

扫描方向对变厚度熔覆成形件组织与力学性能的影响

周显新, 辛博, 巩亚东*, 张伟健, 张海权

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 针对于激光熔覆沉积成形工艺引起的拉伸强度各向异性的问题, 基于变厚度熔覆层沉积方式, 探究扫描方向(从高到低和从低到高)对斜坡薄壁件微观组织和力学性能的影响。测试斜坡薄壁件不同位置的拉伸强度和硬度, 分析其微观组织形貌, 并与等厚度熔覆层沉积方式进行对比。试验结果表明: 在薄壁件的纵截面上, 沿不同扫描方向沉积能改变晶粒的生长方向; 晶粒生长方向和扫描轨迹能影响薄壁件不同位置的拉伸强度, 且从低到高扫描沉积可明显减小抗拉强度的各向异性; 在水平方向, 不同扫描方向下的硬度变化趋势一致, 且变厚度熔覆层沉积会改变薄壁件最大硬度的分布。

关键词 激光技术; 变厚度熔覆层成形; 力学性能; 各向异性; 扫描方向

中图分类号 TG142.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0802003

Effect of Scanning Direction on Microstructure and Mechanical Properties of Part Formed via Variable Thickness Layer Cladding Deposition

Zhou Xianxin, Xin Bo, Gong Yadong*, Zhang Weijian, Zhang Haiquan

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract To investigate the anisotropy of the tensile strength caused by laser cladding deposition, the influence of the scanning direction (from high to low and from low to high) on the microstructure and mechanical properties of the ramp's thin-walled part is explored based on the variable thickness cladding layer deposition. Tensile strength and hardness at different positions on the ramp's thin-walled part are tested, and its microstructure is analyzed by comparing it with that formed via uniform thickness cladding layer deposition. Results show that the grain growth direction in the longitudinal section is affected by the scanning direction when variable thickness cladding layer deposition is used. Furthermore, the grain growth direction and scanning track influence the tensile strength at different positions of the thin-walled part. Tensile strength anisotropy can be obviously reduced by depositing the variable thickness cladding layer in the scanning direction from low to high. In the horizontal direction, the change in hardness is consistent under different scanning directions. Additionally, variable thickness cladding layer deposition changes the maximum hardness distribution of the thin-walled part.

Key words laser technique; variable thickness cladding layer forming; mechanical property; anisotropy; scanning direction

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

激光熔覆沉积技术是成形金属薄壁件的一种主要方法^[1], 采用该技术能够制造具有复杂结构的薄壁件^[2]。根据熔覆层厚度的变化, 薄壁件成形方式主要分为两种^[3]: 等厚度熔覆层沉积(等厚度沉积)和变厚度熔覆层沉积(变厚度沉积)。现阶段, 对等厚度沉积成形薄壁件性能的研究已取得显著进展。

薄壁件的组织与力学性能受多种因素的影响, 如: 激光功率^[4]、搭接率^[5]、沉积方向^[6]等工艺参数。Dinda 等^[7]指出, 扫描方向会改变晶粒的生长方向。由于激光熔覆沉积的工艺特点, 其成形件的拉伸性能具有显著的各向异性, 表现为垂直于沉积方向的力学性能优于沉积方向的力学性能^[8]。为解决该问题, 相关学者进行大量研究后发现, 通过优化扫描方式来控制热循环, 可以改变成形件的微观组织, 提高

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-03-25; 录用日期: 2019-03-28

* E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn; ** E-mail: zhouxianxin163@163.com

成形件的力学性能^[9], 主要体现为改变成形件的强度分布^[10]。此外, 热处理和热等静压等工艺方式也能细化晶粒, 减小组织和性能的各向异性^[11-12]。

在成形具有复杂几何特征的斜坡薄壁结构时, 采用等厚度切片分层的增材成形方式会引起台阶效应, 降低尺寸精度, 而采用变厚度熔覆层成形则能有效解决该问题^[13], 但目前对变厚度熔覆层沉积性能的研究还比较少, 尤其是关于扫描方向对力学性能的影响。鉴于此, 本文重点研究了扫描方向对变厚度熔覆成形件组织与力学性能的影响, 采用从低到高和从高到低的扫描方向, 以变厚度沉积的方式成形相同倾斜角度的斜坡薄壁件, 并与等厚度沉积方式成形的薄

表 1 316L 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
Mass fraction /%	<0.03	<2	<0.045	<0.03	<1	10-14	16-18.5	2-3	Bal.

