

小间隙双层斜套激光立体成形工艺研究

陆斌¹ 石拓^{2*} 石世宏¹ 方琴琴¹

¹苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

²西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

摘要 利用光内送粉技术对小间隙双层斜套的成形工艺进行了研究,采用依次独立堆积路径、法向分层、无错位堆积工艺方法成形了双层斜套。实验结果表明,该工艺可以提升激光成形双层斜套的效率,节约金属粉末,有效保证薄壁件的厚度均匀性和双层斜壁之间的间距稳定性。成形件表面形貌平整,显微组织致密均匀,无裂纹、气孔等缺陷,显微硬度分布均匀。

关键词 激光技术; 激光立体成形; 小间隙双层斜套; 光内送粉; 路径规划; 法向分层

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0902004

Research on Laser Solid Forming Technology of Double-Inclined-Walled Parts with Small Gaps

Lu Bin¹ Shi Tuo² Shi Shihong¹ Fang Qinqin¹

¹School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

²School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract By means of the technology of inside-beam powder feeding, the formation technology of double-inclined-walled parts (DIWPs) with small gaps is investigated. By using the methods of sequentially independent accumulation path, normal layering, and non-dislocation accumulation, the DIWPs are formed. The experimental results indicate that the technology proposed can increase the forming efficiency of DIWP, save metal powder, and ensure the thickness uniformity of thin-walled parts and the gap stability of the double inclined walls. The formed parts have smooth surfaces, uniform morphology, no cracks, no holes and no other defects, and uniform microhardness distributions.

Key words laser technique; laser solid forming; double-inclined-walled parts with small gaps; inside-beam powder feeding; path planning; normal layering

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

激光立体成形是一种先进的快速加工技术,该技术摒弃了模具成本高、周期长等缺点,保留了传统工艺生产制造高致密度零件的优势,在汽车、通信、航空航天等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。

工业上一些保温、冷却用构件,例如带冷却流道的空心涡轮叶片、具有隔热作用的机舱等,均具有双层薄壁特征的结构。激光立体成形在制造薄壁零件方面已经表现出突出优势,但现有研究大多集中在单个薄壁零件的激光立体成形,对双层薄壁零件的熔覆堆积成形的研究较少,这极大限制了激光立体成形技术的应用。拓展激光立体成形技术的应用空间是当前亟需解决的课题。

采用传统工艺难以制造双层薄壁零件,而选区激光熔化(SLM)技术则存在制造尺寸受限制、设备成本

收稿日期: 2016-04-08; 收到修改稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61475107)、国家重点研发计划(2016YFB1100300)

作者简介: 陆斌(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: 182806850@qq.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,博士,教授,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: shishihong@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tuo.shi@qq.com

高等缺点。本文基于国内外对薄壁零件激光立体成形的研究现状,研究了激光立体成形工艺,制造了双层间距小于1 mm的小间隙双层斜壁零件^[3-12]。利用光内送粉激光熔覆光头进行实验,解决了成形双层斜套的路径规划和保持小间隙双层斜壁层的间距稳定性问题。

2 实验材料及设备

2.1 基体与熔覆材料

实验采用304不锈钢基体,直径为40 mm,厚度为10 mm。熔覆材料采用304不锈钢粉末,颗粒直径为38~48 μm,化学成分见表1。

表1 不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of stainless powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
Content	≤0.15	≤0.8	≤0.2	17.5~18.5	9.0~10.0	Bal.

2.2 光内送粉激光熔覆光头

实验采用了苏州大学激光制造技术研究所自主研发的光内送粉激光熔覆光头^[13],光内同轴送粉喷头的示意图如图1所示。中空环形激光由单根光束经由特殊的光学镜组反射而成,在空间上呈环锥形;粉管置于环锥形激光轴线上,用来实现光内同轴送粉,且在不同的激光离焦量和光头倾斜角度下均能保持良好的光粉耦合性。在不同的光头倾斜角度下,粉束的状态如图2所示。由图可见,在较大的光头倾斜角度下粉束依然保持挺直,使倾斜堆积成为可能。

