

铝锂合金强化和韧化的特殊机理^①

陈 铮 王永欣 徐 磊

(西北工业大学 401 教研室, 西安 710072)

摘 要 以未再结晶晶粒结构的 2090+ Ce 铝锂合金板材为对象, 从铝锂合金与普通铝合金力学行为的主要差别入手, 以揭示经典理论难以解释的现象为目的, 重点研究了该合金独有的精细结构与断裂特征的内在联系, 以及力学行为对之的响应关系。涉及到室温拉伸行为, 疲劳长、短裂纹扩展特性, 断裂韧性, 光滑疲劳极限。

关键词 铝锂合金 强韧化 断裂特征 力学行为

80 年代以来, 国际上在改善铝锂合金塑性、断裂韧性、疲劳性能等方面取得了长足的进展, 同时发现铝锂合金的强化韧化特性不同于普通铝合金。例如, 它的未再结晶结构的强塑性配合、断裂韧性、疲劳性能等均明显优于再结晶结构^[1-3]; 一定条件下, 峰值时效的断裂韧性最高^[1]; 低温时的强度、塑性、断裂韧性、疲劳性能等均优于室温^[4]; 虽疲劳裂纹萌生寿命短和短裂纹扩展抗力低, 但仍有较高水平的疲劳极限或疲劳寿命^[5]。用经典的强化韧化理论不能解释这些现象, 因之, 揭示该合金强化和韧化的特殊机理有重要的理论和实用价值。

1 试验方法

本文中图表的试验工作均采用自制的 2090+ Ce 铝锂合金板材, 先后涉及多个炉次, 化学成分 (%) 为: Li: 1.9~2.6, Cu: 2.4~3.0, Zr: 0.08~0.14, Ce: 0.05~0.10。热处理为 528~535℃固溶, 4% 预拉伸, 随后 165℃, 20~24h 时效。取样方向均为 L-T 方向, 疲劳裂纹扩展速率和断裂韧性采用 CT37 试样, 其它采用标准板材拉伸和疲劳试样。疲劳裂纹扩展速

率和 S-N 曲线均用正弦波, $R = 0.1$, 前者的频率为 18Hz, 后者的频率为 60Hz, 疲劳裂纹闭合效应测定用柔度法。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能与薄带强化、分层强化

铝锂合金未再结晶结构与再结晶结构的室温拉伸强塑性的比较及其断裂特征分别示于图 1 和图 2。首先, 可以看出该合金未再结晶结构的强塑性配合明显优于再结晶结构; 断裂特征

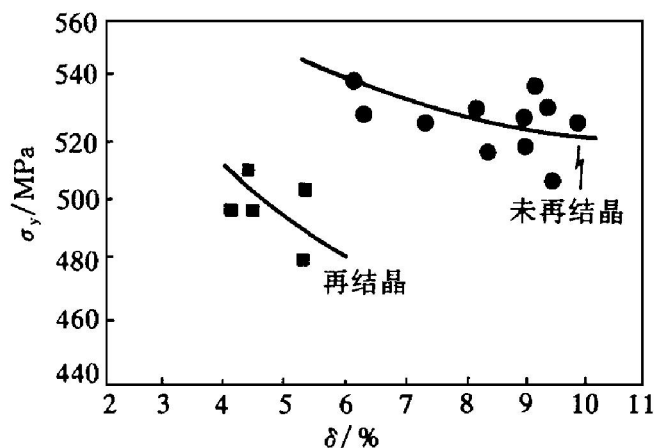


图1 2090+ Ce 铝锂合金板材未再结晶结构与再结晶结构的室温拉伸强塑性比较

① 本研究先后受航空科学基金、国家教委优秀年轻教师基金、国家自然科学基金、军用新材料预研项目的资助
收稿日期: 1996-04-16; 修回日期: 1996-08-08 陈 铮, 男, 45 岁, 教授(博士生导师)

