

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3296

Sc 对铸造 Al-Li 合金组织及力学性能的影响

张 亮¹, 张 深¹, 杨东辰¹, 吴国华^{1,2}

(1. 上海交通大学 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240; 2. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 铸造 Al-Li 合金可用于成型复杂薄壁构件, 在航空航天、国防军工等领域具有广阔的应用前景。细化铸造 Al-Li 合金组织, 提高合金强塑性对其实际应用具有重要意义。本文通过金属型铸造制备不同 Sc 含量的 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金, 分析了 Sc 含量对合金组织及力学性能的影响规律。结果表明, 随着 Sc 含量逐渐增加, 合金晶粒由树枝晶向近等轴晶转变, 晶粒尺寸逐渐减小。 δ' (Al₃Li)相倾向于以 Al₃Sc 相为形核核心, 形成 Al₃(Li, Sc)复合粒子, 这些粒子在变形过程中不易被位错切过, 减少了 Al₃Li 粒子引起的共面滑移。当添加 0.3%Sc(质量分数)时, 合金具有较好的综合力学性能, 经过 175 °C/32 h 的峰值时效处理后, 屈服强度、抗拉强度和伸长率分别可以达到 381.3 MPa、449.5 MPa 和 5.8%。

关键词: 铸造 Al-Li 合金; Sc 含量; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.4+51; TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0419-06

Effect of Sc on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-Li Alloy

ZHANG Liang¹, ZHANG Shen¹, YANG Dongchen¹, WU Guohua^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Cast Al-Li alloys can be used to shape complex thin-walled components and currently have broad application prospects in aerospace, military and other fields. Refining the microstructure and improving the strength and plasticity of cast Al-Li alloys is highly important for practical applications. In this work, Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys containing different Sc contents were prepared by metal mold casting, and the effects of the Sc content on the microstructure and mechanical properties of the alloys were analysed. The results indicate that as the Sc content gradually increases, the alloy grains transform from dendrites to near-equiaxed grains, and the grain size gradually decreases. The δ' (Al₃Li) phase tends to nucleate with the Al₃Sc phase, forming Al₃(Li, Sc) composite particles that are not easily cut by dislocations during deformation, reducing the coplanar slip caused by Al₃Li particles. When 0.3 wt. %Sc is added, the alloy has good comprehensive mechanical properties, and the yield strength, tensile strength and elongation can reach 381.3 MPa, 449.5 MPa and 5.8%, respectively, after the peak aging treatment at 175 °C/32 h.

Key words: cast Al-Li alloy; Sc content; microstructure; mechanical property

材料轻量化在航空航天、国防军工等领域具有重要的意义, 在此背景下 Al-Li 合金得到了人们的关注。Al-Li 合金因其低密度、高比强度、高比刚度、高弹性模量等特点已在飞机、航空航天等领域得到广泛应用, 相比于传统的商业铝合金其具有更好的性能优势, 是实现轻量化的重要结构材料^[1-4]。Al-Li 合金优异的性能主要归功于 Li 元素的加入, Li 元素

添加到铝合金中, 不仅显著降低合金密度, 而且可以产生有效的沉淀强化。研究表明, 向铝合金中加入质量分数为 1% 的 Li 元素可使合金密度降低约 3%, 弹性模量增加约 6%^[5-7]。在铝合金的任何已知添加元素中, Li 元素使铝合金密度降低幅度最大, 弹性模量增加幅度最大^[8]。用 Al-Li 合金取代常规商用 2XXX、7XXX 等铝合金可使航空航天零部件结构质

收稿日期: 2023-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51821001, 51871148)

作者简介: 张 亮, 1983 年生, 博士, 副研究员。研究方向为先进轻合金材料开发及其成型技术。Email: liangzhang08@sjtu.edu.cn

引用格式: 张亮, 张深, 杨东辰, 吴国华. Sc 对铸造 Al-Li 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 419-424.

ZHANG L, ZHANG S, YANG D C, WU G H. Effect of Sc on the microstructure and mechanical properties of cast Al-Li alloy[J].

