DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.002

固溶时效工艺对铸造 A357 铝合金组织与性能的研究

吴恺威,雍学超,周细应,王付鑫,李绍伟
(上海工程技术大学 材料工程学院,上海 201620)

摘　要:利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)等手段研究了固溶、时效工艺对 A357 铸造铝合金组织与性能的影响。结果表明,A357 铸造铝合金的显微组织由 α-Al 基体、共晶硅及 Mg_2Si 相组成。在 540 ℃×4 h 固溶和 145 ℃×4 h 时效处理后,共晶硅更加圆整和均匀,共晶硅、Mg_2Si 相均匀分散在 α-Al 基体晶界处,拉伸性能大幅度提高,使 A357 铝合金铸件性能达到预期要求。A357 铸造铝合金的最佳热处理工艺为,固溶处理:(540±3)℃×4 h;时效处理:(145±5)℃×4 h。

关键词:A357;铸造铝合金;固溶;人工时效;组织

中图分类号:TG156.94; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1113-05

Research on Solution and Aging Process of Microstructure and Properties of A357 Cast Alloy

WU Kaiwei, YONG Xuechao, ZHOU Xiying, WANG Fuxin, LI Shaowei
(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Sciences, Shanghai 201620, China)

Abstract: The effects of solution and aging process on the microstructure and properties of A357 aluminum alloy were studied by means of optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The results show that the microstructure of A357 cast aluminum alloy is composed of α-Al matrix, eutectic silicon and Mg_2Si phase. After solid solution at 540 ℃× 4 h and aging treatment at 145 ℃×4 h, eutectic silicon is more round and uniform, eutectic silicon and Mg_2Si phases are uniformly dispersed at the grain boundary of α-Al matrix, and the tensile property is greatly improved, so that the performance of A357 aluminum alloy casting reach the expected requirements. The optimal heat treatment process of A357 cast aluminum alloy is: solid solution treatment: (540±3) ℃×4 h; Aging treatment: (145±5) ℃×4 h.

Key words: A357; casting alloy; solution; artificial aging; microstructure

铝硅合金是一种重要的铸造铝合金,由于其具有密度小、比强度高、耐磨性好、热膨胀系数低等优点,因而被广泛应用于汽车、航空航天、船舶海洋、化学化工等领域[1,2]。这势必对铸造铝合金性能上提出更高要求,不仅要有较高强度,也要有较好的塑性。

A357 铝合金的力学性能取决于合金的化学成分、熔炼工艺、铸造工艺及热处理工艺[3-6]。对工业过程中提高 A357 铸造铝合金的力学性能有效而直接方法,通过对固溶时效工艺改善其铝合金组织性能,获得最佳工艺参数下材料的综合力学性能。本文研究了固溶时效工艺参数对 A357 铸造铝合金的组织和性能影响,将为工业生产中 A357 铸造铝合金材料热处理工艺提供理论和试验指导意义。

1　实验材料和方法

1.1　实验材料

实验所用的材料为铸造 A357 铝合金,其化学成分如表 1。

表1 A357铸造铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of A357 casting alloy

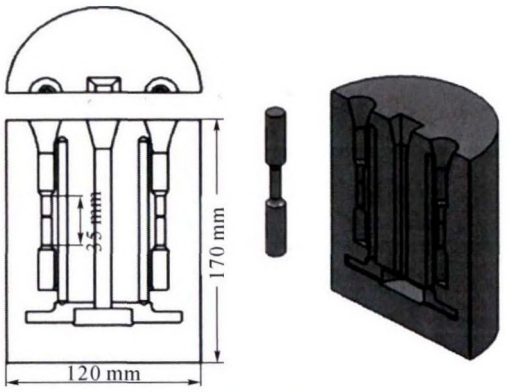
Al	Si	Mg	Sr	Ti	Fe	Cu	Mn	Zn	Ca	Ni
Base	7.26	0.52	0.016	0.13	<0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

1.2　实验方法

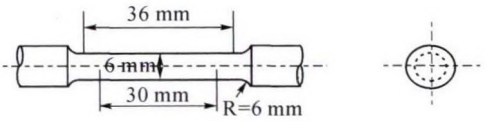
将原材料按表 1 设计的合金成分配制并在 200~300 ℃下预热,然后石墨坩埚电阻炉在温度 760~830 ℃下加原材料熔炼,熔化后通入氩气除气扒渣,静置 5~10 min;加入铝锶、铝钛硼中间合金细化变质并搅拌,随后保温 5~15 min 后通入氩气精炼,将温度降至 700±10 ℃静置 10~20 min,在模具温度 250~400 ℃下浇铸成型(如图 1)。

