

文章编号: 0258-7025(2010)07-1879-06

选区激光熔化变密度快速制造工艺研究

吴伟辉¹ 杨永强¹ 王 迪¹ 黄伟红²

(¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; ²广州瑞通激光科技有限公司, 广东 广州 510380)

摘要 为提高快速制造金属零件的效率,同时保证零件具有良好精度及一定的力学性能,提出一种基于选区激光熔化技术的变密度快速制造工艺:将零件分为壳体区及内部填充区两个成型区域,壳体区采用致密态工艺成型,内部填充区采用非致密态工艺成型。分析了非致密态组织与致密态组织之间的过渡工艺条件:通过调整工艺参数控制对固体基础的熔化量,可实现非致密态组织与致密态组织的切换。采用 316 L 不锈钢粉进行的成型实验表明,采用变密度制造工艺,相对于仅采用致密态成型工艺,成型效率大幅提高,成型件重量大大减轻,且合理设置壳体厚度后,成型件可获得足够硬度;对尺寸较大的零件,还能明显改善成型精度。

关键词 激光技术;快速制造;变密度;选区激光熔化;金属零件

中图分类号 TN249; TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103707.1879

Research on Variable Density Rapid Manufacturing Process Based on Selective Laser Melting Technology

Wu Weihui¹ Yang Yongqiang¹ Wang Di¹ Huang Weihong²

¹ School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
² Guangzhou Riton Laser Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510380, China

Abstract In order to improve building efficiency and ensure good accuracy and adequate mechanical properties of metal parts, a variable density rapid manufacturing process based on selective laser melting technology is proposed. Computer aided design (CAD) part model is divided into two building regions: shell region which is built by near-full-density producing method and internal region which is built by porous structure producing method. The transition condition of two producing methods are analyzed: transition between near-full-density structure and porous structure can be achieved through control of the melting depth of solid substrate by adjusting processing parameters. The experimental results of producing 316 L stainless steel parts by variable density rapid manufacturing process show that, compared to producing metal parts only using near-full-density producing method, producing efficiency is obviously increased, part weight can be reduced significantly and sufficient hardness can be obtained when using appropriate shell thickness. To larger dimension metal part made by this process, the experiments also show that the dimensional accuracy is greatly improved in addition to the above-mentioned advantages.

Key words laser technique; rapid manufacturing; variable density; selective laser melting; metal parts

1 引 言

选区激光熔化(SLM)技术是 20 世纪 90 年代中期发展起来的一种能利用纯金属或合金粉末直接制造出具有冶金结合,致密性接近 100%,具有较高尺寸精度和较好表面粗糙度的金属零件快速成型技

术^[1~3]。相对于其他快速成型方法,其主要特点在于^[4~7]:1)直接制成终端金属产品,省掉中间过渡环节;2)可得到冶金结合的金属实体,密度 100%;3)选区激光熔化制造的工件有高的拉伸强度、较低的表面粗糙度及较高的尺寸精度;4)适合各种复杂形

收稿日期: 2009-10-13; 收到修改稿日期: 2009-11-12

基金项目: 2007 粤港关键领域重点突破(2007Z1-D6091)和广东省教育部产学研结合项目(2007A090302004)资助课题。

作者简介: 吴伟辉(1979—),男,博士,主要从事激光材料合成及成型、快速制造等方面的研究。

E-mail: wuweihui_068@163.com

状的工件,尤其适合内部有复杂异型结构(如空腔)、用传统方法无法制造的复杂工件。

当前快速成型正向直接快速制造精密金属零件的方向发展,选区激光熔化技术很好地顺应了这一趋势,引起了国内外科研工作者的广泛关注^[8]。但是,由于金属材料熔点高,激光直接穿透熔化金属材料厚度有限,因而相对于非金属材料的快速成型,直接成型相对密度接近 100% 的高致密金属零件的效率十分低下。

为提高金属零件直接快速制造的效率,同时保证成型件具有较好的精度、足够的硬度,本文提出一种基于选区激光熔化技术的变密度金属零件快速制造工艺,研究了这一工艺方法的具体实施办法,并采用 316 L 不锈钢粉末对该成型工艺进行了实验验证。

2 理论分析

2.1 基于选区激光熔化技术的变密度快速制造机理

选区激光熔化成型过程可描述如下:先将三维零件 CAD 模型离散成多个层片,并且每个层片采用扫描线填充,然后采用计算机控制激光束完全熔化选区内的金属粉末,依照逐线搭接成面,逐面堆积成体的过程完成金属零件的成型,如图 1 所示^[1~3]。

