

文章编号:1671-6833(2017)03-0006-04

# Zn 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和常温力学性能的影响

王杰芳, 张 铎, 郭巧能, 刘忠侠, 王明星

(郑州大学 材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**借助光学显微镜、差示量热扫描仪、扫描电镜,以及硬度、拉伸性能测试方法,分析了 Zn 元素对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和常温力学性能的影响. 结果表明:Zn 的添加并未改变合金第二相的形态和成分,合金适宜的均匀化制度为 510 ℃ × 24 h. Zn 元素的添加加快了挤压态合金的初始时效反应速度,使合金的峰时效硬度由 169 MHV 提高到 182 MHV,合金的室温拉伸强度和屈服强度分别提高了 23 MPa 和 27 MPa,并且合金的伸长率仍然保持在 14% 以上的较高水平. 这可能是 Zn 元素固溶于基体中,增大了合金的晶格畸变,致使合金硬度增加,并提高了合金的室温力学性能.

**关键词:** Al-Cu-Mg-Ag 合金; Zn 元素; 均匀分布; 晶格畸变; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.020

## 0 引言

Al-Cu-Mg 系铝合金由于密度小,比强度、比模量、断裂韧度和疲劳强度高,以及良好的耐热性能而广泛的应用于航空航天领域,但是随着航空航天技术的发展,对铝合金材料综合性能的要求也越来越高. 而普通的 Al-Cu-Mg 系合金已不能满足现代化工业对合金性能的要求. Polmear 等发现在高 Cu/Mg 比的 Al-Cu-Mg 合金中添加微量的 Ag 元素可以改变合金的时效析出序列,使合金在时效过程中析出一种细小弥散的强化相  $\Omega$  相,不仅改善了合金室温和高温力学性能,还提高了合金的高温抗蠕变性能<sup>[1-3]</sup>. 尽管 Al-Cu-Mg-Ag 合金展示了优于 Al-Cu-Mg 合金的室温与高温力学性能,但其强度仍稍显不足,当温度超过 200 ℃ 时,  $\Omega$  相的粗化速率会急剧增大,使得  $\Omega$  相发生共格失稳,从而转变为平衡相  $\theta$  相,致使合金的力学性能显著下降<sup>[4]</sup>. 大量的研究表明<sup>[5-10]</sup>:通过添加微量的稀土元素能细化合金晶粒,改善合金铸态组织,提高合金的耐疲劳、耐腐蚀、室温和高温力学性能. 因此可以通过在 Al-Cu-Mg-Ag 合金中添加稀土元素来使合金的综合性能得到提高. 但是近些年的研究都集中于稀土元素对铝合金的影响,而忽略了对常规强化元素的研究. 查阅相关文

献[11-13]发现,Al-Zn-Mg-Cu 系合金与 Al-Cu-Mg 系合金相比,多添加了 Zn 元素,而强度却得到了很大的提升. Zn 在元素周期表中位于第 4 周期、第 IIB 族,与 Sc、Ti、V 等处于同一周期,在铝中的固溶度较高,可能有与 Sc 等相类似的作用. 因此笔者尝试将 Zn 作为一种微合金化元素加入 Al-Cu-Mg-Ag 合金中,来研究其对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的影响.

## 1 试验部分

### 1.1 实验材料与方法

试验原料为工业纯铝、纯镁、纯锌以及 Al-Ag、Al-Cu、Al-Mn 和 Al-Ti 中间合金. 采用铸锭冶金方法制备了 Al-Cu-Mg-Ag-(Zn) 合金铸锭. 合金化学成分详见表 1. 铸锭经均匀化处理后,挤压成棒材,合金的淬火时效工艺采用 520 ℃ 室温水淬,180 ℃ 时效. 拉伸测试在 MTS810 材料试验机上进行,采用  $\phi 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  棒状试样,拉伸速率为 1 mm/min,试样均为 3 根,取平均值.

采用日本生产的 JEOL-JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜(SEM)以及配套的 EDS 设备对合金进行能谱分析,并用 OLYMPUS BX51 型光学金相显微镜进行微观组织观察. 差示扫描量热分析(DSC)在法国 Labsys 型高温扫描量热分析仪上

收稿日期:2016-07-08;修订日期:2016-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372283);河南省高等学校重点科研项目(17A430001;13A140674)

作者简介:王杰芳(1968—),女,河南滑县人,郑州大学教授,博士,主要从事轻金属材料与金属物理研究,E-mail:wangjfroese@126.com.

通信作者:郭巧能(1966—),女,河南沁阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事薄膜材料科学模拟研究.

进行,升温速率为 10 ℃/min,扫描温度为 20 ~ 700 ℃. 用工业纯铝作为参比试样,采用 HXD-2000TMS/LCD 硬度仪检测合金硬度.