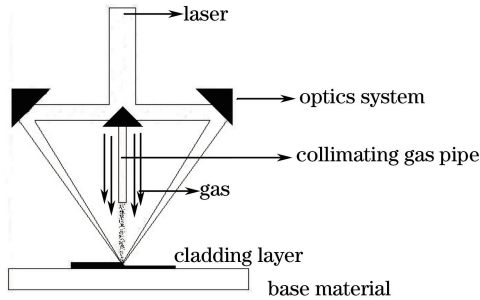


图1 光内同轴送粉喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nozzles for coaxial inside-beam powder feeding

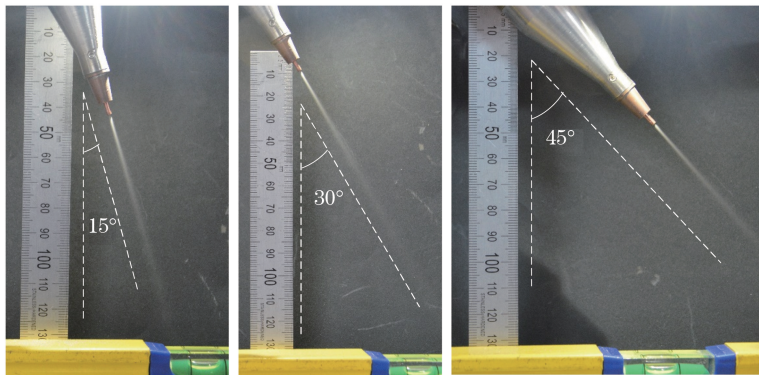


图2 光头在不同倾斜角度下粉束状态

Fig. 2 Powder beam status for nozzles under different oblique angles

3 实验方法

3.1 建立零件模型

小间隙双层斜套模型如图3所示,该零构件为一冷却水套,由下至上分别由实体圆环、底部双层直壁圆筒、双层斜壁锥面、顶部双层直壁圆筒组成。从图3可以看出双层斜壁锥面的技术要求,斜壁倾斜角度为21.9°,内

层薄壁最小直径为 24 mm,内层薄壁最大直径为 90 mm,斜壁长度为 88.5 mm,双层薄壁间隙为 1 mm。

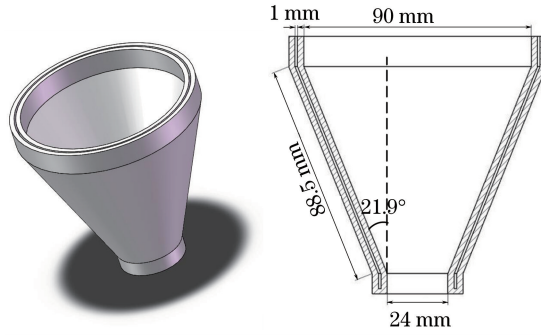


图 3 小间隙双层斜套模型

Fig. 3 Model of double-inclined-walled parts with small gaps

3.2 依次独立堆积工艺

双层斜套分层轮廓非一笔画结构,需光头多次跳转才能完成单层熔覆。采用传统切片分层、逐层堆积的扫描方式,光头在每层截面熔覆时均需多次跳转,成形效率低,且光头跳转时产生极大的粉末浪费。采用独立成形一层薄壁后再成形另一层,会产生激光与已成形薄壁之间的干涉问题。因此,需要提出一种既能提高成形效率又能避免激光干涉的工艺。

激光熔覆工艺参数见表 2,熔覆层宽度为 2.20 mm,高度为 0.32 mm,熔覆堆积光头提升量 ΔZ 为 0.2142 mm。

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Process parameters of laser cladding

Laser power / W	Powder mass flow rate / (g·min ⁻¹)	Laser defocusing amount / mm	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Collimating gas speed / (m·s ⁻¹)
800	8	-4	10	4

进行路径规划时,传统方法采用切片分层、逐层堆积的扫描方式,逐层扫描路径如图 4 所示,其中 P 、 Q 分别为内外层薄壁激光熔覆起止位置。具体过程如下:1) 熔覆内层薄壁;2) 跳转光头至外层薄壁位置;3) 熔覆外层薄壁;4) 跳转光头至内层薄壁位置。

