

微观组织对 2E12 铝合金疲劳裂纹扩展的影响

闫 亮^{1,2}, 杜凤山¹, 戴圣龙², 杨守杰²

(1. 燕山大学 机械与工程学院, 秦皇岛 066004;

2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 研究室温大气环境下 2E12 铝合金微观组织与疲劳裂纹扩展行为之间的关系, 并分别利用光学显微镜、透射电镜和扫描电镜对合金的微观组织及疲劳断口进行分析。结果表明: 合金的疲劳裂纹扩展速率与合金中微米级第二相粒子的体积分数成正比, 且随着亚微米级第二相粒子尺寸的增加及晶粒尺寸的减小, 合金的疲劳裂纹扩展速率明显降低, 尤其是在 Pairs 区及以后, 其值降低 30%; 在低速扩展区, 合金断口呈现脆性的准解理断裂特征, 在中速扩展区, 合金出现清晰的疲劳条纹。

关键词: 2E12 铝合金; 疲劳裂纹扩展; 晶粒; 微米级第二相; 亚微米级第二相

中图分类号: TG146.2; TG113.2

文献标志码: A

Effect of microstructures on fatigue crack propagation in 2E12 aluminum alloy

YAN Liang^{1,2}, DU Feng-shan¹, DAI Sheng-long², YANG Shou-jie²

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

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

Abstract: The interrelationship between microstructure and fatigue crack propagation behaviors of 2E12 aluminum alloys was investigated at room temperature in air. The microstructures and fatigue fracture surfaces of the alloy were examined by optical microscopy, transmission electron microscopy and scanning electron microscopy. The results show that the fatigue crack growth rate is proportional to the volume fraction of micro-sized second-phase particles. And with the increase of submicro-sized second-phase particles size and the decrease of grain size, the fatigue cracks propagate much slowly, reducing by 30% or more at Pairs region. In a low fatigue crack growth rate region, alloy shows quasi-cleavage fracture features. In a middle fatigue crack growth rate region, the fatigue striation features are clear.

Key words: 2E12 aluminum alloy; fatigue crack propagation; grain; micro-sized second-phase particles; submicro-sized second-phase particles

高强度 2×24 合金是航空工业中主要的结构材料, 其常用状态为 T3 态。改进的 2524 铝合金是在 2024 合金的基础上通过降低 Fe 和 Si 等杂质元素的含量而开发的新型高强铝合金, 与 2024 合金相比, 2524 铝合金具有优良的断裂韧性、疲劳性能和抗应力腐蚀性能^[1-2], 用于取代传统的 2024-T3 合金。该合金首先在波音 777 飞机上获得应用, 最近又被应用于 A380

大型客机^[3-5], 成为新一代航空结构材料, 被认为是目前最理想的飞机蒙皮材料。

国内关于 2524(2E12 合金)合金的研究还处于研制开发阶段, 相关的工艺还不成熟, 近期国内出现了一些关于此合金的相关报道^[6-10], 系统地研究了此合金在不同条件下的耐腐蚀性能及疲劳性能, 为该合金在国内的研究奠定了基础。但合金在其常用态 T3 态下

的疲劳裂纹扩展速率(在裂纹失端就历程强度因子幅值 $\Delta K < 33 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时发生断裂^[6, 8]还没有达到 AMS4296B 的要求(在 $\Delta K=33 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时 $da/dN=3.05 \times 10^{-3} \text{ mm/cycle}$)。基于此种状况,本文作者对自行研发及进口合金的性能和微观组织进行对比研究,从影响合金疲劳裂纹扩展速率的主要微观组织(晶粒、微米级第二相粒子及亚微米级第二相粒子等)出发,研究合金的微观组织与疲劳裂纹扩展速率之间的内在联系,探讨不同微观组织对该合金疲劳裂纹扩展速率的影响机制。

