激光选区熔化成形装备的发展现状与趋势

王泽敏，黄文普，曾晓雁
（华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074）

摘要：激光选区熔化成形是最有前景的增材制造技术之一，近些年来激光选区熔化成形装备得到了迅猛发展。针对激光选区熔化成形尺寸偏小、成形精度偏低等问题，重点介绍了大尺寸、高精度激光选区熔化成形装备的发展现状，综述了使用长焦距 *f-θ* 场镜、振镜移动和多光束拼接成形等大尺寸成形方法以及采用短焦距 *f-θ* 场镜+低功率激光器和增减材复合制造等高精度成形方法，对各方法的原理和特点进行了阐述。最后，从装备研发、成形质量控制、软件开发、标准体系建立等方面对激光选区熔化成形技术的发展进行了展望。

关键词：增材制造；激光选区熔化；大尺寸；高精度
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.004
中图分类号：TG665 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2019)04-0021-08

Status and Prospect of Selective Laser Melting Machines

WANG Ze-min, *HUANG Wen-pu*, *ZENG Xiao-yan*
(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: Selective laser melting (SLM) is one of the most promising additive manufacturing technologies. SLM machine has developed rapidly in recent years. Aiming at small forming size and unsatisfactory accuracy of SLM, this review mainly introduces the status of SLM machines with large forming size and high accuracy. Three approaches to expand the forming size, including using a *f-θ* lens with a long focal length, moving the scanner and multi-beam scanning, and two approaches to improve the forming accuracy, including adopting a low-power laser and a *f-θ* lens with a short focal length and additive/subtractive hybrid manufacturing, is summarized. The principles and characteristics of these approaches are discussed. Finally this paper gives outlook for the future development of selective laser melting from equipment development, forming quality control, software development and the establishment of standard system.
KEY WORDS: additive manufacturing; selective laser melting; large forming size; high accuracy

金属增材制造（Metal Additive Manufacturing，简称 MAM）是近 30 年来逐步发展起来的一项先进制造技术，是一种采用激光、电子束和电弧等高能束，以金属粉末或丝材为原材料，基于数字化模型，通过逐层堆积的方式而最终成形三维零件的成形方法[1—2]。与传统制造工艺相比，金属增材制造技术无需模具即可直接成形复杂形状构件，材料选择广泛，利用率高，同时可有效缩短产品设计与制造周期[3—5]。相对于其他能量源，激光增材制造技术具有成形精度高、构件性能优良、材料适应性广等优点，是目前金属增材制造领域的常用加工方法，其中发展最为迅速、应用前景最为广泛的是激光选区熔化成形（Selective Laser Melting，简称 SLM）技术[6—7]。目前针对 SLM 的研究主要集中在粉末制备、成形工艺和成形装备等方面，而装备是其他研究的基础与载体[8]。受光学元器件的限制，目前 SLM 装备的成形尺寸偏小，成

收稿日期：2019-06-19
作者简介：王泽敏（1974—），男，博士，教授，主要研究方向为激光选区熔化成形。

形效率偏低，无法满足航空航天等领域大尺寸构件的成形[9]。另一方面，尽管 SLM 成形构件具有较高的尺寸精度与表面粗糙度，但与传统机加工等方法相比还有一定差距，多数情况下仍需后处理方可使用[10]，因此，大尺寸、高精度是目前 SLM 装备发展的必然趋势。基于上述情况，文中重点介绍了大尺寸、高精度 SLM 装备的研究现状，并对 SLM 技术未来的发展进行了展望。

1 SLM 技术原理及装备发展

SLM 的成形原理如图 1 所示。首先在成形基板上预铺一层粉末，根据成形构件三维 CAD 模型的分层切片信息，扫描振镜带动激光束按照软件规划的路径快速扫描、熔化粉末，单层成形结束后，基板下降一个层厚的高度，重新铺粉进行下一层的加工，重复上述过程直至整个零件成形结束[1]。

