

Z 轴提升量对激光熔覆成形件组织与力学性能的影响

辛博, 周显新, 巩亚东*, 张海权, 李天鸿

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 针对送粉式激光沉积成形技术, 选取不同的 Z 轴提升量成形 316L 不锈钢薄壁件, 分别检测薄壁件不同区域的微观组织和力学性能, 包括晶粒尺寸、重熔深度以及拉伸性能各向异性, 并探究了单道熔覆层和薄壁件整体的晶粒形态以及生长方向。根据不同 Z 轴提升量下的微观组织, 分析了薄壁件不同方向上抗拉强度和伸长率的变化规律。结果表明: 不同于单道熔覆层, 在不同的 Z 轴提升量下, 薄壁件主要以柱状晶为主, 并且不同区域的柱状晶的生长方向发生了变化; Z 轴提升量与晶粒尺寸之间呈非线性关系; 不同 Z 轴提升量下柱状晶的生长方向和尺寸会影响成形件拉伸性能的各向异性。

关键词 激光技术; Z 轴提升量; 微观组织; 重熔深度; 各向异性

中图分类号 TG142.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102014

Impact of Z-Increment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladding Forming Parts

Xin Bo, Zhou Xianxin, Gong Yadong*, Zhang Haiquan, Li Tianhong

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

Abstract Thin-wall parts of 316L alloy are fabricated with different Z-increments using the powder-feeding laser metal deposition technology. The microstructure and mechanical properties such as the grain size, re-melting depth, and anisotropy of the tensile property of the thin-wall parts are explored at different positions. Moreover, the grain morphologies and growth directions of a single-pass cladding layer and the thin-wall parts are investigated. Based on the microstructure with different Z-increments, the tensile strength and elongation in different directions of the thin-wall parts are analyzed. The results demonstrate that for different Z-increments, the grain morphology of the thin-wall part is mainly columnar, which differs from that of the single-pass cladding layer. In addition, the growth direction of the columnar grain is different in different regions. There is a nonlinear relationship between the Z-increment and the grain size. The growth direction and size of the columnar grain of different Z-increments affect the anisotropy of the tensile property of the thin-wall parts.

Key words laser technique; Z-increment; microstructure; re-melting depth; anisotropy

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

激光熔覆沉积成形技术利用高能激光束, 使实时输送的金属粉末在基体上熔化并形成冶金结合的熔覆层, 最终逐层逐道堆积成形零件。在成形过程中, 零件的成形工艺、组织以及力学性能不仅与激光功率、扫描速度和送粉量有关^[1-4], 还受 Z 轴提升量的显著影响。Z 轴提升量为每层熔覆后, 激光头沿沉积方向移动的距离。控制 Z 轴提升量能改变粉末汇聚点

的位置, 因此会影响熔覆层的堆积成形质量^[5]。

目前, 已有诸多学者通过控制 Z 轴提升量来成形高质量的熔道, 进而改进复杂零件的成形工艺, 提高成形件的表面质量。例如: Zhu 等^[6]根据单熔道尺寸提出了 Z 轴提升量的理论模型, 用以改善成形件的表面平整度; Wang 等^[7]根据统计理论求解粉末颗粒的分布密度函数, 并建立了工艺参数与 Z 轴提升量间的数值分析模型; 文献^[8]指出 Z 轴提升量以第二层熔覆层厚度为基准, 能使单熔道厚度与

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-07-22

基金项目: 教育部基本科研业务费项目(N170303009, N180703007)

* E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn

Z轴提升量达到高精度匹配。此外,部分文献还研究了如何通过控制Z轴提升量来成形复杂的金属零件,并已实现了变径回转体^[9]、斜坡薄壁件^[10-11]以及扭曲薄壁件^[12]等零件的一体化成形。目前,已有科研人员针对Z轴提升量对零件表面质量和成形精度的影响进行了相关研究,然而对成形件性能和微观组织的影响规律尚缺乏深入研究。鉴于此,本文通过变Z轴提升量成形实验试制了相同几何尺寸的薄壁件,研究了Z轴提升量对激光熔覆成形材料晶粒形态和生长方向的影响机理,根据晶粒尺寸、

表1 316L不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition 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 基体的化学成分

Table 2 Chemical composition of the 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 实验方案

