



热处理对 Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er 合金组织和性能的影响

洪大军 李爱文 胡丽敏 张 帅 王海军

(贵州航天新力科技有限公司, 遵义 563114)



摘要: 综合采用扫描电子显微镜 (SEM)、硬度计和万能拉伸机等测试手段研究了不同热处理工艺对 Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er 合金锻板微观组织和力学性能的影响规律。研究表明, 在合金锻板组织中存在较多尺寸不均的带状残余第二相颗粒, 主要为 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 和 Al_2Cu ; 在经过固溶、淬火和人工时效处理之后, 合金组织中的未溶第二相明显减少, 屈服强度、抗拉强度和伸长率分别可达 370MPa、465MPa 和 8.4%; 合金最佳固溶时效工艺为: $510^\circ\text{C}/1\text{h}+160^\circ\text{C}/36\text{h}$ 。

关键词: 铝-锂合金; 热处理; 组织演变; 第二相; 力学性能

中图分类号: TG156.9 文献标识码: A

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er Alloy

Hong Dajun Li Aiwen Hu Limin Zhang Shuai Wang Haijun

(Guizhou Aerospace Xinli Technology Co., Ltd., Zunyi 563114)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of T6 Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er alloy were studied by scanning electron microscope (SEM), hardness test and tensile mechanical properties test. The results show that there is serious segregation in the alloy, and the second phases are $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ and Al_2Cu . After solid solution, quenching and artificial aging treatment, the yield strength, tensile strength and elongation of the alloy can reach 370MPa, 465MPa and 8.4% respectively. The optimum single-stage aging process of the alloy is $160^\circ\text{C}/36\text{h}$.

Key words: Al-Li alloy; heat treatment; microstructure evolution; second phase; mechanical property

1 引言

铝-锂合金近年来因其密度低、比强度和比刚度高、耐腐蚀性好以及优良的塑性成型性能而发展迅速, 使用铝-锂合金代替普通铝合金结构件, 可以保持强度相当的同时, 使结构件的密度减低10%, 弹性模量提高10%, 铝-锂合金拥有广大的开发应用潜力, 是一种21世纪飞行器和船舶理想的结构材料^[1~3]。

虽然铝-锂合金前景广阔, 但是铝-锂合金仍存在塑性差、各向异性明显、成本高等缺点。微合金化是

一种能够同时提高铝-锂合金强度、塑韧性和耐蚀性的手段。研究表明, Mn、Cr以及一些稀土元素 (如Sc、Er) 可以在合金中形成第二相, 如 Al_6Mn 、 Al_3Ti 等, 这些第二相可以抑制再结晶, 同时提高合金的强度和耐蚀性^[4~5]。Sc的微合金化效果显著, Sc的添加能综合提高铝合金的力学性能, 但由于Sc的价格过高, 使含Sc的铝合金难以应用于工业生产^[6]。国内外许多研究者针对寻找替代Sc的其他元素开展了大量的研究工作, 发现Al-Er合金和Al-Sc合金具有相似的时效强化效果, 而且Er的价格远比Sc的价格便宜^[7]。Er的添加能够提高

基金项目: 航天航空用高性能铝锂合金及先进制备加工技术研究 (遵义科合重大 (2020) 2 号); 超纯净均质细晶铝锂合金制备与加工创新技术研发及应用 (黔财工 (2020) 284 号)。

作者简介: 洪大军 (1964), 高级工程师, 金属及热处理专业; 研究方向: 新材料研发。

收稿日期: 2022-06-28

铝基体的强度,细化铸态合金的晶粒,提高铝合金的耐腐蚀性和焊接性,形成的 Al_3Er 粒子能阻碍位错和亚晶界的移动以提高强度和再结晶温度^[8~10]。

但是对于Er的研究主要集中于Al-Mg和Al-Zn-Mg,而对于Er在Al-Cu-Li-Mg合金中作用的研究较少。本文通过真空感应熔炼Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er合金,系统地研究了后续的热处理对于Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er合金力学性能和微观组织的影响。

2 试验

以高纯铝锭、高纯镁块、高纯锌块、金属锂、 AlEr_{20} 、 AlCu_{50} 和 AlZr_5 为原材料,采用真空感应熔炼的方式熔炼得到Al-Cu-Li-Mg-Er合金铸锭,其实际化学成分通过



