

Effect of Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7Mg0.4 Alloys

Na Zhao*, Suiqun Zhu, Yi Cao#

SkyTeam Motor (Technology) Ltd., Shanghai

Email: Tina.zhao@zf.com, #yuanbinxia100@163.com, #18502128683/yi.cao@trw.com

Received: Sep. 4th, 2019; accepted: Sep. 23rd, 2019; published: Sep. 30th, 2019

Abstract

AlSi7Mg0.4 alloy is an aluminum alloy with strengthened heat treatment. In the paper, AlSi7Mg0.4 alloys with different aging treatment were investigated. The structure was characterized by X-ray diffraction (XRD) and metallographic microscope. Dynamic change characteristics of the sample with the temperature were tested through differential scanning calorimeter (DSC) method. Through tensile and fatigue tests, the results showed that the yield strength was decreased with aging temperature decrease, and the break elongation was increased with aging temperature decrease. And the fatigue performance was better at lower aging temperature.

Keywords

Al-Si Casting Alloy, AlSi7Mg, Aging Treatment, Texture, Mechanical Property

时效处理对AlSi7Mg0.4合金组织结构和力学性能的影响

赵娜*, 朱随群, 曹懿#

天合汽车科技(上海)有限公司, 上海

Email: Tina.zhao@zf.com, #yuanbinxia100@163.com, #18502128683/yi.cao@trw.com

收稿日期: 2019年9月4日; 录用日期: 2019年9月23日; 发布日期: 2019年9月30日

*第一作者。

#通讯作者。

摘要

AlSi7Mg0.4合金是可强化热处理的铝合金。本文通过对AlSi7Mg0.4合金进行不同的时效处理。通过x射线衍射、金相显微镜进行了组织结构表征。采用差示扫描量热动态法测试了样品随温度的变化特征。进行了拉伸和疲劳性能测试,结果表明,不同温度的时效处理所得样品的抗拉强度变化不大,但屈服强度随时效温度降低而降低,断后伸长率随时效温度降低而升高;而且时效温度越低,疲劳性能越好。

关键词

铸造铝硅合金, AlSi7Mg, 时效处理, 组织结构, 力学性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

AlSi7Mg 合金属于铸造铝合金,具有密度小、比强度高、延展性好,且具有优良的铸造性能和耐腐蚀性能,广泛应用于航空航天、汽车发动机引擎铸件[1]。

AlSi7Mg 合金是可强化热处理的铝合金。通过热处理可细化基体和共晶硅组织,提高力学性能[2]-[9]。固溶阶段是为了 α -Al通过改变固溶温度、固溶时间、时效温度及时效时间以细化组织,提高强度和塑性指标。一般来讲,固溶阶段是为了将Si和Mg元素溶于铝基体中和球化共晶硅,时效阶段主要是为了形成Mg₂Si强化相。

本文通过对汽车发动机的引擎铸件进行不同时效处理,通过XRD、金相分析、差示扫描量热法(DSC)差热分析、拉伸和疲劳测试对其组织结构和力学性能进行了表征测试。

2. 实验方法

2.1. 实验材料

试验材料是商用铸造铝合金AlSi7Mg0.4,具体的镁含量如表1所示。

2.2. 实验过程和表征方法

试验采用已成型的铸件,在马弗炉中进行热处理,先加热至540°C,升温速率为5°C/min,保温一定时间,然后降温到时效处理温度并保温一定时间。然后对所得样品进行XRD测试和金相表征,比较了其组织形态;另外,进行拉伸和疲劳试验。表1为AlSi7Mg0.4合金的不同热处理温条件。

