

文章编号:1674-2974(2016)06-0016-06

2A66 铝锂合金时效行为的研究*

高文理^{1†}, 曹亚雷¹, 陆政², 张显峰², 冯朝辉²

(1. 湖南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要:通过 DSC 分析、硬度测试、拉伸测试、SEM 和 TEM 检测等手段,研究了 2A66 铝锂合金时效组织和性能的变化。研究表明:对于同一时效温度,随着时效时间的延长,强度出现峰值;时效温度越高,出现峰值的时间越短。2A66 铝锂合金最佳的峰值时效制度为 165 °C 保温 64 h,此时合金获得了良好的强塑性结合,硬度为 146 HB,抗拉强度为 526.5 MPa,屈服强度为 448.9 MPa,延伸率为 10.1%。165 °C 时效过程中合金的主要强化相为 δ , θ 和 T_1 相,时效初期合金的主要强化来源为 GP 区、 δ 和 θ 相,峰值时效时合金的主要强化相为 θ 和 T_1 相。

关键词:时效;显微组织;力学性能;2A66 铝锂合金

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

The Aging Behavior of Aluminum-Lithium Alloy 2A66

GAO Wen-li^{1†}, CAO Ya-lei¹, LU Zheng², ZHANG Xian-feng², FENG Zhao-hui²

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The evolution of microstructures and the properties of 2A66 Al-Li alloy during artificial aging was studied with differential scanning calorimetry (DSC), hardness measurement, tensile testing, scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results indicate that the strength can reach the peak value with the increase of aging time, and the higher the aging temperature, the shorter the time for peak value. The best aging process for peak value of 2A66 Al-Li alloy ages at 165 °C for 64 h and the alloy gets a good combination of strength and plasticity. Its hardness, σ_b , $\sigma_0.2$ and δ are 146HB, 526.5 MPa, 448.9 MPa, 10.1%. The δ , θ and T_1 phases are the major precipitates of 2A66 alloy ageing at 165 °C. At the early stage of aging, the main source of strengthening for the alloy is the GP zone, δ phase and θ phase. At the peak of aging, the θ phase and T_1 phase are the main strengthening phases.

Key words: aging; microstructure; mechanical property; 2A66 Al-Li alloy

近年来航空航天工业的迅猛发展对材料提出了更高的要求,为了进一步提高飞行器的性能,降低自

重和节约能源,以降低费用,研究和开发具有重量轻、高比强、耐腐蚀性良好的新型金属材料成为当务

* 收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51271076,51474101),National Natural Science Foundation of China(51271076,51474101)

作者简介:高文理(1964—),男,黑龙江集贤人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: wenligaohd@163.com

之急. 铝锂合金作为一种新型的铝合金材料被开发出来,它具有低密度、高弹性模量、高强度和优良的综合机械性能. 锂是自然界中密度最小的金属元素,在 Al 基体中每添加 1% 的 Li,铝合金的弹性模量会提高 6%,比弹性模量会增加 9%,质量也会减少 3%,其抗拉强度与 2024,7075 等铝合金相当^[1-2]. 铝锂合金的生产工艺同普通铝合金没有原则性的差别,且与碳纤维增强等复合材料相比,它的成形、维修等都比较方便,其成本也远远低于复合材料,被认为是 21 世纪最有竞争力的航空航天材料之一^[3-5].

工业用铝锂合金通常采取 T6 和 T8 两种热处理工艺,由于时效前的预变形可以增加铝合金中的位错密度,促进了 θ' 和 T_1 等富铜相的形核与析出,使得铝锂合金的 T8 态往往比 T6 态具有更好的强塑性配比. 然而,对于一些形状复杂的构件,不可进行预变形^[6],T6 状态下的铝锂合金面临着强度和塑性的匹配问题. 2A66 铝锂合金是我国自主研发的 Al-Cu-Li 系脱溶强化型铝合金,强度高、塑性好,具有良好的加工性能,在航空航天领域具有良好的应用前景. 本文主要研究了 T6 状态下 2A66 铝锂合金的显微组织和力学性能,并讨论了时效过程中组织与性能的关系,旨在为该合金在航空航天领域中的应用提供理论依据.

1 实验方法

实验用料为北京航空材料研究院提供的 Al-Cu-Li-X 系铝锂合金 2A66,其成分如表 1 所示. 合金熔炼和精炼后经半连续铸造制得圆锭,铸锭经过均匀化退火、开坯、热轧、冷轧等工序后得到 2 mm 厚板材.

