

激光熔化沉积 AlSi10Mg 及气孔对力学性能的影响

李俐群, 王 宪, 曲劲宇, 陶 汪

(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: 采用激光熔化沉积的方法对 AlSi10Mg 增材制造, 制备出致密度大于 99%、抗拉强度 350 MPa 左右、延伸率 8% 的薄壁墙体试件, 利用光学显微镜与扫描电镜分析了沉积态的组织。发现即使增材制造过程水氧含量(体积分数, 下同)均控制在 1×10^{-5} 以下, 试件内部仍存在一定的气孔缺陷, 气孔均为直径 100 μm 以下的氢气孔。进一步试验表明, 环境中的氧体积分数与气孔率呈正相关关系。在保持环境湿度和温度不变的情况下, 环境氧含量由 1×10^{-5} 增加到 1×10^{-3} , 气孔直径略微增大, 气孔率由 0.45% 增大到 2.71%, 气孔率增加近 5 倍, 同时抗拉强度降低 100 MPa 左右, 降幅超过 30%, 延伸率降幅超过 20%。最后探讨了氢气孔在激光熔化沉积制造的试件中产生的机理, 给出了利用激光熔化沉积工艺制备稳定的 AlSi10Mg 合金的策略。

关键词: AlSi10Mg; 激光熔化沉积; 增材制造; 气孔; 力学性能

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)03-0109-06

Effects of Porosity on Mechanical Properties of Laser Metal Deposited AlSi10Mg Alloy

LI Liqun, WANG Xian, QU Jinyu, TAO Wang

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

Abstract: A series of AlSi10Mg alloy walls were additive manufactured by laser metal deposition (LMD) process. The density was above 99%, the tensile strength was more than 350 MPa and the elongation was about 8%. OM and SEM were utilized to observe and analyze the microstructure of as-deposited walls. Results show that even if both of water and oxygen concentration is controlled under 1×10^{-5} , there are some pores in the microstructure, which means the pores in LMD process are nearly impossible to eliminated. The pores are hydrogen micro pores, with diameter less than 100 μm . Further experiments show that the porosity is closely related to the oxygen concentration. Keeping the temperature and humidity constant, when the oxygen concentration rises from 1×10^{-5} to 1×10^{-3} , the porosity quadruples from 0.45% to 2.71%. Meanwhile the tensile strength decreases more than 100 MPa, falling over 30%, and the elongation reducing by over 20%. Finally, the mechanism of porosity formation was discussed. Methods to fabricate AlSi10Mg alloy with steady mechanical property by LMD process were given.

Keywords: AlSi10Mg; laser metal deposition (LMD); additive manufacturing; porosity; mechanical property

0 引 言

激光熔化沉积技术是激光金属增材制造技术的一种, 可以是送丝式, 也可以是送粉式。其优势是可以直接制备组织致密、晶粒细小、成分均匀、性能优异的近净成型零部件^[1], 还可应用于修复与熔覆, 目前已经在很多工业领域中有所应

用。目前, 激光熔化沉积关于钛合金、高温合金等金属的研究已经取得了不错的进展, 但是在铝合金上, 因为铝合金具有导热率高, 材料对激光反射率高, 尤其是粉末材料, 表面易生成氧化膜等特点, 导致铝合金激光熔化沉积工艺窗口较窄, 沉积难度较大, 因此关于铝合金激光熔化沉积技术的研究与应用还非常的有限, 现有的研究

收稿日期: 2018-11-06; 修回日期: 2019-05-11

通信作者: 李俐群 (1970—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 激光增材制造与激光加工; E-mail: liliquan@hit.edu.cn

引用格式: 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.

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.