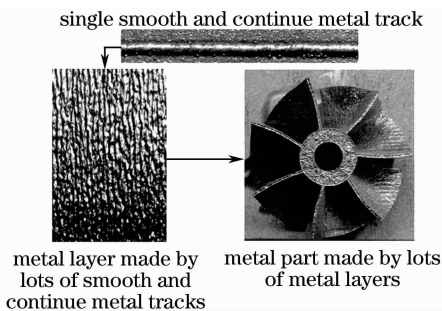


图 1 选区激光熔化快速成型高致密金属零件的机制

Fig. 1 Mechanism of selective laser melting of metal parts with high density

当前基于激光熔覆制造技术以及选区激光熔化技术的金属零件快速成型技术都追求直接成型致密态(本文将相对密度 $\geq 90\%$ 定义为致密态,相对密度 $< 90\%$ 定义为非致密态)的金属零件^[1,9,10],例如北京有色研究总院就利用千瓦级激光器直接成型高力学性能的致密态 316 L 不锈钢零件^[10]。为获得致密态金属零件,选区激光熔化技术一般要求每一次扫描金属粉末形成的熔池都是连续光滑的(见图 1)^[2,11]。但是,激光直接熔化预铺好的金属粉末形成连续光滑的熔池需要满足一定的工艺条件:即保证合适的成型工艺参数,防止成型过程中发生球

化^[2,5]。Badrossamay 等^[12]就对 316 L 不锈钢选区激光熔化成型过程中如何消除球化,形成连续光滑的熔池进行了工艺实验研究,认为只要熔池处于固相线温度与液相线温度之间,必然发生断裂以及球化。但实际成型过程中由于熔池温度难以测量,这一结论对指导成型工艺意义不大。

球化现象是一种金属液体从熔化到凝固过程中,液态金属熔池在金属液与周边介质的界面张力的作用下收缩成球状,凝固后形成一串球化珠的现象^[13]。球化珠之间会形成孔隙,导致在随后的铺粉中有些地方粉层太厚,无法完全熔化,结果球化珠之间、球化珠与粉末之间相互粘结,形成一个不致密的实体。

因此,致密态成型与非致密态成型之间存在着一定的转化过渡工艺条件,实现变密度制造工艺需了解这一过渡工艺条件。

假设激光作用于预铺在固体基础上的一层粉末:

1)如果激光没能将该层底部选区内粉末完全熔化,则对固体基础没有熔化量,金属熔池将置于粉层下部未熔粉末之上[图 2(a)]。松散的金属粉末对熔池的约束力几乎可以忽略不计,这时熔池可看作仅受气液界面张力作用,气液界面张力(即表面张力)总有使液态金属表面收缩成球形最小表面积的趋势。因此这时熔池沿垂直于扫描方向的方向总会卷成球形截面;在沿扫描方向,液态熔池则会先发生断裂,然后再收卷成球[图 2(a)]^[13]。

2)如激光束将该层选区内粉末恰好完全熔化,则这时有一小部分熔池会与固体基础形成液固界面,固、液、气三种介质之间的界面张力合力将决定熔池凝固后形貌^[14]。在选区激光熔化快速成型过程中,除第一层外,其余各层的固体基础与金属粉末都是同类型材料,液固界面润湿性良好,对球化趋势起到阻碍作用。这时,液态熔池沿扫描方向断裂的数量会有所减少甚至不发生断裂,沿垂直于扫描方向的熔池横截面不再呈完全球形[图 2(b)]。

3)如果激光不仅完全将该层选区内金属粉末熔化,还对固体基础有足够的熔化量,则熔化分为熔化固体基础形成的下部熔池以及熔化当前层粉末形成的上部熔池两部分。下部熔池镶嵌在固体基础中,液固界面模糊,这使两介质接触界面润湿性良好,金属液不会发生球化,且对上部熔池也起到良好的粘附约束作用,使熔池能稳定地形成光滑连续线状[图 2(c)]。

