

时效处理对 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金组织和力学性能的影响

林育林^{1,2} 王 迪² 王 智^{1,2}

(1.华南理工大学广东省金属新材料制备与成形重点实验室; 2.华南理工大学机械与汽车工程学院)

摘 要 采用选区激光熔化技术(SLM)成形了 AlMgMnScZr 合金,研究了不同时效处理温度对其组织和力学性能的影响。结果表明,时效处理能够显著改善合金的力学性能,这主要是由于合金在时效处理过程中析出高密度且弥散分布的纳米析出相,可以阻碍位错运动进而提高材料强度。随着时效温度升高,析出相尺寸增大,其显微硬度和强度逐渐降低,塑性逐渐升高。合金经 325 ℃×4 h 后随炉冷却能够获得优异的综合力学性能,其显微硬度(HV_{0.3})约为 164,抗拉强度达 525 MPa,伸长率约为 19%。

关键词 选区激光熔化; AlMgMnScZr 合金; 时效处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG113

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of SLM Formed AlMgMnScZr Alloy

Lin Yulin^{1,2}, Wang Di², Wang Zhi^{1,2}

(1.Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, South China University of Technology; 2.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology)

Abstract: AlMgMnScZr alloy was fabricated by selective laser melting(SLM), and the effects of different aging temperatures on the microstructure and mechanical properties of the alloy were investigated. The results indicate that the aging process can significantly improve the mechanical properties of the SLMed AlMgMnScZr alloy due to the high density and homogenously dispersed nano-precipitates during the aging process, which can strongly hinder the dislocation movement and improve the strength of the alloy. With the increase of aging temperature, the size of precipitates in the alloy is increased, and microhardness and strength of the alloy are decreased gradually, while the plasticity is increased instead. After 325 ℃×4 h and furnace cooling, SLMed AlMgMnScZr alloy obtain excellent comprehensive mechanical properties, where the microhardness (HV_{0.3}), the tensile strength and the elongation are 164, 525 MPa and 19%, respectively.

Key Words: Selective Laser Melting, AlMgMnScZr Alloy, Aging Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

5XXX 系铝镁合金由于具有密度低、比强度高、可焊性优异和耐腐蚀等特点,被广泛应用到航空、船舶工业和国防领域^[1~3]。过渡金属如 Mn、Sc 和 Zr 等合金元素是 5XXX 系合金中的理想增强元素,能够改善合金的力学性能,特别是经过 Sc 和 Zr 复合微合金化后,在铝基体中形成的 Al₃(Sc, Zr)颗粒能够细化晶粒和阻碍位错运动,从而大幅提升 Al-Mg 合金的力学性能^[4,5]。传统的铸造、锻造、轧制等工艺加工 Al-Mg 合金已经十分成熟,但是随着高性能复杂结构零部件的需

求快速增长,增材制造工艺得到快速发展。

增材制造技术是一种近净成形的新型加工方法^[6]。选区激光熔化(SLM)是利用高强度激光束作为能量源,结合三维计算机辅助设计(CAD)数据来决定金属粉末的选择性熔合。SLM 成形过程中极快的冷却速度能够使成形合金微观组织细化从而获得优异的力学性能^[7]。由于铝合金易氧化和高激光反射率等特性,SLM 成形铝合金十分困难。目前研究者针对 SLM 成形 AlSi12 和 AlSi10Mg 合金做了大量研究^[8~10]。但随

收稿日期:2022-03-13;修改稿收到日期:2022-05-05
基金项目:国家重点研发计划政府间重点专项资助项目(2019YFE0110700);广东省自然科学基金资助项目(2020A1515011242);广东省国际科技合作领域粤港澳大湾区国际科技创新中心建设基金资助项目(2021A0505050002);高端外国专家引进计划资助项目(G2021163004L)
第一作者简介:林育林,男,1997 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:136644295@qq.com
通信作者:王智,男,1982 年出生,教授,广州(510640),E-mail:wangzhi@scut.edu.cn
引用格式:林育林,王迪,王智. 时效处理对 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 17-22.
LIN Y L, WANG D, WANG Z. Effects of aging treatment on microstructure and mechanical properties of SLM formed AlMgMnScZr alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):17-22.

