

金属零件激光选区熔化技术的现状及进展

杨永强, 陈杰, 宋长辉, 王迪, 白玉超

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

摘要 激光选区熔化(SLM)是利用高能激光束将设计好的二维截面上的金属合金粉末熔化,由下而上逐层打印实体零件的一种金属增材制造(AM)技术,具有尺寸精度高、表面质量好、致密度高和材料浪费少的优势,已经成为AM技术在金属零件成型领域中的重要技术之一。阐述了SLM技术的原理和研究现状,总结了其在航空航天、医学、汽车、模具等方面的应用现状,并展望了其未来的发展趋势。

关键词 激光技术; 金属增材制造; 激光选区熔化; 粉末材料; 轻量化设计; 免组装机机构

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011401

Current Status and Progress on Technology of Selective Laser Melting of Metal Parts

Yang Yongqiang, Chen Jie, Song Changhui, Wang Di, Bai Yuchao

School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract The selective laser melting (SLM) is a metal additive manufacturing (AM) technique in which a high-energy laser beam is used to melt the metal alloy powder on the designed two-dimensional cross-sections and solid parts are printed layer by layer from bottom to top. It has the advantages of high dimensional accuracy, good surface quality, high density and little material waste, and has been developed into one of the key AM technologies in the metal part forming field. The principle and research status of the SLM technology are introduced, and its applications in aerospace, medicine, automobile, mold and other aspects are summarized. In addition, its future development trend is prospected.

Key words laser technique; metal additive manufacturing; selective laser melting; powder materials; lightweight design; non-assembly mechanisms

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

增材制造(AM)技术通过材料逐层累加的方式直接制造实体零件,能够将计算机辅助设计(CAD)三维软件中设计好的实体三维模型直接打印成型,相比传统加工工艺其更加方便快捷。AM技术过去常常被称为快速原型^[1](RP),受材料、工艺及设备性能的限制,其成型实体的强度和精度达不到工业应用的要求,因此成型实体只能用于制造物理原型件。但近十

年来AM技术已经迅速发展成熟,并且在航空航天、医学、汽车、模具、珠宝首饰、文化创意等领域有了广泛的应用,具有高生产效率、短加工时间、低加工成本及个性化定制的特点,在工业制造中能够发挥巨大的作用。

激光选区熔化(SLM)技术是金属AM领域的重要技术之一,它采用高能密度激光器作为热源,激光光斑集中在 $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 的范围内,选择熔化颗粒直径在 $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 间的球形金属粉末,可以得

收稿日期: 2017-07-27; 收到修改稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51705160)、中央高校基本科研业务费专项(2017BQ072)、广东省科技计划项目(2014A080802002, 2017A030313271)、广州市重大专项(201704020118)

作者简介: 杨永强(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料加工和快速成型制造方面的研究。

E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

到高自由度的复杂金属构件,生成近乎 100% 的高致密度零件,表面粗糙度可达 $20\sim 30\ \mu\text{m}$,尺寸精度可达 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 。本文阐述了 SLM 技术的国内外发展现状,SLM 技术涉及材料方面的研究进展,以及 SLM 技术在各个领域的应用,最后展望了 SLM 技术的未来发展趋势。

2 金属 AM 技术分类

金属 AM 技术按设备系统可分为粉床系统和同步送粉(丝)系统。采用粉床系统的技术主要包括 SLM 和电子束成型 (EBM),虽然两者都使用粉床系统,但是热源的不同使其加工的金属零件物理属性各有特点^[2];而采用同步送粉(丝)系统的技术则包括激光熔覆沉积 (LCD),其在制造空心复杂零件和多金属材料结合零件上更具优势^[3]。

2.1 SLM

SLM 技术是利用高能量激光束将三维模型切片后的二维截面上的金属合金粉末熔化,由下而上逐层打印实体零件的一种 AM 方法^[4]。SLM 技术利用 CAD 三维软件设计三维模型,并导出为切片软件能够识别的文件格式;对三维模型进行切片操作并添加支撑和分层处理,得到三维模型的截面轮廓数据;利用路径规划软件对轮廓数据进行扫描路径处理,将路径规划后的数据导入 SLM 设备中,工控机按照每层轮廓的扫描路径,控制激光束选区逐层熔化金属合金粉末,逐层堆叠成致密的三维金属零件实体,其过程示意图如图 1 所示。

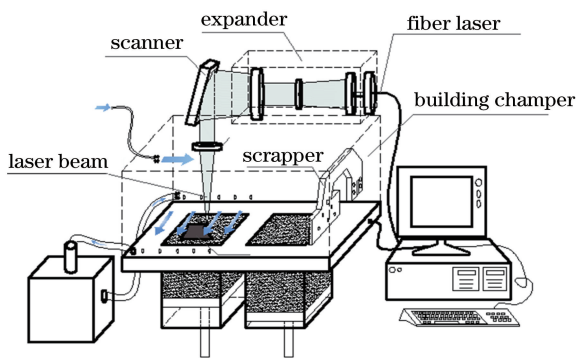


图 1 SLM 过程原理图

Fig. 1 Principle diagram of SLM processing

SLM 技术的优势在于所制造的金属零件具有较高的尺寸精度^[5]和较好的表面质量以及近乎 100% 的致密度,且能够自由设计,相比传统工艺其基本不需要后续的再加工,能大大缩短加工周期,避免材料的浪费,减少昂贵的模具费用^[6]。其局限性在于:1) 由于 SLM 技术正处于发展期,设备组件成

本高,无法实现批量生产;2) 加工所需要的金属粉末因为标准不统一,粉末质量参差不齐,价格也较为昂贵;3) 随着对 SLM 工业应用要求的提高,提升成型金属零件的力学性能、尺寸精度、表面粗糙度、拉伸性能和抗疲劳强度等成为一大难题。

2.2 LCD/EBM 技术

LCD 技术利用数控机床按预先编好程序驱动激光头移动,激光在基板上聚焦并形成熔池,金属粉末通过送粉器与稀有气体同轴送到激光光斑处,粉末迅速熔化成液态并自然冷却凝固。随着激光头和工作台的移动,叠加沉积出与切片图形形状一样且厚度一致的沉积层,然后工作台下落,重复以上步骤直至逐层沉积出 CAD 三维软件设计的实体三维零件。LCD 技术使用造价昂贵的高功率激光器,并且成型时热效应很大,对尺寸精度影响较大,不易制造悬臂结构件。

EBM 的技术原理和 SLM 的类似,采用的热源是电子束,工作时在粉末烧结前需预热,因此金属粉末会有假烧结状态,故成型结束后需要通过喷砂去除未烧结粉末。但是,有些残留在内部结构的粉末无法去除,造成 EBM 成型的工件表面粗糙度较大,尺寸精度比 SLM 的低。

3 SLM 技术的典型设备和研究单位

3.1 SLM 国内外典型设备

国内典型厂商及设备有西安铂力特的 BLT 系列、北京易加三维的 EP 系列、江苏永年的 YLM 系列、广州瑞通激光的 D280、珠海西通的 Riverbase 500 等,相比国外成熟的设备机型,国内设备在成型精度和过程控制上有较大差距。

