

# YB-DM-10 航空定向有机 玻璃疲劳裂纹扩展性能

Fatigue Crack Propagation Property of  
YB-DM-10 Directional PMMA

赵景云<sup>1</sup>, Bamber BLACKMAN<sup>2</sup>, 颜悦<sup>1</sup>, 张旋<sup>1</sup>, 张晓雯<sup>1</sup>

(1 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 英国帝国  
理工学院, 伦敦 SW7 2AZ)

ZHAO Jing-yun<sup>1</sup>, Bamber BLACKMAN<sup>2</sup>, YAN Yue<sup>1</sup>,

ZHANG Xuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-wen<sup>1</sup>

(1 AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing  
100095, China; 2 Imperial College London, London SW7 2AZ, UK)

**摘要:** 通过研究定向有机玻璃(YB-DM-10)疲劳裂纹扩展性能,得到该种定向有机玻璃疲劳断裂阈值。发现其疲劳裂纹扩展速率曲线遵循 Pairs 公式以及 Walker 公式。研究平面内不同角度、不同频率和应力比对疲劳裂纹扩展的影响;通过对比 Paris 公式以及 Walker 公式的回归系数以及断裂表面不同阶段的扫描图像,分析不同参数对疲劳裂纹扩展的影响。结果表明:材料板材平面内,不同切割角度的试样疲劳裂纹扩展速率基本相同;加载频率对疲劳裂纹扩展速率影响不大,但在  $da/dN-\Delta K$  曲线的第三阶段,数据有分离的趋势;相同的  $\Delta K$  情况下,应力比增大,疲劳裂纹扩展速率增加。本工作结果为该种定向有机玻璃的应用以及航空座舱透明件损伤容限性能研究奠定了基础。

**关键词:** 定向有机玻璃;疲劳裂纹扩展;阈值;切割角度;频率;应力比

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.000370

**中图分类号:** TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)08-0156-07

**Abstract:** The threshold value of stress intensity factor range was acquired according the study of fatigue crack propagation property of directional PMMA (YB-DM-10). It was found that the plot of fatigue crack propagation rate is accordance with Pairs Law and Walker Law. The effect of angles in plane, frequency and stress ratio on the fatigue crack propagation was studied. According the comparison of coefficient in Pairs Law, Walker Law and morphology SEM in fracture surface under test conditions with different parameters, the effect of different parameters on fatigue crack propagation rate was analysed. Results show that the fatigue crack propagation rates of test specimens with different cutting angle in XY plane of PMMA sheet are nearly the same. The frequency has slight effect on the fatigue crack propagation, except that data become separate in the third region of  $da/dN-\Delta K$  plot. On the condition of same stress intensity factor range, the fatigue crack propagation rate accelerates as the stress ration increases. The result of the study established foundation for the application of directional PMMA and the research on the damage tolerance of transparent materials used in aircraft cockpit canopies.

**Key words:** directional PMMA; fatigue crack propagation; threshold; cutting angle; frequency; stress ratio

座舱透明件是飞机上重要的功能结构件,也是飞机相对薄弱的结构。它的承载能力直接关系飞机及飞行员的安全。座舱玻璃的承载能力与透明件的性能息息相关。而在实际应用中,风挡玻璃表面容易产生各种划痕和缺陷,但裂纹存在并不一定意味着座舱盖就

存在危险,含裂纹的有机玻璃一般在裂纹形成后仍然具有较长的使用寿命。所以开展有机玻璃的损伤容限性能研究非常必要。而损伤容限性能的重要研究基础是航空透明件玻璃的疲劳裂纹扩展研究<sup>[1]</sup>。

近年来国内外很多学者针对航空透明件材料的疲

劳裂纹扩展进行研究,国外的研究大多集中在非定向有机玻璃的疲劳裂纹扩展研究,包括裂纹扩展模型<sup>[2]</sup>、疲劳裂纹扩展的影响因素等方面<sup>[3-6]</sup>。国内学者大多针对 YB-DM-3 定向有机玻璃进行研究。高宗战等<sup>[7-8]</sup>对 MDYB-3 有机玻璃在-50~90℃范围内进行了裂纹扩展实验研究。基于 Paris 裂纹扩展公式,结合有机玻璃疲劳裂纹扩展特性,得到了描述有机玻璃裂纹扩展行为的公式。贾敬华等<sup>[9]</sup>实验测定和分析了 YB-MD-3 有机玻璃的等幅疲劳裂纹扩展规律和疲劳裂纹扩展门槛值。王泓等<sup>[10]</sup>对有机玻璃疲劳裂纹扩展的控制参量进行了研究。肖健<sup>[11]</sup>全面研究了 YB-MD-3 有机玻璃的疲劳裂纹特性。

