

激光与光电子学进展

激光功率对选区激光熔化 AlSi10Mg 组织及力学性能的影响

陈柯宇¹, 许莉敏¹, 甘杰², 文世峰¹, 周燕^{2*}

¹华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 为了研究选区激光熔化(SLM)工艺参数对 AlSi10Mg 成形性能的影响,在不同激光功率下成形了 AlSi10Mg 试样,采用扫描电镜、X 射线衍射仪、拉伸试验机、纳米压痕仪表征了 AlSi10Mg 试样的熔覆道、缺陷、相组成、组织、力学性能、断口形貌等。结果表明,在 350 W 激光功率下成形试样的致密度最大(为 99.3%),孔洞缺陷最少,熔覆道搭接效果最好,细晶区的晶粒最细小,试样的综合力学性能最好:显微硬度为 2.338 GPa,抗拉强度为 371.9 MPa,延伸率为 12.67%。

关键词 激光技术; AlSi10Mg 合金; 选区激光熔化; 激光功率; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.2+2 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.1314001

Effects of Laser Power on Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted AlSi10Mg

Chen Keyu¹, Xu Limin¹, Gan Jie², Wen Shifeng¹, Zhou Yan^{2*}

¹State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To study the effects of process parameters on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples during selective laser melting (SLM), different laser powers are adopted to form AlSi10Mg samples. Scanning electron microscopy, X-ray diffraction, tensile testing, nano-indentation testing were used to characterize the melting tracks, forming defects, phase composition, microstructure, mechanical properties, and fracture morphologies of AlSi10Mg samples. Results show that the relative density reaches a maximum value of 99.3% at 350 W, as well as the minimum void defects, the optimum overlap of melting tracks, and the finest gains in the fine grained region. The above sample obtained at 350 W has best mechanical properties, namely, the micro-hardness is 2.338 GPa, the tensile strength is 371.9 MPa and the elongation is 12.67%.

Key words laser technique; AlSi10Mg alloy; selective laser melting; laser power; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900

收稿日期: 2020-02-11; 修回日期: 2020-05-25; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 国家自然科学基金辽宁联合基金重点项目(U1808216)

通信作者: *yzhou1987@hust.edu.cn

1 引言

铝合金具有密度小、比强度高、易加工、良好的耐腐蚀性以及优异的导电性和导热性,在航空航天、汽车、国防、电力等领域具有一定的应用和发展潜力^[1-2]。目前,铝合金零件主要采用铸造、锻压等方式加工。尽管传统工艺制造的铝合金产品已被广泛使用,但在生产过程及应用中仍存在许多问题,如铸造过程中的低冷却速度使得铝合金的微观组织变得粗大,并且存在孔隙率高以及熔渣夹杂和元素偏析等缺陷,降低了铝合金零部件的力学性能。此外,现代工业的发展对铝合金零部件的结构和性能也提出了更高要求,例如,为了满足高导热性、轻质和高承载能力的工程要求,航空航天发动机的热保护系统通常使用格子或蜂窝结构。高尺寸精度和近净成形的铝合金零件是未来铝合金应用的主要研发目标。

选区激光熔化(SLM)技术被认为是最有前途的增材制造(AM)技术之一。SLM技术利用高能激光束在保护气氛中沿着激光路径方向完全熔化金属粉末,熔融的金属在激光离开后迅速凝固并逐层叠加,最终形成三维组件^[3-7]。这种逐层叠加的方法在成形复杂结构件和薄壁件上具有独特优势,无需传统的焊接和铆接过程,缩短了设计和生产时间。此外,由于激光快速移动,熔融物的冷却速率可以达到 $10^3\sim 10^8$ K/s,从而抑制了合金元素的偏析和晶粒粗化,有利于成形高性能零部件^[8-9]。因此,SLM技术为铝合金成形提供了新思路,对其成形工艺和理论进行研究有助于铝合金的大规模应用。铝合金粉末易氧化,而且它的流动性差,激光反射率、吸湿性和热膨胀系数均较高^[10-12],这使得SLM成形铝合金比成形铁基、镍基和钛基合金更加困难。

针对上述难点,国内外学者从粉末特性、工艺参数、结构特征、热处理等方面对SLM成形铝合金开展了大量研究^[13-20]。唐鹏钧等^[21]为研究AlSi10Mg粉末及其试块的微观组织、相组成,采用超音速雾化方法制备出了粒径分布符合SLM工艺要求的球形AlSi10Mg粉末,该粉末颗粒细小均匀,主要由 α -Al基体和 $(\alpha+Si)$ 共晶组成;AlSi10Mg试块的致密度高达99.5%,室温抗拉强度达到了442 MPa。Gao等^[22]通过超声振动分散法制备了纳米级TiN颗粒修饰的AlSi10Mg复合粉末,该粉末

