

激光粉末床熔融增材制造实验室质量控制体系的构建与应用

刘婷婷^{1,2}, 章林¹, 曲选辉¹

(北京科技大学 1.新材料技术研究院; 2.材料国家级实验教学示范中心, 北京 100083)

摘要: 随着增材制造的快速发展, 激光粉末床熔融技术在高精度金属构件制造领域展现出巨大潜力。由于成形过程复杂, 并且发展时间较短, 标准体系尚未完善, 探究实验室质量控制体系对于保证实验安全性及其可靠性、一致性, 并提升实验质量具有重要意义。为此, 结合现行的相关国家标准, 通过标准操作规程制定和关键影响因素控制, 构建了激光粉末床熔融增材制造实验室质量控制体系。该体系取得了显著的应用成效, 在提高科研效率、保障人才培养以及提升制件产品质量、促进技术推广等方面发挥了重要作用。

关键词: 质量控制体系; 增材制造; 实验室管理; 标准操作规程; 关键影响因素

Construction and application of laboratory quality control system based on laser powder bed fusion additive manufacturing

LIU Tingting^{1,2}, ZHANG Lin¹, QU Xuanhui¹

(1. Institute for Advanced Materials and Technology; 2. National Demonstration Center for Experimental

Materials Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

Abstract: With the rapid development of additive manufacturing, laser powder bed fusion technology has shown great potential in the field of high-precision metal component manufacturing. Due to the complexity of the forming process and relatively short development time, the standard system is not yet perfect. It is of great significance to explore a laboratory quality control system for ensuring experimental safety, reliability, consistency, and improving experimental quality. Therefore, the laboratory quality control system based on laser powder bed fusion additive manufacturing has been constructed by establishing standardized operating procedures and controlling key influencing factors in accordance with relevant national standards. The remarkable application effects have been achieved, playing an important role in improving research efficiency, ensuring talent cultivation, enhancing product quality of components, and promoting technological dissemination.

Keywords: Quality control system; Additive manufacturing; Laboratory management; Standard operating procedure; Key influencing factors

1 引言

增材制造技术,特别是激光粉末床熔融技术,因其能够快速制造轻量化复杂精密的金属构件而在航空、航天、医疗等多个高端领域得到广泛应用。激光粉末床熔融是在三维数据模型的基础上,通过激光对粉末床区域进行选择性的扫描和熔化,从而实现零部件逐层成形。由于该技术是一种基于粉末床的金属增材制造工艺,并且能量源为激光,在成形件的尺寸精度和表面质量方面颇具优势。然而,在激光粉末床熔融成形过程中,复杂的物理冶金和热物理过程常常会引起裂纹和气孔等内部质量问题,以及变形和表面粗糙度等性能质量问题,并且该技术发展时间尚短,标准体系亦尚未完善,这些都会直接影响到最终构件的质量及其可靠性^[1-3]。因此,构建一个有效的实验室质量控制体系对于保障激光粉末床熔融增材制造技术的发展和具有重要应用具有重要意义。

2 标准操作规程制定

基于激光粉末床熔融,开发与打印材料相适配的成形工艺参数,已经成为近年来增材制造科研实验中最为热门的研究方向之一,也是该技术领域科研成果转化与产业化应用的重要基础^[4-6]。因此,结合现行的相关国家标准以及实践经验,根据激光粉末床熔融技术工艺原理和流程,建立了实用的标准化激光粉末床熔融实验流程及操作规范。实验流程主要包括粉末原材料准备、打印文件创建的打印前准备工作;单道熔池、参数优化小块及力学性能试样打印的激光粉末床熔融成形过程;以及成形件后处理、最终性能测试分析等阶段。标准操作规程主要参考国家标准《GB/T 39331—2020 增材制造数据处理通则》、《GB/T 43148—2023 增材制造结构轻量化设计要求》和《GB/T 43481—2023 增材制造三维工艺模型数据质量要求》以及《GB/T 39252—2020 增材制造金属材料粉末床熔融工艺规范》、《GB/T 42617—2023 增材制造设计金属材料激光粉末床熔融》和《GB/T 44194—2024 增材制造金属粉末再利用技术规范》的规定,对数据处理和激光粉末床熔融成形实验流程及步骤提出了标准化和规范化要求。