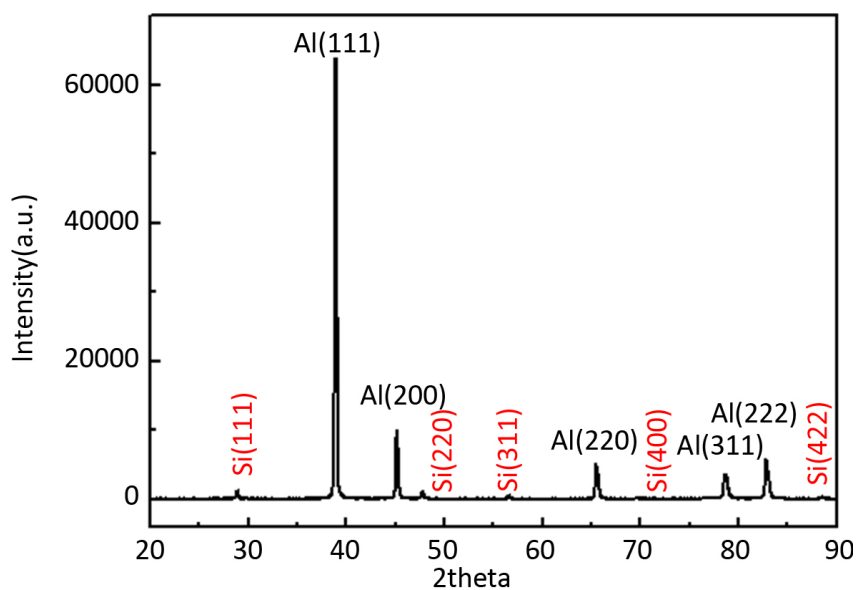
采用Rigaku D/max 2250 V的x射线衍射仪(XRD)对样品进行表征,工作电压和电流分别为40 kV和40 mA。采用SINCOTEC公司的POWER SWING疲劳试验机进行力学性能测试,试样为B6×30 mm,拉伸速度为1 mm/min。采用金相显微镜Zeiss Vert.A1拍摄金相照片,放大倍数为×50,利用拍摄照片测量二次枝晶间距,共晶硅的大小。采用METTLER TOLEDO STAR系统TGA/DSC 2进行热重分析,升温速率为5°C/min,氮气保护。

Table 1. Heat treatment in the AlSi7Mg0.4 alloys**表 1.** AlSi7Mg0.4 铝合金的热处理工艺

样品号	Mg 比重/%	固溶处理阶段		人工时效阶段	
		温度/°C	时间/h	温度/°C	时间/h
1#	0.422	540	4	175	4
2#	0.44	540	2	165	4
3#	0.442	540	4	155	4
4#	0.437	540	4	150	4

3. 实验结果与分析

所有疲劳测试前后的样品进行 XRD 表征。图 1 展示了疲劳测试前 1#样品的 XRD 图谱，图中所有衍射峰分别对应 α -Al(JCPDS No. 04-0787)和 Si(JCPDS No. 27-1402)，且没有观察到其它杂质峰。

**Figure 1.** XRD pattern of AlSi7Mg0.4 alloy**图 1.** AlSi7Mg0.4 合金的 x 射线衍射图

为了考察 α -Al 基体的晶粒尺寸变化规律，针对所有疲劳测试前样品的 α -Al 的(111)晶面进行 Rietveld 精修后，其半峰半宽如表 2 所示。结果表明， α -Al 基体的晶粒尺寸变化不大，固溶时间较短的 2#号样品 α -Al 基体的晶粒尺寸相对最小。

Table 2. Peak width at half height (FWHM) of (111) lattice plane in α -Al**表 2.** α -Al(111)晶面的半峰半宽

样品号	半峰半宽 FWHM
1#	0.22262
2#	0.19687
3#	0.23101
4#	0.24365

同时,对所有样品进行半定量分析,其结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,不同的时效处理温度下, α -Al 和 Si 的含量并没有明显的变化规律;但疲劳测试后, Si 的相对含量有所变化。当时效温度为 175°C 时, Si 的相对含量增多了 66.1%;当时效温度为 165°C 时, Si 的相对含量增多了 12.5%;当时效温度为 155°C 时, Si 的相对含量减少了 1%,当时效温度为 150°C 时, Si 的相对含量减少了 1.8%。在疲劳过程中,时效温度较高的 1#和 2#样品可能有部分 Si 从 α -Al 基体中析出造成,时效温度较低的 3#和 4#样品可能形成了某种少量 Si 的化合物。

