

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0151-05

# 激光直接烧结成形金属零件的实验研究

周建忠, 郭华锋\*, 徐大鹏, 季霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 分析了激光熔池的动态快速冷凝及“球化”效应机理, 基于此采用激光烧结直接成形工艺对铁粉和 Ni45 合金粉末进行了一系列的激光烧结实验。结果表明, 直接烧结单组元铁粉易出现翘曲变形和“球化效应”, 成形质量不高, 即使调整工艺参数获得多层烧结件, 但致密度较低; 而在基体上烧结 Ni45 合金粉末, 在合适的工艺参数下获得了致密组织较好的多层烧结件, 内部组织细密均匀, 表面光滑平整, 且与基体结合牢固。

**关键词** 激光技术; 金属粉末; 直接金属成形; 球化效应; 工艺参数

**中图分类号** TN249; TG156.99 **文献标识码** A

## Experimental Research on Laser Direct Sintering of Metal Parts

ZHOU Jian-zhong, GUO Hua-feng, XU Da-peng, JI Xia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** This paper analyses the mechanism of dynamical condensation of the laser molten pool and balling effect. Direct metal laser sintering process was used to carry out series of sintering experiments of Fe powder and Ni45 alloy powder. The result indicated that it was easy to appear warpage deformation and balling effect during direct sintering metal powder, and the formation quality of the parts was bad, though getting multi-layers sintered part by adjust process parameters, the density was low. But by using appropriate process parameters, much densification sintered parts by sintering small grain size Ni45 alloy powder can be obtained, its microstructure was fine and uniform, surface smooth and bonding firmly with substrate.

**Key words** laser technique; metal powder; direct metal forming; balling effect; process parameters

## 1 引言

金属粉末激光直接烧结(DMLS)是选择性激光烧结的一个重要分支,是集激光技术、材料科学、数控技术等为一体的一种先进制造技术。金属粉末激光直接烧结技术选材广泛、无需支撑,能在几个小时之内利用三维 CAD 数据直接制造出无需后处理或需少量后处理的近净成形零件<sup>[1]</sup>,实现了真正意义上的快速成形制造。激光直接烧结金属粉末成形金属零部件是快速成形技术的最终目标之一<sup>[2]</sup>,但目前存在翘曲变形和球化效应等缺陷,导致烧结过程不能顺利进行,甚至不能成形,阻碍了该技术在工程中的应用。本文采用大功率激光器分别对单组元 Fe 粉和 Ni45 合金粉末进行激光烧结实验,旨在分析不同体系金属粉末对激光烧结工艺的影响,为后续的实验研究提供一定的依据。

## 2 金属粉末激光直接烧结熔凝过程及球化机制分析

### 2.1 激光辐照下激光熔池的动态冷凝

金属粉末的烧结过程实质上是激光辐照下金属粉末的快速冷凝过程。当激光辐照到金属粉末表面时,如果粉末材料表面局部区域温度超过材料的熔点,该区域将由固态变为液态,甚至迅速气化,当形成的液相达到一定量的时候便形成了类似于传统激光加工中的激光熔池,由于在该熔池中,液相、固相同时存在,因此有别于传统的激光熔池,沈以赴等<sup>[3]</sup>将这一液体区域称为“激光烧结池”(如图 1 所示)。在金属粉末激光直接烧结工艺中正是激光烧结池对材料的传热、传质以及金属粉末的熔化和凝固起着重要作用。

**基金项目:** 江苏大学高级人才启动基金(1281110002)资助课题。

**作者简介:** 周建忠(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事激光加工机理及应用等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ghf20004@yahoo.com.cn

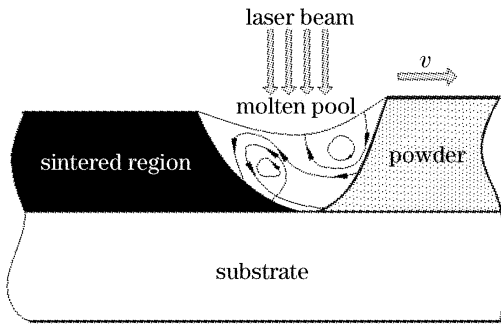


图 1 运动中的激光烧结池示意图

Fig. 1 Schematic of the moving laser molten pool

激光作用时间很短,一般仅为 0.5~25 ms,而整个传质包含激光作用下的传质和激光烧结结束后的热滞期的传质两个阶段,显然,在极短的时间内进行传质远远地偏离了平衡条件,因此由传质产生的溶质会再分布。在金属粉末激光直接烧结工艺中温度梯度、化学位差和浓度梯度的综合作用使熔体形成了表面张力梯度,使得烧结池的流体的速度可达 m/s 的量级,因此表面张力梯度的出现导致了液相的流动,它决定了液相流动的方向,而且成为烧结池内熔体流动的主要驱动力。

