

# 2397 合金高周疲劳性能及裂纹萌生扩展行为

范雪松, 郑子樵, 张 龙, 胡 芳, 龚 铸

(中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 研究了 2397-T87 铝锂合金的高周疲劳性能及裂纹萌生扩展行为。结果表明: 在应力比  $R=0.1$  时, 2397-T87 铝锂合金 L 方向、LT 方向和 ST 方向光滑试样 ( $K_t=1.0$ ) 的疲劳寿命极限分别约为 192, 243 和 151 MPa; 缺口试样 ( $K_t=3.0$ ) 的疲劳寿命极限分别约为 72, 78 和 70 MPa。其疲劳裂纹主要萌生于试样表面, 以及氧化物、夹杂等脱落形成的空洞, Al (CuFeMn) 第二相杂质粒子。驻留滑移带 (PSB) 和晶粒取向对其疲劳裂纹早期扩展有重要影响。

**关键词:** 2397 合金; 高周疲劳性能; 裂纹萌生; 裂纹扩展

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1327-07

铝锂合金具有较低的密度、较高的比强度和比刚度、良好的耐损伤性能和加工成形性能等, 能够满足航空航天用结构对轻量化材料的需求<sup>[1,2]</sup>。2X97 系列铝锂合金包括 2097、2197、2297、2397 等 Al-Cu-Li-Mn-Zr 系第 3 代新型铝锂合金。其中 2097、2197 合金已经被用来取代 2124 铝合金制造 F16 战机的隔框, 可提高 1 倍的构件服役时间<sup>[3]</sup>; 2297 合金因其提高了 5 倍的疲劳寿命而被考虑用来取代 2124-T851 合金<sup>[4]</sup>; 2397 合金产品形式主要为厚板(38~152 mm), 热处理状态为 T87 态, 可部分取代传统 7050 合金厚板产品, 主要用于机身框梁、横桁、舱段隔框等对疲劳性能和应力腐蚀性能较高要求的部位。

作为飞机结构部件, 材料的疲劳性能是最重要的性能指标之一, 而国内外尚未见 2397 合金高周疲劳性能的研究报道。本实验针对我国大飞机用结构材料的需求背景, 研究 130 mm 厚的 2397-T87 合金不同取样方向的高周疲劳性能, 并结合其微观组织分析疲劳裂纹萌生和扩展机理, 以期对 2397 铝锂合金超厚板的性能优化与应用提供参考。

## 1 实 验

试验所用材料为国外某铝业公司工业化生产的 130 mm 厚 2397 铝锂合金板材, 供货热处理状态为 T87 态, 成分范围(质量分数, %)为: 2.5~3.1Cu、1.1~1.7Li、0.25Mg、0.1~0.5Mn、0.08~0.15Zr、0.05~0.15Zn、0.12Ti, 余量为 Al。其 T/2 处的常规拉伸性

能测试结果如表 1 所列。图 1 所示为合金 T/2 处的三维金相图, 可知合金晶粒尺寸较大, 呈煎饼状, 且沿轧制方向被拉长。

高周疲劳实验参照 ASTM-E466、E749 及 GB3075 标准, 在 PLG-100 疲劳试验机上进行。在室温、实验室空气环境下进行试验, 加载频率为 100~130 Hz, 应力比为  $R=0.1$ 。在厚板 T/2 处沿 L、LT 及 ST 方向取样,

表 1 2397-T87 合金 T/2 处的常规拉伸性能

Specimen orientation	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	$E$ /GPa
L	472	421	9.5	70
LT	462	410	6.5	69
ST	444	381	5.0	68

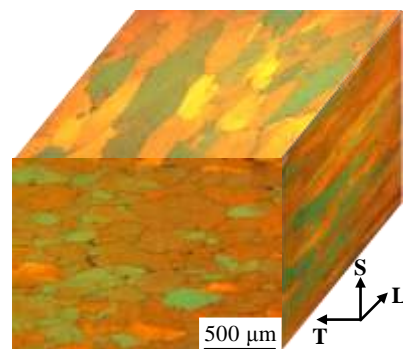


图 1 2397-T87 合金 T/2 处的三维金相组织

Fig.1 Triplanar optical micrograph of 2397-T87 alloy at T/2 layer

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(“973”计划)(2012CB619503)

作者简介: 范雪松, 男, 1991 年生, 硕士生, 中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083, 电话: 0731-88830270, E-mail: 593404902@qq.com