Foundry Technology, 2024, 45(5): 419-424.

量减轻 10%~20%,刚度提高 15%~20%^[9]。

截至目前,大部分关于 Al-Li 合金的研究都集中在变形 Al-Li 合金,但是变形 Al-Li 合金难以成型复杂结构部件。铸造是生产复杂结构部件的一种低成本方法,铸造 Al-Li 合金相比于变形 Al-Li 合金具有较小的力学性能各向异性,且铸造 Al-Li 合金中的 Li 含量可进一步增加,通常 Li 元素的含量在 2%~3%之间,减重增刚效果更加显著^[10-12]。但是,铸造 Al-Li 合金由于不能通过后续变形进行强化,一般晶粒尺寸较为粗大且力学性能相对较低,这也严重制约着铸造 Al-Li 合金的应用。

晶粒细化可同时提高铸造铝合金的强度和塑性,在 Al-Li 合金领域,几种过渡元素如 Sc、Zr 和 Ti 在晶粒细化以及沉淀强化方面引起了人们的广泛关注^[13-15],其中 Sc 作为兼具过渡金属和稀土元素特性的微合金元素,微量 Sc 对铝合金的晶粒细化效果与 Ti/TiB₂ 等商业细化剂相当,而且由于时效过程中产生的 L1₂ 结构 Al₃Sc 沉淀相,在铝中添加 Sc 会产生显著的强化效果^[16-17]。Jiang 等^[18]研究了 Sc 对 2055 铝合金组织和力学性能的影响,结果表明,Sc 的添加会使 T₁ 相的尺寸和数量密度发生明显变化。Huang 等^[19]研究了 Sc 对 Al-Cu-Li 合金析出相形成的影响,发现添加少量 Sc 的合金在经过 T8 热处理后基体中除了 T₁ 和 W 相外,也会出现少量 Al₃(Sc, Zr) 和 S' 相,其中 Al₃(Sc, Zr) 颗粒具有核壳结构,Zr 原子主要靠近壳,Sc 原子富集在核中,Zr 原子在界面处的聚集抑制了 Sc 从 Al 合金基体向沉淀物内部扩散,从而使 Al₃(Sc, Zr) 颗粒粗化速率降低。本文在金属型铸造 Al-2Li-2Cu-0.5Mg 合金中添加了不同含量的 Sc,分析了 Sc 元素对铸造 Al-Li 合金组织及力学性能的影响规律,为高性能铸造铝锂合金设计开发提供理论与实验支撑。

1 实验材料与方法

实验材料为金属型铸造 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金($x=0,0.1,0.15,0.2,0.3,0.5$,质量分数),合金化学成分由电感耦合等离子体发射光谱仪测定,测得的合金具体成分如表 1 所示。铸态样品首先进行固溶处理,为了将溶质原子充分固溶进基体,同时避免组织过分粗大及出现过烧组织,采用先低温后高温的多级固溶处理工艺,固溶后的样品在 175 °C 下进行人工时效处理,人工时效在恒温油浴炉中进行。

样品用 Keller 试剂腐蚀后,利用金相显微镜进行组织观察。采用半自动光学维氏硬度计对样品硬度进行测试,载荷为 5 kg,保载时间为 15 s,每个样

表1 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys

(mass fraction/%)

Alloys	Li	Cu	Mg	Sc	Al
Al-2Li-2Cu-0.5Mg	1.81	2.12	0.51	0	Bal.
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.1Sc	1.91	1.91	0.51	0.09	Bal.
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.15Sc	2.17	1.92	0.44	0.13	Bal.
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Sc	2.28	1.97	0.45	0.18	Bal.
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc	1.98	19.2	0.43	0.31	Bal.
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.5Sc	1.87	2.02	0.43	0.52	Bal.

