

基材冷却状态对激光沉积 AlSi10Mg 合金成形质量的影响

赵宇辉^{1,2,3,*}, 王志国^{1,2}, 赵吉宾^{1,2}, 何振丰^{1,2}, 高元^{1,4}, 张宏伟^{5,6}

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004;

⁵中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016;

⁶泰州鑫玛科技产业发展有限公司, 江苏 泰州 225327

摘要 为研究基材冷却状态对激光沉积成形 AlSi10Mg 合金质量和性能的影响, 在不同冷却条件下沉积成形 AlSi10Mg 合金试样。利用温度测量系统、金相显微镜、扫描电镜、万能材料试验机对成形过程中温度演变和成形后试样宏观形貌、组织状态、拉伸性能等进行分析。结果表明: 合理的基材冷却温度会使沉积效率提升, 缺陷率降低; 改变冷却条件可以使沉积层组织发生显著变化, 内部的枝晶间距明显减小。优化冷却条件后沉积试样的屈服强度和抗拉强度较无冷却条件下的分别提升了约 4% 和 7%, 其断裂方式均为韧性断裂。

关键词 激光光学; AlSi10Mg 合金; 激光沉积; 微观组织; 强度

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1114002

Influence of Substrate Cooling Condition on Properties of Laser Deposited AlSi10Mg Alloys

Zhao Yuhui^{1,2,3,*}, Wang Zhiguo^{1,2}, Zhao Jibin^{1,2}, He Zhenfeng^{1,2}, Gao Yuan^{1,4}, Zhang Hongwei^{5,6}

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²Institute of Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110169, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

⁵Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

⁶Taizhou Xinma Technology Industry Development Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu 225327, China

Abstract In this study, the laser deposited AlSi10Mg alloys are formed under different cooling conditions to investigate the effect of the substrate cooling condition on the deposition qualities and properties. Further, we analyze the temperature variation during the forming process, morphologies, microstructures, and tensile properties of the formed specimens using the temperature testing systems, an optical microscope, a scanning electron microscope, and a universal material testing machine, respectively. The results denote that the deposition efficiency increases and the defect rate decreases when a reasonable substrate cooling temperature is considered. The deposition layer structure can be significantly altered when the cooling conditions are changed. In addition, the dendrite space of the deposition specimen is observed to decrease. The tensile strength and yield strength of the specimens fabricated under the cooling condition are improved by approximately 4% and 7%, respectively, when compared with those of the specimens fabricated without applying any cooling conditions. Furthermore, the fracture mode of the specimens is ductile fracture.

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1105802)、国家自然科学基金(51805526)

* E-mail: yhzhaos@sia.cn

Key words laser optics; AlSi10Mg alloy; laser deposition; microstructure; strength

OCIS codes 140.3580; 140.3300; 160.3900

1 引 言

铝合金材料因具有制造工艺简单、成形性好、耐腐蚀性优良、比强度高优点,在飞机制造领域有着广泛的应用^[1]。例如在我国进口的现役苏 27 战机上,铝合金零件数量占比接近 40%。在长时间服役过程中,部分铝合金零件损坏后,经常面临着备件不足的情况,而备件的仿制受制于流程、图纸等问题,周期漫长。目前,迫切需要一种先进的维修技术对其进行高效修复,延长工作寿命。激光沉积成形(LDMD)技术由于具有快速高效、成本低、原位修复变形小等优势,在航空零件修复中的应用越来越广泛。但铝合金对激光反射率高,能量吸收率低,且具有熔点低、导热率高等特性,导致成形过程中难以控制零件的尺寸及外形精度^[2],并且零件内部易出现气孔、缩孔及氧化物夹杂等缺陷^[3-4]。

现有研究主要集中在对沉积态铝合金微观组织及其基础力学性能优化方面。钦兰云等^[5-6]对预制损伤槽的 ZL114A 零件进行了激光沉积修复实验,发现对其修复后热处理实验能够明显强化沉积态铝合金组织,提高了力学性能。丁莹等^[7]研究了不同波长的激光对 AlSi10Mg 铝合金沉积态及 T6 热处理状态的力学性能和显微组织的影响,发现脉冲光纤激光器在性能和组织上要优于二氧化碳激光器。陈永城等^[8]、Javidani 等^[9]分别对 4045 合金、AlSi10Mg 合金激光沉积态组织中的组织形态、显微硬度渐变等进行了研究。现有的研究主要集中在铝合金激光沉积成形过程的组织及性能的转变方面,而关于铝合金沉积成形过程中成形质量调控方法方面的研究相对较少。常用的成形质量调控手段包括工艺参数调控^[5,10]、外场条件调控^[3,11]等。其中外场条件调控特别是成形温度场控制可以提高沉积成形质量,已经在不锈钢等材料成形过程中得到

了验证^[12]。考虑到铝合金沉积成形过程中同样存在着热累积现象,且与其他合金相比,铝合金的单层重熔率更高,因此,在铝合金沉积成形过程中进行温度场调控,可提高成形质量。本文利用 AlSi10Mg 合金材料进行激光沉积成形工艺实验,对基材施加不同的冷却条件。然后对成形试样的宏观形貌、内部的孔隙缺陷、微观组织、力学性能变化情况进行研究,以获得不同冷却条件对沉积质量和性能的影响规律。