采用光滑试样（缺口系数  $K_t=1.0$ ）和缺口试样（缺口系数  $K_t=3.0$ ）进行实验。试验前，采用 SiC 金相砂纸对试样表面进行打磨至表面光亮。在厚板 T/2 处沿 ST 方向截取光滑试样，在 MTS 810 疲劳试验机上进行疲劳裂纹萌生实验，实验频率为 50 Hz，应力比  $R=0.1$ ，循环加载至试样表面萌生出肉眼可见微裂纹为止。切取试样微裂纹部位，用硝酸甲醇溶液进行电解抛光消除表面应力后，立即放到 Sirion 200 型场发射扫描电镜下进行 EBSD 观察，对裂纹萌生区进行 ODF 分析。在 Quanta-200 环境扫描电镜上观察断口形貌和裂纹萌生、扩展形貌。加速电压为 25 kV，能谱分析在 GENE SIS60E 能谱仪上进行。

## 2 实验结果

### 2.1 高周疲劳性能

图 2 为 2397 铝锂合金厚板不同取样方向（L、LT 和 ST 方向），应力比  $R=0.1$  时光滑试样（ $K_t=1.0$ ）和缺口试样（ $K_t=3.0$ ）的  $S-N$  曲线。由图可知，随着循环加载应力的降低，疲劳试样的循环周次增加，循环周次达到  $10^7$  左右时， $S-N$  曲线趋于水平。疲劳极限用升降法测得，相关数据列于表 2， $q_f$  表示缺口敏感度（ $q_f=(K_f-1)/(K_t-1)$ ，其中  $K_f$  为光滑试样与缺口试样的疲劳极限之比， $K_t$  为试样的理论应力集中系数即缺口系

数），其值越大则表示材料的缺口敏感性越大。相同应力集中系数条件下，不同取向试样的疲劳寿命极限具有各向异性。 $K_t=1.0$  时，LT 方向光滑试样的疲劳性能最好，其次是 L 方向，ST 方向疲劳性能最差； $K_t=3.0$  时，LT 方向缺口试样疲劳性能仍然最优，L 方向和 ST 方向则相差不大。相同取样方向条件下，缺口试样的疲劳寿命极限明显低于光滑试样，表明在周期性动态载荷作用下，试样缺口处由于存在较大的应力集中而更容易产生局部塑性变形导致裂纹萌生。

图 3 为 2397-T87 合金厚板 L 方向、LT 方向和 ST 方向光滑试样在应力比  $R=0.1$  时的疲劳断口形貌。由图 3a, 3e, 3i 疲劳宏观断口形貌可知，不同方向光滑试样的疲劳断口均包括疲劳裂纹源区（I 区）、稳态扩展区（II 区）和快速断裂区（III 区）3 个区域；L 方向和 LT 方向的断口比较粗糙，LT 方向“沟”和“脊”的凹凸形貌明显，L 方向则出现垂直于断裂方向的二次开裂，ST 方向断口则比较平坦。图 3b, 3f, 3j 为不同方向合金的疲劳源及早期裂纹扩展区断口形貌，3 个方向的疲劳试样均仅有 1 个萌生于试样表面的疲劳源，可以看到裂纹由此处呈放射状向周围扩展；断口表现出明显的晶体学特征，宏观上表现为高低不平的晶体学小平面对及河流状花样，LT 方向的放射状条纹较深、曲度较大，小刻面密度较大，而 ST 方向的放射

