

铝锂合金疲劳裂纹扩展行为与 裂尖屏蔽效应^①

倪永峰 陈 铮 何 明 王 泓
(西北工业大学 72 号信箱, 西安 710072)

摘 要

研究了 2090、8090 铝锂合金, 7075、2024 普通铝合金的疲劳裂纹扩展速率, 门槛值, 裂纹闭合效应, 裂纹偏转特性和形貌, 并讨论了上述各因素之间的内在联系。结果表明: 在强度水平相近时, 铝锂合金的疲劳裂纹扩展抗力明显优于普通铝合金, 主要归因于其裂纹闭合和裂纹偏转的裂尖屏蔽(Shielding)作用。铝锂合金特有的断裂特征(脊骨状断口)和强的氧化倾向, 使之获得了高的粗糙度诱发裂纹闭合效应和氧化物诱发裂纹闭合效应。最后, 本文还较系统地讨论了扁平晶粒、强织构、平面滑移、沿晶稳定相等对铝锂合金断裂特征、裂尖屏蔽效应等的影响。

关键词: 铝锂合金 疲劳裂纹扩展 裂尖屏蔽 闭合效应 裂纹偏转 断裂特征

铝锂合金的疲劳特性、耐腐蚀性和各向异性是该合金研究、生产和应用界最关注的三个问题, 北美、西欧和俄罗斯等对其疲劳的研究均给予高度重视。大量研究工作表明^[1-4], 铝锂合金的疲劳特性与普通铝合金不尽相同。例如, 该合金具有很高的应力比敏感性和大的过载效应; 其裂纹偏转倾向极强; 具有优良的疲劳长裂纹扩展抗力, 且有很强的短裂纹效应, 而这些特性不能完全用经典的疲劳理论来解释。八十年代末期提出的裂尖屏蔽理论, 使人们对铝锂合金疲劳裂纹扩展机制的认识获得进一步深化, 但是, 有关铝锂合金裂尖屏蔽效应的本质还有待于进一步研究。本文主要研究铝锂合金和普通铝合金的疲劳裂纹扩展速率、裂纹闭合效应、裂纹偏转特性和断口形貌, 并讨论了上述各因素之间的内在联系, 以期揭示该合金裂尖屏蔽效应的影响和本质。

1 试验条件

本研究选用自制 2 mm 厚铝锂合金板材, 其成份、性能及热处理状态见表 1 和表 2, 同

表 1 试验合金的化学成份

合金	化学成份/wt.-%						
	Li	Cu	Mg	Zr	Ce	Ti	Fe
2090	1.88	2.39	—	0.085	—	0.04	<0.10
8090	2.20	1.25	1.0	0.100	—	0.04	<0.10

表 2 试验合金的状态及横向机械性能

合金	热处理状态	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %
2090	528℃固溶 30min, 4% 预拉伸, 165℃时效 18h	518	469	6.5
8090	520℃固溶 30min, 2% 预拉伸, 190℃时效 18h	458	412	7.4

① 于 1992 年 12 月 15 日收到初稿

时选用 2 mm 厚普通铝合金板材做对比试验。

试验合金的光学显微组织示于图 1。铝锂合金以未再结晶扁平晶粒(pancake)结构为主,伴有少量的再结晶晶粒,其中 8090 合金的晶粒较 2090 合金粗大。与铝锂合金完全不同,普通铝合金为完全再结晶晶粒结构。

采用 CT 试样做疲劳试验,试样宽 50 mm、厚 2 mm,沿 TL 方向取样。试验在 SHIMADZU—SERVOPLSER 疲劳试验机上进行,频率 18 Hz,正弦波, $R=0.1$ 。用降载法测定门槛值,每级降载 2~10%,裂纹扩展量大于前级载荷幅裂尖塑变区的 4 倍。采用自制的 100 倍光学监测仪测量裂纹长度,其误差小于 0.01 mm,用柔度法测定裂纹张开载荷值 P_{op} 。

2 试验结果

试验合金的 $da/dN-\Delta K$ 曲线示于图 2。

铝锂合金与普通铝合金相比,在 paris 区和近门槛值区,2090、8090 合金的 da/dN 分别较 7075、2024 低 1~2 个数量级,亦即在强度水平相近的条件下,铝锂合金的名义疲劳裂纹扩展抗力明显优于普通铝合金。