为探究Z轴提升量对激光熔覆成形件微观组织与力学性能的影响规律,设计了Z轴提升量的单因素试验。基于现有成形经验,实验工艺参数设置如下:激光功率为1000 W,送粉速度为12 g/min,扫描速度为360 mm/min(在沉积过程中保持不变),扫描方式为单向间断扫描,初始离焦量为0 mm。在此参数组合下,单道熔覆层高度为1.2 mm。将单道熔覆层高度四等分,所选的Z轴提升量分别为0.3,0.6,0.9,1.2 mm。在沉积过程中,每层离焦量 L_i 、生长高度 H_i 以及Z轴提升量 ΔZ 三者之间满足的关系为

$$L_i = (i - 1)\Delta Z - (H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_{i-1}),$$

$$i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

式中: N 为所堆积的熔覆层数。

每层熔覆层堆积后,采用游标卡尺测量成形件的生长高度。根据(1)式可计算出每层离焦量的变化规律。当Z轴提升量等于单道熔覆层的高度1.2 mm时,随着层数增多,离焦量由0趋向于正离焦,并不断增大,导致薄壁件难以继续成形;当Z轴提升量小于单道熔覆层高度时,下一层熔覆层的离焦量为负,导致新成形的熔覆层高度变小。随着熔覆层的堆积,熔覆层高度不断变化,直至离焦量减小到一定值时,在负离焦量下,新成形的单道熔覆层高度与Z轴提升量达到协调平衡状态。因此,本文研究了Z轴提升量的三个水平(0.3,

抗拉强度各向异性等指标揭示了Z轴提升量对激光熔覆成形件性能的影响规律。

2 实验方法

2.1 实验条件

薄壁件通过SVW80C-3D增/减材复合加工中心沉积成形,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。实验以Q235钢为基板,沉积成形316L不锈钢薄壁件,基板和316L不锈钢的化学成分如表1和表2所示。

0.6,0.9 mm),并忽略初始1~3层熔覆层层厚的局部变动对离焦量的影响,保证实验薄壁件的顺利成形。

通过标准金相方法制备样本,利用OLS4100 3D激光共聚焦显微镜观察薄壁件的微观组织。根据国标GB/T 228.1—2010设计的拉伸试样的尺寸和选取位置如图1所示,拉伸试样与水平方向的夹角分别为0°、45°、90°。每个位置的试样进行三次试验,求其平均值。在MTSE45.305拉伸试验机上进行拉伸测试,通过扫描电镜观察拉伸试样的断口形貌。

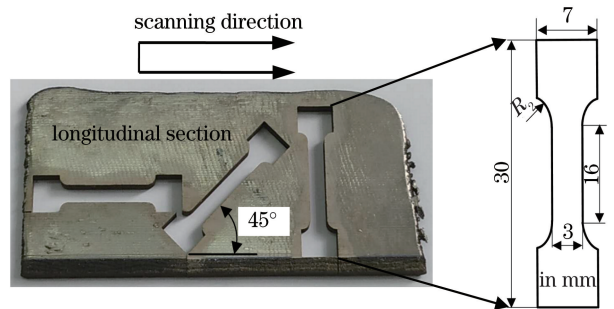


图1 拉伸试样的选取位置和尺寸

Fig. 1 Location and dimensions of tensile sample

3 结果与分析

3.1 晶粒形态

单道熔覆层纵截面的微观组织如图2所示,主要是以定向生长的柱状晶和等轴晶为主,且分布在

不同的区域。根据文献[1]可知,晶粒形态与熔池内的温度梯度 G 及凝固速率 R 有关。由于熔池底部与常温基板接触,可以通过基板进行充分的热传导,所以熔池底部具有较高的温度梯度 G 。熔池中固-

