

文章编号: 1001-3806(2016)05-0654-06

## 激光机器人光内送粉异形实体成形研究

贾帅, 傅戈雁\*, 石世宏, 周亮  
(苏州大学 机电工程学院, 苏州 215021)

**摘要:** 为了利用激光熔覆直接成形技术得到异形变截面圆环链轮齿模拟件, 采用光内送粉技术、利用库卡机器人进行运动控制。根据优化的工艺参量, 采用高度额外增量法、长度额外增量法规划扫描路径, 精准地控制每层提升量。实验前对基板进行预热, 并对成形零件进行检测分析。解决了异形件堆积最容易出现边缘塌陷问题。在保证变截面结构尺寸各处充分的基础上, 较好地控制了加工余量。避免了熔覆层的开裂和剥落, 在 42CrMoV 基板上成功堆积出异形链轮齿模拟件。结果表明, 光内送粉粉末利用率达 60% 以上; 成形链轮齿表面光滑无粘粉, 各尺寸误差均在合理范围之内; 链齿与基板冶金结合良好, 组织均匀致密, 各处硬度均匀。

**关键词:** 激光技术; 链轮齿; 激光熔覆; 路径规划; 微裂纹

**中图分类号:** TG156.99      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.008

## Laser direct forming research of irregular-section entity base on inside-laser powder feeding and robotic technology

JIA Shuai, FU Geyan, SHI Shihong, ZHOU Liang

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**Abstract:** In order to get simulation teeth of ring sprockets with variable cross-section by means of laser cladding direct manufacturing technology, experiments were made based on inside-laser powder feeding technology and motion control of KUKA robot. According to the optimized process parameters, the scanning paths were planned and the lift amount of each layer was accurately controlled based on the incremental method of extra height and extra length. The substrate was preheated and the detection of dimension and microstructure of the formed tooth was made. The problem of edge collapse in the forming of irregular-section parts was solved. The machining allowance was controlled preferably on the basis of promising the sufficient size in different sections. And the cracking and spalling of cladding layer was avoided. The irregular-section tooth was successfully made on 42CrMoV substrate. The results indicate that the powder utilization rate is more than 60% in the processing. The surface of the part was smooth with no powder adhesion. The size of the entity was within reasonable limits. The teeth and the substrate formed good metallurgical combination. The microstructure was uniform without microcracks and the microhardness was uniform in every section.

**Key words:** laser technique; tooth of sprocket; laser cladding; path planning; microcracks

## 引言

激光熔覆直接成形制造集合了激光熔覆和快速制造的先进制造技术<sup>[1-3]</sup>。目前激光熔覆直接成形研究较多的是同步送粉熔覆薄壁零件, 对实体零件尤其是异形实体件成形研究相对较少<sup>[4-5]</sup>。实体成形面临的问题主要有: (1) 成形实体零件粉末用量大, 粉末利用

率的矛盾就凸显出来<sup>[6]</sup>; 而且, 发散的粉末熔融不充分, 造成表面粘粉, 易影响到熔道表面及堆积实体内部质量<sup>[5]</sup>; (2) 基础熔道的形貌对后续搭接及堆积成形的影响很大, 特别是侧面塌陷不易控制, 堆积层数愈多, 形状失真愈大, 严重时导致成形失败; 对于不规则异形实体而言, 每一层形状都在不断变化, 形状精度控制愈显重要; (3) 大体积的熔覆堆积, 更易造成内应力集中, 导致实体开裂。本文中基于中空激光光内送粉技术粉末利用率高、熔道平整无粘粉、侧向融合充分等优势, 利用机器人编程的灵活性解决路径规划问题, 对具有非规则异形实体特征的链轮齿模拟件堆积成形进行了研究。

## 1 试验

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61475107; 11172191)

作者简介: 贾帅 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fugeyan@suda.edu.cn

