

激光熔化沉积 AlSi10Mg 成形特性及力学性能

李俐群, 曲劲宇, 王宪

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 研究激光熔化沉积 AlSi10Mg 铝合金的成形特性及力学性能。**方法** 以颗粒度 45~105 μm 的 AlSi10Mg 粉末为材料, 6061 铝合金为基板, 利用光纤激光器在充氩舱内分别进行单层单道、竖直薄壁单墙体与倾斜薄壁墙体的成形试验。测试单墙体的抗拉强度与延伸率, 并通过扫描电子显微镜和光学显微镜对微观组织形貌进行分析。**结果** 单层单道沉积层高度与激光扫描速度负相关, 与送粉速度成线性正相关; 而沉积层宽度与扫描速度负相关, 与激光功率正相关。沉积单墙体时, 沉积前 10 层最不稳定, 墙体厚度低于后续层的厚度。为了使沉积过程稳定, 墙体不塌陷, 通过激光功率在前 20 层左右逐层递减, 成功制备出 250 层 (高 10 cm) 以上的单墙体。工艺选取合适时, AlSi10Mg 具有良好的成形能力, 激光头角度保持竖直不变, 墙体倾角 60°以下可以稳定沉积。制备沉积态 AlSi10Mg 气孔率约 3%, 抗拉强度 250 MPa 左右, 延伸率 5%以上, 抗拉强度高于成分相似的 ZL104 铸件 25%。微观组织内 Al-Si 共晶细小, 没有针片状共晶组织, 并且组织沿沉积方向呈现周期性变化。**结论** AlSi10Mg 在激光熔化沉积时具有良好的成形能力, 沉积态的组织强度高于铸态组织强度。优化后的工艺可以稳定沉积制备下圆上方的变截面薄壁样件。

关键词: AlSi10Mg; 激光熔化沉积; 增材制造; 成形; 组织; 力学性能

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0332-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.040

Formability and Mechanical Property of Laser Metal Deposited AlSi10Mg Alloy

LI Li-qun, QU Jin-yu, WANG Xian

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the formability and mechanical property of laser metal deposited AlSi10Mg alloy. AlSi10Mg powder with size ranging from 45 to 105 μm was utilized as the material and 6061 aluminum alloy was used as the substrate. Single-layer cladding, thin walls and inclined walls were manufactured with fiber laser in argon chamber to test the formability. The tensile strength and elongation of the walls were tested. The microstructure was analyzed with optical microscope and SEM. There was a positive correlation between the height of single layer and powder feeding speed, but a negative correlation with the scanning speed. Further, the same correlation also existed between the width of single layer and laser power and between the width and the scanning speed. When single-layer wall was deposited, the first 10 layers were not stable. The thickness of wall was thinner than subsequent layers. For the sake of improving the stability and preventing from collapse of walls, laser power should decline gradually in the first 20 layers. With this method, a wall more than 250 layers was made steadily and successfully. AlSi10Mg had good formability when process parameters were selected properly. Inclined walls could be deposited even if the wall had tilted to 60 degree. The porosity of the walls was nearly 3%. The tensile strength was approximately 250

收稿日期: 2018-11-08; 修订日期: 2019-02-12

Received: 2018-11-08; Revised: 2019-02-12

作者简介: 李俐群 (1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为激光加工。邮箱: liliquan@hit.edu.cn

Biography: LL Li-qun (1970—), Female, Doctor, Professor, Research focus: laser processing. E-mail: liliquan@hit.edu.cn

MPa and the elongation was about 5%. The tensile strength was 25% higher than that of ZL104 as-casted aluminum alloy. The microstructure periodically varied along the deposition direction. The eutectic was small and no needle-like eutectic was found. The AlSi10Mg has good formability in laser metal deposition process. The microstructure strength of as-deposited samples is better than as-casted alloy. Finally, a variable cross-section thin-walled sample is deposited with optimized processing parameters.

