DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.07.011

Al–Si–Mg–Cu 铸造铝合金高温拉伸性能研究

洪润洲,范学燚,左　强,张　喆
(中国航发北京航空材料研究院 铸造铝/镁合金研究与工程技术中心,北京 100095)

摘　要:研究了一种 Al-Si-Mg-Cu 铸造铝合金分别在 200、250 ℃的瞬时拉伸性能以及经 200 ℃和 250 ℃稳定化处理不同时间后的高温瞬时拉伸性能,并和已有标准中常用的 Al-Si 系耐热铸造铝合金的高温拉伸性能进行了对比。结果表明,随着测试温度的升高,Al-Si-Mg-Cu 铸造铝合金的瞬时拉伸性能呈下降趋势;随着稳定化处理温度的升高和时间的延长,强度都呈下降趋势,200 ℃时伸长率基本不变,250 ℃时伸长率显著升高。200 ℃时,Al-Si-Mg-Cu 铸造铝合金表现出良好的拉伸性能,明显优于其他常用 Al-Si 系耐热铸造铝合金。

关键词:铸造铝合金;高温拉伸性能;稳定化处理;耐热性能

中图分类号:TG292; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)07-0541-05

Study on High Temperature Tensile Properties of Al–Si–Mg–Cu Cast Aluminum Alloy

HONG Runzhou, FAN Xueyi, ZUO Qiang, ZHANG Zhe
(Engineering Research Center of Cast Aluminium and Magnesium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The instantaneous tensile properties of an Al-Si-Mg-Cu cast aluminum alloy at 200 ℃ and 250 ℃ respectively were studied.And the instantaneous tensile properties at high temperature after being stabilized at 200 ℃ and 250 ℃ for different time, and the high temperature tensile properties of Al-Si series heat-resistant cast aluminum alloy commonly used in existing standards were compared.The results show that the instantaneous tensile properties of Al-Si-Mg-Cu cast aluminum alloy decrease with the increase of test temperature. With the increase of stabilization temperature and time, the strength decreases, and the elongation remains unchanged at 200 ℃, but increases significantly at 250 ℃. At 200 ℃, Al-Si-Mg-Cu cast aluminum alloy shows good tensile properties, which is obviously better than other commonly used Al-Si heat resistant cast aluminum alloys.

Key words: cast aluminum alloy; high temperature tensile property; stabilization treatment; heat resistant property

Al-Si 系铸造铝合金铸造工艺性能优异,广泛用于薄壁复杂铝合金铸件的生产[1-5]。近年来,随着航空发动机性能的逐渐提升,航空发动机用铝合金机匣、燃油控制泵阀体等薄壁复杂铝合金铸件的工作温度达到 200 ℃左右[6-7],因此,要求铸造 Al-Si 合金同时具有良好的耐热性能[8-9]。本研究针对一种新研制的高纯 Al-Si-Mg-Cu 耐热铸造铝合金,采用金属型单铸拉伸试棒,开展了高温拉伸性能研究,并和传统 Al-Si 系耐热铸造铝合金 ZL105A、ZL109 进行了对比。

1　实验材料与过程

新研制的高纯 Al-Si-Mg-Cu 耐热铸造铝合金的主要成分是 7% Si、1.5% Cu、0.7% Mg、0.5% Mn、0.2%Ti,余量为铝,杂质元素 Fe 含量小于 0.2%。

合金采用 99.99%高纯铝锭、99.5%Mg 锭和 Al-Si12A、AlCu50A、AlMn10A、AlTi5A 等中间合金锭配制。合金采用电阻熔化炉进行熔炼,用 0.04%的 Sr 对合金进行变质处理[10],采用 Ar 气旋转喷吹对合金熔体进行精炼,将精炼后的熔体浇注成金属型单铸试棒。

