● 材料改性 Material Propertiest ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.013

退火温度对选区激光熔化 ZL205A 合金组织和性能的影响

欧阳奇,汪志太,徐志锋,李仕豪,李泽铧

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,江西 南昌 330063)

摘　要:采用选区激光熔化(SLM)成形 ZL205A 合金并对其进行退火处理,研究了退火温度对组织和力学性能的影响。结果表明,沉积态试样的组织由 θ(Al_2Cu)相和 α-Al 基体组成;随着退火温度升高,Cu 元素以颗粒状分布在铝基体中,使晶粒尺寸变大,组织中无新相生成。退火处理后,试样的伸长率大幅度提高,抗拉强度、屈服强度和显微硬度均呈下降趋势,拉伸断口为韧性断裂特征。在 250~300 ℃退火 2 h,伸长率较沉积态分别提升 14.3%和 28.6%,且强度优于沉积态。

关键词:选区激光熔化;ZL205A 合金;退火温度;组织;性能

中图分类号:TG156; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)03-0211-06

Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Alloy by Selective Laser Melting

OUYANG Qi, WANG Zhitai, XU Zhifeng, LI Shihao, LI Zehua

(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: ZL205A alloy was formed by selective laser melting (SLM) and annealed. The effects of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy were studied. The results show that the microstructure of the specimen is composed of θ (Al_2Cu) phase and α-Al matrix. With the increase of annealing temperature, Cu particles are distributed in the Al matrix, which makes the grain size increase, and no new phases are formed in the microstructure. After annealing, the elongation of the sample increases greatly, the tensile strength, yield strength and microhardness all decrease, and the tensile fracture is ductile fracture. When annealed at 250~300 ℃ for 2 h, the elongation increases by 14.3% and 28.6%, respectively, and the strength is better than that of the deposited state.

Key words: selective laser melting; ZL205A; annealing temperature; microstructure; mechanical properties

选区激光熔化(Selective Laser Melting,SLM)作为一种典型增材制造工艺，可直接制造出形状复杂、力学性能良好及致密度近 100%的实体三维零件[1]。ZL205A 铝合金是一种高强度铸造 Al-Cu 系列合金,具有较好的综合力学性能、抗应力腐蚀性、机加性能以及能使产品轻量化、降低经济成本、减少生产周期而被广泛应用于飞机、导弹、船舶等国防军工产品[2-3]。但由于 Al-Cu 系合金流动性差、反射率高以及结晶范围宽等特性[4],导致其在选区激光熔化成形过程中成形较为困难，并限制了其在选区激光熔化领域中的发展，尤其是在沉积态的热处理方面报道较少。

国内外学者针对铸造和选区激光熔化成形铝铜合金试样性能进行了研究[5-9],Bartkowiak 等人[10]采用单道熔池成形实验，使用自主研发的 Al-Cu 系、Al-Zn 系高强度合金，通过分析熔池形貌以及润湿角等特征证明了 SLM 成形高强度铝合金的可能性。胡志恒[11]对 SLM 成形 AlCu5MnCdVA 合金试样进行固溶时效处理，结果表明随着时效温度和时间的上升,析出相的形态及种类发生了变化,弥散分布的 θ''相导致试样的屈服强度明显提高。Zhang 等人[12]研究了 SLM 成形 Al-Cu-Mg 合金的显微组织,结果表明成形件内聚集着细小的胞状枝晶亚结构，其枝晶分布间距为 1~2 μm，枝晶内并没有明显的元素偏

收稿日期:2021-01-08

基金项目:博士启动基金(EA201931205);轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题研究基金(EG201903173)

作者简介:欧阳奇(1996—),江西吉安人,硕士研究生.研究方向:金属材料组织与性能控制.电话:15797759227,Email:1536762306@qq.com

通讯作者:汪志太(1983—),江西南昌人,讲师.研究方向:金属增材制造.电话:0791-81453167,Email:wangzt@nchu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

析。Wang 等人[13]研究了 SLM 成形 Al-*x*Cu 合金的显微组织以及力学性能，结果表明随着 Cu 含量的上升，各区域显微组织呈现明显差异；合金强度随 Cu 含量增加而提高，其韧性则随之下降。

