

# 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展

(邀请论文)

杨永强<sup>1</sup> 王迪<sup>1</sup> 吴伟辉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)  
<sup>2</sup>韶关学院物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005)

**摘要** 随着快速成型技术的进步,其研究热点转变到快速直接制造金属功能零件方面,应用范围也拓展到航空航天、医疗、汽车、模具等领域。针对选区激光熔化(SLM)技术更适合精密小批量金属零件的快速制造等特点,结合华南理工大学在该技术方面的研究进展,研究讨论了成型材料、成型工艺与过程控制、应用及其影响因素等,并对 SLM 技术现状、存在问题和发展趋势进行了分析。

**关键词** 激光技术;快速制造;选区激光熔化;成型材料;工艺控制;精密零件

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0601007

## Research Progress of Direct Manufacturing of Metal Parts by Selective Laser Melting

Yang Yongqiang<sup>1</sup> Wang Di<sup>1</sup> Wu Weihui<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China  
<sup>2</sup> School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China)

**Abstract** With the development of rapid prototyping (RP) technology, the research interests change to direct manufacturing of metal parts with functions. The application fields of RP are expanded to the areas of aerospace, medical, motor vehicle, mould, etc. According to the characteristics of selective laser melting (SLM) applicable for rapid manufacturing of fine-structured and small-lot metal parts, powder materials, process, control, applications and affect factors are studied and discussed by combining the research work of the author's group. The status-in-art, problems and developing prospect of SLM technology are also discussed.

**Key words** laser technique; rapid manufacturing; selective laser melting; powder material; process control; precision parts

**OCIS codes** 140.3390; 150.5495; 350.3390

## 1 引言

传统的快速成型方法在成型金属零件时,都采用树脂包覆的金属粉末作为原材料,通过激光扫描使树脂熔化将金属粉末烧结在一起<sup>[1]</sup>,也可采用喷射粘结剂的方法将松散的金属粉末粘结成型<sup>[2]</sup>,但成型后要经过脱粘、浸渗低熔点金属提高强度,该方法难以保证零件的尺寸精度和高强度。随着快速成型技术的发展,其研究方向开始转到快速直接制

造(RM)上<sup>[3]</sup>。RM 技术最大的优势是直接获得功能零件,成型件只需要经过简单的表面处理(喷砂、喷丸等)便可以直接应用于实际生产中。虽然 RM 技术在材料选择、个性化设计以及研发成本控制等方面具有很大的竞争优势,但由于 RM 技术在国内外市场上刚出现不久,其关键技术不够成熟(成型质量的可重复性),所以还没有被市场普遍接受。

选区激光熔化(SLM)技术属于 RM 领域的重

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-04-06

基金项目: 2010 年广东省教育部产学研结合重点项目(2010A090200072)资助课题。

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、快速成型制造等方面的研究。

E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

要部分,采用精细聚焦光斑快速熔化 300~500 目(25~48  $\mu\text{m}$ )的预置粉末材料,可以直接获得几乎任意形状、具有完全冶金结合的功能零件,致密度可达到近乎 100%,尺寸精度达 20~50  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度达 20~30  $\mu\text{m}$ ,是一种极具发展前景的快速成型技术<sup>[4]</sup>,而且其应用范围已拓展到航空航天、医疗、汽车、模具等领域。本文结合华南理工大学在 SLM 技术方面的研究进展,对其研究现状发展趋势和存在的问题进行了分析。

## 2 快速直接制造技术分类

按照粉末的添置方式可以将 RM 技术分为 3 类:1)使用激光照射预先铺展好的金属粉末,即金属零件成型完毕后将完全被粉末覆盖,这种方法目前设备厂家及各科研院所采用最多,包括直接金属激光烧结成型(DMLS)<sup>[5]</sup>、SLM<sup>[6]</sup>和 LC(Laser Cusing)<sup>[7]</sup>等;2)使用激光照射喷嘴输送的粉末流,激光与输送粉末同时工作(LENS)<sup>[8]</sup>,该方法目前在国内使用比较多;3)采用电子束熔化(EBM)预先铺展好的金属粉末<sup>[9]</sup>,此方法与第 1 类原理相似,只是采用热源不同,分别为高功率激光和电子束。

### 2.1 SLM/DMLS/LC 技术

SLM/DMLS 成型过程原理与选择性激光烧结(SLS)基本相同,将 SLM 与 DMLS 放于一起讨论是因为二者的界限目前很模糊,区别不明显,所以文中部分内容是对二者的讨论。DMLS 技术虽翻译为金属的烧结,实际成型过程中多数时候已将金属粉末完全熔化。DMLS 技术使用材料都为不同金属组成的混合物,各成分在烧结(熔化)过程中相互补偿,有利于保证制作精度。而 SLM 技术使用材料主要为单一组分的粉末<sup>[10]</sup>,激光束快速熔化金属粉末并获得连续的扫描线。作者认为 SLM 技术与 DMLS 技术其他方面无明显差别,只是称呼上的不同。为了保证金属粉末材料的快速熔化,SLM 技术需要高功率密度激光器,光斑聚焦到几十微米。SLM 技术目前都选用光束模式优良的光纤激光器,激光功率为 50~400 W,功率密度达  $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  以上。

### 2.2 激光熔覆式快速成型技术

激光熔覆式快速成型技术,美国称之为 LENS,在我国称之为激光净成型。LENS 技术是在传统快速成形技术基础上引入激光熔覆技术而创造的一种新的快速成型技术,成型过程中,通过喷嘴将粉末聚集到工作平面上,同时激光束也聚集到该点,将粉末

以及上层部分已固化金属熔化,已熔化粉末凝固后,形成新层与上一层牢固结合,如此逐层堆积成型。该方法采用大功率 Nd:YAG 固体激光器或 CO<sub>2</sub> 激光器,同轴环形粉末喷嘴输送的粉末汇聚点与激光作用点重合,通过工作台或喷嘴移动,获得堆积的熔覆实体。LENS 技术使用的是千瓦级的激光器,由于采用的激光聚焦光斑较大,一般在 1 mm 以上,虽然可以得到冶金结合的致密金属实体,但其尺寸精度和表面光洁度都不太好,需进一步进行机加工后才能使用。

### 2.3 电子束熔化成型

电子束熔化成型与 SLM/DMLS 系统的差别主要是热源不同,在成型原理上基本相似。因使用电子束作为热源,金属材料对其几乎没有反射,所以能量吸收率大幅提高。成型过程发生在真空环境下,材料熔化后的润湿性也大大提高,增加了熔池之间、层与层之间的冶金结合强度。EBM 技术成型室中必须为高真空,才能保证设备正常工作,这使得 EBM 技术整机复杂度提高。还因在真空度下粉末容易扬起而造成系统污染。此外,EBM 技术需要将系统预热到 800 °C 以上,使得粉末在成型室内预先烧结固化在一起。因而,EBM 技术优点是成型过程效率高,零件变形小,成型过程不需要金属支撑,微观组织更致密等。缺点是高预热温度对系统的整体结构提出非常高的要求,加工结束后零件需要在真空成型室中冷却相当长一段时间,降低了零件的生产效率。

