

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0175-05

选区激光熔化快速成型制造精密金属零件技术

吴伟辉, 杨永强, 卫国强

(华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510641)

摘要 对金属粉末材料进行了自动化成型工艺实验, 结合实验, 研究了影响金属零件直接自动化成型的硬件因素、软件因素和材料因素。其中硬件的影响主要是激光的光束质量和功率、聚焦系统、扫描系统和铺粉系统等; 软件的影响主要是扫描策略、切片软件的使用和 CAD 模型的建立等; 材料方面的影响主要是材料的成分、熔点、粒度和粉末的粒径等。通过针对不同成分和粒度的粉末材料的实验, 获得了从 CAD 模型到分层制造出金属实体的样件, 结果表明, 成型零件的致密度达 100%, 尺寸精度小于 0.1 mm, 是完全冶金结合的具有较高成型精度的金属零件。

关键词 光学设计与制造; 选区激光熔化; 快速成型; 金属零件; 扫描振镜; CAD

中图分类号 TH6; TG14; TN249 **文献标识码** A

Direct Manufacturing of Precision Metal Parts by Selective Laser Melting

WU Wei-hui, YANG Yong-qiang, WEI Guo-qiang

(Institute of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract Using a selective laser melting (SLM) machine-dimetal 240, a series of experiments for direct manufacturing of precision metal parts were carried out. Some effect factors on precision deposition layer by layer were studied combining with the experiments. They can be divided into three categories: hardware, software and materials. Hardware factors include the beam quality, power and wavelength of the laser, the focusing performance of the optical system, and the scan speed and the powder delivering precision. Software factors mainly include the designing of the metal parts with CAD software, slicing of the CAD model and scan strategies. Material factors are the composition of the material, the melting point, and the shape and the size of the metal particle. CAD models will be manufactured into metal parts by using metal powders with different composition and particle size layer by layer. The analysis shows the parts are metallurgical bonded entities with density of 100%, dimension precision < 0.1 mm and surface roughness of about $30 \mu\text{m}$.

Key words optical design and fabrication; selective laser melting; rapid prototyping; metal parts; scan mirror; CAD

1 引 言

直接快速成型精密金属零件是先进制造技术发展的主流方向之一^[1]。目前, 为实现该目标开发了多种工艺, 如选区激光烧结、激光熔覆直接制造、熔滴成型制造技术等^[1~3], 但是由于金属材料熔点高、化学性质活泼、易受热变形, 且易在成型过程中发生球化现象, 多数工艺离目标仍有差距。需要解决的关键问题是聚焦激光束要有足够的功率密度及适合

金属粉末吸收激光能量的波长、高精度高速扫描系统、高度自动化的粉末精确铺设以及不同形状零件的分层扫描策略等。本文以专为直接快速成型金属零件开发的选区激光熔化设备——DiMetal-240 为平台, 结合金属粉末材料自动化成型工艺实验, 研究了影响直接自动化快速成型精密金属零件的各种因素, 如成型致密性、表面粗糙度、尺寸精度等。也对实验样品的形貌及内部组织进行了分析。

基金项目: 广东省自然科学基金(05006590)资助课题。

作者简介: 吴伟辉(1979—), 广东人, 博士研究生, 主要从事激光材料合成及成型方面的研究工作。

E-mail: wuweihui_068@163.com

导师简介: 杨永强(1961—), 河北定州人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工、快速成型及金属材料等方面的研究。

E-mail: meiyqcmg@scut.edu.cn

2 DiMetal-240 选区激光熔化系统

选区激光熔化技术是一种能利用金属粉末材料一步就能制造出层与层间具有冶金结合,相对密度接近 100%,高的尺寸精度及好的表面粗糙度的金属零件的快速成型技术^[3,4]。研发的 DiMetal-240 设备采用了图 1 所示的结构,它采用了快速成型的基本原理,即先在计算机上设计出零件的三维实体模型,然后通过专用软件对该三维模型进行切片分层,得到各截面的轮廓数据,将这些数据导入快速成型设备,设备将按照这些轮廓数据,控制激光束选择性地熔化各层的金属粉末材料,逐层堆叠成三维金属零件。该系统具有以下特色:

1) 激光器的选择及光路设计

选用了高光束质量($M^2 < 1.1$)的单模 100 W 光纤激光器。激光束波长 1090 nm,由于波长短,在成型过程中可以更好地被金属材料吸引。该激光器为连续式激光器,内部集成了光电开关,无需外加调 Q 开关,可以实现激光束的快速通断(响应时间小于 20 μs),能很好地适应快速扫描过程中激光的频繁启闭。