KEY WORDS: AlSi10Mg; laser metal deposition; additive manufacturing; formability; microstructure; mechanical property

激光熔化沉积技术是基于激光熔覆技术发展起来的一种金属增材制造技术,可用于金属材料的增材制造、修复和熔覆,在工业界中有非常广泛的应用^[1]。采用激光熔化沉积技术进行不锈钢、钛合金、镍合金的增材制造在国内外都有较多的研究^[2-5],但是对于铝合金材料,激光熔化沉积制造技术的研究、应用都寥寥无几。相比之下,选区激光熔化技术在 Al-Si 系铝合金的增材制造上已经非常成熟,研究重点已经转移至诸如 7 系铝合金等高强铝合金的制备中^[6-8]。主要是因为铝合金粉末流动性差,对激光具有较高的反射,且铝合金沉积过程易形成气孔、夹渣甚至氧化膜等缺陷,严重影响了粉末向熔池输入的稳定性和。此外,铝合金熔池的黏度较低、材料导热性好,沉积过程很容易出现下塌。因此激光熔化沉积铝合金的成形过程较难控制。

现有的文献对激光熔化沉积 Al-Si 系铝合金的组织及各部分均匀性做了一定的研究^[9-11],发现激光熔化沉积方法制备的试件的组织沿着沉积方向具有一定的周期性,每个周期内的组织并不均匀,沉积试件靠近基板部分、中间部分的组织与顶端部分的组织也

都有一定的区别。关于激光熔化沉积 Al-Si 系铝合金沉积态的力学性能的研究^[12-14]中,学者间得出的结果差异较大,抗拉强度最低低至 125 MPa,最高高达 356 MPa,波动如此大的原因尚不明确。

作为航空航天的常用材料,铝合金激光增材制造与修复技术将具有重要的战略意义。本文以 AlSi10Mg 铝合金为材料,采用同轴激光送粉方式进行铝合金材料激光熔化沉积特性的试验研究,并对其激光熔化沉积的成形能力及力学性能进行分析,为铝合金激光熔化沉积技术的应用提供重要的理论依据与试验数据。

1 试验

试验材料为 AlSi10Mg 粉末,颗粒粒度在 45~105 μm,主要的合金元素为 Si (9.0%~11.0%) 和 Mg (0.25%~0.45%)。该粉末的具体成分在表 1 中给出,粉末的微观形貌如图 1 所示。沉积基板选用 15 mm 厚的 6061 铝合金,为去除表面氧化膜,沉积前对基板进行化学清洗。

表 1 AlSi10Mg 铝合金化学成分
Tab.1 Composition of AlSi10Mg alloy

								wt%
Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Sn	Pb	Fe	Al
9.00~11.00	0.25~0.45	≤0.10	≤0.30	0.20~0.50	≤0.01	≤0.05	≤1.00	Bal.

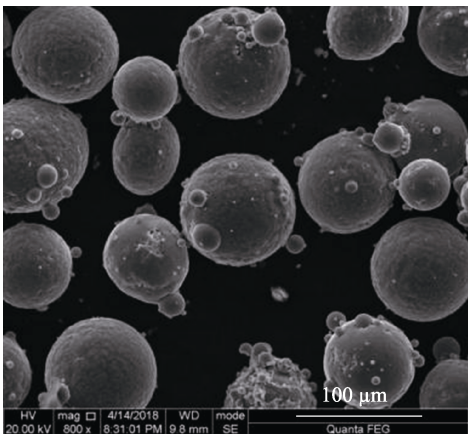


图 1 AlSi10Mg 粉末微观照片
Fig.1 SEM image of AlSi10Mg powder

试验系统包括 IPG 公司的 YLR-5000 型 5 kW 光纤激光器、KUKA 机器人, GTV 公司的 MF-PF2/2 双桶送粉器。为减少氧化,保证成形质量,全部试验在

充氩舱内进行。

在显微硬度分析中,使用 HVS-1000Z 型显微硬度计,载荷 200 g,加载时间为 10 s。拉伸性能测试在单墙体样件上沿沉积方向取样,拉伸样件尺寸如图 2 所示,每个数据取 3 个拉伸件验证。采用蔡司场发射扫描电镜 Merlin Comact 对断口进行观察。