收稿日期: 2015-07-13; 收到修改稿日期: 2015-07-23

### 1.1 光内送粉熔覆技术

实体成形面临的主要问题中,粉末利用率问题亟待解决。光内送粉激光熔覆(见图 1a)的基本原理是单根粉束位于环锥形激光束的中空部位并垂直于基面,粉末位于最里层,外层添加准直气即可对粉末流起准直作用,又能够使熔池得到有效搅拌并压制熔覆过程中火花飞溅现象,实现了光、粉、气三者同轴精确耦合<sup>[6-7]</sup>。单道试验如图 1b 所示,表面光亮无粘粉。连续堆积 25 层后通过测量工件增重与送粉量之比,测得粉末利用率达到了 61%,可有效解决粉末利用率的矛盾。

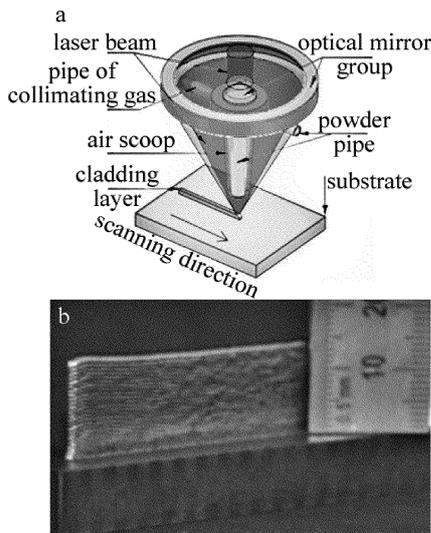


Fig. 1 Schematic diagram and appearance of single track  
a—schematic of coaxial in-side laser powder feeding b—appearance of single track

### 1.2 试验条件

试验中采用 2kW 光纤激光器,CTV PF2/2 送粉器,六轴联动 KUKA 机械手及实验室自主研发光内送粉喷头进行激光熔覆成形,采用 N<sub>2</sub> 作为保护气。并以恒温加热平台预热基体保持恒定温度,最后以 S-4700 冷场发射扫描电镜成型件微观组织进行检测分析。基板材料为 42CrMoV,规格为 70mm × 35mm × 10mm,各化学成分对应的质量分数如下:(0.001 ~ 0.006) C, (0.009 ~ 0.012) Cr, (0.0017 ~ 0.0037) Si, (0.005 ~ 0.008) Mn, (0.0015 ~ 0.0025) Mo, (0.0015 ~ 0.0025) V, ≤0.0003Ni, ≤0.0003P, ≤0.0003S,余量为 Fe。熔覆粉末材料为 Fe 基复合材料,粒度在 40μm ~ 60μm,各化学成分的质量分数如下:(0.001 ~ 0.006) C, (0.008 ~ 0.011) B, (0.011 ~ 0.014) Si, (0.003 ~ 0.007) Mn, (0.152 ~ 0.162) Cr, (0.014 ~ 0.0185) Mo, (0.035 ~ 0.040) Ni, ≤0.00027P, ≤0.0001S, ≤0.0009O,余量为 Fe。实验前基板用砂纸打磨去除氧化层,并用丙酮酒精清洗干净以防止表面杂质引起微

裂纹,粉末在 200℃ 恒温烘箱中烘干以去除水分增加粉末流动性。

### 1.3 加工模型及方法

链轮实体形状如图 2 所示。利用 CAD 设计轮齿模拟件模型如图 3 所示。对模型进行切片处理,根据切片所得形状利用 KUKAC4 语言运动编程,以控制加工过程中送粉喷头的运动轨迹。本试验喷头竖直向下,通过机器人的运动来实现实体的堆积成形,研究初始阶段选择合适的激光单道参量,进而找出最佳的激光离焦量、扫描速率、功率、搭接量和提升量。按 y 方向进行单道扫描,x 方向偏移搭接完成单层熔覆,结合 z 方向提升得到实体模型。