图1 硬度和拉伸试样取样示意图

显微硬度测试在JMHVS-100-XYZ全自动精密显微硬度计上进行,选择载荷为1.96N,保荷时间为15s,每个试样以10个点的平均值作为最终结果。室温拉伸测试在CTM4105万能拉伸试验机上进行,拉伸速度为1mm/min,为了保证数据的可重复性,每个参数准备3个拉伸试样。

利用ZEISS EVO®MA and LS Series 扫描电子显

ICP测定,具体化学成分如表1所示。铸锭490℃/40h均匀化退火后切去头尾,然后在470℃下保温3h后进行锻造,最终锻造成厚度为30mm的板材。

表1 合金的化学成分

元素	Li	Cu	Mg	Er	Zr	Al
wt. %	1.42	3.50	0.29	0.17	0.12	Bal.

从锻造板材上沿着厚度方向取若干个20mm×12mm×12mm小试样,用于不同热处理后的微观组织观察和硬度测试。沿着板材的主变形方向取拉伸试样,硬度和拉伸试样取样如图1所示,拉伸试样的尺寸如图2所示,随后将试样进行固溶处理(470~510℃/1h,水冷)和时效处理(140~180℃/0~48h)。

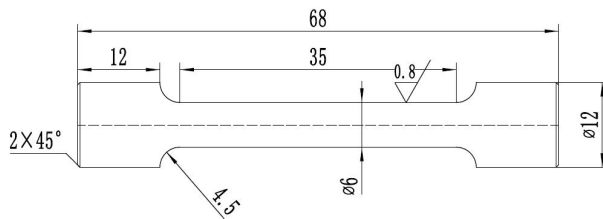


图2 拉伸试样尺寸图

显微镜分析不同热处理状态合金组织。将试样依次在400#、800#、1500#、2000#、3000#砂纸上研磨并机械抛光、清洗和吹干后即可观察微观组织。

3 结果与讨论

3.1 锻态Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er微观组织

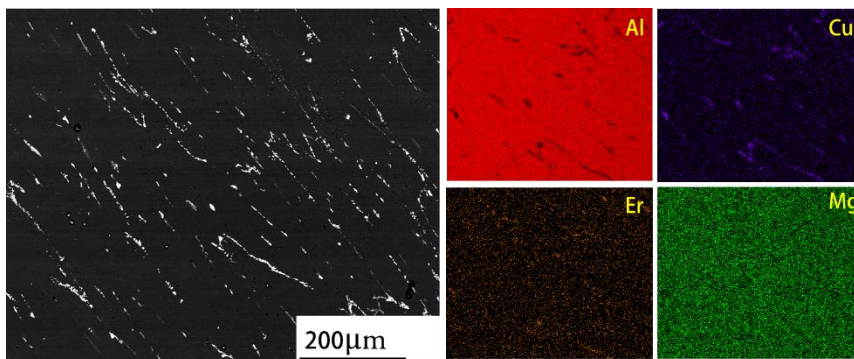


图3 锻态 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er 的 SEM 图及对应的元素分布图

锻态Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er的SEM组织如图3所示,可以看出在锻态组织中存在许多沿主变形方向分布的带状第二相,这些相较脆而且熔点较低,对材料的热

加工性能有负面影响^[11]。从该区域的元素分布面扫图中可以看出,在锻态组织中,析出第二相的主要成分是Cu元素以及少量的Er和Mg元素。为了进一步确定第

二相成分，对其选择A、B、C三个点进行能谱分析（EDS），如图4，其EDS的结果如表2所示，可以看出，第二相主要是 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 和 Al_2Cu 相^[12]，这些相的成分与李^[13]和Song^[14]等人报道的成分相似。

