

# 钛及钛合金激光选区熔化技术的研究进展

李俊峰, 魏正英\*, 卢秉恒

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

**摘要** 激光选区熔化(SLM)作为一种直接制造金属构件的增材制造技术,可实现复杂结构件的高精度制造。介绍了 SLM 技术的发展现状及原理,从材料体系、成形工艺、显微组织及力学性能方面论述了国内外钛及钛合金 SLM 技术的研究及应用现状,总结了 SLM 技术加工钛及钛合金过程中存在的问题,及其未来的发展趋势进行了展望。

**关键词** 激光技术; 钛及钛合金; 激光选区熔化技术; 成形工艺; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011403

## Research Progress on Technology of Selective Laser Melting of Titanium and Titanium Alloys

Li Junfeng, Wei Zhengying, Lu Bingheng

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Shaanxi, Xi'an 710049, China

**Abstract** As an additive manufacturing technology to fabricate metallic components directly, the selective laser melting (SLM) can be used to fabricate complex structures with a high precision. The development status and principle of SLM technology are introduced, and the research and application status of SLM technology of titanium and titanium alloys at home and abroad are discussed from several aspects, which include material systems, forming processes, microstructures and mechanical properties. Furthermore, the problems and future trend of SLM technology for titanium and titanium alloys are summarized and prospected, respectively.

**Key words** laser technique; titanium and titanium alloys; selective laser melting technology; forming process; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 160.3900; 350.3390; 140.3590; 000.2170

## 1 引言

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好、高温力学性能好、无毒无磁性、耐热性好、抗低温脆性好、可焊性好等优点,在航空航天、船舶、石油、化工、医疗等行业得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。近年来,钛及钛合金的发展非常迅速,其使用量大约以每年 8% 的速度增长,20 世纪 60 年代,钛合金在军机中的使用量迅速增加到 20%~25%。先进钛合金可大幅度减轻结构重量,提高安全性,已成为现代飞机和发

动机不可缺少的结构材料之一。21 世纪以来,世界航空工业对钛合金的需求迅猛增长<sup>[5-6]</sup>。然而,钛合金热导率低、硬度高、弹性变形大等缺点,使得传统锻造等加工方式已无法满足设计与整体化制造的要求<sup>[7-10]</sup>。

基于逐层累加成形思想的金属增材制造技术为钛合金复杂结构一体化的设计与制造提供了一种新思路。根据粉体材料输送方式的不同,金属增材制造技术主要分为以下两类。1) 基于送粉和送丝的增材制造技术,以激光立体成形(LSF)、金属直接沉

收稿日期: 2017-08-15; 收到修改稿日期: 2017-09-17

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2016YFB1100400)、装备预研教育部联合基金(6141A02022109)、中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 李俊峰(1992—),男,博士研究生,主要从事金属增材制造方面的研究。E-mail: xjljf2016@163.com

导师简介: 卢秉恒(1945—),男,博士,教授,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zywei@mail.xjtu.edu.cn

积(DMD)为代表,材料以粉末或丝状被直接送入高温熔池,熔化后逐层沉积。该技术只能成形出毛坯,后续需要依靠数控加工才能达到其净尺寸<sup>[11-12]</sup>。2) 基于粉床的金属增材制造技术,如金属直接激光烧结(DMLS)、激光选区熔化(SLM)、电子束选区熔化(SEBM)等,粉体材料预先铺展在基板区域,其层厚一般为 20~100  $\mu\text{m}$ ,利用高能束能量源根据预先规划的扫描路径逐层熔化金属粉末,直接净成形出零件,其表面仅需部分处理即可满足要求<sup>[13-15]</sup>。国内外针对金属增材制造技术开展了广泛研究并取得了诸多成果<sup>[16-20]</sup>。SLM 具有激光光斑小、粉末粒径小、制造精度高,可实现薄壁及精密复杂结构的直接净成形,甚至无需后续处理,在中小型模具、生物结构材料等复杂构件的直接制造方面的应用备受关注<sup>[21]</sup>。2013 年 8 月,NASA 对 SLM 制造的 J-2X 发动机喷注器样件进行热试车,结果表明其完全满足设计使用要求<sup>[22]</sup>。德国 BEGO 牙科设备公司将 SLM 技术应用于牙冠和假牙的制造中;MCP 公司应用 SLM 技术制造出精密金属模具插件及薄壁零件等,其尺寸精度及力学性能优良<sup>[23]</sup>。利用 SLM 技术制备具有随形冷却流道的刀具和模具,冷却效果更好,冷却时间更短,生产效率和产品质量均得到提高。采用 SLM 技术制备的具有交叉流道的微散热器,流道直径可达 0.5 mm,表面粗糙度可达 8.5  $\mu\text{m}$ <sup>[24]</sup>。总体来看,SLM 技术在复杂结构的制备方面具有广阔的应用前景。

本文从材料体系、成形工艺、显微组织及性能、应用等方面,系统概述了钛及钛合金 SLM 成形技术的进展,并总结了存在的问题及对今后的发展趋势进行了展望。

## 2 SLM 技术原理及设备进展

SLM 技术是一种金属增材制造技术,最早由德国 Fraunhofer 研究所于 1995 年提出<sup>[25]</sup>,采用高能激光束逐层熔化堆积金属粉末直至成形,其基本原理如图 1 所示,利用刮刀将粉末均匀铺于基板上,激光在计算机控制下有选择性地熔化金属粉末层,之后基板下降,重复铺粉-熔化过程,逐渐堆积成形直至完成构件的整体成形制造。现有 SLM 设备在成形幅面、激光束数量、铺粉结构等方面有大幅度改进,但基本成形原理及过程大体相同。

SLM 技术发展至今,设备发展较成熟,目前主要有 EOS、Realizer、Concept Laser、SLM solutions、3D systems、Renishaw PLC、Phenix systems。国内

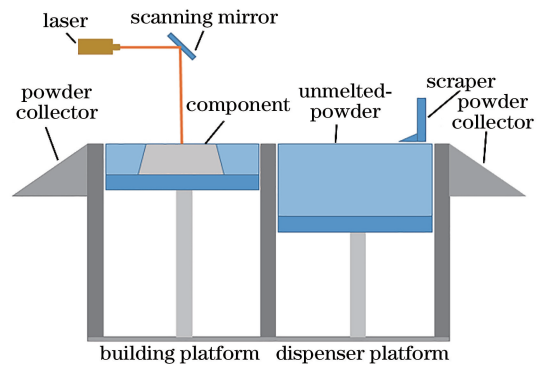


图 1 SLM 技术原理示意图

Fig. 1 Schematic of SLM technology

由于三维打印市场发展缓慢,加上 SLM 技术力量主要集中在西北工业大学、华南理工大学、华中科技大学、南京航空航天大学、中北大学、西安交通大学等高校,我国 SLM 技术的市场化还未取得突出成绩。近年来,西安铂力特公司、江苏永年激光成形技术有限公司、广东汉邦激光科技有限公司、西通公司等相继开发出 SLM 设备,但总体来看,国内 SLM 成形商用化设备市场几乎被国外企业垄断。因此,深入研究 SLM 成形技术,促进具有自主知识产权的商用 SLM 成形设备的产业化,对真正实现国内自主研发的 SLM 成形设备的大规模商业化应用具有重要意义。

## 3 钛及钛合金材料的 SLM 技术研究

目前,钛及钛合金 SLM 成形研究及应用主要集中在纯钛(CP-Ti)、Ti6Al4V 及其他钛合金。国内外学者关于钛及钛合金 SLM 成形的研究主要集中在工艺参数及后处理等对构件致密度、组织及性能的影响方面。

### 3.1 CP-Ti 的 SLM 成形及显微组织性能研究

致密度是表征构件内部缺陷的直接参量之一,对构件的性能影响显著。党新安等<sup>[26]</sup>采用单道、单层实验对 CP-Ti 粉 SLM 成形特性进行了初步研究,确立了较为优化的工艺参数范围,但样块最高致密度不超过 80%。Abe 等<sup>[27]</sup>通过改变工艺参数,获得了致密度大于 92% 的钛构件,验证了 SLM 成形高致密 CP-Ti 构件的可行性。Gu 等<sup>[28]</sup>在合适的工艺参数下获得了致密度达 99.5% 的样件,认为不合理的工艺控制会引起微裂纹及孔隙,如图 2 所示。他们进一步分析了 CP-Ti 的 SLM 成形构件物相,发现衍射角( $2\theta$ )的改变会引起 X 射线衍射(XRD)谱发生微小偏移,如图 3 所示,其中  $\alpha$  相为纯钛相转变过程中的相, $\alpha'$  相为 TC4 在快速冷却凝固过程中

产生的马氏体相。这是由于在不同的工艺参数下,作用于粉床的激光能量密度不同,导致温度梯度及凝固速率不同<sup>[28-29]</sup>。能量密度同样影响构件显微组织形貌及耐摩擦性能,低能量密度下的显微组织主

要表现为片状组织结构,当增大激光功率或降低扫描速度时,出现针状马氏体结构,如图4所示。当能量密度过低或过高时,会引起低致密度或出现热裂纹及微孔和粗晶,进而降低硬度及磨损性能<sup>[28]</sup>。

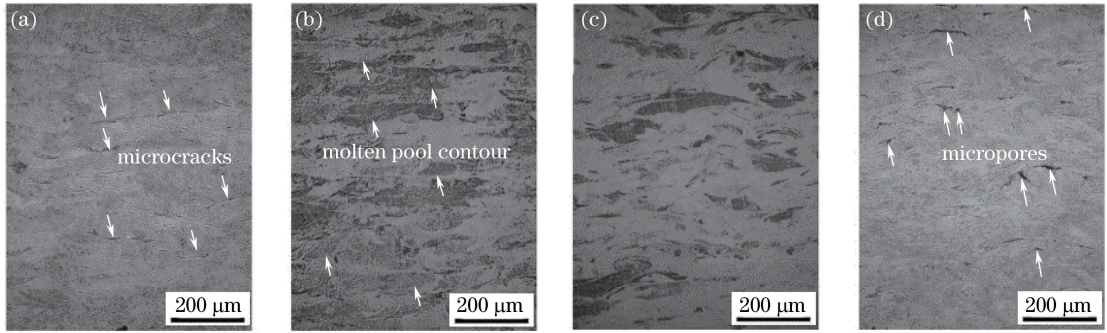


图2 不同扫描速度下的 SLM 成形钛构件横截面。(a)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[28]</sup>

Fig. 2 Cross-sectional images of Ti components formed by SLM under different scanning speeds.

