第 28 卷第 1 期 Volume 28 Number 1 2018年1月 January 2018

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.01.03

Ce 对高强 Al-Cu-Li 合金组织及 拉伸性能的影响



潘 波¹,李 寄¹,李劲风¹,马鹏程²,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)

摘 要:采用金相显微镜、透射电镜、扫描电镜及拉伸性能在测试研究 0.11% Ce(质量分数)添加对一种 Al-Cu-Li 系高强铝锂合金薄板 T8 态时效(5%冷轧预变形+155 ℃时效)组织和力学性能的影响。结果表明: 0.11% Ce 添加明 显降低合金强度,但伸长率略有增加。微量 Ce 添加可细化铸态晶粒组织及固溶再结晶晶粒组织;而且微量 Ce 添 加未改变铝锂合金中时效析出相的种类,主要强化相仍然为 *T*1 相(Al₂CuLi)及 θ'相(Al₂Cu),但其数量减少。铝锂 合金中添加微量 Ce,凝固时可形成含 Ce 且富 Cu 的 Al₈Cu₄Ce 相粒子,在后续均匀化及固溶处理时均难以完全溶 解,导致固溶基体中的 Cu 含量降低,时效时含 Cu 析出相 *T*1 相及 θ'相含量减少,合金强度降低。

关键词: 铝锂合金; Ce 微合金化; 显微组织; 强度

TENX	

新型铝锂合金是航空航天最理想的结构材料^[1-3], 迄今为止已发展了三代铝锂合金,其中第三代铝锂合 金已在航天航空结构件上获得广泛应用。目前,欧美 正致力于开发第四代新型铝锂合金。

添加微合金化元素是开发新型铝锂合金最重要的 方法。一些微合金化元素在不改变铝锂合金析出相类 型的基础上,通过改善析出相的分布提高铝锂合金的 力学性能。如 Mg、Ag 原子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,因而 Mg、 Ag 复合微合金化的铝锂合金时效时可析出更细小、更 弥散分布的 *T*1 相(Al₂CuLi),相应地可以较大幅度提 高 Al-Cu-Li 系铝锂合金的时效强化效果^[4-7]。基于 Mg、 Ag 复合微合金化的作用,美国开发了高强 Weldalite 049 系列的高强铝锂合金,其中的 2195 铝锂合金已应 用于航天飞机外挂低温燃料贮箱^[8]。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^[9-10],相应的铝锂合金包括 2099、2199 及具 有国内独立知识产权的 2A97 合金等^[11-13]。

稀土在铝合金中具有很多积极的作用,主要包括 以下几个方面^[14-15]:1)变质作用,能减小铝合金铸造 枝晶间距,细化铸造组织; 2) 净化熔体,消除 H、Fe 等有害杂质; 3) 微合金化作用,对铝合金起一定的改 性作用。Ce 是铝合金中最常添加的稀土元素,大量研 究表明,铝导体材料中添加微量 Ce 可以显著细化其 铸态晶粒组织,并与其中杂质形成化合物析出,改变 杂质原来的固溶存在方式,一定程度提高强度并明显 提高其导电性能^[16-18]。同时,也有研究表明,在不同 系列铝合金中,微量 Ce 添加对强度具有不同的作用 效果。在 Al-Zn-Mg-(Cu)合金中添加 0.25%以上的 Ce 会降低合金的强度^[19-20],而在 Cu 含量接近极限固溶 度的 Al-Cu-Mg-Ag-Zr 合金(Cu 含量 5.3%,质量分 数)^[21-22]及 Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr 合金(Cu 含量 5.8%,质 量分数)^[23]中,微量 Ce 添加可提高其强度。