重复上述每层熔覆过程,提升每层熔覆层的生长高度,逐层堆积直至达到设计要求。由图 4 可以看出,每层截面熔覆都必须经历两次光头的跳转。

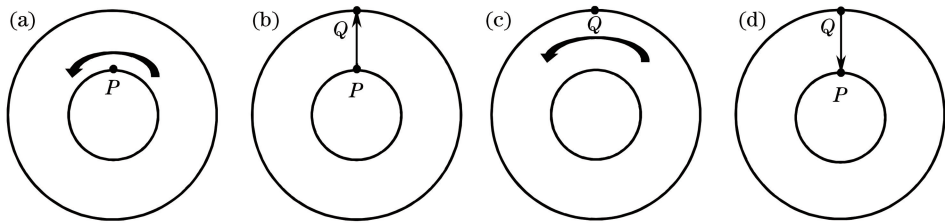


图 4 逐层扫描路径示意图

Fig. 4 Schematic diagram of layer by layer scanning paths

该零件为内外双层薄壁零件,其间无连接结构,可以看作是二个独立的薄壁零件,对其依次进行独立堆积成形,直至满足设计要求。依次独立堆积的扫描路径如图 5 所示,其中 P_{N+1} 为第 $N+1$ 层的 P 点位置, Q_{2N+1} 为第 $2N+1$ 层的 Q 点位置。具体过程如下:1) 堆积熔覆 N 层内层薄壁;2) 光头跳转至外层薄壁位置;3) 堆积熔覆 $2N$ 层外层薄壁;4) 光头跳转至内层薄壁位置;5) 堆积熔覆 $2N$ 层内层薄壁。重复步骤 2)~5),且始终保持内外层薄壁高度差为 N 层堆积高度,直至零件成形。

由依次独立堆积过程可以看出,内外层薄壁零件始终相差 N 层高度,即相当于每堆积 N 层只需要变换光头位置一次,极大地减少了光头跳转次数,有效地节约粉末、提高加工效率,这种激光扫描路径规划的关键在于 N 值的设定。

一个独立堆积周期起始状态示意图如图 6 所示,中空激光外圆锥的半圆锥角为 15.6° ,其中 ΔH 表示 N

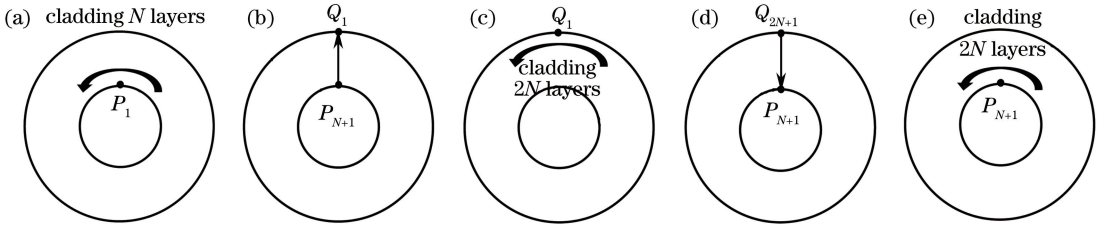


图 5 依次独立堆积扫描路径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of accumulative scanning paths in turn independently

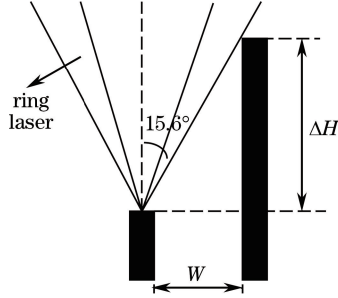


图 6 一个独立堆积周期起始状态示意图

Fig. 6 Schematic diagram of initial state in an independent accumulative period

层熔覆层总高度、 W 表示双层间隙宽度。

根据设计要求,双层间隙的宽度 $W=1\text{ mm}$,内外层高度差 ΔH 的极限值

$$\Delta H_{\max} = \frac{W}{\tan 15.6^\circ} = 3.58\text{ mm}, \quad (1)$$

根据理想的光头提升量 $\Delta Z=0.2142\text{ mm}$,计算独立堆积层数 N 的极限值为

$$N_{\max} = \frac{\Delta H_{\max}}{\Delta Z} = 16, \quad (2)$$

即当内外层堆积层数差大于 16 时,已成形零件会遮挡部分环形激光。由于激光存在衍射现象,因此不能取极限值 $N_{\max}=16$ 。实际层数 N 的计算公式为

$$N = \frac{\Delta H_{\max}}{n}, \quad (3)$$

式中 n 为安全系数。研究发现,当 $N=10$ 时,成形过程不会发生激光被遮挡现象。对于光外送粉的光头,使用依次独立堆积扫描的方法会使部分粉束被已成形零件遮挡,其工艺参数的确定可以参考此处。

