Sc 对 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金 组织和性能的影响

尹登峰 郑子樵 余志明

(中南大学,湖南长沙410083)

摘 要:采用拉伸试验、金相、透射电镜、扫描电镜等测试手段,研究了 Se 对 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金的显微组织对拉伸性能的影响。结果表明 Se 细化了合金晶粒 促进了 T_1 相的析出和均匀弥散分布,在一定程度上改变了合金的断裂行为,能使合金获得更好的综合机械性能。

关键词:Al-Li 合金;Sc;显微组织;拉伸性能 中图法分类号:TG146.2 文献标识码:A

文章编号:1002-185X 2003 09-0736-04

1 前 言

前苏联出于宇航工业和核工业的需要,率先在 Al-Mg 系、Al-Li 系及 Al-Zn-Mg 系中开展了添加微量 钪的研究,俄罗斯已研制开发了一系列含钪铝合金, 如 Al-Mg 系的 015 × ×系列、Al-Li 系的 014 × ×系列、 Al-Zn-Mg系的 019 × ×系列等。除俄罗斯外,美、日、 德、加等国对含 Sc 铝合金也作过不少研究,前苏联解 体后,美、德还聘请了一批俄罗斯专家前往进行研究, 研究工作有了很大进展。1994 年 由俄罗斯发起在莫 斯科主办了第1届国际钪及其应用学术会议,并出版 了一个论文集,但到目前为止,尚未见到关于 Cu 含量 在 4.0% (质量分数,下同) 左右的高铜锂比 (Cu/Li≈ 4)的 Al-Li 合金中加 Sc 的研究报道,原因可能是在含 铜量大于 1.5% 的合金中, 加入大于 0.20% 的钪, 有 可能形成 W(Al_{3~8}Cu_{2~4}Sc) 相,不利于有效地发挥添 加钪合金化的潜在优势¹¹。本工作试图研究微量 Sc 对 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金 (成分相当于美国 2195 合金) 的显微组织对拉伸性能的影响。

2 实验方法

所研究合金在氩气保护下熔炼铸造,合金的化学成分如表1所示。铸锭于450℃,16h+500℃&h双级均匀化后,切头、铣面、热轧、冷轧成2mm厚的板

基金项目:国家"十五"重点攻关计划项目基金资助(41312020205)

作者简介:尹登峰,男,1966年生,讲师,博士研究生,中南大学材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083,电话 10731-8879341

材,然后经504℃ A0 min 盐浴固溶处理之后淬入冷水 中。经冷轧预变形6%后在160℃时效(T₈处理)。拉 伸试验在国产WD-10A型电子拉伸机上进行,金相观 察在MET100光学显微镜上进行,并在H800透射电 镜上观察了微观组织,在KYKY-1000型扫描电镜上 观察了断口形貌。

表1 合金化学成分分析结果(w/%)

 Table 1
 Measured chemical compositions of the experimental alloys

Alloy code	Li	Cu	Mg	Ag	Zr	Sc	Al
1#	1.07	3.97	0.42	0.43	0.15		bal.
7#	0.96	3.8	0.69	0.47	0.14	0.15	bal.

3 实验结果

3.1 拉伸性能

室温拉伸性能测试结果如图 1 所示。从图中可以 看出, T_8 工艺条件下,随着时效时间的延长, 7^* 合金的 拉伸强度缓慢上升,时效约 50 h达到一个峰值平台, 36 h~60 h内强度值变化很小,而延伸率则随时效时 间的延长而缓慢下降,即使到了 50 h延伸率仍约 11.2%,与 1*合金 T_8 状态相比,其最大抗拉强度、屈 服强度相当,且延伸率增加了约 2.4%,显示出 7*合金 具有较好的综合机械性能(具体数值见表 2)。值得一 提的是 7*合金的 T_8 态达到最佳时效态的时间比不含

收到初稿日期:2002-08-13;收到修改稿日期:2003-05-13

Sc 的 1*合金要晚了近 34 h。



图 1 合金 T₈ 时效态的室温拉伸性能与时效时间的关系 Fig. 1 Tensile properties versus aging time at room temperature for T₈ treated alloys

表 2 T₈ 工艺条件下 1[#]与 7[#]合金的峰值强度及相应的延伸率

Table 2Tensile properties for T_8 treated alloys 1 and 7 at
optimal aging time

Alloy code	t∕h	$\sigma_{0.2}/\mathrm{MPa}$	$\sigma_{ m b}/{ m MPa}$	δ/%
1#	16	530	570	8.8
7#	50	534	565	11.2

