

铝合金选区激光熔化精密成形及其在航空领域的应用

甘武奎¹, 彭金贵¹, 李仕豪², 夏文强², 汪志太², 徐志锋²

(1. 肇庆市广应科通用航空研究院, 肇庆 526003;

2. 南昌航空大学航空制造工程学院, 南昌 330063)

[摘要] 主要介绍了铸造铝合金的选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)成形技术, 总结分析了 ZL1××-ZL4×× 系 4 个系列铸造铝合金的 SLM 成形工艺、SLM 成形件热处理工艺等国内外研究现状, 及其在航空工业领域的工程应用, 并进一步探讨了铸造铝合金 SLM 成形技术存在的问题和发展趋势。

关键词: 铸造铝合金; 选区激光熔化; 成形工艺; 热处理工艺

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.053



甘武奎

研究员级高工, 主要从事航空用铸件的研究与加工。

随着航空工业的快速发展, 飞机及航空发动机中航空构件呈现整体化、轻量化、复杂化及精密化特征。其中铝合金铸件在航空航天等领域应用广泛, 但这类复杂铝合金构件采用传统制造工艺因其冶金及尺

寸缺陷多, 制造尤其困难, 传统制造技术已经接近极限^[1-3], 急需新的制备工艺。而以粉末床为主要技术特征的选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)成形技术突破了产品结构形态的约束, 能够直接加工出传统制造工艺方法无法加工或难以加工的非常规结构特征的复杂零部件, 并可通过最优化的结构设计来显著减轻铝合金构件的重量。相比较传统的制造技术, SLM 成形技术具有成形件性能优异、结构精细、尺寸精度高等特点, 从而丰富和拓展了铝合金构件的制造工艺手段, 是制备该类形状复杂、高性能零件的最有前景的技术之一, 已被各国优先推广应用于航空航天领域^[4-8]。

但国内外对 SLM 成形金属材料的研究, 前期均是一直围绕难熔的高温合金、钛合金、碳钢等材料体系来展开, 而对航空航天领域广泛大量使用的轻质铝合金的 SLM 成形技术则少有研究^[9-10]。这是因为 SLM 成形

过程中铝合金粉末与激光的相互作用非常复杂, 铝合金对激光超过 90% 的高反射率及具有的高热导率($237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)、易氧化、含大量易烧损合金元素, 表面张力大等材料特性使铝合金材料的 SLM 成形更难于控制, 目前铝合金 SLM 成形技术的研究和应用要明显落后于其他材料^[11-13]。但近几年随着高功率大型 SLM 成形设备的逐步推出和逐渐成熟, 及其他增材制造在铝合金零件直接制造方面取得的进展, 铝合金材料的 SLM 成形工艺研究也得到业内的高度重视, 其发展迅速, 已成为近期研究的热点^[14-17]。本文主要介绍了铸造铝合金的 SLM 成形技术, 总结分析了铸造铝合金 ZL1××-ZL4×× 系 4 个系列常用合金的 SLM 成形工艺、SLM 成形件热处理工艺等国内外研究现状, 及其在航空航天领域的工程应用, 并进一步探讨了铸造铝合金 SLM 成形技术的发展趋势。

铸造铝合金材料 SLM 成形工艺

铸造铝合金一般具有良好的流动性,较小的收缩、热裂、冷裂倾向性和吸气性。其元素含量一般高于相应变形铝合金,且多数合金接近共晶成分。按主要加入的元素分为 Al-Si 类 ZL1×× 系、Al-Cu 类 ZL2×× 系、Al-Mg 类 ZL3×× 系及 Al-Zn 类 ZL4×× 系 4 个系列。其大多需进行热处理以强化合金、消除内应力、稳定组织和零件尺寸。在航空领域中主要应用在制造飞机的樑体、挂架、进气唇口和发动机的机匣体等,也广泛应用于制造汽车的轮毂、气缸盖、变速箱和活塞,仪器仪表的壳体等零件。

1 Al-Si 系列合金

目前国内外铝合金 SLM 成形研究所采用最多的就是具有良好铸造性能和焊接性的 ZL1×× 系的 Al-Si 类合金材料,这是一类窄结晶温度范围的合金。此外,由于其合金元素 Si 含量较高,SLM 加工过程中对激光的吸收率相对较高^[18],可减低对激光能量的需求,并且在凝固过程中可减少缺陷的产生,是比较适合于 SLM 成形的一类铝合金材料。

(1) AlSi10Mg 合金。

现阶段国内外铝合金 SLM 成形工艺研究大多集中在 AlSi10Mg 合金,其大致相当于国内的 ZL104 合金。应用于 SLM 成形的 AlSi10Mg 合金粉末粒径大致在 1~30 μm 范围内的细粉。其颗粒形貌如图 1^[19] 所示,很明显,其颗粒形状接近于球形,但局部存在一些“卫星球”,影响粉末的流动性。

目前国内外在 AlSi10Mg 合金粉末的 SLM 成形方面做了大量的研究^[19-25]。研究者大多是先通过单道熔池试验去找到最适宜的熔池宽度范围,以获得形成稳定熔池的工艺参数,并以此工艺参数作为 SLM 成形

的基础参数进行工艺优化研究。具体的研究内容有:工艺参数和能量密度对 SLM 成形件的致密度、微观组织及力学性能的影响,扫描方式、预热温度对 SLM 成形及变形的影响,基板材料及其表面粗糙度对合金润湿性的影响,工件摆放、氧含量等对 SLM 成形件力学性能的影响等。其中,具有代表性的研究成果有:Kempen^[26] 主要进行了不同粒度和形状的 AlSi10Mg 合金粉末的单道成形试验,探讨了 AlSi10Mg 合金的 SLM 成形的可行性,试验发现:铝合金成分中 Si 含量较高的粉末对激光的吸收率也较高,润湿性也更好。并在单道成形试验的基础上进行了 AlSi10Mg 合金块体 SLM 成形工艺研究,得到了工艺区间内成形件致密度和工艺参数的关系,其最优工艺参数下的致密度大于 99%,SLM 成形试样的晶粒细至 1~2 μm ,但 SLM 成形件组织中仍存在大小不等的球形或多角形气孔,试验得出 AlSi10Mg 合金具有较好的 SLM 成形性。在前期试验的基础上,Kempen^[27] 进一步进行了 AlSi10Mg 合金 SLM 成形的力学性能研究。拉伸试样分别沿 XY 方向和 Z 方向成形,发现不同方向成形试样的拉伸强度存在各向异性,但 SLM 成形试样的力学性能均高于传统铸造方法制备的试样。而 Buchbinder^[28] 为提高铝合金的 SLM 成形效率,采用最高激光功率 1kW,聚焦激光半径 97.7 μm 的双模

