

基于粉体熔化的选区激光熔化成型方向误差分析

张博, 李涤尘, 曹毅, 杨东, 王成

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 为降低 TC4 钛合金选区激光熔化(SLM)的成型方向(Z 向)误差,考察了 SLM 过程中粉体熔化导致的 Z 向误差产生和变化的过程。建立了 Z 向误差累积和补偿数学模型,并提出了对应的补偿方法。通过成型实验对模型的有效性进行了验证。实验结果表明,这些模型能够有效地描述 TC4 钛合金 SLM 的 Z 向误差累积和变化的规律;依照模型提出的补偿方法能够大幅减小 Z 向误差。相比于传统的 Z 向误差分析方法,新模型更加准确,为未来金属材料 SLM 成型的误差控制和最优层厚的快速选择提供了参考依据。

关键词 激光技术; Z 向误差; 选区激光熔化; 数学模型; TC4 钛合金

中图分类号 TB31;TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011406

Error Analysis in Formation Direction of Selective Laser Melting Based on Powder Melting

Zhang Bo, Li Dichen, Cao Yi, Yang Dong, Wang Cheng

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract In order to reduce the errors in the formation direction (Z axis) during the process of selective laser melting (SLM) of TC4 titanium alloy, the generation and variation of Z axis errors caused by powder melting during the SLM process are investigated. The mathematical models describing the accumulation and compensation of Z axis errors are established, and one corresponding compensation method is proposed. Formation experiments are conducted to verify the effectiveness of these mathematical models. The experimental results indicate that these models can effectively describe the accumulation and changing trends of Z axis errors. With the proposed compensation method from these models, the Z axis error can be greatly reduced. Compared with the traditional Z axis error analysis method, the new model is more accurate, and it provides a reference for the error control and rapid selection of optimal layer thickness in SLM of metal materials in future.

Key words laser technique; Z axis error; selective laser melting; mathematical model; TC4 titanium alloy

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

选区激光熔化(SLM)是一种成型精度较高的增材制造技术^[1-4],其加工过程包含金属粉末的熔化、熔滴的飞溅和熔池的流动等^[5-6],这些因素对成型精度有极大影响。如何进一步提升 SLM 成型零件的精度是亟待解决的问题之一,国内外学者为此进行了广泛的研究。Strano 等^[7]综合研究了台阶效应和粉末黏附对悬垂结构成型精度的影响。朱刚贤等^[8]研究了激光直接成型金属薄壁零件成型方向(Z 向)单行程参数对成型质量的影响。杨雄文等^[9]研究了 SLM 成型的典型几何尺寸精度并通过实验对零件设计规则进行了讨论。王迪等^[10]基于相对密度对激光成型 316L 不锈钢 Z 向误差进行了初步分析。

收稿日期: 2016-09-07; **收到修改稿日期:** 2016-09-28; **网络出版日期:** 2016-12-28

基金项目: 陕西省科技统筹工程计划项目(2014KTZB01-02-02)

作者简介: 张博(1991—),男,硕士研究生,主要从事选区激光熔化方面的研究。E-mail: 13808229317@163.com

导师简介: 李涤尘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事增材制造技术方面的研究。

E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

目前对 SLM 的 Z 向误差的分析多借助相对密度法,该方法虽然能够指出误差产生的主要原因,但未考虑飞溅、蒸发等影响质量守恒的因素,对误差累积过程描述不够准确,且该方法的改善措施多集中于优化选材和工艺参数,缺乏基于误差累积过程的补偿方法。本文从 TC4 钛合金 SLM 成型入手,考虑加工过程中的材料损耗,基于相对层厚建立了 Z 向误差累积和补偿数学模型,并根据模型提出了新的 Z 向误差补偿方法;用自主研发的 SLM 成型平台,验证了模型的合理性和补偿的有效性,为提升 SLM 成型精度提供了理论参考。

2 模型的建立

2.1 Z 向误差累积模型的建立

在 SLM 成型过程中,金属粉末充分熔化是保证成型质量的关键^[11-12]。金属粉末熔化后会流动铺展,使得粉末颗粒间的空隙被填充,产生 Z 方向上的尺寸收缩,使得每一层实际成型厚度小于铺粉厚度,逐层累积后表现为 Z 向误差。粉末熔化收缩示意图如图 1 所示。为了建立 Z 向误差累积数学模型,引入收缩比和收缩误差的概念:设第 n 层成型层的实际铺粉厚度为 H_n ,粉末熔化后该层实际成型厚度为 h_n ,理论分层厚度为 H ,则收缩比 $\alpha = h_n/H_n$,粉末收缩导致的收缩误差 $\lambda_n = H - h_n$ 。

