



Al-Cu-Li 系铝锂合金的合金化与微合金化

李劲风, 宁 红, 刘丹阳, 郑子樵

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 综述了铝锂合金研发历程及成分设计的发展阶段, 重点阐述了 Al-Cu-Li 系铝锂合金中主合金化元素 Cu、Li 含量对时效析出相类型、力学性能及耐腐蚀性能的影响规律及影响机理, 详细论述了微合金化元素 Zr、Mn、Mg、Ag、Zn、稀土和 In 等对 Al-Cu-Li 系铝锂合金力学性能、耐腐蚀性能及微观组织包括再结晶、时效析出相类型与分布密度的影响。结合笔者课题组研究结果, 提出了高强铝锂合金及耐腐蚀铝锂合金两种类型铝锂合金的成分设计思路。

关键词: 铝锂合金; 合金化; 微合金化; 力学性能; 腐蚀; 微观组织

文章编号: 1004-0609(2021)-02-0258-22

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 李劲风, 宁 红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li 系铝锂合金的合金化与微合金化[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 258–279. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36619

LI Jin-feng, NING hong, LIU Dan-yang, et al. Alloying and micro-alloying in Al-Cu-Li series alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 258–279. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36619

铝锂合金是指在铝及铝合金中添加 Li 而形成的一类铝合金。在铝合金中每添加 1.0% 的 Li, 可使铝合金密度降低 3%, 刚度提高 6%^[1]。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^[2]。因此, 铝锂合金是未来非常有竞争力的一类航空航天材料, 欧美及俄罗斯等国均十分重视新型铝锂合金的研制和开发。铝锂合金主要包括 Al-Mg-Li 及 Al-Cu-Li(或 Al-Li-Cu)两个系列。Al-Mg-Li 系主要为俄罗斯(前苏联)发展的铝锂合金系列, 包括 1420、1421、1423、1424 等铝锂合金, 其中 Mg 和 Li 均为主合金元素。其他铝锂合金如 2197、2195、2050、2055、1460、1469、2090、8090 等则基本为 Al-Cu-Li 系铝锂合金, Cu 和 Li 均为其主合金元素, 该系列铝锂合金是现阶段开发新型铝锂合金的主要体系。

铝锂合金的研究和开发至今已有 80 多年历史,

其发展可分为三个阶段, 相应的铝锂合金产品也明确划分为三代^[2-3], 而且第三代铝锂合金在航空及航天工业上已经获得广泛应用。自 2010 年以来, 美国铝业公司(Alcoa)、加拿大铝业公司(Alcan)、美国宇航局(NASA)、空客等铝合金生产企业及应用部门均提出了发展第四代铝锂合金的构想。其中超高强度是第四代铝锂合金的目标性能之一, 即在抗疲劳性能、弹性模量基本不降低的前提下, 进一步提高其强度和断裂韧性^[4]。国内中南大学、航天材料及工艺研究所跟踪了这一发展趋势, 已在国家攻关项目的支持下, 开发了相应的超高强铝锂合金并进行了工业化试制。

强度提升一直是铝锂合金最主要的发展方向之一。纵观铝锂合金的发展历史, 铝锂合金高强化经历了以下三个成分设计阶段。第一个成分设计阶段是高主合金化元素含量阶段, 主要采取以下两种方法: 1) Li 在铝中的固溶度极限为 4.2%(约 14%),

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA032401)

收稿日期: 2020-10-11; **修订日期:** 2020-12-28

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

前期主要通过提高主合金化元素 Li 含量至 2% 以上甚至更高, 增加时效析出相 δ' 相(Al_3Li) 的分数^[5-6];
2) 适当提高 Al-Cu-Li 系铝锂合金中的 Cu 含量, 析出新的时效强化相 T_1 相(Al_2CuLi), 产生 δ' 和 T_1 相的复合强化^[7]。

第二个成分设计阶段是 Mg+X(X=无、Ag 或 Zn) 微合金化阶段。20 世纪 80 年代末, 澳大利亚学者 POLMEAR 等在 Al-4.0Cu-0.3Mg-0.4Ag 铝合金中加入不同含量 Li(0, 0.13%, 0.5%, 1.0%, 2.5%), 发现随 Li 含量增加, 其时效硬化效应并不顺序增加; Li 含量增加至 2.5%, 其时效硬化效应下降^[8]。之后, Alcoa 研究人员在 Al-2.6Cu-2.1Li 合金中同时添加少量 Mg 和 Zn, 发现合金的强度和韧性有较大幅度提高^[9]。上述现象的发现标志着铝锂合金的成分设计进入了第二个阶段, 即在 Al-Cu-Li 系铝锂合金中通过 Mg/Mg+Ag/Mg+Zn 微合金化来实现铝锂合金强度的进一步提升。根据上述原理, Alcoa 相继开发了 Mg+Ag 微合金化的 Weldalite 049 系列高强铝锂合金, 以及 Mg+Zn 微合金化的 2099、2199 及 2070 铝锂合金。国内也于“十一五”、“十二五”期间, 由中南大学、北京航空材料研究院、航天材料及工艺研究所、西南铝业(集团)有限责任公司联合开发了 Mg+Zn 微合金化的 2A97 铝锂合金。

铝锂合金的第三个成分设计阶段可总结为 Mg+Ag+Zn 多元复合微合金化阶段。2012 年, Alcoa 推出了 Mg、Ag、Zn 共同复合微合金化的 2060 铝锂合金及 2055 铝锂合金; 其中 2055 铝锂合金具有超高强度, 其典型 T8 态抗拉强度达到 640 MPa。同时, 国内中南大学、航天材料及工艺研究所、西南铝业(集团)有限责任公司在 Mg+Ag+Zn 多元复合微合金化的基础上, 通过调整 Cu、Li 含量, 开发了一种新型超高强铝锂合金^[10-13]。

1 Al-Cu-Li 系铝锂合金中主要时效析出相的强化效果

作为可热处理强化铝合金, Al-Cu-Li 系铝锂合金的主要时效强化相包括 T_1 相、 δ' 相和 θ' 相

(Al_2Cu)。 T_1 相为平衡相, 晶体结构为密排六方结构, 其晶格常数分别为: $a=0.4965\text{ nm}$, $c=0.9345\text{ nm}$ ^[14]。 T_1 相呈圆盘状, 在铝基体 $\{111\}_{\text{Al}}$ 面析出, 与铝基体半共格, 其取向关系为: $(0001)_{T_1} // (111)_{\text{Al}}$, $[1010]_{T_1} // [110]_{\text{Al}}$ ^[14-16]。铝锂合金中 T_1 相在铝基体 $[112]_{\text{Al}}$ 入射方向的选区衍射(SAED)谱及相应透射电镜(TEM)暗场(DF)像照片如图 1(a), (b)所示。

θ' 相为亚稳相, 晶体结构为四方结构, 其晶格常数分别为: $a=0.404\text{ nm}$, $c=0.58\text{ nm}$ (根据 Silcock 模型)^[16]。 θ' 相呈圆盘状, 在铝基体 $\{100\}_{\text{Al}}$ 面析出, 与铝基体半共格, 与基体的取向关系为: $(100)_{\theta'} // (100)_{\text{Al}}$, $[001]_{\theta'} // [001]_{\text{Al}}$ ^[16]。铝锂合金中 θ' 相在铝基体 $[100]_{\text{Al}}$ 入射方向的 SAED 谱及相应 TEM-DF 照片如图 1(c), (d)所示。

δ' 相为亚稳相, 晶体结构为立方超点阵晶体结构($L1_2$), 其晶格常数为 $a=0.405\text{ nm}$ 。 δ' 相为球状相, 与铝基体共格, 其共格关系为 $(100)_{\delta'} // (100)_{\text{Al}}$, $[001]_{\delta'} // [001]_{\text{Al}}$ ^[16]。铝锂合金中 δ' 相在铝基体 $[100]_{\text{Al}}$ 入射方向的 SAED 谱及相应 TEM-DF 照片如图 1(e), (f)所示。

上述三种时效析出相强化机理与强化效果不同。 T_1 相与铝基体半共格, 在欠时效时位错可以切过, 而峰时效及过时效时主要为绕过强化机制; θ' 相与铝基体半共格, 欠时效至时效阶段均以绕过强化机制为主; δ' 相与铝基体共格, 欠时效阶段以切过强化机制为主, 但峰时效后 δ' 相长大, 其强化方式转变为绕过机制^[17]。

在 $\{111\}_{\text{Al}}$ 面上析出的直径为 D 、厚度为 $T(D \gg T)$ 的 T_1 相与交截的 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面之间的二面角为 70.53° , 在 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面上 T_1 相的投影及有效间距 λ 如图 2 所示。而 $\{100\}_{\text{Al}}$ 面上析出的直径为 D 、厚度为 $T(D \gg T)$ 的 θ' 相与 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面之间的二面角则为 54.74° , 在 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面上 θ' 相的投影及有效间距 λ 如图 3 所示^[18-19]。

假定球状析出相转变为圆盘状析出相时, 单位体积内析出相数密度及单个析出相体积不变, NIE 等分别基于切过强化机制和绕过强化机制计算了 T_1 相及 θ' 相强化效果与球状析出相 δ' 相强化

效果的比值($\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\text{sphere})$)随长宽比(Aspect ratio)变化的关系曲线,如图4所示^[18-19]。在两种强化机制作用下, T_1 相及 θ' 相强化效果均显著大于 δ' 相,而且 T_1 相及 θ' 相强化效果均随其长宽比增加而逐渐增大;同时,在相同的长宽比条件下,

$\{111\}_{\text{Al}}$ 晶面上析出的圆盘状 T_1 相引起的强化效果大于 $\{100\}_{\text{Al}}$ 晶面上析出的圆盘状 θ' 相。另外, T_1 相长宽比通常大于 θ' 相长宽比。综合而言,铝锂合金主要时效析出相强化效果顺序为: T_1 相 $>$ θ' 相 $>$ δ' 相。

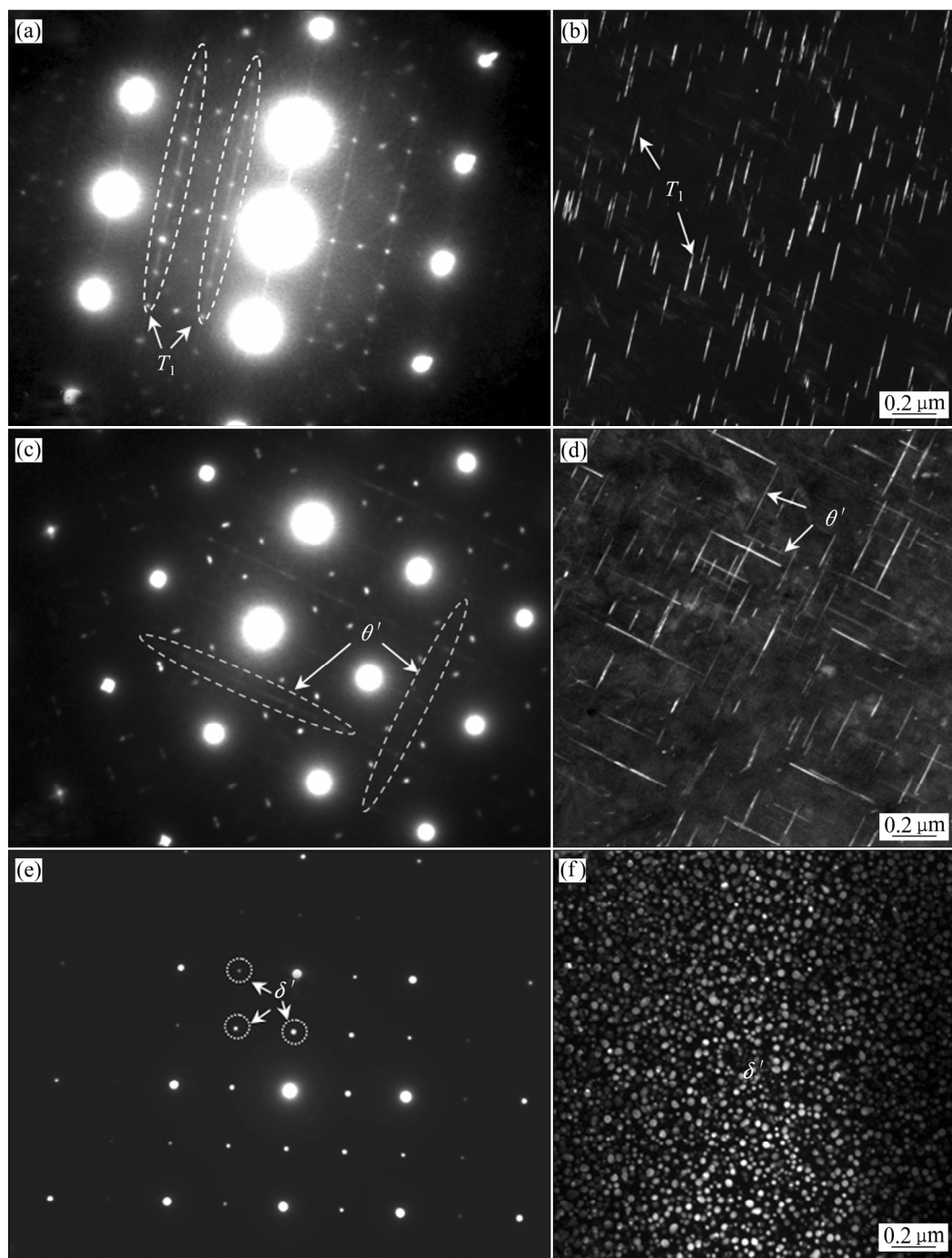


图1 Al-Cu-Li系铝锂合金SAED谱及时效析出相TEM-DF照片

Fig. 1 SAED patterns and TEM-DF images of Al-Cu-Li alloys. (a) $[112]_{\text{Al}}$ SAED pattern; (b) T_1 precipitate, $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (c) $[100]_{\text{Al}}$ SAED pattern; (d) θ' precipitate, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (e) $[100]_{\text{Al}}$ SAED pattern; (f) δ' precipitate, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction

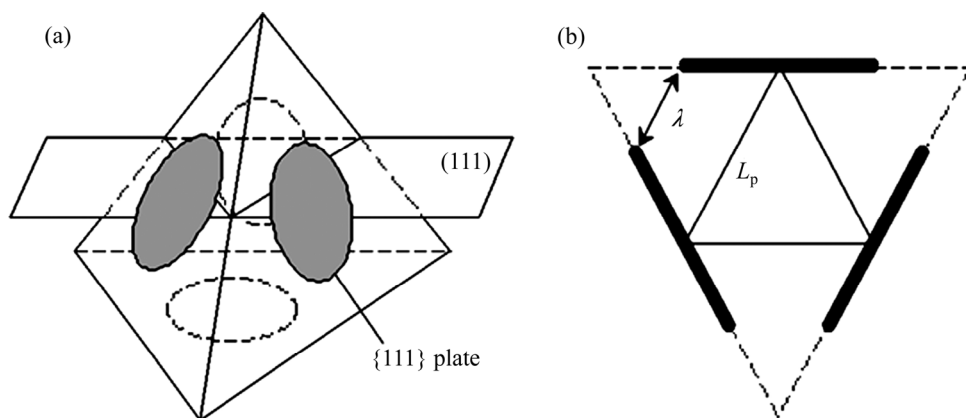


图 2 $\{111\}_{\text{Al}}$ 面上析出 T_1 相示意图及其在 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面上的投影^[18]

Fig. 2 Plate-shaped T_1 precipitates at $\{111\}_{\text{Al}}$ plane (a) and their projection on $\{111\}_{\text{Al}}$ slip plane (b)

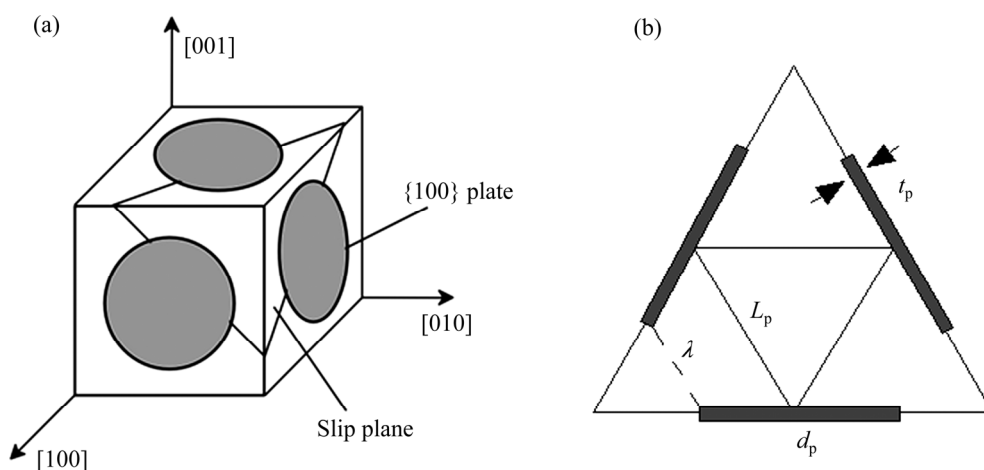


图 3 $\{100\}_{\text{Al}}$ 面上析出 θ' 相示意图及其在 $\{111\}_{\text{Al}}$ 滑移面上的投影^[18]

Fig. 3 Plate-shaped θ' precipitates at $\{100\}_{\text{Al}}$ plane (a) and their projection on $\{111\}_{\text{Al}}$ slip plane (b)^[18]

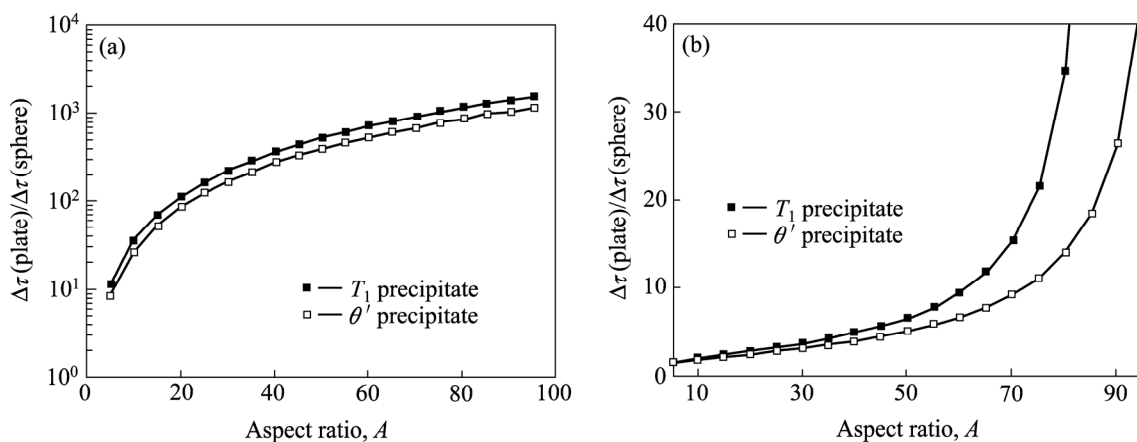


图 4 基于切过机制及绕过机制时圆盘状 T_1 相及 θ' 相强化效果与球状 δ' 相强化效果的比值 $(\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\text{sphere}))$ 随长宽比变化的关系曲线^[19]

Fig. 4 Variation of ratio $(\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\delta'))$ with aspect ratio for plate-shaped T_1 and θ' precipitates, calculated assuming (a) shearing mechanism of shearable particles and (b) by-passing mechanism of shear-resistant particles^[19]

2 Cu 和 Li 主合金化元素

2.1 Cu、Li 含量对 Al-Cu-Li 系铝锂合金析出相的影响

Cu、Li 均为 Al-Cu-Li 系铝锂合金的主合金元素。铝锂合金中随 Cu 含量增加,相应地 Li 含量会有所降低。总体而言,从第二代铝锂合金发展至第三代铝锂合金,其 Cu 含量从 1.0%~2.0%增加至 2.5%~4.5%,而 Li 含量则从 2.5%降低至 1.5%甚至以下。图 5 所示为部分典型 Al-Cu-Li 系铝锂合金 Cu、Li 含量。

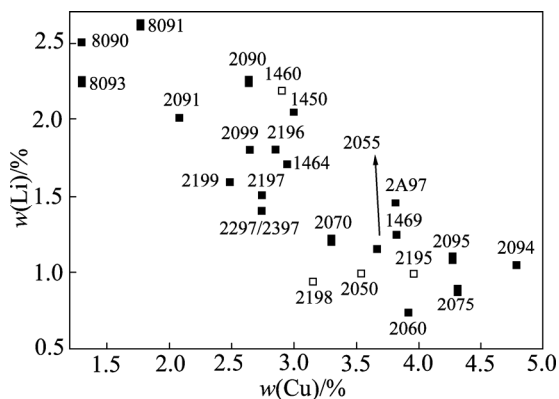


图 5 部分典型 Al-Cu-Li 系铝锂合金的 Cu、Li 含量
Fig. 5 Cu and Li concentrations of some typical Al-Cu-Li series of alloys

Al-Cu-Li 系铝锂合金可能的主要时效强化相包括 T_1 相、 δ' 相和 θ' 相,在时效过程中还可能形成 GP 区、 δ' /GP/ δ' 复合相及 $\delta'/\theta'/\delta'$ 复合相。然而, Cu、Li 含量的差别将导致 Al-Cu-Li 系铝锂合金析出相组成产生显著差异。

表 1 所示为不同 Cu、Li 含量铝锂合金的主要时效析出相组成。当铝锂合金中 Cu 含量较低 ($<2.0\%$) 而 Li 含量较高时,其主要时效析出相为 δ' 相,如 8090 铝锂合金 (1.0~1.6Cu, 2.2~2.7Li)^[20]。随 Cu 含量增加至 2.5~3.0%,在析出 δ' 相的基础上,还会形成另一种主要时效析出相 T_1 相,此时合金的主要强化相组成为 $\delta'+T_1$ 相,如 2090 铝锂合金 (2.4~3.0Cu, 1.9~2.6Li)^[22]。当 Cu 含量为 2.5%~3.0% 而 Li 含量降低至约 1.5%~2.0% 时, T_1 相比比例增加,而 δ' 相比比例减少,合金的主要强化相组成为 $T_1+\delta'$,如 2099 铝锂合金 (2.4%~3.0%Cu、1.6%~2.0%Li)^[24]。当 Cu 含量增加而 Li 含量进一步降低时,合金的主

表 1 不同 Cu、Li 含量铝锂合金主要时效析出相

Table 1 Main aging precipitates of Al-Li alloys with various Cu and Li concentrations

Alloy	Cu	Li	Main aging precipitates
8090 ^[20]	1.0–1.6	2.2–2.7	δ'
1441 ^[21]	2.0	1.9	δ'
2090 ^[22]	2.4–3.0	1.9–2.6	$\delta'+T_1$
1460 ^[23]	2.6–3.3	2.0–2.4	$\delta'+T_1+\theta'$
2099 ^[24]	2.4–3.0	1.6–2.0	$T_1+\delta'$
2197 ^[25]	2.5–3.1	1.3–1.7	$T_1+\theta'$
2198 ^[26]	2.9–3.5	0.8–1.1	$T_1+\theta'$
2050 ^[27]	3.2–3.9	0.7–1.3	$T_1+\theta'$
2195 ^[28]	3.7–4.3	0.8–1.2	$T_1+\theta'$
2055 ^[29]	3.2–4.2	1.0–1.3	$T_1+\theta'$
2060 ^[30]	3.4–4.5	0.6–0.9	$T_1+\theta'$

要强化相组成为 $T_1+\theta'$ 相,如 2195、2050、2198、2055 等铝锂合金^[25–30]。上述表明 Al-Cu-Li 系铝锂合金中主要时效析出相组成与其 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 密切相关,高 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 有利于增加 T_1 相和 θ' 相比比例,而低 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 则导致较高的 δ' 相比比例。

实际上,当 Al-Cu-Li 系铝锂合金中 Cu、Li 含量适当以及特定时效工艺时,其时效强化相组成更加复杂,三种时效析出相 T_1 、 θ' 及 δ' 相比比例均较高,并可能同时存在大量 GP 区,形成 GP/ δ' /GP 复合相,如 T8 态时效含 3.1%Cu 和 2.1%Li 的 1460 铝锂合金 (见图 6)^[23]。

Cu/Li 比不同还导致铝锂合金中析出序列的差异。JO 等^[31]总结了不同 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 铝锂合金 T6 态时效析出序列,认为在不同 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 铝锂合金中时效析出序列为如下:

$w(\text{Cu})/w(\text{Li}) > 4.0$: SSSS $\rightarrow$ GP 区 $\rightarrow \theta''$ 相 $\rightarrow \theta'$ 相 $\rightarrow \theta$ 相;

$w(\text{Cu})/w(\text{Li}) = 2.5 \sim 4.0$: SSSS $\rightarrow$ GP 区 $\rightarrow$ GP 区 + δ' 相 $\rightarrow \theta''$ 相 + δ' 相 $\rightarrow \theta'$ 相 + δ' 相 $\rightarrow \delta'$ 相 + T_1 相 $\rightarrow T_1$ 相;

$w(\text{Cu})/w(\text{Li}) = 1.0 \sim 2.5$: SSSS $\rightarrow$ GP 区 + δ' 相 $\rightarrow \theta'$ 相 + δ' 相 $\rightarrow \delta'$ 相 + T_1 相 $\rightarrow T_1$ 相;

$w(\text{Cu})/w(\text{Li}) < 1.0$: SSSS $\rightarrow \delta'$ 相 + T_1 相 $\rightarrow T_1$ 相。
(SSSS 指过饱和固溶体)

$w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 还影响合金铝锂合金 T8 态时效时最主要强化相 T_1 相析出的孕育期。DECREUS 等^[32]采用小角度中子散射 (Small-angle neutron scattering,

SANS)技术研究了 2196 铝锂合金及 2198 铝锂合金 T8 态时效升温及保温(155 °C)时的析出过程。在 Cu/Li 比较高的 2198 铝锂合金中, 保温 1.5 h 时即可观察到 T_1 相析出的第一个各向异性 X 射线散射

条纹(见图 7(a)), 而 Cu/Li 比较低的 2196 铝锂合金保温 3~7 h 才出现 T_1 相析出的第一个各向异性 X 射线散射条纹(见图 7(b)), 即说明 Cu/Li 比较高时, T_1 相析出孕育期较短^[32]。