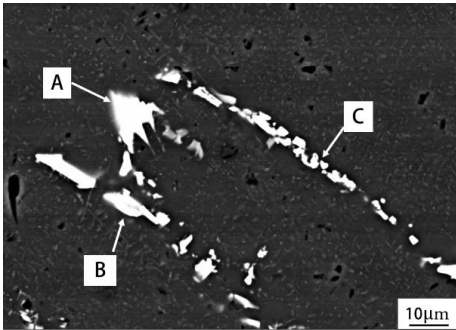
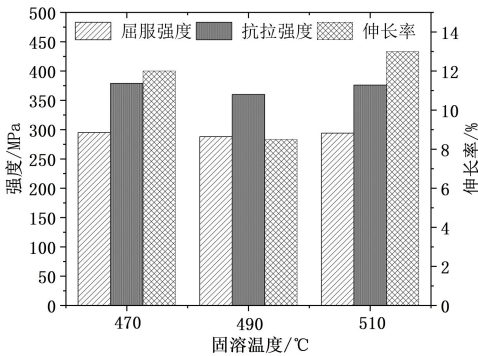


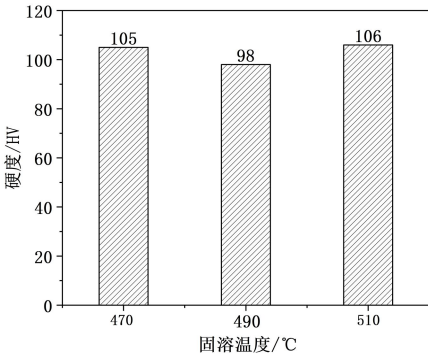
图 4 锻态 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er 的 SEM 图及 EDS

表 2 锻态 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er 的 EDS 结果

	wt. %					
区域	Al	Cu	Er	Mg	Zr	Zn
A	32.06	32.72	9.91	0.26	0	0.19
B	61.59	18.69	6.10	0.22	0.03	0.13
C	66.64	2.51	0.15	0.24	0.14	0.09



a 拉伸性能



b 硬度

图 5 不同固溶条件下 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er 的力学性能

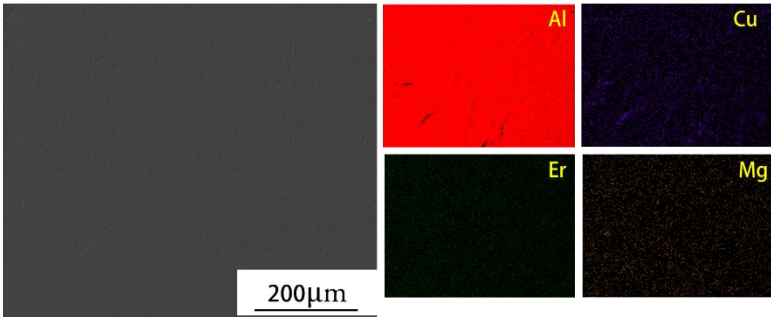


图 6 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er 合金固溶之后的微观组织

3.2 固溶和时效工艺

因为合金中形成的 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 和 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Sc}$ 相似，都是一种低熔点的共晶化合物， $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 相的形成不仅会降低合金的强度，而且 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 相会抑制 Al_2Cu 强化相的形成以及减弱 Al_2Cu 相的作用。所以，需找到合适的固溶工艺使得 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 相回溶进基体中，选择 $470\sim 510^\circ\text{C}/1\text{h}$ 对Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er合金进行固溶处理。在不同固溶处理条件 $470^\circ\text{C}/1\text{h}$ 、 $490^\circ\text{C}/1\text{h}$ 和 $510^\circ\text{C}/1\text{h}$ 下的Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er的室温拉伸性能和硬度如图5所示。从图中可以看出，随着固溶温度的升高，合金的抗拉强度、屈服强度以及伸长率都是先减小再增大的趋势，其中抗拉强度和屈服强度在 470°C 和 510°C 时很接近，但伸长率在 510°C 时最大，为了在固溶之后得到更好的性能而且避免选择更高的温度而产生过烧，所以单级固溶工艺选择 $510^\circ\text{C}/1\text{h}$ 。固溶之后合金的微观组织如图6所示，从面扫结果可以发现， $510^\circ\text{C}/1\text{h}$ 固溶之后，合金中的第二相基本回溶进基体内，还有少量的 Al_2Cu 相存在。