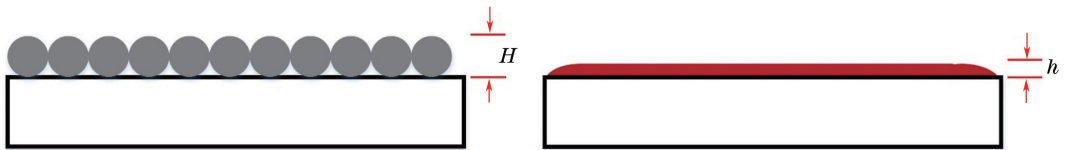


图 1 粉末熔化收缩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contraction of metal powder caused by melting

在此基础上,推导第 n 层收缩误差的表达式。第一层收缩误差为 $\lambda_1 = H_1 - h_1 = (1 - \alpha)H_1$,因为第一层实际铺粉厚度即为理论分层厚度,所以 $\lambda_1 = H - h_1 = (1 - \alpha)H$ 。第一层产生的收缩误差会直接影响第二层的实际铺粉厚度,即 $H_2 = H + \lambda_1$,由此可得第二层实际成型厚度为 $h_2 = \alpha H_2$,相应的收缩误差为 $\lambda_2 = (1 - \alpha)H - \alpha \lambda_1$ 。同理第三层实际铺粉厚度为 $H_3 = H + \lambda_1 + \lambda_2$,收缩误差为 $\lambda_3 = (1 - \alpha)H - \alpha \lambda_1 - \alpha \lambda_2$,以此类推,可以得到第 n 层收缩误差为

$$\lambda_n = (1 - \alpha)^n H, \quad (1)$$

由于 $0 < \alpha < 1$,当 n 足够大时, $(1 - \alpha)^n \rightarrow 0$, $\lambda_n \rightarrow 0$,可见 SLM 单层收缩误差具有自我补偿特性。因为每一层产生的收缩误差都会使下一层的实际铺粉厚度增加,所以随着实际铺粉厚度的增加,实际成型层厚趋近于理论分层厚度,从而单层收缩误差趋近于零。

在(1)式的基础上,可以进一步得到前 n 层的累积误差为

$$S_n = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = (1 - \alpha)H \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{\alpha}. \quad (2)$$

由(2)式可以看出,累积误差和收缩比、理论分层厚度、制作层数有关,若 n 足够大,则可以忽略小项 $(1 - \alpha)^n$, S_n 表达式变为

$$S_n = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = H \frac{(1 - \alpha)}{\alpha}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,当制作层数 n 足够大时,累积误差趋于固定值,与单层收缩误差自我补偿的特性相符。(1)~(3)式描述了收缩误差随制作层数的变化过程,称为 Z 向误差累积模型,简称累积模型。

2.2 Z 向误差补偿模型的建立

因为单层收缩误差具有自我补偿特性,总误差趋于定值,补偿成为可能,所以在收缩误差表达式中引入补偿值 c 。补偿后第一层的铺粉层厚度为 $H'_1 = H + c$,则第一层的实际成型层厚度为 $h'_1 = (H + c)\alpha$,第一层的收缩误差为 $\lambda'_1 = (1 - \alpha)H - \alpha c$ 。同理可得第二层的收缩误差为 $\lambda'_2 = (1 - \alpha)^2 H + \alpha^2 c - \alpha c$,以此类推,可以得到带补偿的第 n 层的收缩误差为

$$\lambda'_n = (1 - \alpha)^n H - \alpha c (1 - \alpha)^{n-1}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,补偿项 $\alpha c (1 - \alpha)^{n-1}$ 的存在使得单层收缩误差能够得到有效削弱。在此基础上,进一步推

导得到补偿后前 n 项的累积误差为

$$S'_n = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = (1 - \alpha) H \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{\alpha} - \alpha c \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{\alpha}, \quad (5)$$

当制作层数 n 足够大时,忽略掉小项 $(1 - \alpha)^n$,则(5)式变为

$$S'_n = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = H \frac{(1 - \alpha)}{\alpha} - c. \quad (6)$$