国内外对传统工艺制备 Al-Cu 合金的热处理工艺研究比较完善，但对于 Al-Cu 合金的选区激光熔化成形和热处理工作研究较少。本文作者探究了不同退火温度对选区激光熔化成形 ZL205A 合金沉积态试样微观组织和力学性能的影响，以期为选区激光熔化成形 ZL205A 合金试样的应用提供理论数据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料与设备

试验所用 ZL205A 铝合金粉末由气雾化制备，粉末规格在 20~55 μm 内，化学成分如表 1，粉末形貌如图 1，粉末呈现出近似球状，部分小颗粒附着在大颗粒上。

表1 ZL205A粉末化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical composition of ZL205A alloy powder

Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	Al
4.60~5.30	0.30~0.50	0.15~0.35	0.15~0.25	0.05~0.30	0.05~0.20	余量

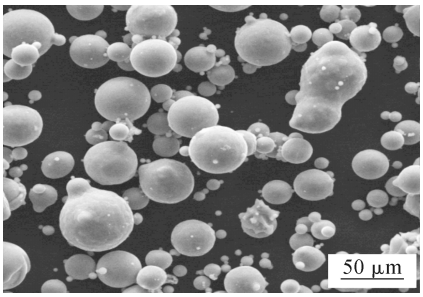


图 1 ZL205A 合金粉末的显微形貌图
Fig.1 Micrograph of ZL205A alloy powder

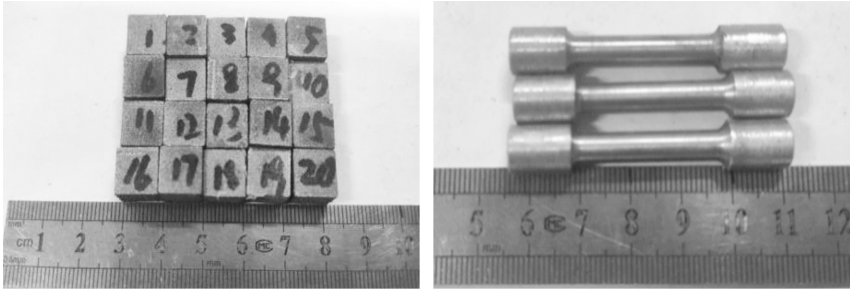
试验所用设备为 SLM300 型选区激光熔化金属增材制造系统，设备具体参数为：YLR-500-WC 光纤激光器，最大激光功率为 500 W，激光波长 1 070 nm，光斑直径为 ϕ0.05~ϕ0.15 mm，最大扫描速度为 7 000 mm/s，成型缸最大尺寸为 300 mm×250 mm×250 mm。

1.2 实验方法

实验前首先将粉末通过 280 目筛网过滤大颗粒粉末，然后将粉末放入真空干燥箱中，加热至 120 ℃干燥 3~4 h，减少粉末吸潮对成形过程的影响，同时使粉末具有良好的流动性。用砂纸打磨铝合金基板表面并用无水乙醇清洗，以减少外来杂质对成形过程的影响。在成型腔内充入 99.99%氩气作为保护气体，控制成形过程中氧含量在 100×10^{-4}%以下，然后将基板预热至 200 ℃，SLM 工艺参数为：激光功率 450 W，扫描速度 1 300 mm/s，扫描间距 0.08 mm，铺粉厚度 0.05 mm，相位角 90°。本试验成形 10 mm×10 mm×10 mm 的方块试样和长 55 mm、直径 10 mm 的圆棒。成形结束后，使用线切割机将成形试样与基板分离。对试样分别进行 250、300、350 ℃保温 2 h 退火处理，升温速率为 10 ℃/min，冷却方式为随炉冷却。