(a)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[28]</sup>

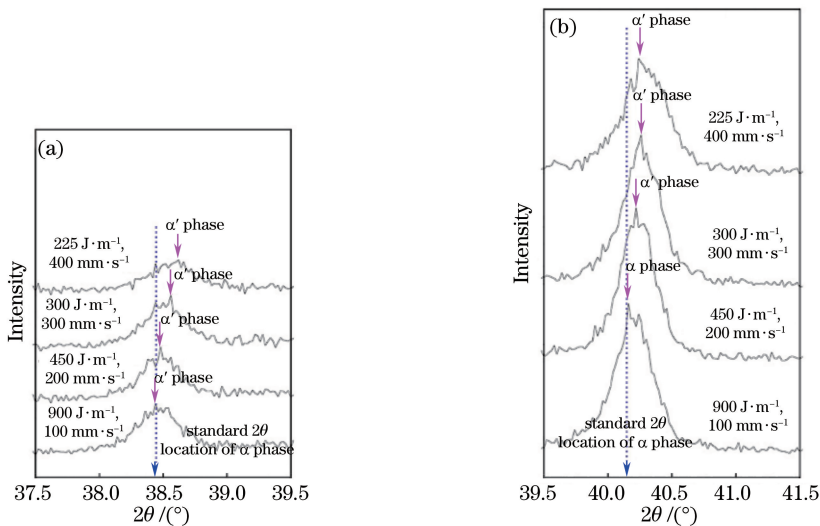


图3 不同衍射角下的 SLM 钛构件的 XRD 谱。(a)  $2\theta = 38.45^\circ$ ; (b)  $2\theta = 40.18^\circ$ <sup>[28]</sup>

Fig. 3 XRD spectra of Ti components formed by SLM under different diffraction angles.

(a)  $2\theta = 38.45^\circ$ ; (b)  $2\theta = 40.18^\circ$ <sup>[28]</sup>

Li 等<sup>[30]</sup>从激光功率角度对 CP-Ti 的 SLM 成形样件的织构及力学性能进行了研究,发现其力学性能在高功率作用下呈现各向同性且呈现弱织构,而在低功率作用下呈现各向异性且具有强织构现象。Kang 等<sup>[31]</sup>首次在 CP-Ti 的 SLM 成形过程中施加静磁场(SMF),发现 SMF 能够细化和均匀化 CP-Ti 显微组织,消除织构,改善力学性能,如图5和图6所示。

SLM 成形 CP-Ti 构件的力学性能见表1所示,其中  $\sigma_{0.2}$  为名义屈服强度,  $\sigma_{UTS}$  为极限强度,  $\epsilon$  为拉伸应变。可以看出,由于成形设备的不同,CP-Ti 的 SLM 成形构件力学性能明显不同。

总的来说,SLM 成形技术可获得高性能的 CP-Ti 构件,但成形质量受到工艺参数、成形环境、粉末状态及设备的影响。目前,研究主要集中在激光功率、扫描速度等主要工艺参数对成形构件的影响方面,而对其他影响因素如成形环境、粉体材料、粉末层厚、扫描间距及扫描填充方式等的研究鲜有报道。另外,不同的 SLM 设备会引起成形构件力学性能的不同,这对工业化应用具有明显的影响方面。因此,需要进一步开展 CP-Ti 的 SLM 成形研究,加速 CP-Ti 构件 SLM 成形标准的制定。

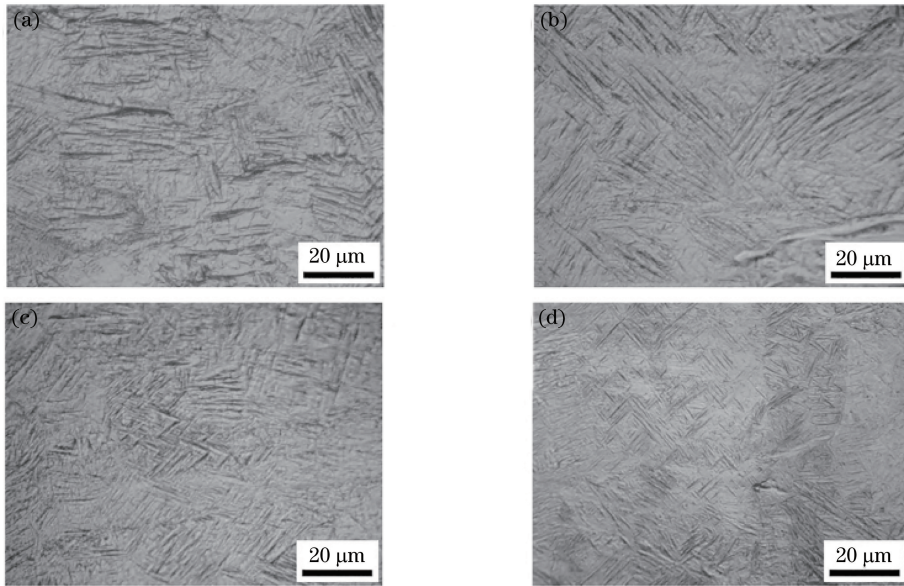


图 4 不同扫描速度下的 SLM 成形钛构件显微结构。(a)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  [28]

Fig. 4 Microstructures of Ti components formed by SLM under different scanning speeds. (a)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  [28]

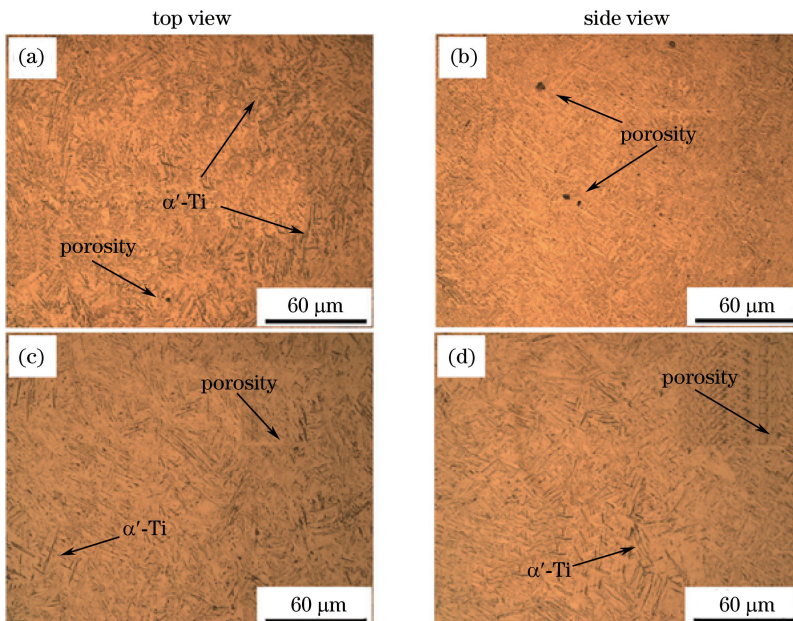


图 5 (a)(b)无 SMF 和(c)(d)有 SMF 下的 CP-Ti 的 SLM 样品显微结构

Fig. 5 Microstructures of CP-Ti samples formed by SLM (a)(b) without and (c)(d) with SMF

表 1 不同 SLM 成形设备所得的 CP-Ti 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of CP-Ti fabricated by different SLM equipments

SLM equipment	$\sigma_{\text{UTS}} / \text{MPa}$	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\epsilon / \%$	Hardness /HV	Reference
MTTSLM 250 HL	$757 \pm 12.5$	$555 \pm 3$	$19.5 \pm 1.8$	261	[29]
MCPSLM 250	766	-	28	-	[31]
SMF-MCPSLM 250	794	-	35	-	
SLM prototype	650	500	17	-	[32]