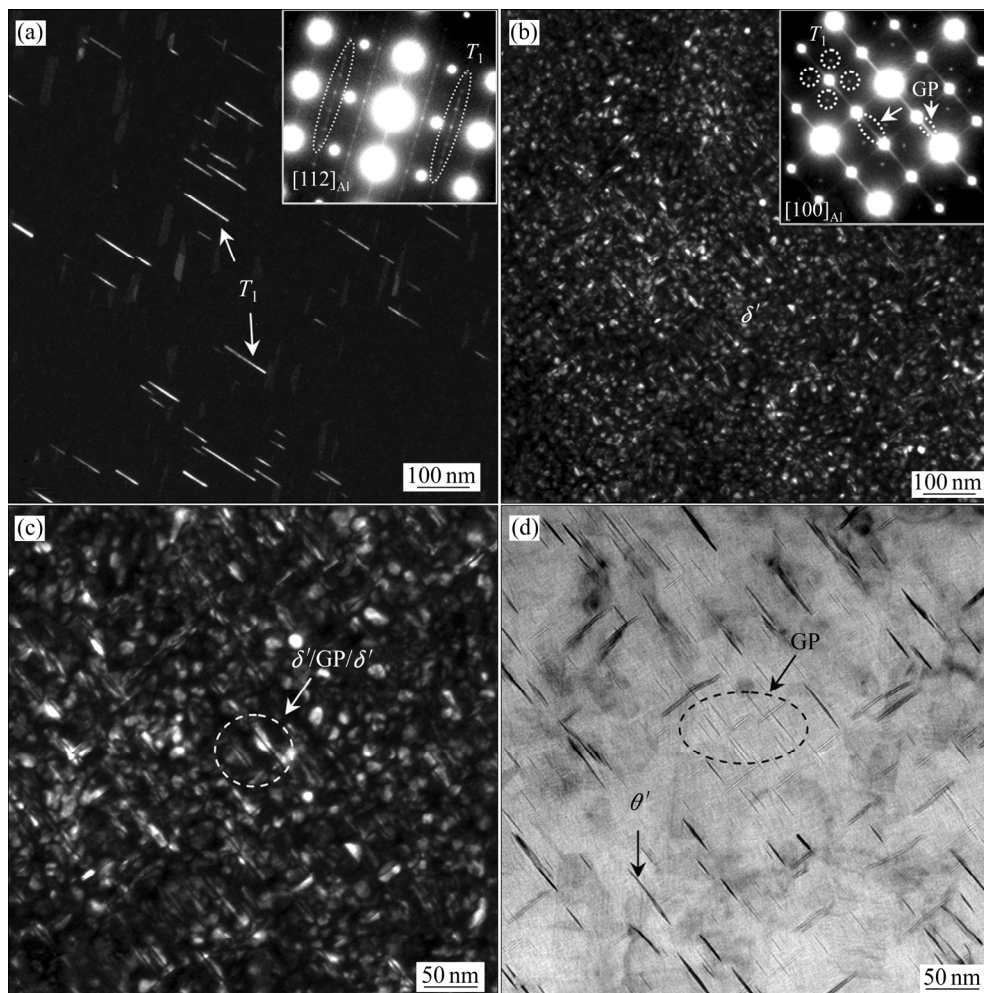


图 6 T8 态时效 1460 铝锂合金 SAED 谱及 TEM 照片^[23]

Fig. 6 SAED patterns and TEM images of T8-aged 1460 Al-Li alloy: (a) DF image, T_1 precipitates, $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (b) DF image, δ' precipitates, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (c) DF image, δ' and GP/ δ' /GP composite precipitates, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (d) bright field (BF) image, θ' precipitates and GP zones, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction

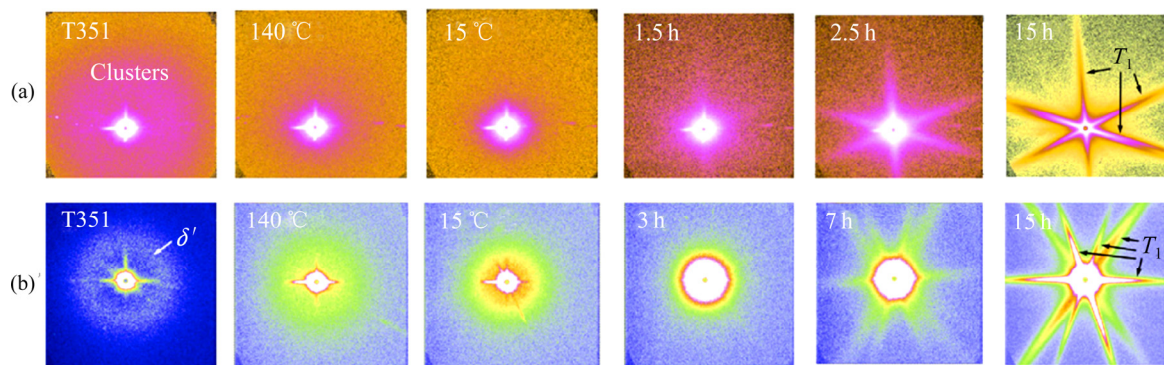


图 7 T351 态 2198 及 2196 铝锂合金升温及保温不同时间的 SAXS 图像^[32]

Fig. 7 Sequence of SAXS images for 2198 and 2196 Al-Li alloys in T351 temper during heating ramp (at 140 °C and 155 °C) and aging at 155 °C for different times, showing formation of characteristic streaks of T_1 precipitate: (a) 2198 alloy; (b) 2196 alloy

除此之外, $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 不同可导致铝锂合金晶界析出相种类和分布的差异^[33]。在高 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 铝锂合金中, 晶界可析出较密集的 T_1 相(见图 8(a)); $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 降低, 晶界含 Cu 的 T_1 相减少(见图 8(b)) 且形成粗大不连续 δ 相(见图 8(c))。

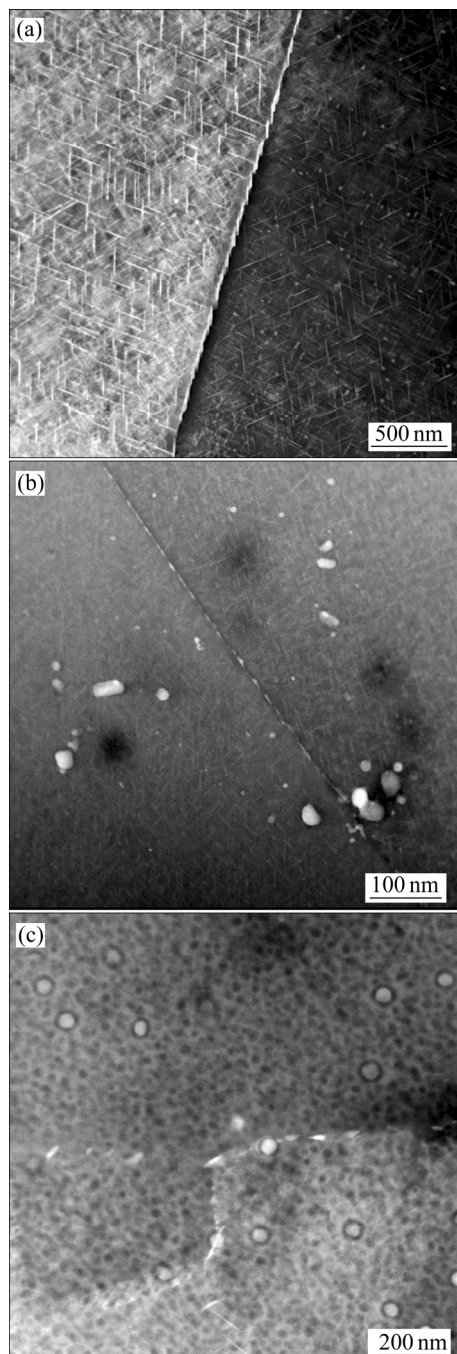


图 8 不同 Cu、Li 含量 Al- $x\text{Cu}$ - $y\text{Li}$ -0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr 合金 T6 峰时效时晶界区域扫描透射电子显微镜(STEM)照片^[33]

Fig. 8 STEM images of grain boundary area in T6 peak-aged Al- $x\text{Cu}$ - $y\text{Li}$ -0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr alloys with different Cu and Li concentrations^[33]: (a) 3.82Cu-0.91Li; (b) 2.78Cu-1.68Li; (c) 1.08Cu-2.43Li

2.2 Cu、Li 含量对 Al-Cu-Li 系铝锂合金性能的影响

通过改变时效析出相的组成, Cu、Li 含量的差异进一步影响其力学性能。研究发现, Al-Cu-Li 系铝锂合金强度随 Cu 含量增加而增加^[10-11]; 但在 Cu 含量一定时, 其硬度、强度并不完全随 Li 含量增加而顺序提高, 甚至可能导致硬度和强度降低^[8, 11]。

李劲凤等^[10-11]采用 Cu、Li 总摩尔分数结合 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$, 系统分析了 Cu、Li 含量对 Al-Cu-Li 系铝锂合金强度的影响规律。当 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 基本一致时, 随 Cu、Li 总摩尔分数增加, 时效析出相分数增加, 相应地铝锂合金强度提高。当 Cu、Li 总摩尔分数基本一致时, 铝锂合金强度随 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 增加而提高。如图 9 所示是在总结作者课题组关于 Al-(3.2~4.4)Cu-

(0.8~1.5)Li-0.4Mg-0.4Ag-0.4Zn-0.1Zr 铝锂合金薄板相同 T8 态近峰时效拉伸性能结果的基础上, 建立的强度(抗拉强度、屈服强度)与 Cu、Li 总摩尔分数和 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 的关系, 图中数字代表相应编号合金的 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 。图 9 中线段 ab 左上部分, 对应 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 为 >0.58 , 随 Cu、Li 总摩尔分数增加, 铝锂合金强度提高。在线段 ab 和 cd 之间部分, 对应 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 为 0.46~0.55, 随 Cu、Li 总摩尔分数增加, 铝锂合金强度提高。在线段 cd 和 ef 之间, 对应 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 为 0.39~0.46, 随 Cu、Li 总摩尔分数增加, 铝锂合金强度提高。另外, 在 Cu、Li 总摩尔分数相同(近)时, 随 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 例增加, 强度有增加的趋势, 如 7[#]铝锂合金与 9[#]铝锂合金。

上述强度变化与不同 Cu、Li 含量改变时效析出相组成及其比例有关。微观组织观察表明(见图 10), 虽然 Cu+Li 总摩尔分数较高(17[#]合金, 质量分数为 3.45%Cu、1.48%Li), 但其 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 比较低, 易形成较多 δ' 相, 导致强化效果最好的 T_1 相相对比例降低(见图 10(a)和(b)); 而即使 Cu、Li 总摩尔分数较低(9[#]合金, 质量分数为 4.46%Cu、1.03%Li), 但高 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 比使 δ' 相消失, 强化效果更好的 T_1 相和 θ' 相相对比例增加(见图 10(c)和(d))。

另外, 不同 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 在影响晶界析出相类型及分布的基础上, 将导致其腐蚀性能的差异。研究表明, 随 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 降低, 其晶间腐蚀(IGC)抗力逐渐提高, 如图 11 所示^[33]。

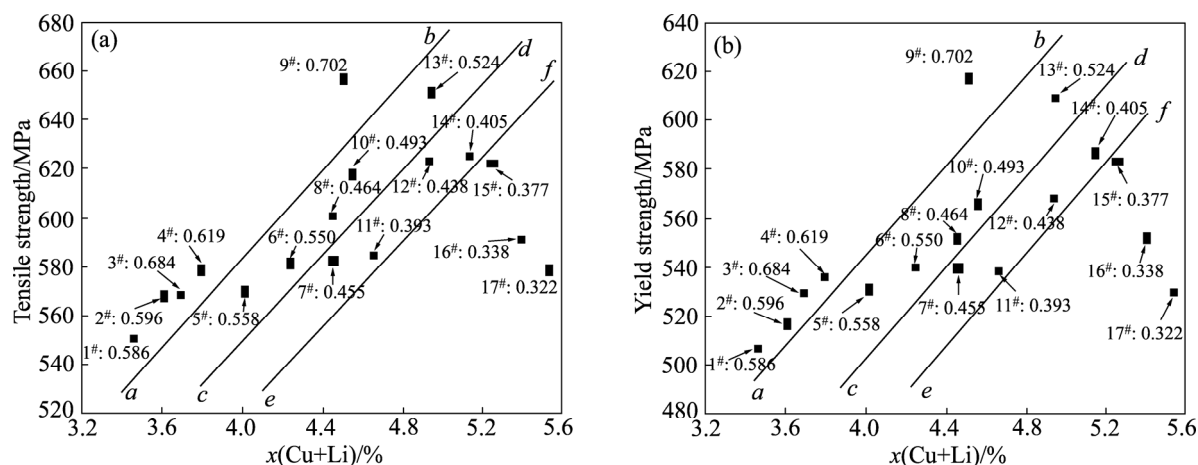


图 9 Al-(3.2~4.4)Cu-(0.8~1.5)Li-0.4Mg-0.4Ag-0.4Zn-0.1Zr 铝锂合金薄板相同 T8 态近峰时效强度与 Cu、Li 摩尔总分数和 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 的关系

Fig. 9 Strength of T8 peak-aged Al-(3.2~4.4)Cu-(0.8~1.5)Li-0.4Mg-0.4Ag-0.4Zn-0.1Zr alloy sheet with different Cu and Li concentrations as function of total Cu and Li mole fraction and $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$