Fig. 2 Sprocket sample

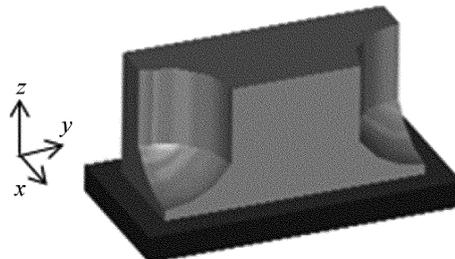


Fig. 3 Sprocket model

## 2 路径规划与工艺参量

激光熔覆成形是将实体零件进行切片处理再分层堆积的过程。为了获得表面质量较好的实体零件,必须对路径和激光熔覆参量进行控制,因为单道熔覆层中的缺陷会累加到整个实体堆积过程<sup>[8]</sup>。图 4 为探索性试验堆积成形的长方体形实体。该试验利用单道熔覆参量,并按理论尺寸作路径规划。由图可看出,扫描

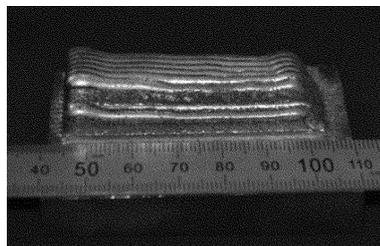


Fig. 4 No parameter optimization

线末端和侧面塌陷导致堆积无法进行,在实体堆积特别是异形实体堆积过程中必须采取相应措施。

### 2.1 路径规划

结合图3中链轮轮齿模拟件CAD模型,对其进行分层切片处理。其中轮窝某层截面示意图如图5所示。粗实线部分为该层界面边缘轮廓,灰色部分为单道简化轮廓,点划线为激光中心路径。

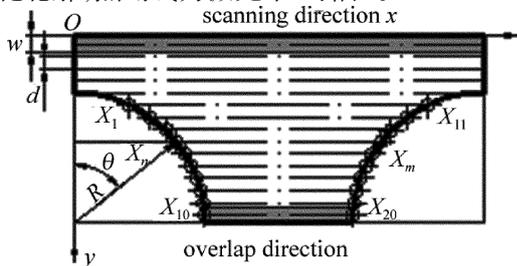


Fig. 5 Section of one layer

$$R = C \times d + w/2 \quad (1)$$

$$X_n = nd \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R - nd)/R]}{2} \right\} \quad (2)$$

$$X_m = (m - 10)d \times \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R - (m - 10)d)/R]}{2} \right\} \quad (3)$$

式中, $R$ 为当前层圆弧半径, $C$ 为当前层圆弧搭接单道数(2~10), $w$ 为单道宽度, $d$ 为单层每道偏移量, $n$ 为圆弧起点到当前点道数, $X_n$ 为圆弧段单道起始点, $X_m$ 为圆弧段与起点对应的终点。

按照(1)式、(2)式、(3)式编辑圆弧段各点坐标,作为加工过程各单道的始末点,运用KUKA C4语言点到点方式运动编程控制机器人的运动轨迹,选用速度逼近方式,每加工一层 $C$ 值增加1,直到球面过度部分加工完成, $C$ 值等于10以后不再增加。KUKA C4语言编程简单快捷,可实现不同形貌异形零件的运动编程,加之六轴联动,使得激光熔覆灵活性大大提高。

考虑到加工过程中球面过渡区域和圆弧处单道偏移引起的误差如图6、图7所示。图6所示为某纵截

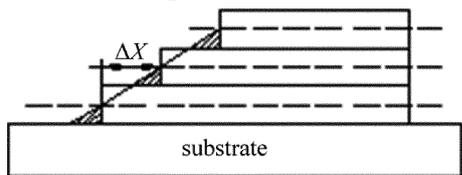


Fig. 6 Vertical section of sprocket

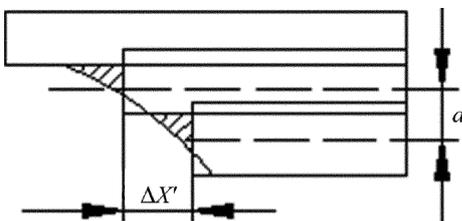


Fig. 7 Horizontal section of sprocket

面一侧示意图,理论开光点为单道与圆弧的交叉点。但是理论开光点会引起圆弧右下端(阴影部分)出现欠熔缺口,为了保证变截面处结构尺寸充分,利用长度额外增量法扫描方向始末段额外各增加 $\Delta X$ 。