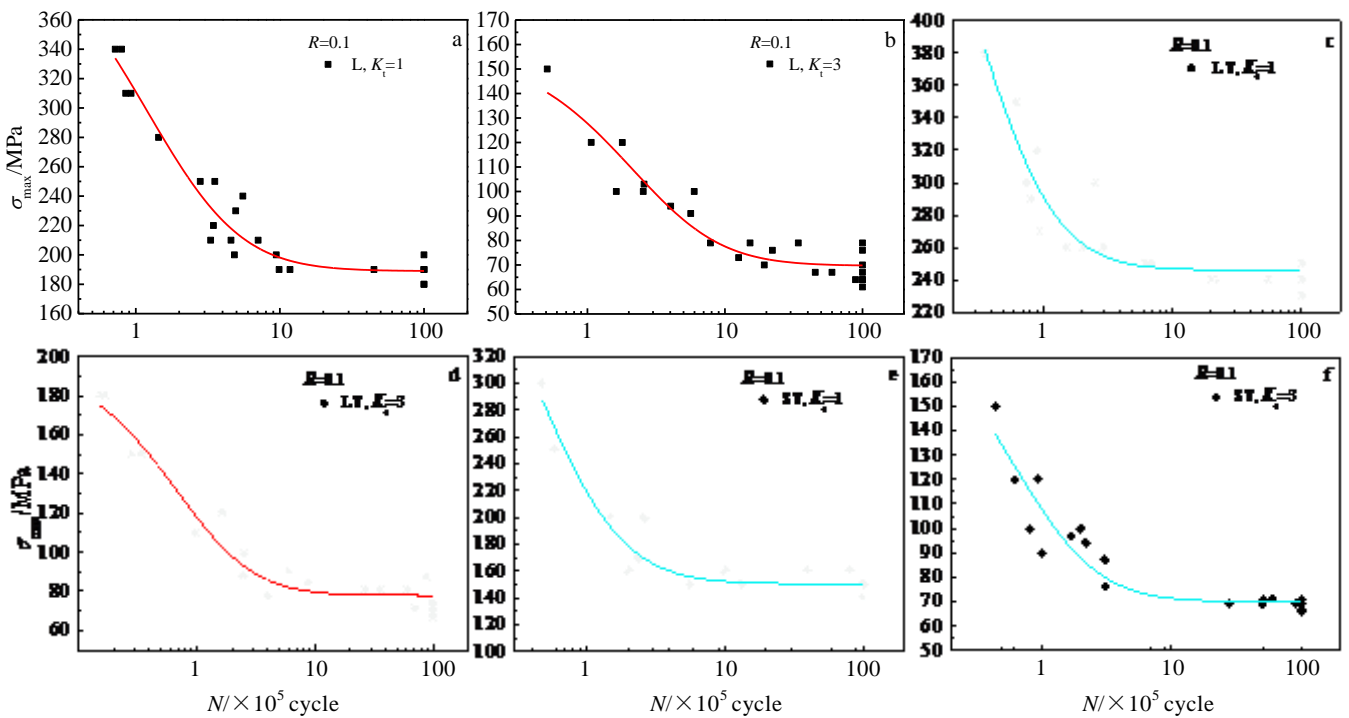


图 2 2397 铝锂合金光滑和缺口试样的  $S-N$  曲线

Fig.2  $S-N$  curves of smooth specimen and notch specimen of 2397 Al-Li alloy: (a) L orientation,  $K_t=1.0$ ; (b) L orientation,  $K_t=3.0$ ; (c) LT orientation,  $K_t=1.0$ ; (d) LT orientation,  $K_t=3.0$ ; (e) ST orientation,  $K_t=1.0$ ; (f) ST orientation,  $K_t=3.0$

表 2 2397 铝锂合金光滑和缺口试样的疲劳极限和缺口敏感度

Table 2 Fatigue limit and notch sensitivity of smooth specimen and notch specimen of 2397 Al-Li alloy ( $R=0.1$ )

Specimen condition	Notch factor	Orientation	$\sigma_N/\text{MPa}$	$\sigma_N/\sigma_{0.2}$	$q_f$
2397-T87	$K_t=1.0$	L	191.7	45.5%	0.840
	$K_t=3.0$		71.5	17.0%	
	$K_t=1.0$	LT	243	59.3%	0.564
	$K_t=3.0$		77.7	19.0%	
	$K_t=1.0$	ST	151	39.6%	0.580
	$K_t=3.0$		69.9	18.3%	

状条纹较平直、细浅，L 方向则介于两者之间，反映出早期裂纹扩展的难易程度为：LT 方向 > L 方向 > ST 方向。由图 3c, 3g, 3k 不同方向光滑试样稳态扩展区断口局部放大图知，不同试样晶粒内部疲劳辉纹也有明显差异，LT 方向疲劳辉纹最细密，测量出相邻辉纹间间距约为 770 nm，且具有少量较浅的二次裂纹；L

方向疲劳辉纹间距约为 1200 nm，有部分二次裂纹出现；ST 方向疲劳辉纹间距约为 800 nm，但辉纹不是很明显，且出现大量严重开裂的二次裂纹。不同方向疲劳试样的快速断裂区形貌如图 3d, 3h, 3l 所示，其形貌差异与不同取向拉伸断口相似，L 方向和 LT 方向是以穿晶断裂为主的混合型断裂，可以观察到大量的韧窝，ST 方向则是以沿晶断裂为主的混合型断裂。

### 2.2 疲劳裂纹的萌生及早期扩展

图 4 为 2397 铝锂合金疲劳裂纹萌生处的 SEM 像和相关能谱分析图。图 4a 为疲劳裂纹在试样边缘萌生并向内部扩展的 SEM 照片，边缘区域容易产生应力集中，成为微裂纹首先萌生的区域。图 4b 为疲劳裂纹在试样表面微孔处萌生和扩展的 SEM 照片，空洞的形成主要可能为熔炼加工过程中引入的气孔或是一些氧化物、夹杂等脱落产生的缺陷。对图 4b 的空洞附近进行 EDS 分析（见图 4c），发现为氧化铝的残留物，说明该孔洞为氧化物在循环加载过程中脱落而形成的。图 4d 为微裂纹在第二相粒子处萌生的 SEM 照片，微裂