2 实验方法

2.1 激光沉积成形实验

将 AlSi10Mg 球形粉末作为沉积材料,其粒度为 48~150 μm ,如图 1 所示。基体材料为铸态 AlSi10Mg 合金,尺寸为 108 mm \times 19 mm,合金元素的含量如表 1 所示。采用的激光沉积成形设备由波长为 1064 nm 的 YAG 激光器、高精度可调送粉器、Stäubli 五轴机器臂、同轴送粉喷嘴、水冷工作台及氩气保护装置组成。

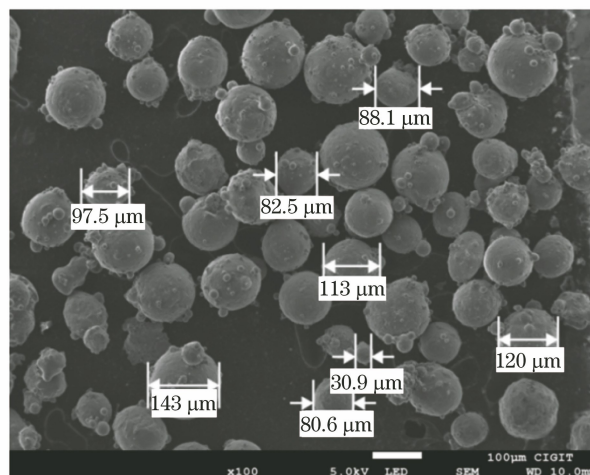


图 1 AlSi10Mg 粉末的扫描电子显微镜(SEM)图

Fig. 1 SEM image of AlSi10Mg powder

表 1 AlSi10Mg 合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of AlSi10Mg alloy

Element	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Ni	Zn	Mn	Al
Mass fraction /%	9-11	0.4	0.16	0.004	0.003	<0.005	<0.002	<0.001	Bal.

激光沉积成形的工艺参数为激光光斑直径为 3 mm,激光功率为 2000 W,扫描速度为 5 mm/s,送粉速率为 1.9 g/min。铝合金对激光具有较高的反射率,为了保护光路和镜组,因此在实验过程中保持激

光入射方向与扫描方向的夹角为 98°。分别设置三种基板冷却温度和三种层间停顿(冷却)时间进行典型试样的正交沉积实验,每试样沉积 12 层,图 2 为沉积过程示意图,图 3 为实验过程照片。样品用于观察沉

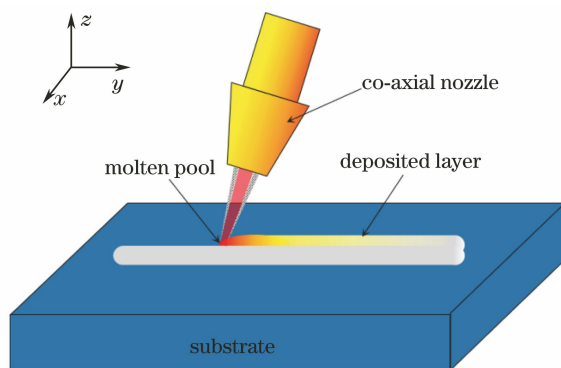


图 2 单道试样 LDMD 示意图

Fig. 2 Schematic of LDMD process of single-track sample LDMD

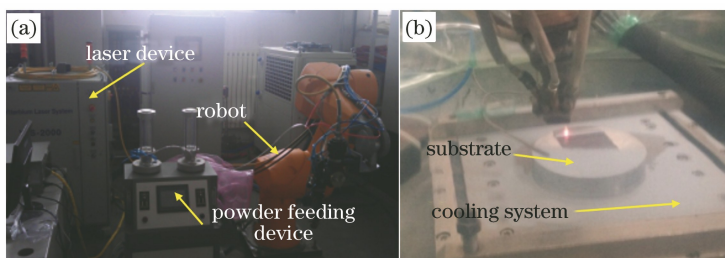


图 3 实验装置和 LDMD 实验图。(a)实验装置图;(b)实验图

Fig. 3 LDMD equipment and experimental process. (a) LDMD equipment; (b) LDMD experimental process

积层内部孔隙缺陷情况及微观组织结构。各试样对应的冷却条件如表 2 所示。

表 2 各试样所对应的冷却温度和冷却时间

Table 2 Cooling temperature and cooling time of each sample

Specimen	Temperature of cooling / $^{\circ}\text{C}$	Dwell time /s
I-1	10	15
I-2		10
I-3		5
II-1	20	15
II-2		10
II-3		5
III-1		15
III-2		10
III-3		5

分别在有冷却和无冷却两种条件下对多层搭接试样进行沉积实验。在基板上埋入 5 支 K 型热电偶,用于在沉积过程中测量各点的温度随时间的变化情况。如图 4 所示,热电偶位于沉积层下方 5 mm,间隔 20 mm。沉积过程中采用单向扫描,搭接率为 30%。为防止过多的热积累,每沉积 6 层为一次循环,进行 1 次长时间冷却停顿,并在无冷却条件下,每沉积 2 层额外停顿 120 s。