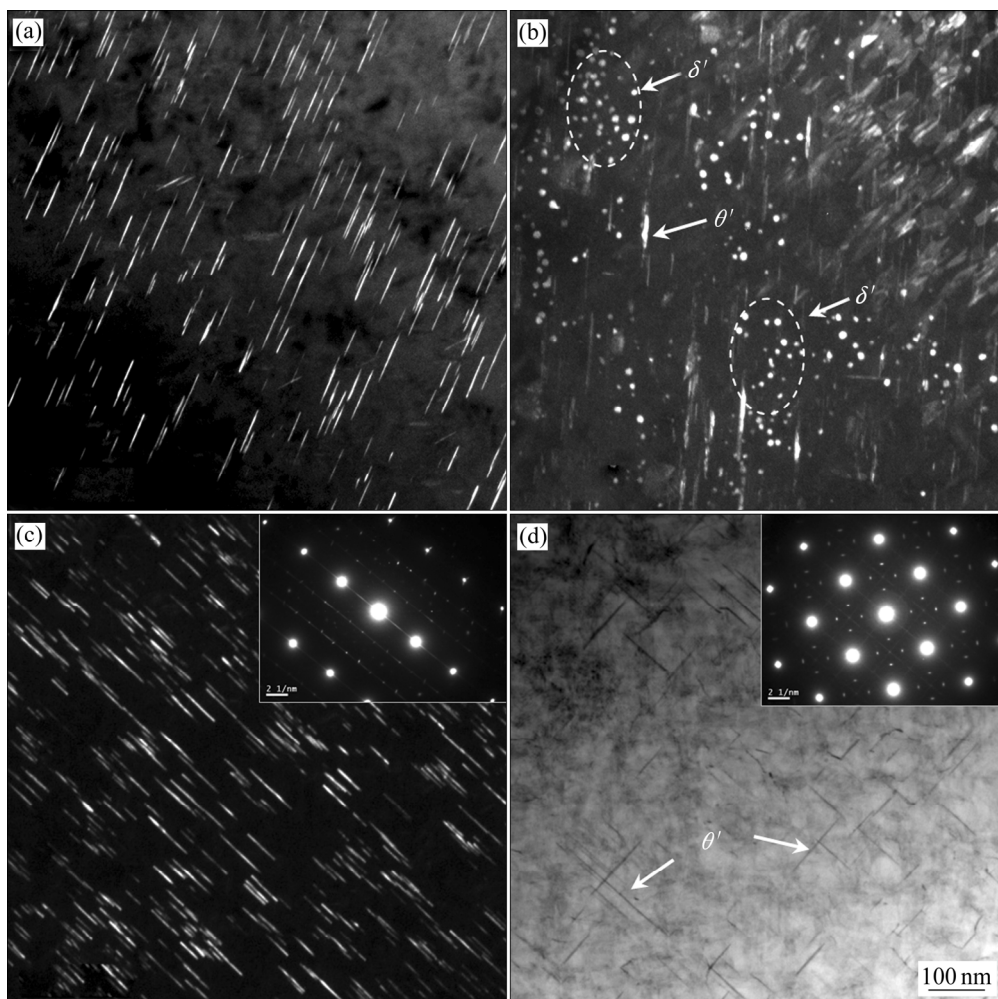


图 10 不同 Cu、Li 含量铝锂合金 SAED 谱及 TEM 像

Fig. 10 TEM images of T8 aged Al-Li alloys with different Cu and Li concentrations: (a), (b) 17# alloy, Al-3.45Cu-1.48Li-X alloy^[10]; (c), (d) 9# alloy, Al-4.46Cu-1.03Li-X alloy; (a), (c) DF images, T_1 precipitate, $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (b) DF image, δ' and θ' precipitates, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (d) BF image, θ' precipitate, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction

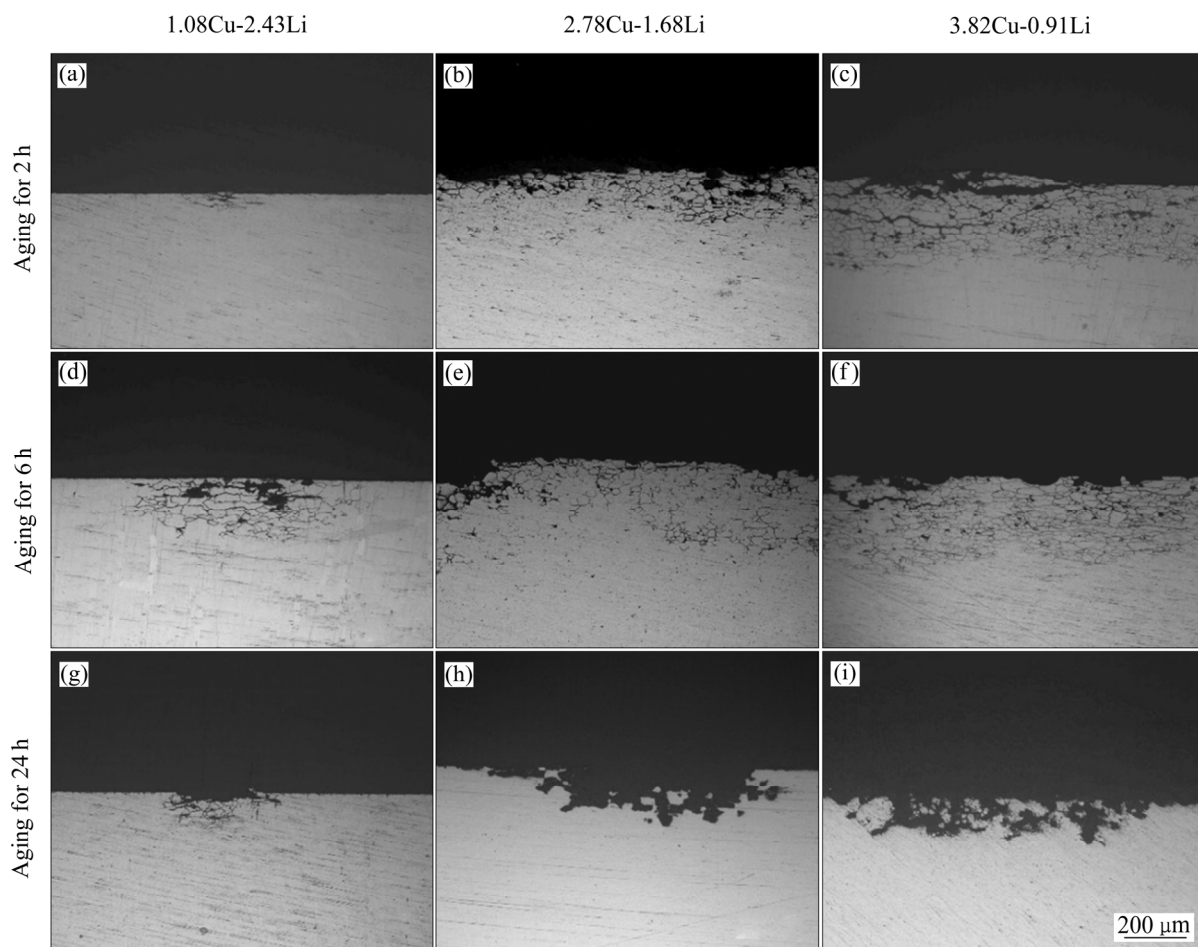


图 11 时效不同时间 Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr 合金晶间腐蚀侧面形貌^[33]

Fig. 11 Typical sectional IGC morphologies of Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr with different Cu and Li concentrations^[33]

3 微合金化元素

3.1 Zr、Mn 微合金化

Zr 是铝合金及铝锂合金中最重要的微合金化元素之一，在 Al 中的固溶度极限约为 0.07% (摩尔分数)。铝合金中添加 Zr 含量通常为 0.05%~0.16% (质量分数)，凝固时可形成 Al_3Zr 初生相粒子，在 385~535 °C 退火过程中也可能形成 Al_3Zr 弥散相粒子^[34]。 Al_3Zr 粒子与铝基体共格，对铝锂合金晶粒组织控制具有十分重要的作用；660.8 °C 时通过 $\text{Al}_3\text{Zr} + \text{L} \leftrightarrow (\text{Al})$ 包晶转变， Al_3Zr 初生相粒子可以作为凝固形核点，提高凝固形核密度，细化铝锂合金铸态晶粒组织；共格的 Al_3Zr 弥散相粒子还能有效阻碍晶界迁移及再结晶过程，并细化再结晶晶粒组织^[35-36]。如图 12 所示为不含 Zr 和含 0.12%Zr 元素的 Al-4.25Cu-0.85Li-X 铝锂合金冷轧薄板固

溶处理后的金相照片，不含 Zr 元素铝锂合金固溶后再结晶晶粒尺寸显著大于含 Zr 元素的铝锂合金。

Mn 在 Al 铝中的极限固溶度为 0.62%，658 °C 通过 $\text{L} \leftrightarrow (\text{Al}) + \text{Al}_6\text{Mn}$ 共晶转变形成 Al_6Mn 粒子。在含 Cu 的铝合金及 Al-Cu-Li 系铝锂合金中可形成与基体半共格、呈板条状的 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 弥散相粒子，其析出温度区间为 300~530 °C^[34]。研究表明，铝锂合金中少量 Mn 形成的含 Mn 弥散相粒子可促进再结晶、控制晶粒生长、分散共面滑移，使滑移更加均匀，降低铝锂合金的各向异性^[36-37]。

第三代 Al-Cu-Li 系铝锂合金如 2050、2198、2196、2099、2197 中通常联合添加微量 Zr、Mn，其添加量对再结晶程度具有明显的影响。研究表明，在热轧 6 mm 厚度 2198 型铝锂合金中单独添加微量 Zr 元素时，形成 Al_3Zr 粒子弥散相粒子 (见图 13(a) 中细小白色粒子) 阻碍固溶处理时的再结晶，

降低其再结晶程度(见图 14(a)), 相应再结晶机理为 SIBM(应变诱发晶界迁移)。而在此基础上添加微量 Mn, 将形成较粗大的 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 弥散相粒子, 同时导致 Al_3Zr 粒子数密度降低(见图 13(b)); 热轧时

较粗大的 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 弥散相粒子增加其边缘基体的变形程度, 提高储能进而导致固溶处理时再结晶程度增加(见图 14(b)), 此时再结晶形核机理以 PSN(粒子激发形核)为主^[37-39]。

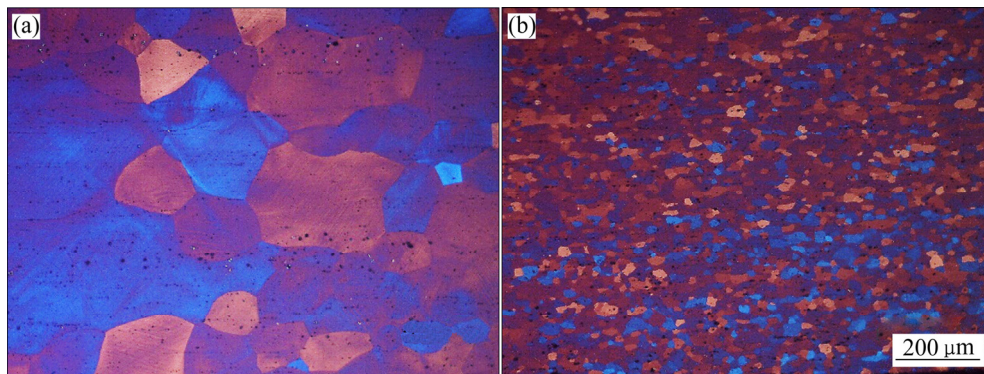


图 12 Al-4.25Cu-0.85Li-X 铝锂合金冷轧薄板固溶处理后金相照片

Fig. 12 Metallographic images of cold-rolled Al-4.25Cu-0.85Li-X alloy sheets after solutionization: (a) Zr-free; (b) containing 0.12% Zr

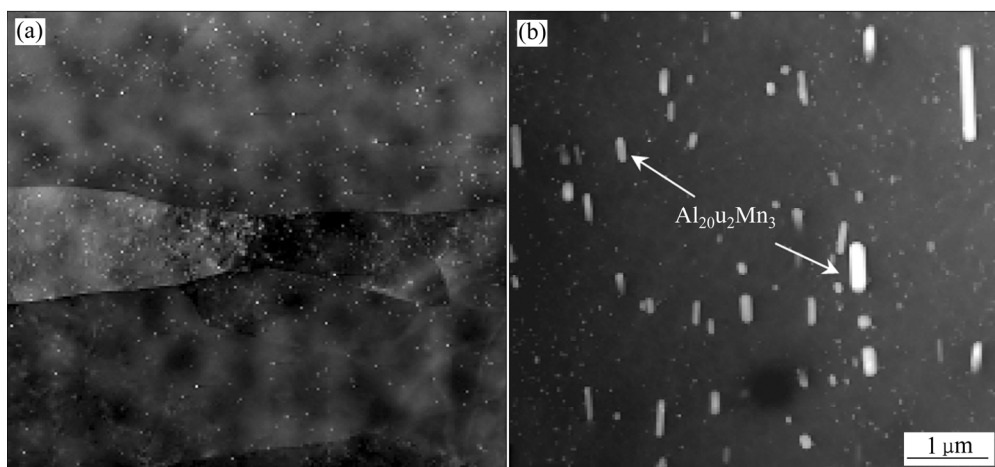


图 13 2198-T351 铝锂合金 6 mm 厚度板材 STEM-HAADF 照片^[39]

Fig. 13 STEM-HAADF images of 2198-T351 Al-alloy plates with 6 mm thickness^[39]: (a) Containing 0.1Zr; (b) Containing 0.1Zr-0.3Mn

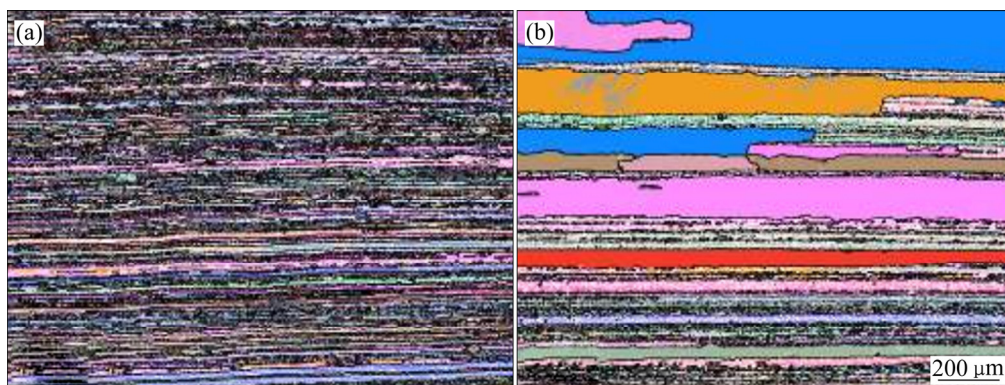


图 14 2198-T351 铝锂合金 6 mm 厚度板材表层 EBSD 照片^[39]

Fig. 14 EBSD maps showing grain structure morphologies at surface layer of 2198-T351 Al-alloy plates with 6 mm thickness^[39]: (a) Containing 0.1Zr; (b) Containing 0.1Zr-0.3Mn