表 1 试验合金化学成分的质量分数

Tab.1 Chemical composition of the present alloys

%							
试样	Cu	Mg	Ag	Mn	Ti	Zn	Al
1#	5.0	0.4	0.4	0.3	0.12	0.0	Bal.
2#	5.0	0.4	0.4	0.3	0.12	0.6	Bal.

2 结果与分析

2.1 铸态合金显微组织

图 1 为两种合金的铸态微观组织. 由图 1 可以发现,这两种合金的铸态组织都呈典型的枝晶组织,晶粒形态呈花瓣状,在晶界处存在粗大的未溶第二相.2#合金的铸态扫描组织如图 2,经 EDS 能谱分析可知,其成分都接近 Al<sub>2</sub>Cu. 能谱分析结果如表 2 所示.

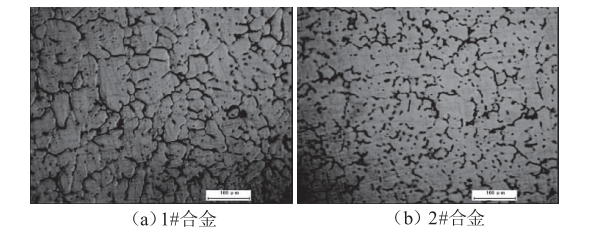


图 1 合金铸态金相组织

Fig.1 Microstructures of the as-cast alloys

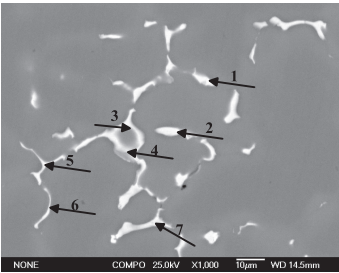
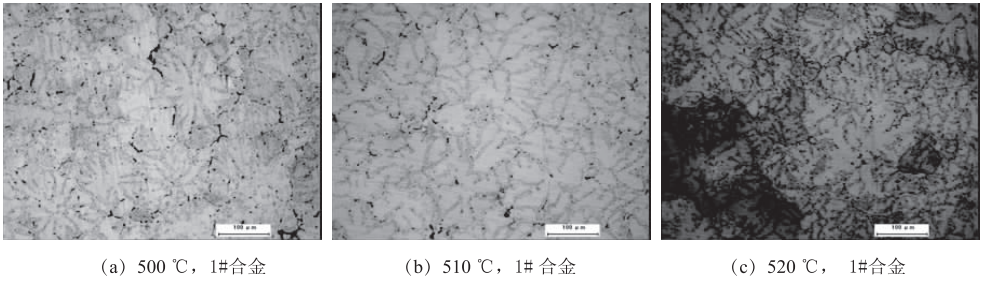


图 2 2#合金铸态 SEM 组织

Fig.2 SEM image of the alloy 2#

2.2 合金均匀化制度

图 3 为两种合金的 DSC 曲线.由图 3 可见,



(a) 500 ℃, 1#合金

(b) 510 ℃, 1#合金

(c) 520 ℃, 1#合金

两种合金都有两个吸热峰,且吸热峰的位置基本相同,所以可以在同一均匀化制度下均匀化,试验合金的主要合金化元素为 Cu、Mg、Ag 和 Zn. 在相同的温度条件下,Mg、Ag 和 Zn 的扩散速率要比 Cu 元素快<sup>[14]</sup>,因此在均匀化过程中主要考虑 Cu 元素. 经查阅文献,在 510 ℃条件下所求得均匀化时间约为 20 h,为保证 Cu 元素扩散充分,所以设计均匀化时间为 24 h.

表 2 2#合金铸态组织能谱成分表

Tab.2 EDS analysis results of the as-cast alloy 2#

晶界位置	Al	Cu	Mg	Mn	Fe
1	65.98	32.27	1.14	0.60	0.00
2	56.47	39.20	2.29	1.00	1.04
3	60.69	38.46	0.85	0.00	0.00
4	62.46	33.21	0.89	1.06	2.38
5	68.03	21.70	0.98	2.63	6.65
6	80.38	17.96	1.04	0.33	0.30
7	89.07	9.54	1.02	0.36	0.00

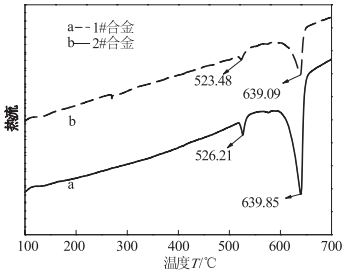


图 3 两种合金的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curves of the two as-cast alloys

图 4 给出了 1#、2#合金分别在 500、510、520 ℃下均匀化 24 h 的金相组织. 由图可见,经过均匀化处理,与铸态金相组织相比,晶界明显细化,晶界残余相大量减少. 对比 3 种均匀化制度:500 ℃时合金晶界变细,残余相大量减少;510 ℃时合金晶界变得更不明显,残余相更为减少;520 ℃合金晶界与 510 ℃相比又变得明显,说明晶界开始扩展. 由以上分析可见,合金的最佳均匀化温度应为 510 ℃.