在激光烧结过程中,激光熔池的冷凝是动态的,不断进行的。随着激光束的向前推移,熔池中金属和熔化的凝固同时进行,具体表现为:在熔池的前部固态粉末不断进入熔池随之熔化,在熔池的后部不断有液态金属脱离熔池发生冷凝。熔池的快速冷凝特征决定了冷凝后的凝固组织,而优良的凝固组织是成形件良好机械性能的前提保证。

## 2.2 球化机制

球化效应是影响烧结过程能否顺利进行的突出问题之一,这些缺陷导致成形的金属零件致密度不太高、易变形、表面质量较差等质量问题。球化效应一旦产生将造成烧结线不连续,成形件的内部孔隙增加,成形件强度和密度减小,尺寸精度降低甚至不能成形。因此有必要深入分析金属粉末激光直接烧结工艺中的球化机制,分析产生球化效应的原因。金属粉末烧结过程中一旦液相形成,激光熔池至少有三相组成:液相、固相和孔隙中的气化物。金属粉末在激光作用下熔化后形成的烧结池形状取决于熔化液相与气固介质间的界面能(也称为界面张力)。湿润角或称接触角是表征固相、液相和气相之间界面能处于平衡状态时出现的一个参数。固相被液相湿润与否,与其相应的接触角大小相关。图 2 为固-气界面能  $\gamma_{SV}$ ,固-液界面能  $\gamma_{SL}$ 和液-气界面能  $\gamma_{LV}$ 之间的平衡关系。接触角  $\theta$  可以表示为

$$\theta = \arccos[(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})/\gamma_{LV}], \quad (1)$$

式中  $\theta$  为湿润角;S 为固体;L 为液体;V 为气体。

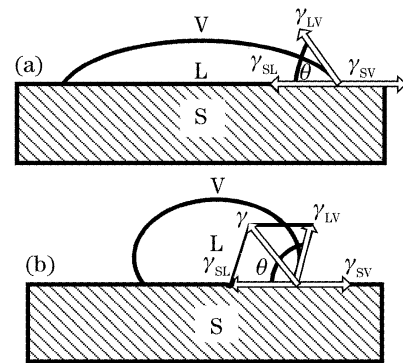


图 2 球化效应示意图。(a)液相湿润固相平衡图;

(b)湿润性差的情况下液相球化收缩示意图

Fig. 2 Schematic of balling effect. (a) stable diagram liquid phase wet solid phase; (b) schematic of balling effect when bad wettability

(1)式可以推出: $\theta=0^\circ$ 时,固-液完全湿润。 $\theta<90^\circ$ 时,如图 2(a)所示固-液部分湿润。 $\theta>90^\circ$ 时,如图 2(b)所示,湿润性很差。由此可知, $\theta$ 的大小反映了液相对固体表面的润湿程度, $\theta$ 越小说明液相对固体表面的润湿性越好。但如果 $\theta>90^\circ$ 烧结开始时即使液相能生成,也会很快跑出烧结体外。且三个界面张力的合力 $\gamma$ [图 2(b)]指向熔池内部,使液面在界面张力和马兰龙尼(Marangoni)对流扰动力作用下向熔池内部收缩而形成球状,其结果表现为烧结线是由一系列小金属圆(椭圆)球组成的,这就是球化效应<sup>[4]</sup>。球化效应在激光束与金属粉末作用的起始阶段尤为明显,具体表现为烧结件第一层第一道最边缘的一条线状突出物,被定义为“第一线扫描球化”(First line scan balling, FLSB)<sup>[5]</sup>。其原因是在最开始的扫描过程中,粉末从辐射激光吸收的能量有一个突然的显著增加,与周围未被激光扫描到的粉末之间形成一个很大的温度梯度,在激光作用的这个区域内,粉末吸收能量达到熔点迅速熔化凝固,其形成的液相来不及向周围铺展,从而在冷凝过程中形成较大的金属圆球。图 3 为本课题组在烧结水雾化 Fe 粉时出现的第一线扫描球化现象。