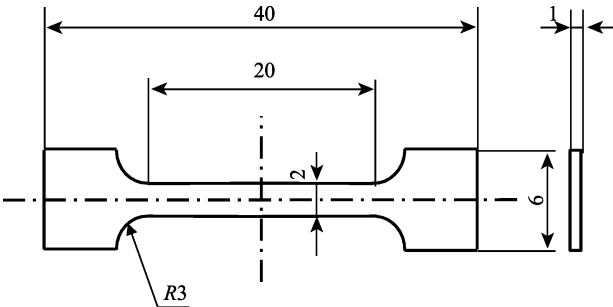


图 2 拉伸试样尺寸
Fig.2 Dimension of tensile sample

2 结果及分析

2.1 单道沉积的成形特性

通过建立单道沉积工艺参数与沉积层几何尺寸的关系,可为后面进行连续沉积的单墙体样件形状控制提供一定的试验指导。在单层单道的成形控制中,最主要要控制的3个要素是单道的宽度、高度以及表面粗糙度。这3个要素均与沉积过程中熔池的形态及熔池和熔池与粉末的交互作用相关。影响熔池形态的最主要工艺参数是激光功率和激光扫描速度,而影响熔池与粉末交互作用最相关要素除了前两个之外,还有送粉速度。

在满足沉积单道表面光滑的前提下,单道宽度、高度与送粉速度的关系如图3所示。在2.5~5.5 g/min的送粉速度、900~1200 W激光功率与0.6~1.5 m/min

扫描速度下,单道沉积层的高度范围一般在0.2~0.8 mm、宽度在0.8~1.4 mm之间变化。可以看出,单道沉积层高度与送粉速度几乎呈现线性关系,但是单道沉积层宽度却几乎不受送粉速度的影响,这是因为沉积层宽度与熔池尺寸的关系更为密切,而熔池的尺寸又主要取决于激光的热输入,而非送粉量。所以改变沉积层的宽度一般是通过调节激光功率来实现的。

图4给出了扫描速度对单道沉积层高度、宽度的影响规律。可以看出,速度变化对沉积效率与层高的影响还是较明显的,速度从0.6 m/min增加到1.5 m/min,其熔覆层高度减小了约3倍。随着激光扫描速度的增大,熔池倾向于宽度变小,因此单道的宽度随扫描速度增大而线性的减小;同时,随着激光扫描速度的增大,熔池的移动速度增大,虽然单位时间内粉末进入熔池的数量不变(单位时间内沉积的体积是基本固定的),但是沉积的长度变长,进而导致单道的高度减小。

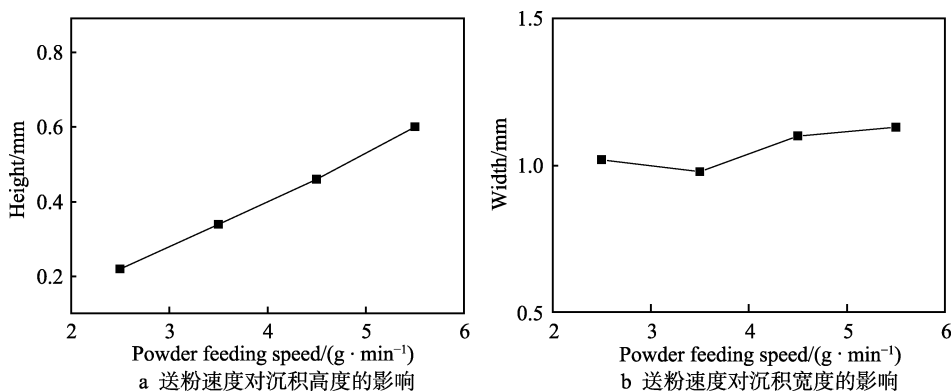


图3 送粉速度对沉积高度与宽度的影响

Fig.3 Effect of powder feeding speed on deposition height and width: a) effect of powder feeding speed on deposition height; b) effect of powder feeding speed on deposition width

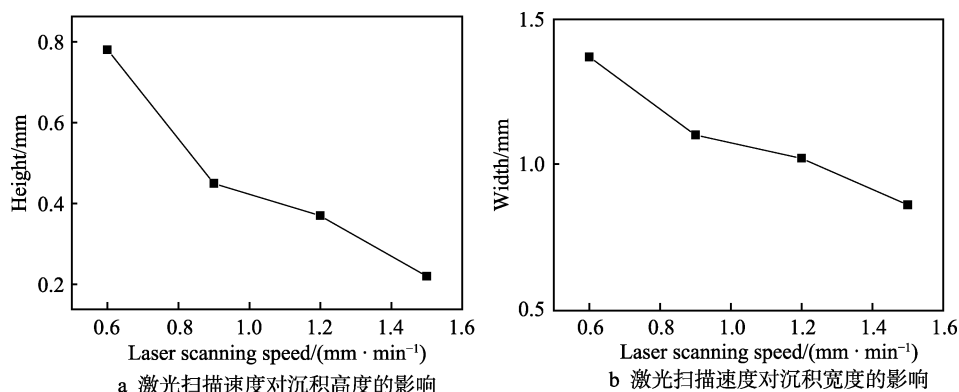


图4 激光扫描速度对沉积高度与宽度的影响

Fig.4 Effect of laser scanning speed on deposition height and width: a) effect of laser scanning speed on deposition height; b) effect of laser scanning speed on deposition width