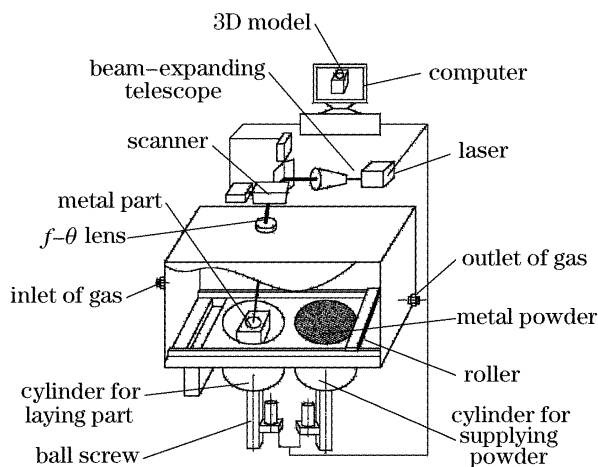


图 1 DiMetal-240 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DiMetal-240

采用了透镜前扫描光路,并以 $f-\theta$ 透镜作为聚焦单元消除球差,使扫描过程中光束焦点始终落在加工平面上。实验表明,通过该光路,可得到 30~100 μm 的聚焦光斑,功率密度达到 $10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 以上。

2) 扫描系统

采用了高速高精度的扫描振镜作为扫描执行单元,实现激光束的 X-Y 平面移动,扫描范围 240 mm \times 240 mm,最高扫描速度可达 7 m/s,光点定位精度可达全视场的 1/65535,还配有扫描校正软件,可供现场调节,进一步提高扫描精度。

3) 铺粉系统

由精密丝杆、成型缸、盛粉缸、铺粉辊、电机控制器及伺服电机等组成。电机控制器采用美国 Park 公司的 AT6400 四轴联动控制器,内含丰富的编程指令控制端口,并带有闭环控制功能,可控制粉末自动化精确铺设。铺粉系统的最小连续铺粉厚度可达 20 μm 。

4) 气体保护系统

由于成型室内部体积较大,要保证气密性较为困难,设备采用了一种整体充纯度为 99.9% 氮气,局部充惰性气体的气体保护方法。

3 成型工艺研究

3.1 实验方法

铜基合金粉末,颗粒大小约为 75 μm ,球形,其成份(质量比)为 0.0883Sn,0.0401P,余量为 Cu。对应基板材料为 304 不锈钢板;Ti-Ni 合金粉末,大小约为 38 μm ,球形,Ti,Ni 元素各占一半,对应基板是纯 Ni 板。

采用 DiMetal-240 选区激光熔化设备作为实验平台,以 0.2~0.7 m/s 的扫描速度,30~50 μm 左右的铺粉厚度,按照预设的 CAD 模型,逐层熔化成型。

实验后利用线切割切取成型件纵截面,通过研磨、抛光和腐蚀制备金相试样,在光学显微镜上进行显微组织观察,利用 X 射线衍射仪进行物相分析。

3.2 成型工艺讨论

3.2.1 硬件因素对成型的影响

选区激光熔化过程要求完全熔化扫描所经过的金属粉末,并且保证足够的成型精度(包括尺寸精度及表面粗糙度)。这两个目标的实现都取决于系统硬件因素:包括激光的光束质量、功率、波长,光路的聚焦能力、扫描速度及连续铺粉精度。

聚焦能力取决于激光的光束质量;光路的聚焦能力。

对高斯光束,如已确定焦距 f ,扩束倍率 n ,将聚焦单元近似看成一个薄透镜,则经扩束准直及聚焦后,得到聚焦光斑直径 D_{\min} 与光束质量因子 M^2 的关系可表示为^[5]

$$D_{\min} = \frac{4\lambda M^2 f}{\pi n D_0} + \frac{k(n D_0)^3}{f^2}, \quad (1)$$

式中第一项为艾里圆,第二项为弥散圆。在入射到透镜的光束直径不是很大的情况下,相对于第一项,第二项的值很小,可以忽略。因此,由(1)式可知,减小透镜焦距、适当扩大入射光束直径、采用具有良好

光束质量的光束(M^2 接近于 1), 都有利于缩小聚焦光斑。

DiMetal-240 采用了光束质量很好的光纤激光器($M^2 < 1.1$) 作为成型能量源, 设计了透镜前扫描式光路, 以获得小的焦距, 并在聚焦前采用可调式扩束镜对入射到 $f\theta$ 透镜的光束进行了适当扩束。

