

Cu、Li 含量对 Mg、Ag、Zn 复合微合金化铝锂合金力学性能及微观组织的影响

李劲风¹ 陈永来² 张绪虎² 郑子樵¹

(1 中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 通过 18 个不同 Cu (3.24% ~ 4.16%)、Li (0.94% ~ 1.44%) 含量的 0.4Mg+0.4Ag+0.4Zn 复合微合金化 Al-Cu-Li 合金,研究总结了 T8 时效处理时 Cu 含量及 Li 含量对铝锂合金强度和微观组织的影响,并采用合金中非固溶 Cu、Li 原子总分数及 Cu/Li 原子分数比例阐明了强度及微观组织的影响规律及机理。结果表明:合金中时效强化相包括 T1 相(Al_2CuLi)、 θ' 相(Al_2Cu)和 δ' 相(Al_3Li)。Cu、Li 原子总分数及其比例增加,合金中时效强化相总量及 T1 相比比例大,合金强度较高。而 Cu/Li 原子分数比例较低, δ' 相比比例增加,T1 相比比例下降,合金强度降低。

关键词 铝锂合金,强度,微观组织,析出相

中图分类号: TG14

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.006

Influence of Cu and Li Contents on Mechanical Properties and Microstructures of Mg-, Ag- and Zn-Microalloyed Al-Li Alloys

LI Jinfeng¹ CHEN Yonglai² ZHANG Xuhu² ZHENG Ziqiao¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstracts Based on 18 Al-Li alloys with various Cu (3.24% ~ 4.16%) and Li (0.94% ~ 1.44%) contents, the influence of Cu and Li contents on the mechanical properties and microstructures of T8 aged Al-Li alloys with micro-alloying elements of 0.4Mg, 0.4Ag and 0.4Zn was investigated. The strengthening effect and microstructure variation were analyzed through total non-solution atomic fraction of Cu and Li and their atomic ratio. The strengthening precipitates consisted of T1 (Al_2CuLi), θ' (Al_2Cu) and δ' (Al_3Li). With increasing the total non-solution atomic fraction of Cu and Li and their atomic ratio, the total amounts of precipitates and the proportion of T1 precipitates were increased, the alloy strength was enhanced. Lower Cu/Li atomic ratio led to an increase in δ' precipitates, and therefore lowered the alloy strength.

Key words Al-Li alloy, Strength, Microstructure, Precipitates

0 引言

新型铝锂合金不仅具有低密度、高弹性模量、高比强度和高比刚度的优点,同时还兼具低疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及低温性能等特点,被认为是航空航天最理想的结构材料^[1-2]。铝锂合金是现阶段

所有铝合金中发展最快的合金品种,据资料初步统计,进入 21 世纪以来,欧美国家新推出的铝锂合金牌号达 12 个。

微合金化成分可以改变铝锂合金析出相的分布,从而提高铝锂合金的力学性能。如 Ag、Mg 的复合微

收稿日期:2014-10-08

基金项目:863 项目(No. 2013AA032401);中南大学教师基金(No. 2013JSJJ001)

作者简介:李劲风,1971 年出生,博士,教授,主要从事铝锂合金及金属腐蚀与防护的研究工作。E-mail:lijinfeng@csu.edu.cn

通讯作者:陈永来,1972 年出生,博士,高级工程师,主要从事铝合金、钛合金的研究工作。E-mail:chenyonglai@263.net

合金化可以大幅度提高 Al-Cu-Li 合金的时效强化效果^[3-4]。Hirosawa 等人^[5]研究发现,Ag、Mg 复合微合金化的铝锂合金 GP 区密度最大,因而生成更细小、弥散分布的 T1 相(Al₂CuLi)。另外,Mg-Ag 之间具有很强的相互作用,淬火后及时效初期,可形成大量 Ag-Mg 原子团簇,促使 Li 和 Cu 原子不断向 Ag-Mg 原子团簇扩散,从而导致 T1 相细小密集^[6]。正是基于 Ag、Mg 的复合微合金化在铝锂合金中的作用,Alcoa 在高 Cu/Li 比铝锂合金中添加微量元素 Mg 和 Ag,开发了高强 2195 铝锂合金。Mg、Ag 复合微合金化的铝锂合金还包括 2096、2098 和 2198 等铝锂合金。同时,Mg、Zn 的复合微合金化作用具有类似于 Mg、Ag 的复合微合金化作用^[7,8]。Mg、Zn 复合微合金化的铝锂合金包括 2099、2199 及具有国内自主知识产权的 2A97 铝锂合金。