(4)~(6)式给出了收缩误差的补偿方法,称为 Z 向误差补偿模型,简称补偿模型。此时,令 $S'_n = 0$,则有

$$c = H \frac{(1 - \alpha)}{\alpha}. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,通过调节首层铺粉厚度来对制作 n 层后的累积误差进行补偿是完全可行的。在实际操作中,第一层铺粉让成型缸先下降距离 c , $c = H(1 - \alpha)/\alpha$,则首层铺粉厚度为 $H'_1 = H + c$,即可实现对收缩误差的补偿。这种补偿方式称为首层补偿,其原理为:加入补偿值 c 后,第一层铺粉厚度增大至 $H + c$,而粉末熔化后实际成型厚度刚好等于理论分层厚度 H ,且第一层制作完毕后成型体上表面和刮粉板之间又会出现尺寸为 c 的空隙。第二层铺粉时,成型缸再次下降 H ,则恰好第二层实际铺粉厚度为 $H'_2 = H + c$ 。以此类推,理论上可使每一层的铺粉厚度都为 $H + c$,即每一层的实际成型厚度都为精确值 H ,从而完成对所有层的补偿。补偿原理如图 2 所示。

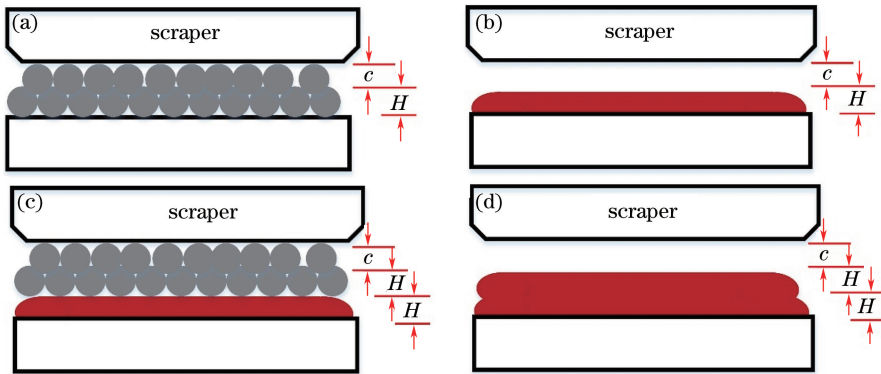


图 2 补偿铺粉结果(左)和实际成型结果(右)。(a)(b) 第一层; (c)(d) 第二层

Fig. 2 Compensated powder spreading result(left)and actual forming result (right). (a)(b) First layer; (c)(d) second layer

3 实验与结果

3.1 实验设备和材料

使用自主研发的 SLM250 成型设备,以粒径为 $13 \sim 53 \mu\text{m}$ 的 TC4 钛合金粉末为原料,在氧的体积分数小于 10^{-4} 的氩气气氛中成型。使用和粉末同种材质的基板,预先打磨,除去氧化层,用无水乙醇清洁,钛合金粉末预先在真空干燥箱中以 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度干燥 10 h。

3.2 实验方案

先进行单层实验,测得单层实际成型厚度为 h_1 ,由 $\alpha = h_1/H$ 获取收缩比 α ,进而得到 TC4 钛合金的误差累积和补偿表达式,再进行变层数实验和补偿实验,验证 Z 向误差是否符合模型预测的规律。在变层数实验中,先分别成型 $1 \sim 10$ 层,以验证原始误差累计模型,再分别成型 20, 40, 80, 160 层,以验证忽略小项后的误差累计模型,最后在变层数实验的基础上加入补偿值进行补偿实验,以验证误差补偿模型。

3.3 实验过程和结果

保证成型件上表面光洁平整,采用正交层错加重熔的扫描策略,激光功率为 240 W,扫描速度为 200 mm/s,层厚为 0.05 mm,扫描间距为 0.08 mm。为减小随机误差,每个层数制作 4 个样件,测量时先使用数显千分尺测量基板和成型体的总厚度,再单独测量基板的厚度,以总厚度减去基板厚度即为 Z 向成型尺寸,并取均值。

4个单层实验Z向成型样件尺寸分别为0.019,0.019,0.021,0.020 mm,均值为0.020 mm,计算可得收缩比为 $\alpha=0.4$,则TC4钛合金Z向总累积误差为 $S_n=0.075 \times (1-0.6^n)$,相应的补偿值 $c=0.075$ mm,据此可得Z向误差随成型层数变化的理论曲线。变层数实验Z向成型尺寸如表1所示,Z向实际成型尺寸和理论尺寸随成型层数的变化关系如图3所示,根据表1得到的实际Z向误差随成型层数的变化关系如图4所示。补偿实验Z向成型尺寸如表2所示,补偿后Z向实际成型尺寸和理论尺寸随成型层数变化关系如图5所示,根据表2得到的补偿后Z向误差随成型层数的变化关系如图6所示。

