

时效工艺对高强度 Al - Cu - Li 合金断裂韧性的影响

蒋 呐^{1,2} 李劲风¹ 郑子樵¹ 向曙光²

(1 中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

(2 西南铝业(集团)有限责任公司技术中心,重庆 401326)

文 摘 采用 Kahn 撕裂法测试了高强度 Al - Cu - Li 合金 2090 在不同时效制度下的断裂韧性及其变化规律,并借助 TEM 和 SEM 对相应微观组织形貌及断口形貌进行了观察。结果表明:双级时效和应变时效均可促进 T₁相析出,改善合金的断裂韧性,但这种促进作用在过时效状态下减弱;晶界 PFZ 的宽化和粗大晶界平衡相的析出降低合金的断裂韧性,并对时效工艺、微观组织及断裂韧性之间的关系进行了讨论。

关键词 铝锂合金,热处理,断裂韧性,微观组织

Effect of Aging on Fracture Toughness of High Strength Al - Cu - Li Alloy

Jiang Na^{1,2} Li Jinfeng¹ Zheng Ziqiao¹ Xiang Shuguang²

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

(2 Technology Center of Southwest Aluminum (Group) Co., Ltd., Chongqing 401326)

Abstract The fracture toughness of high strength Al - Cu - Li alloy 2090 under different aging conditions is tested by utilizing "Kahn method", i. e., "tear-to-failure" method. The microstructure and fractography for corresponding specimens are investigated by means of TEM and SEM observations. It is found that both double aging and strain aging promote the precipitation of T₁-phase and hence improve the fracture toughness. However, under over aging condition, this promotion is weakened and the fracture toughness is sharply decreased due to widening of PFZ and coarsening of equilibrium phases along grain boundaries. The correlativity of fracture toughness, microstructure as well as aging condition is discussed in detail.

Key words Al - Li alloys, Heat treatment, Fracture toughness, Microstructure

1 引言

Alcoa 研制的高强度 Al - Cu - Li 合金 2090 在 T8X 状态下的力学性能可达到 7075 - T6X 的水平,而密度比 7075 降低 8% 左右,因而被认为是一种有望替代 7075 的新型航天结构材料,但该合金较低的断裂韧性使设计师们难以抉择。

铝锂合金的低韧性与其特有的微观组织形态有关^[1-2]。通常,微观组织除了受合金成分及加工工艺的影响之外,热处理是最为重要的影响因素。本文研究了不同时效制度对 2090 合金微观组织和断裂韧性的影响规律,期望通过优化时效工艺,改善合金的低韧性,提高 2090 合金在航天领域的适用性。

2 试验

2.1 材料

采用实验室条件制备的 2090 合金 2 mm 冷轧

板,合金成分 Al - 2.72Cu - 2.27Li - 0.12Mg - 0.11Zr。将板材在 530℃ 盐浴中固溶处理 25 min,水淬至室温,然后按以下四种制度进行时效处理。

(1) 单级人工时效 T6: 160℃/12 ~ 100 h。

(2) 单级应变时效 T8: 6% 预变形 + 160℃/12 ~ 100 h。

(3) 双级人工时效 T6D: 50℃/3 h 预时效 + 160℃/12 ~ 100 h。

(4) 双级应变时效 T8D: 6% 预变形 + 50℃/3 h 预时效 + 160℃/12 ~ 100 h。

2.2 断裂韧性测试

平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的标准测试方法是采用预制裂纹的“三点弯曲试样”,试样厚度须满足 $B \geq 2.5(K_{Ic}/\sigma_s)^2$,对于高强型的 2090 合金,估算的试样厚度不能小于 15 mm。本试验所用的 2 mm 板材

收稿日期:2006 - 09 - 05;修回日期:2006 - 10 - 19

作者简介:蒋呐,1968 年出生,教授级高级工程师,主要从事新型铝合金材料的研究工作

显然无法满足这一测试条件,故选择了一种较为常用的近似测试方法——“Kahn 撕裂法”^[3],也叫“缺口拉伸法”,所使用的缺口拉伸试样如图 1 所示。在该方法中,通过测定缺口拉伸试样在拉伸过程中的载荷-位移曲线,计算出试样的撕裂强度和单位面积裂纹扩展能,再换算出材料的断裂韧性。按照该方法测得的断裂韧性值以 K_{Ic} 表示。