因此,是否对上一层固体基础有足够的熔化量是实现致密态成型和实现非致密态成型的过渡工艺条

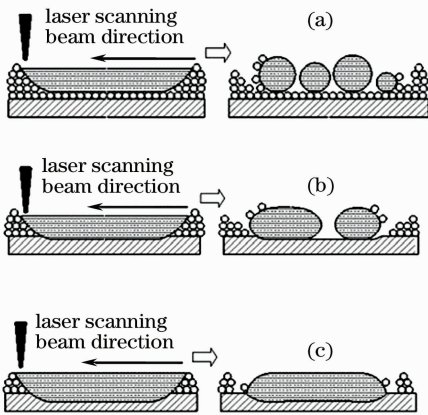


图2 激光快速熔化金属粉末形成的单道熔池纵断面方向形状演变示意图。(a)激光未能完全穿透熔化粉层；(b)激光恰好将粉层穿透熔化；(c)激光完全将粉层穿透熔化，并将固体基础部分熔化掉

Fig. 2 Schematic diagram of evolvement of vertical section shape of single molten pool made by laser melting of metal powder. (a) metal powder can't be fully penetrated by laser; (b) laser just penetrates powder layer and can't melt part of solid substrate; (c) laser can fully penetrates metal powder layer and melts part of solid substrate

件。假设粉层厚度为 h ，如需实现熔化方式成型，需使

$$Z \geq h \quad (1)$$

式中 Z 为熔化深度。

因此使深度为 Z 处材料的温度快速升高，达到熔点的方法可有 1) 降低扫描速度；2) 增加激光功率；3) 采用细微的聚焦光斑；4) 此外，由(1)式可知，粉层厚度 h 越小，所需的熔深 Z 也越小，这可更轻易使粉层实现穿透熔化。因此，成型工艺参数的不同搭配可实现变密度制造工艺。

图3是采用500目(25 μm)气雾化316L不锈

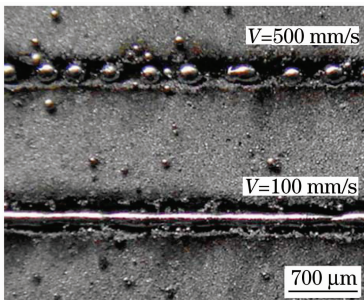


图3 不同扫描速度情况下单道熔池的两种不同形貌(激光功率:150 W;铺粉厚度:50 μm)

Fig. 3 Surface morphology of two molten metal tracks using different scanning speeds (laser power: 150 W; powder-layer thickness: 50 μm)

钢粉末在316 L不锈钢基板上，以不同的扫描速度下获得的单道熔池的两种不同形貌。当扫描速度为500 mm/s时，由于激光对粉层没实现完全穿透熔化，因此，发生了严重的球化；而当扫描速度为100 mm/s时，激光完全穿透熔化粉层，且对固体基础(316 L不锈钢基板)有一定的熔化量，因而熔池为光滑连续线状。

2.2 变密度成型工艺的优点及实施方法

尽管致密态成型方式成型的实体[图4(a)]力学性能更好，强度更高，但一般快速成型过程中，激光功率以及聚焦光斑在成型过程中是设定不变的。如上所述，为保证获得光滑连续的熔池，则需采用低扫描速度、薄的铺粉厚度，但这会导致成型效率很低。而非致密态成型却可采用高的扫描速度、较厚的铺粉厚度，因此可以获得很高的成型效率，但是采用非致密态方式成型的实体是一个多孔隙的实体[图4(b)]，这样的实体往往力学性能较差，通常不能满足实际使用要求。

因此，对于一些需求急迫、同时又对成型质量有一定要求的金属零件，在成型过程中，纯采用致密态方式或纯采用非致密态方式都很难满足实际要求。为此，这里提出一种基于选区激光熔化技术的变密度制造工艺：1)将零件分成壳体区以及内部填充区两大成型区域；2)壳体区域采用致密态方式成型，以保证成型件的力学性能以及表面粗糙度；3)填充区域采用非致密态方式成型，以提高成型效率。

采用变密度成型工艺具有以下优点：

1)同时满足高效率成型以及零件具有一定力学性能的要求；

2)采用非致密态方式成型零件内部，可无需特别设计内部组织即可获得质量轻便成型件，可满足某些特殊的应用场合，例如金属质手术辅助导板；

3)由于非致密态成型组织中留有很多孔隙，可为热应力的释放提供足够的空间，因此非致密态成型体几乎不存在热变形问题。采用致密态方式成型的壳体部分可保证成型件具有良好的表面粗糙度(由于熔化成型件由光滑连续的多层单道熔池搭接堆积而成，因而相对非致密态方式成型件，具有更好的表面粗糙度)；而内部填充部分采用非致密态成型方式成型，成型件的热变形量也将大幅减少，这对具有较大尺寸成型件更为明显。因此，采用变密度制造工艺，将有利于提高成型件的精度。