表1 变层数实验Z向成型尺寸

Table 1 Z axis formation size in multi-layer experiments

mm

Experimental number	Z axis formation size of n layers												
	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$	$n=20$	$n=40$	$n=80$	$n=160$
1	0.052	0.085	0.116	0.167	0.249	0.270	0.327	0.360	0.427	0.932	1.943	3.920	7.973
2	0.049	0.088	0.119	0.174	0.226	0.272	0.338	0.379	0.433	0.941	1.912	3.882	7.912
3	0.046	0.076	0.130	0.173	0.190	0.265	0.314	0.368	0.412	0.934	1.938	3.916	7.920
4	0.050	0.094	0.142	0.189	0.229	0.291	0.316	0.373	0.419	0.926	1.890	3.924	7.868

表2 补偿后变层数实验Z向成型尺寸

Table 2 Z axis formation size in multi-layer experiments after compensation

mm

Experimental number	Z axis formation size of n layers												
	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$	$n=20$	$n=40$	$n=80$	$n=160$
1	0.102	0.160	0.203	0.251	0.310	0.368	0.406	0.463	0.503	1.016	2.024	4.008	8.046
2	0.112	0.176	0.204	0.280	0.337	0.383	0.418	0.472	0.509	1.026	2.031	4.037	8.039
3	0.110	0.151	0.194	0.252	0.308	0.354	0.403	0.462	0.504	1.010	2.016	4.001	8.011
4	0.103	0.156	0.201	0.254	0.302	0.347	0.396	0.444	0.497	0.999	1.982	4.011	8.012

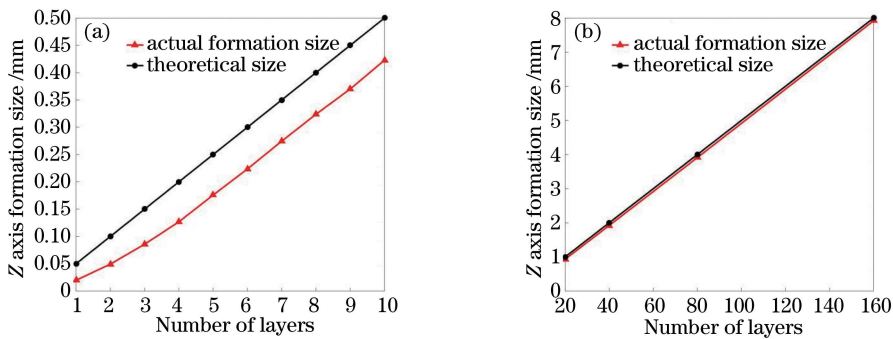


图3 Z向成型尺寸随成型层数的变化。(a) 1~10层;(b) 20层以上

Fig. 3 Variation of Z axis formation size with number of layers. (a) Layer number from 1 to 10; (b) layer number larger than 20

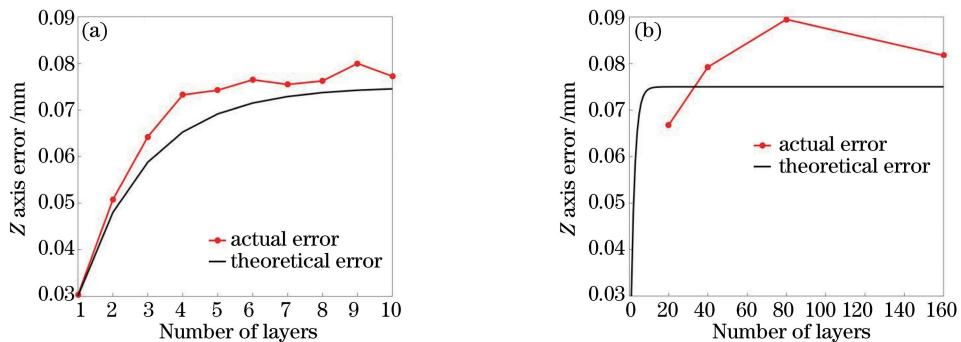


图4 Z向误差随成型层数的变化。(a) 1~10层;(b) 20层以上

Fig. 4 Variation of Z axis error with number of layers. (a) Layer number from 1 to 10; (b) layer number larger than 20