1 实验

实验材料为 2 mm 厚的 2E12-T3 态铝合金薄板材,化学成分见表 1。合金 1 为自行研制的合金板材,铸锭均匀化后经热轧、冷轧得到 2.2 mm 的板材,然后在(498±2) °C 固溶水淬,压光矫直至 2.0 mm,室温放置 96 h 以上最终成 T3 态。合金 2 为进口板材。疲劳裂纹扩展速率实验按中国国家标准 GB6398—86 的要求在 MTS-810 实验机上进行,应力比 $R=0.1$,疲劳裂纹扩展速率试样按照北京航空材料研究院标准 Q/6 S977—2004,试样示意图如图 1 所示。实验在室温、大气环境下进行。合金分别进行磨制、抛光、腐蚀制成金相试样,腐蚀剂为 Keller 试剂,其基本配比(体积分数)为 1.0%HF+1.5%HCl+2.5%HNO₃+95%H₂O。

利用 JSM-5600LV 扫描电镜和 JEM-2000FX 透射电镜分别进行断口分析及微观组织分析。

表 1 2E12 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2E12 aluminum alloy

Alloy No.	Mass fraction/%							
	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Ti	Cr	Al
1	4.0	1.4	0.06	0.06	0.6	0.02	<0.01	Bal.
2	4.19	1.42	0.11	<0.02	0.55	0.011	<0.01	Bal.

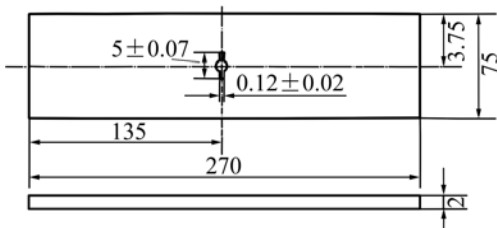


图 1 疲劳裂纹扩展速率试样的示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample for fatigue crack growth rate test (mm)

2 结果与分析

2.1 常规力学性能

表 2 所列为合金 1 和 2 的常规力学性能。由表 2 可以看出,两合金的抗拉强度一致,但是合金 1 的屈服强度及伸长率明显小于合金 2 的。

表 2 2E12 合金的常规力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2E12 aluminum alloy

Alloy No.	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta/\%$
1	458	323	17.7
2	458	331	20.5

2.2 疲劳裂纹扩展速率

图 2 所示为合金的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与裂纹尖端应力强度因子幅值 ΔK 的关系。可以看出,合金 2 的疲劳裂纹扩展速率明显低于合金 1 的疲劳裂纹扩展速率,尤其是在 Pairs 区之后这种规律表现得更为明显。

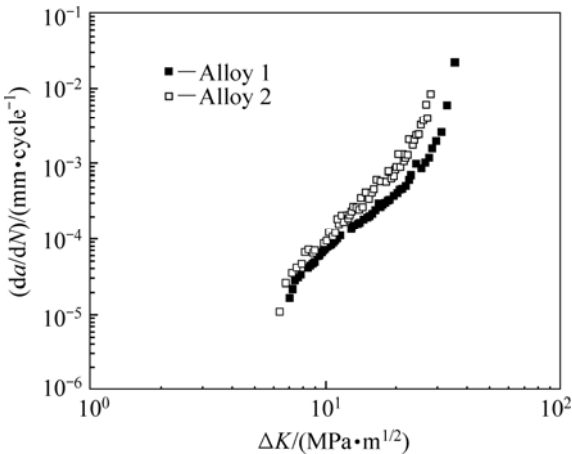


图 2 2E12 铝合金的疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 的关系

Fig.2 Relationship between fatigue crack growth rate and ΔK for 2E12 Al alloy

根据 Pairs 公式^[11]对 $da/dN-\Delta K$ 双对数坐标关系曲线中直线部分的数据进行拟合,合金 1 与 2 相应的 da/dN 与 ΔK 数学表达式分别如式(1)与(2)所示。表 3 所列为与材料性质相关的常数 C 和 n ,并定量地表征在相同 ΔK 时,2 种合金的疲劳裂纹扩展速率值,可知,合金 2 的疲劳裂纹扩展速率明显小于合金 1 的,在 $\Delta K=10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,其裂纹扩展速率降低了 30% 以上。

