



成分梯度材料零件的激光选区熔化成型

刘锋, 吴伟辉, 杨永强, 王迪, 宋长辉

引用本文:

刘锋, 吴伟辉, 杨永强, 等. 成分梯度材料零件的激光选区熔化成型[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1510–1518.

LIU Feng, WU Wei-hui, YANG Yong-qiang, et al. Manufacture of composition gradient material part by selective laser melting[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1510–1518.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1510>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光选区熔化自由制造异质材料零件

Free manufacturing of heterogeneous materials part by selective laser melting

光学精密工程. 2019, 27(3): 517–526 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192703.0517>

激光选区熔化成型可控超轻结构化零件的孔隙生成效果

Pore forming results of controllable ultra-light structured parts by selective laser melting

光学精密工程. 2017, 25(6): 1547–1556 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1547>

激光选区熔化增材制造零件侧壁成型精度分析

Sidewall precision analysis of metal part formed by selective laser melting

光学精密工程. 2015, 23(10z): 165–172 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0164>

变能量激光选区熔化IN718镍基超合金的成形工艺及高温机械性能

Forming process and high-temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 superalloy

光学精密工程. 2015, 23(6): 1695–1704 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152306.1695>

激光选区熔化直接成型高致密锡青铜零件

High relative density tin bronze parts directly manufactured by selective laser melting

光学精密工程. 2016, 24(10s): 484–492 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0484>

文章编号 1004-924X(2020)07-1510-09

成分梯度材料零件的激光选区熔化成型

刘 锋¹, 吴伟辉^{1*}, 杨永强², 王 迪², 宋长辉²

(1. 韶关学院 物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005;
2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:为解决复杂结构金属梯度材料零件制造技术的难题,对成分梯度材料零件的激光选区熔化成型方法展开了研究。通过零件梯度设计法结合多组扫描路径数据文件及一个 txt 格式文件,实现了成分梯度材料零件增材制造数据的获取;通过双轴摆动的粉末实时混合均布装置实现了梯度成分粉末的实时混合及均布;采用柔性清扫回收原理解决激光选区熔化制造梯度材料零件时同层内不同粉末的清理回收问题。利用自主研发的梯度材料零件激光选区熔化成型系统展开了实验验证。获得了 4340+CuSn10 梯度材料零件,颜色上呈明显的梯度过渡,对其前侧面及上表面进行 EDS 分析,发现中间 3 个梯度区域 Fe 的平均质量百分比在垂直方向分别为 4.94%,36.49%,59.16%,在水平方向分别为 12.88%,41%,53.59%,在不同层之间、同一层不同区域之间均呈梯度变化。该方法可实现成分梯度材料零件自由增材制造,为该类零件的制造提供了新的选择。

关键词:激光选区熔化;梯度材料;金属零件;增材制造

中图分类号: TG655 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202807.1510

Manufacture of composition gradient material part by selective laser melting

LIU Feng¹, WU Wei-hui^{1*}, YANG Yong-qiang², WANG Di², SONG Chang-hui²

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,
Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: wuweihui068@163.com

Abstract: A selective laser melting method for manufacturing the composition gradient material part was investigated to solve the problem of manufacturing metallic gradient material parts with complex structures. A composition gradient design combined with several groups of scanning path data files and a material txt format file was proposed to obtain additive manufacturing data of the composition gradient material part. A real-time powder mixing and distributing device was used to mix and distribute the composition gradient powder by swinging a hopper along two axes. The principle of flexible cleaning and recycling of powder was used to clean and recycle different powders in the same

收稿日期: 2019-12-26; **修订日期:** 2020-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51875215); 广东省科技发展专项资金项目(No. 2017A010102016); 广东省自然科学基金资助项目(No. 2018A030313243); 韶关市科技计划项目(No. 2018sn060)

layer during the manufacturing of the gradient material part through selective laser melting. The experimental verification was carried out using a self-developed selective laser melting system for forming of gradient material part. A 4340+CuSn10 gradient material part was manufactured during the experiment, which showed a significant gradient change in color. Energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis on the front side and the upper surface of the part showed that the average mass percentages of Fe in the middle three gradient areas were 4.94%, 36.49%, and 59.16% in the vertical direction, and 12.88%, 41%, and 53.59% in the horizontal direction. The composition of the experimental sample gradually changed in different layers and different regions of the same layer, which verified the feasibility of the method and provided a new choice for the manufacturing of composition gradient material parts.

