

文章编号: 1000-6893(2002) 03-0221-05

Ni 基金属粉末激光快速制造的研究

张剑峰^{1,2}, 沈以赴¹, 赵剑峰¹, 黄因慧¹, 余承业¹

(1. 南京航空航天大学 502 教研室, 江苏 南京 210016)

(2. 扬州大学 机械系, 江苏 扬州 225009)

STUDY ON LASER SINTERING OF Ni-BASED ALLOY POWDERS

ZHANG Jian-feng^{1,2}, SHEN Yi-fu¹, ZHAO Jian-feng¹, HUANG Yin-hui¹, YU Cheng-ye¹

(1. Faculty 502, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

摘要: 采用激光选区烧结的方法, 对 Ni 基合金混合铜粉末进行了一系列激光烧结试验。从烧结模型入手, 分析了烧结过程中出现的现象, 讨论了工艺参数对金属粉末烧结成形的影响, 初步探索了金属粉末直接烧结成形的基本机理, 为金属粉末的激光快速成形制造提供了依据。

关键词: 激光选区烧结; 金属粉末; 工艺参数; 金属零件

中图分类号: TG665 文献标识码: A

Abstract: A series of experiments were carried out with Selective Laser Sintering (SLS) for the mixture of Ni-based alloys powders and copper powders. First, a sintering model was established, then according to the phenomena of the sintering process, the effect of the technological parameter upon metal forming was analyzed and discussed in detail, and finally the mechanism of the laser sintering metallic powders was explored preliminarily. All those above lay the foundation for the forming metal spare parts by laser sintering metallic powders.

Key words: selective laser sintering; metallic powder; process parameters; metallic parts

快速原型制造(Rapid Prototyping & Manufacturing, RPM) 是近年来先进制造技术中发展最为迅速的一种新技术^[1-3]。其中激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS) 又是快速原型制造技术中突出的一项技术, 可进行金属零件的快速制造^[4-8]。目前, 较为成熟的 SLS 工艺是将金属粉末和某种粘结剂(如有机玻璃 polymethyl methacrylate, PMMA) 按一定比例混合, 用小功率激光烧结成形金属粉末与粘结剂粘结的粗坯(又称“绿件”), 然后对坯体进行适当的后处理, 如高温烧结和低熔点金属熔浸, 最终得到金属功能件^[9]。这种方法制造的金属件, 在强度、硬度、致密度等多方面均无法与直接烧结金属粉末得到的零件相媲美。因此, 用大功率激光直接烧结金属粉末成形金属件是快速成形发展的一个重要方向, 并且成形具有较大角度的倒锥体形状更是难题。为此, 本文采用激光选区烧结的方法, 对 Ni 基金属粉末混合铜粉直接进行激光烧结成形试验, 初步探索了金属粉末直接激光烧结成形的机理, 弄清

工艺参数对烧结成形的影响。

1 实验材料与实验方法

实验材料为 Ni 基合金粉末(牌号: 16Cr4B4Si, 粒度: 150 目) 和铜粉(牌号: FTD4, 粒度: 200 目) 2 种材料的混合, 混合比为 10 : 2, 它们的化学成份见表 1。

表 1 烧结材料(Ni 基合金粉末和铜粉) 的化学成分
Table 1 Manufactures material (Ni-based alloy powders and copper powders) specifications

烧结材料/%	Ni 基 16Cr4B4Si	FTD4
Cr	16.0	
Si	4.0	
C	1.0	
B	4.0	
Fe	< 5	0.02
Ni	其余	
Pb		0.05
Sb		0.01
As		0.005
S		0.004
Cu		其余

实验用 2.5kW 的横流式 CO₂ 激光器, 波长为 10.6μm, 激光模式为 0 阶模, 激光束光斑直径为 1mm。输出功率从 150W 到 1300W 连续可调,

收稿日期: 2001-05-21; 修订日期: 2001-11-15

基金项目: 国防预研基金资助项目(99J18.3.1.HK0215)