2.1 数据处理

在增材制造技术中,数据处理为设计数据与最终的打印技术和打印材料之间提供了非常关键的连接。是否成功地对打印数据进行准备和处理,将直接影响到最终打印的成功与否。参照现行的相关国家标准,首先对增材制造数据处理建立起标准操作规程,其流程一般包括添加机器平台、创建模型/导入模型、模型修复、模型位置摆放、添加支撑、工艺参数编辑与添加、切片文件生成等七个步骤,具体过程大致如下。

打开数据处理软件,将平台添加到软件界面中。模型可以直接在数据处理软件中创建,或者模型先由三维建模软件创建并保存为 stl 格式文件,再将模型导入数据处理软件中。对于外部导入的模型,可能存在三角面片缺陷,需要进行修复,以保证模型精度和密闭性,对于直接在数据处理软件中创建的模型结构,可跳过此步骤。之后,对零件进行位置摆放,注意避免零件的长边与刮刀平行摆放,长边应绕 Z 轴旋转 5~45°,以更好地分散对刮刀的冲击力,减少由刮刀引起的成形失败风险。导入与材料相对应的工艺参数文件,如有需要在此参数基础上进行修改,之后将参数赋予到相应零件模型上之后,生成成形设备可以识别的切片文件,以备后续激光粉末床熔融成形使用。

2.2 激光粉末床熔融成形

成形操作开始前,不仅要熟悉所使用的原材料粉末、设备等,更应对成形过程存在的安全风险及其预防措施有充分的了解。对于激光粉末床熔融成形过程涉及到的安全防护,主要包括金属粉末、惰性气体、激光三大方面。

成形所用原材料金属粉末的潜在危险主要包括两方面,人体吸入对于呼吸道、肺部的危害;干燥金属粉末一般可燃,例如铝、钛粉属于易燃固体,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。对于其他金属增材制造常用粉末,要求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有明确的认识。与粉末有关的操作,必须做好个人防护,避免粉尘吸入和接触;控制工作区粉尘浓度,存储场所确保良好的通风,远离火源和热源,并配备 D 级灭火器。

成形在惰性气体保护下进行,氩气密度比空气大,当排放达到一定浓度会从地面开始迅速向上聚集,直到充满整个室内,对人体造成窒息危险。因此,必须确保实验室内通风良好,安装氧气报警器,并注意气瓶的安全操作。

激光及激光辐射可能会对人体造成严重伤害,对于激光的防护,设备成形舱门防护玻璃能够防止激光和紫外线透过。在进行成形实验之前,必须确保防护玻璃完好,并且激光器显示正常。此外,还应确保成形设备所有安全开关均处于正常状态。

参照现行的相关国家标准,制定了激光粉末床熔融成形流程标准操作规程,成形具体过

程大致如下。

金属粉末干燥、筛分与添加，首先穿戴实验防护服、手套、护目镜和口罩，将粉末装入送粉桶，之后与机器连接。设备开机并导入切片文件。基板安装并大致调平，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，注意螺钉对角拧紧，力度均衡，之后将基板下降至与成形舱平面大致齐平的位置。激光入射镜片擦拭，使用干净手套及擦镜纸，将擦镜纸折叠成小平面，喷洒适量异丙醇后轻轻贴合镜片中心，由内而外螺旋线状擦拭镜片，直到擦拭纸上没有污渍。成形环境设置，关闭成形舱门，打开置换空气及基板预热。基板细调并铺好第一层粉末，通过试铺粉进行，根据基板上粉层厚度确定继续上升或是下降基板，直到粉末均匀铺在整个基板区域，并且透过粉末隐约可见基板。

成形开始前各项检查，按照《激光粉末床熔融成形操作确认表单》进行检查确认，如表 1 所示，检查内容主要包括运行日志、传感器数据有无异常红字，滤芯压力是否在正常使用范围内，切片文件及激光器显示是否正常。