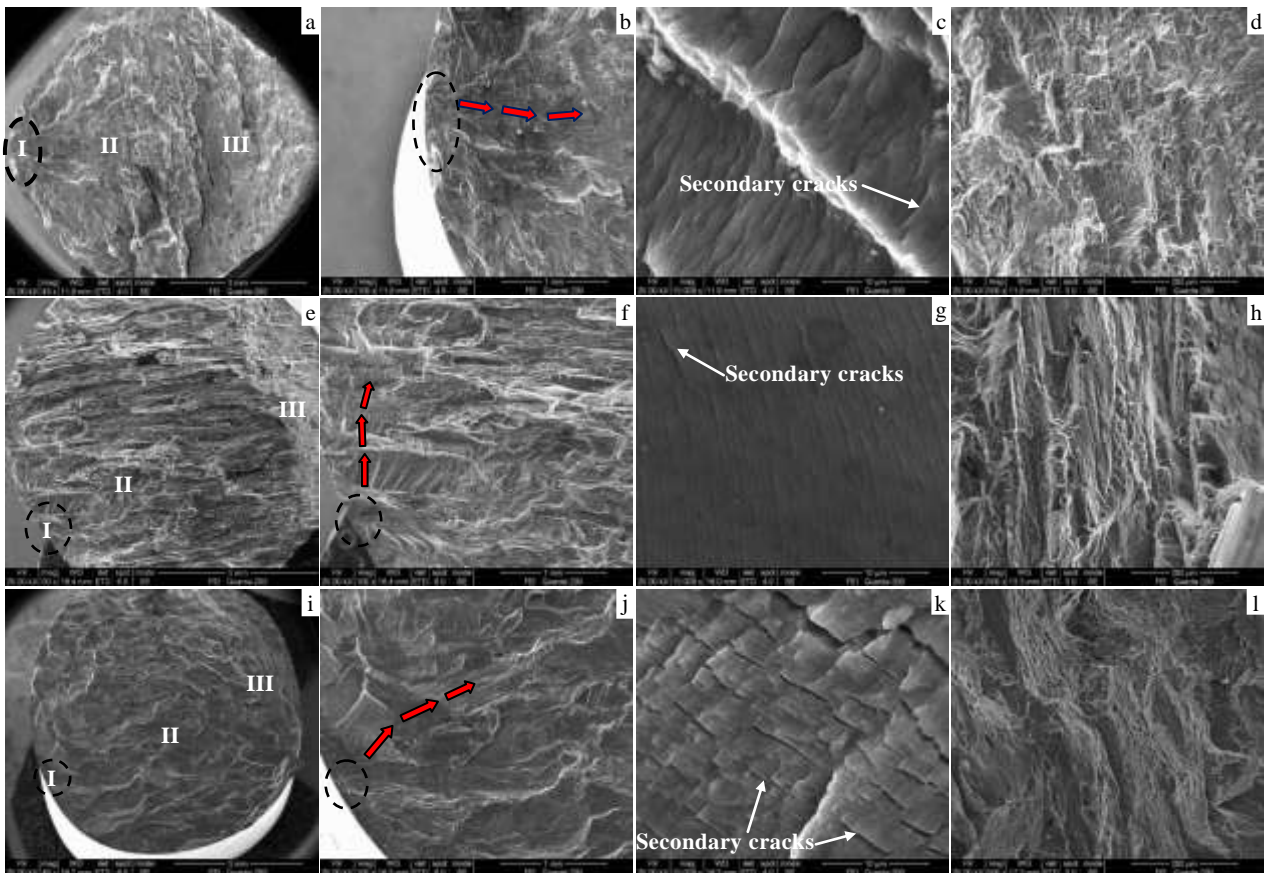


图 3 2397-T87 合金厚板不同方向光滑试样的疲劳断口

Fig.3 Fatigue fractographies of smooth specimens: three different fracture regions, (a) L orientation, (e) LT orientation, (i) ST orientation; fatigue crack initial stage, (b) L orientation, (f) LT orientation, (j) ST orientation; region of stable crack growth, (c) L orientation, (g) LT orientation, (k) ST orientation; fast fracture zone, (d) L orientation, (h) LT orientation, and (l) ST orientation