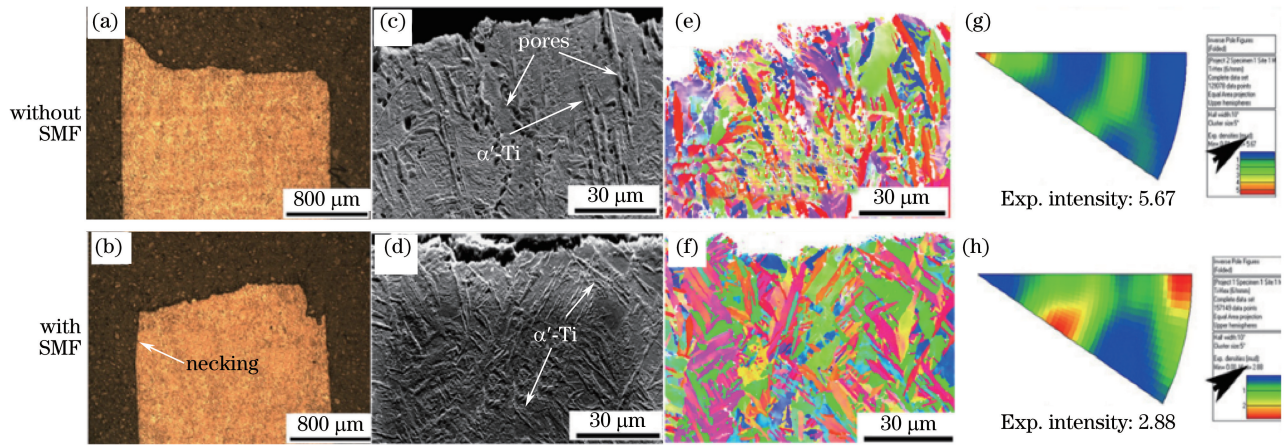


图6 不同条件下的断面截面的(a)(b)光学显微图、(c)(d)扫描电镜图、(e)(f)取向图和(g)(h)反极图<sup>[31]</sup>

Fig. 6 (a)(b) Optical microscopy images, (c)(d) scanning electron microscopy images, (e)(f) orientation maps and (g)(h) inverse pole figures of fracture section under different conditions<sup>[31]</sup>

### 3.2 Ti6Al4V 的 SLM 技术研究

Ti6Al4V 是一种  $\alpha+\beta$  双相钛合金,具有良好的综合性能,被广泛应用于航空航天、汽车、飞机等领域。因此,SLM 成形 Ti6Al4V 构件得到了各国学者的关注,相关研究较为全面和深入。

#### 3.2.1 Ti6Al4V 的 SLM 成形粉末研究

SLM 成形技术通常采用粒径为几十微米的金属粉末,如图 7 所示。目前,国内外批量生产球形钛合金粉末的技术主要有等离子旋转电极法、稀有气体雾化法、感应等离子球化法及感应等离子雾化法<sup>[33]</sup>。Seyda 等<sup>[34]</sup>对比了三种不同制粉方式(气雾化、等离子雾化、感应等离子球化)产生的粉体颗粒的形貌、尺寸分布、元素组成及流动性,深入分析了

不同 Ti6Al4V 粉末材料特性对成形构件质量的影响。结果表明:无论是用流动性好的粉末还是用流动性差的粉末,制备出的构件的力学性能均满足要求,为确保 SLM 成形质量,还需考虑粉末生产流程中的其他因素,建立其他因素与粉末特性及制件质量之间的关系。金属粉末除了本身具有可塑性之外,还必须满足粒径细小、粒度分布窄、球形度高、流动性高以及松装密度高等要求<sup>[35]</sup>。目前,钛合金粉末生产成本普遍较高,故钛合金 SLM 成形技术的应用受到限制<sup>[36-37]</sup>。因此,需要进一步开发钛合金粉末生产工艺,提高生产效率和质量,实现低成本钛合金 SLM 成形,推动 SLM 技术的快速发展及广泛应用。

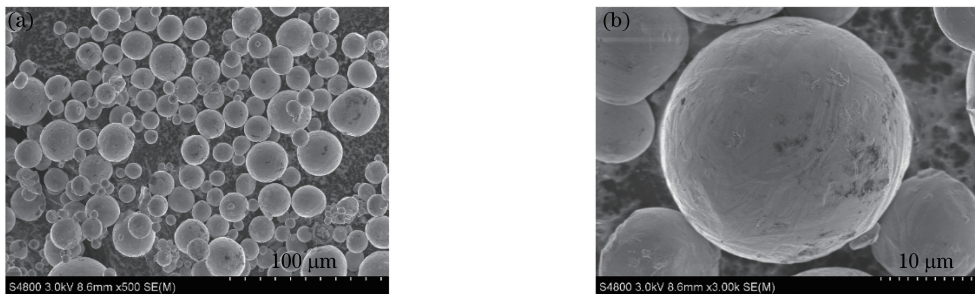


图7 Ti6Al4V 粉末形貌。(a) 500×; (b) 3000×

Fig. 7 Morphologies of Ti6Al4V powder. (a) 500×; (b) 3000×

#### 3.2.2 Ti6Al4V 的 SLM 成形致密化研究

构件的致密度直接影响其性能,这也是 Ti6Al4V 的 SLM 成形技术首先需要研究的问题。Gong 等<sup>[38]</sup>开展了基于熔池形貌的单道工艺实验,根据不同孔隙类型将工艺参数进行分类,讨论了缺陷生成机制,认为高能密度引起的熔池内部蒸发以及熔化过程中的传质现象造成大颗粒残留在每层

上表面,导致出现缺陷<sup>[39-40]</sup>。因此,应该寻求合适的工艺参数,减少高能密度下的飞溅现象<sup>[41-43]</sup>,以改善成形构件的致密度,如图 8 所示,其中  $T$  为时间。Kasperovich 等<sup>[44]</sup>结合二维和三维金相法,建立了工艺参数和孔隙间的关系。研究表明,在优化的工艺参数下可以获得孔隙体积分数小于 0.05% 的 Ti6Al4V SLM 成形构件,且能量密度过大会引起

“钥匙孔”效应,导致圆形或椭圆形孔的出现;而能量密度过小会引起球化或者未熔粉末的出现,导致出现垂直于成形方向的细长裂纹缺陷。Song 等<sup>[45]</sup>建立了 Ti6Al4V SLM 成形三维有限元模型,根据温度场分布及实验验证选择了合适的工艺参数。其他学者针对激光功率、扫描速度、扫描间距、粉层厚度

及扫描策略等主要影响因素开展了工艺实验,均获得了近致密甚至全致密 Ti6Al4V 构件<sup>[46-51]</sup>。

综上所述,在多种因素的共同作用下,Ti6Al4V SLM 成形构件通常出现微孔、裂纹等缺陷,但通过调整工艺参数能够减少甚至消除孔隙等缺陷,实现 Ti6Al4V 的近致密甚至全致密成形。

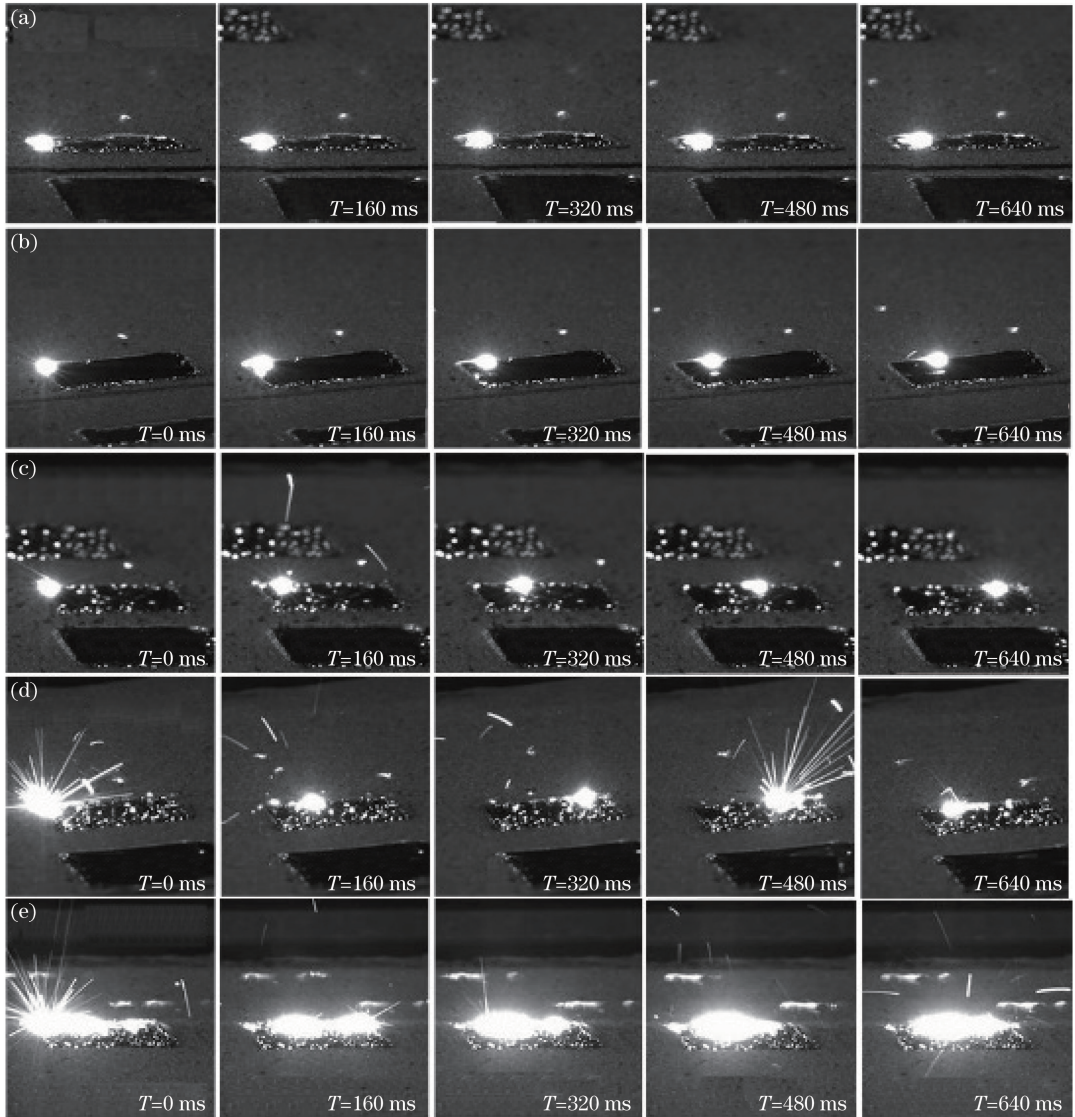


图 8 不同激光扫描速度下的熔化凝固过程<sup>[43]</sup>。(a)  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (e)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 8 Melting and solidification processes under different laser scanning speeds<sup>[43]</sup>. (a)  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (e)  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3.2.3 Ti6Al4V 显微组织及性能研究