着航空工业和国防领域对材料性能要求的进一步提高，亟需发展适合增材制造的高强韧铝合金。近期，SLM 成形 Sc 和 Zr 复合微合金化的 Al-Mg 合金拥有较高的致密度和优异的力学性能受到了广泛关注^[11~14]。值得注意的是，由于 SLM 成形过程中极高的冷却速率使得大量元素固溶于铝基体中，通过时效处理工艺能够使 SLM 成形合金中过饱和的铝基体析出大量弥散的析出相颗粒，进一步提升合金的力学性能，因此研究时效处理对 SLM 成形 Al-Mg 合金的组织 and 力学性能影响十分重要。

本课题利用 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金，研究不同时效处理温度对合金组织和力学性能的影响，旨在为获得高强韧增材制造 AlMgMnScZr 合金的时效处理提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为雾化 AlMgMnScZr 合金粉末，粒径为 15~53 μm，利用 Quanta200 型场发射扫描电镜对合金粉末与 SLM 成形合金进行微观组织观察，颗粒形貌见图 1。可以看出，AlMgMnScZr 合金粉末具有较高的球形度，尺寸较大的粉末颗粒周围存在尺寸较小的卫星粉。

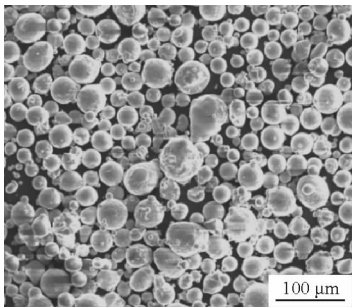


图 1 AlMgMnScZr 合金粉末颗粒形貌

Fig.1 Morphologies of AlMgMnScZr powders

采用自主研发的 Dimetal-100H SLM 设备成形合金试样，其激光功率为 150 W，扫描速度为 400 mm/s，扫描间距为 0.08 mm，层厚为 0.03 mm，层间旋转角度为 67°。时效工艺为：AlMgMnScZr 合金试样置于热处理炉中，分别在 325、365、405 °C 保温 4 h 后随炉冷却，分别命名为 SLM（未处理）、SLM-325、SLM-365 和 SLM-405。利用 ONH836 型电感耦合等离子光谱发生仪对 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金进行元素分析，化学成分见表 1。根据合金元素含量计算理论密度，利用排水法测量并计算合金致密度为 98.75%。

利用 Leica DMI500M 型光学显微镜（OM）和 Quanta200 型场发射扫描电镜（SEM）对合金试样进行观察。金相试样采用 Keller 试剂腐蚀 25 s，扫描电镜试

表 1 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of SLMed AlMgMnScZr alloy %						
w _B						
Mg	Mn	Sc	Zr	Si	Fe	Al
6.028	0.485	0.618	0.329	0.579	0.065	91.896

样利用电解抛光（电解液配比为 90 mL 乙醇+10 mL 高氯酸，电压为 23 V，抛光时间为 10 s）进行预处理。利用 X' pert Powder 型 X 射线衍射仪对粉末和各合金试样进行物相分析，靶材选用 Cu 靶，波长为 0.154 06 nm。利用 DHV-1000Z 维氏硬度计测量合金的显微硬度，载荷为 2.94 N，加载时间为 15 s，每个试样测试 6 个点取平均值。利用 CMT5105 型电子拉伸试验机对打印态和后续时效处理态合金进行拉伸测试，拉伸速率为 0.23 mm/min，拉伸测试方向与试样构建方向平行，拉伸试样见图 2。