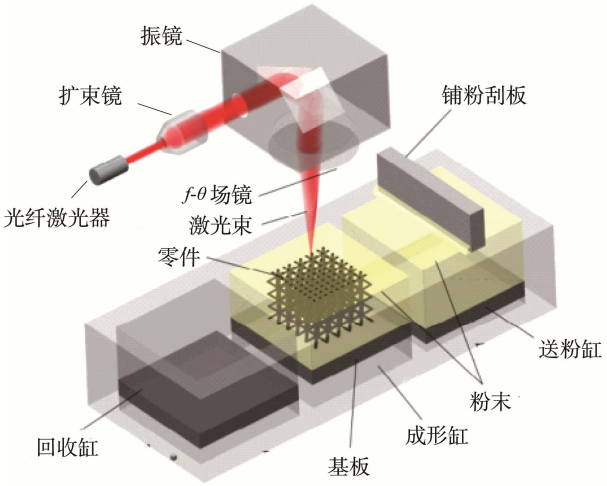


图 1 SLM 成形原理
Fig.1 Schematic diagram of SLM

由于铺粉层厚精确可调，所采用的光斑直径仅有数十微米，在静态粉末和辅助支撑的协助下，采用 SLM 技术能够成形几乎任意复杂的构件，并有良好的尺寸精度与表面粗糙度；同时由于成形过程中更快的冷却速率，总体上 SLM 成形构件的力学性能更优[11—13]。基于以上优势，SLM 技术已成为当前研究最为深入、应用最为广泛的增材制造技术，其加工范围几乎涵盖了所有常见金属材料，包括铁基合金[14—15]、镍基合金[16—17]、钛基合金[18—19]、铝基合金[20—21]和其他多种合金[22—23]，在航空航天、医疗、模具、汽车等领域已得到成功应用[24—26]。

激光选区熔化成形技术最早由德国弗劳恩霍夫激光技术研究所于 1995 年提出，2003 年德国 MCPHEK 公司生产出世界上第一台 SLM 成形装备。随着 SLM 技术的日益成熟和应用的日渐广泛，出现了一大批 SLM 装备制造厂商，德国 EOS、SLM solutions、Concept Laser、英国 Renishaw 和美国 3D systems 是其中的代表，其技术水平处于世界前列[27—28]。国内装备行业起步较晚，但发展迅速，上海探真、西安铂力特、杭州先临三维、湖南华曙高科、江苏永年等公司也已推出了一系列商业化 SLM 成形装备[28—29]。各厂商主流商品化 SLM 装备及关键技术参数如表 1 所示。

从表 1 可以看到，目前主流 SLM 装备的成形幅面一般在 250 mm×250 mm 左右，尺寸偏小，这主要是受到聚焦光学系统的限制。如图 1 所示，SLM 装备的扫描光路主要由振镜与 f-θ 场镜构成，当扫描区域过大时，对于边缘位置，f-θ 场镜很难将焦点补偿到成形平面上，整个成形幅面内激光的均匀性无法得到保证，进而严重影响成形质量[28]，这使得装备的成形尺寸受到很大限制。由于成形尺寸偏小，成形效率偏低，目前的主流 SLM 装备只能满足大约 30%的中小型复杂金属构件的制造需求，对于航空航天等领域诸多大型复杂精密构件（如涡轮泵叶轮、燃烧室壳体等），现有 SLM 装备还无法满足要求。另一方面，尽管小的层厚和光斑直径有利于获得高精度的 SLM 成形构件，但由于 SLM 成形过程中的粉末飞溅、粘附和台阶效应等因素，使得表面粗糙度往往难以保证。同时由于熔池极快的冷却速率，热应力导致的变形也不容忽视[30]，加之软件分层切片误差与装备误差，SLM 成形构件的尺寸精度并不理想。而航空航天等领域对构件的精度要求极为苛刻，例如某航空发动机整体叶轮的叶片表面粗糙度

表 1 内外厂商主流 SLM 装备的关键参数
Tab.1 Key parameters of main SLM machines at home and abroad

厂商	型号	成形尺寸/mm	激光器功率/W	沉积效率/($cm^3 \cdot h^{-1}$)
EOS	M290	250×250×325	200/400	20
Concept Laser	M2 cusing	250×250×280	200/400	35
Reneshaw	AM250	250×250×300	400	20
3D systems	ProX DMP 300	250×250×300	500	—
上海探真	TS300A	250×250×300	500	35
西安铂力特	BLT-S300	250×250×400	500	—
杭州先临三维	EP-M250	250×250×300	200/400	—
湖南华曙高科	FS271M	275×275×320	500	20

