

激光光内送粉仰面熔覆工艺研究及优化

史建军¹, 石拓^{1*}, 石世宏¹, 朱刚贤¹, 杨轶¹, 傅戈雁¹, 鹿霖^{1,2}

- (1. 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021;
2. 苏州工业职业技术学院 机电工程系, 江苏 苏州 215104)

摘要: 利用激光光内送粉熔覆技术,在与水平方向成大于 90°的仰面基体下表面进行了单道熔覆实验研究。分析了仰角、保护气压力与光粉耦合处粉束直径之间的关系;研究了仰面姿态下熔覆层的宽度、高度以及熔池的流淌下垂趋势受激光功率、扫描速度的影响规律。研究发现,光粉耦合处粉束直径随仰角的增大而变大,随保护气压力的增大而减小。基体仰面与水平姿态下,工艺参数对熔覆层的宽度、高度的影响规律保持了较好的一致性;熔池在重力作用下,激光功率、扫描速度以及仰角的变化对熔覆层高度的影响更加显著;熔道顶点的偏移随激光功率的减小、扫描速度的增大和仰角的增大而逐渐减小。保持送粉量和离焦量不变,利用优化后的激光功率、扫描速度,以及保护气压力,获得了最大仰角达 150°、且具有较好尺寸精度和组织性能的激光熔覆立体成形件。

关键词: 仰面熔覆; 光内送粉; 偏移量; 保护气; 工艺优化

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0306005

Process study and optimization of upward cladding by laser inside powder feeding

Shi Jianjun¹, Shi Tuo^{1*}, Shi Shihong¹, Zhu Gangxian¹, Yang Shi¹, Fu Geyan¹, Lu Lin^{1,2}

- (1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China)

Abstract: The cladding surface of the substrate was fixed at an upward angle which was greater than 90° in relative with the horizontal surface, where the single cladding tracks were formed by the laser inside powder feeding technology. The relationship among the tilted angle of the powder feeding nozzle, the pressure of the protection air and the powder spot diameter at the working plane were studied based on the experimental data. The effect of laser power and scanning velocity on the height and width of the tracks was analyzed, while the powder feeding rate and defocus amount kept unchanged. The liquid molten pool tended to drop by the drag force of its gravity, and the height peak offset was also studied. With the increase of the titled upward angle, the powder spot size at the working plane became larger, while the pressure of the protection air did the other way. For upward cladding, the effect of process parameters on the width and height shows a good accordance with the horizontal cladding. However, the

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100301); 国家自然科学基金(51675359); 苏州市科技计划(SYG201541)

作者简介: 史建军(1981-), 男, 博士生, 主要从事激光快速成形工艺与机理方面的研究。Email: sdj004@hotmail.com

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

通讯作者: 石拓(1984-), 男, 副研究员, 主要从事激光快速成形方面的研究。Email: shituo@suda.edu.cn

height of the cladding layer was dramatically affected by the laser power, scanning speed and the tilted angle. The peak height offset of the molten pool got smaller with the decrease of the power and increase of the scanning speed and tilted angle. By using the optimized process parameters and the proper protection air pressure, a 3D part with the maximum titled angle of 150° was formed which also had the good feature accuracy and fine microstructure.

Key words: upward cladding; inside powder feeding; peak offset; protection air; process optimization

0 引言

激光熔覆技术,如激光修复、激光表面涂覆改性、激光直接成形等,在航空航天、新型武器装备中的高性能特种零件,民用工业中的新型汽车零件、模具,医学器官、组织等领域都有极好的应用前景^[1-5]。传统的激光熔覆是依靠工作台在水平方向上的运动和喷头在垂直方向上的移动完成的,但是针对形状较复杂零件的成形,或者移动不便的大型零部件的修复,这种方式已经很难实现。理论上,激光选区融化(SLM)技术可以实现各种复杂形状的制造,但是难以保证大角度悬垂结构的成形精度,甚至无法成形^[6]。近年来,国内外学者展开了对新型熔覆喷头的研发,以及喷头在成形过程中的三维运动的研究来尝试解决这一问题。Paul C P 等^[7]研究了在垂直表面上的激光快速制造技术,建立了在立面时熔覆层尺寸及熔道相对中心位置偏移距离的理论模型,完成了在空心圆柱体表面上的立面激光熔覆实验。邓志强^[8]等通过变姿态径向搭接法获得了倾角为 60°的悬垂无支撑圆弧实体件。Nowotny 等^[9]和杨洗陈等^[10]分别利用机器人辅助三维成形系统,实现了喷头小角度偏摆的三维熔覆。孟伟栋等^[11]和石拓^[12]等依靠喷头的空间三维运动成形了最大倾斜角分别为 90°的变径薄壁回转件和 81°的悬垂弯曲薄壁件。

