大尺寸金属3D打印制造装备激光加工工艺技术研究与探讨

程锦泽
天津镭明激光科技有限公司　天津　300380

摘要：目前，金属3D打印装备市场需求日趋广泛，针对铺粉式光纤激光加工工艺的优势、特点及应用中的问题，探讨光纤激光加工在大尺寸金属3D打印制造装备方面的工艺技术和相关设备装置的研发。

关键词：激光；金属3D打印设备；大尺寸

1　序言

近些年，随着金属3D打印装备制造技术的快速发展及智能数控技术水平的不断提升，国产金属3D打印加工装备已在航空航天、军工装备、汽车，模具产业、健康医疗等先进制造领域获得广泛应用[1，2]。根据信息反馈，突破金属3D打印制造装备大尺寸激光选区铺粉熔化工艺技术的瓶颈，对解决大体积、高品质金属零件3D打印成形加工装备的制造水平，缓解金属3D打印质量和大尺寸相互制约以及应用细分等方面将起到一定的促进作用。

金属3D打印装备80%以上是激光选区熔化成形类装备，主要源于其较广泛的材料适应性和较高的成形精度，并且可以成形非常复杂的结构。目前，已形成了多门类的产品系列，其中较为著名的国外装备公司有EOS、SLM Solution、Concept Laser、Renishaw、3D system等，相关国外装备的成熟性、稳定性和一致性已被认可。这些企业装备种类较为齐全，特别是成形尺寸的跨度从十几毫米到1m以上。国内现已有多家金属3D打印装备制造企业开始研发大尺寸成形设备，其中，天津镭明激光科技有限公司研发生产的相关装备已形成系列产品，并已在航空航天、军工生产等高端制造领域获得应用，正在逐步缩小与国外同类设备制造水平的差距。

虽然大尺寸高深宽比金属零部件3D打印装备可以有几种形式，但根据应用端的需求来看，基于激光选区熔化技术的此类装备具有明显优势。但是，受限于以下几点，其研制也较为困难。

1）以激光为能量源、振镜为运动控制的模式，采用单一光源和单一光学系统会限制其成形幅面，同时其成形效率也较为低下，必须采用多光源多光学系统[3]。那么这随之将带来扫场拼接、风场设置、光斑一致性等很多复杂问题。

2）随着成形体积的增加，在一次成形过程中激光产生的烟尘总量和单位时间的烟尘量都将急剧

the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti–6Al–4V[J].Materials Science and Engineering A，2014，616：1-11.

[9] LI P，WARNER D H，PEGUES J W，et al.Towards predicting differences in fatigue performance of laser powder bed fused Ti-6Al-4V coupons from the same build[J].International Journal of Fatigue，2019, 126：284-296.

[10] MOLAEI R，FATEMI A，PHAN N.Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects[J].International Journal of Fatigue，2018，117：352-370.

MW 20210602

上涨。由于烟尘的存在必然会影响激光的透过率以及一致性，从而影响到整个零部件的质量，因此除尘效率和腔室内的风场显得格外重要，但却异常棘手。

3）由于复杂的结构设置、光学设置以及洁净系统设置等，使得控制系统的建立成为一个非常复杂的系统工程，所以如何控制、监测并反馈装备的运行成为更加难解决的问题。

4）在这些条件下，成形一个由数万层结构和千万数量级的熔覆道构成的零部件，显然工艺参数的设置也是难题。因此必须针对这些难点提出解决方案，并在实践中解决上述问题，打通从硬件到软件再到工艺的研究通道，实现大尺寸高深宽比金属零部件3D打印装备的成功研制和应用。