Table 3. Specific gravity of α -Al and Si before and after fatigue test

表 3. 疲劳测试前后 α -Al 和 Si 的比重

样品号	疲劳测试前		疲劳测试后		Si 增量*/%
	Al/w.t.%	Si/w.t.%	Al/w.t.%	Si/w.t.%	
1	97.80	2.20	96.40	3.60	66.1
2	94.90	5.10	94.30	5.70	12.5
3	94.95	5.05	95.00	5.00	-1.0
4	97.67	2.33	97.71	2.29	-1.8

$$* \text{Si 增量} = \frac{\text{疲劳测试后硅的比重} - \text{疲劳测试前硅的比重}}{\text{疲劳测试前硅的比重}} \times 100\%, \text{ 疲劳测试前后硅的比重} = \frac{w(\text{Si})}{w(\text{Al})}。$$

表 4 是不同时效条件下处理后的样品的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率以及疲劳参数。从表 4 中可以看出,不同时效处理温度下,AlSi7Mg0.4 合金的抗拉强度没有明显的变化规律,所有样品数值接近;但屈服强度随着时效温度的降低而降低,断后伸长率随时效温度的降低而升高。结果表明:时效温度降低, Mg2Si 强化相的析出量变少,从而降低了其屈服强度和提高了其断后伸长率。

为了考察其动态力学性能,进行了疲劳测试。本文通过对每个样品的 12 个零件的疲劳数据进行拟合,得到 k 和 Sd 值,如表 4 所示。根据疲劳极限公式 $\lg N = -k * \lg F + C$, 其中 N 是循环次数, F 为加载力。结果表明,当加载次数 $N = 10^4$, 1#和 2#样品的最大加载载荷为 21.899 kN 和 22.415 kN, 3#和 4#样品的最大加载载荷分别为 30.628 kN 和 35.208 kN。根据使用要求,最大加载载荷必须大于 30 kN,因此只有 3#和 4#样品满足使用要求。结合 XRD 结果分析,时效温度低的样品形成的少量 Si 的化合物,有利于增加试样的疲劳寿命。

Table 4. Tensile and fatigue properties of AlSi7Mg0.4 alloys with different aging treatments

表 4. 不同时效处理温度 AlSi7Mg0.4 合金的拉伸和疲劳性能

样品号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A/%	k	疲劳极限 S_d /N ($N = 2 \times 10^6$)	F/kN ($N = 10^4$)
1#	303.5	264	3.7	4.25	7409	21.899
2#	316.7	256.7	4.5	4.07	7230	22.415
3#	306.6	236.8	5.8	3.8	7596	30.628
4#	302	221.7	8	3.4	7411	35.208

疲劳测试以后,分别对不同时效处理条件下的样品进行金相组织检测,结果如图 2 所示。所有样品中共晶硅均为细小的纤维和颗粒状分布,整体分布都比较均匀。边界的共晶硅组织有利于组织位错的发生,提高屈服强度。从图 2(a)和图 2(b)可以看出,在树枝晶边界分布的共晶硅明显多于图 2(c)和图 2(d)。1#和 2#样品,时效温度较高, Si 在晶界分布的均匀性较差,会出现密集区;时效温度较低 3#和 4#样品,

Si 在晶界分布的有较好的均匀性, 对基体的割裂作用小, 塑性较好, 可提高疲劳性能。由此可见, 材料的静态力学性能(屈服强度)主要跟晶界硅的数量有关, 数量越多, 屈服强度会越高; 而材料的动态力学性能(疲劳性能)主要跟晶界硅的分布有关, 分布越均匀, 疲劳性能越好。

