

# 激光熔覆层端部形貌三维重构模型

宋梦华 林鑫 杨海欧 黄卫东

西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072

**摘要** 激光熔覆层端部形貌对于激光立体成形加工精度及稳定性具有重要影响。基于粉末累积原理,分析了激光熔覆层端部的形成过程。构建了描述激光熔覆层端部三维形貌的分析模型。实验制备了单道激光熔覆层,应用激光共聚焦显微镜观察了激光熔覆层始末端部的形貌特征,并测量了不同横/纵截面的轮廓。结果表明,激光熔覆层端部沿扫描方向由外向内宽度/高度逐渐增加,经过约半个熔池的距离后,宽度达到熔覆层宽度保持不变,初始/末尾熔池外的区域高度达到稳态保持不变,而内部区域继续增加,两区域形成交界线。越过初始/末尾熔池后,熔覆层横截面达到稳态。模型与实验结果在主要几何特征上相符的很好,表明粉末积累是决定熔覆层端部形貌的基本机制,所构模型为认识理解激光熔覆层端部形貌提供了基础。

**关键词** 激光光学; 材料; 激光立体成形; 熔覆层端部形貌; 粉末累积; 分析模型

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.081408

## A Model of Constructing the End of Single-Track Laser Cladding Layer

Song Menghua Lin Xin Yang Hai'ou Huang Weidong

State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an, Shaanxi 710072, China

**Abstract** The morphology of ends of single-track laser cladding layer has an important influence on the processing precision and stability in laser solid forming. Based on the principle of powder accumulation, the formation process of ends of single-track laser cladding layer is analyzed. An analytical model of constructing the ends is developed. Some single-track laser cladding layers are prepared. By laser scanning confocal microscope, the ends of single-track laser cladding layers are observed. And the profiles of a series of cross section along the scanning direction and longitudinal section are measured. The result indicates that the width/height of the ends increase inward along the scanning direction. Beyond the distance of the radius of molten pool, the width of the ends equal to the one of the cladding layer and keep stable. Moreover, the height of the zone out of the initial/tail molten pool reaches stable while the one in the initial/tail molten pool keeps increasing. Between those two zones, a boundary of broken line is formed. Beyond the distance of the length of molten pool, the cross section of laser cladding layer reaches stable. The constructed result shows good agreement with the experimental one in the main geometry characteristics, which indicates the powder accumulation is the primary mechanism in determining the morphology of ends of single-track laser cladding layer. The developed model provides a foundation to get insight into the morphology of ends of single-track laser cladding layer.

**Key words** laser optics; materials; laser solid forming; morphology of ends of single-track laser cladding layer; powder accumulation; analytical model

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 220.4610

## 1 引言

激光立体成形(LSF)是一种先进的数字化增材制造技术<sup>[1]</sup>,其结合了快速原型的自由实体成形与同步送

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-05-15; 网络出版日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51323008)、国家973计划(2011CB610402)、国家863计划(2013AA031103)、凝固技术国家重点实验室自主研究课题(91-QZ-2014)

作者简介: 宋梦华(1983—),男,博士研究生,主要从事激光成形修复2Cr13不锈钢方面的研究。

E-mail: songmenghua@163.com

导师简介: 黄卫东(1956—),男,博士,教授,主要从事金属高性能增材制造技术(3D打印)与凝固理论等方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn(通信联系人)