此外, 由于金属材料更易吸收短波长的激光, 选择激光器时, 也应当尽量选用具有短波长的激光。所选的光纤激光, 其波长只有 1090 nm, 大部分金属对这种波长能很好吸收。

由于聚焦光斑尺寸非常小, 且波长短, 采用较低激光功率即可获得所需能量。测试表明, 采用上述激光器及光路, 100 W 功率即能满足成型要求。

从熔化到凝固过程中, 当金属液与基底不湿润时, 金属液会因表面张力的作用收缩成球状, 凝固后形成一串球化珠, 这就是球化现象。球化使成型件表面凹凸不平, 甚至引起成型中断^[2,3]。成型过程必须弱化或消除球化。

球化需要一定的时间, 显然, 如果凝固速度大于球化速度, 则会大大减小球化程度。提高扫描速度, 可以有效加快凝固速度, 减小球化, 但提高扫描速度必然会减小熔化深度, 甚至使扫描经过的金属粉末未能完全熔化。因此, 在提高扫描速度的同时, 应当相应提高激光功率。J. P. Krutha 等^[3] 以这种方法进行了铁基粉末成型实验研究, 也取得了良好的

效果, 成型过程完全避免球化。

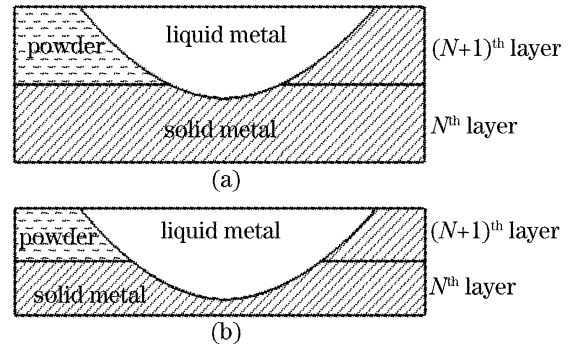
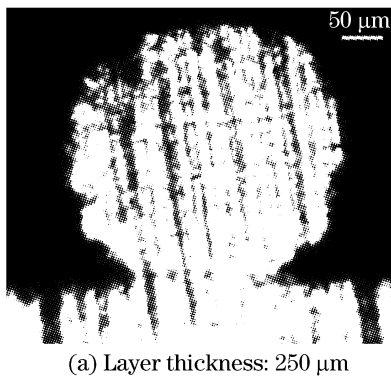


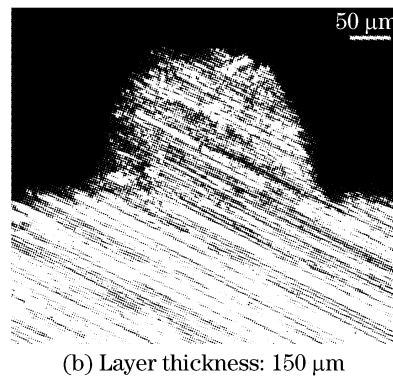
图 2 刚形成的熔池周边状况

Fig. 2 State of the fresh molten pool

球化程度也与液、固界面间的润湿程度有关, 如图 2(a)。刚刚熔化的金属熔池两侧分别是未熔的金属粉末及已凝固的上一道扫描形成的熔池。熔池下部是已凝固的上一层金属(如是首层, 则熔池下部是基板材料)。由于粉末颗粒间充满了气体, 金属粉末与液态熔池界面间的润湿性很差, 很容易使液态熔池发生球化。因此, 减小金属粉末与液态熔池间的接触面积对弱化球化现象有利。如图 2(b), 在相同的激光功率及扫描速度下, 减小层厚, 可使得上一层的重熔量更多, 熔池与金属粉末的接触面积更小。图 3 是在采用相同的激光功率及扫描速度的情况下, 分别以不同铺粉厚度成型的试样, 成型材料为铜基合金粉末。很明显, 采用薄的铺粉厚度后, 球化现象大大弱化。



(a) Layer thickness: 250 μm



(b) Layer thickness: 150 μm

图 3 不同铺粉厚度下的熔化效果(激光功率: 50 W, 扫描速度: 0.117 m/s)

Fig. 3 Molten results in different layer thickness (laser power: 50 W, Scan speed: 0.117 m/s)

