

文章编号: 0258-7025(2008)11-1713-05

# 金属粉末激光气化去除与烧结成形初探

陈继民

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 激光选区烧结成形(SLS)技术是自下而上通过添加材料来成形的加成技术,它是不同于传统的自上而下的材料去除方式的机械加工方法。然而目前还没有一种将材料去除与加成相结合的激光加工成形技术。在研究激光与粉末材料相互作用时观察到粉末材料被气化的同时,激光光束周围的粉末被烧结的现象,利用这一现象探讨了激光气化烧结成形(LVS)的新方法,它既利用激光将粉末材料气化去除,同时又利用激光将粉末烧结加成在一起,形成所需的形状。该技术在制备、成形微型薄壁件时有独特的优势,薄壁的厚度由数个粉末颗粒组成,有望在激光烧结粉末微成形领域得到广泛应用。

**关键词** 激光技术;成型;去除;气化;烧结

**中图分类号** TQ 320.66<sup>+</sup>8;TN 249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20083511.1713

## Exploration of Laser Vaporizing Removing and Sintering Fabrication

Chen Jimin

(National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Material processing is based on the philosophy of either removing material or adding material. Traditional machining technologies gradually remove material from top to down. Selective laser sintering (SLS) composes the powder material bottom up layer by layer. A novel method to sinter powder by the investigation of laser interaction with powder is developed. This fabrication technology combines material removing and adding together named laser vaporizing sintering (LVS) technology. This technology removes the material with laser vaporizing and meanwhile the powder around laser beam is molten and sintered to form structure by laser. It shows great potential advantages to fabricate thin or micro parts in the future.

**Key words** laser technique; additive fabrication; material removing; vaporizing; sintering

## 1 引言

传统的车、铣、刨、磨机械加工均是通过逐渐去除材料得到所需的形状,自从上世纪八十年代激光立体固化成型(Stereolithography SLA)和激光选区烧结成形(SLS)技术发明以来,激光加工成形技术(Laser additive processing)得到了迅速发展<sup>[1~6]</sup>,它的出现颠覆了人们加工成形的理念。这种自下而上(Bottom up)通过添加材料成形的技术不同于自上而下(Top down)的材料去除加工方法,它是将材料在计算机控制下逐渐堆积而成,是集计算机辅助设计、快速原形、激光冶金于一体的独到的材料及结构制备技术<sup>[7]</sup>。近年来的研究显示,激光选区烧结由于对烧结的粉末材料几乎没有限制,不产生废弃

材料,可实现所见即所得,代表着快速成型的发展方向<sup>[8~12]</sup>。现有的激光成形技术,无论是激光烧结、直接熔化成形还是激光切割、雕刻成形,都是属于材料加成或者材料去除,还没有一种将两者结合起来的激光成形方式。本文探讨的金属粉末激光气化烧结成形(LVS)是既利用激光将粉末材料气化去除,同时又利用激光将粉末材料烧结加成成形的新的加工成型技术。

## 2 激光气化烧结现象

激光作用在粉末材料上时,材料在高能量激光束作用下,被迅速加热升温、熔化并发生剧烈的气化。巨大的金属蒸气反冲压力使液态金属向下凹

收稿日期:2008-08-25;收到修改稿日期:2008-10-13

基金项目:国家自然科学基金(50575005)资助项目。

作者简介:陈继民(1965—),男,教授,主要从事激光加工和激光微成形方面的研究。E-mail:jimin@bjut.edu.cn

陷,形成凹坑。当激光束直射至凹坑底部时,产生新的蒸发,进一步加深凹坑,直至最后形成所谓的“小孔”,如图 1 所示。小孔的形成可以使激光能量深入粉末材料内部,加大粉末材料对激光的吸收率。在小孔以外的区域,激光能量吸收的很少,而在小孔内部,在小孔前部的金属粉末被加热升温、熔化以及蒸发气化,维持小孔的存在<sup>[13]</sup>。