名义疲劳裂纹扩展抗力包括裂尖的前进阻力和裂纹的张开阻力,前者系本征疲劳裂纹扩展抗力,来自裂尖前方微观结构对裂尖前进的阻碍作用,一般以 $da/dN-\Delta K_{eff}$ (有效应力强度因子)曲线衡量;后者系裂纹闭合效应,来自裂尖后方塑变区粗糙的裂纹面和裂纹面上的氧化物对裂尖张开的阻碍作用,一般以裂纹张开应力强度因子 K_{op} 衡量。

图3为2090与7075,8090与2024合金的 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲线,由图可见,低 ΔK 条件下,2090合金的本征裂纹扩展抗力明显低于7075合金,8090合金则同2024合金相近。

2090与7075合金,8090与2024合金的 K_{op} ,

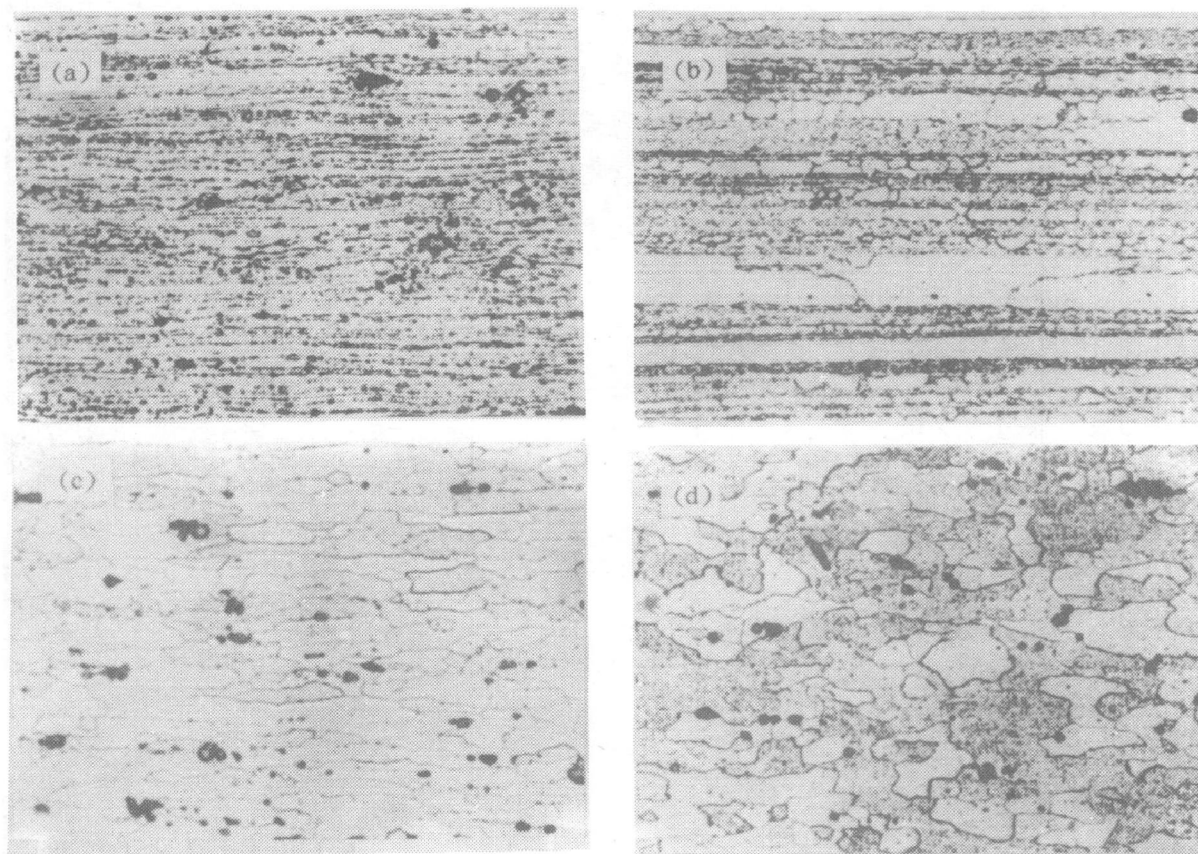


图1 四种合金普通光学金相组织

(a)—2090($\times 250$);(b)—8090($\times 250$);(c)—7075($\times 250$);(d)—2024($\times 250$)

