

激光增材制造技术在航空制造领域的研究与应用进展

安芳利* 李立敏

陕西飞机工业有限公司 陕西 汉中 723200

摘要: 激光增材制造技术(也称为“3D打印”技术)是一种先进的快速成形技术,该技术基于离散-堆积的成形原理,依据计算机三维模型数据,利用高能激光束将金属粉末逐层熔化堆积,最终获得实体零件。按照成形方式的不同,目前发展较为成熟的技术以激光熔化沉积技术和选区激光熔化成形为主。与传统的电弧熔炼工艺相比,激光增材制造技术可直接完成各类大尺寸、复杂结构的金属构件制备,是一种高效率、低成本的制备工艺。因此,激光增材制造技术已广泛应用于不锈钢、镍基合金和钴铬合金等材料制造技术领域。

关键词: 激光增材制造技术;航空制造;应用进展;

DOI: <https://doi.org/10.37155/2717-5189-0404-46>

引言

为了满足航空航天、生物制造等高端领域中难加工、高性能、轻量化等结构的生产需求,近年来开展了大量利用激光增材制造技术加工铝合金及其复合材料的研究。选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是利用高能激光束,按照提前预设的扫描路径,扫描熔化预先铺覆好的金属粉末,自下而上,逐层凝固堆积冷却后成形的一种技术。SLM技术成形精度高,可以用于制造中小型复杂精密结构,是目前金属增材制造技术的主要研究热点之一,引领着当前金属增材制造技术的发展。铝合金在硬度、强度、导电性、抗腐蚀性等方面具有良好的性能,采用金属增材制造的铝合金及其复合材料的产品作为复杂形状的原型和试验轻载零件在航天航空领域有广阔的应用前景。

1 金属增材制造标准现状

2002年,世界上第一份增材制造技术标准诞生,是由SAE(国际自动化工程师学会)编制的AMS4999。SAE已发布的标准多涉及粉末、产品工艺和退火等,未涉及增材制造质量检验内容。ASTM和ISO发布的标准主要是术语和格式,也未涉及增材制造质量分级检验策略。美国宇航局NASA针对航空航天对于增材制造产品应用及质量稳定性的要求,由马歇尔航空航天中心制定并发布MSFC-STD-3716和MSFC-SPEC3717。MSFC-SPEC-3716是金属激光粉末床熔融增材制造航空航天产品标准,规定了增材制造过程控制的基本要求及研制与生产中的关键控制点。2019年美国焊接学会发布了AWS D20.1/D20.1M:2019《Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing》。该标准详细规定了增材制造质量分级和检验策略,文中讨论部分会详细论述^[1]。

2 3D打印沉积态的微观组织

目前,应用增材制造工艺制备镍基高温合金较为普遍,最常用的方法主要有SLM和LOD技术两种。增材制造技术制备的镍基高温合金与传统制造所得合金在微观组织以及性能上差异较大。通过不断调整工艺参数探究增材制造制备的镍基高温合金的微观组织以及缺陷变化,寻求最优化的制造工艺,来提高增材制造镍基高温合金的应用性能。金属增材制造沉积过程中,高能量激光束熔化金属粉末,扫描过程中会形成熔池特征。激光束光斑直径在微米尺度,故熔池尺寸也在微米等级。且成形过程中移动速度较快,激光束能量集中,熔池附近温度梯度大,熔池冷却很快,晶粒没有充裕的时间长大。熔池与金属粉末、已凝固区以及周围气体存在热传导、热对流等,故散热方向复杂多样。因此,增材制造过程显微组织的形成极其复杂,与传统工艺产品的微观组织差异较为显著。增材制造镍基高温合金零件沉积态形貌一般为典型的鱼鳞状相互搭接的熔池形貌。这种鱼鳞状形貌的形成的原因是:每根熔线截面受激光熔化本道熔线的形貌和相邻下一道熔线形成过程的影响,下一道熔线成型前,当前熔线的底部呈碗状,而顶部的形状受到液态表

*通讯作者:安芳利,1984年10月19日,汉,女,陕西扶风,中航工业陕西飞机工业有限公司,设计员,中级工程师,本科,研究方向:航空制造技术。

面张力以及底部熔池熔液的粘附力共同作用，一般呈弧形。当下一道熔线成型后，依据扫描的方向，前一道熔线的部分形貌因部分重熔而被后一道熔线擦除，擦除部分的多少取决于扫描间距的大小，扫描间距越小，擦除部分越多，最终会形成鱼鳞片状单层结构^[2]。

3 增材制造

TZM合金是在纯钼中加入一定量的Ti、Zr和C，以得到Mo-Ti、Mo-Zr固溶体和TiC、ZrC质点，起固溶强化和弥散强化作用，与纯钼相比，室温和高温性能提高，再结晶温度提高，是运用最广泛的钼合金，用于压铸模具、火箭推进器、烧结舟皿的制作等。采用SLS技术，通过逐步提高激光功率，得到密度 7.06g/cm^3 的毛坯件。通过SLM技术得到致密度 $99.7\% \pm 0.3\%$ 、无裂纹的TZM合金，纵截面晶粒因外延生长而被拉长，长宽比为 0.4 ± 0.17 ，相较纯钼晶粒明显细化，其弯曲强度达到 $(591 \pm 26)\text{MPa}$ 。用电子束熔丝DED技术沉积TZM合金，发现束流、打印速度提高都有利于沉积层形成沿晶向择优生长的柱状晶，沉积层内部缺陷主要为MoO₃高温挥发引起的气孔，最高压缩屈服强度约 340MPa ^[3]。