单铸金属型试棒首先进行 T6 处理,T6 处理制度如表 1。T6 处理后,一部分试棒按图 1 所示加工成标准拉伸试棒,分别进行室温、200 ℃和 250 ℃瞬时拉伸性能测试;另一部分试样按表 2 所示制度分别进行高温稳定化处理,处理后的试棒同样按图 1 加工成标准拉伸试棒,分别在相应稳定化温度下进

收稿日期:2022-01-14
基金项目:航发集团创新基金项目"高强耐热铸造铝合金研究"(CXPT-2018-007)
作者简介:洪润洲(1972—),硕士,高级工程师.主要从事铝、镁合金材料及其铸造成型技术方面的工作.
电话:01062497155, Email: 13651212466@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 合金T6热处理制度
Tab.1 T6 heat treatment process

固溶温度	固溶保温时间	冷却介质	时效温度	时效保温时间	冷却方式
535±5 ℃	14 h	40～60 ℃水	170±5 ℃	6 h	空冷

表2 合金稳定化处理制度
Tab.2 Stabilization treatment process

稳定化温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式
200±5	50	空冷
200±5	100	空冷
250±5	50	空冷
250±5	100	空冷

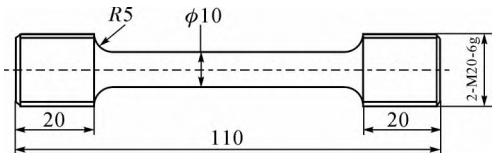


图 1 标准拉伸试样图
Fig.1 Drawing of standard tensile specimen

行拉伸性能测试;每组测试选取 12 个数据。在不同热处理制度的试棒上取样,抛光后用 0.5%的 HF 溶液对抛光面进行腐蚀处理以研究其组织变化。

测试设备为电子万能拉伸试验机,测试方法按照 GB/T 228《金属材料拉伸试验》规定的室温实验方法和高温实验方法进行;采用光学显微镜对不同热处理状态的试样微观组织进行观察。

2 实验结果

试棒 T6 处理后的室温、200、250 ℃瞬时拉伸的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别如图 2～4 所示,图 5～7 为合金 T6 处理后在 200 ℃的瞬时拉伸及 200 ℃分别保温 50、100 h 后的高温瞬时拉伸性能变化趋势图,图 8～9 为合金 T6 处理后在 250 ℃的瞬时拉伸及 250 ℃分别保温 50、100 h 后的高温瞬时拉伸性能变化趋势图。