1.3 试样表征与分析

将方块试样研磨、抛光和腐蚀，腐蚀剂选用Keller试剂（2.5 mL HNO3+1.5 mL HCL+1 mLHF+95 mL去离子水），对金相试样腐蚀 15 s 后通过 FEI Nova Nano SEM450 型扫描电镜和型号为 INCA250 X-Max50 型能谱仪(EDS)对试样的表面形貌，微观组织，以及元素分布进行分析。采用丹麦 DureScan 型维氏显微硬度机对 SLM 成形沉积态和热处理试样进行测试，测试加载载荷为 50 g，加载时间为 20 s，每个试样在不同区域测试 8 个点取平均值。将圆棒试样按照 GB/T228.1-2010，经机加工得到直径 5 mm，长度 55 mm 的拉伸试样，如图 2(b)。试验拉伸设备采用 Instron5569 电子拉伸试验机，拉伸方向平行于堆积成形方向，载荷力为 50 kN，拉伸速率为 1 mm/min。采用 Quanta 200 型环境扫描电子显微镜下观察拉断后拉伸试样的断口形貌并进行分析。



(a)试样块　　(b)拉伸棒

图 2 SLM 成形试样
Fig.2 Specimens formed by SLM

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　实验结果与分析

2.1　SLM 沉积态微观组织分析

图 3 为使用优化的工艺参数 SLM 成形的 ZL205A 显微组织图。使用优化过后的工艺参数成形,仍有部分未熔化粉末和孔洞等缺陷存在。当扫描速度过高时,激光与粉末的相互作用过短,导致部分粉末颗粒未被完全熔化,成形腔内的保护气体和低熔点合金元素的蒸发导致了孔洞的生成。从图中可以看出,该显微组织区域分为细晶区和粗晶区,主要由灰色的 α-Al 基体和白色析出相 θ(Al_2Cu)共同组成,在成形过程中,Cu 原子在 α-Al 基体中分布不均匀,导致不同区域的 θ(Al_2Cu)析出相形态各异。由于 SLM 成形技术的快速熔化快速冷却特点,导致熔池内部的析出相为细小的颗粒状,快速冷却抑制了晶粒的长大,这些细小的析出相极大的增加了成形试样的综合性能,但由于高能量密度的激光与合金粉末熔道搭接处的二次扫描致使重复熔化,导致熔池内部温度升高,此时晶粒进一步生长,最后呈现粗大的枝晶状。

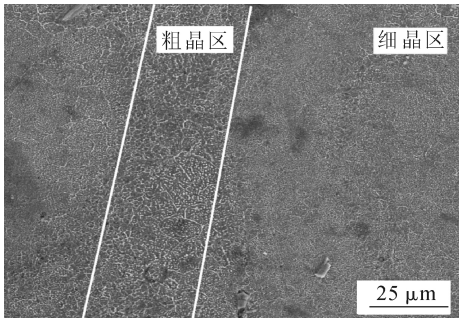
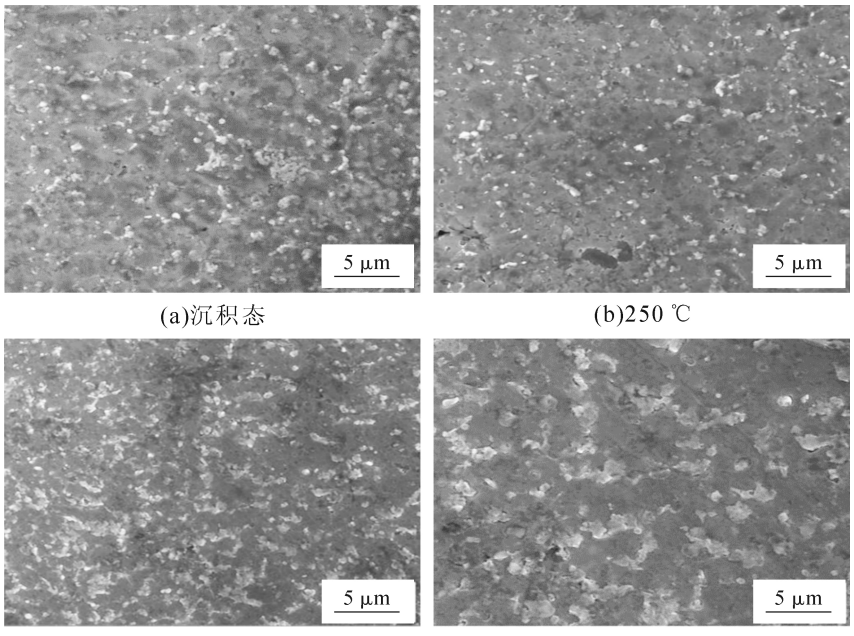