表 2 基板的化学成分

Table 2 Chemical compositions of substrate

Element	C	Si	Mn	P	S
Mass fraction /%	0.14-0.22	0.3	0.30-0.65	0.045	0.050

2.2 扫描轨迹规划与参数选择

如图 2 所示, 采用从高到低和从低到高两种单向倾斜扫描轨迹进行变厚度沉积, 而采用从高到低单向水平扫描轨迹进行等厚度沉积。在等厚度沉积过程中, 每层扫描路径均与基板平行, 随着层数增多, 扫描长度逐渐减小; 在变厚度沉积过程中, 扫描长度随着层数的增多而发生变化, 且每一层扫描路径都不平行, 倾斜的扫描轨迹消除了离焦量对多层

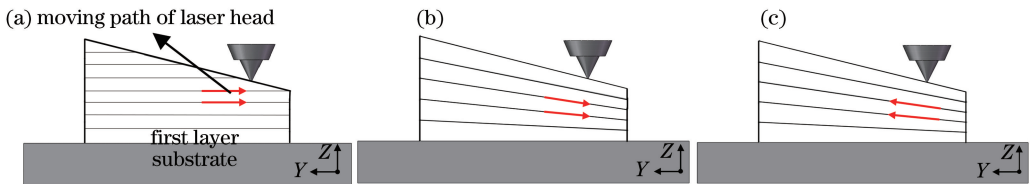


图 2 沉积方式。(a) 从高到低等厚度沉积; (b) 从高到低变厚度沉积; (c) 从低到高变厚度沉积

Fig. 2 Deposition methods. (a) Uniform thickness deposition (from high to low); (b) variable thickness deposition (from high to low); (c) variable thickness deposition (from low to high)

影响熔覆层几何尺寸的工艺参数主要包括送粉速率、激光功率及扫描速度。送粉速率和激光功率对熔覆层尺寸的控制具有迟滞性, 难以对其进行准确、动态控制^[3], 因此选用动态扫描速度成形变厚度熔覆层。

本试验中的主要成形参数源于前期基础试验,

壁件进行对比, 探究不同扫描方向下薄壁件抗拉强度的各向异性, 以及不同位置处微观组织和硬度的变化规律, 为变厚度成形薄壁件的工艺规划提供依据。

2 试 验

2.1 试验条件

斜坡薄壁件在 SVW80C-3D 增/减材复合加工中心沉积成形, 沉积原理如图 1 所示, 其增材制造系统由三部分组成: 光纤激光器、五轴加工中心、双料仓送粉器。成形试验以 316L 不锈钢粉为熔覆粉, 以 Q235 钢板为基板。熔覆粉和基板的化学成分如表 1 和表 2 所示。

熔覆厚度的补偿作用^[14], 使薄壁件尺寸能够达到设计要求。

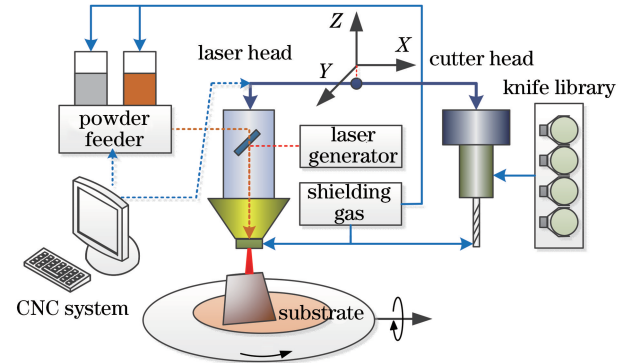


图 1 激光熔覆沉积原理

Fig. 1 Principle of laser cladding deposition

参数值如表 3 所示, 选取的依据如下: 1) 激光功率取 1000 W, 目的是合理控制熔池温度, 保证稳定的熔池尺寸并防止粉末过烧; 2) 根据扫描速度与熔覆层高度的映射实验(图 3)可知, 当扫描速度在 240~520 mm/min 范围内时, 单道熔覆层高度随扫描速度的递增而线性降低, 熔覆层宽度变化较小, 而且在