目前,国际上铝锂合金的一个重要趋势是开发新型超高强铝锂合金,我国也开始了这方面研究。根据 Mg、Zn、Ag 在铝锂合金中的微合金化作用,作者项目组前期进行了 Mg+Ag、Mg+Zn 及 Mg+Zn+Ag 微合金化铝锂合金力学性能及微观组织的研究,发现同时添加 Mg+Ag+Zn 微合金化元素的铝锂合金强度高于添加 Mg+Ag 和 Mg+Zn 微合金化元素的铝锂合金^[9],说明 Mg+Ag+Zn 复合微合金化是开发超高强铝锂合金的重要基础。另外,Cu、Li 是 Al-Cu-Li 系铝锂合金的主合金元素,主要作为 θ' 相(Al₂Cu)、T1 相(Al₂Cu-Li)、δ' 相(Al₃Li) 等强化相的构成元素。铝锂合金的强度主要与合金析出相相关,而 Cu、Li 含量和 Cu/Li 比则控制着铝锂合金的析出相类型和分布。一般而言,铝锂合金强度随着 Cu、Li 含量的增加而提高。

基于上述考虑,本文在制备 18 个不同 Cu、Li 含量的 Mg+Zn+Ag 复合微合金化铝锂合金的基础上,综合研究了 Cu、Li 含量对其强度及微观组织的影响规律及机理,为新型超高强铝锂合金的开发提供成分参考依据。

1 试验方法

参考第三代高强铝锂合金 2195 及 2050 的主成分范围,设计了 Cu 含量 3.2%~4.2%、Li 含量 0.9%~1.4% 的 Mg+Ag+Zn 复合微合金化铝锂合金。由于熔炼成分与设计成分差异,实际总共熔炼制备了 18 个上述成分范围的铝锂合金,其成分如表 1 所示。除 Cu、Li 外,其他微合金化元素基本一致,分别为 0.4Mg、0.4Ag、0.4Zn、0.3Mn、0.1Zr、0.1Ti。铸锭经均匀化退火、热轧、中间退火后,冷轧至 2 mm 厚板材。冷轧板材经固溶、淬火处理后进行 T8 时效处理。所有合金 T8 时效处理均为 6% 冷轧预变形之后于 160℃ 进行不同时间的人工时效。所有合金均采用 MTS 858 材料试验机进行室温拉伸性能测试,拉伸速度为 2 mm/min。之后选择各合金的峰值强度数据进

行分析。

采用透射电镜(TEM)进行部分典型成分铝锂合金的微观组织观察。TEM 试样首先机械减薄至 0.08 mm 左右,而后采用双喷电解减薄仪制取。采用 Tecnai G²20 型 TEM 进行观察,加速电压为 200 kV。

表 1 试验铝锂合金 Cu、Li 成分表及其峰值抗拉强度

| Tab.1 Cu and Li contents of the experimental Al-Li alloys and their peak tensile strength wt% | | | | |
|---|------|------|-------|---------------------|
| 编号 | Cu | Li | Cu/Li | σ _b /MPa |
| 1 [#] | 3.81 | 1.28 | 2.977 | 623 |
| 2 [#] | 3.92 | 1.1 | 3.564 | 601 |
| 3 [#] | 3.35 | 1.26 | 2.659 | 578 |
| 4 [#] | 3.74 | 0.94 | 3.979 | 569 |
| 5 [#] | 3.41 | 0.98 | 3.480 | 568 |
| 6 [#] | 3.58 | 1.18 | 3.255 | 601 |
| 7 [#] | 3.3 | 1.12 | 2.946 | 551 |
| 8 [#] | 3.24 | 0.96 | 3.375 | 550 |
| 9 [#] | 3.45 | 1.48 | 2.331 | 579 |
| 10 [#] | 3.54 | 1.26 | 2.810 | 586 |
| 11 [#] | 3.48 | 1.44 | 2.417 | 601 |
| 12 [#] | 3.77 | 0.96 | 3.927 | 568 |
| 13 [#] | 3.76 | 1.34 | 2.806 | 625 |
| 14 [#] | 3.66 | 1.0 | 3.66 | 578 |
| 15 [#] | 3.66 | 1.38 | 2.652 | 617 |
| 16 [#] | 3.63 | 1.06 | 3.425 | 570 |
| 17 [#] | 4.16 | 1.1 | 3.782 | 609 |
| 18 [#] | 4.15 | 1.4 | 2.964 | 628 |