图 3 SLM 成形的 ZL205A 的显微组织
Fig.3 Microstructure of ZL205A formed by SLM

2.2　退火温度对 SLM 成形 ZL205A 合金显微组织的影响

图 4 为不同退火温度处理下 SLM 成形ZL205A 合金试样的显微组织图。经过 250 ℃退火处理的试样,在沉积态试样的显微白色析出相 θ(Al_2Cu)枝晶间已经有 Cu 元素析出,但由于析出量微少,在宏观观察上其显微组织与沉积态表面形貌并无差异,仍然以细小晶粒状存在,但表面存在少量气孔缺陷。300 ℃退火处理后,原子的扩散速率逐渐变大,Cu 元素在 α-Al 基体中的溶解度逐渐上升,沿着晶界扩散并聚集长大,形成尺寸约 0.5 μm 的颗粒状 Cu 析出相。这是由于退火处理使其从过饱和 α-Al 基体中析出,析出的 Cu 颗粒扩散并分布在 α-Al 基体之中。退火温度提高到 350 ℃时,使富集 Cu 元素的 θ(Al_2Cu)枝晶逐渐变得粗大,尺寸约为 1.0 μm。

对退火处理前后的 SLM 成形试样进行 XRD 测试,测试结果如图 5。从图中可以看出,经过退火处理之后,试样物相依旧和沉积态一样都是由 α-Al 和 θ(Al_2Cu)组成,300 ℃退火态试样较 250 ℃退火态试样的衍射峰出现较小的偏移,而 350 ℃退火态试样较 250 ℃退火态的衍射峰偏移较大,这是因为 SLM 成形技术快熔快凝的特点,致使成形过程中晶格产生了畸变,原本 Al 原子位置被析出的 Cu 原子



(a)沉积态　(b)250 ℃
(c)300 ℃　(d)350 ℃

图 4 不同退火温度下 SLM 成形 ZL205A 合金试样显微组织
Fig.4 Microstructure of ZL205A alloy formed by SLM at different annealing temperatures

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

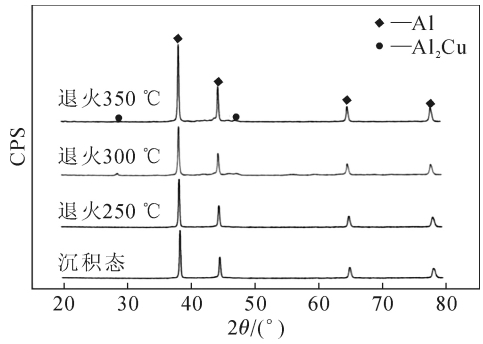


图 5 不同退火温度下试样 XRD 衍射图
Fig.5 XRD patterns of specimens annealed at different temperatures

所占据,形核时 Cu 元素开始富集长大。随着退火温度的升高,Cu 在 Al 基体中的过饱和固溶体转变为置换固溶体,导致相对应的衍射峰向高角度偏移。

图 6 为 SLM 成形 ZL205A 合金在 300 ℃退火处理 2 h 后的 EDS 图。从图中可以看出,区域 1 和区域 2 的元素种类和含量分析与沉积态基本一致,经过退火处理之后,粗大的晶粒中有较少的 Mn 元素和 Ti 元素析出,但含量不足以生成新相,所以经退火处理过后没有产生新的化合物,与 XRD 结果一致。

