

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0141-05

采用区域选择激光熔化技术直接制造铝合金零件

张冬云

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 区域选择激光熔化技术(SLM)与选区烧结技术(SLS)相比其突出的特点在于 SLM 过程使用的金属粉末为单组元粉末材料以及该过程中金属粉末完全熔化。因而采用 SLM 技术生产的金属功能模型和零件致密度高,具有系列产品的组织结构和性能,为单件、小批量直接制造金属零件提供了可能。介绍了 SLM 技术的特点以及采用 SLM 技术加工铝合金粉末的特殊性,采用 SLM 工艺熔化金属在随后的结晶过程中易出现成球现象,优化激光加工参数以及在加工过程中通入惰性气体可以克服该问题。采用 SLM 技术加工了 AlSi25 和 AlSi10Mg 两种铝合金粉末,制备了样件和拉伸试样。微观分析显示:样件的横截面中均无孔隙和裂纹存在,组织细小,微观结构分为细晶区和搭接区,搭接区的结构明显长大,经拉伸测试,采用 SLM 技术生产的样件具有优于传统方法生产试样的综合机械性能。给出了采用 SLM 技术制造的铝合金功能模型。

关键词 激光技术; 区域选择激光熔化; 直接制造; 零件; 铝合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Direct Manufacturing of Aluminium Parts by Selective Laser Melting

ZHANG Dong-yun

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Selective laser melting (SLM) is distinguished for its characters that using of single component metal powder and complete melting of metal powder compared with selective laser sintering (SLS). So the metallic functional model and parts manufactured by SLM possess of fine microstructure and using properties similar to series production, and makes the direct manufacturing of metallic parts by single or small lot possible. The character of SLM and speciality of aluminium powder radiated by SLM process are briefly introduced. Balling phenomena during solidification of molten metal always take place when laser radiates aluminium powder by SLM, the methods such as optimizing of laser processing parameters and flowing of inert gas to overcome it are introduced. The powder of two aluminium alloys AlSi25 and AlSi10Mg are radiated with laser and the samples are made. The microstructure analysis showed that there is no pore and crack in the cross section, the thin microstructure can be divided into thin particle and overlapping zone, the microstructure in the overlapping zone obviously grew. The tensile test proved that the samples manufactured by SLM is distinguished for its excellent properties compared with the sample made from conventional methods. Functional model from aluminium alloys manufactured by SLM is proposed at last.

Key words laser technique; selective laser melting (SLM); direct manufacturing; parts; aluminium alloys

1 引言

激光选区烧结技术(Selective laser sintering, SLS)可以分为三种方法:1)间接烧结法;2)直接烧结法;3)单组元金属粉末加工法^[1],即为区域选择激光熔化方法(Selective laser melting, SLM)。前两种方法中激光所加工的金属粉末或者是覆膜金属粉

末或者是多种金属粉末的混合,在加工过程中,被加工的粉末没有发生完全熔化,而是液相烧结,采用这两种方法生成的金属模型的致密度差,需要在高温下进行渗透以提高其致密度和机械性能,渗透后的模型或者零件的组织结构和机械性能与系列产品相差较远,而且由于渗透在高温下进行,渗透后的零件

基金项目: 德国联邦教研部(BMBF)以及德国研究基金会(DFG)资助项目。

作者简介: 张冬云(1969—),女,黑龙江人,德国亚琛工业大学工学博士。北京工业大学激光工程研究院副研究员。主要从事快速成型和激光焊接方面的研究。E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

导师简介: Prof. R. Poprawe M. A., 德国 Fraunhofer 激光技术研究所所长。

发生了一定程度的变形和开裂,影响了模型或者零件的精确度。而采用 SLM 技术生产的金属功能模型和零件致密度高达 100%左右,具有系列产品的组织结构和性能,因而 SLM 技术为单件、小批量激光直接制造金属零件提供了可能^[2~6],但是目前世界范围内在该领域的研究工作只局限于对不锈钢、工具钢、钛合金等材料的研究,对于铝合金的研究尚处于起步阶段^[2]。

本文介绍了 SLM 技术的特点以及采用 SLM 技术加工铝合金粉末的特殊性,分析了采用 SLM 技术制成的 AlSi25 和 AlSi10Mg 样件的微观结构以及拉伸试样的机械性能。