3.3 法向分层、无错位堆积工艺

利用激光立体成形工艺制造斜套时,通常采用水平分层、层间错位的方法进行堆积,错位的熔池依靠表面张力存在。水平分层堆积示意图如图 7 所示,其中 D 、 H 分别为熔覆层的宽度和高度。研究表明,倾斜角

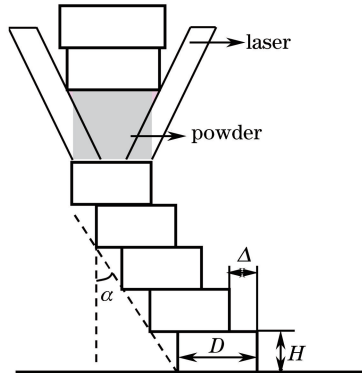


图 7 水平分层堆积示意图

Fig. 7 Schematic diagram of horizontal layering accumulation

α 的值受偏移量 Δ 的影响,当 Δ 过大时,斜壁会因为熔覆层悬臂端产生的塌陷而不能连续成形^[14]。根据尚晓峰等^[14]的研究,采用水平分层堆积的方法具有极限倾斜角,若倾斜的角度超过极限倾斜角,会导致熔覆层塌陷;由于台阶效应,采用此方法成形的斜壁的表面粗糙度随偏移量 Δ 的增大而增大。

利用光头在不同离焦量和倾斜角度下仍具有良好的光粉耦合性的特点,采用法向分层、无错位堆积工艺成形斜套,如图 8 所示。改变光头倾斜角度,使光束、粉束的轴线方向始终垂直于熔覆层表面;切向保护气抑制了熔池的流淌,熔池基本不存在悬臂端,可以实现大角度倾斜薄壁零件的激光立体成形;相邻熔覆层全覆盖无错位,消除了台阶效应,表面粗糙度较小。研究表明,当 $0 \leq \alpha \leq 81^\circ$ 时,成形的薄壁零件表面平整光滑,无台阶效应^[15]。

成形小间隙双层斜套时,法向分层、无错位堆积的成形工艺具有保证双层间隙精度的优点。采用法向分层、无错位堆积工艺成形双层斜套,如图 9 所示。由图可以看出,法向分层、无错位堆积的工艺方法消除了台阶效应,双层斜壁层的间距主要取决于双层薄壁的壁厚精度,因此法向分层、无错位堆积的工艺方法有助于保持双层零件间隙的稳定性。

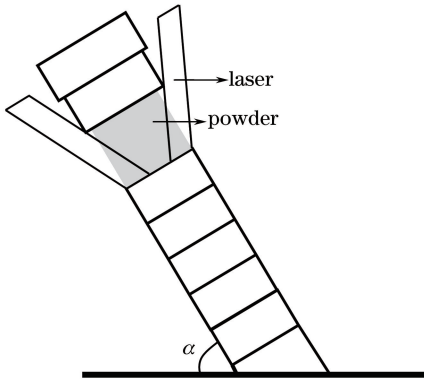


图 8 法向分层堆积示意图

Fig. 8 Schematic diagram of normal layering accumulation

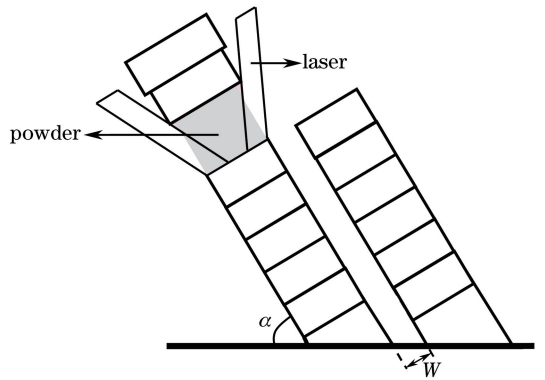


图 9 法向分层堆积双层斜壁示意图

Fig. 9 Schematic diagram of double-inclined-walls by normal layering accumulation