的激光反射率从加入TiN颗粒前的62%降至25%;加入TiN后,样品的显微组织得到了显著改善,硬度从加入TiN颗粒前的126 HV0.1增大到145 HV0.1。Maamou等^[23]根据SLM工艺参数之间的相互作用效应分析了AlSi10Mg试样的相对密度、孔隙率、表面粗糙度和尺寸精度,结果表明:为实现每个性能特征的“最佳”值,成形AlSi10Mg合金时需要不同的激光能量密度和SLM工艺参数;结合每种特性的SLM工艺参数的优化范围制定工艺图,才能确保成形高质量零件。Kempen等^[24]对SLM参数优化和AlSi10Mg材料特性进行了探索,结果表明,SLM成形的AlSi10Mg零件的力学性能至少与铸件的相当。Liu等^[25]发现在SLM成形AlSi10Mg试样期间,熔池冷却速率诱导的微结构梯度和元素分布差异导致样品的显微硬度和耐磨性自表面到内部逐渐降低;他们还讨论了形成梯度微结构的机理及其对样品力学性能的影响,为制造具有梯度微结构的AlSi10Mg零件提供了参考。Zhuo等^[26]为研究热处理对SLM成形AlSi10Mg合金相组成、微观结构、残余应力和力学性能的影响,采用两种热处理方式(300 °C/2 h+水淬+190 °C/10 h+炉淬以及535 °C/1 h+水淬+190 °C/10 h+炉淬)对AlSi10Mg合金进行退火处理,结果表明,热处理是消除铝合金残余应力、提高其力学性能的有效后处理方法。

本文以AlSi10Mg为研究对象,通过X射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、原位纳米压痕仪、拉伸试验机等,研究了激光功率对SLM成形AlSi10Mg合金组织和性能的影响,并最终获得了最优的成形工艺参数。

2 试验

2.1 试验原材料

本次试验采用的气雾化AlSi10Mg粉末购于TLS Technik GmbH公司,在进行SLM成形试验之前,需对粉末进行干燥处理。图1给出了AlSi10Mg粉末的微观形貌,图2给出了粉末的粒径分布。

从图1所示的粉末微观形貌可以看出,粉末颗粒主要呈球形和近球形。这说明合金粉末的流动性很好,有利于粉层的平整性和铺展性。从图2可以看出,粉末的粒径分布为正态分布,主要分布在30~50 μm 之间,平均粒径为 $d_{50}=39.9$ μm 。铺粉层的厚度为50 μm ,粉末平均粒径与铺粉层厚度为同

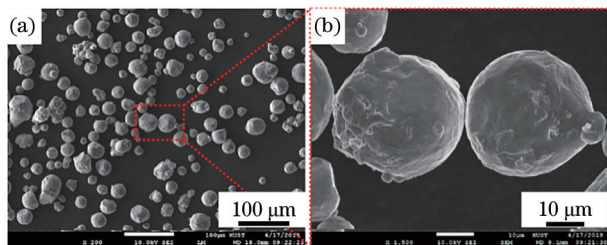


图 1 AlSi10Mg 粉末的微观形貌

Fig. 1 Morphologies of AlSi10Mg powder

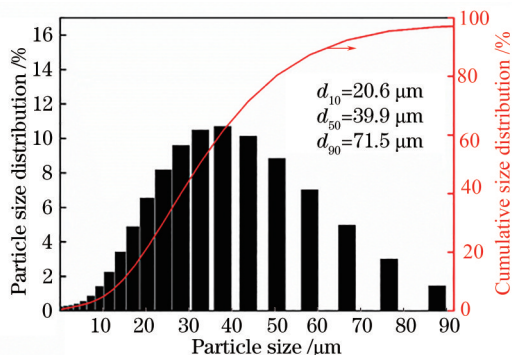


图 2 AlSi10Mg 粉末的粒径分布

Fig. 2 Particle distribution of AlSi10Mg powder

一数量级,且小于铺粉层厚度,保证了铺粉效果。

2.2 成形设备和工艺参数设置

试验使用的 SLM 125 设备是由 Solutions 公司开发的。基于现有文献和相关工作^[27-33],本次试验中的激光功率分别为 250, 300, 350, 400 W, 扫描间距为 0.17 mm, 扫描速度为 1150 mm/s, 层厚为 50 μm, 激光扫描策略为沿成形方向每层旋转 67°, 如图 3(a)所示。

在不同的激光能量密度下各打印 3 个尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 的小方块以及 3 个拉伸试样, 拉伸试样的尺寸如图 3(b)所示。

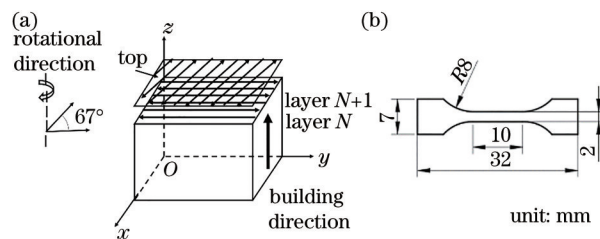


图 3 扫描策略和拉伸试样的尺寸。(a)扫描策略;
(b)拉伸试样的尺寸

Fig. 3 Scanning strategy and size of tensile samples.