2 SLM 技术

2.1 SLM 过程

SLM 技术的工作过程与 SLS 技术相似:首先建立一个 CAD 模型,然后通过特殊的分层软件对 CAD 模型进行切片处理,并把生成的层信息传递给控制计算机。激光束按照所得信息对位于工作台上的金属粉末进行选区扫描,被扫描的粉末发生完全熔化,随后结晶为固体。一层加工完成之后,工作台下下降一定的距离,送粉器再铺上一层粉末,然后激光对下一层粉末进行扫描,激光扫描-工作台下下降-铺粉这一过程不断重复,直到一个完整的模型生成,如图 1 所示。

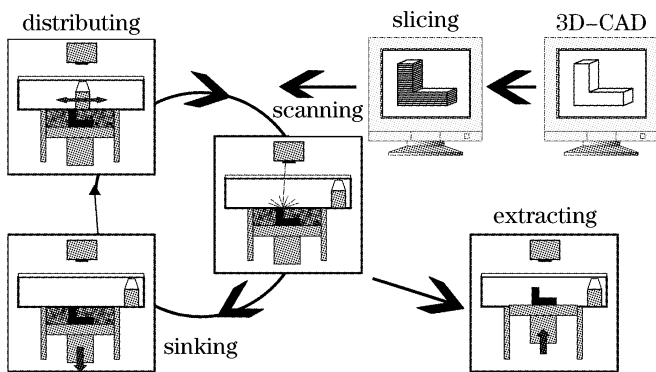


图 1 SLM 过程图

Fig. 1 Process of SLM

表 1 AlSi25 和 AlSi10Mg 铝合金的化学成分 (质量百分数, %)^[7]

Table 1 Chemical composition of AlSi25 and AlSi10Mg Aluminium alloys (mass percent, %)

| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti |
|----------|----------|-----|------|-----------|---------|-----|------|
| AlSi25 | 25 | | | | | | |
| AlSi10Mg | 9.0~11.0 | 0.3 | 0.03 | 0.001~0.4 | 0.2~0.5 | 0.1 | 0.15 |

在 SLM 过程中,粉末材料与激光相互作用发生完全熔化,形成的微小熔池扩展到已经固化的前一层金属以及周围金属中,随着激光束的运动,熔池

其中工作台下下降的距离为分层的厚度。

2.2 SLM 实验设备

SLM 设备的主要组成部分为光源(Nd:YAG 激光器)、具有光束转向功能的导光系统、建模室、粉末储存器、供气系统、过剩粉末贮存器以及粉末分配系统。粉末储存器向工作台输送粉末,粉末分配系统来实现铺粉。光束的运动/转向是通过检流器-振镜完成的。振镜以及建模室粉末输送的控制是通过软件实现的。

实验中采用扫描电镜 LEO 1455 EP 对被加工的粉末材料进行观察。模型以及拉伸试样的建造是在上述设备上进行的。采用光学显微镜 ZEISS (STEMI SV 8 und ZEISS AXIOPHOT)对采用 SLM 生产的样件的宏观和微观结构进行了观察,并对制成的拉伸试样进行了拉伸实验^[2]。

2.3 SLM 技术的特点

SLM 区别于 SLS 的特点在于:SLM 过程使用的金属粉末为单组元粉末材料以及该过程中金属粉末完全熔化。

图 2(a)为被加工的铝合金粉末,其颗粒度为 10~30 μm 。粉末是通过惰性气体(一般为 Ar 气)气流把熔化金属原子化,然后通过筛制生成的。根据厂家的说明,这样制成的粉末形状为圆形,颗粒度分布为高斯分布,即对于上述粉末,其颗粒度在 20 μm 附近的占大多数,比例超过 40%,而颗粒度远离 20 μm 的粉末所占的比例数相对较少^[5],这一现象可以从扫描电镜的观察图中得到。通过这一方法加工制成的金属粉末可以是任何一种工程材料的粉末。目前已经采用 SLM 技术对不锈钢、工具钢、钛合金、铝合金、镍基合金等材料进行了研究^[2,4,5]。本文对 AlSi25 和 AlSi10Mg 粉末进行了加工。其中 AlSi25 合金为活塞合金,活塞合金为过共晶合金, Si 的含量超过 25%。结晶时 Si 以初级 Si 晶的形式存在,提高了活塞的抗摩擦能力,同时降低了热膨胀。AlSi10Mg 为近共晶合金,一般用于生产薄壁、复杂形状的压铸件。两合金的化学成分见表 1。