K_{eff} 随 ΔK 的变化关系曲线示于图4。由图可见,铝锂合金的裂纹闭合效应明显高于普通铝合金,当 ΔK 值较低时差别更加明显。显然,高的裂纹闭合效应使铝锂合金获得了优良的名义疲劳裂纹扩展抗力。

名义应力强度因子门槛值幅值 ΔK_{th} 亦可分为本征应力强度因子门槛值幅值 $\Delta K_i (= \Delta K_{eff,th} = K_{max,th} - K_{op,th})$ 和裂纹闭合应力强度因子门槛值幅值 $\Delta K_{cl,th} (= K_{op,th} - K_{min,th})$ 两部分,四种合金的 ΔK_{th} 、 ΔK_i 、 $\Delta K_{cl,th}$ 的比较示于表3。铝锂合金具有较高水平的 $\Delta K_{cl,th}$,从而使它具有较高的名义应力强度因子门槛值幅值。由表3同时可看出,高强型2090合金的本征门槛值为7075合金的2/3左右,而中强型8090合金与2024合金的本征门槛值差别很小。

表3 试验合金的 ΔK_{th} 、 ΔK_i 和 $\Delta K_{cl,th}$ 比较

合金	2090	7075	8090	2024
$\Delta K_{th}/\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	2.39	1.78	3.34	2.60
$\Delta K_{cl,th}/\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	1.51	0.52	2.29	1.53
$\Delta K_i/\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	0.88	1.26	1.05	1.07

四种合金的疲劳裂纹扩展路径示于图5,普通铝合金的疲劳裂纹扩展路径较为平坦,而

铝锂合金的疲劳裂纹扩展路径则曲折得多。

四种合金的近门槛值附近的断口形貌示于图6,8090合金典型的脊骨状疲劳条纹,其条纹(亦称小平面)与主裂纹面呈一定角度,并被限制在扁平晶粒内而不能穿越晶界。2090合金的断口形貌与8090合金类似,但其条纹较细,晶界的影响也不及8090合金明显,这可能与其小的晶粒尺寸有关。与铝锂合金不同,7075和2024合金的断口由接近平行于主裂纹面的平面和条纹(台阶)组成。

3 讨论

推动裂尖前进的直接驱动力系有效应力强度因子幅值(ΔK_{eff}),故又称 ΔK_{eff} 为裂尖局部扩展驱动力,在名义裂纹扩展驱动力 ΔK 一定时, ΔK_{eff} 取决于裂纹闭合效应的大小和裂纹偏转状况。裂纹张开是裂纹扩展的先决条件,名义裂纹扩展驱动力的一部分首先消耗于克服裂纹闭合效应,其余部分用于推动裂尖前进。亦即,对于一定的 ΔK ,裂纹偏转不仅延长了裂纹扩展路径,在宏观上表现为 da/dN 下降,更重要的是裂纹偏转使其扩展方向与外力