## 3 SLM/DMLS 国内外最新进展

在上述的 RM 技术中,SLM/DMLS 技术因为从 SLS 过渡而来,所以针对其设备开发、成型控制、材料与应用研究也最多。虽然目前国内外 RM 技术众多,作者认为 SLM/DMLS 技术更适合精密金属零件的快速直接制造<sup>[4]</sup>,电子束熔化成型技术在原理与成型工艺过程上与其类似,在本文中一起讨论。

### 3.1 SLM/DMLS 技术主要成熟机型

世界范围内已经有多家成熟的 SLM/DMLS 设备制造商,包括德国 EOS 公司(EOSING M270, DMLS 技术)<sup>[5]</sup>,德国 MCP 公司(Realizer 系列, SLM 技术)<sup>[11]</sup>,Concept Laser 公司(M Cusing 系列,LC 技术)<sup>[7]</sup>,美国 3D 公司(Sinterstation 系列)<sup>[12]</sup>等。瑞典 Acram 公司(EBM 设备系列)<sup>[9]</sup>也占有重要地位。上述厂家都开发了不同型号的机型,包括不同的零件成型范围和针对不同领域的定

制机型等,以适应市场的个性化需求。近年来所有的 SLM/DMLS 设备都采用光纤激光器,因为光纤激光器几乎免维护、光束质量优良、光电转换效率高优点使其应用于 RM 的优势十分明显。随着光纤激光器的发展,使用光纤激光器的功率有逐渐加大的倾向,从初始的 50 W 到目前主流的 200 W,并逐渐向 400 W 靠近,伴随着功率的提升,可以获得更快的扫描速度以提高成型效率。值得注意的是,Concept Laser 公司的 LC 技术并没有采用振镜扫描技术,而使用  $x/y$  轴数控系统带动激光头行走,所以其成型零件范围不受振镜扫描范围的限制,成型精度同样不大于  $50\ \mu\text{m}$ 。

### 3.2 国内外主要研究单位

比利时鲁文大学 Kruth 带领的团队<sup>[13]</sup>对 SLM 技术的理论、工艺和应用研究相对更全面与深入,英国利兹大学 Childs 等<sup>[14]</sup>对 SLM 技术的物理现象与理论分析也较深入,英国利物浦大学的 Morgan 等<sup>[10]</sup>,日本大阪大学的 Abe 等<sup>[15]</sup>和法国 DIPI 研究所的 Yadroitsev 等<sup>[16]</sup>在 SLM/DMLS 领域都有较高的知名度。

国内在 RM 领域,主要有华南理工大学<sup>[17]</sup>、清华大学<sup>[18]</sup>、北京航空航天大学<sup>[19]</sup>、西北工业大学<sup>[20]</sup>、北京有色金属研究总院<sup>[21]</sup>、南京航空航天大学<sup>[22]</sup>和华中科技大学等高校与科研院所。每个单位的研究重点各有优势,其中华南理工大学主要在 SLM 成型设备、工艺过程<sup>[23]</sup>与质量控制、应用探索等方面研究较多。清华大学以 EBM 技术为主,北京航空航天大学、西北工业大学和北京有色金属研究总院主要在 LENS 技术上研究较深入,南京航空航天大学 and 华中科技大学以选择性激光烧结为基础,慢慢过渡到 SLM/DMLS 方向,双方分别在材料与工艺、装备与工艺方面有较多研究。目前国内还没有稳定的商品化 RM 机器在市场上出售。

## 4 材料研究

### 4.1 成熟材料

国外有专门研发的 SLM/DMLS 用金属粉末,但价钱太高,大多数科研学者仍然采用商品化的金属粉末材料。材料研究是 SLM/DMLS 技术最重要和关键的技术之一,包括研究材料成分控制、激光与不同材料的作用机理、材料加热熔化与冷却凝固动态过程、微观组织的演变(包括孔隙率和相转变)、熔池内因表面张力影响造成的流动和材料间的化学反应等。

商品化的 SLM/DMLS 用金属粉末主要包括铜基合金、不锈钢、工具钢、钴铬合金、钛及钛合金、铝合金、镍合金等金属粉末。根据国外多家商品化设备公司已公开信息,目前在市场上应用最多的是奥氏体不锈钢、工具钢、钴铬合金和 Ti6Al4V 等粉末。上述材料通过 SLM/DMLS 成型,致密度近乎 100%,力学性能要优于铸件,部分性能指标甚至超越锻件水平。

### 4.2 科研型材料

目前科研型材料主要包括用于激光烧结的陶瓷材料、梯度材料等。Bertrand 等<sup>[24]</sup>研究了 SLM/SLS 方法成型纯氧化钇、氧化锆陶瓷,分析了陶瓷粉末物性、成型工艺参数与扫描策略对成型质量的影响,成型样品如图 1 所示<sup>[22]</sup>。为了获得梯度材料成型,Beal 等<sup>[25]</sup>针对多种材料的送粉方式、不同组元材料之间的结合特性进行了初步研究,其中关键是如何保证多种组元材料粉末准确地预置到指定位置。目前通过 SLM/DMLS 方法成型梯度材料研究还停留在简单方块的多种材料成型,并不能够获得复杂或任意分布组元材料的零件。图 2 为国外研究成型 X 方向梯度材料(H13 与铜材料)的送粉装置<sup>[25]</sup>,以及获得的成型效果示意图。国内顾东东等<sup>[26]</sup>对特殊材料的 DMLS/SLM 工艺研究较多,主要包括铜基合金、WC-Co 等。