由(2)式可得:

$$\Delta X = |X_{C+1,n+1} - X_{C,n}| = \left| (n+1)d \times \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R_{C+1} - (n+1)d]/R_{C+1}]}{2} \right\} - nd \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R_C - nd)/R_C]}{2} \right\} \right| \leq d \quad (4)$$

式中, $X_{C,n}$ 为轮窝处第 $C$ 层的第 $n$ 道; $X_{C+1,n+1}$ 为轮窝处第 $C+1$ 层的第 $n+1$ 道; $R_C$ 为轮窝处第 $C$ 层截面圆弧半径。

同理对横截面(见图7)分析可知,为保证结构尺寸充分须沿扫描方向向两侧各增加额外增量 $\Delta X'$ :

$$\Delta X' = |X_n - X_{n-1}| = \left| nd \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R - nd)/R]}{2} \right\} - (n-1)d \times \tan \left\{ \frac{180 - \arccos[(R - (n-1)d)/R]}{2} \right\} \right| \leq d \quad (5)$$

根据以上两试计算的长度额外增量均小于等于偏移量,实际加工中扫描方向始末端各增加 $d$ ,以保证各处结构尺寸均匀的基础上控制加工余量。

### 2.2 激光熔覆工艺参量选择

根据基础单道试验数据和形貌自愈合概念<sup>[9]</sup>,进行重复单道试验选择最佳试验参量如表1所示,其单道熔貌如图8所示,宽高比为2.2mm:0.7mm=3.14。

Table 1 Parameter of laser cladding

power/W	scanning speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	powder/(g · min <sup>-1</sup> )	defocusing amount/mm
1500	6	8	-3

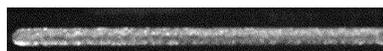


Fig. 8 Appearance of single track

实体成形为多道搭接多层堆积的累积过程,单层质量的好坏直接影响实体质量,因此保证单层质量至关重要。对单道搭接率进行研究,发现单道之间的搭接率等于33%或略小于33%时,各熔覆单道的高度基本相等,反之熔覆道之间的高度差就变的明显<sup>[9-10]</sup>。

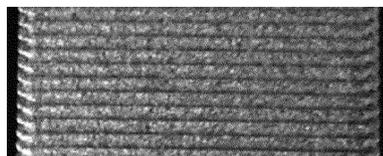


Fig. 9 Appearance of single layer

本文中选择单道偏移量 1.6mm, 即搭接量 27.3% 所得结果如图 9 所示, 表面质量良好, 在可控制范围之内。

在实体成形过程中, 提升量是另一个不可忽略的因素。提升量不均匀将导致堆积过程中侧面塌陷或凹凸不平。尤其是一次成形过程中, 提升量为一定值, 多层堆积后每层提升量误差会累计, 严重时导致堆积无法进行。将单道轮廓近似为圆弧的一部分得到提升量计算公式<sup>[11]</sup>:

$$\Delta Z = \frac{\left(\frac{4h^2 + w^2}{8h}\right)^2 \arcsin\left(\frac{4wh}{4h^2 + w^2}\right) - \frac{w(w^2 - 4h^2)}{16h}}{w} \quad (6)$$

式中,  $\Delta Z$  为 z 轴提升量;  $h$  为单道熔覆层高度。本试验按照此提升量导致离焦量逐渐增大, 编程时每熔覆 3 层增加额外提升量, 可有效控制堆积过程中边缘熔貌。

激光熔覆是一个快速融化和快速凝固的过程, 熔覆层中具有较大的残余应力, 在实体堆积过程中应力不断叠加, 导致实体中存在微裂纹(见图 10a), 严重时导致实体直接脱落(如图 11 所示)。本试验控制基体温度 300℃, 减小熔覆层温度梯度以减小残余应力<sup>[12]</sup>, 选用合适的扫描速率和较小送粉量也可有效将