2.2 薄壁单墙体的成形特性

薄壁单墙体的成形主要难点在于热输入的积累以及散热条件的变化。在沉积前10层左右时,同时存在着沉积层与基板间的热传导散热和沉积层与气

体环境的热对流散热。而在10层以上时,由于距离基板较远且有较大的热积累,热传导能力减弱,散热主要依赖于热对流。因此,要保持熔池尺寸的稳定性,沉积薄壁单墙体的激光功率要随层高的增加逐渐减小。同时还发现,只要沉积的单墙体可以稳定沉积

2 cm, 则该工艺便可以一直保持稳定沉积直至结束; 如果在沉积不足 2 cm 时, 最顶层沉积层出现了波浪形塌陷且未自行愈合, 则沉积过程必定失败。

最终, 试验采取激光功率 1200 W、扫描速度 1.2 m/min、送粉速度 3.5 g/min 的单道沉积工艺参数完成前 5 层的沉积, 并将第 6 层到第 10 层的激光功率降低至 1100 W, 第 10 层到第 20 层的激光功率降低至 1025 W, 第 20 层之后的激光功率降低至 950 W, 最终制备了稳定生长 250 层、60 mm×100 mm×1.7 mm 的薄壁墙体 (如图 5a 所示), 墙体的截面图如图 5b 所示。使用 Matlab 软件对墙体截面组织图片进行滤波及二值化处理, 最后计算得到墙体的气孔率在 3% 以下。

在激光头垂直于基板不变的前提下, 试验调节工艺分别对薄壁墙体倾斜 30°、45°、60°以及 70°进行沉积, 如图 6 所示。结果表明, 只有倾角 70°时沉积失败; 倾角为 30°和 45°时, 薄壁墙体可以稳定沉积 3 cm 以上; 而倾角为 60°时, 沉积的墙体两侧偶尔出现失稳塌陷, 而中间部分可以稳定沉积。由此可见, 虽然 AlSi10Mg 合金液态时流动性很好, 但是在倾斜墙体

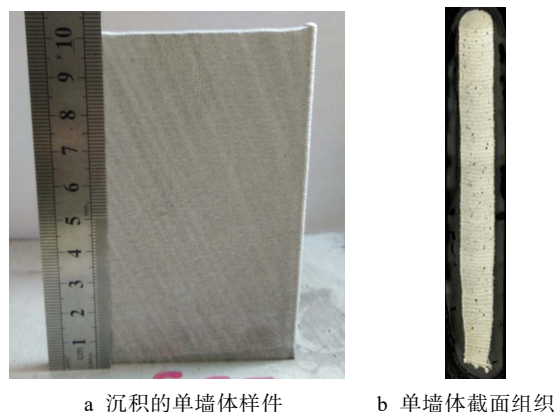


图 5 激光熔化沉积的薄壁单墙体样件

Fig.5 Single-layer thin wall deposited by laser metal:
a) deposited single-layer wall; b) microstructure of cross-section of single-layer wall

沉积过程中, 倾角小于 60°时, 在 AlSi10Mg 合金液体表面张力及氧化膜的联合作用下, 熔池并没有全部塌陷, 仍维持着与非倾斜墙体类似的熔池形貌。因此可以得出, AlSi10Mg 对于倾斜的墙体也有优秀的成形能力。

