样沿加载方向呈(110)纹理,而0°和90°方向试样沿加载方向仍呈(001)纹理,这些纹理的不一致性导致了各向异性的压缩及拉伸行为,因此,应在设计阶段考虑最佳的成形取向,成形取向的评估应综合考虑零件打印时间、打印成本、支撑体积、零件表面质量及尺寸公差等因素,如Mele等^[3]采用考虑零件成形时间、支撑体积、零件变形、表面粗糙度和支撑接触等因素的自动化零件成形取向优化策略,结果表明,取向优化可以减少68.1%的成形时间或66.8%的材料消耗,同时,该优化还能最小化制造零件的表面和尺寸误差。

2 原材料

原材料是增材制造的物质基础,其特性对增材制造工艺稳定性、成形精度和产品组织性能均有重要影响,但迄今为止,粉末物理和化学性能对成品零件性能的影响仍无定性结论。研究者通过大量的文献调研对粉末性能、粉末整体行为与最终制件性能之间的关联关系进行了研究,并指出表征方法越接近实际工艺条件,其与最终零件性能的关系就越清晰^[4]。

2.1 粒度与粒度分布

粒度与粒度分布是粉末的一个重要指标,其值对粉末的流动性、铺展性、成形工艺过程、成形件的微观结构、表面质量及静态/动态性能,甚至与能否采用激光粉末床熔融技术来成形有关。图3为不同粒度范围粉末对成形件侧表面粗糙度影响,可以看到,采用小尺寸金属粉末成形时,侧表面的粗糙度值显著降低,这主要是因为当粉末颗粒较大时,粉末易在刮刀/铺粉辊作用下形成凹槽或波纹,增大粉床表面起伏,再传递至熔化层,最终导致侧表面的粗糙度值增大。

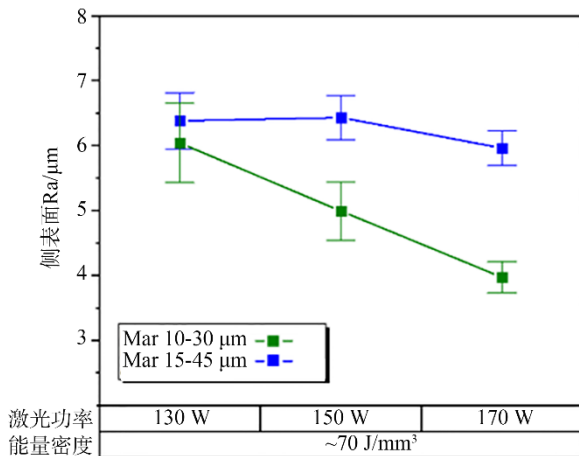


图3 不同颗粒尺寸粉末对成形件侧表面粗糙度的影响^[5]

Fig. 3 The influence of different powder particle size on the surface roughness of the parts^[5]

在粒度分布方面,通常,窄分布意味着粉末熔化均匀,过熔及熔化不足的问题较少,熔池稳定性较高,从而降低Ra值。

2.2 粉末含水量

金属激光粉末床熔融较为合适的粒度范围为

15~53 μm,粒度较为细小,因此,粉末的比表面积较大,粉末易吸附空气中的水,而含水量的多少将直接影响到粉末化学成分、粒度分布、密度及流动性等性能及打印成形过程,并最终影响到成形件的各项性能,如图4、图5所示。这主要是因为金属粉末含水量增加后,水分子会在粉末颗粒表面形成化学或物理键合,使粉末的含氢及含氧量增加,同时,由于化学或物理键合,粉末的流动性降低,粉床均匀性变差,而粉床的不均匀性通常会传递至打印成形件中使成形件出现孔隙等缺陷,进而降低其力学性能,同时,粉末含水量增加会使粉末中的“卫星粉”量增加,这不仅影响了粉末的粒度及粒度分布,还将增大成形件的表面粗糙度,致使后处理工作增加;此外,由于粉末吸水后,水分将在激光作用下瞬间汽化产生局部蒸汽压,影响熔池的稳定性,致使飞溅物数量增加,扫描路径偏移。

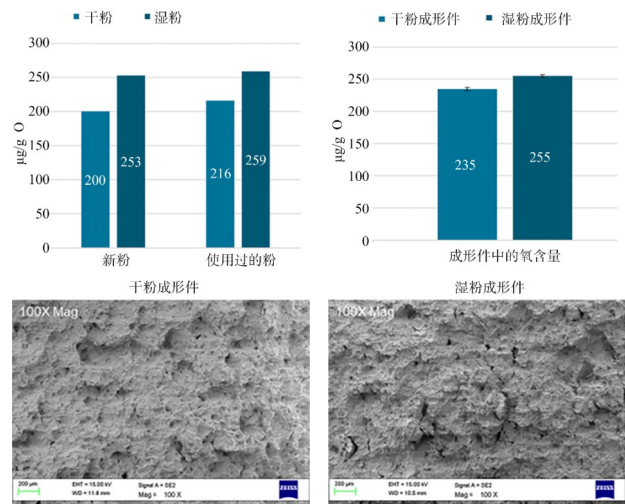


图4 粉末含水量对粉末及成形件氧含量和微观组织的影响^[6]