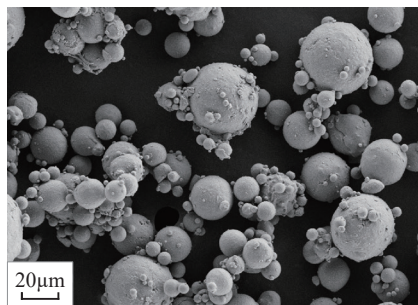


图1 AlSi10Mg合金粉末的微观形貌
Fig.1 SEM morphology of AlSi10Mg powder

光纤激光器对 AlSi10Mg 合金进行了 SLM 成形工艺研究。研究表明在保证 SLM 成形件的致密度和力学性能的前提下,通过增大扫描间距、提高扫描速度可将 SLM 成形速度从 5mm³/s 提升到了 21mm³/s。Calignano^[29] 研究了 SLM 成形过程中的“球化”现象,并用统计法分析了工艺参数对 AlSi10Mg 合金表面粗糙度的影响。在 AlSi10Mg 合金 SLM 成形工艺窗口,成形件的表面粗糙度主要由扫描速度决定,扫描速度较低时,表面粗糙度较小,但扫描速度过低时则会出现“球化”现象,反而恶化了其表面粗糙度。减小扫描间距有利于降低表面粗糙度。Thijs 等^[30] 采用双次扫描 AlSi10Mg 合金,获得了致密度 99.8% 的 SLM 成形件,其成形试样的显微组织呈现出独特的细小胞晶-枝晶结构,细小 Si 相均匀分布在 α -Al 基体中,其 SLM 成形件的抗拉强度、延伸率及冲击性能等力学性能均高于 AlSi10Mg 合金铸件。Brandl 等^[31] 制备了致密度大于 99% 的 AlSi10Mg 合金 SLM 成形疲劳试样,尽管还存在孔隙等缺陷,但其抗疲劳强度仍高于 DINEN (德国标准协会)标准。

赵晓明^[32] 等采用国产 SLM 设备研究了其成形 AlSi10Mg 铝合金的可行性,并对其性能适用性进行评价。研究发现:国产选区激光熔化成形的 AlSi10Mg 合金组织致密,晶粒细小,力学性能优于传统铸造成形的零件。其中横向性能和纵向性能相当,横向塑性略优于纵向(见表 1^[32])。使用国产 SLM 设备成形的 AlSi10Mg 合金退火态性能与德国 EOS 公司公布的性能数据相当,说明国内对 AlSi10Mg 铝合金 SLM 成形的研究和应用水平已达到国际先进水平。邹亚桐^[33] 等为提高 AlSi10Mg 合金 SLM 成形致密度,利用田口方法对影响致密度的激光功率、扫描速度和扫描间距等主要因

素进行优化研究,结合孔隙形成原因和金相形貌,从能量输入的角度分析各个因素对致密度的影响规律,并引入能量密度模型,综合表征能量输入与致密度之间的作用关系。结果表明,3个因素对铝合金SLM成形致密度均有显著影响,足够的能量密度输入是AlSi10Mg合金SLM成形接近全致密的必要条件,能量密度在 $4.0\sim 6.0\text{J}/\text{mm}^2$ 范围内时,致密度可达98%以上。陶攀^[34]等建立了一个零件尺度的模型,采用收缩体积法模拟预测了SLM成形AlSi10Mg合金悬臂梁结构的变形行为,研究了几何结构、扫描方式以及预热温度对悬臂梁结构的变形影响。SLM成形件翘曲方向和变形趋势的数值模拟结果与试验结果一致;而且悬臂梁的壁厚越大其刚度越大,抗变形的能力越强;通过提高预热温度可以有效减小零件的变形。

(2) Al-12Si 合金。

Al-12Si合金也是国内外SLM

研究较多的一类铝合金材料^[35-38],图2^[36]是不同粒径范围的Al-12Si粉末微观形貌,其粒径范围在 $10\sim 100\mu\text{m}$,颗粒的球形度较好,但也存在少量“卫星球”。Al-12Si合金中Si元素含量比AlSi10Mg合金更高,其流动性更好。

在Al-12Si合金的SLM成形性研究方面,Olakanmi^[36]等研究了激光吸收率、粉末中氧含量、熔体的热导率等对Al-12Si合金SLM成形过程中的“球化”现象和氧化膜形成的影响,着重探讨了工艺参数对试样微观组织及致密化行为的影响。得出熔体的润湿性差会发生“球化”现象,而激光功率及扫描速度等工艺参数是影响Al-12Si合金致密度的关键因素;并引入激光能量密度 E 来综合分析工艺参数对致密度的影响,在最优的能量密度 $67\text{J}/\text{mm}^3$ 时的致密度可达到99%以上,而能量密度高于或低于 $67\text{J}/\text{mm}^3$ 都会出现大的孔洞,导致致密度下降。Prashanth^[37]

则主要研究了SLM成形Al-12Si合金的微观组织对力学性能的影响,试验分别采用两种不同的扫描速度进行扫描。通过改变不同的工艺参数,其成形试样的力学性能差异较大,这主要是其微观组织中晶粒大小和形貌严重影响了试样的力学性能。Wang^[38]研究了Al-12Si合金SLM成形过程中, N_2 、Ar和He3种不同惰性气体保护下的致密度和力学性能的差别。试验表明,3种不同惰性气体保护下的SLM成形试样的致密度、显微硬度基本相同,但He气氛下试样的延伸率明显低于 N_2 和Ar保护时,且拉伸强度也稍低。王梦瑶等^[39]对Al-12Si合金的SLM成形特性以及成形试样中裂纹进行了研究,揭示了成形致密度和工艺参数的关系以及裂纹的形成机制。裂纹的形成是Al-12Si合金SLM成形过程中生成了大量共晶Si相,使材料的抗裂性能不足以抵抗成形过程中的高温梯度导致的残余应力所致。通过调整成形工艺参数,可得到无裂纹的性能良好的成形零件。白培康等^[40]认为铝合金对激光的反射率高是造成SLM成形铝合金产生的“球化”现象的根本原因,通过采用X-Y交叉扫描的方式可减少“球化”缺陷。

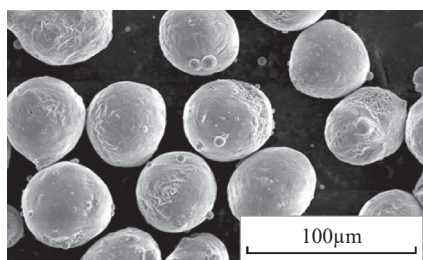
(3) AlSi7Mg 合金。

Nakamoto等^[41]研究了SLM工艺参数对A356(AlSi7Mg0.3)合金试样致密度、显微组织和力学性能的影响,A356合金沉积态的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为400MPa、200MPa和12%~17%。刘婷等^[42]对AlSi7Mg合金进行SLM成形工艺研究,主要研究了能量密度对AlSi7Mg合金致密度、显微组织、Si析出形态及力学性能的影响,揭示了AlSi7Mg合金SLM成形熔池内温度场和速度场等物理冶金机制,发现:SLM成形AlSi7Mg构件中Si颗粒尺寸十分细小、呈良好的弥散状态、以规则网