收稿日期:2020-07-24

作者简介:吴凯威(1990-),河南平顶山人,硕士,实验室教师.研究方向:金属材料组织和性能研究.
电话:13122775197,E-Mail: tianquzongzhu@163.com



(a)铸造模具



(b)拉伸试样

图 1 铸造模具和拉伸试样

Fig.1 Cast iron mold and tensile testing sample

表 2 铸造 A357 铝合金的固溶和时效处理工艺

Tab.2 Solution and aging press of A357 casting alloy

编号	固溶温度 /℃	固溶时间 /h	时效温度 /℃	时效时间 /h
A	520	0/2/4/6	145	4
	530	0/2/4/6	145	4
	540	0/2/4/6	145	4
	545	0/2/4/6	145	4
B	540	4	125	0/2/4/6
	540	4	125	0/2/4/6
	540	4	125	0/2/4/6
	540	4	125	0/2/4/6

结合 Al-Si 合金相图、铸造铝合金热处理工艺(T6)、参考国内外学者在热处理工艺[7-10]对 A356 铝合金方面的研究，利用正交法设计出铸造 A357 铝合金的热处理工艺参数(如表 2)。实验中用真空炉进行固溶处理，淬火转移时间小于 15 s，淬火水温控制在 60~70 ℃；人工时效工艺在真空烘箱中进行。

利用蔡司显微镜对铸态、固溶、时效工艺获得 A357 铝合金样品观察其金相组织。

利用 Zwick 拉伸试验机对铸态、固溶、时效工艺获得 A357 铝合金试棒检测力学性能。

利用日立扫描电镜检测 A357 铝合金材料断口形貌。

利用布氏硬度计测定其表面硬度变化值。

2 实验结果与分析

2.1 固溶和时效工艺对铸造 A357 铝合金力学性能的影响

2.1.1 固溶工艺对铸造 A357 铝合金力学性能的影响

图 2 为不同固溶处理工艺对 A357 铝合金拉伸性能的影响。可以看出，随固溶处理时间的延长，A357 合金的强度上升，而伸长率先增后降趋势；从图中也可看出，随固溶温度的提高，A357 合金的强度呈上升趋势，伸长率同样也先增后降变化；同时试验验证结果与铝合金固溶强化理论完全符合[11]。在时效工艺制定在 145 ℃和 4 h 下，通过变化固溶温度和固溶时间的工艺参数对 A357 铝合金的拉伸性能验证，发现固溶工艺在 540 ℃和 4 h 时，抗拉强度和伸长率相对最佳。推断该工艺下，A357 铝合金的显微组织也为最优态（选用该工艺下组织进行验证也和试验数据吻合）。

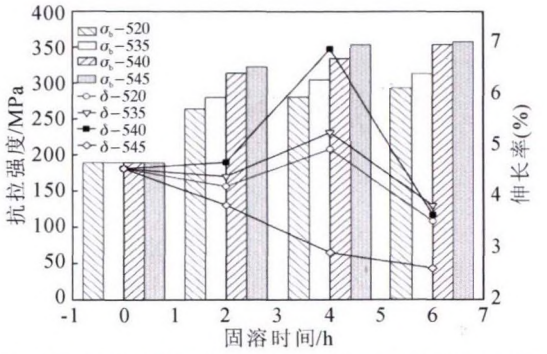


图 2 不同固溶处理工艺对 A357 铝合金拉伸性能的影响

Fig.2 Effect of different solution treatment process on tensile properties of A357 cast alloy

2.1.2 时效工艺对铸造 A357 铝合金力学性能的影响

图 3 为不同时效处理工艺对 A357 铝合金拉伸性能的影响。可以看出，随时效处理时间的延长，A357 合金的强度上升，而伸长率先增后降趋势；从图中也可看出，随时效温度的提高，A357 合金的强度呈上升趋势，延伸率同样也先增后降变化；同时试验验证结果与铝合金时效强化和过剩相的理论完全符合[12,13]。固溶工艺制定在 540 ℃和 4 h 下，通过改变时效温度和时效时间的工艺参数对 A357 铝合金的拉伸性能验证，发现时效工艺在 145 ℃和 4 h 时，抗拉强度和伸长率相对最佳。推断该工艺下，A357 铝合金的显微组织也为最优态(选用该工艺下

