

热处理工艺对 ZL114A 铝合金组织及力学性能的影响

康福伟¹, 李如一¹, 乔昕², 张继敏¹, 樊德智¹

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 中航工业哈尔滨东安发动机(集团)有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要: 为了研究热处理工艺对 ZL114A 铝合金组织和力学性能的影响, 利用金相显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、拉伸实验机等设备对不同热处理后的 ZL114A 铝合金进行组织观察和力学性能测试。结果表明, 随着固溶温度从 505℃ 升高到 550℃, 合金组织中的共晶硅依次发生熔断、球化和粗化等现象, 而且硬度、抗拉强度和延伸率均出现先增加后降低现象, 在 535℃/12 h 时达到最大值, 分别为 89.7 HB、280 MPa 和 6.6%; 当固溶温度达到 550℃ 时, 晶粒粗大, 出现过烧现象, 硬度和抗拉强度急剧降低, 因此, 适合的固溶工艺为 535℃/12 h。经此固溶工艺处理的 ZL114A 铝合金经不同温度 6 h 时效处理, 结果表明, 随着时效温度从 140℃ 升高到 170℃, 合金的抗拉强度从 286 MPa 增加至 345 MPa, 而延伸率则从 6.2% 降低至 4.0%, 在 155℃ 时, 其抗拉强度和延伸率分别为 315 MPa 和 5.2%, 较铸态时抗拉强度提高了 81.0%, 延伸率提高了 108.0%。从企业对产品实际性能需求出发, 最佳的热处理工艺制度为 535℃/12 h + 155℃/6 h。

关键词: ZL114A 合金; 热处理; 组织; 力学性能

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.01.019

中图分类号: TG166.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2019)01-0113-05

Effects of Heat Treatment Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of ZL114A Aluminum Alloy

KANG Fu-wei¹, LI Ru-yi¹, QIAO Xin², ZHANG Ji-min¹, FAN De-zhi¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;

2. Aero Engine (Group) Corporation of China Harbin DongAn Engine Co. LTD., Harbin 150066, China)

Abstract: In order to study the effects of heat treatment on microstructure and properties of ZL114A aluminum alloy, microstructure observation and mechanical properties test of ZL114A aluminum alloy after different heat treatment were investigated by optical microscope, scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), and tensile testing machine. The results show that, with the increasing of the solution temperature from 505℃ to 550℃, fuse, spheroidization and coarsening phenomenon occurred in eutectic silicon of ZL114A alloy, hardness, tensile strength and elongation were increased, reached the maximum value at 535℃/12 h, 89.7 HB, 280 MPa and 6.6%, respectively. At the solution temperature 550℃, because grain become coarse and arise overburnt feature, the hardness and tensile strength decreased dramatically. Therefore, suitable for the

收稿日期: 2017-02-15

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(201810214196); 黑龙江省自然科学基金(E201107)。

作者简介: 李如一(1993—), 女, 硕士研究生;

乔昕(1981—), 男, 硕士。

通信作者: 康福伟(1970—), 男, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: fuwei_kang@163.com。

solution process is 535℃/12 h. The solution treated ZL114A alloy was aged at various temperature for 6 h, the results show that with the increase of aging temperature from 140℃ to 170℃, the tensile strength increased from 286 MPa to 345 MPa, while the elongation decreased from 6.2% to 4.0%. At 155℃, the tensile strength and elongation were 315 MPa and 5.2%, respectively. Comparing with as-casting ZL114A alloy, the tensile strength increased by 81%, and elongation increased by 108%. According to the actual demand of the enterprise, the optimum heat treatment process is 535℃/12 h +155℃/6 h.

Keywords: ZL114A alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

0 引 言

ZL114A 是一种典型的高强度高韧铸造 Al-Si 合金,国外与之相似的合金牌号为 A357(美国军标, Al-7Si-0.6Mg),主要用于制造航空航天飞行器复杂零部件以及汽车等承受高负荷的零部件^[1-2]。我国航空航天企业生产的 ZL114A 合金构件通常是按 HB5480-91 或 HB962-2001 的铸造标准进行设计制造的,虽然合金热处理后的性能指标远高于 GB/T1173-2013 的规定,但与国外 A357 合金砂型铸件性能相比仍存在一定差距^[3-4]。因此,为了提高 ZL114A 合金的综合力学性能,近年来研究人员在合金成分优化、熔体精炼、微合金化、热处理工艺等方面开展了一些研究工作^[5-14],提高了 ZL114A 合金的力学性能。但在实际生产中仍存在某些问题,如合金零件性能稳定性差,合格率低。通过对某企业废品零件的分析,发现热处理工艺是造成该问题的主要原因。ZL114A 铝合金的热处理工艺主要由固溶淬火与人工时效两个工艺组成,这两个工艺对合金第二相大小、形态、数量等有重要影响,从而导致合金性能的变化^[11-14]。因此,本文主要研究固溶和时效工艺对 ZL114A 合金组织和力学性能的影响,以期望对航空复杂零件的生产提供理论指导。