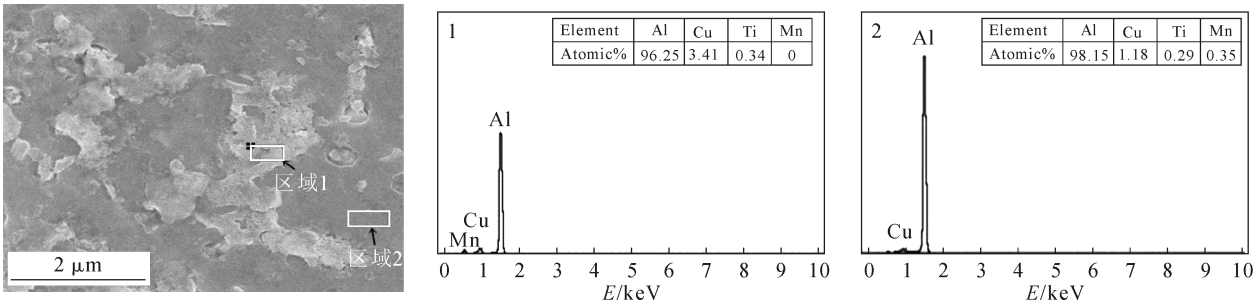


图 6 300 ℃退火态面扫描 EDS 分析
Fig.6 Surface scan EDS analysis of annealed at 300 ℃

2.3 退火温度对 SLM 成形 ZL205A 合金试样力学性能的影响

图 7 为 ZL205A 合金沉积态和退火态的平均维氏硬度。由图可知,退火态试样的维氏硬度均低于沉积态,硬度随着退火温度的升高而降低,从沉积态的硬度 104.5 HV 分别降低至不同退火温度的 102.2、96.7、93.8 HV,下降了 10.2%。退火态试样的维氏硬度均比沉积态小,这主要是因为 SLM 成形过程中冷却速度快,抑制组织晶粒的长大,Cu 元素和 α-Al 基体形成的 θ(Al_2Cu)相增加位错,因此沉积态硬度较高。经退火处理后,Cu 元素在 α-Al 基体中的溶解度增加,使 Cu 原子的析出形成 Cu 颗粒,应力释放,晶粒又进一步长大,固溶强化效果减弱,最终导致退火态的维氏硬度逐渐降低。

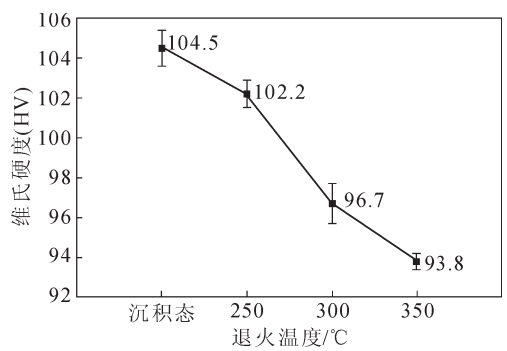


图 7 不同退火温度的 SLM 成形 ZL205A 合金试样的硬度变化
Fig.7 Vickers hardness change of ZL205A alloy formed by SLM at different annealing temperatures

图 8 是 SLM 成形 ZL205A 合金沉积态、和退火态试样的力学性能变化。由图可知,与沉积态的室温拉伸性能相比(抗拉强度 258.92 MPa,屈服强度 208 MPa,伸长率 4.2%),随着退火温度的升高,退火态试样的拉伸强度和屈服强度均呈现下降趋势,拉伸强度由 250 ℃退火态的 252.32 MPa 下降到 350 ℃退火态的 220.48 MPa,屈服强度则由 250 ℃退火态的 230.73 MPa 下降至 350 ℃退火态的 192.83 MPa。退火态试样的伸长率则呈现上升趋势,由 250 ℃退火态的 4.8%提升到 350 ℃退火态的 6.2%,提高了 29.17%。可以看出退火温度对成形试样的力学性能有较小的影响,由于经退火处理后,过饱和的 Cu 元素从 Al 基体中析出,致使改变 Cu 元