Fig. 4 The influence of powder moisture content on the powder oxygen content and oxygen content & microstructure of the parts^[6]

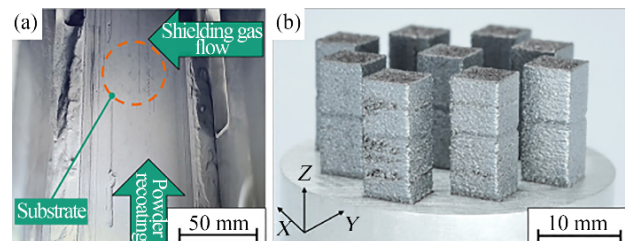


图5 粉末含水量对(a)成形工艺过程、(b)成形件的影响^[7]

Fig. 5 The influence of powder moisture content on the process (a) and the part (b)^[7]

2.3 夹杂物

增材制造用金属粉末中的夹杂物,尤其是高密度夹杂物在成形过程中因密度大及熔化温度高等原因极易沉积在成形件底部,从而使得夹杂物从粉末转移至成形件中,研究表明,夹杂物会成为诱发成形件断裂失效的因素之一^[8],图6为因金属粉末夹杂物转移至成形件中而引起的成形件断裂失效的案例。失效原因主要有:(1)高密度夹杂物与基体金属间的润湿性差,因此会降低成形件的界面结合强度;(2)高密度夹杂物与基体的热膨胀系数不同,成形件中可能会产生微裂纹;(3)高密度夹杂物反射率比普通金属高,可能导致局部能量输入不足进而促使成形件产生未熔合等缺陷。此外,高密度夹杂物还会因反射超声波掩盖真实缺陷,导致无损检测合格率偏高,增加打印件应用风险,因此,应尽可能排除粉末原材料中的夹杂物。

2.4 再利用

原则上,激光粉末床熔融技术只有一小部分粉末可用于实体零件,大部分粉末并未固化到实体零件中,这些粉末要么被回收再利用,要么被废弃。粉末再利用虽可从源头降低增材制造成本,但再利用粉会可能会对粉末性能产生影响,进而影响打印成形件的性能^[9]。粉末化学成分的变化主要源于循环热历史使粉末表面的氧化层增加等原因,而粉末物理性能的变化主要源于成形过程粒径分布变化、飞溅物等原因。不同研究者研究的粉末再利用条

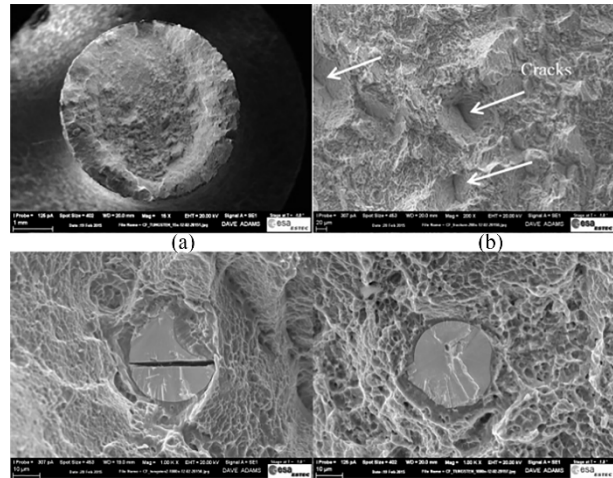


图6 成形件拉伸端口分析

Fig. 6 Cross sectional analysis of the tensile fracture

件对粉末及其制件的影响见表1。表中策略A为每次成形后,再利用和筛分粉与新粉按一定比例混合;策略B为每次循环后(粉末量不足以进行下次成形),再利用粉末与相同热历史粉末混合;策略C为每次成形后引入筛过的粉末,不与其他粉末混合;策略D为再利用和筛分粉被添加到新粉的顶部,不进行混合。

3 设备

激光粉末床熔融设备是增材制造过程所能进行的硬件条件,它直接决定了原材料的处理能力、工艺参数适配性及最终成形件的性能可靠性,目前

表1 粉末再利用对粉末及制件的影响^[4]

Table 1 The influence of powder utilization on the powder and the part^[4]

序号	粉末类别	最大再利用次数	循环策略	对粉末的影响	对制件的影响
1	Ti-6Al-4V	12	C	PSD更粗糙且更宽;流动性增加;表观密度增加	密度增加;表面粗糙度增加;硬度略增加;抗拉强度增加
2	Ti-6Al-4V	38	C	化学成分氧含量和氮含量增加;PSD略变窄;流动性(霍尔)增加;粉末密度不变	抗拉强度增加
3	Ti-6Al-4V	5	C	PSD略粗糙;化学成分氧氮含量不变	化学成分中氧含量增加
4	AlSi10Mg	18	C	PSD偏向细颗粒的方向;形貌略细长;化学成分不变	无影响
5	AlSi10Mg	8	C	化学成分不变;PSD偏向细颗粒的方向;振实和表观密度略增加;形貌不变	抗拉强度降低;屈服强度降低;高周疲劳降低;表面粗糙度不变
6	AlSi10Mg	4	A	PSD不变;流动性(FT4)不变	
7	IN718	14	C	形貌不变;PSD不变,但有聚集体;化学成分不变	微观结构不变;孔隙率不变;机械性能不变
8	316L	11	D	PSD偏向细颗粒的方向;流动性(霍尔)增加;表观密度增加;化学成分不变;微观结构BCC晶相增加;形貌不变	表面粗糙度不变;密度不变;硬度不变;机械性能不变