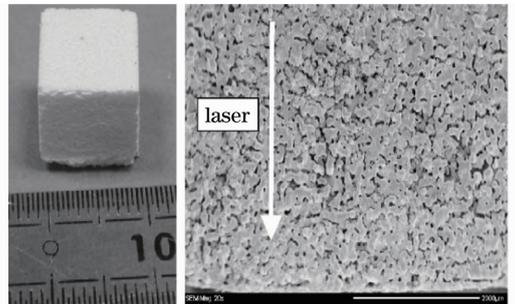


图 1 陶瓷材料 SLM 成型

Fig. 1 SLM fabrication of ceramic material

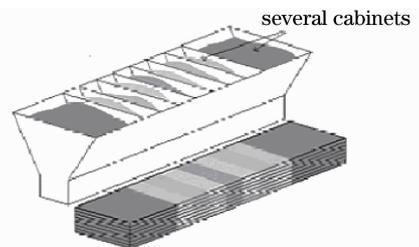


图 2 SLM 成型梯度材料的铺粉装置

Fig. 2 Re-coating device for SLM fabrication of functional graded material

## 5 成型工艺与过程控制

### 5.1 单熔道成型

成型零件由许多层成型面叠加而成,而每一层成型面由许多条单一扫描线“织”成,因此在研究多层成型面叠加成型前,研究并理解单道扫描线和单一成型面的成型规律、成型缺陷是关键。国外学者 Yadroitsev 等<sup>[27]</sup>总结单道熔道形态包括稳定成型区、不稳定成型区和球化成型区 3 类,如图 3(a)所示。Childs 等<sup>[14]</sup>总结单道熔道形态分为 4 类,包括截面为新月型的连续态熔道(高功率条件下),截面

为椭圆形状连续态熔道(优化条件下成型获得),不规则断续状熔道和球化态熔道 4 种,如图 3(b)所示。一般情况下,激光能量输入高容易获得光滑、连续的单道熔道,但高激光功率密度容易使得材料气化,不仅减少了熔池内的材料质量,也吹走了熔池周围的粉末,造成下一道熔池扫描时,没有足够的粉末以保证熔池的丰满。单道熔道的成型实验主要是为了描绘进行 SLM 成型的参数范围,知道熔池的过熔、未完全熔化及合理的能量输入范围,并获得激光功率、扫描速度的优化范围。

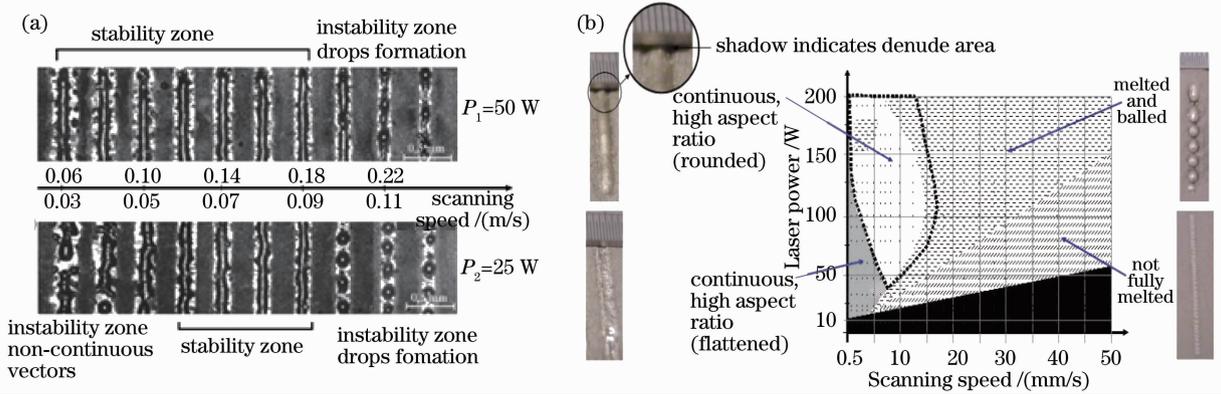


图 3 SLM 成型单熔道分类。(a) Yadroitsev 对单熔道分类,(b) Childs 对单熔道分类

Fig. 3 Classification of single track fabrication by (a) Yadroitsev, (b) Childs

### 5.2 能量输入控制

一直以来没有统一的影响因素来判定 SLM/DMLS 的成型效果。许多研究工作者将成型过程中的各工艺参数统一于能量(密度)输入来表述,而各研究人员对能量输入的定义方法不同,且并没有较全面地考虑各成型参数。表 1 为各学者对能量输入的定义

总结。可看出能量输入大小主要与激光功率( $P$ )、扫描速度( $v$ )、扫描间距( $s$ )、加工层厚( $h$ )等参数有关。许多研究工作者研究结果发现扫描速度对能量输入大小具有最重要的调节作用,其代表了激光停留在粉末表面的时间长短。除了上述影响因素外,影响能量输入大小还包括成型件横截面大小等。

表 1 能量输入的定义总结

Table 1 Summary of definition for energy input

Authors	Model definitions	Physical meanings	Defects for each model
Morgan <sup>[10]</sup>	$\psi_1 = \frac{4P}{\pi vs}$	Amount of energy input per unit area in unit time	Not consider spot diameter and layer thickness
Simchi <sup>[28]</sup>	$\psi_2 = \frac{P}{vdh}$	Amount of energy input per unit volume in unit time	Not consider scan spacing
Simchi <sup>[29]</sup>	$\psi_3 = \frac{P}{vsh}$	Amount of energy input per unit volume in unit time	Not consider spot diameter
Yadroitsev <sup>[27]</sup>	$\psi_4 = \frac{P}{v}$	Amount of energy input per unit time	Not consider spot diameter, layer thickness and scan spacing

为了获得致密化 SLM 成型件,除了要求满足足够的能量输入,还要考虑扫描线之间的搭接率,只有两者都满足才能获得良好的效果。搭接率的存在,必然导致实际激光能量输入的增加(源于已加工熔道及已成型层的预热作用)。

虽然各研究工作者对能量输入的定义都不一

样,但联系其研究条件与讨论的对象可以发现,针对不同的能量输入定义,其应用场合一般也不一样。如  $P/v$  线能量输入主要应用于单道扫描线的形态讨论;而  $\frac{4P}{\pi vs}$ ,  $\frac{P}{vsh}$  等主要应用于多道搭接、多层叠加的致密度讨论;在某些参数固定的情况下,如光斑直

径或者加工层厚固定,选用 $4P/(\pi us)$ 能量输入模型讨论成型效果更为合适。

### 5.3 成型扫描策略

目前 SLM 成型时扫描策略大多采用激光打标应用中的填充式扫描为主。但扫描策略对提高 SLM 成型件致密度、成型效率、减少内部残余应力

方面具有重要作用。Morgan 等<sup>[9]</sup>研究了普通填充方式与层间错开扫描方法对高致密度成型的影响,Beal 等<sup>[30]</sup>也深入分析了几种扫描策略对 H13/Cu 梯度功能材料成型的影响,他们得出的结论都证明采用层间错开扫描策略[如图 4(a)所示]与正交扫描结合的方式,可以获得更高的致密度。