2　研发实施重点与方法的探讨

2.1　大尺寸高深宽比金属3D打印装备整机设计

大尺寸高深宽比金属零部件3D打印装备的设计制造从需求端开始，以航空航天行业金属零部件为对象，瞄准大尺寸高深宽比类型零部件，分析产品需求和工艺需求，明确装备基本原理和类型，结合丰富的同类装备设计经验，制定总体设计方案。分析大尺寸、高深宽比等特点带来的软硬件难题，采用光学拼接方案、移动腔体方案等解决零部件尺度问题，对拼接方案、Z轴方案、密封方案、取件方案等进行研究和试验验证，最终通过分析3D打印装备制备的零部件组织、成分、力学性能等指标，确定装备各组件的合理性以及整套装备的产品实用性。

2.2　加工腔室内洁净度控制

通过对大尺寸零部件的激光选区熔化工艺过程的分析和对常规尺寸装备开发经验的了解，方案设计拟改进和优化接近系统。在滤尘效率方面，滤尘系统采用自研的旋风分离结构，先行过滤较大颗粒，配合优化的三级滤芯，进一步提高滤尘效率，并采用反吹除尘器定时去除滤芯上附着的细小颗粒，增加滤芯使用寿命，减少更换滤芯对产品质量的影响。在腔体洁净效率方面，清洁风场采用多通道输入输出设计，通过增加风道、控制流量、溢出校正等方式形成高效的清洁风场，增强激光透过率和能量输入稳定性，进一步控制熔池稳定性，提升产品质量。

2.3　多激光束扫描光学系统优化和控制系统设计

激光选区熔化技术以激光为能量源，采用多激光束扫描方案，如图1所示。

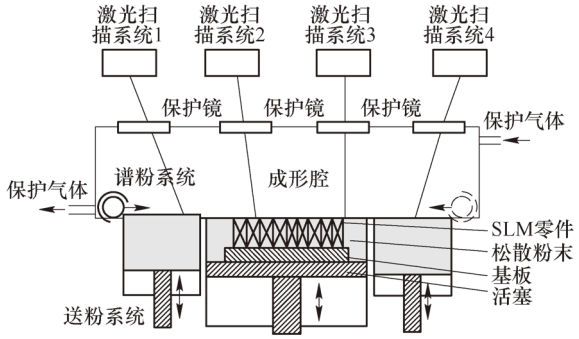

图1　多激光束扫描选区熔化控制系统

采用这样设计方案有如下优点：一方面增加总能量输入，在不影响零部件精度的条件下提高生产效率，另一方面通过较短的工作距离避免了大量保护气体的浪费，同时其光斑质量因其所匹配的光学系统而在整个扫描幅面的偏差值优于采用单束激光所使用的光学系统，使得激光作用形成的熔池在全加工幅面具有更优秀的一致性，提升工艺稳定性。通过调整和测试光学系统方案，获得最佳的尺度、效率、质量的平衡点。采用移植和创新的方式，自行研制多光束控制系统，控制各激光束依据设计好的运动轨迹熔化粉末。运动轨迹的规划充分考虑工艺特点、风场特点、性能要求等方面，形成交叉搭接、随机间隔、区间避让等多种激光束控制方式，避免形成光斑重叠、能量阻隔、拼接单薄等缺陷，保证最终零部件的力学性能，最终形成完善的光学与控制系统解决方案。

2.4　大尺寸高深宽比金属3D打印工艺方案设计

本装备设计中引入的新技术、新结构，不仅仅是简单的工艺重复和叠加，还需要充分考虑它们所带来的新问题和新难点。摒弃以往只注重能量输入调整、原材料性能调整的简单处理方式，创新工艺设计方法和思维方式，吸纳光学设计、流体设计中的一些方法，同时把自研的路径规划方式和熔池控制方法纳入工艺方案中，形成大尺寸高深宽比金属零件3D打印的整体解决方案[4]。