研究较多的设备设施为激光束热源、铺粉刮刀及基板。

3.1 激光束

作为激光粉末床熔融成形工艺的加热热源,激光束质量及其稳定性对成形工艺过程及成形件质量有重要影响,即激光是激光粉末床熔融工艺的“热量控制者,精度保障者和质量决策者”,除此之外,由于成形过程中还存在着激光束与粉末颗粒及惰性气体相互作用,因此,激光束的形状、光斑大小和脉冲特性等也将影响到成形工艺过程。Sow等^[10]研究了激光焦点半径分别为80 μm和500 μm对成形件微观结构、致密度、表面粗糙度及成形效率的影响,研究表明,大激光束的低体积能量密度对激光粉末床熔融工艺稳定性、减少飞溅和成形零件密度提升方面有显著改善。当前动态聚焦研究与应用成为热点,通过Z轴振镜与多校准表联动,实现不同区域光斑尺寸的动态切换,提升3D打印设备的加工精度与稳定性^[11]。

3.2 刮刀

硬钢或陶瓷刀片通常用于压实粉末以产生光滑、均匀的粉层,从而提高零件的强度值,然而,这些刮刀类型可能会损坏小型结构,尤其是精细细节(如晶格结构和高纵横比特征)的成形。使用柔软的橡胶或碳纤维刷可使成形过程更容易,不会破坏小的成形特征,但采用较软的刮刀通常会降低零件的强度。Fox等^[12]研究了高速钢、硅橡胶和碳纤维刷3种刮刀材料对成形件拉伸性能、缺陷尺寸及数量、压缩强度及韧性的影响,研究表明3种刮刀对试样的拉伸及压缩性能无影响,但在缺陷尺寸及数量和韧性方面却有显著差异。因此,应用时应综合考虑成形件几何结构、零件强度要求及粉末性能来选择合适的刮刀类型。

3.3 基板

激光粉末床熔融第一成形层是在基板上完成的,所以基板的材质及性能对成形件质量有重要影响。Wu等^[13]研究表明基板表面粗糙度对铺粉质量影响大于纹理角度,基于基板纹理角度,调整粉末铺展角度可增加粉末覆盖率,适当的重涂技术可以实现粗糙表面凹坑的填充,从而实现更均匀致密的粉末床。

4 成形过程

激光粉末床熔融增材制造过程中激光与粉末、基底之间交互作用致使材料的非平衡物理冶金和热物理过程十分复杂,常常导致诸如裂纹、气孔等内部质量问题,以及变形、表面粗糙度等性能质量问题,因此,应不断优化成形过程中的各参数,以便打印出性能优异的成形件。

4.1 基板温度

基板温度可通过改变冷却速率等方式对影响成形件的组织演变和力学性能,Pedrazzini等^[14]研究发现当基板温度为100 °C时,Ti-6Al-4V微观组织主要由 $\alpha+\alpha'$ 孪晶组成,成形件性能与未预热基板一样;当基板温度升为570 °C时,孪晶消失,在 $\alpha+\alpha'$ 之间出现了纳米 β 沉淀物以及位错网络,成形件延展性大幅提高;但当基板温度升为770 °C时, β 相百分比增加, α' 相百分比减少, α 晶粒内部形成位错,成形件抗拉强度和延展性均急剧下降。Qin等^[15]研究发现基板预热可以看作是一种额外的能量输入方法,从而将最优参数窗口转移到较低的体积能量范围内,达到降低孔隙率的目的,特别是需低体积能量输入的成形。

4.2 气流

激光熔化粉末时会产生金属蒸汽冷凝物和熔融飞溅物,如不及时清除,将会降低激光达到粉床的实际功率,增大熔池温度波动,还可能增加粉末中“卫星粉”比例。此外,激光粉末床熔融过程也需要在惰性气氛下进行,因此,气流还起着动态氧分压调节功能,综上,金属激光粉末床熔融工艺成形过程中气流主要通过烟尘清除、熔池稳定性调控及氧含量控制等来影响成形质量。Ferrari等^[16]研究发现,气体流速对零件缺陷和压缩强度及其测试标准偏差均有显著影响。Anwar等^[17]研究表明逆着气体流动方向进行扫描可获得更优的零件质量(抗拉强度),并基于出口附近堆积的飞溅量、高速摄像机记录的图像及扫描电子显微镜能谱等测试对其进行了阐释和讨论。Ladewig等^[18]研究了成形过程中的飞溅物和羽流物是如何导致零件缺乏熔合,最终导致零件缺陷的机理。