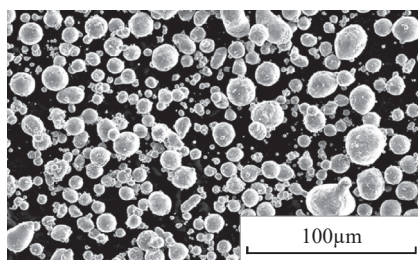
表1 试样沉积态的拉伸性能

Table 1 Mechanical properties of specimens before heat treatment

取样方向	试样编号	UTS/MPa	YS/MPa	$E_t/\%$	$R_f/\mu\text{m}$
横向	H-1	456	270	5.5	11
	H-2	451	266	7	9
	H-3	462	270	7	9
	平均值	456.3	268.6	6.5	9.6
纵向	Z-1	469	240	7	10
	Z-2	471	239	6.5	8
	Z-3	467	235	7.5	10
	平均值	469	238	7	9.3



(a) S20



(b) S10

图2 不同粒径Al-12Si粉末的显微形貌

Fig.2 SEM morphology of Al-12Si powder

状分布,但能量密度过高时 Si 颗粒会发生粗化,不利于合金强韧化。在激光能量密度 200J/m 下,SLM 成形 AlSi7Mg 合金的力学性能比传统铸造或粉末冶金方法的显著提高 20% 以上,AlSi7Mg 合金的拉伸强度达 475.8 MPa,延伸率 6.4%,显微硬度 165HV。

更为有意义的是:肖波、刘志权等^[43-44]对航空铸造应用最广的 ZL114A 合金进行了 SLM 成形工艺研究,获得了 ZL114A 合金 SLM 成形的最优成形工艺区域,其最优参数下致密度达到 99.3% 以上,并进一步研究了激光能量密度对 ZL114A 合金微观组织和力学性能的影响。在能量密度为 100J/mm³,水平摆放下 ZL114A 合金的 SLM 成形试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 400MPa、241.7MPa 和 5.7%;而此时竖直方向上试样抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 317.9MPa、165.3MPa 和 5.9%,表现出水平方向明显高于垂直方向各向异性。

综上,目前国内外对 SLM 成形 ZL1×× 系铝合金的研究还主要集中在 AlSi10Mg、Al-12Si 和 AlSi7Mg 等材料方面,AlSi10Mg 的研究相对于其他铝合金材料更为成熟,SLM 成形的 AlSi10Mg 合金达到接近 100% 的致密度,晶粒细小,无缩孔及区域偏析,其拉伸强度大于 400MPa,均高于传统铸造成形方法,但对其他牌号铸造 Al-Si 合金的研究相对较少。而对铸造 Al-Si 合金 SLM 成形特性的研究则主要集中在致密度、显微组织和力学性能方面,而缺少对 SLM 成形过程中存在的“球化”、氧化膜、飞溅、裂纹等缺陷形成机理的深入研究。

2 Al-Cu 系列合金

ZL2×× 系 Al-Cu 合金由于它的高强度,优异的疲劳性能和损伤容限也广泛应用于航空工业。Al-Cu 系合金属于固溶型,其结晶温度间隔较

宽,铸造过程中易出现热裂、疏松、偏析等缺陷。为减少其加工步骤和提高物理和化学性能,更多的加工技术应用于成形 Al-Cu 合金。近几年,SLM 成形也开始应用于 Al-Cu 合金,以期通过最少的后期加工得到优异的性能,提高效率,节约成本^[45-47]。相对于 Al-Si 系合金,有关 ZL2×× 系高强铝合金的 SLM 成形技术研究要少很多。

2011 年,德国 Bartkowiak 等^[48]率先开展了其自主研发的 Al-Cu 系、Al-Zn 系高强铝合金 SLM 成形性的研究,采用的也是单道熔池成形试验,通过分析熔池形貌和润湿角等证明了高强度 Al-Cu 系、Al-Zn 系铝合金的 SLM 成形具有可行性。此后,有关高强铝合金 SLM 成形的研究也逐渐引起了业界重视。梁小文^[49]等进行了 ZL205A 合金粉末的 SLM 成形工艺研究,通过正交试验获得了 ZL205A 合金粉末 SLM 成形的最优化工艺参数,其对应的致密度可达 98%,但其拉伸试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别只有 281MPa、221MPa 和 4.2%。ZL205A 合金 SLM 成形时易“球化”,表面质量较差,大尺寸“球化”颗粒较多,且存在明显的热裂纹(图 3^[49]),这可能是导致其成形件力学性能不高的主要原因。

而在 ZL2×× 系 Al-Cu 合金之外,有必要提及的是国内外对 AW-2024 铝合金(国标为 LY12)进行了深入研究,该合金的特点是强度高,抗高温性能在 400℃ 工作环境中不会产生永久变形,其广泛用于飞机结构、铆钉、螺旋桨元件、卡车轮毂等关键结构件。其粉末粒度范围在 10~73μm,粉末的微观形貌如图 4^[52]所示,几乎全是球形,但也含有少量的“卫星球”。图 5^[53]是 Al-Cu-Mg 合金中 Cu、Si 和 Mg 含量与热裂纹的关系曲线,通常 Cu 含量在 0.33%~5% 会大大加加热裂纹的敏感性^[50]。2024

铝合金还含有 1%~2% 的 Mg 元素,其热裂倾向特别严重。Ahuja^[51]等采用 SLM 成功制备了几乎全致密的 Al-Cu 合金块体,结果表明 SLM 技术是一种大有前途的 Al-Cu 合金加工方法。基于这个结论,Zhang^[52]等

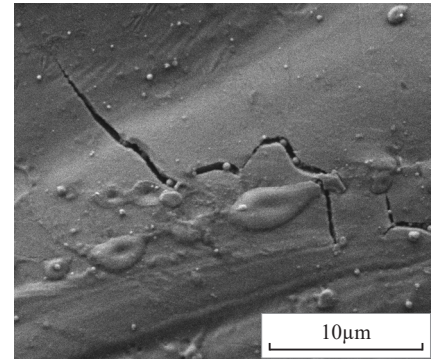


图3 ZL205A合金SLM成形件的显微裂纹
Fig.3 SEM morphology of ZL205A fabricated by SLM

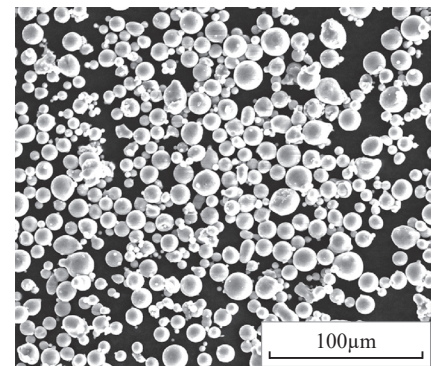


图4 AW-2024粉末的显微形貌
Fig.4 SEM morphology of AW-2024 powder

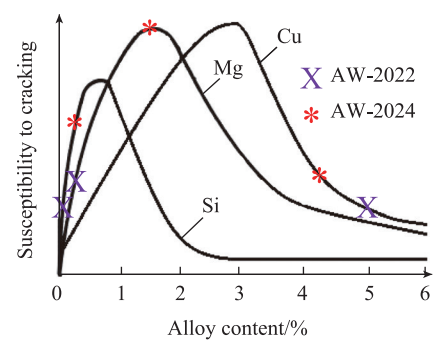


图5 AW-2022和AW-2024中Cu、Mg和Si含量与裂纹敏感性的关系
Fig.5 The relationship between the content of Cu, Mg, Si in AW-2022 & AW-2024 alloy and crack susceptibility