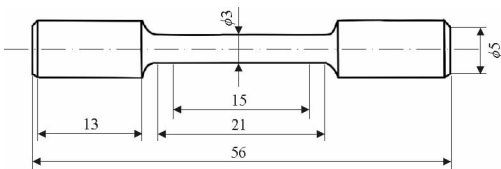


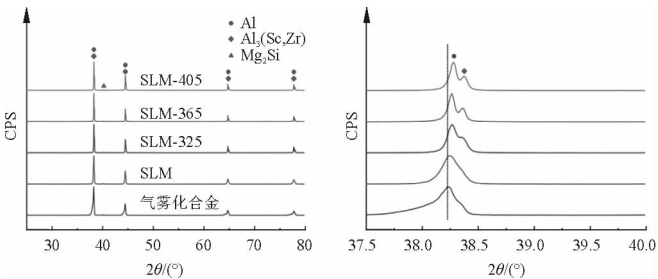
图 2 拉伸试样

Fig.2 Tensile specimens

2 试验结果与分析

2.1 时效处理对 AlMgMnScZr 合金组织的影响

图 3 为雾化合金粉末、SLM 成形 AlMgMnScZr 合金不同时效处理后的 XRD 图谱。可以看出，SLM 合金的 Al 相特征峰较雾化合金粉末向高角度发生了移动，这是由于 SLM 成形合金过程中存在粉末快速熔化和液相快速凝固过程，合金中存在较大的内应力和大量溶质原子固溶到铝基体之中，导致晶格畸变^[12,15]。此外，雾化合金粉末和经过不同时效处理后合金的 XRD 图谱中发现了较为明显的 Al 相和 Al₃(Sc,Zr) 相的衍射峰，而在 SLM 成形合金的 XRD 图谱中，



(a) 粉末与各合金物相分析 (b) 局部区域放大图

图 3 雾化合金粉末、SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和不同时效处理后合金的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of the powder, SLMed AlMgMnScZr alloy and the alloys after different aging treatments

$\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相的特征峰并不明显。时效温度升高,加速了溶质原子在铝基体中的析出,降低了铝基体的过饱和度,使 Al 相的特征峰位置逐渐向高角度方向移动,而 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相的不断析出导致 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相的特征峰愈发明显。

图 4 为平行于构建方向的 SLM 成形合金和不同时效处理后合金的金相(OM)组织。从图 4a 和图 4e 中可以看到,SLM 成形合金组织呈典型的鱼鳞状熔池形貌,熔池形貌由熔池边缘的超细等轴晶区(图中熔池边缘的黑色线条处)和熔池内部的柱状晶区(图中熔池内部的亮白色区域)组成。在 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金过程中, $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒更多的在熔池边缘处析

出^[16]。在熔池凝固初期,初生的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒能够作为外来质点促进非均匀形核过程并阻碍晶粒生长,导致大量细小的等轴晶分布在熔池边缘。随着凝固进行,结晶潜热的释放使得已结晶的固相区域温度升高,导致熔池中未结晶液相区域过冷度降低,这使得晶核的形成速率远低于晶核的生长速率,因此从靠近液相区域的熔池边缘已结晶晶粒逆着热流梯度外延生长形成柱状晶区。从图 4e~图 4h 可以看出,随着时效温度升高,熔池边缘与熔池内部的差异不断减小。这是由于时效温度升高,促进了大量析出相从过饱和铝基体中析出,导致合金均匀化过程加快,从而减少了熔池边缘和内部的差异^[17]。

