

文章编号: 1001-3806(2022)04-0492-07

实时混粉梯度材料 SLM 成型系统构建与实验

吴伟辉¹, 马耿雄¹, 王迪², 马旭元¹, 刘林青²

(1. 韶关学院 智能工程学院, 韶关 512005; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 为了在成型过程中,方便地在零件上按需获得梯度材料成分,采用了集成同步送粉碰撞混合、锥形聚集混合、气流混合等多重混粉动作的实时混粉方法,研制成梯度材料激光选区熔化增材制造系统,并展开了梯度材料成型实验验证,结合试样照片、显微图像及能谱仪检测,分析了成型效果。结果表明,系统可自由按需水平及垂直方向添加成分渐变材料,可方便获得具有复杂外形结构的梯度材料零件;成型件梯度材料区域微区成分分析显示,各微区内元素平均质量分数离散程度小,成型过程中每层平均混粉时间 10s~15s 时,各微区主要元素变异系数不超 0.59,达到了较好的混合均匀性。该研究为自由制造梯度材料零件提供了新途径。

关键词: 激光技术;梯度材料;激光选区熔化;金属零件;增材制造

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.04.009

System construction and experiment for SLM of gradient materials based on real-time powder mixing methods

WU Weihui¹, MA Gengxiong¹, WANG Di², MA Xuyuan¹, LIU Linqing²

(1. School of Intelligent Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China; 2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to obtain the gradient material composition of parts easily in the part forming process, a selective laser melting additive manufacturing system for gradient materials was developed by using the real-time powder mixing method which integrates multiple powder mixing actions such as impact mixing after synchronous discharge powders, converging mixing through a conical cavity, and air flow mixing. With this system, the experimental verification of gradient material forming was carried out, and the forming effect was analyzed combined with the sample photos, microscopic images, and energy spectrometer detection. The result shows that the gradient materials can be freely added in the horizontal and vertical directions to produce gradient material parts with complex shape and structure in the system. The micro areas composition analysis of the gradient material zones of the gradient material part shows that the dispersion degree of the average mass content of elements in each micro zone is small. The variability coefficient of the main elements in each micro zone is not more than 0.59 when the average powder mixing time of each layer is 10s~15s during selective laser melting process, achieving good mixing uniformity. This research provides a new way for free manufacturing of gradient material parts.

Key words: laser technique; gradient materials; selective laser melting; metal part; additive manufacturing

引言

梯度材料是一种特殊的异质材料,是由一种成分、组织或相(或组元)逐渐向另一成分、组织或相(或组

元)过渡的材料^[1-2]。其通过材料成分或结构的梯度变化,获得更好的结合强度及材料性能的渐变过渡^[3-4],因此,在航天航空、生物医学、核工业等领域具有良好应用前景^[4-5]。

增材制造技术通过逐层添加材料制造零件^[6]。激光选区熔化(selective laser melting, SLM)增材制造工艺,具有成型精度高、能成型更复杂结构的优点,特别适合于近终端金属零件的制造^[7]。

但是,由于 SLM 工艺采用粉末床类增材制造原理^[8-9],即成型过程中,每打印一层,总是先供应一个厚厚的粉末,再通过选择性熔化粉层实现成型,如此逐层

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52073105);广东省自然科学基金资助项目(2018A030313243);广东省科技创新战略专项资金(攀登计划)资助项目(pdjh2021b0450)

作者简介:吴伟辉(1979-),男,博士,教授,现主要从事激光增材制造研究。

E-mail:wuweihui_068@163.com

收稿日期:2021-06-17;收到修改稿日期:2021-08-25

堆积成型,最终获得增材制造零件。因此,受制于其铺粉原理,难以在成型过程中按需自由布置所需的不同种类材料,获得异质材料零件^[10]。为在 SLM 成型过程中获得梯度材料,需解决两个问题,即如何根据 3 维模型材料的空间位置按需自由布置异质材料,以及如何提供不同配比的梯度材料成分粉末。