4.3 成形室环境

不同材料有不同的氧含量阈值, 因此在成形时应换算出对应的成形室内的氧含量阈值且不应超标, 若氧含量超标, 金属粉末可能会氧化, 进而影响激光与粉末的相关作用, 同时, 还可能在成形件内部形成氧富集层或脆性化合物, 降低其性能, 但同时, 微量氧的存在也一定程度上可抑制晶粒长大。除氧含量外, 成形室内湿度是另一重要影响因素, 成形室内湿度/水含量增加会使细粉团聚为假颗粒, 增加成形件中孔隙缺陷的形成, 同时, 水在高温下易汽化, 扰乱腔室原有平衡, H 的增加也会增大成形件的氢脆风险。Yamaguchi 等^[19]关于成形室环境对成形及试样性能的研究发现如图 7~图 9 所示, 可以看到在高氧浓度和高湿度条件下, 飞溅颗粒的氧化加速; 低氧浓度和低湿度导致飞溅颗粒圆度高, 尺寸分布窄, 因此, 为确保成形件的质量, 成形室内的氧和湿度应保持在一定范围内。

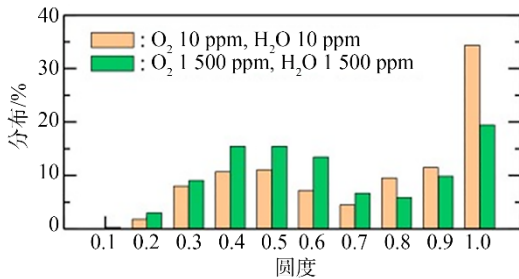


图 7 不同条件下飞溅物的圆度

Fig. 7 Roundness of spatter under different conditions

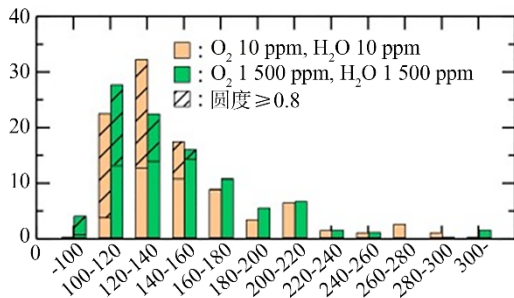


图 8 不同条件下飞溅物的颗粒尺寸

Fig. 8 Particle size of spatter under different conditions

对激光粉末床熔融工艺而言, 惰性气体的组成、气流速度及惰性气体过滤装置的过滤能力对成形工艺过程及成形件质量均有重要影响^[20], 图 10 显示了激光粉末床熔融工艺过程输入气体对工艺及材料的影响。

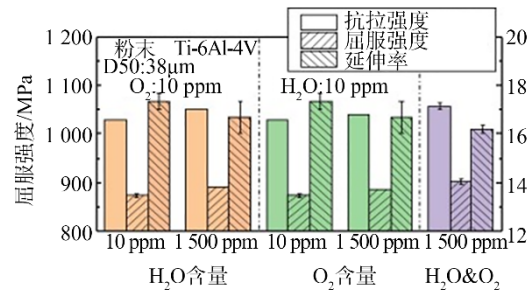


图 9 不同成形条件下成形件的拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of the parts under different processing conditions

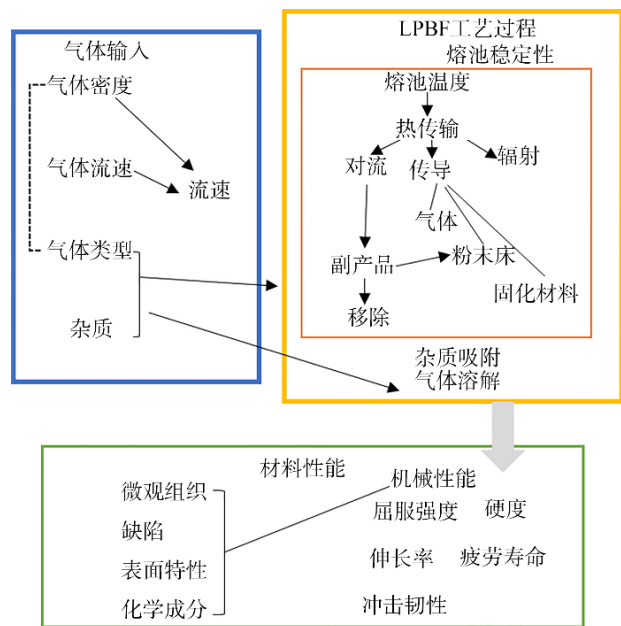


图 10 激光粉末床熔融工艺过程输入气体对工艺及材料的影响

Fig. 10 The influence of input gases on laser powder bed fusion process and corresponding parts