(a) Scanning strategy; (b) size of tensile sample

2.3 表征与测试

采用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪对 AlSi10Mg 粉末的粒度进行分析。在 Olympus BX60 型光学显微镜下观察抛光样品中的裂纹、孔洞等缺陷。采用超景深三维显微镜观察熔覆道的搭接情况。使用 FEI Sirion Quanta 200 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品的微观组织和断口形貌。使用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪进行相组成分析, 衍射角为 30°~100°, 步长为 10 (°)/min。拉伸试验采用 ElectroPlus E1000 型电子动静态疲劳试验机进行, 在室温下以 90 kN 的载荷和 1 mm/min 的应变速率拉断样品, 每组拉伸试验测试 3 个试样, 拉伸试验结果取算术平均值。使用 Bruker TI70 型原位微/纳米机械测试系统测量试样的显微硬度。

3 结果与讨论

3.1 物相分析

图 4 所示为不同激光功率下成形的 AlSi10Mg 试样的 XRD 图谱。试样中只检测到了 α-Al 和 Si 对应的衍射峰, 表明 SLM 成形的 AlSi10Mg 主要存在 α-Al 和 Si 相。从图 4(b) 可以看出, 随着激光功率的降低, α-Al 的衍射峰向右发生了微小偏移。

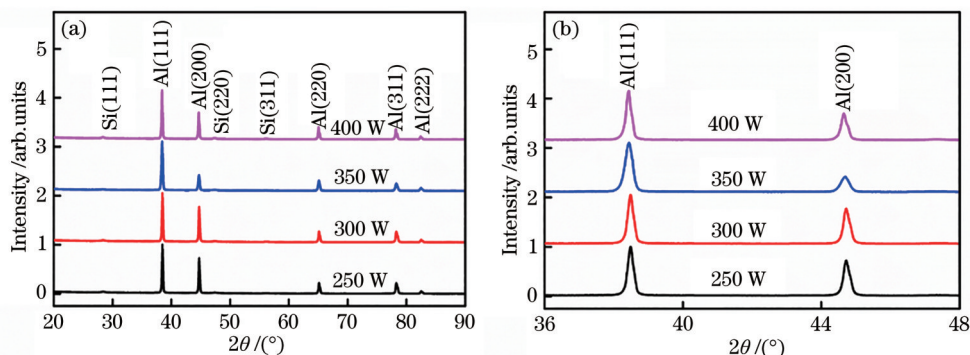


图 4 不同激光功率下成形的 AlSi10Mg 试样的 XRD 谱。(a) 20°~90°; (b) 36°~48°

Fig. 4 XRD spectra of AlSi10Mg samples formed at different laser powers. (a) 20°~90°; (b) 36°~48°

布拉格公式^[34]为

$$2\sin\theta d_{hkl} = \lambda, \quad (1)$$

式中： θ 为衍射角； d_{hkl} 为晶面间距； λ 为X射线的波长。由于 α -Al是面心立方结构，所以它的晶面间距 d_{hkl} 和晶格常数 a 存在一定关系，即

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (2)$$

式中： h 、 k 、 l 为晶面指数。

衍射峰向右移，即衍射角增大， 2θ 增大，对应的 d_{hkl} 变小，因此 a 变小。因此可以说，随着激光功率的降低，即随着输入的激光能量密度的降低，晶格常数减小。这表明，更多的Si固溶体进入到Al基体中，晶格畸变增大；同时，因为Si的原子半径($R_{Si} = 0.1172$ nm)小于Al的原子半径($R_{Al} = 0.1431$ nm)，Si在 α -Al中形成的是置换固溶体，因此晶格中的Al原子被Si原子替换后会使晶格常数变小^[35]。

3.2 组织分析

图5为不同激光功率下试样上表面的熔覆道搭接情况。可以看出，图5(b)、(c)所示的熔覆道平直且搭接良好，而图5(a)、(d)所示的熔覆道边界模糊，粗糙度较大。这表明，激光功率为350 W时，试样的表面质量更高。