在 SLM 成型过程铺入异质材料的方法研究方面,当前已发展的主要工艺方法包括:(1)在铺粉装置上沿铺粉刮板平行方向布置多个供粉漏斗,并排供粉,获得水平异质材料零件;或在不同层间采用不同漏斗供粉,获得垂直异质材料零件,这两种异质材料供给方式,不涉及移除每层成型后多余的异质粉末材料,仅能制作材料界面为简单直线形的梯度材料零件,或层与层间具有梯度成分的零件,还不能实现在零件任意部位自由按需布置梯度材料^[11-13];(2)每成型完一个材料区域,都采用真空吸除成型缸内所有粉末,然后铺入另一种粉末,例如 MA 等人^[14]提出了成型一个材料区域后采用真空吸附回收成型缸内粉末,再送入另一种粉末,接着成型同层内另一材料区域的方法。理论上可在 SLM 成型过程中,在同层内实现异质粉末材料按需预置,但当前的研究仅涉及数值仿真及系统构建,尚未展开具体的工艺实验研究^[15];(3)通过真空吸管吸除上一成型层内多余粉末,再通过超声波送粉喷嘴送入另一种粉末。这是曼彻斯特大学的学者^[16-17]研制出的一种结合粉床铺设、真空吸管选区除粉和超声波喷嘴按点送粉的 SLM 系统,可实现异质材料在不同层间或同层内不同区域的自由布置,但是,按点粉末输送是通过超声波喷嘴实现的,因此,按点粉末输送出的粉末因未经刮板或辊轴挤压布置得较为松散,在激光熔凝过程中易出现裂纹和孔隙,且超声波喷嘴送粉技术难度大、铺粉效率亦不高;(4)利用多漏斗供粉+柔性清扫回收粉末原理实现 SLM 成型过程的异质材料粉末铺设,该方法在切换不同材料前,先采用柔性刮板,将一层左右厚度的粉末扫除,再铺入另一种粉末;这种方案具有简单易实现的优点,作者的团队^[18]据此方案研制了异质材料零件 SLM 增材制造系统,并成功实现了异质材料零件 SLM 增材制造。

不同配比的梯度材料成分粉末可预先混合好,再在成型前装入 SLM 载粉装置(梯度材料 SLM 成型工艺一般采用漏斗)备用,这也是目前多数梯度材料 SLM 成型工艺采用的梯度材料成分粉末供给方案^[11-13,19],具有混合均匀性好、节省制造时间的特点。但因为梯度材料零件模型设计好后,在成型前,需要耗

费较长时间准备好多种相应配比的预混合粉末,所以想要随意变更零件梯度材料成分设计十分困难;同时,为获得材料成分渐变过渡效果,通常需要 4 个漏斗以上,并且梯度材料成分渐变过渡越缓慢,需要按比例预混合好的粉末种类数及相应漏斗的数量就会越多,导致设备结构复杂及建设成本增加;此外,如果加上粉末预混合所需的时间,整个零件的成型效率亦不高。

另一种供给梯度材料成分粉末的方式是在 SLM 成型过程中实时混合粉末,仅需两个装载原始粉末材料的漏斗,通过实时混粉装置,即可按需混合任意比例梯度成分粉末,大大降低了设备结构复杂性及建设成本。已有少数学者对此展开了研究:DEMIR 等人^[20]在 SLM 成型过程中,用两个漏斗,结合双漏斗同步送粉碰撞混合的方式,实现了梯度材料实时混合,成型了 Fe/Al-12Si 梯度材料零件,证明 SLM 技术增材制造梯度材料零件是可行的,但仅能制作层与层间具有梯度成分的零件,还不能实现层内按需布置异质材料,同时,其研究也没对混合的效果展开分析;LIU 等人^[21]给出了一种成分梯度材料零件激光选区熔化成型过程的粉末材料供给方法,可以实时混合粉末,理论上可获得任意配比的梯度材料成分,但是,由于该方法采用两个摆动电机依次摆动实现实时混合粉末,存在混合时间长、难得到均匀混合效果的缺点。

综上所述,本文中拟在已有异质材料零件激光选区熔化增材制造系统^[18]基础上,通过增加多重实时混粉装置,包括同步送粉碰撞混合、锥形聚集混合、气流混合等多重混合方式,以实现 SLM 成型过程中,快速实时混合获得梯度材料成分粉末及成型出梯度材料零件。通过实验验证所研发的系统,并对实验样品各区域的材料混合效果进行分析。