1 实验材料及方法

实验所用的 ZL114A 合金成分如表 1 所示。采用砂型铸造法浇注实验用试棒,一箱两件,图 1(a) 为砂箱示意图,试棒尺寸如图 1(b) 所示。试棒经不同固溶工艺处理后,通过组织分析和力学性能测试,优化出最佳固溶工艺。经该固溶工艺处理后,试棒经不同时效工艺处理并进行组织和性能分析,从而优化出最佳时效工艺。热处理实验方案如表 2 所示。用光学显微镜和 FEI sirion200 型扫描电子显微镜观察合金组织,在 Instron 5500R 万能试验机上按

照国标 GB228-2002 进行拉伸实验,拉伸速率为 4 mm/min,每个实验条件下各拉伸三根试棒,力学性能取平均值。

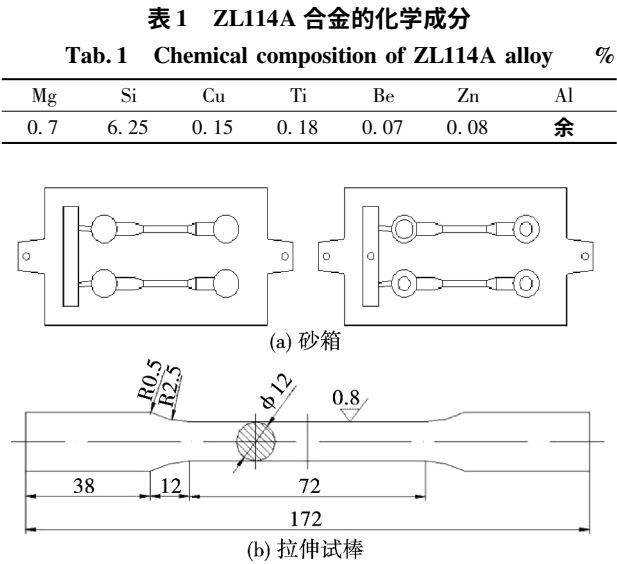


图 1 砂箱及拉伸试棒示意图

Fig.1 Schematic diagram of sand box and tensile sample

表 2 ZL114A 拉伸试棒热处理工艺实验方案

Tab.2 Experimental scheme of heat treatment process for ZL114A alloy tensile bar

固溶温度 /℃	固溶时间 /h	冷却介质	时效温度 /℃	时效时间 /h
505℃	6、8、10、12、14	60℃ 水	140℃	6 h, 空冷
520℃	6、8、10、12、14			
535℃	6、8、10、12、14		155℃	
550℃	6、8、10、12、14		170℃	

2 实验结果与分析

2.1 固溶处理对 ZL114A 合金组织及力学性能的影响

固溶温度和时间对 ZL114A 合金组织和性能影响较大。图 2 是铸态及不同固溶处理后的 ZL114A 合金金相组织照片。由图 2(a) 可知铸态组织主要

由白色的 α -Al 基体, 分布在其周围的深色块状共晶 Si, 细小白色的 Mg_2Si 相及杂质铁相(AlFeMnSi) 组成。随着固溶温度的升高, 共晶 Si 尺寸变小, 形态由块状变为条状和球状, 而组织中的 Mg_2Si 相逐渐溶解到基体 α -Al 相中, 溶入基体中的元素越多, 固溶强化效果越好。但温度达到 550°C 时, 如图 2(e) 所示, α -Al 晶粒粗大, 出现了组织过烧特征。由此可知, 固溶温度应在 550°C 以下。