构件的性能直接取决于其显微组织,SLM 成形是一种微小熔池的极度非平衡的多重热循环过程,其最终形成的显微组织与传统方法得到的不同<sup>[52]</sup>。显微组织与温度、冷却速率等密切相关,而 SLM 成形工艺条件直接影响温度及冷却速率。因

此,各国学者研究了 SLM 成形条件对 Ti6Al4V 显微组织的影响。Thijs 等<sup>[53]</sup>发现扫描策略的不同会引起显微组织形貌的不同,如图 9 所示。可以看出,采用层错扫描策略,显微组织呈网格状,且出现两种晶粒方向。另外,Ti6Al4V 显微组织呈外延生长状态,这是 SLM 成形沉积凝固过程中无

形核障碍导致的。Do 等<sup>[54]</sup>通过研究不同能量密度输入下的 Ti6Al4V SLM 成形的显微组织,发现随着能量密度的增加以及冷却速率的降低,马氏体片体尺寸不断增大,如图 10 所示,其中  $E_0$  为输入的激光能量密度。同样, Yang 等<sup>[55]</sup>在研究 SLM 成形 Ti6Al4V 样件的  $\alpha'$  马氏体形貌和亚结构时,发现随着扫描速度的增加,马氏体尺寸先增大后减小。他们分析认为,可以通过改变扫描间距和扫描速度等工艺参数来控制马氏体尺寸。Simonelli 等<sup>[56]</sup>通过晶体织构分析发现,在 SLM 成形过程中调整显微组织是可能的,这或许可以解决 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件室温塑性差的问题<sup>[57-58]</sup>。其他学者的研究也证实了工艺参数能够影响显微组织特征<sup>[59-60]</sup>。Facchini 等<sup>[61]</sup>研究发现,基板预热能够有效减小残余应力,但是由于未引起沉积态马氏体结构的改变,该因素对 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件的韧性无明显影响。Ali 等<sup>[62]</sup>研究发现,基板高温预热有助于减少温度梯度,可以调控冷却速率,进而实现对力学性能的控制,通过 570 °C 高温预热,  $\alpha'$  马氏体分解为  $\alpha + \beta$  相,屈服强度和延伸率分别提高 3.2% 和 66.2%。Xu 等<sup>[63-64]</sup>

设计了图 11 所示的 SLM 成形加工路线 ( $A_s/A_p$  为支撑结构和零件面积比),使得  $\alpha'$  马氏体原位分解为  $\alpha + \beta$  片层,如图 12 所示, Ti6Al4V 的 SLM 成形构件的延展性和韧性均得到了改善。

除了从工艺参数、成形过程设计等方面调整马氏体显微组织之外,后处理对显微组织特征及性能的影响也较为明显。表 2 对比分析了 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件热处理前后的力学性能,其中  $\epsilon_{\text{fracture}}$  为断后拉伸应变。可以看出,其力学性能差异较为明显。

综上所述, Ti6Al4V 的 SLM 技术在工艺实验方面的研究较为深入,但 SLM 成形过程涉及复杂的物理化学过程,其显微组织形成演化机制仍需进一步阐释;同时,适用于特定 Ti6Al4V SLM 成形件的热处理工艺需要进一步探索和深入研究。需要深入研究和理解工艺、显微组织、性能三者间的关系,制定合理的 Ti6Al4V SLM 成形构件的标准规范。除此之外, Ti6Al4V SLM 成形构件的其他性能如摩擦性能、抗疲劳性能及力学性能有待深入研究。同时,通过调整 SLM 成形工艺条件来实现显微组织的定制化有待于进一步研究。

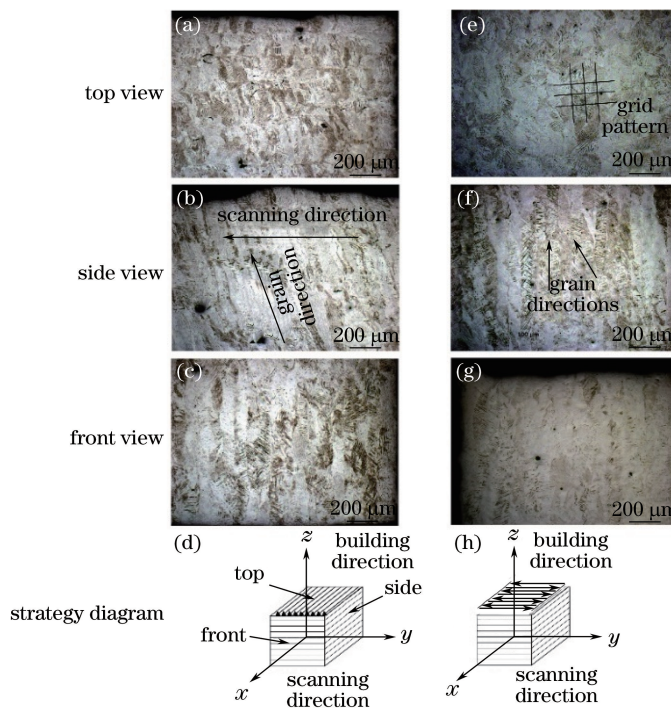


图 9 扫描策略对显微结构的影响<sup>[53]</sup>。(a)(b)(c)(d)单向扫描;(e)(f)(g)(h)交叉扫描

Fig. 9 Influence of scanning strategy on microstructures<sup>[53]</sup>. (a)(b)(c)(d) Unidirectional scanning; (e)(f)(g)(h) cross scanning

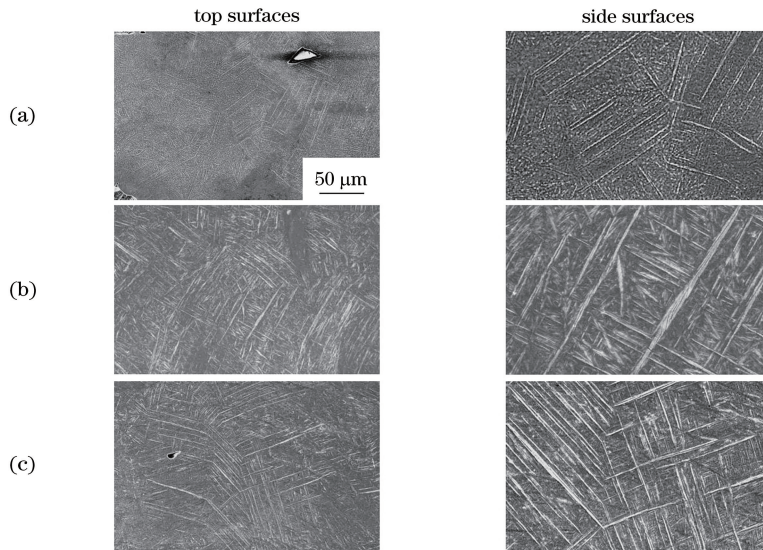


图 10 激光能量输入为(a)  $0.5E_0$ 、(b)  $E_0$ 、(c)  $2E_0$  时, Ti6Al4V 的 SLM 成形样件显微结构<sup>[54]</sup>

Fig. 10 Microstructures of Ti6Al4V specimens formed by SLM with laser energy input of (a)  $0.5E_0$ , (b)  $E_0$  and (c)  $2E_0$ <sup>[54]</sup>

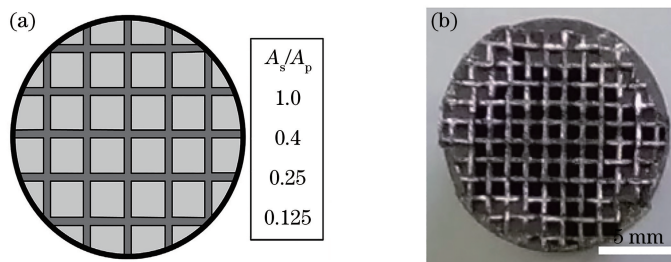


图 11 (a) 支撑结构示意图; (b)  $A_s/A_p=0.25$  时的支撑结构图<sup>[63]</sup>

Fig. 11 (a) Schematic of support structure; (b) schematic of support structure with  $A_s/A_p=0.25$ <sup>[63]</sup>