Ra 要求为 0.3~0.5 μm，加工精度要求±50 μm，叶片边缘位置要求±20 μm，目前 SLM 成形构件的精度水平（表面粗糙度 *Ra* 为 5~30 μm，尺寸精度为±50 μm）还难以满足此类应用需求，需要进行机加工、磨粒流、电化学抛光等后处理手段[31]。面对当前存在的问题，大尺寸、高精度 SLM 成形装备的研制将是未来重要的发展方向。

2　大尺寸 SLM 装备的发展现状

为满足大尺寸构件的制造需求和提高成形效率，国内外 SLM 装备制造商已推出了一系列大尺寸 SLM 成形装备（见图 2），并得到了成功应用（见图 3）。其实现方法归纳起来主要有 3 种：使用长焦距 *f-θ* 场镜、振镜移动和多光束拼接成形。

2.1　使用长焦距 *f-θ* 场镜

该方案的原理如图 4 所示。成形投影面的大小（扫场范围）受到振镜摆动角度及焦距大小的共同作用，其中 L 和 L' 为扫场范围边长，f 和 f' 为对应的焦距大小，可以得到以下关系：

$$L'f'=L/f \tag{1}$$

扫场边长 L 与焦距 f 呈正比，因此可以通过使用长焦距 *f-θ* 场镜的方式实现扫场范围的提升。而长焦距会带来聚焦后光斑直径的增大，因此，在使用长焦距 *f-θ* 场镜时，往往需要采用高功率激光输出以弥补大光斑带来的激光功率密度损失。

以德国 EOS 公司的 M400 为例，该装备使用单台 1000 W 激光器，可提供的最大成形尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm。然而，该项成形技术是在高功

a EOS公司M400　　b Concept Laser公司X Line 1000R　　c SLM solutions公司SLM 800

d Reneshaw公司RenAM 500Q　　e 上海探真TS500　　f 铂力特BLT-S400

图 2　国内外研制的部分大尺寸 SLM 装备

Fig.2 Some SLM machines with large forming size at home and abroad

a EOS公司所成形的涡轮盘　　b Concept Laser公司所成形的复杂内流道零件

图 3　大尺寸 SLM 成形构件

Fig.3 Large-scale SLM parts

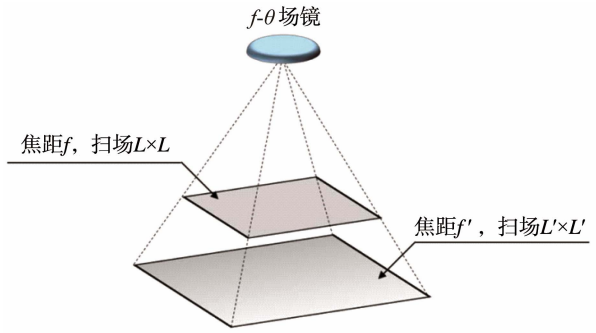


图 4 使用长焦距 *f-θ* 镜扩大成形区域的原理

Fig.4 Schematic diagram of expanding the forming size by using a *f-θ* lens with a long focal length

率、大光斑、大单层加工层厚的基础上[31—32]，在一定程度上会降低成形件的成形精度及表面粗糙度，使得该项 SLM 成形技术的应用仍具有一定的局限性。

2.2 振镜移动

该成形思路通过扫描振镜在水平面上进行分区域式移动，扩展投影面积，实现大幅面的成形加工，其成形原理如图 5 所示。该成形方案采用分区域扫描的策略，理论上甚至可以无限扩大成形投影面积。Concept Laser 公司的 X Line 1000R 是此类方法的代表，其成形尺寸可以达到 630 mm×400 mm×500 mm。

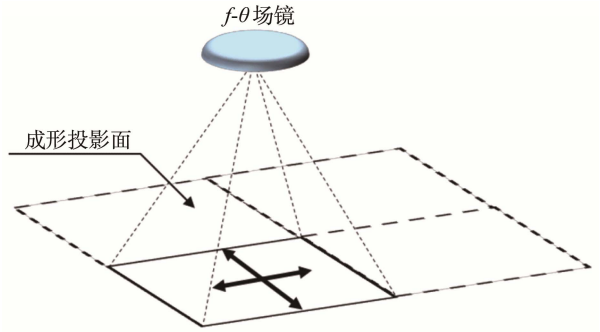


图 5 振镜移动扫描原理

Fig.5 Schematic diagram of the mobile scanner

该方案需安装直线电机及导轨以带动振镜运动，对机床的精度要求高。由于仅使用单光束成形，振镜的运动响应速度慢，依靠该方案成形大尺寸构件时效率偏低，难以满足当前 SLM 成形大尺寸金属构件或者小型构件小批量生产的迫切需求。同时该方案使同一扫描层不同位置的凝固结束时间相差很大，导致整个成形幅面的温度场很不均匀，由此将带来成形质量与变形问题。