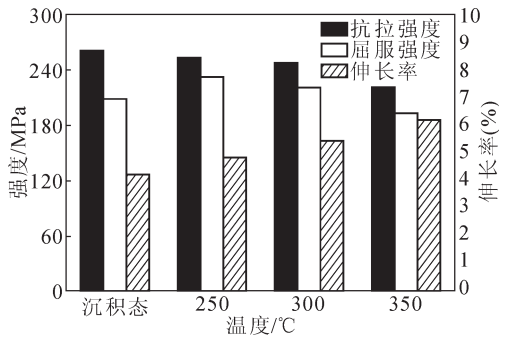


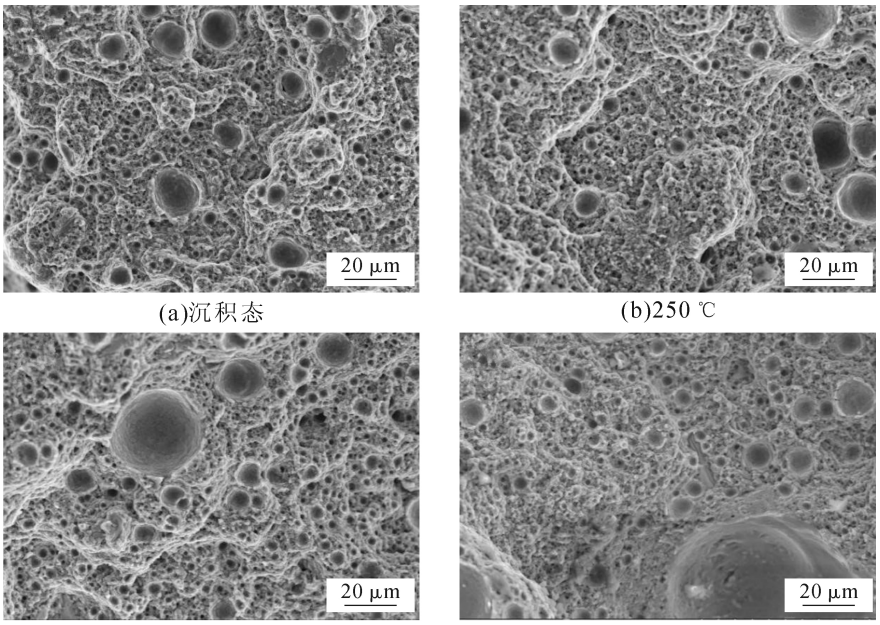
图 8 SLM 成形 ZL205A 合金的力学性能随退火温度的变化
Fig.8 The mechanical properties of ZL205A alloy formed by SLM changing with different annealing temperatures

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素的形态和分布,导致固溶强化效果变弱,在退火热处理工艺下，晶粒进一步长大，使细化晶粒效果变弱,导致力学性能得下降,析出的 Cu 元素聚集长大可以有效的提高成形试样的伸长率。

2.4　退火温度对 SLM 成形 ZL205A 合金试样断口形貌的影响

图 9 为不同退火温度处理下 SLM 成形ZL205A 合金室温拉伸断口形貌图。图 9(a)是沉积态试样断口形貌，可以看出表面存在许多分布不均匀且较浅的大小韧窝,存在一定的塑性变形,由此判断其断裂机制为韧性断裂。经过退火处理后,在它们断口表面都存在大小不一圆形或椭圆形韧窝且都发生了塑性变形,所以断裂机制均可认定为韧性断裂,其中 250 ℃退火态由于在成形过程中激光扫描时导致熔池粉末飞溅,掺杂着气体形成了孔洞。随着退火温度的升高，断口形貌并无明显变化，当退火温度升到 300 ℃时，退火态试样的断口比沉积态断口韧窝数量逐渐变多且尺寸变大,深度加深,当退火温度升高至 350 ℃时,断口韧窝尺寸进一步变大,使得试样塑性得到了提升。



(a)沉积态　(b)250 ℃　(c)300 ℃　(d)350 ℃

图 9　不同退火温度下试样的断口形貌图

Fig.9　Fracture morphology of specimens at different annealing temperatures

3　结论

(1)沉积态试样的微观组织主要由 $\theta(Al_2Cu)$相和 α-Al 基体组成,随着退火温度的升高,晶粒尺寸逐渐增大。当退火温度提高到 350 ℃时,晶粒尺寸约为 1.0 μm,退火态的物相组成与沉积态一致。

(2)随着退火温度的升高,合金的伸长率提高,硬度降低,强度下降。温度升高使原子迁移速率增加,Cu 元素析出,使固溶强化效果减弱,析出的 Cu 元素使枝晶变得粗大,削弱了细晶强化效果,最后导致经过退火处理后成形试样的强度和硬度下降。

(3)退火温度越高,韧窝数量和尺寸都有相应的增加,使试样的塑性得到提升。沉积态和退火态试样的断裂方式均为韧性断裂。

参考文献:

[1]　魏青松. 增材制造技术原理及应用[M]. 北京: 科学出版社,2017.