在经过四种时效制度处理后的板材上沿横向切取试样,按图 1 进行机械加工,然后在 WD-10A 型电子万能材料试验机上进行缺口拉伸试验,以测试合金在不同时效状态下的断裂韧性 K_{Ic} 值。

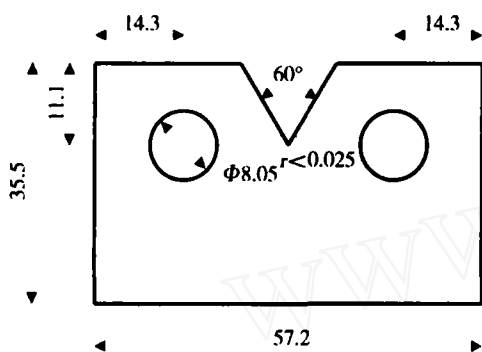


图 1 Kahn 撕裂法所采用的缺口拉伸试样
Fig. 1 Notched specimen used for Kahn method

2.3 微观形貌分析

合金的微观组织形貌在 H800 透射电子显微镜下观察,采用双喷薄膜样品。断口形貌分析在 KYKY-1000 扫描电子显微镜下进行。

3 试验结果

3.1 时效工艺对断裂韧性的影响

图 2 是四种时效制度下合金的 K_{Ic} 随第二级(160℃)时效时间的变化情况。总体的变化趋势是时效初期合金的断裂韧性均较高,随着时效时间延长,断裂韧性均

下降,经 160℃/100 h 后,合金在四种时效制度下的 K_{Ic} 值均下降至 27 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右,彼此相差已不明显。

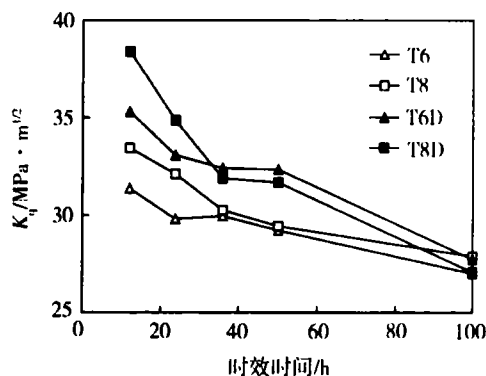
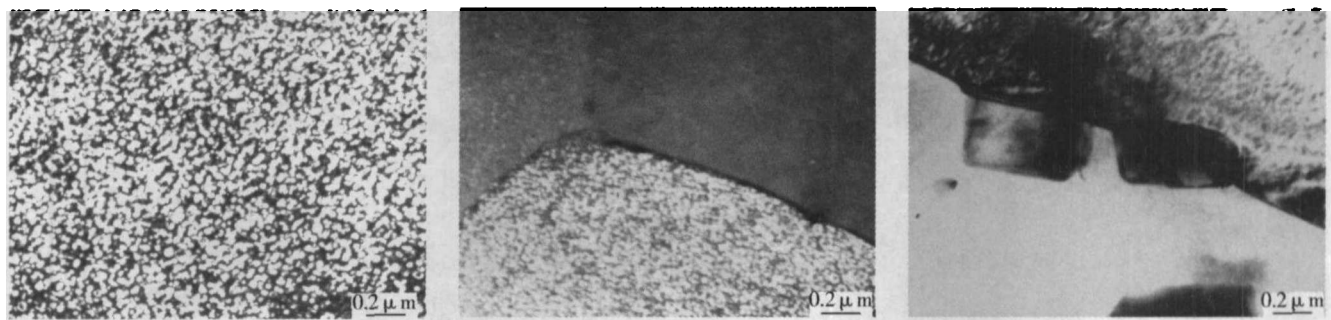


图 2 不同时效制度下断裂韧性随时效时间的变化
Fig. 2 Fracture toughness vs aging time under different tempers