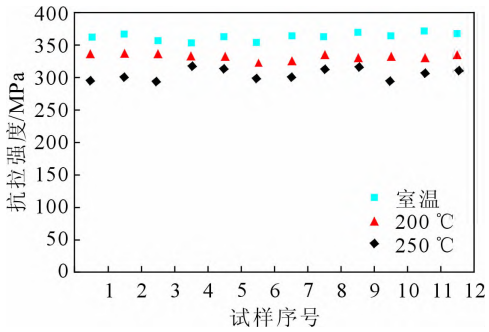


图 2 不同温度下的瞬时抗拉强度
Fig.2 Instantaneous tensile strength at different temperatures

图 11 为该合金分别在 T6 处理和 T6 处理后再按不同稳定化制度处理后的显微组织。

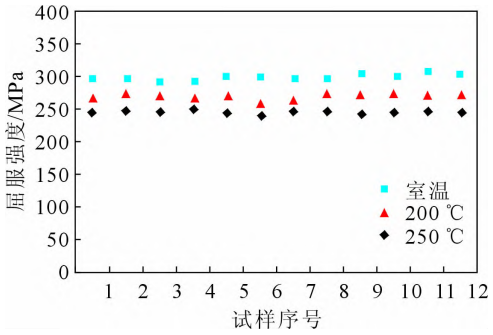


图 3 不同温度下的瞬时屈服强度
Fig.3 Instantaneous yield strength at different temperatures

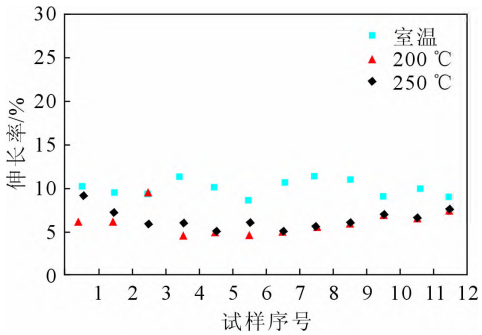


图 4 不同温度下的瞬时伸长率
Fig.4 Instantaneous elongation at different temperatures

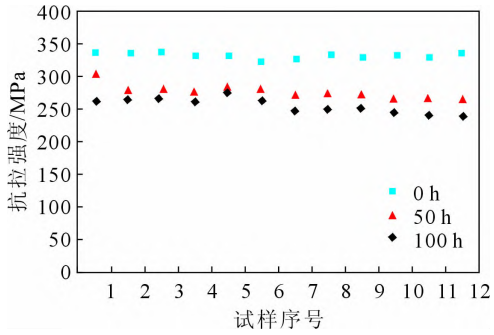


图 5 200 ℃保温不同时间后的抗拉强度
Fig.5 Tensile strength after holding at 200 ℃ for different time

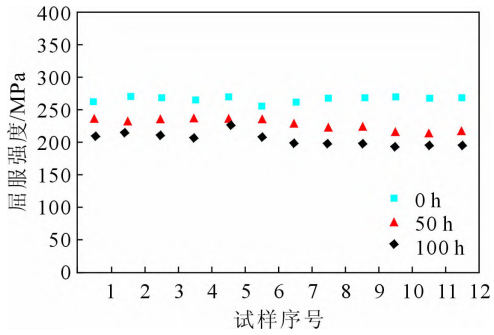


图 6 200 ℃保温不同时间后的屈服强度
Fig.6 Yield strength after holding at 200 ℃ for different time

3 分析与讨论

由图 2～4 可知,合金 T6 处理后,随测试温度提高,合金瞬时拉伸的抗拉强度、屈服强度、伸长率均呈现下降的规律。抗拉强度由室温的平均 360 MPa 左右分别降至平均 330、300 MPa 左右,屈服强度则

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

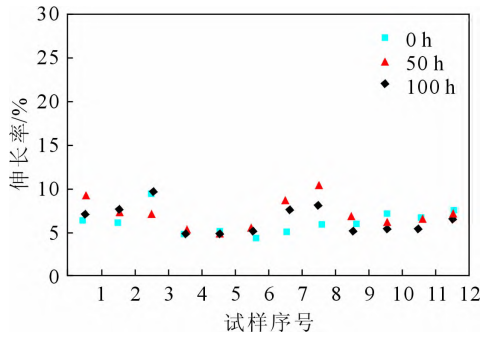


图 7 200 ℃保温不同时间后的伸长率

Fig.7 Elongation after holding at 200 ℃ for different time

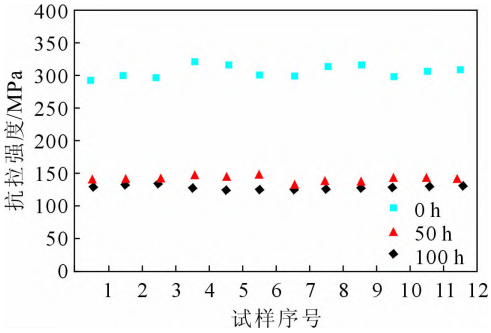


图 8 250 ℃保温不同时间后的抗拉强度

Fig.8 Tensile strength after holding at 250 ℃ for different time

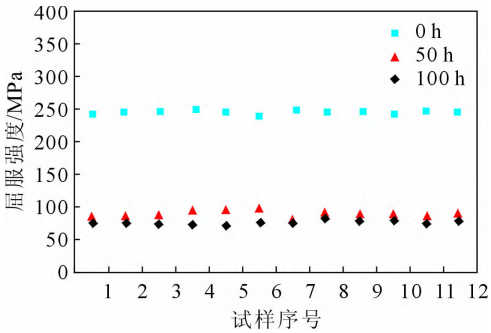


图 9 250 ℃保温不同时间后的屈服强度

Fig.9 Yield strength after holding at 250 ℃ for different time

由室温的平均 300 MPa 左右分别降至平均 270、250 MPa 左右，伸长率由室温的平均 10%分别降至平均 6.1%和 6.4%，伸长率在测试温度分别为 200、250 ℃时没有明显变化。