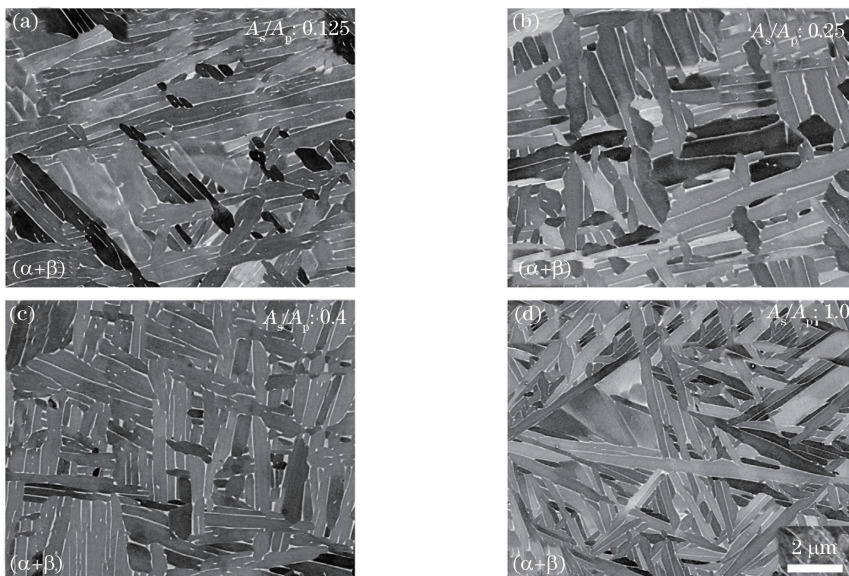


图 12 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件的显微结构<sup>[63]</sup>。(a)  $A_s/A_p=0.125$ ; (b)  $A_s/A_p=0.25$ ; (c)  $A_s/A_p=0.4$ ; (d)  $A_s/A_p=1$

Fig. 12 Microstructures of Ti6Al4V components formed by SLM<sup>[63]</sup>. (a)  $A_s/A_p=0.125$ ;

(b)  $A_s/A_p=0.25$ ; (c)  $A_s/A_p=0.4$ ; (d)  $A_s/A_p=1$



表 2 不同加工条件下 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti6Al4V components formed by SLM under different process conditions

Condition	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{UTS}$ /MPa	$\epsilon_{fracture}$ /%	Ref
540 °C for 2 h, water cooling	1118±39	1223±52	5.36±2.02	[65]
850 °C for 2 h, furnace cooling	955±6	1004±6	12.84±1.36	[65]
850 °C for 5 h, furnace cooling	909±24	965±20	Pre-fracture	[65]
1015 °C for 0.5 h, air cooling followed by				
843 °C for 2 h, furnace cooling	801±20	874±23	13.45±1.18	[65]
1020 °C for 2 h, air cooling	760±19	840±27	14.06±2.53	[65]
705 °C for 3 h, air cooling	1026±35	1082±34	9.04±2.03	[65]
940 °C for 1 h and 650 °C for 2 h, air cooling	899±27	948±27	13.59±0.32	[65]
1015 °C for 0.5 h and 730 °C for 2 h, air cooling	822±25	902±19	12.74±0.56	[65]
SLM built(no post treatment)	1110±9	1267±5	7.28±1.12	[65]
SLM built (no post treatment)	—	1351	3.14	[66]
600 °C for 2 h, furnace cooling	—	1287	3.2	[66]
750 °C for 2 h, furnace cooling	—	1185	3.4	[66]
925 °C for 2 h, furnace cooling	—	988	12.2	[66]
1050 °C for 2 h, furnace cooling	—	980	9.2	[66]
700 °C for 1 h, cooling at 10 K·s <sup>-1</sup>	1051	1115	11.3	[67]
900 °C for 2 h, and 700 °C for 1 h, cooling at 10 K·s <sup>-1</sup>	908	988	9.5	[67]
Hot isostatic pressing (900 °C, 100 MPa) for 2 h				
and 700 °C for 1 h cooling at 10 K·s <sup>-1</sup>	885	973	19.0	[67]
SLM built (no post treatment)	736	1051	11.9	[67]
SLM built (no post treatment)	990±5	1095±10	8.1±0.3	[61]
Hot worked and annealed	790±20	870±10	18.1±0.8	[61]
SLM built (no post treatment)	1250-1280	1390-1430	5.5-7.0	[68]
(705±20) °C for 1.5 h, air cooling	1080-1100	1110-1130	11.0-13.0	[68]
650 °C for 4 h, furnace cooling	1145±17	1187±10	7±2.7	[69]
890 °C for 2 h, furnace cooling	973±8	996±10	3±0.4	[69]
SLM built (no post treatment)	1125±22	12.16±8	6±0.4	[69]
SLM built (no post treatment)	1015	1090	10	[70]
Hot isostatic pressing	850	960	14	[70]
730 °C for 2 h, furnace cooling	974±7	1065±21	7.0±0.5	[71]
SLM built (no post treatment)	1075±25	1199±49	7.6±0.5	[71]

### 3.2.4 Ti6Al4V 的 SLM 成形件残余应力及变形研究

在 SLM 成形过程中,高能激光束逐点逐线作用于金属粉末,其温度梯度大、冷却速度快,导致成形件内部存在较大的残余应力,造成构件的翘曲变形,进而影响构件的尺寸精度和性能<sup>[72]</sup>。如何有效提高构件的尺寸精度和性能是 SLM 成形技术工业化应用的挑战之一。SLM 成形过程中的残余应力研究受到了国内外学者的关注<sup>[62,73-77]</sup>。Yadroitsev 等<sup>[78]</sup>研究发现,基板预热及扫描策略有利于减少 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件残余应力。Parry 等<sup>[79]</sup>通过热力耦合仿真分析了扫描策略对残余应力的影响。Mohanty 等<sup>[80-81]</sup>研究了蜂窝扫描策略及分区扫描策略,证实了扫描策略对残余应力的控制是可行的。张升等<sup>[82]</sup>研究发现,工艺参数的调控可以削

弱残余应力,达到减少或消除裂纹的目的。Mishurova 等<sup>[83]</sup>通过改变扫描速度,研究了不同能量密度对 Ti6Al4V 的 SLM 成形构件残余应力的影响,结果表明,在构件上表面存在大的拉伸应变,较高的激光能量密度能够降低晶格应变,而热处理能够消除晶格应变。Vastola 等<sup>[84]</sup>针对 Ti6Al4V 电子束选区熔化成形单道残余应力建立了仿真计算模型,结果表明,光斑尺寸、光源能量密度、扫描速度及粉床温度对残余应力的大小及分布均有影响,通过调节这些参数可以实现对残余应力的控制,且较高的粉床温度能够有效降低残余应力。

综上所述,残余应力在 SLM 成形构件中不可避免,如何控制甚至消除残余应力成为研究者们关注的问题。另外,如何从支撑设计角度控制成形过

程中的应力变形及建立更为有效的仿真计算模型还有待进一步研究。

### 3.3 其他钛合金 SLM 技术研究

相较于研究较为成熟及应用较为广泛的 Ti6Al4V SLM 成形粉末材料,其他适用于 SLM 技术的钛合金及其复合材料的研究并不多见<sup>[85-86]</sup>。Marcu 等<sup>[87-88]</sup>通过对 Ti6Al7Nb 粉末施加不同的热处理温度,研究了适用于 SLM 成形的 Ti6Al7Nb 粉末流动性,结果表明,经 500 °C 处理后的 Ti6Al7Nb 粉末更加适用于 SLM 且成形构件的显微组织主要为柱状  $\alpha'$  马氏体;同时,研究发现添加羟基磷灰石可以提高构件的硬度,且随着羟基磷灰石体积分数的增加,构件硬度不断增大。Chlebus 等<sup>[89]</sup>开展了 Ti6Al7Nb 的 SLM 成形构件显微组织及力学性能的研究,结果与 Ti6Al4V 的类似,均具有高强度低韧性的特点,显微组织为均匀分布的分散相  $\beta$ -AlNbTi<sub>2</sub> 强化的  $\alpha'$  马氏体。Sercombe 等<sup>[90]</sup>研究了热处理对 Ti6Al7Nb 的 SLM 成形构件的影响。结果表明,固溶温度在 1050 °C 时可获得均匀的显微组织,但该研究未进行力学性能测试。Zhang 等<sup>[91-93]</sup>对生物医用合金 TiNb<sub>24</sub>Zr<sub>4</sub>Sn<sub>8</sub> 的 SLM 成形开展了研究,获得了近全致密试件,并探讨了不同因素对构件力学性能的影响,结果表明,随着扫描速度的降低,其显微硬度不断增大;当能量密度足够高时,激光斑点间的距离对致密度及显微硬度无明显影响,而当能量密度低时,其对构件性能是有害的。相比于传统的加工方法,SLM 制备 TiNb<sub>24</sub>Zr<sub>4</sub>Sn<sub>8</sub> 表现出类似的力学特性且无明显的超弹性变形。进一步利用 SLM 技术制备 TiNb<sub>24</sub>Zr<sub>4</sub>Sn<sub>8</sub> 支架,其表现出优异的力学性能。

另外, TiAl 合金由于具有密度低、弹性模量高、

综合性能指标优于传统高温合金的特性,受到研究者的广泛关注<sup>[94-95]</sup>。Li 等<sup>[96-100]</sup>从工艺、显微组织及性能方面对 TiAl<sub>45</sub>Cr<sub>2</sub>Nb<sub>5</sub> 的 SLM 成形开展了较为深入的研究,并在此基础上对 TiAl/TiB<sub>2</sub> 复合材料的 SLM 技术进行了研究。

除了以上几种钛基材料,对其他钛基材料的 SLM 成形研究也已开展<sup>[102-109]</sup>。SLM 成形钛基材料取得了较为理想的结果,但正如前面所述,钛基材料种类尚不多见,有待进一步深入揭示不同种类钛基材料 SLM 成形的机理。

