● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.001

ZL205A 合金块状偏析相缺陷的研究

郭 凡,贤福超,张海涛,姜 枫,王淑青,肖 抓,卢 鹤
(首都航天机械有限公司,北京 100076)

摘 要:以 ZL205A 合金铸件块状偏析缺陷为研究对象,研究了超声熔体处理、时效处理对块状偏析、显微组织及显微硬度的影响。结果表明,超声处理熔体并不能消除 ZL205A 合金中的块状偏析,对其尺寸和分布无影响,但对合金组织有一定的细化作用;时效时间对块状偏析相尺寸无影响,但对块状偏析相的显微硬度有影响,其显微硬度随时效时间的增加呈现先提高后减小的趋势,时效 4 h 时达到峰值硬度 165.1 HV;均匀化热处理不能减轻或消除块状偏析。

关键词:ZL205A;块状偏析;超声波;显微硬度;时效处理

中图分类号:TG166; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)04-0309-04

Study on Blocky-shaped Segregation Phase of ZL205A Alloy

GUO Fan, XIAN Fuchao, ZHANG Haitao, JIANG Feng, WANG Shuqing, XIAO Zhua, LU He
(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076 , China)

Abstract: The effects of ultrasonic melt treatment and aging treatment on block segregation, microstructure and microhardness of ZL205A alloy castings were studied. The results show that the ultrasonic treatment of the melt could not eliminate the block segregation in ZL205A alloy and has no effect on its size and distribution, but it has a certain refinement effect on the alloy microstructure. Aging time has no effect on the size of the mass segregation phase, but it has an effect on the microhardness of the mass segregation phase. The microhardness increase first and then decrease with the increase of aging time, and the peak hardness is 165.1 HV with 4 hours of aging treatment. Homogeneous heat treatment cannot reduce or eliminate block segregation.

Key words: ZL205A; block segregation; ultrasonic melt treatment; microhardness; aging treatment

ZL205A 合金是世界上强度最高的铸造铝合金[1],能够满足各种大型、高速、多载新型航空飞行器结构材料对强度、断裂韧性、抗应力腐蚀性能和抗疲劳性能的要求,广泛应用于航空、航天以及汽车工业等领域[2-4]。但是 ZL205A 合金的铸造性能较差,合金的凝固结晶范围宽,呈糊状凝固方式,铸件易产生偏析、缩松和裂纹等缺陷,产品合格率低,使得缺陷控制成为困扰工艺人员的一大难题。

实际生产过程中,在 ZL205A 铸件常见缺陷中,偏析缺陷虽不是最突出的,但却是最不容易解决的。偏析缺陷的种类繁多,如宏观形貌呈带状、线性、云雾状、团状、纹状的 Al_2Cu 共晶偏析,由 Al_3Ti、Al_2Cu 以及 Cu、V、Zr、Mn 等重金属元素组成的点状、流线偏析以及由 Al_3Ti、Al_3V 和 Al_3Zr 组成的块状偏析[5-9]。上述偏析缺陷在铸件中的位置一致性较差,时有时无,反复无常,对铸件的力学性能影响较大,亦是铸件报废率居高不下的主要原因。

块状偏析属于微观偏析的一种,是由 Al_3Ti、Al_3V 和 Al_3Zr 聚集长大而成的块状偏析相。块状偏析可使该区域的力学性能降低,尤其对屈服强度和延伸率影响明显[9]。研究发现[10]交变磁场可以有效减少晶粒内部的块状偏析组织,但却不能使之消除。目前对块状偏析的研究报道甚少。本文主要对 ZL205A 合金舱体铸件中产生的块状偏析组织宏微观形貌、偏析相成分及显微硬度进行研究,对比分析有无超声波熔体处理对块状偏析相大小及分布的影响,研究时效时间对块状偏析相大小和硬度的影响规律。

1 实验方法及过程

超声熔体处理实验是通过收集生产过程中所发现的 ZL205A 合金块状偏析毛坯件,切取 60 kg 块状偏析铸件,分别置于两个编号为 1#、2# 的 30 kg 坩埚炉中进行重熔,其中 1# 重熔过程中不做超声熔体处理,2# 重熔中利用超声波对合金熔体进行处

收稿日期:2020-01-31

作者简介:郭 凡(1986-),女,河南南阳人,硕士,工程师.主要从事金属热加工工艺研究方面的工作.
电话:010-68750412,Email:gf86gf08@163.com