液界面推进原理如图 3 所示,熔池内部不同区域的凝固速率 R 沿着固-液界面的法线方向^[13],与扫描速度 v_s 之间的夹角为 φ 。由几何关系可知

$$R = |v_s \cdot \cos \varphi|。 \quad (2)$$

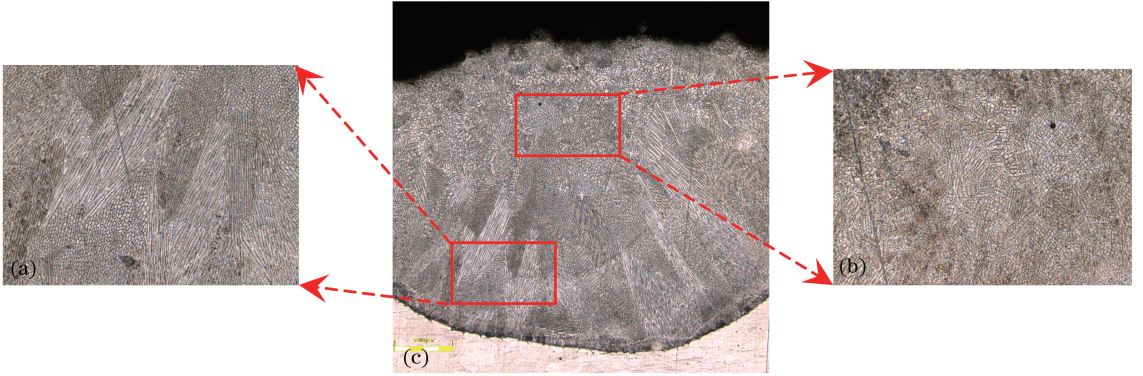


图 2 单道熔覆层纵截面的微观组织。(a)底部;(b)顶部;(c)全貌

Fig. 2 Longitudinal microstructures of single-pass cladding layer. (a) Bottom; (b) top; (c) overview

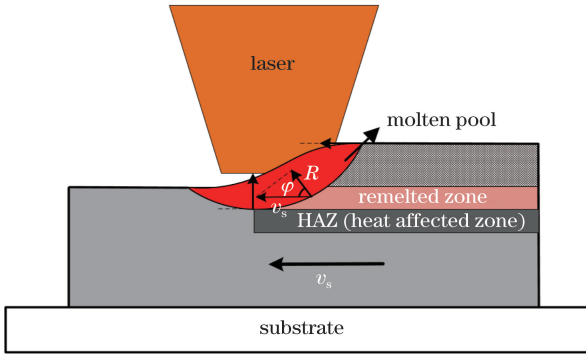


图 3 熔池固-液界面推进原理

Fig. 3 Principle of solid-liquid interface moving in molten pool

从熔池底部到熔池顶部,随着夹角 φ 的减小,凝固速率 R 由 0 逐渐增大并接近扫描速度 v_s 。对于单层熔道,在熔池底部,由于 G/R 值较大,易在边界处形成柱状晶,如图 2(a)所示,生成的柱状晶生长缓慢并呈现为“针状”。在熔池顶部,温度梯度 G 较小,使得 G/R 值相对较小,等轴晶所占比例明显增加,如图 2(b)所示;同时由于在熔池底部柱状晶的竞争生长,减小了等轴晶的生长空间,从而导致顶部等轴晶的尺寸大于底部。

单道多层堆积沉积成形试样的微观组织如图 4 所示,不同于单道熔覆层,所有试样中的晶粒以柱状晶为主,形态细长,均匀致密,当堆积熔覆层时,会引起前一层顶部已凝固区域重新熔化并凝固,导致熔覆层顶部的等轴晶粒形核生长,并且已凝固的高温熔覆层相当于基板,多层热量的累积将降低凝固速率 R ,易形成柱状晶。