YB-MD-10 是国内锦西院最近研发的一种高性能定向有机玻璃,已渐渐应用在很多高性能要求的飞机风挡上。但该种材料的疲劳裂纹扩展性能在国内还鲜见研究。国内鲜有对定向玻璃板材平面内不同角度的试样的疲劳裂纹扩展特性进行研究。本工作对 YB-MD-10 有机玻璃进行了疲劳裂纹扩展研究。测定了其疲劳裂纹扩展中应力强度因子范围  $\Delta K$  的阈值  $\Delta K_{TH}$ ;并研究了平面内不同角度、不同频率和应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响。本工作的实验结果和结论为该种定向有机玻璃的应用以及航空座舱透明件损伤容限性能研究奠定了基础。

1 实验材料与方法

1.1 测试试样及裂纹预制

实验件材料为 YB-DM-10 定向有机玻璃,试样为紧凑拉伸 (Compact Tension, CT)<sup>[12]</sup>,根据标准 BS ISO15850-2002 确定试样的尺寸,如图 1 所示。文献[13]中指出双向拉伸的定向有机玻璃的某些性能可能存在各向异性。为了研究切割角度对疲劳扩展的影响,在板材上取样时与板材拉伸方向分为 3 种取样角度:0°,45°,90°。

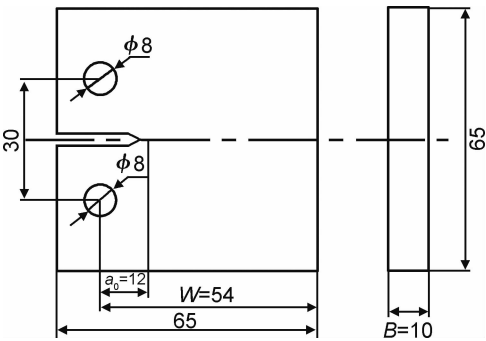


图 1 用于疲劳裂纹扩展测试的 CT 试样

Fig. 1 CT specimen for fatigue crack propagation testing

1.2 实验设备和裂纹测量方法

所有的疲劳测试在带有数字控制系统的 IN-STRON8872 疲劳测试机上进行。实验环境温度为 20℃。该疲劳机的轴向载荷量程为-25~25kN,加载精度为:设定值的±5%或载荷量程的 0.005%中较大值。后续门槛值测试时最小的载荷约为 30N,此时的加载精度为设定值的±5%(±1.5N),能够实现稳定加载。

应力强度因子范围  $\Delta K$  是控制裂纹扩展速率  $da/dN$  的基本参数<sup>[11]</sup>,疲劳裂纹扩展曲线主要分为 3 个区:近门槛区、稳态扩展区和快速扩展区。其中稳态扩展区可以用 Paris 公式表示<sup>[12]</sup>。裂纹扩展速率直接利用式(1)由裂纹长度和循环周期来确定:

(da/dN)<sub>a</sub> = (a<sub>i+1</sub> - a<sub>i</sub>) / (N<sub>i+1</sub> - N<sub>i</sub>) (1)

其中  $\bar{a} = (a_i + a_{i+1})/2$ 。

CT 试样的应力集中系数范围  $\Delta K$  用式(2)计算:

ΔK = ΔP / (B√W) \* (2+α) / (1-α)<sup>3/2</sup> \* (0.886 + 4.64α - 13.31α<sup>2</sup> + 14.72α<sup>3</sup> - 5.60α<sup>4</sup>) (2)

其中  $\alpha = \bar{a}/W$ ;B 是试样厚度;ΔP 是加载载荷;W 如图 1 所示。

本工作中主要采用柔度法(裂缝计)<sup>[14]</sup>来测量疲劳裂纹扩展中的裂纹长度,并结合光学法对其进行校正。裂缝计用在柔度法中,引入系统的控制系统。

通过柔度法直接得到的测量数据为一系列循环周期的裂缝计开口距离。通过公式(3)计算  $a/W$ :

a/W = C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>U<sub>x</sub> + C<sub>2</sub>(U<sub>x</sub>)<sup>2</sup> + C<sub>3</sub>(U<sub>x</sub>)<sup>3</sup> + C<sub>4</sub>(U<sub>x</sub>)<sup>4</sup> + C<sub>5</sub>(U<sub>x</sub>)<sup>5</sup>, U<sub>x</sub> = 1 / ( (BEV / ΔP)<sup>1/2</sup> + 1 ) (3)

