

冷却速率与 T6 热处理对铸造铝合金组织 和性能的影响

王 玮¹,张艳涛²,孙巧妍¹,姚彤辉¹

(1. 烟台南山学院,山东龙口 265700;2. 龙口市丛林铝材有限公司,山东龙口 265700)

摘要:研究了不同冷却速度下铸态与热处理后的铝合金微观组织和力学性能。结果表明:经过热处理后的铝合金组织中针状共晶硅转变为圆滑棒状,而冷却速度小的铝合金组织中硅颗粒尺寸变小;冷却速率对铝合金常温力学性能和耐腐蚀性影响不明显,而T6热处理可显著提高铝合金的常温、高温力学与耐腐蚀性能;常温拉伸试样的断口由基体中的微孔洞、撕裂棱和二次裂纹组成,随着测试温度从25℃提高到300℃,断裂特征由混合断裂转变为韧性断裂,带有韧窝和撕裂棱的微孔洞增加,二次裂纹减少。 关键词:模具温度;热处理;微观组织;力学性能

铝基铸造合金质量轻、铸造性好,通过热处理和机械处理可提高力学性能,其 在汽车、航空、造船和军事工程等行业的应用日益广泛^[1-4]。特别是铝硅镁铜合金, 被广泛应用于汽车发动机零部件,如活塞、缸体、发动机缸体等^[5-8]。随着环境和经 济等方面对轻量化要求的不断提高,汽车发动机零件中铝、硅、镁、铜合金的物理 性能应得到改善。因此,人们对提高Al-Si-Mg-Cu铸造合金的力学性能进行了大量研 究^[9-14],例如Mattos等研究了柴油机气缸盖用Al-Si-Mg铸造合金的疲劳性能和断裂微 观机制;Mohamed等建立了Al-Si-Mg-Cu铸造合金的组织、拉伸性能和断裂行为的关 系模型; 王乐采用固溶+深冷+时效处理,提高了铝合金的综合力学性能;Mrowka-Nowotnik^[15]特别研究了时效参数对C355合金力学性能的影响,在150℃时效时,硬 度随着时效时间的增加而持续增加,而在220℃时效时,硬度达到时效峰后(低于 150℃时的硬度)开始下降。在实际生产应用过程中,模具温度即冷却速度以及零部 件在高温下的力学性能对铸造零部件的性能起着重要的作用^[16-17]。因此,本文研究了 模具温度与热处理对铸造铝合金组织和性能的影响,并对高温下铝合金的性能进行 了分析。

1 试验材料及方法

铝合金熔炼原材料包括高纯铝、Al-Cu中间合金、Al-Si中间合金以及Mg-Al中间 合金等,按照试验预定的合金成分进行配比称重后,在铝合金井式电阻炉中进行熔 炼,在750℃的氮化硼涂层石墨坩埚中熔化,用Al-5Ti-1B精炼剂进行晶粒细化,熔 化的金属依次搅拌并静置30 min,以确保完全溶解。合金用氩气脱气5 min,然后倒 入钢制模具中进行铸造(试验过程中分批进行,其中钢制模具采用不同的温度为: 25℃、200℃)。经过熔炼后的合金成分采用光谱仪进行测量,结果如表1所示。共 浇注4批铝合金,标记为1[#]-4[#]试样。对应模具浇注温度及合金状态如表2所示。

拉伸试验在万能拉伸试验机上进行,常温拉伸按照GB/T 228.1—2010标准执行,高温拉伸按照GB/T 4338—2006标准执行,拉伸试棒直径为10 mm。金相试验采用金相电子显微镜进行,断口扫描采用日式S-4800型场发射扫描电镜进行分析。

王玮(1984-),女,讲师, 研究方向为 轻合金检测加 工技术及先进制造技术。 E-mail: 29115921@qq.com 通讯作者: 孙巧妍,女,副教授。E-mail:

55211856@qq.com

作者简介:

中图分类号:TG156; TG146.21 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2022) 01-0034-05

收稿日期: 2021-05-08 收到初稿, 2021-07-19 收到修订稿。



| Table 1 Composition of aluminum alloy $w_{\rm B}/\%$ | | | | | | | |
|--|------|------|------|-------|------|------|----|
| Si | Cu | Mg | Fe | Sr | Mn | Zn | Al |
| 9.8 | 1.02 | 0.51 | 0.12 | 0.008 | 0.20 | 0.07 | 余量 |

表1 铝合全成分

表2 铝合金试样 Table 2 Aluminum alloy samples

| 试样 | 模具浇注温度/℃ | 合金状态 |
|---------|----------|-------|
| 1# | 25 | 铸态 |
| 2^{*} | 200 | 铸态 |
| 3* | 25 | T6热处理 |
| 4# | 200 | T6热处理 |