3.2 显微组织

图 2 为 1^{*}和 7^{*}合金最佳时效状态的金相照片,可 以看出,添加微量元素 Sc 后合金的晶粒比较细小,这 说明 Sc 有细化晶粒的作用。

图 3 为 1*和 7*合金 T₈ 最佳时效处理的 TEM 照 片。7*合金最佳处理状态主要强化相为 T₁ 相 ,与 1*合 金 T₈ 最佳状态相比 ,7*合金的 T₁ 相较为细小 ,分布也 较均匀 ,而且 T₁ 相沿晶界、亚晶界析出非常明显 ,几 乎不出现晶界无析出带 (PFZ)。7*合金有大量豆瓣状 Al₃(Sc ,Zr)复合析出相析出 ,而 1*合金也有点状相 Al₃Zr 析出。



图 2 合金 Ts 最佳时效态的金相照片 ×200 Fig. 2 Metallographs of optimal aging treatment for Ts treated alloys:(a) alloy 1 and (b) alloy 7



图 3 合金 T₈最佳时效态的 TEM 照片 Fig. 3 TEM micrographs of optimal aging for T₈ treated alloys: (a) T₁ phase of alloy 1, (b) PFZ of alloy 1, (c) T₁ phase of alloy 7, and (d) Al₂(Sc,Zr)of alloy 7

3.3 断口形貌

1*和 7*合金拉伸断口的扫描电镜照片如图 4 所示。T_s 最佳时效态的断口形貌均为层状断口,但与 1* 合金的断口形貌相比,7*合金层状细密很多,且存在 许多细小韧窝,断裂方式呈穿晶断裂+短横向沿晶分 层开裂的混合型断裂。



图 4 合金 T_s 最佳时效态拉伸断口的 SEM 照片 Fig. 4 SEM micrographs of fracture surface of optimal aging treatment for T_s treated alloys :(a) alloy 1 and (b) alloy 7

4 分析讨论

Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金加 Sc 后,在均匀化退火 或热加工过程中形成的 Al₃(Sc, Zr) 质点,多以弥散细 小颗粒存在,阻碍位错滑移与攀移,阻碍亚晶界分解 与合并,阻碍晶界滑动与迁移,从而抑制合金的再结 晶过程。这与文献^[2-6]所报道的 Sc 在 Al-Sc,Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mg-Sc 系铝合金中能较强地阻止再结晶过程, 细化晶粒和亚结构的结果是一致的。而许多研究工作 已证实了铝锂合金的未再结晶结构较再结晶或部分 再结晶结构有较好的强塑性配合^[7,8],所谓铝锂合金 组织分层强韧化机制,即是利用扁平未再结晶晶粒来 减轻沿晶开裂的危害。在拉伸条件下,当晶粒为扁平 状,沿晶开裂呈短横向分层的形式时,不导致断裂,大 大减轻了沿晶开裂的危害,加之短横向分层垂直于主 裂纹时,有阻碍主裂纹扩展的作用,有益于塑性的提