2.2 分析测试实验

对单道试样进行线切割,并进行金相试样的镶

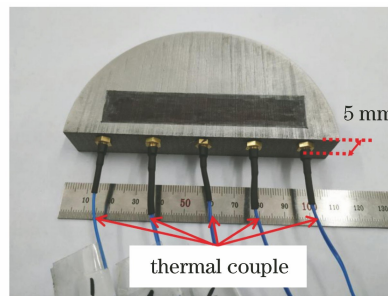


图 4 基板上热电偶埋入位置

Fig. 4 Embed point of thermal couple on substrate

嵌及磨抛(沉积层 $x-z$ 截面)。使用 Keller 试剂 (2.5 mL $\text{HNO}_3 + 1.5 \text{ mL HCl} + 1 \text{ mL HF} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$)对试样进行腐蚀。使用光学显微镜 (Zeiss Axio Observe A1 型)对金相试样进行观察;并使用 Image-Pro Plus 图像分析软件对各试样中的缺陷情况及沉积层的形貌尺寸进行测量和统计;使用场发射 SEM (TESCAN MAIA3 型)对样品微观组织结构、缺陷形貌、断口形貌进行观察。同时为探究沉积层力学性能的各向异性,分别从平行扫描方向和垂直扫描方向对工艺优化后的沉积层进行拉伸试样的切割,每组参数下切取 5 个拉伸试样,各组试样所对应的参数如表 3 所示。其中,1-1~5 表示无冷却条件下的 5 个拉伸试样,2-1~5 表示有冷却条件下平行扫描方向切割的 5 个拉伸试样,3-1~5

表示有冷却条件下垂直扫描方向切割的 5 个拉伸试样。使用电子拉伸试验机(Zwick Z050 型,德国)对拉伸试样进行实验。依照美国材料与试验协会

(ASTM)标准,拉伸试样的取样方向按照拉伸试样外围三边长尺寸大小降序排列^[13],坐标方向如图 5 所示。

表 3 各组拉伸试样所使用的相关参数

Table 3 Processing parameters of tensile samples

Number	Cooling condition	Temperature /°C	Delay time /s	Sampling direction
1-1~5	Without cooling		5	yzx
2-1~5	With cooling	10	15	yzx
3-1~5	With cooling	10	15	zyx

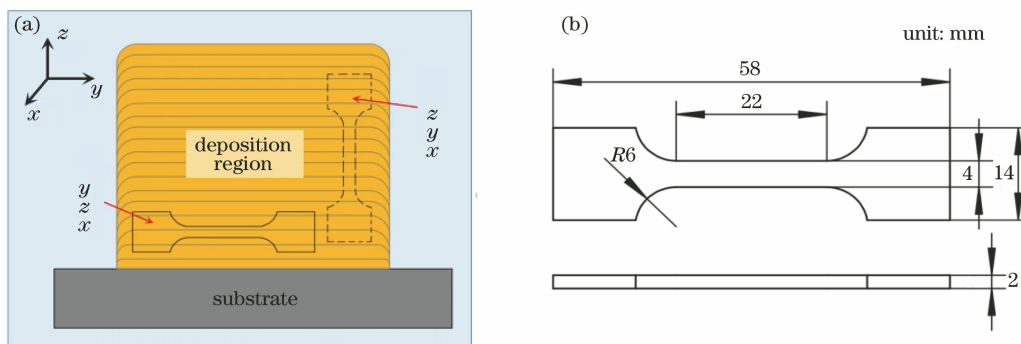


图 5 拉伸试样的取样方向及尺寸。(a)取样方向;(b)尺寸

Fig. 5 Sampling directions and size of tensile samples. (a) Sampling direction; (b) size

3 实验结果及分析

3.1 沉积过程中基体温度的演变

利用热电偶监测并记录基体各点在沉积成形过

程中温度变化的情况,记录间隔为 1 s。图 6、7 分别为有、无冷却条件下的测温曲线,其中 CH1~CH5 为不同位置处基体温度随时间的变化曲线。可以明显看出有、无冷却条件下进行沉积时基板及沉积层

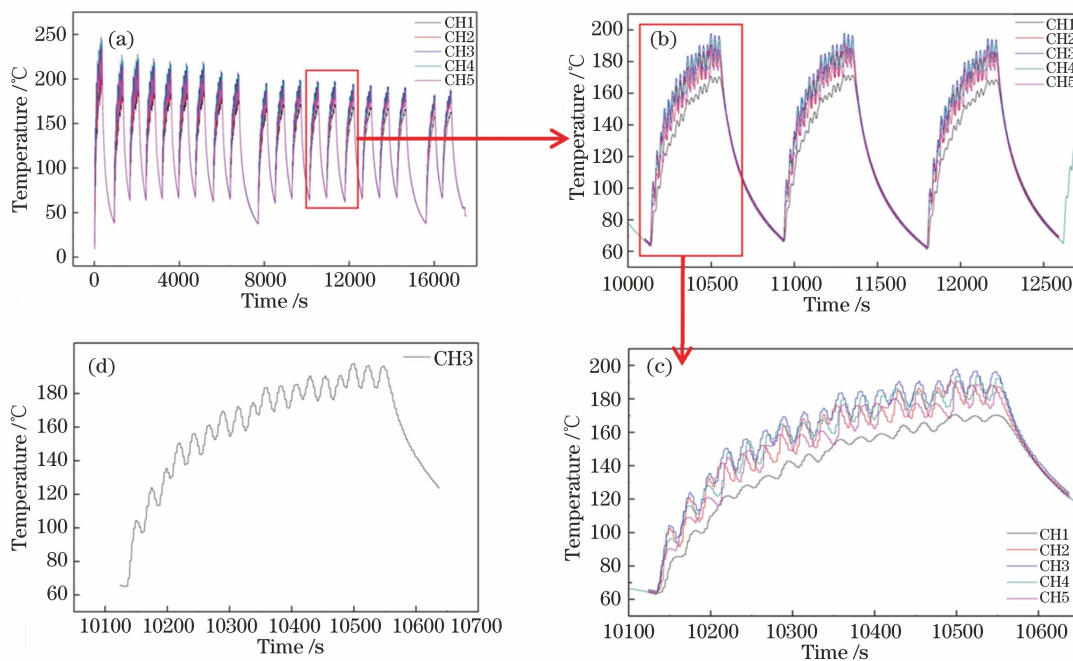


图 6 有冷却条件下的测温曲线。(a)基板整体温度曲线;(b)区间温度曲线;
(c)扫描过程中升温曲线;(d)单一测温点处的温度曲线

Fig. 6 Temperature curves of substrate with cooling. (a) Overall temperature curve of substrate; (b) interval temperature curve; (c) temperature rise curve during scanning; (d) temperature curve at single temperature measuring point