德国在 SLM 设备研发上具有国际领先地位。德国 EOS GmbH 公司最新研发的 SLM 设备 EOS M290 可将成型金属零件的表面精度提高到传统铣削水平,加工的最大尺寸为 $250\ \text{mm}\times 250\ \text{mm}\times 325\ \text{mm}$,光纤激光器功率为 400 W,扫描速度可达 $7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,成型精度达 $6\ \mu\text{m}$,具有较高的成型效率。德国 Concept Laser 公司最近推出的 Concept X line 2000R 金属快速成型机设备,成型尺寸为 $800\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$,使用 1 kW 的光纤激光器,扫描速度为 $7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。德国 SLM Solutions GmbH 公司的 SLM 500 HL 设备,成型尺寸为 $500\ \text{mm}\times 280\ \text{mm}\times 325\ \text{mm}$ 。其他国家的 SLM 设备厂商主要有英国 Renishaw 公司,其新设备 AM250 的成型尺寸为 $250\ \text{mm}\times 250\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$,扫描速度为 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,激光器功率有 200 W 和 400 W 两种选择。此外,还

有美国 3D Systems 公司、日本 Sodick 公司等。

3.2 国内外主要研究单位

新加坡南洋理工大学的 Loh 等^[7]对 SLM 工艺过程的研究较深入,比利时鲁汶大学的 Kruth 等^[8]对 SLM 的理论研究较深入,法国贝尔福-蒙贝利亚技术大学的 Kang 等^[9]对 SLM 的微观机理研究颇为深入,此外,还有德国亚琛工业大学的 Buchbinder 等^[10]、德国综合纳米科学研究所的 Prashanth 等^[11]、英国利物浦大学的 Seiffert 等^[12]、英国埃克塞特大学的 Yan 等^[13]。

国内 SLM 领域的主要科研单位主要有华南理工大学^[14]、华中科技大学^[15]、南京航空航天大学^[16]、中国科学院^[17]、北京工业大学^[18]、北京航空工程制造研究所^[19]、南京理工大学^[20]等。

4 SLM 技术的材料分类

SLM 使用的金属粉末材料主要有铁基合金、铝合金、钛及钛合金、钴基合金、铜合金、镍基合金等材料,粉末的粒径大多为 $10\sim 45\ \mu\text{m}$,要求含氧量少,流动性好,具有较高纯度。

多数科研者采用商品化粉末材料,国外粉末主要供应厂商有山特维克(Osprey)、卡彭特(Carpenter)、英国 LPW 公司等;国内供应商主要有湖南顶力科技有限公司、长沙天九金属材料、无锡飞尔康、中航迈特、浙江亚通焊材、成都优材科技等。许多学者都重视 SLM 的材料研究,包括研究材料成分配比控制、激光与不同材料的相互作用、粉末材料在受热熔化和冷却凝固两个动态过程中的变化规律、熔池热效应对成型质量的影响、高温下材料的化学反应等。以下是关于 SLM 不同材料的研究进展总结。

4.1 铁基材料

Ankudinov 等^[21]在 SLM 研究中对铁和不锈钢粉

末进行了建模,分析了快速相变条件下多孔介质的不稳定热传递情况,得出了粉末孔隙率与热导率间的关系。Stasić 等^[22]在 316L 不锈钢中添加 NiB,用数码相机和扫描电子显微镜(SEM)对激光熔融样品的宏观和微观形貌进行了观察(如图 2 所示),用光学轮廓仪测量了其表面粗糙度(如图 3 所示),认为在 316 不锈钢粉末中添加 NiB 能够提高零件表面质量,其中 τ 为脉宽, E_p 为脉冲能量, f 为扫描频率, N 为每毫米距离上的光斑数。Čapek 等^[23]利用 SLM 技术成型了高度多孔(87% 体积分数)的 316L 不锈钢骨架(如图 4 所示),观察了微观结构(如图 5 所示),对其进行了拉伸、压缩、抗弯实验以研究其力学性能,分析了其表面化学成分对细胞生长的影响,认为 SLM 成型的高度多孔 316L 不锈钢骨架具有良好的力学性能和细胞相容性。

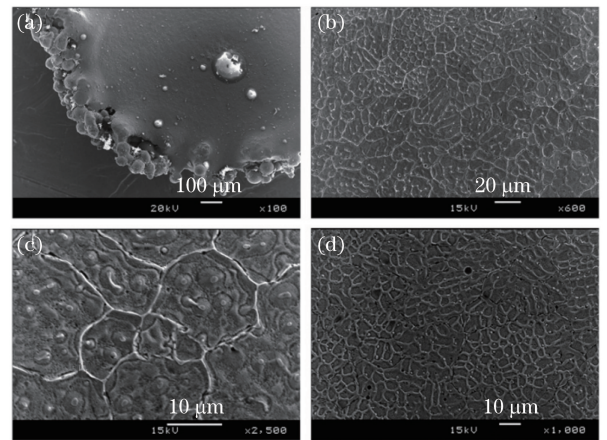


图 2 SLM 工艺成型的 316L-NiB 合金的 SEM 图

($f=20\ \text{Hz}$; $N=20$)。 (a) $\tau=2\ \text{ms}$, $E_p=3.47\ \text{J}$;

(b)(c) $\tau=2\ \text{ms}$, $E_p=2.45\ \text{J}$; (d) $\tau=4\ \text{ms}$, $E_p=4.06\ \text{J}$ ^[22]

Fig. 2 SEM images of 316L-NiB alloys formed by SLM process ($f=20\ \text{Hz}$; $N=20$). (a) $\tau=2\ \text{ms}$, $E_p=3.47\ \text{J}$;

(b)(c) $\tau=2\ \text{ms}$, $E_p=2.45\ \text{J}$;

(d) $\tau=4\ \text{ms}$, $E_p=4.06\ \text{J}$ ^[22]

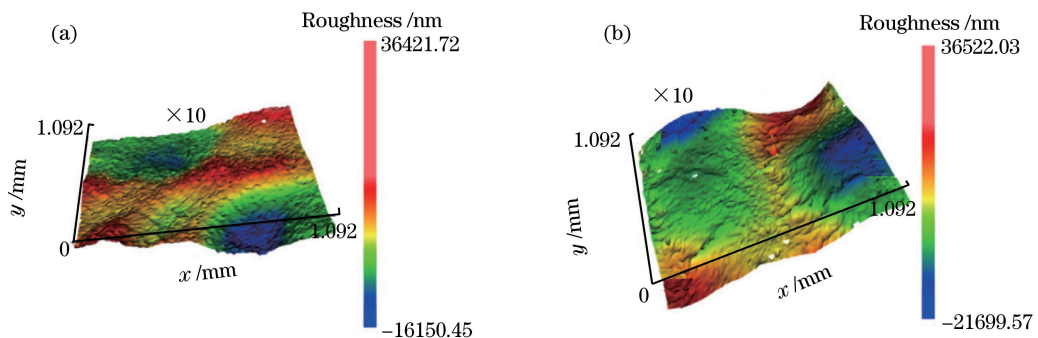
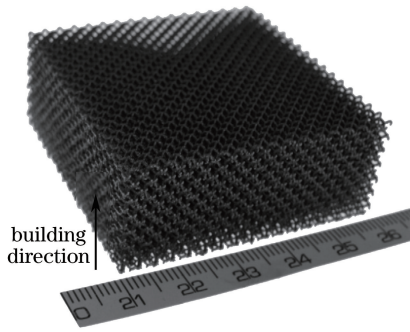
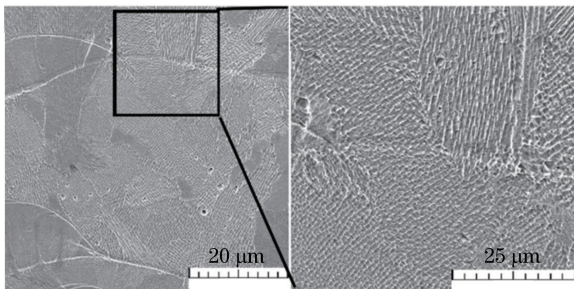


