

文章编号:1673-9981(2017)03-0146-07

Cu, Li 含量对新型超高强铝锂合金力学性能 及微观组织的影响*

潘波¹, 李睿¹, 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 湖南 410083; 2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076

摘要:利用力学性能测试和 TEM 分析测试手段, 计算出铝锂合金 Al-(3.6%~4.15%)Cu-(1.1%~1.4%)Li 中非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和及 Cu/Li 原子摩尔分数比, 分析了强度和微观组织之间的影响机理. 结果表明, 合金中的主要时效强化相为大量 T1 相 (Al₂CuLi) 和少量 θ' 相 (Al₂Cu), Li 含量较高的合金可能析出的极少量 δ' 相 (Al₃Li). 在上述成分范围内, 随 Cu 含量或 Li 含量增加, 合金强度提高, 且 Li 含量的增加幅度不同, 对合金强度的提高幅度存在明显的差异. 非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和及其比例共同作用, 通过影响析出相总量、类型及各析出相分数决定合金强度. 要获得铝锂合金的超高强度, 在提高 Cu, Li 原子摩尔分数总和的同时, 还要提高其比例.

关键词:铝锂合金; 时效强化相; 强度; 微观组织; Cu/Li 原子摩尔分数比

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

铝锂合金具有密度低、弹性模量高以及良好的强度刚度等特点, 同时还具有疲劳裂纹扩展速率低和高低温性能好等优点^[1], 在航天航空领域有着良好的应用前景. 自 90 年代以来, 铝锂合金的研发进入大发展时期, 并在航天航空结构件上获得大范围应用^[2-3]. 进入 21 世纪后, 欧美俄不断通过调整铝锂合金的主成分 Cu, Li 及添加微合金化元素, 开发新型铝锂合金, 以提高其性能, 其中一个重要方向是进一步提高铝锂合金强度^[4].

在铝锂合金中添加微量元素可对第二相的析出产生影响, 从而有利于提高合金的力学性能^[5]. 例如, Al-Cu-Li 系合金中单独或联合添加 Mg, Zn, Ag 等微合金化元素, 可以促进合金 T1 相的析出, 提高合金的强度^[6-7]. 添加 Ag, Mg 合金元素时, 在时效初期会形成 Mg-Ag-cluster^[8], 能促进强化相的析出, 并且有利于沉淀相的均匀分布, 同时添加 Ag, Mg 也会提高 GP 区的密度^[9]. 正是由于 Ag, Mg 的复合微合金化在铝锂合金中的作用^[10], Alcoa 在

Cu/Li 质量比高的铝锂合金中添加微量元素 Ag 和 Mg, 开发出高强 2195 铝锂合金. Alcoa 还在 Mg, Ag 复合微合金化的基础上开发出 2096、2098 和 2198 等系列铝锂合金. 基于 Mg, Zn 微合金化作用的合金有 2099、2199 及具有国内独立知识产权的 2A97 等铝锂合金. 研究表明, Mg, Ag, Zn 三种微合金元素同时添加的效果强于三种元素的单独添加^[11].

目前, 国内外研究的目标之一仍是进一步提高铝锂合金的强度, 力求开发超高强铝锂合金产品^[12]. Cu 为铝锂合金中的主要强化元素, 在 Al-Cu-Li 合金中添加过量的 Cu 时, 会形成中间相导致合金的韧性下降并增大合金密度^[2], 而当 Cu 含量过低时则不能减弱局部应变. Cu, Li 合金元素是 Al-Cu-Li 系铝锂合金中 θ' 相 (Al₂Cu)、T1 相 (Al₂CuLi) 和 δ' 相 (Al₃Li) 等强化相的构成元素, 合金中 Cu, Li 含量及 Cu/Li 原子摩尔比是影响铝锂合金时效强化相总量及各析出相体积分数的主要因素^[13].

为开发新型超高强铝锂合金, 在课题组前期

收稿日期: 2017-02-16

* 基金项目: 国家 863 项目 (2013AA032401)

作者简介: 潘波 (1992-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生.