系统研究了激光体能量密度对 Al-Cu-Mg 合金的 SLM 成形性的影响,获得了 $E=340 \text{ J/mm}^3$ 为 SLM 成形能量密度,在此能量密度均可获得无缺陷、无微裂纹的近乎完全致密的 SLM 试样(99.8%)。SLM 成形 Al-Cu-Mg 合金试样的显微组织是极其细小的过饱和胞晶,在细晶强化和固溶强化作用下,Al-Cu-Mg 合金 SLM 成形件的极限抗拉强度为 402MPa,屈服强度为 276MPa,延伸率为 6.5%。而 Karg^[53] 也分析了 AW-2022 以及 AW-2024 两种 Al-Cu 合金 SLM 成形的可行性,发现 AW-2024 合金的致密度高达 99.9%,且其成形工艺窗口较宽,但是热裂纹也无法消除。相比较,其 SLM 成形难度要大于 AW-2022。另外,通过降低熔池的冷却速度可以降低上述两种 Al-Cu 合金在成形过程中的裂纹敏感性。

与 Al-Si 系铝合金相比,Al-Cu 合金的 SLM 成形要困难得多,其中“球化”和热裂纹是其主要的 SLM 成形缺陷,这使得其在 SLM 成形中具有独特的技术工艺特点。目前依靠添加形核剂等方法虽然大大降低了高强铝合金在 SLM 成形时的热裂敏感性,消除了裂纹,并显著提升了室温抗拉性能,初步获得了成功,但由于改变了原始粉末的成分,对铝合金的高温性能、动态性能以及其他性能的影响还有待进一步研究,离工程应用还有较大的差距^[54-55]。此外,高强铝合金含有大量的合金元素,这些元素在高功率激光作用下会被烧损,合金元素的烧损机制、合金元素的烧损对成形零件性能的影响以及如何抑制等也必须解决。因此其 SLM 成形技术发展缓慢。未来 Al-Cu 合金的 SLM 成形的研究重点仍是进一步减少“球化”,及消除热裂纹,并在此基础上研制适合 SLM 成形的 Al-Cu 合金粉末材料的成形工艺,以及掌握其 SLM 成形过程中所涉及的物理机

制,成形工艺参数与综合性能之间的关系^[56]。

3 Al-Mg 系合金

关于 ZL3×× 系 Al-Mg 系列铸造铝合金的 SLM 成形研究则鲜有报道,国内外通过加入一些合金元素和稀土后对变形铝合金进行了 SLM 成形研究^[57-58],经后期热处理得到优良的组织 and 性能。Schmidtke 等^[56] 在 5××× 系 Al-Mg 合金中添加了 Sc 元素,并制备了共晶 AlMgScZr 合金,SLM 成形后的 AlMgScZr 合金经时效热处理后,其抗拉强度、延伸率分别达到 500MPa 和 20%。Spierings 等^[59] 通过 Sc-Zr 改性 Al-Mg 合金再 SLM 成形,由于理想微观组织的形成,在预加工条件下具有优异的性能,与传统工艺一样,这种合金具有时效硬化性,从而析出了高比例的细小分散的共格 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 金属间化合物,有助于提高机械强度,并采用电子背散射衍射和透射电子显微镜技术,研究了热处理和 HIP 对 SLM 试样微观结构的影响。此外,用原子探针层析法分析了 Al_3Sc 粒子的化学性质和数量密度。结果表明,由于晶内 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 析出物的密度较高,以及晶界上的各种粒子,即使热处理后,在加工条件下观察到的双模态晶粒尺寸分布仍然可以保持,HIP 后处理可能导致某些较粗粒度区域的晶粒生长,这可能是由于驱动力和反作用力之间的局部不平衡造成的,因此缺陷密度更高,钉扎沉淀物更少。

4 Al-Zn 系合金

ZL4×× 系 Al-Zn-Mg-Cu 合金具有强度高、塑性大、焊接性能好、耐腐蚀等优点,在航空工业中得到了广泛的应用。另外,高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 合金都是通过快速凝固来强化,而不需要后续的冷加工。像 Al-Si、Al-Cu 等合金由于具有好的焊接性和淬透性,可通过 SLM 技术近净成形,获得高致密度和优良力

学性能的试件,而对于 Al-Zn 合金的 SLM 研究则更少,Al-Zn 合金是一类不可焊接材料,其 SLM 成形的难度极大,热裂问题更难以克服,因此其 SLM 研究进展比 ZL2×× 系铝合金还慢,但利用 SLM 加工高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金也同样具有重要的工程意义。

Wang^[60] 采用 SLM 成功地制备了一种含 Zn 量较高的 Al-Zn-Mg-Cu 合金。少量不连续的 h 颗粒析出到枝晶间区域,其析出量小于相应的铸样。经过 T6 热处理后,几乎所有的 h 粒子都溶解在铝基体中。合成的 SLM 材料的硬度为 $(133 \pm 6) \text{ HV}_{0.05}$,与均质铸样相似,经 T6 热处理后,其 $\text{HV}_{0.05}$ 为 219 ± 4 。这一数值高于对应的 T6 铸样,说明 SLM 加工使材料力学性能较铸态得到了改善。

综上,目前,人们针对铝合金高导热率、高反射率、容易形成氢气孔、氧化物、小孔塌陷缺陷等特点,分别采用粉末烘干、基板预热、优化扫描策略等技术手段控制缺陷,能实现各类铸造铝合金的高致密度成形。同时通过改变工艺参数如激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉层厚等,均可获得高致密和优良力学性能的 SLM 铝合金。

铝合金 SLM 成形件的热处理研究

金属 SLM 成形过程具有“快热急冷”特点,因此 SLM 成形不仅显著细化了晶粒,而且增加了沉积态组织中合金元素的固溶极限,抑制了第二相的沉淀析出,获得的高过饱和的固溶体在细晶强化和固溶强化的共同作用下,沉积态铝合金 SLM 成形件的强度要高于铸态。但延伸性相较于铸态没有提升或者可能下降,须通过热处理进一步提高 SLM 成形件的强度和硬度,并且使延伸性提高。对 SLM 成形件进行