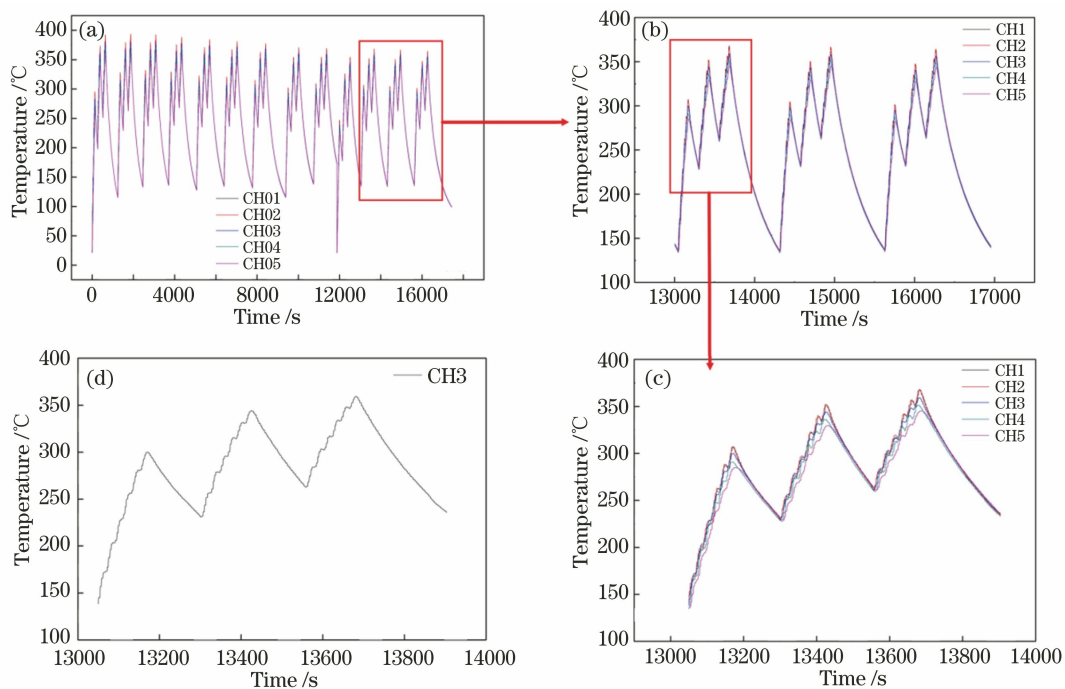


图 7 无冷却条件下的测温曲线。(a)基板整体温度曲线;(b)区间温度曲线;(c)扫描过程中升温曲线;(d)单一测温点处的温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of substrate without cooling. (a) Overall temperature curve of substrate; (b) interval temperature curve; (c) temperature rise curve during scanning; (d) temperature curve at single temperature measuring point

的热积累情况。在冷却条件良好的情况下,基板的最高温度达到 200 °C 左右,如图 6(a)、(b)所示,而在无冷却条件下基板温度最高升至近 400 °C,如图 7(a)、(b)所示;并且在沉积过程中,有冷却条件下基板温度上升较为缓慢,如图 6(c)所示,而无冷却条件时基板温度急剧上升,如图 7(c)所示;同时可以明显看到,在有冷却条件下,各测温点处的温度随着激光的扫描发生起伏。图 6(d)和图 7(d)为不同冷却条件下相同单一测温点处在一次 6 层沉积循环中基体温度的变化,可以看出,施加外部冷却,基体温度会出现一定程度的升降趋势,而在无冷却条件下,基体温度整体只有升而无降的趋势。

3.2 冷却条件对沉积层形貌影响

图 8(a)为 9 种不同冷却条件下的单道沉积试样的宏观组织照片(沉积层 y-z 截面)。使用图像分析软件依照图 8(b)对各试样的沉积高度、顶层宽度和顶层厚度、顶层占比(顶层厚度与沉积高度之比)进行测量,统计结果分别如图 9 所示。在无冷却的情况下,沉积试样的沉积高度较低,但顶层的宽度和厚度都远高于有冷却条件下的沉积试样。在无冷却条件下,顶层厚度占整个沉积高度 70%左右,说明沉积过程中每次扫描会对前一层进行大量重熔。同时发现,当冷却温度为 10 °C 时,沉积高度、顶层宽