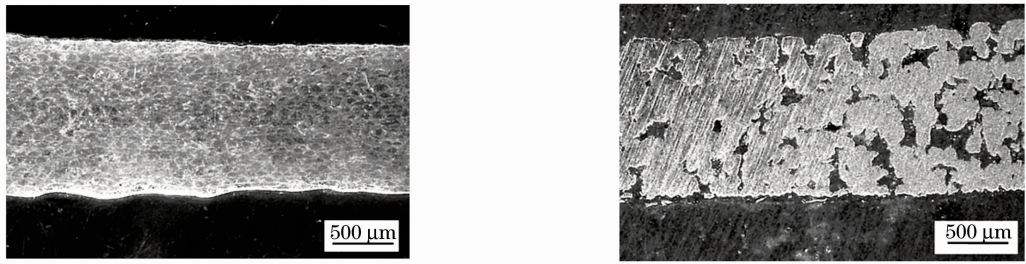


图4 两种成型方式下对应的横截面微观组织(成型材料:316 L 不锈钢)。(a)致密态成型组织(激光功率:80 W;层厚:30 μm ;扫描速度:80 mm/s;扫描间距:0.04 mm);(b)非致密态成型组织(激光功率:110 W;层厚:60 μm ;扫描速度:160 mm/s;扫描间距:0.04 mm)

Fig.4 Cross-section of metal parts made by two different methods(material:316 L stainless steel). (a) near-full-density structure (laser power: 80 W; layer thickness: 30 μm ; scanning speed: 80 mm/s; scanning space: 0.04 mm); (b) porous structure (laser power: 110 W; layer thickness: 60 μm ; scanning speed: 160 mm/s; scanning space: 0.04 mm)

3 实 验

3.1 实验过程

成型材料采用500目气雾化316 L不锈钢粉末,成型设备采用华南理工大学与广州瑞通激光科技有限公司联合研发的DiMetal280选区激光熔化快速成型设备。设备主要参数指标为:激光器:波长1075 nm SPI 200 W连续式光纤激光器;最大成型尺寸:280 mm \times 280 mm \times 300 mm;激光扫描方式:振镜扫描后 $f\sim\theta$ 透镜聚焦;光束质量因子: $M^2\leq 1.1$;聚焦光斑直径:30~50 μm ;铺粉厚度:10~100 μm 。

成型过程采用体积分数为99.98%的氮气作为保护气体。

先进行简单的正方实体(尺寸为10 mm \times 10 mm \times 10 mm)的成型实验,以此分析成型时间、相对密度、成型件硬度随变密度制造工艺参数的变化情况。然后采用变密度制造方式以及致密态成型方式分别成型具有较大尺寸的手术导板,以此对比分析成型精度的变化情况。

壳体区数据由Magics软件对零件CAD模型进行抽壳获得,内部填充区数据由Magics软件在对零件CAD模型进行切片时添加刀具补偿量获得。

对壳体区,扫描方式采用轮廓平行扫描方式;对内部填充区,采用邻层 $X\sim Y$ 正交的Z字形扫描法^[15]。

成型实验考察目标包括成型时间、相对密度、硬度(常用的考察力学性能指标)和尺寸精度。

3.2 结果及讨论

通过在内部填充区提高扫描速度、增大扫描间距以及增加粉层厚度可大大提升成型效率,但如扫描速度太高、扫描间距太大以及粉层厚度太大,会导

致非致密态成型体内夹杂很多粉末,造成非致密态成型体无法完全粘结成型,出现“散架”现象,这会大大降低成型件的强度,因此,非致密态成型的工艺参数需要实验确定。此外,也需要通过实验确定致密态成型的工艺参数。

在成型过程中,激光功率固定为85 W,分别采用60 μm 和30 μm 的铺粉厚度以不同的扫描速度成型发现,最大不发生夹粉的扫描速度分别为800 mm/s和1000 mm/s。对于扫描间距,对应扫描速度为1000 mm/s的最大不发生夹粉的扫描间距为0.08 mm;对应扫描速度为800 mm/s的最大不发生夹粉的扫描间距为0.1 mm。另外,通过实验发现采用30 μm 层厚,300 mm/s扫描速度,0.06 mm扫描间距可获得致密态的成型组织。