Key words: selective laser melting; gradient material; metal parts; additive manufacturing

1 引 言

成分梯度材料零件是一种特殊的异质材料零件,即在零件的两种不同材料之间,通过材料成分呈梯度过渡,实现异种材料之间的连接,能有效克制异种材料之间因性能差异导致材料难以良好结合的情况,同时也能获得性能上的连续过渡,因而在航空航天、医疗器械、仿生器械等领域有着广阔的应用前景^[1]。现有制造成分梯度材料与零件的方法主要包括等离子喷涂法、磁控溅射法、化学气相沉积法及粉末冶金法等,但对于一些结构复杂的金属梯度材料零件,仍存在困难^[1-3]。由于增材制造技术特别适合复杂结构零件的成型,且成型过程具有自动化程度高及通过逐步添加材料成型的特点,在成分梯度材料零件成型方面具有巨大的应用潜力及良好的发展前景。

目前,利用增材制造技术成型金属成分梯度材料零件的研究主要集中在激光净成型工艺方面^[4-7],但该工艺的成型精度较低、且较难成型高复杂程度的结构。相对多数金属增材制造工艺而言,激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术具有更高的成型精度,更好的复杂结构成型能力,其成型件的力学性能也十分优良,仅需抛光等简单后处理即可投入使用,因而采用该工艺展开梯度材料零件增材制造的应用前景更好^[7-11]。国内外对 SLM 成型梯度材料零件的研究,主要集中在结构梯度零件的设计、成型及组织和机械性能等的分析上^[12-15],仅有少数学者涉及了多种材料成分逐步梯度过渡的成分梯度材料零件的 SLM 成型。Demir 等^[16]针对冶金相容性低的组件焊接困难的问题,利用双漏斗柔性 SLM 系统直接成型了 Fe/Al-12Si 多材料零件,组成成

分在垂直方向上实现由 Fe 向 Al-12Si 的转变,并利用 55%+45%的混合材料实现了两者的联结,在层与层间仅简单地通过一种混合成分材料实现了梯度过渡。Wei 等^[17]采用阵列送粉装置,结合不同材料逐点沉积方法及真空选择性清除残余粉末的方法,实现了成分梯度材料零件的成型。

由于 SLM 是基于粉末床原理,采用刮板或辊轮以线状推进方式供给粉末,因此,在成型空间内任意位置按需布置材料是 SLM 自由成型梯度材料零件的难点之一,已有学者解决了此难题。吴伟辉等^[18]提出了柔性清理回收同层内多余的异种材料,再铺入另一种材料实现异质材料零件成型的方法,并用自主研发的激光选区熔化异质材料增材制造系统成型了具有复杂外形及微细材料区域特征的 4340/CuSn10 异质材料齿轮零件。Wei 等^[19]采用特制的 SLM 系统,利用料缸供应主要粉末 316L、粉末分配器用于分配次要粉末 In718,通过刮板铺设主粉末、真空选择性清除同层内残余粉末及通过粉末分配器选择性布入次要粉末的方式,实现了两种材料在成型空间上的自由布置。

为实现 SLM 自由制造成分梯度材料零件,还需解决以下两个难题:(1)需针对梯度材料零件的材料成分特点,研究适合 SLM 成型的成分梯度材料零件模型数据获取方法;(2)当各层或同层各个区域内材料成分不同时,需在粉末铺刮前将粉末按比例均匀混合及供给。目前,这方面仅限于一些装置及方法的提出^[20-21],尚未涉及具体的实验研究。本文拟在已有异质材料 SLM 成型工艺研究基础上,探讨成分梯度材料零件的设计及数据处理方法、梯度材料成分的实时混配方法,并采用自主研发的梯度材料零件 SLM 成型实验系统展开实验验证,为金属梯度材料零件的自由增材制造提供一种路径。

2 成型原理及方法

2.1 零件梯度设计法

成分梯度材料零件不同区域材料组成成分按一定规律发生变化。两种材料构成的成分梯度材料零件,若其中某一成分体积百分比的变化情况用成分分布函数表示为 $f(x)$,则另一成分用成分分布函数表示为 $1-f(x)$ 。由泰勒定理可知,指数函数、幂函数、三角函数均可利用泰勒公式展开为多项式函数,因此可用分段多项式函数作为分布函数的基本形式,结合梯度源思想^[22-23],将第 i 种组分的分布函数表示如下:

$$f_i(x) = \begin{cases} 0 & (x_{\min} < x < x_1) \\ a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n & (x_1 < x < x_2) \\ \vdots & \\ 1 & (x_n < x < x_{\max}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: x 为某一成分材料距离梯度源的距离, x_{\min} 为距离最小值, x_{\max} 为距离最大值。

根据上述成分分布函数,可将整个成分梯度材料零件的几何结构分解为有限个几何子模型的并集,利用几何子模型各区域材料的体百分比加权平均值作为其材料信息,将它离散化为 n 个具有材料属性的子模型的装配体,用于控制成型。如图 1 所示,在采用三维设计软件进行零件结构设计时,根据其组成成分的变化,以轴线为梯度源,将三维结构设计成 5 个子材料三维模型,通过组装各子材料三维模型,获得一个完整的成分梯度材料零件的三维模型。