理。超声波振动处理装置由 TJS- 智能超声波发生器(最大输出功率 600 W、频率 25 kHz)和超声搅拌装置组成，超声波处理温度为 720 ℃，处理功率为 450 W,处理时间 120 s,超声处理完毕后调整合金液温度至 730 ℃。将 1#、2# 坩埚炉合金液在同样的浇注温度(730 ℃)下采用重力铸造方法浇注试样。

对有无超声处理的试样在同一位置切取金相试样(见图 1),对比观察两者的宏观和微观组织。使用 X 光机探伤试样,依据 X 光底片标记块状偏析缺陷位置，切取若干块块状偏析组织的铸态 OM 试样,采用 36 kW 分体淬火炉固溶处理,固溶处理温度 538±2 ℃,保温 15 h,以小于 15 s 的转移速度在 15~20 ℃水中淬火。空冷 10 min 后,选用 4 kW 电阻烘箱,在 175±2 ℃时效温度下,分别按 0、2、4、6、8、10、12 h 的时效时间对试样进行时效处理，最后取出试样进行空冷；采用 OLYMPUS GX71 型金相显微镜观察微观组织，采用 Duramin-A300 型显微硬度计测量块状偏析相维氏显微硬度。

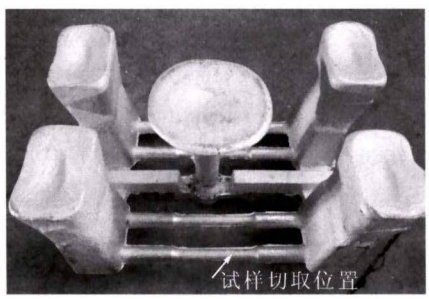


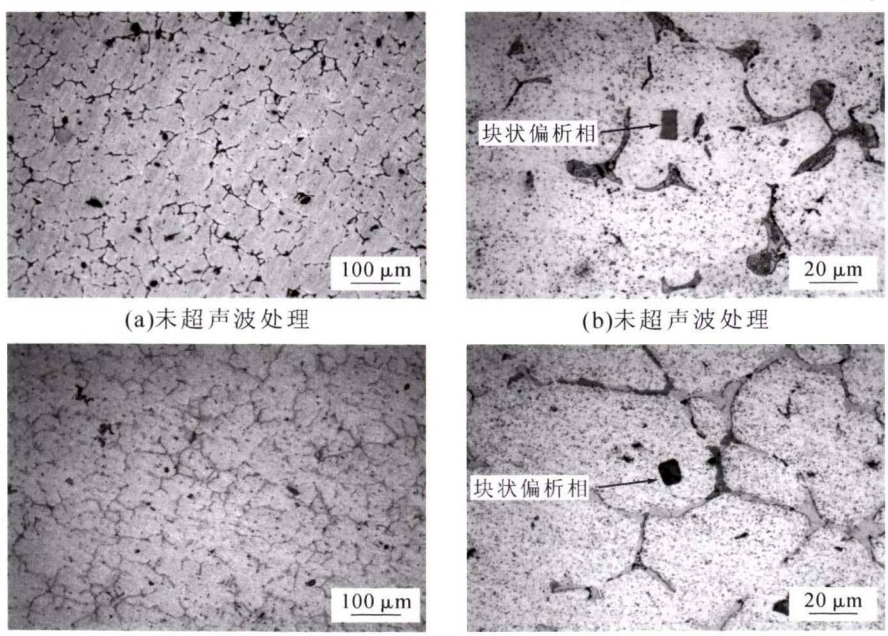
图 1 取样位置图
Fig.1 Sampling positions

2 实验结果及分析

2.1 超声处理对组织的影响

图 2 为未经超声处理和超声处理熔体后的 ZL205A 合金的凝固组织。从图中可以看出,未加超声处理的 ZL205A 合金多为发达的树枝晶，晶粒尺寸粗大,晶粒呈块状和鱼骨状。采用 Image J 软件对图 2 中晶粒度进行测量 20 次,未经超声处理的晶粒尺寸约为 75 μm。而经过超声处理后 ZL205A 合金组织得到了一定的细化,且分布较前者更为均匀,晶粒尺寸平均约为 51 μm。整体来说,两者的晶粒度差别不是太大，这是因为 ZL205A 合金成分中本身含有细化晶粒元素 Ti、V、Zr、Cd 和 B 等，在凝固过程中会形成 Al_7V、Al_3Zr、Al_3Ti 和 TiB_2 化合物。它们可以作为 α(Al)的外来结晶核心,有效的细化晶粒。正是由于 ZL205A 合金中自身存在细化元素,在 ZL205A 合金熔炼过程中,无需添加细化变质剂。超声波有比较明显的晶粒细化效果，然而超声处理并没有消除 ZL205A 合金组织中的块状偏析现象，块状偏析相的尺寸基本没有改变，块状偏析相在合金组织中的分布规律没有变化,这可从图 2 中得到证实。