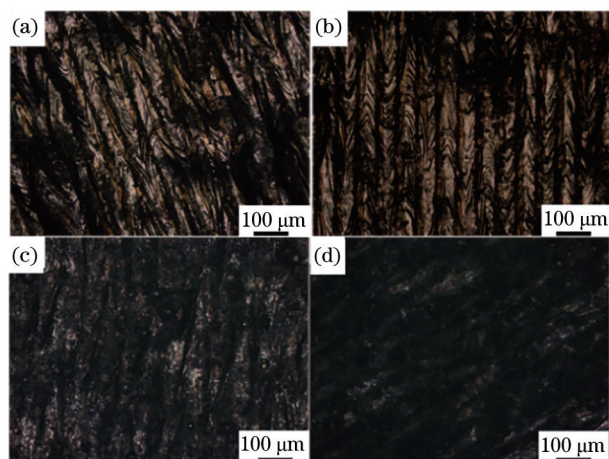


图5 不同激光功率下成形AlSi10Mg试样的上表面熔覆道。

(a)250 W;(b)300 W;(c)350 W;(d)400 W

Fig.5 Melting tracks on the upper surface of AlSi10Mg samples formed at different laser powers. (a) 250 W;

(b) 300 W; (c) 350 W; (d) 400 W

图6为AlSi10Mg试样上表面腐蚀抛光后的光学显微镜照片。可以看出，各种激光功率下成形的试样上表面均有一定数量的孔洞缺陷。当激光功率为400 W时，上表面中的孔洞最为密集，而激光功率为350 W时，孔洞最少。此外可以发现：孔洞

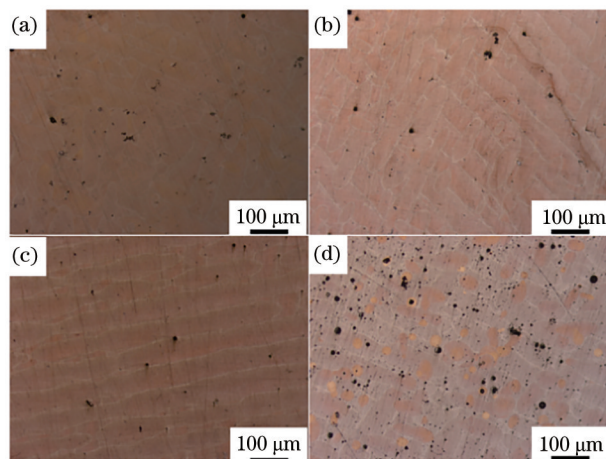


图6 不同激光功率下成形AlSi10Mg试样表面的光学显微镜照片。(a)250 W;(b)300 W;(c)350 W;(d)400 W

Fig.6 Optical micrographs of the surface of AlSi10Mg samples formed at different laser powers. (a) 250 W;

(b) 300 W; (c) 350 W; (d) 400 W

缺陷基本沿扫描方向分布于熔化道的搭接熔合处^[36]，如图6(a)、(b)所示。当激光功率较低时，熔化道搭接处的粉末颗粒熔化不完全，容易脱落，从而产生了气孔。在激光束作用于粉体过程中，熔体前沿与粉末颗粒作用会产生大量的氢气。当激光功率较大时，熔池的凝固时间延长，熔池内的氢气达到局部溶解度极限，形核生成气泡，气泡从熔池底部及热影响区向顶部扩散，并最终形成大量的氢气孔^[37]，因而孔洞缺陷明显。

通过计算平均相对密度得到了不同激光功率下成形试样的致密度，如图7所示。可以看出，当激光功率为350 W时，试样的致密度最高，这也进一步印证了图6的结果。

图8给出了SLM成形AlSi10Mg试样的典型

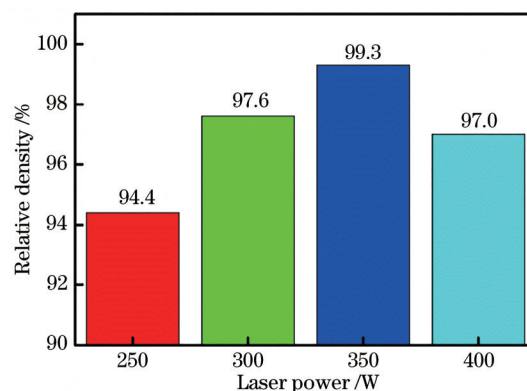


图7 不同激光功率下成形AlSi10Mg试样的致密度

Fig.7 Relative density of AlSi10Mg samples formed at different laser powers

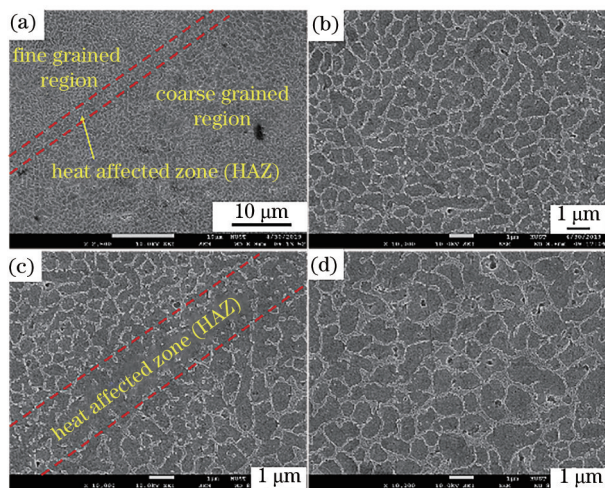


图 8 SLM 成形 AlSi10Mg 试样的显微组织。(a)低倍下的显微组织;(b)细晶区;(c)热影响区;(d)粗晶区

Fig. 8 Microstructures of AlSi10Mg sample formed by SLM. (a) Microstructure at low magnification; (b) fine grained region; (c) heat affected zone; (d) coarse grained region