360~480 mm/min 范围内制得的熔覆层表面轮廓较规则,故将该区间设为扫描速度的变化范围;3)送粉量取 13.95 g/min,可避免熔覆层表面粘粉过多;4)不同扫描速度对应的 Z 轴提升量根据文献[15]推导的映射关系进行求解。在表 3 所示的参数组合下沉积的熔覆层的成形质量较好。

表 3 激光熔覆沉积成形过程中的工艺参数

Table 3 Process parameters of laser cladding deposition

Parameter	Variable thickness cladding	Uniform thickness cladding
Laser power /W	1000	1000
Scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	[360, 480]	420
Powder flow rate /($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	13.95	13.95
Z increment /mm	[0.50, 0.62]	0.56

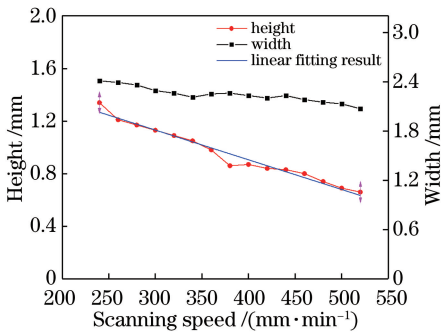


图 3 扫描速度对熔覆层宽度与高度的影响

Fig. 3 Effect of scanning speed on height and width of cladding layer

2.3 试验过程

采用标准金相方法制备样品,用王水溶液(硝酸和盐酸溶液按体积比为 1:3 配制而成)对试样表面进行化学腐蚀,然后通过 OLS4100 3D 激光共聚焦显微镜观察斜坡薄壁件纵截面、横截面上晶粒的生长方向及分布。根据国标 GB/T 228.1—2010 设计的拉伸件尺寸和选取位置如图 4 所示,拉伸件与水平方向的夹角 β 分别为 0° 、 45° 和 90° 。每个位置处的试样均进行三次试验,力学性能数据取三次试验的平均值。在成形薄壁件之后,通过电火花线切割得到拉伸件,然后在 MTSE45.305 型拉伸试验机上进行拉伸试验,通过扫描电镜观察断口形貌。采用 HVS-1000M 型显微维氏硬度计测试斜坡薄壁件水平方向和沉积方向上硬度的变化规律,测量点如图 5 所示。

3 试验结果与分析

3.1 微观组织分析

薄壁件横截面上的晶粒分布如图 6(a)所示,在



图 4 拉伸件的选取位置和尺寸

Fig. 4 Selected location and dimension of tensile part

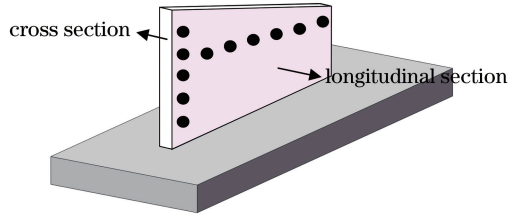


图 5 硬度测点位置示意图

Fig. 5 Diagram of testing points of hardness

横截面上,不同的沉积方式对应相同的微观组织分布。由于激光束的能量呈高斯分布,故可看到清晰的鱼鳞状界面,每个熔覆层都被高功率激光熔化,相邻熔池在 Z 轴方向上均存在一定程度的重叠,且晶粒生长方向垂直于熔池边界,指向熔池中心。

在激光沉积成形过程中,熔覆层的显微组织与温度梯度、凝固速率 v 的比值 G/v 密切相关^[5]。液体熔池下半部分与凝固金属接触,具有很大的温度梯度,使得固/液界面的 G/v 值很大,在熔池底部易出现定向生长的细长柱状晶。柱状晶沿温度梯度最大的方向择优生长,导致晶粒指向熔池中心。随着固/液界面的推进,熔覆层温度梯度 G 逐渐减小,通过熔池边界的散热已经不占优势,柱状晶外延生长的趋势被打断。在熔池上半部分,热量通过周围环境(即表层的大气)散热,易形成等轴晶。