降低裂纹敏感率<sup>[13]</sup>, 最终参量所得实体结合区微观组织如图 10b 所示, 冶金结合良好无微裂纹。

选定工艺参量和试验条件进行实体堆积, 其成形过程如图 12 所示。基于“光束中空, 光内送粉”技术, 粉末在准直气的作用下汇聚良好, 大部分粉末进入环形激光熔池内, 加工平稳无火花飞溅。

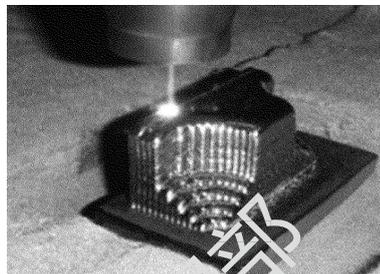


Fig. 12 Processing

成形轮齿模拟件如图 13 所示, 过渡和拐点处形貌良好侧面无塌陷, 模型共堆积 35 层, 单层搭接 15 道, 偏移量 1.6mm。按照单道实验所得数据计算理论尺寸与成形轮齿测量尺寸对比, 如表 2 所示。根据数据显示, 只需少量精加工便可达到建模尺寸, 且成形轮齿表面光滑无粘粉, 侧面无塌陷现象出现。

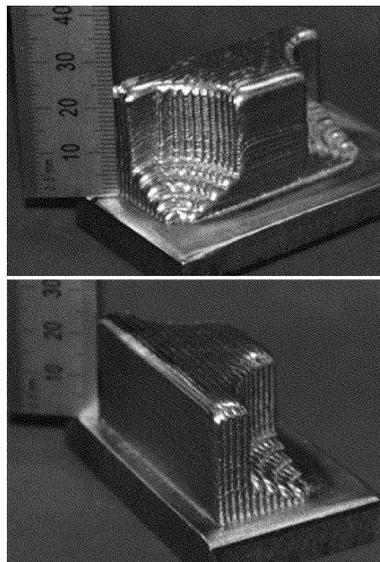


Fig. 13 Processed model

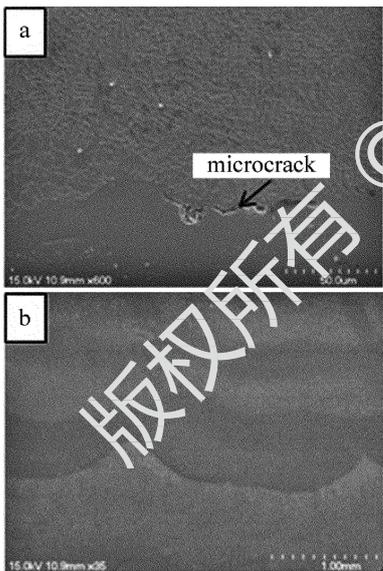


Fig. 10 Microstructure of bond zone  
a—microcrack b—no microcrack

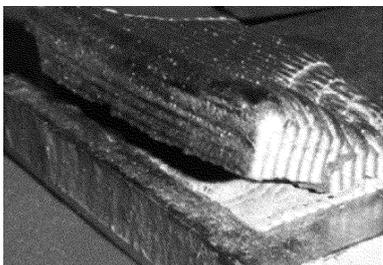


Fig. 11 Macroscopic crack

Table 2 Contrast of theoretical value and measured value

category	length/mm	width/mm	height/mm	maximum radius of circular/arcmm	the height of excessive arc/mm
theoretical value	50	24.6	24.5	14.5	7
measured value	51.38	23.8	25.7	14.1	7.28
error/%	2.76	2.59	4.9	-2.76	4