超高强铝锂合金是第四代新型铝锂合金的一个重 要发展方向,其中 Mg、Ag、Zn 多元复合微合金化是 开发超高强铝锂合金的一个重要思路^[24-26]。鉴于稀土 元素 Ce 可提高 Cu 含量为固溶度极限附近铝锂合金的 强度^[23],而目前高强铝锂合金中 Cu 含量范围一般在 3.5%~4.5%之间,本工作研究了微合金化元素 Ce 对 Mg、Ag、Zn 多元复合微合金化的 Al-4.25Cu-1.2Li-0.12Zr 超高强铝锂合金组织和力学性能的影响。

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA032401)

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2017-03-24

通信作者: 李劲风, 教授, 博士; 电话: 13278861206; E-mail: lijinfeng@csu.edu.cn

1 实验

以 Al-4.25Cu-1.2Li-0.12Zr-0.4Mg-0.4Ag-0.45Zn (质量分数,%)为基础,分别熔铸制备了不含 Ce 及含 0.11% Ce 两种成分的铝锂合金。经化学分析,合金中 Cu、Li、Ce 的化学成分如表 1 所列。铸锭经(470 ℃, 8 h)+(530 ℃,24 h)双级均匀化退火、热轧、中间退火 后,冷轧成 2 mm 厚度薄板。冷轧薄板经 510 ℃盐浴 固溶处理 40 min,冷水淬火处理后进行 T8 时效处理。 T8 时效处理工艺为淬火后先进行 5%的冷轧预变形, 再于 155 ℃进行不同时间的人工时效。

表1 实验用铝锂的化学成分

 Table 1
 Chemical compositions of experimental Al-Li alloy

Allow No	Mass fraction/%						
Alloy No.	Cu	Li	Ce	Zr	Mg	Ag	Zn
1	4.25	1.17	0	0.12	0.4	0.4	0.45
2	4.24	1.26	0.11	0.12	0.4	0.4	0.45

原始铸态组织及淬火处理后板材晶粒组织经打磨 抛光及阳极覆膜处理后采用 Leica DMILM 金相显微 镜进行金相组织观察。

原始铸态组织及淬火组织采用 Sirion 200 场发射 扫描电镜(SEM)进行观察,并利用其附带的背散射 (BSE)系统成像,第二相粒子成分采用能谱(EDS)进行 分析。

采用 MTS 858 材料试验机对 T8 时效处理后铝锂 合金进行室温拉伸性能测试,拉伸速率为 2 mm/min。 取样方向为轧制方向,样品平行段宽度 8 mm,标距 长度 30 mm。采用 Tecnai G²20 型透射电镜(TEM)对 T8 时效的显微组织(时效析出相)和选区电子衍射 (SAED)进行观察。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,TEM 观察时加 速电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 室温拉伸性能

图 1 所示为铝锂合金在 T8 处理时拉伸性能随时 效时间的变化曲线。由图 1 可见,两种合金强度均随 着时效时间的延长而逐渐增加,达到峰值后缓慢下降; 伸长率则随着时效时间的延长而逐渐降低,而后长时 间趋于稳定。

在整个时效过程中,不含 Ce 合金 1 的强度明显 较高,峰值抗拉强度达 620 MPa 以上,而含 0.11% Ce 合金 2 的强度下降约 30 MPa。由于合金 2 的 Li 含量 (1.26%)稍高于合金 1 的(1.17%),当无 Ce 微合金化作 用时,这种 Cu、Li 成分特征应该导致合金 2 的强度 高于合金 1 的^[27]。因此,本研究中合金 2 的强度较低 应该是 Ce 微合金化的影响。另外,但值得注意的是, 含 0.11% Ce 合金 2 的伸长率稍高。



图1 铝锂合金在 T8 态时效(5%冷轧预变形+155 ℃时效)时 性能随时效时间的变化

Fig. 1 Change of tensile strength (a), yield strength (b) and elongation (c) of Al-Li alloys with aging time at T8 aging (5% cold rolling pre-deformation+aging at 155 $^{\circ}$ C)