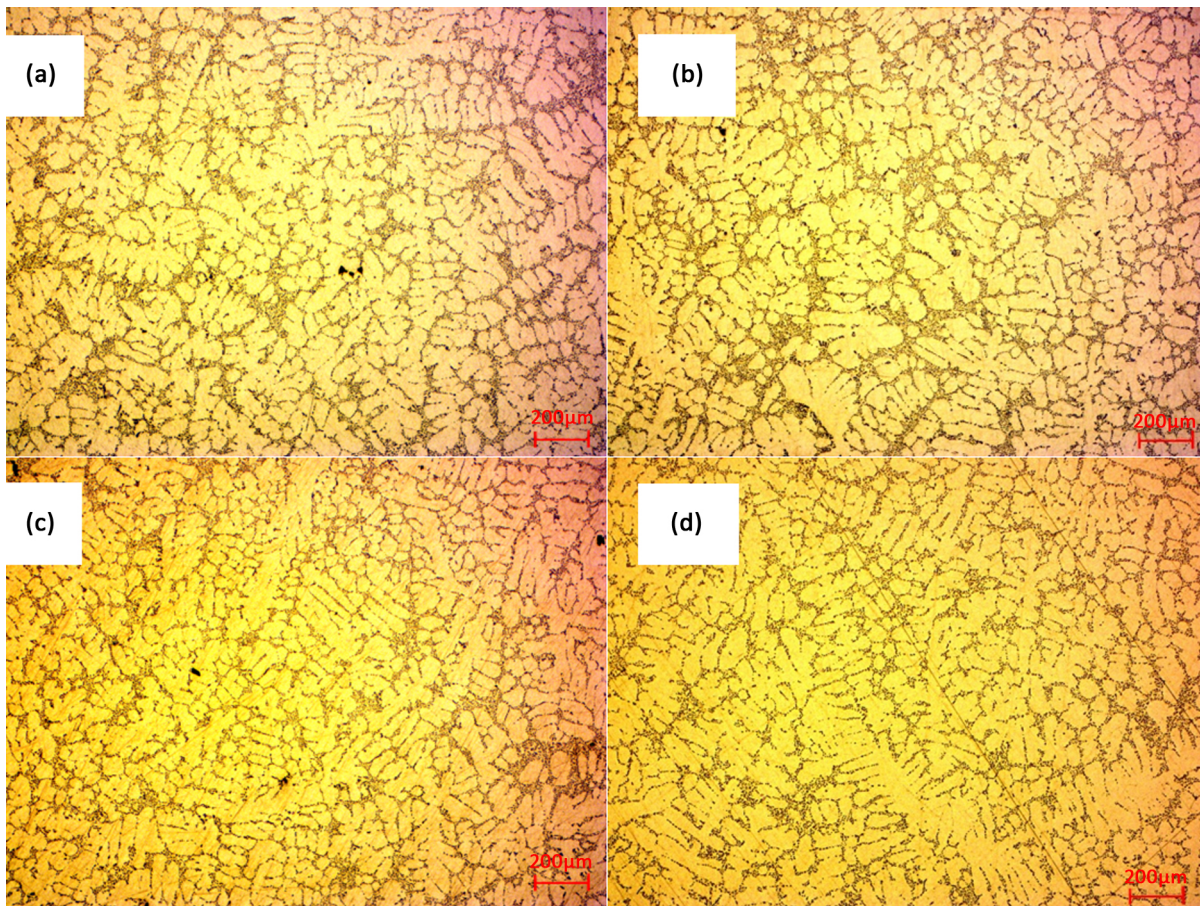


Figure 2. Metallographic micrograph of AlSi7Mg0.4 alloy with different aging treatments: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#
 图 2. 不同时效处理条件下 AlSi7Mg0.4 合金的金相显微照片, (a) (b) (c) (d) 分别为 1 到 4 号样品

