

选区激光熔化金属增材制造技术应用培训

刘婷婷^{1,2}, 章林¹, 孙建林²

(北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 材料国家级实验教学示范中心, 北京 100083)

摘要: 为满足金属增材制造技术快速发展对于高层次应用型人才的迫切需求, 根据选区激光熔化工艺流程特点, 结合自身优势资源, 开展了金属增材制造技术应用培训。依据已经发布的国家标准, 制定了实用的选区激光熔化工艺标准化流程及操作规范, 不仅是保证培训质量和可靠性的基础, 也为学生标准化意识的树立以及增材制造创新应用型高端人才的培养提供有力保障。

关键词: 金属增材制造;选区激光熔化;技术培训;国家标准

Application training of metal additive manufacturing technology by selective laser melting

Liu Tingting^{1,2}, Zhang Lin¹, Sun Jianlin²

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Materials Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

Abstract: With the rapid development of metal additive manufacturing technology, to meet the urgent demand for high-level talents with practical skills, application training of metal additive manufacturing was carried out based on the characteristics of selective laser melting process and own advantageous resource. Practical standard process and operation specification of selective laser melting experiment were formulated based on the released national standards, which not only served as the basis for ensuring the quality and reliability, but also provided a strong guarantee for students to develop the awareness of standard and the cultivation of high-end talents with innovation and practical skills in additive manufacturing.

Keywords: metal additive manufacturing; selective laser melting; technical training; national standards

增材制造按照国家标准《GB/T 35351—2017 增材制造术语》的定义，是一种以三维模型数据为基础，通过材料堆积的方式制造零件或实物的工艺。与传统制造工艺相比，增材制造具有更高的设计自由度及原材料利用率、更少的零件装配、更短的产品实现周期等特点，已经成为引领制造业变革的一项颠覆性技术^[1,2]。根据《Wohlers Report 2022》，2021 年全球增材制造行业持续增长，市场规模已达到 152.44 亿美元，其中金属增材制造的工业应用在近几年增长非常迅速，推动这一增长的原因是航空航天、生物医疗、汽车终端对金属增材制造需求的不断增长^[3,4]。近年来，我国高度重视增材制造技术的发展，将其列为《“十四五”智能制造发展规划》智能制造关键发展技术，给予了大力支持^[5]。鉴于增材制造极快的发展速度以及广阔的应用前景，要求高校在增材制造教育领域进行积极的创新与实践，特别是在如何应用工业级的金属增材制造技术方面^[6-8]。因此，开展金属增材制造技术应用培训以顺应国家对于增材制造高技术人才的迫切需求具有重要意义。

1 选区激光熔化金属增材制造技术背景

金属增材制造工艺因其能够直接快速成形高性能金属零部件，已经成为国防军工、航空航天、能源动力等尖端领域的重要技术手段。其中，选区激光熔化技术（SLM）作为金属增材制造的主要研究热点，推动着当前金属增材制造技术的不断发展。SLM 是以三维数据模型为基础，通过激光选择性扫描熔化粉末床区域逐层成形零部件的工艺。由于该技术是一种基于粉末床的金属增材制造工艺，能量源为激光，在成形件的尺寸精度和表面质量方面颇具优势，非常适合于轻量化复杂精密结构件的快速制造^[9-11]。

典型的金属材料粉末床熔融工艺流程按照国家标准《GB/T 39252—2020 增材制造金属材料粉末床熔融工艺规范》的规定，主要包括模型设计、数据处理及工艺参数设置、成形准备、成形过程、粉末清理、初步检验、后处理共 8 个阶段。根据 SLM 工艺流程特点，结合自身优势资源，开展了金属增材制造技术应用培训，使学生能够更直观地了解和掌握典型的金属增材制造工艺与方法，激发学生的自主探索能力和动手实践能力。