## 4 钛合金 SLM 成形技术的应用研究

SLM 成形技术可实现复杂构件的一体化成形,较少甚至无需后续处理,大大提高了构件的制造效率,降低了加工成本。不少国内外学者应用 SLM 技术制备钛及钛合金复杂构件,取得了诸多成果,相关研究主要集中于医疗、工程等领域。

### 4.1 在医学领域上的应用

Sing 等<sup>[110]</sup>利用 SLM 成形设备成功制备了 CP-Ti 和 TiTa 生物组织工程结构支架,如图 13 所示,该双相结构支架可应用于软骨组织的再生。

Wang 等<sup>[111]</sup>针对个性化骨板,应用 SLM 技术成功制备了该复杂结构,如图 14 所示,并进行了临床试验,该构件与人体破损处匹配良好,能够满足不同病人骨盆手术的要求,同时手术时间缩短到 2 h。

椎间融合器主要用于治疗背痛和蜕变性疾病,然而高刚度融合装置会出现应力集中现象, Pan 等<sup>[112]</sup>利用 SLM 技术制备了 Ti6Al4V 多孔结构,如图 15 所示,模型和结构件的匹配性很高,且这种结构能够有效避免应力集中现象。因此,SLM 技术为个性化医疗提供了可能性,针对不同病人的实际情况,可提供特定的医疗方案。

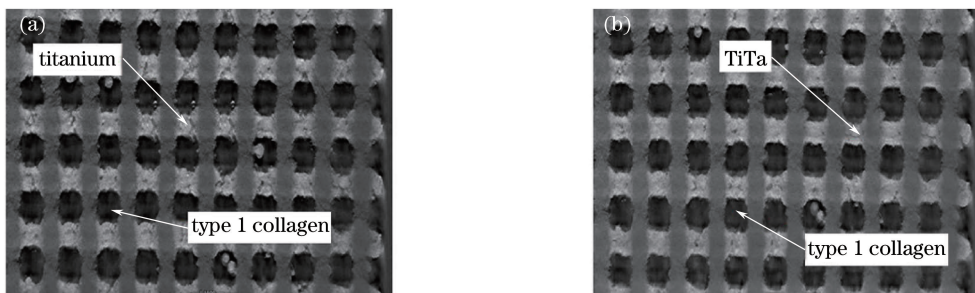


图 13 SLM 制备的结构件。(a) CP-Ti;(b) TiTa

Fig. 13 Structural components fabricated by SLM. (a) CP-Ti; (b) TiTa

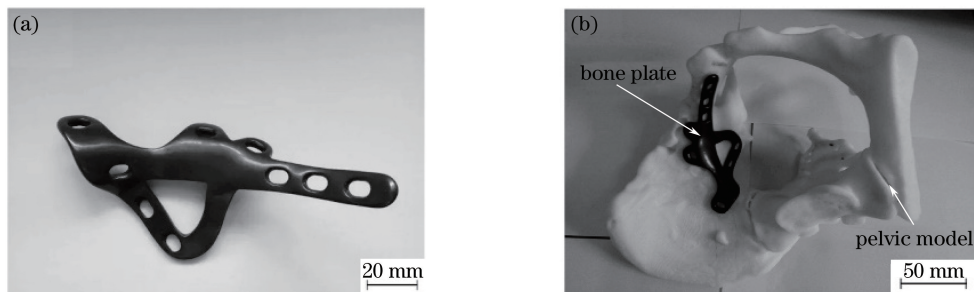


图 14 (a) 表面处理后的个性化骨板; (b) 骨板和骨盆模型的匹配

Fig. 14 (a) Individual bone plate after surface treatment; (b) matching between bone plate and pelvic model

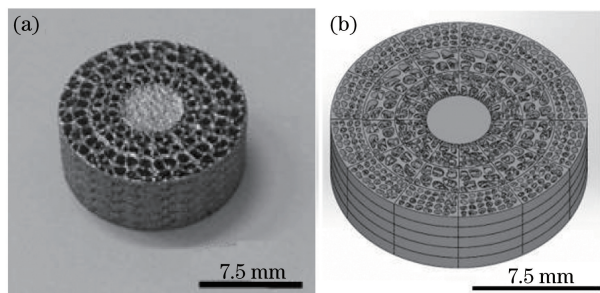


图 15 梯度融合器的(a)成形件和(b)模型

Fig. 15 (a) Formed part and (b) model of gradient fusion cage section

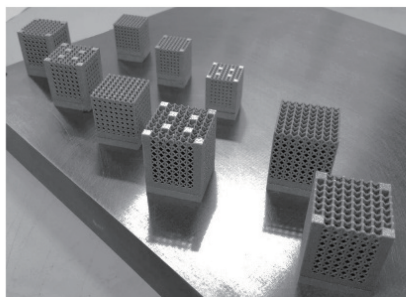


图 17 基板上的样件

Fig. 17 Samples on substrate

## 4.2 在工程领域上的应用

Cheng 等<sup>[113]</sup>设计了两种吸声器结构,并利用 SLM 技术成功完成了该结构的制造,如图 16 所示,实验与计算结果相吻合。Campanelli 等<sup>[114]</sup>研究了应用 SLM 成形技术制备的 Ti6Al4V 格子结构,如图 17 所示,验证了通过 SLM 成形技术制备轻质格子结构的可行性。欧洲宇航防务集团于 2012 年展示了 SLM 成形的钛合金零件,如图 18 所示,该结构可有效削减重量,减少生产、运作和回收过程中能源的使用和排放<sup>[115]</sup>。

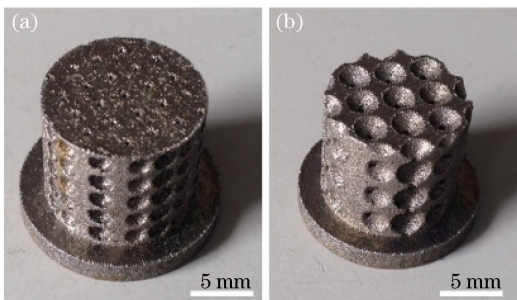


图 16 SLM 成形制备的 Ti6Al4V 吸声器。

(a) 样品 A; (b) 样品 B

Fig. 16 Ti6Al4V sound absorbers fabricated by SLM.

(a) Sample A; (b) sample B

目前,钛合金 SLM 成形构件主要应用于医学领域,可修复骨骼、牙齿等结构。而在航空航天、汽



图 18 SLM 成形的钛合金零件

Fig. 18 Titanium alloy parts fabricated by SLM

车、船舶等领域的应用报道较少,主要原因可能是技术保密、成本高等<sup>[116]</sup>。

## 5 结束语

SLM 技术经过二十多年的发展,在设备、工艺、性能及显微组织等方面取得了诸多成果,其商业化设备层出不穷,多种材料体系尤其是钛及钛合金的 SLM 成形技术日臻完善,但仍存在以下问题:1) SLM 成形设备有待进一步完善,急需开发具有我国自主知识产权的商业化 SLM 成形设备,推动国产设备的大规模商业化使用;2) 适用于 SLM 成形的钛合金粉末体系有待健全,急需扩展专用钛合金材料体系,开发低成本钛合金粉末;3) 钛合金 SLM 成形工艺、显微组织及性能间的关系有待进一步研究,揭示其相互作用机制有助于实现钛合金 SLM 成形

构件性能的稳定化以及标准规范的制定;4) 适用于钛合金 SLM 成形的热处理及其他后处理有待进一步完善;5) 对钛合金 SLM 成形构件应力变形的控制有待进一步研究;6) 有待开发大尺度钛合金 SLM 成形构件, 以实现精密复杂大尺度钛合金构件的高精度一体化成形。

### 参 考 文 献

- [1] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2003: 3.
- [2] Fu Y Y, Song Y Q, Hui S X, *et al.* Progress in research and application of titanium alloys used in aeronautical field[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850-856.  
付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.
- [3] Li L Q, Wang J D, Wu C C, *et al.* Temperature field of molten pool and microstructure property in laser melting depositions of  $Ti_6Al_4V$ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302009.  
李俐群, 王建东, 吴潮潮, 等.  $Ti_6Al_4V$  激光熔化沉积熔池温度场与微观组织特性[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302009.
- [4] Wang X, Zhou J Z, Huang S, *et al.* Effect of laser peening on hydrogen embrittlement resistance of TC4 titanium alloys[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0914006.  
王祥, 周建忠, 黄舒, 等. 激光喷丸对 TC4 钛合金抗氢脆性能的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0914006.
- [5] Zhao Y Q, Chen Y N, Zhang X M, *et al.* Phase transformation and heat treatment of titanium alloys[M]. Changsha: Zhongnan University Press, 2012.  
赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- [6] Zhu Z S, Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.  
朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [7] Li F C, Song Z M, Yang D J. Research on titanium alloy machining technology[J]. New Technology & New Process, 2010, 5: 66-69.  
李富长, 宋祖铭, 杨典军. 钛合金加工工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2010, 5: 66-69.
- [8] Gong S L, Suo H B, Li H X. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 433(13): 66-71.  
巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 433(13): 66-71.
- [9] Wang H M. High-performance metal component manufacturing technology opens a new chapter in national defense[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 3: 5-7.  
王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013, 3: 5-7.
- [10] Deng X H, Yang Z J. Current situation and prospect of titanium alloy additive manufacturing technology[J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(5): 113-120.  
邓贤辉, 杨治军. 钛合金增材制造技术研究现状及展望[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(5): 113-120.
- [11] Li J, Lin X, Qian Y H, *et al.* Study on microstructure and property of laser solid forming TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103010.  
李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.
- [12] Li H X, Gong S L, Sun F, *et al.* Development and application of laser additive manufacturing for metal component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 416(20): 26-31.  
李怀学, 巩水利, 孙帆, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. 航空制造技术, 2012, 416(20): 26-31.
- [13] Pan A Q, Zhang H, Wang Z M. Molten pool microstructure of Ni-based single crystal superalloys fabricated by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 041702.  
潘爱琼, 张辉, 王泽敏. 选区激光熔化镍基单晶高温合金的熔池显微组织[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 041702.
- [14] Hou H P, Liang Y C, He Y L, *et al.* Microstructure evolution and tensile property of Hastelloy-X alloys produced by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202007.  
侯慧鹏, 梁永朝, 何艳丽, 等. 选区激光熔化