第28卷第1期

2.2 Ce 微合金化对组织的影响

2.2.1 晶粒组织

图 2 所示为不含 Ce(合金 1)及含 0.11% Ce(合金 2) 的铸态金相照片,两种铝锂合金都呈树枝状晶粒组织。 但从晶粒尺寸而言,合金 1 的晶粒尺寸约 300~800 μm(见图 2(a)),而合金 2 的晶粒尺寸约 100~400 μm(见 图 2(b))。0.11% Ce 的添加比较显著细化了铝锂合金铸 态晶粒组织。

图 3 所示为不含 Ce(合金 1)及含 0.11% Ce(合金 2) 的冷轧并固溶、淬火处理后的纵截面金相照片。由于 冷轧薄板的储能较高,盐浴固溶处理时两种铝锂合金 均发生了明显再结晶。合金 1 淬火态的再结晶晶粒尺 寸较大,部分晶粒尺寸可达 100 μm 以上(见图 3(a)); 而合金 2 的再结晶晶粒尺寸均小于 80 μm(见图 3(b)), 即 0.11% Ce 的添加同样细化了该铝锂合金淬火态再 结晶晶粒组织。

2.2.2 时效析出相

图 4 所示为不含 Ce 及含 0.11% Ce 合金 T8 峰时 效的 SAED 谱及 TEM 暗场像照片。合金 1〈100〉方向 入射的 SAED 谱中可以发现明亮的 θ'相斑点,其对应 TEM 暗场像中也出现较多尺寸约为 230 nm、互相垂 直分布的 θ'相(见图 4(a)),即合金 1 中析出了大量 θ' 相。同时,〈112〉方向入射的 SAED 谱中出现了明亮的 *T*1 相斑点,相应 TEM 暗场像可以发现其中析出了大



图 2 不含 Ce 及含 0.11% Ce 合金的铸态金相组织 Fig. 2 Metallographic images of Ce-free (a) and 0.11%Ce-containing (b) alloy cast ingots



图 3 不含 Ce 及含 0.11% Ce 合金淬火态纵截面金相组织 Fig. 3 Metallographic images of longitudinal sections of qunched state Ce-free (a) and 0.11% Ce-containing (b) alloys

量分布密集的 T1 相,其尺寸约为 300 nm(见图 4(b))。

由合金2(100)方向入射SAED 谱中可观察到θ'相斑 点但相对比较微弱,TEM 暗场像中观察到的θ'相相对 较少,其尺寸约为260 nm(见图4(c))。另外,(112)方向 入射的SAED 谱中也出现了明亮的T1 相斑点,对应的 暗场像则观察到大量尺寸约为280 nm 的T1 相(见图 4(d))。与合金1比较,合金2的时效析出相仍然为T1 相及θ'相,T1 相数量基本相当,但θ'相数量明显减少。

为相对定量描述 0.11% Ce 添加对铝锂合金峰时 效时析出相的影响,采用 Photoshop 软件对上述暗场 像照片中的 T1 相和 θ'相数量进行统计,计算 T1 相和 θ'相的平均数密度并统计其尺寸;统计时一般选取 3 张照片,统计结果如表 2 所列。

2.2.3 铸态组织中第二相

图 5 所示为不含 Ce 的合金 1 铸态组织的 BSE 像 及其中第二相粒子 EDS 分析。铸态组织中均存在较多 的非平衡凝固共晶相(见图 5(a)和(b)),而 EDS 分析(见 图 5(c)和(d))表明这些非平衡凝固共晶相主要为 θ 相 (Al₂Cu)及少量含 Ag 的 S 相(Al₂CuMg)。另外,还有极 少量常见的含 Fe 杂质相粒子。

图 6 所示为含 0.11% Ce 的合金 2 的铸态组织 BSE 像及其中第二相粒子 EDS 分析。铸态组织中的非平衡



图 4 不含 Ce 及含 0.11% Ce 合金 T8 峰时效时的 SAED 谱及 TEM 暗场像

Fig. 4 SAED patterns and dark field (DF) TEM images of Ce-free ((a), (b)) and 0.11% Ce-containing ((c), (d)) alloys after T8 peak-aging: (a), (c) θ' precipitates (direction parallels to $\langle 100 \rangle_{Al}$); (b), (d) *T*1 precipitates (direction parallels to $\langle 112 \rangle_{Al}$)