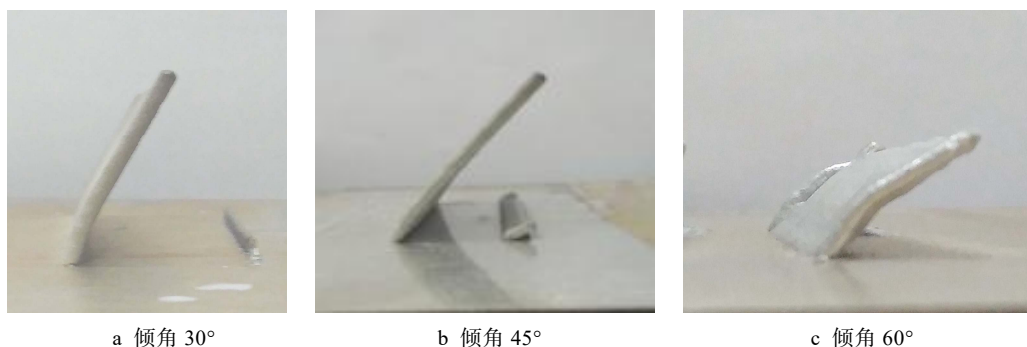


图 6 倾斜墙体的成形效果

Fig.6 Formability of inclined walls: a) 30°; b) 45°; c) 60°

2.3 沉积件的微观组织特征与力学性能

沿沉积方向测量了 AlSi10Mg 激光沉积样件的显微硬度, 其测量位置如图 7 中框选所示, 测试的第一点位于靠近基体沉积的第一层的沉积高度中间处, 沿着沉积层高度方向向上, 每隔 1 mm 测试一点, 测量结果见图 8。测试结果显示, 成形件的硬度在 70~90HV 之间波动, 且基体附近硬度变化出现了较大波动, 当组织稳定后, 硬度基本在 75~85HV 之间小幅度波动, 平均硬度值为 78.71HV。之所以沉积层前 5 mm 硬度波动较大, 主要由两方面引起: 首先是散热条件变化时, 热传导为主导变为热对流为主导, 导致凝固速率不稳定; 其次是因为为了沉积成形稳定, 激光功率不断变化, 也使得熔池凝固速率不稳定, 最终导致硬度沿沉积方向波动。

表 2 给出了沉积的单墙体样件拉伸性能, 拉伸试样垂直于沉积方向取样。因为 AlSi10Mg 为粉末牌号,



图 7 显微硬度测试位置

Fig.7 Location of hardness testing

国标中没有与之对应的铸件牌号, 所以选取化学成分相似的国标 ZL104 和美标 A360 的力学性能与之对比。

从表 2 中数据可以看出, 本研究制备的 AlSi10Mg 明显优于 ZL104, 延伸率达到其 3 倍以上。并达到

A360 合金强度的 80%以上。现有的关于 AlSi10Mg 沉积态强度的文献较少,强度差异也非常大,本试验的强度优于 Chen 等^[12]学者制备的试件和丁莹等学者^[14]使用 CO₂ 激光器制备的沉积态试件,但是低于

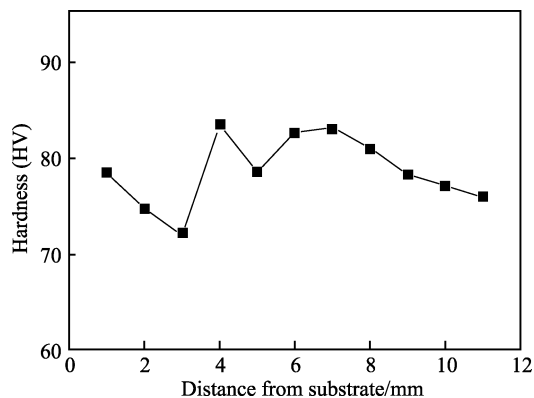


图 8 沉积态 AlSi10Mg 显微硬度
Fig.8 Hardness of deposited AlSi10Mg

表 2 AlSi10Mg 激光沉积样件与 ZL104 铸造铝合金力学性能

Tab.2 Mechanical properties of laser deposited AlSi10Mg samples and ZL104 casted alloy

State of specimens	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
As-deposited specimens in this paper	131~135	250~259	5.4~6.2
ZL104 ^[15]	65	200	1.5
A360 ^[16]	170	305	2.5
As-deposited specimens fabricated by fiber laser ^[12]		125~162	
As-deposited specimens fabricated by CO ₂ laser ^[14]	87~92	208~210	13.4~15.9
As-deposited specimens fabricated by YAG laser ^[14]	203~210	340~356	3.2~4.5

丁莹等使用 YAG 激光器制备的沉积态试件。原因推测为本试验的沉积件气孔率较大所致(沉积试件的气孔率在 3%左右)。图 9 所示为沉积件的断口形貌,可以观察到气孔对断裂部位产生了影响。