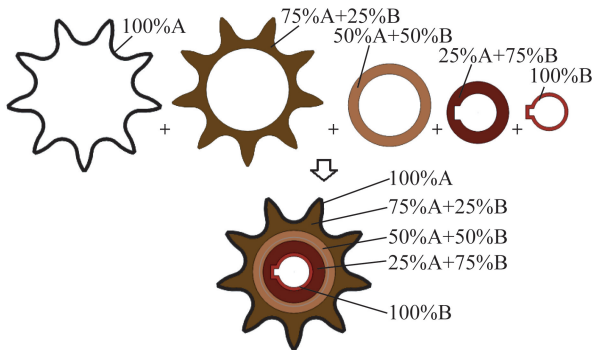


图 1 成分梯度材料零件三维模型设计示意图

Fig. 1 Sketch of 3D model design method for composition gradient material part

2.2 增材制造数据的获取方法

对成分梯度材料零件的三维模型进行数据处理,将梯度材料零件的几何结构特征与材料特征组合,建立几何子模型到材料信息空间的映射关系,获取其增材制造数据,如图 2 所示。先记录梯度材料零件三维模型中各子材料三维模型的中心坐标,在切片软件中打开各子材料三维模型,通过移位使各子材料三维模型的中心坐标与它在梯度材料零件三维模型中的中心坐标一致,完成模型数据的移位处理;然后可对各子材料三维模型进行切片处理,获得各子材料三维模型的 CLI (Common Layer Interface) 数据文件。对 CLI 文件进行扫描路径规划,并生成激光扫描路径,每一 CLI 文件对应生成一组扫描路径,一组扫描路径可由 m 个 HPGL (Hewlett-Packard Graphics Language) 文件组成(m 为对应 CLI 切片文件的层数),每个 HPGL 文件用于描述对应子材料模型一个层片的扫描路径。

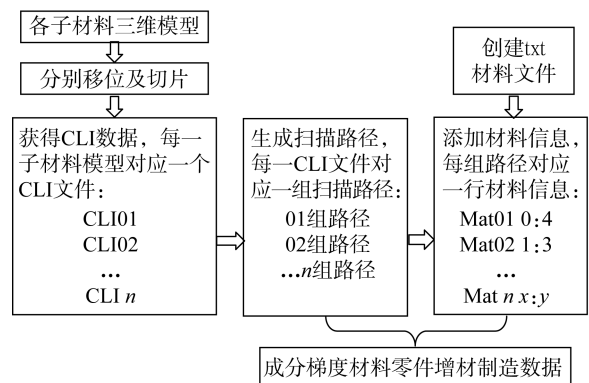


图 2 成分梯度材料零件增材制造数据获取方法

Fig. 2 Acquisition method of additive manufacturing data for component gradient material part

由于零件为梯度材料零件,不同部位材料的组成成分不同,因此,针对所有子材料三维模型创建一个 txt 格式的材料文件,在该文件中添加以 Mat 作为起始字符的材料信息,每组扫描路径对应一行材料信息。采用两个定量供粉漏斗供给粉末,通过一根带槽的辊轴的旋转实现粉末供给,每旋转一圈,即泄出定量容积的粉末,该定量容积可称为基础容积。例如“Mat02 1:3”,表示 02 子模型采用的材料成分是由 1 倍基础容积的材料 A 和 3 倍基础容积的材料 B 混合而成。因此,如图 1 中的成分梯度材料零件的材料文件,可先建立 5 种材料编号: Mat01 为 100% A, Mat02 为

75%A+25%B, Mat03 为 50%A+50%B, Mat04 为 25%A+75%B, Mat05 为 100%B。再建立一个 Mat.txt 的文件,在文件中写入如下表达: Mat01 4 : 0; Mat02 3 : 1; Mat03 2 : 2; Mat04 1 : 3; Mat05 0 : 4。

2.3 成型系统结构组成及工作原理

梯度材料零件 SLM 成型系统是基于粉末实时混配+柔性清扫回收余粉原理,在原有异质材料零件 SLM 成型系统的基础上^[18,20-21],增加梯度材料粉末实时混合均布装置构建而成的,结构原理如图 3 所示。混合均布装置在成型过程中将两泄粉管下泄的粉末完全混合,并将混合后的粉末均匀分布开来,整理成与铺粉盒长度一致的粉末束流。

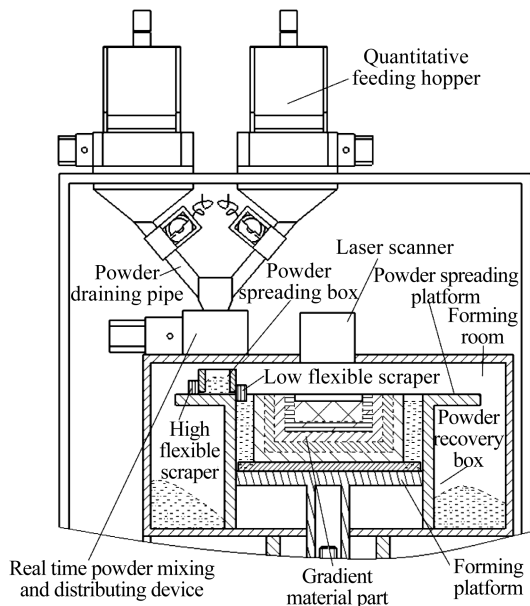


图 3 梯度材料零件 SLM 成型系统结构原理

Fig. 3 Schematic diagram of selective laser melting manufacturing system for gradient material parts

粉末实时混合均布装置主要由混均粉斗、两个摆动电机和两个微型振动电机组成,如图 4 所示。摆动电机 1 和摆动电机 2 可分别驱动混均粉斗绕两电机输出轴的中心线摆动以实现粉末混合,摆动角度在相对水平面为 $\pm 5^\circ \sim \pm 60^\circ$ 内选取,摆动时间根据需要在程序中设定;在混均粉斗分别绕两电机输出轴中心线摆动时,微型振动电机对斗中的粉末进行振动,减少粉末在斗内器壁上的黏附;实现粉末充分混合后,还需要将混均粉斗内的粉末整理成与铺粉刮板长度相匹配的流束;可使斗的位置在沿摆动电机 2 的轴向方向