电化学腐蚀测试进行电化学工作站的三电极系统:测 试的样本作为工作电极、铂丝电极与饱和甘汞参比电 极。所有的电化学测量都在3.5wt% NaCl水溶液中进 行,扫描速率为2 mV/s,从-1.8 V到-1.0 V。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织分析

图1所示为铝合金金相组织图。图1a、b为铸态铝 合金,析出的二次共晶硅相为针状,而经过T6热处理

的铝合金 (图1c、d) 由于热处理使得共晶硅发生球 化,成为圆滑的短棒状。比较图1a、b可以发现,1^{*}试 样铸态组织中硅颗粒的尺寸要远远小于2[#]试样,这是由 于模具温度的降低提高了铝硅合金的形核速率,共晶 Si相形状和尺寸减小;而经过T6热处理后,通过对比 图1a、c可以看出,模具温度为25 ℃时经过热处理后硅 颗粒的尺寸增加了,而对比图1b、d可以看出模具温度 为200 ℃时,经过热处理后组织中的硅颗粒的尺寸减小 了。经过热处理后图1c、d中硅颗粒的尺寸几乎相同, 这是由于热处理使得组织更均匀化。

综上所述,较高的冷却速率下(模具温度为25℃), Al-Si-Cu-Mg合金经过了T6热处理, 硅原子发生了快速 扩散,共晶Si逐渐球化,但由于小硅颗粒扩散到共晶硅 中, 硅颗粒的平均尺寸增大。在模具温度为200 ℃时, 硅元素有足够的时间扩散到共晶硅中,因此硅粒子的 数量没有明显变化。而在铸态铝硅合金中,共晶硅颗 粒的形态对力学性能起着重要作用。

2.2 力学性能分析

2.2.1 室温力学性能

通过拉伸试验研究了模具温度和热处理对合金力 学性能的影响,拉伸试验结果如图2所示。在铸态试样 中,1[#]试样由于模具温度为25℃,其抗拉强度与屈服强



(a) 1[#]试样; (b) 2[#]试样; (c) 3[#]试样; (d) 4[#]试样 图1 铝合金金相组织图 Fig. 1 Optical microstructures of aluminum alloy











度比2^{*}试样高,而伸长率比2^{*}低0.15%。而经过热处理 后的3^{*}试样与4^{*}试样的抗拉强度与屈服强度较铸态试样 有明显提高,而伸长率略有降低。热处理后的3^{*}试样与 4^{*}试样的三个力学性能的差距不大,这是由于经过热 处理后,3^{*}试样与4^{*}试样共晶硅颗粒形状和大小趋于一 致,所以在力学性能上也趋于一致。

2.2.2 高温力学性能

图3所示为模具温度为200 ℃下铸态与热处理后 2^{*}、4^{*}试样不同温度力学性能。从图3a可以看出,随着 温度的升高,2^{*}、4^{*}试样的抗拉强度逐渐降低;2^{*}试样 的屈服强度在三个温度下差别不明显,在200 ℃时略有 上升。4^{*}试样屈服强度随着温度的升高而降低;2^{*}试样 伸长率随着温度的升高先降低后升高,在300 ℃时可以 达到4.5%,而热处理后4^{*}试样随着试验温度的升高而增 加,最高达4.8%。

图4为铝合金断口形貌,从图中可以看出,室温下 图4a、c显示了相似的断裂行为,断口由基体中的微孔 洞、撕裂棱和二次裂纹组成。从断口形貌来看,随着 测试温度从25 ℃提高到300 ℃,断裂特征由混合断裂 转变为韧性断裂,带有韧窝和撕裂棱的微孔洞增加, 二次裂纹减少。这表明基体软化,合金强度降低,但 延性增加。当温度升至300 ℃时,基体比室温时软得 多。与此同时,局部塑性变形产生了孔洞,并使孔洞 膨胀。

2.3 电化学结果及分析

图5为各个试样的极化曲线,从图5中可以看出, 热处理后的试样整体要比热处理前耐腐蚀性能要好。 热处理前,模具温度较低的25 ℃,试样耐腐蚀性较 好;而经过热处理后模具温度为200 ℃时,试样耐腐蚀 性最好,说明热处理有助于提高耐腐蚀性能,而25 ℃ 下经过热处理后的铸造铝合金材料性能是最好的,这 与铝合金的力学性能趋势基本保持一致。

3 结论

(1)模具温度为25℃的铝合金组织中硅颗粒尺寸经过热处理后变大,模具温度为200℃的尺寸变小。

(2)模具温度由20℃升到200℃,冷却速率降低,铝合金的抗拉强度和屈服强度略有降低,伸长率略有升高;而经过T6热处理后,三项力学性能提高较



 (a) 2[#]试样常温拉伸; (b) 2[#]试样300 ℃拉伸; (c) 4[#]试样常温拉伸; (d) 4[#]试样300 ℃拉伸 图4 铝合金断口形貌图
 Fig. 4 Fracture morphologies of aluminum alloys



Fig. 5 Polarization curves of alloys with different samples

参考文献:

- [1] 杨斌,杨金玉,刘丽亚.汽车用Al-7Si-0.5V-0.3In铸造铝合金的性能研究 [J]. 热加工工艺,2021(13):75-77.
- BERLANGA C, BAKEDANO A, CIRIZA A P, et al. Evaluation of the corrosion resistance of a new AlSi10MnMg (Fe) secondary alloy
 [J]. Materials Today, 2019 (10): 312–318.
- [3] 王波,许晓东,赵东宏. 合金化对汽车活塞用铸造铝合金的组织和性能影响 [J]. 热加工工艺,2021,50(5): 68–71.
- [4] IRFAN M, IRFAN MA, ALMUFADI FA. Effect of nanoparticle reinforcement on mechanical properties and erosion-corrosion behavior of cast aluminum [J]. Materials Testing, 2019 (7): 667–673.
- [5] 梁岩,孙荣滨. 7A04铝合金铸锭均匀化热处理研究 [J]. 轻合金加工技术, 2008 (8): 9-14, 21.
- [6] 赵海新. 汽车缸盖用新型铝合金的低压铸造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 80-83.
- [7] 丁清伟,张迪,侯胜利,等.最终形变热处理工艺对Al-5.2Mg-3.1Zn铝合金组织性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2019(21): 99–101.

为明显。

(3)随着拉伸试验温度的升高,冷却速率较低的 铸态和热处理后的铝合金试样的抗拉强度和屈服强度 均有明显的下降,而伸长率先降低后升高。

有色合金 70 铸造

37

(4)铝合金试样拉伸断口均由基体中的微孔洞、 撕裂棱和二次裂纹组成,高温拉伸试样的断裂特征由 混合断裂转变为韧性断裂。

(5)热处理前,模具温度低的铝合金试样耐腐蚀 性能好。热处理后,模具温度高的铝合金试样耐腐蚀 性好。 38 70 (1881) 6(17)78年 有色合金

- [8] ZHEN L, KANG S B. DSC analyses of the precipitation behavior of two Al-Mg-Si alloys naturally aged for different times [J]. Materials Letters, 1998, 37: 349–353.
- [9] 付靖. 浇注温度对挤压铸造6016铝合金组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(21): 57-59.
- [10] 王乐. 深冷处理对汽车轮毂用A356铝合金组织与力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 126-128.
- [11] 王文熙,孙有平,周学浩,等. Al-Mg-Si-Cu合金薄板不同取向的组织与性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 824–826.
- [12] MOHAMED A M A, SAMUEL F H, ALKAHTANI S. Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al-Si-Mg-Cu cast alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 577: 64–72.
- [13] 陈旷,关绍康,胡保健,等.双级时效工艺对低压铸造A356合金轮毂力学性能的影响[J].轻合金加工技术,2006(4):44-47.
- [14] MATTOS J J I, UEHARA A Y, SATO M, et al. Fatigue properties and micromechanism of fracture of an alsimg0.6 cast alloy used in diesel engine cylinder head [J]. Procedia Engineering 2010, 2 (1): 759–765.
- [15] MROWKA-NOWOTNIK G, SIENIAWSKI J. Microstructure and mechanical properties of C355.0 cast aluminium alloy [J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2011, 47 (2): 85–94.
- [16] 陈才,陈建立.铸造浇注温度对电器外壳用铝合金性能的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(3):81-83.
- [17] 毛文龙,刘磊,农登,等.Al-3.2Si-0.8Mg铝合金热处理工艺的正交试验优化 [J]. 热加工工艺,2018,47 (24):198-203.

Effects of Cooling Rate and T6 Heat Treatment on Microstructure and Properties of Cast Aluminum Alloy

WANG Wei¹, ZHANG Yan-tao², SUN Qiao-yan¹, YAO Tong-hui¹

(1. Yantai Nanshan University, Longkou 265700, Shandong, China; 2. Longkou Conglin Aluminum Co., Ltd., Longkou 265700, Shandong, China)

Abstract:

The microstructure and mechanical properties of as-cast and heat-treated aluminum alloys under different cooling rates have been studied. The results showed that the eutectic silicon in the microstructure of the aluminum alloy after heat treatment changed from needle-like to smooth rod-like, and the size of the silicon particles in the microstructure with low cooling rate decreased. The cooling rate had no obvious effect on the mechanical properties and corrosion resistance of the aluminum alloy at room temperature, while the T6 heat treatment significantly improved the mechanical properties and corrosion resistance of the tensile specimen at normal temperature consisted of micro-pores, tearing edges and secondary cracks in the matrix. With the increase of test temperature from 25 $^{\circ}$ C to 300 $^{\circ}$ C, the fracture characteristics changed from mixed fracture to ductile fracture, and the micro-pores with dimples and tearing ridges increased, while the secondary cracks decreased.

Key words:

mold temperature; heat treatment; microstructure; mechanical properties