粉激光熔覆的高性能熔覆沉积技术特征,能够实现高性能金属零件的快速制造和修复,已在航空、航天、动力和能源等多个领域获得应用<sup>[2-10]</sup>。

对于激光立体成形技术来说,保证加工过程的稳定性以及成形零件的精度是其必须要解决的重要问题。成形零件的精度由其外侧壁的特征决定,根据激光立体成形的不同沉积路径,零件外侧壁的形成可分为三类:1)由单道熔覆层端面组成;2)由单道熔覆层纵向外侧面组成;3)由单道熔覆层端面与纵向外侧面交替组合而成<sup>[11]</sup>。因此,单道熔覆层的形状是影响激光立体成形加工精度的基础。许多工作研究了激光熔覆层的形状,Li等<sup>[12]</sup>和Oliveira等<sup>[13]</sup>分别研究了侧向送粉、同轴送粉两种方式下工艺参数(功率、扫描速度、送粉率、光斑尺寸)等对单道熔覆层宽度、高度的影响;Onwubolu等<sup>[14]</sup>基于张力平衡研究了熔覆层与基材的接触角;Yu等<sup>[15]</sup>研究了熔覆层的铺展行为;Liu等<sup>[16-17]</sup>用粉末累积高度来重构横截面轮廓,结果与实际相符的很好。然而上述工作均是研究激光熔覆层中间段的形状特征。如前所述,熔覆层端部也是影响零件成形精度的重要部分。Bi等<sup>[18-19]</sup>报道了单道熔覆层两端坍塌以及由此造成的第一类外侧壁向内倾斜的现象。Song等<sup>[20]</sup>指出熔覆层端部的坍塌对于交叉光栅路径的外侧壁向内倾斜具有重要影响。因此研究激光熔覆层端部的形貌特征以及成形过程具有重要意义。而目前有关激光熔覆层端部三维(3D)形貌特征及其相关机理的研究鲜见报道。

激光熔覆层的形成是粉末累积与液态变形耦合进行的过程,涉及热传输、相变、流动等诸多复杂过程,难以全面考虑各因素。因此,发现其中的主要因素,基于此建立能够快速构建熔覆层端部形貌的模型,有助于理解熔覆层端部形貌的主要特征及机理,并能够为进一步研究其他因素的影响提供基础。本文基于激光熔覆层粉末累积成形原理,分析了激光熔覆层端部的形成过程;构建了重构单道熔覆层端部三维形貌的解析模型;通过理论重构与实验观察,分析了激光熔覆层端部形貌特征,并对比讨论了所构建模型的合理性与局限性。

## 2 模 型

激光熔覆层的形成是粉末在一定形状熔池内累积并凝固固结成形的过程。对于单道熔覆层,在激光束的辐照下,基材表面会形成熔池,与此同时粉末也开始进入熔池并开始累积。伴随激光束与粉末束的移动,熔池也会相应同步移动。当基材上某点位于熔池内时,由于是液态,可以接受粉末并不断累积;当熔池移出时,该点随即凝固,此后无法接受粉末,则粉末累积高度确定。对于确定的工艺参数,基材某点的粉末累积量只与其对应的熔池扫描长度相关。对于单道熔覆层起始端,不同位置所对应的熔池扫描长度如图1所示。对于起始熔池内的区域,不同点对应的熔池扫描长度就是沿扫描反方向与起始熔池边界间的距离,如图中虚线所示;起始熔池外的区域,各点对应的熔池扫描长度就是沿扫描方向在熔池上的截线段,不会沿扫描方向变化,如图中点划线所示。对于外半圆部分,由于熔池的圆形形状,熔覆层宽度沿扫描方向按照熔池轮廓从零逐渐增加到熔池直径;当进入内半圆后,熔池宽度会保持熔池直径不变。因此,由于起始熔池不同横截面宽度和所对应熔池扫描长度的变化,横截面会逐渐变宽变高。当越过起始熔池后,不同横截面上各点的熔池扫描长度均为各点所对应的熔池截线长度,此后横截面的轮廓达到稳态保持不变,也就是激光熔覆层的中间段。对于熔覆层末端,粉末的累积情况与起始端对称。

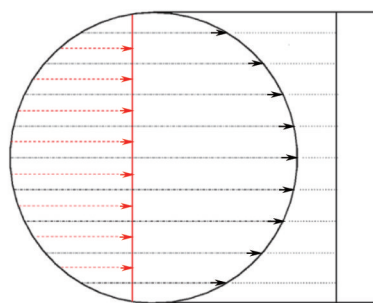


图1 熔覆层端部熔池扫描长度随扫描方向变化的示意图

Fig.1 Sketch of variation of the molten pool length along the scanning direction for the ends of single-track cladding layer