Mg, Ag, Zn 微合金化研究的基础上^[11], 本文探讨了 Cu, Li 含量对 Mg, Ag, Zn 复合微合金化铝锂合金强度及微观组织的影响。

1 实验部分

1.1 试样制备

设计了 5 种成分的超高强铝锂合金, 其中主成分 Cu 质量分数为 3.6%~4.2%、Li 质量分数为 1.1%~1.4%, 其他微合金元素分别为 0.4% Mg, 0.4% Ag, 0.4% Zn, 0.3% Mn, 0.1% Ti 和 0.1% Zr。由于熔炼过程中的不确定因素, 实际成分与设计成分稍有偏差, 但仍处于可研究范围之内。所制备的 5 个超高强铝锂合金试样中 Cu, Li 含量列于表 1。铸锭经均匀化、热轧、中间退火后, 冷轧至 2 mm 厚的薄板。样品固溶后分别进行 T8 和 T6 时效处理, T8 时效处理为固溶后先进行 6% 的冷轧预变形, 而后于 160 °C 进行人工时效; T6 时效为固溶处理后直接于 175 °C 下进行人工时效。

表 1 铝锂合金试样的 Cu, Li 含量

Table 1 Measured Cu and Li contents of the experimental Al-Li alloys

样品编号	w(Cu)/%	w(Li)/%	m(Cu)/m(Li)
1 号	3.63	1.06	3.42
2 号	3.8	1.1	3.45
3 号	4.16	1.1	3.78
4 号	3.8	1.18	3.22
5 号	4.15	1.4	2.94

1.2 性能测试

采用 MTS 858 试验机对时效态合金的室温拉伸性能进行测试, 拉伸速率为 2 mm/min。之后选择各合金的峰时效抗拉强度进行分析。将试样减薄磨至 0.1~0.08 mm 后, 制成电镜观察样品, 然后采用 Tecnai G220 型透射电子显微镜(TEM)观察峰时效态样品的微观组织。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

2.1.1 Cu 含量对合金力学性能的影响

由表 1 可知, 1 号(3.63% Cu-1.06% Li)、2 号

(3.8% Cu-1.1% Li) 和 3 号(4.16% Cu-1.1% Li) 合金试样中 Li 含量基本一致, 只是 Cu 含量有变化。对 1, 2, 3 号试样分别进行 T6 和 T8 时效处理, 所测的合金峰时效抗拉强度列于表 2。

表 2 Cu 含量及时效处理对峰时效抗拉强度的影响

Table 2 T6 and T8 peak-aging tensile strength of 1.1% Li containing alloys with different Cu contents

时效处理	样品编号	w(Cu)/%	w(Li)/%	抗拉强度/MPa
T6	1 号	3.63	1.06	550
	2 号	3.8	1.1	565
	3 号	4.16	1.1	592
T8	1 号	3.63	1.06	570
	2 号	3.8	1.1	585
	3 号	4.16	1.1	613

由表 2 可知, 随 Cu 含量增加, 合金峰时效强度提高。Cu 质量分数由 3.63% 增加到 3.8%, 合金 T6 峰时效抗拉强度增加 15 MPa; Cu 质量分数继续增加至 4.16%, 合金 T6 峰时效抗拉强度进一步增加 27 MPa, 强度显著提高。进行 T8 时效时, Cu 质量分数由 3.63% 增加至 3.8%, 合金峰时效抗拉强度增加 15 MPa; Cu 质量分数继续增加至 4.16%, 合金峰时效抗拉强度增加 28 MPa。试验还表明, 进行 T8 时效处理时, 合金峰时效强度都高于 T6。

2.1.2 Li 含量对合金力学性能的影响

为方便分析 Li 含量对合金强度的影响, 现将合金按 Cu 含量分为两组。一组为 Cu 质量分数为 3.8%, Li 质量分数从 1.1% (2 号) 增至 1.18% (4 号); 另一组 Cu 质量分数约为 4.15%, Li 质量分数从 1.1% (3 号) 增至 1.4% (5 号)。两组合金分别进行 T6 和 T8 处理时的峰时效抗拉强度列于表 3。

表 3 Li 含量及时效处理对峰时效抗拉强度的影响

Table 3 T6 and T8 peak aging tensile strength of 3.8% Cu and 4.15% Cu containing alloys with different Li contents

时效处理	样品编号	w(Cu)/%	w(Li)/%	抗拉强度/MPa
T6	2 号	3.8	1.1	565
	3 号	4.16	1.1	592
	4 号	3.8	1.18	595
	5 号	4.15	1.4	600