薄壁件同一高度处纵截面的微观组织如图 6(b)~(d)所示,三种沉积方式形成了不同倾斜角度的晶粒生长方向(黑色虚线箭头),黑色实线箭头所指为层与层之间的边界,白色箭头为扫描方向。晶粒生长方向不完全相同导致腐蚀后的微观组织呈现不同的颜色。熔池底部与沉积层之间的温度梯度可以为晶粒生长提供驱动力,晶粒沿着生长方向穿越层与层之间的边界。三种沉积方式均可实现良好的冶金结合。在相同熔覆层,随着熔覆头的移动,熔池不断形成并迅速凝固,与已凝固部分以及空气对流换热也是新形成熔池热量散失的一部分^[16],导致等厚度沉积成形件中晶粒并不是完全沿着 Z 轴生长,而是具有一定的倾斜角度,偏向扫描方向,但倾斜角

度较小,与沉积方向的平均夹角为 17° 。对于从高到低的变厚度沉积方式,随着层数增多,扫描长度与熔覆层倾斜角度增大,逐渐增加的高度差会使最大温度梯度方向偏离垂直方向,从而导致晶粒生长方

向更加倾斜,平均倾斜角度为 40° 。但对于从低到高的变厚度沉积方式,扫描方向的改变以及与同一层已凝固部分传热导致晶粒生长方向几乎平行于 Z 轴,从而抑制了晶粒生长方向的倾斜。

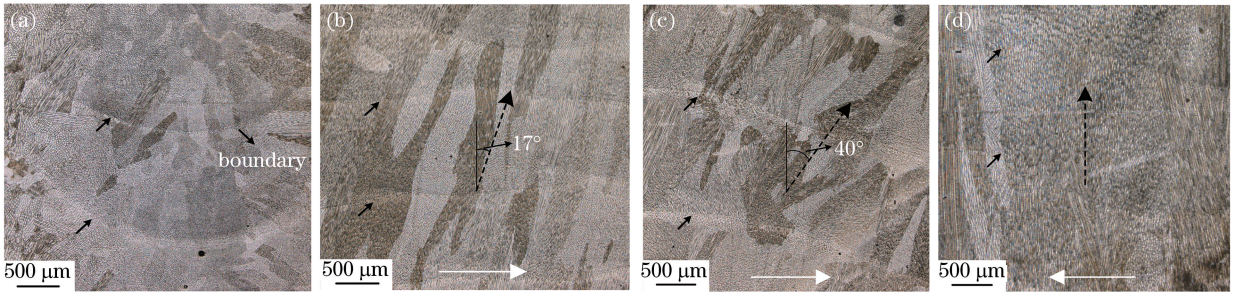


图6 微观组织。(a)横截面;(b)从高到低等厚度沉积纵截面;(c)从高到低变厚度沉积纵截面;(d)从低到高变厚度沉积纵截面
Fig. 6 Microstructures. (a) Cross section; (b) longitudinal section by uniform thickness deposition (from high to low); (c) longitudinal section by variable thickness deposition (from high to low); (d) longitudinal section by variable thickness deposition (from low to high)

3.2 拉伸性能

为避免边缘气孔、裂纹等缺陷的影响,拉伸件过渡区的位置应尽量偏离边缘处。由表4可知,每一种沉积方式下的抗拉强度在不同位置均存在差异,并且对于变厚度沉积方式,不同扫描方向的抗拉强度的分布不同,但从低到高变厚度沉积成形的薄壁件不同位置的抗拉强度最大相差 84.0 MPa ,各向异性明显改善。相比于从高到低变厚度沉积和等厚度沉积,从低到高变厚度沉积成形的薄壁件的各向异性差值减小了 92.0 MPa 和 109.9 MPa ,说明扫描方向是影响零件力学性能的一个重要因素。

由图2、图4及表4可知:对于等厚度沉积成形试样,当其拉伸方向与扫描轨迹垂直时,熔池边界处的黏结力较弱,断裂优先发生^[17],故其抗拉强度最小,为 478.0 MPa (对应于 $\beta=90^\circ$)。对于变厚度沉积成形试件,试件1与试件3的加载方向与激光头运动轨迹成一定的角度,试件2与扫描轨迹近似垂