进入冷却阶段,液态金属发生结晶,形成致密的冶金结合,如图 2(b)。由此生成的模型或零件的致密度为 100%左右。

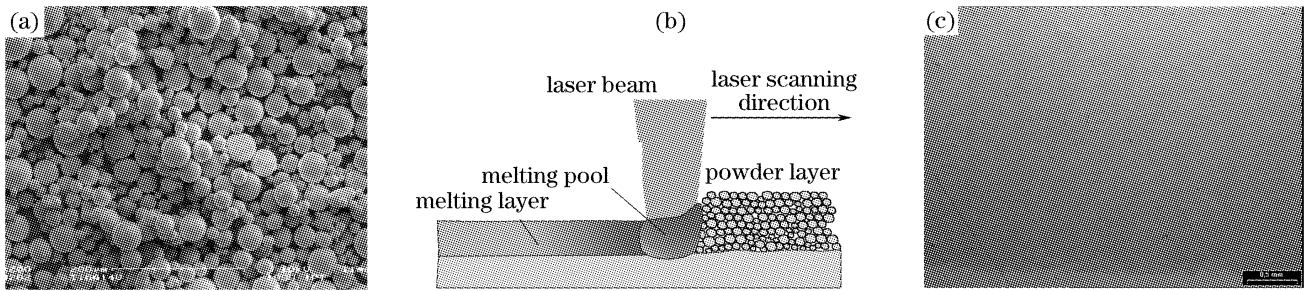


图 2 SLM 技术的特点

Fig. 2 Characters of SLM technology

图 2(c) 为采用区域选择激光熔化技术制成的样品的横截面宏观图。图的底部为底板与 SLM 技术制成的实体的连接部分。图中部分的制造层厚为 $50\mu\text{m}$ ，层数为 60。从宏观图可以看出组织结构中无孔隙、无裂纹、无应变、致密度高。

3 实验结果

3.1 SLM 技术加工铝合金粉末的特殊性

熔化金属粉末在随后结晶过程中的成球问题是 SLM 技术主要解决的问题。这一问题是由于液态金属的表面张力造成的。易发生氧化的金属如铝合金成球现象尤其严重^[2]。这一问题可以通过优化激光加工参数来解决。另外在加工过程中通入一定量的惰性气体以防止液态金属结晶过程中可能发生的氧化和氮化现象，也可以减少成球现象的发生^[5]。优化激光加工参数另一方面也可以使液态熔池[图 2(b)]不仅扩展到下一层的固化金属中，也能够扩展到周围的固化金属中，只有这样才能在随后的结晶过程中形成致密的冶金结合^[2,5,6]。

3.2 实验过程

在 SLM 过程中参数优化不仅在于激光功率、扫描速度、层厚、粉末颗粒度以及激光扫描直径的正确搭配，也在于激光扫描线以及层与层之间搭接量的选择。首先工艺中金属粉末完全熔化的特点决定了该工艺需要较高的激光功率。扫描速度越快，建模时间越短。所选择的层厚越薄，建成模型或零件的表面质量越好，而层越薄，建模时间越长。因而扫描速度以及层厚的确定需要根据具体情况进行选择。粉末层的均匀性是非常重要的，工艺中粉末层厚在 $30\sim 300\mu\text{m}$ 之间，被加工的粉末颗粒度在 $30\sim 150\mu\text{m}$ 之间，由于粉末细小易积聚，铺粉器的底部与粉末摩擦加剧了粉末的积聚现象，给铺粉过程带来了很大的难度。需要正确选择粉末的颗粒度、铺粉器的材料以及保持粉末干燥是该问题的重要因素。激光扫描直径对建模时间以及模型的表面质量都有

较大的影响。激光扫描直径越大，模型的表面质量越差，建模速度越快。搭接量的大小一方面影响建模速度，另一方面也决定了加工过程中的热输入量以及加工过程中在粉末床中形成的温度梯度，进而影响模型内部应力的形成以及模型的精度^[2,5,6]。

3.3 微观结构

图 3(a) 和 (b) 为采用 SLM 技术加工的 AlSi25 和 AlSi10Mg 样品的横截面。AlSi25 样品横截面的组织由析出的初级硅晶和 AlSi 共晶体组成。由于工艺的特点，在整个样品的横截面存在着搭接区和细晶区。搭接区硅晶显著长大。在无搭接区组织较细小，硅晶也较细小。AlSi10Mg 样品的横截面的组织由胞状溶有 Si 的铝固溶体树枝晶和 AlSi 共晶体组成。整个样品的横截面也存在着搭接区和细晶区。在搭接区组织显著长大。两种材料的样品横截面中均无孔隙和裂纹存在^[2]。