### 3 激光熔覆层组织分析

为了考察实体成形质量, 进行了组织形貌分析。

分别取图 14 中代表性部位 a, b, c, d 和 e, 共 5 块样品观察其组织。

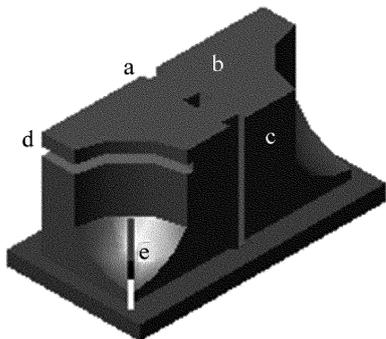


Fig. 14 Sample position

观察发现, a, b 和 c 处组织相似, 现以前端面 c 处组织为例说明。图 15a 为熔覆层与基体结合部位组织图, 沿基体方向温度梯度较大散热较快, 晶粒择优垂直于基体生长, 形成粗大柱晶。同样单道与单道之间的搭接区域晶体择优垂直于基体生长, 但由于结合区存在二次重熔区域, 两者结合面之间出现细小的胞晶, 如图 15b 所示。图 15c 中单层熔道中间位置, 随之到基体距离增加温度梯度减小, 晶粒会沿逆热流方向垂直于晶界向熔池内部择优生长<sup>[14]</sup>, 形成致密的树枝晶组织。单层熔道顶部距离基体较远, 熔池向各个方向散热均匀, 晶粒生长失去了规律性, 形成紊乱的致密组织如图 15d 所示。在层与层的堆积过程(见图 15a 和图 15b)中的组织重复出现均匀且规律。图 15e 和图 15f 分别为图 14 中的 e 处和 d 处组织, 两处组织均匀致密, 图 15f 处与空气接触面小, 所以其晶粒相比于图 15e 稍大。从图 15 可见, 所成形的异形实体各处组织均匀致密, 圆弧和拐点等特殊部位无缺陷出现, 且与基体结合良好微观组织中无微裂纹出现。

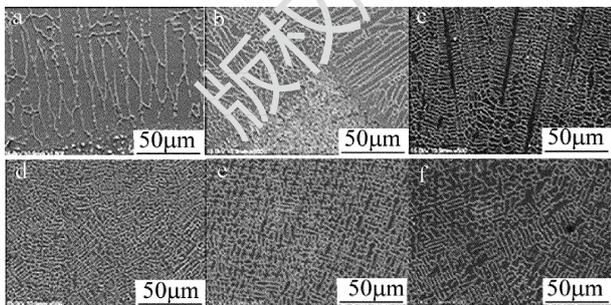


Fig. 15 Microstructure of coating

a—bond zone with the substrate b—overlap of the single track c—the middle of one layer d—the top of one layer e—camber surface f—the position of the biggest arc

#### 4 显微硬度

为测试激光熔覆成形件的硬度, 取图 14 中所示样块, 并另取扫描方向样块, 测试各部位加载载荷为 0.2kg 时的显微维氏硬度。结果表明, 熔覆层各处硬

度均匀, 波动范围小。图 14 中 d 和 e 两特殊位置处硬度均达到 570HV 以上。取纵向和横向两块样品硬度数值绘制如图 16 所示显微硬度变化曲线。从图 16a 中可以看出各个区域硬度不同, 熔覆层的硬度最高可达 590.5HV, 平均硬度可达 570.43HV, 由熔覆层至基体硬度逐渐减小, 结合区由于两种粉末形成良好的冶金结合, 其硬度处于两者之间。图 16b 中为熔覆层横向硬度变化曲线, 其硬度基本保持恒定变化, 波动较小, 这也间接证明激光熔覆层组织均匀细密。