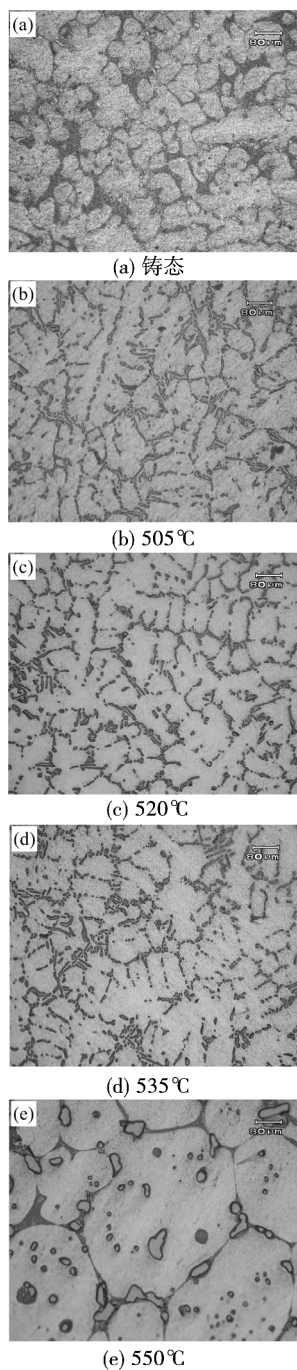


图 2 ZL114A 合金铸态及在不同固溶温度下保温 12 h 的金相组织

Fig. 2 Microstructures of as-casting ZL114A alloy and treated at different solution temperature for soaking 12 h

图 3 为固溶温度 535°C 不同保温时间的 ZL114A 合金金相组织。从图中清晰可见棒状共晶 Si 的熔断、球化及粗化过程。保温 6h 后 3(a) 图, 部分共晶 Si 已经开始发生熔断, 从图 3(b)、3(c) 和 3(d) 可以看出, 随着固溶时间的延长, 更多的棒状共晶 Si 熔断, 并逐渐球化。当固溶保温时间为 14h 时, 如图 3(e), 组织中的共晶 Si 相开始出现聚集长大, 逐渐粗化。

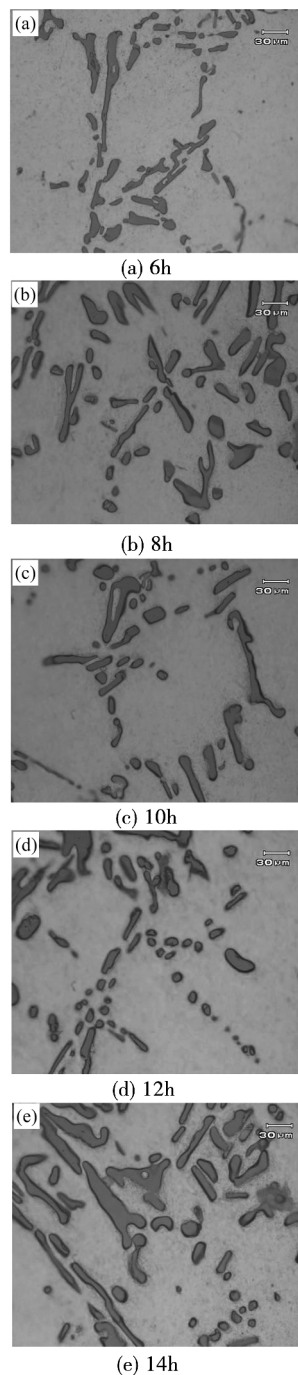


图 3 ZL114A 合金在 535°C 固溶保温不同时间的金相组织

Fig. 3 Microstructures of ZL114A alloy at 535°C solution for different soaking time

图4为不同固溶处理对ZL114A合金硬度及拉伸性能的影响。从图4(a)可见,除550℃外,随着固溶温度升高或保温时间的延长,合金硬度增加,在535℃/12h时硬度达到最大值。这主要是由于固溶温度越高,时间越长,溶解到基体 α -Al中的 Mg_2Si 越充分,引起的晶格畸变就越严重,固溶强化效果就会越好。而温度达到550℃时随着保温时间的延长,硬度降低,由前述可知,这是由于过烧引起的。一般情况下金属材料的硬度变化规律与其拉伸强度呈正比,除550℃外,其余3个固溶条件下的拉伸试棒力学性能与铸态试棒拉伸性能对比如图4(b)所示。由图可见,抗拉强度和延伸率都随着固溶温度升高和时间的延长而增加,在535℃/12h时,抗拉强度为280 MPa,延伸率为6.6%,比铸态时的174 MPa和2.5%提高很多,综上得出ZL114A合金最佳固溶处理工艺为535℃/12h。