度及顶层厚度均小于冷却温度为 20 °C 时,并且随着冷却时间的增加,二者之间的差距逐渐扩大。

产生以上现象的原因如下。金属材料对激光的吸收率会随材料表面的温度升高而增大^[14],根据测温数据,在无冷却条件下,基板及沉积层的温度会急剧大幅度升高,使得激光的吸收率也随之大幅度提升,进而熔池尺寸增大,重熔率提高;熔池内冷却速率较低,液态金属凝固时间较长,因而在相同的送粉速率条件下,受送入的粉量限制,沉积层趋于横向生长,因此熔覆的宽度增大、高度减小。反之,在有冷却条件下,基板及沉积层温度提升幅度较小,对激光吸收率较低,较小的熔池尺寸以及较为快速的凝固速率使得沉积层趋于纵向生长。但在冷却温度为 20 °C 时,材料的表面温度会略高于冷却温度为 10 °C 时的,并且随着冷却时间的增加二者之间的这种表面温度差异也会扩大。当送粉量相对充足的情况下,这种温度增加引起的激光吸收率的小幅提升反而会使熔覆层在横向和纵向均充分生长。对比图 8(a)可以看出,在基体冷却温度为 10 °C,层间停顿时间为 15 s 时,缺陷率最小。

3.3 冷却条件对沉积层微观组织的影响

图 10、11 分别为有、无冷却条件下沉积试样第 5 层的 SEM 照片。可以明显看到,在有冷却的情况

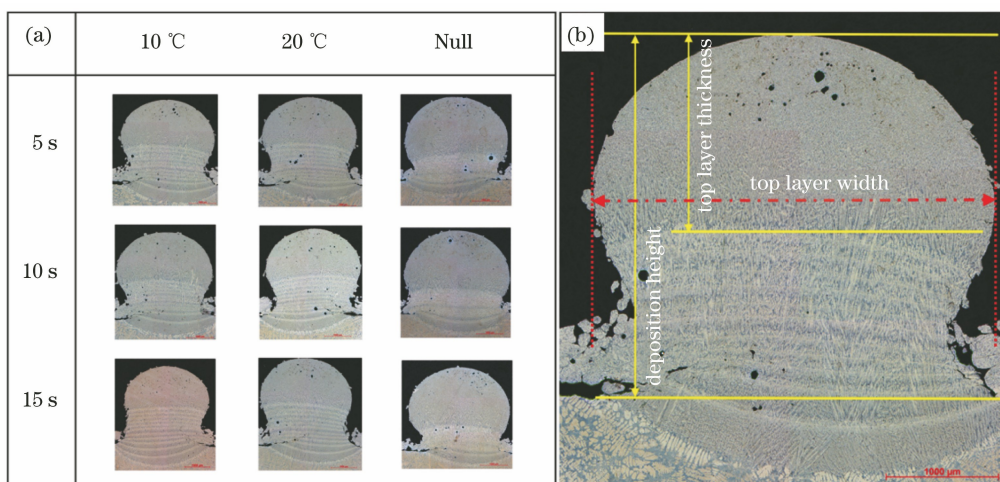


图 8 AlSi10Mg 合金沉积态宏观组织形貌。(a)不同冷却参数;(b)相关几何特征的测试位置
 Fig. 8 Macrostructure morphology of deposited AlSi10Mg alloy. (a) Different cooling parameters;
 (b) test locations for related geometric features

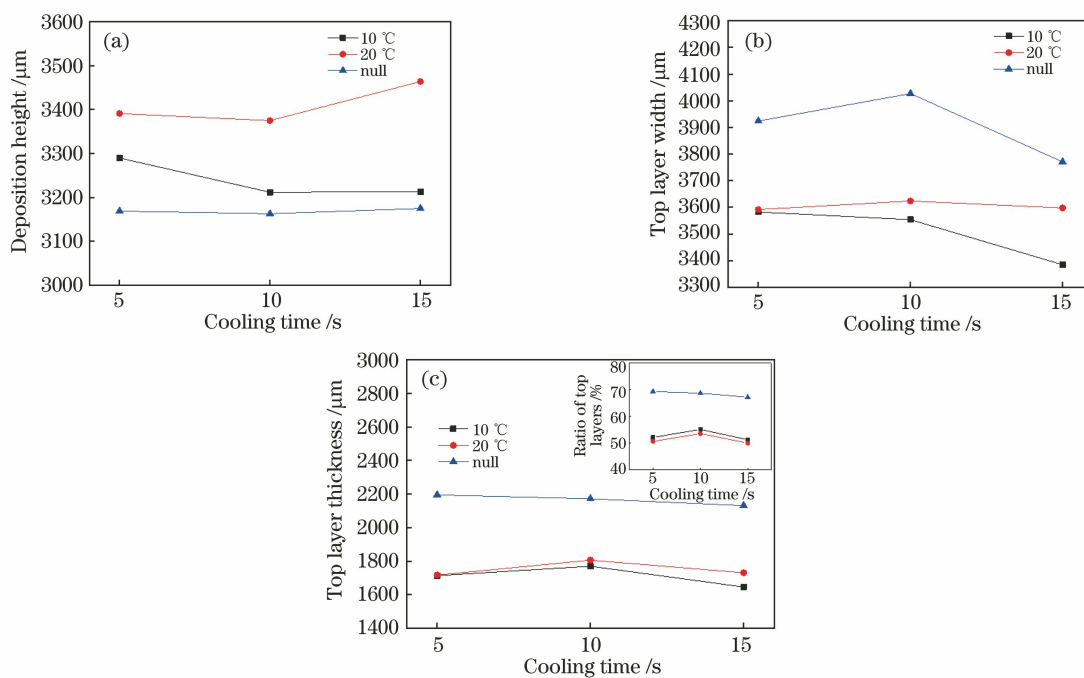


图 9 单道沉积态试样的几何特征尺寸。(a)沉积高度;(b)顶层宽度;(c)顶层厚度及顶层占比
 Fig. 9 Geometric feature sizes of single-track deposition specimens. (a) Deposition height;
 (b) top layer width; (c) top layer thickness and ratio of top layer