3.2 晶粒尺寸

图 4 所示为三种不同 Z 轴提升量下的底部、顶部和中部纵截面的显微组织。由激光共聚焦显微镜可得到不同区域柱状晶粒长和宽的平均值尺寸,测量方法如图 5 所示,测量结果如表 3 所示。由于成形件底部热量的流失速度较快, Z 轴提升量对底部晶粒尺寸的影响较小,三种参数下柱状晶的尺寸近似相等,因此本文仅研究中部和顶部晶粒尺寸的演化机理。随着 Z 轴提升量从 0.3 mm 增至 0.9 mm,柱状晶的长度、宽度均先增后减,这主要是因为 Z 轴提升量影响了熔覆头与熔池间的距离以及熔覆层的厚度^[14],从而间接影响了熔池内部的能量密度^[15]。当 Z 轴提升量为 0.3 mm 时,虽然熔覆头与熔池的距离较近,能量衰减较少,熔池内的能量密度较高,但由于受到层厚的限制,柱状晶的长度较小;当 Z 轴提升量增大到 0.6 mm 时,晶粒尺寸明显长大,尤其是在零件顶部,热量的累积降低了凝固速率,使晶粒生长得较为充分,柱状晶周围形成了明显的二次枝晶臂。如图 4(h)所示,顶部柱状晶较为粗大,其长度、宽度分别为 539.1 mm 和 37.3 mm。当 Z 轴提升量为 0.9 mm 时,熔池能量密度的变化情况与 0.3 mm 相反,熔覆层易凝固,形成的晶粒变细,但由于不受层厚的影响,长度与 Z 轴提升量为 0.6 mm 时相近。综上可知,能量密度以及层厚的增大均有利于晶粒尺寸的生长,但 Z 轴提升量与熔池内部的能量密度呈负相关,与层厚呈正相关,从而导致晶粒尺寸随 Z 轴提升量增大而先增大后减小。