图 3 SLM 工艺成型的 316L-NiB 样品的表面轮廓。 (a) $f=20\ \text{Hz}$, $E_p=3.86\ \text{J}$, $\tau=3\ \text{ms}$; (b) $f=40\ \text{Hz}$, $E_p=1.58\ \text{J}$, $\tau=2\ \text{ms}$ ^[22]

Fig. 3 Surface profiles of 316L-NiB samples formed by SLM process. (a) $f=20\ \text{Hz}$, $E_p=3.86\ \text{J}$,

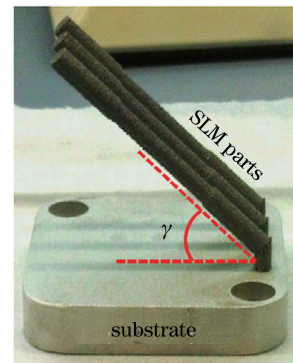
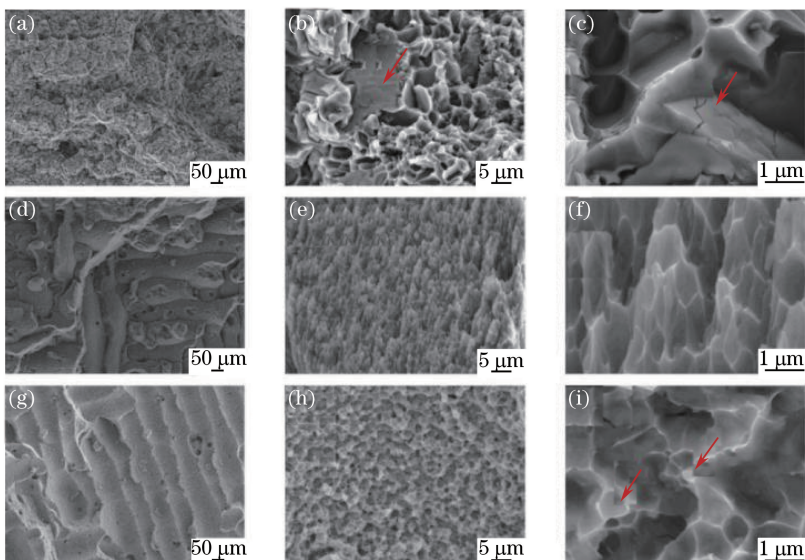
$\tau=3\ \text{ms}$; (b) $f=40\ \text{Hz}$, $E_p=1.58\ \text{J}$, $\tau=2\ \text{ms}$ ^[22]

图4 成型的多孔材料的宏观图^[23]Fig. 4 Macrograph of formed porous material^[23]图5 SEM下的晶粒组织^[23]Fig. 5 Grain structures under SEM^[23]

4.2 铝基材料

铝基材料主要有 Al-Si、Al-Cu、Al-Zn 和 Al-Mg 基合金等。SLM 成型铝基合金会受到反射率高、电导率高、粉末流动性差和易氧化的影响,相比传统铸造,SLM 成型的铝合金力学性能更好,通过简单的热处理可以得到更好的延展性。

华中科技大学的张虎等^[24]采用 SLM 成型了高强度 Al-Cu-Mg 合金,研究了激光束能量密度对 SLM 成型样件致密度的影响,利用热处理工艺提高了试样的力学性能。Casati 等^[25]采用 SLM 成型 2618 铝合金,通过对 SLM 过程进行热量分析,研究了热效应对样件微观结构和力学性能的影响。Anwar 等^[26]研究了 SLM 成型 AISi10Mg 过程中,激光扫描策略、零件摆放位置和稀有气体流速对零件质量的影响。Aboulkhair 等^[27]研究了扫描速度对 Al 合金的融合线、单轨迹等的影响。Prashanth 等^[28]对 SLM 成型的 Al-12Si(倾斜角 γ 在 30° 至 90° 之间,如图 6 所示)进行退火后处理,观察其微观结构和拉伸性能,发现适当的热处理可以极大改善 SLM 成型 Al-12Si 样件的力学性能和延展性,如图 7 所示。

图6 SLM 样品和基板之间的倾角 γ ^[28]Fig. 6 Inclination angle γ between SLM specimen and substrate^[28]图7 室温下拉伸实验后的断面形貌。(a)~(c)铸件;(d)~(f) SLM 以 90° 倾斜角制备的样品;(g)~(i) 723 K 条件下热处理的样品^[28]Fig. 7 Fracture morphologies after tensile tests at room temperature. (a)-(c) Cast; (d)-(f) samples formed by SLM with inclination angle of 90° ; (g)-(i) samples after heat-treatment at 723 K^[28]

4.3 钛基材料

钛合金具有密度低、弹性模量低、力学性能良好、耐腐蚀性好、生物相容性好的特点,是理想的医用人体植入材料之一。与 316L 不锈钢(210 GPa)和 Co-Cr 合金(240 GPa)相比,钛合金具有更低的杨氏模量(55~110 GPa),而骨头的杨氏模量为10~30 GPa。为了避免钛合金人体植入物对人体正常的骨头产生伤害,需要在钛合金中添加其他成分,医学方面的钛合金研究主要是 Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr、Ti-35Nb-7Zr-5Ta 和 Ti-24Nb-4Zr-8Sn 几种。由于钛金属价格昂贵,而传统钛金属制造工艺的材料利用率低,因此 SLM 是制造钛基零件的理想方法之一。Ti-6Al-4V 是目前 SLM 研究的主流,很多学者对其致密化机理、显微组织、力学性能进行了研究,此外 Ti-6Al-7Nb 也被广泛研究,纯钛的研究也有很多,但成本较高。

表 1 表面处理前后样品的 R_a , R_q 和 R_z [29]

Table 1 R_a , R_q and R_z of specimens before and after surface treatment [29]

$\gamma / (^{\circ})$	$R_a / \mu\text{m}$				$R_q / \mu\text{m}$				$R_z / \mu\text{m}$			
	Initial		Final		Initial		Final		Initial		Final	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
0	3.93	0.89	1.28	0.05	4.77	1.05	1.98	0.88	18.91	3.51	6.13	2.55
22.5	12.74	0.89	3.84	1.07	15.61	1.31	4.52	1.21	65.56	9.30	14.82	3.99
45	15.54	0.69	1.59	0.68	18.90	0.90	1.92	0.80	77.62	3.00	7.25	2.95
67.5	12.25	1.96	1.04	0.66	14.87	2.02	1.23	0.74	61.49	5.50	4.22	2.56
90	11.74	1.29	1.26	0.91	14.04	1.33	1.47	0.89	56.12	4.05	5.91	3.10
112.5	11.25	1.09	0.87	0.28	13.63	1.25	1.01	0.33	56.95	4.46	3.40	1.26
135	22.68	2.27	2.52	0.41	27.61	1.95	2.88	0.46	109.80	5.42	9.30	1.41

