

汽车用 AlSi7Mg 铸造铝合金的组织 and 性能研究

吴 亮¹, 柯华波², 周红云³, 肖红军⁴

(1. 广东工贸职业技术学院 实训中心, 广东广州 510510; 2. 广汽埃安新能源汽车有限公司, 广东广州 511400;
3. 广东工贸职业技术学院 机电工程学院, 广东广州 510510; 4. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 广东佛山 528225)

摘要: 研究了汽车转向节部件AlSi7Mg铝合金的组织 and 性能, 主要通过不同保温温度 and 时间的固溶热处理制度, 研究了固溶热处理工艺对AlSi7Mg铸造铝合金的组织 and 力学性能的影响规律。试验结果表明: 538 ℃和8 h保温后, 合金固溶更加充分, 热处理后合金的共晶组织球化程度较高, 固溶温度对共晶组织形态的影响要比保温时间的影响大得多, AlSi7Mg合金在538 ℃/8 h+淬火+160 ℃/6 h热处理状态下, 材料的综合性能达到了较高的水平, 若材料的韧性满足产品要求, 可以降低固溶热处理的保温时间, 以提高热处理效率。

关键词: AlSi7Mg铝合金; 固溶热处理; 微观组织; 力学性能

在国家倡导碳达峰、碳中和的大背景下, 部件系统轻量化成为汽车行业节能减排的重点发展趋势^[1-2]。汽车车身及底盘系统部件的轻量化作为主要研究热点, 铝合金成为车身和底盘部件的优选材质^[3]。目前汽车轮毂、防撞梁、四门两盖等都已经能够运用不同类型的铝合金材质, 对于汽车底盘部件的轻量化设计, 在现阶段的汽车工业领域, AlSi7Mg铝合金已经获得广泛的应用^[4-5]。

铸态的AlSi7Mg铝合金通过固溶时效处理后才能达到设计使用指标, 在铝合金的固溶处理阶段, 防止低熔点共晶体在固溶加热时熔化, 即出现过烧, 固溶温度应低于三元共晶 ($\alpha + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si}$) 温度^[6]。在固溶处理温度下保温的目的是保证得到饱和度最大的固溶体, 铸造铝合金由于含有较多的合金元素, 因此第二相比比例大且组织粗大, 其溶解速度远低于变形铝合金, 因而它所需要的保温时间远比变形铝合金要长^[7-8]。

本文通过对照试验研究不同固溶热处理工艺对A356铸造铝合金组织 and 性能的影响。优选出适合AlSi7Mg铝合金的最佳固溶处理工艺参数, 通过热处理温度及保温时间的良好搭配来实现短时高效热处理。

1 试验材料与方法

材料采用A356.2, 控制成分如表1所示, 参照标准ASTM B 108-03a。通过低压铸造工艺成形汽车转向节部件, 为金属型铸件, 热处理试样均取自在转向节的同一部位, 取样如图1所示, 每件切取一根。通过MTS电子万能拉伸试验机进行拉伸实验, 利用布氏硬度计开展试样的硬度测试。金相试验先后进行样品镶嵌、磨抛以及腐蚀, 然后利用光学显微镜开展金相显微组织观察。AlSi7Mg铝合金低压铸造件切割获得拉伸试样, 具体尺寸如图2所示。

针对原热处理工艺, 固溶温度 (538 ± 5) ℃, 保温时间8 h, 改变固溶温度

表1 AlSi7Mg合金成分控制范围
Table 1 Composition ranges of the AlSi7Mg aluminum alloy

项目	Si	Mg	Sr	Ti	Fe	Cu	单个杂质	杂质总和
范围	6.5~7.5	0.4~0.45	0.01~0.025	≤0.2	≤0.2	≤0.1	≤0.05	≤0.15
实际	6.7	0.41	0.02	0.15	0.12	0.1	0.01	0.1

作者简介:

吴亮 (1985-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向机械设计与开发、内燃机原理与排放控制、机械实训教学。
E-mail: 240694831@qq.com

中图分类号: TG146.21;
TG166.3

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977 (2022) 12-1525-04

基金项目:

广东省教育科研“十三五”规划课题《“互联网+”下创新创业教育嵌入高职产品设计开发课程路径研究》(2018GXJK304)。

收稿日期:

2022-04-15 收到初稿,
2022-06-06 收到修订稿。



图1 汽车转向节及试验取样位置
Fig. 1 Automobile steering knuckle and test sampling position

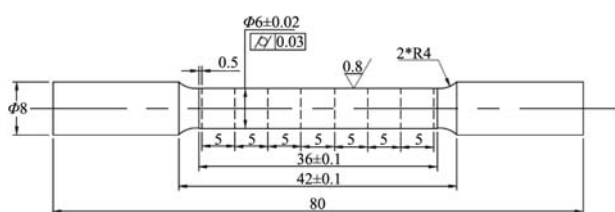


图2 圆柱形拉伸试棒尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of size of the cylindrical tensile sample
和保温时间。由于时效影响较小，仍采用原时效参数，时效温度160℃，保温时间6 h。同一炉中放置三件铸件，进行固溶处理，温度控制（528±5）℃、（538±5）℃、（548±5）℃，保温时间分为4 h和8 h（表2）。60~80℃水淬火20 min后，空气中放置2 h，进行160℃时效处理，保温时间6 h，后空冷。实验设备采用GWL-1200LB箱式电炉和时效保温炉。待热处理

表2 热处理方案
Table 2 Heat treatment scheme

固溶温度/℃	保温时间/h
528	4
528	8
538	4
538	8
548	4
548	8

结束后，分别在铸件的同一位置进行取样测试。

2 试验结果及分析

2.1 铝合金铸态组织

AlSi7Mg铝合金在铸态下基体呈现为初生α-Al组织，组织形貌较大程度趋向于较多的树枝晶形态。二次枝晶较为细小，并且二次枝晶间距较小，说明合金在较低铸造温度下发生凝固。另外，铸态组织中还存在少量的初生α-Al等轴晶组织，说明AlSi7Mg合金凝固时间较短，实现了较快速度的凝固，初生α-Al组织未来得及生长为较大的树枝晶组织。在枝晶臂间形成Al-Si共晶组织，铸态合金凝固时，在枝晶间形成Si₂Mg、Si及含Fe的化合物等，呈片状无规律弥散分布，暗色的为含Fe相组织，深色的为共晶Si，共晶组织呈不规则的形态，如图3所示为典型的亚共晶组织形貌。

2.2 热处理后的铝合金组织

在160℃/6 h时效热处理条件下，研究了不同固溶温度对AlSi7Mg合金组织的影响，分别做了528℃、538℃、548℃以及保温4 h和8 h的固溶处理。从图4中看出，在528℃保温4 h，由于保温时间短，固溶温度低，合金中的共晶元素及强化相未充分溶解，未完全溶入固溶体中，在枝晶间仍存在少量片状的共晶成分；在538℃固溶保温后，共晶Si及强化相形状明显更加圆润，呈球状形态弥散分布，铸件在此固溶温度及保温时间下，淬火后得到了饱和程度更高的固溶体。本合金中添加了Al-10Sr中间合金，Sr对共晶Si起到了变质的作用，通过热处理后对共晶成分的析出形貌转变也起到了重要作用；548℃固溶保温后部分共晶成分大小不一，变得不均匀，共晶Si尺寸呈现出较大的差别，说明在较高的固溶温度下共晶成分发生了部分溶解。