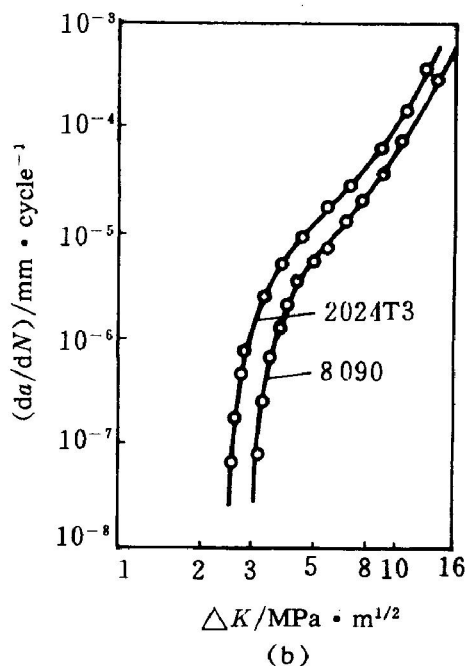
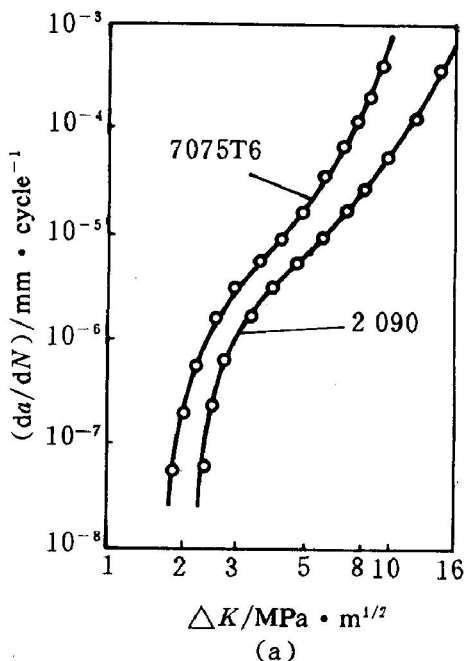
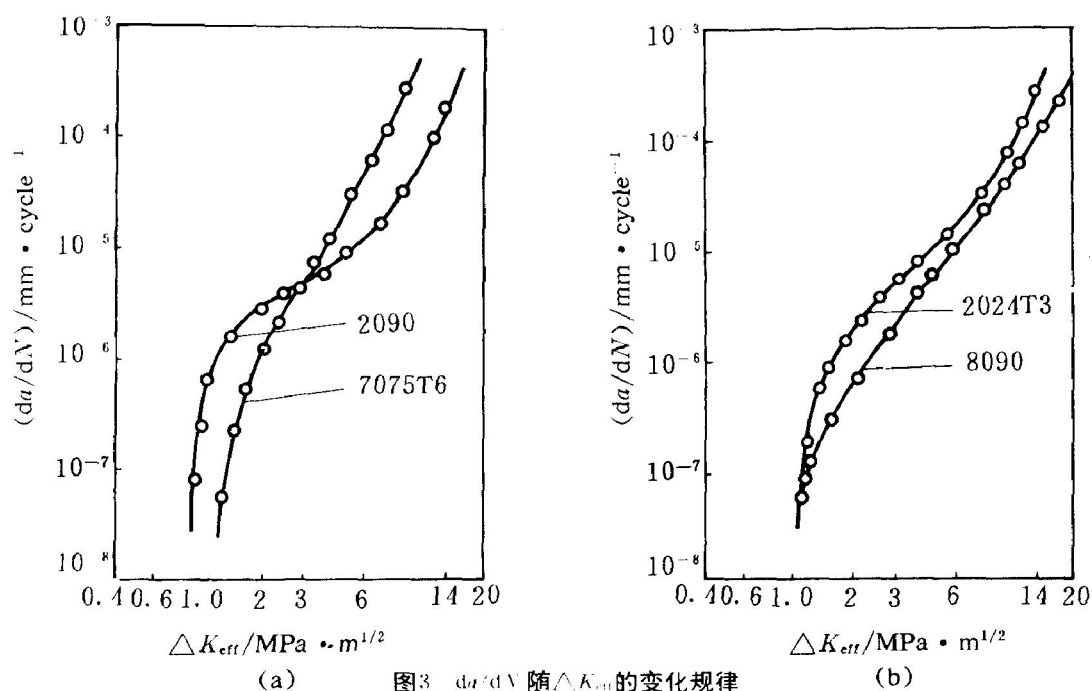
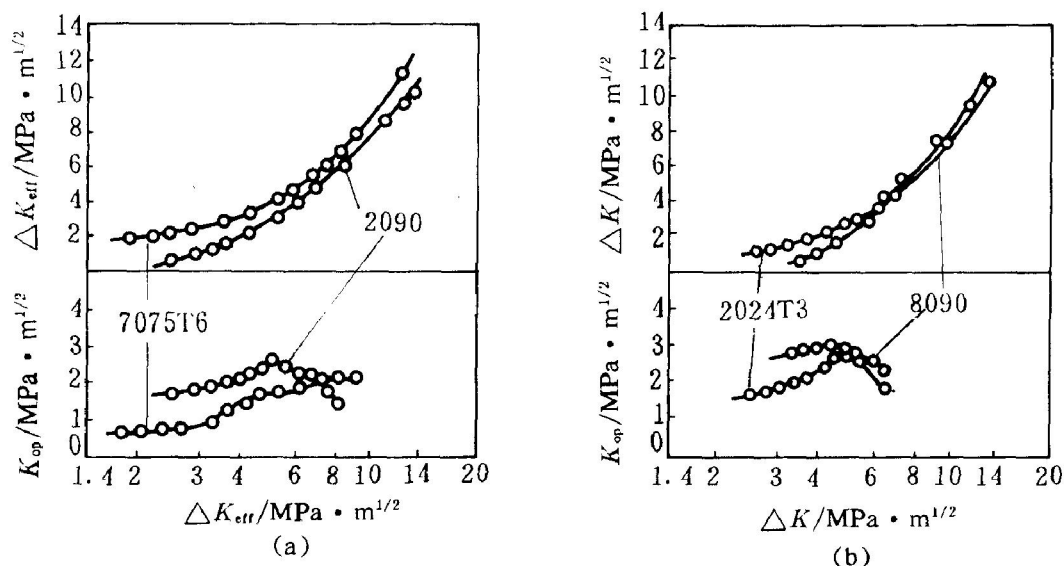