直,从低到高变厚度沉积成形薄壁件的抗拉强度最小,为 596.0 MPa (对应于 $\beta=90^\circ$)。这是因为沉积形成的晶粒由定向生长的细长柱状晶和等轴晶构成,拉伸方向与晶粒生长方向的偏角越大,在加载方向上的晶粒尺寸就越小,晶界及位错就越多,故力学性能越好。对于从高到低变厚度沉积成形的薄壁件,试件2的拉伸加载方向与扫描轨迹近似垂直,且平行于晶粒生长方向,晶粒尺寸在沉积方向和水平方向上的差别较小,导致该试样的抗拉强度最小,为 472.8 MPa (对应于 $\beta=45^\circ$),小于从低到高变厚度沉积成形试件的最小抗拉强度,而且该试件抗拉强度的各向异性最大。对比两种扫描方向下变厚度沉积成形的最小抗拉强度值与方向可知,晶粒生长方向以及扫描轨迹共同决定了薄壁件各个位置的强度。三种沉积方式下水平方向上的试件与晶粒生长方向不平行,且与扫描轨迹的夹角最大,所以最大抗拉强度均对应 $\beta=0^\circ$ 。

表4 不同沉积方式下不同位置处拉伸件的抗拉强度与伸长率

Table 4 Tensile strength and elongation of tensile part at different positions under different deposition strategies

$\beta / (^\circ)$	Tensile /MPa (elongation /%)		
	Uniform thickness deposition (high to low)	Variable thickness deposition (high to low)	Variable thickness deposition (low to high)
0	654.0 (44.2)	666.7 (40.9)	680.0 (46.4)
45	571.7(55.2)	472.8 (54.4)	624.3 (56.5)
90	478.0 (53.9)	644.0 (42.93)	596.0 (57.8)
Difference (tensile strength) /MPa	176.0	193.9	84.0

从表4还可以得到,三种沉积方式下试样的最大断后伸长率分别为 55.2% ($\beta=45^\circ$)、 54.4% ($\beta=$

45°)和 57.8% ($\beta=90^\circ$),不同方向上断后伸长率之间的偏差较大,且与最大抗拉强度方向不一致。这

是因为对于激光熔覆沉积成形而言,大部分晶粒沿着一个方向生长,导致不同方向的伸长率存在差异,沿着晶粒生长方向的断后伸长率最大。

从低到高变厚度沉积成形薄壁件中选择抗拉强度最大的试件,对其断口进行分析,断口形貌如图 7 所示。由图 7(a)~(b)可知:拉伸后,试件出现了较大的塑性变形,通过撕裂的方式形成台阶,即撕裂棱;而且,试件产生了明显的颈缩现象。由图 7(c)

可知,拉伸断口表面分布着杂乱不一的韧窝(一些大小不等的圆形或椭圆形的凹坑),可知其断裂形式为韧性断裂。在韧窝内也发现了第二相粒子,第二相粒子一般出现在热处理过程中,但在激光沉积过程中,熔覆层会经历多次热循环,从而导致第二相粒子出现。这些第二相粒子在受到力的加载时可以阻碍位错运动,阻碍材料的塑性变形,增加试样的抗拉强度。

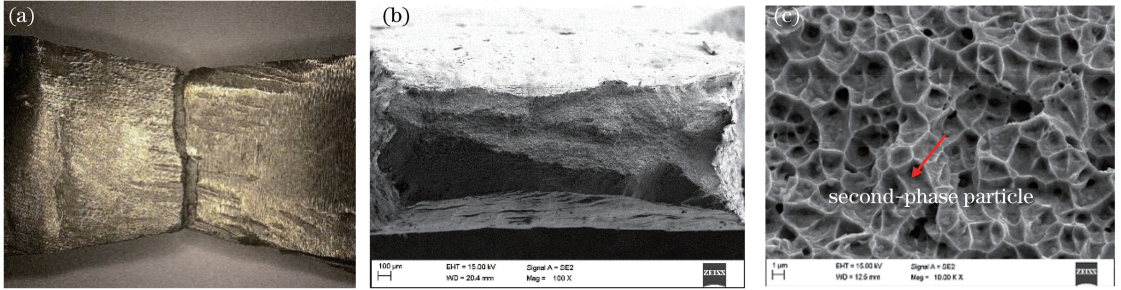


图 7 扫描电镜下的断口形貌。(a)拉伸试样的宏观断口形貌;
(b)低倍扫描电镜下的断口截面;(c)高倍扫描电镜下的断口截面

Fig. 7 Fracture morphologies obtained by scanning electron microscope. (a) Macro fracture morphology of tensile sample; (b) fracture morphology obtained by scanning electron microscope with low magnification; (c) fracture morphology obtained by scanning electron microscope with high magnification