由图 5～7 可知，随保温时间延长，抗拉强度、屈服强度均呈明显下降趋势。抗拉强度由 200 ℃保温 0 h 的 330 MPa 左右分别下降至 260、250 MPa 左右，屈服强度由 200 ℃保温 0 h 的 270 MPa 左右分别下降至 220、210 MPa 左右，变化并不显著；伸长率在 200 ℃随保温时间的延长基本保持不变，均为 6%左右，但较室温瞬时拉伸的伸长率(10%左右)降低了 40%。如图 8～10 所示，250 ℃保温后，合金的抗拉强度、屈服强度均急剧下降，且保温 50 h 与100 h 的强度值非常接近，而合金的伸长率显著提升。

Al-Si-Mg-Cu 合金的凝固组织主要为 α 固溶体、Si相、Mg_2Si 相(β 相)、$CuAl_2$ 相(θ 相)和 Al_2CuMg 相(S 相)、$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相(Q 相)[10-14]。图 11(a)为合金 T6 处理后的组织，可以看出，由于合金熔炼时采用了 Sr 变质，在 T6 处理后，Si 相变得近乎圆形或边界圆滑的块状；其他相经固溶处理后，绝大部分溶于基体中，时效后形成弥散分布的 β 相、θ 相[15-16]，晶界上几乎无残留 β 相、θ 相、S 相和 Q 相。图 11(b)为 T6 处理后 200 ℃保温 50 h 的组织，与T6 处理后的组织相比，Si 相的数量没有显著差异，但在晶界上可以看到短棒状 θ 相，说明 T6 处理后弥散分布的 θ 相经稳定化处理后发生了偏聚长大；200 ℃保温 100 h 后，如图 11(c)所示，偏聚长大的 θ 相数量并无明显区别，但 Si 相数量明显增多，说明固溶体中的 Si 元素偏聚又形成了片状的 Si 相[15]。200 ℃保温后，θ 相偏聚长大和 Si 相的增加导致了强度和伸长率的下降。