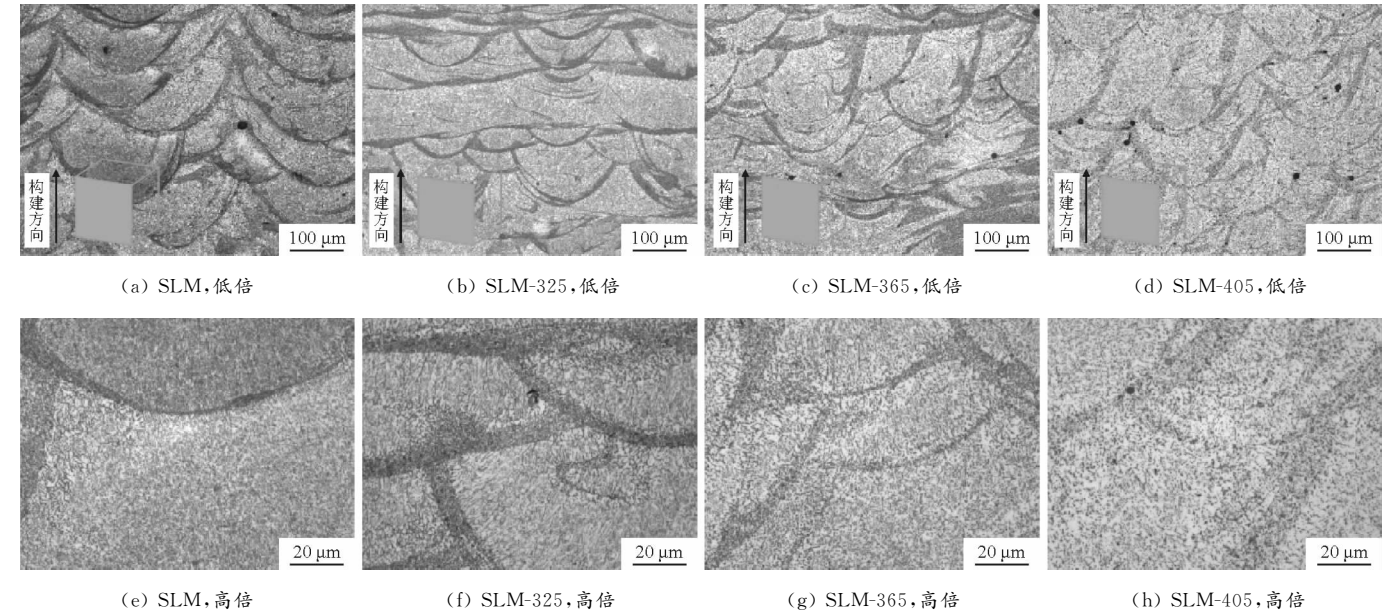


图 4 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和不同时效处理后的 OM 组织

Fig.4 OM images of SLMed AlMgMnScZr alloy and alloys after different aging treatments

图 5 为平行于构建方向的 SLM 成形合金和不同时效处理后的背散射电子图。从图 5a 和图 5e 可以观察到,熔池边缘的细等轴晶区和熔池内部的柱状晶区,细等轴晶区晶粒尺寸普遍低于 $1 \mu\text{m}$,柱状晶区晶粒的短轴长度约为 $2 \mu\text{m}$,长轴长度为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,熔池边缘的细等轴晶区下方存在部分粗化的树枝晶。这是因为 SLM 成形过程是激光熔化粉末形成的熔池不断沿着构建方向逐层搭接的过程,因此部分区域会发生重熔。由于激光能量的损耗,在不足以熔化熔池底部下方的已结晶固相时,固相晶粒会在受到上方熔池凝固传递的热量的影响下发生晶粒生长。在熔池边缘的细等轴晶区晶界处分布着少量细小弥散的亮白色析出相,这些析出相可能为初生的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒,其与铝基体之间存在非共格关系^[18]。随着时效温度升高,等轴晶区和柱状晶区晶粒尺寸基本保持不变^[19]。这是由于 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒能够强烈钉扎位错和晶界,阻碍再结晶行为的发

生,进而提高合金再结晶温度。从图 5b~图 5d 可以看出,经过时效处理后,大量弥散的亮白色析出相从基体中析出,随着时效温度的升高,析出相的尺寸显著粗化。

图 6 为 SLM-365 合金的 BESI 及元素分布。可以看出, Mn、Mg 和 Si 溶质原子在晶界处发生明显偏析,其中 Mg 和 Si 的聚集区域趋于一致,根据图 3 的 XRD 结果,结合 ZHAO J H 等^[18]和 LI R D 等^[20]的研究,可以确认在晶界处偏析区域形成了 Al_6Mn 和 Mg_2Si 相,而 Sc 和 Zr 偏析区域对应着等轴晶和柱状晶内部中大量弥散细小的析出相颗粒,这些颗粒为时效过程中析出的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒。与在细等轴晶区晶界处的初生 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒不同,合金经过时效处理后会于晶内析出尺寸更为细小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒,其与铝基体的晶格错配度低,因此与基体呈高度的共格关系。随着时效温度升高,当 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒尺寸继续增大时,会由共格关系逐渐演变成半共格关系和非共格关系^[18]。