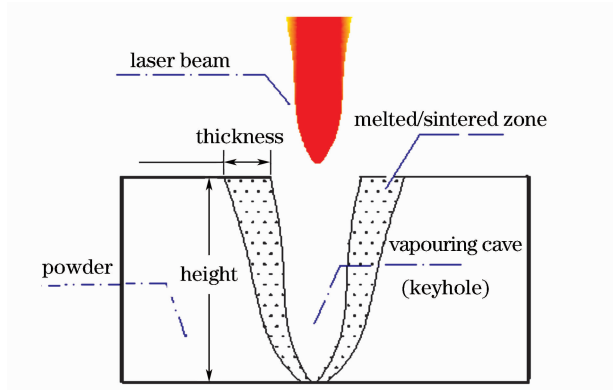


图 1 金属粉末气化烧结示意图

Fig. 1 Schematic of powder using laser vapor sintering

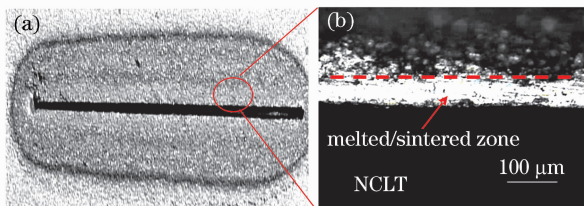


图 2 (a) 金属粉末激光气化形成沟槽;

(b) 沟槽侧壁熔化、烧结区形成金属薄壁

Fig. 2 (a) Groove of laser vapor on powder;

(b) Wall of melted/sintered zone beside the groove

激光移动时,气化的金属蒸气迅速膨胀,对侧壁形成一定的压力,同时金属蒸气在孔内侧壁重新凝结,释放出来的气化热熔化、烧结小孔两侧的金属粉末,激光光斑附近熔体的表面温度最高,而偏离熔池中心越远,其熔体的表面温度越低,相应地表面张力在熔池表面上的分布规律为:熔池中心附近的熔体的表面张力最低,熔池边缘附近的张力最高,熔池上形成表面张力差,驱动液体从低张力区流向高张力区,故熔融、烧结的金属以光束中心为界,分别向两侧运动,形成沟槽,如图 2(a) 所示;沟槽两侧熔化、烧结区冷却后形成金属薄壁,如图 2(b) 所示。本文对能否利用这一现象使粉末材料成形所需的金属薄壁结构进行了探索。

### 3 实验结果与讨论

在实验中,首先要有足够的激光能量密度使表

面的金属粉末发生气化,形成小孔。随着激光束的运动,小孔所吸收的能量必须把小孔行进轨迹的两个侧面加热到气化、熔化状态,在侧壁形成致密的金属层。本实验采用 50 W IPG 光纤激光器对金属铁粉(自由状态)进行了实验。图 3 为壁高与激光功率的关系。

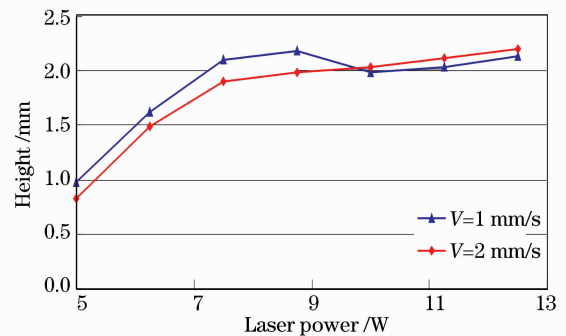


图 3 壁高随激光功率的变化关系

Fig. 3 Relation between laser power and the height

通过实验结果可以看出在一定的扫描速度下,适当增加激光功率可增加粉末吸收的能量,形成熔池的深度也随之增加,金属薄壁的高度也逐渐增加。在既定的扫描速度下,当激光以较小的功率密度作用在粉末上时,薄壁高度上升得很快。当激光功率上升至 7 W 以上时,激光穿透深度基本达到一个较为稳定的范围,约为 2 mm。由于光纤激光良好的光束质量,能量密度分布较为均匀,熔池锥度较小,易于形成直立熔化侧壁<sup>[14,15]</sup>。

