

# Effect of Mn and Cu on Microstructure and Mechanical Properties of 6013 Aluminum Alloy

Yimeng Wang, Chengwu Liu, Fan Feng, Xiaoyuan Zhou, Wenlin Chen\*

Hefei University of Technology, Hefei Anhui  
Email: ymwang1007@163.com, \*wlchen8761@126.com

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

6013 alloys with different content of Cu and Mn alloy elements were prepared by ingot metallurgy. The results show that Mn can refine the grain in the process of ingot homogenization, but excessive Mn can embrittle the microstructure of the alloy. When the mass fraction of Cu element increased from 0.9% to 1.1%, the T6 tensile strength of the alloy increased from 290 MPa to 305.6 MPa, with an increase of 7.3%. The elongation and microstructure were also improved.

## Keywords

Copper and Manganese Alloy Elements, 6013 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Property

# Mn和Cu对6013铝合金组织及力学性能的影响

王翼猛, 刘承武, 冯 凡, 周晓远, 陈文琳\*

合肥工业大学, 安徽 合肥  
Email: ymwang1007@163.com, \*wlchen8761@126.com

收稿日期: 2019年6月6日; 录用日期: 2019年6月20日; 发布日期: 2019年6月27日

## 摘 要

通过铸锭冶金法制备了不同铜、锰合金元素含量的6013合金, 研究了不同元素含量对合金微观组织和室温拉伸力学性能的影响。研究表明: Mn在铸锭均匀化过程中能细化晶粒, 但过量的Mn使合金组织脆化; Cu元素质量分数由0.9%提高到1.1%时, 合金的T6态抗拉强度由290 MPa提高到305.6 MPa, 提

\*通讯作者。

高了7.3%，伸长率也有所提高，组织也得到有效改善。

## 关键词

铜、锰合金元素，6013铝合金，显微组织，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

6013 铝合金在当今世界最先进的铝合金中，以其杰出熔铸性、塑性成形性及焊接性，中等的比强度、良好的抗腐蚀性、上等的损伤容限、优良的热暴露稳定性等一系列性能而备受关注。因为其具有良好的综合性能，在大型民用飞机、军用舰载飞机、轨道交通上具有重大应用前景[1]。

有研究表明随 Mn 含量的增加，Al-Mg-Si 系合金中原本粗大的骨骼状 AlFeSi 相变为颗粒状的 AlFeMnSi 相，可以抑制再结晶晶粒长大[2]。但 Jeniski, R.A. 等人研究表明当加入 Mn 元素超过 3.5 wt% 时，粗大的  $\alpha$ -AlFeMnSi 相比比例上升，引起组织脆化[3]。现有研究中，薛学功等人通过向 6013 铝合金中加入四组不同量的 Cu 元素，发现 6013 合金的挤压型材，Cu 与 Al 形成的  $\theta$  相，是低强度硬铝和中强度硬铝中的主要强化相，并且 Cu 元素的含量与 6013 合金的耐腐蚀性密切相关[4]。在 Al-Mg-Si 合金中加入 Cu 还可以提高合金的耐热性能[5]，降低合金的淬火敏感性。

国内对 6xxx 系铝合金的合金化和热处理等进行了大量研究，现今 6061，6063，6005 等合金及其改进型号已经占据了 6 系合金的 80% 以上，它们涵盖了抗拉强度 180~360 MPa 整个范围，但是对于 6013 合金的研究相对较少[6]。本文通过铸锭冶金法制备了不同铜、锰合金元素含量的 6013 合金，研究了合金元素对 6013 铝合金拉伸性能的影响，对于充分挖掘材料潜力，开发综合性能优良的 6013 铝合金，具有重大意义。

## 2. 材料及实验方法

### 2.1. 实验材料

实验用合金的主要化学成分(质量分数,%)如表 1 所示。合金的冶炼原料为高纯铝(99.99%)、Al-10%Mg 中间合金、Al-20%Si 中间合金，Al-20%Mn 中间合金，Al-50%Cu 中间合金。

Table 1. Chemical composition of experimental alloys (mass %)

表 1. 实验合金的主要化学成分(%)

合金序号 Alloy No.	Mg	Si	Cu	Mn	Al
0#	0.95	0.75	0.9	0.35	剩余(Bal.)
1#	0.95	0.75	0.6	0.35	剩余(Bal.)
2#	0.95	0.75	1.1	0.35	剩余(Bal.)
3#	0.95	0.75	0.9	0.2	剩余(Bal.)
4#	0.95	0.75	0.9	0.8	剩余(Bal.)