其中:E 是杨氏模量,本工作实验材料的杨氏模量为 3300MPa;V 是裂缝计在位置(X/W)的开口距离。依据标准 BS ISO 15850-2002 中给出的 C<sub>0</sub>~C<sub>5</sub> 系数值,结合光学法测试结果对其进行修正得到 C<sub>0</sub>~C<sub>5</sub> 系数的修正值:C<sub>0</sub>=1.00049, C<sub>1</sub>=-4.214, C<sub>2</sub>=12.843, C<sub>3</sub>=-134.75, C<sub>4</sub>=619.23, C<sub>5</sub>=-939.40。

最后由公式(1),(2)计算得到  $da/dN$  和  $\Delta K$ ,绘制  $da/dN$ - $\Delta K$  对数曲线。

为了排除初始裂纹的影响<sup>[15]</sup>,删掉最初的几个测试数据。光学法和柔度法测得的数据对照如图 2 所示:相比光学法测到离散的裂纹长度数据,柔度法可以得到连续的裂纹长度,且测量到的数据范围更大。

1.3 疲劳裂纹扩展测试

所有的疲劳裂纹扩展测试载荷曲线为正弦曲线。频率用  $f$  表示,应力比( $\Delta P_{min}/\Delta P_{max}$ )用  $R$  表示。主要

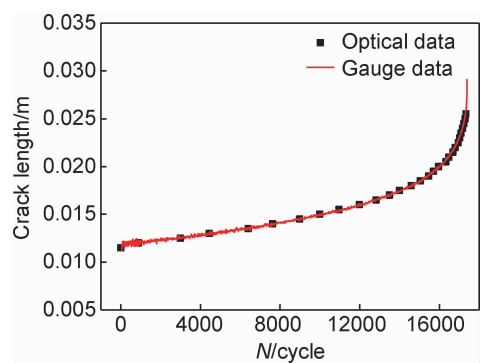


图 2 光学法和柔度法数据对比

Fig. 2 Data comparison between optical and compliance method

用  $da/dN-\Delta K$  的图表来表示测试结果。疲劳测试前需要首先参照实验标准 BS ISO 13586—2000 对试样进行静态测试确定材料断裂的最大载荷,进而确定疲劳测试中适用的载荷。试样静态测试的结果如表 1 所示。

表 1 CT 试样静态测试结果

Table 1 Static testing results of CT specimens

Sample No	$P_{static-max}/N$	$K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$
1	1108.1	2.155
2	1116.3	2.164
Mean value	1112.2	2.160

1.3.1  $\Delta K_{TH}$  测试

首先需要进行  $\Delta K_{TH}$  测试来得到此种材料的应力集中系数范围的阈值。在 3 种加载频率 ( $f=1, 2.5, 4$ ) 条件下,采用位移控制加载。

1.3.2 裂纹扩展影响参数测试

以下疲劳裂纹扩展实验均采用载荷控制的方法。为了得到不同的参数对裂纹扩展的影响,所有的实验将被分为两组:

第 1 组实验包含 9 组测试:不同切割角度方向的试样 ( $\theta=0^\circ, \theta=45^\circ, \theta=90^\circ$ , 本工作中用  $\theta$  表示试样的切割角度)在相同的应力比 ( $R=0.1$ )、不同的加载频率 ( $f=1, 2.5, 4$ ) 条件下进行疲劳裂纹扩展测试。

第 2 组实验包含 9 组测试:不同切割角度方向的试样 ( $\theta=0^\circ, \theta=45^\circ, \theta=90^\circ$ )在相同的加载频率 ( $f=4$ )、不同的应力比 ( $R=0.1, 0.25, 0.4$ ) 条件下进行疲劳裂纹扩展测试。

结合两组测试数据能得到切割角度、频率和加载应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响。

2 实验结果

2.1  $K$  阈值测试及结果分析

$\Delta K_{TH}$  测试采用位移控制。对试样加载的位移在

整个测试过程中为常值,当裂纹长度增长时,载荷范围变小,从而使裂纹扩展速度越来越慢直至没有裂纹扩展发生。测试从一个相比  $K_{IC}$  来说比较小的  $\Delta K$  开始,初始的  $\Delta K$  值定为  $0.98 MPa \cdot m^{1/2}$ 。测试过程中的载荷曲线和裂纹长度如图 3 所示。

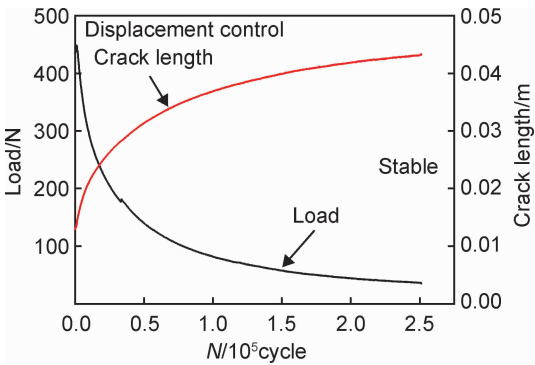


图 3 循环加载过程中载荷和裂纹长度的变化

Fig. 3 Load and crack length versus loading cycle

图 4 所示为 3 个加载频率条件下的测试结果:  $f=4$  的试样裂纹扩展较好。当  $\Delta K$  接近阈值附近时,裂纹增长速率下降很快。随着  $da/dN$  的下降,  $\Delta K$  收敛于一个稳定值。此时  $da/dN$  小于  $1 \times 10^{-8} m/cycle$ , 此材料的应力集中系数范围阈值  $\Delta K_{TH}$  可以被确定为  $0.635 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