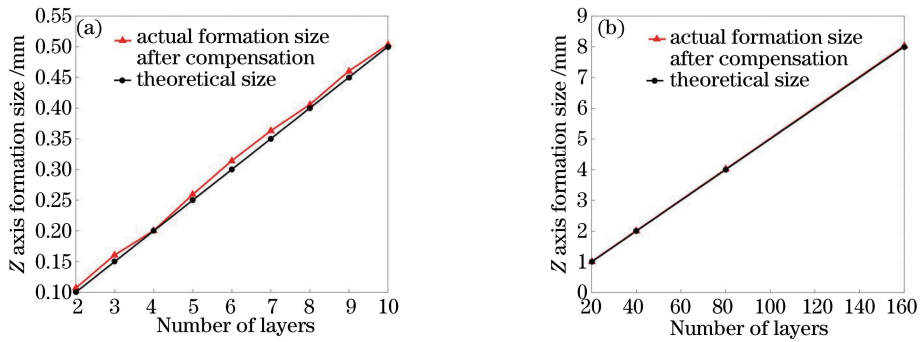


图 5 加入补偿后 Z 向成型尺寸随成型层数的变化。(a) 1~10 层; (b) 20 层以上

Fig. 5 Variation of Z axis formation size with number of layers after compensation. (a) Layer number from 1 to 10; (b) layer number larger than 20

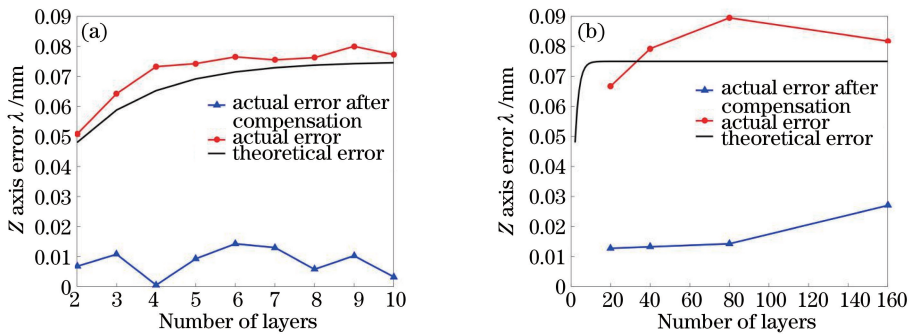


图 6 加入补偿后实际 Z 向误差随成型层数的变化。(a) 1~10 层; (b) 20 层以上

Fig. 6 Variation of practical Z axis error with number of layers after compensation. (a) Layer number from 1 to 10; (b) layer number larger than 20

4 分析与讨论

从图 3 可以看出,所有样件 Z 向成型尺寸均明显小于理论值,这符合粉体材料熔化收缩导致 Z 向尺寸小于理论值的特征。从图 5 可以看出,经过补偿,所有样件 Z 向误差均大幅减小,与补偿模型预测结果相符。

从图 4 可以看出,当制作层数为 1~10 层时,实验获得的 Z 向误差随成型层数的变化趋势和误差累计模型理论曲线基本吻合,但数值上略高于理论值。这是因为随着制作层数的增加,成型表面质量有所下降,粗糙度增加,导致实际 Z 向误差超过模型计算值;当制作层数达到 20 层以上时,收缩误差达到极值并趋于稳定,实际 Z 向误差在理论最大值附近波动。

从图 6 可以看出,加入补偿后,Z 向误差大幅下降,但仍在 0~20 μm 范围内波动。这是因为加入补偿后,收缩误差对 Z 向误差的影响基本消失,此时表面质量是影响 Z 向误差的主要因素。

相关研究表明^[13-14],松装密度和致密密度的比值可衡量粉体收缩程度。理论上基于密度的收缩比为

$$\alpha' = \rho_1 / \rho_2, \quad (8)$$

式中 ρ_1 为松装密度, ρ_2 为致密密度。

此处使用的 TC4 钛合金粉末松装密度为 2.27 g/mm^3 ,致密密度为 4.45 g/mm^3 ,则基于密度的收缩比 $\alpha' = 0.51$,大于基于层厚测量的收缩比 α ($\alpha = 0.4$),两种收缩比的误差累积曲线对比如图 7 所示。由图可以看出,基于层厚测量的误差累积曲线更接近实验结果。这是因为基于密度的收缩比计算没有考虑粉末飞溅和蒸发带来的损耗,所以基于层厚测量的收缩比计算更加准确。