## 2.2. 实验方法

金在石墨坩埚电阻炉中进行熔炼,并在水冷铜模中浇铸成  $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的铸锭。铸态合金先进行  $540^\circ\text{C} \times 8\text{ h}$  均匀化处理后,再进行四道热轧,五道冷轧,之后进行  $560^\circ\text{C} \times 2\text{ h}$  的固溶处理和  $151^\circ\text{C} \times 8\text{ h} + 191^\circ\text{C} \times 8\text{ h}$  时效处理。将铸态试样用金相砂纸预磨后进行机械抛光,用  $0.5\%\text{HF}$  酸进行腐蚀。在 MR5000 型金相显微镜下对腐蚀后的试样进行显微组织观察和分析。拉伸实验在 SANS-100KN 微型控制电子万能试验机上完成,拉伸速度为  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,每个状态测定 3 个试样取平均值。

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 合金的显微组织

五种合金的显微组织如图 1,图 2 所示。由图 1 中可以看出,随 Mn 含量的增加,Mn 会代替  $\text{AlFeSi}$  相中的部分 Fe 而构成  $\text{AlFeMnSi}$  相,使原本粗大的骨骼状或汉字形的  $\text{AlFeSi}$  相变为颗粒状的  $\text{AlFeMnSi}$  相,这种弥散的颗粒相对合金再结晶中的晶界迁移有阻碍作用。而且随着合金中不可溶结晶相及弥散粒子数量增加,对晶界具有钉扎作用,阻碍再结晶晶粒长大。由图 2 中可以看出,在 Al-Mg-Si 合金中添加少量的 Cu 可以促进合金中强化相粒子的析出以及在时效过程中原子团簇和 GP 区的形成。这主要是因为 Cu 和 Mg、Si 结合在一起,在合金中形成了 Cu/Mg/Si 复合团簇,这些复合团簇的形成可以作为 GP 区优先形核的位置,加速形成了细小及高密度的团簇和 GP 区。Mg 原子和 Si 原子偏聚团附近的这种 Cu 原子和空位的偏聚,就会为析出相的均匀形核提供有利场所,并加快合金的时效强化过程。

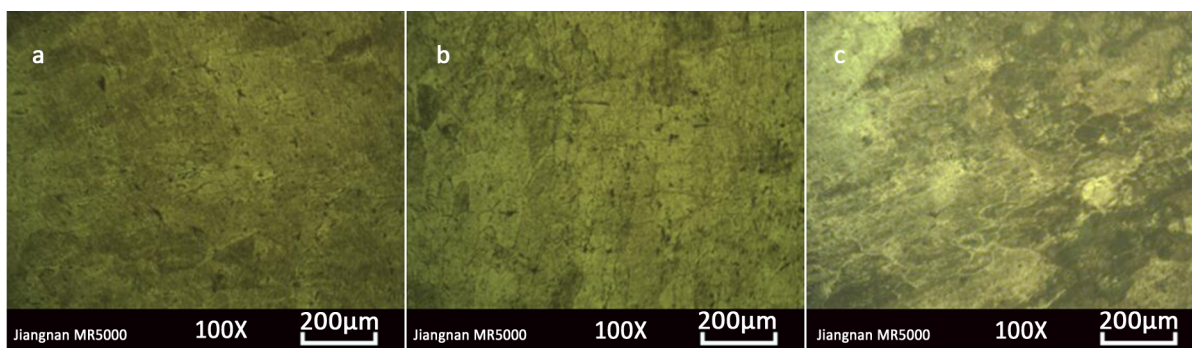


Figure 1. Microstructure of the alloy when Cu content is changed: (a) No.0 alloy; (b) No.1 alloy; (c) No.3 alloy  
图 1. 合金改变 Cu 元素含量时显微组织: (a) No.0 合金; (b) No.1 合金; (c) No.3 合金

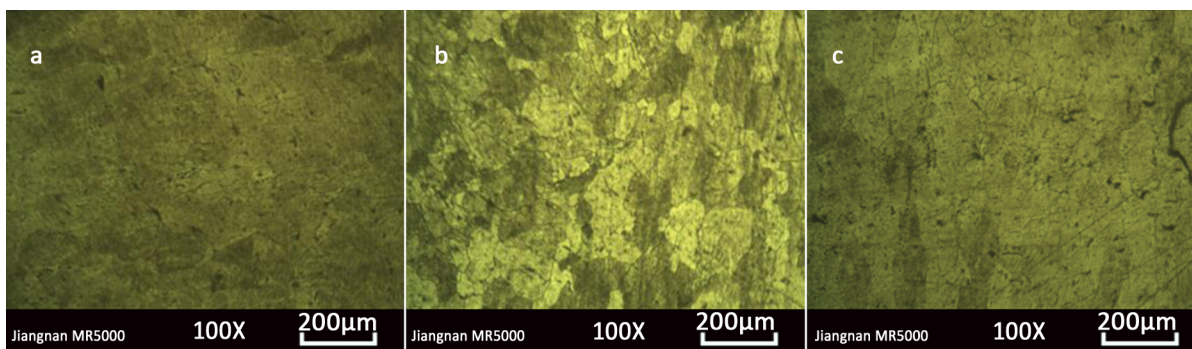


Figure 2. Microstructure of the alloy when Mn content is changed: (a) No.0 alloy; (b) No.3 alloy; (c) No.4 alloy  
图 2. 合金改变 Mn 元素含量时显微组织: (a) No.0 合金; (b) No.3 合金; (c) No.4 合金