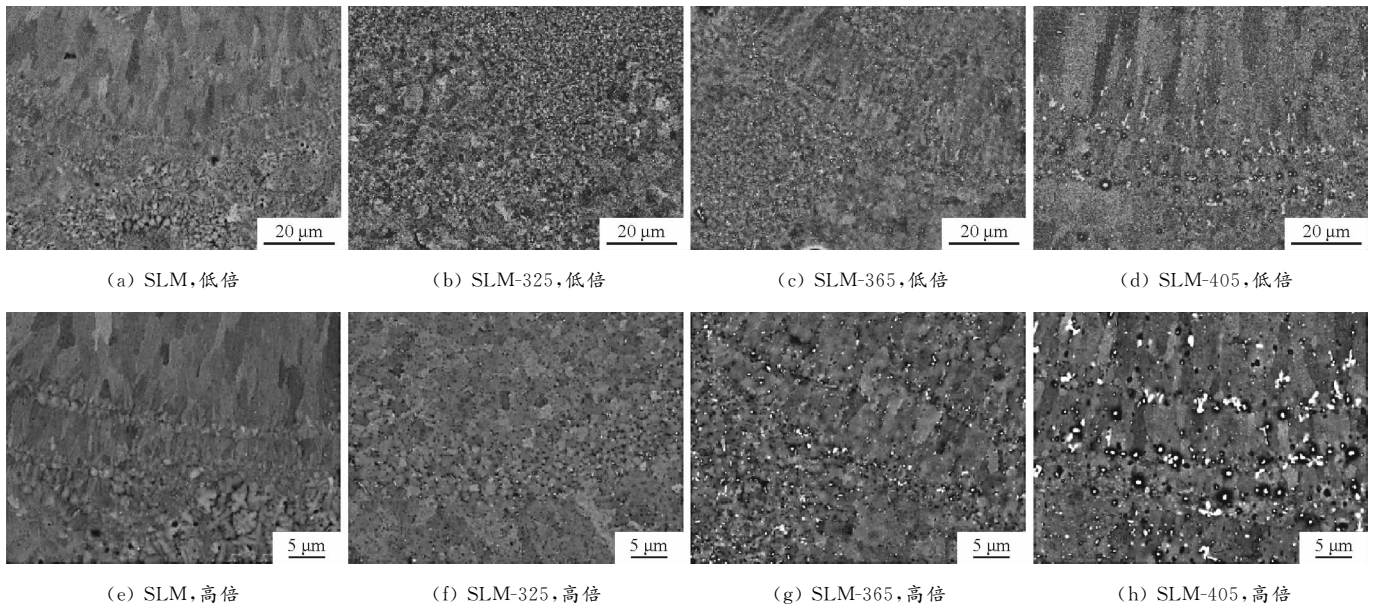


图 5 平行于构建方向的 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和不同时效处理后的背散射图(BSEI)

Fig.5 BSEI of SLMed AlMgMnScZr alloy and alloys after different aging treatments parallel to the building direction

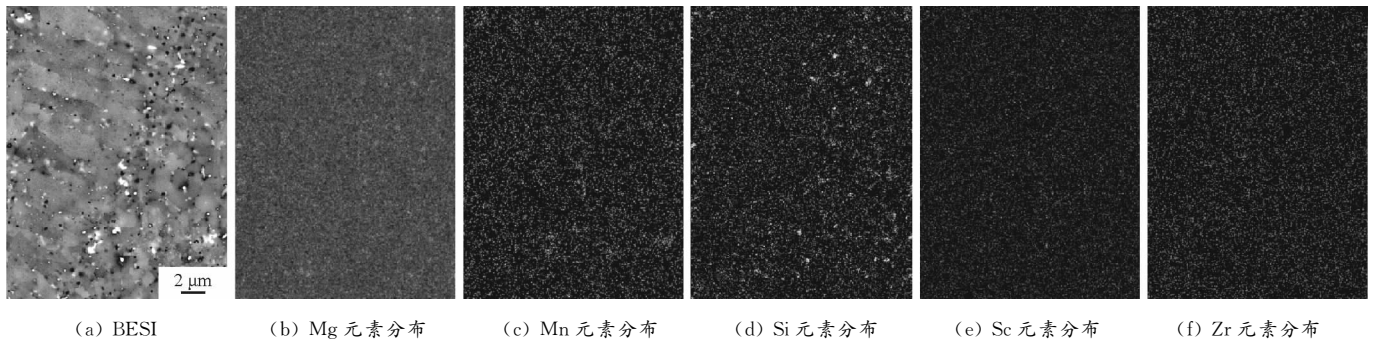


图 6 SLM-365 合金的 BSEI 和元素面扫描

Fig.6 BSEI images and element distribution of SLM-365 alloy

2.2 时效处理对 AlMgMnScZr 合金力学性能的影响

图 7 为不同时效处理对 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金显微硬度的影响。可以看出,不同的时效处理均能大幅提升 SLM 成形合金的硬度,这是由于在时效过程中大量弥散的析出相颗粒从 SLM 成形合金的过饱和铝基体中析出,特别是时效过程中从铝基体中析出高度共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 纳米颗粒能够造成显著的沉淀强化