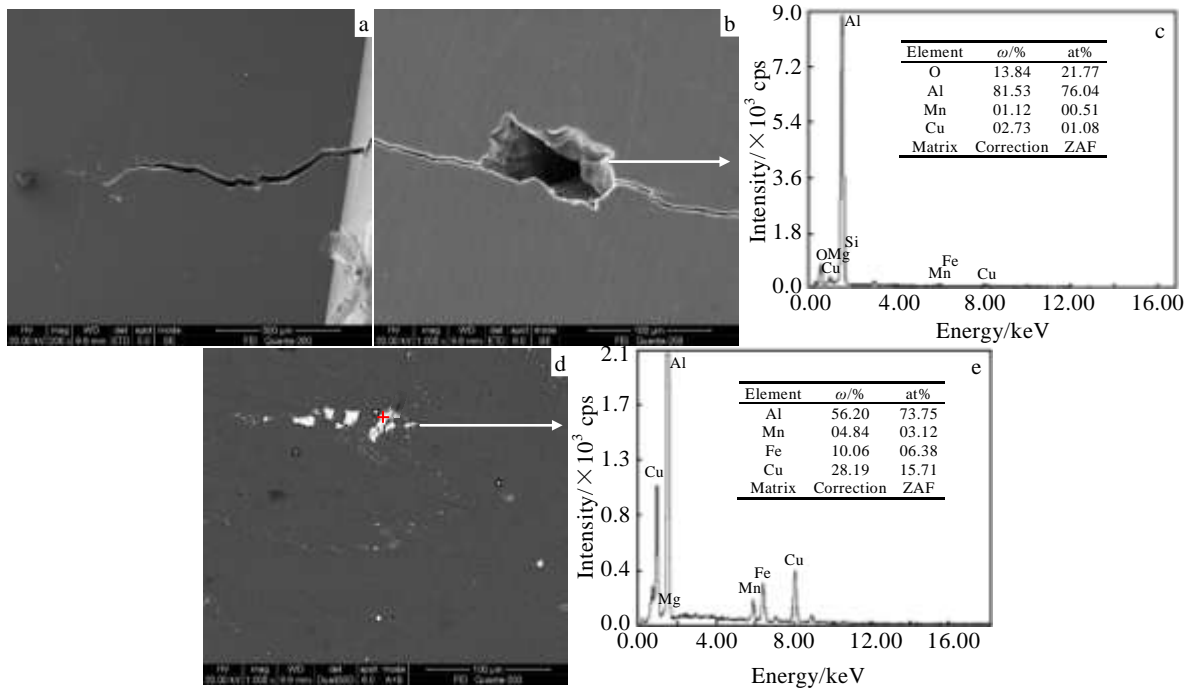


图 4 2397 铝锂合金疲劳裂纹萌生的 SEM 照片及 EDS 分析结果

Fig.4 SEM images (a, b, d) of fatigue crack initiation and corresponding EDS results (c, e) of 2397 Al-Li alloy

纹在粗大的第二相粒子中间开裂并向基体扩展，由图 4e 的 EDS 结果分析表明，该第二相粒子主要为 Al (CuFeMn) 杂质相。该粒子本身比较硬而脆，其弹性模量与基体具有较大差别，在高应力作用下，本身由于产生较大局部应力集中而开裂导致裂纹萌生。

图 5 为 2397 铝锂合金疲劳裂纹早期扩展的 SEM 照片

照片。从裂纹扩展路径整体形貌图可以观察到，裂纹在扩展过程中会改变方向，发生路径偏折，但整体扩展方向与加载方向垂直。图 5a, 5b, 5c, 5d 所示为裂纹 a、b、c 和 d 4 个位置局部放大图，可以看出，循环应力作用下，裂纹在扩展过程中，其周围会发生明显的塑性变形，位错滑移遇到晶界等较弱的位置发生

