

# 基于选区激光熔化快速成型的自由设计与制造进展

宋长辉<sup>1,2</sup> 杨永强<sup>1,2</sup> 叶梓恒<sup>1</sup> 王迪<sup>1</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> 广州有色金属研究院, 广东 广州 510641)

**摘要** 随着机械系统复杂性的不断增加,在现代结构理论模型的设计中,设计者需要统筹考虑结构新颖性、性能优良性和制造可行性,但传统的制造方式对设计约束很大。选区激光熔化(SLM)是快速制造中最有发展潜力的技术之一,在理论上可以实现任意复杂的计算机辅助设计(CAD)理论模型到金属功能件的直接制造。针对 SLM 自由制造的特点,结合华南理工大学在该技术方面的研究基础,研究了具有免组装、功能集成和轻量化特点的复杂金属功能件自由设计与直接制造的工艺,为航空航天、医疗、汽车等领域的产品创新设计与个性化制造提供参考。

**关键词** 光学制造; 选区激光熔化; 自由设计与制造; 免组装机构; 轻量化构件

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.080026

## Development of Freeform Design and Manufacturing Based on Selective Laser Melting

Song Changhui<sup>1,2</sup> Yang Yongqiang<sup>1,2</sup> Ye Ziheng<sup>1</sup> Wang Di<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China  
<sup>2</sup> Guangzhou Research Institute of Non-Ferrous Metals Guangzhou, Guangdong 510641, China

**Abstract** As the complexity of the mechanical system is increasing, designers need to give comprehensive consideration to the novelty, excellent performance and manufacturing feasibility of the structure in the design of the theoretical model of modern mechanism. However, the traditional manufacturing methods impose great restriction on the design. Selective laser melting (SLM) is one of the technologies that have most development potential, which can achieve direct manufacturing of metal functional parts from any complex computer-aided design (CAD) theoretical models in theory. Based on the characteristics of the freeform manufacturing of SLM, combining with the related research of South China University of Technology, we study the freeform design and direct manufacturing process of complex metal pieces with non-assembly, functional integration and lightweight characteristics, which provides effective reference for the innovative design and personalized manufacturing of products in the fields of aerospace, medical treatment and automobile.

**Key words** optical fabrication; selective laser melting; freeform design and manufacturing; non-assembly mechanism; lightweight structure

**OCIS codes** 140.3390; 350.3850; 230.4000

## 1 引言

随着机械系统复杂性的不断增加,在现代结构理论模型的设计中,设计者需要统筹考虑结构新颖性、性能优良性和制造可行性。其中制造可行性强调在设计阶段就要充分考虑制造中的问题,其基本思想是从产品设计参数中提取与制造过程相关的信息进行分析,以改善设计。传统制造对于产品的形状与结构设计约

收稿日期: 2013-03-08; 收到修改稿日期: 2013-04-01; 网络出版日期: 2013-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51275179)

作者简介: 宋长辉(1986—),男,博士研究生,主要从事激光加工与激光快速成型等方面的研究。

E-mail: song\_changhui@163.com

导师简介: 杨永强(1961—),男,博士,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: meiyqiang@scut.edu.cn(通信联系人)

束很大。如何解放传统制造对设计的约束,实现复杂理论模型的工程价值,是目前急需解决的问题。

先进制造技术与计算和信息技术结合,在产品设计、制造工艺、装备和系统的描述、规划、操作与控制等方面带来了深刻的变革,推动产生了数字化制造这一新的学科领域<sup>[1-2]</sup>。发展于 20 世纪 80 年代的多学科综合的快速成型(RP)技术采用离散/叠加原理,根据零件的三维数字化模型直接制造出实体零件,是数字化制造的重要组成部分。随着科技发展及推广应用的需求,直接制造金属功能零件成为了快速成型主要的发展方向<sup>[3]</sup>。目前可用于直接制造金属功能零件的方法主要有选区激光熔化(SLM)<sup>[4]</sup>、选区激光烧结(SLS)<sup>[5]</sup>、电子束选区熔化(EBSM)<sup>[6]</sup>、激光熔覆(LENS)<sup>[7]</sup>等。本文结合华南理工大学的相关研究基础,对基于 SLM 的快速成型技术展开综述,以为各领域的产品创新设计与个性化制造提供参考。