续表 3

时效处理	样品编号	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Li})/\%$	抗拉强度/MPa
T8	2号	3.8	1.1	585
	3号	4.16	1.1	613
	4号	3.8	1.18	619
	5号	4.15	1.4	628

由表 3 可知, Cu 含量基本保持不变时, 随 Li 含量增加, 合金强度提高. 当 Cu 质量分数为 3.8% 时, Li 质量分数由 1.1% 增至 1.18%, T6 峰时效抗拉强度提高 30 MP, T8 峰时效抗拉强度提高 34 MP. 当 Cu 质量分数为 4.15% 时, Li 质量分数由 1.1% 增至 1.4%, T6 峰时效抗拉强度提高 8 MPa, T8 峰时效抗拉强度提高 15 MPa. 同时, 还发现 Li 含量增加幅

度不同, 合金强度提高的幅度有明显的差异.

2.2 微观组织

在进行 TEM 观察时, Li 质量分数为 1.1% 而 Cu 含量不同的合金, 即 1, 2, 3 号合金试样的 SAED 谱(选区衍射谱, 图略)均只观察到 T1 相及 θ' 相斑点, 未观察到铝锂合金中另外一种较为常见析出相 δ' 相斑点. 图 1 为 1, 2, 3 号合金试样的 T8 峰时效 TEM 暗场像. 由图 1 可知, 当 Cu 质量分数由 3.63% (图 1(a), (b)) 增加至 3.8% (图 1(c), (d)) 时, T1 相和 θ' 相的数量均明显增加; 当 Cu 质量分数由 3.8% 继续增至 4.16% (图 1(e), (f)) 时, T1 相的数量增加, 而 θ' 相的数量略有减少. 说明 Cu 含量的变化会导致合金中 T1 相和 θ' 相数量产生较明显的变化.