表 1 2A66 铝锂合金化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of 2A66 Al-Li alloy (%)

元素	w_{Cu}	w_{Li}	w_{Mn}	w_{Mg}	w_{Zn}	w_{Zr}	w_{Al}
比例	2.5	1.4	0.4	0.2	0.5	0.1	余量

2A66 铝锂合金的热处理工艺确定为固溶+时效. 固溶处理在 SX₂-4-10 型箱式电阻炉中进行,并于温度低于 20 °C 的清水中水淬,淬火转移时间 ≤ 5 s;时效处理在 DHG-9145A 型电热鼓风干燥箱中进行,温度误差为 ± 2 °C,取样后空冷. 随后在 HBR-VU-187.5 型布洛维光学硬度计上进行布氏硬度测试,加载载荷为 612.9 N,保荷时间为 30 s,每个试

样测试 5 个点并取其平均值作为测量值. 在 Instron3369 电子万能试验机上进行室温拉伸性能测试,拉伸速度为 1 mm/min,拉伸试样断口形貌在 Quanta 200 型环境扫描电子显微镜 (SEM) 上进行观察. DSC 分析在 STA449C 型热分析仪上进行,采用 Ar 气保护,升温速率分别为 5,10 和 15 °C/min,升温范围为 20~700 °C. 采用 30% (V_{硝酸}/V_水) 硝酸 + 70% (体积分数) 甲醇混合溶液双喷减薄制备 TEM 试样,并在 JEM-3010 高分辨透射电子显微镜上观察显微组织,电镜加速电压为 200 kV.

2 实验结果

2.1 DSC 分析

图 1 为轧制态 2A66 铝锂合金的 DSC 曲线. 从图 1 可以看出,合金在 524.8, 573.9, 648.5 °C 出现了 3 个吸热峰,其中前两个峰对应于 2A66 合金中两种非平衡低熔点共晶相的融化温度,而 648.5 °C 则对应于该合金的熔点. 由此可以初步确定 2A66 铝锂合金的过烧温度为 525 °C,固溶处理时不能超过此温度,本实验中固溶温度定为 520 °C.

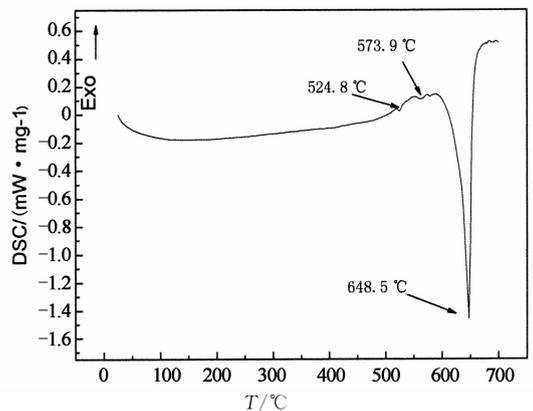


图 1 轧制态 2A66 铝锂合金的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curve of the rolled 2A66 Al-Li alloy

2.2 布氏硬度曲线

图 2 为 2A66 铝锂合金 520 °C 固溶时的时间-硬度曲线图. 从图中可以看出,随着固溶时间的延长,2A66 铝锂合金的硬度出现了先上升后下降的现象,于 90 min 时达到了峰值,峰值强度为 75.3 HB. 在固溶处理初期,随着固溶时间的延长,残留的第二相会不断地溶入基体内,使得淬火后固溶体的过饱和度和不断增加,合金的强度也不断增加并逐渐达到峰值;到了固溶处理后后期,再结晶晶粒会进一步长大并出现粗化,使得合金的硬度值下降. 综上所述,本实验选取 520 °C/90 min 作为 2A66 铝锂合金的固