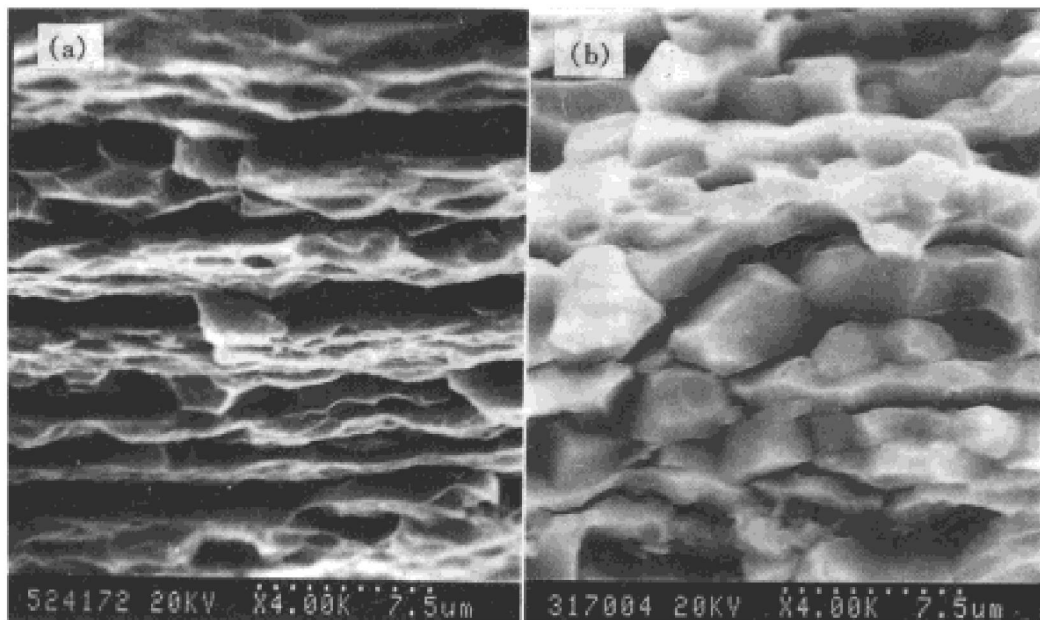


图2 2090+ Ce 铝锂合金板材未再结晶结构与再结晶结构的室温拉伸断口

(a) —未再结晶结构; (b) —再结晶结构

也截然不同,前者呈层状断口,后者为典型冰糖状断口。

早在70年代就发现,在铝锂合金中加入少量锆,均匀化时形成 Al_3Zr 相而阻碍晶界迁移,最终热处理后仍保留未再结晶结构,可明显改善合金的强塑性配合。目前,几乎所有工业铝锂合金都含有锆,一般在未再结晶状态应用。80年代初至今,许多人赞同这样一个观点^[3]:未再结晶晶粒间的位向差小,位错易穿越之进入相邻晶粒,晶界处的位错塞积量减少而减弱了沿晶开裂倾向。从一般性的理论角度看,此看法有合理性,但随铝锂合金断裂机理研究的深入,它暴露出问题而受到怀疑。以未再结晶扁平晶粒结构的铝锂合金板材为例,其拉伸断口为层状,伴有大量垂直主断裂面的沿晶二次裂纹,称之为短横向分层(Short-transverse delamination)。这一事实说明未再结晶结构仍有很强的沿晶开裂倾向,更令人奇怪的是短横向分层的增多往往伴随着拉伸强塑性的改善,上述观点不能解释这一现象,必须探讨特殊的机理。

短横向分层的产生系因扁平晶粒、弱晶界、平面滑移、晶界平衡相和相应的无沉淀带的联合效应,它呈均匀分布、平行轧制面并垂

直主断裂面扩展。它的产生与发展不仅不导致试样断裂反而将其分成许多平行拉伸轴的薄带,随后的塑性变形被限制在独立的薄带中,相互间的变形传递难以进行,变形抗力因之而增大,这种效应称为薄带强化(ligament strengthening)。其次,由于短横向分层垂直主裂纹,主裂纹与之相遇时将发生 90° 偏转,而暂时停滞,此效应称为分层强化(delamination strengthening)。薄带强化和分层强化的机理是靠改变塑性变形和裂纹扩展的外部条件,起到增强增塑的作用,故归为外强化(extrinsic strengthening)。