表 3 不同条件下合金的常数 C 和 n 以及不同 ΔK 时的 da/dN

Table 3 C and n of alloys under different conditions and da/dN at different ΔK

Alloy No.	C	n	$da/dN=C\Delta K^n/(\text{mm}\cdot\text{cycle}^{-1})$		
			$\Delta K=10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	$\Delta K=15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	$\Delta K=20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
1	7.91×10^{-8}	3.12	1.04×10^{-4}	3.69×10^{-4}	9.07×10^{-4}
2	1.72×10^{-7}	2.61	7.01×10^{-5}	2.02×10^{-4}	4.28×10^{-4}

$da/dN=7.91\times10^{-8}\Delta K^{3.12}$ (1)

$da/dN=1.72\times10^{-7}\Delta K^{2.61}$ (2)

2.3 合金的微观组织

2.3.1 晶粒形貌

图 3 和 4 分别为合金 1 和 2 的光学金相组织。由图 3 和 4 可以看出,两种合金都发生了再结晶;同时,可以看到两种合金中有较大尺寸的微米级第二相弥散分布在晶粒内部及晶界。合金 1 的晶粒尺寸较大,且

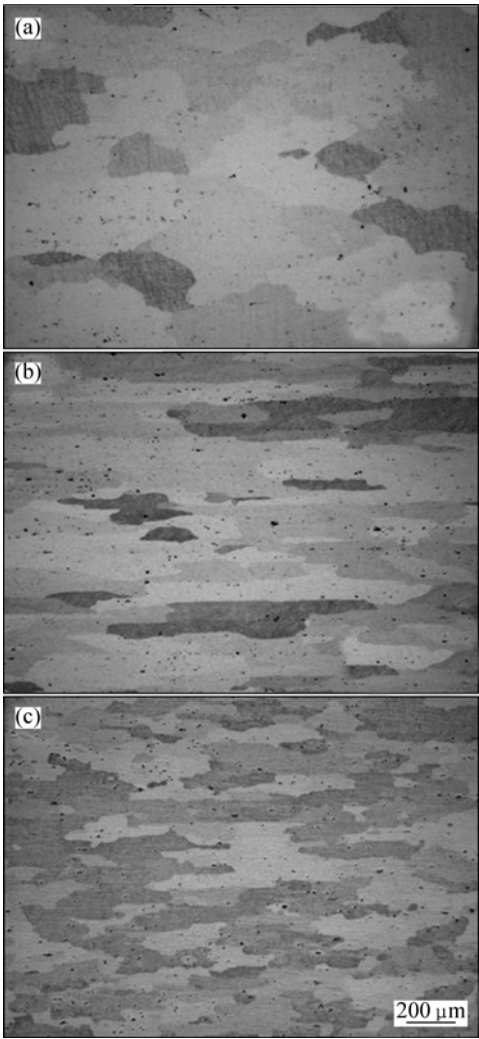


图 3 合金 1 的金相组织
Fig.3 Optical microstructures of alloy 1: (a) Rolling plane; (b) Longitudinal plane; (c) Transverse plane

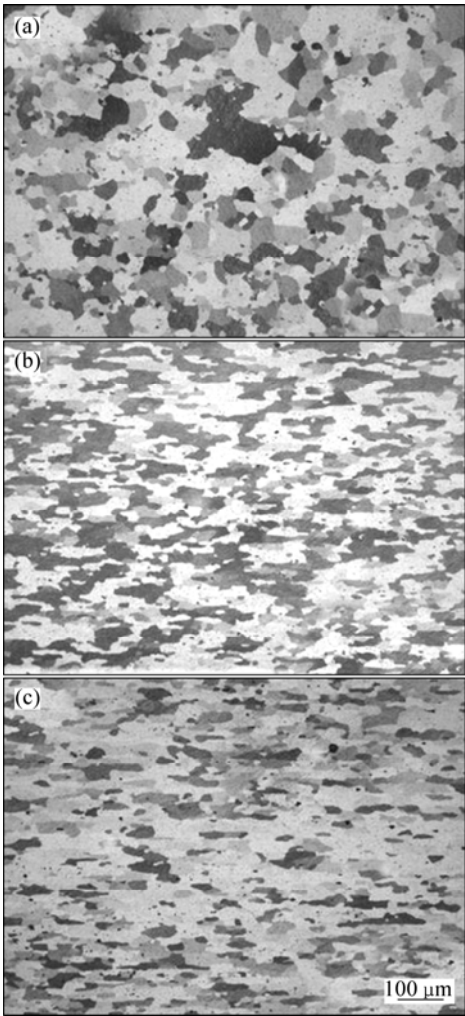


图 4 合金 2 的金相组织
Fig.4 Optical microstructures of alloy 2: (a)Rolling plane; (b)Longitudinal plane; (c)Transverse plane