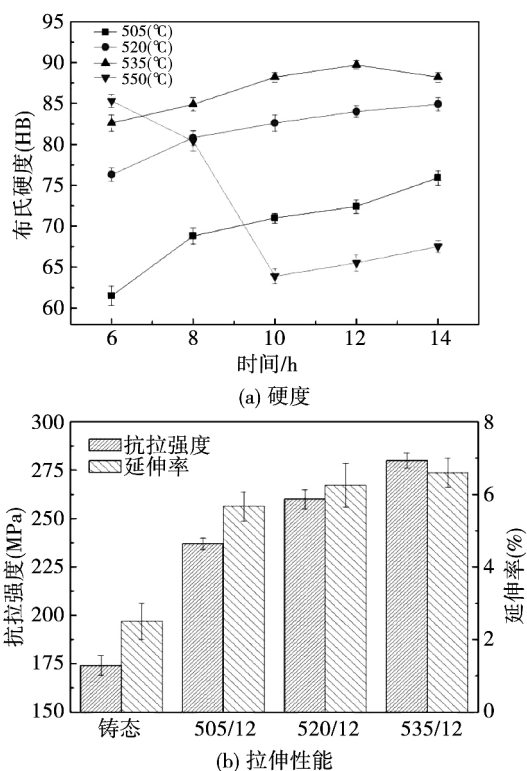


图4 不同固溶条件对ZL114A合金硬度及拉伸性能的影响

Fig.4 Effects of various solution treatment conditions on hardness and tensile properties of ZL114A alloy

2.2 时效处理对ZL114A合金组织及力学性能的影响

图5是在535℃×12h固溶处理后经140℃、155℃、170℃,6h时效处理的ZL114A合金组织照片。由图可见随着时效温度的升高,析出相数量不断增多,时效强化作用增强,合金的强度应该逐渐升高。

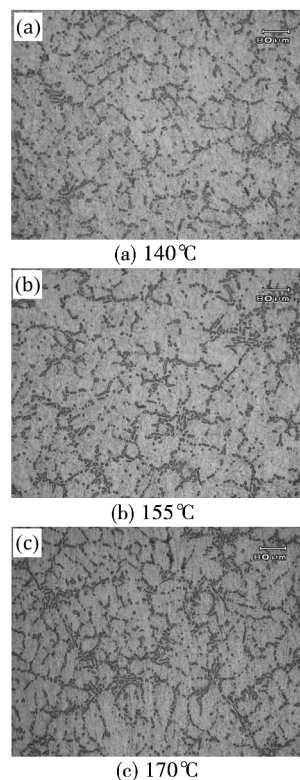


图5 ZL114A在6h时不同时效温度对组织的影响
Fig.5 Effects of different aging temperatures for 6h of ZL114A alloy

众所周知,Al-Si-Mg合金随着时效温度的升高,时效沉淀是通过以下步骤完成的,即过饱和 α 固溶体 $\rightarrow$ G.P.区 $\rightarrow\beta'$ 相(Mg_2Si) $\rightarrow\beta$ 相(Mg_2Si)。图6是不同时效处理后的ZL114A合金透射电镜显微组织照片。在时效过程中,如图6(a)所示,白色铝基体上分布的黑色球状相为G.P. I区,针状相为G.P. II区(即 β'' 相)。由于G.P.区与基体呈共格关系,产生共格畸变,使强度提高,由于畸变程度较低,其强化作用有限。随着时效温度升高,由图6(b)和6(c)可以看出,针状 β'' 相开始向棒状 β' 相(Mg_2Si)转变, β' 相沿着铝基体的 $[001]$ 面析出,呈现出互相垂直的棒状形态,且均匀分布于基体上,由于 β' 相与基体保持共格关系,在其周围形成强的畸变应力场,从而使合金强度提高。若温度再升高, β' 相转变为 β 相, β 相与基体为非共格关系,强化作用减小,合金强度降低,即过时效。所以在170℃/6h时效处理下抗拉强度应该最高。

图7为不同时效温度下的抗拉强度和延伸率测量值,与上述组织分析结果相一致。可见,随着时效温度的升高,抗拉强度随之增加,但延伸率有所降低,在170℃时分别达到345 MPa和4.0%。从企业对ZL114A合金构件综合力学性能要求,时效温度为155℃更合适,此时的抗拉强度和延伸率分别为315 MPa和5.2%。

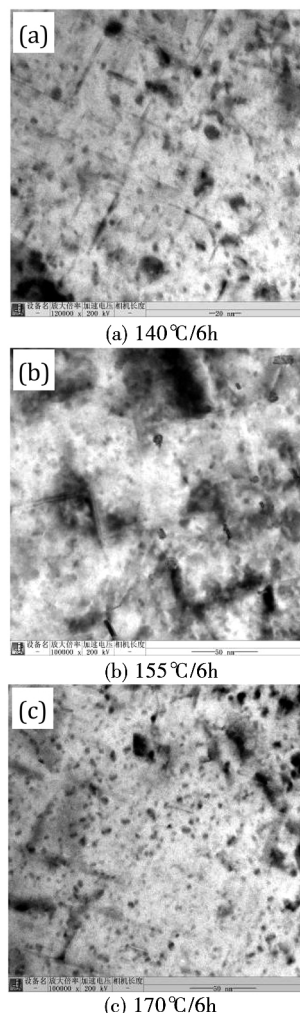


图 6 535°C/12 h 固溶处理后不同时效处理的 ZL114A 合金组织透射电镜照片

Fig. 6 TEM micrographs of ZL114 alloy at solution treatment of 535°C/12 h following by various aging treatments

