

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.02.007

有机玻璃表面裂纹疲劳扩展仿真研究

李业媛, 于培师*, 董淑宏, 赵军华

(江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:针对有机玻璃构件在服役过程中常因交变载荷而导致表面裂纹的产生和疲劳扩展,进而引起断裂的行为,课题组通过仿真研究来预测有机玻璃的表面裂纹疲劳扩展寿命。采用7点递增多项式法拟合疲劳裂纹扩展速率得到材料参数;基于裂纹尖端应力场分析软件,将穿透直裂纹测定的材料参数准确应用到表面裂纹的寿命预测上;采用表面裂纹疲劳扩展试验用于验证仿真结果。研究结果表明利用该方法预测的表面裂纹扩展寿命、裂纹扩展形貌与试验吻合较好。该项研究为有机玻璃结构的损伤容限设计提供了一定的参考。

关 键 词:有机玻璃;疲劳寿命;表面裂纹;7点递增多项式法;非穿透曲线裂纹

中图分类号:TH145.1;O346

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2021)02-0035-07

Simulation Study on Fatigue Growth of Surface Crack for Plexiglass

LI Yeyuan, YU Peishi*, DONG Shuhong, ZHAO Junhua

(Jiangnan Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Aiming at the problems of plexiglass components that the surface cracks and fatigue growth caused by alternating loads in the service process, which leads to the behavior of fracture, the system simulation study was used to predict the surface fatigue crack growth life of plexiglass. The seven-point incremental polynomial method was used to fit the fatigue crack growth rate to obtain the material parameters; based on the crack tip stress field analysis software, the material parameters measured by straight crack penetration were accurately applied to the life prediction method of surface cracks; the surface crack fatigue growth test was carried out to verify simulation results. The research results show that the surface crack growth life and crack growth morphology predicted by this method are in good agreement with the test. This research provides a certain reference for the damage tolerance design of plexiglass structure.

Keywords: plexiglass; fatigue life; surface crack; seven-point incremental polynomial method; non-penetrating curve crack

有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯)是一种透明高分子材料,具有质量轻,不易碎裂,耐老化、耐腐蚀以及良好的机械强度等优良特性,常被应用于航空、工程建筑和生物医学等各个领域。其中DX 001三菱有机玻璃常应用于大型建筑物、汽车部件等重要结构中。由于有机玻璃在加工过程中产生的缺陷或夹杂物等会引发表面裂纹的萌生,且在交变服役载荷作用下裂纹扩展会导致疲劳断裂,因此研究材料的表面疲劳扩展规律对结构的安全寿命评估至关重要。

疲劳断裂是工程中最常见的失效形式之一。国内

外学者针对有机玻璃的疲劳断裂问题进行了大量实验和数值分析研究^[1-3]。如:王泓等^[4]基于有机玻璃穿透直裂纹疲劳试验得到了在近门槛区、中部区和快速扩展区的疲劳裂纹扩展统一表达式;朱婷^[5]基于ABAQUS对静、动态加载下的有机玻璃孔边直裂纹扩展进行了研究,得到了裂纹扩展与断裂规律;肖健^[6]开展了航空有机玻璃疲劳裂纹扩展的试验研究,探讨了裂纹扩展门槛值和断裂韧性及裂纹扩展速率;Yuen等^[7]研究了拉、压过载对有机玻璃疲劳裂纹扩展速率的影响。当前的研究主要集中于穿透直裂纹的疲劳扩

收稿日期:2020-10-19;修回日期:2021-01-30

基金项目:国家自然科学基金(11972171);江苏省杰出青年基金(BK20180031);中国博士后科学基金(2018M630513)。

第一作者简介:李业媛(1996),女,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为有机玻璃的疲劳与断裂。通信作者:于培师(1982),男,山东章丘人,博士,副教授,主要从事机械结构强度、疲劳与断裂力学研究。E-mail:ypsnuaa@163.com