3.2.2 软件因素对成型的影响

成型系统需要软件实现三维零件的设计、分层切片及依据二维切片生成扫描轨迹。数据流向大致可表示为: 设计三维模型原型, 并转化为 STL 格式模型 \rightarrow STL 模型修正及分层离散 \rightarrow 扫描路径规划。

进行分层离散时, 由于“台阶效应”^[6], 可能遗失相邻切片层之间的小特征结构, 使表面粗糙不平, 降低了成型精度。为获得精密金属零件, 分层离散时

适宜采用尽可能小的切片厚度。

由于金属的热传导性好, 在成型过程中易产生大的温度梯度, 金属凝固后引发大的残余应力, 导致成型件变形、断裂。合适的扫描路径规划可有效消除热变形。

热变形是由温度梯度诱发的, 考虑到激光是以一定的扫描速度熔化金属粉末的, 在同一条扫描轨迹线上, 激光当前作用点的温度与前面扫描所经过

点的温度之差会随距离的增加而增加,因此尽量缩短扫描线的长度,可以有效减小热变形的程度,这可以通过分区扫描来实现。

图 4 是总面积相同的两个试件,采用的激光功率及扫描速度相同,但试件(a)分三个区扫描,可以连续加工 30 层,试件(b)没采用分区扫描,只加工了 16 层就发生了翘曲变形。

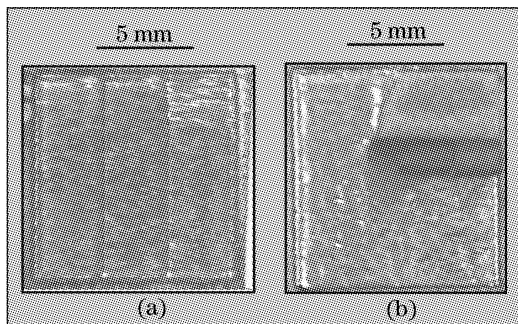


图 4 分区扫描对热变形的影响

Fig. 4 Effect on thermal deformation using scan strategy dividing large scan area into several small scan areas

3.2.3 材料因素对成型的影响

合适的材料也是成功实现直接自动化成型精密金属零件的关键因素。主要考虑的材料因素有材料的成分、熔点、粉末粒径分布。

SLM 追求能实现多种金属材料的快速成型,但合理的材料成分更有利于克服球化、热变形、缩孔等在成型中极易发生的缺陷,通常要求成型材料具有以下两个特点:1)熔融状态下具有充分的亲和性、流动性和浸润性;2)材料的线膨胀系数较小。

材料的熔点也是一个关键因素,但可根据成型设备参数(如最大的激光功率密度、激光波长、最大扫描速度、最小铺粉厚度等)选取,以保证成型过程,金属材料能被完全熔化。

很明显,粉末的最大粒径将直接决定实际的最小铺粉厚度。因此,粉末的粒径分布对成型过程有很大的影响,如为能达到 $100\ \mu\text{m}$ 的铺粉厚度,采用的粉末粒径应小于 $100\ \mu\text{m}$ 。

3.3 成型零件的宏观形貌及成型精度

图 5 是采用铜基合金粉末成型的一个零件,其成型参数如下:

扫描速度:首层为 $0.2\ \text{m/s}$,其余各层为 $0.7\ \text{m/s}$;

激光功率: $75\ \text{W}$;

扫描方式:分区扫描;

扫描间距: $50\ \mu\text{m}$;

层厚: $100\ \mu\text{m}$;

加工层数: 30 层。

对比零件尺寸与模型尺寸发现,零件尺寸精度小于 $0.1\ \text{mm}$ 。

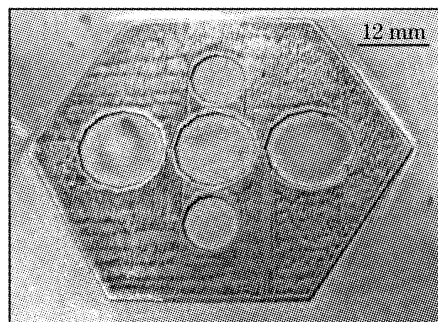


图 5 成型零件(铜基合金粉末)

Fig. 5 A SLM part (material: Cu-based powder)