### 3.2. 合金的力学性能

五种合金的力学性能如表 2 所示。由图 3 可知, 随着铜元素含量上升, 屈服强度、抗拉强度及延伸率都得到提高。其中, 因为 1 组中 Cu 元素含量较少, Mg/Cu 比例值较大, 形成  $\theta$  相,  $\theta$  相的过渡相强化效果较差; Mg/Cu 比例值减小时, Cu 含量上升, 形成 S 相, 强化效果变好; 当 Mg/Cu > 1.08, 如 2 组时, 形成  $Q + \theta$  相, 强化效果最好。

由图 4 可知, 随着锰元素含量上升, 屈服强度、抗拉强度及延伸率均出现先上升后下降的趋势。由 0 组和 3 组对比可知, 在 Al-Mg-Si 合金中加入一定量的 Mn, Mn 与 Fe 可以相互替代, 形成多元相, 代替  $\beta$ -AlFeSi 相中的部分 Fe 而构成  $\beta$ -AlFeMnSi 相, 改善  $\beta$  相的生成与生长, 使  $\beta$  相由针状向块状、团状  $\alpha$  相转变, 消除 Fe 的有害作用。

同时, Mn 的加入促进了均匀化处理过程中长针状的  $\beta$ -AlFeMnSi 相向粒状的  $\alpha$ -AlFeMnSi 相转变, 改善了合金的性能。另外, 这种含 Mn 的  $\alpha$  相弥散颗粒可作为合金时效强化相  $\beta'$ (Mg<sub>2</sub>Si) 的非均匀成核核心, 促进  $\beta'$  相的析出, 从而强化合金, 使合金获得较好的强塑性配合。4#组力学性能较 0#组下降是由于 Mn 热稳定性很高, 且在铝基体中的扩散速度很慢, 含 Mn 第二相在固溶处理过程中不能消失, 消耗了一部分 Si, 造成 Mg<sub>2</sub>Si 数量明显减少, 降低了合金的强度。

Table 2. The mechanical properties of alloys cast ingots

表 2. 合金力学性能

合金序号 Alloy No.	0#对照组	1#低铜组	2#高铜组	3#低锰组	4#高锰组
抗拉强度 (MPa)	290.2	268.4	305.6	272.5	282.6
屈服强度 (MPa)	258.3	232.6	274.8	241.2	253.6
伸长率(%)	9.2	8.6	10.2	8.9	9.1