表 2 不含 Ce 及含 0.11% Ce 合金 T8 峰时效时 T1 相和 θ 相数密度及尺寸

Table 2 Population density and diameter of T1 and θ' precipitates in T8 peak-aged Ce-free and 0.11% Ce-containing alloys

Alloy No. —	T1 precipitate from DF images a	$ \log \langle 112 \rangle_{Al}$ direction	θ' precipitate from DF images along $\langle 100 \rangle_{\rm Al}$ direction		
	Population density/µm ²	Diameter/nm	Population density/µm ²	Diameter/nm	
1	124.2	200-300	148.8	210-230	
2	130.4	160-280	63.3	220-260	

凝固共晶相呈连续网状分布(见图 6(a)和(b))。EDS 分 析合金中的非平衡凝固共晶相主要为 θ 相(见图 6(c)), 同时还存在许多含 Ce 且富 Cu 的第二相粒子(见图 6(d))。根据文献[28],这种含 Ce 且富 Cu 的粒子应该 为 Al₈Cu₄Ce。同样,铸态组织中还含有极少量常见的 含 Fe 杂质相粒子。

2.2.4 固溶组织中第二相

图 7 所示为不含 Ce 合金 1 淬火态的 BSE 像及未 溶残余第二相粒子的 EDS 分析。合金中未溶残留第二 相非常少(见图 7(a)); EDS 分析表明,这些粒子主要 为含 Fe 杂质相粒子(见图 7(b)和(c)),应该主要为 Al₇Cu₂Fe 粒子。

在含 0.11% Ce 的合金 2 中, 淬火态的未溶残余第 二相粒子明显增加(见图 8(a))。经 EDS 分析,这些未 溶的残余第二相粒子分为两种类型,第一种与合金 1 中残余第二相粒子一致,为 Al₇Cu₂Fe 型含 Fe 杂质相 粒子(见图 8(b)和(c));第二种为富 Cu 且含 Ce 的第二 相粒子 Al₈Cu₄Ce(见图 8(b)和(d))。



图 5 不含 Ce 的合金 1 的铸态 BSE 像及第二相粒子 EDS 的分析

Fig. 5 BSE images of Ce-free alloy 1 cast ingot ((a), (b)) and EDS analysis of positions A (c) and B (d) in Fig.(b)



图 6 含 0.11% Ce 的合金 2 铸态的 BSE 像及第二相粒子的 EDS 分析

Fig. 6 BSE image of 0.11% Ce-containing alloy 2 cast ingot ((a), (b)) and EDS analysis of positions A (c) and B (d) in Fig.(b)



图 8 含 0.11% Ce 合金 2 淬火态的 BSE 像及第二相粒子 EDS 分析

Fig. 8 BSE images of quenched 0.11% Ce-containing Al-Li alloy 2 ((a), (b)) and EDS analysis of positions A (c) and B (d) in Fig.(b)

3 分析与讨论

综上所述可知,上述 Al-Cu-Li 系铝锂合金中 Ce 的微合金化作用主要体现在以下几个方面:1) 形成难 溶的含 Ce 且富 Cu 的第二相粒子;2) 细化铸态组织 晶粒及再结晶晶粒组织;3) 降低时效态铝锂合金的 强度。

研究表明,在 Al-Cu-Ce 合金中,含 Ce 且富 Cu 的 Al₈Cu₄Ce 第二相粒子凝固过程中就开始形成。形成 的 Al₈Cu₄Ce 初晶可促进凝固时非均匀形核^[28],通过提 高凝固时的形核率,细化铸态组织晶粒。而后凝固过 程中形成的 Al₈Cu₄Ce 粒子在均匀化过程中很难完全 溶解至合金基体中,虽然部分连续的第二相粒子由于 轧制加工而破碎,但固溶处理时这些破碎的粒子仍不 能完全溶解,导致含 0.11% Ce 的合金 2 中未溶残余粒 子数量较多(见图 8(a))。这些未溶的 Al₈Cu₄Ce 粒子在 固溶处理时的再结晶过程中可阻碍晶界迁移,从而细 化了固溶处理时再结晶晶粒组织。