文章网址: <http://www.cnki.net.cn/hkxb/2002/03/0221/>

扫描速度从 100mm/min 到 2000mm/min。每层粉末的铺放采用自制的铺粉装置进行,粉层厚度可精确调节到 0.2mm。

2 激光烧结成形过程

激光作用于金属粉末,其烧结成形过程可分为几个阶段,如图 1 所示。当金属粉末吸收能量达到一定阈值时,部分颗粒表面局部熔化,表面熔化的颗粒去粘结相邻的颗粒,见图 1(a);随着吸收能量的增加,颗粒进一步熔化,金属温度急速上升,甚至在沸点以上,在功率密度最高点处,金属电子流密度急速增加,金属离子逸出,对下层面产生一个反冲力,在这个反冲力的作用下出现粉末飞溅现象,如图 1(b);当输入的能量不太大时,表层粉末完全熔化,熔池的下部未进入下层基体,烧结成形后易得到由一串圆球组成的扫描线,如图 1(c)所示;当输入的能量是足够高时,熔池的下部可进入基体,此时熔池受基体的约束其形状发生了变化,成形后易得到半椭圆形连续的烧结线,如图 1(d)所示。

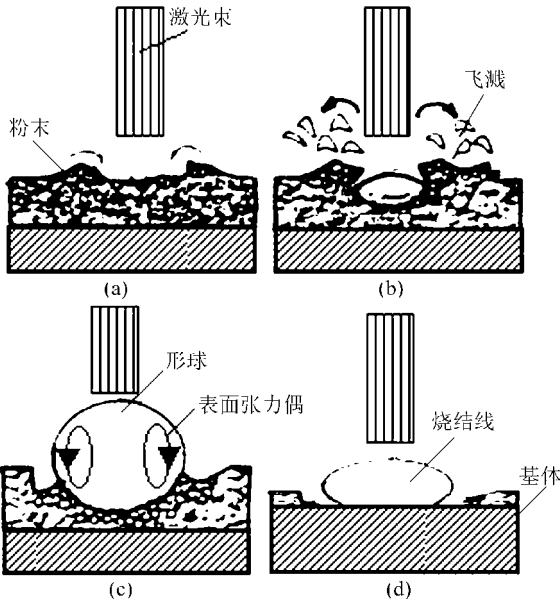


图 1 烧结成形过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Laser Sintering Process

3 模型的建立与分析

激光作用于金属粉末,由于粉末颗粒之间存在着孔隙,金属粉末的导热系数受气孔率的影响,其表达式为

$$\lambda = \lambda_0 \left[\frac{3}{\phi} - 2 \right] \quad (1)$$

式中: λ_0 为空气导热系数; $\phi = 1 - \phi_0$ 为金属粉的

体积百分比; ϕ_0 为空气的体积百分比。激光作用于金属粉末的时间可粗略地表示为

$$T = D/V \quad (2)$$

式中: D 为光斑直径; V 为扫描速度。

从式(1)可知,金属粉末的导热系数仅与周围空气的导热系数成正比,而没有金属粉末的导热系数项。这说明金属粉末的导热系数是相当低的。从式(2)中可知,激光作用金属粉末的时间是很短的,因而可以把金属粉末层假设为不导热的绝热层。激光照射金属粉末时,由表面向下熔化,直到液态熔池与基体相接触时才开始有传热过程,熔池前沿因热量传出而重新凝固,熔化前沿倒退上移,直到基体表面受热达到熔化温度时,熔池前沿才重返交界面。因此,激光作用区域主要应考虑在光斑半径以内的圆形区域,下层粉末熔化主要是熔池粘结周围粉末进入熔池进一步熔化,这给分析烧结成形带来了方便。这种建立的模型在一定程度上与实际情况相符合。

激光照射金属粉末,当吸收能量达到一定阈值时,表层金属粉末开始局部熔化,随着吸收能量的增加,熔化金属达到一定数量以后形成熔池。熔池内的流体单元上的力主要包括体积力和表面力。由于成形采用的光斑小($d = 1\text{mm}$),所以熔池内表面张力占主要作用,在这种情况下,可忽略体积力的作用。另外,熔池中表面存在温度梯度或溶质浓度梯度,势必产生一个表面张力梯度,由此引起熔体对流驱动力 \bar{F}_σ^{101}

$$\bar{F}_\sigma = \left[\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial c} \Delta c \right] \delta(z) H(d-r) \quad (3)$$