主要集中在对沉积态铝合金微观组织特征及其成分均匀性的研究上^[2], 激光熔化沉积态铝合金的性能评估尚有很多工作有待完成。

在铝合金激光增材制造方面, AlSi10Mg 合金的研究相对广泛, 多采用的是选区激光熔化 (SLM) 技术, 该方法制备的 AlSi10Mg 合金的沉积态拉伸性能普遍在 300 MPa 以上^[3-4], 报道中有的强度可达 518 MPa^[5], 经热处理后仍然高达 406 MPa。激光熔化沉积技术由于影响因素较多, 过程稳定性难以控制, 研究相对较少, 对于其沉积态合金力学性能的分析就更少。哈尔滨工业大学的 Chen 等^[6]学者以光纤激光器激光为热源, 采用激光熔化沉积方法制备的沉积态 AlSi10Mg 合金抗拉强度仅为 125~162 MPa, 远低于铸态 AlSi10Mg 的强度性能, 长春理工大学的丁莹^[7]等学者分别使用 CO₂ 激光器和 YAG 激光器制备了沉积态 AlSi10Mg, 激光源对沉积态材料性能的影响较大, CO₂ 激光器制备的沉积态合金抗拉强度在 208~210 MPa, 而 YAG 激光器制备的足有 340~356 MPa。与 AlSi10Mg 相似的 Al-Si 系合金, 美国韦恩州立大学的 Amrinder Singh^[8]等学者制备的 Al-11.2Si 合金的沉积态合金抗拉强度在 225 MPa 左右。可见不同学者通过激光熔化沉积技术制备的沉积态铝合金的性能差异非常大, 导致这种差异原因目前也还没有非常系统的研究。

文中拟采用光纤激光熔化沉积技术制备 AlSi10Mg 合金, 对沉积态铝合金的力学性能特性进行研究, 分析沉积态组织内气孔对沉积态性能的影响, 探索研究沉积态 AlSi10Mg 合金性能的主要原因, 最终为获得稳定的高强度沉积态 AlSi10Mg 合金提供试验基础与理论指导。

1 试验方法

激光熔化沉积试验材料为 AlSi10Mg 铝合金粉末, 粉末的成分如表 1 所示。粉末颗粒度在 45~105 μm。形貌如图 1 所示。为了减少粉末表面吸附的水分, 试验前将粉末置入 60 ℃ 的烘干炉中烘干 2 h。基板材料选用 150 mm×100 mm×15 mm 的 5A06 铝合金平板, 为了去除基板表面的油污和氧化膜, 首先将基板浸泡在 60 ℃ 左右的 8% NaOH 溶液中 5 min, 取出后用流水冲洗干净, 再在 30% HNO₃ 溶液中浸泡, 直至基板表面全部恢复金属光泽。最后取出, 用清水冲洗干净, 用丙

表 1 AlSi10Mg 铝合金化学成分					
Table 1 Composition of AlSi10Mg alloy					(w/%)
Element	Si	Mg	Cu	Zn	Mn
Content	9.0~11.0	0.25~0.45	≤0.1	≤0.3	0.2~0.5

Element	Sn	Pb	Fe	Al	
Content	≤0.01	≤0.05	≤1.00	Bal.	

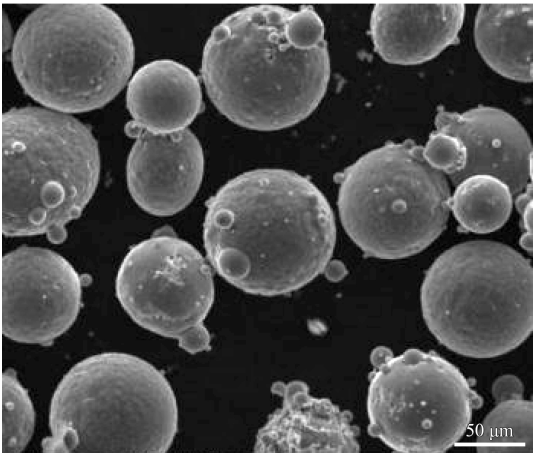


图 1 AlSi10Mg 粉末微观形貌
Fig.1 SEM image of AlSi10Mg powder

酮擦拭, 并在 180 ℃ 的烘干炉中预热。

试验中采用的激光熔化沉积系统包括 IPG 光纤激光器 (YLS-4000)、GTV 送粉器、三束流同轴送粉喷嘴, 带有 5 轴 4 联动数控机床的充氩舱。充氩舱可以控制其舱内的水氧含量体积分数在 1×10^{-5} 以内。激光熔化沉积过程中, 激光束采用正离焦 5 mm 的方式, 即聚焦光斑在粉斑下方 5 mm 处, 离焦后的光斑直径约为 0.7 mm。试验用激光功率为 910 W, 扫描方向为单向, 扫描速度 1 m/min, 送粉速度 3.5 g/min, 每层的沉积高度为 0.4 mm。制备厚度为 2 mm 的单墙体样件, 进行气孔率、力学性能的分析。为了分析气孔的占比, 使用 Matlab 软件对光学显微镜下的墙体剖面金相照片进行图片处理, 首先将图片转换为灰度图, 中值滤波, 再调节阈值将图片二值化, 使材料组织和气孔分别用不同的值表示, 进而可以计算出剖面的气孔率。每个单墙体取 3 个剖面, 最后得到的气孔率取平均值。在力学性能测试中, 拉伸件尺寸如图 2 所示, 每个单墙体沿垂直于沉积方向取 3 个拉伸件。因为拉伸件比较薄, 拉伸时使用气动夹具夹持, 防止拉伸件被提前夹断。