由此可见,目前的研究大部分是基于基板小角度倾斜或垂直位置时所进行的激光熔覆。针对基板倾斜角度大于 90°的仰面熔覆,由于重力的作用,熔池和粉末的喷射状态都将发生变化,工艺条件与熔覆层质量之间的关系也随之变化,而这方面的研究还很少。文中利用激光光内送粉熔覆技术,调整基板位置使其处于仰面姿态,并在其下表面进行单道熔

覆实验;分析仰面姿态下光粉耦合处粉束直径的变化与控制方法;研究仰面姿态下,激光功率、扫描速度等对熔覆层形貌的影响规律。最终对各实验参数和方法进行优化,以获得稳定的仰面熔覆层,为复杂形状零件的修复和成形提供研究基础。

1 实验材料和方法

实验选用 304# 不锈钢为基体材料,尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm。实验前,首先使用粗砂纸打磨基体表面,再用丙酮以及酒精对待加工表面进行清洗、晾干处理,以清除表面的锈蚀以及油污,满足激光熔覆的需要。熔覆材料选用 75~106 μm 的 Fe313 合金粉末。基体及粉末材料成分如表 1 所示。

表 1 材料化学成分表(单位:wt%)

Tab.1 Chemical composition of material (Unit:wt%)

Elements	#304	Fe313
C	≤0.07	≈0.1
Si	≤1.0	2.5-3.5
Mn	≤2.0	-
Cr	17.0-19.0	13-17
B	-	0.5-1.5
P	≤0.035	-
Ni	8.0-11.0	-
S	≤0.03	-
Fe	Bal.	Bal.

实验系统由 IPG 公司 YLS-2000-CT 光纤激光器、KUKA 机器人、空气压缩机组和 GTV PF2/2 型送粉器组成。文中选用如图 1 所示的中空激光光内送粉喷头^[13],该喷头采用圆锥-圆环双反射镜光路,

将入射的实心圆形激光束进行变换后,在成形表面上形成中空环形激光束。由送粉器输送的载气粉末从环形激光中间的粉嘴中喷出,且与中空激光保持同轴,粉嘴外侧有环绕压缩保护气体(氮气)将粉末包裹其中,形成良好的束性。该喷头的单光路、单粉束结构实现了光、气、粉的同轴,能够保证光、粉在焦点位置的准确耦合。

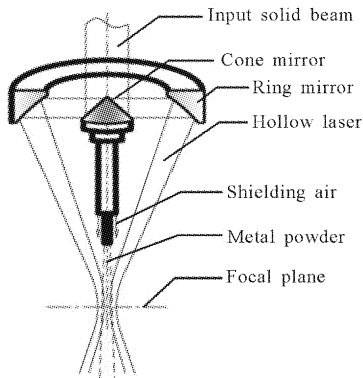


图 1 激光光内送粉喷头原理图

Fig.1 Schematic of laser nozzle of inside powder feeding

文中采用平口钳夹具+可调式转盘的组合方式直接获得处于仰面姿态的基体下表面:首先将基体固定在平口钳夹具上,然后将此组合体固定在角度可调的转盘工作台上,通过调节工作台姿态即可获得不同的仰角 θ ,如图 2 所示。实验过程中,粉末通过气流从送粉器输送到喷头中,送粉器的调节参数与

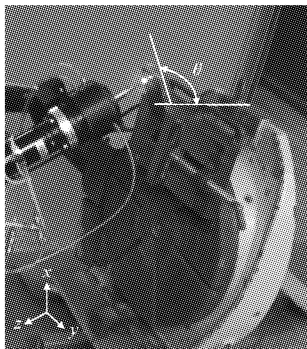


图 2 仰面单道熔覆实验示意图

Fig.2 Experiment schematic of single cladding tracks with upward angle

喷头中实际送粉量的变化存在较长的时间差。熔覆层的宽度主要取决于激光光斑的大小,而中空激光光斑由离焦量决定,通过控制喷头在熔覆层生长方向上的提升量可以获得稳定的离焦量。因此,在实际