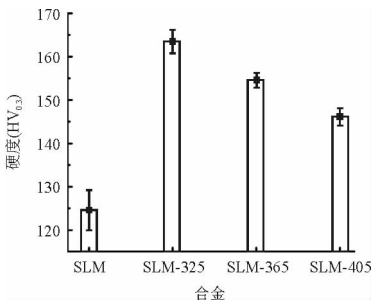


图 7 SLM 成形合金和经过不同时效处理工艺后合金的硬度

Fig.7 Hardness of SLMed alloy and alloys after different aging treatments

从而提高合金硬度。从图 7 可以看出,SLM-325 合金的硬度最高。随着时效温度逐渐升高,合金硬度逐渐降低,这是由于随着时效温度升高会使合金中析出相颗粒粗化,削弱了沉淀强化效果进而降低合金硬度。

图 8 为 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金经过不同时效处理工艺后的应力-应变曲线。表 2 为 SLM 成形合金和经过不同时效处理后合金的力学性能。可以看出,

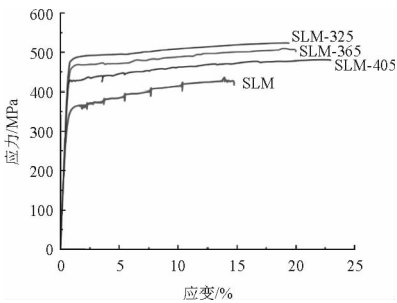


图 8 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和经过不同时效处理后合金的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of SLMed AlMgMnScZr alloy and the alloys after different aging treatments

表 2 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和经过不同时效处理后合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of SLMed alloy and the alloys after different aging treatments

试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
SLM	343	435	14.74
SLM-325	478	525	19.38
SLM-365	456	509	19.99
SLM-405	429	481	22.96

各合金在塑性变形阶段中都出现了锯齿屈服的现象。这是 Al-Mg 合金在塑性变形过程中常出现的 PLC 效应,是由可动位错与溶质原子或析出相发生动态交互作用导致的^[5,21]。由于 SLM 成形过程中极高的冷却速度使铝基体中存在数量较多的溶质原子和高密度的位错,导致在后续试样拉伸过程中出现锯齿屈服现象。各合金的屈服强度和抗拉强度随着时效温度的变化趋势与硬度随时效温度的变化趋势一致。SLM 成形合金表现出优异的力学性能,这主要得益于 SLM 成形过程中极高的冷却速度细化了合金晶粒尺寸,根据 Hall-Petch 关系,随着晶粒尺寸细化,材料强度上升。合金经过时效处理后,其强度和塑性均较 SLM 成形合金有较大提

高,其中 SLM-325 合金的强度最高,其屈服强度为 478 MPa,抗拉强度为 525 MPa,随着时效温度的升高,合金强度逐渐降低,但塑性逐渐升高。根据 Considère 判据,合金加工硬化能力的提高有助于延迟材料颈缩的发生进而提高合金的塑性,合金的加工硬化能力与合金内部的位错积累能力呈正相关^[16,22]。随着时效温度升高,加速了合金的回复过程,消除了部分晶内缺陷并释放了部分合金内部的残余应力,提高了合金内部可移动位错数量上限进而提高了材料的加工硬化能力。

图 9 为 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和经过不同时效处理后的拉伸断口 SEM 形貌。从图 9a 和图 9e 可见,断口中存在大量细小的韧窝和部分河流状形貌,这说明 SLM 成形合金的断裂模式为混合断裂。从图 9b 和图 9f 可见,SLM-325 合金断口与 SLM 成形合金类似,仍存在大量细小的韧窝和部分河流状形貌,但在韧窝底部发现了细小弥散的析出相颗粒。随着时效温度升高,合金断口中河流状形貌逐渐消失,韧窝和底部析出相颗粒的尺寸逐渐增大,韧窝的尺寸与材料的塑性往往呈正相关,拉伸断口形貌的变化与合金的塑性变化有较好的对应关系。