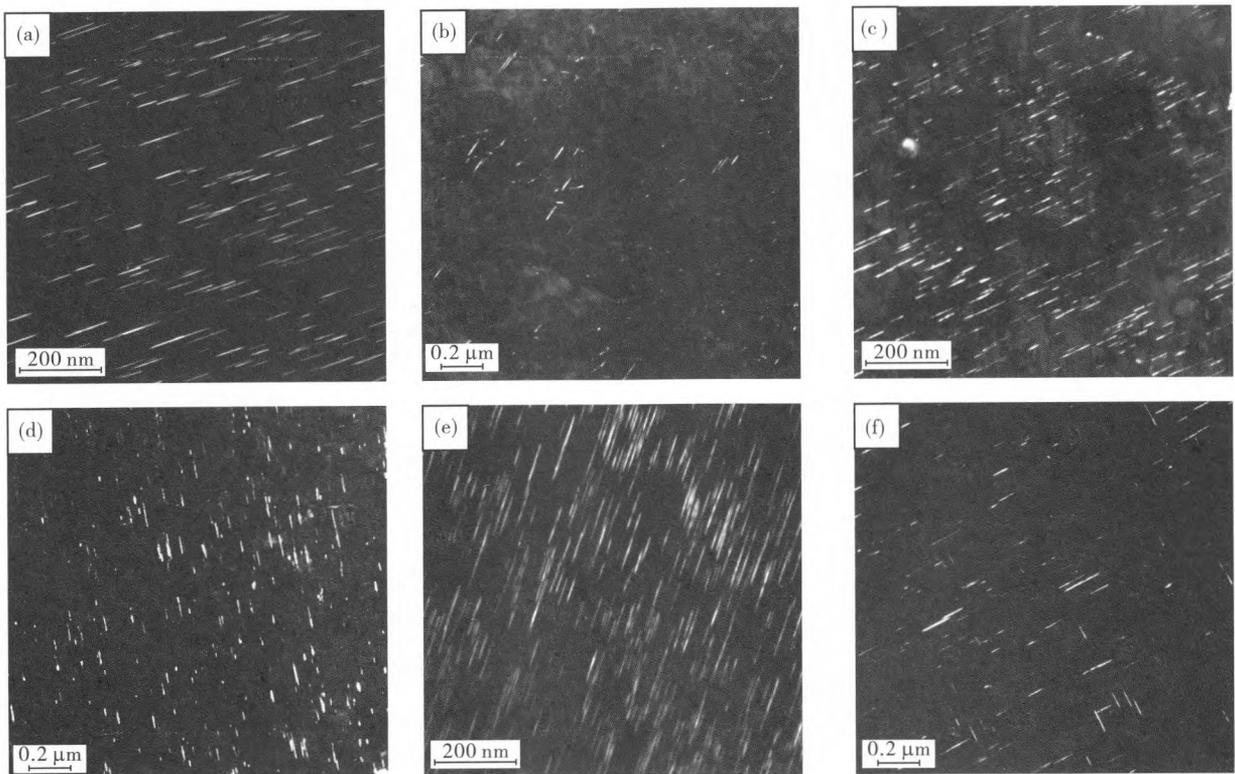


图 1 Li 含量为 1.1% 时不同 Cu 含量合金 T8 峰时效的 TEM 暗场像
 (a) 1 号合金, 20 h, T1 相, $b = \langle 112 \rangle$; (b) 1 号合金, 20 h, θ' 相, $b = \langle 100 \rangle$;
 (c) 2 号合金, 16 h, T1 相, $b = \langle 112 \rangle$; (d) 2 号合金, 16 h, θ' 相, $b = \langle 100 \rangle$;
 (e) 3 号合金, 8 h, T1 相, $b = \langle 112 \rangle$; (f) 3 号合金, 8 h, θ' 相, $b = \langle 100 \rangle$

Fig. 1 TEM dark field images of T8 peak-aged 1.1% Li containing alloys with different Cu concentration
 (a) No. 1 alloy, 20 h, T1 precipitate, $b = \langle 112 \rangle$; (b) No. 1 alloy, 20 h, θ' precipitate, $b = \langle 100 \rangle$;
 (c) No. 2 alloy, 16 h, T1 precipitate, $b = \langle 112 \rangle$; (d) No. 2 alloy, 16 h, θ' precipitate, $b = \langle 100 \rangle$;
 (e) No. 3 alloy, 8 h, T1 precipitate, $b = \langle 112 \rangle$; (f) No. 3 alloy, 8 h, θ' precipitate, $b = \langle 100 \rangle$

图 2 为 4 号合金 T8 峰时效的 TEM 暗场像. 图 2 显示,主要析出相为 T1 相和 θ' 相,未发现 δ' 相. 与 2 号样品相比,4 号样品的 T1 相数量明显增多(图 2(a)),而 θ' 相数量变化不明显(图 2(b)).

与 3 号合金不同,5 号合金 T8 峰时效 SAED 谱(图略)既存在 T1 相与 θ' 相斑点,也存在较弱的 δ' 相斑点. 沿 $\langle 112 \rangle$ 及 $\langle 100 \rangle$ 方向入射的 TEM 中心暗场像如图 3 所示. 由图 2,3 可知,与 3 号合金相比,5 号合金中 T1 相数量略有增加, θ' 相变化不明显,但 5 号合金出现明显的 δ' 相(图 3(b)).

TEM 观察表明, Cu, Li 含量在试验范围内即

Cu 质量分数为 3.6%~4.2%、Li 质量分数为 1.1%~1.4% 的合金峰时效的主要析出强化相是 T1 相及少量 θ' 相;当 Li 质量分数较高,为 1.4% 时,合金峰时效在析出大量 T1 相和少量 θ' 相的同时,还析出极少量 δ' 相.

为定量描述 Cu, Li 含量变化对合金峰时效析出相的影响,采用 photoshop 软件对上述暗场像照片中的各析出相进行逐一统计. 统计时一般选取三张照片,计算相应析出相的平均数密度,结果列于表 4.

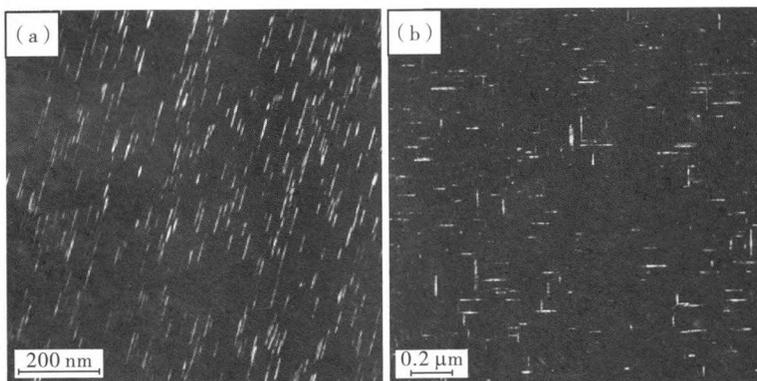


图 2 4 号合金 T8 峰时效时的 TEM 暗场像

(a)4 号合金,17 h,T1 相, $b=\langle 112 \rangle$; (b)4 号合金,17 h, θ' 相, $b=\langle 100 \rangle$