轧制面上晶粒不规则,平均晶粒尺寸为 $150\text{ }\mu\text{m}$,厚度在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 左右。而合金 2 的晶粒尺寸较小,轧制面上晶粒呈现饼状特征,平均直径约为 $70\text{ }\mu\text{m}$,厚度约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3.2 微米级第二相粒子

图 5 所示为合金 1 和 2 中微米级第二相粒子的 SEM 像。由图 5 可看出,第二相粒子主要为 Al_2CuMg 和 Al_2Cu 未溶相及含 Fe、Si 的杂质相^[12],合金 2 中的

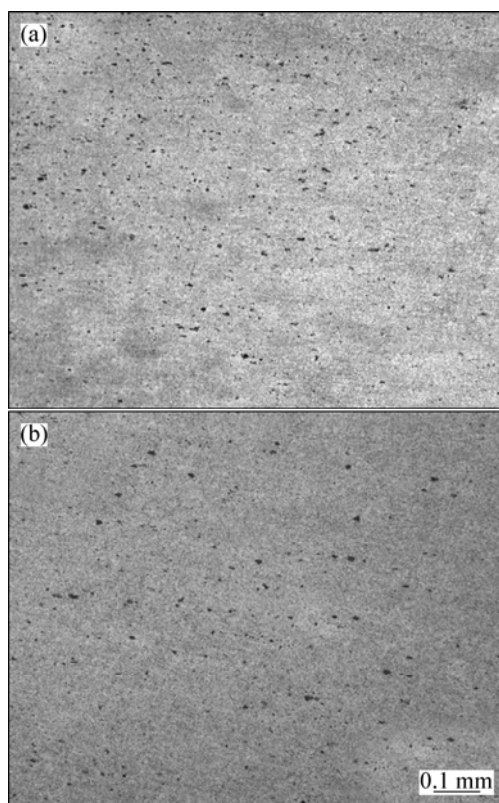


图 5 合金中微米级第二相粒子的 SEM 像

Fig.5 SEM images of micro-sized second-phase particles in alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

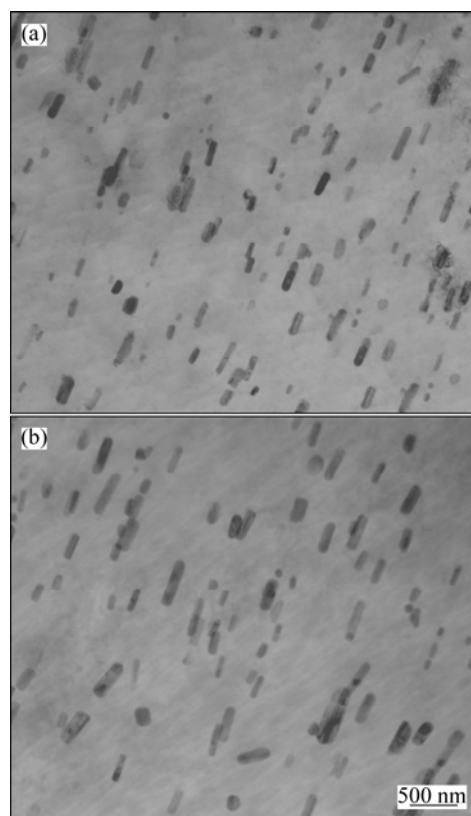


图 6 合金中亚微米级第二相粒子的 TEM 像

Fig.6 TEM images of submicro-sized second phase particles in alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

微米级第二相粒子数量要明显少于合金 1 中第二相的数量。利用 Image-Pro Plus 6.0 分析软件对合金中的微米级第二相粒子进行定量统计,合金 1 和 2 中微米级第二相粒子的体积分数分别为 0.77%和 0.38%。由此可见,合金 2 中的微米级第二相的体积分数比合金 1 中第二相粒子的体积分数减少了 50%左右。