下,沉积层具有较大的厚度,并且由于沉积过程中具有较大的温度梯度,沉积层内部从上至下形成三种不同的组织结构,如图 10(a)所示,组织形态与 Li 等^[15]在激光选区熔化(SLM)成形沉积层中发现 3 个位置处的有明显差异,也与 Li 等^[16]在激光沉积成形 Al-5Si-1Cu-Mg 合金的层内组织中发现的 2 个区域处的不同。图 10 中上下两条虚线分别是第 5 层与第 6 层和第 4 层的熔合线。沉积层上部为转变区(T 区),是沉积第 6 层时在该层产生的热影响区,

如图 10(b)所示,该区域内部 Si 晶粒发生粗化,其纤维状结构转变为不规则块状结构;沉积层中部为树枝晶区(F 区),F 区内部的 α -Al 为尺度较小的等轴树枝晶结构,具有明显的二次枝晶特征,如图 10(c)所示,同时 Al-Si 共晶组织内的 Si 的纤维状结构分布于 α -Al 晶粒周围,如图 10(e)所示;沉积层下方与第 4 层之间熔合线处紧邻的区域为胞状晶粒区(C 区),此区域处于重熔线与凝固前缘之间,界面位置处温度梯度最大^[17]。

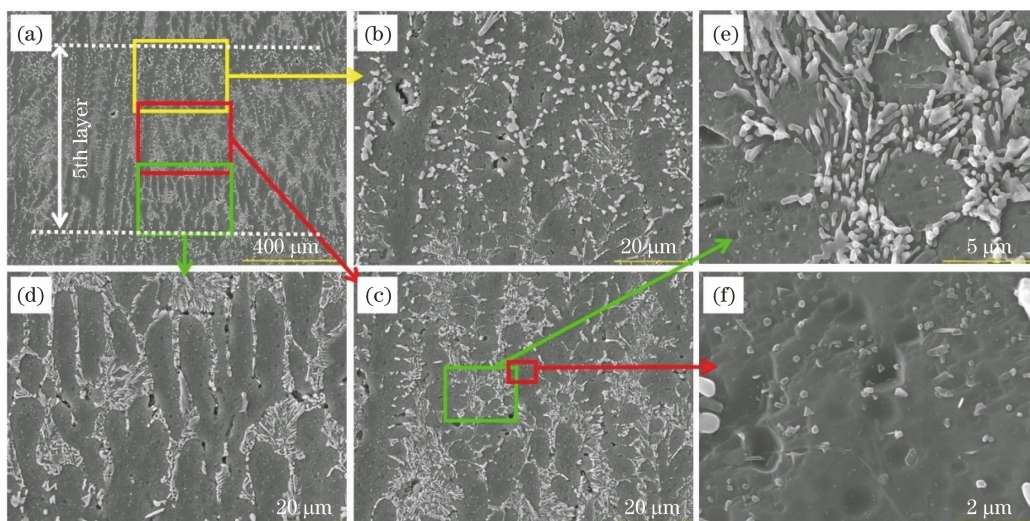


图 10 冷却条件下第 5 沉积层的微观组织。(a)整体区域;(b)顶部区域;(c)中间区域;(d)底部区域;(e)枝晶间;(f)枝晶内
Fig. 10 Microstructure of 5th deposited layer with cooling. (a) Overall region; (b) top region; (c) middle region; (d) bottom region (e) inter-dendritic zone; (f) dendritic zone

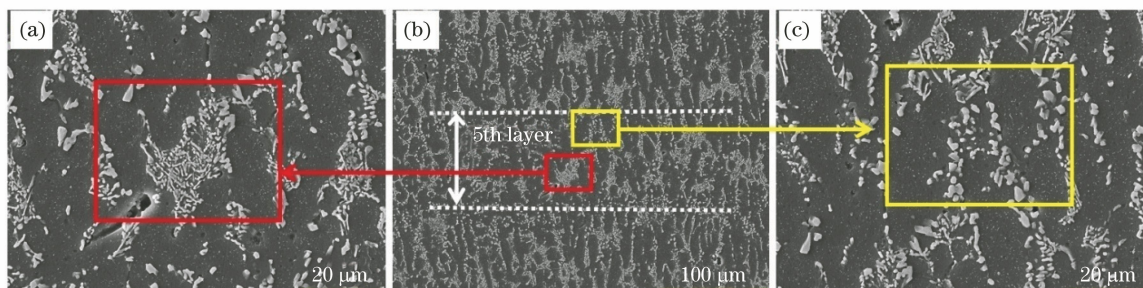


图 11 无冷却条件下第 5 沉积层的微观组织。(a)底部区域;(b)整体区域;(c)顶部区域

Fig. 11 Microstructure of 5th deposited layer without cooling. (a) Bottom region; (b) overall region; (c) top region

在无冷却条件下,沉积过程中产生较大的热积累,使得凝固界面温度梯度降低,枝晶生长方向性不明显,胞状区不明显。凝固组织分布在树枝晶区(B区)和热影响区(C区),同时由于较高的重熔率,单层沉积层的厚度较小。对比图 11(a)和图 10(d)可以看出,与无冷却条件下的组织比,加冷却后凝固组织中一次枝晶间距更小,这与合金凝固过程密切相关,一次枝晶间距取决于 G (温度梯度) $\times R$ (凝固速率) 数值,在扫描速率固定情况下, $G \times R$ 数值越大,一次枝晶间距越小。