空化效应和声流效应是超声细化的主要作用机理。空化效应在超声细化作用中比较明显。空化效应产生的局部高温、高压造成局部过冷，从而促进形核;而且,崩溃的空化泡会带走其周围的热量,热量降低的熔体会形成瞬时过冷，形核率得到很大的提高;此外,超声空化泡崩溃时形成激射流,引起熔体原子的近程有序转变为远程有序，从而二次提高形



(a)未超声波处理　(b)未超声波处理

(c)超声波处理100 s　(d)超声波处理100 s

图 2 超声波熔体处理对 ZL205A 合金铸件凝固组织的影响
Fig.2 Effect of ultrasonic melt treatment on solidification microstructure of ZL205A alloy castings

核率[11-13]。于此同时，超声处理形成的冲击波将初生树枝晶打断或击碎，碎断的枝晶在超声搅拌作用下弥散在熔体中，形成新的晶核[14]。空化效应和声流效应的相互配合，完成了超声细化晶粒的作用。超声处理之所以没有消除 ZL205A 合金块状偏析缺陷，原因是超声处理虽然能使合金熔体中的初生晶碎断，异质结晶质点数目增多；这些形核质点在声流的带动下散播到熔体的各个区域，类似结晶时的晶粒游离。由于 ZL205A 合金中异质形核质点多为 Al_3Ti、Al3Zr 等化合物，它们具有相同的晶格结构和相近的晶格参数，满足晶体生长共格理论，在晶粒游离过程中会不断聚集在一起和长大，最终形成 ZL205A 合金块状偏析形貌。

从以上实验和分析结果可知，超声处理熔体对 ZL205A 合金块状偏析相的尺寸和分布没有影响，并不能消除块状偏析缺陷，但对 ZL205A 合金组织起到一定的细化作用，这也说明很难通过元素均匀化手段来消除块状偏析。

2.2　固溶时效处理对组织的影响

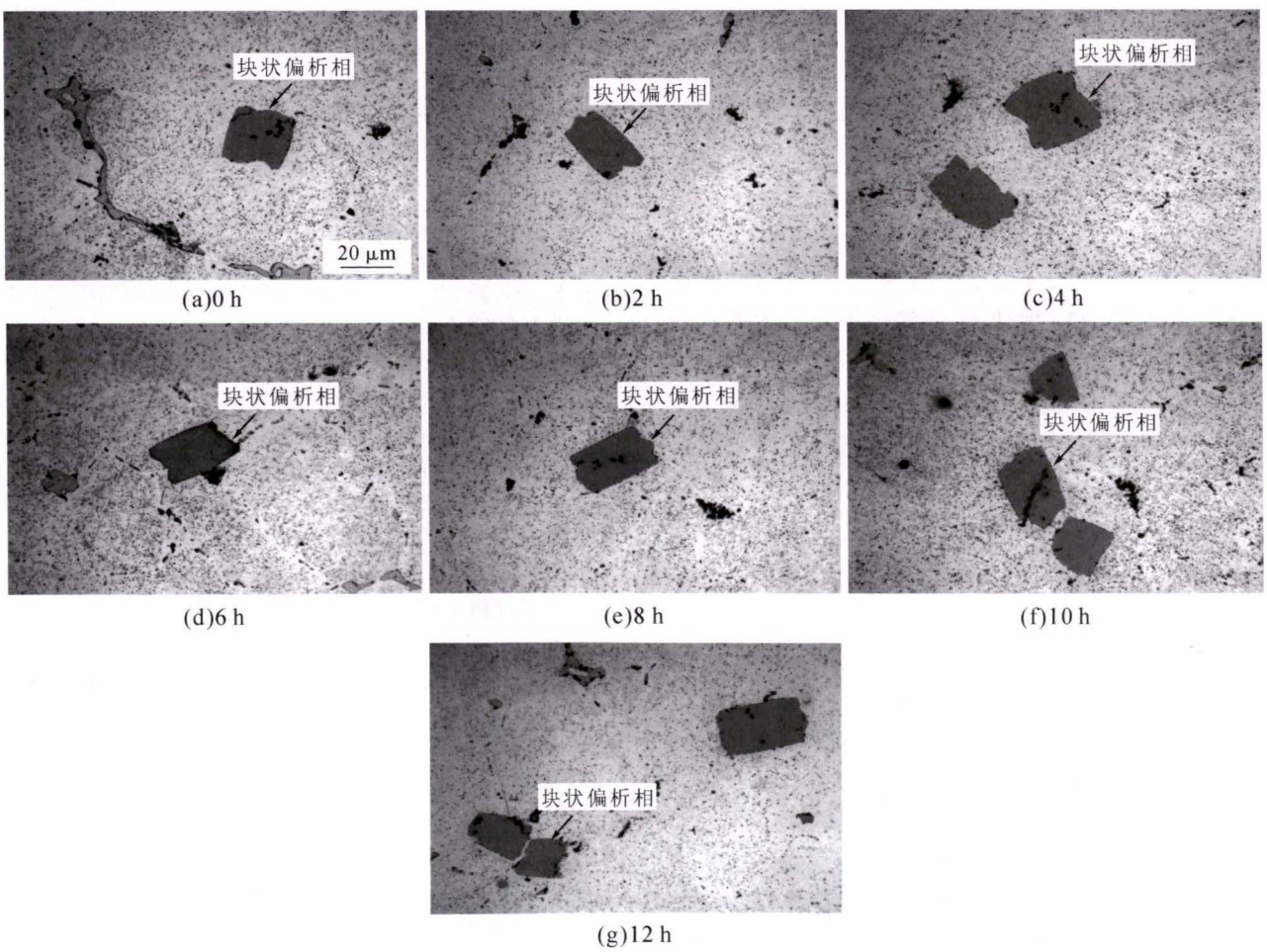
图 3 分别为 ZL205A 合金块状偏析试样淬火后 175 ℃时效不同时间下的金相照片。随着时效时间的变化，块状偏析组织和黑色斑点没有消除，块状偏析相尺寸并没有变化，但基体中的 T($Al_{12}CuMn_2$)相更加弥散和细小。