激光功率密度变化对于侧壁的厚度影响则较小,主要是由于小孔效应的影响,激光能量很少横向传输,薄壁的厚度基本维持在 60~80 μm 之间。当激光能量密度过低时,虽然能够成型,但是成型的强度及致密度都比较低。随着激光功率的增加,金属薄壁的厚度也随之缓慢增加,致密度也相应随之增加,相对密度可达 75% 以上。

如果激光功率过大,一方面由于光束能量密度分布的变化导致作用区变大,致使成型体具有较大的锥度,并且在不同的深度范围内,激光能量密度不同,成型体的微观结构也会发生变化。另一方面由于光束能量密度太大,会致使表面部分粉末发生过烧,直接影响成型体的精度、致密度等。

扫描速度是另一个重要的工艺参数,在激光输出功率一定的情况下,不同的扫描速度直接影响成型体致密度及质量等。随着激光扫描速度的增加,粉末吸收激光能量逐渐降低,成型体的厚度及高度都逐渐下降,如图 4,5 所示。在这一过程中,薄壁厚

度主要与熔池的状态有关, 受限于激光光束能量密度分布以及小孔效应下的横向能量传递。薄壁高度没有太大的变化, 基本维持在一个较为稳定的数值(约为2 mm)。当速度下降到一定值时, 激光能量输入太大, 金属粉末发生严重过烧, 甚至燃烧。在10 W的功率下, 当速度小于0.5 mm/s时, 金属细粉就会发生燃烧现象。在激光功率一定的情况下, 如选择较快的扫描速度, 会使粉末在激光照射过程中出现“飞溅”现象, 使得粉末飞离作用区, 进而影响成型体的质量。

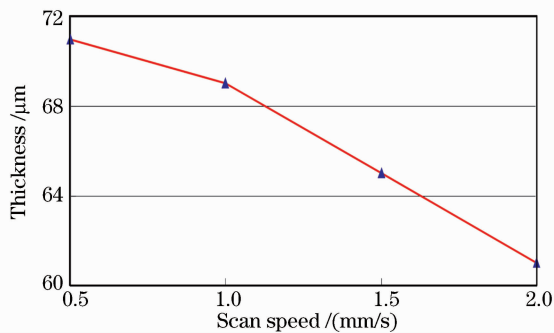


图4 激光功率7.5 W时扫描速度与壁厚的关系  
Fig. 4 Relation between scan speed and the thickness with 7.5 W laser power

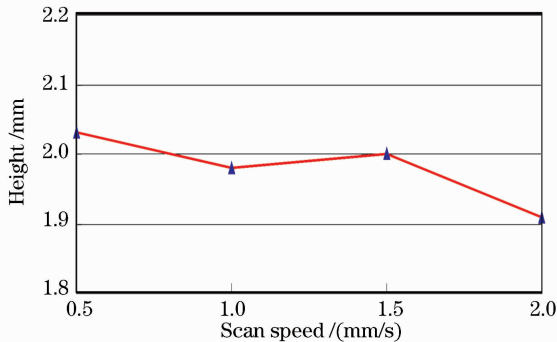


图5 激光功率7.5 W时扫描速度与壁高的关系  
Fig. 5 Relation between scan speed and the height with 7.5 W laser power

此外, 选用了三种不同粒度的金属铁粉末进行实验, 这三种粉末的粒度分别为200目, 300目和400目。实验后, 对薄壁高度以及厚度进行了测量, 其结果如图6所示。可见, 粉末颗粒越细, 烧结的薄壁越薄, 薄壁仅有几个颗粒组成。