图2 da/dN 随 ΔK 的变化规律

图3 da/dN 随 ΔK_{eff} 的变化规律图4 ΔK_{eff} 、 K_{op} 随 ΔK 的变化规律

不再保持垂直关系,虽然裂纹闭合效应和裂纹偏转对裂尖前进没有直接的阻碍作用,但它们都可降低裂尖处的应力强度因子幅值,从而起到保护裂尖的作用,故称这种效应为裂尖屏蔽(Crack tip shielding)。从本工作的研究结果可看出,尽管铝锂合金的本征裂纹扩展抗力不优于普通铝合金,但它具有高的裂纹闭合效应和明显的裂纹偏转特性,从而获得很高的裂尖屏蔽效应,这是铝锂合金具有优良的名义裂纹扩展

抗力的主要原因。疲劳裂纹扩展机制的研究表明:裂纹闭合效应一般来自裂尖后方塑变区的压应力、粗糙裂纹面的相互楔入作用和裂纹面氧化物,分别称之为塑变区诱发裂纹闭合效应、粗糙度诱发裂纹闭合效应和氧化物诱发裂纹闭合效应。铝锂合金同普通铝合金相比,塑变区诱发裂纹闭合效应差别不大,但由于铝锂合金共面滑移、强织构和扁平晶粒的综合作用,使之具有一种特有的脊骨状断口,其裂纹

面呈齿状排列的小平面有强的相互咬入或楔入作用,由此而获得很高的粗糙度诱发裂纹闭合效应。普通铝合金的疲劳开裂虽然也是以穿晶解理为主,但多数解理面与主裂纹面平行,故其粗糙度诱发裂纹闭合效应水平远低于铝锂合金。铝锂合金中含有锂,其氧化倾向大于普通铝合金,从断口表面亦可看出,铝锂合金断口表面有氧化产物,氧化迹象明显,较高的氧化物诱发裂纹闭合效应是铝锂合金的另一重要特性。接近门槛值时,氧化物诱发裂纹闭合效应作用更加明显。

由于铝锂合金沿晶稳定相和晶界无沉淀带的影响,使疲劳裂纹难以穿越晶界,又因其扁平晶粒的作用,在垂直裂纹扩展方向,疲劳裂纹被“准分散”到相互平行的薄带(扁平晶粒)中,应力状态由平面应变转为“准平面应力”状态,在宏观上表现为裂纹扩展抗力增大。尤其在晶粒粗大时,如图5(b)(8090合金断口),这

种效应更为明显。而强织构和共面滑移的联合效应,使裂纹易于沿粗滑移带扩展,而一般粗滑移带与外力呈 45° 角,从图4可看出,铝锂合金的疲劳裂纹易发生 45° 偏转,显示一种曲折的扩展路径。