2 试验结果

2.1 力学性能

2.1.1 铜含量对铝锂合金强度的影响

由于合金成分较多,为较好分析铜含量对强度的影响,首先将部分合金按 Li 含量高低分组进行说明。当合金 Li 含量控制较低且基本不变时(0.96%~0.98%,5[#],8[#],12[#]),随铜含量由 3.24% (8[#]) 增加至 3.41% (5[#]),合金峰值强度从 550 MPa 提高至 568 MPa,增加约 15 MPa;而后铜含量进一步增加至 3.77% (12[#]),其强度基本没有增加。

当 Li 含量控制为中间成分且基本不变时(1.26%~1.28%,1[#],3[#],10[#])时,随 Cu 含量由 3.35% (3[#]) 增加至 3.54% (10[#]),合金峰值抗拉强度由 571 MPa 提高至 586 MPa;当 Cu 含量进一步增加至 3.81% (1[#]),合金峰值抗拉强度则顺序递增至 623 MPa。

当 Li 含量控制较高且基本保持不变时(1.38%~1.44%,11[#],15[#],18[#]),随 Cu 含量由 3.48% (11[#]) 增加至 3.66% (15[#]),峰值抗拉强度由 601 MPa 提高至 617 MPa;而后 Cu 含量进一步较大幅度增加至 4.15% (18[#]),峰值抗拉强度提高至 629 MPa,提高幅

度较小。上述不同 Cu 含量铝锂合金峰值抗拉强度比较如图 1 所示。低 Li 水平(0.96% ~ 0.98%)时,通过增加 Cu 含量来提高合金强度的作用有限。Li 含量较高(1.26% ~ 1.4%)时,可以通过提高 Cu 含量达到有效提高合金强度的目的。

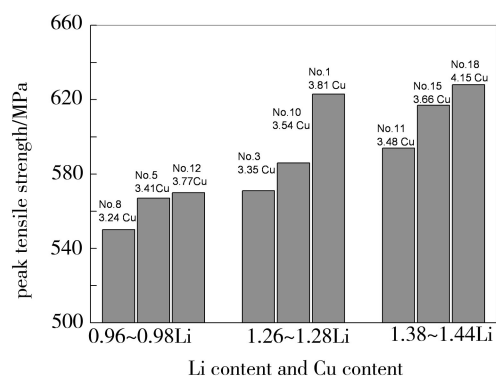


图 1 Cu 含量对峰值抗拉强度的影响

Fig. 1 Influence of Cu content on peak tensile strength

2.1.2 Li 含量对铝锂合金强度的影响

为较好分析 Li 含量对强度的影响,将部分合金按 Cu 含量高低分组进行阐述。当 Cu 含量较低且基本保持稳定(3.35% ~ 3.45%, 3#, 5#, 9#)时,随 Li 含量由 0.98% (5#) 增加至 1.26% (3#) 及 1.48% (9#) 时,峰值抗拉强度从 567 MPa 分别提高至 571 MPa 及 579 MPa,提高幅度极小。当 Cu 含量较高且基本保持稳定(3.66% ~ 3.81%, 1#, 12#, 15#)时,Li 含量由 0.96% (12#) 增加至 1.28% (1#),合金峰值抗拉强度由 568 MPa 大幅度提高至 623 MPa。然而当 Li 含量进一步增加至 1.38% 时,合金强度不仅未见提高,反而略有降低。上述不同 Li 含量合金峰值抗拉强度比较如图 2 所示。Cu 含量维持较低水平(3.35% ~ 3.