3.4 冷却条件对沉积层力学性能和外观的影响

拉伸实验结果如图 12 所示,较无冷却条件下的试样(编号 1-1~5),冷却条件下沉积试样(编号 2-1~5)的屈服强度和抗拉强度的平均值分别提升了约 4% 和 7%。断口宏观形貌如图 13 所示,可知断口表面均存在大量的几十微米数量级的圆形气孔,沉积试样断口处具有明显的韧窝形貌,断裂方式为韧性断裂,并且有冷却条件下的断口韧窝尺

寸明显小于无冷却条件下的韧窝尺寸。这与前文所述相一致,在无冷却时,沉积层内部晶粒发生粗化,使得强度降低。从图(14)中可以观察到,圆形气孔内壁较为光滑且无夹杂物存在,可以判断该类气孔是由沉积过程中外界气体^[18]卷入熔池引起的或者为氢气孔^[19],这是材料力学性能降低的主要原因之一。

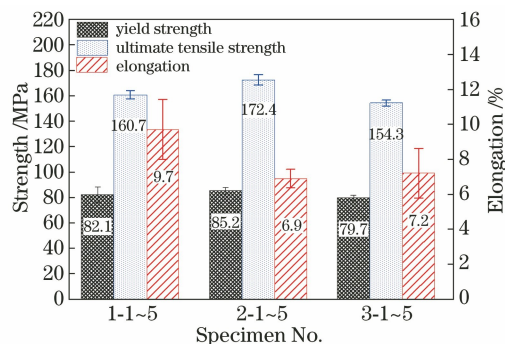


图 12 拉伸实验结果

Fig. 12 Results of tensile test

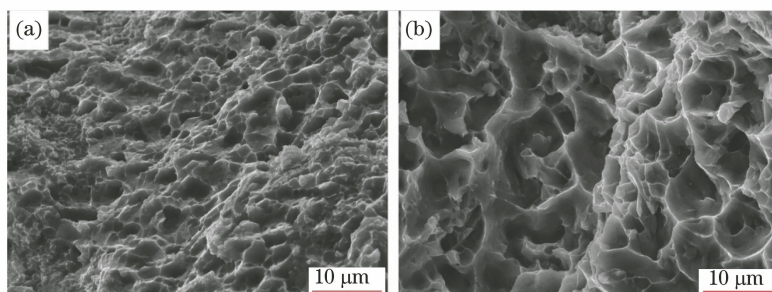


图 13 断口韧窝。(a)有冷却;(b)无冷却

Fig. 13 Dimples of tensile fracture. (a) With cooling; (b) without cooling

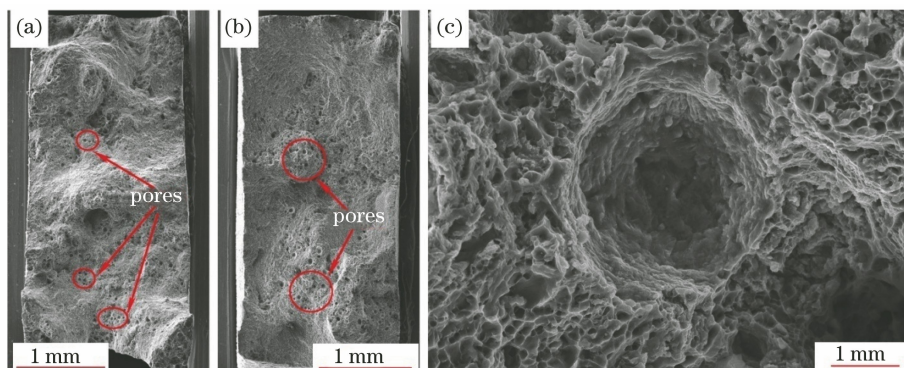


图 14 断口 SEM 照片。(a)试样 2-1~5;(b)试样 1-1~5;(c)气孔缺陷

Fig. 14 SEM pictures of fracture. (a) Sample 2-1~5; (b) sample 1-1~5; (c) pore defect

此外在相同的冷却条件下,由于沉积层内部组织存在各向异性,沉积试样在沿晶粒生长方向上的拉伸性能高于垂直晶粒生长方向,这与 Bian 等^[20]在钛合金研究中的结果相似,而 Gu 等^[21]在 Al-Cu-Mg 中并未发现各向异性,这可能是因为在本文实验条件下组织生长的方向性更加明显。因此与平行扫描方向切割的拉伸试样(2-1~5)相比,垂直扫描方向切割的拉伸试样(3-1~5)在屈服强度和抗拉强

度上分别下降了约 6.5% 和 10.5%,伸长率略有提升,但二者相差不明显。

为了验证基材冷却状态对成形试样外观的影响,在有冷却(基板冷却温度为 10 °C,层间停顿时间为 15 s)和无冷却条件状态下进行激光沉积实验,如图 15 所示。发现无冷却条件的成形试样表面平整度较差,且极易出现坍塌等问题;而在有冷却条件状态下,成形试样外观平整,可获得较好的成形外貌。