2.3 多光束拼接成形

该方法在单光束成形的基础上，通过增加扫描振镜和激光器的数量，成形过程中各激光器分区域同时工作，使得装备成形尺寸得到成倍的增加，同时可有效提高成形效率（见图 6）。2011 年，华中科技大学武汉光电国家研究中心在国际上率先提出多光束 SLM 解决大尺寸金属构件成形的技术方案，并于 2014 年开发出国际上首台大尺寸四光束激光选区熔化成形装备，成形尺寸达到了 500 mm×500 mm×530 mm。基于该思想，国内外 SLM 装备制造厂商陆续开发出类似的多光束 SLM 装备，相关情况列于表 2。不难看出，多光束 SLM 装备的主流仍然是使用千瓦以下级别的激光器，并配套使用 2/4 台套扫描系统，因此，理论上讲，基于多光束、多振镜分区域拼接成形技术可以在维持现有成形精度的情况下实现成形尺寸及效率的大幅同步提升，因此多光束拼接是大尺寸 SLM 装备发展的主流，但随着扫描系统数量的增加，相应的系统控制和软件开发难度将逐渐增大。

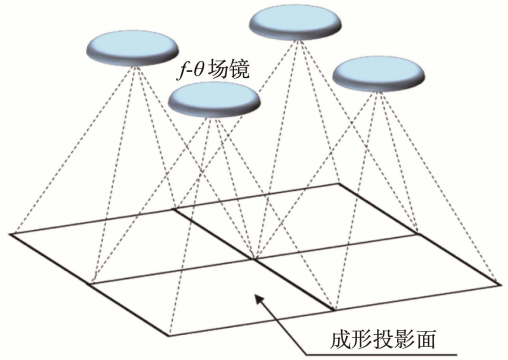


图 6 多光束扫描原理

Fig.6 Schematic diagram of multi-beam selective laser melting

表 2 多光束 SLM 装备关键技术参数

Tab.2 Key parameters of multi-beam SLM machines

厂商	型号	成形尺寸/mm	激光器功率/W	沉积效率/($cm^3 \cdot h^{-1}$)	推出时间
华中科技大学	SLM500	500×500×530	4×500	80	2014/10
Concept Laser	X line 2000R	800×400×500	2×1000	120	2015/8
EOS	M 400-4	400×400×400	4×400	100	2016/8
SLM solutions	SLM 800	500×280×850	4×400/700	171	—
Reneshaw	RenAM 500Q	250×250×350	4×500	150	—
上海探真	TZ-SLM500A	500×500×1000	4×(500/1000)	200	2018/2
西安铂力特	BLT-S400	250×400×400	2×500	—	—
江苏永年	YLM-1000	1000×800×400	4×500	—	—
湖南华曙高科	FS421M	420×420×420	2×500	—	—

3　高精度 SLM 装备的发展现状

3.1　短焦距 *f*-*θ* 场镜+低功率激光器

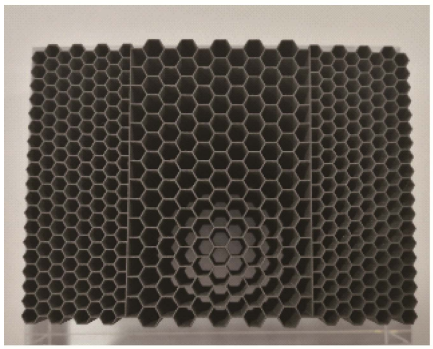
为提高成形构件的精度，方法之一是采用短焦距，减小聚焦光斑直径，同时采用低功率光纤激光器，进一步控制光斑大小，并保证光束质量和激光的稳定输出。通过获得细小的光斑，同时配合小的层厚，可在一定程度上提高 SLM 构件的成形精度，减少后处理加工量，从而节省时间和成本，适用于复杂精细结构的成形（见图 7）。EOS 的 M100、Concept Laser 的 Mlab cusing、3D systems 的 ProX DMP 100、上海探真的 TZ-SLM120、西安铂力特的 BLT-A100、湖南华曙高科的 FS121M 等装备均采用了此方法（见表 3）。而这种方法带来的问题是成形尺寸较小，且成形效率较低。另一方面，尽管成形精度可以达到较高水平（精度±50 μm，*Ra*=5 μm），但仍无法满足涡轮叶片等精密构件的苛刻要求。