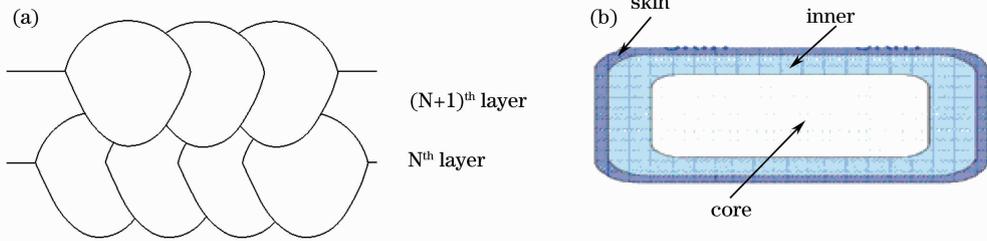


图 4 特殊的扫描策略。(a)层间错开扫描策略, (b)“Skin and Core”扫描策略

Fig. 4 Specific scan strategies used in SLM. (a) inter-layer stagger scan strategy, (b) "Skin and Core" scan strategy

在商品化的机器中,成型效率与成本是密切相关的。EOS 和 Arcam 公司都针对零件的外框、内层和芯部采用不同的扫描速度方法提高成型效率,如图 4(b)所示,其称之为“Skin and Core”扫描策略<sup>[5]</sup>。零件的外框低速度扫描获得高致密度与高表面质量,而内层和芯部采用高速扫描提高成型效率。

含量的实时监测等。Arcam 公司 EMB 设备因成型室内的真空度及对温度控制要求严格,所以需要氧含量、预热温度进行严格的监测。在 SLM 技术上,Kruth 领导的团队<sup>[31]</sup>针对成型过程熔池的物理信号进行实时监测,可反馈给控制系统并快速调整激光功率、扫描速度等加工参数,光路硬件以及熔池图像如图 5(a)和(b)所示,该技术主要应用于成型室内氧含量变化、激光功率变化异常时对机器的智能调整,而最重要的应用是针对悬垂结构成型质量的有效改善。

### 5.4 成型过程监测与反馈

针对 SLM/DMLS 系统控制方面的研究还比较少,从目前公开的信息来看,商品化设备功能上增加人性化操作,如对粉末的自动过筛或者重复利用,氧

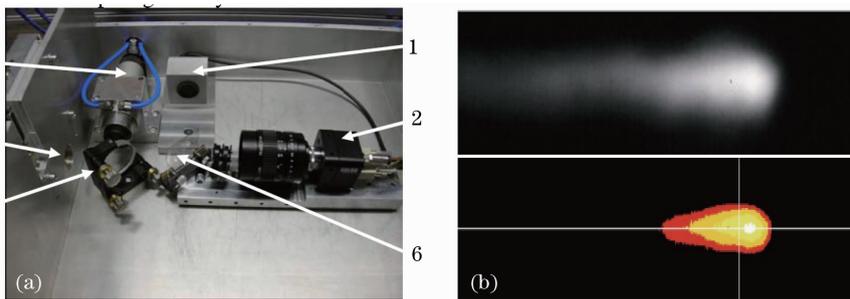


图 5 光路改造检测 SLM 成型过程熔池。(a)光路硬件组成, (b)经过处理后的熔池图像

Fig. 5 Improving the hardware of the light path to monitor the melt pool during SLM fabrication

(a) hardware of light path, (b) processed image of the melt pool

### 5.5 表面质量改善研究

对特定材料的 SLM 成型零件致密度可以优化控制在 95% 以上,甚至达到 100%,力学性能与铸锻件可相媲美。但 SLM 成型件的表面粗糙度一般为 $15\sim 50\ \mu\text{m}$ ,相比于传统机加工的表面质量还有较大差距。主要是因为该工艺本身是采用叠层制造方法熔化粉末。虽然 SLM 成型件采用喷砂、喷丸方式进行后处理,或者简单手工打磨方式能够获得良好表面的光滑度,但是当零件内部结构复杂且为关

键功能部位,或者是一些精细零件时,采用上述后处理方法将不再适用。所以,直接优化改善 SLM 成型件表面质量更为关键,改善的方法包括从工艺、粉末选择、特殊的扫描策略等方面。图 6 为作者根据加工经验将 SLM 成型金属零件表面质量进行分级,按照由好变差顺序分为 4 级,良好状态是获得等级一和等级二的表面质量,此时只需要简单的后处理便可以使用。

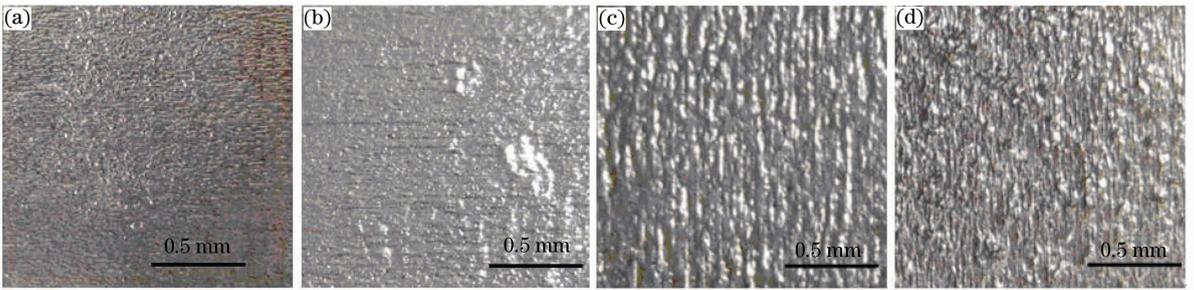


图 6 SLM 成型件按表面质量分为 4 个等级(316 L 不锈钢)。(a) 等级一,(b) 等级二,(c) 等级三,(d) 等级四

Fig. 6 Four levels of SLM fabricated parts' surface quality. (a) level one, (b) level two, (c) level three, (d) level four

### 5.6 几何特征成型

虽然 SLM 技术原理上可以成型任意复杂形状的金属零件,但不能完美地成型所有的几何特征,包括薄板、尖角、特别是悬垂面结构<sup>[32]</sup>等,如图 7(a)和(b)所示<sup>[31,32]</sup>。悬垂结构使 SLM 成型零件的局部形状精度、尺寸精度不能达到要求,严重时导致加工件报废,或者成型过程失败。针对悬垂面的加工,目前主要是通过添加大量的金属支撑保证成型过程稳定,再除去支撑和表面打磨方法保证成型面。也有少部分情况下是 SLM 成型结束后,通过机加工方

式获得悬垂面。但是当加工件精细而复杂、或者悬垂面在零件内部时,添加支撑或者后续机加工都不再合适。所以,如果能够在不添加支撑情况下将悬垂面顺利成型完成,或者在设计阶段避免或尽量减少悬垂面,对 SLM 工艺的提升和应用范围拓展具有很大的意义。目前国内外针对 SLM 成型悬垂面的研究很少,比利时鲁文大学 Kruth 带领的团队<sup>[31]</sup>进行了初步的研究,提出在光路系统中增加监测和反馈装置,灵活改变激光功率大小的方式改善悬垂面的成型质量。