1 成型系统的构建

多重实时混粉装置及在 SLM 成型室上的集成原理如图 1a 所示,其实时混粉工作原理可描述如下。

(1)设置 A、B 两个供粉漏斗,漏斗供粉采用带单槽的转轴回转拾取粉末,每回转一次,拾取一槽的粉末。在粉末自两漏斗流入铺粉盒过程中,可执行同步送粉碰撞混合、锥形聚集混合、气流混合等几个混合步骤。

(2)同步送粉碰撞混合:两条送粉管在垂直方向排成 V 字型,在两管相交处有一个 V 形的缺口,即 V 形碰撞混粉口。在两漏斗内粉末同步向 V 形碰撞混粉口送出粉末时,两束粉末流相互碰撞混合。

(3)锥形聚集混合:同步送粉碰撞混合后的粉末

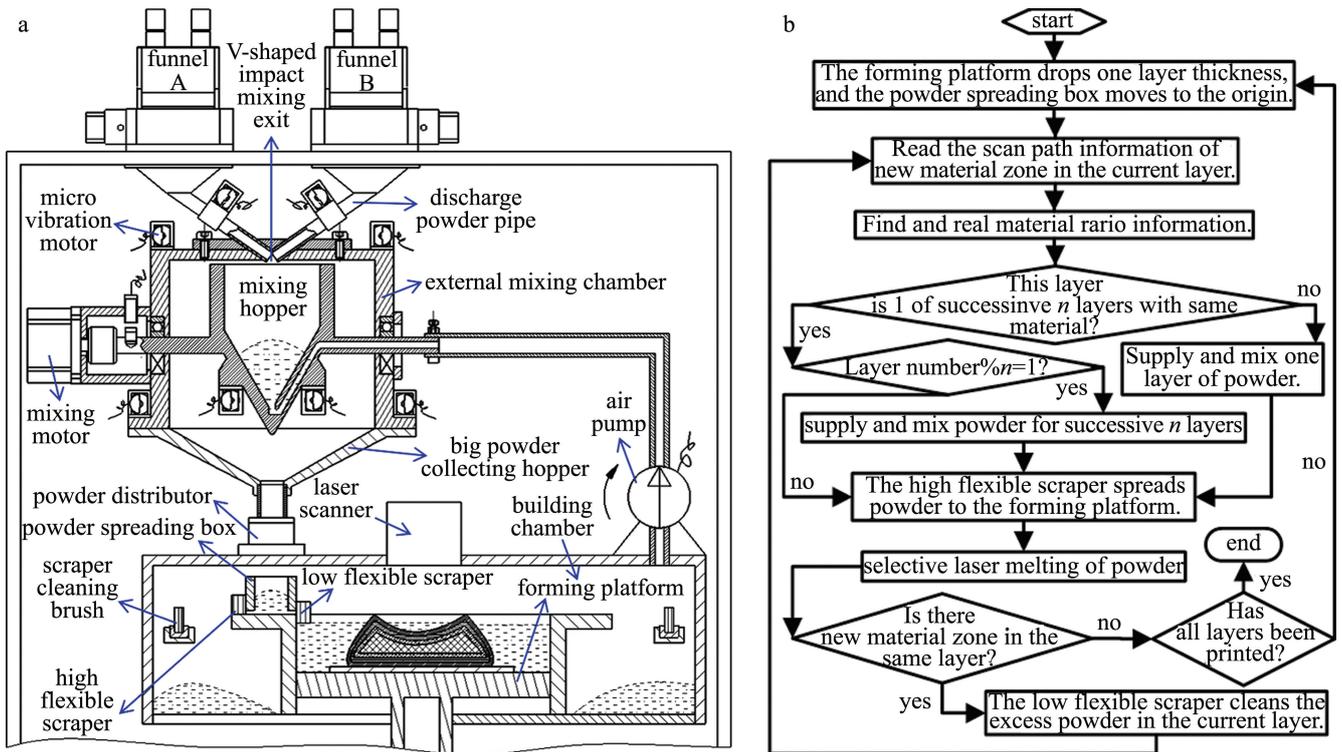


Fig. 1 System structure and workflow

a—system structure diagram b—forming flow chart of gradient material parts

自流到下部的锥形混粉斗中,依靠圆锥外形,实现粉末的锥形聚集混合。

(4)气流-锥形聚集循环混合:锥形混粉斗的两根轴安装在外混粉腔内,一根轴内部空心,设置有气流通道,轴末端与气泵出口相通。当粉末落入到锥形混粉斗底部后,气泵启动,气流从锥形混粉斗底部向上甩起斗底部的粉末,斗底部粉末颗粒向上运动,在空中相互碰撞实现混合。被抛起的粉末到达一定高度后在重力作用下沿气流冲击力较弱的斗内壁面等处下行,补充刚才粉末冲走形成的空隙,接着再进一步被抛射到斗上方,如此循环持续一小段时间,充分将粉末混合。在被抛起的粉末下落过程中,同样亦受锥形混粉斗横截面积逐步缩小的影响,下落过程逐步聚集在一起,因而粉末颗粒又进行聚集混合,如此反复,实现气流-锥形聚集循环混合。

(5)上述V形碰撞混粉口所在的两根管下端插入到一个外混粉腔内,外混粉腔用于保证粉末碰撞混合、锥形聚集混合、气流混合3个粉末混合过程中的气密性,防止成型室内的保护气体外溢。

(6)锥形混粉斗的另一根轴通过联轴器与外混粉腔外的混粉电机相连,通过混粉电机实现锥形混粉斗的翻转及复位。

(7)外混粉腔下部是一个大集粉斗,用于收集锥

形混粉斗翻转后下落的粉末,大集粉斗下部与粉末均布器相连接,进行粉末均布处理。粉末均布由粉末均布器^[13]实现,可将粉末束整理成与铺粉刮板相同的宽度,以便铺粉刮板能将粉末在成型平台上铺满一层。

(8)混粉装置多处装有微型振动电机,在混粉斗翻转朝下时,微型振动电机启动,将混粉装置内残余粉末清除干净。