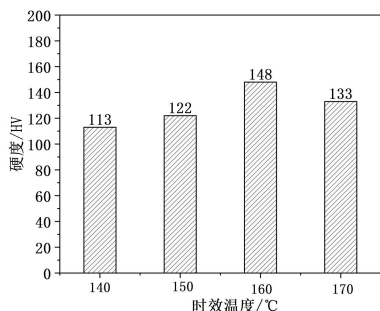


图7 不同温度时效24h后硬度的变化

为了确定时效的温度,先在温度区间为140~170℃、时效时间为24h,对Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er合金进行时效。不同时效温度的试样的硬度值如图7所示,从图中可以发现,在160℃时效24h之后,试样的硬度值最大,可以达到148HV0.2,当温度升高到170℃时,硬度值开始减小,这是因为高温加速了溶质在基体中的扩散速率,

让原子的扩散距离更远,降低了第二相粒子的密度;同时,过高的温度会导致强化相过早的粗化,从而影响材料的性能。通常来说,材料的屈服强度的变化和硬度的变化是一致的,所以不同时效温度下硬度的变化也可以反映该条件下强度的变化。因此,时效温度选择160℃研究时效对合金组织和性能的影响。

3.3 时效后的组织和性能

图8为Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er合金不同时效时间的微观组织,在时效处理之后,不同形态的第二相,如长条状、方块状的第二相开始析出。这些第二相的大小和密度随着时效时间的延长而发生变化。通过EDS分析,可以发现在510℃/1h固溶+不同时间时效之后,合金中出现了一些粗大的方块状第二相,主要为Al-Cu-Er相,此外,还存在许多细小的长条状第二相,主要为Al-Cu相。时效36h后,第二相更多地呈现带状析出,部分第二相开始长大粗化。

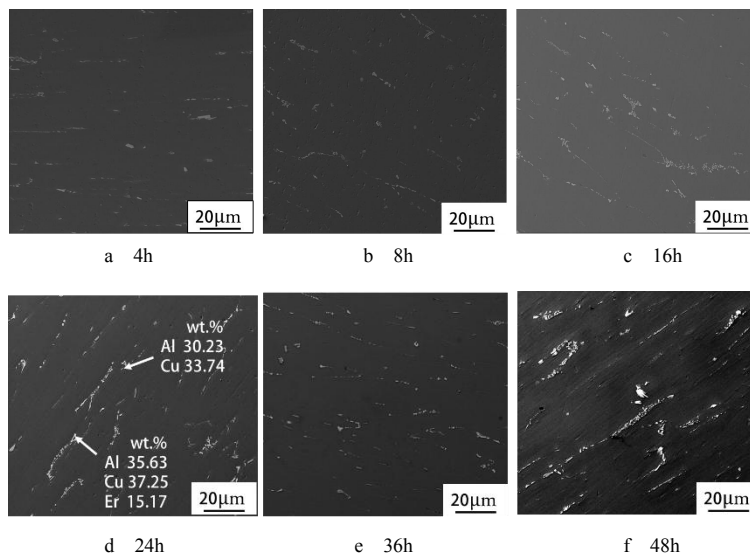


图8 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er合金在不同时效时间时的SEM图

图9显示了合金在不同时效时间下的硬度和拉伸性能。从图9a可以看出固溶处理的试样在时效之前硬度较低,然而时效处理显著地提高了合金的硬度。合金的硬度值随着时效时间的延长而提高,在时效时间为36h时达到峰值,峰值硬度为152HV0.2。然后,合金的硬度值开始降低。合金硬度值发生变化的主要原因是固溶和时效处理引起的强化效应。在固溶处理中,大部分的第二相回溶进入基体之中,形成过饱和固溶体。随着时效时间的延长,不同类型的第二相开始析出,析出相的密度、形态和分布对合金的性能产生不同的影响,导致了硬度值的变化。

从图9b可以发现,在固溶和时效处理之后,合金

的屈服强度和抗拉强度的变化趋势基本一致。固溶处理过后的合金强度相对较低,在时效前期,合金中析出相的强化效果不显著,随着时效时间的延长,合金的屈服强度和抗拉强度呈现先增大后减小的趋势,合金的强度在36h时达到峰值,屈服强度为370MPa,抗拉强度为465MPa。随着时效时间的进一步增加,合金的强度开始降低。合金的硬度和强度的变化趋势基本相同。但是伸长率的变化比较复杂,随着时效的进行,合金的伸长率开始降低,36h时达到最低点。在过时效状态下,合金的塑性略有提高。根据以上结果,确定了合金的最佳单级时效工艺为160℃/36h。