## 2 选区激光熔化快速成型技术原理及特点

SLM 快速成型集成了激光、精密传动、新材料、计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)等技术,通过 30~80  $\mu\text{m}$  的精细激光聚焦光斑,逐线搭接扫描新铺粉层上选定区域,形成面轮廓后,层与层堆积成型制造,从而直接获得几乎任意形状、具有完全冶金结合的金属功能零件,致密度可达到近乎 100%<sup>[8]</sup>。SLM 将复杂三维几何体简化为二维平面制造,制造成本不取决于零件的复杂性,而是取决于零件的体积和成型方向<sup>[9]</sup>。

SLM 是一种激光增材制造技术,同 LENS 技术一起是目前激光金属“三维打印”制造的重要方式,两者各有优势,其共同点包括<sup>[10-11]</sup>:1) 采用分层制造技术;2) 使用高功率密度的激光器;3) 直接制成终端金属产品;4) 金属零件是具有冶金结合的实体,其相对密度几乎达到 100%;5) 适合单件和小批量模具和功能件的快速制造。它们的区别体现在以下几个方面<sup>[10-11]</sup>:

1) 送粉方式不同。SLM 基于铺粉式,而 LENS 是同步送粉。SLM 在成型时,粉末通过机械装置定量地送到成型平面上,然后采用滚筒或刮板等铺粉装置推送到成型缸,要求所铺粉末平整、紧实、均匀。LENS 通过送粉装置将粉末送运到粉喷嘴,在喷嘴处粉末汇聚,要求粉末汇聚性好。

2) 光路系统不同。SLM 基于高速动态扫描振镜,而 LENS 则是基于激光与数控平台的相对运动(激光束运动或者工作平台运动)。SLM 高速动态扫描振镜可让激光在 7 m/s 的扫描速度下精确定位与粉末作用的位置,但扫描范围受限于扫描振镜;LENS 激光与数控平台相对运动装置简单,精度取决于机械运动平台。

3) 激光与粉末作用位置不同。SLM 是激光焦点直接作用在成型平面粉床上,而 LENS 同步送粉立体成形是激光焦点光斑作用在喷嘴粉末汇聚处。

SLM 金属功能件直接制造与传统制造都需要数字化建模,而建模的过程也就是通过产品的设计来实现产品的功能。产品的设计又需要提取制造信息补充设计规则、理论,减少后反馈设计。传统制造将特征识别作为一种映射工具,而基于 SLM 的金属功能件自由制造的理念使其不限于已知的特征,即 SLM 技术拓展了现有的设计特征。同时 SLM 离散/累积制造在原理上也有一定约束,设计时需要提取的制造约束信息有:1) 分层约束;2) 激光光斑约束;3) 激光与材料相互作用约束<sup>[9]</sup>。

目前很多学者开始重视成型件的设计,如英国 University of Wales 采用工艺试验测试选区激光熔化直接制造几何形状的成型能力<sup>[12]</sup>,但大多只在应用研究中稍有涉及,并且针对 SLM 设计与制造大多局限于几何形状的设计以及单个零件的制造,无法发挥 SLM 制造的优势。

## 3 基于选区激光熔化快速成型免组装机构自由设计与制造

如何解放机构理论模型设计约束,让机构理论模型研究成果真正实现其工程应用价值,是目前急需解决的问题。传统机构制造方式是将机构的各个构件先制造出来,然后组装成机构。这要求设计者在设计时必须考虑到组装手段和装配空间,并由此延伸了面向装配的设计(DFA),可见因组装带来的设计约束很大。

华南理工大学苏旭彬等<sup>[13]</sup>提出了免组装机构的概念,为了区别于传统机构,将采用数字化设计和组装并直接制造成型,无需实际组装工序的机构称为免组装机构,并采用 SLM 技术一次性将金属机构制造出来。免组装机构 SLM 直接成型的主要步骤为:建立各个零件三维模型,将各个零件模型数字化组装后进行数据处理,导入 SLM 成型设备直接成型。