对气体而言, 比热容和导热系数随温度升高而增大, 而密度随温度升高而减小。激光粉末床熔融通常采用氩气和氮气作为工艺气氛, 表 2 为不同惰性气体的性质。氩具有完整的电子外壳, 是惰性气体, 而氮气以双原子分子的形式存在于空气中。与氩一样, 氮分子也没有自由电子, 相对来说是惰性的, 但它仍然可以解离并以原子状态溶解在金属中。此外, 然后氮原子还可以与其他元素如氧、氢、硫和合金元素发生反应, 因此, 当金属粉末为活性金属时, 应采用惰性更强的气体。

4.4 扫描路径

扫描路径是激光束在空间的移动轨迹, 是由一

表 2 不同惰性气体的性质^[20]

Table 2 Properties of different inert gases^[20]

气体	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	恒压下的比热容 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	单位体积热容量 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	25 °C热导率 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
氩气	1.62	520	842	0.016
氮气	1.14	1 040	1 186	0.024
氦气	0.16	5 190	830	0.142

系列扫描矢量组成,可通过改变扫描方向、顺序、矢量旋转角度和长度来调整,它对成形件的温度场、微观组织、残余应力和力学性能有显著影响。不同扫描策略之间最明显的差别在于重新熔化的严重

程度,这会使得冷却速率和局部的热处理变得存在差别。Zhang等^[21]采用全耦合热-力学模型,对双激光粉末床熔融成形 Ti6Al4V 零件的热过程和残余应力进行计算预测,结果表明,扫描策略对制件最终残余应力和变形有显著影响,见图 11。贺^[22]等研究者比较了环状扫描和带状扫描对试样微观组织、抗拉强度及界面处厚度的影响,发现环状扫描可使钛-铝异质合金一体化复合结构过渡区组织更细小、致密且晶粒生长方向随机,相应地,试样抗拉强度及硬度也明显得到改善。

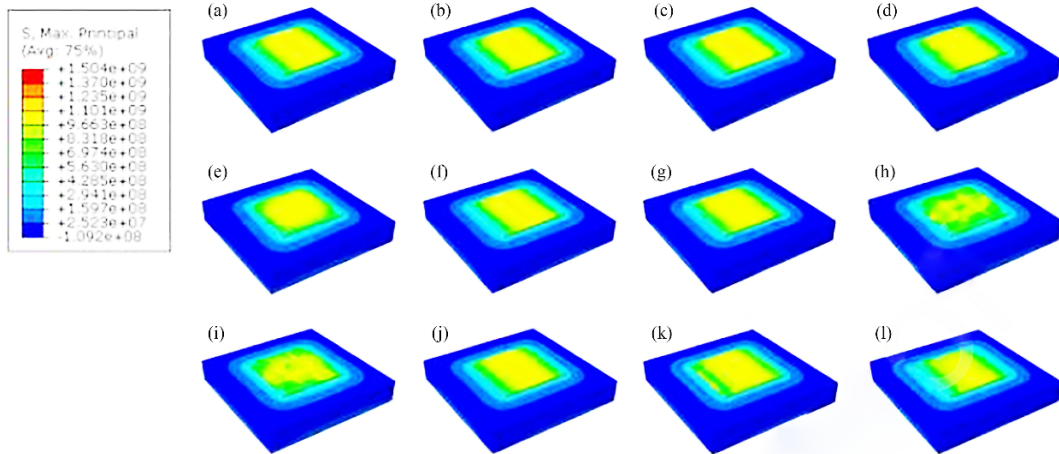


图 11 释放底板约束前不同扫描策略的最终最大主应力

Fig. 11 The final maximum principal stress for different scanning strategies before removing the substrate constraint

由于不同扫描策略对成形件性能有重要影响,为提高成形件质量,研究者开展了针对扫描策略的优化研究,如Su等^[23]提出可采用层间错开正交扫描方式(见图 12)来保证层间的良好搭接,从而提高激光粉末床熔融金属成形件的致密度。

间断扫描方案不同,多激光器设备搭接区域的结构是分两步成形,即先成形一半,然后使用相邻激光成形另一半,因此,搭接率直接影响到输入能量,从而影响成形件的致密度及微观结构一致性,研究发现,表面/内部气孔缺陷及未熔合等缺陷最易在搭接区域发生,因此,研究搭接区域大小及如何通过后处理减少搭接区域与本体区域的差异性至关重要。图 13 为 Xie 等^[24]研究的不同搭接率下成形件的金相图,可以看到搭接率对成形件的致密度有显著影响。

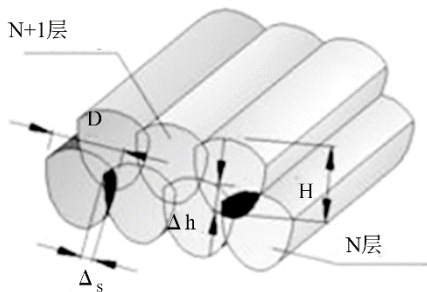


图 12 层间错开扫描搭接

Fig. 12 Schematic diagram of interlayer interlacing scanning

4.5 搭接率

随着应用端对大尺寸金属成形件的需求,市场涌现出了多激光器成形设备,与单一激光系统的不

4.6 扫描速度

扫描速度是选区激光熔化成形过程中最重要的工艺参数之一,当扫描速度过慢时,激光束在熔池中停留的时间过长,导致输入的体能量密度输入过高,导致熔池中的熔体出现湍流和不稳定,从而导致匙孔等缺陷降低相对密度。然而,当扫描速度过快时,熔池形成和冷却时间都很短,熔池中熔体