2 选区激光熔化原材料及设备

2.1 粉末原材料

目前用于 SLM 成型的主要原材料为铁基合金、镍基合金、钛及钛合金、铝及铝合金等金属粉末，从粉末安全性、成形性以及成本等方面考虑，技术应用培训选用 316L 不锈钢粉末^[12]。316L 粉末的微观形貌通过 LEO-1450 型扫描电镜观察得到，如图 1 所示，可以观察到此 SLM 用 316L 粉末表面光整，呈现较好的球形度，粉末具有良好的流动性和铺展性，

能够保证成形的顺利开展。

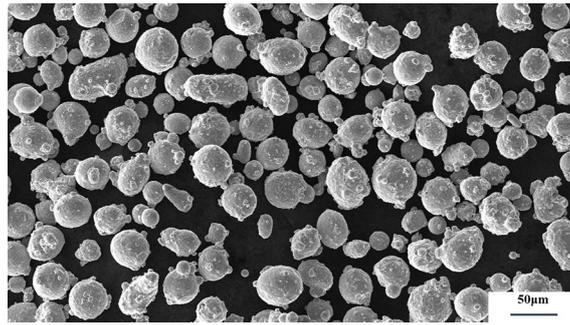


图1 316L 粉末微观形貌

2.2 设备及原理

采用 SLM 125HL 型选区激光熔化成形设备（德国 SLM Solutions GmbH），激光器为单激光（1×400 W）IPG 光纤激光器，成形过程在氩气保护气氛下进行，氧含量保持在 0.1% 以下。图 2 为 SLM 125HL 设备左视图示意其工作原理，首先，设备为上送粉方式，粉缸在整个设备最上方，粉末自上而下，进入到铺粉器，铺粉器运动，均匀铺上一个层厚的粉末，第二阶段，激光按照切片文件的成形策略选择性局部扫描，使粉末完全熔化，同时与下面已加工部分实现冶金结合，第三阶段，基板下降一个层厚，铺粉器继续运动，均匀铺一层粉末，然后再进行新一层的熔化，例如高度 60 mm 的零件，粉层厚度为 30 μm ，这个过程循环重复 2000 次直到整个零件全部成形完毕。

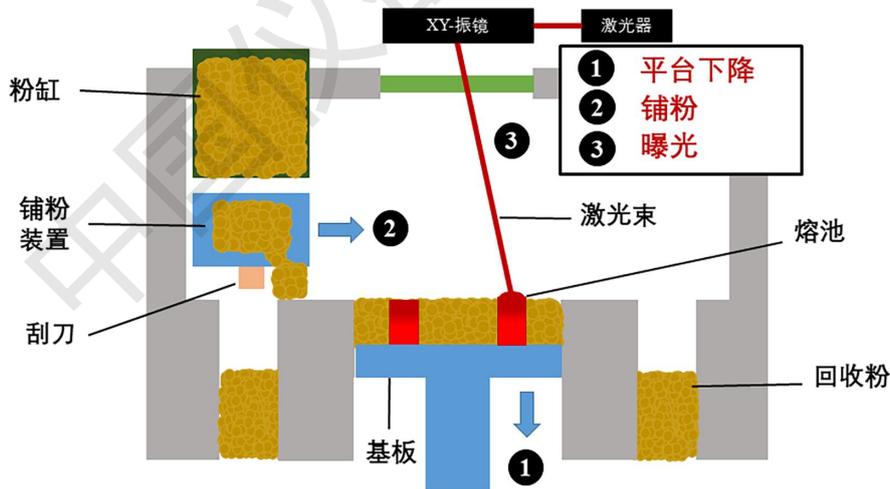


图2 SLM 设备工作原理示意图

3 选区激光熔化安全培训

开始操作之前，学生必须要对存在的安全隐患及其防护措施有充分的了解，建立起“安全第一、生命至上”的安全防范意识。对于 SLM 过程涉及到的安全隐患及相应的防护措施，