展规律,而实际中的结构破坏主要是由有机玻璃表面的曲线裂纹发生疲劳扩展引起的。事实上,有机玻璃表面疲劳裂纹扩展试验和仿真研究还存在一定技术挑战。例如:在预制初始表面裂纹时,需要对有机玻璃表面进行精密的手工切割;对疲劳扩展中的裂纹前沿进行实时测量难度较大;在仿真时对表面裂纹前沿应力场的精确求解非常繁琐。上述困难导致关于有机玻璃表面裂纹的疲劳扩展研究较为欠缺。

针对上述问题,课题组选取了 DX 001 三菱有机玻璃作为研究对象,对其表面裂纹疲劳扩展规律进行了系统的仿真研究。首先,利用穿透直裂纹的疲劳裂纹扩展试验得到了仿真所需的材料参数,并写到专用的分析软件中;其次,对表面裂纹疲劳扩展进行了模拟研究,得到了不同应力比下的裂纹扩展寿命仿真结果;最后利用表面裂纹疲劳扩展试验对仿真结果进行验证,证明了仿真结果的有效性。

1 仿真所需材料参数确定

1.1 试验准备

采用标准的试验方法以及标准试样,对三菱 DX 001 有机玻璃进行了拉伸试验和穿透直裂纹疲劳裂纹扩展试验,得到材料的基本力学参数以及不同应力比下的裂纹扩展模型参数。拉伸试验试样示意图如图 1 (a) 所示。穿透直裂纹疲劳裂纹扩展试验试样按照标准 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》^[8] 确定,试样尺寸为 180 mm × 50 mm × 5 mm,试件中央通孔直径 $\varnothing = 2$ mm,且在中心孔两侧沿厚度方向加工长 1 mm,宽度 < 0.2 mm 的切缝,预裂纹长度约为 3.1 mm,试样示意图如图 1 (b) 所示。试验在 MTS Landmark 370 伺服液压疲劳试验机上进行,在室温环境为 18 ~ 25 °C、湿度为 50% ~ 60% 条件下,分别进行应力比 R 为 -0.5 和 0.1,频率 f 为 2 Hz 的正弦波加载的疲劳裂纹扩展速率试验。试样的基本力学性能参数见表 1。

表 1 有机玻璃的力学性能

Table 1 Mechanical properties of PMMA

参数	弹性模量/MPa	泊松比	$\sigma_{0.2}$ /MPa
数值	2 660	0.33	30

1.2 裂纹扩展模型参数确定

为了获取疲劳裂纹扩展速率 da/dN 数据,分别采用割线法和 7 点递增多项式法对穿透直裂纹的疲劳裂纹扩展速率试验数据进行拟合。其中,7 点递增多项式法是对 $a-N$ 曲线上任意数据点 i ,取其前后相邻的 3 点采用最小二乘法进行局部拟合^[9],局部拟合公式为

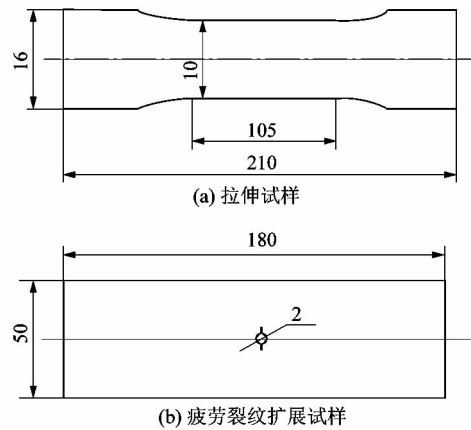


图 1 拉伸试样和疲劳裂纹扩展试样

Figure 1 Tensile and fatigue crack propagation specimens

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2. \quad (1)$$

式中: b_0, b_1 和 b_2 是按最小二乘法得到的回归系数, a_i 是对应循环次数 N_i 的名义裂纹长度。

$$\begin{aligned} \text{其中: } C_1 &= \frac{N_{i+3} + N_{i-3}}{2}; \\ C_2 &= \frac{N_{i+3} - N_{i-3}}{2}. \end{aligned}$$