Fig.2 TEM dark field images of T8 peak-aged alloy (No. 4) containing 3.8% Cu and 1.18%Li
(a)No. 4 alloy,17 h, T1 precipitate, $b=\langle 112 \rangle$; (b) No. 4 alloy,17 h, θ' precipitate, $b=\langle 100 \rangle$

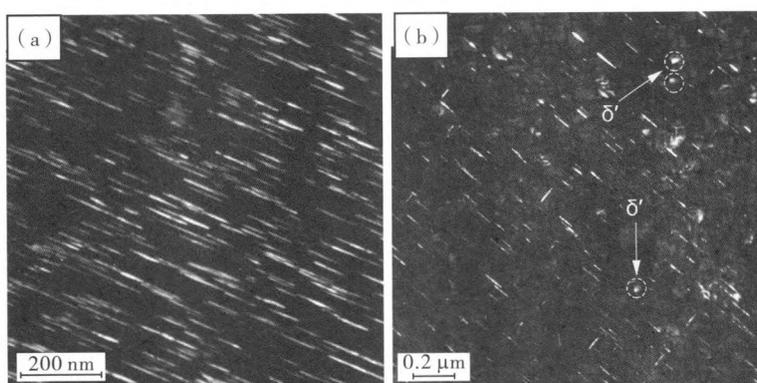


图 3 5 号合金 T8 峰时效的 TEM 暗场像

(a)5 号合金,12 h,T1 相, $b=\langle 112 \rangle$; (b)5 号合金,12 h, θ' 相, δ' 相, $b=\langle 100 \rangle$

Fig.3 TEM dark field images of T8 peak-aged alloy(No. 5) containing 4.15%Cu and 1.4%Li
(a) No. 5 alloy, 12 h, T1 precipitate, $b=\langle 112 \rangle$; (b) No. 5 alloy, 12 h, θ' precipitate, δ' precipitate, $b=\langle 100 \rangle$

表4 T1相、 θ' 相和 δ' 相的数密度及相应T8峰值强度
Table 4 The number density of T1, θ' and δ' precipitates in the T8 peak-aged alloy and corresponding tensile strength

样品编号	T1相/ μm^2	θ' 相/ μm^2	δ' 相/ μm^2	σ_b/MPa
1号	264.00	10.99	0	570
2号	311.05	47.61	0	585
3号	358.00	28.00	0	613
4号	444.44	36.55	0	619
5号	376.65	34.40	16.21	628

2.3 分析与讨论

上述研究表明,主合金元素 Cu 和 Li 含量的变化对合金强度的影响很大.但采用表 1 所示的 Cu, Li 质量分数的差异较难分析合金强度的变化,特别是 2 号和 4 号以及 3 号和 5 号之间强度的变化.而用原子摩尔分数分析 Cu, Li 含量对合金峰时效抗拉强度的影响十分有效.峰时效铝锂合金中, Cu, Li 原子有两种存在形式,即固溶原子和非固溶原子.非固溶原子指时效析出相中的组成原子,本研究中主要指 T1 相、 θ' 相及 δ' 相中的 Cu, Li 原子;而固溶原子指时效后仍然固溶在 Al 基体中的 Cu, Li 原子.通常情况下,合金元素 Cu, Li, Mg, Ag, Zn 等在 Al 基体中的固溶度会互相影响,或导致 Cu 或 Li 原子的固溶度降低.为简化分析,本文在此假设 160 °C(时效温度)时, Cu 和 Li 在该铝锂合金中固溶度约为 Al-Cu 系和 Al-Li 系二元相图中固溶度的 60%.根据 Al-Cu 系和 Al-Li 系二元相图,160 °C 时 Cu 和 Li 在纯 Al 中的固溶度分别约为 0.1% 和 0.5%^[14].将表 1 中的合金元素质量分数转化为原子摩尔分数,再计算相应的非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和及相应原子摩尔分数比,结果列于表 5.为便于分析,合金的 T8 峰时效抗拉强度也列于表 5.