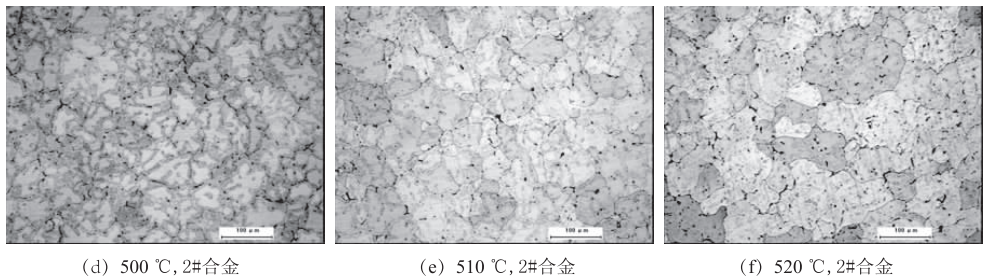


图 4 1#、2#合金经不同均匀化处理的金相组织

Fig. 4 Microstructures of the alloy 1# & 2# after different homogenization treatment

2.3 挤压态合金力学性能

图 5 为两种合金在 520 °C 固溶 2 h 后在 180 °C 时效过程下的时效硬化曲线. 合金的时效过程均呈典型的三阶段时效: 欠时效、峰时效和过时效. 1#合金在快速达到一定硬度后, 硬度值就开始缓慢增长, 直到 12 h 达到最高点 169 MHV; 而添加 Zn 的 2#合金, 初始硬化速率与 1#合金相比有显著提高, 出现明显的峰值, 在 8 h 时达到 182 MHV, 比 1#合金提高了 13 MHV. 对经过峰时效处理 (T6 态) 的两种合金进行室温力学性能测试, 结果显示: 1#合金的抗拉强度为 461 MPa,  $\sigma_{0.2}$  为 437 MPa, 伸长率为 14.48%; 2#合金的抗拉强度为 484 MPa,  $\sigma_{0.2}$  为 464 MPa, 比 1#合金的抗拉强度提高了 23 MPa, 伸长率为 14.4%, 与 1#合金相当. 从图 6 也可以看出, 两种合金的断裂形式也基本相同.

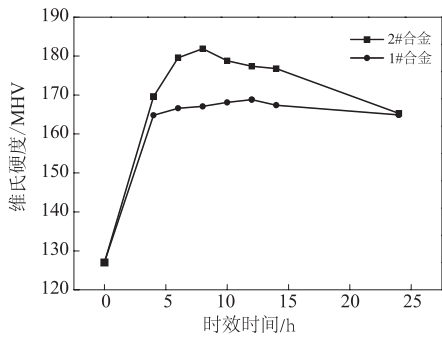


图 5 两种合金在 180 °C 时的时效硬化曲线

Fig 5 Age hardening curves of the two alloys at 180 °C

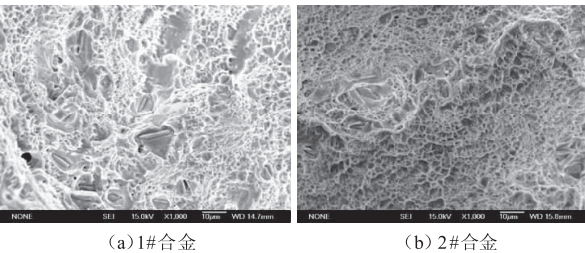


图 6 2 种合金室温拉伸断口形貌

Fig. 6 Fracture images of the two alloys

上述结果表明, 添加 0.6% Zn 元素加快了挤

压态合金的时效反应速率, 提高了硬化水平, 在保持合金拉伸延性的同时提高了合金的拉伸强度.

3 讨论

比较两种合金的拉伸性能可以发现, Zn 的添加提高了合金的拉伸强度, 且几乎不影响合金的伸长率. Zn 在铝合金中的固溶度很高, 室温 20 °C 下为 2.00%, 在 380 °C 时可以达到 32.8%. 而在本实验中, 2#合金中 Zn 的添加量为 0.6%, 所以 Zn 很可能以固溶态的方式存在于合金中, 通过增大合金的晶格畸变程度来影响合金的组织与性能. 金属 Al 的层错能达  $0.20 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而在 Al 中加入溶质原子后其层错能会有所降低, 特别是固溶度大的溶质原子, 对层错能的影响更大, 而 Zn、Mg 和 Ag 等元素在 Al 中有较大的固溶度, 这些固溶原子聚集在密排  $\{111\}_\alpha$  面上, 能显著降低 Al 合金的层错能, 有利于大量层错的形成, 为在  $\{111\}_\alpha$  面上析出的密排六方相 (如  $\Omega$  相) 提供优越的形核位置, 而析出相的大小、分布及密度对铝合金的性能影响很大.