对式(1)求导得对应 N_i 的疲劳裂纹扩展速率为

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right).$$

由国家标准 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》可知,基于割线法得到的裂纹扩展速率的表达式为

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_a = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}.$$

Paris 公式^[10]为:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m.$$

式中: da/dN 为裂纹扩展速率,mm/cycle; C, m 为材料参数; ΔK 为应力强度因子幅,MPa · mm^{1/2}。

对 Paris 公式两边取对数,有:

$$\lg \frac{da}{dN} = \lg C + m \lg (\Delta K).$$

令 $\lg \frac{da}{dN} = y, \lg (\Delta K) = x, \lg C = d, m = b$, 则有 $y = d + bx$ 。

即双对数曲线 $\lg \frac{da}{dN} - \lg (\Delta K)$ 是一条直线,通过最小二乘法拟合得到系数 C 和 m 。

利用 MATLAB 编程^[11],对比了 7 点递增多项式法和割线法拟合疲劳裂纹扩展速率,从图 2 可以看出 7 点递增多项式法比割线法拟合的效果要好。采用 7 点递增多项式法拟合得到 $\lg \frac{da}{dN} - \lg (\Delta K)$ 的关系、 da/dN

$dN - \Delta K$ 的关系如表 2 所示。对各组数据进行拟合得到 $R = -0.5$ 和 $R = 0.1$ 时 Paris 公式中的材料参数分别为 $C = 1.033\ 0 \times 10^{-17}$, $m = 10.420\ 0$; $C = 1.130\ 7 \times 10^{-16}$, $m = 9.297\ 8$ 。