其中

$$\delta(z) = \begin{cases} 1 & z = 0 \\ 0 & z > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$H(d-r) = \begin{cases} 1 & r < d \\ 0 & r > d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \Delta T$ 为温度梯度引起表面张力差; $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial c} \Delta c$ 为浓度梯度引起表面张力差; $\delta(z)$ 为 δ -函数; $H(d-r)$ 为 Heaviside 函数; δ -函数和 Heaviside 函数表明熔体对流驱动力仅存在于熔池表面;它是一个表面力。

粉末熔化后熔池形状取决于气、液、固三相交点上液体质点的受力情况,也可以说取决于接触物质之间的界面张力,如图 2 所示。在稳定状态,各界面张力之间的关系

$$\sigma_{gs} = \sigma_{ls} + \sigma_{gl} \cos \theta$$

$$\cos \theta = (\sigma_{gs} - \sigma_l) / \sigma_{gl} \quad (6)$$

式中: θ 为润湿角; σ_{gs} 为固-气界面张力; σ_l 为固-液界面张力; σ_{gl} 为液-气界面张力。

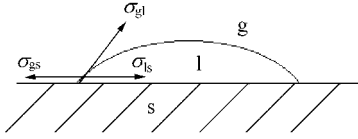


图 2 气、液、固界面张力的关系

Fig. 2 Interface tension relationship of air, liquid and solid

如果润湿角小于 90° 液体能够粘接固体粉末, 随着润湿角减小, 液体粘接固体就越好。如果润湿角大于 90° 液体不能润湿固体, 液体表面张力将使液面缩为球状。

4 实验结果与讨论

金属粉末烧结成形是各种工艺参数综合作用的结果。工艺参数主要包括激光功率、扫描速度、粉层厚度、光斑直径、粉末粒径等。从金属粉末熔化过程来看, 在一定工艺参数范围内, 熔化的金属粉末易形成球体, 这是由于当金属粉末吸收能量达到一定阈值, 熔化形成熔池后, 金属粉末颗粒之间结合力较小, 使得固体质点对液体质点的作用力小于液体质点之间的作用力, 结果气、液、固三相交点上液体质点总的合力方向指向液体内部。此时, 润湿角为钝角, 界面张力将使液面缩为球状。在熔池中, 由于存在多个方向的流动力偶, 使液体流动, 在垂直激光移动方向上, 液体流动如图 1(c) 所示。流动的液体将周围的粉末粘接到熔池中, 熔池的流动性越大, 对周围粉末粘接越多。随着激光移向下一熔区, 使得已粘接周围粉末的熔池的冷却和凝固加快, 如果激光作用的下一熔区没有足够的粉末材料(因这里的粉末已被前一熔区粘接走), 则不能形成新的熔池。只有移动到一定距离以后, 才有足够的粉末材料被熔化, 形成一个新的熔池, 这样重复形成一个个新的球体。因此烧结线是由一串圆球组成。圆球直径和粉末的厚度、激光功率、扫描速度等因素有关, 在其它工艺参数不变的情况下, Ni 基合金混合铜粉烧结中圆球直径与激光功率、粉层厚度、扫描速度的关系分别见图 3、图 4 和图 5, 从图可看出, 圆球直径随激光功率、粉层厚度的增加而增加, 随扫描速度的增加而减小。显然, 激光功率越大, 熔池流动越剧烈, 粘接周围的粉末越多, 使得形球的直径增大; 粉层厚度的增加, 熔池能够粘接的粉末越多, 也使圆球直径增大。激光扫描速度的加快, 即意味着熔池吸