3.3 硬 度

在水平方向上,与等厚度沉积成形方式相反,变厚度沉积成形件硬度最高点均在高端测量点附近,如图 8(a)所示。决定硬度的重要因素之一是冷却速率^[18],由于激光与粉末之间的相互作用时间有限,在熔化过程中低的冷却速率减缓了热量流失的速度,延长了晶粒生长的时间,因此硬度降低。并且,在熔覆层沉积过程中,当前层会对已凝固层产生加热作用,相当于进行了回火处理,也会使硬度降低。由于斜坡薄壁件的结构特点,高端和低端测量点的热量输入和散失不一致。对于等厚度沉积方式,在同一高度上层数相同,但随着熔覆层在高端堆积,扫描距离逐渐减小,导致高端加热时间比低端

长,降低了高端的冷却速率,并且高端测量点经过多次回火,所以峰值硬度出现在低端测量点附近。然而,对于变厚度沉积方式,同一高度下沉积层数不同,导致硬度不均匀变化。低端的层数大于高端的层数,导致低端热量累积严重,冷却速率较低。虽然高端测量点经历的热循环次数较多,但冷却速度比低端快^[19],导致回火效果不明显,低端硬度小于高端硬度。

从图 8(a)还可以看出,相比于中间,薄壁件边缘处的硬度较小。这是因为边缘处的温度梯度较大,熔覆层快速凝固^[7],导致部分存在于金属粉末间隙中的气体未及时逸出试样,形成近似圆形的孔洞,如图 9 (a)中的 A 所示,以及液体金属凝固过快,未能及时补

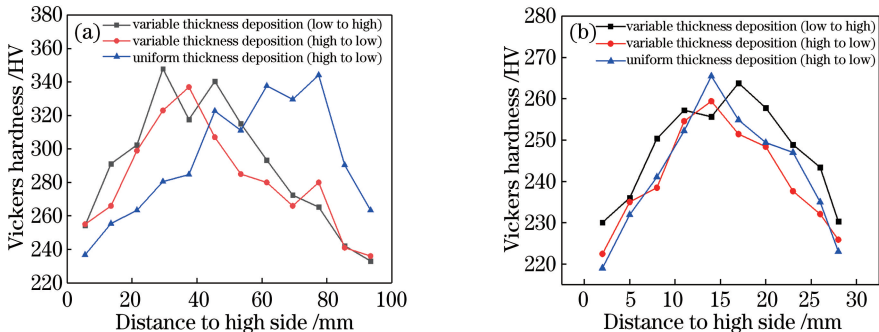


图 8 硬度曲线。(a)水平方向;(b)沉积方向

Fig. 8 Plots of hardness. (a) Horizontal direction; (b) deposition direction

缩形成不规则的气孔,如图 9(b)中的 B 所示。边缘区域的气孔数量明显多于中间区域的气孔数量,如图

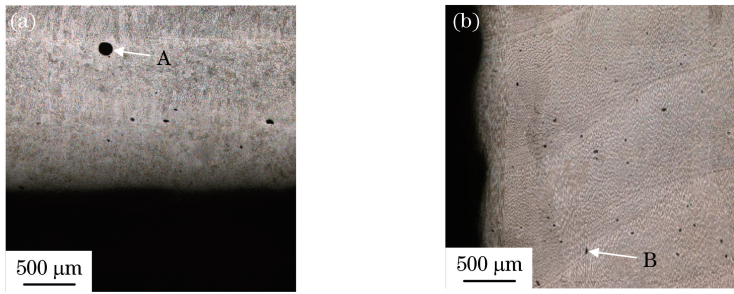


图 9 斜坡薄壁件不同位置处的孔洞分布。(a)底部;(b)边缘

Fig. 9 Pore distributions at different positions of ramp's thin-walled part. (a) Bottom; (b) edge

在沉积方向上,等厚度和变厚度沉积成形薄壁件硬度的变化趋势一致,如图 8(b)所示。在材料沉积初期,热量通过基体迅速消散,累积不严重,并且靠近基板处的熔覆层快速冷却,易产生孔洞,所以底部的硬度随着层数增多而增大。当距离超过 16 mm 时,随着熔覆层的连续沉积,热量不断累积,导致已凝固层温度升高,当前熔覆层冷却速度变慢。靠近基板的熔覆层经历的热循环次数多,但与基板的热传导使底部区域受到的热影响较小,峰值温度趋于稳态^[20];相反,中上部区域的回火效果更加明显,硬度更小。