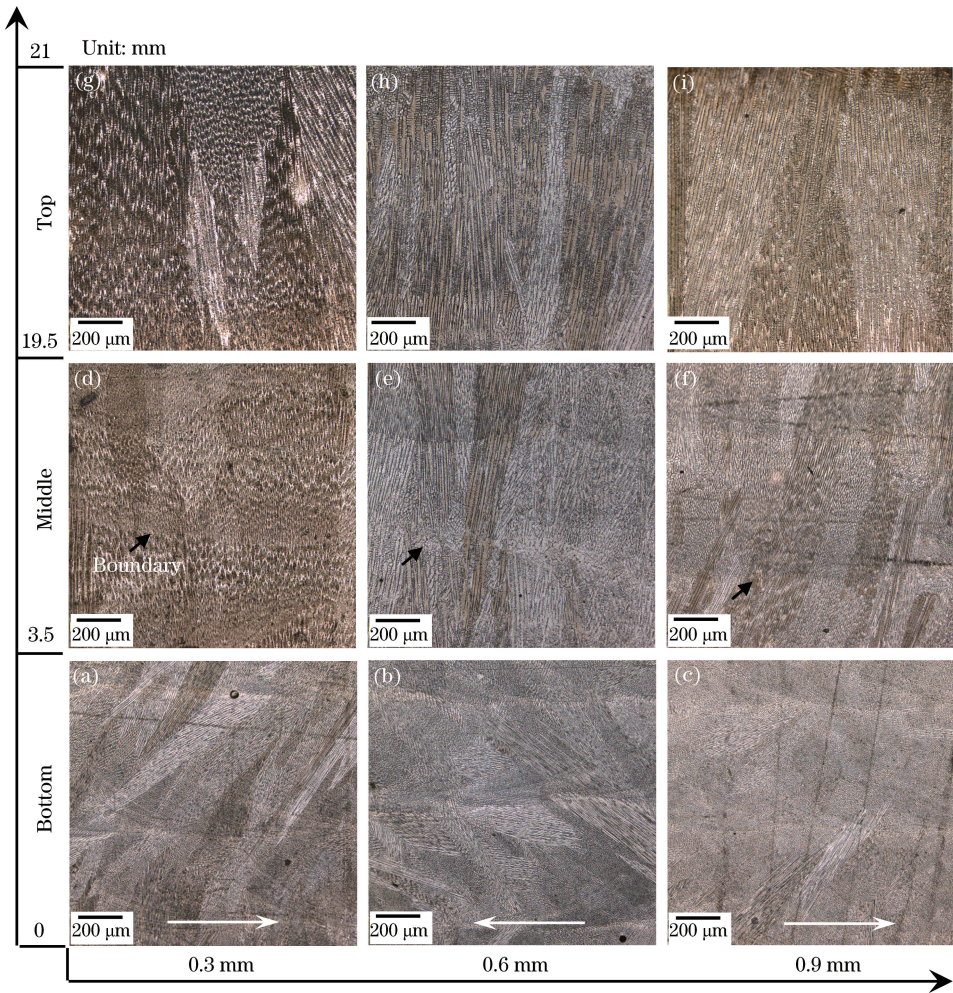


图 4 薄壁件纵截面的微观组织

Fig. 4 Microstructures of longitudinal sections of thin-walled parts

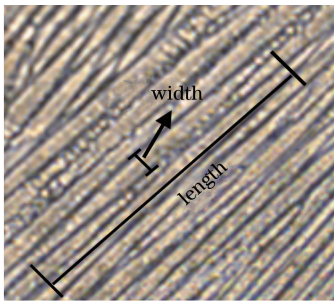


图 5 单个柱状晶粒尺寸的测量方法

Fig. 5 Measuring method of size of single columnar grain

表 3 不同 Z 轴提升量下不同区域柱状晶长度和宽度的平均值

Table 3 Average length and width of columnar grain in different regions under different Z-increment

Zone	Length (width) / μm		
	0.3 mm	0.6 mm	0.9 mm
Bottom	47.3(4.5)	46.7(4.8)	49.6(4.9)
Middle	234.2(23.8)	389.8(30.4)	315.0(16.3)
Top	354.3(29.2)	539.1(37.3)	476.1(26.1)

从图 4(d)~(f)所示的成形件中部的微观组织可知,单道熔覆层顶部受下一层熔池二次加热作用的影响显著,该区域的晶粒尺寸较熔覆层底部更粗大,单道熔覆层内部呈现出小晶粒向大晶粒转变的现象。

3.3 生长方向

由图 4 可知:在三种不同的 Z 轴提升量下,成形件中均存在明显的熔覆层边界,如黑色箭头所指,当前层的柱状晶沿着前一层晶粒的生长方向形核生长时,柱状晶呈典型的外延生长特性;底部、中部、顶部晶粒的生长方向由倾斜于固液界面的前进方向(扫描方向),如白色虚线箭头所示,转向平行于沉积方向。这是因为柱状晶会沿热流最大的相反方向择优生长,在成形件底部约 3.5 mm 范围内,随着固液界面的不断推进,熔池的热传导方向既沿着同一层已凝固的熔覆层,也沿着前一层凝固层。如图 3 所示,生长方向与扫描方向的夹角约为 50° ,连续移动的熔池沿扫描轨迹不断地熔化、凝固形成熔覆层,并

且在熔道内形成清晰的移动界面(凝固前沿)。随着沉积层数逐渐增加,热量的累积导致当前熔覆层的凝固速率变慢,同时随着熔池的不断形成,热量的主要散失传导方向由二维转变为一维,且主要沿着前一层凝固层,相邻熔池之间的热传导较小,并且同一层相邻熔池之间的凝固前沿几乎消失,柱状晶沿沉积方向生长。

3.4 重熔深度

成形件横截面的微观组织如图 6 所示,可见,晶

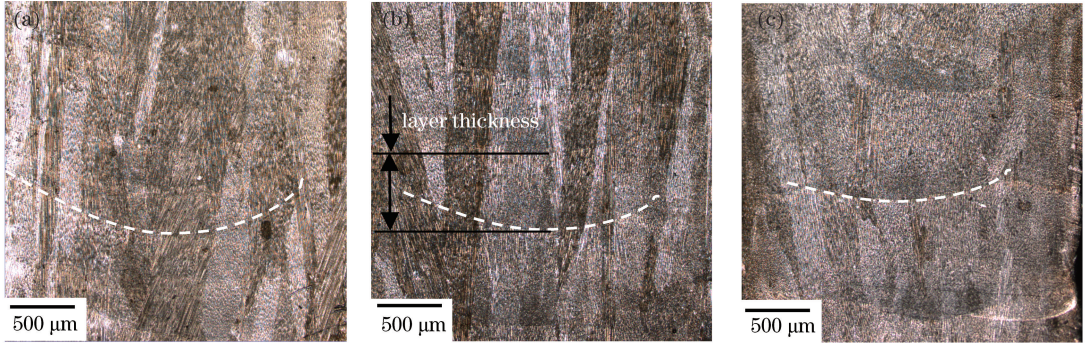


图 6 不同 Z 轴提升量下成形件横截面的微观组织。(a) 0.3 mm;(b) 0.6 mm;(c) 0.9 mm

Fig. 6 Microstructures of thin-walled parts under different Z-increments in cross section.