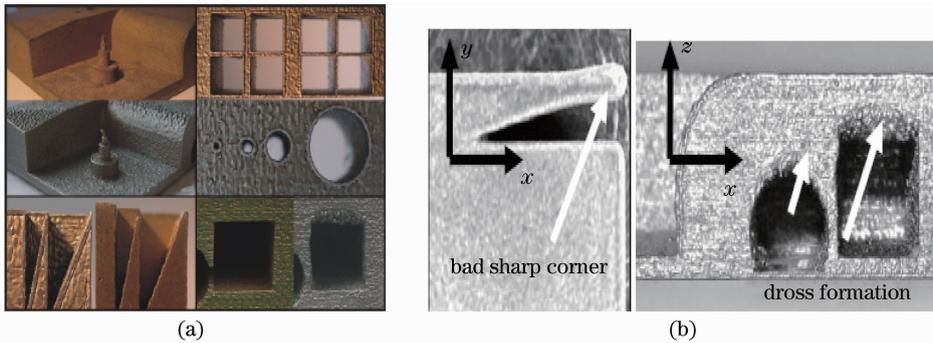


图 7 Kruth 对 SLM 成型零件几何特征的研究。(a) 不同几何特征成型质量,(b) 尖角与悬垂结构成型缺陷

Fig. 7 Study on the SLM fabrication of geometrical features by Kruth. (a) fabrication quality of various geometrical features, (b) fabrication defects of sharp corner and overhanging structure

## 6 应用研究

如果没有经过慎重分析零件特性、应用领域等而选用 SLM/DMLS 制造,反而与该技术初衷背道而驰。是否选用 RM 制造,要考虑零件的体积与形状复杂度,而零件的质量要求是最重要的因素。其中零件的体积与形状复杂度直接决定加工成本,而零件的质量要求决定了 RM 技术是否能够满足实际需求。

零件尺寸与复杂度:零件越小且复杂的情况下,选用 RM 技术将有更大优势。换句话说,假如一个零件形状简单,而且体积很大,通过传统的机加工方法将更为合适。而当零件小而复杂,RM 每次成型可

以达到几十甚至几百个,相比传统的机加工将更有优势。RM 制造成本与零件体积大小成正比例关系。

质量要求:包括零件的强度、尺寸精度、表面质量等。也许目前 RM 技术遇到的最大问题就是零件质量还不能够完全达到传统加工方法。相比传统方法,RM 技术在尺寸精度、材料可靠性、表面质量等方面还较为逊色。因此,当零件强度与表面质量要求很高时,RM 技术可能不合适。

SLM/DMLS 技术目前还主要应用于新概念产品的快速研发和小批量小型零件制造,以缩短加工周期。用于批量产品的加工还很少有报道,EOS 公司和 MCP 公司报道 DMLS 技术应用于牙桥牙冠的

批量生产工艺较为成熟，一次成型牙冠可以达到500个。图8~11以典型实例列举了SLM目前在

医疗、汽车、航空航天等行业的应用<sup>[9,11]</sup>。

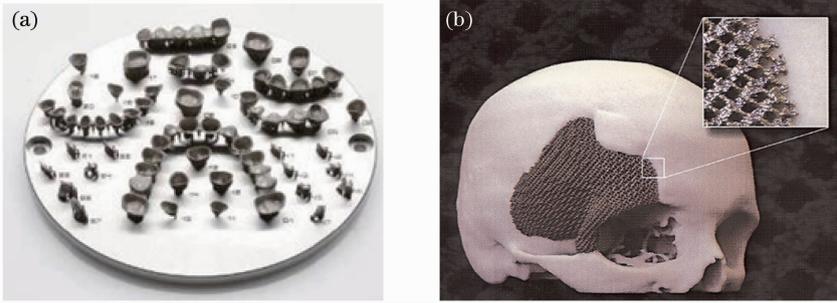


图8 SLM技术应用于医学领域。(a)牙桥和牙冠批量制造,(b)多孔结构用于人的头骨修补

Fig.8 SLM is applied to medical field. (a) mass production of crowns and bridges, (b) porous structure is used to skull repairing

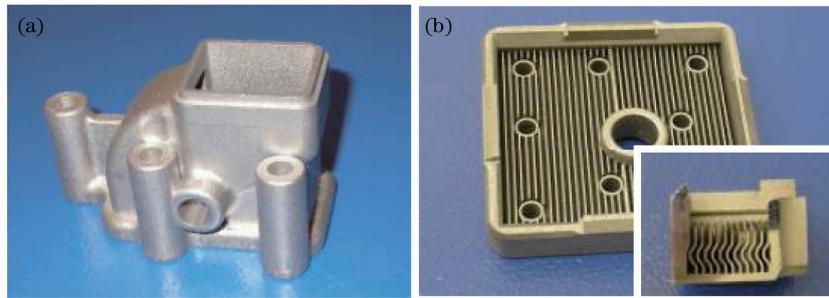


图9 SLM技术应用于汽车和核电行业。(a)汽车油烟排泄转接口,(b)核电厂的过滤装置

Fig.9 SLM is applied to automobile and nuclear-power industry. (a) lampblack venting interface in automobile, (b) filtering device in nuclear-power plant

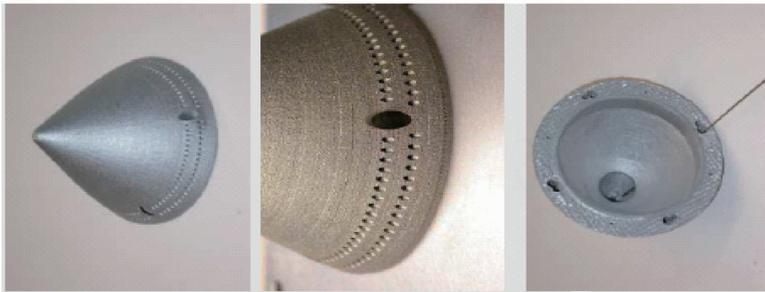


图10 SLM技术直接制造火箭头部

Fig.10 SLM is applied to directly manufacture rocket head

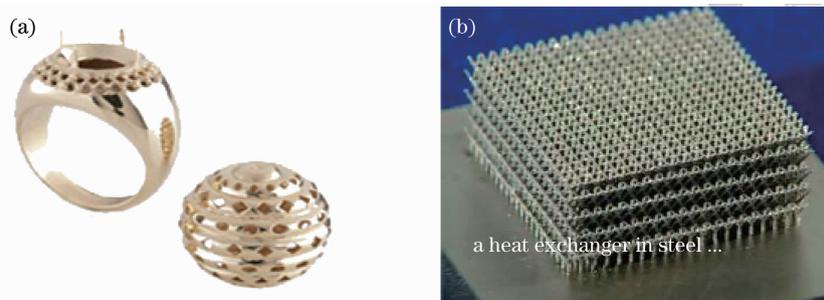


图11 SLM技术应用于其他行业。(a)珠宝首饰,(b)新型多孔结构散热装置

Fig.11 SLM is applied to other industries. (a) jewelry, (b) new type porous structure used as heat sink device