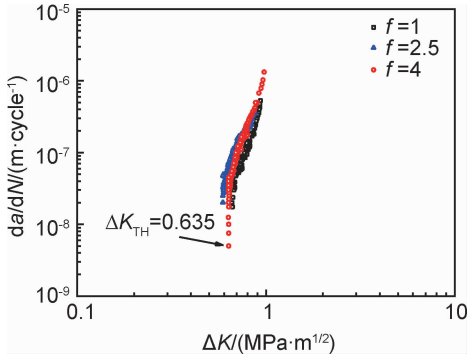


图 4  $\Delta K_{TH}$  测试曲线

Fig. 4 Test data for  $\Delta K_{TH}$

2.2 相关参数对疲劳扩展速率的影响

2.2.1 切割角度的影响

不同切割角度的试样在相同的加载频率和应力比下的实验结果如图 5 所示:在稳定扩展区域(线性区域),试样的裂纹扩展速率( $da/dN$ )和 Pairs Law<sup>[16]</sup> 有很好的 consistency;在加载频率和应力比相同的情况下,定向有机玻璃试样的切割角度对疲劳裂纹扩展基本无影响。

2.2.2 加载频率的影响

应力比相同的条件下,试样在不同的加载频率

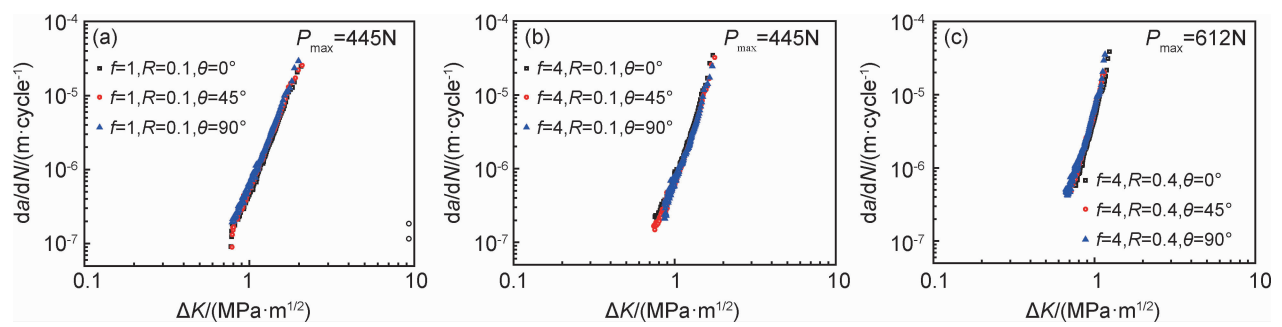


图 5 不同切割角度的试样的测试结果 (a)  $f=1, R=0.1$ ; (b)  $f=4, R=0.1$ ; (c)  $f=4, R=0.4$

Fig. 5 Plot showing data results of specimens with different cutting angles (a)  $f=1, R=0.1$ ; (b)  $f=4, R=0.1$ ; (c)  $f=4, R=0.4$

下的实验结果如图 6 所示:在稳定扩展区域,频率对疲劳裂纹扩展速率没有明显的影响;在快速扩展区域,随着频率的增加,试样的疲劳裂纹扩展速率( $da/dN$ )变大。