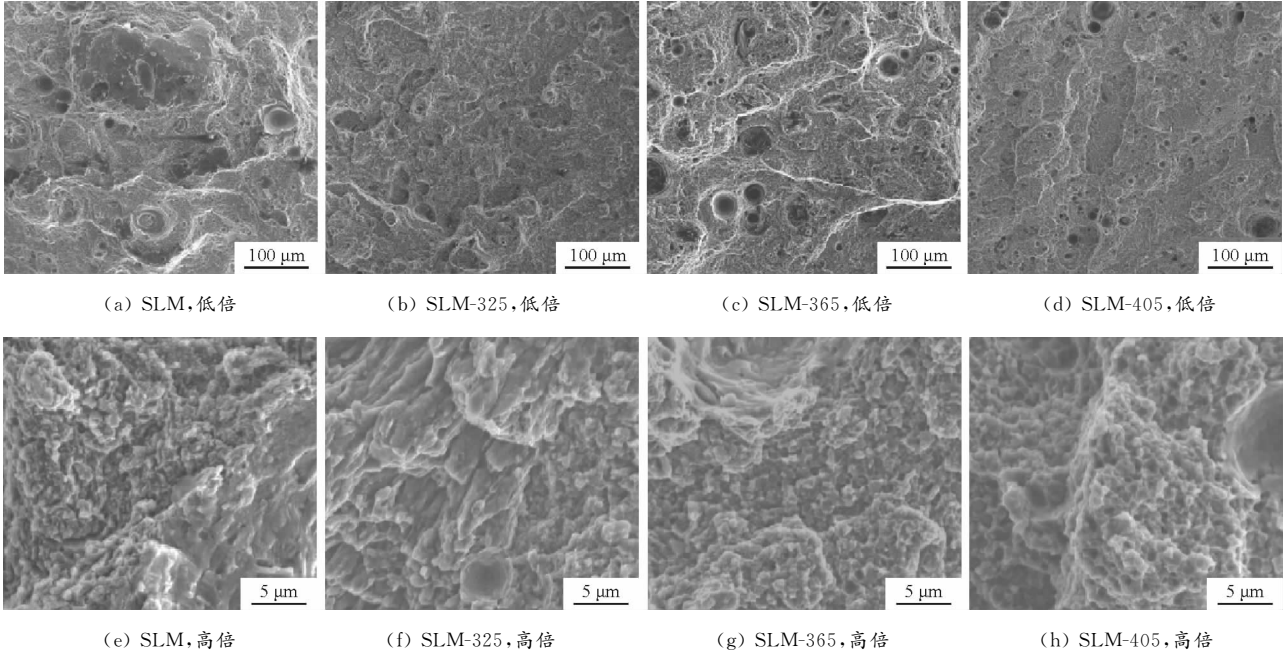


图 9 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金和经过不同时效处理后的拉伸断口 SEM 形貌

Fig.9 SEM images of tensile fracture of SLMed AlMgMnScZr alloy and alloys after different aging treatments

3 结 论

- (1) SLM 成形 AlMgMnScZr 合金的晶粒尺寸细小,其熔池结构由熔池边缘的细等轴晶区和熔池内部的柱状晶区组成。
- (2) 时效处理使大量弥散相从 SLM 成形 AlMgMnScZr 合金过饱和铝基体中析出,主要为

- $Al_3(Sc,Zr)$ 、 Mg_2Si 和 Al_6Mn ,随着时效温度逐渐升高,析出相颗粒尺寸逐渐增大。
- (3) 时效处理能够同时提升 SLM 成形 AlMgMn-ScZr 合金的强度和塑性。随着时效温度的升高,强度逐渐降低,塑性逐渐升高。合金经 $325\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$ 后随炉冷却后具有最佳的综合力学性能,其抗拉强度达 525 MPa,伸长率约为 19%。