3.2 Mg、Ag、Zn 微合金化

3.2.1 Mg、Ag、Zn 微合金化元素对时效析出相的影响

Mg 是 Al-Cu-Li 系铝锂合金最主要的微合金化元素之一, 大多数第三代铝锂合金均添加一定量的 Mg。Ag、Zn 是第三代铝锂合金重要的微合金化元

素, 并通常与 Mg 同时添加。Mg、Ag、Zn 添加显著影响时效强化相的析出, 特别是有利于促进 T6 态时效时 T_1 相的析出。

图 15 所示分别为 Al-3.5Cu-1.0Li-X(X 代表 Mn、Zr 等微合金化元素)合金不添加 Mg、单独添加 Mg 及同时添加 Mg+Ag 时 T6 态(175 °C)峰时效时 TEM

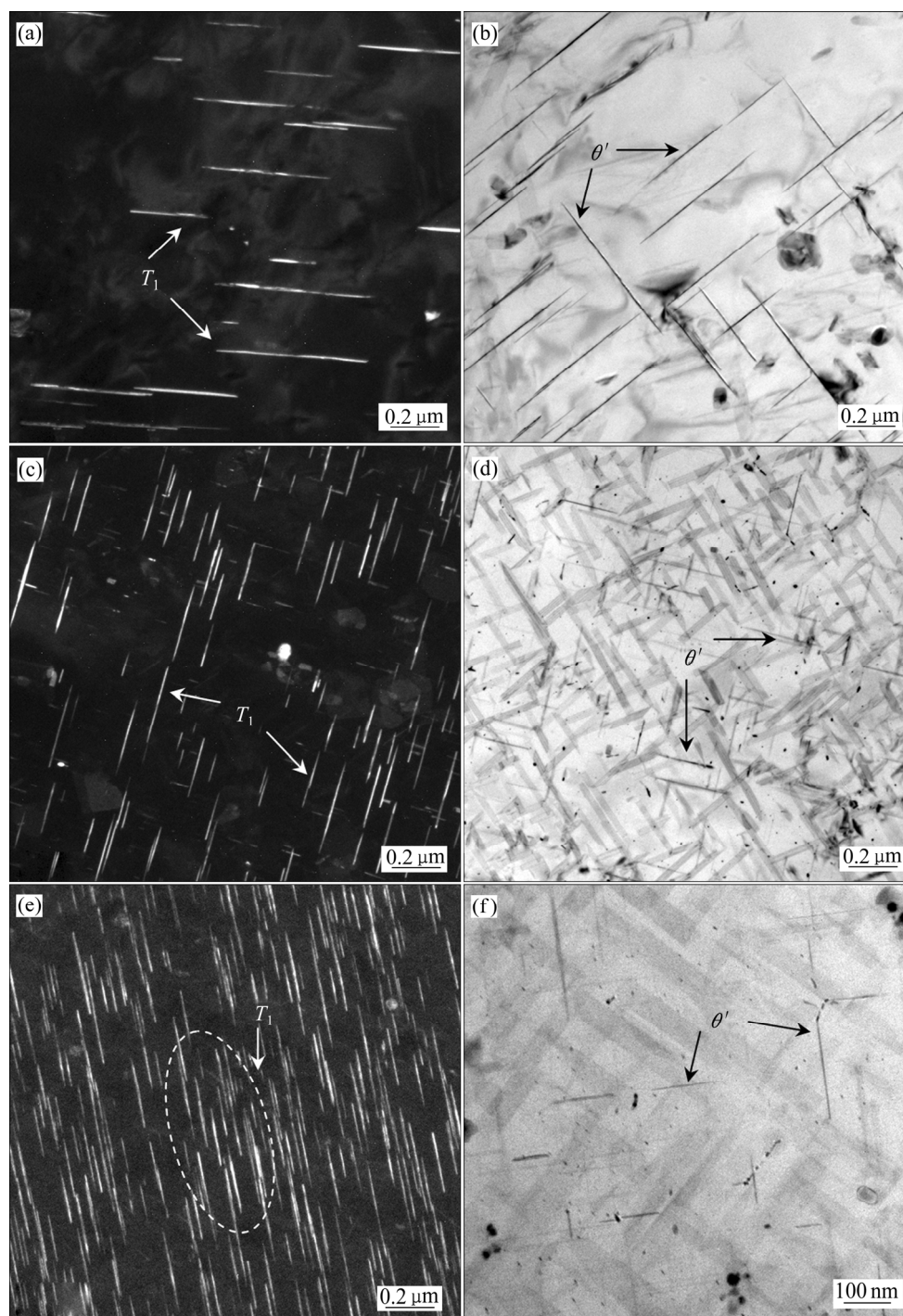


图 15 添加不同微合金化元素 Al-3.5Cu-1.0Li-X 铝锂合金 T6 峰时效时 TEM 照片^[40-41]

Fig. 15 TEM images of Al-3.5Cu-1.0Li-X alloys with different micro-alloying elements^[40-41]: (a), (b) Mg-free; (c), (d) Containing 0.35Mg; (e), (f) Containing 0.35Mg+0.45Ag; (a), (c), (e) DF images, T_1 precipitates, $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (b), (d), (f) BF images, θ' precipitates, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction

照片^[40-41]。相比不添加 Mg(见图 15(a)和(b)), 单独添加 Mg(见图 15(c)和(d))及同时添加 Mg+Ag(见图 15(e)和(f))时均有利于铝锂合金中 T_1 相析出分数增加, 同时导致 θ' 相减少。

图 16 所示为不含 Zn 及含 0.75%Zn 的 Al-2.7Cu-1.7Li-0.4Mg-X 铝锂合金 T6 峰时效时 $[100]_{\text{Al}}$ SAED 谱及 TEM-DF 照片^[42]。合金主要时效析出相均为 δ' 相及 T_1 相。但添加 0.75%Zn 合金中 T_1 相析出密度增加, 同时 δ' 相尺寸减小。

研究表明, Mg+Ag+Zn 三元复合添加具有更大的促进 T_1 相析出的效果, 是超高强铝锂合金微合金化成分设计的主要方向^[43-44]。综合文献分析表明, Mg、Mg+Ag、Mg+Zn、Mg+Ag+Zn 微合金化均能显著促进 Al-Cu-Li 系铝锂合金中 T6 态时效时主要

强化相 T_1 相析出, 其中以 Mg+Ag+Zn 三元复合添加效果最好, Mg+Ag 和 Mg+Zn 效果次之。需要说明的是, T8 态时效时预变形产生的位错能促进 T_1 相形核, 将部分减弱上述微合金化效果^[44]。

对于 Mg+X(X=Ag、Zn)微合金化促进 T_1 相时效析出机理, 研究人员进行了如下总结。

T_1 相与铝基体半共格, 为减少形核阻力, T_1 相将于位错、晶界、亚晶界等处优先析出, 层错及铝基体 $\{111\}_{\text{Al}}$ 面上形成的 GP 区也是其重要的优先形核位置^[45-46]。合金中添加微量 Mg 后, 由于 Mg 原子与空位(V)之间的结合能高, 大量过饱和空位在固溶淬火过程中易被 Mg 原子俘获形成 Mg-V 对, 并形成大量的 Mg-Cu-V 团簇, 为时效过程提供大量有效的可动空位, 从而促进 GP 区的形成, 继而

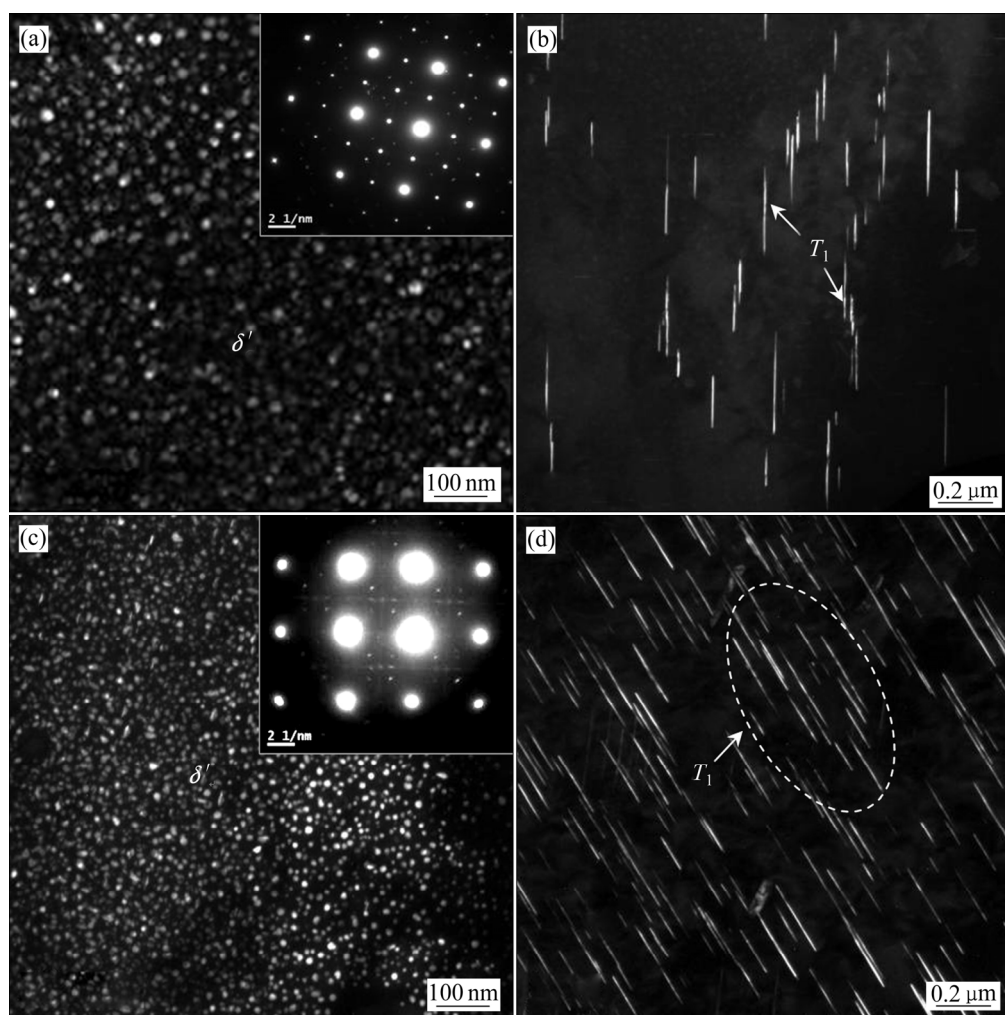


图 16 不含 Zn 及含 0.75%Zn 的 Al-2.7Cu-1.7Li-0.4Mg-X 铝锂合金 T6 峰时效时 $[100]_{\text{Al}}$ SAED 谱及 TEM-DF 照片^[42]

Fig. 16 SAED patterns and TEM-DF images of T6 peak-aged Al-2.7Cu-1.7Li-0.4Mg-X alloys with different micro-alloying elements^[42]: (a), (b) Zn-free; (c), (d) Containing 0.75%Zn; (a), (c) $[100]_{\text{Al}}$ SAED patterns, DF images, δ' precipitates, $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ direction; (b), (d) DF images, T_1 precipitates, $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$ direction

促进 T_1 相形核析出^[46]。同时, Mg 能显著降低铝合金的层错能, 有利于层错形成, 为 T_1 相提供更多形核位置, 促进 T_1 相的形核析出^[46]。

当联合添加 Mg+Ag 元素后, 检测到 Mg、Ag 元素可存在于 T_1 相内部^[47](见图 17(a)), 也可偏聚与 T_1 相与基体的界面部位^[48](见图 17(b))。根据上述现象及原子之间的相互作用趋势, 提出的 Mg+Ag 复合添加促进 T_1 相析出的机理如下: 由于 Mg、Ag 原子间的强相互作用, 在淬火及时效早期, 合金中形成了 Mg-Ag 原子团簇; 在随后的时效过程中, Mg、Ag 原子与 Cu、Li 原子的相互作用促使 Cu、

Li 原子扩散到团簇周围, 且 Cu 原子不断替代 Ag, 使团簇溶解形成更加稳定的三元 T_1 相。即 Mg、Ag 原子在时效前期将作为桥梁促进 T_1 相形核, 但在时效过程中 Mg、Ag 原子将逐渐排除出 T_1 相^[47]。

关于 Mg+Zn 微合金化作用机理还有待进一步探索。有研究认为 Mg+Zn 微合金化作用与 Mg+Ag 类似, 并在 Mg+Zn 微合金化的 2099 铝锂合金 T_1 相内部发现 Mg、Zn 原子的富集^[49]。作者课题组也发现在 2099 铝锂合金 T_1 相内部发现 Mg、Zn 的同时富集(见图 17(c))。然而, 也有研究认为 Zn 原子进入 T_1 相, 占据 T_1 相中 Cu 原子位置, 即 Zn 元素取