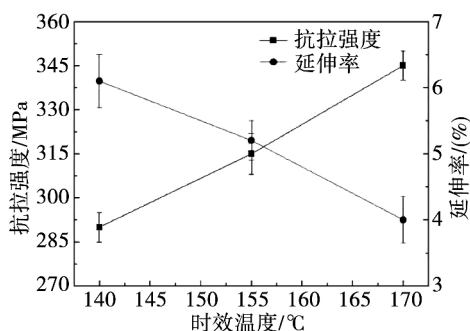


图 7 不同时效温度下 ZL114A 合金的抗拉强度和延伸率
Fig. 7 Tensile strength and elongation at various aging temperatures for ZL114A alloy

3 结 论

1) 随着固溶温度从 505°C 升高至 550°C, ZL114A 合金抗拉强度和延伸率均呈现先增加后降

低的变化规律,性能的降低是由于在 550°C 时出现过烧现象引起的,最佳固溶处理工艺为 535°C/12 h, 60°C 水冷,此时的抗拉强度为 280 MPa,延伸率为 6.6%。

2) 时效温度从 140°C 升高至 170°C,析出相共格强化作用逐渐增强,导致抗拉强度逐增加,而延伸率则逐渐降低;在 155°C 时,其抗拉强度和延伸率分别为 315 MPa 和 5.2%;

3) 根据企业对 ZL114A 综合力学性能要求,最佳热处理工艺为 535°C/12 h (60°C 水冷) + 155°C/6 h (空冷)。

参 考 文 献:

- [1] BOUAZARA M, BOUAICHA A, RAGAB Kh A. Fatigue Characteristics and Quality Index of A357 Type Semi-Solid Aluminum Castings Used for Automotive Application [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(8): 3084.
- [2] TIRYAKIOĞLU M, ALEXOPOULOS N. D. The Effect of Artificial Aging on Tensile Work Hardening Characteristics of a Cast Al-7 Pct Si-0.55 Pct Mg (A357) Alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(11): 2772.
- [3] 解传浩,陈振中. A357 铸造合金力学性能研究 [J]. 飞机设计, 2010, 30 (3): 42.
- [4] 王东成. ZL114A 合金组织与力学性能的综合优化 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.
- [5] ALEXOPOULOS, NIKOLAOS D, STYLIANOS Antonis, et al. Dynamic Fracture Toughness of Al-7Si-Mg (A357) Alloy [J]. Mechanics of Materials, 2013, 58: 55.
- [6] CESCHINI L, MORRI Alessandro, MORRI Andrea, et al. Correlation Between Ultimate Tensile Strength and Solidification Microstructure for the Sand Cast A357 Aluminium alloy [J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4525.
- [7] MOSTAFAEI M, GHOBADI M, EISAABADI Ghasem B. Evaluation of the Effects of Rotary Degassing Process Variables on the Quality of A357 Aluminum Alloy Castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(6): 3469.
- [8] WU Ruizhi, QU ZhiKun, SUN Baode, et al. Effects of Spray Degassing Parameters on Hydrogen Content and Properties of Commercial Purity Aluminum [J]. Materials Science and Engineer A, 2007, 456: 386.
- [9] 康福伟,刘洪汇,刘凯,等. 精炼工艺对 ZL114A 合金组织即性能的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(6): 9.
- [10] TAN Ten-hung, LEE Sheng-long, LIN Yu-lom. Effects of Be and Fe Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of A357.0 Alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995(26A): 1196.
- [11] JIANG Long-tao, WU Gao-hui, YANG Wen-shu, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure of Dimensional Stability of ZL114A Aluminum alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010(20): 2124.
- [12] PEDERSEN L, ARNBERG L. The Effect of Solution Heat Treatment and Quenching Rates on Mechanical Properties and Microstructures in AlSiMg Foundry Alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2001, 32(3): 525.
- [13] 周永江,张喆,洪润州. 热等静压对 ZL114A 铸件组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(7): 687.
- [14] SABOORI A. Studying the Age Hardening Kinetics of A357 Aluminum Alloys Through the Johnson-Mehl-Avrami Theory [J]. Metal Powder Report, 2016, 72(6): 420. (编辑: 温泽宇)