结合目前的研究,在此定义下的免组装机构将分为运动副的免组装和功能件的免组装。运动副的免组装主要研究现有的一些活动机构,在计算机设计过程中将构件组装,通过 SLM 一次直接制造。如传统万向节由节和十字架组成,将构件 CAD 模型在计算机中组装后,用 SLM 制造,如图 1 所示。功能件的免组装则要通过一个功能件完成传统多个构件组合才能完成的功能,这需要对设计相应地做出一定的改变,在设计过程中,按照定义的功能要求、尺寸约束等条件对机构进行重新设计,将要求的特征集成到一个功能件上,并通过 SLM 一次直接制造。如传统熔覆喷嘴由外套、中套、喷芯等分开制造然后组装,而通过功能件一体化设计,将多个构件组成才能实现的功能集中在一个构件上,通过 SLM 技术直接制造,如图 2 所示。

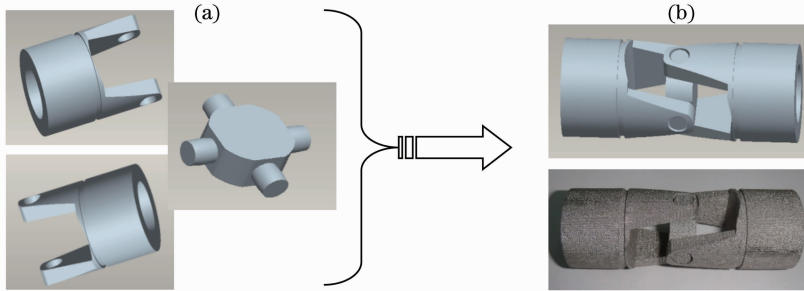


图 1 运动副免组装机构设计及 SLM 制造。(a)传统万向节组成;(b)计算机组装,SLM 制造(所用材料为 316L 不锈钢)

Fig. 1 Non-assembly motion pairs design and SLM manufacturing. (a) Combination of traditional universal joints; (b) assembled by computer and manufactured by SLM (material: 316L stainless steel)

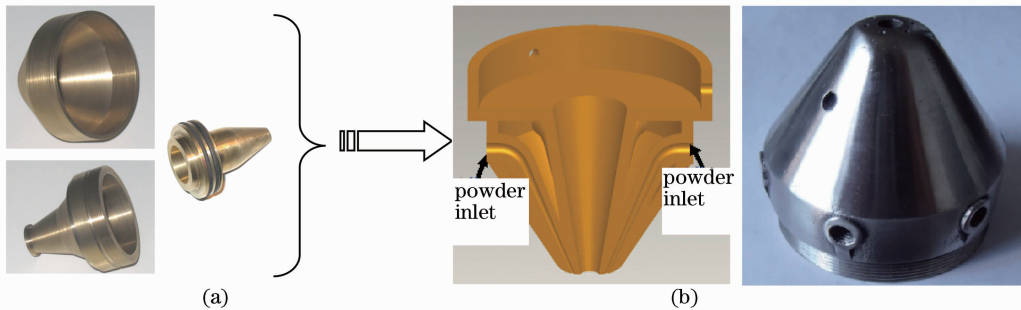


图 2 功能件免组装集成设计及制造。(a)外套、中套、喷芯组装制造喷嘴;  
(b)功能件免组装设计及 SLM 制造(所用材料为 316L 不锈钢)

Fig. 2 Non-assembly integrated functional parts design and SLM manufacturing. (a) Nozzle is assembled by coat, cover and spray core; (b) non-assembly design and SLM manufacturing of functional parts (material: 316L stainless steel)

运动副的免组装难点是活动关节的间隙的设计及其成型方向,功能件的免组装难点是在设计时将功能集成到一个构件上。这个,它们的共同难点是悬垂部分要采用支撑结构,防止激光的深穿透作用产生悬垂物、翘曲等缺陷,但是在功能件内部微细结构和运动副活动关节内部产生支撑较难清除,所以在设计时要避免对在精度要求高的区域添加支撑。苏旭彬等<sup>[13-14]</sup>通过对活动关节间隙的改进、成型极限角、成型机构摆放位置几方面开展研究,在很大程度上改善了 SLM 成型免组装活动关节的成型。

目前华南理工大学基于 SLM 技术,对免组装机构展开了大量的基础研究,通过 SLM 技术一次成型制造的 316L 不锈钢构件包括万向节、球关节、曲柄滑块机构等。同时针对具有特定电、磁、热、力性能金属材料进行成型工艺研究,从而进一步达到多个功能构件免组装成型,实现复杂机电装置一体化的制造,这对微机械系统的发展有重要意义。