基于上述分析,利用熔覆层粉末累积原理<sup>[16-17]</sup>,构建了熔覆层端部的三维形貌。

为了模型形式的简化,采取了如下约定和近似:

- 1) 成形过程中,基材位于激光束焦点下方;

2) 由于激光立体成形过程中,通常熔池尺寸和激光束直径相接近,为此,忽略热传输的影响,假定熔池形状为有效作用范围内(满足形成熔池所需的临界能量密度)的激光束与基材的交线;

3) 假设粉末束流内粉末浓度分布均匀,且认为进入熔池范围内的粉末全部被捕获并熔化;

4) 熔覆层液态阶段的变形非常复杂,难以定量考量,考虑到激光立体成形过程中冷却极快,液态变形时间很短,变形量较小<sup>[16-17]</sup>,因此忽略熔覆层液态阶段的变形;

5) 认为粉末束与激光束的开/关同步。

以基材表面为  $xoy$  所在平面,激光束起始位置中心轴线与基材平面的交点为原点,扫描方向为  $y$  轴方向,建立坐标系,如图2所示。

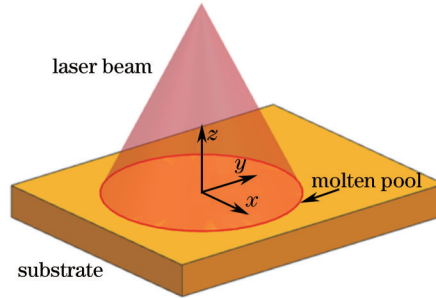


图2 坐标系定义示意图

Fig.2 Schematic of the coordinate system

设激光束与基材平面相交形成的光斑半径(即初始单道熔覆层的宽度)为  $r$ , 则激光束与基材表面相交形成的熔池形状为

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (1)$$

式中  $x$ 、 $y$  为横、纵坐标。

设粉末束流内每一点的粉末质量浓度为  $m$  [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 则熔池内某一点对应的高度为

$$z = \frac{\Delta y \cdot m}{v \cdot \rho}, \quad (2)$$

式中  $z$  为点  $(x, y)$  对应的高度坐标,  $\Delta y$  为点  $(x, y)$  所对应的粉末束扫描长度,  $v$  为扫描速度 ( $\text{m/s}$ ),  $\rho$  为粉末的密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )。

由于激光熔覆层末端粉末的累积情况与起始端对称,下面只构建起始端的情况。对于起始端,根据上述分析,熔池内外各点所对应的粉末扫描长度为

$$\begin{cases} \Delta y = y + \sqrt{r^2 - x^2}, & y \in [-\sqrt{r^2 - x^2}, \sqrt{r^2 - x^2}] \\ \Delta y = 2\sqrt{r^2 - x^2}, & y \in (\sqrt{r^2 - x^2}, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,可得单道熔覆层端部的表面形貌为

$$\begin{cases} z = \frac{m \cdot (y + \sqrt{r^2 - x^2})}{\rho \cdot v}, & y \in [-\sqrt{r^2 - x^2}, \sqrt{r^2 - x^2}] \\ z = \frac{2m \cdot \sqrt{r^2 - x^2}}{\rho \cdot v}, & y \in (\sqrt{r^2 - x^2}, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