2.2 断裂韧性与分层韧化

铝锂合金未再结晶结构板材不同时效程度的断裂韧性断口示于图3。欠时效和峰值时效状态的断口形貌为层状,后者的层状特征更明显,片层更薄;进入过时效状态,层状特征消失,以沿亚晶断裂为主。

断裂韧性主要取于两个因素:一是材料微观结构对裂纹扩展的阻力;二是裂尖的应力应变状态。仍以未再结晶扁平晶粒结构的铝锂合金板材为例,由于裂尖前方的三轴拉应力诱发短横向分层,裂尖前方形成一系列垂直主裂纹的薄带,其结果使裂尖由一个整体的平面应变

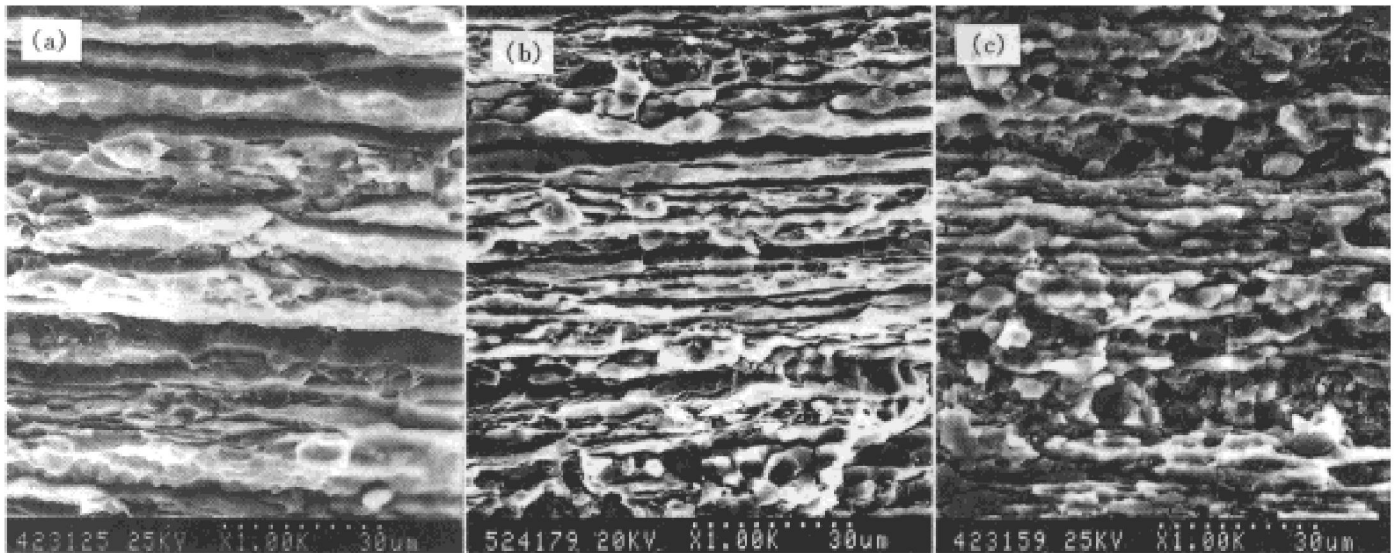


图3 2090+ Ce 铝锂合金未再结晶结构板材不同时效程度的断裂韧性断口

(a) 欠时效, $K_{IC} = 36 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; (b) 一峰时效, $K_{IC} = 45 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; (c) 一过时效, $K_{IC} = 31 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$

状态转变为一系列平行的平面应力状态, 宏观上表现为断裂韧性值上升, 这种韧化效应称为分层韧化 (delamination toughening)。分层韧化不是依赖于增强材料内部微观结构对裂纹扩展的直接阻碍作用, 而是靠改变裂尖的外部状态, 故归之为外韧化 (extrinsic toughening)。应用分层韧化理论, 就很容易理解为什么铝锂合金未再结晶扁平晶粒结构的断裂韧性优于再结晶等轴晶粒结构。