的成形过程中,送粉量和离焦量通常保持不变。文中选取送粉量为 8 g/min ,离焦量为 -3 mm ,光斑直径 3 mm ,以基体水平放置时的激光光内送粉熔覆实验研究为基础,确定仰面熔覆工艺参数的优化区间为:激光功率 $400\sim 800 \text{ W}$,扫描速度 $3\sim 6 \text{ mm/s}$ 。在不同工艺参数组合下,沿 y 方向进行仰面单道熔覆实验,单道熔覆层长度为 45 mm 。实验完成后,将熔覆层沿扫描方向垂直切开,并对其横截面形貌进行观测和分析。

2 结果与讨论

2.1 粉末汇聚性

当基体处于水平位置,受光内同轴送粉喷头的单粉束结构和保护气共同作用,粉末在距离基体表面一定距离的工作范围内挺直,发散很小^[14]。但当基体处于仰面姿态时,金属粉末受重力作用,且在粉末喷射方向的分力与保护气作用方向相反,这削弱了保护气的准直作用,因此粉末汇聚性及喷射轨迹都将发生变化,影响进入熔池的有效粉末量以及成形质量。因此,保护气压力是仰面熔覆过程中一个非常重要的工艺条件。

以基体水平放置时的保护气压力(0.20 bar)为基础,调整仰角从 90° 每隔 10° 变化到 150° 进行送粉实验,并使用高速相机拍摄各个仰角下粉末汇聚状态图(黑色背景)。通过图像处理软件分析粉嘴出口处及距粉嘴出口 18 mm (粉末与中空光斑的耦合位置)处的灰度值,如图 3 所示;在实验条件下,粉嘴出口处的粉末直径约为 2 mm ,黑色背景灰度值取 25 。将纵坐标定义为灰度值,横坐标定义为粉末直径,获得如图 4 所示粉末直径方向上各点处灰度值曲线。通过灰度曲线所覆盖横坐标的范围可得到光粉耦合处的粉末直径。图 5 所示为仰角从 90° 变化到 150° 的过程中,各光粉耦合处粉末直径的变化曲线,可以看出,粉末直径随仰角的增大而增大,变化范围在 $2\sim 5 \text{ mm}$ 之间。

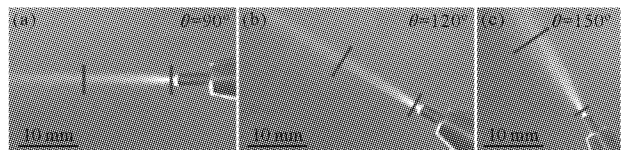


图 3 不同角度下粉末汇聚性(保护气压力为 0.20 bar)

Fig.3 Powder convergence at different tilted angles (with air pressure 0.20 bar)

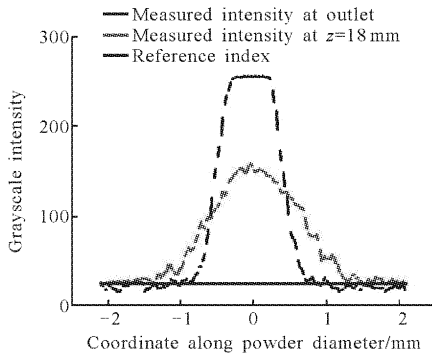


图 4 灰度值与粉束直径转换关系

Fig.4 Transformation relationship between grayscale and powder diameter

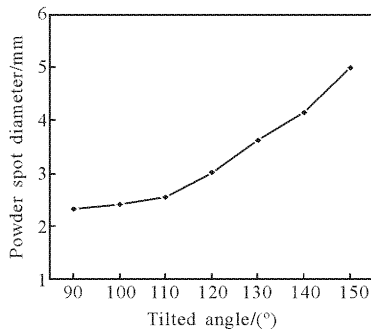


图 5 不同仰角下的粉束直径

Fig.5 Powder spot diameter at different tilted angles

研究粉束发散最严重的情况,即仰角为 150°时,光粉耦合处粉束直径与保护气压力之间的关系。采用与图 4 相同的方法,通过分析不同压力下粉束图像的灰度值,获得光粉耦合处粉束直径的大小,如图 6