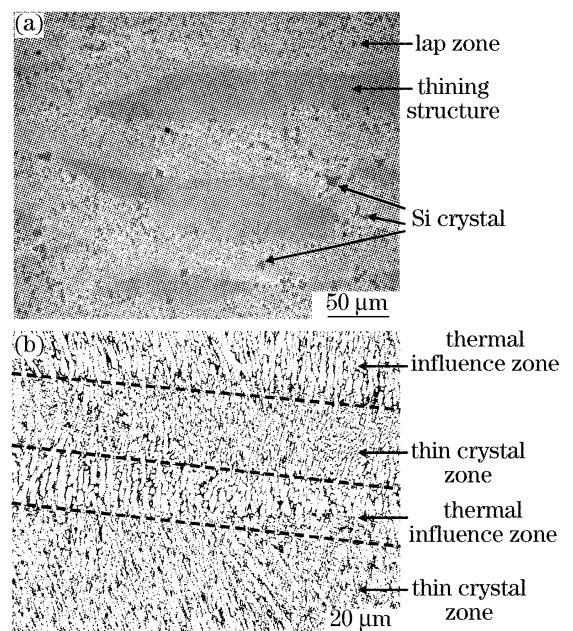


图 3 SLM 样品的微观结构

Fig. 3 Microstructure of sample manufactured by SLM

(a) AlSi25; (b) AlSi10Mg

除上述特点外，采用 SLM 技术制成的 AlSi25 和 AlSi10Mg 样品的微观结构较细小，这是由激光

加工的特点决定的。通过有限元计算,SLM 过程中最大的温度梯度达 7×10^6 K/s^[6]。

3.4 拉伸试样

采用上述激光加工参数按照德国工业标准 EN ISO6871-2 制成了圆形的拉伸试样,材料为 AlSi10Mg。其夹持部分和拉伸部分的直径分别为 6 mm 和 3 mm,拉伸试样全长 50 mm,其中细径部分长度为 18 mm。图 4 中左侧为从建模室取出的拉伸试样原形,试样的表面比较粗糙,其表面粗糙度为 $R_z 80 \sim 120 \mu\text{m}$ 。为了避免粗糙的表面影响拉伸结果,对拉伸试样表面进行了车削,车削后的拉伸试样如图 4 右侧所示。

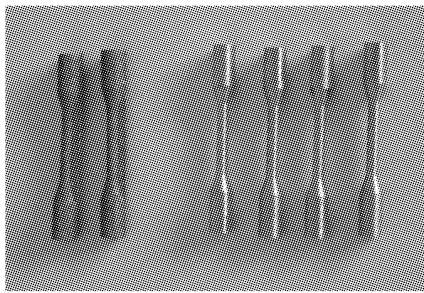


图 4 采用 SLM 生产的拉伸试样

Fig. 4 Tensile samples manufactured by SLM

样品表面粗糙的原因可能是:SLM 过程中为了实现金属粉末的完全熔化,需要较高的激光能量。由于较高的能量输入,在粉末床中形成了较大的温度梯度,零件轮廓外表面处也发生了相当于烧结的现象,未完全熔化的粉末粘结在零件外表面,因而生成的零件外表面较粗糙(材料的物理和热性能不同,其粗糙程度也不同)。经过喷砂处理,表面有所改善。如果工业应用环境对零件表面质量要求较高例如注塑模具,则需要经过切削等机械加工来提高表面质量。

3.5 机械性能

对上述表面进行车削加工的拉伸试样进行拉伸实验,结果显示:采用 SLM 技术制成的拉伸试样具有很好的综合机械性能(如图 5),其抗拉强度(400 MPa),屈服强度(200 MPa)和延伸率(13%)显著高于相应的铸造件(180 MPa,80 MPa,4%)和时效处理后的铸造件(260 MPa,215 MPa,1%)^[2]。SLM 过程中较大的温度梯度 7×10^6 K/s 是形成细小微观组织和较好综合机械性能的原因^[6]。铸造过程的冷却速度慢,温度梯度为 1×10^3 K/s,组织为较粗大的胞状结构,其综合机械性能较 SLM 的样品差。时效处理后零件的抗拉强度和屈服强度都有改善,但是材料的延展性变差^[7]。图 5 中的结果符合