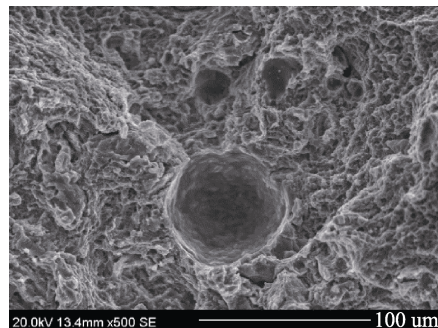
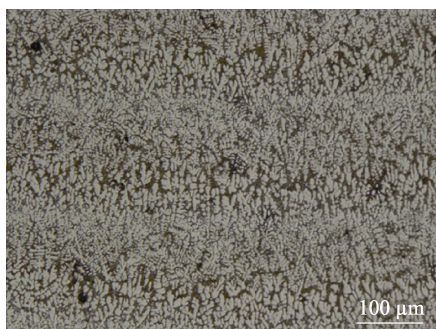


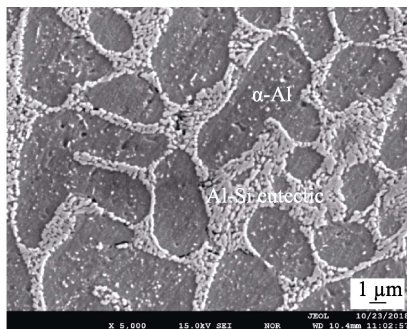
图 9 沉积态试件断口形貌
Fig.9 Tensile fracture surfaces of the tensile specimen

沉积样件的微观组织结构如图 10 所示。由图 10a 可以看出,沉积态的组织具有一定的周期性,这种组织的形成与沉积过程中每层的重熔有很大的关系。图 10b 中亮白色的区域主要为 Al-Si 共晶,灰色区域为 α -Al。重熔过程中,熔池下方未熔化组织在热循环的作用下,形态发生改变。这种热处理使得组织中的 Al-Si 共晶生长,且变得粗大,所以每层沉积层下方的这部分区域亮白色增多。

由于在金属型铸态 AlSi10Mg 合金中,共晶 Si 因为 Mg、Fe 等其他元素的影响,通常呈针片状,这种形貌下共晶组织对材料的韧性影响很大,所以铸态的 AlSi10Mg 的延伸率一般较低。而在本试验沉积态的 AlSi10Mg 合金中,Al-Si 共晶的形貌得到了很好的改善(图 10a)。组织中没有针片状共晶,而是更为细小的颗粒状(图 10b),进而降低了 Al-Si 共晶对基体的撕裂作用,这种形貌提升了试件的强度与塑性,因此沉积件的塑性相对于 ZL104 提升了 3 倍以上。



a 组织在光镜下的照片



b 组织在电镜下的照片

图 10 沉积态 AlSi10Mg 微观组织

Fig.10 Microstructure of laser metal deposited AlSi10Mg: a) OM image; b) SEM image

2.4 变截面薄壁样件的制备

采用前文介绍的逐层递减激光功率的工艺方法,使用自主研发的基于 Open CASCADE Technology 的

激光熔化沉积 CAM 软件,制备了图 11 所示的变截面薄壁样件,模型中变截面处的倾角(最大处)小于 45°。最终沉积的 AlSi10Mg 合金样件如图 11c 所示,样件壁厚 2.4 mm,沉积过程稳定,表面质量较好。

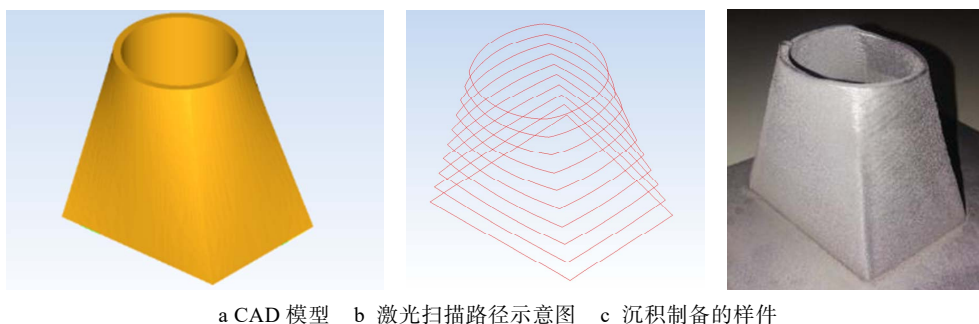


图 11 激光熔化沉积制备的变截面薄壁样品

Fig.11 Variable cross-section sample fabricated by LMD: a) CAD model; b) illustration of laser scanning path; c) deposited sample