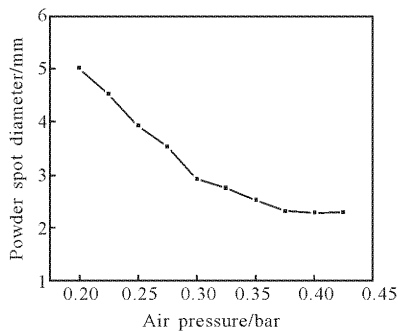


图 6 仰角 150°时保护气压力与粉束直径之间的关系

Fig.6 Relationship between powder spot diameter and air pressure at 150°

所示。随着保护气压力的增大,粉束直径逐渐减小,粉末汇聚性得到了明显的改善,但当保护气压力大于 0.38 bar 时,粉束直径维持在 2.2 mm 基本不再变

化。因此,在仰面熔覆角度下,增大保护气压力可以有效提高粉束的汇聚性,但压力过大会吹散液态熔池,进而影响熔覆层的成形质量。为增加熔覆过程中粉末的使用效率,使用光内送粉方法,粉束直径应小于光斑直径^[15]。由图 6 可知,仰角 150°时,粉束直径 3 mm 所对应的保护气压力为 0.30 bar。由图 5 可知,光粉耦合处粉束直径随仰角减小而减小。为提高实验操作的稳定性,在仰面熔覆过程中保持压力值不变,粉束汇聚性如图 7 所示。

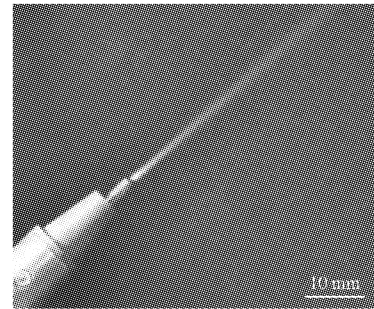


图 7 保护气压力 0.30 bar 下仰面粉束汇聚性效果

Fig.7 Powder convergency with air pressure 0.30 bar

2.2 熔覆层形貌

2.2.1 熔池受力分析

在激光光内送粉熔覆过程中,假设某一位置处的基体和金属粉末在 $t_1=0$ 时刻开始受激光辐照作用,并由固态转变为液态而形成熔池,此时熔池受到重力 G 、黏力 F_μ 、表面张力 F_γ 和保护气压力 F_p 的共同作用。当基体为水平放置时,重力 G 垂直于熔池表面并由基体完全支撑,因此熔池轮廓始终与熔道中心线呈对称分布。当基体处于与水平面夹角为 $\theta \in [90^\circ, 150^\circ]$ 的仰面姿态时,重力 G 方向保持竖直向下,并失去了基体的支撑作用力,熔池“倒吸”在基体下表面,重力对液态熔池产生“拉伸”作用,如图 8(a)所示。直至 $t_2=D/v$ (D 为光斑直径, v 为扫描速度)时刻,即激光完全离开,熔池由液态凝固成具有一定宽度 W 、高度 H 和顶点偏移量为 Δx 的固态熔道,如图 8(b)所示。

根据图 8(a),沿 x 方向对熔池进行受力分析可得:

$$G \sin \theta = F_\mu + F_\gamma + F_{ps} \quad (1)$$

式中: F_μ 为由于熔池有沿 x 方向流淌趋势而产生的粘性剪力; F_γ 和 F_{ps} 分别为作用在熔池表面上的表

面张力和保护气压力在 x 方向上的分力。根据参考文献[5]对粘力和表面张力的定义,公式(1)可转换成:

$$\rho_L \cdot z \sin\theta = \mu_L \frac{\partial U(z)}{\partial z} + \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial s} + p \quad (2)$$

$$U(z) = \frac{\Delta x}{D} v \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)中,并在等式两边积分可得熔道顶点位置的沿 x 方向的偏移量为:

$$\Delta x = \frac{\Delta t}{\mu_L} \left[\rho_L \cdot z \frac{H^2}{2} \sin\theta - \gamma_1 D_{TS} H - p H \right] \quad (4)$$

式中: ρ_L 为熔池内液态金属材料的密度, kg/mm^3 ; θ 为基体表面与水平面之间的夹角, $\theta \in [90^\circ, 150^\circ]$; D 为激光光斑直径, mm ; Δt 为激光与熔池的作用时间, s ; μ_L 为熔池动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; H 为熔覆层高度, mm ; $\gamma_1 D_{TS}$ 为表面张力分量; p 为熔池表面所受保护气压力, MPa 。

