

工艺参数对 316 不锈钢粉末激光烧结球化的影响

Effect of Process Parameters on Balling During Direct Laser Sintering of 316 Stainless Steel Powders

潘琰峰¹, 沈以赴¹, 顾冬冬¹, 杨家林², 王 洋²

(1 南京航空航天大学, 南京 210016;

2 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

PAN Yan-feng¹, SHEN Yi-fu¹, GU Dong-dong¹, YANG Jia-lin², WANG Yang²

(1 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

摘要: 采用直接金属激光烧结的方法, 对 316 不锈钢粉末进行了一系列烧结实验。实验发现, 在液相粘度较高、表面张力大、熔体材料不浸润固相颗粒和基板等因素的影响下, 烧结过程中出现了球化现象。球化的出现妨碍了直接金属激光烧结成形的顺利进行。分析了 316 不锈钢粉末球化效应产生的原因, 讨论了工艺参数(激光功率、扫描速度和粉层厚度)对 316 不锈钢金属粉末烧结成形的影响。研究表明, 适当提高扫描速度或减小激光功率可以在一定程度上减小 316 不锈钢粉末激光烧结的球化效应。

关键词: 直接金属激光烧结; 金属粉末; 球化效应; 工艺参数

中图分类号: TG665; TG142 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)05-0052-04

Abstract: A series of experiments were carried out with direct metal laser sintering (DMLS) for the 316 stainless steel powders. During the laser sintering, due to the large liquid phase viscosity and surface tension, the balling effect occurred when the molten did not wet the solid metal particle and the underlying substrate. This resulted in a rough and bead-shaped surface, obstructing a smooth layer deposition. The balling effect of 316 stainless steel powder was studied, and the effects of process parameters, such as laser power, scan rate, and layer thickness, on the success of laser sintering were discussed. The results showed that increasing scan rate and decreasing laser power can minish balling effect to a certain extent.

Key words: direct metal laser sintering; metal powder; balling effect; process parameter

选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, 简称 SLS)是目前快速成形技术中发展最快的技术之一, 已成功应用于现代制造业, 其可选用材料很广泛, 主要集中在聚合物粉末和金属粉末。在金属粉末方面, 按成形过程和材料又可分为间接法和直接法。选择性激光直接烧结金属粉末一般称为直接金属激光烧结(Direct Metal Laser Sintering, 简称 DMLS), 它能在几小时内, 不需要或仅需要少量后处理的情况下, 利用三维 CAD 数据直接制造出真正的净成形零件^[1-3]。直接用金属粉末烧结成形三维零件已成为快速成形制造的最终目标之一^[4]。

目前, DMLS 制造金属零件还存在一定不足之处: 烧结成形过程中易出现球化效应和变形, 这两者是影响烧结过程能否顺利进行的突出问题之一; 而且, 球

化效应的产生使得烧结线不连续, 成形件的内部孔隙增加, 导致成形件强度和密度减小、表面粗糙度增大及尺寸精度降低。本工作对 316 不锈钢金属粉末进行了直接激光烧结实验, 初步分析和探讨了球化产生机理和工艺参数(激光功率、扫描速度和粉层厚度)的影响。

1 实验材料和方法

实验材料为气雾化 316 不锈钢金属粉末, 粉末粒度 $\leq 42\mu\text{m}$, 颗粒形状为球形。

激光成形工艺参数为: 连续 CO_2 激光, 波长为 $10.6\mu\text{m}$, 激光束光斑直径为 0.3mm ; 最大输出功率为 1000W , 且功率连续可调; 扫描速度范围为 $0\sim 4\text{m/s}$, 扫描间距为 0.15mm 。

实验均采用单层扫描烧结。粉末不预热,不加气体保护,基板为 Q235 钢板。试样表面形貌利用 QUANTA 200 型扫描电镜分析。

2 实验结果与讨论

2.1 直接金属粉末激光烧结和球化机理

在 DMLS 中,激光束停留在每个金属颗粒上的时间十分短暂(一般为 0.5~ 25ms)^[1],粉末颗粒在极短的时间内被加热、熔化、凝固、冷却。金属粉末的激光烧结实际上就是金属粉末在激光作用下的快速熔凝过程^[5]。激光作用区域内的金属粉末吸收热量后,温度急剧上升至熔点形成液相。形成的液相构成熔池,这里的熔池内既含有液相,又含有固相,因而不同于传统意义上纯液相的熔池,可以将其定义为“烧结池”^[6]。熔体的凝固是一个动态凝固过程,即随着激光束的连续扫描,在烧结池中,金属的熔化与凝固是同时进行的。在烧结池的前半部分,金属粉末不断进入烧结池内熔化而形成熔体;在烧结池的后半部分,液态金属不断脱离烧结池凝固而形成固体。