因此,在正方体成型实验中,成型参数为:激光功率:85 W;铺粉厚度:壳体区30 μm ,内部填充区30 μm 或60 μm (采用隔层扫描实现,即铺粉后不扫描本层的内部填充区,留待下一次铺粉再扫描,则内部填充区的粉层厚度即为60 μm);扫描速度:壳体区300 mm/s,内部填充区800 mm/s;扫描线间距:壳体区0.06 mm,内部填充区0.08 mm。

根据所获得的成型参数,进行了一组简单正方体的变密度制造工艺实验。这些正方体的壳体厚度变化范围为0~5 mm,图5是一个壳体厚度为1 mm的正方体成型件某一层的表现形貌。分别以采用致密态方式成型(即对应5 mm厚壳体)所需时间(112 min),316 L不锈钢标准硬度(HB187)以及316 L不锈钢标准密度($7.98\times 10^3\text{ kg/m}^3$)作为无量纲化标准将实验结果表示为图6所示曲线。

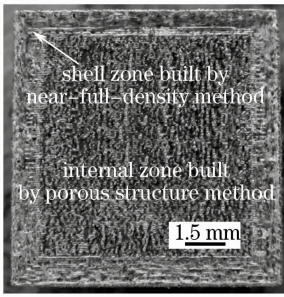


图 5 壳体厚度为 1 mm 的正方体成型件某一层的形貌
Fig. 5 Surface morphology of a cube with 1 mm shell thickness

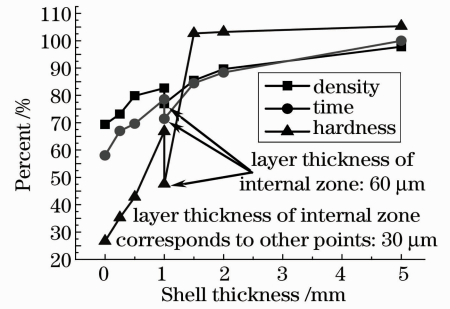


图 6 采用不同壳体厚度时成型件密度、时间、硬度的无量纲曲线

Fig. 6 Non-dimensional curves of density, time and rigidity of metal cube with different shell thicknesses

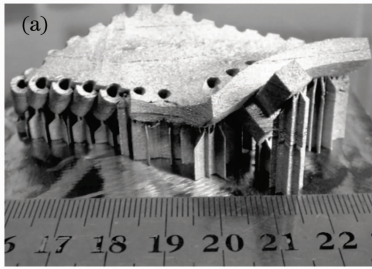


图 7 采用变密度成型工艺(a)以及采用致密态成型工艺(b)分别成型的两个手术导板
Fig. 7 Two surgical guide plates manufactured by (a) variable density rapid manufacturing process and (b) near-full-density producing process

由图 6 的时间曲线、密度曲线可知,随着致密态方式成型壳体的增厚,成型件的成型时间、相对密度都急剧上升。并且由该图也可知,内部填充区采用较厚的粉层厚度(采用隔层扫描方式实现,即铺粉后不扫描本层的内部填充区,留待下一次铺粉再扫描,则内部填充区的粉层厚度即为 $60 \mu\text{m}$),也可有效减少成型时间,降低成型质量。

由图 6 的硬度曲线可知,如采用相同内部填充区粉层厚度($30 \mu\text{m}$),当壳体厚度小于 1.5 mm 时,成型件的硬度随壳体厚度的增加而不断增大,当壳体厚度为 1.5 mm 时,成型件的硬度已基本和完全熔化方式成型件一致。但尽管采用较厚的内部填充区粉层厚度($60 \mu\text{m}$)相对于较薄的内部填充区粉层厚度($30 \mu\text{m}$)可以获得更高的成型效率(图 6 时间曲线)、更轻的成型质量(图 6 密度曲线),但成型件硬度却也相应减小(图 6 硬度曲线),可见非致密态成型对成型件总体力学性能仍有一定的贡献。

为考察变密度制造工艺的成型精度,采用变密度制造工艺成型了一个具有复杂形状且尺寸较大的手术导板,如图 7(a)所示,作为对比,也采用致密态成型工艺成型了一个手术导板,如图 7(b)所示。图

7(a)采用的激光功率为 85 W,铺粉厚度为 $30 \mu\text{m}$,壳体厚度为 1 mm,扫描速度为壳体区 300 mm/s 和内部填充区 800 mm/s,扫描线间距:壳体区 0.06 mm 和内部填充区 0.08 mm。图 7(b)采用的激光功率为 85 W,铺粉厚度为 $30 \mu\text{m}$,扫描速度为 300 mm/s,扫描线间距为 0.06 mm,扫描方式为邻层 X-Y 正交 Z 字形扫描法。