从528℃保温8 h的试样金相来看，仍然存在尺寸较大片状的共晶组织，形貌没有完全球状化，并未形成充分的过饱和固溶体，538℃/8 h保温后，共晶组织

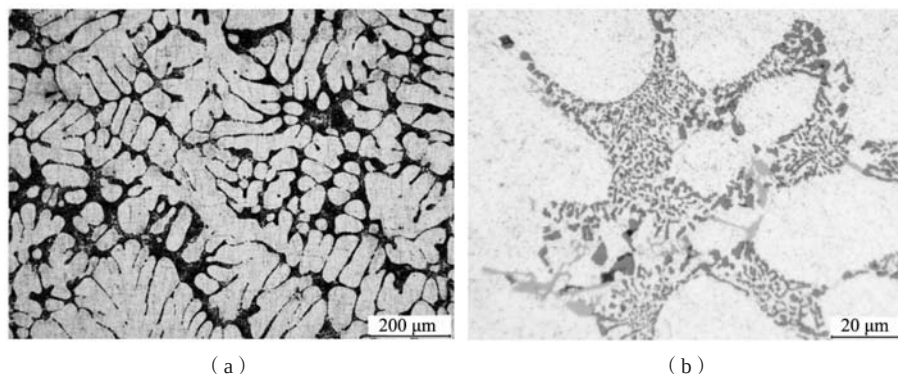


图3 AlSi7Mg铝合金铸态试样的显微组织
Fig. 3 Microstructures of the as-cast AlSi7Mg aluminum alloy

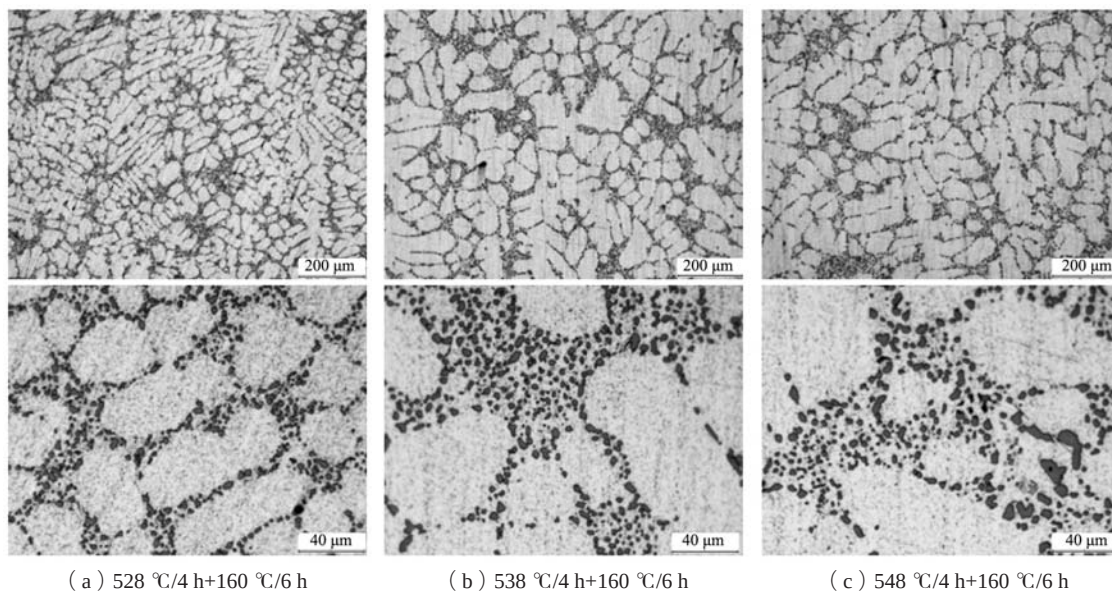


图4 不同固溶温度下AlSi7Mg铸造铝合金试样的显微组织

Fig. 4 Microstructures of the AlSi7Mg cast aluminum alloy samples at different solution temperatures

球化程度较高, 548 °C/8 h保温后, 尺寸较小的球状共晶组织相对减少。从图5中看出, 与固溶保温时间4 h的组织形态相比, 固溶保温时间较长的合金共晶组织尺寸较大。固溶温度对Si相形态的影响要比保温时间的影响大得多。一般来讲, 固溶温度每降低10 °C相当于固溶保温时间减少了4~8 h。