上述的分析。

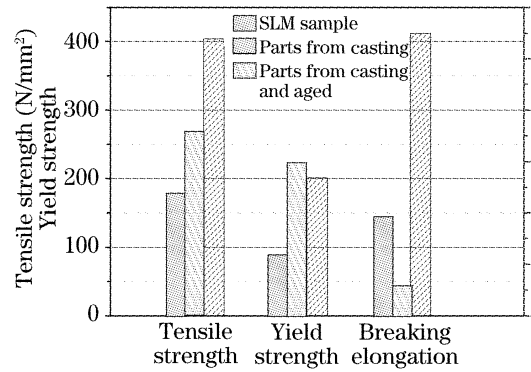


图 5 SLM 样件的拉伸性能

Fig. 5 Mechanical properties of samples manufactured by SLM

对没有进行表面车削加工的拉伸试样进行的拉伸实验,结果为:抗拉强度 360 MPa,屈服强度 215 MPa 和延伸率 8%。可见表面质量较好的试样其抗拉强度和延伸率高于表面质量较差的试样^[2]。较好的表面质量可以避免层间过渡处成为拉伸过程中的裂纹源^[3,7]。

3.6 模型

图 6 为采用 SLM 技术制造的铝合金功能模型。模型中空、内部结构复杂,壁厚为 0.5 mm。虽然目前在德国通过精密铸造制造的零件最小壁厚为 0.2 mm,鉴于该模型的复杂程度,无法采用精密铸造或者其他传统的方法制造。另外该模型的中空结构为轻型结构设计,在保证零件机械性能的前提下减轻了零件的重量,即采用轻型材料制造轻型结构(超轻制造),SLM 技术为航天航空零件的制造提供了广阔的应用空间。

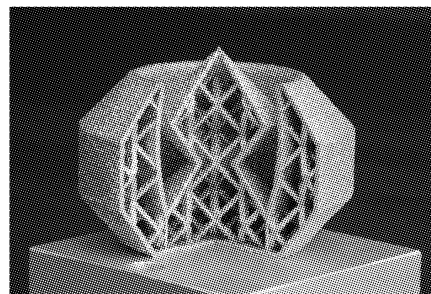


图 6 采用 SLM 技术制造的铝合金模型

Fig. 6 Model from aluminum alloy manufactured by SLM process

4 结 论

1) 采用 SLM 可以快速制造铝合金零件,制造的铝合金零件具有与系列产品相同的材料和较高的致密度;

2) 采用 SLM 技术制造的铝合金零件表面较粗糙, 一般需要进行表面加工以提高其表面质量和机械性能;

3) 采用 SLM 技术制造的铝合金零件组织细小, 机械性能好, 原因为 SLM 过程中较大的温度梯度。

致谢 感谢德国 Fraunhofer 激光技术研究所表面技术部的同事在我攻读博士学位期间对我工作的支持。

参 考 文 献

- 1 R. Morgan, A. H. Popwort, C. Sutcliffe *et al.*. Direct selective laser remelting of 316L stainless steel powder [C]. *SFF*, Austin, Texas, USA, 2001. 276~282
- 2 D. Y. Zhang. Development of Selective Laser Melting (SLM) for Aluminium Alloys [D]. Aachen, Germany; Shaker Publishing House, 2004. 3~11 (in German)
- 3 A. Gebhardt. Rapid Prototyping; Tool for the Rapid Production Processing [M]. Deutschland; Carl Hanser Publishing House Munic Wien, 2000. 333~338 (in German)
- 4 N. N. The Concurrence not sleepy[J]. *Form + Tool*, 2004, **1**: 48 (in German)
- 5 W. Meiners. Directe Selektives Laser Sintering with Simple Komponent metallic Material [D]. Aachen, Germany; Shaker Publishing House, 1998. 2~5 (in German)
- 6 C. Over. Generative Manufacturing of Parts from Tool Steel X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 Using "Selective Laser Melting" [D]. Aachen, Germany; Shaker Publishing House, 2003. 3~8 (in German)
- 7 C. Kammer. Aluminium Hand Book [M]. 15th Edition. Duesseldorf, Germany; Aluminium Publishing House, 1995. 648~654 (in German)