另外, 离焦量的影响也不容忽视。对于单模激光光束, 通过下面公式可以求得经过聚焦透镜的出射光束腰半径的大小和束腰离透镜的距离之间的关系, 还可以得出对应的功率密度

$$\omega(z) = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

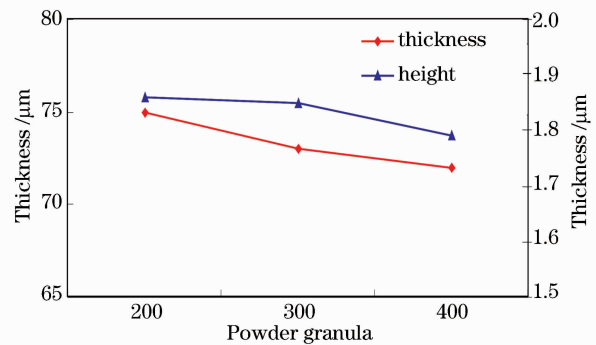


图6 粉末粒度与壁高和壁厚的关系

Fig. 6 Relation among powder granula, the height and the thickness

根据(1)式可知激光束腰处激光能量密度最大, 所以壁厚与壁高都最大(见图7)。在负离焦的状况下, 激光能量密度分布和正离焦相近, 但是由于激光焦点位置在熔池的底部, 熔池的底部得到更强的激光能量致使在同离焦量下壁的高度与厚度都有一定程度的增加。

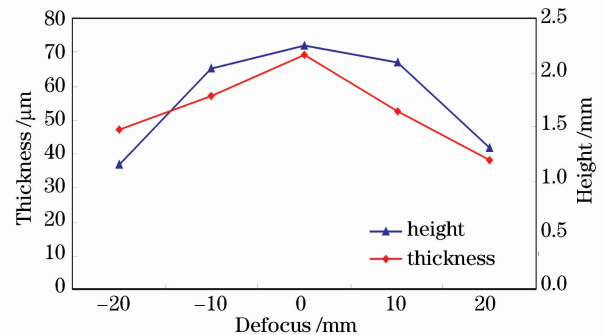


图7 离焦量与壁高和壁厚的关系

Fig. 7 Relation among defocus, the height and the thickness

#### 4 气化烧结成形实例

通过图2(b)可以看出, 在激光直接作用区的一侧表面较为平整, 另一侧较粗糙。在激光作用区, 激光的能量密度相对较为稳定, 熔池的温度以及状态也就相应地较为稳定, 所以边缘处较为平整。而在另一侧没有和激光直接作用, 只是熔化的液态金属在蒸气压力及粉末间的毛细管力的作用下渗入到金属粉末颗粒间的空隙中, 烧结后形成的自然状态, 致使该处表面较为粗糙, 影响了成型体的制造精度。另外由于该侧只有部分金属粉末熔化, 金属粉末微粒只是通过熔化金属烧结在一起, 其致密度远低于另一侧完全熔化凝固的金属壁, 从而影响到整个成型体的致密性。鉴于此, 可采用双边扫描的办法制造具有较高强度及致密性的金属薄壁, 如图8所示。