[2]　甘武奎,彭金贵,李仕豪,等. 铝合金选区激光熔化精密成形及其在航空领域的应用[J]. 航空制造技术,2019, 62(16):53-63.

[3]　戴圣龙. 先进航空铝合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社,2012.

[4]　DUTTA B, FROES F H (Sam). The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys[J]. Metal Powder Report, 2016(72):96-106.

[5]　王荣,李建彬,高映民. ZL205A 铝合金铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2019, 40(2):193-194.

[6]　武晓枫. ZL205A 合金的热处理工艺的研讨[J]. 甘肃科技, 2014, 30(6):71-72, 132.

[7]　李玉,张国伟,徐宏,等. ZL205A 合金热处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(1):68-69, 73.

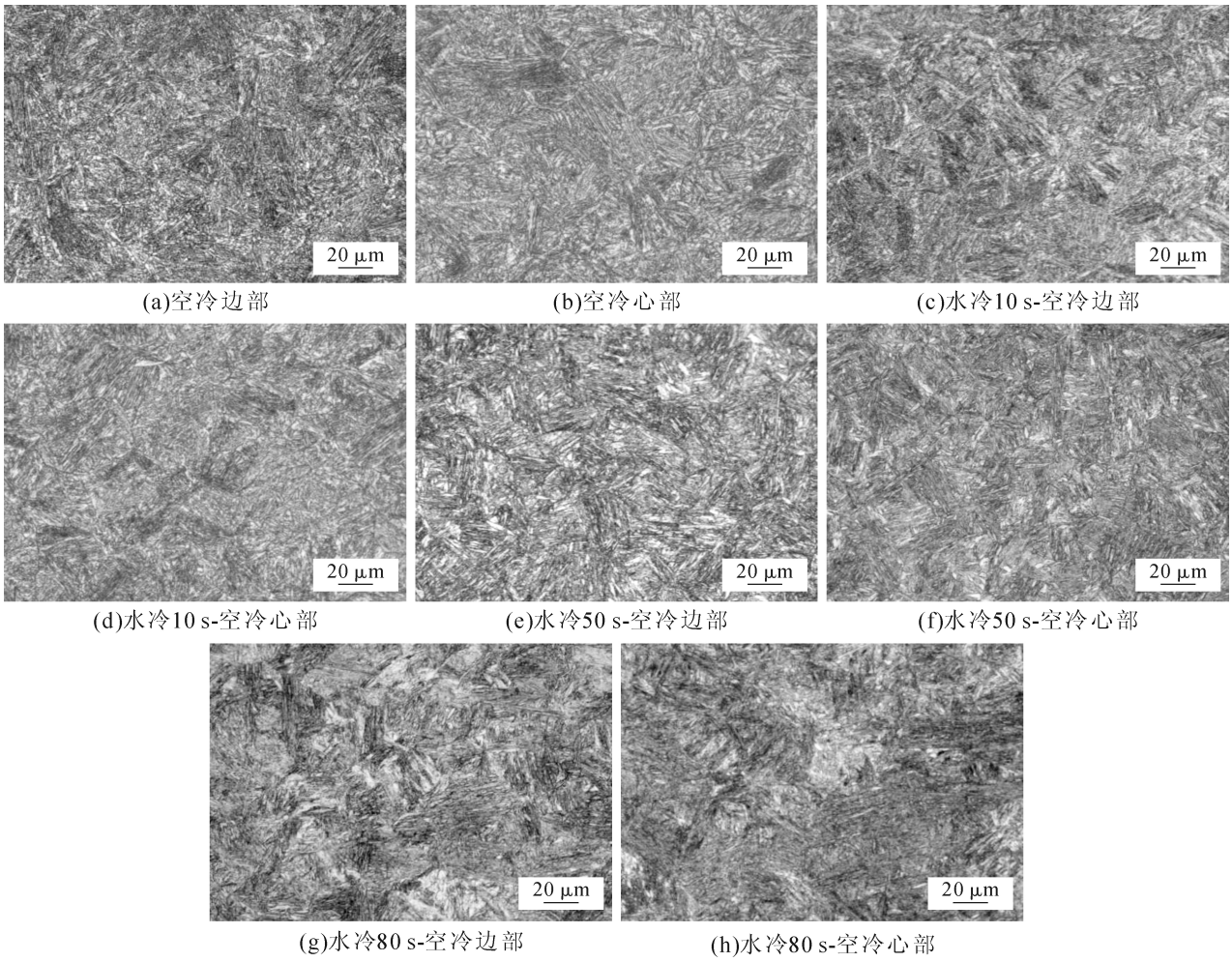
[8]　刘志权,余欢,徐志锋,等. 选区激光熔化成形 ZL205A 合金工艺及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2019, 39(4):370-373.