上保持水平,然后通过摆动电机 2 绕该电机轴中心线反复摆动,并同时开动微型振动电机。混合粉末在重力、往复摆动冲击力及微型振动电机的微细振动力的联合作用下,上层球形粉末颗粒插入到下层球形颗粒的间隙中,下层球形粉末颗粒在相互挤压中逐步向粉斗两侧流淌,实现粉末在混均粉斗中按长度均布,当混均粉斗的长度不小于铺粉刮板的长度时,则可使粉末流束的长度不小于铺粉刮板的长度。均粉后,摆动电机 2 驱动混均粉斗先向下翻转 180° ,使粉末落入正下方的铺粉盒中,然后向上翻转 180° 回到初始位置,为下一个粉末实时混配循环做准备。

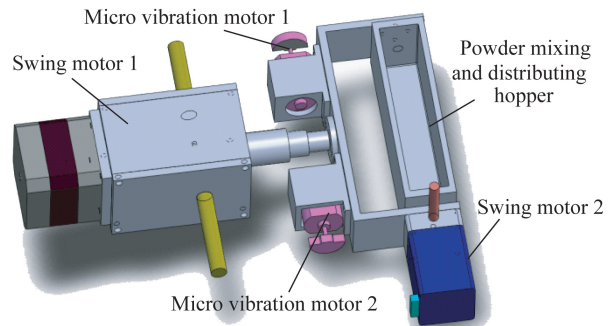


图 4 粉末实时混合均布装置(拆去气密外罩)

Fig. 4 Real time powder mixing and distributing device (Removing the airtight cover)

如图 3 所示,铺粉盒及其两侧的柔性刮板组成柔性清扫回收装置,图中铺粉盒左侧的高位柔性刮板用于粉末的铺设,右侧的低位柔性刮板用于粉末的清扫回收。柔性刮板由多根具有弹性的丝材夹持制成,如图 5 所示,如同扫帚可将地面上的粉尘清扫干净而不会带走固定在地面上凸起的石头一样,低位柔性刮板可将某层内多余的粉末清扫并回收而不会影响已成型的实体^[18]。

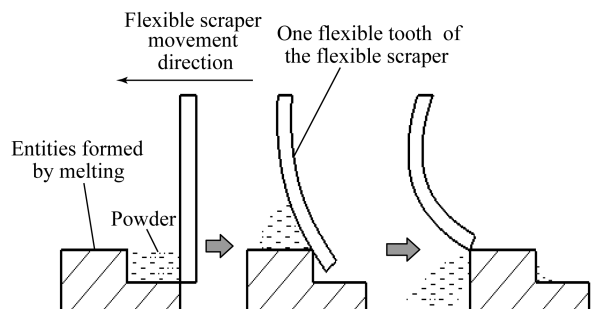


图 5 柔性刮板清除回收粉末原理

Fig. 5 Schematic diagram of powder recovering by flexible scraper

成型梯度材料零件时,首先根据成分梯度材料零件增材制造数据的获取方法设计三维模型、处理数据,获得增材制造数据后,将数据导入成型系统,用于控制成型缸下降、清粉、供粉、激光束扫描等操作。成型过程如下:

- (1)设置相关成型参数,准备成型。
- (2)成型平台下降一个层厚,准备铺粉。
- (3)读取某组路径数据在当前层的扫描路径信息。
- (4)打开 Mat. txt,查找该组路径数据对应的 Mat 编号,并读取对应的材料配比信息。
- (5)两个定量漏斗按配比下泄定量粉末材料至粉末实时混合均布装置的混均粉斗中,若为单材料,则摆动电机 2 翻转将粉末倒至铺粉盒中;若为混合成分材料,则充分完成粉末混合均布操作后将粉末倒至铺粉盒中。
- (6)铺粉盒载着按需配置好的粉末材料向右移动,高位柔性刮板将粉末平铺到成型平台上。
- (7)激光束根据该组路径数据在当前层的扫描路径选择性地熔化金属粉末,执行 SLM 成型。
- (8)若同层内存在梯度材料区域,铺粉盒返回,低位柔性刮板将当前层内多余粉末清除干净。每次铺粉前,低位柔性刮板对成型平台完成指定次数的清扫动作,以达到完全清除剩余粉末、防止粉末污染的目的。
- (9)重复步骤(3)~(8),直至完成梯度材料零件当前层的成型。
- (10)转至步骤(2),循环执行步骤(2)~(9),直至完成整个梯度材料零件的 SLM 成型。

3 实验及结果分析

3.1 实验设备与材料

实验设备为自主研发的梯度材料零件 SLM 成型系统。该系统配置了 200 W 连续式光纤激光器、粉末实时混合均布装置、柔性清扫回收装置、成型缸及 2 个定量供粉漏斗。激光器的光束质量因子 $M^2 \leq 1.3$ 、波长为 1 075 nm,最大成型尺寸为 80 mm×80 mm×80 mm,铺粉厚度可设置范围是 10~100 μm 。