欠时效至峰值时效, 普通铝合金的断裂韧性下降, 进入过时效状态, 断裂韧性回升^[1]。然而, 未再结晶扁平晶粒结构的铝锂合金板材在峰值时效时有最高的断裂韧性, 增加或减小时效程度均使断裂韧性下降, 这个现象只能用分层韧化理论来解释。铝锂合金在欠时效至峰值时效过程, 一方面晶内强度升高和晶界无沉淀带增宽而拉大晶内—晶界强度差, 同时沿晶析出的稳定相增多而加剧晶界应力集中, 其结果是短横向分层更容易产生, 分层韧化效应增强。进入过时效阶段, 稳定相开始沿亚晶界析出, 并生成相应的亚晶界无沉淀带, 亚晶界应力集中及弱化的影响占主导地位, 二次裂纹在等轴的亚晶界上生成和扩展, 短横向分层减小甚至消失, 分层韧化效应逐步丧失。

2.3 疲劳裂纹扩展行为与裂尖屏蔽

铝锂合金与普通铝合金疲劳长裂纹扩展速率 da/dN 以及裂纹张开应力强度因子 K_{op} 的比较示于图4, 前者的断口形貌示于图5, 铝锂合金较普通铝合金有低的裂纹扩展速率, 对应于高的裂纹张开应力强度因子, 即大的裂纹闭合效应。近门槛值区的断口形貌由循环解理刻面组成, 高低起伏明显; 在 Paris 区呈脊骨状断口, 即准分层与循环解理的耦合; 当进入 III 区, 则得到典型的层状断口。

疲劳裂纹扩展抗力包括抵抗裂尖前进的能力和抵抗裂纹张开的抗力。前者系材料微观结构对裂尖前进的阻碍作用, 后者系裂纹面上氧化物、粗糙度和塑变区对裂纹张力的阻碍作用, 分别称为氧化物诱发裂纹闭合效应 (oxide-induced crack closure effect)、粗糙度诱发裂纹闭合效应 (roughness-induced crack closure effect) 和塑变区诱发裂纹闭合效应 (plasticity-induced crack closure effect)。裂纹闭合效应对裂纹前进没有直接的阻碍作用, 但因裂纹张开是裂纹扩展的先决条件, 闭合效应阻碍裂纹张开而消耗掉部分扩展驱动力, 使裂尖局部扩展驱动力减小, 从而起到保护裂尖的作用, 此效应称为裂尖屏蔽 (crack tip shielding)。因这种裂尖屏蔽效应直接来自裂纹面上而非材料内部, 故归为外韧化, 铝锂合金在近门槛值的疲