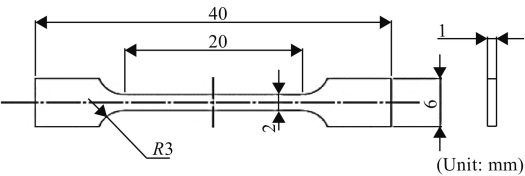


图2 拉伸试样尺寸

Fig.2 Tensile test specimen dimensions of AlSi10Mg alloy

2 结果与讨论

2.1 沉积态组织及力学性能

激光熔化沉积制备的薄壁单墙体试件如图3所示, 尺寸为70~90 mm×55 mm×2 mm。使用阿基米德排水法^[9]测得试件的密度为2.66 g/cm³, 而铸态 AlSi10Mg 合金密度^[10]为2.68 g/cm³, 试件相对于铸件的致密度为99.3%。

图4展示了激光熔化沉积试件 XOZ 面的微观组织照片。由图4(a)中可以看出, 沉积态的组织并不均匀, 组织呈现出一定的周期性。激光熔化

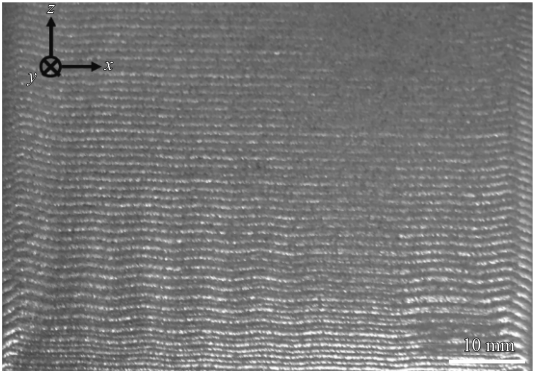
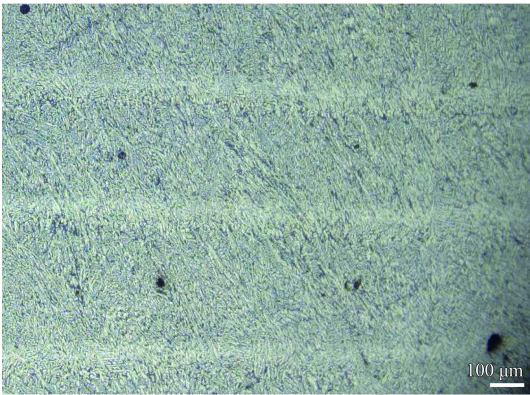


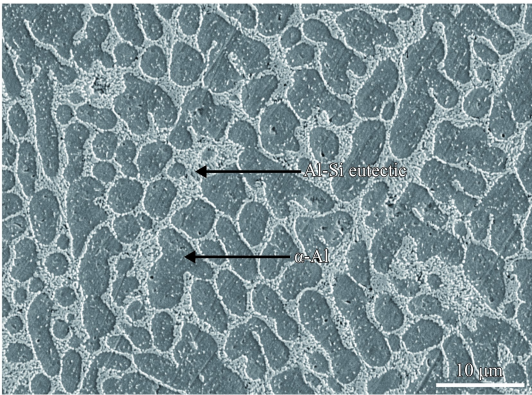
图3 激光熔化沉积制备的薄壁墙体

Fig.3 Thin-walled parts made by metal desposition

沉积过程, 熔池的冷却速度非常快, 远远高于平衡凝固的冷却速度, 沉积态组织由细小的 α -Al 枝晶(图4(b)中灰色部分)及 Al-Si 共晶(图4(b)中白色部分)组成, 与铸态的 Si 形成的针片状组织有很大的区别。同样因为冷却速率过快, α -Al 枝晶的平均二次枝晶间距只有1.5 μ m。