实验采用尺寸为 50 mm×50 mm、厚度为 5 mm 的 304 不锈钢板作为基板。实验粉末材料为经磁选法反复分离提纯的 4340 钢粉末(国产牌

号 40CrNi2 Mo)和 CuSn10 铜合金粉末,分别置于两个定量漏斗中,粉末粒径均为 15~53 μm ,球形,4340 粉末呈银灰色,CuSn10 粉末呈金黄色。实验成型过程中,保护气体采用体积分数为 99.98% 的氩气。实验后,对照零件照片并结合体视显微分析及能谱仪成分分析(EDS,设备型号:蔡司 EVO18,布鲁克 Xflash 6130),获得梯度材料零件成型的形貌及成分信息。

3.2 实验数据

为方便观察本方法对不同层之间、同层中不同区域间材料同时呈梯度变化的复杂梯度材料零件的成型能力,采用零件梯度设计法,设计了如图 6 所示的梯度材料零件的三维模型。零件最内部是尺寸为 3 mm×1.5 mm×1.5 mm 的长方体基体,材料为 100% 的 4340,零件整体尺寸为 8 mm×4 mm×4 mm 的长方体,最外层壳体区域材料为 100% 的 CuSn10,中间利用 3 个厚度为 0.5 mm 的梯度区域实现两种材料之间的过渡。零件自内向外,4340 合金钢的含量呈梯度减少,CuSn10 的含量呈梯度增加。

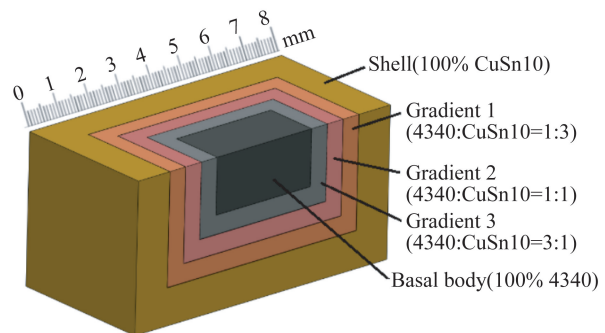


图 6 梯度材料零件的结构组成

Fig. 6 Structure and composition of gradient material part

按上述方法,根据零件在三维模型中的位置对各子材料三维模型进行移位、分层切片,并进行扫描路径规划后,获得 5 组子材料模型路径数据,由内至外分别为 01 组路径、02 组路径、03 组路径、04 组路径、05 组路径,设置切片数据层厚 30 μm ,总层数为 133 层。

建立 Mat. txt 文件存储材料信息,如上所述,可在文件中通过五行信息建立 5 种材料:Mat01 4 : 0;Mat02 3 : 1;Mat03 2 : 2;Mat04 1 : 3;Mat05 0 : 4。将 5 组路径数据及 Mat. txt 材料文件导入梯度材料零件 SLM 成型机指定的文件夹

中,获得完整的增材制造数据,用于控制成型操作。

3.3 成型参数

实验开始前,在梯度材料零件 SLM 成型系统中设置实验相关参数如表 1 所示。

表 1 梯度材料零件 SLM 实验成型参数

Tab.1 Experimental process parameters of gradient material part fabricated by SLM

实验设备成型参数	设定值
激光功率/W	140
摆动电机 1 摆动角度/(°)	±30
摆动电机 2 摆动角度/(°)	±45
两刮板底平面距离/mm	1
粉末清扫次数	9
铺粉层厚/ μm	30
激光扫描间距/mm	0.08
4340 材料区域激光扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	350
第一梯度区域扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	250
第二梯度区域扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	300
第三梯度区域扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	300
CuSn10 区域扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	150

3.4 实验结果分析

对成型的梯度材料零件进行拍照,获得的成型件照片如图 7 所示(彩图见期刊电子版),发现其材料分布基本与图 6 的模型图相一致:其左、右侧面均为 CuSn10 外壳层,呈金黄色;上表面最内部为 4340 基体区域,因表面略微氧化呈明显的深灰色,由第 3 梯度到第 1 梯度,随着 4340 成分逐渐减少、CuSn10 成分逐渐增加,暗灰色逐渐变淡,直至最外层纯 CuSn10 区域可见明显的金黄色;前侧面也表现了类似的颜色梯度变化。

从图 7 中所标记的前侧面进行磨制抛光,腐蚀后用体视电子显微镜对零件进行拍照后得到图 8。由图 8 可知,所成型的零件前侧面明显呈现出 A,B,C,D,E 共 5 个不同的材料区域,各材料区域都具有完全冶金组织,基本没有明显的孔洞,成型质量较好。E 区域长为 3 mm,高为 1.5 mm;在垂直方向和水平方向,A 区域宽度为 1 mm,B,C,D 区域宽度均为 0.5 mm,梯度区域尺寸与原始设计模型的尺寸基本一致。