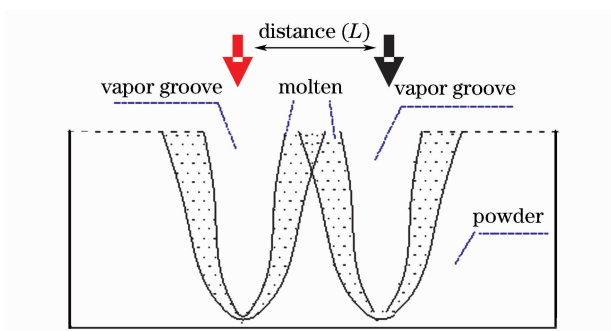


图 8 双边扫描成形原理图  
Fig. 8 Principle of double scanning forming

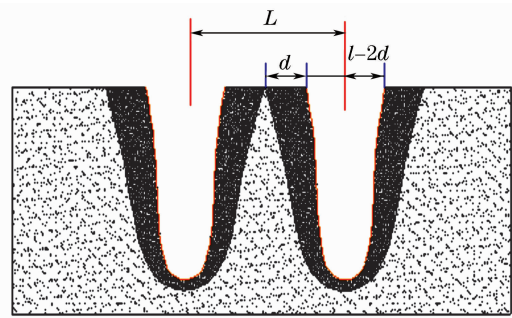


图 10 双边扫描成形示意图  
Fig. 10 Schematic of double scanning

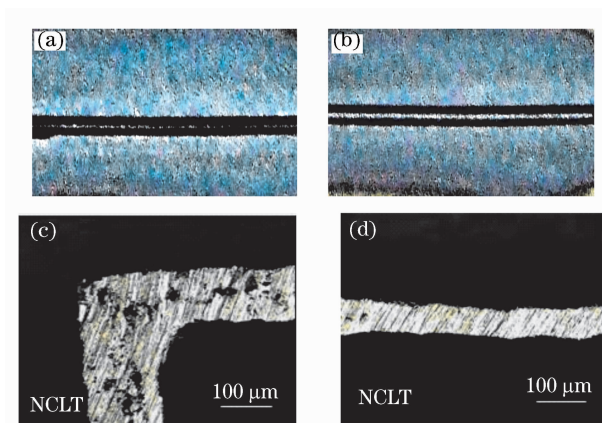


图 9 双边扫描成型。(a) 间距过小；(b) 间距适中；  
(c) 间距过大；(d) 图(b)薄壁截面

Fig. 9 Double scanning forming. (a)  $L$  is too small;  
(b)  $L$  is good; (c)  $L$  is too big; (d) section of Fig. (b)

当激光功率以及扫描速度固定时，如果扫描间距过小，第二次的激光能量对第一次成型的金属薄壁产生直接影响，该能量致使薄壁受热变形甚至熔化、气化，无法得到连续的薄壁体，如图 9(a) 所示。

如果扫描间距过大，第二次扫描时激光作用熔化区与第一次扫描时激光作用熔化区相互间隔开来，也就是说第二次激光扫描时熔化的液态金属没有和第一次扫描时的金属完全重合，致使其中间有部分未熔粉末颗粒，有“夹渣”现象，严重影响成型体的致密度，如图 9(c) 所示。

只有间距适中，双边扫描时才能得到成形良好的薄壁，如图 9(b), (d) 所示。

因此，扫描间距是中间成型体致密度的关键因素。为了简化起见，假设沟槽宽度上下一致，如图 10 所示。通过图 10 可以得到

$$L = \kappa(2d + l), \quad (2)$$

式中  $L$  为扫描间距， $2(l-d)$  为沟槽宽度， $2d$  为薄壁厚度， $\kappa$  为搭接系数， $l$  为沟槽宽度与烧结宽度。

为了得到良好的烧结薄壁，一般搭接系数  $\kappa$  取

0.3~0.5 较为合适。

激光功率与扫描速度的匹配决定了输入能量的大小。粉末吸收激光能量的大小直接决定熔池的状态，继而影响到气化沟槽的宽度。随着输入能量的增加气化沟槽宽度越来越大。测量沟槽宽度与薄壁厚度，利用(2)式，通过实验参数优化就可以制造出具有一定精度及表面平整度的薄壁结构。

图 11 为优化工艺参数得到的薄壁结构体，最薄壁厚约  $100 \mu\text{m}$  (5~6 个粉末颗粒熔化烧结在一起)，未经后处理的表面最大硬度可达 HV300。