此外,国外众多研究人员采用光固化成型和选区激光烧结等快速成型方法制造出旋转关节、球关节、线性关节和万向节等简单机构,所用材料为非金属<sup>[15-18]</sup>;香港大学 Chen 等<sup>[14]</sup>研究了快速成型直接制造免组装机械机构的主要影响因素,并提出了改进间隙的措施。他们提出的免组装机构有如下共同点:不同于当前对计算机三维模型预组装分析后,单独制造构件再将构件组装,而是在计算机内将三维模型组装后通过快速成型一次直接制造机构。

#### 4 基于选区激光熔化快速成型轻量化构件自由设计与制造

轻量化技术是轻量化设计、轻量化材料和轻量化制造技术的集成应用。但目前种种因素限制了轻量化技术的发展;设计周期不断压缩,新产品要求一次研发成功率高,同时轻量化技术中存在大量不确定因素,定量难度系数大。

基于 SLM 的金属功能件直接制造为结构与材料的轻量化提供了巨大契机。首先,SLM 是快速制造,允许设计师在最短时间内将三维数据模型转化为工程实体,便于功能件的后续检测;其次,SLM 制造允许采用更多创新设计方法,实施多种轻量化材料的匹配,减少零部件数量,结构更加紧凑。

目前基于 SLM 的金属功能件直接制造在轻量化方面除了实施多种轻量化材料的匹配外,采用多孔结构实现材料的结构效能比<sup>[19]</sup>也是最为重要的方式之一。可控多孔结构采用单元体通过一定排列组合形成,根据单个单元体的尺寸大小、结构形体以及组合方式的不同,其密度、性能、功用是不同的。可控多孔结构的单元体重缩小系数(实体占总体积比例)为 20%以下<sup>[20]</sup>,同时具有低密度、高强度、良好的能量吸收性、热导性及声学特性<sup>[21]</sup>,可以广泛地用于热交换器、生物器官与植入体、化学化工以及汽车航天航空轻量化构件等。

轻量化的可控多孔结构在制造热交换器方面具有很大优势,如图 3 所示。如 Tsopanos 等<sup>[22]</sup>报道的 1 mm 宽的栅格冷却通道,且有可控表面粗糙度,通过产生层流提高热交换性能。此外通过 SLM 可成型一些超轻材料如钛、钛合金,结合可控多孔结构可以制造一些超轻结构。如图 4 所示,德国 ILT Aachen 公司利用 SLM 技术对 Ti6Al4V 成型,成型的孔壁厚度 1 mm,成型时间 11 h。



图 3 SLM 技术制造热交换器(TCT Magazine)

Fig. 3 Heat exchanger fabricated with SLM technique (TCT Magazine)

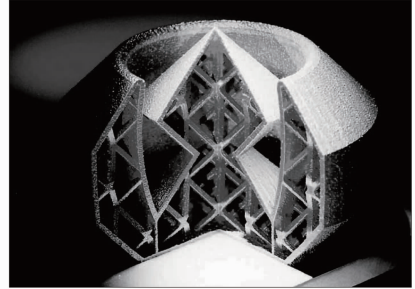


图 4 SLM 钛合金超轻构件

Fig. 4 Lightweight parts made by Ti alloy fabricated with SLM technique

国内,华南理工大学采用 SLM 技术直接制造可控多孔结构,如图 5 所示为八面体直接制造成型。根据 SLM 成型工艺要求,特别是 SLM 制造约束,在成型精密多孔结构时,需要对单元孔结构进行优化设计。对称八面体结构与方形和圆形单元孔相比,理论上可以完全避开倾斜角度小的悬垂结构,通过调整孔的线框倾斜角度到可靠成型角度以上,便可以保证可控多孔结构零件成型过程的安全性。