## 7 华南理工大学 SLM 研究进展

华南理工大学在 Dimetal-240 基础上,与企业合作开发了 Dimetal-280。目前 Dimetal-280 在特定材料的关键性能方面已经可以与国外同类产品相比较,比如成型件的精度与致密度等。但在成型过程稳定性控制、材料成分控制等方面与国外商品化设备还有一定差距。

### 7.1 材料及成型过程控制

可用于 Dimetal-280 稳定加工的材料包括不锈钢、钛合金、工具钢,正在进行研究材料包括铜基合金、铁基合金等。不锈钢、工具钢成型相对容易控制,致密度优化控制在 99%,钛合金容易氧化,成型过程控制要求严格,致密度控制在 92%~96%。在 SLM 成型的过程中,出现了嵌入物、孔隙、塌陷、翘曲变形等缺陷,这些缺陷的存在严重影响着致密度、表面精度、尺寸精度以及力学性能等。这些缺陷跟工艺有很大的关系,下面总结了作者在 SLM 实验过程中针对稳定性控制的一些经验:1)控制入射到粉床上的实际激光功率的稳定度。从光纤激光器发出的激光经过光隔离器、扩束镜、扫描振镜、聚焦镜后,实际到达粉末表面的激光功率经过光学原件的削弱必定比设定值小;2)铺粉平整性保证。铺粉平整,则粉末对激光的吸收平稳,激光熔化粉末后容易获得平整的成型表面。而当铺粉平面凹凸不平,导致激光照射在粉末表面功率密度不等,粉末熔化效果有差异,最终成型面起伏不平。SLM 铺粉的效果要求平整、薄和紧实,这 3 个要求对铺粉机构设计与装配提出了较高的要求;3)成型室内含氧量保证在 0.1% 体积分数以下。粉末材料中 C、Si、Mn 等元素与 O 的结合更容易,容易形成稳定相而变成杂质。成型室气氛中所含氧气也是金属液发生球化的一个重要原因,液态金属表面氧化后与基板或与已凝固层的润湿性大大降低;4)要求粉末纯净。粉末长期使用导致成型件表面嵌入夹杂物,夹杂物成分主要为  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  等,严重影响了成型件的力学性能,并降低铺粉结构运行的安全性;5)黑烟问题,黑烟来源于金属粉末中的 C 元素、低熔点合金元素以及其他杂质元素气化。黑烟很容易污染镜片和粉末,影响成型过程激光功率的稳定。

### 7.2 SLM 成型悬垂结构

零件倾斜角度  $\theta$  (悬垂面与水平方向的夹角)和成型参数(激光功率、扫描速度、成型层厚)对悬垂面成型影响最大。 $\theta$  越小意味着层与层间悬空部分越大,当悬空部分大于光斑直径时,激光聚焦光斑完全落在

粉末支撑区域上,导致熔池体积很大,并沉陷到粉末中。为了稳定成型悬垂面,悬空部分长度需小于光斑半径,使激光光斑大部分在实体支撑区域进行扫描。图 12 为 SLM 成型悬垂结构时,临界成型角度曲线将成型区域分为 3 个区间,临界成型角度包括最小成型角与可靠成型角度,根据悬垂结构成型质量,可分为稳定成型区、悬垂物成型区和不能成型区。

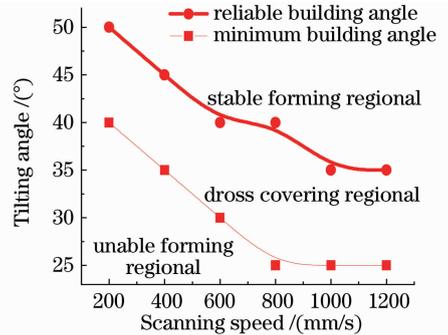


图 12 临界成型角度曲线将成型区域分为 3 个区间 ( $P=150\text{ W}$ )

Fig. 12 Fabrication zone is divided into 3 regions by critical tilting angle ( $P=150\text{ W}$ )

图 13 为临界成型角度与激光功率、扫描速度的关系,由图可知临界成型角度与能量输入互为制约。当悬垂面倾斜角  $\theta$  固定且较小时,必须提高扫描速度或者减小激光功率,以减小悬垂结构的翘曲倾向;当需要高能量输入获得更致密化的成型时,在无法添加支撑的情况下,必须从设计上提高倾斜角度  $\theta$ 。虽然随着扫描速度的提高,翘曲量随着减小,但不能通过不断减小能量输入对翘曲变形进行改善,因为过低能量输入导致熔深降低,影响上下层的结合,容易造成层间开裂。

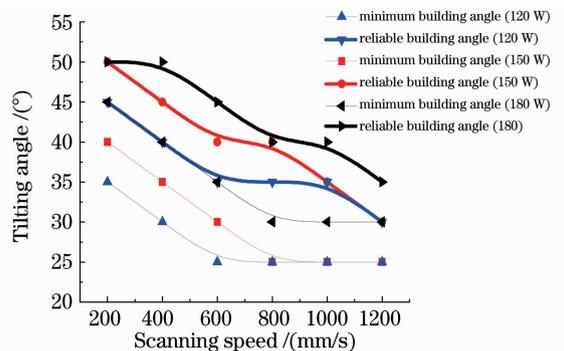


图 13 不同扫描速度、激光功率与临界成型角度的关系

Fig. 13 Relationships among scan speed, laser power and critical tilting angle

### 7.3 应用研究探索

图 14(a)~(d)列举了本实验室在探索 SLM 应用过程中的典型应用实例,每个例子的开发成功都

具有良好的市场价值。

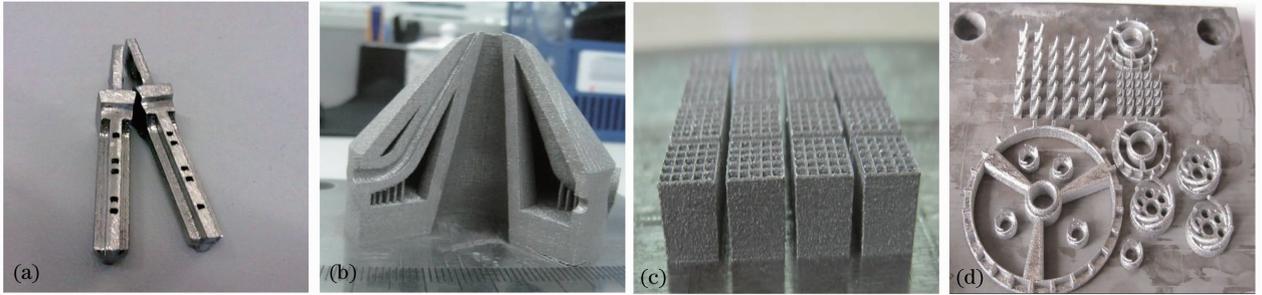


图 14 Dimetal-280 应用探索。(a)自由设计的钥匙,(b)具有复杂水冷与保护气通道喷嘴,(c)精密散热器,(d)自由曲面耦合设计的齿轮

Fig. 14 Application of Dimetal-280. (a) free form designed key, (b) nozzle with complex water-cooling and shielding gas channels, (c) precision heat sink device, (d) freeform designed wheel gear