基于依次独立堆积工艺,采用法向分层、无错位堆积工艺进行小间隙双层斜套激光立体成形,加工过程如图 10 所示。带双层斜壁结构的成形件如图 11 所示。



图 10 小间隙双层斜套加工过程

Fig. 10 Processing of double-inclined-walls parts with small gaps



图 11 带双层斜壁结构的成形件

Fig. 11 Formed parts with double-inclined-walled structure

4 结果与分析

带双层斜壁结构的成形件表面形貌良好,无明显裂纹缺陷,无粘粉。采用便携式粗糙度仪(TR200 型,北京时代三丰科技有限公司,中国)检测表面粗糙度,取样长度为 0.8 mm,测得粗糙度值 $R_a = 20.8 \mu\text{m}$ 。

带斜壁双层结构冷却水套成形件剖面如图 12 所示。沿斜壁建立坐标轴 τ ,用来表示离斜壁堆积起始点位置距离为 τ 的部位。成形件尺寸偏差见表 3,由表可以看出,斜壁长度、倾斜角度、内层最小内径、内层最大内径的尺寸偏差率都不超过 1.11%。

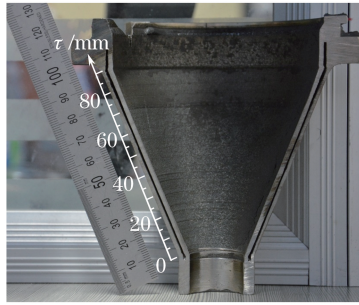


图 12 成形件剖面

Fig. 12 Section of formed parts

表 3 成形件尺寸偏差

Table 3 Size deviation of formed parts

	Length of inclined wall	Inclined angular	Maximum diameter of inside wall	Minimum diameter of inside wall
Formed parts	89.2 mm	22.0°	91.0 mm	24.2 mm
Designed parts	88.5 mm	21.9°	90 mm	24 mm
Deviation	0.79%	0.46%	1.11%	0.83%

成形件模型斜壁厚度为 2.2 mm, 双层斜壁层的间距为 1 mm。进行斜壁厚度及双层间隙的测量, 测得的 τ 轴不同坐标位置处的斜壁厚度如图 13 所示。由图可知, 斜壁厚度尺寸大部分接近 2.2 mm, 最大偏差为 ± 0.15 mm, 偏差率为 6.82%。 τ 轴不同坐标位置处的双层层间间距如图 14 所示, 由图可以看出, 大部分位置的双层间隙均在 0.90~0.95 mm 范围内。由上述测量数据可知, 采用法向分层、无错位堆积工艺成形带双层斜壁结构的零件, 其薄壁厚度和双层薄壁之间的间距较为稳定、均匀。