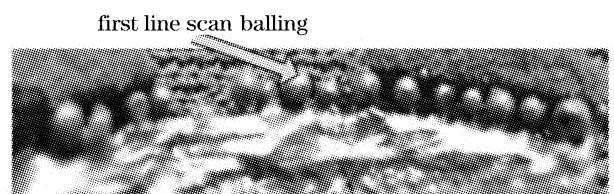


图 3 水雾化 Fe 粉烧结第一线扫描球化现象

Fig. 3 First line scan balling of Fe powder sintering

对金属粉末的预热和调整工艺参数可以减小第

一线扫描球化现象。降低烧结过程中已烧结和未烧结粉末之间的温度梯度,减小液相表面张力,从而使液相能及时向周围铺展来湿润固相达到减小球化效应的目的。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验条件和方法

实验中采用两种不同体系的金属粉末,单组元铁粉和 Ni45 合金粉末,粒度分别为 150 目和 200 目。实验所用激光器为 NEL-2000 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,激光模式 TEM<sub>00</sub>,最大输出功率 2000 W 且连续可调;所用数控系统为 SIEMENS 840D 型;铺粉装置自制,最小铺粉厚度 0.1 mm,所用基体材料为 A3 钢。实验完成后沿扫描方向切割成型件,用王水深腐蚀,采用 JXA-840A 电子探针分析仪观察金相组织。

#### 3.2 实验过程

将基体材料切割成 70 mm×35 mm×6 mm 试

样,所有基体均用无水乙醇和丙酮清洗。利用自制的铺粉装置,在基体上铺设一层金属粉末,激光器按照预先输入的扫描路径,以一定的激光能量和速度进行扫描烧结,当本层烧结完毕后,激光头上升一个层厚,铺设新的粉末,进行下一层的扫描烧结,如此反复循环即可完成整个金属零件的制作。整个实验过程中无预热、无保护装置。

#### 3.3 铁粉的激光烧结

在进行铁粉的激光烧结实验中,在粉床上直接烧结很容易出现球化和翘曲变形,根本不能成型,后续实验采用基体,在基体上烧结的工艺参数组合及成型质量如表 1 所示。可以看出在目前 9 组工艺参数下,成形件质量都不高,主要原因是单组元粉末的烧结机制为熔化/固化机制,烧结过程中不能实现液相烧结,颗粒重排非常困难,很容易引起球化效应<sup>[6]</sup>,从而导致成形件存在大量孔隙,强度较低。通常需要后处理工艺,因此不能成为真正意义上的直接烧结。

表 1 Fe 粉烧结工艺参数组合及成型件质量评价

Table 1 Processing parameter combination and sintering quantity appreciation of Fe powder sintering

Group number	Laser power /W	scanning rate /(m/min)	Spot diameter /mm	Scanning space /mm	Forming quantity
1	180	1	0.4	0.2	Sintered layer has lots of gully and crack , sintered part appears warption and distortion
2	230	1.5	0.4	0.2	Sintered layer has lots of cracks
3	230	3	0.4	0.2	Sintered part bonded well with substrate ,but surface quantity is poor
4	230	6	0.4	0.2	Appearing lots of cracks which direction are perpendicular scanning direction, sintered part appears lamination
5	230	6	0.4	0.3	bonding quantity is poor,sintered layer sloughs off
6	330	3	0.4	0.2	bonding quantity poor,sintered layer sloughs off from substrate
7	330	6	0.4	0.2	Sintered part has lots of pore, bonding quantity is poor
8	330	6	0.4	0.3	Sintered track cannot bond nearly , the whole sintered layer appears reticular
9	535	1	0.4	0.2	Power density oversize, sintered part has lots of pore

#### 3.4 Ni45 合金粉末的激光烧结

主要工艺参数为:激光功率 200~1600 W,扫描速度为 1000 mm/min,1200 mm/min,1500 mm/min、光斑直径 0.9 mm,0.4 mm,铺粉厚度约为 0.15 mm。采用上述工艺参数在 A3 钢基体上进行单道烧结实验用以观察其成形性,共进行了六组实验,选取其中典型的两组来分析。图 4 为扫描速度分别为 1200 mm/min,1500mm/min 时激光功率对 Ni45 烧结成形性的影响,烧结成形性用烧结线的质量来衡量,烧结线质量取决于烧结线的连续性和均匀性<sup>[7]</sup>。由图4可以看出当激光功率为200W时,两种速度下