品测试 6 次,取平均值。拉伸测试在电子万能试验机上进行,其中拉伸速率为 0.5 mm/min,片状拉伸样品宽度为 3.5 mm、厚度为 2.0 mm、标距长度为 15 mm,每个状态的样品都进行 3 次拉伸,取其平均值为最终拉伸性能结果。利用台式扫描电镜观察合金的微观组织,同时利用透射电镜分析合金的析出相特征,加速电压为 200 kV,其中用于透射电镜分析的样品首先机械研磨成 60~70 μm 的薄片;随后用冲孔机在薄片上冲出直径为 3 mm 的圆形薄片;最后用双喷电解减薄仪进行减薄,电解液的成分为 4%高氯酸+96%乙醇(体积分数),减薄时电解液的温度为 -30 °C,电压为 30 V。

2 实验结果及讨论

2.1 铸态合金

铸态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金的金相组织如图 1 所示。当 Sc 的添加量(质量分数,下同)为 0.1%、0.15%、0.2 %时合金晶粒呈树枝状,并且晶粒逐渐减小,晶粒尺寸分别为 289.8、171.0、141.7 μm。随着 Sc 含量继续增加,晶粒逐渐由树枝晶向近等轴晶转变,第二相沿晶界呈网状分布,晶粒尺寸也持续降低,Sc 的添加量为 0.3%和 0.5%时,合金的组织中能明显看到初生 Al₃Sc 相,如图 1e 和 f 中的红圈所示,且 Sc 添加量为 0.5%时,合金中的初生 Al₃Sc 相数密度、粒子直径更大,添加 0.3%Sc 的合金晶粒尺寸已经降至 47.3 μm,比添加 0.2%Sc 的合金降低了约 64.1%,而添加 0.5%Sc 的合金晶粒尺寸更是降至 24.2 μm,晶粒尺寸比添加 0.3%Sc 的合金又降低了约 48.8%。

图 2 是铸态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金相关力学性能变化曲线,铸态合金的各项力学性能随着 Sc 含量的增加均有先升高后降低的趋势。当 Sc 含量添加至 0.2%时,继续添加 Sc,屈服强度(YS)变化不大,基本维持在 260 MPa 左右;Sc 添加量为 0.3%时,抗拉强度(UTS)达到最大值,为 328 MPa,继续添加 Sc 到 0.5%时,抗拉强度降至 269 MPa。伸长率整体来

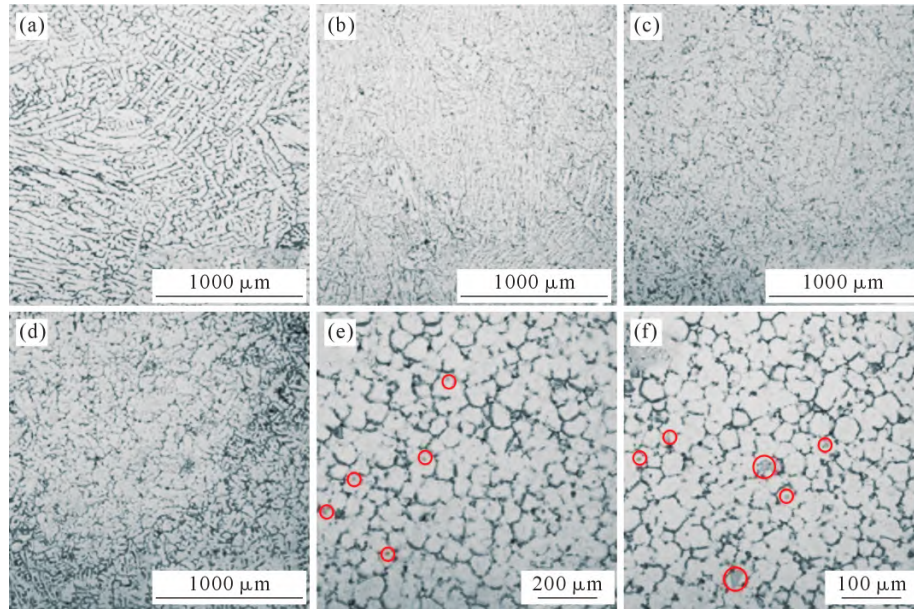


图1 铸态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金金相组织:(a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.15%; (d) 0.2%; (e) 0.3%; (f) 0.5%