(a) 0.3 mm; (b) 0.6 mm; (c) 0.9 mm

3.5 拉伸性能

由于成形的组织以柱状晶为主,为保证性能对比的合理性,拉伸试样的过渡区应选在成形件中部。由图 7 可知,不同 Z 轴提升量下得到的激光沉积成形件的力学性能(抗拉强度和伸长率)均具有明显的各向异性,随着柱状晶生长方向与拉伸试样之间夹角的增大(90°至 0°),试样的抗拉强度增大,伸长率减小,这主要是因为沉积试样的显微组织以长而细

粒形态、尺寸以及生长方向与纵截面一致,本节不再具体描述。激光束为高斯热源,导致熔池边界(白色虚线)为弧形,横截面呈现鱼鳞状。由图 6 还可以看出,随着 Z 轴提升量增大,重熔深度逐渐减小,熔池边界的曲率减小。通过显微镜测量熔覆层的厚度可知,其值与 Z 轴提升量近似相等。这是因为激光功率不变时,在不同的 Z 轴提升量下,输入的能量相同,当熔覆层厚度较小时,激光能量会过多地作用于前一层熔覆层,导致已凝固熔覆层的熔化质量较多。

的柱状晶粒为主,导致在不同的方向上,晶粒尺寸不一致。在单向拉伸力作用下,拉伸试样会发生变形,晶粒尺寸越小,晶界及位错越多,越有利于阻碍变形,故而试样的力学性能越好。在试样的沉积方向上,载荷方向与柱状晶粒平行,抗拉强度较小,而垂直于沉积方向的抗拉强度较大。伸长率最大的方向均为 90°,主要是因为大部分柱状晶沿着沉积方向外延生长。

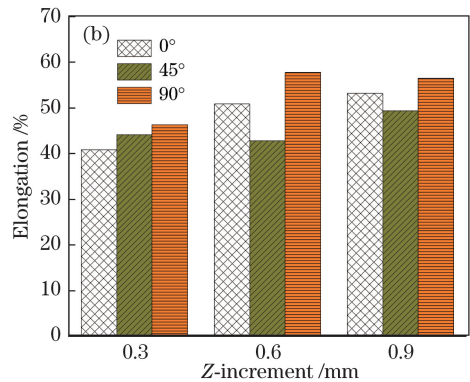
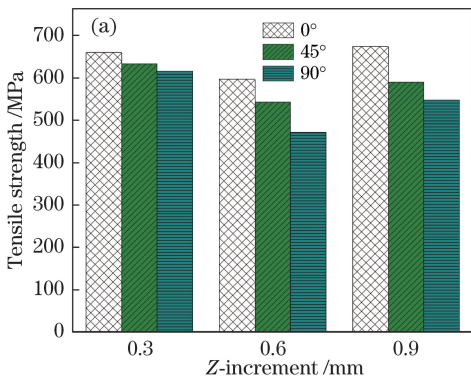


图 7 不同方向拉伸试样的力学性能。(a) 抗拉强度;(b)伸长率

Fig. 7 Mechanical properties of tensile sample in different directions. (a) Tensile strength; (b) elongation

由图 7 还可以看出,当 Z 轴提升量为 0.3 mm 时,试样水平方向的抗拉强度要比沉积方向的高约 50 MPa,在此参数下,成形件抗拉强度的各向异性

最小。分析其原因为:Z 轴提升量为 0.3 mm 时所形成的柱状晶的长度与宽度的差值较小,柱状晶粒趋向等轴。由上述分析可知,抗拉强度与晶粒尺寸

(长度、宽度)呈负相关,所以抗拉强度的差值较小,但宽大的柱状晶降低了其水平方向的抗拉强度。受晶粒长度和宽度的影响,随着 Z 轴提升量增大,抗拉强度的各向异性增大。

当 Z 轴提升量为 0.9 mm 时,抗拉强度的各向异性较大,对不同方向的拉伸试样的断口进行分析,通过扫描电镜(SEM)拍摄得到断口的形貌如图 8 所示。由图 8 可见:三个拉伸试样具有相似的特征,断口上均存在杂乱不一的韧窝,且韧窝内存在不同形状的第二相粒子,根据 SEM 结果可知试样的断裂形式为韧性断裂;但当拉伸方向从 90°变为 0°时,