参 考 文 献

- [1] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [2] SINGH R K R, PRASAD R, PANDEY S, et al. Effect of cooling environment and welding speed on fatigue properties of friction stir welded Al-Mg-Cr alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 127: 551-563.
- [3] LIU X D, YE L Y, TANG J G, et al. Superplastic deformation mechanisms of an Al-Mg-Li alloy with banded microstructures[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A805: 140 545.
- [4] 郭琦,徐国富,黄继武,等. 新型 Al-Mg-Sc-Zr 合金显微组织和性能研究[J]. 稀有金属, 2019, 43(3): 255-264.
- [5] 封蕾,李建国,毛铁哲. 高镁低钪 Al-Mg-Sc-Zr 合金强化机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2 857-2 863.
- [6] 杨强,鲁中良,黄福享,等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016(12): 26-31.
- [7] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.
- [8] PONNUSAMY P, MASOOD S H, RUAN D, et al. High strain rate dynamic behaviour of AlSi12 alloy processed by selective laser melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 1 023-1 035.
- [9] 韩潇,康楠,焦建超,等. 选区激光熔化 AlSi10Mg 合金镜的表面性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(11): 3 088-3 092.
- [10] 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.
- [11] 耿遥祥,唐浩,罗金杰,等. 高 Mg 含量 Al-Mg-Sc-Zr 合金选区激光熔化成形性及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 939-947.
- [12] 林泽恒,李瑞迪,祝弘滨,等. 送粉式激光增材制造 Al-Mg-Sc-Zr 合金的微观组织与力学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(11): 3 055-3 063.
- [13] 陈金汉,耿遥祥,侯裕,等. 选区激光熔化 Al-Mg-Sc-Zr 合金成形性及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(11): 3 882-3 889.
- [14] 文世峰,刘洋,陈柯宇,等. 激光选区熔化 AlMgScZr/AlSi10Mg 工艺及性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 16-21.
- [15] LI P, LI R D, YANG H O, et al. Selective laser melting of Al-3.48Cu-2.03Si-0.48Sc-0.28Zr alloy: Microstructure evolution, properties and metallurgical defects[J]. Intermetallics, 2021, 129: 107 008.
- [16] WANG Z H, LIN X, KANG N, et al. Strength-ductility synergy of selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr alloy with a heterogeneous grain structure[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101 260.
- [17] SHEN X F, CHENG Z Y, WANG C G, et al. Effect of heat

treatments on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy fabricated by selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107 312.

- [18] ZHAO J H, LUO L S, XUE X, et al. The evolution and characterizations of $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$ phase in Al-Mg-based alloys processed by SLM[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A824: 141 863.
- [19] MA R L, PENG C Q, CAI Z Y, et al. Manipulating the microstructure and tensile properties of selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr alloy through heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 831: 154 773.
- [20] LI R D, WANG M B, LI Z M, et al. Developing a high-strength Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy for selective laser melting: Crack-inhibiting and multiple strengthening mechanisms [J]. Acta Materialia, 2020, 193: 83-98.
- [21] DUAN Y X, CHEN H, CHEN Z, et al. The influence of nanosized precipitates on Portevin-Le Chatelier bands and surface roughness in AlMgScZr alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 87: 74-82.
- [22] KONDA G P. Work hardening in selective laser melted Al-12Si alloy[J]. Material Design & Processing Communications, 2019, 1 (2): e46.

(编辑:栗万仲)

西安交大研发的“400 ℃ 级别耐热高强铝合金材料”取得突破

近日,西安交通大学金属材料强度国家重点实验室薛航与杨冲、张鹏、张金钰和刘福柱合作,在 400 ℃ 级别耐热高强铝合金材料的研发上取得突破。他们提出了纳米沉淀相颗粒晶格间隙位置异质原子有序化的全新热稳定化设计策略,在常见的 Al-Cu-Mg-Ag 合金中添加微量稀土 Sc 原子,采用双级时效工艺克服了慢扩散原子 Sc 与快扩散原子 Cu 之间有效耦合在时间上的“失配”。

国外学者专题评论认为该工作“创制新型纳米沉淀相的合金设计新策略,使得所制备的铝合金在近乎其绝对温度熔点的 80%,即高达 400 ℃ 下仍然具有史无前例的高强度和抗高温蠕变性能,将对航空航天、交通运输等关键部件用、近熔点温度下服役的合金设计制备与应用及其未来发展产生深远影响”。

(摘自西安交通大学)