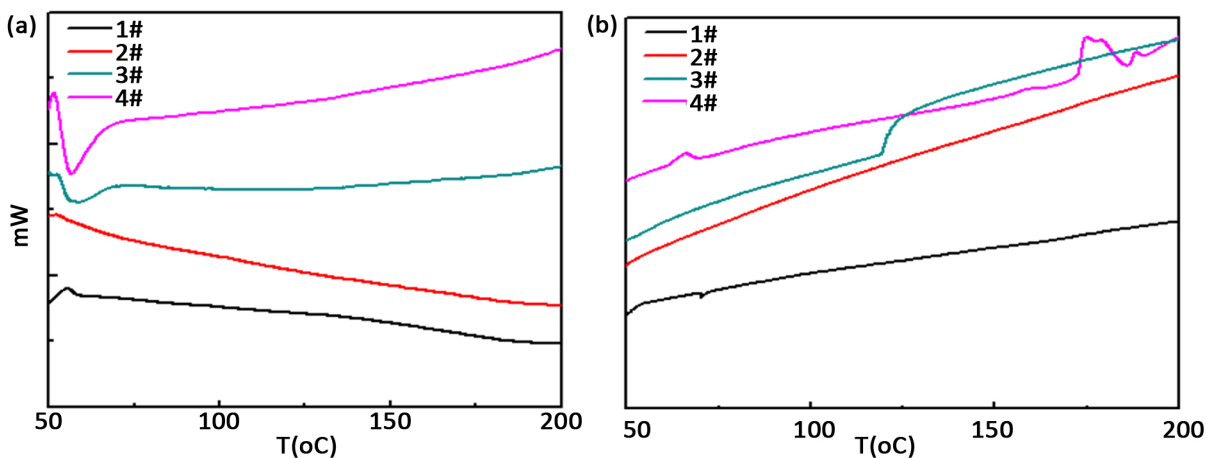


Figure 3. DSC curves before (a) and after (b) fatigue testing
 图 3. 疲劳测试前(a)和测试后(b)的差示扫描量热法(DSC)曲线

为了进一步分析不同时效处理的样品,对疲劳测试前后的所有样品进行了 DSC 分析,如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,疲劳测试前,当温度从 50 度到 200 度时,1#和 2#样品没有明显的吸热反应,50 度附近的放热峰应该是水;3#和 4#样品具有明显的吸热峰,分别在 60°C 和 58°C,表明有反应。从图 3(b)中可以看出,疲劳测试后,四个样品均没有明显的吸热峰存在。因此,该铸件在低温长时间运行,会析出某种(Mg, Si)强化相,阻碍位错运动,提高塑性,在运行过程中会提高使用性能。

4. 结论

本论文中的 AlSi7Mg0.4 铸造铝合金中 α -Al 基体晶粒大小范围变化不大,主要引起性能变化因素是第二相的大小和分布。屈服强度随着时效温度的降低而降低,断后伸长率随时效温度的降低而升高。当加载次数 $N = 10^4$, 1#、2#、3#和 4#样品的可承受的最大加载载荷为 21.899 kN、22.415 kN、30.628 kN 和 35.208 kN,只有时效温度较低的 3#和 4#样品满足大于 30 kN 的使用要求。结合 XRD 结果分析,时效温度低的样品形成的少量 Si 的化合物,有利于增加试样的疲劳寿命。结合金相分析,较高的时效温度会降低 Si 在晶界分布的均匀性,出现密集区;时效温度低, Si 在晶界分布的有较好的均匀性,对基体的割裂作用小,塑性较好,提高疲劳性能。结合 DSC 分析,长时间低温运行,会析出某种(Mg, Si)强化相,阻碍位错运动,提高塑性,在运行过程中会提高使用性能。综上所述,较低的时效温度会提高其疲劳性能。

参考文献

- [1] 范宋杰, 何国球, 刘晓山, 徐坡. A356 铝合金力学性能与微观结构[J]. 有色金属, 2008, 60(4): 5-8.
- [2] Peng, J.H., Tang, X.L., He, J.T. and Xu, D.Y. (2011) Effect of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Properties of A356 Alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 1950-1956. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60955-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60955-2)
- [3] 赵丽娟. 过热处理温度对 AlSi7Mg0.6 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 105-106.
- [4] 张恒华, 许珞萍, 邵光杰, 余忠土. AlSi7Mg 合金半固态压铸件热处理强化机理研究[J]. 材料热处理学报, 2003, 24(2): 62-64.
- [5] 姜峰, 索忠源, 刘祥玲, 关鲜洪, 王毅坚. 热处理对不同 Sr 含量变质 A356 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造, 2019, 68(1): 29-33.
- [6] 龙锦中, 梁艳娟, 马俊, 贾勤馨. A356 合金铸造工艺及组织与性能研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1417-1420.
- [7] Ridvan, G., Serhat, A., Alptekin, K., Kerem, A. and Ahmet, K. (2018) Influence of T6 Heat Treatment on A356 and A380 Aluminium Alloys Manufactured by Thixoforging Combined with Low Superheat Casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **28**, 385-392. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64672-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64672-2)
- [8] 孙成宁, 孙悦. 固溶处理对 A356 铸造铝合金力学性能影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(2): 422-423+427.
- [9] 刘海红, 苏磊, 窦沙沙. A356 合金的组织与热疲劳性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 1022-1025.