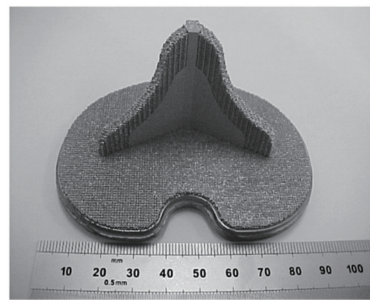
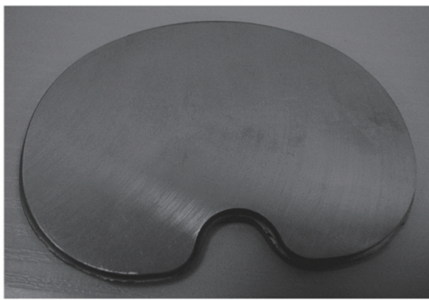


图 8 异种材料衬底上的多孔固体结构膝关节植入物 [31]

Fig. 8 Knee implants with porous solid structures deposited on dissimilar-material substrate [31]

4.4 钴基材料

SLM 技术成型的 Co-Cr 合金在牙科领域的应用较为广泛,与铸造和铣削加工工艺相比,SLM 成型件具有更小的内部孔隙度,边缘质量更好,与陶瓷间的粘合强度更大。与铸造件相比,SLM 成型零件的力学性能和电化学性能更好,并且单金属陶瓷冠的临床寿命与过去牙科中使用的 Au-Pt 合金相当。

Urlea 等 [29] 对 SLM 成型的 Ti-6Al-4V 进行表面后处理,采用电解抛光的方式获得了良好的表面粗糙度和精度,其表面处理前后的相关参数见表 1, R_a 、 R_q 、 R_z 分别为线性粗糙度的平均值、均方根、最大值。Edwards 等 [30] 对 SLM 成型的 Ti-6Al-4V 样品进行了拉伸实验,对材料的断裂韧性和疲劳裂纹扩展特性进行了研究。Fox 等 [31] 在铸造的钴铬合金底板上成型多孔钛和钽涂层,将多孔结构生物相容性好的特点与钴铬合金力学性能良好的特点相结合,在异种材料衬底上 SLM 成型了多孔结构膝关节植入物,如图 8 所示。肖振楠等 [32] 研究了热处理后的 SLM 成型 TC4 钛合金试件的组织和性能,发现钛合金试件的强度会随着其塑形的增加而有所降低,并且热处理减少了其内部的残余应力,降低了其变形开裂的几率。

Zhirnov 等 [33] 对 Co-Cr 合金 SLM 成型工艺进行了研究,发现扫描速度较低时成型不稳定,扫描速度过高则会发生球化现象,提出大功率激光器的最优扫描速度范围较宽、高导热材料的范围较窄。传统加工工艺成型特殊内部轮廓的硬质合金需要繁琐的工序,Uhlmann 等 [34] 利用 SLM 技术成型了 WC-Co 合金,取得了不错的效果。林辉等 [35] 比较了

SLM 成型医用钴铬钼合金和传统铸造 CoCrMo 的摩擦性能,发现 SLM 成型的 CoCrMo 合金摩擦系数要小于铸造的。

4.5 铜基材料

铜对激光的吸收情况不佳,故通过 SLM 技术成型铜合金较为困难。利用 SLM 成型特殊电连接器原件以及小批量铜合金组件是非常有研究前景的。

Ventura 等^[36]采用 SLM 技术成型了 Cu-4.3% Sn(4.3%为 Cu 的质量分数)合金金属零件(如图 9 所示),在 873 K 和 1173 K 两种温度条件下进行了热处理实验,热处理后零件屈服强度降低且延性显著增加。Gargarella 等^[37]将 SLM 方法用于成型 3 mm 直径的 Cu 基记忆合金棒(Cu-Al-Ni-Mn),样件的相对密度高于 92% 并且无裂纹,通过金相显微组织实验、SEM 实验以及 X 射线断层扫描设备观察了样件的孔隙特征,分析了成型质量。Scudino 等^[38]采用 SLM 方法成型青铜制品(Cu-10Sn,如图 10 所示),通过改变工艺参数优化其微观组织结构以提高力学性能。

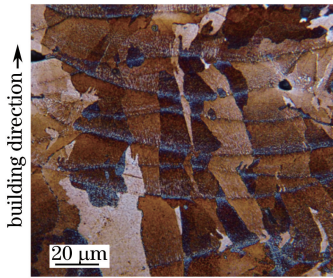


图 9 光学显微镜下蚀刻 Klemm's I 试剂的 Cu-4.3%Sn^[36]

Fig. 9 Cu-4.3%Sn etched by Klemm's I reagent under optical microscope^[36]

4.6 镍基合金

镍基合金具有耐高温和抗氧化的特性,在航空航天航海领域的应用非常广泛,目前用于 SLM 研究的镍基合金有 Inconel 625、Inconel 718、Inconel 263 以及其他特种镍基合金。

Vilaro 等^[39]对 SLM 成型的 263 镍基合金的微观显微组织进行了研究分析,由于激光束和粉末之间的相互作用时间非常短(数毫秒),得到的微观组织结构不平衡,发现一方面需要进行热处理以均质化微观组织结构,另一方面要在 SLM 成型零件的过程中减少残余应力的产生;实验中对热处理后的镍基合金进行了室温下的拉伸实验,并与传统加工工艺成型出来的镍基合金进行了性能比较。IN738LC 是一种特殊的镍基合金,具有高强度、耐高温、抗氧化的特点,广泛应用于重型燃气轮机的

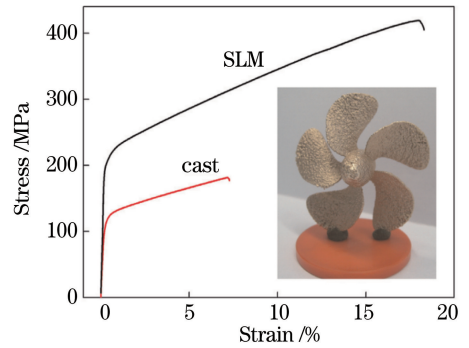


图 10 铸造和 SLM 成型的 Cu-10Sn 青铜在室温下的应变应力曲线,插图为 SLM 成型的 Cu-10Sn 青铜螺旋桨^[38]

Fig. 10 Stress-strain curves for Cu-10Sn bronze formed by SLM and cast at room temperature, where inset is Cu-10Sn bronze propeller fabricated by SLM^[38]

气路组件(叶片、隔热罩等)中。Rickenbacher 等^[40]对 SLM 成型的和传统铸造工艺加工的 IN738LC 合金的性能进行了比较。Trosch 等^[41]对比了 SLM 成型的与传统锻造工艺加工的 Inconel718 合金的微观组织结构及力学性能,发现 SLM 成型的金属合金零件的拉伸性能优于传统工艺加工的(如图 11 所示)。麦淑珍等^[42]采用正交实验优化了 SLM 成型曲面的工艺参数,研究了 NiCr 合金的粗糙度与其表面形貌间的关系。

5 SLM 技术的应用

5.1 航空航天领域的应用

传统的航空航天组件加工需要耗费很长的时间,在铣削的过程中需要移除高达 95%(体积分数)的昂贵材料。采用 SLM 方法成型航空金属零件,可以极大节约成本并提高生产效率。Ti-6Al-4V(Ti64)具有密度低、强度高、可加工性好、力学性能优异、耐腐蚀性好的特点,是航空零部件中最为广泛使用的材料之一。