Fig.1 OM images of the as-cast Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys: (a) 0 wt. %; (b) 0.1 wt. %; (c) 0.15 wt. %; (d) 0.2 wt. %; (e) 0.3 wt. %; (f) 0.5 wt. %

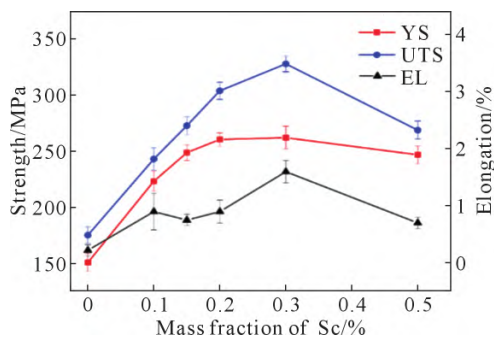


图2 铸态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of the as-cast Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys

说较低,Sc的添加对铸态合金的塑性有一定提高,Sc添加量为0.3%时,合金伸长率(EL)最高,约为1.6%。

2.2 固溶态合金

图3给出了固溶态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金的背散射电子图像。当添加0.1%和0.15%Sc合金后,经过固溶处理几乎观察不到颗粒较大的含Sc相,只有少量未溶解的含Cu相及沿晶界分布呈碎颗粒状的 Al_3Sc 相。研究表明,Cu的存在会降低Sc在Al中的固溶度,使共晶点偏移。非平衡凝固条件下初生 Al_3Sc 相优先从熔体中析出,形成块状初生 Al_3Sc 相,颗粒尺寸粗大,形状较为规则,但很难使其

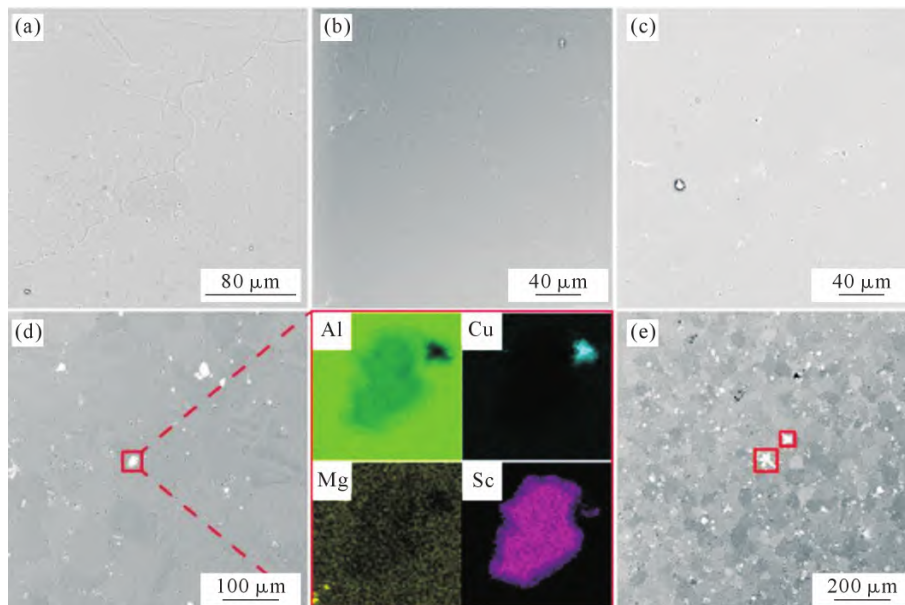


图3 固溶态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金背散射电子图像:(a) 0.1%; (b) 0.15%; (c) 0.2%; (d) 0.3%; (e) 0.5%

Fig.3 BSE images of the solution treated Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys: (a) 0.1 wt. %; (b) 0.15 wt. %; (c) 0.2 wt. %; (d) 0.3 wt. %; (e) 0.5 wt. %