(a) OM image of deposited AlSi10Mg



(b) SEM image of deposited AlSi10Mg

图4 激光熔化沉积 AlSi10Mg 组织形貌

Fig.4 Microstructure of laser metal deposited AlSi10Mg

图5给出了沉积件的典型拉伸曲线, 可见抗拉强度达到了350 MPa以上, 延伸率高于8%。因为 AlSi10Mg 为粉末牌号, 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^[11] 和美标 A360^[10] 的力学性能与之对比。ZL104 的抗拉强度在200 MPa, 延伸率1.5%, 而 A360 的抗拉强度为305 MPa, 延伸率2.5%。可见试验激光熔化沉积制备的 AlSi10Mg 合金的性能已经明显优于铸态的 AlSi10Mg 合金。强度超过 A360 铝合金16.3%, 超过 ZL104 铝合金77.5%。强度大幅提高的同时, 延伸率也明显的提高, 沉积态 AlSi10Mg 合金的延伸率为 A360 的3倍左

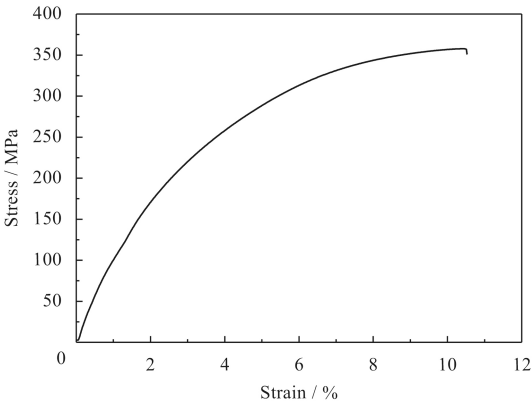


图5 激光熔化沉积的 AlSi10Mg 拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of laser metal deposited AlSi10Mg

右, 达到 ZL104 的 5 倍以上。

铝合金沉积态试件的力学性能虽然相比于铸态有很大的提升, 但是气孔缺陷并没有完全消除, 如图 6(a) 显示的是沉积态 YOZ 剖面组织中的气孔分布, 使用 Matlab 软件进行灰度处理、中值滤波、再二值化处理后得到清晰的气孔分布如图 6(b) 所示。随机从剖面中取 3 个位置, 使用 Matlab 计算剖面气孔率后得到气孔率均值为 0.45%, 所以推知沉积件的相对致密度应该在 99.5% 左右。使用 Matlab 计算的气孔率与使用阿基米德排水法求得的相对致密度较为吻合。

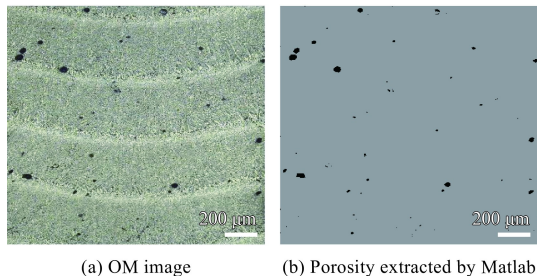


图 6 沉积态组织中气孔分布及 Matlab 提取的气孔分布图

Fig.6 As-deposited microstructure and porosity distribution extracted by Matlab

2.2 气孔的类型

图 7 为沉积态铝合金试件拉伸断口的宏观形貌。断口中韧窝明显, 表现为明显的韧性断裂, 但是也可以看出, 断口中包含很多气孔, 部分气孔的直径已经接近 100 μm, 有些气孔基本相连。图 8 为某个气孔的放大图, 可以看出, 气孔的内壁非常光滑, 形状也非常规则, 近似于球体, 表现出典型的氢气孔形貌^[12], 可以排除因熔合不良而导致的工艺气孔的可能性。