收能量的减小, 熔池流动减弱, 形球直径减小。

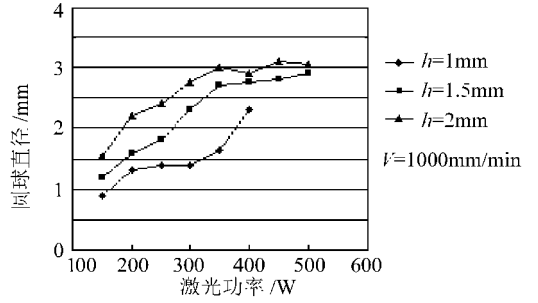


图 3 激光功率与圆球直径关系

Fig. 3 Relationship between laser power and sphere diameter

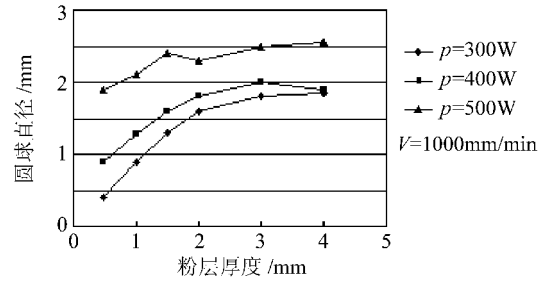


图 4 粉层厚度与圆球直径关系

Fig. 4 Relationship between powder thickness and sphere diameter

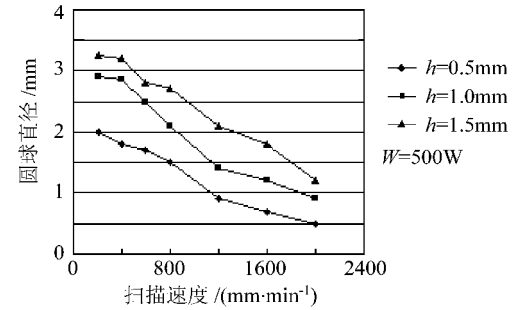


图 5 扫描速度与圆球直径关系

Fig. 5 Relationship between scanning speed and sphere diameter

形球现象对烧结成形是不利的, 调整工艺参数可改变熔池形状从而可避免圆球的出现。例如, 增大激光功率或减小粉层厚度, 使熔池前沿深入基体时, 则会出现与上述完全不同的情形。此时, 基体上固体质点对液体质点的作用力大于液体质点之间的作用力, 此时润湿角为锐角, 界面张力将使液面沿着固体表面张开。因此熔池形状发生变化, 基体下方以扇形形状出现, 烧结成形后扫描线形状是半椭圆形, 另外激光功率的增加, 使得熔池和凝固区的温差加大, 随着激光束向前移动, 有一部分熔体回流, 在熔池的后沿不断地凝固。基体的熔化和熔体的回流避免了形球, 使得烧结成形光滑直线。在其它工艺参数不变的情况下, 激光功率与烧结线的宽度、高度以及熔入基体深度之间的

关系分别见图 6、图 7 和图 8。从图可看出, 扫描线的宽度、高度以及熔入基体深度随激光功率增加而增大。适当增加激光功率对烧结成形是有利的, 但过大的激光功率, 在烧结过程中会出现粉末飞溅现象, 激光功率越高, 飞溅现象越严重。粉层越薄, 虽然成形质量较好, 但成形速度太慢; 粉层越厚, 又易形球, 且金属粉末损失越多, 使得烧结区材料减少, 影响成形尺寸。

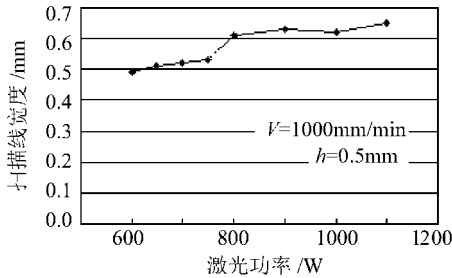


图 6 激光功率与扫描线宽度关系

Fig. 6 Relationship between laser power and sintering width

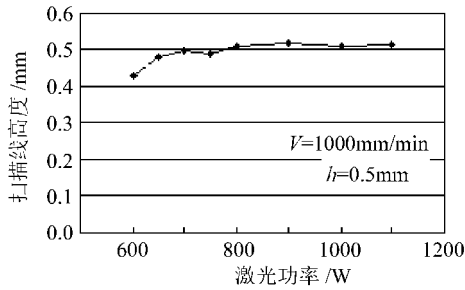


图 7 激光功率与扫描线高度关系

Fig. 7 Relationship between laser power and sintering depth

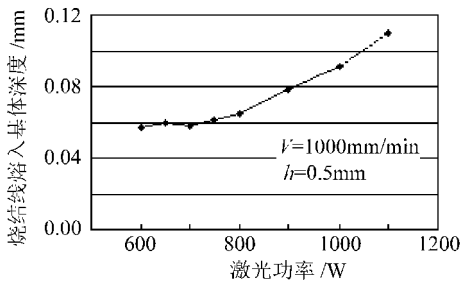
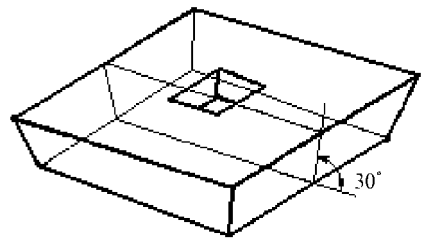