- Hastelloy-X 合金组织演变及拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202007.
- [15] Yang Q Z, Wei Y P, Gao P, *et al.* Research progress of metal additive manufacturing technologies and related materials[J]. Materials Review, 2016(s1): 107-111.  
杨全占, 魏彦鹏, 高鹏, 等. 金属增材制造技术及其专用材料研究进展[J]. 材料导报, 2016(s1): 107-111.
- [16] Edwards P, O'Conner A, Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: Properties and performance[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6): 061016.
- [17] Baufeld B, van der Biest O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): S106-S111.
- [18] Wang X, Wang D S, Gao X S, *et al.* Research status and development in laser additive manufacturing of light alloy components[J]. Applied Laser, 2016, 36(4): 478-483.  
王霄, 王东生, 高雪松, 等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 478-483.
- [19] Wang H M, Zhang S Q, Tang H B, *et al.* Development of laser rapid prototyping technology for large titanium alloy structures[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(6): 28-30.  
王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 28-30.
- [20] Feng Y F. Northwestern polytechnical university made 3 meters titanium alloy parts of C919 aircraft with 3D printing[J]. Technology Research, 2013, 1: 24.  
冯颖芳. 西工大用 3D 打印制造 3 米长 C919 飞机钛合金部件[J]. 工艺技术研究, 2013, 1: 24.
- [21] Dong P, Li Z H, Yan Z Y, *et al.* Research status of selective laser melting of aluminum alloys[J]. Applied Laser, 2015, 5: 607-611.  
董鹏, 李忠华, 严振宇, 等. 铝合金激光选区熔化成形技术研究现状[J]. 应用激光, 2015, 5: 607-611.
- [22] Dong P, Chen J L. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 1: 1-5.  
董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2014, 1: 1-5.
- [23] Yang Y Q, Wu W H, Lai K X, *et al.* Newest process of direct rapid prototyping of metal part by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 2: 73-76.  
杨永强, 吴伟辉, 来克娴, 等. 金属零件选区激光熔化直接快速成形工艺及最新进展[J]. 航空制造技术, 2006, 2: 73-76.
- [24] Yin H, Bai P K, Liu B, *et al.* Present situation and development trend of selective laser melting technology for metal powder[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(1): 140-144.  
尹华, 白培康, 刘斌, 等. 金属粉末选区激光熔化技术的研究现状及其发展趋势[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 140-144.
- [25] Gu D D, Shen Y F. Research status and technical prospect of rapid manufacturing of metallic part by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 8: 32-37.  
顾冬冬, 沈以赴. 基于选区激光融化的金属材料零件快速成形现状与技术展望[J]. 航空制造技术, 2012, 8: 32-37.
- [26] Dang X A, Zhang X B, Yang L J, *et al.* Researching forming property of titanium powder in selective laser melting[J]. Journal of Shaanxi University Science & Technology, 2014, 1: 68-73.  
党新安, 张晓博, 杨立军, 等. 钛粉激光选区熔化成型特性的研究[J]. 陕西科技大学学报, 2014, 1: 68-73.
- [27] Abe F, Santos E C, Kitamura Y, *et al.* Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(1): 119-126.
- [28] Gu D, Hagedorn Y C, Meiners W, *et al.* Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium[J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [29] Attar H, Calin M, Zhang L C, *et al.* Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium[J]. Materials Science and Engineering, 2014, 593(2): 170-177.
- [30] 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]. *Mater& Design*, 2017, 116: 352-358.
- [31] Kang N, Yuan H, Coddet P, *et al.* On the texture, phase and tensile properties of commercially pure Ti produced via selective laser melting assisted by static magnetic field[J]. *Mater Science and Engineering*, 2017, 70: 405-407.
- [32] Barbas A, Bonnet A S, Lipinski P, *et al.* Development and mechanical characterization of porous titanium bone substitutes[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, 9(3): 34.
- [33] Liang Y R, Wu Y J. Production technology of titanium and its alloy spherical powders used in 3D printing[J]. *World Nonferrous Metals*, 2016, 12: 150-151.  
梁永仁, 吴引江. 3D打印用钛及钛合金球形粉末制备技术[J]. *世界有色金属*, 2016, 12: 150-151.
- [34] Seyda V, Herzog D, Emmelmann C. Relationship between powder characteristics and part properties in laser beam melting of Ti-6Al-4V, and implications on quality[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022311.
- [35] Yao N N, Peng X H. The preparation method of metal powder for 3D printing[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2013, 4: 48-51.  
姚妮娜, 彭雄厚. 3D打印金属粉末的制备方法[J]. *四川有色金属*, 2013, 4: 48-51.
- [36] Zhao X H, Zuo Z B, Han Z Y, *et al.* A review on powder titanium alloy 3D printing technology[J]. *Materials Review*, 2016, 30(23): 120-126.  
赵霄昊, 左振博, 韩志宇, 等. 粉末钛合金 3D打印技术研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(23): 120-126.
- [37] Yao W J. Iluka additional investment in the low-cost development of titanium metal powders[J]. *China Titanium Industry*, 2016, 2: 50.  
姚文静. Iluka追加投资研发低成本钛金属粉末[J]. *中国钛业*, 2016, 2: 50.
- [38] Gong H, Gu H, Zeng K, *et al.* Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder[C]. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014: 256-267.
- [39] Gong H J, Rafi K, Gu H F, *et al.* Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1/2/3/4: 87-98.
- [40] Sun J F, Yang Y Q, Yang Z. Study on surface roughness of selective laser melting Ti6Al4V based on powder characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0702004.  
孙健峰, 杨永强, 杨洲. 基于粉末特性的选区激光熔化 Ti6Al4V 表面粗糙度研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702004.
- [41] Sato Y, Tsukamoto M, Yamashita Y. Surface morphology of Ti-6Al-4V plate fabricated by vacuum selective laser melting[J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(3): 545-549.
- [42] Simonelli M, Tuck C, Aboulkhair N T, *et al.* A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2015, 46(9): 3842-3851.
- [43] Sato Y, Tsukamoto M, Yamashita Y, *et al.* Effect on beam profile of Ti alloy plate fabrication from powder by sputter-less selective laser melting[C]. *SPIE*, 2017, 10095: 100950Z.
- [44] Kasperovich G, Haubrich J, Gussone J, *et al.* Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 105: 160-170.
- [45] Song B, Dong S J, Liao H L, *et al.* Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(9/10/11/12): 967-974.
- [46] Sun J F, Yang Y Q, Wang D. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49(7): 118-124.
- [47] Ye Z H. The personalized design and process research of selective laser melting manufacturing of Ti6Al4V tibial implant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.  
叶梓恒. Ti6Al4V 胫骨植入体个性化设计及其激光选区熔化制造工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [48] Wang X L. Study on process optimization and property of titanium alloy manufactured by selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

- 王小龙. 钛合金激光选区熔化工艺优化与性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [49] Wang J H, Bai P K. Study on process parameters on surface quality of Ti6Al4V by selective laser melting [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(15): 13-15.  
王建宏, 白培康. Ti6Al4V 粉末选区激光熔化单层扫描工艺研究 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(15): 13-15.
- [50] Zhang S. Research on the forming processes and properties in selective laser melting of medical alloy powders [D]. Wuhan: Huang Zhong University of Science and Technology, 2014.  
张升. 医用合金粉末激光选区熔化成形工艺与性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [51] Shi X, Ma S, Liu C, *et al.* Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V [J]. *Materials*, 2016, 9(12): 975.
- [52] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C. Microstructure of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting [J]. *Journal of Physics*, 2012, 371(1): 012084.
- [53] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, *et al.* A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V [J]. *Acta Mater*, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [54] Do D K, Li P F. The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys by selective laser melting [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11(1): 41-47.
- [55] Yang J J, Yu H C, Yin J, *et al.* Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 308-318.
- [56] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C. Further understanding of Ti-6Al-4V selective laser melting using texture analysis [C]// *Proceedings of 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012:480-491.
- [57] Han J, Yang J J, Yu H C, *et al.* Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(2): 217-226.
- [58] Dutta B, Froes F H S. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys [J]. *Metal Powder Report*, 2017, 72(2): 96-106.
- [59] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C. On the texture formation of selective laser melted Ti-6Al-4V [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45(6): 2863-2872.
- [60] Barriobero V P, Gussone J, Haubrich J, *et al.* Inducing stable  $\alpha+\beta$  microstructures during selective laser melting of Ti-6Al-4V using intensified intrinsic heat treatments [J]. *Materials*, 2017, 10(3): 268.
- [61] Facchini L, Magalini E, Robotti P, *et al.* Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2010, 16(6): 450-459.
- [62] Ali H, Ma L, Ghadbeigi H, *et al.* *In-situ* residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V [J]. *Materials Science & Engineering*, 2017, 695: 211-220.
- [63] Xu W, Lui E W, Pateras A, *et al.* *In situ* tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance [J]. *Acta Mater*, 2017, 125: 390-400.
- [64] Xu W, Sun S, Elambasseril J, *et al.* Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting with superior mechanical properties [J]. *JOM*, 2015, 67(3): 668-673.
- [65] 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.
- [66] Khorasani A, Gibson I, Goldberg M, *et al.* On the role of different annealing heat treatments on mechanical properties and microstructure of selective laser melted and conventional wrought Ti-6Al-4V [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(2): 295-304.
- [67] Kasperovich G, Hausmann J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 202-214.
- [68] Liang X K, Dong P, Chen J L, *et al.* Microstructure and mechanical properties of selective laser melting Ti6Al4V alloy [J]. *Applied Laser*, 2014, 34(2): 101-104.  
梁晓康, 董鹏, 陈济轮, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 钛合金的显微组织及性能 [J]. *应用激光*, 2014, 34(2): 101-104.
- [69] Cain V, Thijs L, Humbeeck J V, *et al.* Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy

- produced by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2015, 5: 68-76.
- [70] Benedetti M, Torresani E, Leoni M, *et al.* The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti-6Al-4V ELI parts made by selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 71: 295.
- [71] Simonelli M, Tse Y Y, Tuck C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V[J]. Materials Science & Engineering, 2014, 616: 1-11.
- [72] 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.
- [73] Casavola C, Campanelli S L, Pappalettere C. Preliminary investigation on distribution of residual stress generated by the selective laser melting process [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2009, 44(1): 93-104.
- [74] Liu Y, Yang Y, Wang D. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1/2/3/4): 647-656.
- [75] Megahed M, Mindt H W, N'Dri N, *et al.* Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling[J]. Integrating Materials & Manufacturing Innovation, 2016, 5(1): 4.
- [76] Mercelis P, Kruth J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 12(5): 254-265.
- [77] Vrancken B, Cain V, Knutsen R, *et al.* Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting[J]. Scripta Materialia, 2014, 87: 29-32.
- [78] Yadroitsev I, Yadroitsava I. Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting[J]. Virtual & Physical Prototyping, 2015, 10(2): 1-10.
- [79] Parry L, Ashcroft I A, Wildman R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 1-15.
- [80] Mohanty S, Hattel J H. Reducing residual stresses and deformations in selective laser melting through multilevel multiscale optimization of cellular scanning strategy[C]. SPIE, 2016, 9738: 97380Z.
- [81] Deng S S, Yang Y Q, Li Y, *et al.* Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202003.  
邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202003.
- [82] Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, *et al.* Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 21-27.  
张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 21-27.
- [83] Mishurova T, Cabeza S, Artzt K, *et al.* An assessment of subsurface residual stress analysis in SLM Ti-6Al-4V[J]. Materials, 2017, 10(4): 348.
- [84] Vastola G, Zhang G, Pei Q X, *et al.* Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 231-239.
- [85] Rotaru H, Armencea G, Spirchez D, *et al.* *In vivo* behavior of surface modified Ti6Al7Nb alloys used in selective laser melting for custom-made implants. A preliminary study[J]. Romanian Journal of Morphology Embryology, 2013, 54(3): 791-796.
- [86] Łyczkowska E, Szymczyk P, Dybała B, *et al.* Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 586-594.
- [87] Marcu T, Todea M, Gligor I, *et al.* Effect of surface conditioning on the flowability of Ti6Al7Nb powder for selective laser melting applications[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 3276-3282.
- [88] Marcu T, Menapace C, Girardini L, *et al.* Selective laser melting of Ti6Al7Nb with hydroxyapatite addition [J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(4): 301-310.
- [89] Chlebus E, Kuźnicka B, Kurzynowski T, *et al.* Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2011, 62(5): 488-495.



- [90] Sercombe T, Jones N, Day R, *et al.* Heat treatment of Ti-6Al-7Nb components produced by selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, 14(5): 300-304.
- [91] Bolzoni L, Ruiz-Navas E M, Gordo E. Influence of HIP parameters on the microstructure and mechanical properties of elemental titanium and Ti-6Al-7Nb alloy [C]. *European Powder Metallurgy*, 2012.
- [92] Zhang L C, Klemm D, Eckert J, *et al.* Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(1): 21-24.
- [93] Zhang L C, Sercombe T B. Selective laser melting of low-modulus biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy: Effect of laser point distance[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 520: 226-233.
- [94] Liu Y J, Li X P, Zhang L C, *et al.* Processing and properties of topologically optimized biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn scaffolds manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, 642: 268-278.
- [95] Dang X. Overview of development of patent technology in titanium alloy field in China[J]. *Advanced Materials Industry*, 2017, 3: 30-34.  
 党兴. 我国钛铝合金领域专利技术发展综述[J]. *新材料产业*, 2017, 3: 30-34.
- [96] Shi X, Ma S, Liu C, *et al.* Parameter optimization for Ti-47Al-2Cr-2Nb in selective laser melting based on geometric characteristics of single scan tracks [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 71-79.
- [97] Li W, Liu J, Zhou Y, *et al.* Effect of substrate preheating on the texture, phase and nanohardness of a Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting[J]. *Scripta Materials*, 2016, 118: 13-18.
- [98] Li W, Liu J, Wen S, *et al.* Crystal orientation, crystallographic texture and phase evolution in the Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting[J]. *Materials Characterization*, 2016, 113: 125-133.
- [99] Li W, Liu J, Zhou Y, *et al.* Effect of laser scanning speed on a Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting: Microstructure, phase and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688: 626-636.
- [100] Li W, Liu J, Zhou Y, *et al.* Texture evolution, phase transformation mechanism and nanohardness of selective laser melted Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy during multi-step heat treatment process[J]. *Intermetallics*, 2017, 85: 130-138.
- [101] Li W, Yang Y, Liu J, *et al.* Enhanced nanohardness and new insights into texture evolution and phase transformation of TiAl/TiB<sub>2</sub> *in-situ* metal matrix composites prepared via selective laser melting[J]. *Acta Materialia*, 2017, 136: 90-104.
- [102] Krakhmalev P, Yadroitsev I. Microstructure and properties of intermetallic composite coatings fabricated by selective laser melting of Ti-SiC powder mixtures[J]. *Intermetallics*, 2014, 46: 147-155.
- [103] Attar H, Ehtemam-Haghighi S, Kent D, *et al.* Nanoindentation and wear properties of Ti and Ti-TiB composite materials produced by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 688: 20-26.
- [104] Attar H, Löber L, Funk A, *et al.* Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti-TiB composite materials manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, 625: 350-356.
- [105] Attar H, Prashanth K G, Zhang L C, *et al.* Effect of powder particle shape on the properties of *in situ* Ti-TiB composite materials produced by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(10): 1001-1005.
- [106] Fischer M, Joguet D, Robin G, *et al.* *In situ* elaboration of a binary Ti-26Nb alloy by selective laser melting of elemental titanium and niobium mixed powders[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, 62(2): 852-859.
- [107] Speirs M, Humbeek J V, Schrooten J, *et al.* The effect of pore geometry on the mechanical properties of selective laser melted Ti-13Nb-13Zr scaffolds[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 5: 79-82.
- [108] Grigoriev A, Polozov I, Sufiiarov V, *et al.* *In-situ* synthesis of Ti<sub>2</sub>AlNb-based intermetallic alloy by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 704: 434-442.
- [109] Sharkeev Y P, Eroshenko A Y, Kovalevskaya Z G, *et al.* Structural and phase state of Ti-Nb alloy at selective laser melting of the composite powder[J]. *Russian Physics Journal*, 2016, 59(3): 1-5.
- [110] Wang Q, Han C J, Choma T, *et al.* Effect of Nb content on microstructure, property and *in vitro* apatite-forming capability of Ti-Nb alloys fabricated

- via selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2017, 126: 268-277.
- [111] Sing S L, Wang S, Agarwala S, *et al.* Fabrication of titanium based biphasic scaffold using selective laser melting and collagen immersion[J]. *International Journal of Bioprinting*, 2017, 3(1): 1-7.
- [112] Wang D, Wang Y, Wu S, *et al.* Customized a Ti6Al4V bone plate for complex pelvic fracture by selective laser melting[J]. *Materials*, 2017, 10(1): 10010035.
- [113] Pan C T, Lin C H, Huang Y S, *et al.* Design of interbody fusion cages of Ti6Al4V with gradient porosity using a selective laser melting process for spinal fusion arthroplasty[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2017, 12(1): 34-44.
- [114] Cheng L W, Cheng C W, Chung K C, *et al.* Sound absorption of metallic sound absorbers fabricated via the selective laser melting process[J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(1): 37-37.
- [115] Campanelli S L, Contuzzi N, Ludovico A D, *et al.* Manufacturing and characterization of Ti6Al4V lattice components manufactured by selective laser melting[J]. *Materials*, 2014, 7(6): 4803-4822.
- [116] Zhao Z G, Bo L, Li L, *et al.* Status and progress of selective laser melting forming technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 463(19): 46-49.
- 赵志国, 柏林, 李黎, 等. 激光选区熔化成形技术的发展现状及研究进展[J]. *航空制造技术*, 2014, 463(19): 46-49.
- [117] Ding H Y, Sun Z G, Chu M Q, *et al.* Development and application of selective laser melting technology in civil aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 473(4): 102-104.
- 丁红瑜, 孙中刚, 初铭强, 等. 选区激光熔化技术发展现状及在民用飞机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2015, 473(4): 102-104.