成形开始，过程应保持监测和观察，可通过远程控制软件进行实时监控，关注事项主要包括传感器各参数显示正常，氧含量保持在 1000 ppm 以下，铺粉均匀完全且粉量充足，零件未翘曲，粉末飞溅能够被风场带离成形区域。

粉末回收清理并取出基板，成形完成后，待基板温度下降至室温，打开成形舱门，先将临近出风口位置的飞溅粉尘全部吸除；然后上升成形平台，使用与粉末相配套的毛刷或者小钢片，将粉末回收；最后将残留粉末清理干净，取出基板。此外，更换滤芯、换粉清理等维护操作步骤在标准操作规程中也均有详细的图文说明。

3 关键影响因素控制

影响激光粉末床熔融技术成形质量的因素众多，主要包括模型与支撑设计、粉末原材料特性、材料工艺参数、热处理工艺等^[7-9]。考虑到在进行材料成分设计与工艺参数优化时，基本不涉及复杂形状零件模型设计，并且通常直接对打印态制件的致密度及其显微组织、力学性能等进行研究，因此粉末原材料特性、成形工艺参数是实验室需要有效控制的关键因素。

3.1 粉末原材料

粉末原材料是保证激光粉末床熔融实验质量的先决条件，对于粉末原材料的质量控制主要从金属粉末特性及其循环检测两方面进行。首先，对于已经商用的金属粉末，粉末的化学成分、粒度分布、松装密度和流动性等特性均须满足相应的现行国家标准；而对于自行成分

设计研发的粉末，须保证其具备良好的可塑性、较为广泛的应用前景以及良好的流动性和铺展性。其次，由于成形过程中需要将粉末填满成形腔至所需高度，但其单次成形粉末消耗并不多，因此粉末面临着循环使用问题。为此，对激光粉末床熔融粉末原材料的循环使用流程进行了标准化规定，即首先对粉末初始特性进行检测，确认能够满足使用标准；每次激光粉末床熔融成形后对粉末进行筛分并做好使用记录；待粉末达到一定使用次数或定期对粉末特性进行重新检测，包括粉末粒度分布、氧含量和易燃元素分析等。在实验完成后，粉末须密封安全储存，并在下次使用之前进行烘干处理，从而保证粉末原材料的质量和一致性，这对于控制和提高激光粉末床熔融实验质量至关重要。

表 1 激光粉末床熔融成形操作确认表单

进程	操作	要求	数值记录
打印前	环境确认	室内湿度：RH 小于 70%；室内温度： 氩气充足、空压机运转及实验室电力供应正常	
	原材料信息	粉末规格、重量、批次：	
	粉末烘干	温度、时间、真空度：	
	粉末筛分	记录筛分前、后粉末质量	
	粉末加入	记录粉末加入量	
	切片文件导入	数据文件导入完成	
	基板准备	基板材质： 基板表面及四角通孔清洁	
	基板安装	确认舱室内平台基板安装螺纹孔已清理 确认基板安装螺丝已清理，未滑丝	
	镜片清洁	使用异丙醇及专用擦镜纸擦拭镜片	
	平台加热	平台加热温度：	
	惰性气体置换	关闭舱门，打开气体涌流	
	基板调平	前后铺粉，调节基板高度，基板均匀分布薄层粉末	
	气体循环	打开舱室内气体循环及压力控制	
	条件确认	平台温度： 风速： 氧含量：小于 1000 ppm 滤芯状态、其他温度及压力指标在容许范围内	
启动打印	开始按钮点击	确认当前平台高度：0.00 mm；确认开始打印层数：	

确认初始层重复扫描次数：

点击确认，启动打印

打印过程	粉末筛分及加入	记录筛分次数，筛分前、后粉末量以及粉末加入量
	异常状况	异常状况包括但不限于：(1)铺粉异常；(2)零件翘曲；(3)气体报警；(4)温度报警；(5)压力报警；(6).....
		重点关注识别的风险位置打印情况
		发生异常，立即联系实验室负责人

打印后	设备降温	平台加热关闭、气体循环关闭、冷却保持开启
	粉末回收	在平台温度降至 70 °C 以下后，打开舱门，上升平台，使用对应材料的粉末刷回收粉末
	取件	使用防爆吸尘器，清理四个螺纹孔粉末 取出基板固定螺丝，取出基板