2.3.3 亚微米级第二相粒子

图 6 所示为合金 1 和 2 中的亚微米级第二相粒子的 TEM 像。由图 6 可看出,亚微米级第二相粒子主要为棒状的 AlCuMn 相^[12],合金 1 中的亚微米级棒状相平均长度在 200 nm 左右,合金 2 中的亚微米级棒状相尺寸在 300 nm 左右,合金 2 中棒状相间距较宽。

2.4 断口分析

图 7 所示为应力强度因子幅值 $\Delta K=7.87 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 处合金的断口形貌。由图 7 可以看出,在较小的 ΔK 时,两种合金的断口形貌为准解理断裂,均呈现脆性断裂的特征,合金 2 的断口较为粗糙,说明裂纹偏转较明显。

图 8 所示为 $\Delta K=20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 处合金的断口形貌。

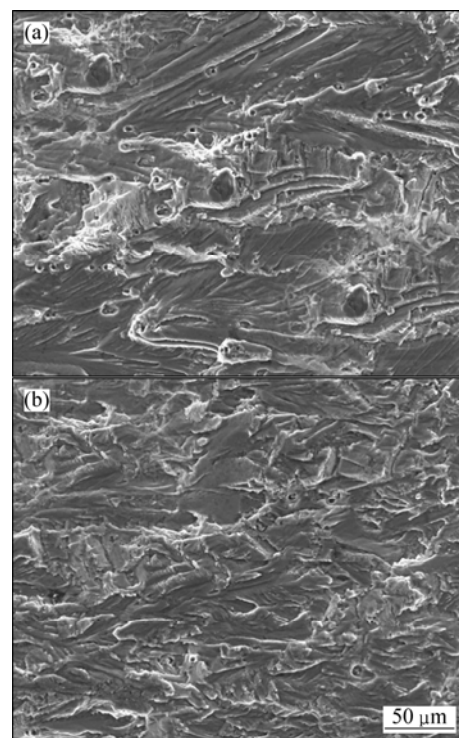


图 7 $\Delta K=7.87 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 处合金的断口形貌

Fig.7 Morphologies of fractures at $\Delta K=7.87 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ for alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

由图 8 可看出, 随着 ΔK 的增大, 合金疲劳断口的塑性特征增强。可以看出, 合金 1 的断口形貌表现出疲劳条纹和韧窝混合型的特征, 说明此时合金 1 的疲劳裂纹扩展进入稳定扩展与快速扩展阶段的过渡阶段 (见图 8(a)); 合金 2 的断口形貌仍以疲劳条纹特征为主 (见图 8(c)), 并伴随少量的二次裂纹。由高倍放大图 (见图 8(b) 和 (d)) 可以看出, 合金 1 的疲劳条纹间距明显大于合金 2 的疲劳条纹间距, 这也说明合金 2 相对合金 1 具有较低的疲劳裂纹扩展速率。

图 9 所示为合金瞬断区的断口形貌。由图 9 可以看出, 瞬断区均为典型的韧窝型穿晶断裂, 韧窝源于微米级第二相粒子, 合金 1 的韧窝较多, 且韧窝小而浅, 而合金 2 的韧窝明显减少, 且韧窝大而深。这是由于合金 2 中微米级第二相粒子的体积分数减少, 粒子的间距相对增大, 使断裂时各韧窝的形核间距加大, 断裂时韧窝与韧窝之间的长大及连接随着断裂形核间距的加大而推迟, 继而使韧窝尺寸变大, 并且在断裂前需要吸收更多的能量, 使合金在较高的 ΔK 下不断裂。