SEM图。从图中可以看到,试样中主要存在灰白色的网状相和灰黑色的基体相^[38]。通过图9所示的能谱可知,灰白色相为共晶Si相,灰黑色相是 α -Al基体相,这与图4所示的XRD结果吻合。

除此之外,AlSi10Mg组织按照晶粒尺寸可以分为三个区域^[39]:细晶区、热影响区和粗晶区,如图8(b)~(d)所示。

图10给出了不同激光功率下细晶区的SEM形貌。显然,当激光功率为350 W时,细晶区的晶粒最细小(晶界更多),且晶粒分布得更加均匀致密。

更多的晶界能有效抑制位错移动和滑移变形,同时晶粒越多,外界载荷就能分散到更多的晶粒上,因而理论上晶粒越小的组织,其力学性能越优异。

3.3 显微硬度分析

图11为通过纳米压痕测试得到的载荷与AlSi10Mg试样上表面压痕深度的关系曲线。可以发现,随着压痕深度的不断增加,试样的硬度和弹性模量呈递减的趋势。这说明AlSi10Mg试样内部是不均一的,越靠近材料表面,硬化现象越明显。

通过数据处理,去除打在孔洞上的点,并选取同一深度范围的点取平均值,得到了如图12所示的显微硬度随激光功率的变化图。由图12可以看出,显微硬度随激光能量密度变化的趋势不明显,350 W激光功率下成形的AlSi10Mg试样的显微硬度最大,达到2.338 GPa。

3.4 拉伸试验测试

将拉伸试样打磨、去除表面毛刺后,在室温下(15~25 °C)进行拉伸测试。试验中测得的12组应力-应变曲线如图13所示。

由图13可以看到,除了300 W组的个别试样,其余试样在弹性变形阶段的拉伸应力-应变曲线基本重合,这可以说明它们的弹性模量基本相同。此外,由图13还可以看出没有明显的屈服阶段,应力到达峰值后,试样立刻断裂。图14给出了不同激光能量密度下的拉伸强度和延伸率。

从图14可以看出,当激光功率为350 W时,试样的延伸率最大,达到了12.67%。从图6和图7可

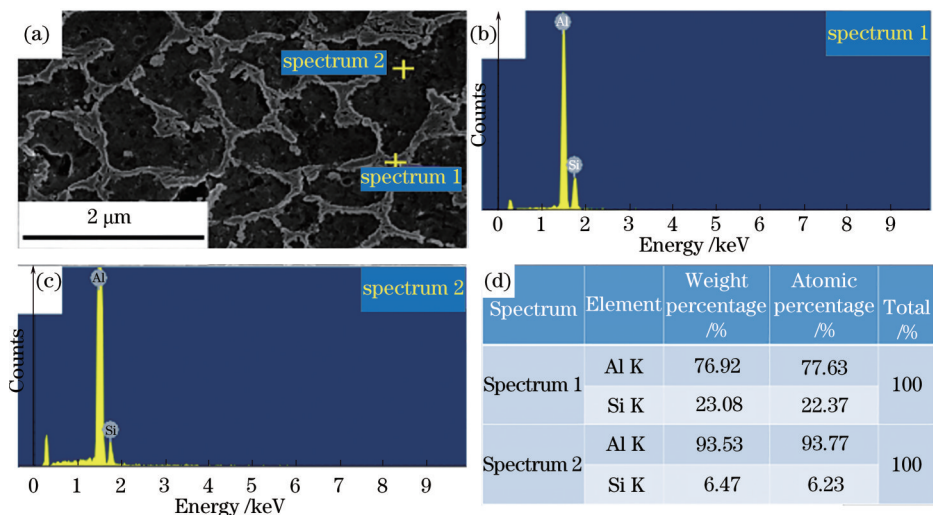


图9 能谱分析。(a)~(c)白色网状相和灰黑色基体的能谱图;(d)点扫元素含量分布表

Fig. 9 Energy spectrum analysis. (a)~(c) Energy spectra of white network phase and gray-black matrix; (d) elements contents obtained by point-scanning