固溶进基体中。另一方面,共晶反应($L \rightarrow Al + Al_3Sc$)也在剩余液相凝固过程中进行,由于 Sc 的平衡分配系数 k 小于 1 (为 0.6), Sc 在固液界面前沿富集,最终在残余液相中形成 Al_3Sc 相。当 Sc 的添加量从 0.2% 增至 0.5% 时,初生 Al_3Sc 相开始增多,逐渐在晶界处出现块状初生 Al_3Sc 。如图 3d 所示,在添加 0.3% Sc 的合金中观察到块状含 Sc 的第二相,同时其附近存在少量含 Cu 相,经过多级固溶处理也未能将其溶解。在添加 0.5% Sc 的合金中有类似的情况,如图 3e 所示。

固溶态合金的相关力学性能如图 4 所示。当添加 0.1% 的 Sc 时,合金的强度变化不大,屈服强度维持在 202 MPa,抗拉强度保持在 309 MPa,但伸长率有明显提升,从 13.7% 提高至 16.3%。Sc 的添加量从 0.1% 提高至 0.3% 时,合金的强度显著提高,屈服强度提高到 240.5 MPa,抗拉强度提高到 405 MPa,强度提高的同时伸长率也有明显提升,添加 0.3% Sc 的合金伸长率提高到 19.9%。继续提高 Sc 的添加量合金强度基本保持不变,但是由于合金 Sc 含量增多导致 Al_3Sc 初生相增多,这种粗大的第二相会损害合金的塑性,导致添加 0.5% Sc 的合金伸长率与添加 0.3% Sc 的合金相比出现大幅降低。

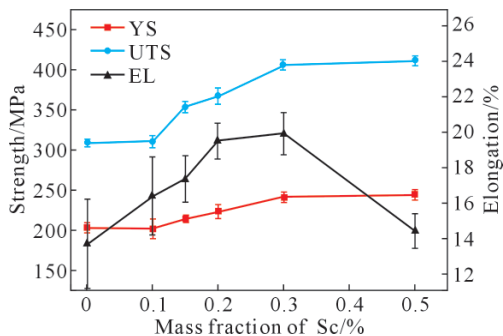


图 4 固溶态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金的力学性能
Fig.4 Mechanical properties of solution treated Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys

2.3 时效态合金

根据前面对不同 Sc 添加量合金的铸态样品以及固溶态样品组织及力学性能的分析,当 Sc 的添加量为 0.3% 时,合金具有较好的综合力学性能,所以选取添加 0.3% Sc 的合金做进一步时效分析。图 5 为未添加 Sc 的合金及添加 0.3% Sc 的合金经过固溶处理后,置于 175 °C 油浴炉中时效若干个小时 (0~512 h) 的时效硬化曲线。添加 0.3% Sc 的合金固溶处理后硬度为 129.1 HV,其时效硬化曲线整体呈抛物线形状,在时效 32 h 后硬度达到最大值,约为 166.6 HV,继续延长时效时间合金硬度将逐渐下降。通过与未添加 Sc 的合金时效硬化曲线相比,可知

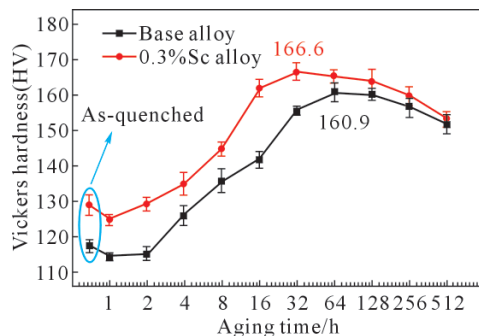


图 5 未添加 Sc 的合金及添加 0.3% Sc 的合金的时效硬化曲线

Fig.5 Age hardening curves of alloys without Sc and alloys with 0.3 wt.% Sc

Sc 的添加能加快合金时效硬化的速率及时效硬化的程度。

图 6 给出了固溶态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金经过峰值时效 (175 °C/32 h) 处理后的各项力学性能。时效态样品的屈服强度随着 Sc 添加量的增加而逐渐提高,当 Sc 添加量为 0.3% 时,取得最大值为 381.3 MPa,继续添加 Sc 会使合金的屈服强度降低。抗拉强度具有类似的变化趋势,当 Sc 的添加量为 0.2% 时,抗拉强度取得最大值为 452.3 MPa;继续添加 Sc 至 0.3% 时,合金的抗拉强度会略有下降为 449.5 MPa,同时值得注意的是:经过峰值时效处理后,伸长率最高的合金为添加 0.3% Sc 的合金,伸长率为 5.8%,相较于未添加 Sc 的合金,伸长率有了大幅提升。所以当 Sc 添加量为 0.3% 时,合金经过峰值时效处理后具有较好的综合力学性能。