4 结论

(1) 铝锂合金具有优良的疲劳长裂纹扩展抗力,其 da/dN 较普通铝合金低1~2个数量级,这归因于其高的裂尖屏蔽效应,而裂尖屏蔽源于裂纹闭合效应和裂纹偏转。

(2) 8090合金的本征门槛值与2024合金相近,而2090合金的本征门槛值较7075合金一般要低1/3左右。

(3) 铝锂合金的疲劳裂纹扩展断口形貌为脊骨状,由于裂纹面上呈齿状小平面的咬合或楔入作用,使之获得了很高的粗糙度诱发裂纹

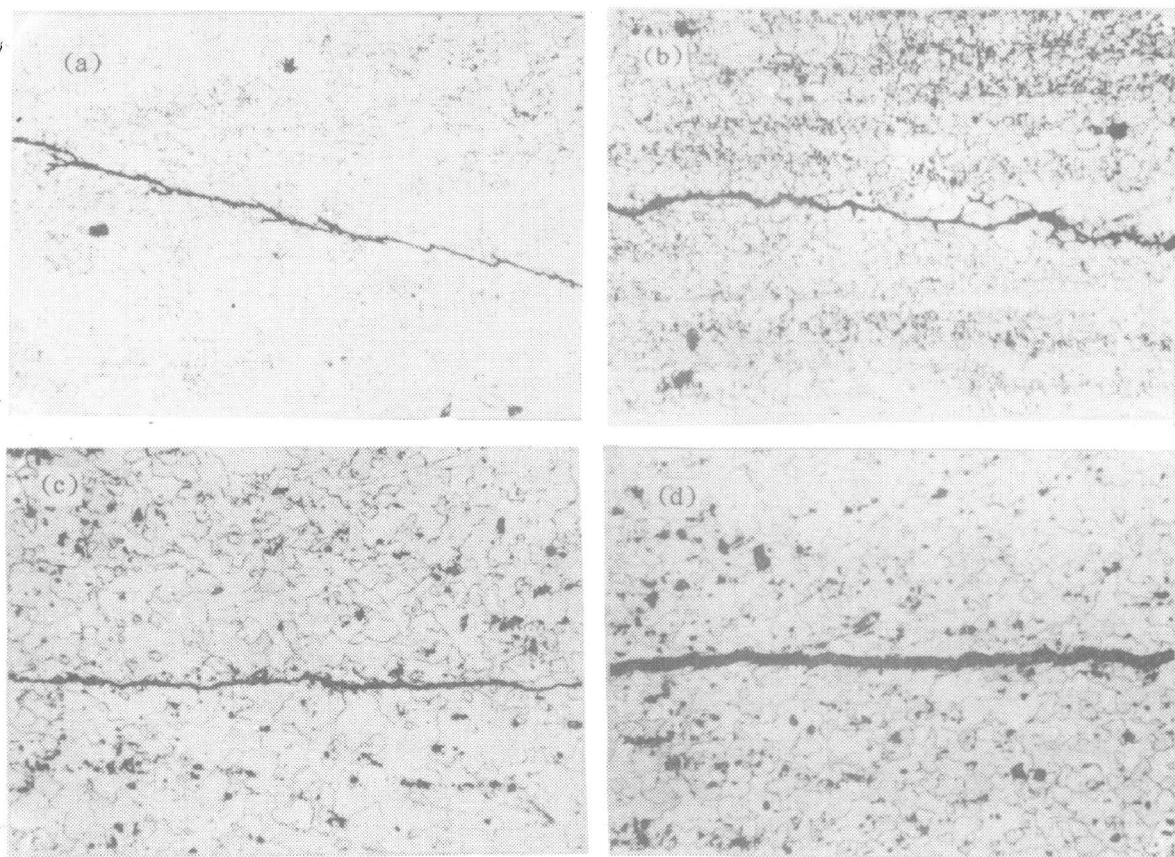


图5 四种合金的疲劳裂纹扩展路径

(a)—2090($\times 100$); (b)—8090($\times 100$); (c)—7075($\times 100$); (d)—2024($\times 100$)