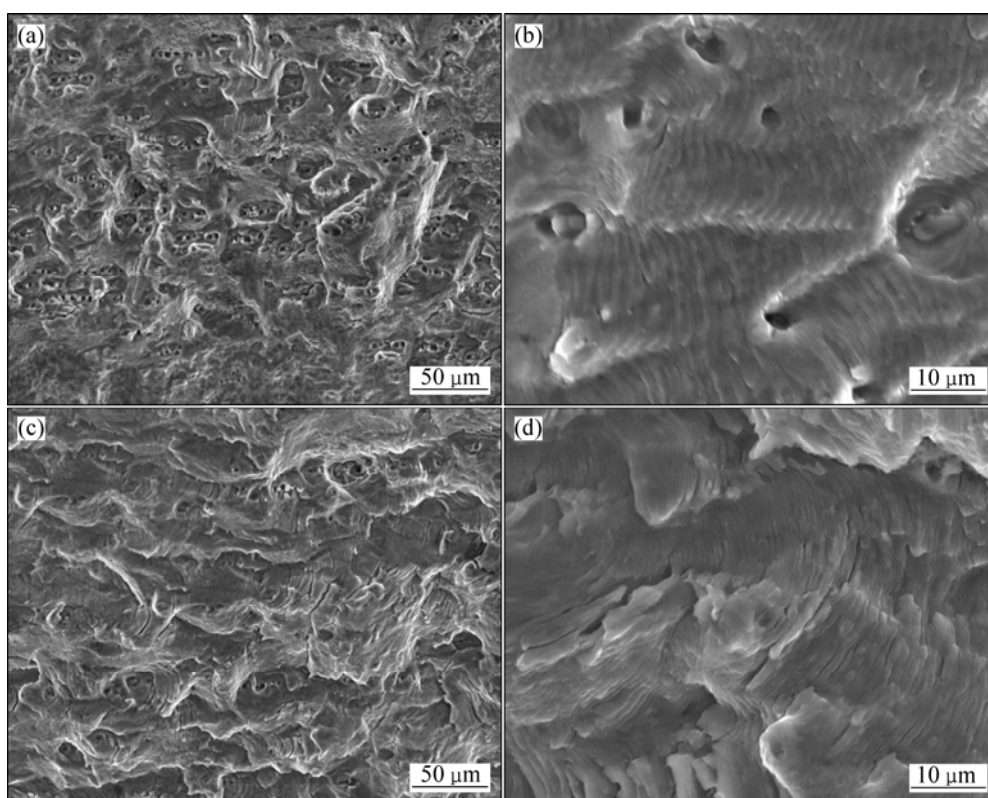


图 8 $\Delta K=20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 处合金的断口形貌

Fig.8 Morphologies of fractures at $\Delta K=20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ for alloys: (a) Alloy 1; (b) Higher magnification for (a); (c) Alloy 2; (d) Higher magnification for (c)

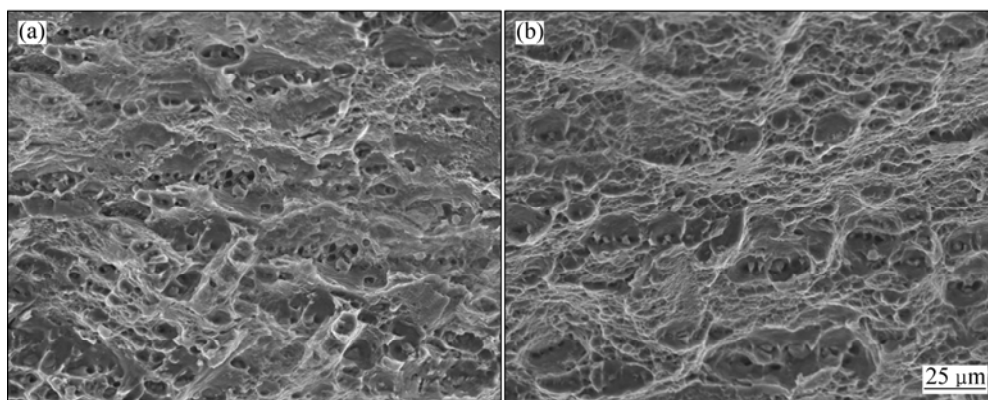


图 9 合金瞬断区的断口形貌

Fig.9 Morphologies of final fracture zone for alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

3 讨论

对于 $2 \times \times \times$ 铝合金, 影响其疲劳裂纹扩展速率的微观因素有晶粒尺寸、微米量级第二相粒子、纳米量级的细小时效强化相以及尺寸介于以上两相之间的亚微米量级的中间尺寸第二相颗粒等。在本研究中, 因合金都为 T3 状态, 两种合金时效析出相的影响因素相同。