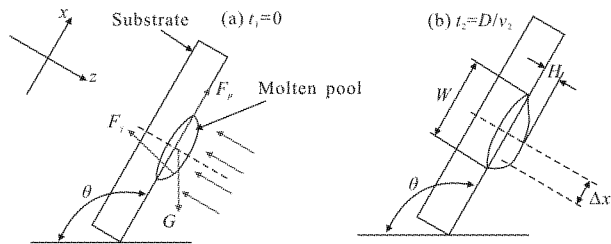


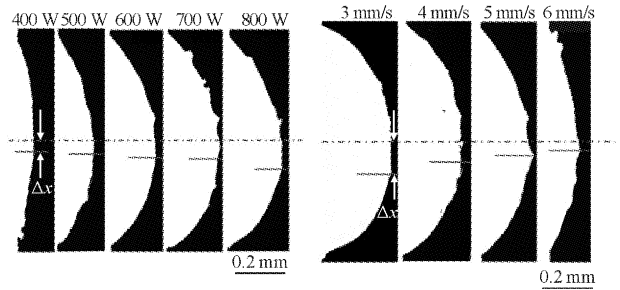
图 8 仰面姿态下熔池受力分析原理图

Fig.8 Principle diagram of force analysis of upward cladding molten pool

由公式(4)可知,仰面熔覆时,熔道顶点偏移量与熔池的动力粘度 μ_L 及熔池表面受到的压力成反比;与激光对熔池的作用时间成正比;在 $\theta \in [90^\circ, 180^\circ]$ 时,与 θ 成反比。

2.2.2 工艺参数对单道熔覆层形貌的影响

文中通过实验的方法,在各个仰面姿态下,改变激光功率和扫描速度获得不同的单道熔覆层,并对横截面轮廓进行测量和分析。为提高测量精度,文中通过图形软件对熔覆层截面进行黑白化处理,其中白色部分为基体和熔道,黑色部分为镶样材料。如图 9 所示分别为仰角 150° 时不同功率和扫描速度下熔覆层的截面图。按同样的方法,对多个仰角下的熔覆层截面进行分析处理和观测,获得了熔覆层截面形貌与工艺参数之间的关系曲线图,如图 10~12 所示。



(a) 扫描速度 $v=5 \text{ mm/s}$

(b) 功率 $P=600 \text{ W}$

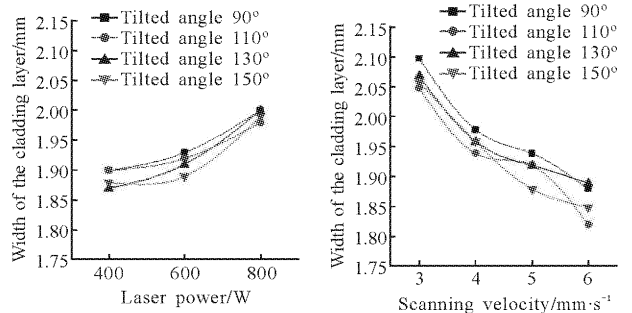
(a) Scanning velocity $v=5 \text{ mm/s}$

(b) Laser power $P=600 \text{ W}$

图 9 仰角 150° 时熔道顶点偏移量截面图

Fig.9 Cross section of height peak offset of cladding track at tilted upward angle of 150°

图 10、11 所示为各个仰角下,工艺参数分别对熔覆层宽度和高度的影响关系曲线图。由图可以看



(a) 激光功率

(b) 扫描速度

(a) Laser power

(b) Scanning velocity

图 10 工艺参数与熔覆层宽度的关系

Fig.10 Effect of process parameters on width of cladding layer

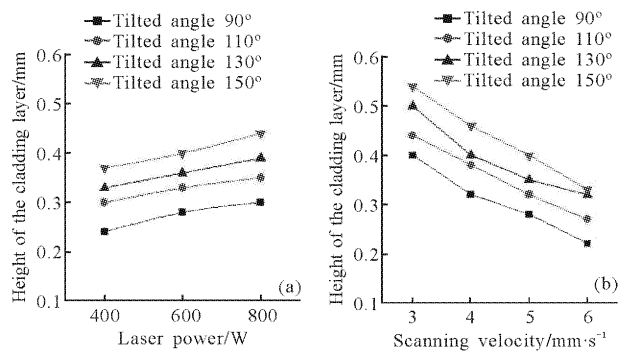


图 11 工艺参数与熔覆层高度的关系

Fig.11 Effect of process parameters on height of cladding layer

出,仰面姿态下,该影响规律与基体水平姿态下基本一致。同时,可以看出仰角的变化对熔覆层宽度的影响很小,这说明熔覆宽度主要由激光光斑决定,受熔池重力的影响可以忽略。但是,激光功率、扫描速度