由图 7(b)可知,采用致密态成型工艺成型的手术导板发生了较为严重的变形,底部的支撑有些已因热变形作用发生了脱落,实测尺寸精度为 $\pm 0.72 \text{ mm}$;但采用变密度制造工艺成型的手术导板(图 7(a))几乎没有发生大的热变形,支撑保持良好,实测尺寸精度为 $\pm 0.17 \text{ mm}$ 。此外,采用变密度制造工艺以及致密态成型工艺成型的手术导板所需时间分别是 9.2 h 和 12 h,相对密度分别为 86% 和 92%,同样证实了上述变密度制造工艺的优点。

4 结 论

1) 分析了激光作用于金属粉末后形成致密态及非致密态成型组织的过渡工艺条件,认为通过工艺参数调节,增加或减小对固体基础的熔化量,可实现

致密态成型与非致密态成型之间的过渡。

2)为同时兼顾成型件力学性能以及成型效率,并且获得具有良好成型精度以及质量轻便的实体,提出一种基于选区激光熔化技术的变密度制造工艺:将零件分成壳体区以及内部填充区,在壳体区采用致密态成型方式保证成型件的力学性能以及表面粗糙度,在内部填充区采用非致密态成型方式成型以提高成型效率、降低成型件重量及提高成型件尺寸精度。

3)正方体成型实验证明,采用变密度制造工艺,相对单独采用致密态成型方式,成型效率大幅提高,相对密度大大降低,且壳体厚度达到一定厚度以后,成型件硬度接近致密态成型件硬度。复杂手术导板成型实验表明,采用变密度制造工艺除具有成型效率高、成型件更轻便的优点外,还具有能防止严重热变形,获得较高的成型尺寸精度的优点。

参 考 文 献

- 1 C. Over, W. Meiners, K. Wissenbach *et al.*. Selective laser melting; a new approach for the direct manufacturing of metal parts and tools [C]. 1ST International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering, Germany; Frankfurt, 2001
- 2 Kozo Osakada, Masanori Shiomi. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(11): 1188~1193
- 3 Kamran Aamir Mumtaz, Poonjolai Erasenthiran, Neil Hopkinson. High density selective laser melting of Waspaloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **195**(1-3): 77~87
- 4 Rehme O. Emmelmann. Reproducibility for properties of selective laser melting [C]. Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Germany; Munich, 2005
- 5 J. P. Krutha, L. Froyenb, J. Van Vaerenbergha *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **149**(1-3): 616~622
- 6 F. Abe, E. C. Santos, K. Osakada *et al.*. Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process [J]. *J. Mechanical Engineering Science*, 2003, **217**(1): 119~126
- 7 E. C. Santos, K. Osakada, M Shiomi *et al.*. Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting [J]. *J. Mechanical Engineering Science*, 2004, **218**(7): 711~719
- 8 Yang Yongqiang, Wu Weihui, Lai Kexian *et al.*. Newest progress of direct rapid prototyping of metal part by selective laser melting [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006, (2): 73~76, 97
杨永强, 吴伟辉, 来克炯等. 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, 97
- 9 Yang Yongqiang, He Xingrong, Wu Weihui *et al.*. Direct manufacturing of customized orthopedics surgery orienting model by selective laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2460~2464
杨永强, 何兴容, 吴伟辉等. 选区激光熔化直接成型个性化骨科手术模板[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2460~2464
- 10 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316 L 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
- 11 I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand *et al.*. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **254**(4): 980~983
- 12 M. Badrossamay, T. H. C. Childs. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(5): 779~784
- 13 A. V. Gusarov, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand *et al.*. Heat transfer modeling and stability analysis of selective laser melting [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **254**(4): 975~979
- 14 Zhang Jianfeng, Shen Yifu, Zhao Jianfeng *et al.*. Melting solidifying characteristic of Ni based alloy powders by selective laser sintering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 763~768
张剑峰, 沈以赴, 赵剑峰等. 激光选区非致密态成型 Ni 基属粉末的熔凝特征 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 763~768
- 15 Chen Hong, Zhang Zhigang, Cheng Jun. Scanning path scheme for SLS RP system [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2001, **9**(2-3): 201~207
陈 鸿, 张志钢, 程 军. SLS 快速成型工艺激光扫描路径策略研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2001, **9**(2-3): 201~207