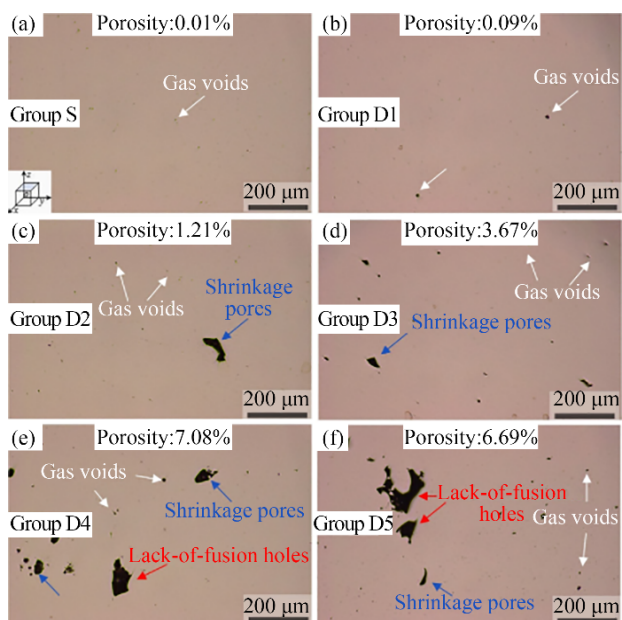


图13 不同搭接率下LPBF成形件的金相图(D代表搭接,S代表对照组,D1:50 μm;D2:100 μm;D3:150 μm,D4:200 μm;D5:250 μm)

Fig. 13 Metallographic images of LPBF parts under different overlap ratios (D represents overlap group, S represents control group, D1: 50 μm; D2: 100 μm; D3: 150 μm; D4: 200 μm; D5: 250 μm)

容易出现不稳定,极易出现熔合不良缺陷。宗学文^[25]等研究表明随扫描速度增加,试样表面粗糙度增加、内部空隙增加、抗拉强度、断后伸长率和硬度缓慢增加,但当速度大于1 000 mm/s时,性能呈现快速降低趋势。姜夕义^[26]等的研究发现低扫描速度(705 mm/s)下,由于激光体能量密度相对较高导致熔池较深,金属气化和凝固过程中收缩不一致,加之冷却速率较快,试样残余应力增大,因此出现了细小裂纹。随着扫描速度增加,Ti6Al4V的孔洞缺陷增多、抗拉强度、屈服强度和显微硬度下降,但当扫描速度增加到1 000 mm/s时,试样的孔洞尺寸较大且存在较深的拉伸裂纹、较多的未熔颗粒和球化现象,最终降低其性能。

4.7 成形中断

金属激光粉末床熔融成形工艺过程中的停电、粉末原料和/或保护气体缺乏等都将导致成形中断,由于逐层制造的特性,增材制造过程的中断可从停止发生的位置恢复,然而,通过在中断位置附近引起局部失效,成形中断可能会对制造部件的结构完整性产生不利影响。Mahtabi等^[27]研究了各种成形

中断条件以及热处理和表面处理等条件对AlSi10Mg和Ti6Al4V合金显微组织和力学性能的影响,试验结果表明,AlSi10Mg试样的拉伸强度和显微硬度值与对照组相比没有任何明显变化,但一半的中断试样在成形中断位置附近失效,特别是24 h空气暴露试样(中断时间较长且空气暴露),与对照组试样相比,所有成形中断Ti6Al4V试样的断裂伸长率都较低,而硬度则几乎没有变化。图14为AlSi10Mg合金试样在空气中暴露24 h后的SEM图,图中断面附近可观察到一条可见的变色线,这可归因于由于工艺中断而引起的热历史变化。

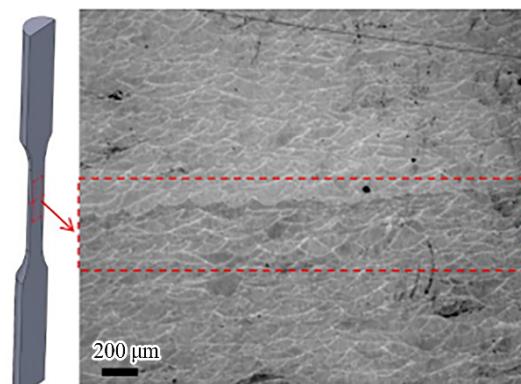


图14 AlSi10Mg合金试样24 h空气暴露后的SEM图
Fig. 14 The SEM image of the AlSi10Mg alloy sample after 24 hours of exposure to air