比较 T6 和 T6D 制度可知,双级时效可以提高合金的断裂韧性,尤其是在达到峰值时效之前,这种效果尤为明显;比较 T6 和 T8 制度可以看出,在整个时效周期内,合金在 T8 状态下的 K_{Ic} 值均高于 T6 状态,这说明时效前的预变形同样可以提高断裂韧性,但随着时效时间的延长,其效果逐渐降低;从 T8D 制度的 K_{Ic} 曲线可以看出,合金在双级应变时效状态下具有最佳的断裂韧性。

3.2 不同时效状态下的微观组织

2090 合金在时效过程中析出的主要强化相为 δ' (Al_3Li) 相和 T_1 (Al_2CuLi) 相^[4]。图 3(a) 的观察结果表明, δ' 相的析出速率非常快,在时效初期就已经能够观察到 δ' 相粒子的大量析出,因而时效制度对 δ' 相的形貌和分布特征无明显影响,只是随着时效时间延长, δ' 相粒子逐渐长大。图 3(b)、(c) 则显示,时效初期,晶界无析出带 (PFZ) 很窄,经长时间时效后,晶界上析出粗大平衡相,晶界无析出带加宽。



(a) δ' 相, 160℃/12 h (b) 晶界 PFZ, 160℃/12 h (c) 晶界平衡相, 160℃/100 h

图 3 不同时效时间的 δ' 相及晶界的 TEM 形貌

Fig. 3 Morphologies of δ' -phase and grain boundary at different aging times

图 4 的观察证实, T_1 相的析出过程较为迟缓,主要以异质形核的方式析出长大,因而时效制度对 T_1 相的析出将产生显著影响。T6 状态下,仅有少量 T_1

相沿 β' (Al_3Zr) 粒子或晶内的单根位错线析出[图 4(a)];对于 T6D 状态,可以看到较多沿位错环析出的 T_1 相[图 4(b)];图 4(c)、(d) 表明,时效前的预变形

明显提高 T_1 相的析出密度, 晶内析出了大量均匀分布的 T_1 相, 这是由于预变形在晶内引入高密度位错, 为 T_1 相提供了大量的异质形核点, 从而促进 T_1 相弥