1) 晶粒尺寸的影响。根据 2.3.1 部分对合金晶粒的定量分析可知, 合金 2 的晶粒尺寸明显减小, 则其在循环加载过程中产生的粗糙度诱发裂纹闭合的效应就更强烈, 并导致强烈的裂纹屏蔽效应, 使其具有较高的疲劳裂纹抗力, 降低疲劳裂纹扩展速率。同时, 晶界也会对裂纹扩展直接起阻碍作用, 晶粒尺寸较小时, 其晶界数量增多, 对裂纹扩展的阻碍作用增大, 导致了更大的裂纹扩展抗力, 使合金的裂纹扩展速率降低。这与 FAN 等^[13]及 HIRAMATSU 等^[14]的研究结果一致。

2) 不同尺寸第二相粒子的影响。合金中的第二相粒子也会对合金的疲劳裂纹扩展速率起重要作用。由 2.3.2 部分可知, 合金 1 中微米级第二相粒子的体积分数较大, 则在循环载荷作用下, 第二相粒子阻碍位错滑移的能力就越强, 塞积在第二相粒子附近的位错数量就越多, 相应产生的应力集中也越强, 当局部应力集中超过第二相粒子本身的断裂强度或与其与基体的结合强度时, 第二相粒子破碎, 或者沿界面与基体分离^[12, 15]。第二相粒子本身的这种性能为疲劳裂纹提供优先扩展的路径, 这些扩展路径的出现降低疲劳裂纹扩展所需的能量, 使裂纹更易于扩展, 从而随着微米级第二相粒子体积分数的增多势必会降低疲劳裂纹的扩展抗力, 进而提高疲劳裂纹扩展速率。

亚微米级第二相粒子尺寸的增大也可以降低疲劳裂纹扩展速率。这是由于当亚微米级第二相粒子尺寸与裂纹尖端张开位移相当时, 在卸载过程中, 粒子与裂纹面将发生接触, 引起裂纹闭合, 即发生“桥接效应”。这种中间尺寸第二相颗粒的“桥接效应”得到 SURESH 和 RITCHIE^[16]研究的证实。图 10 所示为亚微米级第二相粒子桥接作用的示意图, 形象地表示了较大尺寸粒子的桥接效应。由 2.3.3 部分的分析可知, 合金 1 中亚微米级的第二相粒子尺寸较小, 在循环载荷卸载过程中不能发挥“桥接效应”, 降低裂纹闭合的程度, 裂纹扩展的有效驱动力相对较大, 使裂纹扩展速率增大。

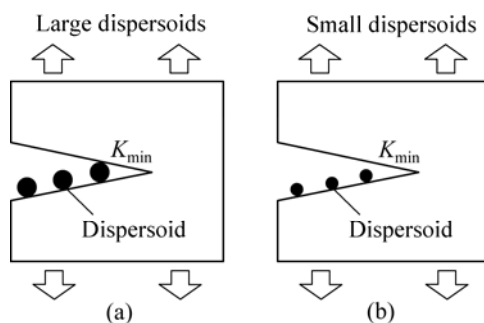


图 10 粒子间的桥接作用示意图^[16]

Fig.10 Schematic diagram of bridging effect among particles^[16]: (a) Large dispersoids; (b) Small dispersoids

由此可见, 减少微米级第二相粒子的体积分数及适当增加亚微米级第二相的尺寸能降低疲劳裂纹扩展速率。

4 结论

1) 2E12 铝合金的疲劳裂纹扩展速率与合金中的微米级第二相的体积分数成正比, 且随着亚微米级第二相尺寸的增加及晶粒尺寸的减小, 合金的疲劳裂纹扩展速率明显降低, 尤其是在 Pairs 区及以后, 其值降低了 30%以上。