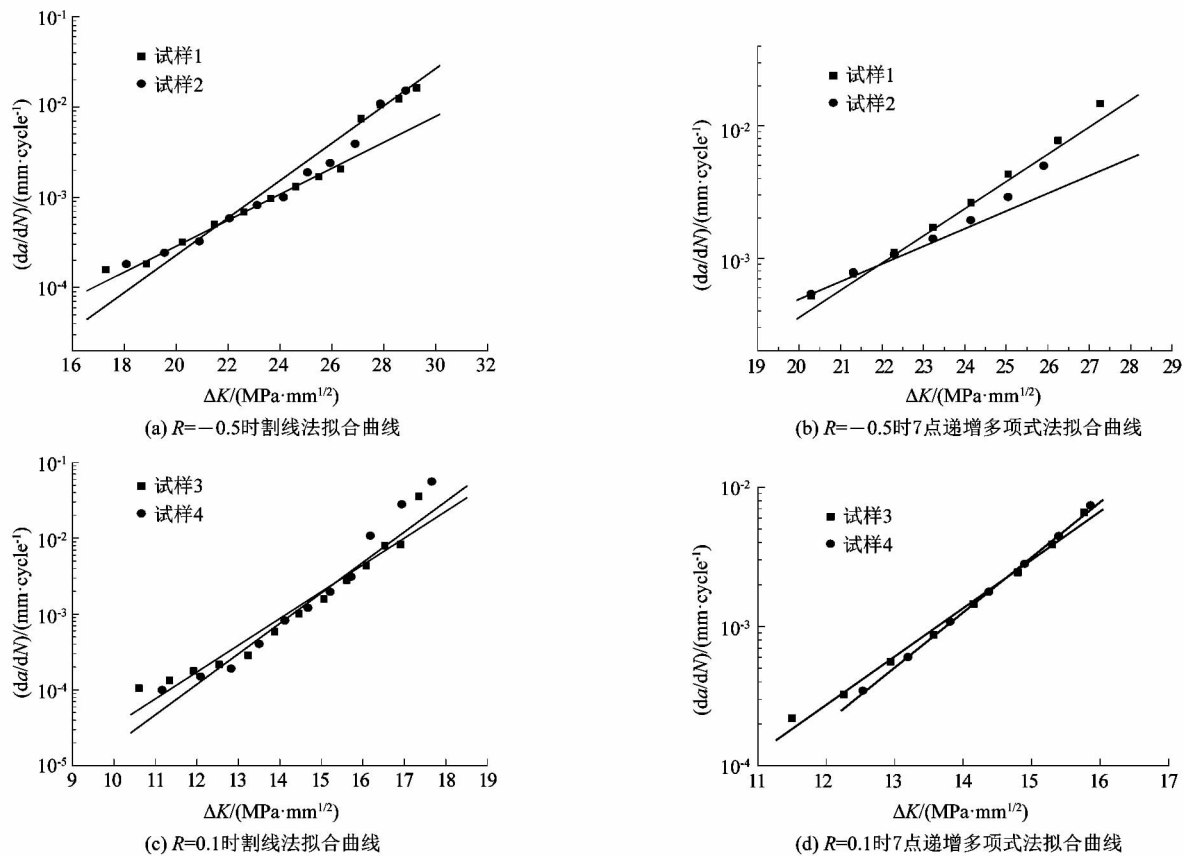


图 2 不同应力比下 7 点递增多项式法和割线法拟合的试样疲劳裂纹扩展速率

Figure 2 Fatigue crack growth rate of each sample under different stress ratios fitted by seven-point incremental polynomial method and secant method respectively

表 2 各试样 7 点递增多项式法得到的 Paris 表达式

Table 2 Paris expression obtained by seven-point incremental polynomial method of each sample

试样编号	$\lg (da/dN) - \lg (\Delta K)$ 的关系	$da/dN - \Delta K$ 的关系
1	$\lg (da/dN) = -12.826 + 7.315 \lg (\Delta K)$	$da/dN = 1.493 \times 10^{-13} (\Delta K)^{7.315}$
2	$\lg (da/dN) = -18.125 + 11.281 \lg (\Delta K)$	$da/dN = 7.499 \times 10^{-19} (\Delta K)^{11.281}$
3	$\lg (da/dN) = -16.502 + 12.041 \lg (\Delta K)$	$da/dN = 3.146 \times 10^{-17} (\Delta K)^{12.041}$
4	$\lg (da/dN) = -15.001 + 10.736 \lg (\Delta K)$	$da/dN = 9.972 \times 10^{-16} (\Delta K)^{10.736}$

2 有限元仿真

2.1 Zencrack 软件与仿真流程介绍

Zencrack 是一种高级 3D 裂纹扩展分析软件,能够基于有限元计算三维裂纹断裂力学参数,如应力强度因子、能量释放率等^[12]。其中包含一种非常便捷的裂纹前缘网格生成的方法—Crack-block 技术,而且,此软件可根据裂纹前缘位置自动更新裂纹尖端网格,得

到裂纹扩展至新位置的有限元模型。Zencrack GUI 可以快速完成参数设置,计算分析以及后处理过程,可生成各种计算结果曲线,得到裂纹扩展轮廓、裂纹面的典型贝纹线等。由于表面裂纹模型具有对称性,在 ABAQUS 中建立 1/4 模型即可,并设置材料参数、边界及载荷条件等,然后将有限元模型导入到 Zencrack 软件中,并设置材料参数、裂纹扩展公式、载荷谱^[13]等。