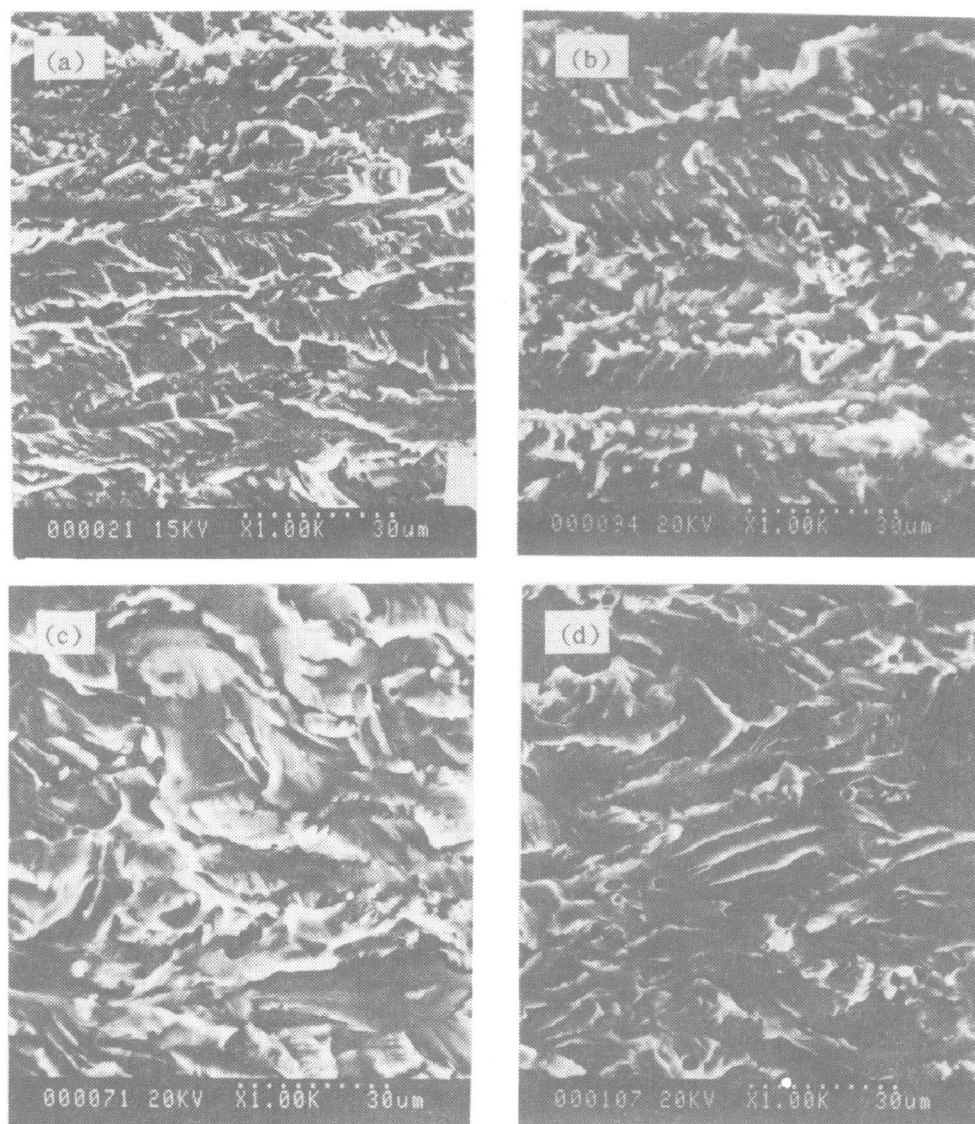


图6 四种合金近门槛值区的断口形貌

(a)—2090; (b)—8090; (c)—7075; (d)—2024

闭合效应;同时,由于锂的加入加剧了裂纹面上的氧化倾向,使氧化物诱发裂纹闭合效应增大,因之,铝锂合金具有较普通铝合金高的裂纹闭合效应。

(4) 由于平面滑移和强织构的联合效应,铝锂合金的疲劳裂纹易于沿粗滑移带扩展,因之而反复发生 45° 偏转。

(5) 由于扁平晶粒和沿晶稳定相等的综合作用,裂纹被“准分散”到相互平行的薄带中,从而使裂尖应力状态转入到“准平面应力”,宏观上也表现出裂纹扩展抗力增大。

参考文献

- 1 Venkateswara Rao K T, Yu W, Ritchie R O. Metall Trans, 1988;19A:549.
- 2 Nicholls D J, Martin J W. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 1990,13:83.
- 3 Kemp R N, Wilson R N and Gregson P J. Fatigue Fract Eng Mater, 1992,15:291.
- 4 Petit J, Ranganathan N. In: 6th International Aluminum Lithium Conference 1991, 521.