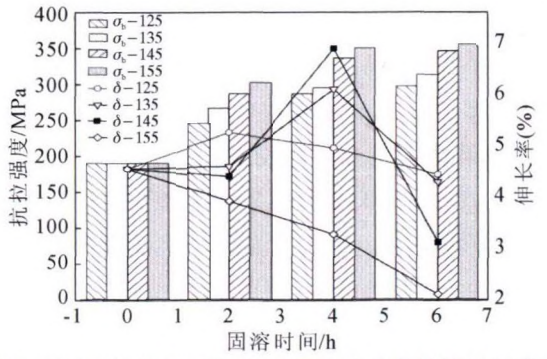


图 3 不同时效处理工艺对 A357 铝合金拉伸性能的影响

Fig.3 Effect of different aging process on tensile property of A357 cast alloy

组织进行验证也和试验数据吻合）。

综上可知，图 2 固溶处理工艺和图 3 时效处理工艺对 A357 铝合金拉伸性能的影响。结合工业上应用的可行性，因此，确定的 A357 铸造铝合金最佳的固溶和时效工艺为：固溶温度为 540 ℃，固溶时间为 4 h；时效温度为 145 ℃，时效时间为 4 h。

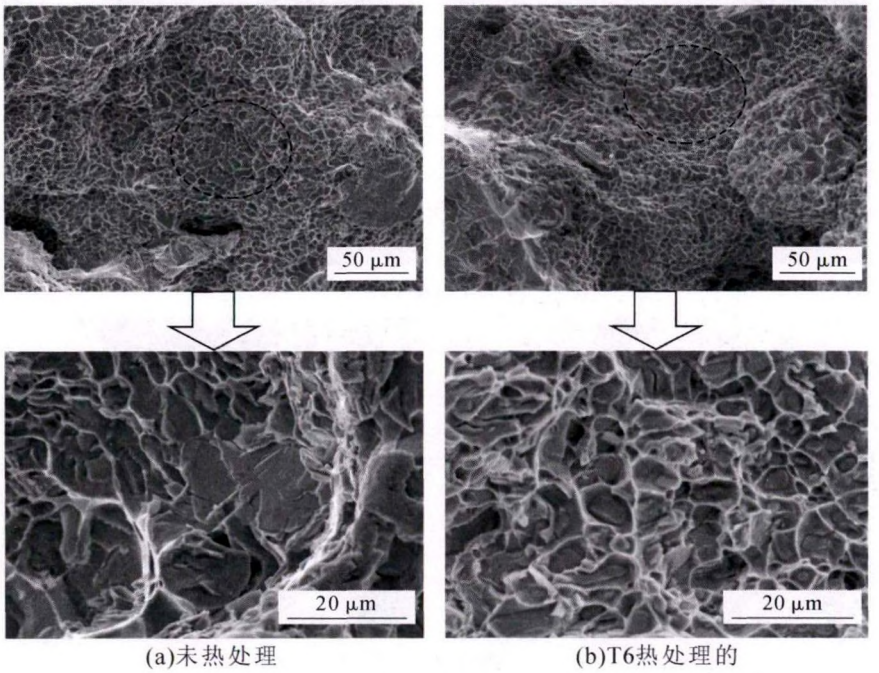
2.2　断口形貌分析

图示 4 不同工艺状态下 A357 铝合金拉伸试样的 SEM 断口形貌图。可以看出，断口上分布着多数韧窝形态，可认定其拉伸断裂方式都为韧性断裂。但未处理样(a)分布着两种形态：韧窝和少量的河流花样，从选定区域放大可以看出脆性形态较多，韧窝的区域小。而 T6 热处理状态下，(b)拉伸断口上的韧窝占有区域明显增多，能够清楚地看出断裂上撕裂棱，从分布区域上可以看出分布着大面积区域的韧窝形貌，韧窝大且深，塑性变形充分；发现韧窝内也存在二相粒子，该工艺状态下呈现韧性断裂的状态。结合断口形貌和机械性能说明 A357 铝合金在 T6 工艺下材料的抗拉强度、屈服强度及伸长率均表现最佳状态。

2.3　微观组织分析

图 5 为铸造态下 A357 铝合金的微观组织金相。从合金的金相可看出占据很大面积区域的白色为 α-Al 基体相，不规则的共晶硅呈小块状和针状分布于 α-Al 基体晶界上；α-Al 基体组织为等轴晶和粗晶，晶粒粗大且不均匀，放大呈椭圆形状；共晶硅组织呈现针状形态，分布上有部分为偏析区域，放大针状形态极为明显。