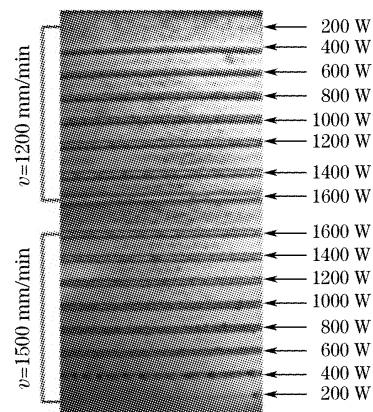


图 4 激光功率对粉末烧结成形性的影响

Fig. 4 Effect on powder sintering formability of laser power

都无法烧结成形。当激光功率为 400 W 时,两种速度下都能烧结成形,但速度为 1500 mm/min 时,有明显的球化现象,球化颗粒尺寸远远大于原始粉末颗粒。

当激光功率为 600 W 时,两种速度下形成的烧结线都比较连续、均匀,球化现象消失。但当功率高于 1000 W 时在烧结的过程中出现了明显的爆破飞溅现象,这是由于激光功率较高导致金属粉末的温升快而高,但作用时间却很短,这样就造成了材料中的空气和金属蒸气来不及向外散失,从而形成了爆破飞溅现象。当激光功率为 1600 W 时,金属粉末和基体已产生明显的气化、炭化现象,表现为烧结道周围的黑色区域。根据各种工艺参数下烧结线质量选取工艺参数,并对现有工艺参数进一步调整,得出一组较优的工艺参数:

Laser power $P$ /W	900
Scanning rate $v$ /(mm/min)	1200
Spot diameter $\varphi$ /mm	0.9
Scanning space $d$ /mm	0.45
Powder thickness $h$ /mm	0.15

按照上述工艺参数烧结两层观察成形质量,从图 5 可以看出,由于该粉末的自熔性较好,流动性好,整个烧结件表面比较平整光滑、均匀。将成形件沿垂直扫描方向用线切割切开观察内部组织。如图 6 所示,从表层到心部依次为:烧结层、过渡区域和基体。烧结层与基体有一条一定宽度的亮白带,即合金元素交互扩散结合带,说明 Ni45 合金烧结层与基体形成了良好的冶金结合,两者之间搭接牢固。激光烧结时基体表层上方由于粉末吸收能量快速熔化,同时冷的基体也吸收部分热量,因此基体表面发生熔融,由于基体传热导致急冷,烧结层与基体之间产生较大的温度梯度,激光束离开熔池后底层熔融部分随即冷凝而产生枝晶,枝晶沿着热流的负方向呈外延方式生长,方向基本垂直固液界面,而且扫描速度越快形成的枝晶越细。

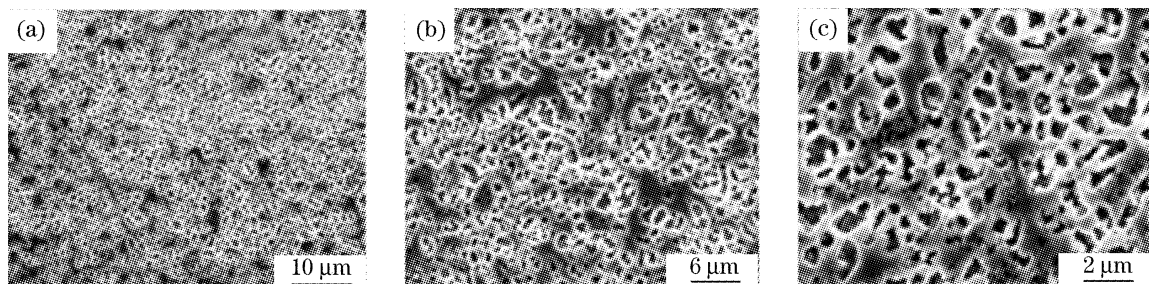


图 8 两层烧结件微观形貌

Fig. 8 Micro-morphology of two-layer sintered part

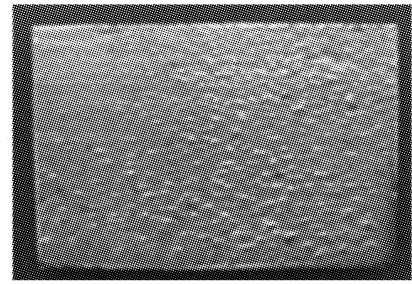


图 5 两层烧结件实物图

Fig. 5 Two-layer sintered part

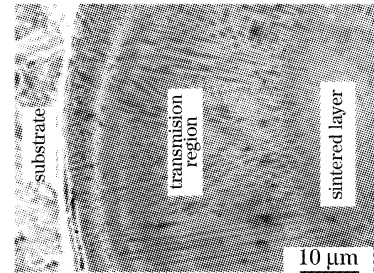


图 6 成形件断面微观组织结构

Fig. 6 Cross-section microstructure

基体下表层部分由于热影响的作用形成一定深度的热影响区域,该部分区域受到热传导的作用发生相变,相当于进行了热处理,晶粒非常细密,随着与烧结层距离的增加,加热温度逐渐降低,进而形成相变区、部分相变区和原始基体组织的具有梯度变化的微观组织,如图 7 所示。