4.8 层厚

由于增材制造的逐层成形特性,增加粉末层厚度可以提高材料的沉积速率,从而减少激光粉末床熔融过程中的成形时间,然而,增加粉末层厚度也会对成形材料的局部熔化和随后的微观结构产生负面影响。图15为Hyer等^[28]研究的粉末层厚对成形试样缺陷和相对密度的影响结果,可以看到,当粉末层厚最为40 μm时,激光停留时间可在较宽的加工窗口内(60~100 μs),达到的最大密度>99%;而当粉末层厚度增加到80 μm和120 μm时,最大密度分别为98.7%和96.8%,但可以达到这些密度的可接受激光停留时间窗口大大缩小。

4.9 铺粉速度

铺粉速度主要是通过粉末输送效率和铺展均匀性来影响激光粉末床熔融工艺,图16为固定层厚下不同铺粉速度下的粉层轮廓及轮廓层粗糙度,可以看到,粉层轮廓粗糙度随着铺粉速度增加而增

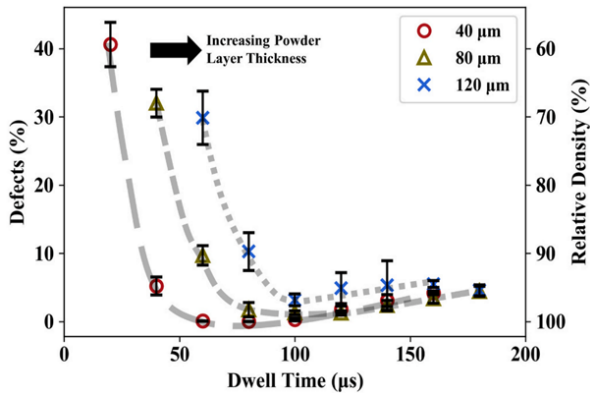


图15 不同粉末层厚及脉冲停留时间对成形试样孔隙率和相对密度的影响

Fig. 15 The influence of different powder layer thicknesses and dwell times on the porosity and relative density of the parts

大,粉层轮廓粗糙度的增加主要是因为随着铺粉速度增加,滚筒转动对粉末的拖拽力也增大,当该力超过粉末床与粉末颗粒之间的摩擦后,穿过间隙的粉末颗粒将继续运行一段距离后再停留在基体上,从而增大粉床的表面粗糙度。

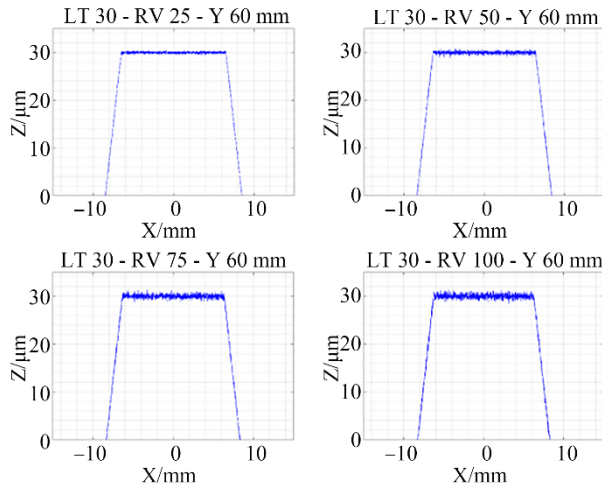


图16 不同铺粉速度对粉层表面轮廓及相应轮廓层粗糙度的影响^[29]

Fig. 16 The effects of different powder spreading speed on the surface profile and roughness of the powder layer^[29]

铺粉速度增加除了会影响粉床表面粗糙度外,还可能使粉末因来不及散开而导致边缘堆积,从而使零件边缘尺寸出现超差,但应注意,铺粉速度过慢会导致打印时间延长,也会使粉床过度压实,从而需要更多能量来熔化粉层。因此,工艺人员应结合粉末颗粒特性如粘性、打印时间及打印件质量确定最佳的铺粉速度。

5 结论及展望

(1)本文系统梳理了激光粉末床熔融工艺全流程中影响成形性能的关键变量,并对关键变量的现有研究进行了分析,有助于增材制造生产方建立过程控制文件和相关方开展审核时的质量控制点。

(2)现有研究多聚焦于单个变量或少数变量矩阵变化的影响关系构建,对于该工艺基于点-线-面、长周期、冶金多变量、复杂结构成形等特征具有很大局限性,后期研究中宜进行多变量耦合研究,采用数据驱动、物理机理、系统科学等多路径融合的方法建立输入-微结构-性能等系统性关联模型,分析优化各变量的相互作用,探索研究最优的“输入”参数组合,实现按需设计。

(3)面向激光粉末床熔融工艺成形零件的批量应用与深入应用,应首先进行零件的分级与分类,根据不同等级的质量要求建立过程控制文件,开展不同水平的过程管控,平衡质量要求与成本控制。

(4)尽快建立过程控制与审核准则标准规范,核查质量控制情况,确保“生产即合格”,构建一个让市场敢用、用户放心、产业高质量加速发展的健康生态,尽最大可能释放应用需求,驱动中国增材制造产业规模化发展。