图 6 为 T6 工艺状态下 A357 铝合金的微观组织金相。从合金的金相可看出占据很大面积区域的仍为 α-Al 基体相，规则的共晶硅呈球形颗粒状分布于 α-Al 基体晶界上；α-Al 基体组织基本上为等轴晶，未见粗晶状形态，晶粒细小且均匀化；共晶硅呈球形颗粒形态完全呈现于 α-Al 基体晶界处。结合时效强化、固溶强化理论及位错理论[14,15]说明了共晶硅和析出的 Mg_2Si 球粒化程度对 A357 铝合金的机械



(a)未热处理　　(b)T6热处理的

图 4 不同工艺下 A357 铝合金拉伸试样断口的 SEM 形貌

Fig.4 SEM image of A357 tensile sample fracture under different conditions

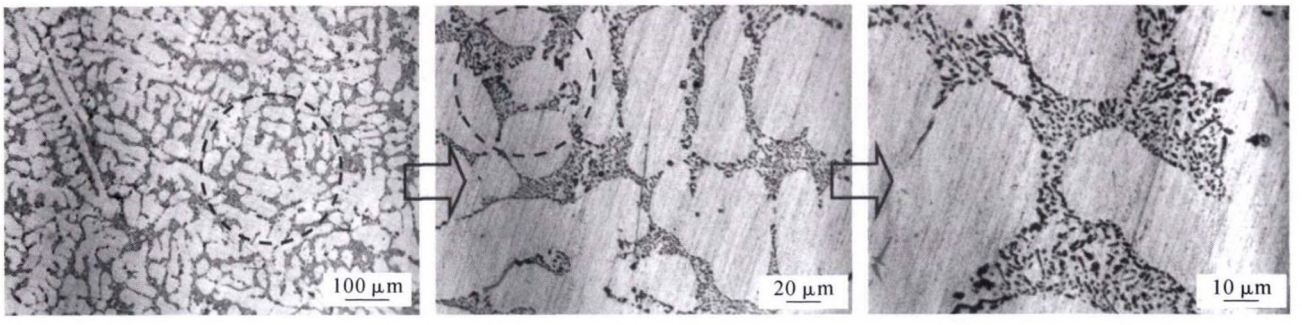


图 5 A357 铝合金的铸态微观组织

Fig.5 As-cast microstructure of A357 alloy

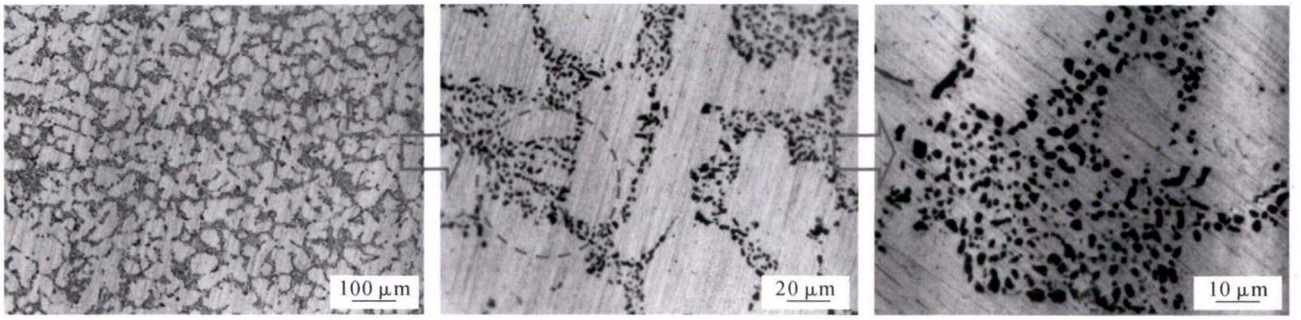
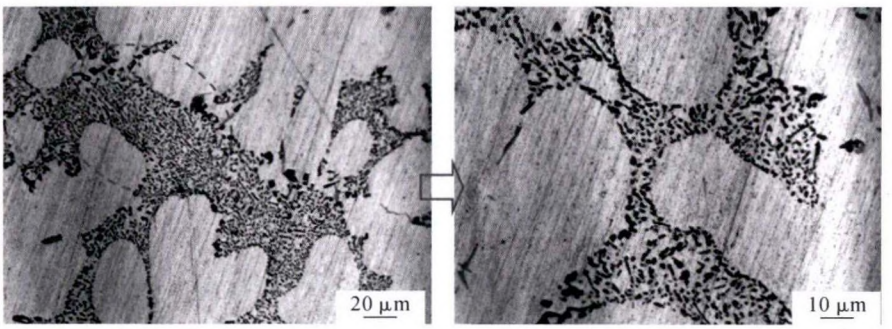