溶处理制度。

图3为经2A66铝锂合金520℃/90 min固溶处理后在不同温度单级时效时硬度随时效时间的变化曲线。时效温度分别为145℃、165℃和185℃,与其对应的时效时间分别为0~120 h、0~86 h和0~36 h。从图中可以看出,2A66铝锂合金具有比较明显的时效强化作用,3种温度下该合金的布氏硬度随时效时间的变化规律比较相似,都存在欠时效、峰值时效和过时效3个阶段,温度越高达到峰值的时间越短。145℃低温时效时,时效初期合金的硬度上升较为缓慢,时效60 h后硬度为132 HB,随后合金硬度上升得更为缓慢,时效108 h硬度才达到138 HB,之后合金的硬度基本保持不变。165℃时效时,时效初始阶段合金的硬度迅速上升,时效至12 h硬度已达到120 HB;随后硬度上升变缓,时效至40 h硬度达到130 HB;之后随着时效时间的延长合金的硬度值继续缓慢上升,时效64 h后达到峰值,峰值硬度达到146 HB;继续时效将会进入过时效状态,合金硬度开始缓慢下降。时效温度提高到185℃后,合金的初始硬化速率明显加快,18 h便达到峰值时效,峰值硬度为150 HB,随后就进入了过时效阶段。

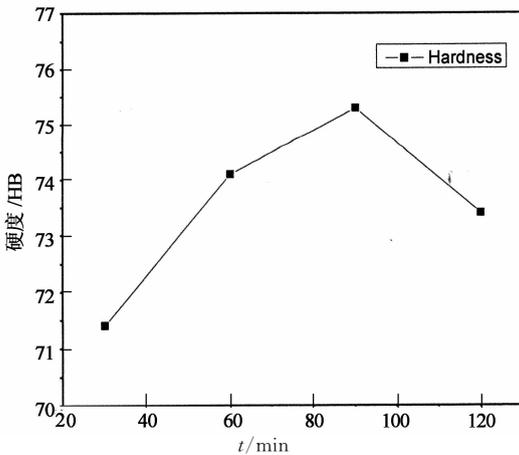


图2 2A66铝锂合金520℃固溶的硬度曲线
Fig. 2 Hardness-time curve of 2A66 Al-Li alloy solution treated at 520℃

2.3 拉伸力学性能

表2为520℃/90 min固溶处理后2A66铝锂合金在不同时效制度下的室温拉伸性能。由表可知,经145℃/108 h人工时效处理后,合金具有良好的塑性,延伸率达到了18.4%,但合金的抗拉强度和屈服强度都比较低。165℃/64 h时效时,合金的抗拉强度和屈服强度均得到了大幅的提升,分别为526.5 MPa和448.9 MPa,同时合金还保持了比较好的塑性,延伸率达到10.1%。相比于165℃峰值

时效,185℃/18 h时效时合金的强度有了一定程度的提升,但其塑性下降过多,延伸率降到了4.25%。对比3种峰值时效制度,为了使2A66铝锂合金能获得更好的强度性配比,本实验主要研究165℃的时效过程。

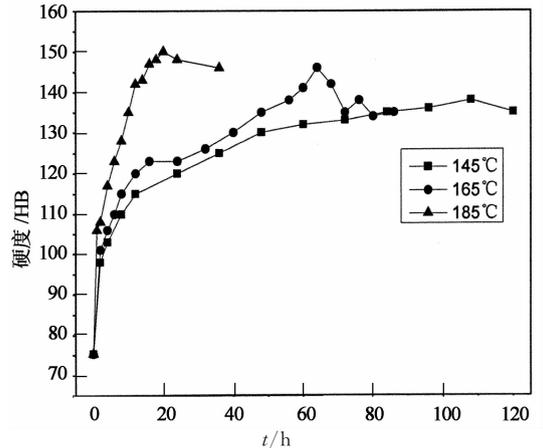


图3 2A66铝锂合金不同温度单级时效的硬化曲线
Fig. 3 Hardness-time curves of 2A66 Al-Li alloy aged at different temperatures

表2 2A66铝锂合金不同时效制度下的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of 2A66 Al-Li alloy after different aging processes

时效制度	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
145℃/108 h	478.7	354.4	18.4
165℃/64 h	526.5	448.9	10.1
185℃/18 h	552.2	492	4.25

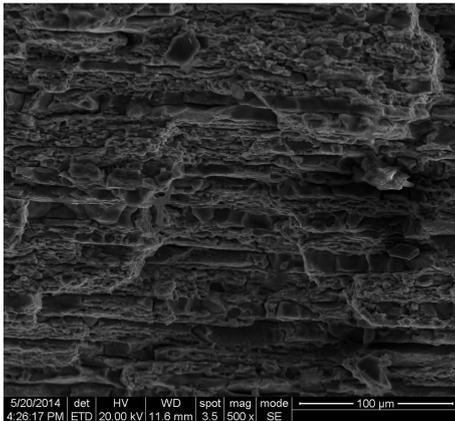
表3给出了2A66铝锂合金经520℃/90 min固溶处理后于165℃时效不同时间的拉伸力学性能。由表可知,合金的抗拉强度和屈服强度变化规律一致,峰时效(64 h)前均随着时效时间的延长迅速提高,峰时效后便开始缓慢下降,而合金的延伸率却随着时效时间的延长单调下降。上述拉伸力学性能的变化规律基本与图3中合金165℃单级时效的布氏硬度曲线相吻合。