西北工业大学和中国航天科工集团北京动力机械研究所于 2016 年联合实现了 SLM 技术在航天发动机涡轮泵上的应用,在国内首次实现了三维(3D)打印技术在转子类零件上的应用^[43]。图 12 所示为 Brandt 等^[44]采用 SLM 直接制造出的航天转轴结构组件,图 13 所示为美国 GE/Morris 公司采用 SLM 技术制造的一系列复杂航空部件^[45]。此外,美国 NASA 公司从 2012 年开始采用 SLM 技术制造航天发动机中的一些复杂部件。

5.2 生物医学应用

AM 技术在国内医疗行业的应用始于上世纪 80 年代后期,最初主要用于快速制造 3D 医疗模型。

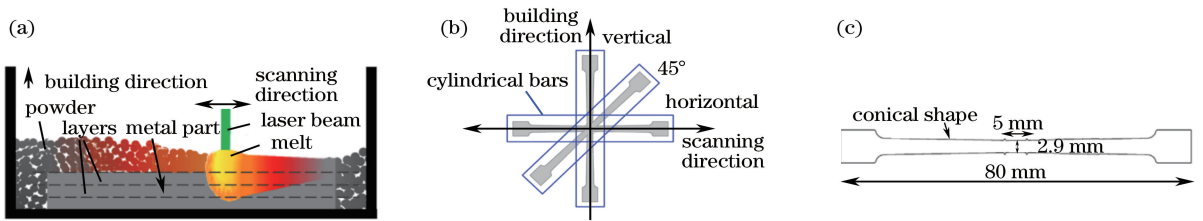


图 11 (a) SLM 过程; (b) 圆柱体在图 11(a) 中基板上的不同方位; (c) 拉伸测试件的几何参数^[41]
 Fig. 11 (a) SLM process; (b) different orientations of cylinder on substrate as shown in Fig. 11(a);
 (c) geometric parameters of specimens for tensile tests^[41]



图 12 航天转轴结构组件^[44]

Fig. 12 Aviation rotating shaft component^[44]

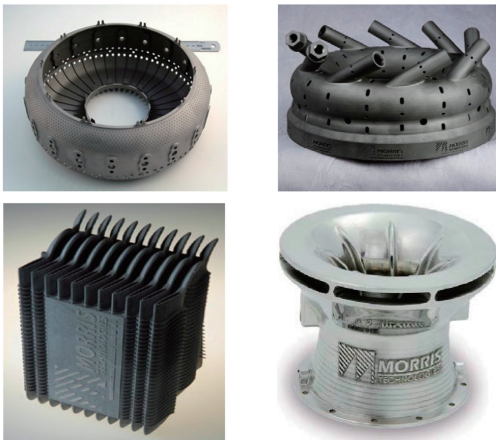


图 13 SLM 成型的复杂航空部件^[45]

Fig. 13 Complex aviation components formed by SLM^[45]

随着 AM 技术的发展以及医疗行业精准化、个性化的需求增长, SLM 技术在医疗行业的应用也越来越广泛, 逐渐用于制造骨科植入物、定制化假体和假肢、个性化定制口腔正畸托槽和口腔修复体等。图 14 所示为 Wang 等^[46]用 SLM 技术成型的 316L 不锈钢脊柱外科手术导板。图 15 所示为 Song 等^[47]利用 SLM 成型的个性化膝关节假体。

传统心血管支架制作工艺基于微管生产和激光显微切削, Demir 等^[48]采用 SLM 技术成型了钴铬合金心血管支架, 如图 16 所示, 其中 P_{peak} 为该实验所用金属 3D 打印机激光器的峰值功率, t 为脉冲宽度。图 17 所示为 Khorasani 等^[49]采用 SLM 技术成型的 Ti-6Al-4V 人工髌臼外壳, 通过分析优化

SLM 过程中的工艺参数改进了假体髌臼壳的成型效果。Liverani 等^[50]采用 SLM 技术成型了钴铬钼合金踝关节内部假体植入物(如图 18 所示), 为了提高成型件的致密度和机械强度, 进行了工艺参数优化, 结果表明, 其功能完整且性能表现良好。Taniguchi 等^[51]研究了 SLM 成型的多孔钛植入物(如图 19 所示)对兔体内骨向内生长的影响, 多孔钛植入物的参数为: 预期孔隙率 65%, 孔径 300, 600, 900 μm (分别对应 P300, P600 和 P900), 研究结果表明, P600 型植入物的多孔结构最为合适。

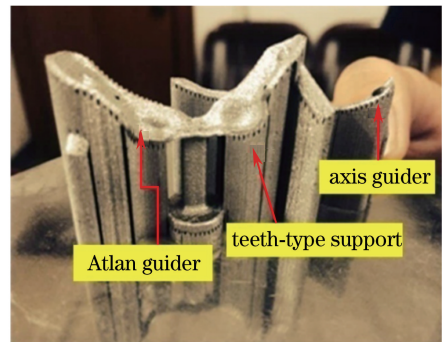


图 14 SLM 成型的外科脊柱导板^[46]

Fig. 14 Surgical spine guide-plate formed by SLM^[46]

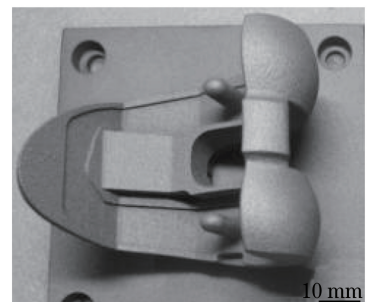


图 15 SLM 成型的膝关节假体^[47]

Fig. 15 Knee joint implant formed by SLM^[47]

5.3 汽车领域应用

在汽车行业中, 汽车制造大致可分为三个环节: 研发、生产以及使用。目前, SLM 技术在汽车制造领域中的应用主要包括两个方面: 汽车发动机及关键零部件直接成型制造和发动机复杂铸型件成型制

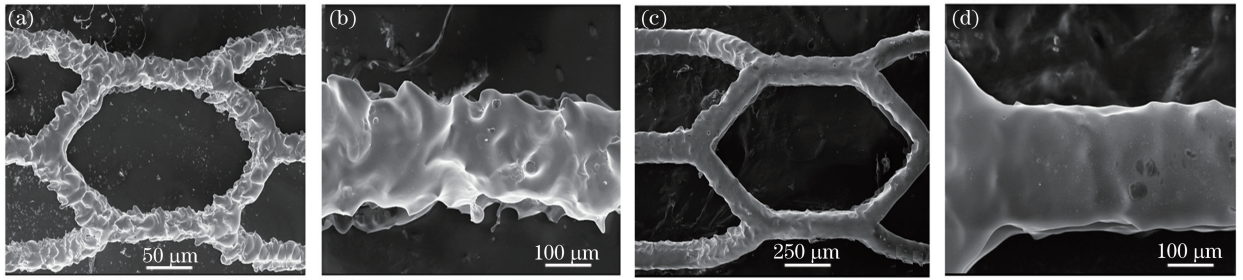


图 16 SLM 成型的钴铬合金心血管支架的 SEM 图。(a)(b) $P_{\text{peak}} = 180 \text{ W}$, $t = 100 \mu\text{s}$;

(c)(d) $P_{\text{peak}} = 40 \text{ W}$, $t = 120 \mu\text{s}$ ^[48]

Fig. 16 SEM images of Co-Cr-alloy cardiovascular stents formed by SLM. (a)(b) $P_{\text{peak}} = 180 \text{ W}$,

$t = 100 \mu\text{s}$; (c)(d) $P_{\text{peak}} = 40 \text{ W}$, $t = 120 \mu\text{s}$ ^[48]