后续热处理,可以消除成形件元素的微观偏析,部分消除残余热应力,从而提高构件的强度。

近几年,随着对 SLM 成形技术认识的提升,以及工程实际应用的需要,国内外学者对铝合金 SLM 成形件的热处理研究日趋重视。Brice 等^[61]对铝合金沉积态试样进行了退火热处理,过饱和 Si 元素从 α -Al 基体中缓慢析出,“固溶强化”现象变弱,同时晶粒尺寸逐渐长大,由于 Si 晶粒的聚集和长大,导致铝合金沉积态试样的力学性能降低,但延伸率增大。Li 等通过对 SLM 成形的 AlSi12Mg 试样进行了后续热处理,将延伸率提高至 25%^[62]。张文奇^[63]等对 SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金进行了热处理研究,对其沉积态和热处理态试样进行了拉伸性能测试和显微组织分析。结果表明: AlSi10Mg 合金 SLM 沉积态的常温拉伸强度远高于铸件标准,延伸率与铸态相当;退火工艺对 SLM 试样的组织及力学性能有着重要的影响,随着退火温度的提高,试样微观组织发生改变,在 300 °C × 2h 退火处理后,均匀分布的颗粒状 Si 聚集长大为针状,抗拉强度由沉积态的 507~518MPa 下降到 378~406MPa,延伸率由沉积态的 3.0%~3.5% 增加到 6.5%~9.5%。余开斌^[64]研究了退火、固溶以及 T6 等热处理工艺对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明: SLM 成形 AlSi10Mg 合金的物相主要为 α -Al 基体和共晶 Si。共晶体组织(α -Al+单质 Si)在 α -Al 基体上呈连续网络状分布, XOY 和 XOZ 截面的组织均有粗晶区、细晶区和热影响区,经退火处理后,连续网络状分布的共晶 Si 发生部分溶解和断裂,合金的强度降低,但硬度略微升高。而经 T6 处理后,共晶体呈规则几何形状零散地镶嵌在 α -Al 基体上,合金的抗拉强度下降,但屈服强度略有提升,塑性明显

增强。综合比较 T6 处理更适合作为 SLM 成形 AlSi10Mg 合金的后续热处理。王学才^[65]探讨了 AlSi10Mg 合金 SLM 成形工艺、热处理工艺对其力学性能的影响。发现:热处理能显著提高 SLM 成形件的显微硬度和拉伸强度,170 °C × 2h 时效后,SLM 成形件的显微硬度提高了 15~30 HV,抗拉强度增加了 30 MPa 左右。闫云飞^[66]在 450 °C 温度条件下分别保温 1h、2h 和 4h,然后将其放入水中进行水冷处理。对比了热处理前后 SLM 成形 AlSi10Mg 合金的硬度和微观形貌。研究发现: AlSi10Mg 合金 SLM 成形试样的硬度随热处理时间的增加呈先减后趋平缓,但都高于铸造 AlSi10Mg 合金的硬度。热处理使得 AlSi10Mg 合金组织和成分更加均匀,而合金中的孔洞缺陷主要是由于 SLM 过程中凝固速率过快导致粉末颗粒之间存在的气体溶解在熔池中导致的。康梦瑶^[67]也进行了热处理工艺对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金组织及性能研究。SLM 成形 AlSi10Mg 合金的抗拉强度和屈服强度可达 (456 ± 10) MPa 和 (270 ± 10) MPa,较其铸造标准均高出 50% 以上,延伸率为 4.5%,与铸造标准大致相当。SLM 成形 AlSi10Mg 合金存在主要的两种强化机制,一种是 Si 相在 α -Al 基体中以固溶的形式存在,表现出固溶强化机制;另一种是成形组织晶粒细小,表现出细晶强化机制。

瑞士 Spierings 等^[68]研究了添加 Sc、Zr 元素的 Al-Mg 系列铝合金的 SLM 成形件的热处理工艺;由于 AlSc (+Zr) 的强化作用,Al-Mg 合金的抗拉强度超过 500MPa,同时伸长率超过 12%; SLM 成形的 2024、7075 等高强铝合金的致密度也接近 100%,添加 Zr、Ni 等合金元素可改善力学性能。张虎^[69]利用 SLM 技术制备了 Al-Cu-Mg 合金,在近乎全致密试样的基础上,通过 T4 热处理提高了 SLM 试样的力学性能,在

析出强化的作用下,抗拉强度提升至 532MPa,屈服强度提升至 338MPa,延伸率提升至 13%。

需要指出的是,目前应用于 SLM 成形所采用的铝合金材料大多仍是传统的铸造合金或锻造合金,后续的热处理工艺也大多是沿用传统铸件和锻件的热处理制度。而铝合金 SLM 成形工艺特性决定了其组织与传统的铸件和锻件具有较大的差别,使得这些合金的设计及热处理制度通常无法充分发挥铝合金 SLM 成形件的力学性能,开发具有针对性适用于铝合金 SLM 成形件的热处理工艺非常有必要。

在航空领域的应用

目前,人们针对铝合金的高导热率、高反射率及 SLM 过程中容易形成氢气孔、氧化物、微孔缺陷等特点,采用了粉末干燥、预热基板、优化扫描策略、工艺优化等方式来控制成形缺陷,基本实现了铝合金高致密度 SLM 成形,其沉积态的力学性能均高于铸态。现阶段,SLM 成形 AlSi10Mg 合金的拉伸强度最高达到 500MPa,远高于铸造 ZL104 合金 T6 态的力学性能,这主要是 SLM 成形的 AlSi10Mg 合金的沉积态组织相比铸态合金显著细化,同时 SLM 成形过程中因激光多层往复沉积的再热处理也使得合金在成形的同时还经受了充分的时效处理^[70-72]。很明显,铝合金 SLM 成形技术可实现力学性能优于铸件的复杂构件的直接制造。目前,德国 EOS 公司 SLM 成形 AlSi10Mg 合金已成功应用在航空和汽车制造业,图 6^[71]为其 SLM 成形的 AlSi10Mg 合金零件。更为吸引人们注意的是,2015 年,空客防务和航天公司在英国宣称已经采用 SLM 成形方法制造了应用于 Eurostar E3000 卫星上安装遥测和遥控天线的铝合金结构支架零件(如图 7 所示)。该零件无法采用

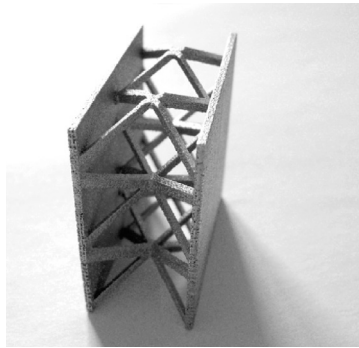


图6 SLM成形的AlSi10Mg合金零件
Fig.6 AlSi10Mg part fabricated by SLM

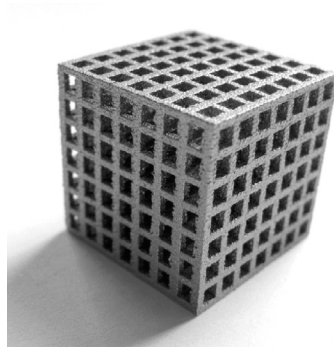


图7 SLM成形的航空航天铝合金结构
支架零件
Fig.7 Aerospace aluminum alloy structural
support parts fabricated by SLM

传统加工方法来实现,它取代了以前的4个独立部件的功能,其中包括44颗铆钉,其重量减轻了35%,硬度提高了40%,而且零件的可靠性也得到了大幅提高。这为推进SLM技术在航空航天领域的应用起到重要示范和引领作用。目前铝合金SLM成形技术已在航空航天制造领域的关键构件中得到了实际工程应用,并展现出广阔的应用前景。