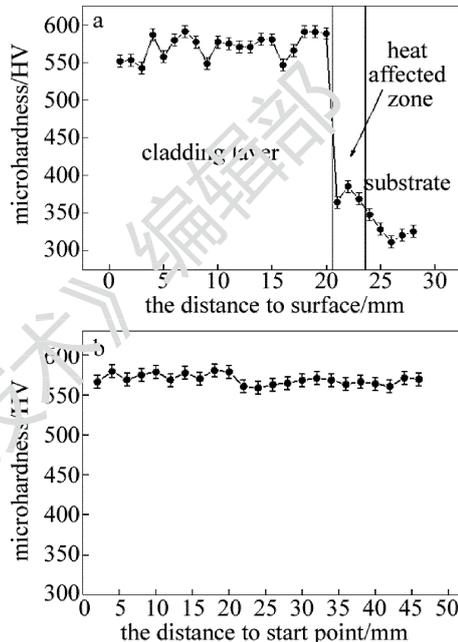


Fig. 16 Profile of microhardness

a—deposition direction b—scanning direction

硬度随着晶粒大小的减小而增大, 硬度均匀可间接证明激光熔覆组织均匀细密。本文中研究异形实体轮齿模拟件直接成形, 各处硬度均匀组织致密, 轮窝和拐点处无缺陷出现。

#### 5 结论

通过对异形实体零件成形工艺研究, 在 42CrMoV 基板上直接成形链轮轮齿模拟件, 加工无需模具直接成形, 可为企业生产节约大量生产成本, 并为后续实体零件成形提供参考。

(1) 基于光内同轴送粉技术, 通过良好的光、粉、气耦合特性, 解决了实体堆积粉末利用率和表面粘粉问题, 实体成形粉末利用率达 60% 以上。

(2) 通过工艺参量优化和提升量的精准控制, 基于 KUKA 工业机器人, 获得形状轮廓良好轮齿模拟件, 边缘无塌陷, 轮窝位置过度平缓; 采用长度额外增量法, 在保证结构尺寸的基础上, 较好地控制了加工余量, 理论值与测量值的最大误差不超过 5%。

(3)对成形实体零件进行显微组织和硬度检测,发现熔覆层与基体冶金结合良好,成形模拟件各处硬度均匀、组织致密、晶粒细小;并通过基体预热的方法成功解决了实体堆积脱落问题,观察其微观组织无气孔与微裂纹。

## 参 考 文 献

- [1] ZHONG M L, LIU W J. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11):1653-1659(in Chinese).
- [2] ZHANG D Y, WANG R Z, ZHAO J Z, *et al.* Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1):18-25(in Chinese).
- [3] YANG S, ZHONG M L, ZHANG Q M, *et al.* New techniques to rapidly manufacture metal parts with laser[J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 254-257(in Chinese).
- [4] FU G Y, LIU Y, SHI S H, *et al.* Control of process parameters for accumulate screw thin-walled part by laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding[J]. Machining and Mold, 2014, 41(2):43-46(in Chinese).
- [5] TAN H, SHEN J, LIN X, *et al.* Research on molten pool temperature in the process of laser rapid forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(7):454-462.
- [6] WU S H, SHI S H, XIAO J Y. Study on characteristics of inner ring laser powder feed molten pool of thin workpiece [J]. Applied Laser, 2013, 33(3):250-253(in Chinese).
- [7] SHI S H, FU G Y, WANG A J, *et al.* Laser forming manufacturing process and nozzle of inside-laser powder feeding: Chinese Patent, 200610116413.1 [P]. 2006-09-22(in Chinese).
- [8] YAO Q S. Laser cladding technology and performance study of direct manufacturing stainless steel parts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005:32-53(in Chinese).
- [9] HONG W D, LIN X, CHEN J, *et al.* Rapid laser solid forming dense metal parts-high performance free-form [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007:11(in Chinese).
- [10] ZHU G X, ZHANG A F, LI D C. Effect of process parameters on surface smoothness in lasercladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1):296-301(in Chinese).
- [11] ZHU G X, ZHANG A F, LI D C. The z axis study laser metal manufacturing of thin-wall parts in single stroke model [J]. Transactions of China Welding Institution, 2010, 31(3):57-60(in Chinese).
- [12] SHI J J, FU G Y. The establishment and research of the heat-stress module in laser cladding layer [J]. Journal of Soochow University, 2005, 8(4):39-41(in Chinese).
- [13] LAI Y B, LIU W J, KONG Y, *et al.* Influencing factors of residual stress of Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr alloy by laser rapid forming process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7):1526-1530(in Chinese).
- [14] WU Y, XU G, HE X L, *et al.* Research on processing of laser cladding Ti-W alloy coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8):0903008(in Chinese).