45%)时,通过增加合金中 Li 含量来提高合金强度的作用有限。当 Cu 含量较高(3.66% ~ 3.81%)时,可以通过增加 Li 含量来有效提高合金强度;但 Li 含量增加幅度太大时,其强化效果反而减弱,这说明强化效果应该与铝锂合金中 Cu/Li 比例有关。

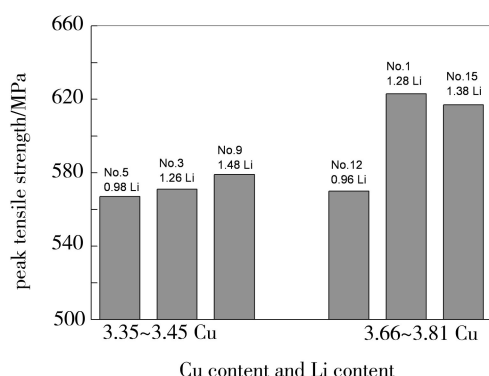
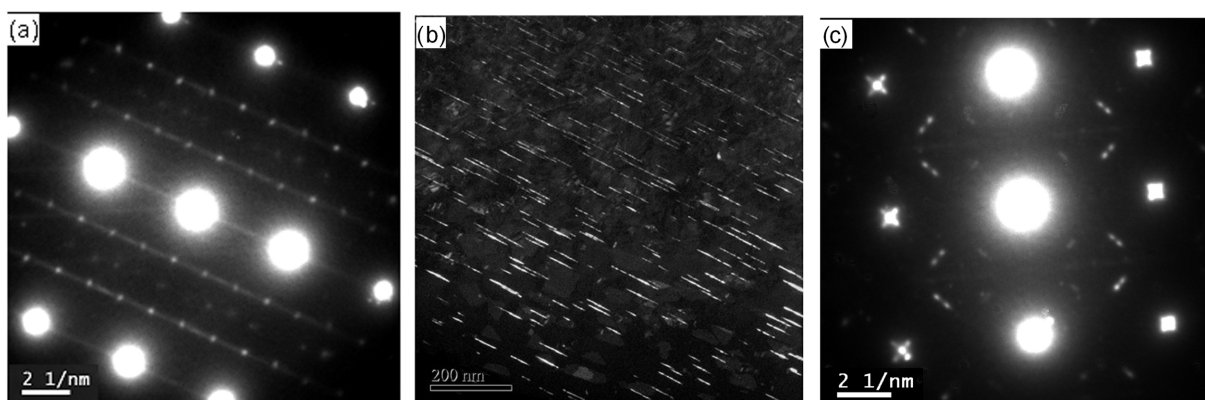


图 2 Li 含量对峰值抗拉强度的影响

Fig. 2 Influence of Li content on peak tensile strength

2.2 微观组织

由于合金成分较多,本文选择了三个典型 Cu、Li 含量的合金进行微观组织分析。这三个铝锂合金成分特征分别为高 Cu 低 Li 型(12#)、高 Cu 中 Li 型(1#)及低 Cu 高 Li 型(9#)。图 3 所示为高 Cu 低 Li 型铝锂合金(12#)峰时效时的衍射斑及 TEM 暗场像。合金 $[112]_{Al}$ 衍射斑中存在明显的 T1 相斑点[图 3 (a)],相应地 TEM 暗场像可观察到大量 T1 相[图 3 (b)]。另外,合金 $[100]_{Al}$ 衍射斑中存在有非常微弱的 θ' 相芒线[图 3 (c)],表明合金中应该存在极少量 θ' 相,但 TEM 很难观察。而铝锂合金中另一种比较常见的析出相 δ' 相,在该合金中并未观察到。



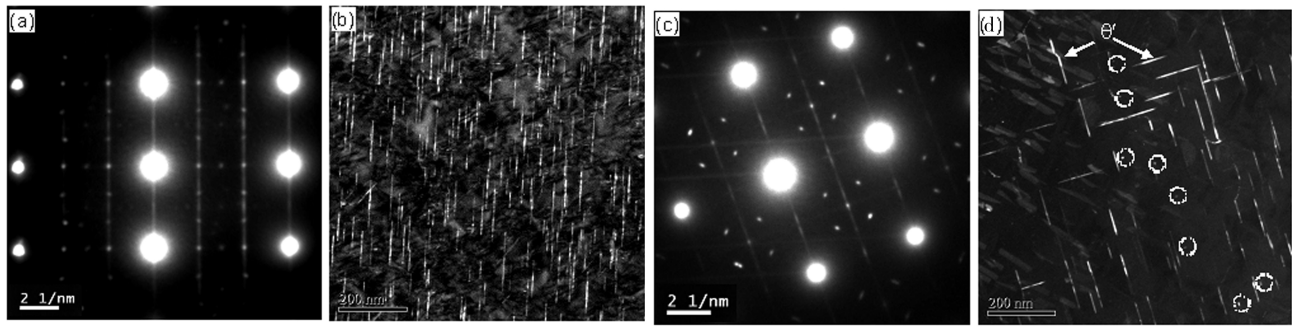
(a) $[112]_{Al}$ 衍射斑 (b) T1 相暗场像, $\langle 112 \rangle_{Al}$ 入射方向 (c) $[100]_{Al}$ 衍射斑