研究的铝锂合金主要通过时效热处理进行强化, 其时效强化相是从固溶体基体中析出的 *T*1 相及*θ*相。 TEM 观察表明,添加微量 Ce 将导致时效析出相 *T*1 相特别是 *θ*相析出数量减少(见图 4),这是含 0.11% Ce 合金 2 强度降低的直接原因。

在上述铝锂合金中添加 0.11% Ce, 通过形成难溶 相 Al₈Cu₄Ce 粒子细化了铸态晶粒组织及再结晶晶粒 组织,一定程度上具有有益的作用;但固溶处理时 Al₈Cu₄Ce 难溶残余相粒子可导致固溶基体的合金化 成分改变。由于这些粒子含有较多的 Cu 元素,导致 固溶处理后合金中许多 Cu 原子仍然以 Al₈Cu₄Ce 粒子 的形式存在,而不是以固溶 Cu 原子存在于固溶基体 中。相比于不含 Ce 的合金 1,含 0.11% Ce 合金 2 固 溶基体中的 Cu 原子含量降低。

本文作者在此做一简单定量计算,分析由于 Ce 元素添加导致固溶基体中 Cu、Li 含量的变化。计算 前先进行如下假设处理:1)杂质元素 Fe 及含 Fe 杂质 相忽略不计;2)固溶处理后 Mg、Ag、Zn、Li 及剩余 Cu 元素均固溶至基体中;3)所有 Zr 元素形成 Al₃Zr 粒子;4)根据 Al-Ce 二元相图,Ce 在 Al 中的极限固 溶度仅约 0.01%(摩尔分数),因此,假设 Ce 原子全部 与Cu结合形成富Cu 且含Ce 的第二相 Al₈Cu₄Ce 粒子。 根据上述假设,将所有元素质量分数先转化为摩尔分 数,而后重新计算固溶处理后固溶基体中的 Cu、Li 摩尔分数。为有利于直观认识,进一步将计算后固溶 基体中 Cu、Li 摩尔分数再转化为质量分数,计算结 果如表 3 所列。由此可见,固溶处理后,由于 Zr 元素 形成 Al₃Zr 粒子消耗了少量 Al 元素,导致合金 1 固溶 基体中 Cu 含量略高于合金原始 Cu 含量(即原始化学 分析的 Cu 含量)。而合金 2 中添加 0.11% Ce,导致固 溶基体中 Cu 含量低于合金原始 Cu 含量;原始合金的 Cu 含量为 4.24%,而固溶处理后基体中固溶 Cu 含量 较大幅度降低至 4.07%。

表 3 铝锂合金原始 Cu、Li 的浓度及淬火处理后固溶体的 Cu、Li 的浓度

Table 3Cu and Li concentrations in original Al-Li alloys andtheir solid solution

Stata	Allo	oy 1	Alloy 2		
State	w(Cu)/%	w(Li)/%	w(Cu)/%	w(Li)/%	
In original alloy	4.25	1.17	4.24	1.26	
In solid solution	4.26	1.17	4.07	1.27	

由于强化相 T1 相和 θ'相是在时效过程中从固溶 基体中析出,而 Cu 元素既是 T1 相也是 θ'相的组成元 素。固溶基体中 Cu 含量降低,将减少 T1 相和 θ'相含 量。因而在相同预变形量(5%)的 T8 态时效时,由于 含 0.11% Ce 合金 2 固溶基体中的 Cu 含量减少(见表 3),导致时效后含 Cu 的析出相减少(见表 2)。另外, 由于时效前预变形在淬火态基体中形成的位错主要有 利于时效时 T1 相的竞争析出^[29],因而,0.11% Ce 的 添加更主要导致 T8 时效时 θ'相的减少。