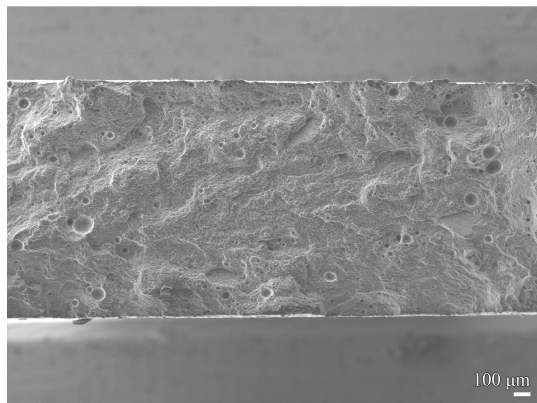


图 7 沉积试件断口形貌

Fig.7 Tensile fracture image of the tensile specimen

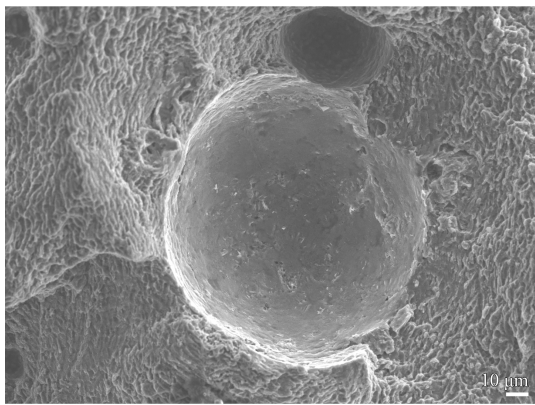


图 8 断口上气孔的形貌

Fig.8 Pores morphology in tensile fracture surface

2.3 气体环境氧含量对气孔率及力学性能影响

环境温度与湿度对铝合金焊接过程氢气孔数量及大小的影响已有学者做了深入研究^[13], 但是作者发现, 气体环境中氧气含量也对氢气孔的形成有很大的影响。试验中向充氩舱内充入一定量的氧气, 开启充氩舱内的气体循环, 待充氩舱内氧含量稳定在 1×10^{-3} 左右时关闭充氩舱循环柱, 使氧含量维持在 1×10^{-3} 左右。在 10 min 后使用和前述同样的工艺进行激光熔化沉积试验。得到的沉积试件的微观组织以及 Matlab 提取的气孔分布图如图 9 所示。可见在氧含量提升后, 气孔明显增多, 平均气孔率达到了 2.71%, 比在氧含量 1×10^{-5} 以下制备的沉积试件气孔率增加近 5 倍。

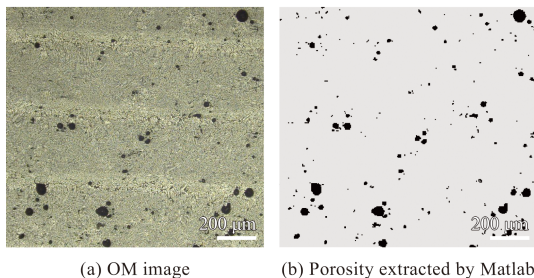


图 9 氧含量 1×10^{-3} (1 000 ppm) 时沉积态微观组织及 Matlab 提取的气孔分布图

Fig.9 Microstructure deposited with 1 000 ppm oxygen concentration and porosity distribution extracted by Matlab

在拉伸测试中, 得到拉伸曲线如图 10 所示, 氧含量 1×10^{-3} 。抗拉强度 248 MPa, 延伸率 6.2% 之间。此氧含量下做测试的全部试件中, 抗拉强度范围 227~248 MPa, 延伸率 4.6%~6.2%。相比于前述氧含量小于 1×10^{-3} 制备的沉积件, 强度降低了超过 30%; 塑性也降低了 20% 左右。

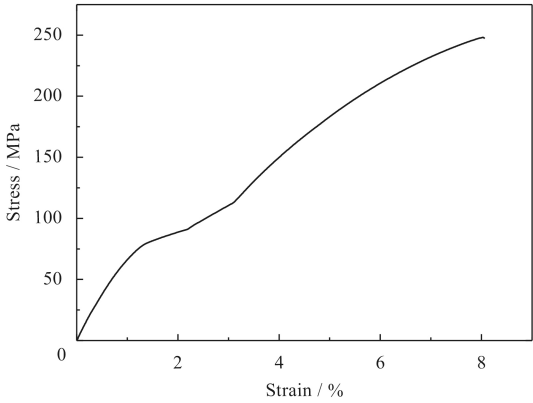


图 10 气孔率达 2.71% 试件的拉伸性能

Fig.10 Tensile properties of specimens with 2.7% porosity

强度和韧性的降低主要与两个因素有关，一是气孔周围，尤其是气孔与气孔之间的区域的受力状态，另一个则是因为气孔率增多而导致的受力面积的减小。拉伸试件的断口形貌如图 11 所示，可见断口中所见的气孔明显多于截面组织的气孔，说明断裂中裂纹扩展时倾向于沿着气孔与气孔之间薄的组织扩展，气孔与气孔间的组织的受力状态变得复杂。另一方面，因为气孔的增多，拉伸试件中横截面的面积也会有所减少，导致拉伸时施加同样的载荷会导致更大的应力。但是，试件的气孔率在 3% 以下，拉伸时的受力面积相对于氧含量 1×10^{-5} (10 ppm) 下的沉积件只减小了 2% 左右，远没有达到强度减小的降幅，即 30%。所以，气孔周围受力状态的变化，即受力状态由单项拉应力向三向拉应力的转换，是导致强度与韧性大幅下降的最主要原因。