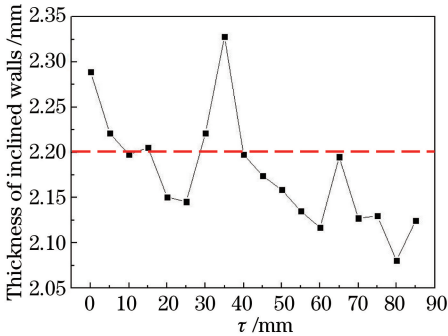


图 13 不同位置处的斜壁厚度

Fig. 13 Thickness of inclined walls at different locations

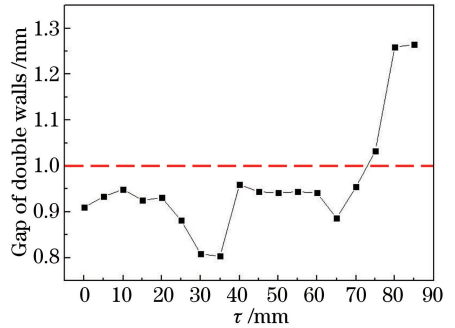


图 14 不同位置处的层间间距

Fig. 14 Gap of double walls at different locations

对成形件进行随机取样, 制备金相试样, 并对金相试样进行打磨、抛光、腐蚀处理。在斜壁 $\tau=50$ mm 的位置处取样, 并制备得到图 15 所示的金相试样, 由图可以看出, 金相宏观无裂纹、气孔等缺陷。激光立体成形技术是急热急冷的增材制造技术, 较大的温度梯度使得晶粒细小, 斜壁显微组织如图 16 所示, 金相组织以树枝晶为主, 树枝晶的生长方向即为成形件的散热方向, 晶粒致密均匀、无气孔和裂纹等缺陷。

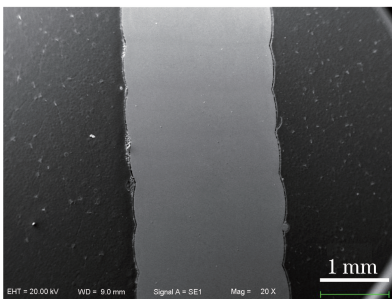


图 15 成形件金相试样

Fig. 15 Metallographic specimen of formed parts

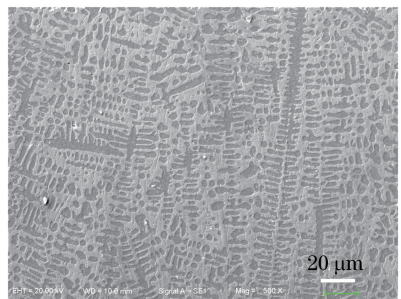


图 16 成形件显微组织

Fig. 16 Microstructure of formed parts

由于熔池冷凝时具有较大的温度梯度,得到的金相组织晶粒细小,组织致密,具有较大的硬度。对 τ 轴不同坐标位置处随机取样进行硬度分析,得出不同位置处显微硬度分布,如图 17 所示。由图可知,成形件沿 τ 轴方向硬度值在 663~733 HV 之间,显微硬度略微波动但整体分布较为平稳。

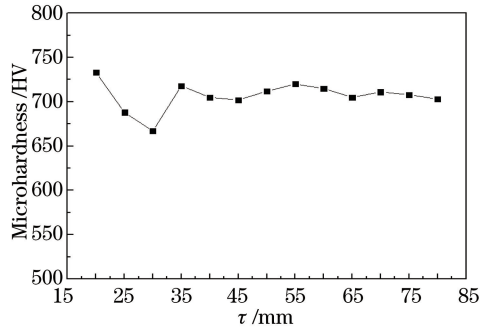


图 17 不同位置处的显微硬度

Fig. 17 Microhardness at different locations

为检测成形件的力学性能,随机取样进行拉伸实验,双层斜壁成形件标准试样如图 18 所示。其中,图 18(a)为过线切割获得的成形件试样毛坯;为了消除表面粗糙度造成的应力集中对检测结果的影响,对毛坯进行打磨、抛光处理,处理后的标准试样如图 18(b)所示。使用卡尺对抛光后的试样进行测量,拉伸截面宽度为 1.88 mm,长度为 2.80 mm,截面积为 5.264 mm^2 。

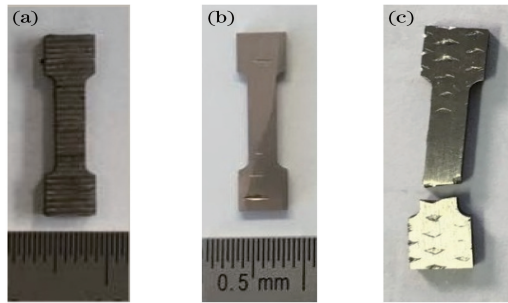


图 18 成形件拉伸实验的标准试样。(a) 毛坯;(b) 抛光后;(c) 拉伸后断裂

Fig. 18 Standard specimens of formed parts in stretch tests. (a) Workblank; (b) after polishing; (c) fracture after stretch

对试样进行拉伸实验,拉伸速度为 0.2 mm/s,随着应变的增加,试样最终发生脆性断裂,断裂后的试样如图 18(c)所示。小间隙双层斜壁成形件标准试样应力-应变曲线如图 19 所示,由曲线图可知,成形件的抗拉强度约为 485.6 MPa。采用激光立体成形技术制造的小间隙双层斜套零件抗拉强度与锻件相当^[16]。