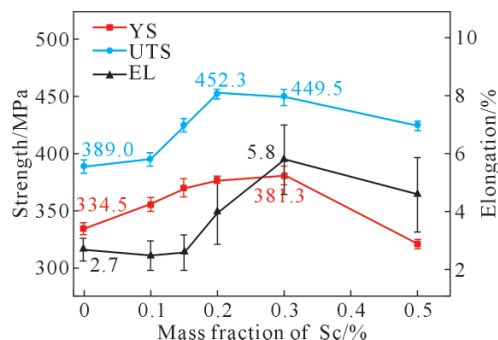


图 6 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc 合金在 175 °C 时效 32 h 后的力学性能

Fig.6 The mechanical properties of the Al-2Li-2Cu-0.5Mg-xSc alloys aged at 175 °C for 32 h

从上述研究结果可知,当合金中添加 0.3% 的 Sc 时,具有较好的综合力学性能,且在经过 175 °C/32 h 的时效处理后,添加 0.3% Sc 的合金相较于未添加 Sc 的合金不仅强度提高,而且伸长率也有大幅提升。为进一步分析 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc 合金经过时效处理后性能提高的微观机理,对时效态 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc 合金进行了 TEM 分析。

图7为Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc合金在峰值时效(175℃/32h)后的TEM图像。从图中可以看出,合金在峰值时效后主要的析出相为 Al_3Li 、 T_1 、 S' 相及 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 相。其中 T_1 相主要沿 $[111]_{\text{Al}}$ 方向分布,如图7a所示,在不同 $(111)_{\text{Al}}$ 平面上的 T_1 变体向观察方向“倾斜”,这与之前的相关研究吻合^[20-21],此外合金中还存在一定密度的沿 $(110)_{\text{Al}}$ 面析出的 S' 板条。如图7c和d所示,合金中还含有高密度的细小 δ' (Al_3Li)相,表明 δ' 相是主要的强化相。当合金中添加Sc后, δ' 相倾向于在 Al_3Sc 表面形核,最终形成以 Al_3Sc 为核心、 Al_3Li 为外壳的 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 复合粒子, $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 复合粒子表现为中间暗核被周围更亮的壳层所包围的核壳结构,这类复合相具有较强的热

稳定性,时效过程中的粗化速率远低于单一的 δ' 相^[22-23]; $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 复合粒子也会与 T_1 相产生一定的交互作用,如图7c和d中黄色矩形框所示, $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 复合粒子可被 T_1 相切过;核/壳结构的 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 相可以在变形过程中抵抗位错剪切,产生Orowan强化,减少共面滑移,并使平面滑移均匀化,从而提高材料的强塑性。在Al-Li-Cu-Mg合金中, S' 相主要在 δ' 相与基体的界面上形核,即当 δ' 相长大至一定程度时,Cu和Mg聚集在生长界面的前端,构成了 S' 相形核的必要条件。此外在形成 δ' 相时会释放过量的空位,这些过量的空位会成为 S' 相形核的有利条件,尺寸更小、弥散度更高的板条状 S' 相也有利于分散滑移,减少共面滑移和应力集中^[24]。