### 3 结果与讨论

根据上述模型,重构了熔池半径  $r$  为 1.5 mm, 宽高比  $v \cdot \rho / m$  为 5 时的单道熔覆层起始端部形貌,结果如图3所示。图3表明,由各点的粉末累积量决定,激光熔覆层起始端的高度沿扫描方向从零逐渐增加,当越过初始熔池范围后,沿同一纵截面线,各点的高度保持不变[图3(c)]。在初始熔池外半侧,熔覆层的宽度沿初始熔池形状逐渐增加[图3(b)];进入内半侧,熔覆层宽度保持熔池直径不变,同时,由于初始熔池范围外区域的横截面已经稳定,而内部区域的横截面还在逐渐发展,则两部分形成交界线(导数不连续),该交界线在基材表面的投影与初始熔池内半侧重合。图3(c)的纵截面形貌显示端部表面高度呈线性增长,这与模型采用均匀粉末浓度有关。实际过程中,如果熔池对应的粉末浓度变化不大,则端部会呈线性增长, Tan 等<sup>[19]</sup>利

用高速摄影对熔池侧向进行实时观察表明了这种线性增长。

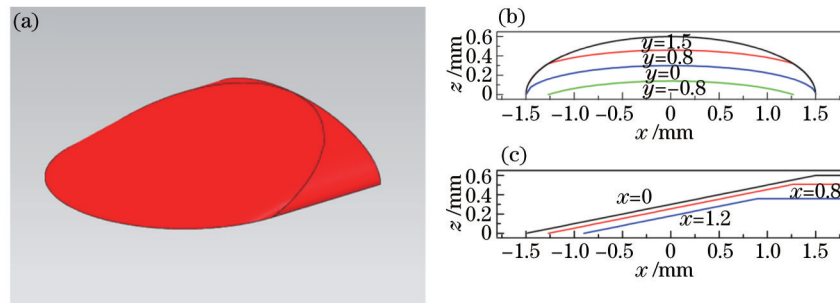


图3 单道熔覆层起始端重构结果。(a) 三维形貌; (b) 不同横截面轮廓; (c) 不同纵截面轮廓

Fig.3 Constructed result. (a) 3D shape; (b) profiles of different cross sections; (c) profiles of different longitudinal sections

利用 LSF-III B 型激光立体成形装备制备了单道激光熔覆层,利用 OLYMPUS-OLS4000 激光共聚焦显微镜观察试样的始末端形貌并测量不同横、纵截面轮廓,结果如图 4 所示。

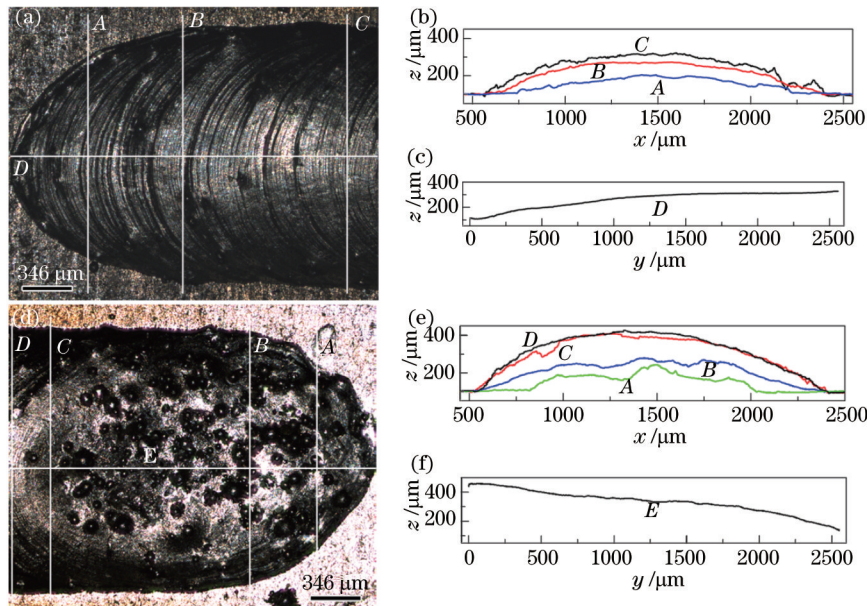


图4 实验制备单道熔覆层。起始端为(a)形貌; (b)不同横截面轮廓; (c)纵截面轮廓; 和末端为(d)形貌; (e)不同横截面轮廓; (f)纵截面轮廓

Fig.4 Ends of prepared single-track laser cladding layer. (a) Shape; (b) profiles of different cross sections; (c) profile of longitudinal section of the initial end; (d) shape; (e) profiles of different cross sections; (f) profile of longitudinal section of the tail end