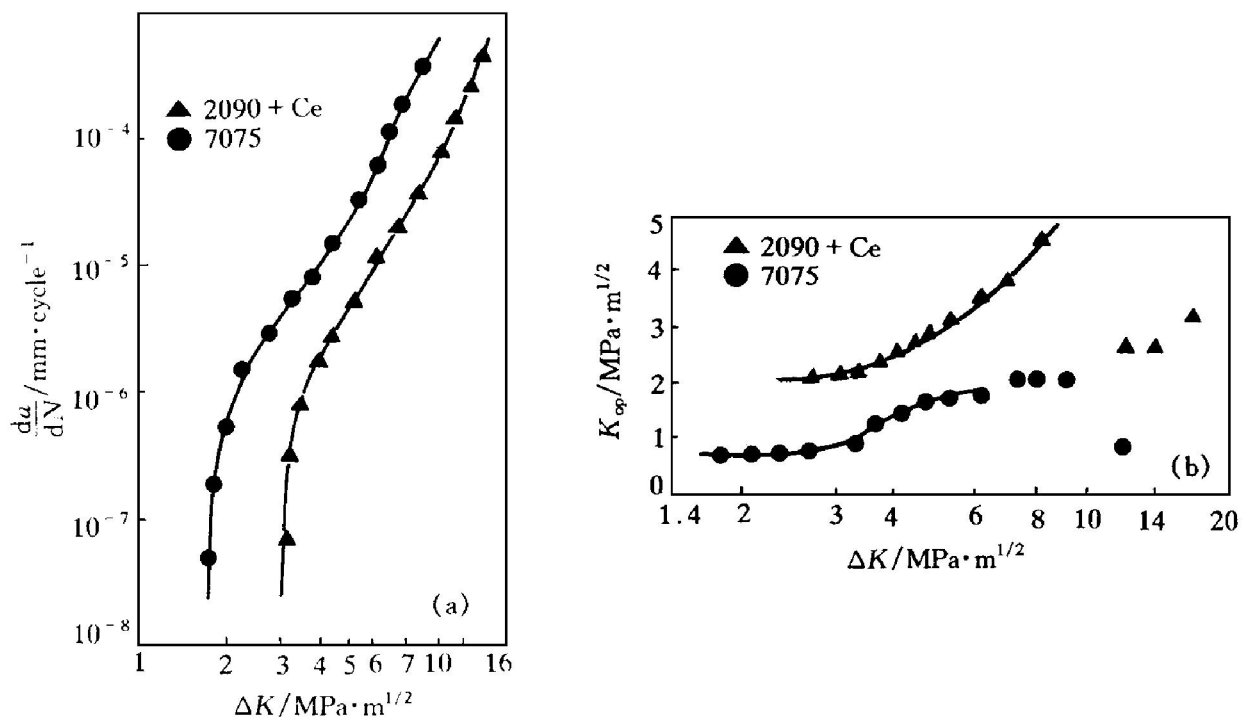


图 4 2090+ Ce 铝锂合金与 7075 铝合金
疲劳裂纹扩展速率 da/dN (a) 以及裂纹
张开应力强度因子 K_{op} (b) 的比较

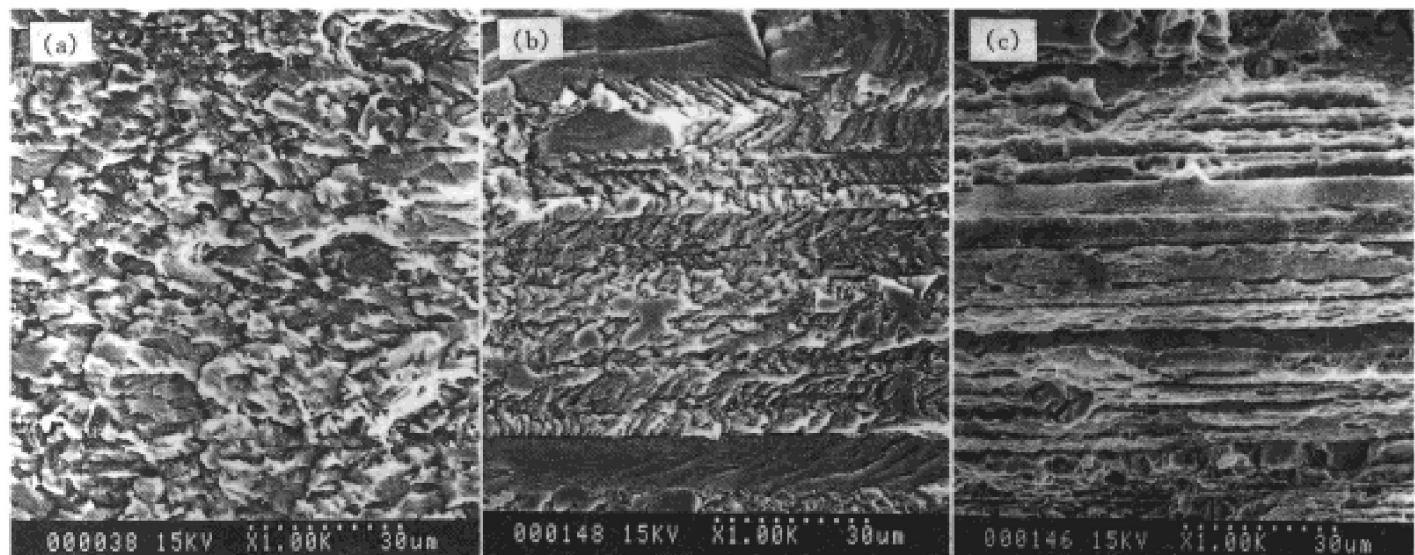


图 5 2090+ Ce 铝锂合金的疲劳裂纹断口形貌
(a) —近门槛值区; (b) —Paris 区; (c) —III区

劳裂纹扩展抗力主要源于此。

在 Paris 区裂尖前方的三轴拉应力虽不足以诱发明显的短横向分层，但裂尖已处于“准分层”状态，由一个平面应变状态转变到一系列“准平面应力”状态，起到一定分层韧化作用，且此时裂纹张开位移不大，粗糙度诱发裂纹闭合效应和氧化物诱发裂纹闭合效应仍有重要的作用，外韧化效应系裂纹闭合效应与分层韧化效应的耦合。在 III 区，裂尖前方的三轴拉应力足以诱发明显的短横向分层，同时，由于