由补偿模型可知,分层厚度越大,所需的补偿值也越大。对于本文使用的 TC4 钛合金粉末,当分层厚度 $H = 0.05 \text{ mm}$ 时,所需的补偿值已达 0.075 mm。实验表明,实际铺粉厚度与理论分层厚度差异较大就会导致原有工艺参数偏离最优值,需要调整。同时,铺粉厚度的增加会导致熔池体积增大,使得产生球化、孔隙、夹渣等缺陷的概率也增大。实际工作中应通过设定尽可能小的理论分层厚度来避免补偿值过大,但理论

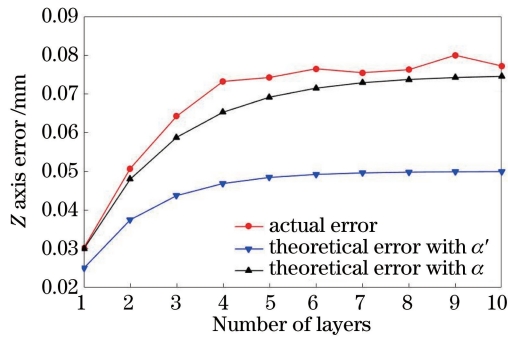


图7 不同收缩比下,误差累积曲线对比

Fig. 7 Comparison among error accumulation curves under different contraction ratios

分层厚度不应小于粉末平均粒径。如本文 TC4 钛合金粉末平均粒径为 0.04 mm,若分层厚度小于 0.04 mm,则铺粉表面可能出现无粉区,导致成型质量下降。本文 TC4 钛合金粉末最佳分层厚度为 0.04 mm。

5 结 论

考虑加工过程中的材料损耗,基于相对层厚建立了 TC4 钛合金 SLM 的 Z 向误差累积和补偿数学模型,并根据数学模型提出了补偿方法,得到以下结论。

1) SLM 的 Z 向误差具有自我补偿的特性,是一个先逐渐增大最后趋于定值的过程,与铺粉层厚、成型层数以及收缩比有关。

2) 建立的误差累积模型对 SLM 成型的 Z 向误差发展规律的描述与实验结果相符,按照误差补偿模型提出的补偿方法能够有效提高 SLM 的 Z 向尺寸精度。

3) 相对于基于密度的收缩比,使用基于层厚测量的收缩比的误差累积曲线更接近实验结果。

4) SLM 成型中,在不小于粉末平均粒径的前提下,应尽可能选择小的理论分层厚度,这样有利于 Z 向误差补偿,保证成型质量。

参 考 文 献

- [1] Yang Qiang, Lu Zhongliang, Huang Fuxiang, *et al.* Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 507(12): 26-31.
杨 强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 507(12): 26-31.
- [2] Louvis E, Fox P, Sutcliffe C J. Selective laser melting of aluminum components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 275-284.
- [3] Campanelli S L, Contuzzi N, Ludovico A D. Manufacturing of 18 Ni Marage 300 steel samples by selective laser melting [J]. Advanced Materials Research, 2010, 83-86: 850-857.
- [4] Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.* Laser direct rapid manufacturing of functional metal part with complex structure and full density[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1653-1657.
吴伟辉, 杨永强, 王 迪, 等. 全密度功能性复杂金属零件的激光直接快速制造[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1653-1657.
- [5] Osakada K, Shiomi M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1188-1193.
- [6] Gusarov A V, Yadroitsev I, Bertrand P, *et al.* Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting [J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 975-979.
- [7] Strano G, Hao L, Everson R M, *et al.* Surface roughness analysis, modeling and prediction in selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4): 589-597.
- [8] Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen, *et al.* Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 57-60.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属薄壁零件 Z 向单层行程模型[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 57-60.

- [9] Yang Xiongwen, Yang Yongqiang, Liu Yang, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- [10] Wang Di, Yang Yongqiang, Wu Weihui, *et al.* Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3233-3239.
王迪, 杨永强, 吴伟辉, 等. 光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3233-3239.
- [11] Meier H, Haberland C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2008, 39(9): 665-670.
- [12] Morgan R, Sutcliffe C J, O' Neill W. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives[J]. Journal of Material Science, 2004, 39(4): 1195-1205.
- [13] Wang Di. Study on the fabrication properties and process of stainless steel parts by selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 63-64.
王迪. 选区激光熔化成型不锈钢零件特性与工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 63-64.
- [14] Wang Li. Research on the performance in selective laser melting of metallic part[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 66-67.
王黎. 选择性激光熔化成形金属零件性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 66-67.