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张力。图 1 所示为熔池液相与周围空气、固相的接触情况,其中 θ 为接

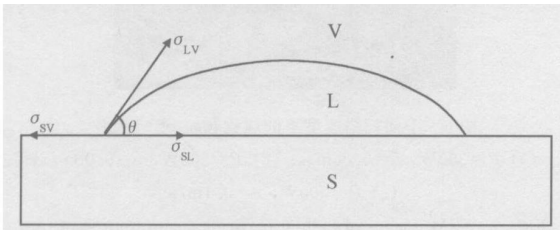


图 1 液相与空气、固相接触情况

Fig. 1 Contact and interfacial tensions among liquid, vapor and solid

触角(又称润湿角), σ_{LV} , σ_{SV} , σ_{SL} 分别表示液相与气相、固相与气相、固相与液相之间的界面张力。在平衡态时满足 Young 方程:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}}$$

θ 的大小反映了液相对固体表面的润湿程度。 θ 越小说明液相对固体表面的润湿性越好。当 θ 大于 90° 时,如图 2 所示,三个界面张力的合力指向烧结池内部,使液面在界面张力和 Marangoni 对流扰动力作用下向烧结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,相邻烧结线之间存在孔隙。

由于表面张力的不稳定性影响,液相烧结线断裂

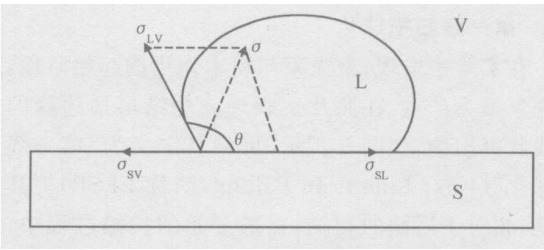


图 2 液相球化收缩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of liquid phase shrink to sphere

成一系列球形颗粒以减小表面积^[7]。图 3 为烧结过程中金属粉末颗粒熔化凝固形球示意图。图 4 为低倍下烧结实物表面形貌 SEM 照片。

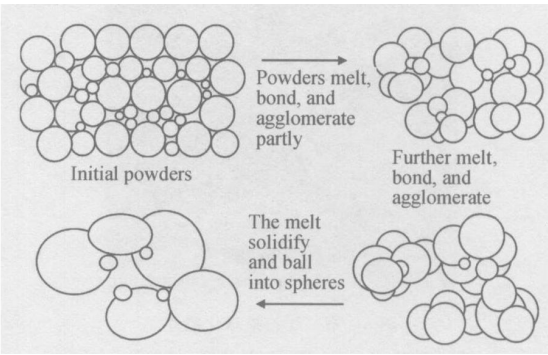


图 3 金属粉末烧结熔化凝固形球示意图

Fig. 3 Schematic of metal powders melt and ball during laser sintering

图 4 清楚地反映了球化颗粒之间的粘结形貌,球化颗粒粘结颈较小且分布不均,其主要原因是由于液相表面张力和粘度较大,液相对周围粉末润湿性较差难于填充于固体颗粒之间的孔隙,而是在减小表面张力的驱动下,液相附着在固体颗粒表面球化收缩,使得部分颗粒球化增大,而颗粒间粘结液相减少。这样相邻颗粒由于缺少足够的液相来填充粘结,颗粒相互间粘结强度很低,烧结层存在很多明显的孔隙。

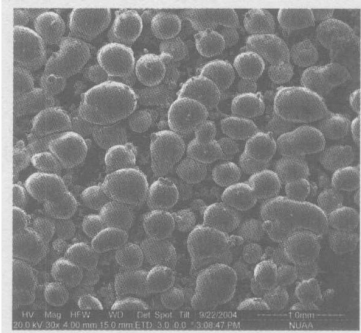


图 4 颗粒相互粘结整体形貌 SEM 照片

(激光功率 $P = 300\text{ W}$; 扫描速度 $v = 0.1\text{ m/s}$)

Fig. 4 SEM image of bonding about balling particles

(laser power $P = 300\text{ W}$; scan rate $v = 0.1\text{ m/s}$)

2.2 第一线扫描球化

在实验中发现, 激光束与粉末作用的起始阶段, 球化现象最为严重, 在照片上表现为烧结层最边缘的一条线状突出物, 如图 5 所示, 可将其定义为“第一线扫描球化”(First Line Scan Balling, 简称 FLSB)。其原因是, 相对于后面的扫描, 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, 其间形成的液相来不及向周围铺展。