## 8 SLM 技术发展趋势

### 8.1 成型效率

SLM 技术相比于传统加工,最大优势是可成型复杂形状零件,其次是快速小批量制造一定体积范围内零件,省去开模的成本与时间,其制造成本与加工时间成正比关系,但在成型较大零件时,少说 20 h,多则 2~3 天时间,加工过程需要系统稳定性绝对可靠。目前 EOS 公司、MCP 公司成型效率一般为 5~20 cm<sup>3</sup>/h。为了进一步提高成型效率,他们通过研究特殊的扫描策略,更换更大功率的光纤激光器,对粉末预热,或者从机械上减少铺粉行程等方法提高成型效率,而更换大功率光纤激光器为主要趋势。

### 8.2 可控多孔材料制造

SLM 直接成型可控多孔零件,即在 CAD 设计阶段或者成型过程中进行有目的的人工干预,以达到预期的孔隙大小、数量和结构。可控多孔材料可应用在:1)医学上多孔植入体是为了让细胞生长依附性好,使骨组织替换后更快速地生长;2)一些散热机构,要求空气对流性好;3)过滤装置。图 15 为 MCP 公司研发通过快速成型多孔结构材料应用于骨组织替代的例子<sup>[11]</sup>。从设计到最终产品应用与临床,包括 CT 反求、CAD 设计、SLM 快速加工制造、表面涂覆羟基磷灰石(HA)等。每一个步骤对临床效果至关重要,材料包括 Co-Cr-Mo 合金、316 L 不锈钢和钛合金。

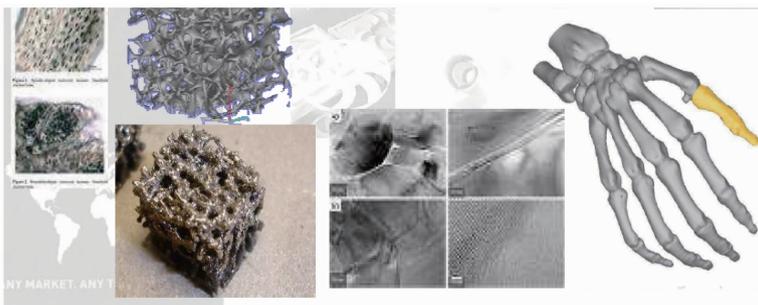


图 15 SLM 成型多孔结构材料用于骨替代品

Fig. 15 SLM fabricated porous structured material used as bone substitutes

### 8.3 微小型零件成型

日本学者从特征尺寸的角度对微机械的基本尺寸做了划分:小到 100~1 mm 的称为微小型机械(Mini-mechanism);小到 1 mm~10 μm 的称为微型机械(Micro-mechanism);小到 10 μm~10 nm 的称为超微型机械(Sub-micro-mechanism)或纳米机械。SLM 技术采用粉末颗粒大小从几微米到几十微米

之间,所以理论上 SLM 可以成型微小型零件。图 16 为德国研究人员通过选区激光烧结设备成型的微小零件(Micro-parts)<sup>[33]</sup>,零件细节特征分辨率小于 30 μm[如图 16(b)所示],成型条件为真空。

### 8.4 免装配机构直接制造

传统的机械装置通过先加工零部件,然后再组装的方式获得,零部件在装配过程中经常出现装配

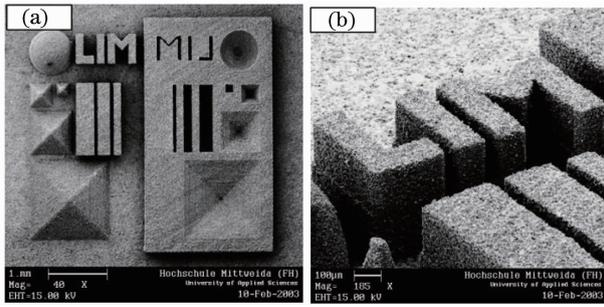


图 16 激光烧结成型微型零件。(a)样品全貌，  
(b)细节观察

Fig.16 Micro-parts fabricated by laser sintering process.  
(a) full view of the sample, (b) observing magnified details

精度与变形等问题。采用 SLM 技术,结合数字化设计和装配可直接制造出一定间隙量的免装配结构,能够保证装配精度,省去后续工序。图 17 为典型的一种免装配机构直接成型例子,可以看出其成型后可以自由摆动。

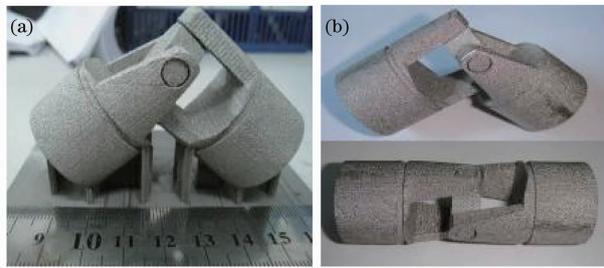


图 17 SLM 直接成型免装配机构。(a)支撑除去前，  
(b)除去支撑后摆动

Fig.17 Non-assembly mechanism fabricated by SLM.  
(a) before support structure removed, (b) after support structure removed and swing

### 8.5 尚存在的问题

材料贵、设备贵、操作复杂等问题需要解决。国外 SLM 设备售价大概在 500~700 万元人民币,还不包括后续的材料使用费等。国内的科研院所或者企业一般承担不了如此高的成本,SLM 设备需要专业人士操作,操作人员需要对其技术原理深入地了解也是限制设备应用的一个重要因素。SLM 设备维护费用较为昂贵,包括保护气体、从原厂商购买成型材料等。但巨大的市场价值,使得国内很多高校与科研机构开始涉足 SLM 技术的研究。目前国内 SLM 技术的发展与推广还存在一些问题。主要是因为该技术系统集成度高,需要综合材料、光学、软件、数控、机械等多门类人才共同研发,且设备研发周期长,技术难度大,导致设备昂贵。国内配套部件的稳定性还达不到国外的水平,目前也还只能制作