表 3　高精度 SLM 装备关键技术参数
Tab.3 Key parameters of high-accuracy SLM machines

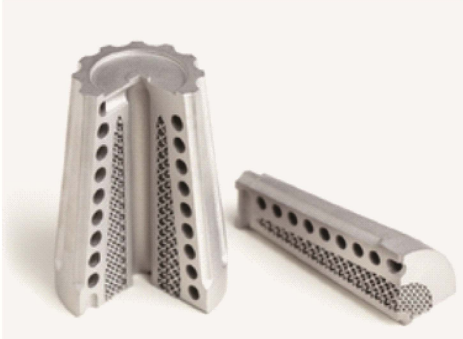
厂商	型号	成形尺寸/mm	激光器功率/W
EOS	M100	*Φ*100×95	200
Concept Laser	Mlab cusing	90×90×80	100
3D systems	ProX DMP 100	100×100×80	100
上海探真	TZ-SLM120	*Φ*120×100	200/500
西安铂力特	BLT-A100	100×100×100	200
湖南华曙高科	FS121M	120×120×100	200

a EOS公司所成形的换热器

b Concept Laser公司所成形的金属义齿



c 上海探真所成形的格栅结构



d 西安铂力特所成形的随形水路

图 7　SLM 成形的高精度构件
Fig.7 High-accuracy SLM parts

3.2　增减材复合制造

增减材复合制造是一种从产品设计、软件控制设计到零件加工的全流程中，将增材制造和减材制造相结合的一项新技术，通过增材成形复杂精密高性能构件，通过减材保证良好的尺寸精度和表面质量，很好地综合了两者的优势[33—34]。国外一些高端数控机床制造商凭借其自身技术优势，已推出了商业化的增减材复合制造装备。现有增减材复合制造方案主要分为两类，一类是将激光熔覆沉积技术和数控加工相结合，如德国德玛吉公司的 LASERTEC 4300 3D hybrid 型和 Hamuel Reichenbacher 公司的 HYBRID HSTM 1500 型装备；另外一类是将激光选区熔化成形技术与数控加工技术结合，以日本松浦公司和沙迪克公司为代表。2013 年，日本松浦公司推出了世界上首台 SLM/数控铣削复合制造装备 LUMEX Avance-25（见图 8a）。沙迪克公司随后于 2014 年推出了 OPM250L 型增减材装备，2017 年又推出了 OPL350L 型装备（见图 8b）。该类装备特别适用于高端金属模具的制造，能够解决复杂冷却流道的成形难题，同时保证内壁光

滑。例如，通过增减材复合制造成形管状模芯（见图9），可直接成形一般机床无法加工的内部螺旋结构，同时可将零件的制造周期从传统的上千小时缩短至59 h。

a 日本松浦公司LUMEX Avance-25

b 日本沙迪克公司OPL350L

图 8 SLM/数控铣削复合制造装备
Fig.8 Hybrid additive/subtractive machines combining SLM with machining

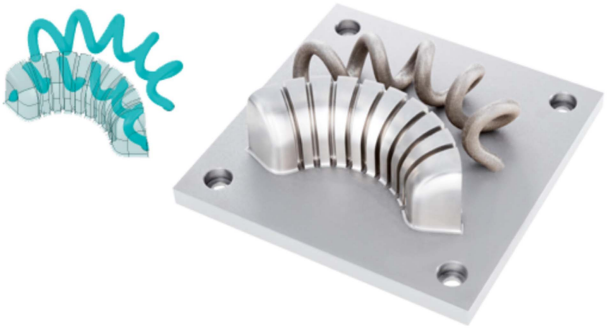


图 9 日本沙迪克公司所成形的管状模芯
Fig.9 Tubular mold core produced by Sodick

4 SLM 技术存在的问题与展望

目前，SLM 技术正迅速发展，并日渐成熟，已在航空航天等领域获得了初步应用，但相对于传统加工工艺，SLM 技术还存在诸多局限。为实现 SLM 技术的进一步推广应用，还有许多问题有待解决。