4 结 论

变扫描方向沉积变厚度成形的斜坡薄壁件的微观组织、硬度和拉伸性与等厚度沉积的明显不同。

薄壁件晶粒由定向生长的细长柱状晶和等轴晶组成。在斜坡薄壁件的横截面上,晶粒的生长方向垂直于层与层的边界,指向熔池中心。纵截面上晶粒的生长方向与熔覆头的扫描路径有关,采用从高到低变厚度沉积成形的薄壁件的晶粒生长方向更加倾斜。

晶粒生长方向和扫描轨迹共同决定了试样的抗拉强度,采用从低到高变厚度沉积方式可以避免晶粒生长方向与扫描轨迹垂直,强度优于其他方式成形的试样的强度。激光熔覆沉积成形 316L 合金拉伸试样出现韧性断裂,断口呈韧窝状,且韧窝内存在第二相粒子。

在水平方向上,三种沉积方式成形的试样的硬度都不均匀,在 240~360 HV 范围内变化,但变厚度沉积成形薄壁件高端测量点的硬度优于低端测量点,扫描方向对其硬度的影响较弱。由于其高度连续可变,变厚度成形具有广阔的工程化应用前景,本

文的研究内容对变厚度沉积的应用具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Deng Z Q, Shi S H, Zhou B, *et al.* Laser cladding forming of unequal-height curved arc-shaped thin-wall structures[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (9): 0902005.
邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2017, 44 (9): 0902005.
- [2] Wang X Y, Wang Y F, Jiang H, *et al.* Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese Journal of 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.
- [3] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L K, *et al.* An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part II: mechanical behavior, process parameter optimization and control [J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 12-35.
- [4] Xiao Y, Lu Y Y, Guo X X, *et al.* Study on process and properties of thin-walled structure part by laser additive manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081405.
肖鱼, 路媛媛, 郭溪溪, 等. 激光增材制造薄壁结构件工艺及性能的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081405.
- [5] Guan K, Wang Z M, Gao M, *et al.* Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel [J]. Materials & Design, 2013, 50: 581-586.
- [6] Guo P, Zou B, Huang C Z, *et al.* Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser

- deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 12-22.
- [7] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: microstructural evolution and thermal stability [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 509(1/2): 98-104.
- [8] Mertens A, Reginster S, Contrepois Q, *et al.* Microstructures and mechanical properties of stainless steel AISI 316L processed by selective laser melting [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 783/784/785/786: 898-903.
- [9] Chen D N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403003.
陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403003.
- [10] Yu J, Lin X, Ma L, *et al.* Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 1094-1104.
- [11] Ding L, Li H X, Wang Y D, *et al.* Heat treatment on microstructure and tensile strength of 316 stainless steel by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0406003.
丁利, 李怀学, 王玉岱, 等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0406003.
- [12] Tillmann W, Schaak C, Nellesen J, *et al.* Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 13: 93-102.
- [13] Wang X Y, Guo H R, Xu W J, *et al.* Laser cladding of a ramp thin wall with a variable [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 216: 419-423.
- [14] Zhu G X, Li D C, Zhang A F, *et al.* The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 349-356.
- [15] Lai Y B, Bo Y, Wang D Y. Theoretical calculation and experimental verification of Z increment in laser metal direct manufacturing [C] // *International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science (ISMEMS 2017)*, May 25-26 2017, Xi'an, China. France: Atlantis Press, 2017.
- [16] Cao J, Liu F C, Lin X, *et al.* Effect of overlap rate on recrystallization behaviors of laser solid formed inconel 718 superalloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 228-235.
- [17] Wen S F, Shuai L, Wei Q S, *et al.* Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2660-2667.
- [18] Amine T, Newkirk J W, Liou F. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, 3: 21-34.
- [19] Hassan A. Effect of slicing trajectories on mechanical properties of sloped thin-walled part produced by laser additive manufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 29-34.
Abdalkariem Hassan. 增材制造中激光扫描路径对倾斜薄壁件力学性能的影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 29-34.
- [20] Wang L, Felicelli S D, Pratt P. Residual stresses in LENS-deposited AISI 410 stainless steel plates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 496(1/2): 234-241.