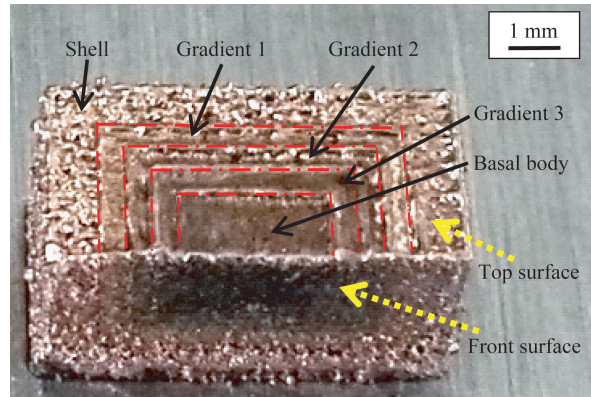


图 7 梯度材料零件

Fig.7 Gradient material part

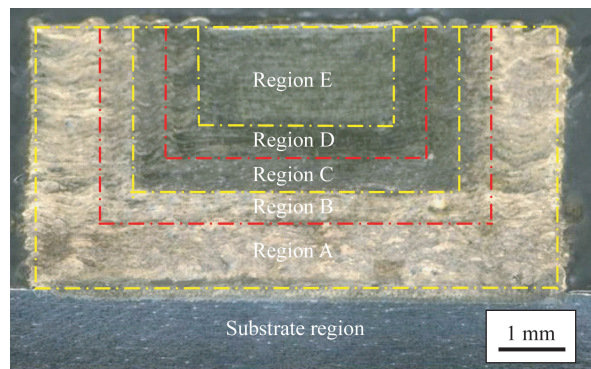


图 8 梯度材料零件剖面显微照片(腐蚀后)

Fig.8 Profile micrograph of gradient material part (after corrosion)

由于 4340 粉末对激光的吸收率高于 CuSn10 粉末,在成型过程中 4340 粉末吸收更大的激光能量而产生飞溅,继而引发材料损失,导致上表面 4340 基体区域发生较明显的凹陷。由于清粉用的低位柔性刮板底平面与铺粉用的高位柔性刮板底平面距离设置为 1 mm,尽管存在中间的 4340 基体区域凹陷,但如图 8 所示,凹陷深度不超过 0.18 mm,通过柔性刮板多次往复清除粉末,基本可以清除干净粉末。早前的研究也表明^[18],4340 基体区域的凹陷对两个材料区域内的材料纯度影响甚微。为分析梯度过渡区域的材料成分情况,对 B,C,D 3 个成分梯度区域进行成分检测。在每个区域内 3 个不同位置拾取 0.05 mm × 0.05 mm 的微区域进行 EDS 分析,将同一区域的 3 个微区数据元素成分取平均值,并与所用的 CuSn10 粉末及 4340 粉末成分(通过 XRF 分析得到,设备型号:日本理学 PrimusII)进行对比,可得各成分梯度区域元素含量的变化柱状图,如图 9 所示。

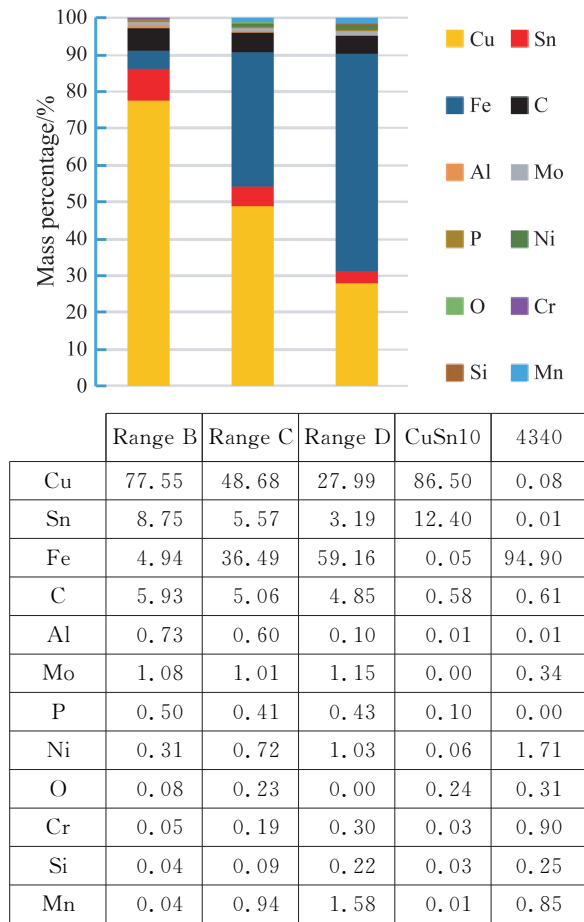


图 9 前侧面梯度区域主要元素的平均质量百分含量(右两列为原始粉末成分)

Fig. 9 Average mass percentages of major elements in each gradient region of front surface (The right two columns are the original powder composition)