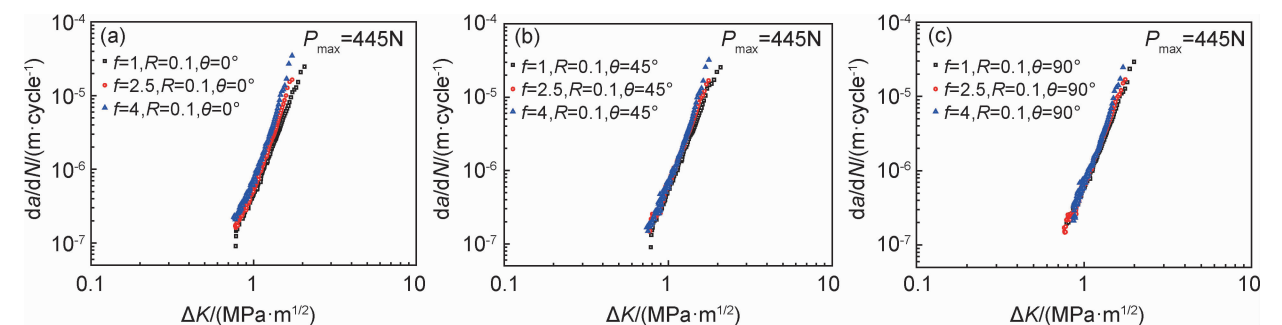


图 6 不同加载频率的试样实验结果 (a)  $R=0.1, \theta=0^\circ$ ; (b)  $R=0.1, \theta=45^\circ$ ; (c)  $R=0.1, \theta=90^\circ$

Fig. 6 Plot showing data results of different  $f$  (a)  $R=0.1, \theta=0^\circ$ ; (b)  $R=0.1, \theta=45^\circ$ ; (c)  $R=0.1, \theta=90^\circ$

频率增高使裂纹尖端的温度增高,而温度升高可以导致计算的裂纹长度比实际值大。这可以解释疲劳裂纹扩展速率数据在快速扩展区域随频率增加而升高的现象。

2.2.3 应力比的影响

不同应力比下的实验结果如图 7 所示。Paris Law 和 Walker 公式以及测试数据回归公式后的结果见表 2。

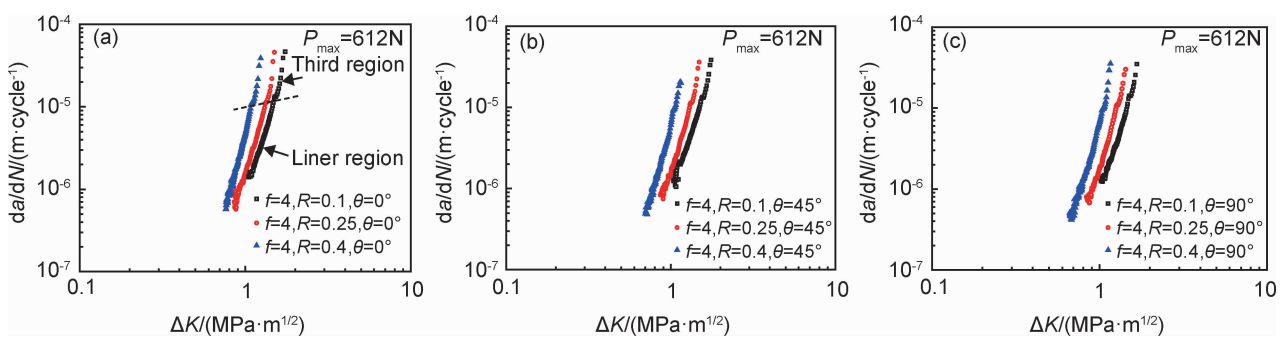


图 7 不同应力比的试样实验结果 (a)  $f=4, \theta=0^\circ$ ; (b)  $f=4, \theta=45^\circ$ ; (c)  $f=4, \theta=90^\circ$

Fig. 7 Plot showing data results of different  $R$  (a)  $f=4, \theta=0^\circ$ ; (b)  $f=4, \theta=45^\circ$ ; (c)  $f=4, \theta=90^\circ$

可以看出,在相同的  $\Delta K$  情况下,随着应力比的升高,试样的疲劳裂纹扩展速率加快;不同应力比条件下的测试点拟合的 Paris Law 公式中的常数  $m$  的标准偏差较高。可以看出当应力比增加时,常数  $m$  也增加;不同应力比的实验结果拟合的 Paris Law 公式的常数

$A$  完全不同,当应力比增加时, $A$  值也增加。

综上分析,Paris 公式不能表示应力比  $R$  对疲劳裂纹扩展速率的影响。在此引入 Walker 公式<sup>[9]</sup>对数据的近似线性段进行重新拟合。假设 Walker 公式中  $C, m, R$  为未知参数,对相同频率下的 3 组数据(应力比

表 2 测试数据回归 Paris Law 公式和 Walker 公式后的常数  $A, m$  以及  $C, m, n$   
Table 2 Value of constant in Paris Law and Walker Law