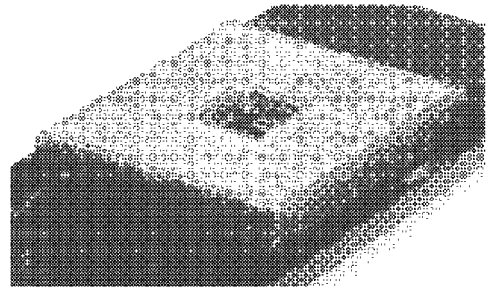
图 8 激光功率与烧结线熔入基体深度关系

Fig. 8 Relationship between laser power and base's melting depth of sintering line

在上述试验研究的基础上, 选择如下工艺参数: 激光功率为 1100W, 扫描速度为 1000mm/min, 光斑直径为 1mm, 粉层厚度为 0.8mm 进行烧结成形。零件的形状如图 9(a) 所示, 带有 30 锥度、且中间带有正方形孔的棱台结构形。经分层切片连续多层烧结成形, 得到零件实物, 图 9(b) 实物照片。经分析烧结件的致密度在 85% 以上, 显微硬度在 HV_{0.05} 550 以上。



(a)



(b)

图 9 激光成形零件结构及实物照片

Fig. 9 The part structure of laser fabrication and Photo

5 结论

(1) 金属粉末激光烧结成形过程中会出现特征明显的粉末飞溅、形成球体、烧结成线等不同现象。粉末飞溅和形球对烧结成线是不利的。

(2) 通过选择合适的工艺参数, 如适当提高激光功率、扫描速度, 减小粉层厚度, 避免形球出现, 形成光滑的烧结线, 并保证层面、烧结线之间的牢固粘接。粉末飞溅是在大功率烧结成形过程中出现的, 功率越高, 粉层越厚, 飞溅现象越严重。在保证选择烧结成形的前提下, 降低激光功率, 可减少粉末飞溅。

(3) 选择合适的工艺参数可直接成形形状较为复杂的零件, 并可获得致密度在 85% 以上、性能良好的烧结件。

参考文献

[1] Kruth J P. Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques[J]. Annals of CIPP, 1991, 40(2): 603-614.

[2] Narahara H. Improvement procedures for stereolithography parts[J]. Int J Japan, Proc Eng, 1994, 28(4): 101- 108.

[3] Kruth J P, Leu M C, Nakagawa T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping[J]. Annals of the CIPP, 1998, 47(2): 525- 540.

[4] O'Neill W, Sutcliffe C J, Morgan R, et al. Investigation on multi-layer direct metal laser sintering of 316L stainless steel powder beds[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 151- 154.

[5] Song Y A. Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting

metallic powder[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 127-131

- [6] Agarwala M, Bourell D, Beaman J, *et al.* Direct selective laser sintering of metals[J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(1): 26-36.
- [7] Niu H J, Chang I T H. Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder[J]. Journal of materials science, 2000, 35: 31-38.
- [8] Guo Zuoxing, Hu JIangdong, Zhou Zhenfeng. Laser sintering of Cu-Sn-C system P/M alloys[J]. Journal of Materials Science. 1999, 34: 5403-5406.
- [9] 白俊生. 激光烧结金属粉末快速成形的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1997.
(Bai J S. Study on laser sintering of metallic powders[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1997.)
- [10] 刘江龙, 刘朝. 激光作用下合金熔池内的熔体流动[J]. 重庆大学学报, 1993, 16(5): 109-114.

(Liu J L, Liu C. Melt flow in alloy melted pool under the action of laser[J]. Journal of Chongqing university, 1993, 6(5): 109-114.)

作者简介:



张剑峰(1959-) 男, 江苏扬州人, 扬州大学副教授, 在读博士生, 主要研究方向 CAD/CAM、快速原型制造。已发表学术论文 15 篇。联系电话: 025-4890963.



沈以赴(1964-) 男, 江苏扬州人, 博士后, 南京航空航天大学副教授。主要研究方向先进材料的特种成型与加工。已发表学术论文 20 余篇。

(责任编辑: 蔡斐)