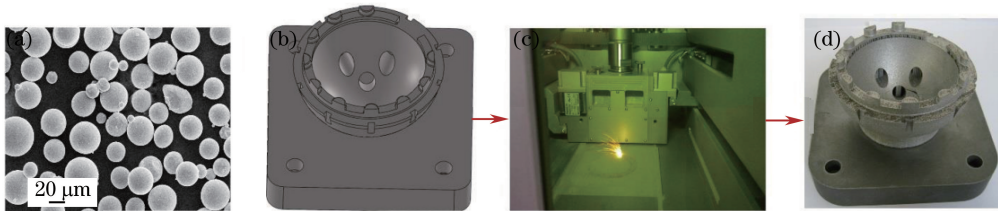


图 17 (a) Ti-6Al-4V 粉末;(b) CAD 模型;(c) SLM 过程;(d) 制成的模型^[49]

Fig. 17 (a) Ti-6Al-4V powder; (b) CAD model; (c) SLM process; (d) manufactured model^[49]

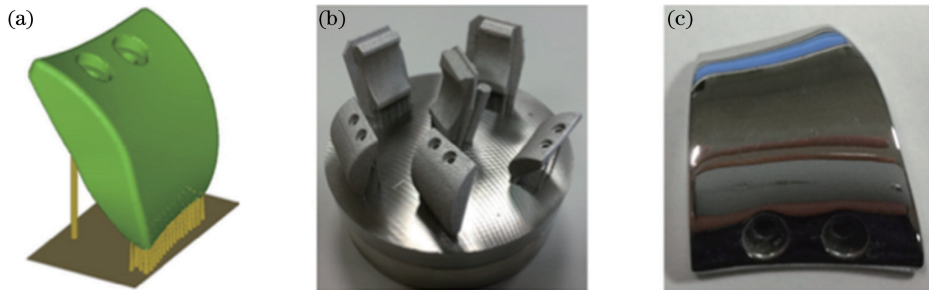


图 18 (a) CAD 设计原型;(b) SLM 成型的合金假体以及基板组件;(c) 抛光后的假体样件^[50]

Fig. 18 (a) CAD design model; (b) alloy implant formed by SLM and substrate components; (c) implant specimen after polishing^[50]

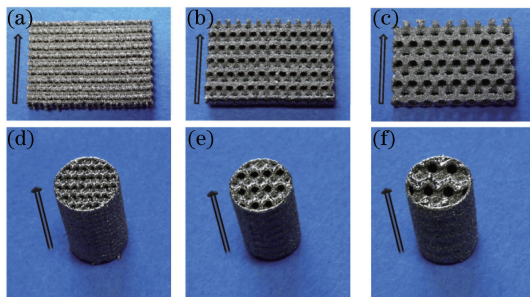


图 19 动物活体实验的多孔植入物,箭头所示为成型方向。

(a) P300 平板;(b) P600 平板;(c) P900 平板;

(d) P300 圆柱体;(e) P600 圆柱体;(f) P900 圆柱体^[51]

Fig. 19 Porous implants used in living animal experiments and arrows indicate building orientation.

(a) P300 plate; (b) P600 plate; (c) P900 plate;

(d) P300 cylinder; (e) P600 cylinder; (f) P900 cylinder^[51]

造。由于各方面技术难题尚未解决,AM 技术制造的汽车零部件只是用于实验和功能性原型制造,还未大规模地投入实际生产使用中。随着 AM 技术不断发展,AM 技术在零部件生产、汽车维修、汽车改装等方面的应用会逐渐成熟。

5.4 模具行业的应用

SLM 技术在模具行业中的应用主要包括成型冲压模、锻模、铸模、挤压模、拉丝模和粉末冶金模等。Mahshid 等^[52]采用 SLM 技术成型了带有随形冷却通道的结构件,测试了采用细胞晶格结构后零件的工件强度。实验设计了四种结构:实体、空心、晶格结构和旋转的晶格结构(如图 20 所示),分别进行了压缩实验,结果显示:相对于实体结构,带有晶格结构的样件强度有所降低;相对于中空结构,带有晶格结构的样件强度没有明显增加。Armillotta 等^[53]采用 SLM 技术成型了

带有随形冷却通道的压铸模具(如图 21 所示),实验结果表明:随形冷却的存在减少了喷雾冷却次数,提高了

冷却速率,冷却效果更均匀,铸件表面的质量有所提高,缩短了周期时间并且避免了缩孔现象发生。

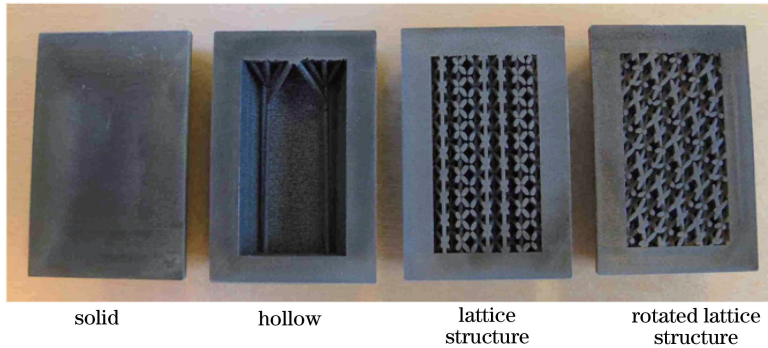


图 20 SLM 成型的样品^[52]

Fig. 20 Specimens formed by SLM^[52]



图 21 SLM 制造的压铸模具^[53]

Fig. 21 Die casting mold formed by SLM^[53]

5.5 其他领域应用

SLM 技术在珠宝、家电、文化创意、创新教育等领域的应用也越来越广泛。利用 SLM 技术打印的珠宝首饰致密度高、几何形状复杂,支持多自由度设计,更能突显珠宝首饰设计个性化和定制化的特点,能给消费者提供更多的选择。并且 SLM 在文化创意、创新教育方面也会有广阔的发展空间。

6 SLM 技术的发展趋势

6.1 轻量化结构设计

航空航天、汽车工业和医学人体植入物等领域对轻量化结构的需求越来越高,传统加工工艺中制造的轻量化结构往往需要预先设计好模具再进行铸造和后续减材加工,耗费了很多时间,经济成本较高,但采用 SLM 方法可以直接成型出更复杂、自由度更高的轻量化结构件。

国内外对 SLM 轻量化结构设计的研究已有很多,Tang 等^[54]根据中国国家标准,采用 SLM 技术成型了塞子和连接板等部件,结果表明,这些零件在应用测试(压缩实验)中运行良好,部件的重量和制造时间都减少了 20% 以上。Emmelmann 等^[55]从

仿生学的角度,采用 SLM 技术成型了轻量化飞机结构件(如图 22 所示)。目前,SLM 技术在轻量化结构设计上的应用还有很多问题需要解决,通过改进设备和工艺参数可以提高 SLM 成型零件的力学性能,SLM 制造的轻量化结构在工业中的应用将会更加广泛。

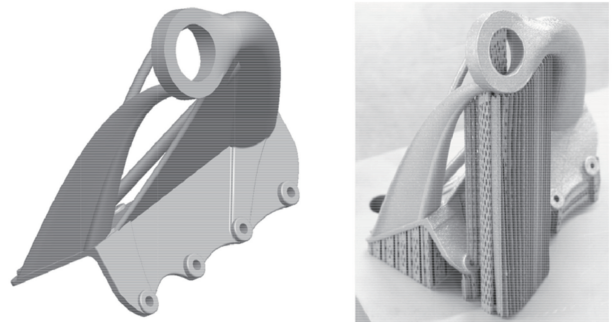


图 22 优化后的仿生结构及其支撑结构的 CAD 模型^[55]