高。基于铝锂合金的这一共同结构特点,可以认为,微 量 Sc 对 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金晶粒细化作用和再结 晶的抑制作用是改善合金强塑性配合的原因之一。*T*。 工艺条件下,由于在时效前进行了适当的冷变形,可 在合金基体上形成密布的位错或位错缠结 ,大大增加 了 T₁相非均匀形核的条件^[9~11], 加上铝基体上弥散 分布的 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点和亚结构也可以成为 T_1 相优 先形核长大的场所^[12],这些是导致 7*合金的 T₁相的 尺寸、形貌、分布比 1*合金明显改善的主要原因,而且 7*合金 T₈ 态在 TEM 下观察到 T₁ 相在晶界、亚晶界上 的大量细小析出,且很难观察到明显的晶界无析出带 (PFZ), 这是 7*合金比 1*合金具有较好综合机械性能 的又一重要原因。至于 7*合金为何时效响应速度缓慢 的缘由可能与 Sc 的加入有关: Sc 在铝合金中通常形 成具有 LI₂ 结构的 Al₃Sc 相 其许多性质与 Zr 相似。有 文献报道^[13],铝锂合金中添加 Zr,由于 Zr 原子 - 空位 结合能高 (0.24 ± 0.02eV),易与空位结合,导致与锂 原子结合的空位减少 ,从而阻止 δ'相在固溶淬火及时 效初期析出,Sc 有与 Zr 类似的作用,能延缓 T_1 相的 生长, 且 Se 的作用比 Zr 更有效 11, 这与本实验观察 的结果一致。Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金在应变时效态 $(T_8$ 态)的主要强化相为 T_1 相,由于 Al₃Sc 和 Al₃Zr 既 能增加 T₁相形核场所,又能影响 T₁相的生长速度, 尤其在含 Zr 的合金中加入 0.15% Sc ,将降低 Zr 或 Sc 在合金中的溶解度而强化这种作用,这也许是 T₁相 细小、分布均匀、缓慢长大的主要原因。7*合金最佳处 理态的断口形貌表现为细层状 + 穿晶断裂的断裂方 式,证实了 Sc 的加入将对 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金除 有固溶强化、次生含 Sc 铝化物质点产生的弥散强化、 细化弥散化 T₁相的作用外,还有晶粒细化、抑制再结 晶所产生的亚结构强化作用,这也是使合金断裂模式有 别于 2195 合金的层状 + 沿晶断裂模式的重要原因。

5 结 论

1) 添加微量的 Sc 能使 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金在 *T*₈ 工艺条件下获得较好综合机械性能,可在几乎不降 低合金强度的前提下,有效地改善其塑性。

2) 在 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金中添加微量的 Sc, 在 *T*₈ 工艺条件下, 延缓时效过程,能使合金晶内析出 的 *T*₁ 相分布均匀, 平均尺寸减小,又使亚晶界和晶界 上析出的 *T*₁ 相变得细小, 几乎不出现明显的晶界无 析出带 (PFZ),这是使合金强塑性配合显著优于不含 Sc 的 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金的重要原因。 3) 添加微量 Sc 能部分改善 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金的断裂模式,其断口形貌表现为细层状+穿晶断裂 为主的模式,而有别于不含 Sc 的 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 合金的层状+沿晶断裂为主的模式。

参考文献 References

- [1] Xiao Yude (肖于德) et al. Chinese Journal of Rare Metals (稀 有金属)[J], 1999 23(5):331
- [2] Yu Kun (余 琨) et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报)[J], 1999 9(4):709
- [3] Yin Zhimin 伊志民) et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报)[J], 1997,7(4):75
- [4] Davgdov V G, Rostova T D, Zakharov V V et al. Materials Science and Engineering A [J], 2000, 280: 30
- [5] Norman A F, Prangnell P B, Mcewen R S. Acta Mater[J],

1998 A6(16):5 715

- [6] Geng Dongsheng(耿东生), Meng Liang(孟 亮), Zhang Jingyu(张晶宇). Rare Metal Materials and Engineering(稀有 金属材料与工程)[J],1997 26 亿)45
- [7] Chen Zheng 陈 铮) et al. Chinese Rare Earths (稀土)[J], 1998,19(2):23
- [8] Shen Jian(沈 健) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 1994, 23(5): 29
- [9] Huang B P, Zheng Z Q, Yin D F, Mo Z M. Materials Science Forum [J], 1996 217 ~ 222: 1 239
- [10] Pickens J R, Heubaum F H, Kramer L S. Scripta Metall Mater[J], 1990 24:457
- [11] Tack W T, Heubaum F H, Pickens J R. Scripta Metall Mater [J], 1990 24:1 685
- [12] Zhao Zhilong (赵志龙). Nonferrous Metals (有色金属)[J], 1999 51(3):83
- [13] Huang B P, Zheng Z Q. Acta Mater[J], 1998 A6(12): 4 381

Effect of Sc on Microstructure and Properties of Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr Alloy

Yin Dengfeng Zheng Ziqiao ,Yu Zhiming (Central South University ,Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of Sc on microstructure and tensile properties of Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr alloy has been studied using optical and transmission electron microscopy and scanning electron microscopy. The results show that addition of Sc may refine the grain size, and encourages the homogeneous precipitation of T_1 phase throughout the matrix, The widespread precipitation of T_1 phase promotes homogeneous deformation thereby improving the mechanical properties of these trace-Sc containing.

Key words: Al-Li alloy; scandium; microstructure; tensile property

Biography: Yin Dengfeng, Candidate for Ph. D., Lecturer, College of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-8879341