3.2 成形工艺参数

成形工艺参数也会对最终制件性能产生直接影响，这也是该领域的重要研究方向之一。激光粉末床熔融成形工艺参数主要包括材料工艺参数（如激光能量密度、扫描策略）和设备自身参数等。在粉末床熔融成形工艺中，激光能量密度是一个关键因素，通常由激光功率、扫描速度、扫描间距和层厚的组合来评估。一般来说，需要确定一个合适的能量密度范围，以避免成形缺陷，提高材料的致密度。针对不同的原材料粉末，需要不同的工艺参数组合优化，来实现致密度高且力学性能优的打印制件成形。主要参数的合适配合，应该使得输入的能量分布均匀，粉末能够完全熔化，并且有充足的时间与周围的粉体发生热交换，这样可以得到致密度和表面质量较高的制件。此外，选择合适的扫描策略能够改善致密度和残余应力问题，减少裂纹开裂倾向，促进组织的均匀化和力学性能的提高^[10]。对于设备所涉及的工艺参数（如基板预热温度、风速、氧含量等）均在设备操作软件上进行设置，应保障成形过程稳定，并完整记录相关内容，以便于分析、追溯。

4 应用成效

依托激光粉末床熔融增材制造实验室质量控制体系，不仅有效保障了大型科研仪器设备的安全、稳定和高效运行，在满足实验室科研任务的同时，还全面实现了实验室的开放共享，显著提高了设备使用效率和科研成果应用范围。尤其在科研成果融入教育教学方面，面向本

科生开设了金属增材制造实验课程,规范化地进行全流程实验讲解演示及学生自主上机实践操作,使学生更加直观地了解和掌握了典型的增材制造工艺与方法,激发了创新思维与科研兴趣。此外,也为学生提供了全方位的综合实践平台,鼓励学生开展创新实践项目,并积极参加各类高水平创新创业竞赛,培养创新精神和实践能力。同时,该质量控制体系还为设计合理的激光粉末床熔融成形实验提供了指导与参考,有利于缩短研发周期,极大地提高了科研效率及质量,支撑了高水平科研成果的产出。通过引入现行相关国家标准,推动并规范了研究成果的转化与推广,从而为增材制造技术的发展做出了积极贡献。

5 结语

基于粉末床熔融增材制造工艺特性,结合现行的相关国家标准,制定了标准化操作规程,并建立了关键因素的质量控制方法,从而构建了激光粉末床熔融增材制造实验室质量控制体系。该质量控制体系具有极强的实践意义和指导价值,有效保障了成形过程的可靠性、一致性及其安全性,并提升了产品质量以及实验室资源使用效率。同时,还应用于相关专业的实验实践教学,有力支撑了学生工程实践与创新能力的培养。因此,该质量控制体系不仅为提升科研质量以及高层次创新人才培养提供重要支持,也对推动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] 张百成, 张文龙, 曲选辉. 基于高通量制备的增材制造材料成分设计[J]. 金属学报, 2023, 59(01): 75-86.
- [2] 赵志斌, 王晨希, 张兴武, 等. 激光粉末床熔融增材制造过程智能监控研究进展与挑战[J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 253-276.
- [3] Man C, Dong C F, Liu T T, et al. The enhancement of microstructure on the passive and pitting behaviors of selective laser melting 316L SS in simulated body fluid[J]. Applied Surface Science, 2019, 467-468: 193-205.
- [4] 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.
- [5] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.

- [6] Oliveira J P, LaLonde A D, Ma J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2020, 193: 108762.
- [7] 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.
- [8] 杨永强, 蒋梦龙, 邓澄. 铜钢功能材料增材制造研究进展[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(04): 14-24.
- [9] Ren S B, Chen Y H, Liu T T, et al. Effect of build orientation on mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(9): 4388-4409.
- [10] Chen J, Liu Z, Liu C, et al. Effects of scanning strategy and scanning speed on microstructures and mechanical properties of NiTi alloys by laser powder bed fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 914: 147115.