激光选区熔化增材制造多材料零件的难点在于,在同一层内,如何自由地布置异质粉末材料,其核心问题是:如何在铺设一层粉末,选择性熔化粉末成型后,将同层内多余的粉末清除掉,再铺入另一种粉末。本系统采用柔性清扫回收余粉原理解决此问题,如图1a所示,其中柔性清扫回收余粉装置主要包括铺粉盒、高位柔性刮板、低位柔性刮板、铺粉平台、2个安装在成型室内壁上的柔性刮板清洁刷。两柔性刮板采用弹性丝材制作。柔性清扫回收余粉原理可描述为:激光选区熔化金属粉末成型后,再如同采用毛刷将粉尘越过平面上凸起的小阶梯清扫走一样,低位柔性刮板将同一层内多余的粉末绕过已成型的实体清扫回收^[22]。

梯度材料零件模型可由各分材料模型装配而成,其增材制造数据,在本系统中由形状数据及材料数据组成,分别通过惠普公司图形语言(Hewlett-Packard graphics language, HPGL)文件组成的扫描路径文件、

文本格式(text, TXT)的材料文件表达,数据处理过程如下^[21]:(1)使各分材料模型的位置与其在梯度材料零件模型中的位置相同;(2)每个分材料模型生成一组扫描路径,一组扫描路径可由 k 个 HPGL 文件组成(k 为梯度材料零件层数),每个 HPGL 文件存放一个分材料模型的一个层扫描路径(如是空层,HPGL 文件的数据亦为空);(3)建立一个文本格式文件,文件中存放着多行材料数据,一组扫描路径对应一行材料数据,例如第 2 行文字为“Mat02 1:3”,表示 02 分材料模型的材料成分由 1 槽容积的材料 A 和 3 槽容积的材料 B 混合所得;(4)在成型某一层时,SLM 增材制造控制系统将逐个搜索该层的新材料区域扫描路径,即判断新的分材料模型在该层的 HPGL 文件的数据是否非空;如果非空,则根据 TXT 文件相应行的材料数据,开始供给、混合及铺设粉末;接着调用该 HPGL 文件数据,控制激光选择性熔化材料成型。

整个梯度材料零件的增材制造过程如图 1b 所示。特别地,在采用单一材料成型时(即 A 和 B 的材料比中有一项数值为 0),混粉时间为 $0s$ (即不需混粉),只执行供粉动作。

按上述原理研发的实时混粉梯度材料激光选区熔化成型系统如图 2 所示。该系统集成了 500W 连续光纤激光器、多重实时混粉装置、柔性清扫回收装置、双供粉漏斗等。系统最大成型尺寸为 $80mm \times 80mm \times 80mm$,铺粉厚度可设为 $10\mu m \sim 100\mu m$ 。