一些尺寸较小的工件。在配套材料的研发上缺少成熟的理论支撑。只有研发出高可靠性和高技术指标、具有自主知识产权的 SLM 设备,同时拥有配套的工艺路线,才能在我国较大范围地推广这项技术。

## 9 结 论

1) 比较了目前直接制造金属零件方法的种类,主要包括 SLM/DMLS、LENS、EBM,认为 SLM/DMLS 技术更适合精密金属零件的快速直接制造。

2) 针对 SLM/DMLS 技术的成型材料、成型工艺与过程控制、应用研究等几个方面进行了详细的讨论,认为其中单熔道成型、能量输入控制、扫描策略优化、成型过程监测与反馈等是影响 SLM 成型质量的主要因素。

3) 结合华南理工大学在 SLM 快速成型的研究进展,探讨了 SLM 技术的发展趋势。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Guangchun, Zhao Guoqun. Rapid Prototyping and Rapid Tooling Technology and Its Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 80~200  
王广春, 赵国群. 快速成型技术与快速模具制造技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 80~200
- 2 Liu Weijun. Rapid Prototyping Technology and Its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 90~200  
刘伟军. 快速成型技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 90~200
- 3 E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada *et al.*. Rapid manufacturing to metal components by laser forming [J]. *Internat. J. Machine Tools and Manufacture*, 2006, **46**(13): 1459~1468
- 4 I. Yadroitsev, I. Shishkovsky, P. Bertrand *et al.*. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(10): 5523~5527
- 5 Y. Tanga, H. T. Loha, Y. S. Wongb *et al.*. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **140**(3): 368~372
- 6 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di *et al.*. Research on variable density rapid manufacturing process based on selective laser melting technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1879~1884  
吴伟辉, 杨永强, 王 迪 等. 选区激光熔化变密度快速制造工艺研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1879~1884
- 7 Vojislav Petrovic, Juan Vicente Haro Gonzalez, Olga Jorda Ferrando *et al.*. Additive layered manufacturing: sectors of industrial applications shown through case studies [C]. *International Journal of Production Research*, 2011, **49**(4): 1061~1079
- 8 I. Palcic, M. Balazic, M. Mifelnar *et al.*. Potential of laser engineered net shaping (LENS) technology [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, **24**(7): 750~753
- 9 H. B. Qi, Y. N. Yan, F. Lin *et al.*. Direct metal part forming of 316 L stainless steel powder by electron beam selective melting [C]. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part*

- B; *Journal of Engineering*, 2006, **220**(11): 1845~1853
- 10 R. H. Morgan, A. J. Papworth, C. Sutcliffe *et al.*. High density net shape components by direct laser re-melting of single-phase powders[J]. *J. Mater. Sci.*, 2002, **37**(15): 3093~3100
- 11 Andreas Gebhardt, Frank-Michael Schmidt, Jan-Steffen Hötter *et al.*. Additive manufacturing by selective laser melting: the realize desktop machine and application for dental industry[J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**(2): 543~549
- 12 K. D. Dotchev, S. S. Dimov, D. T. Pham *et al.*. Accuracy issues in rapid manufacturing CastForm™ patterns [C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 2007, **22**(1): 53~67
- 13 J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **149**(1-3): 616~622
- 14 T. H. C. Childs, C. Hauser, M. Badrossamay. Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders; experiments and modeling[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B; *Journal of Engineering Manufacture*, 2005, **219**(4): 339~357
- 15 F. Abe, K. Osakada, M. Shiomi *et al.*. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting[J]. *Mater. Process. Technol.*, 2001, **111**(3): 210~213
- 16 I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. bertrand *et al.*. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **254**(4): 980~983
- 17 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wei Guoqiang. Direct manufacturing of precision metal parts by selective laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 175~179  
吴伟辉, 杨永强, 卫国强. 选区激光熔化快速成型制造精密金属零件技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 175~179
- 18 Yan Yongnian, Qi Haibo, Lin Feng *et al.*. Electron beam selective melting to fabricate three-dimensional metal parts[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(6): 87~92  
颜永年, 齐海波, 林峰等. 三维金属零件的电子束选区熔化成形[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(6): 87~92
- 19 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Tang Haibo *et al.*. The development of large-scale titanium alloy structure fabrication by laser rapid prototyping[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型技术研究进展[J]. *航空精密制造技术*, 2008, **44**(6): 28~30
- 20 Huang Weidong, Li Yanmin, Feng Lipin *et al.*. Laser solid forming of metal powder materials[J]. *Material Engineering*, 2002, (3): 40~43  
黄卫东, 李延民, 冯莉萍等. 金属材料激光立体成形技术[J]. *材料工程*, 2002, (3): 40~43
- 21 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1045~1048  
席明哲, 张永忠, 章萍芝等. 工艺参数对激光快速成型 316 L 不锈钢组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 22 Dongdong Gu, Yifu Shen. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, **8**(5): 34~38
- 23 Wang Di, Yang Yongqiang, Wu Weihui. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3233~3239  
王迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3233~3239
- 24 Ph. Bertrand, F. Bayle, C. Combe *et al.*. Ceramic components manufacturing by selective laser sintering[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **254**(4): 989~992
- 25 V. E. Beal, P. Erasenthiran, C. H. Ahrens *et al.*. Evaluating the use of functionally graded materials inserts produced by selective laser melting on the injection moulding of plastics parts [C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B; *Journal of Engineering Manufacture*, 2007, **221**(6): 945~954
- 26 Gu Dongdong, Shen Yifu. Microstructure of the WC-10% Co particulate reinforced Cu matrix composites fabricated by selective laser sintering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, **35**(2): 276~279  
顾东东, 沈以赴. 选区激光烧结 WC-10%Co 颗粒增强 Cu 基复合材料的显微组织[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, **35**(2): 276~279
- 27 I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8064~8069
- 28 A. Simchi, F. Petzoldt, H. Pohl. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **141**(3): 319~328
- 29 A. Simchi. Direct laser sintering of metal powders; Mechanism, kinetics and microstructural features[J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2006, **428**(2): 148~158
- 30 V. E. Beal, P. Erasenthiran, N. Hopkinson *et al.*. The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, **30**(9): 844~852
- 31 J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh *et al.*. Feedback control of selective laser melting [C]. Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2007. 521~527
- 32 J. P. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Vandenbroucke *et al.*. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques [C]. Int. Conf. Polymers & Moulds innovations (PMI), Gent, Belgium, 2005. 20~23
- 33 Horst Exner, Peter Regenfuss, Lars Hartwig *et al.*. Selective laser micro sintering with a novel process [C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 145~151