表3 2A66铝锂合金在165℃时效不同时间的力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of 2A66 Al-Li alloy aged at 165℃ for different time

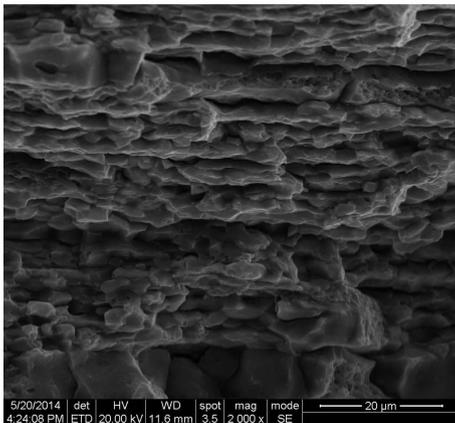
165℃时效	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
12 h	475.7	313.7	17.2
40 h	502.8	344.7	13.7
64 h	526.5	448.9	10.1
80 h	509.2	397.4	9.3

2.4 断口形貌分析

图4为2A66铝锂合金165℃峰值时效(64h)时的拉伸断口形貌图.从低倍图中可以看出,此时合金的断口形貌主要表现为穿晶断裂和沿晶断裂的混合型断口,表现出明显的分层特征,且垂直于主裂纹前进方向,断面上还分布着一些突起的撕裂棱.观察高倍图发现,断口分层间存在着较多细小的韧窝,同时也分布着一些沿晶二次裂纹.此外,拉伸试样的断口还出现了明显的颈缩,表明此时合金具有较好的韧性.



(a) 低倍



(b) 高倍

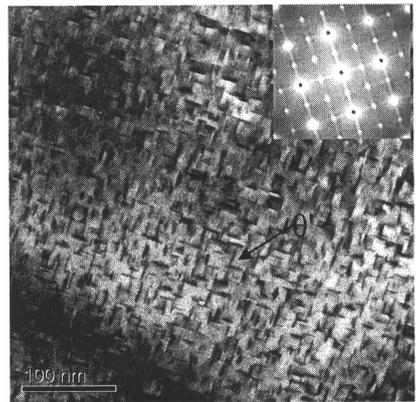
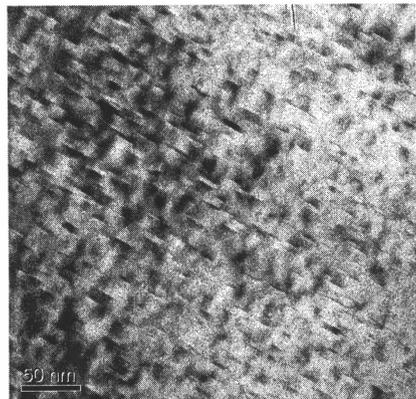
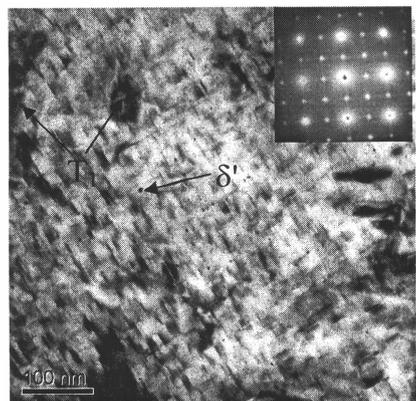
图4 2A66铝锂合金165℃/64h
时效状态下试样的断口形貌

Fig. 4 Fractographs of 2A66 Al-Li
alloy aged at 165 °C for 64 h

2.5 TEM分析

图5所示为沿 $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$, $\langle 110 \rangle_{\text{Al}}$ 方向观察到的2A66铝锂合金经165℃时效不同时间的TEM明场像.从图中可以看出,合金在整个时效过程中的显微组织主要为球状的 δ 相、针状的 θ 相和针状或盘片状的 T_1 相.由图5(a)和5(b)可知,2A66铝锂合金经165℃时效12h后铝基体中析出大量细小 θ' 相和弥散的 δ' 相,基体 $[100]$ 带轴衍射花样主要呈现对应 δ' 相的 $1/2(200)$, $1/2(220)$ 超点阵斑点和对应 θ'