2) 在低速扩展区, 合金断口呈现脆性的准解理断裂特征; 在中速扩展区, 合金断口呈现清晰的条带特征; 在瞬断区, 断口呈现典型的韧窝特征。

REFERENCES

- [1] GOLDEN P J, GRANDT A F, BRAY G H. A comparison of fatigue crack formation at holes in 2024-T3 and 2524-T3 aluminum alloy specimens [J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(1): S211-S219.
- [2] BRAY G H, BUCCI R J, COLVIN E L, KULAK M. Effect of prior corrosion on the S/N fatigue performance of aluminum sheet alloys 2024-T3 and 2524-T3 [C]// van der SLUYS W A, PIASCIK R S, ZAWIERUCHA R. Effects of Environment on the Initiation of Crack Growth. ASTM STP 1298. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1997.
- [3] STARKE E A, STALEYT J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2/3): 131-172.
- [4] CASSADA W, LIU J, TALRY J. Aluminum alloys for aircraft

- structure [J]. *Advanced Materials & Processes*, 2002, 160(12): 27–29.
- [5] 陈 文. 先进铝合金在 A380 上的应用[J]. *航空维修与工程*, 2005(2): 40–41.
- CHEN Wen. Application of advanced aluminum alloys in A380 structures [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2005(2): 40–41.
- [6] 刘 岗, 郑子樵, 杨守杰, 戴圣龙, 李世晨. 2E12 铝合金的疲劳寿命与裂纹扩展行为的研究[J]. *机械工程材料*, 2007, 31(11): 65–68.
- LIU Gang, ZHENG Zi-qiao, YANG Shou-jie, DAI Sheng-long, LI Shi-chen. The fatigue performance and fatigue crack propagation behavior of 2E12 Al alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, 31(11): 65–68.
- [7] LIU Yan-bin, LIU Zhi-yi, LI Yun-tao, XIA Qin-kun, ZHOU Jie. Enhanced fatigue crack propagation resistance of an Al-Cu-Mg alloy by artificial aging [J]. *Mater Sci Eng A*, 2008, 492(1/2): 333–336.
- [8] 孙晓旭. 2E12+Zr 铝合金的热处理与微观组织及力学性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 52–63.
- SUN Xiao-xu. The heatment, microstructures and mechanical properties of 2E12+Zr aluminum alloy [D]. Changsha: Central South University, 2008: 52–63.
- [9] 李 海, 王芝秀, 魏修宇, 郑子樵. 固溶处理时间对 2E12 铝合金组织和疲劳性能的影响[J]. *航空学报*, 2009, 30(1): 148–152.
- LI Hai, WANG Zhi-xiu, WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao. Effect of solution treatment time on microstructures and fatigue properties of aluminum alloy 2E12 [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(1): 148–152.
- [10] 杨 胜, 易丹青, 姚素娟, 钟 利. 热处理对 2E12 铝合金耐腐蚀性及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2007, 32(9): 9–13.
- YANG Sheng, YI Dan-qing, YAO Su-juan, ZHONG Li. Effect of heat treatment on corrosion resistance and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 32(9): 9–13.
- [11] DESMUKH M N, PANDEY R K, MUKHOPADHYAY A K. Effect of aging treatments on the kinetics of fatigue crack growth in 7010 aluminum alloy [J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 435/36: 318–326.
- [12] 杜凤山, 闫 亮, 戴圣龙, 杨守杰. 高强铝合金疲劳特性研究[J]. *航空材料学报*, 2009, 29(1): 96–100.
- DU Feng-shan, YAN Liang, DAI Sheng-long, YANG Shou-jie. Study on fatigue performance of high strength aluminum alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(1): 96–100.
- [13] FAN Xi-gang, JIANG Da-ming, ZHONG Li, WANG Tao, REN Shi-yu. Influence of microstructure on the crack propagation and corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloy 7150 [J]. *Materials Characterization*, 2007, 58(1): 24–28.
- [14] HIRAMATSU T, CHIKUDA M, MIYAQI Y, NAGAO K. Relationship between stress corrosion resistance and grain shape of heavy section Al-Zn-Mg extrusion [J]. *J Jap Inst Light Metals*, 1972, 22(12): 701–709.
- [15] BROEK D. Role of inclusions in ductile fracture and fracture toughness [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1973, 5: 55–66.
- [16] SURESH S, RITCHIE R O. Propagation of short fatigue cracks [J]. *International Metals Review*, 1984, 29: 455–476.

(编辑 杨 华)