3　工艺技术路线及可行性实施

工艺技术路线流程如图2所示。

激光选区熔化成形技术是当今主流的金属3D打

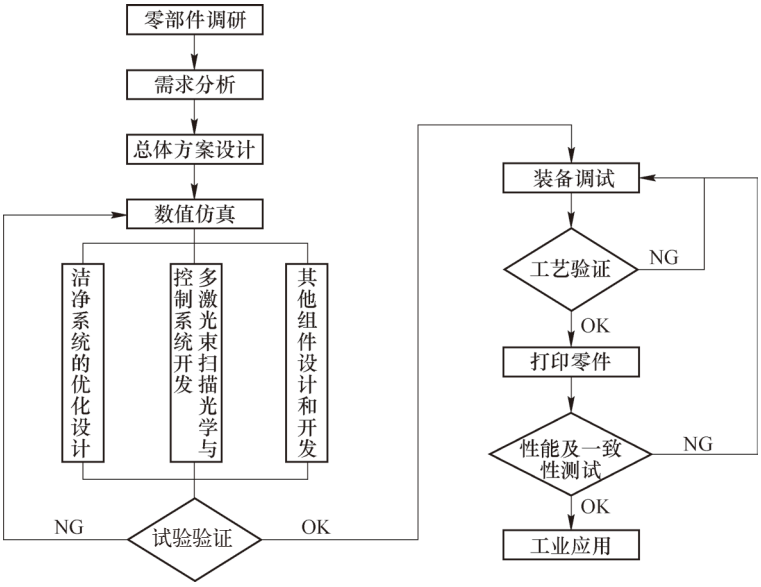

图2　工艺技术路线流程

印技术之一，成形的零部件尺寸精度高、表面质量好、性能优异，可具有非常复杂的形状结构，相比其他金属3D打印技术优势显著。目前，我国在常规尺寸的金属零部件激光选区熔化成形技术上与国外差距越来越小，但是在大尺寸高深宽比金属零部件3D打印的装备和工艺开发上还具有较明显的差距，特别表现在装备稳定性和产品一致性上。随着金属零部件尺寸的不断增加，仅仅通过3D打印工艺参数调整难以实现其高精度成形，目前亟需从3D打印装备入手，研制各类适用于大尺寸金属零部件成形的新型配套硬件，保证最终产品质量和稳定性。

天津镭明激光科技有限公司具有多年从事金属3D打印装备研发的技术基础，以及大尺寸成形件服务加工的工艺基础。装备研发方面，从TSC-350系列到LM-150、LM-260等系列已经过多次迭代并量产，数台该类型设备已装备于航空航天企业和知名科研院所，长期运行稳定可靠，打印的部分零部件已用于型号产品的开发和前期验证中。经过长期的研发、改进、生产，我们在整机结构设计、光学设计、风场设计、软件及算法设计、洁净系统设计、预热结构设计与粉床监测等方面积累了丰富的研发和生产经验，同时培养了一批综合素质高、专业技能过硬的技术团队，为方案设计装备的研制提供技术创新保障。目前已量产的LM-X260A金属3D打印成套装备如图3所示。激光选区熔化设备成形尺寸达到250mm×250mm×420mm，在国内外同类型设备中具有最高的成形尺寸，解决了很多困扰工艺开发人员的装备限制性难题。

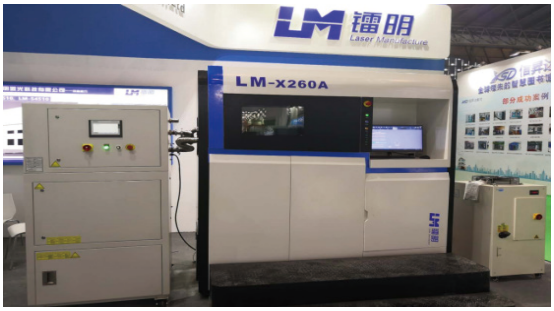

图3　LM-X260A金属3D打印成套装备

该设备长期运行稳定，加工的高度400mm零件工艺性能优良，产品的性能、精度、表面质量都达到行业领先水平。与此同时，成形尺寸为400mm×400mm×500mm的激光选区熔化设备LM-400A已完成前期研发任务并进入试制阶段。根据已有的研究背景以及前面论述的技术思路、技术方案与可行性实施，现已取得了多激光、大幅面、高尺寸可定制化选区激光熔化系列装备的突破性研究成果。