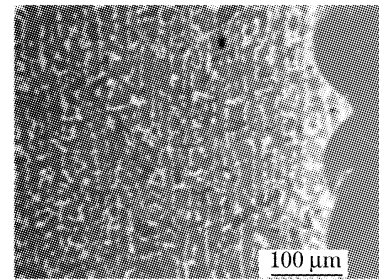


图 7 基体的微观结构

Fig. 7 Microstructure of substrate

随着烧结层的增高以及传热、传质的进行,烧结层的热积累效应越来越明显,烧结层温度越来越高,上一层的部分晶粒将重熔,与正烧结的金属粉末一

起形成新的晶核,枝晶逐渐变短,通过烧结层和基体的热传导越来越困难,使得烧结件通过周围环境辐射散热和烧结层传导散热,故枝晶外延生长的优势逐渐削弱,树枝晶逐渐向等轴晶转变,因此烧结层主要由大量细密的等轴晶组成。在烧结层上任取一点放大 1000 倍,2000 倍和 4000 倍,如图 8(a),(b),(c)所示,可以看出烧结件内部组织比较致密、均匀。

从上述分析结果可以看出该组工艺参数成形的烧结件无论从内部组织上还是表面形态上都比较理想,按照此工艺参数进行多层烧结,烧结 20 层,成形件实物图如图 9 所示。

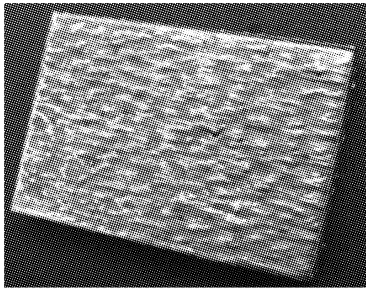


图 9 多层烧结件实物图

Fig. 9 Multi-layer sintered part

## 4 结 论

1) 单组元铁粉烧结过程中容易产生球化效应,特别是第一线扫描球化,内部和表面孔隙率都比较高,即使调整工艺参数成型多层烧结件,但成型件致密度较低。

2) 在合适的工艺参数下, Ni45 烧结成形件内

部组织主要由过渡区域的细长枝晶和烧结层的大量枝晶组成,组织细密均匀。

3) Ni45 烧结层与基体之间存在一定宽度的亮白带,即合金元素的交互扩散带,烧结层与基体呈良好冶金结合。

## 参 考 文 献

- 1 Abdolreza Simchi, Fran K. Pelzoldt, Haiko Pohl. Direct metal laser sintering; material considerations and mechanisms of particle bonding [J]. *The International J. Power Metallurgy*, 2001, **37**(2): 49~61
- 2 Engel B, Bourell D L. Titanium alloy powder preparation for selective laser sintering [J]. *Rapid Prototyping J.*, 2000, **6**(2): 97~106
- 3 Shen Yifu, Gu Dongdong, Yu Chengye *et al.*. Simulation of temperature field in direct metal laser sintering processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(1): 67~73  
沈以赴,顾冬冬,余承业等. 直接金属粉末激光烧结成形过程温度场模拟 [J]. *中国机械工程*, 2005, **16**(1): 67~73
- 4 Pan Yanfeng, Shen Yifu, Gu Dongdong *et al.*. Effect of process parameters on balling during direct laser sintering of 316 stainless steel powders [J]. *J. Materials Engineering*, 2005, (5): 53~55  
潘彦峰,沈以赴,顾冬冬等. 工艺参数对 316L 不锈钢粉末激光烧结球化的影响 [J]. *材料工程*, 2005, (5): 53~55
- 5 R. Morgan, C. J. Sutcliffe, W. O'Neill. Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd:YAG laser remelted preplaced powder beds [J]. *Rapid Prototyping J.*, 2001, **7**(3): 159~172
- 6 A. Simchi, H. Pohl. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder [J]. *Materials and Engineering A*, 2003, **359**(1~2): 119~128
- 7 Zhang Jianhua, Zhao Jianfeng, Tian Zongjun *et al.*. Experimental research on selective laser sintering of nickel-based alloy powder [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(5): 432~434  
张建华,赵剑峰,田宗军等. 镍基合金粉末的选择性激光烧结试验研究 [J]. *中国机械工程*, 2004, **15**(5): 341~343