图 3 高 Cu 低 Li 型铝锂合金(12#)峰时效衍射斑及 TEM 暗场像照片

Fig. 3 Diffraction patterns and TEM image of 12# Al-Li alloy with 3.77% Cu and 0.96% Li

图 4 所示为高 Cu 中 Li 型铝锂合金(1#)峰时效时的衍射斑及 TEM 暗场像。 $[112]_{Al}$ 衍射斑中存在明显的 T1 相斑点[图 4 (a)],相应地 TEM 暗场像可观察到大量 T1 相[图 4 (b)]。同时,合金 $[100]_{Al}$ 衍射

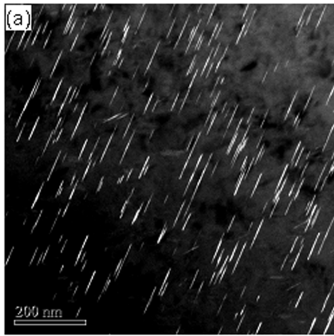
斑中也存在有比较明显的 θ' 相芒线及 δ' 相斑点[图 4 (c)];相比高 Cu 低 Li 型铝锂合金(12#)而言,其 θ' 相芒线及 δ' 相斑点更明显,表明合金中存在 θ' 相及 δ' 相比例增加。相应地, $\langle 100 \rangle_{Al}$ 方向暗场像可观察到较多 θ' 相及一定的 δ' 相(白色圆圈内)。



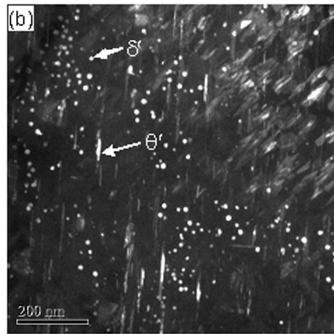
(a) $[112]_{Al}$ 衍射斑 (b) T1 相暗场像, $\langle 112 \rangle_{Al}$ 入射方向 (c) $[100]_{Al}$ 衍射斑 (d) θ' 相及 δ' 相暗场像, $\langle 100 \rangle_{Al}$ 入射方向
图4 高 Cu 中 Li 型铝锂合金(1[#])峰时效衍射斑及 TEM 暗场像照片

Fig. 4 Diffraction patterns and TEM images of 1[#] Al-Li alloy with 3.81% Cu

图5为低Cu高Li型铝锂合金(9[#])峰时效时的TEM暗场像。 $\langle 112 \rangle_{Al}$ 入射方向暗场像表明合金中存在较多的T1相[图5(a)],而 $\langle 100 \rangle_{Al}$ 入射方向暗场像则说明合金中出现数量较多的 θ' 相及 δ' 相[图5(b)]。而且相比1[#]铝锂合金而言,9[#]铝锂合金中T1相密度下降, δ' 相及 θ' 相析出量增加,特别是 δ' 相密度大幅度增加。



(a) T1 相暗场像, $\langle 112 \rangle_{Al}$ 入射方向



(b) θ' 相及 δ' 相暗场像, $\langle 100 \rangle_{Al}$ 入射方向

图5 低Cu高Li型铝锂合金(9[#])峰时效 TEM 暗场像照片

Fig. 5 TEM images of 9[#] Al-Li alloy with 3.45% Cu and 1.48% Li

上述三种比较典型 Cu、Li 含量铝锂合金的微观组织分析表明,在表1所示成分范围内,当 Cu/Li 比例比较高(12[#])时,合金中主要析出 T1 相,而 θ' 相及 δ' 相非常少。当 Cu/Li 比例降低时(1[#]),合金中主要析出相仍然为 T1 相,但 θ' 相及 δ' 相比例增加。当 Cu/Li 比进一步降低时(9[#]),虽然 T1 相、 θ' 相及 δ' 相均有析出,但 δ' 相比例大幅度增加,T1 相及 θ' 相减少。即宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第2期