另外,添加 0.11% Ce 可稍提高该铝锂合金的伸长 率,这应该与以下几个因素有关: 1)稀土元素 Ce 能 够有效吸附杂质元素,减少杂质元素对铝锂合金的危 害; 2)稀土元素在铝合金中具有良好的精炼除气作 用,能与铝熔体中氢形成氢化物,降低合金中的氢含 量,提高铝锂合金质量^[14-15],增加其塑性变形能力。

4 结论

1) 0.11% Ce 的添加比较显著细化铝锂合金铸态 晶粒组织,并减小冷轧薄板固溶后的再结晶晶粒尺寸。

2) 铝锂合金中添加的微量 Ce 与 Cu 结合,在凝 固时形成含 Ce 且富 Cu 的 Al₈Cu₄Ce 粒子,可促进凝 固时的形核,同时这种粒子在均匀化及固溶处理时难 以溶解至固溶体基体中,可阻碍固溶处理时再结晶过 程中的晶界迁移,因而 Ce 微合金化在一定程度上有 细化晶粒的作用。

1861-1867.

3) 0.11% Ce 的添加未改变铝锂合金中时效析出 相的种类,合金的强化相仍为 *T*1 相及 θ'相。但含 Ce 且富 Cu 的难溶粒子 Al₈Cu₄Ce 导致固溶基体中 Cu 含 量降低,时效析出相的数量减少,合金强度降低。

REFERENCES

- RIOJA R J, LIU J. The Evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2012, 43: 3325–3337.
- [2] 李劲风,郑子樵,陈永来,张绪虎. 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.
 LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, CHEN Yong-lai, ZHANG Xu-hu.
 Al-Li alloys and their application in aerospace industry[J].
 Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 13-19.
- [3] RIOJA R J, DENZER D K, MOOY D, VENEMA G B. Lighter and stiffer materials for use in space vehicles[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13). Pittsburg: John Wiley & Sons, Inc, 2012: 593–598.
- [4] 王瑞琴,郑子樵,陈圆圆,李世晨,魏修宇. 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.
 WANG Rui-qin, ZHENG Zi-qiao, CHEN Yuan-yuan, LI

Shi-chen, WEI Xiu-yu. Effects of Ag, Mg micro-alloying on aging characteristics and microstructure of Al-Cu-Li alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2009, 38(4): 622–626.

[5] 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]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1999, 30(3): 292-294.

YI Hong-kun, ZHENG Zi-qiao. The influence of small additions of silver and magnesium on microstructures and properties of Al-Li-Cu system alloys[J]. Journal of Central South University of Technology (Nature Science), 1999, 30(3): 292–294.

- [6] HIROSAWA 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 and Engineering A, 1998, 242: 195–201.
- [7] MURAYAMA M, HONO K. Three dimensional atom probe analysis of pre-precipitate clustering in an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(8): 1315–1319.
- [8] JIANG Na, GAO Xiang, ZHENG Zi-qiao. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial production[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(5): 740–745.
- [9] 魏修宇,郑子樵,佘玲娟,陈秋妮,李世晨. 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.

WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao, SHE Ling-juan, CHEN Qiu-ni, LI Shi-chen. Microalloying roles of Mg and Zn additions in 2099 Al-Li alloy[J]. Rare Metal Mat Eng, 2010, 39(9): 1583–1587.

- [10] 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.
 ZHU Xiao-hui, ZHENG Zi-qiao, ZHONG Shen. Effect of Mg and Zn on microstructure and tensile properties of 2099 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10):
- [11] ROMIOS M, TIRASCHI R, PARRISH C, BABEL H W, OGREN J R, ES-SAID O S. Design of multistep aging treatments of 2099 (C458) Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(5): 641–646.
- [12] 袁志山,陆 政,谢优华,戴圣龙,刘常升.高强 Al-Cu-Li-X 铝锂合金 2A97 三级时效工艺及性能研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 79-82.