散、均匀析出, 因此合金在 T8 状态和 T8D 状态下具有相近的 T_1 相析出特征。

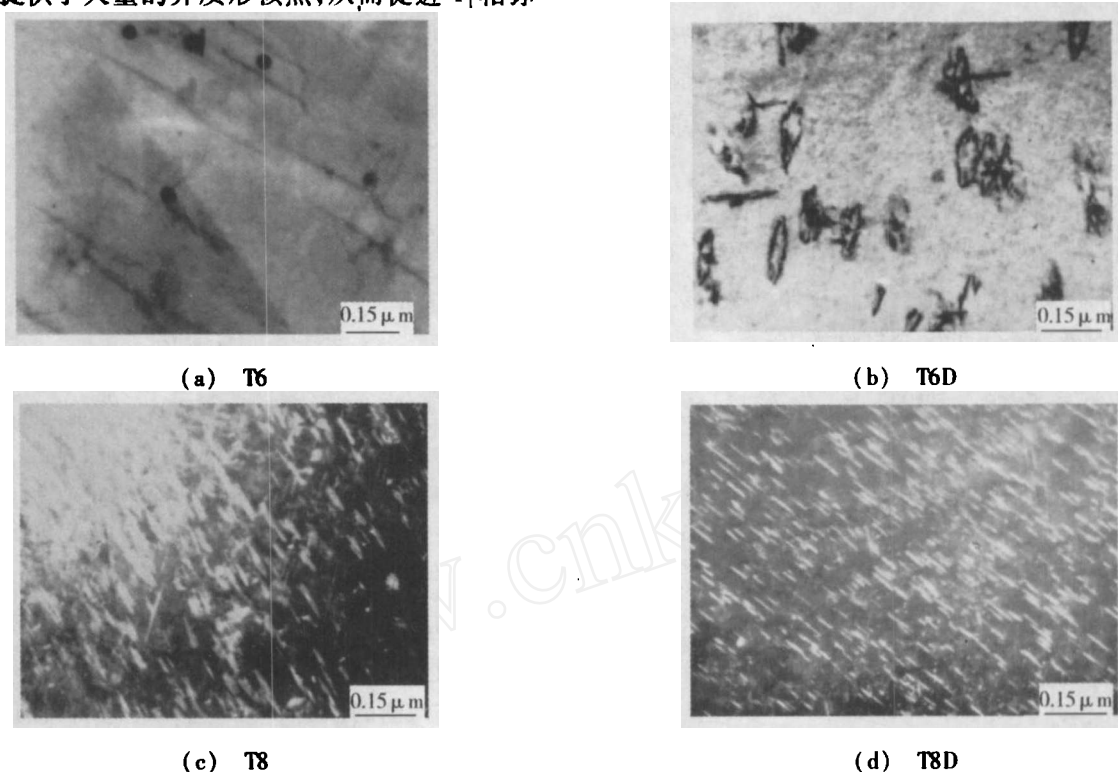


图4 不同时效制度下的 T_1 相形貌

Fig. 4 Morphologies of T_1 -phase under different aging tempers

3.3 断口形貌

从图5的断口形貌可以看出, 该合金基本上呈沿晶加穿晶的混合断裂特征。在欠时效状态, 沿晶断裂比例较小, 穿晶断裂比例相对大一些, 可观察到一些细小韧窝, 见图5(a), 随着时效时间延长, 沿晶断裂

的比例增加, 并表现出沿厚度方向的分层[图5(b)]。上述断口形貌特征与其断裂韧性值是相对应的, 沿晶断裂比例越高, 断裂韧性越低。因此, 如何降低沿晶断裂倾向是提高合金断裂韧性的关键。

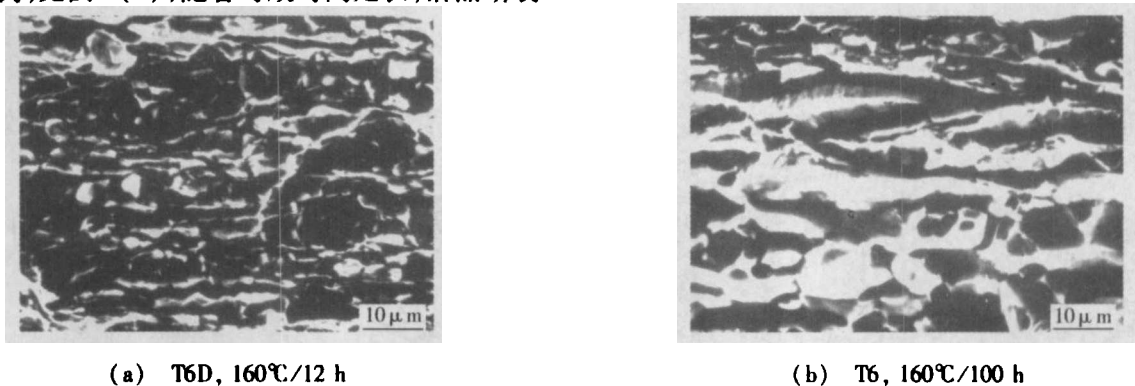


图5 Kahn 撕裂试样的断口形貌特征

Fig. 5 Fractography of specimens tested by "Kahn method"

4 断裂机理分析

一般来说, 铝锂合金的低韧性与变形时的共面滑移、应变局域化以及粗大晶界析出物等多种因素有关。与基体完全共格的 $L1_2$ 结构的 δ' 相易被位错成对切割而引起长程共面滑移, 致使大量位错塞积在晶界同一位置, 在晶界处产生应力集中而导致低能沿晶断裂; 应变局域化则是由于 PFZ 相对于基体而言更容易变形, 从而使变形被集中在柔软的 PFZ 中进行,

导致在晶界平衡相与 PFZ 的界面处或三晶交叉处萌生微裂纹, 并最终引发沿晶断裂。因此, 分散共面滑移、减小 PFZ 宽度、减少晶界平衡相的析出都有助于改善铝锂合金的断裂韧性。