因此，铝合金激光熔化沉积增材制造，建议

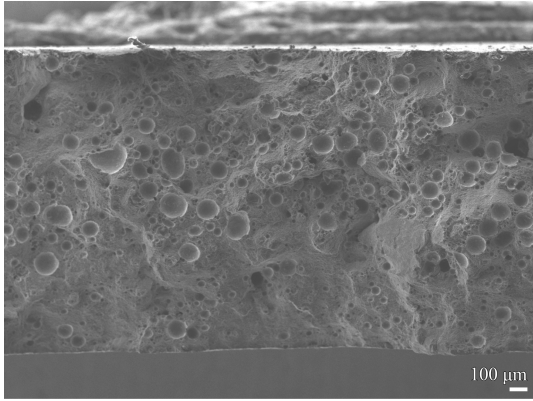


图 11 氧含量 1×10^{-3} (1000 ppm) 沉积试件断口形貌

Fig.11 Tensile fracture image of the specimen deposited in 1×10^{-3} oxygen concentration

在充氩舱环境内进行，方能保证内部气孔的控制，尤其是对于粉基激光熔化过程，粉末对环境的影响更为敏感。

3 结 论

(1) 采用激光熔化沉积技术，制备出表面质量完好、尺寸均匀、厚度 2 mm 的 AlSi10Mg 薄壁单墙体，沉积态试件的抗拉强度达到 350 MPa 以上，延伸率达到 8%，明显优于铸态组织的强度及塑性。力学性能较高的主要原因是沉积态中形成了间距在 2 μm 以下、非常细小 $\alpha\text{-Al}$ 的二次枝晶。

(2) 激光熔化沉积制备的 AlSi10Mg 沉积态组织中含有一定量的氢气孔，这些气孔是影响试件力学性能的重要因素。而环境中的氧气含量对沉积态 AlSi10Mg 的气孔率有很大的影响，氧气含量控制在 1×10^{-1} 以下时，沉积态组织气孔率在 0.5% 以下，而当水氧含量达到 1×10^{-3} 左右时，沉积态组织中的气孔率接近 3%。

(3) 随着氢气孔的数量增加，强度与塑性急剧减小，相比于气孔率小于 0.5% 时的沉积试件，当气孔率增大到 3% 左右时，强度下降了近 30%，塑性也下降了 20%。气孔对沉积态合金的力学性能影响非常大，是导致沉积试件力学性能不稳定的重要原因。

(4) 铝合金激光熔化沉积增材制造，要严格控制环境氧含量，最好在充氩舱内进行，方能保证内部气孔的控制，提高沉积的铝合金的力学性能。

参考文献

[1] 王华明, 张凌云, 李安, 等. 先进材料与高性能零件快速凝固加工研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(3): 27-31.
WANG H M, ZHANG L Y, LI A, et al. Progress on rapid solidification laser processing for advanced materials and components[J]. World Sci Tech R & D, 2004, 26(3): 27-31 (in Chinese).
[2] 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): 0303008-98.
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): 0303008-98 (in Chinese).
[3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- 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 (in Chinese).
- [6] 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.
- [7] 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(4).
- 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(4).
- [8] 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.
- [9] 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*, 2016: 1-11.
- [10] ASTM committee B07 on light metal and alloy. Standard specification for aluminum-alloy die casting. ASTM B85/B85M-14[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014: 9.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 铸造铝合金: GB/T 1173-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013, 10.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Casting aluminum alloy: GB/T 1173-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013, 10(in Chinese).
- [12] 王威, 徐广印, 段爱琴, 等. 1420 铝锂合金激光焊接气孔形成机理[J]. *焊接学报*, 2005, 26(11): 59-62.
- WANG W, XU G Y, DUAN A Q, et al. Porosity formation mechanism in laser welding 1420 Al-Li alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(11): 59-62.
- [13] 乔建毅, 王文权, 阮野, 等. 环境温湿度对铝合金焊缝气孔和力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2018(2): 254-258.
- QIAO J Y, WANG W Q, RUAN Y, et al. Effects of temperature and humidity on porosity and mechanical properties of aluminum alloy MIG joints[J]. *Materials Review*, 2018(2): 254-258 (in Chinese).