和仰角的变化,对熔覆层高度的影响显著。随着激光功率的逐渐增加和扫描速度的降低,激光与熔池作用时间增加,因此增加了进入熔池的粉末量,同时熔池单位体积内能量增加,这使得熔池体积增大。在仰面姿态下,一方面,熔池缺少了基体的支撑而“倒吸”在基体下表面,在高度方向上液态熔池受到表面张力的作用但处于相对自由的状态;另一方面在高度方向的重力分力对液态熔池产生“拉伸”作用,而熔池体积的增加使得其所受重力也增加,因此熔池高度随着拉伸作用增大而增加。

当仰角逐渐增大时,熔池所受重力虽保持不变,但重力方向与高度方向之间的夹角逐渐变小使得重力在高度方向上的分力逐渐增大,熔池受拉伸作用随仰角的增大而越来越明显,高度也逐渐增加。

图 12 显示随着激光功率的降低、扫描速度的增加和仰角的增大,熔道顶点偏移量逐渐减小。仰面熔覆时,熔池流淌发生在其由液态向固态转变的过程中,因此偏移量的大小取决于液态熔池存在的时间、冷却速度和受力状态。实验中,光斑大小保持不变,扫描速度增大,激光与熔池的作用时间减少,由公式(4)可知,作用时间越短,熔道顶点偏移量减小。这

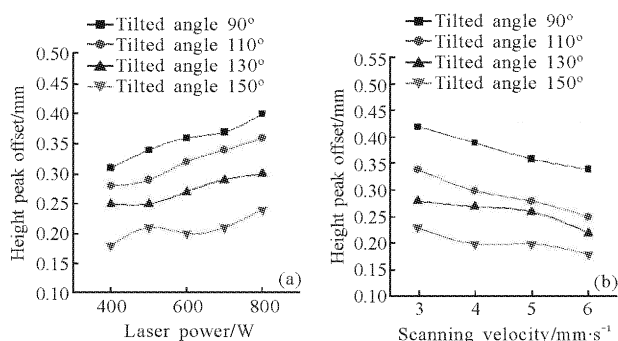


图 12 工艺参数与偏移量的关系

Fig.12 Effect of process parameters on peak height offset

是因为激光与熔池作用时间减小,液态熔滴凝固时间变短,熔池没有足够的时间发生流淌。激光功率减小和扫描速度的增大使熔池单位体积内的输入能量减少,熔池温度降低,因此熔池冷却速度加快,偏移量降低。由公式(1)可知,熔池的流淌主要是受重力在 x 方向上分力的“拉伸”作用,并克服熔池内部的粘性剪力、表面张力和表面压力而造成的。仰角的增大则使得重力在熔滴流淌方向上的分力减小;减小激光功率和增加扫描速度降低了熔池温度,使得其

内部粘度下降,流动能力减弱,熔池在流淌过程中受到的粘性剪力增加,因此偏移量减小。此外,实验中,保护气压力虽保持不变,但相较于水平姿态时的有所增大,相当于增加了熔池冷却的速率和熔池表面的压力,对熔池流淌起到抑制作用。

3 激光仰面熔覆立体成形

根据第 2 节的分析得到仰面熔覆工艺特性,本节进行“伞”状回转成形件的仰面熔覆实验:基体直接固定于转盘表面并使其处于水平姿态,熔覆喷头姿态每隔 5° 变化一次,变化范围为 $90^\circ \sim 150^\circ$,如图 13 所示。