在高强铝合金SLM成形零件的应用方面:2013年,德国弗劳恩霍夫激光研究所自主研发了添加Sc、Zr元素的SLM用AlMgSc-Zr合金粉末,通过铝合金成分优化和改变粉末粒径,大幅改善了其SLM成形效果,使铝合金的SLM制造迈向实用化阶段^[51]。该所SLM成形的该类铝合金构件致密度达到100%,且无微裂纹,其中图8为张虎采用SLM成形的Al-Cu-Mg样件^[69]。而图9、图10为美国加州大学圣巴巴拉分校Martin J H团队通过在铝合金粉末表面添加晶格匹配的纳米细化剂,采用SLM技术制备的高热裂敏感性的高强度7075合金和6061合金,其获得的SLM成形合金内部无裂纹缺陷,强度与锻造材料相当,其论文发表在*Nature*上^[73]。这种方法同样适用于其他高热裂敏感性合金,其将极大地扩展适用于SLM成形的铝合金材料的范围。

主要存在的问题

铝合金SLM成形技术极好地满足了航空构件的“整体化、轻量化、复杂化、精密化”的快速响应要求,具有广阔的应用前景。但需要强调的是,与传统的铸焊热加工技术和机械加工等冷加工技术相比,低熔点、低密度和高活性铝合金材料目前SLM成形的成熟度还较低,还存在一些尚未解决的突出问题制约了其在航空航天领域的广泛应用。

(1)目前对铝合金SLM成形过程的微观组织演变、球化、热裂纹等冶金缺陷形成机理、应力演化及变形开裂行为等关键基础问题还缺乏深入系统地认识和研究,而更深入的机理研究可为其工艺优化提供理论基础,需进一步对铝合金SLM成形过程中相关基础理论进行深入系统研究。

(2)SLM成形过程中存在的二次重熔粘粉现象,输入激光能量越高则对成形件周围粉末的热影响越明显,产生粉末粘附现象更严重,如何减少成形区附近粘粉,以及通过后处理来有效改善成形件表面掉粉是其工程实际应用急需解决的难题。另外,SLM成形构件的尺寸精度、表面粗糙度、力学性能等未达到理想状态,尤其在SLM成形一些含有薄板、尖角、特别是悬垂面几何特征结构件仍面临着挑战,存在悬垂面粗糙,局

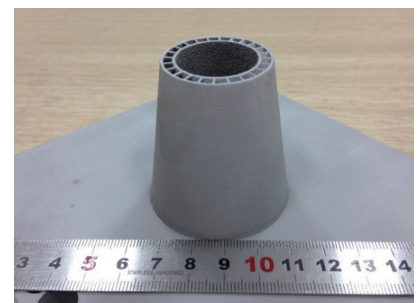


图8 SLM成形的Al-Cu-Mg零件
Fig.8 Al-Cu-Mg part fabricated by SLM

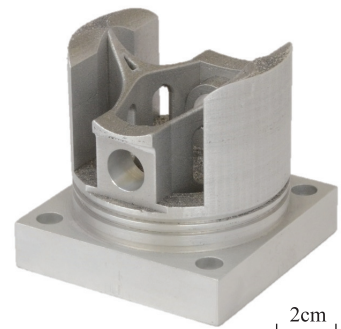


图9 SLM成形的拓扑优化6061合金活塞
Fig.9 Topologically optimized 6061 alloy
piston fabricated by SLM



图10 SLM成形的7075合金HRL标志
Fig.10 7075 alloy HRL logo fabricated by SLM

部形状精度、尺寸精度等不能达到要求,稳定性较差。

(3) SLM 成形不同结构零件都需要使用必不可少的辅助成形的支撑结构,目前都是通过添加大量的网状金属支撑以防止变形来保证 SLM 成形过程的稳定,但在后续的除去支撑,尤其是在内部的支撑结构时,去除不易,同时与支撑接触的表面的机械加工修整也非常困难。

(4) SLM 成形效率仍然偏低,虽然从早期的成形速度 $2\sim 20\text{cm}^3/\text{h}$,提高到了目前多个激光器在工作区域联动加工条件下的 $120\text{cm}^3/\text{h}$,但离高效成形仍存在较大的差距。

(5) 目前采用 SLM 成功制造的铝合金构件仍然限于较少的几种合金材料范围内,SLM 成形的专用铝合金粉末材料开发滞后。

(6) 高性能铝合金粉体材料的制备也是 SLM 成形技术的主要难点之一。目前国内外采用气体雾化法制备的铝合金粉体材料存在球形度不高、流动性较差、松装密度低等不足,导致在 SLM 成形过程中易出现铺粉不均匀、粉末团聚等现象。

(7) 热处理和冷处理仍是改善沉积态组织与力学性能的有效方法。然而简单沿用传统的针对铸锻态的热处理工艺则难以实现铝合金沉积态的组织 and 性能优化。

结论

基于粉床的铝合金 SLM 成形是一种兼顾精确成形和高性能成形的先进制造技术,其优势在于可以直接成形精细复杂几何结构的高性能构件,非常适合航空航天领域。尤其近几年,其相关的基础研究和应用基础研究在向更加深入、广泛的方向发展,铝合金 SLM 成形技术的发展非常迅速,目前成功的实际应用案例也在逐年增加。但需要注意的是,铝合金 SLM 技术的进步不是取代传统制造技术,而是增加了一个铝合金新的

先进制造手段和一种可能,而这种可能是传统制造方法不具备的。

对于铝合金 SLM 成形技术的未来发展:

(1) 基于航空航天等领域对高强铝合金 SLM 成形的需求,以 Al-Cu、Al-Zn 以及含 Sc 稀土系为代表的高强度铝合金材料的 SLM 成形未来的重点,其 SLM 成形过程中的裂纹缺陷控制、组织性能调控以及相应的后处理技术将成为未来技术研究的热点。

(2) 要进一步研究适合于 SLM 成形的铸造铝合金材料,积极拓展其他可用的铝合金材料,并结合航空工业中关键铝合金构件结构和性能要求,研制开发适应于 SLM 成形专用的铝合金粉末,并通过相应的基础理论研究和工艺参数优化来提高其加工精度及表面质量,从而实现高性能铝合金构件的高效制备。

(3) 应进一步优化 SLM 扫描路径、智能控制和实时监测反馈系统,大幅提高成形效率和突破零件成形尺寸来继续扩大铝合金 SLM 技术的应用范围。

(4) 铝合金 SLM 成形件的后热处理工艺研究,在开发具有针对性的铝合金 SLM 成形件热处理工艺基础上,可以进一步探索冷处理、深冷处理对沉积态铝合金组织和性能的影响,实现其组织优化。

随着铝合金 SLM 制造技术的进一步发展,并通过与热等静压等组合制造技术,相信在未来的几年铝合金 SLM 成形技术就能制造一些以往无法实现的航空铝合金关键构件,显著提升航空铝合金构件的制造能力,以推动新一代飞机和航空发动机的快速制造水平。

参考文献

[1] 林鑫,黄卫东.高性能金属构件激光增材制造[J].中国科学:信息科学,2015,45(9):1111-1115.