3 结论

1) 单层单道的激光熔化沉积层宽度主要受扫描速度、激光功率的影响, 沉积高度主要受扫描速度和送粉速度的影响。

2) 激光熔化沉积薄壁单墙体时, 前 20 层采用激光功率递减的工艺可以实现尺寸的稳定控制, 制备的 60 mm×100 mm×1.7 mm 垂直单强体样品, 其气孔率低于 3%。同时可以在不改变激光头角度情况下, 实现 60°以内薄壁墙体的成形; 而倾斜角度 60°及以上时, 沉积过程会失稳而造成沉积失败。

3) 激光熔化沉积的 AlSi10Mg 显微硬度为 78.71HV, 拉伸强度可以达到 250 MPa, 延伸率 5% 以上, 相比于化学成分近似的铸造态 ZL104, 强度和塑性均有大幅提高。试件断裂呈韧性断裂特征, 沉积态组织中的过固溶的 α -Al 与细小颗粒状的 Al-Si 对沉积态试件的强度与韧性的增强起主要作用。

4) 根据薄壁墙体制作工艺与原理的指导, 成功制备出下圆上方的变截面薄壁样品。

参考文献:

- [1] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
WANG Hua-ming, ZHANG Shu-quan, WANG Xiang-ming. progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components(invited paper)[J]. Chinese journal of lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [2] 陈博, 邵冰, 刘栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 57-63.
CHEN Bo, SHAO Bing, LIU Dong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(4): 57-63.
- [3] 常帅. IN718 高温合金光纤激光增材制造技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CHANG Shuai. Research on fiber laser additive manufacturing technology of IN718 superalloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [4] 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.

- [5] HUANG Wei-dong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
- [6] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属 3D 打印技术的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 78-84.
- [7] PU Yi-song, WANG Bao-qi, ZHANG Lian-gui. Metal 3D printing technology[J]. Surface technology. 2018, 47(3): 78-84.
- [8] DING Y, MUNIZ-LERMA J, TRASK M, et al. Microstructure and mechanical property considerations in additive manufacturing of aluminum alloys[J]. MRS bulletin, 2017, 41(10): 745-751.
- [9] ABOULKHAIR N T, MASKERY I, TUCK C, et al. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment[J]. Materials science & engineering A, 2016, 667: 139-146.
- [10] TODD I. Metallurgy: No more tears for metal 3D printing[J]. Nature, 2017, 549(7672): 342-343.
- [11] DINDA G P, DASGUPTA A K, BHATTACHARYA S, et al. Microstructural characterization of laser-deposited Al 4047 alloy[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2013, 44(5): 2233-2242.
- [12] DINDA G P, DASGUPTA A K, MAZUMDER J. Evolution of microstructure in laser deposited Al- 11.28%Si alloy [J]. Surface & coatings technology, 2012, 206(8): 2152-2160.
- [13] JAVIDANI M, ARREGUIN-ZAVALA J, DANOVITCH J, et al. Additive manufacturing of AlSi10Mg alloy using direct energy deposition: Microstructure and hardness characterization[J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 26(4): 587-597.
- [14] CHEN B, YAO Y Z, SONG X G, et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg alloy using direct metal deposition[J]. Ferroelectrics, 2018, 523(1): 153-166.
- [15] SINGH A, RAMAKRISHNAN A, DINDA G. Fabrication of Al-11.2Si components by direct laser metal deposition for automotive applications[J]. Journal of welding and joining. 2017, 35(4): 67-73.
- [16] 丁莹, 杨海欧, 白静, 等. 激光立体成形 AlSi10Mg 合金的微观组织及力学性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 52-60.
DING Ying, YANG Hai ou, BAI Jing, et al. Microstructure and mechanical property of AlSi10Mg alloy prepared by laser solid forming[J]. China surface engineering, 2018, 31(4): 52-60.
- [17] GB/T 1173—2013, 铸造铝合金[S].
- [18] GB/T 1173—2013, Casting aluminum alloy[S].
- [19] ASTM B85/B85M—14, ASTM committee B07 on light metal and alloy. Standard specification for aluminum-alloy die casting[S].