韧窝的数量增多,尺寸变小,深度变浅,第二相粒子由碎块状变成细小均匀的椭球状,尤其是当拉伸方向为 0°时,韧窝呈现出尺寸一致性,且较均匀。此外,采用电子探针针对韧窝不同位置进行能谱分析,结果如图 9 所示。与韧窝其他位置的元素进行对比分析后可知,第二相粒子中的氧含量明显增加,这表明粒子以粉末所含合金元素的氧化物为主。主要原因为:在激光熔覆过程中,空气中的氧和粉末中的合金元素发生了化学反应,生成了合金化合物粒子。随着熔覆层的不断堆积,已凝固熔覆层会经历多次热循环,导致化合物粒子析出。

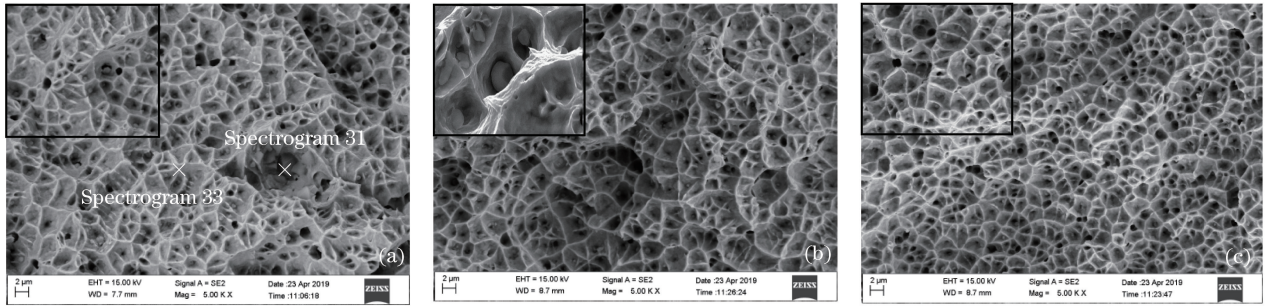


图 8 不同方向拉伸试样的断口形貌。(a) 90°;(b) 45°;(c) 0°

Fig. 8 Fracture morphologies of tensile sample in different directions. (a) 90°; (b) 45°; (c) 0°

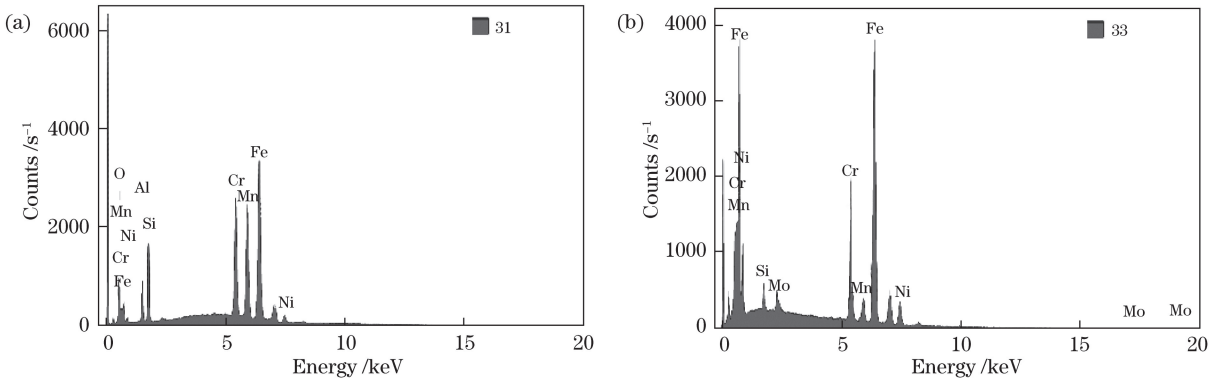


图 9 韧窝不同位置处的能谱分析结果。(a)韧窝边缘;(b)第二相粒子

Fig. 9 Energy spectrum analysis of dimple at different positions. (a) Edge of dimple; (b) 2nd phase particles