4 激光增材制造适航符合性研究进展

(1) 硬化参数例如层厚度)是在成型过程中设定的。影响其波动的主要因素是设备控制及其传感器的准确性。因此，应定期校准添加剂制造设备，满足要求。2) 关键参数直接影响成形结构和波动特性。SLM的主要参数包括激光功率、扫描速度和扫描距离。目前，许多单位已经开展了大量的研究，以改进这些参数的优化。这些参数的变化主要通过影响能量条来影响结构、缺陷和性能。图5a表明，在激光低输入能量密度的情况下，组织内可能会形成不完全融合误差，缺陷尺寸可达 $100\ \mu\text{m}$ ；当激光性能过高时，能量密度较高，有利于组织形成深孔。3) 重要和受控参数对成形质量影响很大，但受控参数可以通过某些方法实现。例如带宽、圆周率等。只要这些参数能通过研究得到优化和有效控制，质量就能得到保证。工艺参数控制是SLM过程控制的一个非常重要的组成部分，但SLM过程控制不仅涉及工艺参数，而且涉及设备的选择和维护，影响设备激光性能的质量和波动，从而影响过程的稳定性。零件在制造工艺中的放置和零件后处理方法影响SLM的成形质量，必须在工艺规范中明确控制。此外，在质量控制方法中，基于“人、机、料、法、环、测”的控制模式在SLM过程中控制控制元件方面也起着重要作用^[4]。

5 微观结构的各向异性

一般而言，增材制造技术制备的成形件为柱状晶结构，且晶粒穿过多个熔覆层向上延伸。较快的凝固速度以及垂直于基材方向的热损失使得晶粒在粉床中外延生长。在选区激光增材制造制备的构件中可以观察到一些可变性的结构，这是通过使用棋盘式扫描策略导致形成嵌入在主要柱状晶区域中的近等轴晶区域^[5]。更重要的是，由于该工艺的反复加热性质，显微组织在几十微米尺度上也表现出不均匀性，这表现在所见的“鱼鳞”形貌和晶粒结构或偏析上的不均匀性。晶粒结构中的各向异性本身不是问题，但是我们期望可以通过控制晶粒的各向异性来获得某些特定的力学性能，比如定向浇铸(Directionallycast, DS)获得结构的方向性^[5]。通过调控工艺参数进而实现对晶粒尺寸和晶体取向的控制，增材制造技术在这方面具有很大的潜力。但目前关于这方面的研究还非常少，其潜力还尚未被充分发掘，需要进一步研究。与微观结构相关的另一个难点是结构中快速凝固副产物的亚稳态性质。大多数镍基高温合金增材制造成形件的结构要么表现出一定程度的枝晶间偏析，要么显现出其它不希望出现的凝固诱导相(如Laves相)。因此，通常需要后处理来修复增材制造工艺引起的缺陷。除了固溶和时效热处理外，还可以产生一定尺寸和比例的沉淀物来提高材料的高温特性。然而，这些后处理操作会进一步增加增材制造的成本，降低它们的吸引力^[6]。

6 结束语

随着激光增材技术的不断发展，未来还有很多值得探索的空间。一方面，掺杂金属、陶瓷或其他材料的方式具有明显提高铝合金性能的作用，但目前商用的铝合金材料种类非常有限，存在成本高、开发周期长的问题，所以需要加快开发新型铝合金材料步伐，同时深入研究新材料的球化、孔隙等缺陷形成机理，配合合适的成形工艺，提高使用新材料的成形技术；另一方面，应该从多功能领域，如电、磁、热等领域发挥增材制造技术的独特优势，研究全成形尺寸、高制造效率的SLM的应用。依据多物理场的数值模拟仿真、加入机器学习等人工智能技术，与传统加工技术复合

成形，打破SLM构件制造尺寸的壁垒，提高制造效率，形成功能性更强的新型复合材料结构。

参考文献：

- [1]耿冬妮,陈晋市.高熵合金激光增材制造技术研究进展[J/OL].粉末冶金技术:1-11[2022-02-11].
- [2]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.
- [3]孙小峰,荣婷,黄洁,李明亮,徐迪.激光增材制造技术在航空制造领域的研究与应用进展[J].金属加工热加工),2021(03):7-14.
- [4]刘晓飞.激光增材制造技术的研究进展[J].科技风,2020(22):3.
- [5]郭绍庆,刘伟,黄帅,向巧.金属激光增材制造技术发展研究[J].中国工程科学,2020,22(03):56-62.
- [6]赵兴科.镍钛记忆合金增材制造技术研究进展及其在航空领域的应用前景[J].航空制造技术,2016(12):34-41+48.