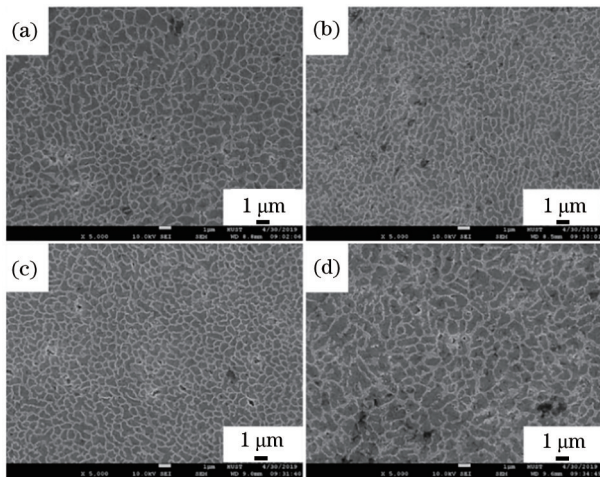


图 10 不同激光功率下的细晶区。(a) 250 W;(b) 300 W;
(c) 350 W;(d) 400 W

Fig. 10 Fine grained region at different laser powers.
(a) 250 W; (b) 300 W; (c) 350 W; (d) 400 W

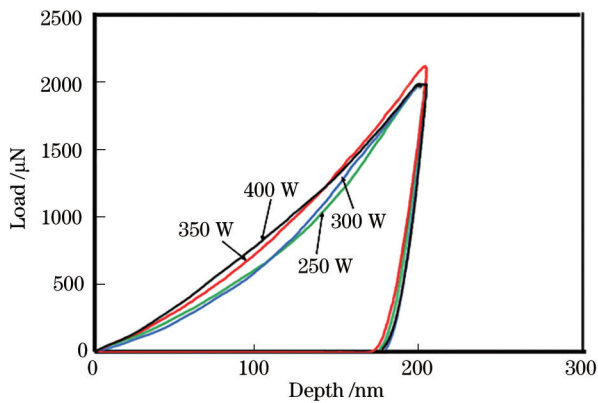


图 11 不同激光功率下成形 AlSi10Mg 试样的载荷-压痕深度曲线

Fig. 11 Load-indentation depth curves of AlSi10Mg samples formed at different laser powers

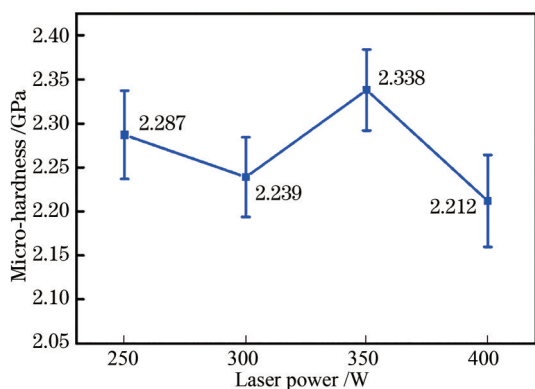


图 12 AlSi10Mg 试样的显微硬度随激光功率的变化

Fig. 12 Variation of micro-hardness of AlSi10Mg samples with laser power

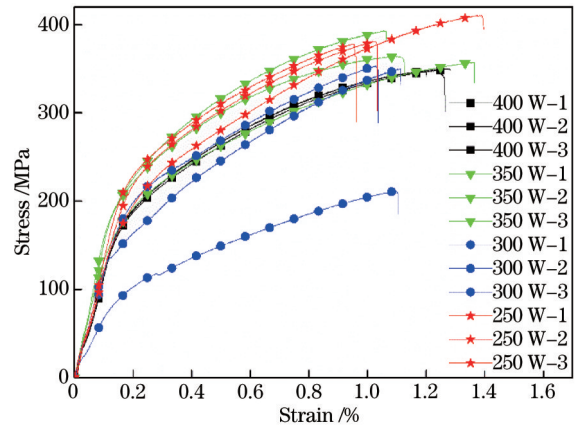


图 13 不同激光功率下成形 AlSi10Mg 试样的拉伸应力-应变曲线

Fig. 13 Tensile stress-strain curves of AlSi10Mg samples formed at different laser powers

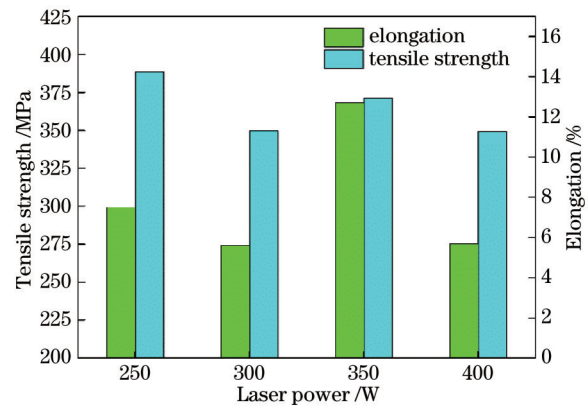


图 14 不同激光功率下成形 AlSi10Mg 试样的抗拉强度和延伸率

Fig. 14 Tensile strength and elongation of AlSi10Mg samples formed at different laser powers