Fig. 2 Photo of the gradient material SLM molding system with a device of real-time mixing powders in various ways

2 实验及结果分析

2.1 实验方法

采用自主研发的梯度材料零件 SLM 成型系统(见图 2)为成型设备,展开梯度材料成型实验,验证系统的性能。实验中采用尺寸为 $50mm \times 50mm \times 5mm$ 的

304 不锈钢板作为基板。采用经磁选法反复分离提纯的 4340 钢粉末以及 $CuSn_{10}$ 青铜粉末作为原始材料,其中 4340 钢粉末中 Fe, Cu, Sn, Ni, Si 4 种元素含量(质量分数 w)占比分别为 0.9490, 0.0008, 0.0001, 0.0171, 0.0025, $CuSn_{10}$ 青铜粉末中 Fe, Cu, Sn, Ni, Si 4 种元素含量(质量分数 w)占比分别为 0.0005, 0.8650, 0.1240, 0.0006, 0.0003^[18]。两种原始材料分别装入两个漏斗中,粉末粒径均为 $15\mu m \sim 53\mu m$,球形,4340 粉末呈银灰色, $CuSn_{10}$ 粉末呈金黄色。实验成型过程中,保护气体采用体积分数为 0.9998 的氩气。

实验后,对照零件照片,并结合显微图像及 X 射线能谱成分分析(设备型号:蔡司 EVO18,牛津 OXFORD Inca250X-Max20mm2 电制冷能谱仪),获得梯度材料零件成型的形貌及成分信息。

2.2 宏观形貌分析

先成型了两个具有复杂外形结构的梯度材料零件,如图 3 所示。可见具有复杂外形结构的梯度材料零件也可以打印出来。由图 3a 可知,所成型的零件,

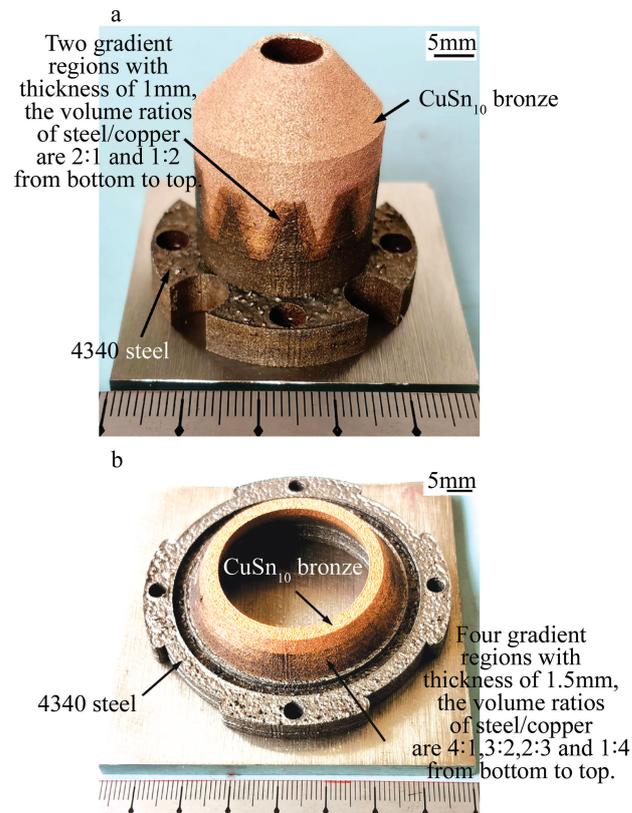


Fig. 3 Two verification parts of gradient material (main molding parameters: laser power of 170W; powder cleaning times of 5 times; scanning distance of 0.08mm; layer thickness of $30\mu m$; scanning speed of $250mm/s \sim 450mm/s$)

a—gradient material part of steel copper nozzle b—gradient material part of steel copper flange

在水平方向、垂直方向的材料颜色都可呈梯度变化,显示系统可按比例供给及混合两种原始粉末,并按零件模型各部分材料信息布置材料及成型,最终获得梯度材料零件。在图 3b 中,是一个在垂直方向具有 4 个 1.5mm 厚的梯度材料区域的法兰零件,自下而上,各梯度材料区域内的 4340 钢/CuSn₁₀ 青铜材料的预设体积比分别为 4:1,3:2,2:3 和 1:4,由图 3b 可知,其 4 个梯度区域内的颜色变化呈较好的缓慢渐变效果。