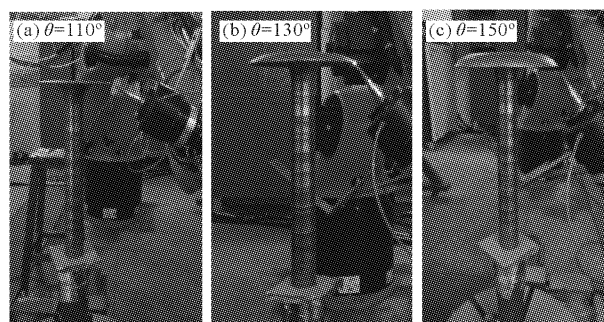


图 13 “伞状”成形件生长过程图

Fig.13 Forming process of "umbrella" shaped part

实验过程中设定转盘转速为 ω ,并根据成形直径大小实时调整转速以保证恒定的线速度 v 。根据第 2 节的分析结果,仰面熔覆时,低功率、高扫描速度可降低熔池顶点偏移量,但此时熔覆层高度较低,对熔覆效率有一定的影响。综合考量后,文中选取如表 2 所列工艺参数进行激光仰面熔覆立体成形实验。

表 2 立体成形优化的工艺参数

Tab.2 Optimized process parameters of stereoforming

Angle/($^\circ$)	Air pressure/bar	Power/W	Scanning speed / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
90	0.3	400	6
110	0.3	500	6
130	0.3	600	5
150	0.3	600	4

3.1 成形件尺寸精度

成形实验过程中,表面平整,没有出现坍塌和熔滴掉落等现象;实验后获得的成形件侧表面光滑,未

出现粘粉现象。图 14 所示为具有仰面几何结构特征的成形件截面,经过测量,获得如表 3 所示的技术参数。与初始的设计模型参数对比后发现,两者一致性较高。说明该工艺参数组合下的成形过程和保护气量对粉末汇聚效果,在实验中有较好的稳定性。

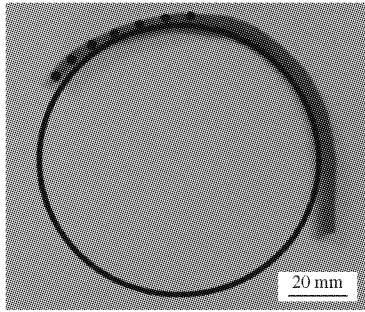


图 14 成形件侧面轮廓图

Fig.14 Profile of the formed part

表 3 成形件设计尺寸与实际测量尺寸对比

Tab.3 Dimensional comparison of formed part between designed size and measured size

	Total height /mm	Max diameter /mm	Max upward angle/(°)
Designed size	300	189	150
Actual measurement	302	198	150
Difference	0.67%	4.8%	0

3.2 性能检测

图 15 所示为成形件角度变化分别为 90°~95°、120°~125°、145°~150°的截面形貌图。从中可以看到,层与层之间结合致密,没有出现孔隙或欠熔现象。特别是在角度突变部位,新的熔覆层很好地与前一熔覆层结合,并未因此造成层厚不均匀的现象。

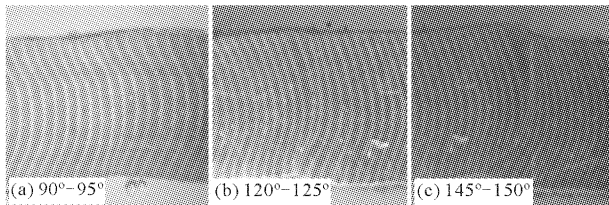
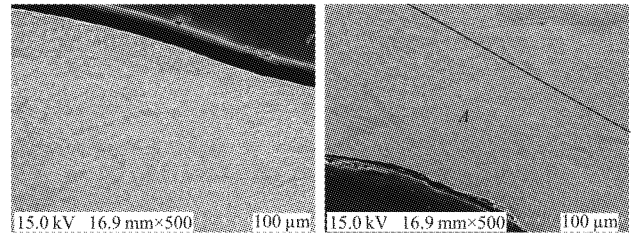


图 15 角度变化处截面形貌图

Fig.15 Cross section at the upward angle changing areas

分别选取成形件的外表层、仰角转换位置的内侧以及层结合带位置观测其显微组织,除 A、B 区域外,晶粒均呈现出细小且致密状态,如图 16 所示。这主要

是因为:(1) 实验中选用的功率较小、扫描速度较大,因而单位体积内的能量输入较小;(2) 较大的保护气压力增强了熔池周围的对流散热能力,同时成形件的回转半径较大,增加了已熔覆层的冷却时间,因而在实验过程中激光功率可以根据成形形貌要求设定而无需考虑热累积效应。上述两个原因均增加了熔池冷却速率,有利于形成细小的晶粒组织。A 区晶粒较为粗大的原因是由于其处于仰角转换的内侧,热累积较大;B 区则是因为层间二次升温造成的晶粒粗大。