Fig. 22 CAD-models of optimized bionic structure and its support structure^[55]

6.2 免组装机构设计

传统机械加工都是要先制造单个零件进而再装配为一个部件,但采用 SLM 技术可以将设计好的部件一次直接成型,大大地减少了传统加工所要耗费的时间,降低了经济成本。与传统机构一样,部件间配合是 SLM 成型免组装机构的重大影响因素之一,因此需要优化成型件倾斜角度、设备铺粉层厚以及能量输入等参数^[56]。图 23 所示为 SLM 成型的免组装万向节^[57]。

6.3 支撑结构优化

支撑设计是 SLM 中需要研究的问题。对于一些设计结构简单的金属零件,可以不添加支撑,直接在基板上成型,然后线切割取下,但无法保证金属零



图 23 SLM 成型的免组装万向节^[57]

Fig. 23 Free-assembly universal joint formed by SLM^[57]

件和基板接触面的尺寸精度以及表面粗糙度；而对于一些外形复杂、结构自由度高的金属零件，就必须用支撑结构。不良支撑在 SLM 过程中会给零件带来应力不均匀，引起翘曲变形^[58]。支撑的设计还要考虑支撑的拆除，拆除支撑对金属零件表面粗糙度和尺寸精度的影响较大，尤其是一些结构件的内部支撑。结构件的内部多为一些悬垂结构，很多学者都对 SLM 技术成型悬垂结构进行了研究，刘婷婷等^[59]对 SLM 成型悬垂结构特征进行了研究，分析了熔池变化与悬垂角度间的关系，对比了不同实验条件下的表面成型质量。

6.4 复合加工

SLM 技术能够直接制造冶金结合良好、组织致密度高、尺寸精度高和力学性能良好的功能零件。设想利用现有的 SLM 设备与传统的高精密铣削数控系统，构成一个复合加工整体系统：SLM 成型完金属零件后，采用高精密铣削刀具对支撑进行拆除，并直接对其进行表面处理而不需要将其取出，金属零件的成型精度会在现有水平的基础上大大提高。SLM 技术在未来制造业中的应用会更广泛。

6.5 大型设备开发

传统制造业中有很多大型加工件，例如大型航空件、汽车零件或船舶部件，而目前科研型 SLM 加工工件的长度、宽度、直径、高度等参数多在 1000 mm 以下，在保证成型精度的情况下，加大设备的加工平台需要克服很多技术难关，随着 SLM 设备和软件技术的发展，大型 SLM 设备的开发会是 SLM 技术的一个发展趋势。

6.6 实时监测及反馈

国内关于 SLM 工艺过程中监测技术的研究鲜有报道，成型金属零件的缺陷往往处于零件内部，它们会严重制约零件的力学性能，故 SLM 成型过程中的实时监测及定位缺陷研究很有必要。Grasso 等^[60]提出了一种空间检测识别方法，在逐层打印过程中，利

用机器视觉系统(如图 24 所示)检测缺陷，然后用计算机对图像数据进行分析处理并加以反馈，控制系统快速调整加工参数，极大改善了 SLM 成型质量。

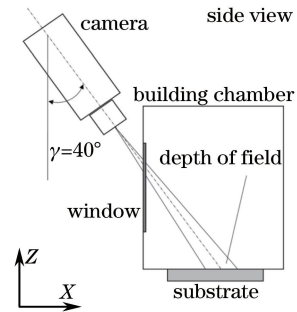


图 24 采用高速相机监测 SLM 过程的示意图^[61]

Fig. 24 Diagram of SLM process with high-speed camera monitor^[61]

6.7 尚存在的问题

SLM 技术还有很多技术难题，该技术的发展离不开材料、光学、计算机软件、机械等多领域专业技术的研发。随着今后越来越多学者加入 SLM 研究中，国内会有更多的自主研发 SLM 设备，SLM 技术会实现更大的技术突破。

7 结 论

金属 AM 技术有 SLM、EBM 和 LCD 三种，其中 SLM 最具优势。阐述了国内外 SLM 典型设备和主要研发单位。分别阐述了国内外不同材料的 SLM 研究进展以及 SLM 在航空航天、生物医学、汽车工业和模具等领域的最新应用进展。结合 SLM 技术的国内外发展现状，展望了 SLM 技术的未来发展趋势。

参 考 文 献

- [1] Peltola S M, Melchels F P, Grijpma D W, *et al.* A review of rapid prototyping techniques for tissue engineering purposes[J]. *Annals of Medicine*, 2008, 40(4): 268-280.
- [2] Zhong Y, Rännar L E, Wikman S, *et al.* Additive manufacturing of ITER first wall panel parts by two approaches: Selective laser melting and electron beam melting [J]. *Fusion Engineering & Design*, 2017, 116: 24-33.
- [3] Palčić I, Balazić M, Milfelner M, *et al.* Potential of laser engineered net shaping (LENS) technology[J]. *Materials & Manufacturing Processes*, 2009, 24(7/8): 750-753.
- [4] Kruth J P, Badrossamay M, Yasa E, *et al.* Part and

- material properties in selective laser melting of metals [C]// 16th International Symposium on Electromachining, 2010: 1-12.
- [5] Yang X W, Yang Y Q, Liu Y, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- [6] Manakari V, Parande G, Gupta M. Selective laser melting of magnesium and magnesium alloy powders: A review[J]. 2016, 7(1): 2.
- [7] Loh L E, Chua C K, Yeong W Y, *et al.* Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061 [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 80: 288-300.
- [8] Li X P, Humbeeck J V, Kruth J P. Selective laser melting of weak-textured commercially pure titanium with high strength and ductility: A study from laser power perspective[J]. Materials & Design, 2016, 116: 352-358.
- [9] Kang N, Coddet P, Liao H, *et al.* Macrosegregation mechanism of primary silicon phase in selective laser melting hypereutectic Al-high Si alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 662: 259-262.
- [10] Buchbinder D, Meiners W, Wissenbach K, *et al.* Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S2): S29205.
- [11] Prashanth K G, Scudino S, Eckert J. Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2017, 126: 25-35.
- [12] Seiffert G, Hopkins C, Sutcliffe C. Comparison of high-intensity sound and mechanical vibration for cleaning porous titanium cylinders fabricated using selective laser melting [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials, 2017, 105(1): 117-123.
- [13] Yan C, Liang H, Hussein A, *et al.* Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015, 51: 61-73.
- [14] Wang D, Song C, Yang Y, *et al.* Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts[J]. Materials & Design, 2016, 100: 291-299.
- [15] Li S, Wei Q S, Shi Y S, *et al.* Microstructure characteristics of inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(9): 946-952.
- [16] Gu D, Meng G, Li C, *et al.* Selective laser melting of TiC/Ti bulk nanocomposites: Influence of nanoscale reinforcement[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(2): 185-188.
- [17] Zhao X, Li S, Zhang M, *et al.* Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. Materials & Design, 2015, 95: 21-31.
- [18] Yan A R, Yang T T, Wang Y L, *et al.* Thermal properties and mechanical properties of selective laser melting different layer thicknesses of Ni powder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203004.
闫岸如, 杨恬恬, 王燕灵, 等. 选区激光熔化不同层厚镍的热特性与机械性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203004.
- [19] Ding L, Li H X, Wang Y D, *et al.* Heat treatment on microstructure and tensile strength of 316 stainless steel by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0406003.
丁利, 李怀学, 王玉岱, 等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406003.
- [20] Zhang K, Liu T T, Zhang C D, *et al.* Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0903007.
张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903007.
- [21] Ankudinov V, Gordeev G A, Krivilyov M D. Numerical simulation of heat transfer and melting of Fe-based powders in SLM processing[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 192 (1): 012026.
- [22] Stašić J, Božić D. The effect of NiB additive on surface morphology and microstructure of 316L stainless steel single tracks and layers obtained by SLM[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307: 407-417.
- [23] Čapek J, Machová M, Fousová M, *et al.* Highly porous, low elastic modulus 316L stainless steel scaffold