仿真流程如图3所示。

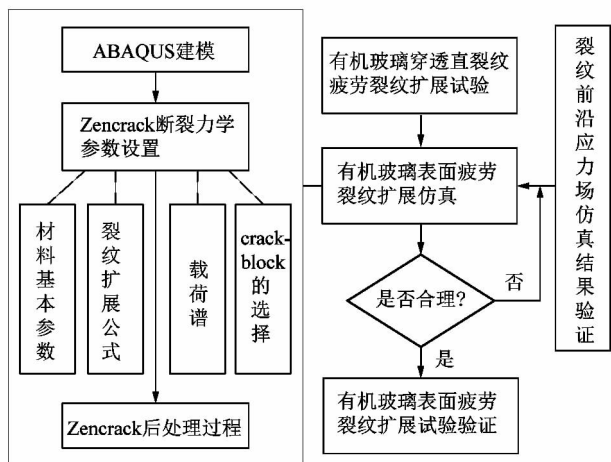


图3 仿真流程图

Figure 3 Simulation flow chart

2.2 裂纹前沿应力场仿真结果验证

在利用 Zencrack 软件对表面裂纹试件的疲劳裂纹扩展行为进行数值模拟分析之前,要验证 Zencrack 软件计算准确性即验证裂纹前沿应力强度因子的准确性。所以,课题组利用 Zencrack 软件计算出来的裂纹前沿应力强度因子与前人总结的经验公式所计算的应力强度因子进行对比。

半椭圆表面裂纹的应力强度因子 K 由 Newman-Raju 公式^[14] 计算得出:

$$K = F_s(a/c, a/t, c/w, \varphi) \frac{\sigma_t \sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (2)$$

式中: F_s 为表面裂纹的几何修正系数, a 为裂纹深度, t 为试样厚度, w 为试样宽度, φ 为裂纹角, c 为初始裂缝表面长度, σ_t 为载荷, $E(k)$ 为第2类完全椭圆积分。

表面裂纹的几何修正系数 F_s 和第2类完全椭圆积分 $E(k)$ 可根据公式^[15] 计算出。

表面裂纹试样的有限元模型为:初始裂纹表面长度 $c = 2.09$ mm,初始裂纹内部长度 $a = 2$ mm,试件厚度 $t = 5$ mm,宽度 $w = 44$ mm, $\sigma_t = 13$ MPa。有限元计

算的裂纹前缘应力强度因子与经验公式的结果对比如图4所示。由图4可知随着裂纹角 φ 的改变, Zencrack 模拟的裂纹前缘应力强度因子与经验公式的结果吻合较好,即验证了 Zencrack 模拟结果的准确性。

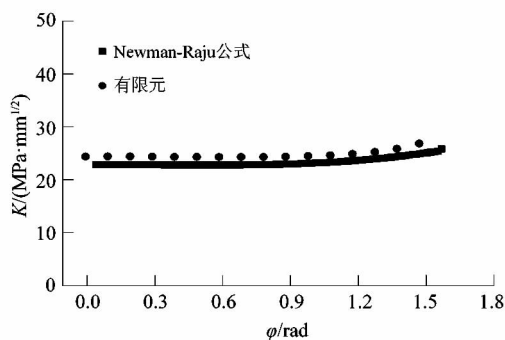


图4 裂纹前沿应力强度因子对比

Figure 4 Comparison of stress intensity factors at crack front

2.3 有限元仿真模型

有限元模型中设置的载荷与试验中的载荷条件相同,其中最大载荷为 2 kN,应力比 R 分别为 -0.5 和 0.1 。Zencrack 软件中提供 Crack-block 技术,即将有限元中无裂纹模型相应的单元替换成含裂纹的单元。Zencrack 软件提供 2 种形式的裂纹块:标准裂纹块和大裂纹块^[16]。标准裂纹块和大裂纹块各有特点:大裂纹块在裂纹扩展时能够有效控制网格的扭曲,模拟内嵌式裂纹的扩展行为,但是没有边界移动的功能;标准裂纹块具有边界移动的功能,即允许从一个网格移动到另外一个网格,但移动时会有一定程度上的网格扭曲。课题组采用 1/4 圆大裂纹块(类型为 106_q5376x16)进行表面裂纹疲劳扩展的模拟。半椭圆表面裂纹有限元模型如图5所示。