2.3 微观成型效果分析

为进一步考察本梯度材料零件 SLM 成型系统的成型效果,设计了如图 4a 所示的梯度材料零件 3 维模型。零件为 10mm×10mm×4mm 的方块,在垂直方向,依次设置有 4340 钢(厚 1mm)、垂直梯度 1(厚 1mm)、垂直梯度 2(厚 1mm)、顶部材料块(厚 1mm)等 4 个层次的材料过渡;自零件顶面向下 1mm 范围的厚度内,是顶部材料块,顶部材料块在水平方向上,设置有 4340 钢(长 4mm×宽 4mm)、水平梯度 1(长 4mm×宽 1mm)、水平梯度 2(长 4mm×宽 1mm)、CuSn₁₀ 青铜(长 4mm×宽 4mm)4 个层次的材料过渡。对水平梯度 1 的成型材料,采用 4340 钢粉与 CuSn₁₀ 青铜粉按体积比为 1:1 混合而成;对垂直梯度 1 的成型材料,采用 4340 钢粉与 CuSn₁₀ 青铜粉按体积比为 3:2 混合而成;对垂直梯度 2 或水平梯度 2 的材料,采用 4340 钢粉与 CuSn₁₀

青铜粉按体积比为 1:3 混合而成。因此,该模型可考察成型系统在水平方向以及垂直方向的成型效果。

图 4a 所示模型每种颜色的块体都代表一种材料成分,可设计为一个单独的零件模型,总的梯度材料零件 3 维模型通过几种颜色的块体零件模型装配而成。按前面所述,由各个颜色块体零件模型生成扫描路径数据 HPGL 格式文件,并创建材料信息 TXT 格式文件后,即可获得整个梯度材料零件的增材数据^[18]。

实验开始前,在梯度材料零件 SLM 成型系统中设置的相关实验参数如表 1 所示。

Table 1 SLM experimental process parameters for producing the gradient material part

forming parameter	setting value
laser power	140W
air mixing time	10s (for single layer) or 15n s (for continuous n layers)
gas flow	10L/min
times of powder cleaning	7
layer thickness	30μm
laser scanning space	0.08mm
scanning speed in 4340 material region	650mm/s
scanning speed of gradient 1 region	550mm/s
scanning speed of gradient 2 region	450mm/s
scanning speed in CuSn ₁₀ bronze material region	400mm/s

成型件照片如图 4b 所示,其材料分布基本与图 4a 的模型图相一致:底部为深色的 4340 钢,然后过渡到垂直梯度 1、垂直梯度 2(颜色逐渐变淡);在顶部,分布着处于同一水平面的 4340 钢、水平梯度 1、水平梯度 2 和 CuSn₁₀ 青铜几种材料区域,颜色同样逐渐变淡。

按图 4b 所示的剖切位置示意点划线,对成型零件进行了剖切,制成金相试样并通过扫描电镜获得了图 5 所示的一个带清晰水平梯度及垂直梯度形貌的扫描电镜照片。由该照片的颜色不同可知,在水平方向及垂直方向,材料的成分的确依次按梯度分布。

为考察粉末混合的均匀性,在图 5 剖面的水平梯度 1 区域内部(不靠近两种材料区域边界)、垂直梯度 1 区域内部(不靠近两种材料区域边界),各随机选取 4 个不重叠的 160μm×160μm 的微细区域,对每个区域内的主要元素平均质量分数作能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)分析,以考察粉末混合效果,所得的数据如表 2 及表 3 所示。元素分布的离散程度可用变异系数体现^[23-24],由表 2、表 3 可知,采用 10s~15s 的单层平均混合时间混合后,8 个微区内的主要元