图4表明,熔覆层的端部在一个熔池的范围内逐渐增高/降低,同时其宽度依熔池形状逐渐增大/减小,在约一半熔池以后达到熔覆层宽度。在端部内半侧,熔池以外的区域其横截面轮廓与中间段基本重合,只在顶部不重合[图4(e)];纵截面轮廓基本呈线性变化,但在初始/末尾处略高[图4(c)和(f)]。对于末端,熔池内外结合处明显[图4(d)]。上述特征与模型重构结果吻合的很好,说明粉末累积是决定激光熔覆层端部的形貌的基本机制,所构建模型能够基本反映熔覆层端部形貌的主要特征。

同时,实验结果也显示了一些与模型结果不相符之处:1) 实际熔池沿扫描方向被拉长,近似于椭圆,而非正圆;2) 起始端,熔池内外结合处不明显;3) 熔覆层横截面两侧的斜率明显小于重构结果。上述不同之处应与下述原因相关:1) 模型忽略了基材内的热传输,将激光束与基材表面相交圆等同于熔池,这在扫描速度相对较小时适用,但扫描速度较大时,移动热源产生的熔池会沿扫描方向拉长,此时,熔池扫描长度的具体形式将发生变化,从而影响粉末累积量及最终形貌;2) 对于熔覆层起始端,熔池还未达到稳态,即沿着扫描方向,熔池会逐渐变宽变长直至稳态。这种变化会使得交界线被重熔,在表面张力作用下趋于光滑而使得交界线不明显;3) 模型采用了均匀分布的粉末浓度,而实际粉末浓度往往呈“高斯”分布<sup>[21-22]</sup>,中心浓度最高,周围浓度会迅速减小,因此使得重构结果横截面两侧的高度偏大,造成斜率大。

如前所述,熔覆层形状受粉末累积及液态阶段变形决定。对于基体上的熔覆层,初始形状由粉末累积决定,但是在所受力的作用下,该初始形状会向由力学平衡决定的平衡形状转变,变形过程与熔覆层的逐层冷却凝固耦合进行。熔覆层主要受自身重力、表面张力、气体-粉末束流冲击力以及表面汽化的冲击力<sup>[20]</sup>。在重力作用下,为了降低重心,减小势能,熔覆层有铺展趋势,即高度减小宽度增大;气体-粉末束流及气化冲击力作用在熔覆层顶部有助于铺展。表面张力的作用表现在两个方面:1) 熔覆层与基材间的平衡夹角由杨氏方程决定,即表面张力会影响熔覆层与基材间的夹角,但须注意,此时的固液界面并非基材的初始平面,而是熔池底部的固液界面,其形状由热传输过程控制;2) 由表面张力随温度变化而引起的 Marangoni 流动会影响熔覆层内部的对流形态,如由中心向外或者由外向中心,这两种形态分别利于或者阻碍熔覆层的铺展过程。上述变形过程与逐层凝固耦合在一起,变形量依赖于具体的动力学过程。但是当熔覆层过热度较小,如功率较小,扫描速度较大,送粉率较大等情况下,熔覆层保持液态时间较短,粉末累积决定的形状会迅速凝固,从而使得变形的影响较小。上述实验结果采用的是常规使用的成形参数,但是与模型结果的主要几何特征一致,说明对于常规激光立体成形过程而言,粉末累积是决定激光熔覆层端部形貌的主要过程。因此该模型对于实际沉积过程具有指导意义。同时基于模型结果,还可以继续考虑变形过程的影响,从而获得具有更多细节特征的结果,这需要更多后续的工作。