LIN Xin, HUANG Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Science in China(Information Sciences), 2015, 45(9): 1111-1115.

[2] 张小伟.金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J].航空动力学报,2016,31(1):10-16.

ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-16.

[3] 陆璐.增材制造技术在航空铸造领域的应用[J].材料导报,2018,60(S1):390-394.

LU Lu. Additive manufacturing applied in aviatric casting[J]. Materials Review, 2018, 32(S1): 390-394.

[4] 王华明.高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J].国防制造技术,2013(3):5-7.

WANG Huaming. High performance metal component additive manufacturing technology opens a new chapter in national defense manufacturing[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(3): 5-7.

[5] 周济.智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015(17):2273-2284.

ZHOU Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015(17): 2273-2284.

[6] 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.

HUANG Weidong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.

[7] ABOULKHAIR N T, MASKERY I, TUCK C, et al. Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: Influence of heat treatment and surface quality[J]. Materials & Design, 2016, 98: 174-182.

[8] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, IAN M, et al. Selective laser melting of aluminum alloys[J]. MRS Bulletin, 2017, 42(4): 311-319.

[9] 林鑫,黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J].中国材料进展,2015,34(9):684-688.

LIN Xin, HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials

China, 2015, 34(9): 684–688.

[10] 闫雪, 阮雪茜. 增材制造技术在航空发动机中的应用及发展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 70–75.

YAN Xue, RUAN Xueqian. Application and development of additive manufacturing technology in aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 70–75.

[11] 赵志国, 柏林, 李黎, 等. 激光选区熔化成形技术的发展现状及研究进展[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 46–49.

ZHAO Zhiguo, BO Lin, LI Li, et al. Status and progress of selective laser melting forming technology[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2014, 57(19): 46–49.

[12] 董鹏, 李忠华, 严振宇, 等. 铝合金激光选区熔化成形技术研究现状[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 607–611.

DONG Peng, LI Zhonghua, YAN Zhenyu, et al. Research status of selective laser melting of aluminum alloys[J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 607–611.

[13] 孙光永, 崔俊佳, 李光耀, 等. 一种热塑性玻璃纤维增强铝合金层板的成形装置与方法: ZL 201410128520.0[P]. 2015–09–16.

SUN Guangyong, CUI Junjia, LI Guangyao, et al. A forming device and method for thermo-plastic glass fiber reinforced aluminum alloy laminates: ZL 201410128520.0[P]. 2015–09–16.

[14] 史淑文. 激光增材制造 Al–12Si 合金成形工艺与性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

SHI Shuwen. Study on forming process and properties of Al–12Si alloy by laser additive[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[15] LI X P, WANG X J, SAUNDERS M, et al. A selective laser melting and solution heat treatment refined Al–12Si alloy with a controllable ultrafine eutectic microstructure and 25% tensile ductility[J]. Acta Materialia, 2015, 95: 74–82.

[16] 王霄, 王东生, 高雪松, 等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 478–483.

WANG Xiao, WANG Dongsheng, GAO Xuesong, et al. Research status and development in laser additive manufacturing of light alloy components[J]. Applied Laser, 2016, 36(4):

478–483.

[17] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 38–42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautic[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38–42.

[18] READ N, WEI W, ESSA K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development[J]. Materials & Design, 2015, 97: 417–424.

[19] FRANCESCO T, FLAVIANA C, MASSIMO L, et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties[J]. Materials, 2017, 10(1): 76–99.

[20] CALIGNANO F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2014, 96: 203–213.

[21] BRANDL E, HECKENBERGER U, HOLZINGER V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior[J]. Materials & Design, 2012, 94: 159–169.

[22] ABOULKHAIR N T. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2014, (1–4): 77–86.

[23] SIMONELLI M, TUCK C, ABOULKHAIR N T, et al. A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al–Si10–Mg, and Ti–6Al–4V[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2015, 46(9): 3842–3851.

[24] ABOULKHAIR N T, MASKERY I, TUCK C, et al. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: microstructure and nano-mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2016, 230: 88–98.

[25] LAM L P, ZHANG D Q, LIU Z H, et al. Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting[J]. Virtual & Physical Prototyping, 2015, 10(4): 207–215.

[26] KEMPEN K, THIJIS L, HUMBEECK J V, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 439–446.

[27] KEMPEN K, THIJIS L, HUMBEECK J V, et al. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation[J]. Materials Science & Technology, 2015, 31(8): 917–923.

[28] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 271–278.

[29] CALIGNANO, MANFREDI, AMBROSIO, et al. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts; produced by DMLS[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9–12): 2743–2751.

[30] THIJIS 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.

[31] 谭乐, 李亮, 王伟雪, 等. 选区激光熔化成形 AlSi10Mg 合金组织研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 120–124, 129.

TAN Le, LI Liang, WANG Weixue, et al. Research on microstructure of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melt[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 120–124, 129.

[32] 赵晓明, 齐元昊, 于全成, 等. AlSi10Mg 铝合金 3D 打印组织与性能研究[J]. 铸造技术, 2016(11): 111–113.

ZHAO Xiaoming, QI Yuanhao, YU Quancheng, et al. Study on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by 3D printing[J]. Foundry Technology, 2016(11): 111–113.

[33] 邹亚桐, 魏正英, 杜军, 等. AlSi10Mg 激光选区熔化成形工艺参数对致密度的影响与优化[J]. 应用激光, 2016, 36(6): 656–662.

ZOU Yatong, WEI Zhengying, DU Jun, et al. Effect and optimization of processing parameters on relative density of AlSi10Mg alloy parts by selective laser melting[J]. Applied Laser, 2016, 36(6): 656–662.