主要包括以下四个方面。

(1) 金属粉末。干燥金属粉末一般可燃，例如铝合金、钛合金粉末属于易燃固体，与空气混合达到一定浓度，任何点火源，即摩擦、受热、火花或火焰，都可能引起火灾或者爆炸；金属粉末吸入人体对呼吸道有害，尤其是镍、钴合金粉末还有人体吸入毒性、致癌性，对人体危害性极大^[13]。技术培训中用到的是干燥的 316L 不锈钢粉末，它的隐患主要是人体吸入对呼吸道、肺部的危害；对于其他金属增材制造常用粉末材料，要求学生必须依据化学品安全技术说明书（MSDS），对所使用的粉末特性及安全要求有明确的认识。

因此，与粉末有关的操作，一定要做好个人防护，必须穿戴工作服、佩戴口罩和手套等，避免粉尘吸入，避免粉末接触皮肤和眼睛；对于粉末存储，必须要控制工作区粉尘浓度，存储场所要确保良好的通风，避免容器受到强烈震动和撞击，远离一切点火源和热源^[14]。需要特别注意的是，关于粉末的操作和存放注意事项，是从开始前粉末准备到打印成形过程、打印后粉末清理，贯穿了整个过程，必须引起高度重视。

(2) 惰性气体。SLM 成形在惰性气体保护下进行，惰性气体风险虽相比其他可燃气体要小，但要注意的是当惰性气体排放达到较高浓度时，人体吸入会有窒息危险，尤其 SLM 中通常用到的是氩气，氩气密度比空气大，会从地面开始迅速向上聚集，直到充满整个室内，窒息风险大。因此，务必确保实验室内通风良好，避免较长时间蹲着作业，并注意气瓶固定，气瓶的安全操作也是实验室安全中非常重要的部分。

(3) 激光及激光辐射。设备配备的激光器最高输出功率为 400 W，激光辐射会对人体造成严重伤害，对于激光的防护，设备成形舱门有一处防护玻璃可防止激光和紫外线透过，因此，SLM 成形正式开始前，需要关注设备成形舱门上的防护玻璃完好，并且激光器处于正常状态，才能开始。

还有一些其他的安全注意事项，例如基板通常会预热到 200 °C，为防止烫伤，务必确保基板已冷却至室温，再对基板进行操作；搬运较重的工具或部件时，须小心并穿戴劳保鞋等。总之，学生通过接受有针对性的安全教育，有助于提升安全素养责任素养的同时，也能有效地提高技术培训效果及实际应用性。

4 选区激光熔化成形过程

为了保证培训质量，提高学生标准化意识，参照已经发布的国家标准《GB/T 39252—2020 增材制造金属材料粉末床熔融工艺规范》，结合多年的实践经验，建立了实用的标准化 SLM 成形工艺流程及操作规范，具体过程如下。

(1) 金属粉末添加并安装送粉桶。首先，穿戴实验防护服，佩戴手套、护目镜和口罩；将粉末装进送粉桶，关闭送粉桶管口处与机器入粉口处的阀门，再将送粉桶管口与机器入粉口对接到一起，使用卡箍紧固，完成粉瓶与机器的连接；最后将粉瓶和入粉口处的阀门都打开，此时粉末添加到机器中。

(2) 基板安装并大致调平。安装前，先用无纤纸和酒精擦拭基板表面；将基板放置成形舱内成形平台上，对基板进行安装时，注意螺钉对角拧，力度均衡，防止拧得过紧基板受热膨胀后卡死；安装后，先将基板下降至与成形舱平面大致齐平的位置。

(3) 激光入射镜片擦拭。擦拭前注意使用干净手套及擦镜纸，拿起擦镜纸的边缘，以对角的方式折叠形成一个没有棱角的小平面，在小平面上喷洒适量异丙醇（IPA）；将小平面对角轻轻贴合镜片中心，从中心到边缘螺旋线状由内而外擦拭镜片，如果擦拭完毕后擦拭纸上有肉眼可见的污渍，则需要将上述过程再次重复一遍，直到没有污渍。

(4) 成形环境设置。当基板经过粗调后，认为基板与成形舱周围区域高度差很小，可以关闭成形舱门，在基板进行细调过程中，打开基板预热及置换空气操作，使得氧含量逐渐降低，有效缩短培训过程中的等待时间，提高效率。