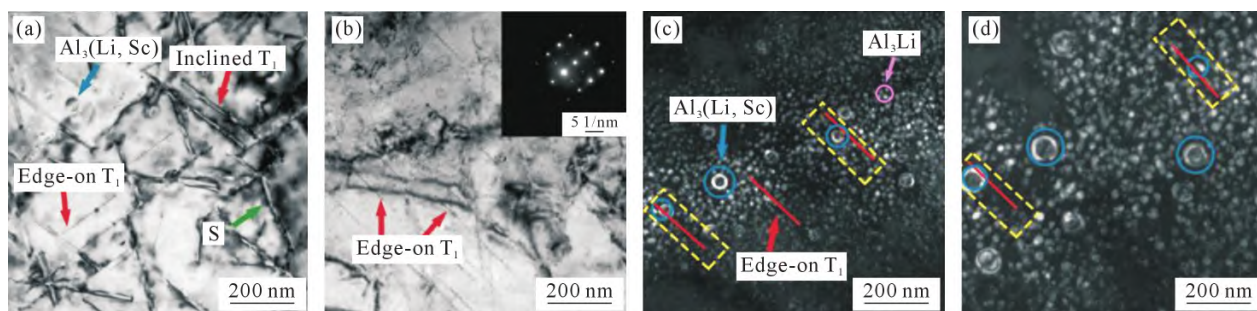


图7 时效态Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc合金TEM图像:(a) $[011]_{\text{Al}}$ 晶带轴下观察到的明场像;(b~d) $[112]_{\text{Al}}$ 晶带轴下观察到的明场像和暗场像

Fig.7 TEM images of the aged Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc alloy: (a) BF image viewed in the $[011]_{\text{Al}}$ zone axis; (b~d) BF image and DF image viewed in the $[112]_{\text{Al}}$ zone axis

3 结论

(1)随着合金中Sc含量的增加,晶粒由树枝晶向近等轴晶转变,晶粒尺寸逐渐降低。当Sc的添加量为0.5%时,晶粒尺寸降低至24.2 μm ,同时初生 Al_3Sc 相增多,第二相沿晶界呈网状分布。

(2)当Sc的添加量为0.3%时,合金具有较好的综合力学性能。同时在175℃进行32h的峰值时效处理后,添加0.3%Sc的合金Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc相比于未添加Sc的合金Al-2Li-2Cu-0.5Mg不仅强度提高、伸长率也有大幅提升,时效态Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc合金的屈服强度、抗拉强度及伸长率分别达到381.3 MPa、449.5 MPa和5.8%。

(3)Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.3Sc合金经过175℃/32h的峰值时效处理后,合金基体中析出的第二相主要为 Al_3Li 相、 T_1 相、 S' 相及 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 相,这些第二相的强化作用也是合金强度提升的主要原因。 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc})$ 相可以在变形过程中抵抗位错的剪切,产生Orowan强化,而且可以分散共面滑移使平面滑移均匀化,从而提高材料的强塑性。同时,Sc元素的添加使合金晶粒细化,有利于提高Al-Li合金的强塑性。

参考文献:

- [1] EL-ATY A A, XU Y, GUO X Z, ZHANG S H, MAY, CHEN D Y. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review [J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49-67.
- [2] 吴国华, 戚方舟, 张小龙, 张亮, 童鑫, 李良彬, 熊训满, 丁文江. 铸造铝锂合金强韧化研究现状与展望[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 869-879, 890.
- [3] WU G H, QI F Z, ZHANG X L, ZHANG L, TONG X, LI L B, XIONG X M, DING W J. Strengthening and toughening of cast Al-Li alloys: Research progress and future prospect [J]. Materials China, 2022, 41(11): 869-879, 890.
- [4] OVRI H, JÄGLE E A, STARK A, LILLEODDENE T. Microstructural influences on strengthening in a naturally aged and overaged Al-Cu-Li-Mg based alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 637: 162-169.
- [5] CHEN A T, PENG Y, ZHANG L, WU G H, LI Y L. Microstructural evolution and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.2Zr alloy during heat treatment [J]. Materials Characterization, 2016, 114: 234-242.
- [6] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys [J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [7] LAVERNIA E J, SRIVATSAN T S, MOHAMED F A. Strength, deformation, fracture behaviour and ductility of aluminium-lithium alloys [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25(2): 1137-1158.