相的 $\langle 200 \rangle$ 衍射条纹.随着时效时间的延长,析出相不断变化,165℃时效40h后合金的主要析出相为 θ' 相和 T_1 相,同时还观察到了少量粗化的 δ' 相,基体 $[100]$ 带轴衍射花样呈现 $1/2(200)$, $1/2(220)$ 斑点和 $\langle 200 \rangle$ 衍射条纹,基体 $[110]$ 带轴衍射花样中呈现 $1/2(200)$, $1/3$, $1/2$, $2/3$ (220)弱斑点和 $\langle 200 \rangle$ 条纹(图5(c), (d)).由图5(e)和5(f)可知,165℃/64h峰值时效时,合金的主要析出相仍为 θ' 相、 T_1 相, T_1 相的数量和尺寸明显增加, θ' 相的尺寸也变大,但数量有所减少.基体 $[110]$ 带轴衍射花样中 $1/3$, $2/3$ (220)斑点和 $\langle 111 \rangle$ 条纹明显.

(a) 165 °C/12 h($B=[100]_{\text{Al}}$)(b) 165 °C/12 h($B=[110]_{\text{Al}}$)(c) 165 °C/40 h($B=[100]_{\text{Al}}$)

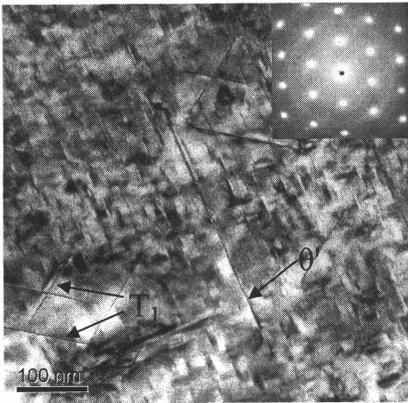
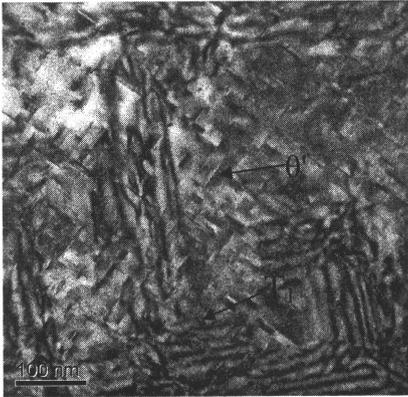
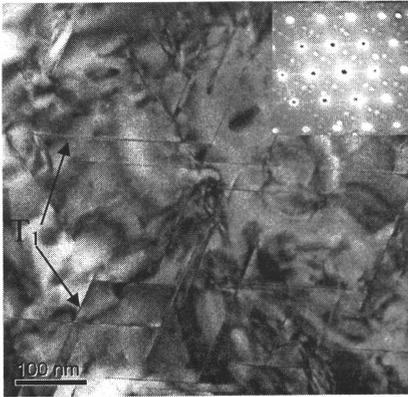
(d) 165 °C/40 h($B=[110]_{Al}$)(e) 165 °C/64 h($B=[100]_{Al}$)(f) 165 °C/64 h($B=[110]_{Al}$)

图5 2A66 铝锂合金 165 °C 时效的显微组织

Fig. 5 TEM micrographs of 2A66 Al-Li alloy aged at 165 °C for 12, 40 and 64 h

3 讨论

2A66 铝锂合金具有明显的时效强化效应,主要强化机制为沉淀强化,沉淀相的种类越多、尺寸越小、所占体积分数越高、分布越弥散,合金的强度越高. 2A66 铝锂合金在 165 °C 时效过程中的强化相主要包括 δ' (Al_3Li), θ' (Al_2Cu) 和 T_1 (Al_2CuLi) 相. 其中 δ' 相是铝锂合金时效初期的主要强化相,具有 LI_2 型超点阵结构,与铝基体完全共格,错配度仅为