铝锂合金中 Cu/Li 比例较高时,有利于 T1 相析出,而 Cu/Li 比例较低时则有利于 δ' 相析出。

3 分析与讨论

铝锂合金的强度不仅与合金化元素 Cu 和 Li 的含量有关,而且也与其比例有关^[10-11]。为方便阐述表1,还同时列出了 Cu/Li 质量分数比例及合金峰值抗拉强度。总体而言,Cu、Li 质量分数总和及其比例越大,峰值抗拉强度越高。然而,由于 Cu、Li 元素原子量相差较大,上述合金强度与 Cu、Li 质量分数及其比例的关系并不明显。

实际上,采用原子分数分析合金化元素 Cu、Li 含量对抗拉强度的影响更加有效。时效后铝锂合金中 Cu、Li 原子以两种形式存在,分别为固溶原子及非固溶原子(即析出相中原子)。超过固溶度的 Cu 和 Li 原子将在时效过程中形成第二相,影响强度的因素主要是含 Cu 或(和)Li 的析出相。通常,合金中 Cu、Li、Mg、Ag、Zn 等元素在 Al 基体中的固溶度相互有所影响,即由于 Cu 或 Li 的固溶,将导致 Li 或 Cu 固溶度降低。由于缺乏具体数据,为简化分析过程,本文在此作一简单假设,即假设 Cu 和 Li 在该体系铝锂合金中 160℃时效温度时的固溶度约为 Al-Cu 和 Al-Li 系二元相图中固溶度的 60%。根据 Al-Cu 和 Al-Li 系二元相图,160℃时 Cu 和 Li 在纯 Al 中的固溶度分别约为 0.1wt% 和 0.5wt%。将表1所示合金元素 wt% 转化 at%,继而计算相应的非固溶 Cu、Li 原子分数总和及原子分数比例,结果如表2所示。同样为方便描述,表2同时列出了相应合金的峰值抗拉强度。根据表2所示非固溶 Cu 和 Li 原子分数总和及其比例,可以发现两个非常明显的现象:(1)当非固溶 Cu 和 Li 原子分数总和基本相当时,随 Cu/Li 原子分数比例增加,铝锂合金强度提高;如 9[#]、11[#]及 18[#]合金,非固溶原子分数总和基本相当(5.82at% ~ 5.95at%),但 Cu/Li 原子分数比例由 0.319 逐步增加至 0.414,相应地其峰值抗拉强度由 579 MPa 逐渐提高至 628 MPa;(2)当 Cu/Li 原子分数比例基本相当时,随非固溶 Cu 和 Li 原子分数总和增加,合金强

度提高;如 8[#]、16[#]及 2[#]合金,其 Cu/Li 原子分数比例基本相当(0.521~0.536),但非固溶 Cu 和 Li 原子分数总和由 3.94 at% 逐步增加至 4.78at%,相应地合金峰值抗拉强度由 550 MPa 逐渐提高至 601 MPa。而对于 9[#]和 14[#]合金而言,虽然 9[#]合金非固溶原子分数总和(5.95at%)大于 14[#](4.28at%),然而其 Cu/Li 原子比(0.319)低于 14[#]合金(0.570),因而其强度基本相当。

表 2 非固溶 Cu 与 Li 原子分数总和、原子分数比例及其峰值抗拉强度

Tab.2 Calculated total non-solution atomic fraction of Cu and Li, their ratio and corresponding peak tensile strength at%

| 编号 | Cu+Li/at% | Cu/Li | σ_b /MPa |
|-----------------|-----------|-------|-----------------|
| 1 [#] | 5.39 | 0.425 | 623 |
| 2 [#] | 4.78 | 0.536 | 601 |
| 3 [#] | 5.10 | 0.381 | 578 |
| 4 [#] | 4.10 | 0.637 | 569 |
| 5 [#] | 4.10 | 0.546 | 568 |
| 6 [#] | 4.91 | 0.444 | 601 |
| 7 [#] | 4.56 | 0.438 | 551 |
| 8 [#] | 3.94 | 0.534 | 550 |
| 9 [#] | 5.95 | 0.319 | 579 |
| 10 [#] | 5.19 | 0.403 | 586 |
| 11 [#] | 5.82 | 0.333 | 601 |
| 12 [#] | 4.18 | 0.623 | 568 |
| 13 [#] | 5.59 | 0.396 | 625 |
| 14 [#] | 4.28 | 0.570 | 578 |
| 15 [#] | 5.69 | 0.371 | 617 |
| 16 [#] | 4.49 | 0.521 | 570 |
| 17 [#] | 4.89 | 0.570 | 609 |
| 18 [#] | 5.99 | 0.414 | 628 |