- prepared by selective laser melting [J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, 69: 631-639.
- [24] Zhang H, Nie X J, Zhu H H, *et al.* Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0503007.
张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al-Cu-Mg 合金研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503007.
- [25] Casati R, Lemke J N, Alarcon A Z, *et al.* Aging behavior of high-strength Al alloy 2618 produced by selective laser melting[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2016, 48(2): 1-5.
- [26] Anwar A B, Pham Q C. Selective laser melting of AlSi10Mg: Effects of scan direction, part placement and inert gas flow velocity on tensile strength [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 388-396.
- [27] Aboulkhair N T, Maskery I, Tuck C, *et al.* On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 88-98.
- [28] 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 & Engineering A*, 2014, 590(2): 153-160.
- [29] Urlea V, Brailovski V. Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242: 1-11.
- [30] Edwards P, Ramulu M. Effect of build direction on the fracture toughness and fatigue crack growth in selective laser melted Ti-6Al-4V [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(10): 1228-1236.
- [31] Fox P, Pogson S, Sutcliffe C J, *et al.* Interface interactions between porous titanium/tantalum coatings, produced by Selective Laser Melting (SLM), on a cobalt-chromium alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(20): 5001-5007.
- [32] Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Microstructure and properties of heat treatment TC4 titanium alloy produced by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902001.
肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902001.
- [33] Zhirnov I V, Podrabinnik P A, Tokbergenov M, *et al.* Optical monitoring and diagnostics of SLM processing for single track formation from Co-Cr alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2015, 834: 51-60.
- [34] Uhlmann E, Bergmann A, Gridin W. Investigation on additive manufacturing of tungsten carbide-cobalt by selective laser melting[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 35: 8-15.
- [35] Lin H, Yang Y Q, Zhang G Q, *et al.* Tribological performance of medical CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1114003.
林辉, 杨永强, 张国庆, 等. 激光选区熔化医用钴铬钼合金的摩擦性能 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1114003.
- [36] Ventura A P, Wade C A, Pawlikowski G, *et al.* Mechanical properties and microstructural characterization of Cu-4.3 Pct Sn fabricated by selective laser melting[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2016, 48: 1-10.
- [37] Gargarella P, Kiminami C S, Mazzer E M, *et al.* Phase formation, thermal stability and mechanical properties of a Cu-Al-Ni-Mn shape memory alloy prepared by selective laser melting [J]. *Materials Research*, 2015, 18(s2): 35-38.
- [38] Scudino S, Unterdörfer C, Prashanth K G, *et al.* Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze[J]. *Materials Letters*, 2015, 156: 202-204.
- [39] 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 & Engineering A*, 2012, 534(1): 446-451.
- [40] Rickenbacher L, Etter T, Hövel S, *et al.* High temperature material properties of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) technology [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 19(4): 282-290.
- [41] Trosch T, Ströbner 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.
- [42] Mai S Z, Yang Y Q, Wang D. Study on surface morphology and roughness variation of NiCr alloy curved surface manufactured by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203004.
麦淑珍, 杨永强, 王迪. 激光选区熔化成型 NiCr 合金曲面表面形貌及粗糙度变化规律研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1203004.

- 光, 2015, 42(12): 1203004.
- [43] Liu Y D. 3D printing of turbo shaft rotor for space turbine was realized for the first time in our country[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2016(3): 18.
刘一丹. 我国首次实现航天发动机涡轮轴转子 3D 打印[J]. *军民两用技术与产品*, 2016(3): 18.
- [44] Brandt M, Sun S J, Leary M, *et al.* High-value SLM aerospace components: From design to manufacture[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 633: 135-147.
- [45] Dong P, Chen J L. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2014(1): 1-5.
董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成型技术在航空航天领域应用现状[J]. *航天制造技术*, 2014(1): 1-5.
- [46] Wang D, Wang Y, Wang J, *et al.* Design and fabrication of a precision template for spine surgery using selective laser melting (SLM) [J]. *Materials*, 2016, 9(8): 608.
- [47] Song C, Yang Y, Wang Y, *et al.* Personalized femoral component design and its direct manufacturing by selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(2): 330-337.
- [48] Demir A G, Previtali B. Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 338-350.
- [49] Khorasani A, Gibson I, Goldberg M, *et al.* Production of Ti-6Al-4V acetabular shell using selective laser melting: Possible limitations in fabrication [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 23(1): 110-121.
- [50] Liverani E, Fortunato A, Leardini A, *et al.* Fabrication of Co-Cr-Mo endoprosthetic ankle devices by means of selective laser melting (SLM) [J]. *Materials & Design*, 2016, 106: 60-68.
- [51] Taniguchi N, Fujibayashi S, Takemoto M, *et al.* Effect of pore size on bone ingrowth into porous titanium implants fabricated by additive manufacturing: An *in vivo* experiment [J]. *Materials Science & Engineering*, 2015, 59: 690.
- [52] Mahshid R, Hansen H N, Højbjerg K L. Strength analysis and modeling of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting for tooling applications [J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 276-283.
- [53] Armillotta A, Baraggi R, Fasoli S. SLM tooling for die casting with conformal cooling channels [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1): 573-583.
- [54] Tang L, Wu C, Zhang Z, *et al.* A lightweight structure redesign method based on selective laser melting [J]. 2016, 6(11): 280.
- [55] Emmelmann C, Petersena M, Kranza J, *et al.* Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry [C]. *SPIE*, 2011, 8065: 80650L.
- [56] Liu Y, Yang Y Q, Wang D, *et al.* Study on the clearance feature of non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1103007.
刘洋, 杨永强, 王迪, 等. 激光选区熔化成型免组装机件的间隙特征研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1103007.
- [57] Wang D, Liu R C, Yang Y Q. Clearance design and process optimization of non-assembly mechanisms fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0203004.
王迪, 刘睿诚, 杨永强. 激光选区熔化成型免组装机件间隙设计及工艺优化 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0203004.
- [58] Zhang G Q, Yang Y Q, Zhang Z M, *et al.* Optimal design of support structures in selective laser melting of parts [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202002.
张国庆, 杨永强, 张自勉, 等. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202002.
- [59] Liu T T, Zhang C D, Liao W H, *et al.* Experimental analysis of pool behavior in overhang structure fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202004.
刘婷婷, 张长东, 廖文和, 等. 激光选区熔化成型悬垂结构熔池行为试验分析 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202004.
- [60] Grasso M, Laguzza V, Semeraro Q, *et al.* In-process monitoring of selective laser melting: Spatial detection of defects via image data analysis [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2017, 139(5): 051001.