2.2 热处理工艺对铝合金力学性能的影响

铸件热处理后的强韧性均得到了大幅度提升, 528 °C固溶处理条件下, 铸件合金成分均未得到充分的固溶, 因此抗拉强度和伸长率均较低。铸件从538 °C固溶处理开始, 铸件的强韧性均达到了较高的水准, 548 °C

固溶处理的铸件伸长率均出现了下降的趋势。在同一固溶温度下, 保温时间较长, 那么热处理后试样的屈服强度均较小, 其伸长率均较大, 韧性较好。因此可以根据铸件的要求, 通过固溶热处理工艺调控材料的屈强比以及伸长率。从表3的热处理结果看出, 固溶热处理工艺对铝合金铸件的硬度影响不是很明显。

AlSi7Mg合金固溶强化的本质是因为Si、Mg等合金元素的溶入使得 α -Al基体组织发生晶格畸变, 导致所产生的应力场和位错周围的应力场发生相互作用, 形成柯氏气团, 阻碍位错运动, 提高铸造铝合金的强度。固溶温度越高, 保温时间越长, 溶质原子溶入越充分, 过饱和度也越高, 强化效果就越好。但是

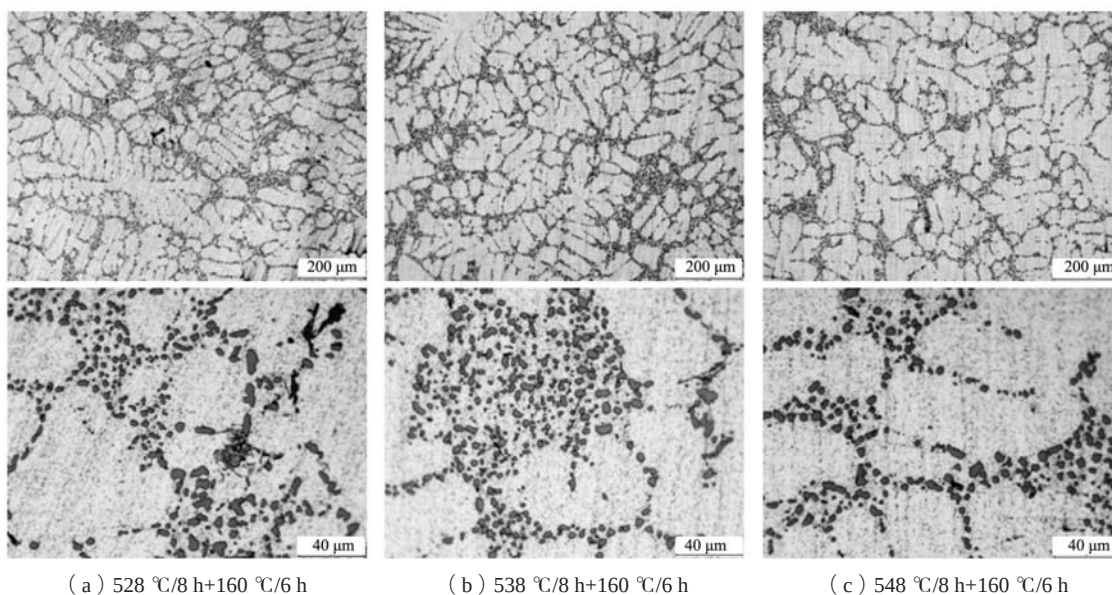


图5 不同固溶温度下AlSi7Mg铸造铝合金试样的显微组织

Fig. 5 Microstructures of the AlSi7Mg cast aluminum alloy samples at different solution temperatures