2.4 应力分析

图6为有机玻璃在不同应力比时的裂纹尖端区域的应力分布云图。

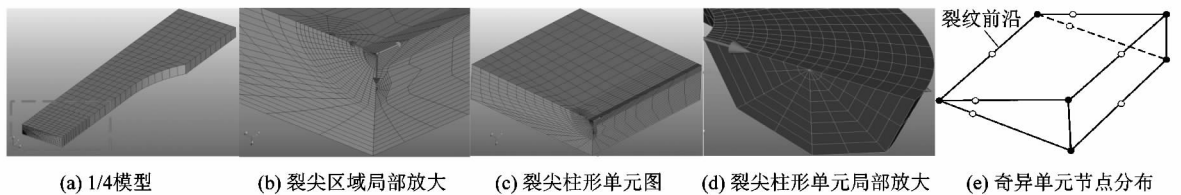


图5 半椭圆表面裂纹有限元模型

Figure 5 Finite element model of semi-ellipse surface crack

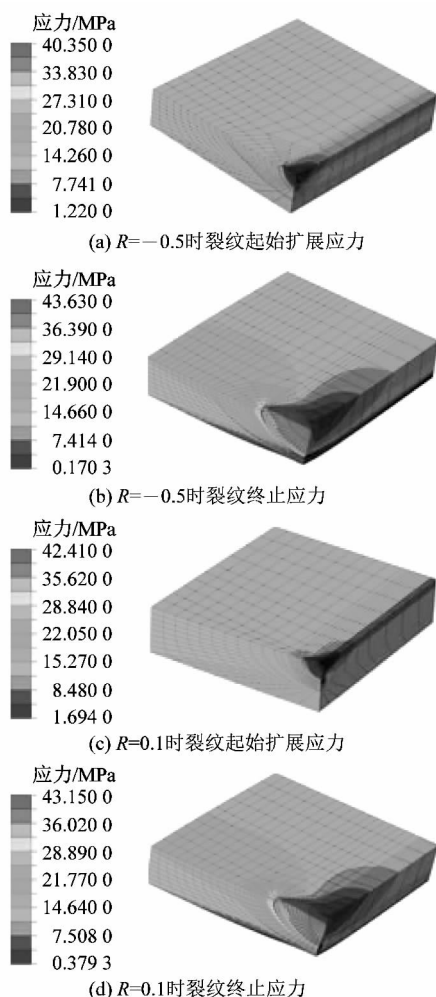


图6 不同应力比的裂纹尖端区域的应力分布云图

Figure 6 Stress distribution cloud diagram of crack tip area

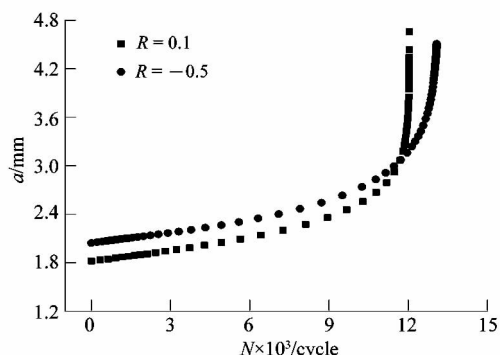
从图6中可以看出,裂纹前沿对应的应力较大,即裂纹前沿的应力强度因子较大。

2.5 仿真结果分析

图7为仿真做出的不同应力比下的 $a-N$ 曲线,裂纹长度随着循环次数呈指数增长,裂纹起始扩展速率缓慢增长直至最后失稳断裂。由图7可以看出,裂纹扩展前期,当达到同一裂纹长度时,应力比 $R=-0.5$ 较应力比 $R=0.1$ 的疲劳寿命值 N 小。裂纹快速扩展阶段反之,应力比 $R=0.1$ 对应的疲劳寿命值 N 较小,即疲劳裂纹扩展速率快。

3 表面裂纹疲劳扩展仿真结果验证

为了验证仿真结果的准确性,对有机玻璃表面裂纹疲劳扩展进行了试验验证。试样尺寸为 $250\text{ mm} \times 63\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,并在中心处加工长度为 2.5 mm 、深度为 0.6 mm 、宽度 $<0.2\text{ mm}$ 的表面裂纹缺口,试样尺寸