## 4 结 论

1) 分析了激光熔覆层端部形成的基本过程,发现端部内各点的熔池扫描长度随扫描方向变化,其将导致粉末累积量的变化。

2) 构建了能够重构激光熔覆层端部三维形貌的解析模型。

3) 理论重构与实验结果表明,激光熔覆层端部沿扫描方向由外向内宽度/高度逐渐增加,经过约半个熔池的距离后,宽度达到熔覆层宽度保持不变,初始/末尾熔池外的区域高度达到稳态保持不变,而内部区域继续增加,两区域形成交界线。越过初始/末尾熔池后,熔覆层横截面保持稳定。

4) 实验结果与模型结果在主要几何特征上相符的很好,表明粉末积累是决定熔覆层端部形貌的基本机制,该模型为认识理解激光熔覆层端部形貌提供了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1-60.  
黄卫东, 林 鑫, 陈 静, 等. 激光立体成形—高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 1-60.
- 2 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.  
黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- 3 Liu F C, Lin X, Yang G L, *et al.*. Microstructure and residual stress of laser rapid formed inconel 718 nickel-base superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 208-213.
- 4 Ma Liang, Lin Xin, Tan Hua, *et al.*. Scanning path optimization of laser solid forming based on style[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 031405.  
马 良, 林 鑫, 谭 华, 等. 基于样式表达的激光立体成形路径优化[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 031405.
- 5 Yang G L, Lin X, Liu F C, *et al.*. Laser solid forming Zr-based bulk metallic glass[J]. Intermetallics, 2012, 22: 110-115.
- 6 Lin X, Cao Y Q, Wu X Y, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 553: 80-88.
- 7 Liu Y H, Chen J, Zhang Q, *et al.*. Microstructure characteristics of laser forming repaired Ti60 alloy[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(7): 071402.
- 8 Xue Lei, Chen Jing, Yu Wenjun, *et al.*. Investigation on  $K_{IC}$  of as-deposited Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3210-3214.  
薛 蕾, 陈 静, 虞文军, 等. Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的平面应变断裂韧度[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3210-3214.
- 9 Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of a novel  $\beta$  titanium metallic composite

- by selective laser melting[J]. *Acta Materialia*, 2014, 68(15): 150–158.
- 10 Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, *et al.*. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57(3): 133–164.
- 11 Song Menghua, Lin Xin, Liu Fenggang, *et al.*. Formation and modeling of the vertical outside wall of components inclining inward in laser solid forming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(6): 753–761.  
宋梦华, 林 鑫, 刘丰刚, 等. 激光立体成形零件竖直外侧壁向内倾斜的形成及模型[J]. *金属学报*, 2015, 51(6): 753–761.
- 12 Li Y M, Yang H, Lin X, *et al.*. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 360(1–2): 18–25.
- 13 De O U, Ocelik V, De H J T M. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 197(2–3): 127–136.
- 14 Onwubolu G C, Davim J P, Oliveira C, *et al.*. Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(6): 1130–1134.
- 15 Yu J, Lin X, Wang J J, *et al.*. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(14): 4612–4620.
- 16 Liu J C, Li L J. Study on cross-section clad profile in coaxial single-pass cladding with a low-power laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(6): 478–482.
- 17 Liu J C. Formation of cross-sectional profile of a clad bead in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(8): 1532–1536.
- 18 Bi G J, Gasser A, Wissenbach K, *et al.*. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(6): 2676–2683.
- 19 Tan H, Chen J, Zhang F Y, *et al.*. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(1): 1–8.
- 20 Song M H, Lin X, Yang G L, *et al.*. Influence of forming atmosphere on the deposition characteristics of 2Cr13 stainless steel during laser solid forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 701–709.
- 21 Lin J M. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31(3): 251–257.
- 22 Pinkerton A J, Li L. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(1): 33–41.

栏目编辑: 张浩佳