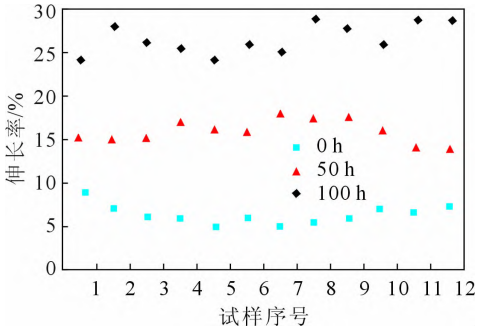


图 10 250 ℃保温不同时间后的伸长率

Fig.10 Elongation after holding at 250 ℃ for different time

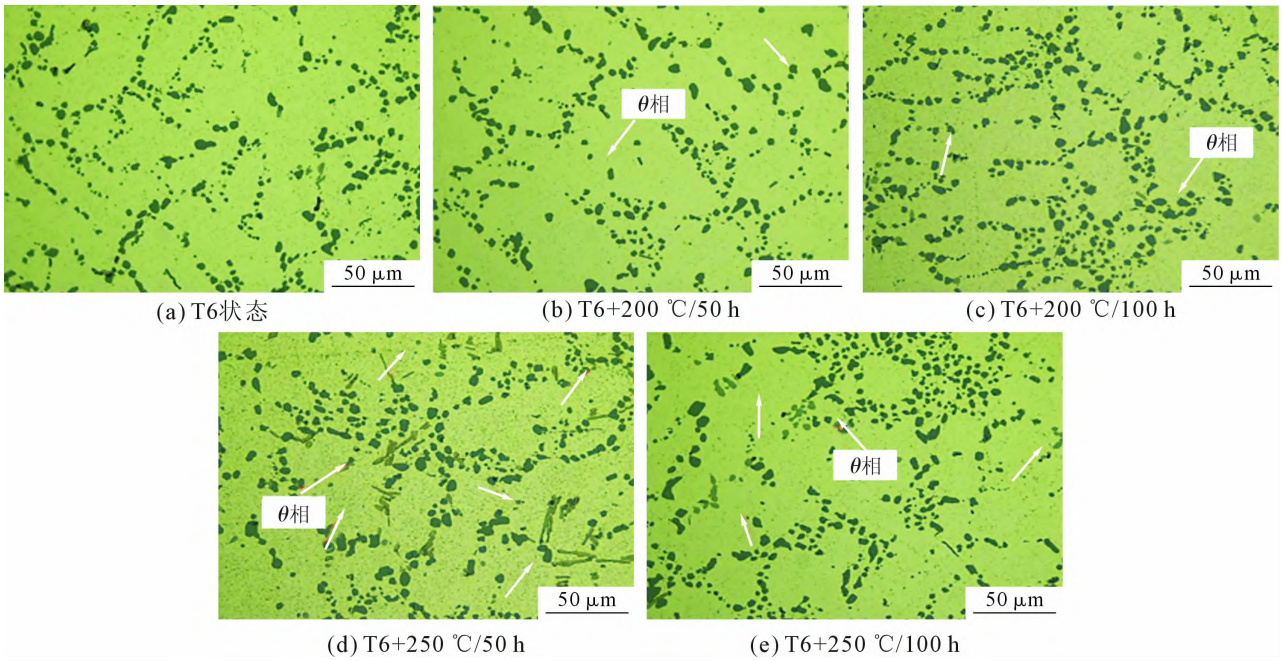
图 11(d)、(e)为 T6 处理后 250 ℃分别保温 50、100 h 的组织，可以看出，组织中 Si 相数量较 T6 状态增多；另一显著现象是保温 50 h 后，基体析出长条状 θ 相；保温 100 h 后，长条状 θ 相发生断裂，变为短棒状。θ 相的数量、大小说明在 250 ℃保温时，T6 处理后基体中弥散分布的 θ 相大量聚集，对合金的强化作用大大减弱[17]。由于是在高温下保温、拉伸，合金基体的滑移系均可启动，使合金具有了很高的伸长率[18]。随着保温时间的延长，θ 相形态由长条状转变为短棒状，导致保温 100 h 后的伸长率高于保温 50 h 后的伸长率。

表 3 为国内用于结构件铸造的几种 Al-Si 系耐热铸造铝合金在 200 ℃保温 100 h 后的性能对比[19-20]，可以看出，新研制的 Al-Si-Mg-Cu 合金 200 ℃的抗拉强度、屈服强度明显高于其他合金，ZL105、ZL105A 合金的伸长率显著增加，说明合金中的强化相已经丧失强化作用。

4 结论

(1)随着测试温度的升高，新研制的Al-Si-Mg-Cu

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) T6状态 (b) T6+200 ℃/50 h (c) T6+200 ℃/100 h

(d) T6+250 ℃/50 h (e) T6+250 ℃/100 h

图 11 不同热处理制度下合金的显微组织

Fig.11 Microstructure of the alloy under different heat treatment processes

表3 Al–Si–Mg–Cu合金与常用Al–Si系耐热铸造合金的200 ℃拉伸性能对比

Tab.3 Comparison of tensile properties between Al–Si–Mg–Cu alloy and common Al–Si heat resistant casting alloy at 200 ℃

合金代号	状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%
ZL105	T7	130	90	20
ZL105A	T6	95	70	40
ZL109	T1	180	102	2.0
Al-Si-Mg-Cu 合金	T7	250	210	6