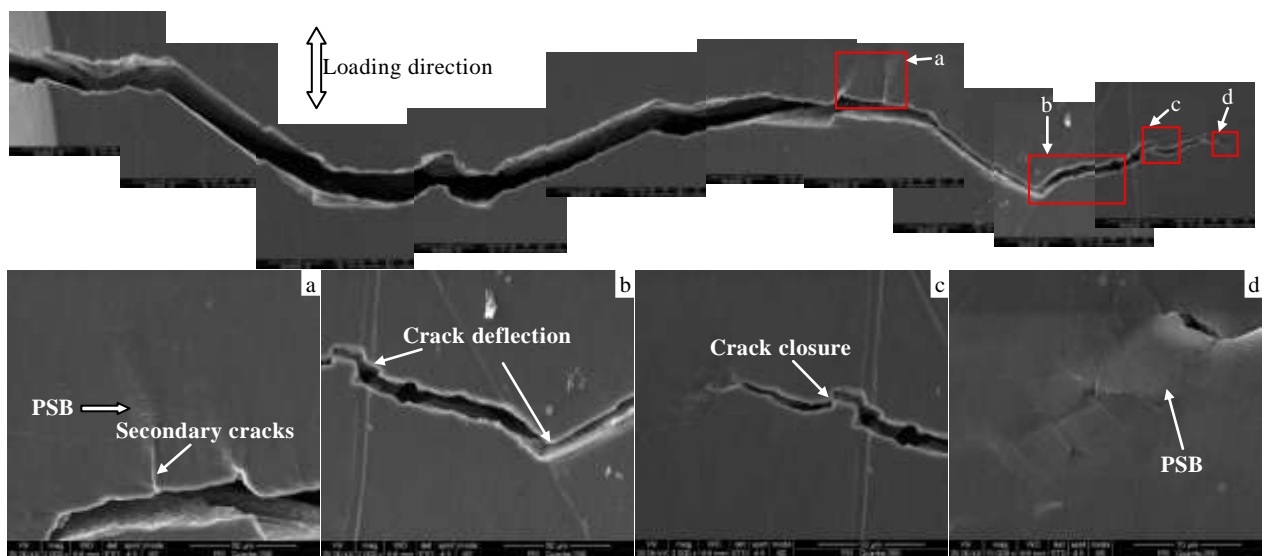


图 5 2397 铝锂合金疲劳裂纹早期扩展行为的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of fatigue crack propagation behavior at early stage of 2397 Al-Li alloy (Fig.5a, 5b, 5c and 5d is corresponding crack enlargement of a, b, c, and d, respectively)

塞积，在试样表面形成大量相互平行、具有一定间隔的驻留滑移带 (PSB) 条纹。且在 PSB 迹线处，由于应力集中，容易萌生二次裂纹，导致主裂纹发生分叉 (见图 5a)。裂纹倾向于选择最优的滑移系扩展，因而容易发生偏转 (见图 5b)。裂纹在发生偏转的同时，发生了一定程度的裂纹闭合现象 (见图 5c)。而在裂纹尖端附近，由于应力集中程度较大，PSB 较为明显，裂纹分叉及二次微裂纹再生现象严重，出现表面浮凸不平 (见图 5d)。

图 6 为 2397 铝锂合金疲劳裂纹萌生并发生早期扩展的 EBSD 结果。可以观察到疲劳裂纹在晶粒 II 内的亚晶附近萌生，以贯穿的方式进入两边未再结晶的晶粒 I 和 III 扩展，且在晶粒 III 中裂纹发生偏折，选择

最优扩展路径。同时由图 6c 可知，裂纹倾向于选择 Schmid 因子较大的晶粒扩展。为了明确裂纹附近晶粒取向的种类，即织构类型，对图 6 所示裂纹萌生区进行了 ODF 取向分布函数分析，如图 7 所示。可以看出，裂纹附近晶粒取向主要以 Brass 黄铜织构为主。对于 Brass 取向的晶粒，其取向属于软取向且可动滑移系众多，有利于裂纹扩展。故裂纹在此 Brass 织构取向的区域萌生后，在循环应力作用下，可选择有利滑移系继续扩展。

### 3 分析与讨论

影响合金疲劳寿命极限的因素主要包括以下 3 方

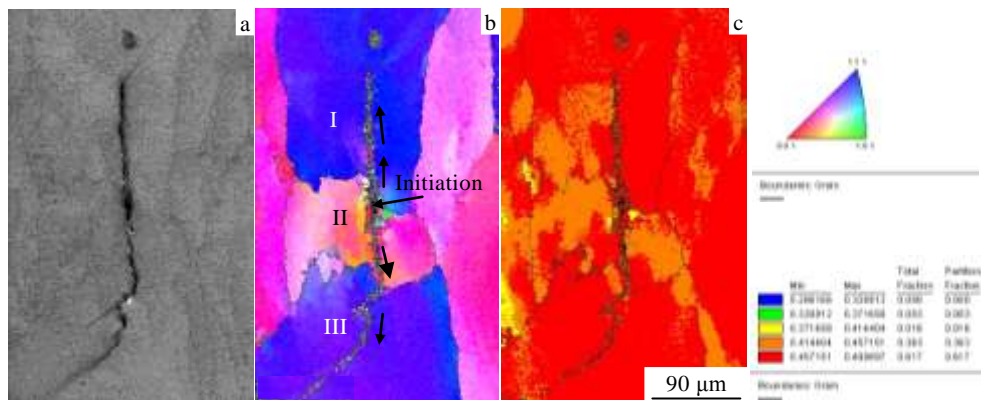


图 6 2397-T87 铝锂合金裂纹萌生及早期扩展的 EBSD 照片

Fig.6 EBSD maps of crack initiation and propagation at early stage in 2397-T87 Al-Li alloy: (a) SEM image of fatigue crack, (b) image of orientation distribution, and (c) Schmid factor mapping