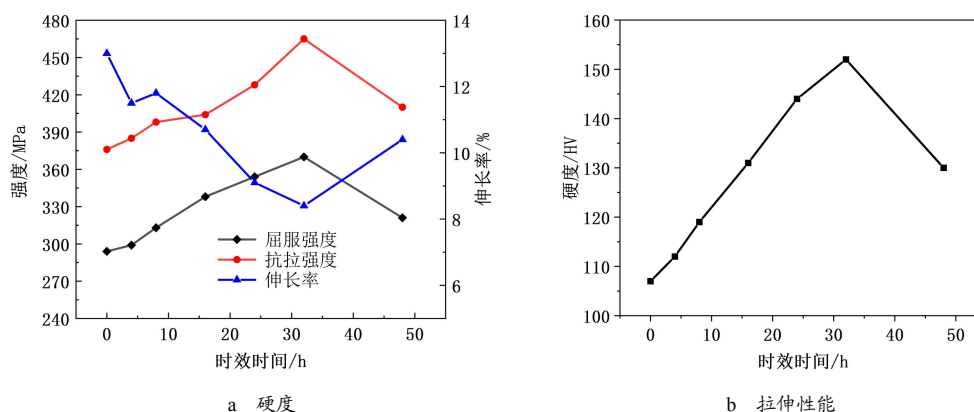


图9 Al-Cu-Li-Mg-Zn-Er合金在不同时效时间时的力学性能

4 结束语

a. 在初始的合金中存在大量的第二相，这些第二相呈现链状分布，主要为 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 和 Al_2Cu 。

b. 合金在经过固溶处理（ $510^\circ\text{C}/1\text{h}$ ）后，大部分的第二相基本回溶进入基体中。

c. 合金的硬度和强度在 160°C 时效 36h 后达到峰值，然后开始降低。达到峰值时，合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 370MPa、465MPa 和 8.4%。在时效过程中，合金的伸长率先降低而后升高。

参考文献

- 尹登峰, 郑子樵. 铝锂合金研究开发的历史与现状[J]. 材料导报, 2003(2): 18~20
- Yuan Zhishan, Zheng Lu, Xie Youhua, et al. Mechanical properties of a novel high-strength aluminum-lithium alloy[J]. Materials Science Forum, 2011, 689: 385~389
- 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): 82~85
- Fang Huachan, Chen Kanghua. Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(25-26): 7606~7615
- Zhang Linjie, Lu GuangFeng, Ning Jie, et al. Effects of minor Zr addition on the microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar joint

of titanium and molybdenum[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 742

- 聂祚仁, 文胜平, 黄晖, 等. 钪微合金化铝合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2361~2370
- Fang Huachan, Chao Hua, Chen Kanghua. Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 610: 10~16
- 肖代红, 黄伯云, 陈康华. 稀土Er对Al-5.3Cu-0.8Mg-0.6Ag合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2008(2): 119~122
- 张新明, 朱航飞, 李国锋, 等. 微量Zr, Er和Y对Al-Zn-Mg-Cu合金铸态组织的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6): 1196~1200
- 杨福宝, 刘恩克, 徐骏, 等. Er对Al-Mg-Mn-Zn-Sc-Zr(Ti)填充合金凝固组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008(8): 911~916
- Peng Yu, Chen Antao, Zhang Liang, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.2Zr alloy[J]. Journal of Materials Research, 2016(8): 1~9
- 杨军军, 聂祚仁, 金头男, 等. 稀土元素钪对Al-4Cu合金组织与性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2002(S1): 159~162
- 李云涛, 刘志义, 夏卿坤, 等. Er在Al-Cu-Mg-Ag合金中的存在形式及其均匀化工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006(6): 1043~1047
- Bai Song, Liu Zhiyi, Gu Yanxia, et al. Microstructures and fatigue fracture behavior of an Al-Cu-Mg-Ag alloy with addition of rare earth Er[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(7-8): 1806~1814