- [7] WU G H, ZHANG X L, ZHANG L, WANG Y X, SHI C C, LI P S, REN G X, DING W J. An insight into the precipitate evolution and mechanical properties of a novel high- performance cast Al-Li-Cu-Mg-X alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 875: 159996.
- [8] ARAULLO-PETERS V, GAULT B, GEUSER F D, DESCHAMPS, CAIRNEY J M. Microstructural evolution during ageing of Al-Cu-Li-x alloys[J]. *Acta Materialia*, 2014, 66: 199-208.
- [9] 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): 3325-3337.
- [10] WU L, LI X F, WANG H W. The effect of major constituents on microstructure and mechanical properties of cast Al-Li-Cu-Zr alloy [J]. *Materials Characterization*, 2021, 171: 110800.
- [11] CHEN A T, ZHANG L, WU G H, SUN M, LIU W C. Influences of Mn content on the microstructures and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.2Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 715: 421-431.
- [12] ZHANG X L, ZHANG L, WU G H, LIU W C, SHI C C, TAO J S, SUN J W. Microstructural evolution and mechanical properties of cast Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Zr alloy during heat treatment[J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 312-319.
- [13] WANG Y X, WU G H, ZHANG L, GUO Y J. Enhanced strength and ductility in sand-cast Al-Li-Cu-Mg-Zr alloy via synergistic microalloying with Sc and Ti[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 962: 170954.
- [14] ZHANG J S, WU G H, ZHANG L, SHI C C, WANG Y X, SUN B D, LI L B. Role of Ti in the microstructure evolutions and mechanical properties of cast Al- 2.5Li-1.5Cu-1Zn-0.5Mg(-0.2Zr) alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163320.
- [15] TSIVOULAS D, ROBSON J D. Heterogeneous Zr solute segregation and Al₃Zr dispersoid distributions in Al-Cu-Li alloys[J]. *Acta Materialia*, 2015, 93: 73-86.
- [16] LI C L, LI X W, ZHANG Y A, WEN K, XIAO W, LI Y N, YU M Y, GAO G J, LI Z H, XIONG B Q. Effect of Sc content on microstructure characteristics and evolution of W phase in Al-Cu-Li alloys under as-cast and homogenization conditions[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 7335-7352.
- [17] HUANG J W, XU C L, LIU S C, JIANG F Q. Microstructure and superior quenching sensitivity of a novel Sc, Zr alloyed Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. *Materials Letters*, 2022, 309: 131422.
- [18] JIANG B, YI D Q, YI X O, ZHEGN F, WANG H S, WANG B, LIU H Q, HU Z. Effect of trace amounts of added Sc on microstructure and mechanical properties of 2055 aluminum alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 141: 248-259.
- [19] HUANG L P, HUANG J, LIU W S, CAO L F, LI S. Effect of minor Sc additions on precipitation and mechanical properties of a new Al-Cu-Li alloy under T8 temper [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 927: 166860.
- [20] DUAN S W, LIU Z L, GUO F Q, PAN Y Z, MATSUDA K, ZOU Y. Precipitates evolution during artificial aging and their influence on mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 2502-2517.
- [21] YOSHIMURA R, KONNO T J, ABE E, HIRAGAKI. Transmission electron microscopy study of the evolution of precipitates in aged Al-Li-Cu alloys: the θ' and T_1 phases[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51 (14): 4251-4266.
- [22] RADMILOVIC V, OPHUS C, MARQUIS E A, ROSSELL E A, TOLLEY A, GAUTAMA, ASTA M, DAHMEN U. Highly monodisperse core-shell particles created by solid-state reactions[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(9): 710-715.
- [23] SHI C C, WU G H, ZHANG L, ZHANG X L, SUN J W, ZHANG J S, LI L B. Microstructure and mechanical properties of casting Al-3Li-2Mg-1Zn-0.1Zr alloys modified by Sc additions [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 885: 161106.
- [24] GREGSON P J, DINSDALE K, HARRIS S J, NOBLE B. Evolution of microstructure in Al-Li-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 1987, 3(1): 7-13.