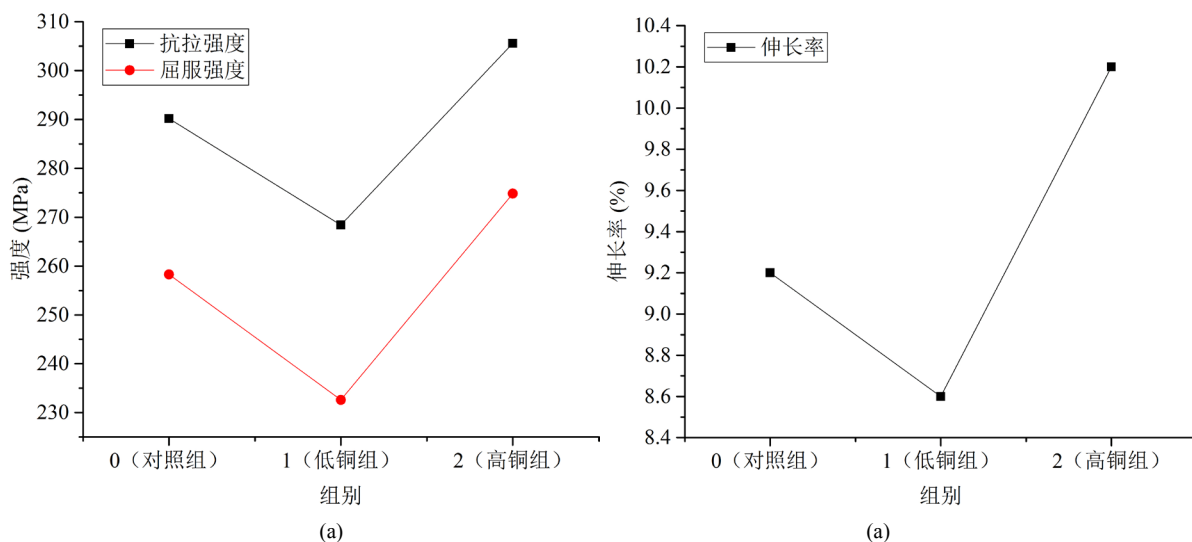
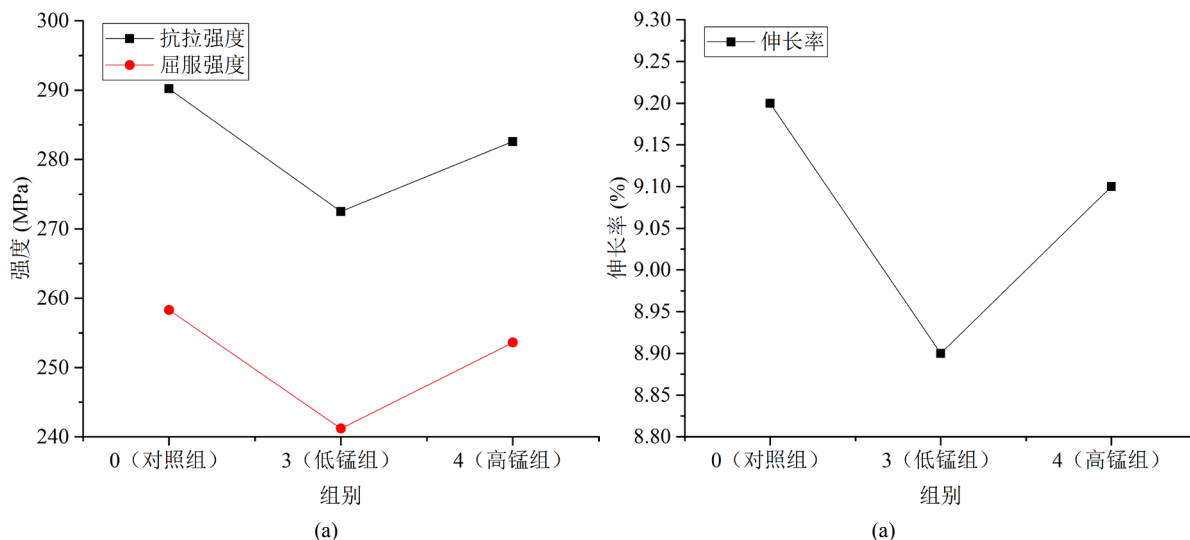


Figure 3. Variation of tensile property with copper content change: (a) Variation of tensile strength and yield strength; (b) Variation of elongation

图 3. 铜含量变化时拉伸性能变化: (a) 抗拉强度及屈服强度变化; (b) 伸长率变化



**Figure 4.** Variation of tensile property with manganese content change: (a) Variation of tensile strength and yield strength; (b) Variation of elongation

**图 4.** 锰含量变化时拉伸性能变化: (a) 抗拉强度及屈服强度变化; (b) 伸长率变化

#### 4. 结论

随着 Mn 元素含量增加, 6013 合金晶粒得到显著细化, 在伸长率基本不变的基础上抗拉强度得到提高, 但 Mn 质量分数超过 3.5 wt% 时会引起组织粗晶脆化, 不利于力学性能。

随着 Cu 元素质量分数由 0.9% 提高到 1.1%, 合金的 T6 态抗拉强度由 290 Mpa 提高到 305.6 MPa, 后者伸长率相对于 Cu 含量较低的合金也提高了 10%, 材料力学性能得到优化。

#### 参考文献

- [1] 张福豹. 6013 型铝合金的微合金化与性能初步研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [2] 吕昌略. 微合金化及热轧工艺对铝硅镁基型材组织和性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] Jeniski, R.A., Thanabonsombut, B. and Sanders, T.H. (1996) The Effect of Iron and Manganese on the Recrystallization of Hot Rolled and Solution-Heat-Treated Aluminum Alloy 6013. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **27**, 19-27. <https://doi.org/10.1007/BF02647743>
- [4] 薛学功, 章四琪. Cu 含量对 6013 铝合金挤压型材性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2003(1): 32-34.
- [5] 金曼, 邵光杰, 杨丽丽. 含 Cu 的 Al-Mg-Si 合金微观组织及耐热性能的研究[J]. 热处理, 2010, 25(2): 23-26.
- [6] 孙瑜. 热处理对 6082, 6063 合金组织和性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2373-1478, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)