Al-Cu-Li 系铝锂合金的时效过程中,非固溶 Cu 和 Li 原子主要形成 T1 相、 θ' 相或 δ' 相,析出相的总量及不同析出相的比例分数决定于合金中非固溶的 Cu 和 Li 原子总量及其比例。随着非固溶 Cu 和 Li 原子分数总和增加,形成的析出相总量增加,因而可能导致强度增加。另外,在上述三种析出相中,T1 相呈片状,为六方晶体结构(HCP),与基体位向关系为 $\{0001\}_{T1} // \{111\}_{Al}$ and $\langle 1010 \rangle_{T1} // \langle 110 \rangle_{Al}$ ^[12]。因此,T1 相对 $\{111\}_{Al}$ 面位错滑移具有强烈的阻碍作用;相对于 θ' 相及 δ' 相,T1 相的强化效果最大。合金中 Cu/Li 比例较高(12[#]合金)时,T1 相析出分数最大, θ' 相和 δ' 相析出分数非常低(图 3)。而 Cu/Li 比例降低,则导致合金中 δ' 相比例增加;9[#]合金虽然 Cu、Li 原子分数总量较高,但 Cu/Li 比例较低,合金中 δ' 相析出比例大幅度增加,而 T1 相析出密度降低(图 5),因而其强化效果降低。

4 结论

研究总结了 18 个不同 Cu (3.24~4.16)、Li (0.94~1.44)含量 Al-Cu-Li 系铝锂合金 T8 态时效时的强度及微观组织,详细分析了 Cu、Li 含量对铝锂合金强度及微观组织的影响规律及其机理。主要结论如下:

(1)上述 Cu、Li 含量铝锂合金中时效强化相包括 T1 相、 θ' 相和 δ' 相。

(2)Cu、Li 原子总分数及其比例增加,合金中时效强化相总量及 T1 相比比例大,合金强度较高。而 Cu/Li 原子分数比例降低, δ' 相比比例增加,T1 相比比例下降,合金强度降低。

参考文献

- [1] 郑子樵,李劲风,陈志国,等. 铝锂合金的合金化与微观组织演化研究[J]. 中国有色金属学报,2011, 21(10): 2337-2349
- [2] 李劲风,郑子樵,陈永来,等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺,2012,42(1):13-19
- [3] 王瑞琴,郑子樵,陈圆圆,等. Ag, Mg 合金化对 Al-Cu-Li 合金时效特性和显微组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2009, 38(4):622-626
- [4] 易宏坤,郑子樵. 微量 Mg, Ag 对 Al-Li-Cu 系合金性能和组织的影响[J]. 1999, 30(3): 292-294
- [5] Hiroswawa S, Sato T, Kamio A. Effects of Mg addition on the kinetics of low temperature precipitation in Al-Li-Cu-Ag-Zr alloys[J]. Materials Science Engineering A, 1998, 242: 195-201
- [6] Murayama M, Hono K. Three dimensional atom probe analysis of pre-precipitate clustering in Al-Cu-Mg-Ag alloys [J]. Scripta Mater., 1998, 38:1315
- [7] 魏修宇,郑子樵,余玲娟,等. Mg、Zn 在 2099 铝锂合金中的微合金化作用[J]. 稀有金属材料与工程,2010, 39(9):1583-1587
- [8] 朱小辉,郑子樵,钟申. Mg 和 Zn 对 2099 合金时效组织与拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2010, 20(10): 1861-1867
- [9] 罗先甫,郑子樵,钟继发,等. Mg、Ag、Zn 对一种新型铝锂合金时效行为的影响[J]. 中国有色金属学报,2013, 23(7):1833-1842
- [10] Decreus B, Deschamps A, Geuser F De, et al. The Influence of Cu/Li ratio on precipitation in Al-Cu-Li-X alloys [J]. Acta. Mater., 2013, 61: 2207-2218
- [11] Hyung-Ho Jo, Hirano K. Precipitation processes in Al-Cu-Li alloy studying by DSC [J]. Mater. Sci. Forum., 1987 (13/14): 377-382
- [12] Kumar K S, Brown S A, Pickens J R. Microstructural evolution during aging of an Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr alloy [J]. Acta. Mater., 1996, 44: 1899-1915

(编辑 李洪泉)