铺粉系统：结构简单稳定，粉量可控，可实现20~120μm的层厚；避免引入氧气，实时供粉；双刮刀铺粉，缩短打印时间。

监控系统：双摄监控，实时拍摄每次的铺粉及打印结果，便于远程监控。

（下转第13页）

料基础问题[J].航空学报，2014，35（10）：2690-2698.

[4] LIN X, HUANG W D.Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J].Scientia Sinica，2015，45（9）：1111.

[5] LIU J，LI L.Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding[J].Optics & Laser Technology，2005，37（4）：287-292.

[6] LIU Z，ZHANG H C，PENG S，et al.Analytical modeling and experimental validation of powder stream distribution during direct energy deposition[J].Additive Manufacturing，2019，30：100848.

[7] 顾玉芬，苏艳文，石玗，等.工艺参数对大光斑半导体激光熔覆层成形特征参数及组织性能的影响：第二十次全国焊接学术会议文集[C].北京：中国机械工程学会，2015：309-313.

[8] TAN H，ZHANG F，WEN R，et al.Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming[J].Optics and Lasers in Engineering，2012，50（3）：391-398.

[9] FELIPE Arias-González，JESúS del Val，COMESAA R，et al.Microstructure and crystallographic texture of pure titanium parts generated by laser additive manufacturing[J].Metals and Materials International，2018，24（1）：231-239.

[10] LIN X，HUANG W D.Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J].Scientia Sinica，2015，45（9）：1111.

[11] 王先龙，张维林，侯军，等. 超高速激光熔覆在采煤机齿轮上应用研究[J].金属加工（热加工），2020（7）：22-23.

[12] JINOOP A N，PAUL C P，NAYAK S K，et al.Effect of laser energy per unit powder feed on Hastelloy-X walls built by laser directed energy deposition based additive manufacturing[J].Optics & Laser Technology，2021，138（6）：106845.

MW 20210624

（上接第8页）

控制软件：配合专用运动控制系统自主研发，配合进口伺服驱动器，引进全球先进品牌（比利时Materialise）的模型处理软件Magics和BP等。

综上所述，该装备在研发设计过程中已对大尺寸腔体、光学方案、洁净风场及复杂系统集成等方面进行了分析，并将在调试过程中对上述设计进行验证和总结，并且依托该型号设备，可提前对方案设计大尺寸高深宽比金属零部件3D打印装备的部分结构和功能进行验证，降低本项目实施的风险。以上相关装备成功的研发试制经验，均体现了自主研发激光选区熔化成形工艺技术的可行性、稳定性和实用性。

4 结束语

中国是工业制造大国，正在向智能制造强国迈进。随着航空航天、军工制造、精密机械加工等高端领域的发展，国内对大尺寸工件的金属3D打印需求越来越大，具有自主知识产权的国产化装备正在逐步替代进口装备。但是，面对国际相关装备技术和加工工艺水平，国产装备的研发和应用刚起步，仍存在一定差距。因此，尽快提升、完善大尺寸金属3D打印制造装备激光加工工艺技术水平，对实现国产整机装备应用的实用化、规模化有着重要的意义。

参考文献：

[1] 巩水利.先进激光加工技术[M].北京：航空工业出版，2017.

[2] 唐洪奎，卓君，马宽，等.航空航天钛合金结构件增材制造技术[J].金属加工（热加工），2020（8）：14-17.

[3] 杨永强，王迪.激光选区熔化3D打印技术[M].武汉：华中科技大学出版社，2019.

[4] 魏青松，宋波，文世峰，等.金属粉床激光增材制造技术[M].北京：化学工业出版，2021.

MW 20210624