参考文献:

- [1] Mazur M, Selvakannan P R. Laser Powder Bed Fusion—Principles, Challenges, and Opportunities[M]. Springer Nature Singapore, 2022: 77–108.
- [2] Nematollahi M, Saghayan S E, Safaei K, et al. Building orientation–structure–property in laser powder bed fusion of NiTi shape memory alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 873: 159791
- [3] Mele M, Campana G, Bergmann A. Optimisation of part orientation and design of support structures in laser powder bed fusion[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2022, 16: 597–611.
- [4] Vock S, Klöden B, Kirchner A, et al. Powders for powder bed fusion: a review[J]. Prog Addit Manuf, 2019, 4: 383–397.
- [5] Sinico M, Witvrouw A, Dewulf W. Influence of the particle size distribution on surface quality of Maraging 300 parts produced by Laser Powder Bed Fusion[C]//

- 2019 euspen and ASPE Special Interest Group Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing At: Nantes, France.
- [6] Mellin P, Rashidi M, Fischer M, et al. Moisture in Metal Powder and Its Implication for Processability in LPBF and Elsewhere[J]. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, 2021, 166(1):33–39.
- [7] Weissa C, Heslenfeld J, Saewe J K, et al. Investigation on the influence of powder humidity in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) [C]//12th CIRP Conference on Photonic Technologies, Fürth, Germany, 2022.
- [8] Brandão A D, Gerard R, Gumpinger J, et al. Challenges in Additive Manufacturing of Space Parts: Powder Feedstock Cross-Contamination and Its Impact on End Products[J]. *Materials*, 2017, 10(5):522.
- [9] 何艳丽,雷力明,侯慧鹏,等. 金属粉末床熔融增材制造粉末循环使用研究现状[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(11):29–34.
HE Y L, LEI L M, HOU H P, et al. Research Status on Powder Recycling of Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. *Materials For Mechanical Engineering*, 2020, 44(11):29–34.
- [10] Sow M C, De Terris T, Castelnau O, et al. Influence of beam diameter on Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) process[J]. *Additive Manufacturing*, 2020:101532.
- [11] 徐志翔,陈光胜. 三维扫描振镜动态聚焦控制系统建模与仿真[J]. *建模与仿真*, 2021, 10(2):311–318.
XU Z X, CHEN G S. Modeling and Simulation of Dynamic Focusing Control System for 3D Scanning Galvanometer[J]. *Modeling and Simulation*, 2021, 10(2):311–318.
- [12] Fox H, Kamaraj A B, Drake D. Investigating the effect of powder recoater blade material on the mechanical properties of parts manufactured using a powder-bed fusion process [J]. *Manufacturing Letters*, 2022, 33:561–568.
- [13] Wu Y P, Chu F Z, Zhang C C, et al. Influence of substrate surface morphology on powder spreading in laser powder bed fusion process [J]. *Powder Technology*, 2025, 464:121296.
- [14] Pedrazzini S, Pek M E, Ackerman A K, et al. Effect of Substrate Bed Temperature on Solute Segregation and Mechanical Properties in Ti–6Al–4V Produced by Laser Powder Bed Fusion [J]. *Metall Mater Trans A*, 2023, 54:3069–3085.
- [15] Qin S, Saewe J, Kunz J, et al. Influence of Preheating Temperature on Microstructure Evolution and Hardness of High-Speed Steel AISI M50 Processed by Laser Powder Bed Fusion [J]. *Steel Research International*, 2023, 94:2200784.
- [16] Ferrar B, Mullen L, Jones E, et al. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(2):355–364.
- [17] Anwar A B, Pham Q C. Selective laser melting of AlSi10Mg: Effects of scan direction, part placement and inert gas flow velocity on tensile strength[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240:388–396.
- [18] Ladewig A, Schlick G, Fisser M, et al. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 10:1–9.
- [19] Yamaguchi M, Kushima K, Ono Y S, et al. Humidity control in laser powder bed fusion using titanium alloy powder for quality assurance of built parts and reusability of metal powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 311:117817.
- [20] Pauzon C. The Process Atmosphere as a Parameter in the Laser-Powder Bed Fusion Process [D]. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2019.
- [21] Zhang W Y, Tong M M, Harrison N M. Scanning strategies effect on temperature, residual stress and deformation by multi-laser beam powder bed fusion manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36:101507.
- [22] 贺晨,李家栋,孙晨,等. 扫描策略对增材制造钛铝异质合金组织与性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(12):3947–3958.
HE C, LI J D, SUN C, et al. Effect of scanning strategy on microstructure and properties of titanium–aluminum heterogeneous alloy fabricated by additive manufacturing [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(12):3947–3958.
- [23] Su X B, Yang Y Q. Research on track overlapping during selective laser melting of powders [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(10):2074–2079.
- [24] Xie Y, Teng Q, Shen M, et al. The role of overlap region width in multi-laser powder bed fusion of Hastelloy X superalloy[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 18(1):2142802.
- [25] 宗学文,张健,卢秉恒,等. 扫描速度对选区激光熔化