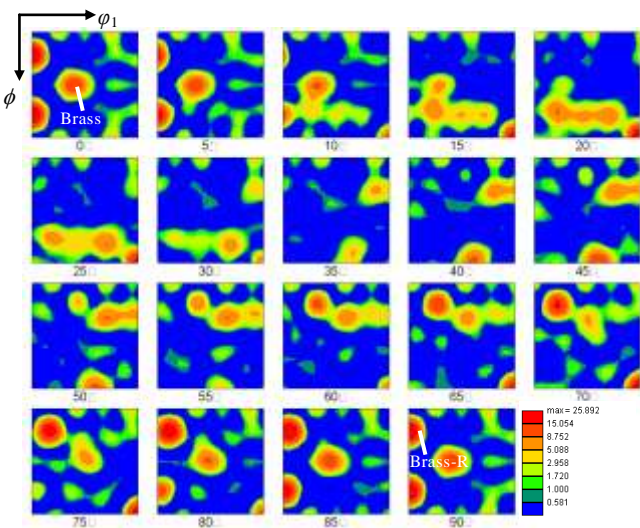


图 7 2397-T87 铝锂合金裂纹萌生区域晶粒取向分布的 ODF 图

Fig.7 ODF images of grain orientation distribution in the region of crack initiation in 2397-T87 Al-Li alloy

面：表面粗糙或缺陷等裂纹萌生源因素；包括应力比、循环特征、残余应力等载荷状态，试样尺寸、缺口情况等试样几何特征等，影响局部应力大小和分布的因素；合金状态、取样方向等导致微观组织差异的因素<sup>[5,6]</sup>。缺口试样或实际工程构件中，缺口的存在，使得试样表面形状和尺寸等几何特征发生突变，导致应力和应变分布变得不均匀，应力和应变在缺口处出现明显的峰值，即发生应力集中，促进裂纹萌生和扩展<sup>[7]</sup>。故缺口试样的疲劳寿命极限远低于光滑试样。

2397-T87 铝锂合金厚板中，不同取向试样的晶粒结构、晶界数量和晶粒取向 (织构种类和含量) 等微观组织特征的差别，使得不同取样方向裂纹萌生和扩展、断裂模式不同，导致了合金不同取向光滑试样疲劳寿命极限的差异。由图 3 可知，在裂纹扩展早期，LT 方向的放射状条纹较深、曲度较大，小刻面密度较大，体现了裂纹扩展非常曲折的扩展路径，曲折的裂纹扩展路径一方面延长了裂纹扩展途径，另一方面，当裂纹扩展方向偏离最大应力面时，裂尖的局部扩展

驱动力减小,粗糙裂纹面的相互楔入,可获得高的粗糙度诱发裂纹闭合效应,因而 LT 方向疲劳裂纹扩展抗力最高,疲劳极限最大。ST 方向裂纹扩展方向与煎饼状晶粒层平行,层状晶粒间结合力较弱,裂纹扩展阻力较小,故疲劳失效最容易,疲劳极限最小。所以 L、LT 和 ST 3 个取向光滑试样中,疲劳寿命极限为:LT 方向 > L 方向 > ST 方向。

疲劳裂纹萌生行为主要发生在材料表面。在循环应力作用下,位错循环交互滑移使得合金表面变得粗糙,从而诱发裂纹萌生,即粗糙诱发的裂纹萌生机制。在循环加载过程中,氧化物、夹杂易发生脱落,形成空洞(如图 4b),在疲劳过程中容易优先发生变形,并且在承受拉应力的区域容易诱发裂纹萌生。在疲劳过程中,由于与合金基体存在变形不匹配的问题,粗大第二相粒子周边通常存在较大的应力集中<sup>[8]</sup>,造成位错的不可逆滑移,因而第二相粒子容易与基体发生界面分离,或如图 4d 中的 Al(CuFeMn)杂质相发生自身碎裂而形成疲劳裂纹源<sup>[9]</sup>。

M. D. Sangid 等人认为<sup>[10,11]</sup>驻留滑移带(PSB)与晶界之间的交互作用对疲劳裂纹的扩展行为具有重要影响。一般而言,大角度晶界对位错运动具有强烈的阻滞作用,而在循环载荷下,位错密度的增加使得其在晶界处的塞积情况更为严重,最终沿特定的滑移面形成驻留滑移带(PSB),当相邻晶粒的不同 PSB 冲击晶界的同一个区域时,强烈的应力集中将冲破晶界能垒,使得此区域相邻晶体出现局部塑性变形,从而导致裂纹在 PSB 处萌生并沿特定方向扩展,这也可以解释疲劳裂纹早期扩展时的偏折现象。如图 5 所示,在裂纹尖端附近,PSB 较为明显,裂纹分叉及二次微裂纹再生现象严重,印证了此观点。