图7 不同应力比下的 $a-N$ 曲线Figure 7 $a-N$ curve under different stress ratio

如图8所示。室温条件下分别进行应力比为 -0.5 和 0.1 ,频率 f 为 2 Hz 的表面裂纹疲劳扩展试验,预制疲劳裂纹时设置最大载荷为 3 kN ,且预制裂纹深度约为 $1.5 \sim 2.0\text{ mm}$,正式试验时设置最大载荷为 2 kN ,并且每组进行不少于3次重复试验。在有机玻璃的表面裂纹疲劳扩展速率的实验中,采用100倍数码显微镜和粘贴刻度尺并附加灯光辅助的方法进行实时测量表面方向的裂纹尺寸,采用载荷勾线法进行记录深度方向的裂纹长度,其中,刻度尺的精度为 0.1 mm 。实验结束后可从断面可观察到‘海滩状’条纹,采用工具显微镜测量裂纹表面及其深度方向的裂纹长度。表面裂纹疲劳扩展试验装置如图9所示。

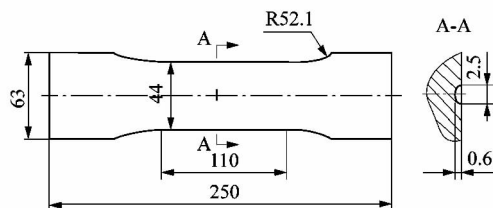


图8 表面裂纹疲劳扩展的试件

Figure 8 Surface fatigue crack propagation specimen

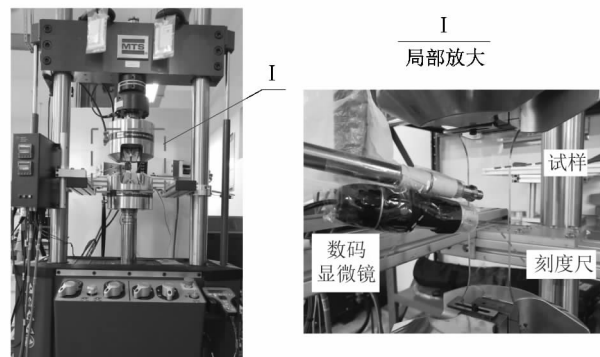


图9 疲劳裂纹扩展试验装置

Figure 9 Fatigue crack growth test device

图10是采用勾线法记录的应力比为-0.5情况下的表面裂纹疲劳扩展的形貌图。图11表示应力比为-0.5和0.1下的 $a-2c$ 曲线图。

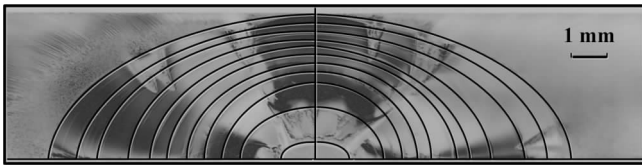


图10 采用勾线法记录的表面裂纹的形貌图

Figure 10 Topography of surface cracks recorded by the hook line method

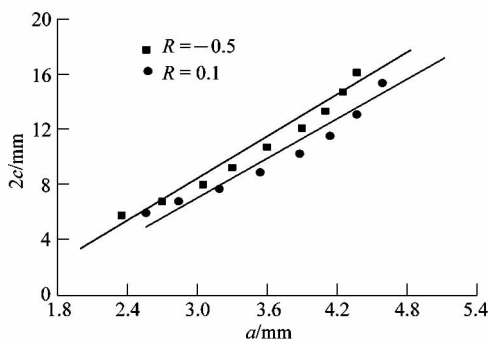


图11 不同应力比下的 $a-2c$ 曲线

Figure 11 $a-2c$ curve under different stress ratio

由图11可以看出,有机玻璃的疲劳裂纹内部长度与表面长度基本呈线性关系。对于其他非透明材料难以测量疲劳裂纹内部长度时,可以根据表面裂纹长度估算内部裂纹长度,进而估算材料的剩余寿命^[17]。