由表 4 和表 5 可知:(1)对于 1 号和 2 号合金,其 Cu/Li 原子摩尔分数比为 0.52,非固溶原子摩尔分数总和由 4.49% 提高至 4.72%,则 T1 相数密度由 264 个/ μm^2 提高到 311.5 个/ μm^2 .说明当 Cu/Li 原子摩尔分数比相近时,随非固溶原子摩尔分数总和增加,T1 相数密度也随之增加.(2)对于 3 号与 2 号合金,非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和及其比例同时增加,则 T1 相数密度有较大幅度的增加.说明如果非固溶原子摩尔分数总和及比例增加,则 T1 相数密度增加.(3)2 号与 4 号合金相比,4 号合金的

表5 非固溶 Cu 与 Li 原子摩尔分数总和、原子摩尔分数比例及 T8 峰时效抗拉强度

Table 5 Calculated total non-solution atomic mole fraction of Cu and Li, their ratio and corresponding tensile strength of T8 peak aging

样品编号	$x(\text{Cu}+\text{Li})/\%$	$n(\text{Cu})/n(\text{Li})$	σ_b/MPa
1号	4.49	0.52	570
2号	4.72	0.52	585
3号	4.89	0.57	613
4号	5.02	0.47	619
5号	5.99	0.41	628

非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和高,原子摩尔分数比低,但 T1 相数密度仍增加较多.3 号与 5 号合金相比,5 号合金的 Cu, Li 原子摩尔分数总和高,但其摩尔分数比较低,导致 T1 相数密度不高,但析出 δ' 相.这说明非固溶 Cu, Li 原子的摩尔分数总和及其摩尔分数比共同决定合金中析出相的类型及组成.

在非固溶 Cu 和 Li 原子形成的 T1 相、 θ' 相和 δ' 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、 $\langle 1010 \rangle$ T1 // $\langle 110 \rangle$ Al^[15-16],T1 相对 $\{111\}$ Al 面位错滑移具有强烈的阻碍作用^[17].与 θ' 相和 δ' 相相比,T1 相的强化效果最大.非固溶 Cu, Li 原子摩尔分数总和及其比例是通过影响析出相总量、类型及各析出相分数,来影响合金的强度.与 Li 质量分数 1.1% 的 3 号合金相比,5 号合金的 Li 质量分数较高,为 1.4%,但其 Cu/Li 摩尔分数比较低,使主强化相 T1 相数密度较少,导致其强度比 3 号只提高 15 MPa.上述分析表明,要获得超高强度的铝锂合金,既要提高铝锂合金中 Cu, Li 原子摩尔分数总和,还要提高 Cu/Li 摩尔分数比.

3 结论

Cu, Li 含量对 Mg, Ag, Zn 多元复合微合金化 Al-(3.6%~4.15%)Cu-(1.1%~1.4%)Li 合金力学性能与微观组织有较大的影响.合金主要时效析出相是大量 T1 相和少量 θ' 相, Li 质量分数为 1.4% 的合金有极少量 δ' 相析出.在 Cu 质量分数为 3.6%~4.15%, Li 质量分数为 1.1%~1.4% 范围内,随 Cu 含量或 Li 含量增加,合金强度提高,而 Li 含量

增加幅度不同,对合金强度提高的幅度有明显的差异.要获得超高强度的铝锂合金,在提高 Cu,Li 原子摩尔分数总和的同时,还需提高其原子摩尔分数比.

参考文献:

- [1] 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 (1):13.
- [2] 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[J]. 中国有色金属学报,2011,21(10):2337.
- [3] 王浩军,史春玲,贾志强,等. 铝锂合金的发展及研究现状[J]. 热加工工艺,2012,41(14):82.
- [4] GUPTA R K,NAYAN N,NAGASIREESHA G, et al. Development and characterization of Al-Li alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 420 (1):228.
- [5] 张健,马云龙,李劲风,等. 微合金化对 Al-Cu-Li-Zr 合金拉伸性能和微观组织的影响[J]. 锻压技术, 2015,40 (07), 131-134.
- [6] GUMBANN E,DE GEUSER F,DESCHAMPS A, et al. A combinatorial approach for studying the effect of Mg concentration on precipitation in an Al-Cu-Li alloy [J]. Scripta Materialia,2016,110: 44.
- [7] LIU Qing, ZHU Rui-hua, LI Jin-feng, et al. Microstructural evolution of Mg, Ag and Zn microalloyed Al-Cu-Li alloy during homogenization [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016 (03):607.
- [8] 黄兰萍,陈康华,郑子樵,等. 微量 Ag,Mg 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,2005,34(08):1322.
- [9] LI Jinfeng, LIU Pingli, CHEN Yonglai, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg, Ag and Zn multi-microalloyed Al-(3. 2-3. 8) Cu-(1. 0-1. 4) Li alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(07):2103.
- [10] 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(04):622.
- [11] 罗先甫,郑子樵,钟继发,等. 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(07):1833.
- [12] RIOJA R J, LIU J. The Evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43 (9), 3325.
- [13] DECREUS B,DESCHAMPS A,DE GEUSER F, et al. The influence of Cu/Li ratio on precipitation in Al-Cu-Li-x alloys[J]. Acta Materialia,2013,61(6):2207.
- [14] 李劲风,陈永来,张绪虎,等. 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 (02):24.
- [15] MUÑOZ-MORRIS M A, MORRIS D G. Microstructure control during severe plastic deformation of Al-Cu-Li and the influence on strength and ductility[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (9):3445.
- [16] 高珍,陈江华,刘吉梓,等. Al-Cu-Li 合金中 T1 相的演变规律研究[J]. 电子显微学报,2012;31(04),308.
- [17] MURAYAMA M,HONO K. Role of Ag and Mg on precipitation of T1 phase in an Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy [J]. Scripta Materialia,2001,44(4):701.

Influence of Cu and Li contents on mechanical properties and microstructures of a new super high strength Al-Li alloy

PAN Bo¹, LI Rui¹, LI Jinfeng¹, CHEN Yonglai², ZHANG Xuhu², ZHENG Ziqiao¹

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: Based on Al-Li alloys with Cu(3.6%~4.15%) and Li(1.1%~1.4%), the influence of Cu and Li contents on the mechanical properties and microstructures of T8 and T6 aged Al-Li alloys with microalloying elements of Mg, Ag and Zn was investigated. By using tensile properties measurement and TEM, the strengthening effect and microstructure evolution were analyzed through total non-solution atomic mole fractions of Cu and Li and their atomic ratio. The strengthening precipitates consisted of a lot of T1 (Al₂CuLi), a few θ' (Al₂Cu) and a thimbleful of δ' (Al₃Li) which may be precipitated with high contents

of Li. Strength of the alloys was enhanced with increasing the contents of Li or Cu in the range of contents above. And different increasing extent of Li content enhanced the strength of the alloy with obviously different extent. Total non-solution atomic mole fraction of Cu and Li and their ratio determined the strength of the alloy by effecting the amount, types, and fractions of precipitates. To enhance the strength of Al-Li alloys largely, their atomic ratio should be kept high values, while increasing the total non-solution atomic mole fraction of Cu and Li.

Key words: aluminum-lithium alloy; aging strengthening phase; strength; microstructure; Cu/Li atomic mole fraction ratio

(上接第 145 页)

- [31] 潘金芝,任瑞铭,戚正风. 国内外模具钢发展现状[J]. 金属热处理,2008,33(8):10-15.
- [32] 骆芳,陈智君,楼程华,等. 塑料模具钢表面激光熔覆陶瓷复合涂层的性能研究[J]. 兵工学报,2010, 31(7): 933-938.
- [33] 戴晓光,周圣丰. Cr12MoV 冷作模具钢表面激光熔覆球磨 SiC 强化 Fe-Al 涂层研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(10):170-173.
- [34] 戴晓光,周圣丰. P20 塑料模具钢表面激光熔覆球磨 Fe 基 SiC 金属陶瓷涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2016,45 (6):190-192.

Research development of laser cladding coatings on the surfaces of titanium alloy and steel

REN Xinming, MA Beiyue, ZHANG Bowen, ZHANG Yaran, YU Jingkun

Institute of High Temperature Materials and Technology for Metallurgy, School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The working principle and characteristics of the coating technology were briefly introduced. The research status and progress of the laser cladding coating on the surfaces of titanium alloy and steel substrate were emphatically expounded. The details of the research on the aerospace titanium alloy, biomedical titanium alloy, as well as stainless steel and mold steel were summarized.

Key words: laser cladding; titanium alloy; steel; coating; research development