4 结论

- (1) Al-5.0Cu-0.4Mg-0.4Ag 合金中添加 0.6% Zn 元素后, 在铸态合金中 Zn 基本呈均匀分布, 两种合金可在相同均匀化制度下进行均匀化处理.
- (2) 添加 0.6% Zn 元素的合金时效初期反应速度明显加快, 且峰时效硬度高于不含 Zn 元素的 Al-Cu-Mg-Ag 合金, 并且使合金的拉伸强度得到提高, 而且合金仍能保持较高的伸长率. 这可能是 Zn 元素固溶于基体中, 增大了合金的晶格畸变, 降低了 Al 合金的层错能, 促进了强化相的析出, 致使合金的性能得到提高.

参考文献:

[1] 宋旻, 肖代红, 贺跃辉, 等. 稀土元素对 Al-Cu-Mg-Ag 合金显微组织与时效行为的影响[J]. 中国有色金属

- 属学报,2009,19(8):1356-1365.
- [2] SCULLY J R, LITTLE D A, CONNOLLY B J. An electrochemical framework to explain the intergranular stress corrosion behavior in two Al-Cu-Mg-Ag alloys as a function of aging [J]. Corrosion science, 2007, 49 (2):347-372.
- [3] CHANG C H, LEE S L, LIN J C, et al. Effect of Ag content and heat treatment on the stress corrosion cracking of Al-4.6Cu-0.3Mg alloy [J]. Materials chemistry and physics, 2005, 91 (3):454-462.
- [4] 刘晓艳,潘清林,陆智伦,等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金高温蠕变行为[J]. 金属学报, 2011, 47(1):53-60.
- [5] 赵启淞,起华荣,王璐,等. 钛加入量对铝铜镁稀土合金组织和拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(12):67-70.
- [6] 杨兵,杨天云,周鹏,等. 不同 RE 含量对 Al-Cu-Mn 合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2012, 33 (2):171-173.
- [7] 周娴,陈志国,黄裕金,等. 微量 Ge 对 Al-1.5Cu-4.0Mg 合金时效行为及微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7):1513-1520.
- [8] SHI Yaowu, YU Yang, LI Yaping, et al. Study on the microstructure and wettability of an Al-Cu-Si braze containing small amounts of rare earth erbium [J]. Journal of materials engineering and performance, 2009, 18(3):278-281.
- [9] XIA Yumei, BAI Zhihao, QIU Feng, et al. Effects of multi-modification of rare earth  $\text{Pr}_x\text{O}_y$  and  $\text{La}_x\text{O}_y$  on microstructure and tensile properties of casting Al-Cu alloy [J]. Materials science & engineering A, 2012, 558(3):602-606.
- [10] 向青春,侯丽娜,赵静,等. Sc、Zr 微合金化对 Al-4Cu-1.5Mg 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 59(7):611-645.
- [11] 王旭,吴私,刘运腾,等. Al-Zn-Mg-Cu 系合金微合金化的研究进展[J]. 山东科学, 2014, 27(1):56-62.
- [12] 李锡武,熊柏青,张永安,等. 时效对新型 Al-Zn-Mg-Cu 合金力学及应力腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属, 2010, 34(4):503-508.
- [13] 王正安,汪明朴,杨文超,等. 1973 铝合金铸态组织及均匀化退火组织研究[J]. 材料工程, 2010, 43 (5):56-63.
- [14] 陈旭. Al-Zn-Mg-Cu 合金热处理工艺及组织性能研究[D]. 长沙:中南大学材料科学与工程学院, 2012.

## Effect of Zn on the Microstructures and Mechanical Properties of an Al-Cu-Mg-Ag Alloy

WANG Jiefang, ZHANG Duo, GUO Qiaoneng, LIU Zhongxia, WANG Mingxing

(Key Laboratory of Materials Physics of Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The effect of zinc on the microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy was investigated using optical microscope, differential thermal scanners, scanning electron microscope, hardness and tensile property test. The results showed that the addition of Zn did not change the morphology and composition of the second phase, the best homogenization treatment of the alloy was  $500\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ . The peak aging hardness was increased from 169MHV to 182 MHV, the tensile strength and yield strength at room temperature were increased by 23 MPa and 27 MPa, respectively. And the elongation of the alloy was still kept at a high level of 14%. The reason could be the solution of the zinc increase the crystal lattice distortion, and then lead to the improvement of the mechanical properties.

**Key words:** Al-Cu-Mg-Ag alloy; zinc; distribution; lattice distortion; mechanical properties