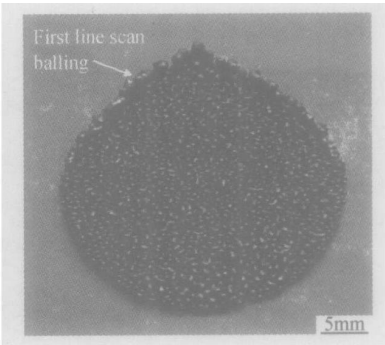


图 5 第一线扫描球化照片

(激光功率 $P=300\text{ W}$; 扫描速度 $v=0.1\text{ m/s}$)

Fig. 5 Photo of the first line scan balling

(laser power $P=300\text{ W}$; scan rate $v=0.1\text{ m/s}$)

第一线扫描球化的球化颗粒尺寸明显大于后续的球化颗粒尺寸, 约为 1 mm , 远大于原始粉末尺寸 ($42\mu\text{m}$)。第一线扫描球化的出现, 对后续工艺过程是极不利的, 不仅会影响下一层粉末的铺放, 还会造成烧结层翘曲变形, 从图 5 可看出第一线扫描球化导致了严重的烧结变形。

2.3 激光功率与扫描速度的影响

激光功率与扫描速度的匹配决定了输入能量的大小。适当增加激光功率或减小扫描速度可使粉末吸收的能量也随之增加, 促使粉末颗粒熔化量增加, 降低熔体粘度和表面张力, 从而增大烧结深度和宽度, 使颗粒间的粘结力增加。能量太小, 会导致烧结不透, 粘结金属粉末熔化不充分, 没有足够的液相润湿粉末, 致使粘结效果差、烧结层残余孔隙过多。能量太大, 会造成烧结温度过高, 熔化液相过多, 出现“飞溅”, 导致金属粉末损失, 增加球化趋向, 影响工件形状和尺寸精度。

在相同激光功率和粉层厚度下, 扫描速度的增加有利于减小球化倾向。图 6 为不同扫描速度下的球化颗粒 SEM 照片。从图 6 可以看出, 在激光功率 300 W , 粉层厚度 0.35 mm 下, 扫描速度从 0.05 m/s 增大到 0.1 m/s 时, 球化颗粒尺寸减小。其原因是扫描

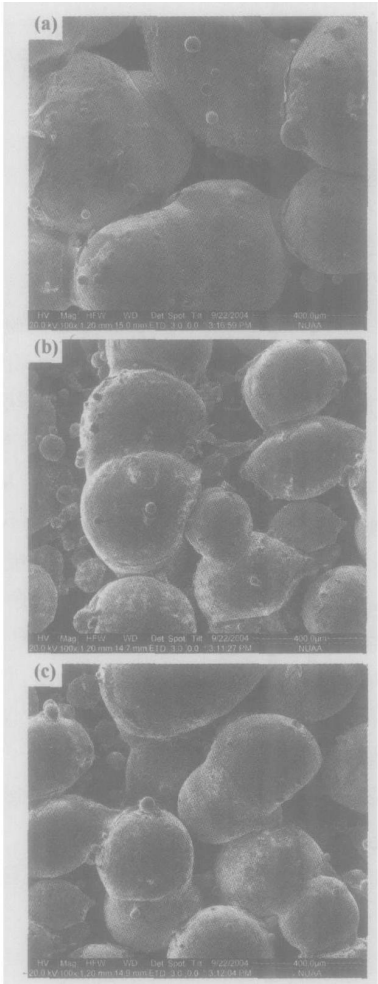


图 6 不同扫描速度下的球化颗粒 SEM 照片

(a) $P=300\text{ W}$, $v=0.05\text{ m/s}$; (b) $P=300\text{ W}$, $v=0.08\text{ m/s}$;
(c) $P=300\text{ W}$, $v=0.1\text{ m/s}$

Fig. 6 SEM images of balling particles at different scan rate

(a) $P=300\text{ W}$, $v=0.05\text{ m/s}$; (b) $P=300\text{ W}$, $v=0.08\text{ m/s}$;
(c) $P=300\text{ W}$, $v=0.1\text{ m/s}$

速度较小时, 激光停留在粉末表面的时间相对延长, 使得熔化的粉末增多, 液相量过多而又未能向周围铺展就使得球化倾向增大。但扫描速度不能太大, 太大会使烧结不充分、熔化液相量过少, 致使颗粒之间、烧结线之间缺少足够的液相来粘结, 孔隙增多, 从而使烧结强度降低, 甚至无法粘结成形。

另一方面, 颗粒间的孔隙大小也随扫描速率的增加而减小, 但孔隙的数目却有所增多。总体上, 烧结层的致密度有所增加。孔隙的出现一方面是由液相对固相润湿性较差引起的, 另一方面是由液相凝固本身收缩引起的。

图 7 为不同激光功率下的球化颗粒 SEM 照片。从图 7 可以看出, 在粉层厚度 0.35 mm , 扫描速度 0.1 m/s 下, 激光功率从 300 W 增大到 350 W 时, 球化颗粒尺寸显著增大。