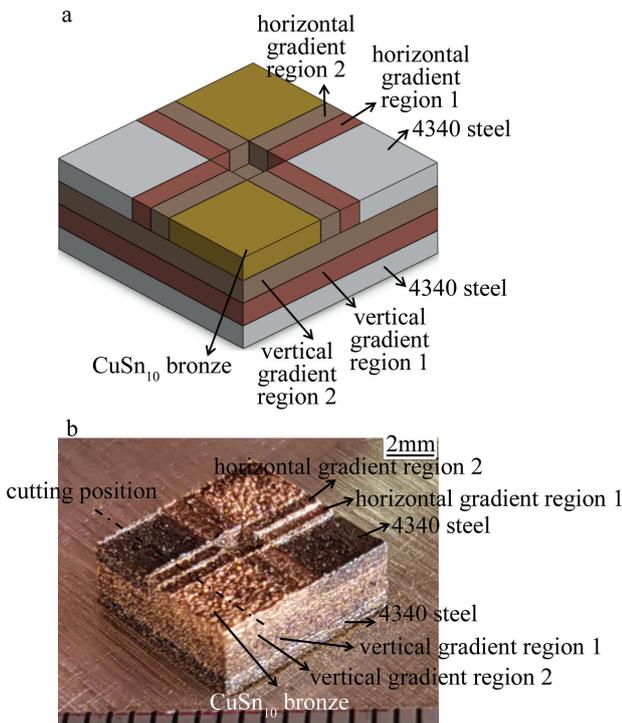


Fig. 4 3-D model and sample photo of a gradient material part
a—3-D mode b—sample photo

Table 2 Average mass fraction of main elements in selected micro zones in horizontal gradient region 1 of the Fig. 5

element	element content of microzone 1 (mass fraction w)	element content of microzone 2 (mass fraction w)	element content of microzone 3 (mass fraction w)	element content of microzone 4 (mass fraction w)	average value (mass fraction w)	variability coefficient
Fe	0.5014	0.5073	0.4802	0.5304	0.5048	0.04
Cu	0.4540	0.4446	0.4721	0.4253	0.4490	0.04
Sn	0.0299	0.0309	0.0310	0.0277	0.0299	0.04
Ni	0.0097	0.0103	0.0097	0.0108	0.0101	0.05
Si	0.0050	0.0069	0.0070	0.0058	0.0062	0.13

Table 3 Average massfraction of main elements in selected micro zones in vertical gradient region 1 of the Fig. 5

element	element content of microzone 1 (mass fraction w)	element content of microzone 2 (mass fraction w)	element content of microzone 3 (mass fraction w)	element content of microzone 4 (mass fraction w)	average value (mass fraction w)	variability coefficient
Fe	0.6347	0.6102	0.5945	0.6100	0.6123	0.02
Cu	0.3151	0.3276	0.3469	0.3349	0.3311	0.03
Sn	0.0387	0.0417	0.0409	0.0390	0.0401	0.03
Ni	0.0116	0.0150	0.0119	0.0116	0.0125	0.11
Si	0	0.0055	0.0059	0.0045	0.0040	0.59

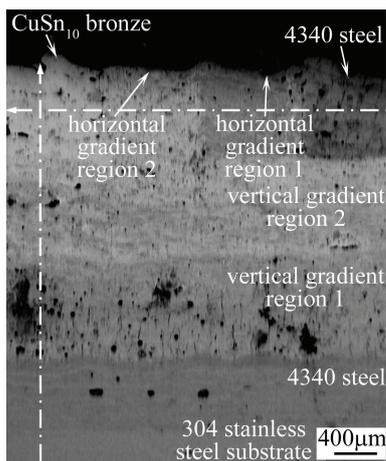


Fig. 5 Aseccion micrograph of the part and position and direction of EDS line scanning (horizontal dotted line; horizontal line scanning; vertical dotted line; vertical line scanning; dotted line: color boundary)

素变异系数最大不超过 0.59,因此,各微区内的粉末元素平均质量分数离散程度小,达到较好的混合均匀性。

3 结论

本文中研发了实时混粉梯度材料 SLM 成型系统,并采用该系统展开了梯度材料成型实验验证,对实验结果进行了详细分析。

(1)系统可方便自由地按需在水平及垂直方向添加成分渐变材料,获得具有复杂外形结构的梯度材料零件。

(2)在 SLM 成型过程中,实时混粉装置成功执行了同步送粉碰撞混合、锥形聚集混合、气流混合等多重

混粉动作,可方便获得成分渐变过渡缓慢的梯度材料。

(3)对成型零件不同方向的两个梯度材料区域的微区 EDS 成分分析表明:采用 10s~15s 的单层平均混合时间混合后,各微区内的主要元素变异系数最大不超过 0.59。因此,各微区内的粉末元素平均质量分数离散程度小,达到较好的混合均匀性,基本实现快速实时混粉效果。