Sample No	R	Paris Law		Walker Law		
		Constant A	Constant m	Constant C	Constant m	Constant n
CT-f4-0°-1	0.1	$7.51594 \times 10^{-7}$	6.8282	$4.01283 \times 10^{-7}$	-0.67987	7.02151
CT-f4-0°-2	0.25	$1.48850 \times 10^{-6}$	6.8828			
CT-f4-0°-3	0.4	$4.89086 \times 10^{-6}$	8.1418			
CT-f4-45°-1	0.1	$7.61351 \times 10^{-7}$	6.3859	$3.4688 \times 10^{-7}$	-0.79428	6.96915
CT-f4-45°-2	0.25	$1.46144 \times 10^{-6}$	7.0187			
CT-f4-45°-3	0.4	$5.81766 \times 10^{-6}$	7.4092			
CT-f4-90°-1	0.1	$7.83293 \times 10^{-7}$	6.6489	$3.53075 \times 10^{-7}$	-0.77645	7.30381
CT-f4-90°-2	0.25	$1.68353 \times 10^{-6}$	7.4549			
CT-f4-90°-3	0.4	$6.44354 \times 10^{-6}$	7.6054			
	Mean	—	7.15287	$3.67079 \times 10^{-7}$	-0.7502	7.09816
	Stand dev	—	0.54524	$2.97828 \times 10^{-8}$	0.06156	0.18001

Paris Law:  $\frac{da}{dN} = A\Delta K^m$  ;Walker Law:  $\frac{da}{dN} = C[(1 - R)^m \Delta K]^n$

R 不同)进行数据拟合。拟合后的结果显示:不同切割角度的试样测试结果拟合的公式常数标准偏差较小,进一步说明可以忽略定向玻璃试样切割角度的影响,此种定向有机玻璃的疲劳裂纹扩展速率可以表示为:

$$\frac{da}{dN} = 3.67079 \times 10^{-7} [(1 - R)^{-0.7502} \Delta K]^{7.09816} \quad (4)$$

其中  $da/dN$  的单位为  $m/cycle$ ,  $\Delta K$  的单位为  $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

2.3 疲劳断裂表面

试样典型疲劳断裂表面如图 8 所示。疲劳断裂表面不同于静载断裂表面<sup>[17]</sup>,典型位置包括:最初的疲劳裂纹扩展表面,疲劳裂纹扩展结束阶段,快速裂纹扩展阶段表面。其中 X 方向为试样的宽度方向,Y 方向为裂纹扩展方向。可以看出在最初的疲劳裂纹扩展表面出现的是相对较为均匀的竖条纹;疲劳裂纹扩展的结束阶段出现较为粗糙的深沟纹;快速裂纹扩展阶段表面较为光滑,有一些分布不均的水纹。

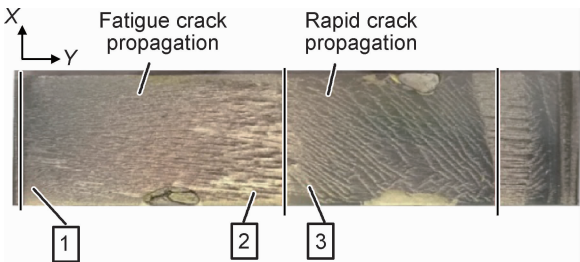


图 8 断裂表面的典型位置  
Fig. 8 Fracture surface of specimen and typical location

图 9 所示为 3 个典型位置的裂纹扩展表面,此种材料疲劳断裂表面主要表现为沿裂纹扩展方向(Y 向)的竖条纹。随着疲劳裂纹长度增加,疲劳裂纹扩展表面的竖条纹间距增大,断裂表面变得粗糙。其中疲劳裂纹扩展区域的结尾阶段表面最为粗糙,如图 9 所示。这是由于对应更大的  $\Delta K$ ,裂纹扩展速率增加,更快的断裂造成更为粗糙的表面。

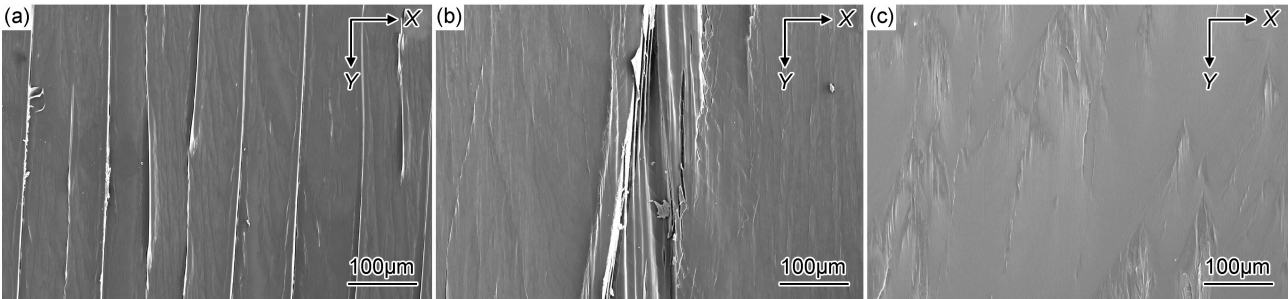


图 9 疲劳裂纹扩展试样的典型断裂表面  
(a)疲劳裂纹扩展的初始阶段;(b)疲劳裂纹扩展的结束阶段;(c)快速裂纹扩展阶段

Fig. 9 Typical fracture surface of specimens

(a)initial phase of fatigue crack propagation;(b)ending phase of fatigue crack propagation;(c)phase of rapid crack propagation