0.08%^[7],它的界面能比较低,因而时效时析出的激活能也比较低,析出动力大. θ' 相由 GP 区发展而来^[8],为正方结构,其形貌呈盘片状或针状,与基体的位向关系为 $(100)_{\theta'} // (100)_{Al}$ 和 $[010]_{\theta'} // [010]_{Al}$ ^[9],在 Al-Cu-Li 合金中具有较好的强化作用. T_1 相为密排六方结构,其形貌与 θ' 相相似但更为粗大,与基体的位向关系为 $(11\bar{2}0) // (2\bar{1}1)_{Al}$, $(0001) // (111)_{Al}$, $(10\bar{1}0) // (110)_{Al}$ ^[10-12],它能够有效阻止共面滑移,其强化效果高于 δ' 和 θ' 相,是 Al-Cu-Li 合金中强化效果最好的析出相^[13-14].

由于 Li 和 Mg 元素都具有较高的空位结合能,能在淬火过程中形成大量的晶格空位,在时效初期这些过饱和空位会为 δ' 和 GP 区提供有利的形核位置,促进其析出. 165 °C/12 h 欠时效时,2A66 铝锂合金的主要析出相为 δ' 和 θ' 相,时效初期形成的 GP 区已经转变为 θ' 相. 此时的 δ' 和 θ' 相比较细小且均匀弥散分布,容易被位错切过,造成切割强化,使合金得到强化. 时效至 40 h,时效初期形成的形状不规则的 δ' 相大部分已分解,只有少量长大为球形, θ' 相数量保持不变、尺寸变大,铝基体中出现了 T_1 相. 袁志山等^[15]认为, T_1 相的生长会消耗固溶体中的 Li 原子,使得 δ' 溶解,数量减少. 虽然 T_1 相的强化作用明显高于 δ' 和 θ' 相,但此时 T_1 相的数量比较少,使得合金的硬度和强度提高不明显. 相关文献表明,在峰值时效尤其是过时效时, T_1 相将通过消耗 δ' 和 θ' 相来获得生长^[16]. 相比时效 40 h 时,峰值时效 (64 h) 时 T_1 相的数量和尺寸明显增加, θ' 相的数量有所减少,而球状的 δ' 相基本消失不见,此时 T_1 相的强化作用占主导作用,合金的硬度和强度得到了明显的提高. 进一步延长时效时间会进入过时效状态, T_1 相将会明显粗化, θ' 相也会向平衡相 θ 相转变,合金的强度和塑性会出现下降^[17]. 与 2A97 铝锂合金相比^[16], 165 °C 峰值时效时 2A66 合金内部 T_1 相的数量有所减少, θ' 相数量增多且更加细小弥散,使得 2A66 合金的强度略低于 2A97 合金,但其延伸率却明显提高,可见 165 °C 峰值时效时 2A66 合金比 2A97 合金具有更好的强度性匹配.

4 结论

1) 2A66 铝锂合金的最佳固溶制度为 520 °C/90 min. 随着时效温度的提高,合金硬度达到峰值的时间缩短. 相较于 145 °C 和 185 °C 峰值时效, 165 °C/

64 h 峰值时效时合金能够获得较好的强塑性匹配,硬度为 146 HB,抗拉强度为 526.5 MPa,屈服强度为 448.9 MPa,延伸率为 10.1%。

2)2A66 铝锂合金 165 °C/64 h 峰值时效时的拉伸断口形貌为穿晶断裂和沿晶断裂的混合型断裂,断口表现出明显的分层特征,分层间存在着较多细小的韧窝。

3)2A66 铝锂合金 165 °C 单级时效过程中沉淀相的析出序列为: α 过饱和固溶体 \rightarrow GP 区 $\rightarrow\delta'$ $\rightarrow\theta'$ $\rightarrow\delta'$ $\rightarrow\theta'+\delta'+T_1\rightarrow\theta'+T_1$ 。时效初期合金的主要强化来源为 GP 区、 δ' 和 θ' 相,峰值时效时合金的主要强化相为 θ 和 T_1 相。