裂尖张开位移增大,使裂纹闭合效应的作用减小,分层韧化占主导地位。

2.4 疲劳寿命与外韧化效应

铝锂合金与普通铝合金的光滑疲劳 $S-N$ 曲线的比较示于图 6,相应的断口形貌示于图 7, 2090+ Ce 铝锂合金的疲劳极限与 7075 铝合金相差不大,许多文献有类似报道,或相当,也有略低或略高的。然而,两者的断口差别较为明显,2090+ Ce 铝锂合金的疲劳条纹宽而平直清晰,属于脆性条纹;7075 铝合金的疲劳条纹窄而弯曲,可看到塑变迹象,通常这两种疲劳条纹的差异对应相当大的疲劳寿命差别,从这一点很难理解两合金的疲劳极限为什么如此接近。

疲劳断裂是疲劳裂纹萌生、短裂纹扩展、长裂纹扩展和最终失稳断裂的过程,通常裂纹萌生和短裂纹扩展占疲劳总寿命的绝大部分。由于平面滑移、沿晶平衡相、晶界无沉淀带、K 和 Na 杂质偏聚晶界的综合作用,铝锂合金的疲劳裂纹极易沿晶界萌生和扩展。尽管铝锂合金的疲劳裂纹萌生寿命和短裂纹扩展抗力低,但其疲劳寿命和疲劳极限却与普通铝合金差别不大,仅用疲劳长裂纹扩展抗力高这一点不足以解释此现象,更何况,当试样尺寸较小

时,短裂纹扩展后期已接近失稳断裂临界尺寸,疲劳长裂纹扩展阶段仅占疲劳总寿命的很小部分。怎样一个机制影响着铝锂合金的疲劳寿命?这是铝锂合金疲劳研究中长期未能揭示的问题。虽然,铝锂合金的未再结晶扁平晶粒结构不能抑制疲劳裂纹沿晶萌生和扩展,但是,它使早沿晶萌生和扩展的短裂纹呈短横向分层的形式,而不构成对疲劳寿命的危害,因此,疲劳寿命仍保持在较好的水平。其次,与普通铝合金相比,铝锂合金有更高的尾迹效