通过对比不同实验条件下的裂纹扩展表面来分析 各种因素对疲劳裂纹扩展的影响,限于篇幅,以最初的



疲劳裂纹扩展表面为例进行对比分析。当加载频率不同时,在疲劳裂纹扩展区域,更高频率试样的断裂表面形成的竖条纹比低频率试样表面的竖条纹更密集,表

面更光滑,如图 10 所示。当应力比不同时,在疲劳裂纹扩展区域,应力比越大的试样断裂表面比应力比低的表面的竖条纹更稀疏,表面更粗糙,如图 11 所示。

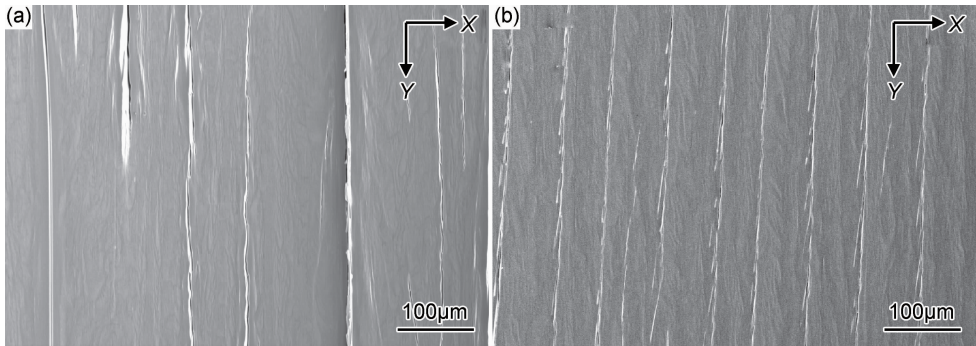


图 10 加载频率不同的试样的断裂表面对比 (a)  $f=1$ ; (b)  $f=4$   
Fig. 10 Fracture surface comparison of specimens with different  $f$  (a)  $f=1$ ; (b)  $f=4$

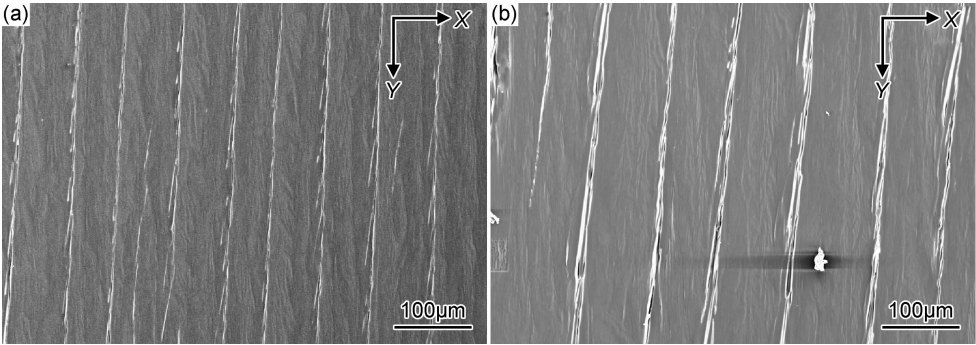


图 11 应力比不同的试样的断裂表面对比 (a)  $R=0.1$ ; (b)  $R=0.4$   
Fig. 11 Fracture surface comparison of specimens with different  $R$  (a)  $R=0.1$ ; (b)  $R=0.4$

3 结论

(1)通过位移控制的方法对 YB-DM-10 有机玻璃进行  $\Delta K$  阈值测试得到该定向有机玻璃的  $\Delta K_{TH} = 0.635\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(2)不同切割角度的试样在同样参数下进行疲劳裂纹扩展实验,实验结果基本一致;此结论说明,此种定向玻璃的疲劳裂纹扩展性能不随方向的变化而改变,板材平面内各个方向的裂纹扩展速率可认为是一致的。

(3)在疲劳裂纹扩展的线性区域,频率对疲劳扩展速率没有明显的影响。在快速扩展阶段,不同加载速率下的数据开始产生分离;这可能是由于频率的改变引起温度的改变而使柔度法测试的裂纹长度产生偏差造成的。

(4)相同的  $\Delta K$  情况下,随着应力比的升高,试样的疲劳裂纹扩展速率加快;数据曲线的斜率变化不大,但截距变化大。

(5)若考虑应力比的影响,YB-DM-10 定向有机玻璃的疲劳裂纹扩展速率曲线的线性扩展阶段和 Walker 公式具有很好的一致性,拟合公式为:  $\frac{da}{dN} = 3.67079 \times 10^{-7} [(1-R)^{-0.7502} \Delta K]^{7.09816}$ 。

参考文献

[1] 张志林,姚卫星,傅祥炯. 座舱玻璃划伤容限研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6):569-572.  
ZHANG Z L, YAO W X, FU X J. Investigation on scratch tolerance of the cabin glass[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6):569-572.