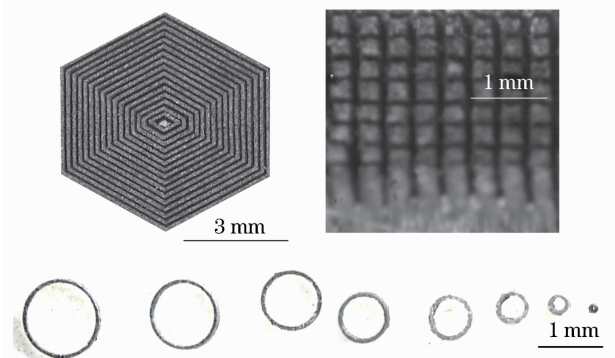


图 11 激光气化烧结成形的薄壁体  
Fig. 11 Thin wall structure with LVS fabrication

## 5 结 论

金属粉末在高能量密度激光作用下出现气化、熔化、烧结可以形成金属薄壁结构。这种薄壁结构可以通过优化工艺参数进行控制，并形成具有高深宽比的薄壁结构。随着激光功率逐渐增加，壁厚和壁厚都逐渐增加，由于激光能量在粉末中传递的限制性，壁厚变化不大。只要通过对工艺参数进行优化就能获得所需的微型薄壁件。这种利用激光去除和加成相结合的成形原理，对粉末材料具有普适性，需要研究的问题还很多，希望能在激光制备、成形微型薄壁结构件中开辟一个新的领域。



## 参 考 文 献

- 1 Yin Yiguo, Bai Peikang, Liu Bing. State-of-the-arts in metal powder rapid prototyping [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2006, **24**(2):142~145  
尹贻国,白培康,刘斌. 金属粉末激光烧结快速成型制造技术发展现状[J]. *粉末冶金技术*, 2006, **24**(2):142~145
- 2 J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui. Progress in selective laser sintering [J]. *Annals of the CIPP*, 2001, (2):21~38
- 3 Yan Yongnian, Zhang Renjie, Lin Feng. New development of laser rapid prototyping technique [J]. *New Technology & New Process*, 2006, (9):7~10  
颜永年,张人佶,林峰. 激光快速成形技术的新进展[J]. *新技术新工艺*, 2006, (9):7~10
- 4 Zhang Pingzhi, Zhang Yongzhong, Shi Likai *et al.*. Research on laser direct deposition of metallic parts [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2001, **25**(2):28~31  
章萍芝,张永忠,石力开等. 金属零件的激光直接成形研究[J]. *稀有金属*, 2001, **25**(2):28~31
- 5 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  
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
- 6 Jimin Chen, Jianhua Yang, Tiechuan Zuo. Micro fabrication with selective laser micro sintering [C]. Proceeding of the 1<sup>st</sup> IEEE international Conference on NEMS, China, 2006. 427~430
- 7 Liu Changsheng, Zhou Li, Chen Suiyuan *et al.*. Development of the laser additive processing technology [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, **24**(8):792~294
- 8 Horst Exner, Peter Regenfuss, Lars Hartwig *et al.*. Selective laser micro sintering with a novel process [C]. *SPIE*, 2005, **5063**:89~101
- 9 Juergen Brandner, Edgar Hansjosten, Eugen Anurjew *et al.*. Microstructure devices generation by selective laser melting [C]. *SPIE*, 2007, **6459**:59~67
- 10 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**:779~784
- 11 Kozo Osakada, Masanori Shiomi. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**:1188~1193
- 12 Zhou Jianzhong, Guo Huafeng, Xu Dapeng *et al.*. Experimental research on laser direct sintering of metal parts [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):151~155  
周建忠,郭华锋,徐大鹏等. 激光直接烧结成形金属零件的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊):151~155
- 13 R. Ducharme, P. Kapadia. The collapse of the keyhole in the laser welding of materials [C]. in: Proc. ICALEO'93 Orlando: LIA, 1994. 177~183
- 14 D. Q. Sun, J. M. Chen, X. J. Zong. The study on laser sintering metal powder for micro fabrication [C]. International Technology and Innovation Conference 2006, Hangzhou 2006
- 15 Sun Daqing. The experiment research on selective laser melting metal powder [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007  
孙大庆. 金属粉末选区激光熔化实验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2007