图 6 T6 热处理的 A357 铝合金的铸态微观组织
Fig.6 Microstructure of T6 heat treated A357 alloy

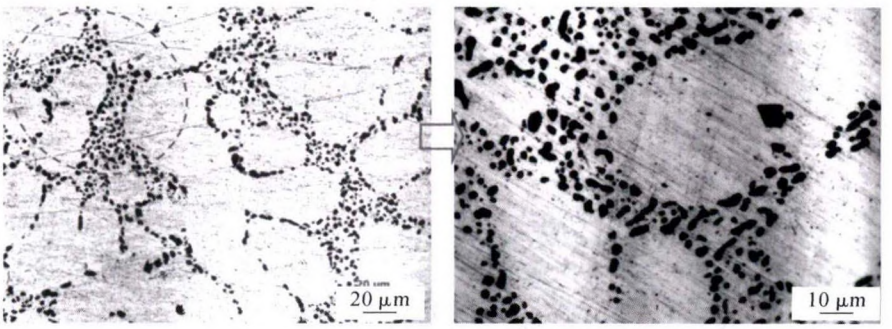
性能具有很好作用，也和实际试验数据相吻合。进一步说明该工艺下 A357 铝合金组织和机械性能为最佳参数。

2.4 共晶硅的组织形态分析

图 7 不同工艺状态下 A357 铝合金的共晶硅形貌。(a) 铸态下，A357 铸造铝合金的共晶硅形貌，可看出，白色组织为初始 α-Al 相，针片状组织为共晶硅。(b)在 T6 工艺状态下，合金的显微组织由树枝晶向等轴晶发生转变，α-Al 基体相由(a)中所示逐渐转变更小的区域，而共晶硅的组织由针状转为球形和椭圆球，且球化效果显著，分散相对均匀化。对比(a)与(b)明显地看出，该工艺下共晶硅的组织形貌更圆整、均匀化。说明此工艺获得共晶硅的组织形貌为最佳状态。



(a)未经T6热处理



(b)T6热处理

图 7 不同工艺状态下 A357 铝合金的共晶硅形貌
Fig.7 Eutectic silicon optical microstructures of A357 alloys with different condition

3 结论

(1)确定的 A357 铸造铝合金最佳的固溶时效工艺为：固溶温度为(540±3)℃，固溶时间为 4 h；时效温度为(145±5)℃，时效时间为 4 h；可获得优异的性能，且能为工业提供较优的工艺参考。

(2)由(1)获得最佳固溶时效工艺参数，对 A357 铸造铝合金组织与断口形貌分析可知，组织上共晶硅形貌更圆整、均匀化，共晶硅、Mg_2Si 相均匀分散在 α-Al 基体晶界处；Mg_2Si 相在该工艺参数下能析出并起到很好的时效强化的作用。

参考文献：

[1] Khushubo T, Gaurav G, Narendra K, et al. Effect of Primary Silicon Refinement on Mechanical and Wear Properties of a Hypereutectic Al-Si Alloy [J]. Silicon, 2018, 10(5): 2227-2239.

[2] Dwivedi D K, Arjun T S, Thakur P, et al. Sliding wear and friction behavior of Al-18% Si-0.5% Mg alloy [J]. Journal of Materials

(下转第 1133 页)

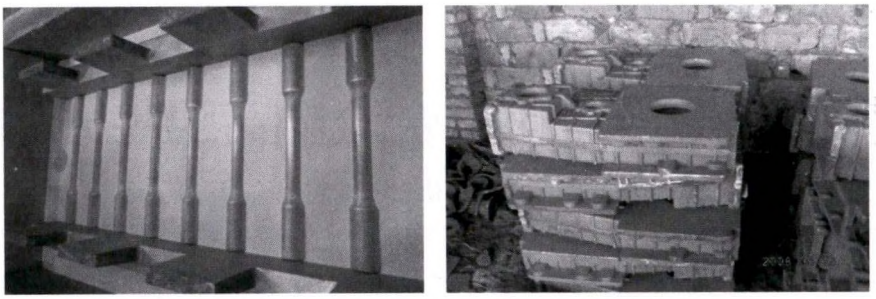


图 3 浇注铸铁件所用磷酸盐自硬砂铸型及浇注的铸件

Fig.3 Sand mold made by self-set sands bounded with modified phosphate inorganic bounder and poured castings