疲劳裂纹的扩展强烈依赖于裂纹尖端塑性区中的位错滑移,T. Zhai<sup>[12]</sup>等人认为 Schmid 因子大的滑移面上,位错滑移所受分切应力较大,即裂纹扩展驱动力较大,平面滑移性较好,为短裂纹扩展的有利路径。如图 6c 所示,本实验测得裂纹萌生后早期扩展经过的晶粒,均有较高的 Schmid 因子,与已有的观点相一致,裂纹倾向于选择 Schmid 因子较大的晶粒扩展。如图 7 所示,实验采用 ODF 取向分布函数,分析出裂纹附近晶粒取向的种类,以 Brass 黄铜织构为主,Brass 取向属于软取向, Schmid 因子较大,可动滑移系众多,有利于裂纹扩展。且在 K. T. Venkateswara Rao<sup>[13]</sup>和 G. O. Ritchie<sup>[14]</sup>等人的研究中也得到了类似的结论。

## 4 结 论

1) 在应力比  $R=0.1$  时,2397-T87 铝锂合金 L 方向、

LT 方向和 ST 方向光滑试样 ( $K_t=1.0$ ) 的疲劳寿命极限分别约为 192, 243 和 151 MPa; 缺口试样 ( $K_t=3.0$ ) 的疲劳寿命极限分别约为 72, 78 和 70 MPa。

2) 2397-T87 铝锂合金疲劳裂纹主要萌生于试样表面,以及氧化物、夹杂等脱落形成的空洞,Al(CuFeMn)第二相杂质粒子。

3) 驻留滑移带(PSB)和晶粒取向对 2397-T87 铝锂合金疲劳裂纹早期扩展有重要影响。裂纹尖端易形成 PSB,大角度晶界对 PSB 具有较强的阻碍作用,从而使裂纹发生偏折;裂纹倾向于选择 Schmid 因子较大的晶粒扩展,Brass 取向晶粒属于软取向,可动滑移系多,有利于裂纹扩展。

## 参考文献 References

- [1] Eswara Prasad N, Gokhale A A, Rama Rao P. *Mechanical Behaviour of Aluminium-Lithium Alloys*[C]. Bangalore: Indian Academy of Sciences, 2003, 28(1-2): 209
- [2] Rioja R J, Liu J. *Metallurgical and Materials Transactions A* [J], 2012, 43(9): 3325
- [3] Williams James C, Starke Edgar A. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 5775
- [4] Jabra J, Romios M, Lai J *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2006, 15(5): 601
- [5] Zheng Ziqiao(郑子樵), Chen Yuanyuan(陈圆圆), Zhong Liping(钟利萍) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(1): 37
- [6] Sun Xiaoxu(孙晓旭), Zheng Ziqiao(郑子樵), Chen Yuanyuan(陈圆圆) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(1): 50
- [7] Lukáš P, Kunz L. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 314(1): 75
- [8] Lei Z, Hong Y, Xie J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 558: 234
- [9] Zheng Z Q, Cai B, Zhai T *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(4): 2017
- [10] Michael D Sangid, Hans J Maier, Huseyin Sehitoglu. *International Journal of Plasticity*[J], 2011, 27(5): 801
- [11] Sangid Michael D, Ezaz Tawhid, Sehitoglu Huseyin *et al. Acta Materialia*[J], 2011, 59(1): 283
- [12] Zhai T, Wilkinson A J, Martin J W. *Acta Materialia*[J], 2000, 48(20): 4917
- [13] Venkateswara Rao K T, Yu W, Ritchie R O. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1988, 19(3): 549
- [14] Rading G O, Berry J T. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 219(1): 192

## High-Cycle Fatigue Properties and Crack Initiation and Propagation Behavior of 2397 Alloy

Fan Xuesong, Zheng Ziqiao, Zhang Long, Hu Fang, Gong Zhu

(Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education,  
Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The high-cycle fatigue properties and crack initiation and propagation behavior of 2397-T87 Al-Li alloy were investigated. The results show that when the stress ratio  $R$  is 0.1, the fatigue limit of smooth specimens of 2397-T87 Al-Li alloy in the L orientation, LT orientation and ST orientation are about 192 MPa, 243 MPa and 151 MPa, respectively. The fatigue limit of notch specimens in the L orientation, LT orientation and ST orientation are about 72 MPa, 78 MPa and 70 MPa, respectively. Fatigue crack initiation of this alloy mainly occurs on the sample surface, with initiation from the defects caused by the oxides and inclusions, the Al(CuMnFe) secondary phases. Persistent slip bands (PSB) and grain orientation have important influence on fatigue crack propagation at the early stage.

**Key words:** 2397 alloy; high-cycle fatigue properties; crack initiation; crack propagation

---

Corresponding author: Zheng Ziqiao, Professor, School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-8830270, E-mail: s-maloy@mail.csu.edu.cn