图 4 分别为铸态和热处理（固溶 538 ℃×15 h，时效 175 ℃×4 h）后的 ZL205A 合金块状偏析组织。由图 4 可知，经热处理后，块状偏析组织尺寸没有变化，即块状偏析组织未减轻或消除，晶界处存在的离异共晶组织 Al_2Cu 固溶到基体中，形成过饱和固溶体，大量分布不均匀的黑色条状 θ''(Al_2Cu)相从过饱和固溶体中析出，晶界的 T($Al_{12}CuMn_2$)相消失，二次 T ($Al_{12}CuMn_2$)相质点弥散分布于基体中。

2.3　固溶时效时间对块状偏析相显微硬度的影响

图 5 所示为 ZL205A 合金块状偏析相淬火后在 175 ℃的时效硬化曲线。由图 5 可知，块状偏析相的硬度随着时效时间的延长呈现出先增加后减小的趋势，在时效 4 h 前出现时效硬化现象，在 4 h 后硬度值有所下降，表现出时效软化现象，4 h 为峰值时效，时效峰值显微硬度为 165.1 HV，比时效前显微硬度值 84.8 HV 提高了 80.3 HV。

块状偏析相的硬度-时间曲线遵循先提高后降低的规律，在 0~2 h 增加速度较 2~4 h 慢，可能是由



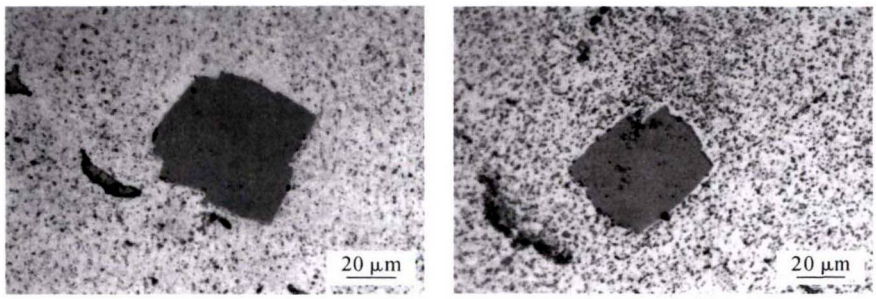
(a)0 h　(b)2 h　(c)4 h

(d)6 h　(e)8 h　(f)10 h

(g)12 h

图 3　不同时效时间处理的 ZL205A 合金块状偏析显微组织

Fig.3　Microstructures of block segregation phase in ZL205A alloy for different aging time