[9]　NIE Xiaojia, ZHANG Hu, ZHU Haihong, et al. Analysis of processing parameters and characteristics of selective laser melted high strength Al-Cu-Mg alloys: From single tracks to cubic samples[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018, 256: 69-77.

[10]　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.

(下转第 219 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)空冷边部　(b)空冷心部　(c)水冷10 s-空冷边部

(d)水冷10 s-空冷心部　(e)水冷50 s-空冷边部　(f)水冷50 s-空冷心部

(g)水冷80 s-空冷边部　(h)水冷80 s-空冷心部

图 4　水–空冷热处理 ϕ53 mm棒料不同水冷时间的微观组织

Fig.4　Microstructure of water-air cooled ϕ53 mm bar with different water cooling time

参考文献：

[1] 张红梅，刘相华，王国栋，等. 低碳贝氏体钢形变奥氏体的连续冷却相变研究[J]. 金属热处理学报，2000，21(4):35-40.

[2] 陈忠伟，张玉柱，杨林浩. 低碳贝氏体钢的研究现状与发展前景[J]. 材料导报，2006，20(10):84-86.

[3] 于庆波，孙莹，倪宏昕，等. 不同类型的贝氏体组织对低碳钢力学性能的影响[J]. 机械工程学报，2009，45(12):284-288.

[4] 贺信莱，尚成嘉，杨善武，等. 高性能低碳贝氏体钢的组织细化技术及其应用[J]. 金属热处理，2007，32(12):1-10.

[5] 尚成嘉，王学敏，杨善武，等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化[J]. 金属学报，2003，30(10):1019-1024.

[6] 王六定，朱明，陈景东，等. 低碳超高强度贝氏体钢的组织细化[J]. 材料热处理学报，2007，28(5):42-45.

[7] 高宽，王六定，朱明，等. 低合金超高强度贝氏体钢的晶粒细化与韧性提高[J]. 金属学报，2007，43(3):315-320.

[8] 尚成嘉，杨善武，王学敏，等. 低碳贝氏体钢的组织类型及其对性能的影响[J]. 钢铁，2005，40(4):57-61.

[9] 程彦，程巨强，游人杰. 贝氏体钢模锻件冲击值偏低的原因分析[J]. 热加工工艺，2019，48(17):179-181.

[10] 程彦，程巨强，李振飞. 加热温度对无碳化物贝氏体截齿钢组织和性能的影响[J]. 煤矿机械，2019，40(2):62-64.

[11] 李晴，程巨强. 回火温度对无碳化物贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 铸造，2019，68(8):544-547.

(上接第 215 页)

[11] 胡志恒. AlCu5MnCdVA 铝合金的激光选区熔化成形熔凝行为研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.

[12] ZHANG Hu, ZHU Haihong, QI Ting, et al. Selective laser melting of high strength Al-Cu-Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A,2016 (656):47-54.

[13] WANG P, DENG L, PRASHANTH K G, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloys fabricated by selective laser melting of powder mixtures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 2263-2266.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net