由于 CuSn10 材料的主要成分为 Cu 元素及 Sn 元素,4340 材料中的主要成分为 Fe 元素,根据图 9 对 3 个成分梯度区域的主要元素进行分析统计,B 区、C 区、D 区 Cu 元素和 Sn 元素的平均质量百分含量之和分别为 86.3%,54.25%,31.18%,Fe 的平均质量百分含量分别为 4.94%,36.49%,59.16%。由此可见,3 个区域的 CuSn10 成分的含量逐渐减少,4340 成分的含量逐渐增加,实现了材料组成成分的梯度变化。原始设计模型中 B 区、C 区、D 区 CuSn10 的体积百分比分别为 75%,50%,25%,由于 CuSn10 的密度略大于 4340 的密度,实验数据中 CuSn10 的质量百分含量会比体积百分含量偏高,但仍然存在微小误差。这主要是因为 4340 粉末的流动性低于 CuSn10 粉末的流动性,当两个漏斗泄粉时,

供应 CuSn10 粉末的漏斗供粉辊轴上的拾粉槽拾得的粉末量往往比供应 4340 粉末的漏斗供粉辊轴上的拾粉槽拾得的粉末量更为密实;另外,当供应 4340 粉末拾粉槽的粉末下落时,拾粉槽内也容易发生粉末黏附,导致在拾粉槽的边角处有部分粉末残留,无法下泄至铺粉盒内。下一步可对实验设备进行优化设计,减小误差。

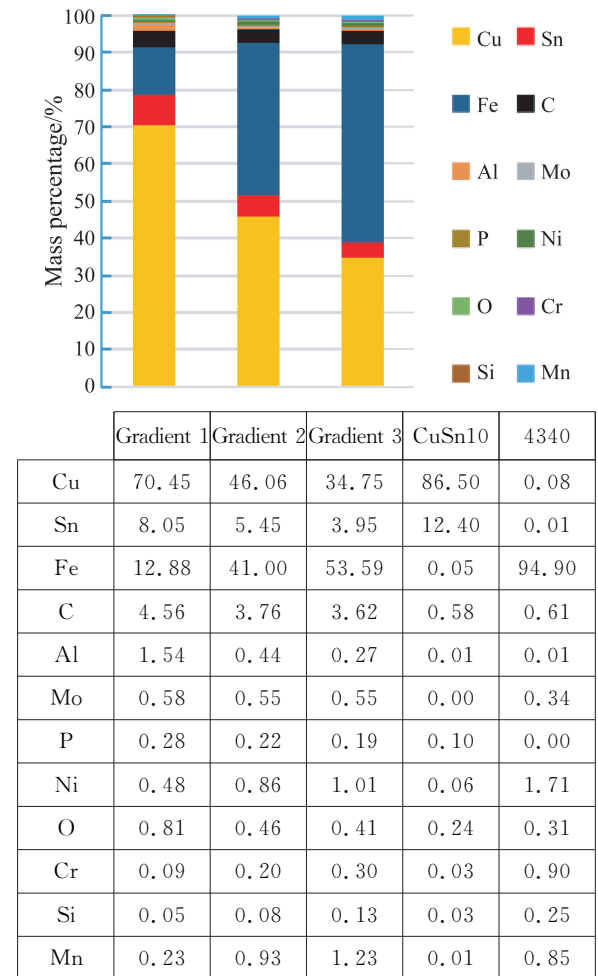


图 10 上表面梯度区域主要元素的平均质量百分含量(右两列为原始粉末成分)

Fig. 10 Average mass percentages of major elements in each gradient region of upper surface (The right two columns are the original powder composition)

为进一步验证同一层不同区域的材料成分变化情况,同样对如图 7 所示的上表面进行磨制抛光,结合设计模型中梯度区域的尺寸数据,同理在 3 个梯度区域分别随机取 3 个 $0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ 的微区进行 EDS 分析,分析结果如图 10 所示。同理,根据图 10 对 3 个成分梯度区域的主要元素进行分析统计,发现其 Cu 元素和 Sn 元素

的平均质量百分含量之和分别为 78.5%, 51.51%, 38.7%, Fe 的平均质量百分含量分别为 12.88%, 41%, 53.59%。实验结果表明,由第 1 梯度到第 3 梯度,4340 合金钢的主要元素 Fe 的百分含量呈梯度增加,CuSn10 的主要元素 Cu 和 Sn 呈梯度减少。

综上所述,本实验成型的梯度材料零件与设计三维模型相符,在零件的不同层之间、同一层不同区域均实现了成分梯度过渡。

4 结 论

本文针对成分梯度材料零件的特点,探讨成分梯度材料零件的三维模型设计及数据处理方法、不同成分梯度材料的实时混配方法,并采用 4340+CuSn10 粉末展开梯度材料零件的成型实

验验证。实验设计的 4340+CuSn10 梯度材料零件,由内向外经过 4340+CuSn10(体积比为 3:1)、4340+CuSn10(体积比为 1:1)、4340+CuSn10(体积比为 1:3) 3 个梯度变化,材料由 4340 转变成 CuSn10。实验获得的梯度材料零件颜色上显示明显的梯度过渡,对其前侧面及上表面进行 EDS 分析,发现中间三个梯度区域 Fe 的平均质量百分比在垂直方向分别为 4.94%, 36.49%, 59.16%, 在水平方向分别为 12.88%, 41%, 53.59%。结果表明:采用零件梯度设计法,结合多组路径数据及一个 txt 材料文件,实现了成分梯度材料零件增材制造数据的获取;通过基于双轴摆动的粉末实时混合均布装置实现了梯度成分粉末的实时混配;按该方法成型的梯度材料零件能在不同层之间、同一层不同区域间同时实现材料组成成分的梯度过渡。