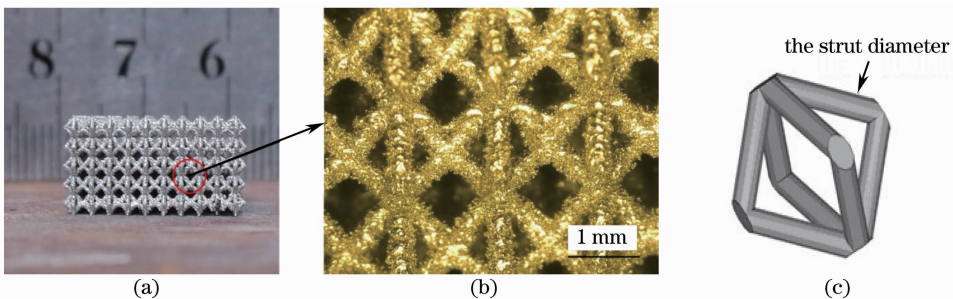


图 5 八面栅格结构的设计与制造。(a) 多孔结构单元孔优化设计;(b) SLM 制造零件;(c) 零件侧面放大图

Fig. 5 Design and manufacturing of octahedron lattice structure. (a) Optimal design of porous structure; (b) lattice parts manufactured by SLM; (c) enlarged side view of part

同时华南理工大学在医学植入体上采用可控多孔结构,在保证植入体性能的基础上,极大地减轻了植入体重量。植入体设计通过对单元孔结构优化设计,再与计算机层析成像(CT)三维医学信息重建获得的

CAD 模型进行布尔运算,获得具有复杂内部结构的多孔几何体。内部结构的设计主要是对孔隙率、孔隙形状、孔隙大小、孔分布以及相互之间连通性等表征参数的确定,如图 6 所示。

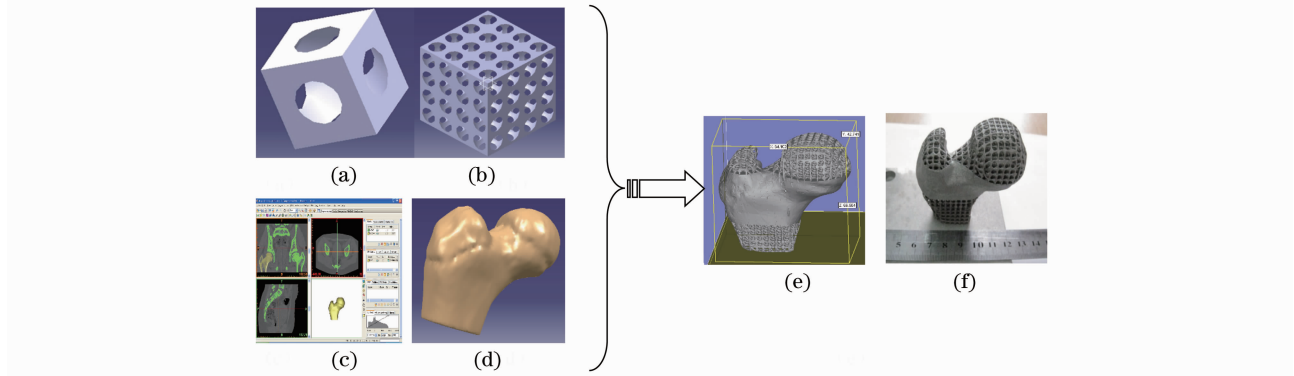


图 6 网格股骨植入体设计与制造。(a)单元孔设计;(b)单元孔阵列;(c)CT 数据;  
(d)CT 重建 CAD;(e)布尔运算获得模型;(f)植入体成型件

Fig. 6 Design and manufacture of femur implants. (a) Design of cell; (b) array of unit structure; (c) CT data;  
(d) CT reconstruction CAD; (e) result of Boolean calculation; (f) implants manufactured by SLM

## 5 结束语

本文涉及到的免组装结构、轻量化结构设计与制造在实际应用中并不是单独应用,而往往是根据实际需求,采用相结合的方式实现 SLM 制造及其自由设计的优势。

目前 SLM 技术在成型效率、成型精度、成型材料与工艺上有待完善,自由设计的 CAD 软件有待进一步开发。同时由于仿生结构、免组装结构和栅格结构在设计上需要仿生学、拓扑优化、力学、现代数学等基础知识和 SLM 制造相结合,将对设计者提出更高的要求。