140 目大林标准砂，环境温度为 20～25 ℃，空气相对湿度 RH 为 55%~70%。

2 生产性验证

图 3 是在西安某铸造厂使用磷酸盐自硬砂制造铸型及浇注的铸铁件。结果表明，磷酸盐自硬砂强度高，能够满足使用要求，而且溃散性良好。浇注结果表明，相比水玻璃砂来说，磷酸盐自硬砂溃散性良好，完全能够用于实际生产。

3 结论

与有机树脂砂相比，改性磷酸盐无机粘结剂自硬砂的粘结强度已经达到或接近前者的水平，通过生产实验验证，改性磷酸盐无机粘结剂自硬砂能够很好地满足实际生产需要，其发气性较小，为 6.3 mL/g，不仅能够有效降低铸件的气孔缺陷，而且因为其优异的溃散性能，还可以代替水玻璃砂用于浇注铸钢、铸铁件，以及代替有机树脂砂用于浇注低熔点合金。

参考文献：

[1] 朱纯熙，何芝梅，卢晨. 铸造工作者应重视二恶英和呋喃的环境污染问题[J]. 铸造, 2002(8): 502-504.

[2] 张友寿，薛亦渝，黄晋，等. 新型改性铸造用磷酸盐无机树脂自硬砂性能的研究[J]. 铸造技术, 2005(4): 268-269.

[3] 杨凯，张景伟，陈明，等. 铸造材料伸缩尾翼气动载荷下接触问题的分析与研究[J]. 精密成形工程, 2011(1): 18-22.

[4] 张友寿，黄晋，夏露，等. 新型改性磷酸盐无机铸造粘结剂的优越性[J]. 铸造技术, 2009(12): 1504-1506.

（上接第 1116 页）

Pressing Technology, 2004, 152(3): 323-328.

[3] 王茂源. 铝合金化学成分的含量对其屈服极限的影响 [J]. 中国科技纵横, 2019, 000(002): 221-223.

[4] 张春莉. 汽车车轮用 A356.2 铝合金锭熔炼生产工艺研究[J]. 有色冶金节能, 2017, 33(003): 35-37.

[5] 王彦凤，杨正，邱常明，等. 基于响应面法的 A357 铝合金金属型铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019(10): 103-110.

[6] 王荣滨. 铸造铝合金缺陷分析与热处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2008, 37(4): 10-12.

[7] 刘树红，凌缔成，黄丹丹，等. 多元铝合金相图热力学、热物性质数据库及其应用[J]. 中国材料进展, 2015, 34(4): 049-59.

[8] Wang Q G, Apelian D, Lados D A. Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects [J]. Journal of Light Metals, 2001, 1(1): 73-84.

[9] Lim S, Kim S, Lee C G, et al. Tensile behavior of friction-stir-welded A356-T6/Al 6061-T651 bi-alloy plate [J]. Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and, Materials Science), 2004, 35(9): 2837-2843.

[10] Zhen-Zhong C, Chuan-Hao X, Cheng-Xiang Z. The effects of heat treatment on fatigue properties of A357 casting aluminum alloy [J]. Light Metals, 2010, 50(7): 58-61.

[11] Guo F B, Zhu B H, Jin L B, et al. Microstructure and mechanical properties of 7A56 aluminum alloy after solution treatment [J]. Rare Metals, 2017(7): 1-8.

[12] Jang J H, Nam D G, Park Y H, et al. Effect of solution treatment and artificial aging on microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Siety of China, 2013, 23(3): 631-635.

[13] Manickaraj J, Liu G, Shankar S. Effect of Incubation Coupled with Artificial Aging in T6 Heat Treatment of A356.2 Aluminum Casting Alloy [J]. International journal of metal casting, 2011, 5(4): 17-34.

[14] Sadeler R, Totik Y, Gavgali M, et al. Improvements of fatigue behavior in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening [J]. Materials & Design, 2004, 25(5): 439-445.

[15] Alexopoulos N D, Pantelakis S G. Quality evaluation of A357 cast aluminum alloy specimens subjected to different artificial aging treatment [J]. Materials & Design, 2004, 25(5): 419-430.