产生上述断口形貌变化的原因是第二相粒子存在的区域应力较为集中,相比于其他位置,该区域与基体的结合强度较弱,当拉伸力施加在此处时,容易产生微裂纹。随着拉伸力不断增大,微裂纹不断扩展,最终拉伸试样断裂,在断裂后的表面形成孔洞,数量较多的孔洞聚集形成韧窝状断裂形貌。第二相颗粒往往存在于韧窝底部,也就是裂纹形成的起始位置,尺寸较大的第二相粒子有利于裂纹的传播扩展,孔洞易形核及长大,且形成的韧窝尺寸较大。同理,较大的韧窝也有利于块状第二相粒子析出。当拉伸力的加载方向水平时,断口所对应的粒子呈规则的椭球形,韧窝尺寸小,尺寸较小的第二相

粒子会阻碍晶粒的长大,对成形件起到细晶强化的作用^[16],反映了该方向抗拉强度高但伸长率低的特点。

4 结 论

对比成形件的微观组织和拉伸性能,发现 Z 轴提升量对其产生了显著影响,并总结得出以下结论。1)在不同 Z 轴提升量下获得的薄壁件的显微组织主要为柱状晶,随着层数增多,柱状晶逐渐平行于沉积方向外延生长。受到层厚以及熔池内部能量密度的影响,在其余工艺参数不变的情况下,随着 Z 轴提升量增加,柱状晶的宽度与长度均先增加后减小,

并且重熔深度逐渐减小。2)柱状晶的生长方向和晶粒尺寸导致成形件存在明显的力学性能各向异性,当Z轴提升量为熔覆层高度的1/4时,柱状晶的宽度和长度相对接近,抗拉强度的各向异性较小。成形件的伸长率主要与晶粒的生长方向有关。拉伸性能与断口形貌相对应,浅而小的韧窝与较规则的椭球形第二相粒子反映了试样抗拉强度高、伸长率小的特征。

参 考 文 献

- [1] Zhang K, Wang S J, Liu W J, *et al.* Characterization of stainless steel parts by laser metal deposition shaping [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 104-119.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zhang R, Shi T, Shi S H, *et al.* Closed-loop control of laser engineered net shaping of unequal-height parts [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302005.
张锐, 石拓, 石世宏, 等. 不等高结构件激光近净成形闭环控制 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302005.
- [5] Zhu G X, Li D C, Zhang A F, *et al.* The influence of standoff variations on the forming accuracy in laser direct metal deposition [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, 17(2): 98-106.
- [6] 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.
- [7] Wang J H, Han F Z, Ying W S. Surface evenness control of laser solid formed thin-walled parts based on the mathematical model of the single cladding layer thickness [J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022009.
- [8] Wang X L, Deng D W, Hu H, *et al.* Effect of single z -increment on laser cladding forming [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 702-705.
王鑫林, 邓德伟, 胡恒, 等. z 轴单层行程对激光熔覆成形的影响 [J]. *激光技术*, 2015, 39(5): 702-705.
- [9] Sun J Y, Yu T B, Zhao Y, *et al.* Research on laser cladding forming process of circumferentially inclined thin-walled cylinders [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802004.
孙佳钰, 于天彪, 赵雨, 等. 激光熔覆周向倾斜薄壁圆环成形工艺的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802004.
- [10] Wang X L, Deng D W, Qi M, *et al.* Influences of deposition strategies and oblique angle on properties of AISI316L stainless steel oblique thin-walled part by direct laser fabrication [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 80: 138-144.
- [11] 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.
- [12] Fu G Y, Liu Y, Shi S H, *et al.* Control of process parameters for accumulate screwy thin-walled part by laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding [J]. *Electromachining and Mould*, 2014(2): 43-46.
傅戈雁, 刘宇, 石世宏, 等. 光内同轴送粉激光熔覆堆积扭曲薄壁件工艺参数的控制 [J]. *电加工与模具*, 2014(2): 43-46.
- [13] Hou W, Chen J, Chu S L, *et al.* Anisotropy of microstructure and tensile properties of AlSi10Mg formed by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702003.
侯伟, 陈静, 储松林, 等. 选区激光熔化成形 AlSi10Mg 组织与拉伸性能的各向异性研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702003.
- [14] Qiu C L, Ravi G A, Dance C, *et al.* Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 629: 351-361.
- [15] Gu 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.
- [16] Lan X Y, Li K, Wang F X, *et al.* Preparation of millimeter scale second phase particles in aluminum alloys and determination of their mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784: 68-75.