1）目前大尺寸 SLM 装备多采用光束拼接的方法，如何保证光束拼接区域与其他成形区域组织与性能的一致性，如何保证良好的成形质量，如何通过调整图形设计、工艺参数、扫描策略等控制大尺寸成形带来的应力与变形，这些问题都有待进一步研究。

2）与国外相比，国内增减材复合制造技术还相对滞后，国内数控加工产业大而不强，长期处于中低端，国内 SLM 装备厂商尽管发展较快，但与国外相比还有较大差距。机床装备制造商与 SLM 装备厂商应加强合作，优势互补，争取取得突破性的成果。

3）由于 SLM 成形复杂的物理冶金过程和逐层堆积的特点，SLM 构件的成形质量难以保证，因此，需要加强对 SLM 在线检测领域的研究，建立在线的成分、缺陷和变形检测系统，通过闭环控制，保证构件的成形质量和组织与性能的均匀性。

4）国内对 SLM 技术的研究主要集中在成形工艺和硬件系统构建，软件开发领域的研究相对薄弱，与国外相比还存在很大差距，而工艺参数控制、扫描路径优化、多光束扫描控制、在线检测等都离不开相关软件的支持，因此该方面的研究亟待加强。

5）SLM 标准体系尚未建立，应针对 SLM 成形，建立材料、工艺、装备等方面的相关标准。同时开展 SLM 成形构件检测的理论与方法研究，建立相应的检测和认证体系，推动 SLM 技术的产业化和工程化应用。

参考文献：

[1] 马明明. 两种典型金属零部件激光增材制造技术基础比较研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2016.
MA Ming-ming. A Comparative Study on Fundamentals of Two Typical Laser Additive Manufacturing Technologies of Metallic Components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[2] TROSCH T, STRÖßNER J, VÖLKL R, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Inconel 718 Compared to Forging and Casting[J]. Materials Letters, 2016, 164: 428—431.

[3] 周加永, 纪平鑫, 莫新民, 等. 3D 打印技术在军事领域的应用及发展趋势[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 217—219.
ZHOU Jia-yong, JI Ping-xin, MO Xin-min, et al. The Application and Development Trend of 3D Printing Technology in Military Field[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(6): 217—219.

[4] 赵剑峰, 马智勇, 谢德巧, 等. 金属增材制造技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 675—683.
ZHAO Jian-feng, MA Zhi-yong, XIE De-qiao, et al. Metal Additive Manufacturing Technique[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014,

46(5): 675—683.

[5] 郭志飞, 张虎. 增材制造技术的研究现状及其发展趋势[J]. 机床与液压, 2015, 43(5): 148—151.
GUO Zhi-fei, ZHANG Hu. Research Status Quo and Development Trend of Additive Manufacturing Technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(5): 148—151.

[6] POPOVICH V, BORISOV E, POPOVICH A, et al. Functionally Graded Inconel 718 Processed by Additive Manufacturing: Crystallographic Texture, Anisotropy of Microstructure and Mechanical Properties[J]. Materials & Design, 2017, 114: 441—449.

[7] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 517(22): 16—22.
ZHANG An-feng, LI Di-chen, LIANG Shao-duan, et al. Research Progress of Laser Material Addition Technology for High Performance Metal Parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 517(22): 16—22.

[8] 李昂, 刘雪峰, 俞波, 等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 159—173.
LI Ang, LIU Xue-feng, YU Bo, et al. Key Factors and Developmental Directions with Regard to Metal Additive Manufacturing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 159—173.

[9] LI F, WANG Z, ZENG X. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Fabricated by Multi-Laser Beam Selective Laser Melting[J]. Materials Letters, 2017, 199: 79—83.

[10] DUVAL-CHANEAC M S, HAN S, CLAUDIN C, et al. Characterization of Maraging Steel 300 Internal Surface Created by Selective Laser Melting (SLM) after Abrasive Flow Machining (AFM)[J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 359—362.

[11] PRASHANTH K G, SCUDINO S, KLAUSS H J, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Al–12Si Produced by Selective Laser Melting: Effect of Heat Treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 590: 153—160.