通过 Zencrack 软件对半椭圆表面裂纹模型进行疲劳裂纹扩展模拟,裂纹扩展速率采用 Paris 公式。其中,根据 $a-N$ 曲线图采用割线法得到 da/dN ,应力强度因子 K 由 Newman-Raju 公式计算得出,最后可作出对应的 $da/dN - \Delta K$ 曲线。图12与图13分别表示应力比 R 为-0.5和0.1时对应 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 关系。

由图12至图13可以看出,模拟和试验吻合较好。当给定应力强度因子范围的情况下,相对于应力比 $R = -0.5$,应力比 $R = 0.1$ 时所对应的疲劳裂纹扩展速率较快,说明裂纹尖端损伤程度较大,所以疲劳裂纹扩展速率也越大。

4 结论

课题组对 DX001 三菱有机玻璃进行了表面裂纹疲劳扩展规律的仿真研究,实现了基于传统直裂纹扩展参数对曲线表面裂纹扩展寿命的仿真预测。得到了不同应力比下的疲劳裂纹扩展速率曲线以及裂纹前缘形状,并分析了不同应力比下有机玻璃的疲劳裂纹扩

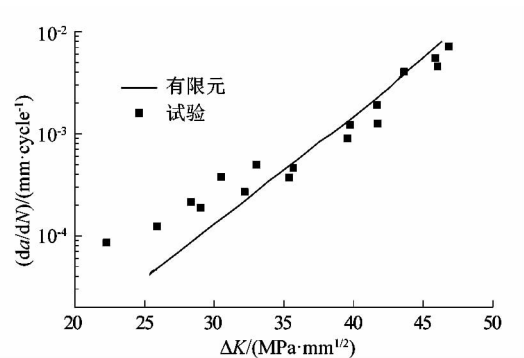


图12 $R = -0.5$ 时对应的 $da/dN - \Delta K$ 关系

Figure 12 Corresponds relationship of $da/dN - \Delta K$ at $R = -0.5$

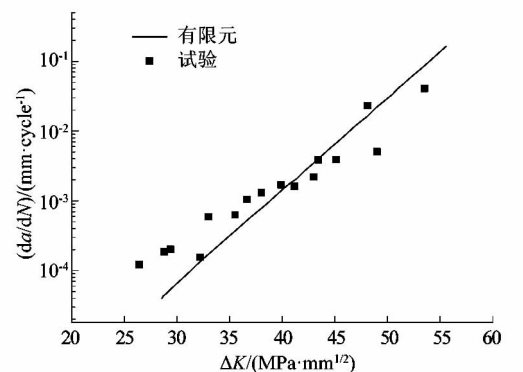


图13 $R = 0.1$ 时对应的 $da/dN - \Delta K$ 关系

Figure 13 Corresponds relationship of $da/dN - \Delta K$ at $R = 0.1$

展性能。结果表明:在 ΔK 相等的情况下,应力比 R 越大,裂纹扩展速率较大。仿真结果与试验结果吻合较好,为有机玻璃使用安全性评估与剩余寿命预测提供了参考。

参考文献:

- [1] 陈小刚,魏兵,惠战荣.定向有机玻璃裂纹扩展性能试验研究[J].机械强度,2016,38(4):734-737.
- [2] 赵景云,颜悦,厉蕾,等.边缘结构材料对透明件疲劳寿命的影响及优化[J].材料科学与工程学报,2018,36(3):5347-5351.
- [3] 王综轶,王元清,杜新喜,等.不同温度下有机玻璃厚板的平面应变断裂韧性试验[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(5):864-870.
- [4] 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,2001,22(1):83-86.
- [5] 朱婷.基于 ABAQUS 软件的 PMMA 材料裂纹及其扩展研究[D].长沙:湖南大学,2016:5.
- [6] 肖健. MDYB-3 航空有机玻璃疲劳裂纹特性的试验研究[D].西安:西北工业大学,2004:5.

(下转第47页)