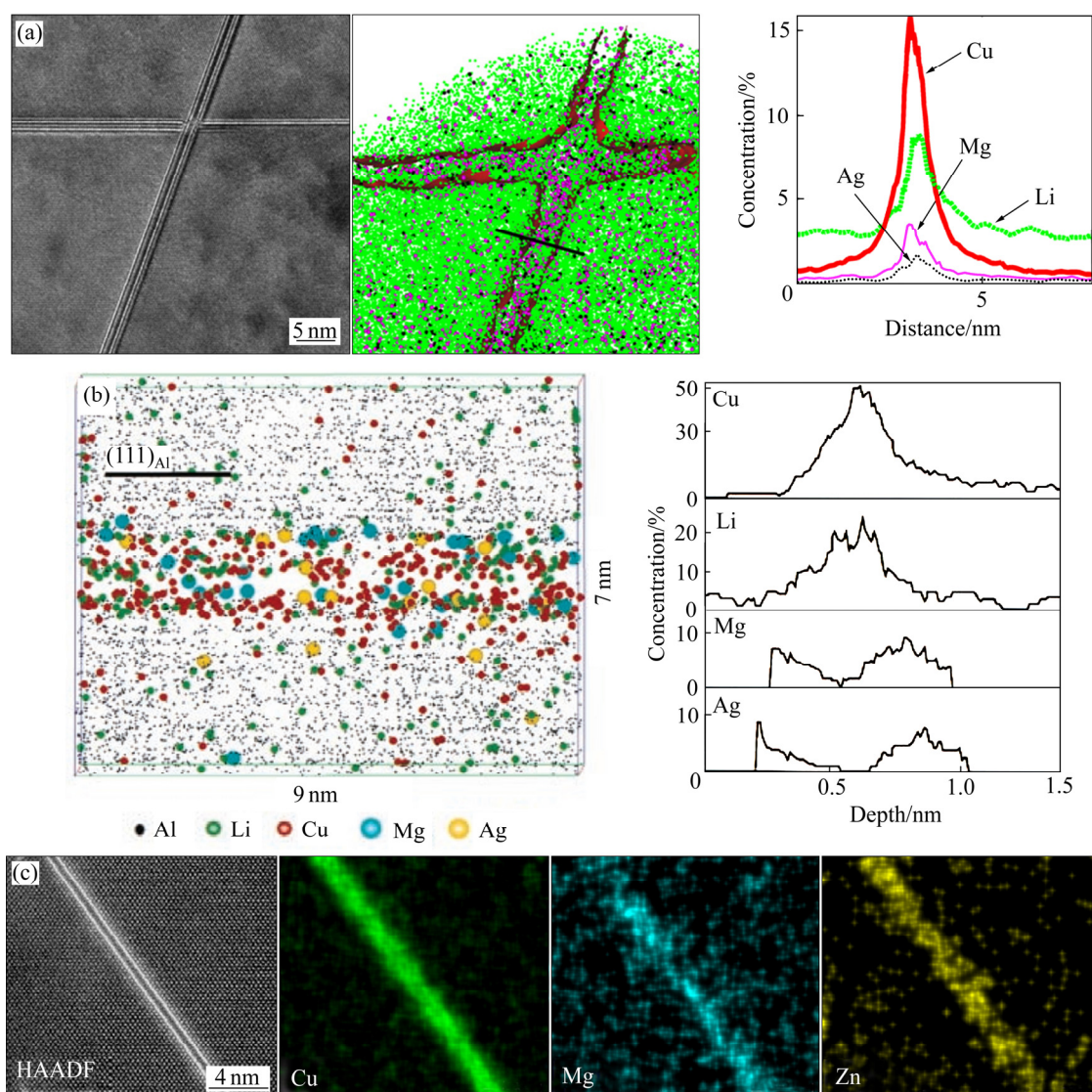


图 17 不同微合金化 Al-Cu-Li 合金 T_1 相中元素分布

Fig. 17 Element distribution through T_1 precipitates in Al-Cu-Li alloy with different microalloying elements: (a) HRTEM, atom probe tomography (APT) and a composition profile through T_1 precipitate in Al-1.68Cu-4.62Li-0.33Mg-0.1Ag (mole fraction, %) alloy aged at 200 °C for 1 h^[47]; (b) 3DAP elemental map concentration depth profiles in Al-5.0Li-2.25Cu-0.4Mg-0.1Ag-0.04Zr (mole fraction, %) aged at 180 °C for 200 min^[48]; (c) HAADF and scanning element analysis mapping of 2099 Al-Li alloy after T6 aging at 175 °C

代 T_1 相中 Cu 元素位置^[50]。

3.2.2 Mg、Ag、Zn 微合金化元素对性能的影响

通过促进 T_1 相形核, 加速时效响应过程, Mg、Ag、Zn 微合金化将显著影响铝锂合金的力学性能。表 2 所示为不添加 Mg、单独添加 Mg 及复合添加 Mg+Ag 的 Al-3.5Cu-1.0Li-X(X 代表 Mn、Zr 等微合金化元素)铝锂合金冷轧薄板 T6 态(175 °C)及 T8 态近峰时效时的拉伸性能。相比不添加 Mg 元素时, 合金中单独添加 Mg 时, T6 峰时效时强度大幅度提高; 同时添加 Mg+Ag 时, 其强度进一步大幅度提高。T8 时效时强度变化表现出类似规律, 但强度提高幅度明显降低^[40-41]。

表 3 所示为单独添加 0.25Mg 及复合添加 0.25Mg+0.75Zn 的 Al-2.6Cu-1.7Li-X(X 代表 Mn、Zr 等微合金化元素)铝锂合金挤压棒材 T6 态(175 °C)及 T8 态近峰时效时的拉伸性能^[51]。复合添加 Mg+Zn 时, 对应峰时效抗拉强度和屈服强度均有所

提高。

表 4 所示为 Al-3.7Cu-1.2Li-X(X 代表 Mn、Zr 等微合金化元素)中分别少量添加 Mg+Ag、Mg+Zn 及 Mg+Ag+Zn 后 T6(175 °C)及 T8 峰时效时的拉伸性能^[43-44]。综合而言, Mg+X(X=无、Ag 或/和 Zn)微合金化通过促进 T_1 相析出, 能有效提高 T6 态时效时 Al-Cu-Li 系铝锂合金强度, 其微合金强化效果呈现如下规律: Mg+Ag+Zn>Mg+Ag>Mg+Zn>Mg。另外, T8 态时效时呈现相似的强化规律, 但微合金强化效果部分减弱。

Ag、Zn 微合金化对铝锂合金腐蚀性能表现出不同的影响效果。在铝锂合金腐蚀过程中, 晶界同时含 Cu、Li 析出相 T_1 及 T_2 相在腐蚀过程中存在电化学极性转换机制。 T_1 及 T_2 相电位较负, 作为阳极先发生腐蚀, 其中活泼元素 Li 优先溶解后, 导致腐蚀后的 T_1 相和 T_2 相产生 Cu 元素富集并转化为阴极, 进而促进其边缘铝基体的阳极溶解^[52-54]。铝锂

表 2 Mg、Ag 微合金化 Al-3.5Cu-1.0Li-X 铝锂合金薄板 T6、T8 态峰时效时拉伸性能^[41]

Table 2 Tensile properties of T6 and T8 peak-aged Al-3.5Cu-1.0Li-X alloy sheets with micro-alloying elements of Mg and Ag^[41]

Micro-alloying element	T8			T6		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
Mg-free	496	477	9	335	248	14
0.35Mg	506	488	10	444	410	9
0.35Mg+0.45Ag	562	547	9	522	506	8

表 3 Mg、Zn 微合金化 Al-2.6Cu-1.7Li-X 铝锂合金挤压棒材 T6 及 T8 峰时效拉伸性能^[51]

Table 3 Tensile properties of T6 and T8 peak-aged Al-2.6Cu-1.7Li-X alloy bars with micro-alloying elements of Mg and Zn^[51]

Micro-alloying elements	T8			T6		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
Mg	616	590	6	539	490	8
Mg+Zn	625	601	6	559	499	7

表 4 Mg、Ag、Zn 微合金化 Al-3.7Cu-1.2Li-X 铝锂合金冷轧薄板 T6、T8 态峰时效时拉伸性能^[43]

Table 4 Tensile properties of T6 and T8 peak-aged Al-3.7Cu-1.2Li-X alloy sheets with micro-alloying elements of Mg, Ag and Zn^[43]

Micro-alloying element	T8			T6		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
Mg+Ag+Zn	647.2	609.4	7.3	613.1	558.1	6.3
Mg+Zn	610.3	571.5	6.7	553.8	480.7	8.8
Mg+Ag	617.3	570.7	9.1	582.2	527.5	7.5

合金中添加的 Zn 元素可进入晶界含 Cu、Li 析出相 (晶界 T_1 相及晶界其他含 Cu 相), 代替其部分 Cu 元素 (见图 18(a)), 降低析出相中不活泼元素 Cu 的含量, 在腐蚀过程中减弱上述电化学极性转换后促进边缘铝基体阳极溶解的效果, 进而提高其耐蚀性能^[55-58]。Ag 元素同样可进入晶界含 Cu、Li 析出相 (见图 18(b))^[59], 然而由于 Ag 元素电化学活性低于 Cu 元素, 将进一步加剧上述电化学极性转换后促进其边缘铝基体阳极溶解的效果, 进而降低其耐蚀性能。

3.3 稀土微合金化

研究表明, 稀土(RE)元素在铝合金中有细化晶粒、阻碍再结晶、提高韧性及强度的效果, 如 Sc 在 Al-Mg 系及 Al-Zn-Mg 系铝合金中具有细晶强化、 $Al_3(Sc,Zr)$ 第二相强化及亚结构强化的作用^[60-61]。然而有不少研究发现, Sc、Ce、Er 等稀土元素在不同 Al-Cu-Li 系铝锂合金中具有不同的作用效果, 既可能提高铝锂合金强度, 但也可能导致其强度降低, 如表 5 所示。

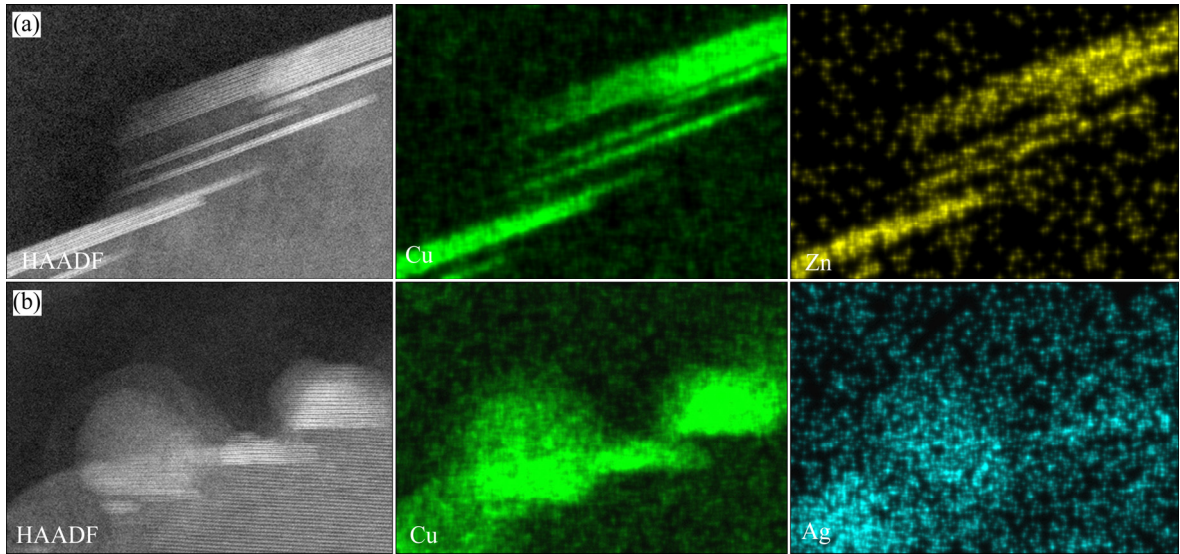


图 18 HAADF-STEM 照片及晶界析出相元素面扫描照片
Fig. 18 HAADF-STEM images and scanning element analysis mapping of grain boundary precipitates: (a) Zn containing alloy; (b) Ag containing alloy^[59]

表 5 微量稀土对 Al-Cu-Li 系铝锂合金强度的影响

Alloy	Element concentration ,w/%								Strength variation compared to RE-free alloy
	Cu	Li	Mn	Mg	Ag	Zn	Zr	RE	
2099+Sc ^[62]	2.6	1.6	0.3	0.3	—	0.7	0.1	0.1Sc	Strength enhanced
1460+Sc ^[63]	3.0	2.0	—	—	—	—	0.1	0.11Sc	Strength enhanced
	3.0	2.0	—	—	—	—	0.1	0.22Sc	Strength lowered
1469+Sc ^[64]	4.3	1.0	—	0.3	0.4	—	0.12	0.063Sc	Strength lowered
	3.52	1.5	—	—	—	—	0.12	0.11Sc	Strength enhanced
Al-Cu-Li+Sc ^[65]	3.51	1.51	—	—	—	—	0.12	0.15Sc	Little difference
	3.50	1.52	—	—	—	—	0.12	0.24Sc	Strength lowered
Al-Mg-Cu-Li+Sc ^[66]	1.5	1.0	—	4.0	—	—	0.12	0.2Sc	Strength enhanced
Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr+Ce ^[67]	5.87	1.31	—	0.43	0.41	—	0.13	0.2Ce	Strength enhanced
Al-Cu-Li-Mg-Zn-Mn-Zr+Sc ^[68-69]	3.36	1.19	0.3	0.4	—	0.4	0.1	0.082Sc	Strength lowered
Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zn-Zr+Ce ^[69-70]	4.24	1.26	—	0.4	0.4	0.45	0.12	0.11Ce	Strength lowered
Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zn-Mn-Zr+Er ^[69, 71]	3.56	1.19	0.3	0.4	0.4	0.45	0.1	0.2Er	Strength lowered

微观组织分析表明, 在添加微量 Sc、Ce、Er 等 RE 元素的 Al-(3.5-4.3)Cu-1.2Li-X 铝锂合金(X 代表其它微合金元素)中, T_1 相和 θ' 相数量减少, 即含 Cu 时效强化相 T_1 相及 θ' 相析出分数降低^[68-71]。在低 Li 含量 Al-Cu-Li 系铝锂合金($w(\text{Cu}) > 3.0\%$)中, 强化相以 T_1 相和 θ' 相为主; 添加微量 Sc、Ce、Er 等 RE 元素后, RE 元素与 Cu 元素结合, 在凝固及退火过程中即分别形成 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 、 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Ce}$ 及 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 等第二相(见图 19)^[69], 不能有效地形成 Al_3Sc (或 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$)等弥散粒子, 减弱其细化晶粒、阻碍再结晶及弥散强化的效果(见图 20(a)); 同时, 难溶相 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 、 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Ce}$ 及 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 粒子含较多 Cu 元素且固溶处理时不能溶解至固溶体基体中, 导致过饱和固溶体基体中 Cu 含量降低, 相应时效后析出的含 Cu 强化相 T_1 相及 θ' 相减少, 时效强化效果降低。