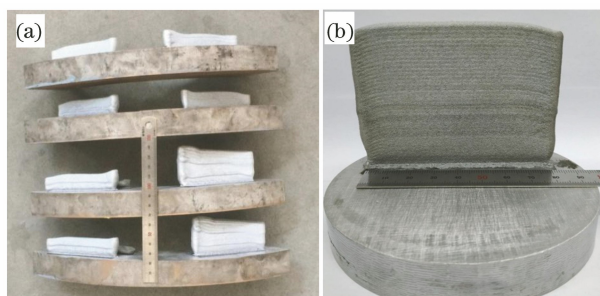


图 15 成形试样外貌图片。(a)无冷却;(b)有冷却

Fig. 15 Morphology of formed specimens. (a) Without cooling; (b) with cooling

4 结 论

进行了不同冷却条件下 AlSi10Mg 合金激光直接沉积实验,并对沉积后的试样进行了一系列的测

试。在不同冷却条件下对沉积层的沉积质量进行分析,得到以下结论。1)在激光沉积 AlSi10Mg 合金过程中,对基板进行强制冷却可以显著提升增材效率,降低其气孔类缺陷的形成率;在无冷却成形过程

中,由于热积累效应,已形成层会发生较大重熔。在合理的基体冷却温度下,其增材试样内部的气孔类缺陷率可以显著降低。2)当对基板进行冷却处理时,沉积层内部可以明显观察到温度梯度差异所引起的三个具有不同微观组织形貌的区域,且单层的厚度较大;而在外加基板冷却样品上,区域划分不明显,且由于具有较大的重熔量,单层厚度较小。此外,在对基板进行冷却处理的情况下,沉积层内部的枝晶间距明显减小。3)优化基体冷却条件会使激光沉积 AlSi10Mg 合金具有更高的抗拉强度和屈服强度。两种状态下增材铝合金均有韧性断裂,在有冷却条件下的断口处,韧窝尺寸较小,断口处可见呈弥散分布的气孔缺陷。

参 考 文 献

- [1] Yang S J, Dai S L. A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry [J]. *Materials Review*, 2005, 19(2): 76-80.
杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. *材料导报*, 2005, 19(2): 76-80.
- [2] Zhao L Z, Zhao M J, Song L J, et al. Ultra-fine Al-Si hypereutectic alloy fabricated by direct metal deposition[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 542-548.
- [3] Gu J L, Ding J L, Williams S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 26-34.
- [4] Zhang Y, Guo Y, Chen Y, et al. Ultrasonic-assisted laser metal deposition of the Al 4047 alloy [J]. *Metals*, 2019, 9(10): 1111.
- [5] Qin L Y, Pang S, Yang G, et al. Microstructure and mechanical properties of laser deposition repaired cast ZL114A aluminium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(6): 1596-1601.
钦兰云, 庞爽, 杨光, 等. 激光沉积修复 ZL114A 铝合金的组织及力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(6): 1596-1601.
- [6] Qin L Y, Pang S, Yang G, et al. Microstructure and mechanical property analysis of ZL114A aluminum alloy repaired by laser deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202009.
钦兰云, 庞爽, 杨光, 等. 激光沉积修复 ZL114A 铝合金组织和力学性能分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202009.
- [7] Ding Y, Yang H O, Bai J, et al. Microstructure and mechanical property of AlSi10Mg alloy prepared by laser solid forming [J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(4): 46-54.
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): 46-54.
- [8] Chen Y C, Zhang S Q, Tian X J, et al. Microstructure and microhardness of 4045 aluminum alloy fabricated by laser melting deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303008.
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积 4045 铝合金显微组织及显微硬度[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303008.
- [9] Javidani M, Arreguin-Zavala J, Danovitch J, et al. Additive manufacturing of AlSi10Mg galloy using direct energy deposition: microstructure and hardness characterization [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(4): 587-597.
- [10] Li Z, Sui S, Yuan Z H, et al. Microstructure and tensile properties of high-deposition-rate laser metal deposited GH4169 alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102004.
李祚, 隋尚, 袁子豪, 等. 高沉积率激光熔覆沉积 GH4169 合金的微观组织与拉伸性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102004.
- [11] Ji X, Sun Z G, Chang L L, et al. Microstructure evolution behavior in laser melting deposition of Ti6Al4V/Inconel625 gradient high-temperature resistant coating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102008.
季霄, 孙中刚, 唱丽丽, 等. 预热对激光沉积 TA15/GH4169 梯度结构组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102008.
- [12] Yadollahi A, Shamsaei N, Thompson S M, et al. Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 644: 171-183.
- [13] Lewandowski J J, Seifi M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46(1): 151-186.
- [14] Wang J T, Weng C I, Chang J G, et al. The influence of temperature and surface conditions on surface absorptivity in laser surface treatment [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(7): 3245-3253.
- [15] Li W, Li S, Liu J, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 663: 116-125.

- [16] Li J, Cheng X, Li Z, et al. Microstructures and mechanical properties of laser additive manufactured Al-5Si-1Cu-Mg alloy with different layer thicknesses [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 789: 15-24.
- [17] 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 (8/9): 2152-2160.
- [18] Gao Y, Zhao J B, Zhao Y H, et al. Effect of processing parameters on solidification defects behavior of laser deposited AlSi10Mg alloy [J]. *Vacuum*, 2019, 167: 471-478.
- [19] Li L Q, Wang X, Qu J Y, et al. Effects of porosity on mechanical properties of laser metal deposited AlSi10Mg alloy [J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(3): 109-114.
- 李俐群, 王宪, 曲劲宇, 等. 激光熔化沉积 AlSi10Mg 及气孔对力学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(3): 109-114.
- [20] Bian L, Thompson S M, Shamsaei N. Mechanical properties and microstructural features of direct laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *JOM*, 2015, 67(3): 629-638.
- [21] Gu T, Chen B, Tan C W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of laser additive manufacturing of high strength Al-Cu-Mg alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 140-150.