可以看出,当激光功率为 350 W 时,试样的致密度最高,气孔等成形缺陷最少,因此,该试样拥有最高的断裂延伸率,塑性最好。在拉伸应力作用下,试样内部的成形缺陷往往是应力集中、裂纹萌生并最终导致试样断裂失效的主要原因^[40]。当激光功率为 250 W 时,试样的抗拉强度最大,为 388.4 MPa;当激光功率为 350 W 时,试样的抗拉强度为 371.9 MPa,略低于前者,但塑性较前者更好。所有试样的抗拉强度均高于铸造铝合金(300~317 MPa),塑性也比铸造铝合金(2.5%~3.5%)好,尤其是 350 W 激光功率下成形的 AlSi10Mg 试样的拉伸性能最好。

图 15 是拉伸试样断口的典型 SEM 图。拉伸断口上分布着大量韧窝(说明试样为韧性断裂^[41]),韧

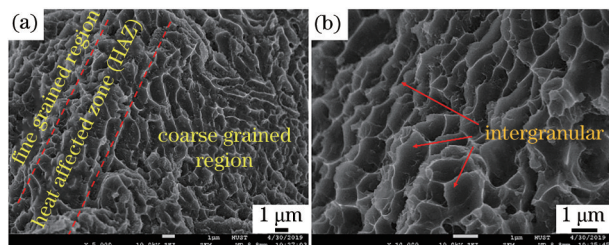


图 15 AlSi10Mg 试样的拉伸断口

Fig. 15 Tensile fracture morphologies of AlSi10Mg sample
窝尺寸与三个区域的晶粒尺寸一一对应,这也直观地从立体的角度对三个区域的存在及分布作出了解释。

在图 15(b)中可以看出,断口上的晶粒被拉长,之后沿着晶界断裂,断裂方式为沿晶断裂。

4 结 论

本文研究了不同激光功率下 SLM 成形 AlSi10Mg 合金试样的微观组织和力学性能,通过各项表征分析确定了 AlSi10Mg 合金粉末熔化成形的最佳激光功率。本文得到的结论如下:

- 1) SLM 成形 AlSi10Mg 试样主要包含 α -Al 体相和网状共晶 Si 相,且随着激光功率的减小, α -Al 基体的晶格常数减小,晶格畸变增加;
- 2) SLM 成形 AlSi10Mg 合金试样具有较高的抗拉强度和延伸率,断裂方式为沿晶断裂;
- 3) 激光功率为 350 W 时,表面熔覆道的搭接最好,孔洞缺陷最少,致密度、显微硬度、延伸率和抗拉强度最高,综合力学性能最佳。

参 考 文 献

[1] Duan W, Zhao Z, Ji H W, et al. Effects of powder properties and selective laser melting processing on the densification behavior of AlSi10Mg alloy[J]. Materials Reports, 2019, 33(10): 1685-1690.
段伟, 赵哲, 吉红伟, 等. 粉体性能及选区激光熔化打印工艺对 AlSi10Mg 合金致密化行为的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 1685-1690.

[2] Ch S R, Raja A, Nadig P, et al. Influence of working environment and built orientation on the tensile properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 750: 141-151.

[3] Salmi A, Atzeni E, Iuliano L, et al. Experimental analysis of residual stresses on AlSi10Mg parts produced by means of selective laser melting (SLM)

[J]. Procedia CIRP, 2017, 62: 458-463.

[4] Shi Q M, Gu D D, Xia M J, et al. Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 84: 9-22.

[5] Peel M, Steuwer A, Preuss M, et al. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds[J]. Acta Materialia, 2003, 51(16): 4791-4801.

[6] Wang C S, Zhang J, Liu L, et al. Effect of melt superheating treatment on directional solidification interface morphology of multi-component alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(7): 668-672.

[7] Gäumann M, Henry S, Cléton F, et al. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 271(1/2): 232-241.

[8] Thijs L, Kempen K, Kruth J P, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1809-1819.

[9] Çam G, Mistikoglu S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1936-1953.

[10] Zhang W Q, Zhu H H, Hu Z H, et al. Study on the selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 918-926.
张文奇, 朱海红, 胡志恒, 等. AlSi10Mg 的激光选区熔化成形研究[J]. 金属学报, 2017, 53(8): 918-926.

[11] Yamagata H, Kasprzak W, Aniolek M, et al. The effect of average cooling rates on the microstructure of the Al-20% Si high pressure die casting alloy used for monolithic cylinder blocks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/2/3): 333-341.

[12] Xu X L, Zhao Y H, Hou H, et al. Concentration and fluid flow effects on kinetics, dendrite remelting and stress accumulation upon rapid solidification of deeply undercooled alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 740-749.