YUAN Zhi-shan, LU Zheng, XIE You-hua, DAI Sheng-long, LIU Chang-sheng. Study on triple aging and mechanical properties of high strength Al-Cu-Li-X aluminum-lithium alloy 2A97[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 79–82.

[13] 王 哲. 2A97 铝锂合金的热处理工艺及性能研究[D]. 长沙:
 中南大学, 2014.
 WANG Zhe. The study on heat-treatment process and

performance of 2A97 aluminium-lithium alloy[D]. Changsha: Central South University, 2014.

- [14] 杨遇春.稀土在有色金属合金中应用的新进展[J].稀有金属 材料与工程, 1993, 22(4): 1-6.
 YANG Yu-chun. The new evolution of application of rare-earth on nonferrous metal and alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1993, 22(4): 1-6.
- [15] 曹大力,石忠宁,杨少华,王吉坤,王兆文,邱竹贤.稀土在 铝及铝合金中的作用[J].稀土,2006,27(5):88-93.
 CAO Da-li, SHI Zhong-ning, YANG Shao-hua, WANG Ji-kun, WANG Zhao-wen, QIU Zhu-xian. Effects ofrare earth on aluminium and its alloys[J]. Chinese Rare Earths, 2006, 27(5): 88-93.
- [16] 李红英,孙 远,宾 杰,刘 洋,曹 俊.Ce 对耐热铝导体 材料铸态组织和性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版), 2011,42(10): 3026-3032.

LI Hong-ying, SUN Yuan, BIN Jie, LIU Yang, CAO Jun. Effect of cerium on as-cast microstructure and properties of heat-resistant aluminum conductor[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 3026–3032.

[17] 章德胜,刘 平,刘新宽,李 伟,马风仓,陈小红.高导电率、高强度耐热铝合金导体材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2012,41(24):24-27.
ZHANG De-shen, LIU Ping, LIU Xin-kuan, LI Wei, MA Feng-can, CHEN Xiao-hong, Research on progress of

Feng-can, CHEN Xiao-hong. Research on progress of high-conductivity and high-strength of aluminum conductor material[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 24–27.

[18] 刘顺华, 王桂芹, 高洪吾, 李长茂, 梁效礼, 张应俊. 稀土元

素对铝导体导电性能的影响[J]. 机械工程材料, 2005, 29(10): 46-49.

LIU Shun-hua, WANG Gui-qin, GAO Hong-wu, LI Chang-mao, LIANG Xiao-li, ZHANG Ying-jun. The influence of RE on the electric properties of aluminum conductors[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(10): 46–49.

[19] 胡桂云,陈送义,姜慧丽,王培吉,陈康华.稀土 Ce 对 7A52
 铝合金组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2016,26(7):
 1372-1382.

HU Gui-yun, CHEN Song-yi, JIANG Hui-li, WANG Pei-ji, CHEN Kang-hua. Effect of RE Ce on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1372–1382.

- [20] 王大庆, 王庆良. 稀土对 AlZnMgCu 合金铸态组织和力学性 能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 1998(S1): 3-7.
 WANG Da-qing, WANG Qing-liang. Effects of rare earth additions on the as cast microstructures and the mechanical properties of AlZnMgCu alloy[J]. Special-cast and Non-ferrous Alloys, 1998(S1): 3-7.
- [21] 肖代红,陈康华,宋 旼. 铈对 Al-Cu-Mg-Mn-Ag 合金时效析 出与显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 669-675.

XIAO Dai-hong, CHEN Kang-hua, SONG Min. Effect of cerium addition on precipitation and microstructure of Al-Cu-Mg-Mn-Ag alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(5): 669–675.

[22] 肖代红,王健农,丁冬雁,陈世朴. 微量 Ce 和 Ti 对 AlCuMgAg 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(4): 404-407.