参 考 文 献

- [1] LI Y. Research progress on gradient metallic materials [J]. Materials China, 2016,35(9): 658-665(in Chinese).
- [2] XIA X G, DUAN G L. Advances and prospects of additive manufacturing technology of functionally graded material [J/OL]. (2021-07-30) [2021-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20210730.1014.004.html>(in Chinese).
- [3] LIU Zh S, XUE D Q, HAN Sh H, et al. Microstructure and mechanical properties of double metal arc additive forming part based on CMT welding[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(17): 184-186(in Chinese).
- [4] ONUIKE B, HEER B, BANDYOPADHYAY A. Additive manufacturing of Inconel 718—Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENS™) [J]. Additive Manufacturing, 2018,21: 133-140.
- [5] WANG P, LAO C S, CHEN Z W, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si and Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si bimetal fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020,36:18-26.
- [6] GUO Y F. Experimental research on multilayer structure of high nitrogen steel-316L made by robot CMT additive manufacturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018:9-15(in Chinese).
- [7] LIU M N, WEI K W, DENG J F, et al. Study on selective laser melting rapid forming technology of aluminum liquid cold plate [J/OL]. (2021-01-06) [2021-07-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/>

31. 1690. TN. 20210105. 1351. 013. html(in Chinese).
- [8] ZHANG Ch Y, CHEN X Sh, SUN X T. The development situation of metal 3-D printing manufacturing technology[J]. Laser Technology, 2020,44(3):393-398(in Chinese).
- [9] CHEN J T, GUO Z Y, WANG Ch Y, *et al.* Research status of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting for medical device applications[J]. Laser Technology, 2020,44(3):288-298(in Chinese).
- [10] WANG D, DENG G W, YANG Y Q, *et al.* Research progress in additive manufacturing of metal heterogeneous materials [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021,57(1):186-198(in Chinese).
- [11] CHIVEL Y. New approach to multimaterial processing in selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2016,83:891-898.
- [12] CHEN J, YANG Y, SONG C, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L/CuSn₁₀ multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A752: 75-85.
- [13] LIU Z H, ZHANG D Q, SING S L, *et al.* Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy[J]. Materials Characterization, 2014, 94: 116-125.
- [14] MA Sh Y, SHI X Zh, TAN T H. Powder spreading and powder recovery device for selective laser melting of heterogeneous materials: China, 2014102203104[P]. 2014-08-13(in Chinese).
- [15] TAN T H. Molding process simulation of heterogeneous material molding for selective laser melting and its equipment structure design [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015:17-75(in Chinese).
- [16] WEI C, LI L, ZHANG X, *et al.* 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting[J]. Cirp Annals- Manufacturing Technology, 2018,67(1):245-248.
- [17] WEI C, GU H, SUN Z, *et al.* Ultrasonic material dispensing-based selective laser melting for 3-D printing of metallic components and the effect of powder compression [J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100818.
- [18] WU W H, YANG Y Q, MAO G Sh, *et al.* Selective laser melting free fabrication of heterogeneous material parts [J]. Optics and Precision Engineering, 2019,27(3):517-526(in Chinese).
- [19] WEI C, SUN Z, CHEN Q, *et al.* Additive manufacturing of horizontal and 3-D functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(8):081014.
- [20] DEMIR A G, PREVITALI B. Multi-material selective laser melting of Fe/Al-12Si components[J]. Manufacturing Letters, 2017, 11:8-11.
- [21] LIU F, WU W H, YANG Y Q, *et al.* Manufacture of composition gradient material part by selective laser melting[J]. Optics and Precision Engineering, 2020,28(7):1510-1518(in Chinese).
- [22] WU W H, YANG Y Q, MAO G Sh, *et al.* Design and implementation of selective laser melting system for producing heterogeneous material parts [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(10):32-37(in Chinese).
- [23] FENG R, ZHAI D Ch, YUAN Y Sh. Research on air and surface water quality evaluation method incorporated with the coefficient of variation [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021,11(4):814-822(in Chinese).
- [24] HUANG Ch X, WU X Ch, CHEN Q H. Study of mixing effect of solid powder in horizontal plant-size twin-shaft paddle mixer[J]. Food & Machinery, 2017,33(3):80-83(in Chinese).