(a)铸态　　(b)热处理态

图 4 ZL205A 合金铸态和热处理后块状偏析的 OM 照片

Fig.4 OM morphologies of ZL205A alloy with block segregation in different states

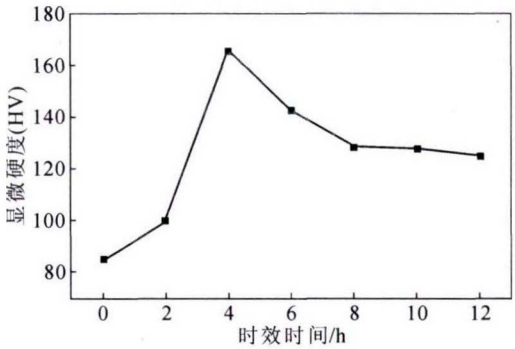


图 5 ZL205A 合金淬火 +175 ℃时效处理后块状偏析相的硬化

Fig.5 Hardening of block segregation phase of ZL205A alloy after quenching and 175 ℃ aging treatment

于 Cd 元素延缓时效过程的缘故[15]。随着时效时间的延长,Cd 元素的延缓时效作用逐渐减弱，同时块状偏析相中的 Al_3Ti 相会在其周围产生大量的位错,为时效处理提供了部分驱动能,一定程度上加快了时效进程。

有文献表明[16],合金相中的 Al_3Ti 在等温时效过程中会转变成 DO_{22} 型结构,该结构不属于超点阵结构，其转变量随着时效时间的延长而逐渐增多,以短程有序的形式出现,而短程有序参数随时效时间的增加而逐渐减小。由于本文没有进一步对块状偏析相时效后的相变化进行研究,有待对不同时效时间后的偏析相的组成进行定量分析,以确定块状偏析相随时效时间变化的相演化规律。

3 结论

(1)超声处理熔体对 ZL205A 合金块状偏析相的尺寸和分布没有影响,并不能消除块状偏析缺陷,但对合金组织起到一定的细化作用。

(2)时效时间对块状偏析相尺寸没有影响,但时效时间对块状偏析相显微硬度具有影响。块状偏析相的硬度随着时效时间的延长呈现出先增加后减小的趋势,在时效 4 h 前出现时效硬化现象,在 4 h 后表现出时效软化现象,4 h 为峰值时效;时效峰值显微硬度为 165.1 HV，比时效前提高了 80.3 HV。

(3)块状偏析组织热处理后尺寸没有变化,热处理不能减轻或消除块状偏析。

参考文献:

[1] 贾泮江,陈邦峰. ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(1):10-12.

[2] 杨光昱,介万奇,张润强,等. ZL205A 铝合金近液相线等温半固态组织转变特性 [J]. 稀有金属材料与工程 [J]. 2007, 36(10): 1717-1721.

[3] Fan Li, Hao Qitang, Xian Fuchao. Element segregation behavior of aluminum-copper alloy ZL205A [J]. China Foundry, 2014, 24(6): 510-515.

[4] 贤福超，郭凡，肖文丰. ZL205A 合金元素偏析行为 [J]. 铸造, 2014, 10(63):995-998.

[5] 史晓平,李玉胜. ZL205A 合金偏析缺陷研究[J]. 铸造, 2011, 60 (10):1022-1026.

[6] 贤福超,郝启堂,李新雷,等. ZL205A 合金晶界偏析行为研究[J]. 铸造技术, 2012, 12(33):1391-1393.

[7] 陈邦峰,贾泮江. ZL205A 铝合金铸件流线缺陷研究[J]. 特种铸造及有色合金,2010, 30(11):984-987.

[8] 周继广,荣福杰,李 笑,等. ZL205A 舱体铸件孤立点状缺陷的研究[J]. 铸造, 2019, 9(68):1031-1035.

[9] 贤福超,郝启堂,范理. ZL205A 合金块状偏析形成机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 4(43):941-945.

[10] 罗贵敏,陈舸,芦刚,等. 交变磁场对 ZL205A 合计块状偏析的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 12(3):319-323.

[11] 李晓谦,刘诗月,蒋日鹏. 超声场对 7B50 铝合金凝固组织的影响[J]. 上海有色金属,2008,29(2):47-50.

[12] 黎正华,李晓谦,张明,等. 超声外场对 7050 铝合金铸锭凝固微观组织的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程,2011,16(3): 341-348.

[13] 王乐酉,吴文祥,马科,等. 超声振动对 7055 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺,2010,18(6):838-842.

[14] 李晓谦,蒋日鹏,张立华,等. 超声施振深度和冷却方式对纯铝凝固组织的影响[J]. 北京理工大学学报,2008,28(4):290-293.

[15] 龚磊清. 铸造铝合金金相图谱[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1987:35-42.

[16] 邓忠民. 等温时效对 Cu-9Ni-6Sn-0. 3Ce 合金相结构的影响[J]. 中国有色金属学报,1994, 4(4):95-97.