- [34] 陶攀, 许庆彦. 激光选区熔化 AlSi10Mg 合金悬臂梁残余变形的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 32-36.
- TAO Pan, XU Qingyan. Numerical simulation of residual distortion of AlSi10Mg alloy cantilever manufactured by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(5): 32-36.
- [35] LIU J, GU D D, CHEN H Y, et al. Influence of substrate surface morphology on wetting behavior of tracks during selective laser melting of aluminum-based alloys [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2018, 19(2): 111-121.
- [36] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO KW. Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al-12Si powders [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2011, 211(1): 113-121.
- [37] PRASHANTH K G, SCUDINO, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 590(2): 153-160.
- [38] WANG X J, ZHANG L C, FANG M H, et al. The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 597: 370-375.
- [39] 王梦瑶. Al-Si 合金的激光选区熔化成形特性及性能的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- WANG Mengyao. Study on the characteristics and properties Al-Si alloys of laser selective melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [40] 康梦瑶, 白培康, 刘斌, 等. SLM 激光快速成型 Al-Si 合金组织及力学性能分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(2): 122-124.
- KANG Mengyao, BAI Peikang, LIU Bin, et al. Analysis on microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy prepared by selective laser melting[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(2): 122-124.
- [41] 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.
- [42] 刘婷, 葛建彪. 激光增材制造高强 AlSi7Mg 铝合金构件工艺与组织调控研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(3): 77-85.
- LIU Ting, GE Jianbiao. Tailoring of process and microstructure of high-strength AlSi7Mg aluminum alloy parts prepared by laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 77-85.
- [43] 肖波. ZL114A 铝合金粉末的选区激光熔化成形工艺研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- XIAO Bo. Study on selective laser melting forming process of ZL114A aluminum alloy powder[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [44] 刘志权, 尹家新, 徐志锋, 等. ZL114A 铝合金激光选区熔化成形工艺 [J]. 铸造, 2018, 67(11): 961-967.
- LIU Zhiqian, YIN Jiabin, XU Zhifeng, et al. Selective laser melting forming process of ZL114A aluminum alloy[J]. Foundry, 2018, 67(11): 961-967.
- [45] 朱海红, 廖海龙. 高强铝合金的激光选区熔化成形研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 16-22.
- ZHU Haihong, LIAO Hailong. Research status of selective laser melting of high strength aluminum alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 16-22.
- [46] 王梦瑶, 朱海红, 祁婷, 等. 选区激光熔化成形 Al-Si 合金及其裂纹形成机制研究 [J]. 激光技术, 2016, 40(2): 219-222.
- WANG Mengyao, ZHU Haihong, QI Ting, et al. Selective laser melting Al-Si aluminum alloy and the crack formation mechanism[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 219-222.
- [47] 李保强, 李忠华, 刘斌, 等. 选区激光熔化成形 AlSi10Mg 孔隙的产生与降低 [J]. 应用激光, 2018, 38(5): 42-47.
- LI Baoqiang, LI Zhonghua, LIU Bin, et al. Generation and reduction of porosity in AlSi10Mg fabricated by selective laser melting[J]. Applied Laser, 2018, 38(5): 42-47.
- [48] BARTKOWIAK K, ULLRICH S, FRICK T, et al. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 393-401.
- [49] 梁小文. ZL205A 铝合金粉末的选区激光熔化成形工艺及其组织性能研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- LIANG Xiaowen. Study on ZL205A aluminum alloy powder selective laser melting process and microstructure[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [50] 张冬云. 采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型 [J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1700-1704.
- ZHANG Dongyun. Model manufacturing process from aluminum alloys using selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1700-1704.
- [51] AHUJA B, KARG M, NAGULIN K Y, et al. Fabrication and characterization of high strength Al-Cu alloys processed using laser beam melting in metal powder bed[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 135-146.
- [52] ZHANG H, ZHU H, QI T, et al. Selective laser melting of High Strength Al-Cu-Mg alloys: processing, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 656: 47-54.
- [53] KARG M, AHUJA B, KURYNTSEV S, et al. Processability of high strength aluminium-copper alloys AW-2022 and 2024 by laser beam melting in powder bed[C]//25th Annual International Solid Freeform Symposium. Austin, 2014.
- [54] SPIERINGS A B, DAWSON K, HEELING T, et al. Microstructural features of Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys processed by selective laser melting [J]. Materials & Design, 2017, 99: 52-63.
- [55] ZHANG H, ZHU H, NIE X, et al. Effect of zirconium addition on crack, microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Al-Cu-Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 134: 6-10.
- [56] SCHMIDTKE K, PALM F, HAWKINS A, et al. Process and mechanical properties: applicability of a scandium modified Al-alloy for laser additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 369-374.
- [57] OLAKANMI E O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: effect of processing conditions and powder properties[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2013, 213(8): 1387-1405.
- [58] SPIERINGS A B, DAWSON K, UGGOWITZER P J, et al. Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al3Sc particles and mechanical properties in Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys[J]. Materials & Design, 2017, 99: 134-143.
- [59] SPIERINGS A B, DAWSON K, DUMITRASCHKEWITZ P, et al. Microstructure characterization of SLM-processed Al-Mg-Sc-Zr alloy in the heat

- treated and HIPed condition[J]. Additive Manufacturing, 2018, 20: 173–181.
- [60] WANG P, LI H C, PRASHANTH K G, et al. Selective laser melting of Al–Zn–Mg–Cu: Heat treatment, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 287–290.
- [61] BRICE C, SHENOY R, KRAL M, et al. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 648: 9–14.
- [62] LEARY M, MAZUR M, ELAMBASSERIL J, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures[J]. Materials & Design, 2016, 98: 344–357.
- [63] 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): 24–32.
- ZHANG Wenqi, ZHU Haihong, HU Zhiheng, et al. Study on the selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 24–32.
- [64] 余开斌, 刘允中, 杨长毅. 热处理对选区激光熔化成形 AlSi10Mg 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(3): 298–305.
- YU Kaibin, LIU Yunzhong, YANG Changyi, et al. Effects of heat treatment on microstructures and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2018, 23(3): 298–305.
- [65] 王学才. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金组织与性能研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2017.
- WANG Xuecai. Study on microstructure and properties of selective laser melting AlSi10Mg alloy[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2017.
- [66] 闫云飞. 一种选区激光熔化 AlSi10Mg 合金构件的成形及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- YAN Yunfei. Study on forming and properties of AlSi10Mg alloy member by selective laser melting[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [67] 康梦瑶. 热处理对选区激光熔化成形 AlSi10Mg 合金组织及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- KANG Mengyao. Study on microstructure and properties of AlSi10Mg alloy formed by selective laser melting by heat treatment[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [68] SPIERINGS A B, DAWSON K, KERN K, et al. SLM-processed Scand Zr-modified Al–Mg alloy: mechanical properties and microstructural effects of heat treatment[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 701: 264–273.
- [69] 张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al–Cu–Mg 合金研究[J]. 中国激光, 2016(5): 78–84.
- ZHANG Hu, NIE Xiaojia, ZHU Haihong, et al. Study on high strength Al–Cu–Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 78–84.
- [70] 李东方. 基于激光选区熔化成型的支撑结构优化及工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- LI Dongfang. Research on support structure optimization and technology based on laser selective melting forming[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [71] MANFREDI D, CALIGNANO F, KRISHNAN M, et al. Additive manufacturing of Al alloys and aluminium matrix composites (AMCs)[M]//MONTEIRO W A. Light Metal Alloys Applications, 2014: 33–34.
- [72] WEI L, SHUAI L, JIE L, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 663: 116–125.
- [73] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549: 365–369.

通讯作者: 甘武奎, E-mail: ganwukui@163.com。

Aluminum Alloy Selective Laser Melting Precision Forming Technology and Application in Aviation Field

GAN Wukui¹, PENG Jingui¹, LI Shihao², XIA Wenqiang², WANG Zhitai², XU Zhifeng²

(1. Zhaoqing Guangyingke General Aviation Research Institute, Zhaoqing 526003, China;

2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

[ABSTRACT] This paper mainly introduces the selective laser melting (SLM) forming technology of cast aluminum alloy. The research status of SLM forming process and heat treatment process of SLM forming parts of ZL1××–ZL4×× series cast aluminum alloys at home and abroad, as well as their engineering application in the field of aviation industry were summarized and analyzed. In addition, the exiting problems and development trend of SLM forming technology for casting aluminum alloy were discussed further.

Keywords: Cast aluminum alloy; Selective laser melting; Forming technology; Heat treatment

(责编 大漠)