[12] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D, et al. Microstructural and Mechanical Approaches of the Selective Laser melting Process Applied to a Nickel-Base Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 446—451.

[13] AMATO K N, GAYTAN S M, MURR L E, et al. Microstructures and Mechanical Behavior of Inconel 718 Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Acta Materialia, 2012, 60(5): 2229—2239.

[14] GUAN K, WANG Z, GAO M, et al. Effects of Processing Parameters on Tensile Properties of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel[J]. Materials & Design, 2013, 50: 581—586.

[15] MURR L E, MARTINEZ E, HERNANDEZ J, et al. Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(3): 167—177.

[16] WANG Z, GUAN K, GAO M, et al. The Microstructure and Mechanical Properties of Deposited-IN718 by Selective Laser Melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 513: 518—523.

[17] MCLOUTH T D, BEAN G E, WITKIN D B, et al. The Effect of Laser Focus Shift on Microstructural Variation of Inconel 718 Produced by Selective Laser Melting[J]. Materials & Design, 2018, 149: 205—213.

[18] YU H, YANG J, YIN J, et al. Comparison on Mechanical Anisotropies of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy and 304 Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 695: 92—100.

[19] VRANCKEN B, THIJS L, KRUTH J P, et al. Heat Treatment of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 177—185.

[20] LI X P, WANG X J, SAUNDERS M, et al. A Selective Laser Melting and Solution Heat Treatment Refined Al-12Si Alloy with a Controllable Ultrafine Eutectic Microstructure and 25% Tensile Ductility[J]. Acta Materialia, 2015, 95: 74—82.

[21] KEMPEN K, THIJS L, VAN HUMBEECK J, et al. Processing AlSi10Mg by Selective Laser Melting: Parameter Optimisation and Material Characterisation[J]. Materials Science and Technology, 2015, 31(8): 917—923.

[22] ZHANG D Q, LIU Z H, CAI Q Z, et al. Influence of Ni Content on Microstructure of W-Ni Alloy Produced by Selective Laser Melting[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 45: 15—22.

[23] LI S, HASSANIN H, ATTALLAH M M, et al. The Development of TiNi-Based Negative Poisson's Ratio Structure Using Selective Laser Melting[J]. Acta Materialia, 2016, 105: 75—83.

[24] SEABRA M, AZEVEDO J, ARAÚJO A, et al. Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aerospace Componentes[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 1: 289—296.

[25] HALLMANN S, GLOCKNER P, DANIEL C, et al. Manufacturing of Medical Implants by Combination of Selective Laser Melting and Laser Ablation[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2015, 2(3): 124—134.

[26] FORTUNATO A, LULAJ A, MELKOTE S, et al. Milling of Maraging Steel Components Produced by Selective Laser Melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5/6/7/8): 1895—1902.

[27] POPRAWE R, HINKE C, MEINERS W, et al. SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design[J]. Advances in Production Technology, 2015: 49—65.

[28] 宋长辉，翁昌威，杨永强，等. 激光选区熔化装备发展现状与趋势[J]. 机电工程技术, 2017, 46(10): 1—5.
SONG Chang-hui, WENG Chang-wei, YANG Yong-qiang, et al. Development Status and Trend for the Equipment of Selective Laser Melted[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(10): 1—5.

[29] 杨泽云，杜青泉，门正兴，等. 激光选区熔化金属 3D 打印设备现状与发展趋势[J]. 大型铸锻件，2018(4): 46—48.
YANG Ze-yun, DU Qing-quan, MEN Zheng-xing, et al. Present Status and Development Trend of Selective Laser Melting Metal 3D Printing Equipment[J]. Heavy Casting and Forging, 2018(4): 46—48.

[30] VORA P, MUMTAZ K, TODD I, et al. AlSi12 In-Situ Alloy Formation and Residual Stress Reduction Using Anchorless Selective Laser Melting[J]. Additive Manufacturing, 2015, 7: 12—19.

[31] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S, et al. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 271—278.

[32] BARTKOWIAK K, ULLRICH S, FRICK T, et al. New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 393—401.

[33] FLYNN J M, SHOKRANI A, NEWMAN S T, et al. Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools-Research and Industrial Developments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 79—101.

[34] HANSEL A, MORI M, FUJISHIMA M, et al. Study on Consistently Optimum Deposition Conditions of Typical Metal Material Using Additive/Subtractive Hybrid Machine Tool[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 579—582.