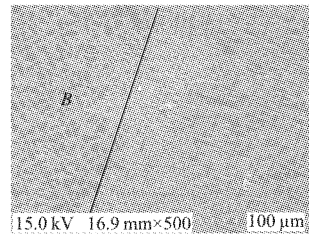


(a) 外表层

(a) Outer surface

(b) 仰角变换内侧

(b) Inner surface at tilted angle changing position



(c) 层结合处

(c) Bonding area between layers

图 16 成形件不同位置处显微组织

Fig.16 Microstructures diagram of formed part at different locations

图 17 所示为不同区域角度变化处的硬度分布曲线,由图可以看出成形件的硬度值在 600~720 HV_{0.2}的区间内,整体上比较平稳。说明成形件的性能整体上均匀一致。

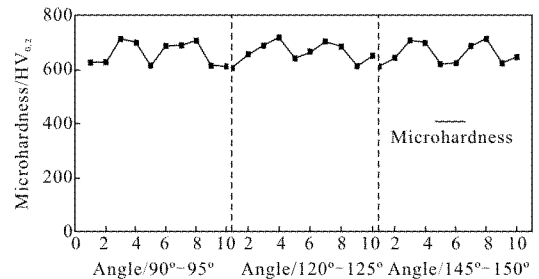


图 17 不同仰角变化区域的显微硬度分布

Fig.17 Microhardness distribution at upward angle changing area

4 结 论

(1) 在基体处于水平和仰面姿态进行激光熔覆时,工艺参数对熔覆层宽度、高度的影响规律保持了较好的一致性。但是仰面熔覆时,由于熔池受重力的影响,熔覆层高度受工艺参数变化的影响更加显著。

(2) 实验结果表明,熔池流淌受重力和粘度的共同作用。当仰角较小时,重力在偏移方向上的分力较大,对熔池流淌起主要作用;当仰角较大时,重力分力作用减小,偏移量主要受熔池粘度的影响。因此,为降低熔池流淌位移,需要减小激光功率或增大扫描速度。

(3) 光粉耦合处粉末直径随着仰角的增大呈现非线性增大,汇聚性变差,粉末利用率变低;利用光内送粉喷头的特殊结构设计,适当增加保护气压力可有效改善粉末的汇聚效果。

(4) 通过优化后的工艺参数,获得了尺寸精度和性能优良的“伞”状三维成形件,其最大仰角达到了 150°。

参 考 文 献 :

- [1] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, et al. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS) [C]// Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, 1996: 125-132.
- [2] Huang W D, Li Y M, Feng L P, et al. Laser solid forming of metal powder materials [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, 30(3): 40-43, 27. (in Chinese)
- [3] Yang Guang, Ding Linlin, Wang Xiangming, et al. Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2926-2932. (in Chinese)
- [4] Bian Hongyou, Zhao Xiangpeng, Li Ying, et al. Experimental study on laser deposition repair GH4169 alloy component [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 126-131. (in Chinese)
- [5] Wang Yanqin, Shen Jingxing, Wu Haiquan. Application and research status of alternative materials for 3D -printing Technology[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(4): 89-98. (in Chinese)
- [6] Song Changhui, Yang Yongqiang, Zhang Manhui, et al. Redesign and selective laser melting manufacturing of femoral component based on digital 3D technology [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2117-2126. (in Chinese)
- [7] Paul C P, Mishra S K, Kumar A, et al. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 224(12): 18-28.
- [8] Deng Zhiqiang, Shi Shihong, Zhou Bin, et al. Laser cladding forming of arcuate cantilevered entity part [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1006004. (in Chinese)
- [9] Nowotny S, Scharek S, Beyer E, et al. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(3): 344-348.
- [10] Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2780-2798. (in Chinese)
- [11] Meng Weidong, Shi Shihong, Shi Tuo, et al. Forming technology research of laser accumulation of reducing solid of revolution with changing laserhead posture [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1003006. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, et al. Internal powder feeding technology and nozzle for laser molding manufacture: China, CN2006101164131[P]. 2006-09-22. (in Chinese)
- [14] Wang Lifang, Zhu Gangxian, Shi Shihong, et al. Influence of shielding gas pressure on flow field of the inside-laser powder feeding nozzle [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s103007. (in Chinese)
- [15] Wang Mingdi. Research on mechanism and process of laser cladding rapid manufacturing using coaxial inside -beam powder feeding [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 37-47.