SLM 技术在制造自由曲面、中空结构、多孔结构等复杂零件时,可充分发挥自由制造的优势。结合 SLM 自由制造,通过免组装设计、仿生设计、拓扑优化设计、功能集成设计,对零件的重量、性能、功能、美观进行优化,从而直接成型免组装部件、轻量化结构件、仿生结构件等。特别是在当今资源短缺的情况下,基于 SLM 技术对材料进行最大效能结构的设计与制造,符合绿色制造的主题。

## 参 考 文 献

- Xiong Youlun, Yin Zhouping. Digital manufacturing and digital equipment: the development direction of the manufacturing technology and equipment in the 21st Century[J]. Digital Manufacture Science, 2003, 1(1-4): 1-13.
- 熊有伦, 尹周平. 数字制造和数字装备——新世纪制造业及其装备的发展方向[J]. 数字制造科学, 2003, 1(1-4): 1-13.
- Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation Committee. Development Strategy Report of Mechanical Engineering 2011-2020[M]. Beijing: Science Press, 2010. 16-20.
- 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 16-20.
- Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi, *et al.*. The newest advance in laser rapid forming of metallic powders[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2000, 29(6): 361-365.
- 张永忠, 石力开, 章萍芝, 等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(6): 361-365.
- Huang Shuhuai, Xiao Yuejia. The prospect of rapid prototyping technology[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1-2): 195-200.
- 黄树槐, 肖跃加. 快速成型技术的展望[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 195-200.
- K Sanjay. Selective laser sintering: a qualitative and objective approach[J]. JOM, 2003, 55(10): 43-47.
- Yan Yongnian, Qi Haibo, Lin Feng, *et al.*. Produced three-dimensional metal parts by electron beam selective melting[J]. Chinese J 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.
- Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components[J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 388-391.

- 钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 388—391.
- 8 Wu Weihui, Yang Yongqiang. Key techniques of selective laser melting rapid prototyping system[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 175—180.
- 吴伟辉, 杨永强. 选区激光熔化快速成形系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 175—180.
- 9 Su Xunbin. Study on Digital Design and Direct Fabrication of Functional Parts Based on Selective Laser Melting[D]. South China University of Technology, 2011. 30—32.
- 苏旭斌. 基于选区激光熔化的功能键数字化设计与直接制造研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. 30—32.
- 10 Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe, *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 19—25.
- 张冬云, 王瑞泽, 赵建哲, 等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 19—25.
- 11 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.
- 12 Daniel Thomas. The Development of Design Rules for Selective Laser Melting[D]. Cradiff: University of Wales, 2009.
- 13 Su Xubin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Study on process of non-assembly mechanisms directly fabricated by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603021.
- 苏旭彬, 杨永强, 王迪, 等. 免装配机构的选区激光熔化直接成型工艺研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603021.
- 14 Y H Chen, Z Z Chen. Major factors in rapid prototyping of mechanisms[J]. J Key Engineering Materials, 2010, 443: 516—521.
- 15 C Mavroidis, K J DeLaurentis, J Won. Fabrication of non-assembly mechanisms and robotic system using rapid prototyping [J]. J Mechanical Design, 2001, 123(4): 516—524.
- 16 H Lipson, F C Moon, J Hai. 3D printing the history of mechanisms[J]. J Mechanical Design, 2005, 127(5): 1029—1033.
- 17 K Park, Y S Kim, C S Kim. Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of humanoid biped robot[J]. J Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 609—613.
- 18 S Rajagopalan, M Cutkosky. Error analysis for the *in-situ* fabrication of mechanisms[J]. J Mechanical Design, 2003, 125: 809—822.
- 19 Hongjie Jiao, Yidu Zhang, Wuyi Chen. The lightweight design of low RCS pylon based on structural bionics[J]. J Bionic Engineering, 2010, 7(2): 182—190.
- 20 A G Evans, J W Hutchinson, N A Fleck, *et al.*. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3-4): 309—327.
- 21 M Dotcheva, H Millward, D Thomas. Investigation of rapid manufactured cellular structures for injection moulding tools [C]. Proceedings of 6th CIRP Int Conf on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2008. 369—374.
- 22 S Tsopanos, C J Sutcliffe, I Owen. The manufacture of micro cross-flow heat exchangers by selective laser melting[C]. Proceedings of ECI Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra Compact Heat Exchangers, 2005. 410—417.