为避免球化,成型过程采用了很薄的层厚及较快的扫描速度。由图 5 可知,成型件表面光洁,具有明显的完全熔化的金属光泽,没有发生球化现象。

采用分区扫描方式以防止变形,图 5 中零件每边长 $30\ \text{mm}$,且内部有多处圆孔,连续加工 30 层,没有发生变形。首层与基板牢固结合。

图 6 是成型件的纵向断面显微照片。由图可知,由于采用的铺粉厚度很薄,相邻两层间的重熔量很多,使得除最上面一层外,其余各层间的界限很模糊,表现在宏观上,就是图 5 所示的成型件上看不到快速成型中常见的“台阶效应”,这对提高成型件的尺寸精度很有好处。

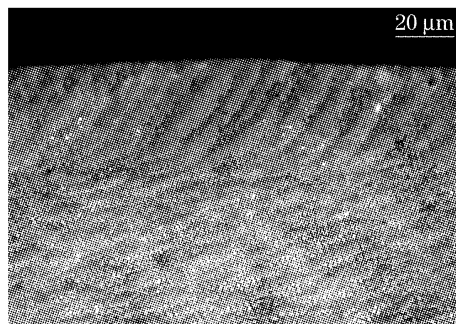


图 6 成型件的多层纵向断面(铜基合金粉末)

Fig. 6 Microstructure of many-layered section plane (Cu based powder)

对该成型件进行 X 射线衍射分析表明,成型件主要成分是 $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ 及 Cu_3P ,粉末已全部熔化形成冶金结合的实体。对多个方位取横向断面及纵向断面分析也表明,成型件内部完全没有孔隙,致密性达到 100% 。

还采用 Ti-Ni 合金粉末进行了成型实验,其成型参数如下:

扫描速度:首层为 $0.2\ \text{m/s}$,其余各层为 $0.7\ \text{m/s}$;

激光功率：75 W；
扫描方式：分区扫描；
扫描间距：50 μm ；
层厚：100 μm ；
加工层数：40 层。

图 7 是成型件的多层纵向断面显微照片。由该图可以看到，各层呈一排排的鱼鳞片状，每个鱼鳞片实际上就是一次扫描形成的熔池凝固后留下的痕迹。由于 Ti-Ni 合金粉末的熔点(1310 $^{\circ}\text{C}$)比所用的铜基粉末熔点(1080 $^{\circ}\text{C}$)更高，在相同的加工参数下，熔深要浅一些，两层间的重熔量不多，因此，相对于图 6，图 7 显示出明显的多层组织。可明显看出，成型件也是完全冶金结合的致密金属实体。

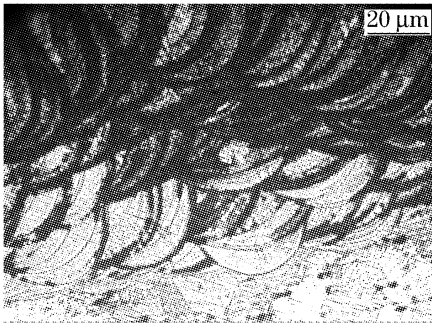


图 7 成型件的多层纵向断面(Ti-Ni 合金)

Fig. 7 Microstructure of many-layered section plane
(Material: Ti-Ni alloy)

4 结 论

结合金属粉末材料自动化成型工艺实验,研究

了影响直接自动化快速成型精密金属零件的各种因素。结果表明,合理设计系统的软硬件,优化配置成型参数,选用合适的成型材料,可以实现致密金属零件的直接自动化快速成型,得到的成型件相对密度达到 100%,层与层间完全冶金结合,成型件表面光洁,尺寸精度小于 0.1 mm。

参 考 文 献

- 1 Feng Tao, Li Zhigang. The latest developments of rapid prototyping and rapid tooling technologies [J]. *Die & Mould Industry*, 2004, (4): 3~5
冯涛,李志刚. 快速成型与快速制模技术的最新发展-Euro Mold '2003 考察报告[J]. *模具工业*, 2004, (4): 3~5
- 2 Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi *et al.*. The newest advance in laser rapid forming of metallic powders[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(6): 361~365
张永忠,石力开,章萍芝等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, **29**(6): 361~365
- 3 J. P. Krutha, L. Froyenb, J. van Vaerenbergha *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2004, **149**: 616~622
- 4 O. Rehme, C. Emmelmann. Reproducibility for properties of selective laser melting[C]. Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, Germany: WLT, 2005. 1~6
- 5 Zhu Linqun, Bai Peikang, Zhu Jiangmiao. Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 24~29
朱林泉,白培康,朱江淼. 快速成型与快速制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 24~29
- 6 Wang Guangchun, Zhao Guoqun. Rapid Prototyping and Rapid Tooling Manufacturing Technology and Its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 31~35
王广春,赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 31~35