[2] WILLOAMS J G. A model of fatigue crack growth in polymers [J]. Journal of Material Science, 1977, 12(1):2525-2533.

[3] CHOU Y F, SUN C T. Modeling of the frequency effect on fatigue crack propagation in PMMA [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 17(1): 17-26.

[4] YUEN B K C, TAHERI F. The effects of loading frequency, tensile overload and compressive underload on the fatigue crack propagation behavior of polymethyl methacrylate [J]. Polymer Testing, 2004, 23:491-500.

- [5] RAMSTEINER F, ARMBRUST T. Fatigue crack growth in polymers [J]. *Polymer Testing*, 2001, 20:321-327.
- [6] EVANS S L. Fatigue crack propagation under variable amplitude loading in PMMA and bone cement [J]. *J Mater Sci*, 2007, 18: 1711-1717.
- [7] 高宗战,刘伟,岳珠峰,等. 有机玻璃疲劳裂纹扩展[J]. *材料科学与工程学报*, 2008, 26(1):90-93.  
GAO Z Z, LIU W, YUE Z F, et al. Fatigue crack propagation in polyethylene methacrylate [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2008, 26(1):90-93.
- [8] LIU Y S, GAO Z Z, LIU W, et al. Analytical and experimental investigation of fatigue crack propagation for polyethylene methacrylate [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 486(1):363-368.
- [9] 贾敬华,李亚智,肖健. YB-MD-3 有机玻璃的疲劳裂纹扩展特性研究[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(5):109-112.  
JIA J H, LI Y Z, XIAO J. Study on fatigue crack propagation behavior of YB-MD-3 PMMA plates [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(5):109-112.
- [10] 王泓,鄢君辉,郑修麟. 有机玻璃疲劳裂纹扩展表达式及控制参量[J]. *航空学报*, 2001, 26(5): 83-86.  
WANG H, YAN J H, ZHENG X L. Formulae and governing parameters of fatigue crack propagation in polymethyl methacrylate [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 26(5): 83-86.
- [11] 肖健. MDYB-3 航空有机玻璃疲劳裂纹特性的实验研究[D]. 西安:西北工业大学, 2004.  
XIAO J. Experimental investigation on fatigue crack propagation characteristic of aeronautical PMMA called YB-MD-3 [J]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [12] HAO W, MA L T, CHEN X W, et al. Comparison of the fatigue crack propagation behavior of two different forms of PMMA using two-stage zone model [J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2016, 25(2):493-501.
- [13] 朱子华. 双轴定向有机玻璃的定向度均匀性的研究[J]. *材料工程*, 1993(3): 42-44.  
ZHU Z H. Study on the phenomenon and pattern of orientation of biaxial stretching orientated organic glass [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1993(3): 42-44.
- [14] KANTERS M J W, STOLK J, GOVAERTAN L E. Direct comparison of the compliance method with optical tracking of fatigue crack propagation in polymers [J]. *Polymer Testing*, 2015, 46(1):98-107.
- [15] De SOUZA J M, YOSHIMURA H N, PERES F M, et al. Effect of sample pre-cracking method and notch geometry in plane strain fracture toughness tests as applied to a PMMA resin [J]. *Polymer Testing*, 2012, 31:834-840.
- [16] 许凤和,薛建高. 有机玻璃疲劳裂纹扩展实验分析[J]. *材料工程*, 1999(10):40-41.  
XU F H, XUE J G. Experimental analysis of fatigue crack growth for PMMA [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1999(10):40-41.
- [17] CICERO S, MADRAZO V, GARCIA T, et al. On the notch effect in load bearing capacity, apparent fracture toughness and fracture mechanisms of polymer PMMA, aluminum alloy Al7075-T651 and structural steels S275JR and S355J2 [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 29(1):108-121.

基金项目:中国航发北京航空材料研究院国际合作项目(KJSG150810)

收稿日期:2017-03-27;修订日期:2018-02-08

通讯作者:颜悦(1966—),男,研究员,博士,研究方向为透明材料,联系地址:北京市 81 信箱 83 分箱(100095), E-mail:yue.yan@biam.ac.cn

(本文责编:解 宏)