合金的瞬时拉伸性能都逐渐降低。

(2)在 200 ℃稳定化处理后，固溶体中的 Si 元素聚集形成 Si 相，θ 相开始偏聚长大，合金的拉伸性能虽有下降，但仍处于较高水平，说明该合金可在 200 ℃下长时间工作。

(3)在 250 ℃稳定化处理后，弥散分布的 θ 相明显偏聚，合金的强度下降较多，温度的升高导致伸长率较高，且 θ 相形态随保温时间的延长而变化，导致其伸长率进一步提高。

(4)相较于已有的 Al-Si 系耐热铸造铝合金，该合金在 200 ℃时拉伸性能具有明显的优势。

参考文献:

[1] GLAZOFF M, ZOLOTOREVSKY V, BELOV N. Casting aluminium alloys[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007.

[2] THOMPSON S, COCKCROFT S L, WELLS M A. Advanced light metals casting development: solidification of aluminium alloy A356[J]. Materials Science and Technology, 2004(2): 193-200.

[3] LIU L, SAMUEL F H. Assessment of melt cleaness in A356.2 aluminium casting alloy using the porous discfiltration apparatus technique[J]. Journal of Materials Science, 1997(5): 5901-5925.

[4] 黄玉凤. 合金元素对铝合金铸件组织和性能的影响[J]. 有色金属，2010, 62(2): 18-19.

[5] KUHLMAN G W, GRASSI J R, CAMPBELL J. Alotech precision sand casting of aluminium alloys, a new technlogy for cost efficient, extremely high quality cast components for aerospace and automotive applications [C]//46th International SAMPE Symposium. Ohio: Taylor & Francis, 2001. 611-625.

[6] 李波，张东辉，洪黎. 航空发动机燃油热管理系统仿真及试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究，2019, 32(10): 29-34.

[7] 谢凤，范鸿宇，刘广龙，等. 航空涡轮发动机对润滑油的性能要求与发展趋势[J]. 合成润滑材料，2009, 36(3): 20-25.

[8] SAHOO K L, SIVARAMAKRISHNAN C S. Some studies on Al-8.3Fe-0.8V-0.9Si alloy fornear net shape casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(135): 253-257.

[9] AMENOVA A, BELOV N, SMAGULOV D, et al. Perspective high strength aluminium alloys of new generation based on Al-Ni-Mn-Fe-Si-Zr system[J]. Materials Research Innovations, 2014(18): 50-53.

[10] 陆文华，李隆盛，黄良余. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[11] CESCHINI L, MORRI A, TOSCHI S, et al. Microstructural and mechanical properties characterization of heat treated and over aged cast A354 alloy with various SDAS at room and elevated temperature [J].Materials Science and Engineering A, 2015(648): 340-349.

[12] 印小松，刘宏庆，史翔，等. A354 铝合金铸造缸盖热处理[J]. 中国铸造装备与技术，2018, 52(2): 57-60.

[13] 侯立群，陈小辉，邢志媛，等. 新型 Al-Si-Cu-Mg 系合金热处理工艺的研究[J]. 兵器材料科学与工程，2013, 36(6): 18-21.

[14] 龚磊清，金长庚. 铸造铝合金金相图谱[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1987.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[15] 赵明伟，蒙春标，梁新华，等. 变质及 T6 热处理对 ZL111 铝合金组织中的影响[J]. 热加工技术，2020, 49(14): 140-142.

[16] 钱宇. 热处理工艺对汽车用铸造铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工技术，2017, 46(16): 206-212.

[17] 随育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造铝合金组织及其高温性能研究[D]. 上海：上海交通大学出版社，2016.

[18] 李娜，李玉龙，郭伟国. 3 种铝合金材料动态性能及其温度相关性对比研究[J]. 航空材料学报，2007, 29(4): 903-908.

[19] 刘伯操. 铸造手册第 3 卷[M]. 第 2 版. 北京：机械工业出版社，2002.

[20] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册(第 2 版)第 3 卷[M]. 北京：中国标准出版社，2002.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net