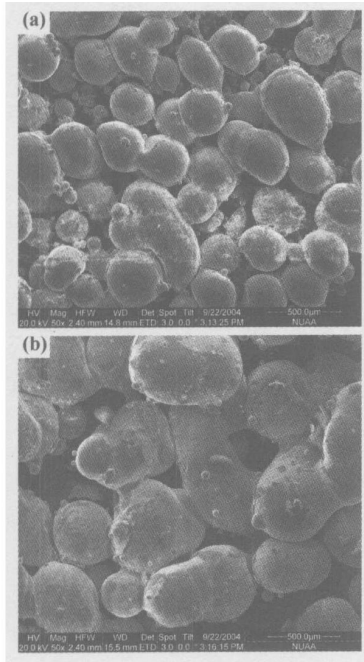


图 7 不同激光功率下的球化颗粒 SEM 照片

(a) $P=300\text{W}$, $v=0.1\text{m/s}$; (b) $P=350\text{W}$, $v=0.1\text{m/s}$

Fig. 7 SEM images of balling particles at different laser power

(a) $P=300\text{W}$, $v=0.1\text{m/s}$; (b) $P=350\text{W}$, $v=0.1\text{m/s}$

从图 4, 6, 7 观察到, 熔化液相凝固形成球形颗粒, 而且在大颗粒周围团聚着许多小颗粒; 球化颗粒尺寸较大, 为原始粉末颗粒的 5~10 倍, 而且颗粒间粘结状况很差, 粘结颈很小。这就使得烧结线是由球形颗粒组成, 极易断裂, 烧结层孔隙很多, 强度也很低。

2.4 粉层厚度的影响

随着粉层厚度的减小, 球化倾向增加^[8]。图 8 所示为球化颗粒尺寸与粉层厚度的关系。从图 8 可以看出, 在激光功率 300W, 扫描速度 0.1m/s 不变的情况下, 粉层厚度从 0.25mm 增大到 0.40mm 过程中, 球

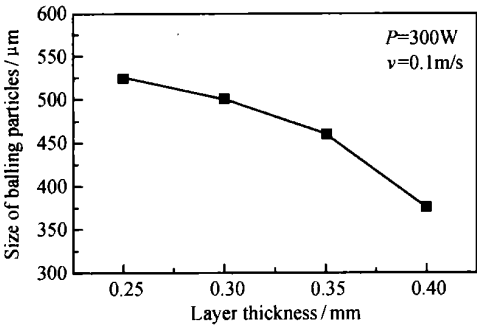


图 8 球化颗粒尺寸与粉层厚度的关系

Fig. 8 Effect of layer thickness on size of balling particles

化颗粒平均尺寸从 530μm 减小为 360μm。适当增大粉层厚度有利于减小球化现象, 但粉层厚度的增加提高了对激光功率的要求, 而且对成形形状和表面质量不利, 铺粉太厚反而会增大球化效应^[9]。

3 结论

(1) 激光功率与扫描速度对球化有着明显的影响作用。适当提高扫描速度或减小激光功率可减小球化倾向。

(2) 粉层厚度的选择对球化效应也有一定影响, 适当增加粉层厚度可以减小球化倾向, 但须严格控制, 铺粉太厚反而会增大球化倾向, 且对成形质量不利。

参考文献

[1] MUKESH AGARWALA, DAVID BOURELL, JOSEPH BEAMAN, et al. Direct selective laser sintering of metals [J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(1): 26–36.

[2] YONG-AK SONG. 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): 127–130.

[3] ABDOLREZA SIMCHI, FRANK PELZOLDT, HAIKO POHL. Direct metal laser sintering: material considerations and mechanisms of particle bonding [J]. The International Journal of Power Metallurgy, 2001, 37(2): 49–61.

[4] ENGEL B, BOURELL D L. Titanium alloy powder preparation for selective laser sintering [J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6(2): 97–106.

[5] 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): 431–434.

[6] 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.

[7] SIMCHI A, POHL H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 359(1): 119–128.

[8] NIKOLAY K, TOLOCHKO, SERGEI E, et al. Balling processes during selective laser treatment of powders [J]. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(2): 78–87.

[9] 张剑峰, 沈以赴, 赵剑峰, 等. Ni 基金属粉末激光快速制造的研究[J]. 航空学报, 2002, 23(3): 221–225.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目(10276017); 南京航空航天大学科研创新基金资助项目(S0403-061)

收稿日期: 2004-11-08; 修订日期: 2005-04-03

作者简介: 潘琰峰(1979–), 男, 硕士研究生, 从事金属粉末的直接激光烧结快速成形技术研究, 联系地址: 南京航空航天大学材料科学与技术学院(210016)。