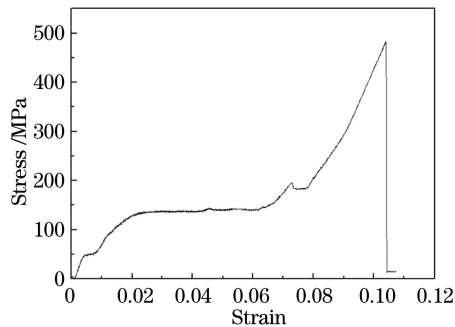


图 19 成形件应力-应变曲线

Fig. 19 Stress-strain curve of formed parts

5 结 论

利用光内送粉的激光熔覆光头对小间隙双层斜套的成形工艺进行了研究,采用依次独立堆积的工艺方

法成形小间隙双层斜套,提高了双层薄壁零件的制造效率,节约了金属粉末。

采用法向分层、无错位堆积工艺对双层斜套进行激光立体成形,消除了由传统逐层熔覆堆积成形斜套所产生的台阶效应,达到了保持双层斜壁层的间距稳定性和斜套壁厚度均匀性的目的。

采用依次独立堆积和法向分层、无错位堆积工艺得到的小间隙双层斜套成形件,表面形貌平整,显微组织致密均匀,无气孔、裂纹等缺陷,显微硬度分布均匀。

参 考 文 献

- 1 Zhang Kai, Liu Weijun, Shang Xiaofeng, *et al.* Research on technology of directly laser rapid manufacturing metal part [J]. *Tool Engineering*, 2005, 39(5): 3-9.
张 凯, 刘伟军, 尚晓峰, 等. 金属零件激光直接快速成形技术的研究(上)——国外篇[J]. *工具技术*, 2005, 39(5): 3-9.
- 2 Zhang Kai, Liu Weijun, Shang Xiaofeng, *et al.* Research on technology of directly laser rapid manufacturing metal part [J]. *Tool Engineering*, 2005, 39(6): 3-5.
张 凯, 刘伟军, 尚晓峰, 等. 金属零件激光直接快速成形技术的研究(下)——国内篇[J]. *工具技术*, 2005, 39(6): 3-5.
- 3 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.* Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103006.
王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103006.
- 4 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan, *et al.* Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(10): 53-57.
杨洗陈, 李会山, 王云山, 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(10): 53-57.
- 5 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2780-2798
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2780-2798.
- 6 Yip M W, Barnes S. CO₂ laser cladding of mild steel using iron based powder and silicon carbide particles[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 748: 269-272.
- 7 Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 141-152.
- 8 Zhao H, Xue H L, Ji H T. Research on the modernization of the equipment manufacturing industry[C]. *Proceedings of the 2012 3rd International Conference on E-Business and E-Government*, 2012, 2: 1001-1004.
- 9 Liu F G, Lin X, Song M H, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser solid formed 300M steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 621: 35-41.
- 10 Gao W Y, Zhao S S, Liu F L, *et al.* Effect of defocus manner on laser cladding of Fe-based alloy powder[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 248: 54-62.
- 11 Jantunen E, Emmanouilidis C, Arnaiz A, *et al.* E-maintenance: Trends, challenges and opportunities for modern industry[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 453-458.
- 12 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 and Manufacture*, 2010, 50(1): 1-8.
- 13 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.* Laser forming manufacturing process and nozzle of inside-laser powder feeding: 200610116413.1[P]. 2006-09-22.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 200610116413.1[P]. 2006-09-22.
- 14 Shang Xiaofeng, Liu Weijun, Wang Wei, *et al.* Slope limit of part made in metal powder laser shaping [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(8): 97-100.
尚晓峰, 刘伟军, 王 维, 等. 金属粉末激光成形零件倾斜极限[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(8): 97-100.
- 15 Shi Tuo, Wang Yiqing, Lu Bingheng, *et al.* Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10):1003003.
石 拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003003.
- 16 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.* Laser solid forming of high performance fast free forming dense metal parts [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1-2.
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: 1-2.