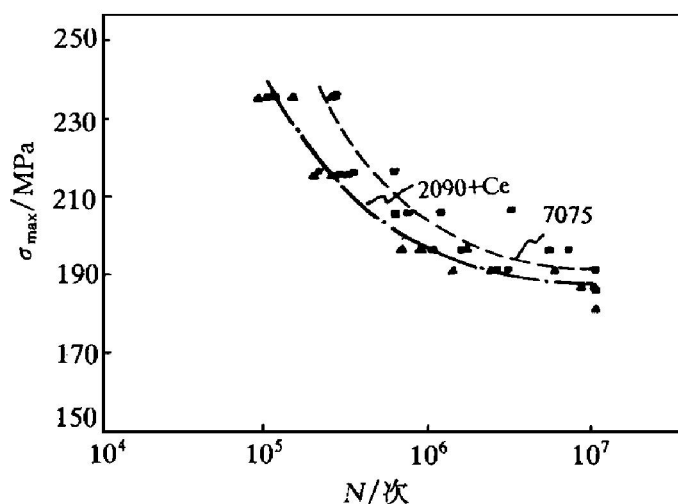


图 6 2090+ Ce 铝锂合金与 7075 合金的光滑疲劳 $S-N$ 曲线比较

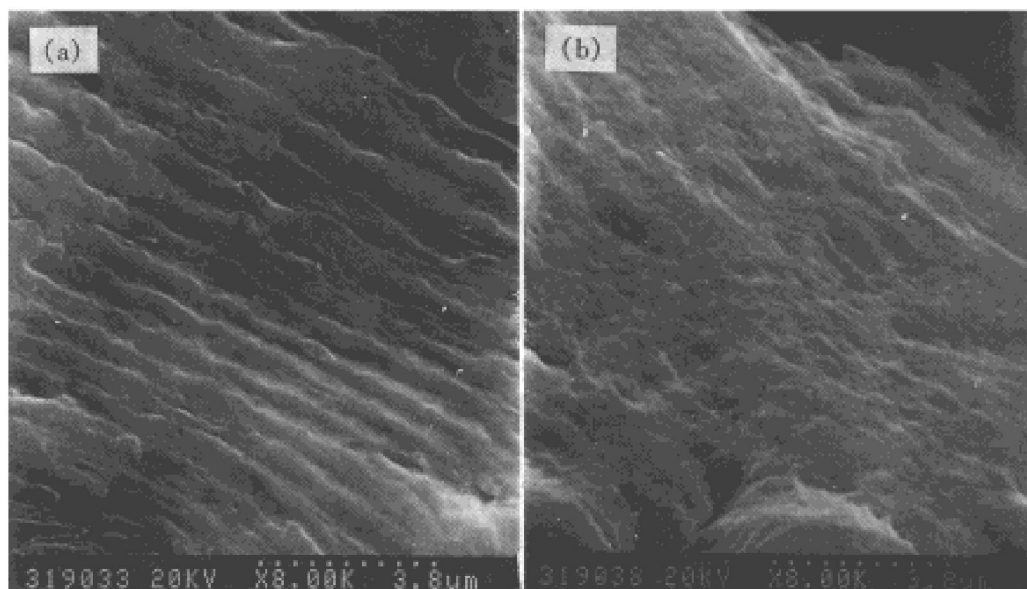


图 7 2090+ Ce 铝锂合金与 7075 合金的光滑疲劳断口形貌

(a) —2090+ Ce 合金; (b) —7075 合金

应, 闭合效应随尾迹增长而迅速增大, 可使扩展速率呈下降趋势, 甚至最终进入非扩展状态, 在一定程度上抵消了其短裂纹初期高速扩展的危害。

3 结束语

最后应当说明, 时效强化、细晶强化、第二相强化等内强化机制同样适用于铝锂合金, 并在其强化韧化机理中占有重要地位, 本文对此不作复述。铝锂合金独有的微观结构使之表现出很强的外强化、外韧化效应, 而有别于普

通铝合金, 改善和优化铝锂合金的性能在于内、外强化以及内、外韧化效应的最佳配合。

参考文献

- 1 Venkateswar Rao K T *et al.* Mater Sci Tech, 1989, 5(9): 882– 895.
- 2 Venkateswar Rao K T *et al.* Mater Sci Tech, 1989, 5(9): 896– 907.
- 3 Starke E A *et al.* Metall Trans, 1982, 13A(12): 2259– 2267.
- 4 Xu Y B *et al.* Metall Trans, 1991, 22A(5): 723– 729.
- 5 Farcy I *et al.* J de physique, 1989, sup. 9: 767– 772.

SPECIAL MECHANISMS OF STRENGTHENING AND TOUGHENING FOR ALUMINIUM-LITHIUM ALLOY

Chen Zheng, Wang Yongxin, Xu Lei

School of Materials Science and Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

ABSTRACT The material studied was aluminum-lithium alloy 2090+ Ce with pancake-shape uncrystallized grains. The difference in the mechanical behavior between aluminum-lithium alloy and traditional aluminum alloy was researched so as to reveal the special phenomena which are difficult to be explained by the traditional theory. Specific emphasis has been placed on the relationship among microstructure, fractographic feature and mechanical behavior for aluminum-lithium alloy. The tensile behavior at room temperature, the growth behavior of long and short fatigue cracks, fracture toughness and fatigue limit of the studied alloy were concerned with.

Key words aluminum-lithium alloy strengthening and toughening fracture feature mechanical behavior

(编辑 彭超群)