若铝锂合金中 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 降低, 合金强化相以 δ' 相为主, T_1 相比比例下降。同时, 能更有效的形成 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 等弥散粒子, 发挥阻碍再结晶的效果(见图 20(b))^[72], 因而在低 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 铝锂合金中微量 RE 元素具有有效的阻碍再结晶、提高强度的作用。

在一定 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$ 铝锂合金中, 强化相以 δ' 相为主, 但同时存在一定量 T_1 相时, 微量 RE 元素如 0.1%Sc 可以形成一定的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 弥散粒子, 并弥补形成 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 粒子的负面影响效果; 但当 RE 元素如 Sc 含量增加至 0.2%以上时, 将导致形成更多的难溶 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 粒子, $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 弥散粒子的有益作用并不能弥补形成较多 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 粒子产生的负面影响, 结果导致铝锂合金强度降低^[63]。综上所述, RE 元素在 Al-Cu-Li 系铝锂合金中的微合金化作用效果与其 Cu、Li 含量密切相关, 高 Cu 含量铝锂合金中应控制 Sc、Ce、Er 等 RE 元素的添加。

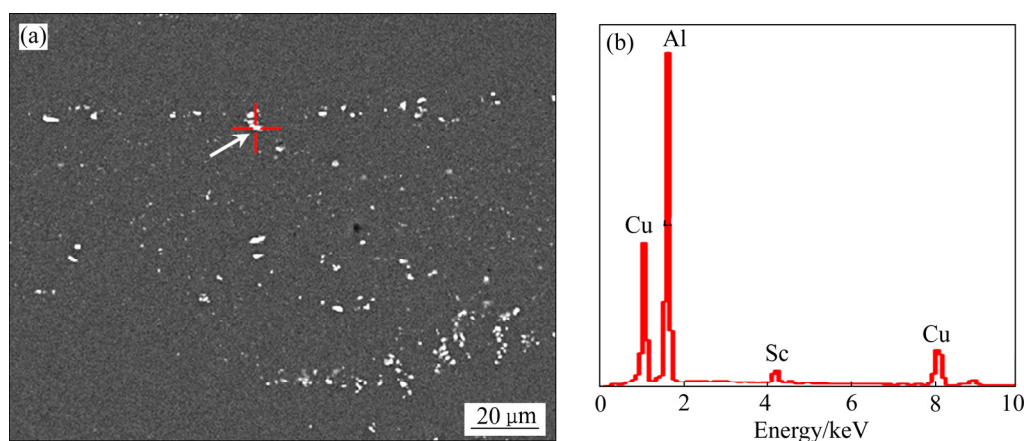


图 19 Al-3.4Cu-1.2Li-X-0.082Sc 铝锂合金固溶处理后 SEM 背散射照片及难溶相粒子 EDS 分析^[69]

Fig. 19 SEM back scattered image (a) and EDS analysis of residual particles (b) of solutionized Al-3.4Cu-1.2Li-X-0.082Sc alloy^[69]

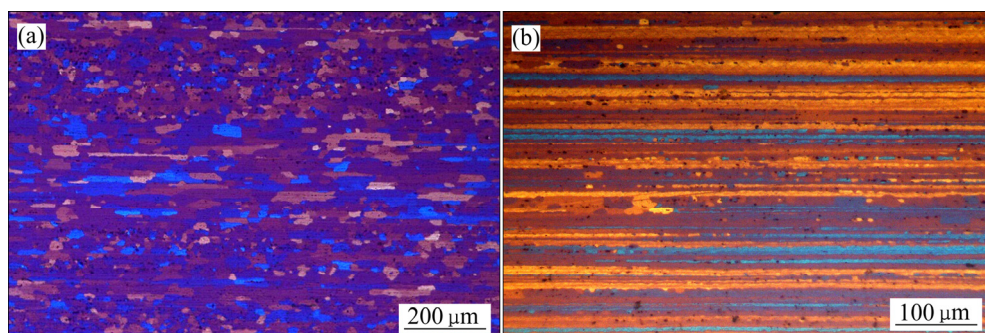


图 20 含 Sc 铝锂合金冷轧薄板固溶后金相照片^[72]

Fig. 20 Metallographic images of Sc containing Al-Li alloy sheet after solutionization^[72]: (a) Al-3.4Cu-1.2Li-X-0.1Sc alloy; (b) Al-1.5Cu-1.7Li-X-0.08Sc alloy

3.4 In 元素微合金化

研究表明, Al-Cu 合金中添加微量 In、Sn、Cd 元素, 这些原子偏聚在析出相与基体的界面上, 降低界面能, 从而加速 θ' 相的析出, 提高 Al-Cu 合金的时效响应速度。同时, In 和 Sn 等微量元素所形成的富 In 和富 Sn 粒子先于 θ' 相形成, 可作为 θ' 相非均匀形核的位置, 从而促进 θ' 相的析出。另外, 微量 In、Sn 的添加还能抑制 θ' 相的粗化, 提高 Al-Cu 合金的过时效性能^[73-75]。

鉴于微量 In 在 Al-Cu 合金中有益的微合金化效果, 研究人员进行了 In 元素在 Al-Cu-Li 系铝锂合金中的微合金化效果研究。PAN 等^[76-78]发现 0.2%~0.5%In 微合金化的 Al-3.3Cu-0.8Li 铝锂合金 T6 态时效(175 °C)时大量析出一种均匀分布的、与铝基体共格的稳定立方相 χ 相($\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Li}_2$), 并促进 θ' 相析出, 提高铝锂合金强度。同时, 由于 In 与空位间的强相互作用使其在淬火态或时效早期捕捉了大量空位, 减少 T_1 相形核所需的位错环, 从而延缓 T_1 相形核析出; 另外, 该立方相 χ 相同时含 Cu 和 Li 原子, 与 T_1 相析出呈竞争关系, χ 相大量析出相应地减少了 T_1 相析出分数^[4]。

GILMORE 等^[79]发现 Al-4.2Cu-1.2Li-0.16Zr 合金中添加 0.09%In 可促进 T6 态时效时 θ'' 相和 T_1 相析出, 提高铝锂合金强度。WOO 等则发现在低 Cu 高 Li 含量的 Al-2.5Cu-1.8Li 合金中添加 0.18%In 时, 160 °C 进行 T6 态时效时可促进 T_1 相和 θ' 相, 而抑制 δ' 相析出, 提高铝锂合金强度^[80]。上述研究表明, In 可以促进 Al-Cu-Li 合金 T6 态时效时 θ' 相和 θ'' 相析出; 但如果形成立方相 χ 相($\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Li}_2$), 则抑制 T_1 相析出; 反之则促进 T_1 相析出。但总体而言, 关于 In 在铝锂合金中的微合金化作用机理, 尚待进一步深入研究。

另外, 在添加微合金化元素 Mg 的基础上再添加微量 In, 其微合金化作用并无叠加效果^[77-78]。而且 T8 态时效时, In 的微合金化作用效果明显减弱^[77-78]。

4 总结

从 20 世纪 70 年代以来, 以成分设计为目的的铝锂合金的合金化及微合金化研究已取得了长足的进步, 特别是现代先进检测手段的发展, 铝锂合

金的微合金化研究工作取得了更大的进展。综合国内外研究文献, 结合笔者课题组成分设计研究成果, 可以总结以下两种类型铝锂合金成分设计思路。

1) 对于高强铝锂合金的成分设计, 可在采用 Mg+Ag、Mg+Zn 或 Mg+Ag+Zn 复合微合金化的基础上, 保证较高 Cu、Li 总摩尔分数的同时, 提高 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$, 通过增加 T_1 相和 θ' 相析出密度和比例, 达到铝锂合金高强度的目的。

2) 对于耐腐蚀铝锂合金的成分设计, 一方面应降低铝锂合金中 $x(\text{Cu})/x(\text{Li})$ 或 $w(\text{Cu})/w(\text{Li})$, 减少晶界含 Cu 析出相分数; 另一方面, 添加微合金化元素 Zn, 减少晶界含 Cu 析出相中的 Cu 含量, 减弱腐蚀过程中晶界析出相电化学极性转换后促进边缘基体阳极溶解的作用。

航空工业和航天工业的飞速发展, 对轻质高强铝合金材料提出了迫切需求, 可以预计我国将迎来轻质铝锂合金的研究高潮。这些研究既包括成形、焊接、热处理等方面的应用技术研究, 也包括基于不同应用背景和性能要求的成分设计研究。虽然铝锂合金的合金化和微合金化研究已取得重要进展, 但基于未来铝锂合金成分设计发展的需要, 笔者认为 Al-Cu-Li 系铝锂合金还应该在以下几个方面开展更深入的研究。① 针对航空工业对耐损伤铝锂合金的需求, 系统地开展(微)合金化元素对铝锂合金耐损伤性能的影响规律及机理研究, 开发高耐损伤铝锂合金。② 进一步深入开展复合微合金化, 特别是 Mg+Zn 复合微合金化的作用效果及机理研究。③ 开展稀土元素在不同成分铝锂合金中的作用效果研究, 包括力学性能、耐损伤性能, 充分发挥稀土元素的有益作用, 并摒弃其有害作用。

REFERENCES

- [1] EL-ATY A A, XU Y, GUO X Z, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review[J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49-67.
- [2] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metallurgical Materials Transaction A, 2012, 43(9): 3325-3337.
- [3] 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.
- LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, CHEN Yong-lai, et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry[J]. Aerospace Materials and Technology, 2012, 42(1): 13-19.
- [4] 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): 2337-2351.
- ZHENG Zi-qiao, LI Jin-feng, CHEN Zhi-guo, et al. Alloying and microstructural evolution of Al-Li alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2337-2351.
- [5] CHEN T R, HUANG J C, LIAO J M, et al. Effects of lubrication on superplastic forming of 8090 Al-Li sheets[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(3): 309-314.
- [6] McDARMAID D S. Effect of natural aging on the tensile properties of the Al-Li alloys 8090, 8091 and 2091[J]. Materials Science and Engineering A, 1988, 101: 193-200.
- [7] DERVENIS C P, MELETIS E I, HOCHMAN R F. Corrosion fatigue in Al-Li alloy 2090[J]. Materials Science and Engineering A, 1988, 102(2): 151-160.
- [8] POLMEAR I J, CHESTER R J. Abnormal age hardening in an Al-Cu-Mg alloy containing silver and lithium[J]. Scripta Metallurgica, 1989, 23: 1213-1218.
- [9] RIOJIA R J, BRETZ P E. Aluminum-Lithium alloys having improved corrosion resistance containing Mg and Zn. United States Patent 4961792[P]. 1990-10-09.
- [10] 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, 45(2): 24-28.
- LI Jin-feng, CHEN Yong-lai, ZHANG Xu-hu, et al. Influence of Cu and Li contents on mechanical properties and microstructures of Mg-, Ag- and Zn-microalloyed Al-Li alloys[J]. Aerospace Materials and Technology, 2015, 45(2): 24-28.
- [11] LI Jin-feng, LIU Ping-li, CHEN Yong-lai, et al. Mechanical properties and microstructures of Mg, Ag and Zn mult-microalloyed Al-(3.2~3.8)Cu-(1.0~1.4)Li alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2103-2112.
- [12] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 一种新型超高强铝锂合金板材的组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(12): 3715-3720.
- LI Jin-feng, CHEN Yong-lai, ZHANG Xu-hu, et al. Structures and mechanical properties of a super-high strength Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(12): 3715-3720.
- [13] 程彬, 郑子樵, 范春平, 等. 时效制度对新型 Al-Cu-Li 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 926-933.
- CHENG Bin, ZHENG Zi-qiao, FAN Chun-ping, et al. Effect of aging treatments on microstructures and properties of new Al-Cu-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1833-1842.
- [14] LÜ Ke-xin, ZHU Chen-yang, ZHENG Jing-xu, et al. Precipitation of T1 phase in 2198 Al-Li alloy studied by atomic-resolution HAADF-STEM[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(20): 3535-3544.
- [15] HUANG J C, ARDELL A J. Crystal structure and stability of T_1 precipitates in aged Al-Li-Cu alloys[J]. Materials Science and Technology, 1987, 3: 176-188.
- [16] WANG S C, STARINK M J. Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys[J]. International Materials Reviews, 2005, 50(4): 193-215.
- [17] NIE J F, MUDDLE B C. On the form of the age-hardening response in high strength aluminium alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 319/321: 448-451.
- [18] NIE J F, MUDDLE B C, POLMEAR I J. The effect of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in high strength aluminium alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217/222: 1257-1262.
- [19] NIE J F, MUDDLE B C. Microstructural design of high-strength aluminum alloys[J]. Journal of Phase Equilibria, 1998, 19(6): 543-551.
- [20] LIU Yu-lin, ZHANG Yun, ZHAO Hong-en, et al. Microstructure and mechanical properties of 8090 Al-Li alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 1992, 5(2): 89-94.
- [21] GHOSH K S, DAS K, CHATTERJEE U K. Studies of retrogression and reaging behavior in a 1441 Al-Li-Cu-Mg-Zr alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36: 3477-3487.
- [22] ZHAO Zhi-long, LIU Lin, CHEN Zheng. Co-strengthening contribution of δ' and T_1 precipitates in Al-Li alloys 2090 and 2090+Ce[J]. Rare Metals, 2006, 25(3): 197-201.
- [23] LI Jin-feng, YE Zhi-hao, LIU Dan-yang, et al. Influence of pre-deformation on aging precipitation behavior of three Al-Cu-Li alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(2): 133-145.
- [24] LIN Y, LU C, WEI C Y, et al. Effect of aging treatment on