XIAO Dai-hong, WANG Jian-nong, DING Dong-yan, CHEN Shi-pu. Effect of Ce and Ti doping on microstructure and properties of the alloy AlCuMgAg[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(4): 404–407.

[23] YU Xin-xiang, YIN Deng-feng, YU Zhi-ming. Effects of cerium and zirconium microalloying addition on the microstructures and tensile properties of novel Al-Cu-Li alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 1917–1923.

- [24] DENZER D K, RIOJA R J, RIOJA R J, VENEMA G B, COLVIN E L. The evolution of plate and extruded products with high strength and fracture toughness[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13), Pittsburg: John Wiley & Sons, Inc, 2012: 587–592.
- [25] 罗先甫,郑子樵,钟继发,张海锋,钟 警,李世晨,李劲风.
 Mg、Ag、Zn多元微合金化对新型 Al-Cu-Li 合金时效行为的 影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1833-1842.
 LUO Xian-fu, ZHENG Zi-qiao, ZHONG Ji-fa, ZHANG Hai-feng, ZHONG Jing, LI Shi-chen, LI Jin-feng. Effects of Mg, Ag and Zn multialloying on aging behavior of new Al-Cu-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1833-1842.
- [26] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials and Design, 2014, 56: 862–871.
- [27] 李劲风,陈永来,张绪虎,郑子樵. 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[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(2): 24-28.
 LI Jin-feng, CHEN Yong-lai, ZHANG Xu-hu, ZHENG Zi-qiao.
 Influence of Cu and Li contents on mechanical properties and micro-structures of Mg-, Ag- and Zn-microalloyed Al-Li alloys[J]. Aerospace Materials and Technology. 2015, 45(2): 24-28.
 [28] YU Xin-xiang, YIN Deng-feng, YU Zhi-ming, ZHANG Yi-ran,
- [28] YU Xin-Xiang, YIN Deng-reng, YU Zhi-ming, ZHANG Yi-ran, LI Shu-fei. Effects of cerium addition on solidification behaviour and intermetallic structure of novel Al-Cu-Li alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(6): 1423–1429.
- [29] LI Jin-feng, YE Zhi-hao, LIU Dan-yang, CHEN Yong-lai, ZHANG Xu-hu, XU Xiu-zhi, ZHENG Zi-qiao. Influence of pre-deformation on aging precipitation behavior of three Al-Cu-Li alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(2): 133–145.

Effect of Ce on structures and tensile properties of high-strength Al-Cu-Li alloy

PAN Bo¹, LI Rui¹, LI Jin-feng¹, MA Peng-cheng², CHEN Yong-lai², ZHANG Xu-hu², ZHENG Zi-qiao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
 2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Through metalloscopy, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy and tensile tests, the effect of 0.11% Ce (mass fraction) addition on structures and tensile properties of a high-strength Al-Cu-Li alloy with T8 aging (5% cold rolling pre-deformation and aging at 155 °C) was investigated. The results show that the addition of 0.11% Ce significantly decreases the strength, but enhances the elongation a little. The cast structure and re-crystallized grains after solution treatment are refined by the Ce addition. The precipitate types does not change with the small addition of Ce, and the aging precipitates are still *T*1(Al₂CuLi) and $\theta'(Al_2Cu)$ phases, but their amount decreases. As 0.11% Ce is added to the Al-Li alloy, Ce-contained and Cu-rich Al₈Cu₄Ce particles form during solidification process, which cannot be completely dissolved into the alloy matrix during homogenization and solution process. The concentration of dissolved Cu in solid solution decreases, which decreases the fraction of *T*1 and θ' precipitates and lowers the alloy strength.

Key words: Al-Li alloy; Ce micro-alloying; microstructure; strength

Received date: 2016-10-12; Accepted date: 2017-03-24

Corresponding author: LI Jin-feng; Tel: +86-13278861206; E-mail: lijinfeng@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)

Foundation item: Project(2013AA032401) supported by National High Technology Research and Development Program of China