(5) 基板细调并铺好第一层粉末。通过试铺粉末来进行基板细调，根据铺粉后观察基板上粉末厚度的状态，来确定将继续上升或是下降基板，重复进行这样的操作，直到最后呈现出粉末能够均匀的铺在整个基板区域，并且透过粉末隐约可见基板，此时基板细调工作完成。

(6) 成形开始前各项检查。检查内容主要包括设备操作软件上打印文件、运行日志、传感器数据显示有无异常红字，滤芯压力值是否在正常使用范围内，设备气体压力值显示是否正常，激光器显示是否正常，设备上方警示灯显示是否为绿灯。

(7) 开始零件成形。设备显示均正常，点击开始打印按钮，打印工作正式开始。打印过程中关注事项包括设备操作软件中传感器各参数正常，惰性保护气体及粉量充足，铺粉均匀完全，零件未翘曲，风场正常，粉末飞溅被带离成形区域等。打印过程中，注意保持监测和观察，确保及时发现问题，若出现成形中断等问题，及时解决，并做好记录。

(8) 粉末回收清理并取出基板。成形顺利完成后，首先待基板温度下降至室温后打开成形舱门，用吸尘器将成形区域粉床的左侧（临近出风口的位置）颜色较深的飞溅粉尘堆积全部吸走；然后将成形平台上升，粉床中的粉末会被抬高并溢出，零件也逐渐上升暴露在视线中，使用与材料相配套的毛刷或者小钢片，尽量将粉末都扫入前面的溢流槽，回收溢流瓶中；最后用吸尘器将成形舱及基板残余粉末清理干净，将基板取出。

(9) 样品移除及表面处理。样件可根据需要先随基板，按照合适的热处理制度进行热

处理,之后样件采用机械加工从基板上线切割下来,有支撑结构的样件再通过机械加工或手工去除支撑。样件移除后,进行喷砂、打磨、抛光等表面处理,以去除零件表面毛刺、氧化物及残留粉末。

5 结语

基于金属增材制造典型工艺流程特点,开展了金属增材制造技术应用培训。学生在培训过程中深入了解并系统掌握了先进的金属增材制造材料成形技术,锻炼了自身的动手实践能力及分析实际问题能力。培训中引入了现行相关国家标准,并进行了有针对性的安全教育,有利于培养学生的标准化意识及安全素养。同时,建立了标准化 SLM 工艺流程,构建了 SLM 操作规范,能够保障培训质量,也对培育增材制造高技术人才,推动金属增材制造技术创新与可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(01): 19-23.
- [2] Liu G, Zhang X F, Chen X L, et al. Additive manufacturing of structural materials[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 145: 100596.
- [3] 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): 32-55.
- [4] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P, et al. Additive manufacturing of metals: microstructure evolution and multistage control[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2022, 100: 224-236.
- [5] 董凯. “十四五”智能制造发展规划解读及趋势研判[J]. 中国工业和信息化, 2022(01): 26-29.
- [6] 魏青松, 李继康, 闫春泽, 等.“新工科”下3D打印前沿学科三位一体多维度教学模式研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(09): 10-14.
- [7] 何扬波, 陈剑, 房飞宇, 等. 新工科背景下3D打印技术本科教学实验室的建设[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(01): 275-278+306.
- [8] 李方正, 周岩. 我国增材制造产业发展人才瓶颈探究及建议[J]. 工业技术创新, 2020, 07(04): 34-40.

- [9] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(01): 9-21.
- [10] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372: 6545.
- [11] Wen Y J, Zhang B C, Narayan R L, et al. Laser powder bed fusion of compositionally graded CoCrMo-Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2021, 40: 101926.
- [12] 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.
- [13] 李争显, 李伟, Lei J J, 等. 常见金属元素对人体的作用及危害[J]. 中国材料进展, 2020, 39(12): 934-944.
- [14] 孙思衡, 孙艳, 贾存锋, 等. 增材制造用金属粉末爆炸敏感性研究 [J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(04): 249-256.