参考文献

- [1] 霍红庆,郝维新,耿桂宏,等. 航空轻型结构材料——铝锂合金的发展[J]. 真空与低温,2005,11(2):63-69.
HUO Hong-qing,HAO Wei-xin,Geng Gui-hong,*et al.* Development of the new aircraft material—Aluminum-Lithium alloy [J]. Vacuum and Cryogenics,2005,11(2):63-69. (In Chinese)
- [2] 胡德昌,胡小舟. 现代工程材料手册[M]. 北京:宇航出版社,1992:271-280.
HU De-chang,HU Xiao-zhou. Manual of modern engineering materials[M]. Beijing: Astronautic Publishing House,1992:271-280. (In Chinese)
- [3] AHMADI S, ARABI H, SHOKUH FAR A. Effects of multiple strengthening treatments on mechanical properties and stability of nanoscale precipitated phases in an aluminum-copper-lithium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010, 26(12): 1078-1082.
- [4] 杨守杰,陆政,苏彬,等. 铝锂合金研究进展[J]. 材料工程,2001,5(5):44-47.
YANG Shou-jie,LU Zheng,SU Bin,*et al.* Development of Aluminum-Lithium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2001,5(5):44-47. (In Chinese)
- [5] 刘兵,彭超群,王日初,等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报,2010,20(9):1705-1715.
LIU Bing,PENG Chao-qun,WANG Ri-chu,*et al.* Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2010,20(9):1705-1715. (In Chinese)
- [6] KIM J D, PARK J K. Effect of stretching on the precipitation kinetics of an Al-2.0Li-2.8Cu-0.5Mg(-0.13Zr) alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24(12): 2613-2621.
- [7] WILLIAMS D B, EDINGTON J W. The precipitation of δ' (Al₃Li) in dilute Aluminium-Lithium alloys[J]. Metal Science, 1975, 9(12): 529-532.
- [8] NOBLE B, MCLAUCHLIN I R, THOMPSON G. Solute atom clustering processes in aluminium-copper-lithium alloys [J]. Acta Metallurgica, 1970, 18(3): 339-345.
- [9] 胡荣祖,史启祯. 热分析动力学[M]. 北京:科学出版社,2008:79-80.
HU Rong-zu,SHI Qi-zhen. Thermal analysis kinetics [M]. Beijing: Science Press,2008:79-80. (In Chinese)
- [10] LI Hong-ying, TANG Yi, ZENG Zai-de,*et al.* Effect of ageing time on strength and microstructures of an Al-Cu-Li-Zn-Mg-Mn-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 498(1/2): 314-320.
- [11] AHMADI S, ARABI H, SHOKUH FAR A. Formation mechanisms of precipitates in an Al-Cu-Li-Zr alloy and their effects on strength and electrical resistance of the alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 484(1/2): 90-94.
- [12] 卫英慧,贾连锁,胡兰青,等. Al-Li-Cu-Zr 合金中 T1 相结构、形核和长大机制研究[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(6):428-430.
WEI Ying-hui,JIA Lian-suo,HU Lan-qing,*et al.* Study on T1 phase structure,nucleation and growth mechanism in Al-Li-Cu-Zr Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2003,32(6):428-430. (In Chinese)
- [13] HUANG J C, ARDELL A J. Addition rules and the contribution of δ' precipitates to strengthening of aged Al-Li-Cu alloys[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(11): 2995-3006.
- [14] 袁志山,陆政,谢优华,等. 2A97 铝锂合金双级时效研究[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(3):444-446.
YUAN Zhi-shan,LU Zheng,XIE You-hua,*et al.* Study on double-aging of 2A97 Aluminum-Lithium alloy,rare metal materials and engineering,2011,40(3):444-446. (In Chinese)
- [15] 袁志山,陆政,谢优华,等. 预变形对高强 Al-Cu-Li-X 铝锂合金组织和性能影响[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(3):493-496.
YUAN Zhi-shan,LU Zheng,XIE You-hua,*et al.* Effect of plastic deformation on microstructure and properties of high strength Al-Cu-Li-X Aluminum-Lithium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2007,36(3):493-496. (In Chinese)
- [16] 高文理,闫豪,冯朝辉,等. 时效制度对 2A97 铝锂合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2014,24(5):1206-1211.
GAO Wen-li,YAN Hao,FENG Zhao-hui,*et al.* Effect of aging treatment on microstructure and mechanical properties of 2A97 Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014,24(5):1206-1211. (In Chinese)
- [17] 李红英,王晓峰,宾杰,等. 2 种时效制度对 2A97 合金组织和性能的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(5):1261-1269.
LI Hong-ying,WANG Xiao-feng,BIN Jie,*et al.* Effect of two aging processes on microstructure and properties of alloy 2A97 [J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2011,42(5):1261-1269. (In Chinese)