参考文献:

- [1] 李毅. 梯度结构金属材料研究进展 [J]. 中国材料进展, 2016, 35(9): 658-665.
LI Y. Progress in the research of metal materials with gradient structure [J]. *Material Progress in China*, 2016, 35(9): 658-665. (in Chinese)
- [2] CPM S A, VARGHESE B, BABY A. A review on functionally graded materials [J]. *The International Journal of Engineering and Science*, 2014, 3: 90-101.
- [3] YANG H, LAVERNIA E J, SCHOENUNG J M. Novel fabrication of bulk Al with gradient grain size distributions via powder metallurgy [J]. *Philosophical Magazine Letters*, 2015, 95(3): 177-186.
- [4] 席明哲, 张永忠, 涂义, 等. 激光快速成形 316L 不锈钢/镍基合金/Ti6Al4V 梯度材料 [J]. 金属学报, 2008, 44(7): 826-830.
XI M ZH, ZHANG Y ZH, TU Y, *et al.*. 316L Stainless steel/Ni-based alloy/Ti6Al4V gradient materials prepared by laser rapid forming process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(7): 826-830. (in Chinese)
- [5] LI S J, ZHAO S, HOU W T, *et al.*. Functionally graded Ti-6Al-4V meshes with high strength and energy absorption [J]. *Advanced Engineering Materials*. 2016, 18(1): 34-38.
- [6] QIAN T T, LIU D, TIAN X J, *et al.*. Microstructure of TA2/TA15 graded structural material by laser additive manufacturing process [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(9): 2729-2736.
- [7] LOH G H, PEI E, HARRISON D, *et al.*. An overview of functionally graded additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 34-44.
- [8] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
YANG Y Q, CHEN J, SONG CH H, *et al.*. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401. (in Chinese)
- [9] GOKULDOSS P K, VIJAY KESHAV KOLLA S S, ECKERT J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines [J]. *Materials*, 2017, 10(6): 672.
- [10] LEWANDOWSKI J J, SEIFI M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46(11): 151-186.
- [11] CHEN J, YANG Y Q, SONG C H, *et al.*. Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L /CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting [J]. *Materials*

- Science and Engineering A*, 2019, 752:75-85.
- [12] ZHANG M K, YANG Y Q, WANG D, *et al.*. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti₆Al₄V gradient structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 736: 288-297.
- [13] FOUISOVÁ M, VOJTĚCH D, KUBÁSEK J, *et al.*. Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 69: 368-376.
- [14] CHOY S Y, SUN C N, LEONG K F, *et al.*. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 112-120.
- [15] HAN C J, LI Y, WANG Q, *et al.*. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 119-127.
- [16] DEMIR A G, PREVITALI B. Multi-material selective laser melting of Fe/Al-12Si components [J]. *Manufacturing Letters*, 2017, 11:8-11.
- [17] WEI C, SUN Z, CHEN Q, *et al.*. Additive manufacturing of horizontal and 3D functionally graded 316L/Cu₁₀Sn components via multiple material selective laser melting [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of the Asme*, 2019, 141(8): 14.
- [18] 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生, 等. 激光选区熔化自由制造异质材料零件 [J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(3): 517-526.
- WU W H, YANG Y Q, MAO G SH, *et al.*. Study on technology of free manufacturing of heterogeneous materials part by selective laser melting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 517-526. (in Chinese)
- [19] WEI C, LI L, ZHANG X J, *et al.*. 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting [J]. *CIRP Annals*, 2018, 67: 245-248.
- [20] 吴伟辉, 刘锋. 一种多材料零件 3D 打印的粉末供给、铺展方法及装置: 中国, ZL2016101729906 [P]. 2016-06-01.
- WU W H, LIU F. A method and device of supplying and spreading powder for 3D printing of multi-material parts: CN, ZL2016101729906 [P]. 2016-06-01. (in Chinese)
- [21] 吴伟辉, 杨永强, 王迪, 等. 一种用于梯度材料零件 3D 打印的粉末混合均布方法及装置: 中国, ZL108213425 B [P]. 2019-02-15.
- WU W H, YANG Y Q, WANG D, *et al.*. A powder mixing and uniform distribution method and device for 3D printing of gradient material parts: CN, ZL108213425 B [P]. 2019-02-15. (in Chinese)
- [22] 陈晔. 梯度功能材料零件 CAD 建模和熔积路径规划研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- CHEN Y. *Research on Functional Gradient Material Parts CAD Modeling and Deposition Path Planning* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- [23] SIU Y K, TAN S T. 'Source-based' heterogeneous solid modeling [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(1): 41-55.

作者简介:



刘 锋(1986—),女,湖南郴州人,硕士,讲师,2011年于中南大学获得硕士学位,主要从事材料激光合成及成型方面的研究。E-mail: 785896674@qq.com

通讯作者:



吴伟辉(1979—),男,广东化州人,教授,博士,博士后(已出站),2007年于华南理工大学获得博士学位,主要从事材料激光合成及成型方面的研究。E-mail: wuweihui068@163.com