表3 热处理后性能
Table 3 Mechanical properties after heat treatment

热处理 工艺	抗拉 强度/MPa	屈服 强度/MPa	伸长率 /%	硬度 HBW
未热处理试样	270.8	223.4	5.37	-
528 ℃/4 h+淬火+160 ℃/6 h	309.8	237.7	8.20	96
528 ℃/8 h+淬火+160 ℃/6 h	308.2	231.6	11.27	94
538 ℃/4 h+淬火+160 ℃/6 h	322.1	252.1	9.33	95
538 ℃/8 h+淬火+160 ℃/6 h	317.0	236.1	13.13	95
548 ℃/4 h+淬火+160 ℃/6 h	318.8	255.0	7.40	100
548 ℃/8 h+淬火+160 ℃/6 h	322.7	244.4	9.61	95

参考文献:

- [1] 李光霁, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 47-61.
- [2] 陈一哲, 赵越, 王辉. 汽车领域纤维复合材料构件轻量化设计与工艺研究进展 [J]. 材料工程, 2020, 48 (12): 36-43.
- [3] MANENTE A, TIMELLI G. Optimizing the heat treatment process of cast aluminium alloys [J]. Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys, 2011, 9: 197-220.
- [4] HAGHSHEENAS M, ZAREI-HANZAKI A, JAHAZI M. An investigation to the effect of deformation-heat treatment cycle on the eutectic morphology and mechanical properties of a Thixocast A356 alloy [J]. Materials Characterization, 2009, 60 (8): 817-823.
- [5] 周涛, 周细应, 答建成, 等. 热处理工艺对A356铝合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (8): 201-203.
- [6] 饶晓晓. A356 铸造铝合金热处理强化工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [7] 姜峰, 索忠源, 刘祥玲, 等. 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.
- [8] 姜巨福, 王迎, 肖冠菲, 等. 变质细化和热处理对挤压铸造成形A356铝合金构件性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2020, 34 (12): 881-891.

固溶温度过高或保温时间过长会导致组织粗大, 致使强化效果降低。

3 结论

(1) AlSi7Mg合金在538 ℃固溶效果较好, 共晶Si形貌更加圆润, 呈球状形态弥散分布; 固溶温度对Si相形态的影响要比保温时间的影响程度大得多。

(2) AlSi7Mg合金在538 ℃/8 h+淬火+160 ℃/6 h热处理状态下, 材料的综合性能达到了较高的水平, 若材料的韧性满足产品要求, 可以降低固溶热处理的保温时间, 以提高热处理效率。

Study on Microstructure and Properties of AlSi7Mg Cast Aluminum Alloy for Automobile

WU Liang¹, KE Hua-bo², ZHOU Hong-yun³, XIAO Hong-jun⁴

(1. Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Training Center, Guangzhou 510510, Guangdong, China; 2. GAC AIAN New Energy Automobile Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China; 3. Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Mechanical and Electrical Engineering Institute, Guangzhou 510510, Guangdong, China; 4. Foshan University, School of Mechatronic Engineering and Automation, Guangdong, Foshan 528225, Guangdong, China)

Abstract:

The microstructure and properties of AlSi7Mg aluminum alloy for automobile steering knuckle parts were studied. Mainly through the solution heat treatment system with different holding temperatures and times, the influences of the solution heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of the AlSi7Mg cast aluminum alloy were studied. The test results showed that the solid solution of the alloy was more adequate after holding at 538 ℃ for 8h, and the spheroidization degree of eutectic structure of the alloy was relatively high after heat treatment. The effect of the solution temperature on eutectic microstructure was much greater than that of the holding time. Under the condition of 538 ℃ / 8 h + quenching + 160 ℃ / 6 h heat treatment, the comprehensive properties of the AlSi7Mg alloy have reached a high level. If the toughness of the material meets the product requirements, the holding time of the solution heat treatment can be reduced and the heat treatment efficiency can be improved.

Key words: AlSi7Mg aluminum alloy; solution heat treatment; microstructure; mechanical properties