[13] Yuan X B, Wei Q S, Wen S F, et al. Research on selective laser melting AlSi10Mg alloy powder[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(4): 91-94.
袁学兵, 魏青松, 文世峰, 等. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 91-94.

- [14] Liu S W, Zhu H H, Peng G Y, et al. Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis[J]. *Materials & Design*, 2018, 142: 319-328.
- [15] Li X, Huang Z H, Qi W J, et al. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by SLM technology[J]. *Material Sciences*, 2019, 9(6): 564-572.
李鑫, 黄正华, 戚文军, 等. SLM 成形 AlSi10Mg 合金的组织与力学性能[J]. *材料科学*, 2019, 9(6): 564-572.
- [16] Sharifi P, Jamali J, Sadayappan K, et al. Grain size distribution and interfacial heat transfer coefficient during solidification of magnesium alloys using high pressure die casting process[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(2): 324-334.
- [17] Romano S, Abel A, Gumpinger J, et al. Quality control of AlSi10Mg produced by SLM: metallography versus CT scans for critical defect size assessment[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 394-405.
- [18] Romano S, Patriarca L, Foletti S, et al. LCF behaviour and a comprehensive life prediction model for AlSi10Mg obtained by SLM[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 117: 47-62.
- [19] Olakanmi E O, Cochrane R F, Dalgarno K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: processing, microstructure, and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477.
- [20] Louvis E, Fox P, Sutcliffe C J. Selective laser melting of aluminium components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(2): 275-284.
- [21] Tang P J, He X L, Yang B, et al. Microstructure and properties of AlSi10Mg powder for selective laser melting[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(1): 47-53.
唐鹏钧, 何晓磊, 杨斌, 等. 激光选区熔化用 AlSi10Mg 粉末显微组织与性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(1): 47-53.
- [22] Gao C F, Xiao Z Y, Liu Z Q, et al. Selective laser melting of nano-TiN modified AlSi10Mg composite powder with low laser reflectivity[J]. *Materials Letters*, 2019, 236: 362-365.
- [23] Maamoun A, Xue Y, Elbestawi M, et al. Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts: powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy [J]. *Materials*, 2018, 11(12): 2343.
- [24] Kempen K, Thijs L, van Humbeeck J, et al. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation [J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(8): 917-923.
- [25] Liu Y J, Liu Z, Jiang Y, et al. Gradient in microstructure and mechanical property of selective laser melted AlSi10Mg[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 735: 1414-1421.
- [26] Zhuo L C, Wang Z Y, Zhang H J, et al. Effect of post-process heat treatment on microstructure and properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy [J]. *Materials Letters*, 2019, 234: 196-200.
- [27] Zhang X L, Qi H, Wei Q S. Experimental study of selective laser melted AlSi12[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 391-397.
张晓丽, 齐欢, 魏青松. 铝合金粉末选择性激光熔化成形工艺优化试验研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 391-397.
- [28] Liu J H, Shi J G, Li Y. Study on selective laser melting process and forming of AlSi10Mg alloy powder[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2015, 25(5): 509-515.
刘锦辉, 史金光, 李亚. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末的成形工艺[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2015, 25(5): 509-515.
- [29] Kempen K, Thijs L, Yasa E, et al. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 439-446.
- [30] Wang W L, He L, Yang X, et al. Microstructure and microhardness mechanism of selective laser melting Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 868: 159107.
- [31] Rao H, Giet S, Yang K, et al. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 109: 334-346.
- [32] Qian D Y, Chen C J, Zhang M, et al. Study on microstructure and micro-mechanical properties of porous aluminum alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403002.
钱德宇, 陈长军, 张敏, 等. 选区激光熔化成形多孔铝合金的显微组织及微观力学性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403002.
- [33] 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.
- [34] Chen S, Tao F H, Jia C Z. Study on microstructure and properties of 18Ni300 steel fabricated by selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2019, 40(7): 657-661.
- 陈帅, 陶凤和, 贾长治. 选区激光熔化成型 18Ni300 钢显微组织与性能研究[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 657-661.
- [35] Kong D C, Dong C F, Ni X Q, et al. Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1499-1507.
- [36] Tang M, Pistorius P C. Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 192-201.
- [37] Weingarten C, Buchbinder D, Pirch N, et al. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 112-120.
- [38] Kimura T, Nakamoto T. Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1294-1301.
- [39] Zhu X G, Sun J, Wang L F, et al. Microstructure, properties and inclined plane forming quality of aluminum alloy by selective laser melting[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(2): 77-80.
- 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 77-80.
- [40] Wang L F, Jiang X H, Guo M X, et al. Characterisation of structural properties for AlSi10Mg alloys fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(18): 2274-2282.
- [41] Bian P Y, Yin E H. Tribological properties of 3D printing aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 74-79.
- 边培莹, 尹恩怀. 3D 打印铝合金材料的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 74-79.