在 2090 合金中, δ' 相虽起强化作用, 但可诱发共面滑移而降低韧性。 T_1 相则可分散共面滑移^[5-6], 因而同时具有强化和韧化的作用。在 T6 状态下, 合金的主要析出相为 δ' 相, T_1 相很少, 共面滑移倾向大, 因

此断裂韧性最低(图2)。在T6D状态下,低温预时效促进了 T_1 相析出[图4(b)],从而显著地提高了合金的断裂韧性。低温预时效促进 T_1 相析出的原因与空位和位错环等缺陷有关。由于Li原子和空位之间具有很高的结合能^[7],淬火时的大量过饱和空位因此而被冻结,在低温预时效阶段,随着 δ' 相析出长大,被Li原子冻结的空位逐渐释放形成自由空位,这些自由空位进一步聚集形成位错环以降低过饱和度,当进行第二级时效时, T_1 相便优先在这些位错环上形核并长大,在图4(b)中可看到被 T_1 相缀饰的位错环痕迹。对于T8状态,由于预变形在基体中引入了大量位错,这些位错成为 T_1 相理想的异质形核点,从而促进了 T_1 相析出。预变形产生的位错密度往往较高,有可能因过多位错缠结而形成胞状位错组织。当基体中存在胞状位错组织时,变形的均匀性将会极大降低,并可造成局部应力集中,导致裂纹过早萌生并迅速失稳扩展,从而降低合金的韧性,因此,合金在T8状态的断裂韧性低于T6D状态(图2)。如果在预变形之后又进行低温预时效(T8D制度),可使部分位错在低温预时效阶段因回复作用而重组或湮灭,有利于位错的均匀分布,从而降低因位错密度过高而带来的负面影响,这正是为什么合金在双级应变时效状态(T8D)下具有最佳断裂韧性的原因。

随着时效时间延长,进入过时效阶段之后,由于晶界无析出带的宽化和粗大晶界平衡相的析出成为影响断裂过程的主导因素,此时, T_1 相因分散共面滑移而对断裂韧性的改善作用被部分甚至全部抵消。因此在过时效阶段,合金在四种不同时效制度下的断裂韧性最终趋于接近,并且其值均较低。

5 结论

(1)2090合金中 T_1 相的析出受到时效制度的显著影响,预变形引入的位错或预时效形成的位错环等缺陷可为 T_1 相提供异质形核点,从而促进 T_1 相均匀析出。

(2)通过 T_1 相的均匀析出,同时减小晶界无析出带宽度和减少晶界粗大平衡相,有助于提高2090合金的断裂韧性。

(3)2090合金在双级应变时效状态下可获得最佳的断裂韧性。

参考文献

- 1 根本实,美浦康宏,古川稔.含锂铝合金的开发现状.轻金属(日),1986;36:685
- 2 Sanders Jr T H, Starke Jr E A. The effect of slip distribution on the monotonic and cyclic ductility of Al-Li alloys. Acta Metall, 1982; 30: 927
- 3 万韬瑜,丁小平,张伟斌.评铝锂合金断裂韧性的测试方法.轻合金加工技术,1989;(9):42
- 4 张匀,赵洪恩,姚大平等. Al-2.2Li-2.5Cu-0.2Mg合金组织与性能的关系.金属学报,1989;25(3):A161~A167
- 5 Gregson P J, Flower H M. Microstructural control of toughness in aluminium-lithium alloys. Acta Metallurgica, 1985; 33: 527~537
- 6 Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. Mechanical properties of Al-Li alloys. Materials Science and Technology, 1989; 5: 882
- 7 Ceresara S, Giarda A, Sanchez A. Annealing of vacancies and ageing in Al-Li alloys. Phil. Mag., 1977; 35: 97

(编辑 李洪泉)

有关版权转让声明

凡向本刊所投稿件,全体作者需在投稿时签署《论文著作权转让书》,将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊。本刊已加入《中国学术期刊光盘版》、《中国期刊网》、《万方数据数字化期刊群》等,被中国核心期刊(遴选)数据库收录。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

说明:编辑部在收到作者签署的《论文著作权转让书》后方进行稿件审查。本规定从2007年1月1日起执行。

《宇航材料工艺》编辑部