- microstructures, tensile properties and intergranular corrosion behavior of Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 141: 163–168.
- [25] 魏修宇, 郑子樵, 潘峥嵘, 等. 预变形对 2197 铝锂合金显微组织和力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(11): 1996–1999.
- WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao, PAN Zheng-rong, et al. The role of plastic deformation on microstructure and mechanical properties of 2197 Al-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(11): 1996–1999.
- [26] CHEN Bin, GUO Ming-feng, ZHENG Jing-xu, et al. The effect of thermal exposure on the microstructures and mechanical properties of 2198 Al-Li alloy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18(7): 1225–1233.
- [27] YE Zhi-hao, CAI Wen-xin, LI Jin-feng, et al. Impact of annealing prior to solution treatment on aging precipitates and intergranular corrosion behavior of Al-Cu-Li alloy 2050[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 2471–2486.
- [28] LI Jin-feng, LIU Dan-yang, NING Hong, et al. Experimental quantification of “hardenability” of 2195 and 2050 Al-Li alloys by using cold-rolled sheets[J]. *Materials Characterization*, 2018, 137: 180–188.
- [29] BALDUCCI E, CESCHINI L, MESSIERI S, et al. Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 707: 221–231.
- [30] 李劲风, 郑子樵, 蔡彪. 一种铝锂合金搅拌摩擦焊的接头力学性能及微观组织研究[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(3): 71–76.
- LI Jin-feng, CAI Biao, ZHENG Zi-qiao. Mechanical property and microstructure of friction stir welding (FSW) joint of an Al-Li alloy[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2013, 43(3): 71–76.
- [31] JO Hyung-Ho, HIRANO Ken-ichi. Precipitation processes in Al-Cu-Li alloys by DSC[J]. *Materials Science Forum*, 1987, 13/14: 377–382.
- [32] 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 Materialia*, 2013, 61: 2207–2218.
- [33] LIU Dan-yang, LI Jin-feng, LIN Yong-cheng, et al. Cu/Li ratio on the microstructure evolution and corrosion behaviors of Al-xCu-yLi-Mg alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(9): 1201–1216.
- [34] 桑冯建, 郑子樵, 王海金. Mn 在 2297 铝锂合金中的微合金化作用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(3): 871–877.
- SANG Feng-jian, ZHENG Zi-qiao, WANG Hai-jin. Micro-alloying effects of Mn in 2297 Al-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 871–877.
- [35] GUO Zhan-ying, ZHAO Gang, CHEN C G. Effects of homogenization treatment on recrystallization behavior of 7150 aluminum sheet during post-rolling annealing[J]. *Materials Characterization*, 2016, 114: 79–87.
- [36] YANG Shou-jie, DAI Sheng-long, SU Bin. Influence of alloying elements on mechanical properties of Al-Li plates[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2004, 14(2): 321–324.
- [37] TSIVOULAS D, PRANGNELL P B. The effect of Mn and Zr dispersoid-forming additions on recrystallization resistance in Al-Cu-Li AA2198 sheet[J]. *Acta Materialia*, 2014, 77: 1–16.
- [38] TSIVOULAS D, PRANGNELL P B. Comparison of the effect of individual and combined Zr and Mn additions on the fracture behavior of Al-Cu-Li alloy AA2198 rolled sheet[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45: 1338–1351.
- [39] TSIVOULAS D. Effects of combined Zr and Mn additions on the microstructure and properties of AA2198 sheet[D]. Manchester: University of Manchester, UK, 2010.
- [40] 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.
- WANG Rui-qin, ZHENG Zi-qiao, CHEN Yuan-yuan, et al. Effects of Ag, Mg micro-alloying on aging characteristics and microstructure of Al-Cu-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(4): 622–626.
- [41] 王瑞琴. 2050 合金微合金化及其组织和性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- WANG Rui-qin. Microalloying, structures and properties of 2050 alloy[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [42] 魏修宇. 高性能中强耐损伤铝锂合金的组织结构、热处理和性能关系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- WEI Xiu-yu. Relationship between microstructure, heat treatment and properties of moderate strength, high damage tolerant Al-Li alloy[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [43] 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.
- LUO Xian-fu, ZHENG Zi-qiao, ZHONG Ji-fa, et al. Effects of Mg, Ag and Zn multialloying on aging behavior of new AlCuLi alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1833–1842.
- [44] 罗先甫. 新型 Al-Cu-Li 合金的时效组织与力学性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LUO Xian-fu. Study of the structure and mechanical properties of new Al-Cu-Li alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [45] NOBLE B, THOMPSON G E. T_1 (Al₂CuLi) precipitation in aluminum-copper-lithium alloys[J]. Metal Science Journal, 1972, 6: 167–174.
- [46] ITOH G, CUI Q, KANNO M. Effects of a small addition of magnesium and silver on the precipitation of T_1 phase in an Al-4%Cu-1.1%Li-0.2%Zr alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 1996, 211(1/2): 128–137.
- [47] GAULT B, GEUSER F De, BOURGEOIS L, et al. Atom probe tomography and transmission electron microscopy characterization of precipitation in Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy[J]. Ultramicroscopy, 2011, 111: 683–689.
- [48] MURAYAMA M, HONO K. Role of Ag and Mg on precipitation of T_1 phase in an Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(4): 701–706.
- [49] GUINEL M J F, BRODUSCH N, SHA G, et al. Microscopy and microanalysis of complex nanosized strengthening precipitates in new generation commercial Al-Cu-Li alloys[J]. Journal of Microscopy, 2014, 255(3): 128–137.
- [50] GUMBMANN E, LEFEBVRE W, GEUSER F De, et al. The effect of minor solute additions on the precipitation path of an Al-Cu-Li alloy[J]. Acta Materialia, 2016, 115: 104–114.
- [51] 朱小辉. 新型铝锂合金(2099 和 2196 合金)挤压材组织与性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- ZHU Xiao-hui. Structures and properties of new Al-Li alloy (2099 and 2196) extrusions[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [52] LI Jin-feng, ZHENG Zhi-qiao, LI Shi-chen, et al. Simulation study on function mechanism of T_1 (Al₂CuLi) in localized corrosion of Al-Cu-Li alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 2006, 16(6): 1268–1273.
- [53] LI J F, LI C X, PENG Z W, et al. Corrosion mechanism associated with T_1 and T_2 precipitates of Al-Cu-Li alloys in NaCl solution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460: 688–693.
- [54] LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, et al. Simulation study on function mechanism of some precipitates in localized corrosion of Al alloy[J]. Corrosion Science, 2007, 49(6): 2436–2449.
- [55] LI Jin-feng, XU Long, CAI Chao, et al. Mechanical property and intergranular corrosion sensitivity of Zn-free and Zn micro-alloyed Al-2.7Cu-1.7Li-0.3Mg alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(12): 5736–5748.
- [56] LI J F, BIRBILIS N, LIU D Y, et al. Intergranular corrosion of Zn-free and Zn micro-alloyed Al-xCu-yLi alloys[J]. Corrosion Science, 2016, 105: 44–57.
- [57] LIU D Y, LI J F, MA Y L, et al. A closer look at the role of Zn in the microstructure and corrosion of an Al-Cu-Li alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 45: 220–231.
- [58] LIU Dan-yang, MA Yun-long, LI Jin-feng, et al. The influence of Zn addition on microstructure of an Al-1.7 Cu-4.0 Li-0.4 Mg alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 2423–2439.
- [59] LIU Dan-yang, WANG Jie-xia, LI Jin-feng, et al. The effect of Ag element on the microstructure characteristic evolution of an Al-Cu-Li-Mg alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11121–11134.
- [60] PENG Y Y, LI S, DENG Y, et al. Synergetic effects of Sc and Zr microalloying and heat treatment on mechanical properties and exfoliation corrosion behavior of Al-Mg-Mn alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 666: 61–71.
- [61] LIU J, YAO P, ZHAO N Q, et al. Effect of minor Sc and Zr on recrystallization behavior and mechanical properties of novel Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 717–725.
- [62] 张海锋, 郑子樵, 林毅, 等. 微量 Sc 对 2099 铝锂合金组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1420–1427.
- ZHANG Hai-feng, ZHENG Zi-qiao, LIN Yi, et al. Effects of small addition of Sc on microstructure and properties of 2099 Al-Li alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(5): 1420–1427.
- [63] MA J, YAN D S, RONG L J, et al. Effect of Sc addition on microstructure and mechanical properties of 1460 alloy[J]. Progress in Natural Science-Materials International, 2014, 24(1): 13–18.

- [64] JIA M, ZHENG Z Q, LUO X F. Influence of AlCuSc ternary phase on the microstructure and properties of a 1469 alloy[J]. Materials Science Forum, 2014, 794/796: 1057–1062.
- [65] 梁文杰, 潘青林, 朱朝明, 等. 含钪 Al-Cu-Li-Zr 合金的组织与性能[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(2): 154–157.
- LIANG Wen-jie, PAN Qing-lin, ZHU Zhao-ming, et al. Microstructure and properties of Al-Cu-Li-Zr alloys containing Sc[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(2): 154–157.
- [66] 陈志国, 郑子樵, 王芝秀, 等. Al-4.0Mg-1.5Cu-1.0Li 合金中 Sc 的微合金化行为[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 372–377.
- CHEN Zhi-guo, ZHENG Zi-qiao, WANG Zhi-xiu, et al. Microstructural evolution and ageing behaviour of Al-4.0Mg-1.5Cu-1.0Li-(0.2Sc) alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(3): 372–377.
- [67] 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.
- [68] LIU Dan-yang, WANG Jie-xia, LI Jin-feng. The microstructures evolution and mechanical properties disparity in 2070 Al-Li alloy with minor Sc addition[J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 2018, 28(11): 2151–2161.
- [69] MA Yun-long, LI Jin-feng. Variation of aging precipitates and strength of Al-Cu-Li alloys caused by small addition of rare earth elements[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(9): 4329–4339.
- [70] 潘波, 李睿, 李劲风, 等. Ce 微合金化对一种 Al-Cu-Li 系高强铝锂合金薄板组织及拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(1): 21–30.
- PAN Bo, LI Rui, LI Jin-feng, et al. Effect of Ce on structures and tensile properties of high-strength Al-Cu-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(1): 21–30.
- [71] 李劲风, 刘丹阳, 郑子樵, 等. Er 微合金化对 2055 铝锂合金力学性能及微观组织的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(7): 821–830.
- LI Jin-feng, LIU Dan-yang, ZHENG Zi-qiao, et al. Effect of Er micro-alloying on mechanical properties and microstructures of 2055 Al-Li alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(7): 821–830.
- [72] PENG Zhuo-wei, LI Jin-feng, SANG Feng-jian, et al. Structures and tensile properties of Sc-containing 1445 Al-Li alloy sheet[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 471–483.
- [73] GABLE B M, MUDDLE B C. Factors influencing the heterogeneous nucleation of θ' in Al-Cu-In alloys[J]. Materials Science Forum, 2006, 519-521: 585–590.
- [74] 舒军, 陈志国, 李世晨, 等. 微量 Sn 和 In 对 Al-3.5%Cu 合金时效行为及微观组织演变的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2486–2491.
- SHU Jun, CHEN Zhi-guo, LI Shi-chen, et al. Effect of trace Sn(In) addition on ageing behaviour and microstructure evolution of Al-3.5%Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2486–2491.
- [75] 潘峥嵘, 郑子樵, 李世晨, 等. In 对 Al-3.5Cu 合金析出过程的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 1079–1083.
- PAN Zheng-rong, ZHENG Zi-qiao, LI Shi-chen, et al. Effect of In addition on precipitation process of Al-3.5Cu alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 1079–1083.
- [76] PAN Zheng-rong, ZHENG Zi-qiao, LIAO Zhong-quan, et al. New cubic precipitate in Al-3.5Cu-1.0Li-0.5In (wt.%) alloy[J]. Materials Letters, 2010, 64: 942–944.
- [77] PAN Zheng-rong, ZHENG Zi-qiao, LIAO Zhong-quan, et al. Effects of Indium on precipitation in Al-3.3Cu-0.8Li alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2010, 23(4): 285–292.
- [78] MA Yun-long, LI Jin-feng, LIU Dan-yang, et al. Influence of small Indium (In) addition on microstructures and tensile properties of Al-Cu-1.0Li-(Mg) alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 48(1): 1–8.
- [79] GILMORE D L, STARKE E A Jr. Trace element effects on precipitation processes and mechanical properties in an Al-Cu-Li alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28: 1399–1415.
- [80] WOO K D, KIM S W. The mechanical properties and precipitation behavior of an Al-Cu-Li-(In,Be) alloy[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 411–416.

Alloying and micro-alloying in Al-Cu-Li series alloys

LI Jin-feng, NING hong, LIU Dan-yang, ZHENG Zi-qiao

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

Abstract: The research process of Al-Li alloys and their composition design development stages are summarized. The influence and corresponding mechanism of contents of main alloying elements Cu and Li on the aging precipitate types, mechanical properties and corrosion resistance of Al-Cu-Li series alloys are emphatically expounded. The effects of micro-alloying elements Zr, Mn, Mg, Ag, Zn, Rare earth (RE) and Indium (In) on the mechanical properties, corrosion resistance and micro-structures, such as recrystallization, type and population density of aging precipitates, are discussed in detail. Based on the reported literatures and the research results of our research group, the composition design ideas of two kinds of Al-Li alloys, high strength Al-Li alloys and corrosion resistant Al-Li alloys, are proposed.

Key words: Al-Li alloy; alloying; micro-alloying; mechanical property; corrosion; microstructure

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

Received date: 2020-10-11; **Accepted date:** 2020-12-28

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

(编辑 龙怀中)