

文章编号: 1000-6893(2001) 01-0083-04

有机玻璃疲劳裂纹扩展表达式及控制参量

王 泓, 鄢君辉, 郑修麟

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072)

FORMULAE AND GOVERNING PARAMETERS

OF FATIGUE CRACK PROPAGATION IN POLYMETHYL METHACRYLATE

WANG Hong, YAN Jun-hui, ZHENG Xiu-lin

(College of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘 要: 将用于建立金属材料疲劳裂纹扩展关系式的静态断裂模型引入有机玻璃裂纹扩展行为的研究中,得到了在近门槛区、中部区和快速扩展区都能较好地与实验结果相吻合的疲劳裂纹扩展速率表达式。该关系式揭示了疲劳裂纹扩展速率和应力强度因子与弹性模量、门槛值和断裂韧性之间的内在关系,式中不含无明确物理意义的待定系数,是较为完善的表达式。认为有机玻璃疲劳裂纹扩展的控制参量为:有效应力场强度因子、门槛值与断裂韧性之比值及最大应力场强度因子与断裂韧性之差。

关键词: 有机玻璃; 疲劳裂纹扩展; 门槛值; 应力强度因子; 断裂韧性

中图分类号: V250.3; O346.2 文献标识码: A

Abstract: A modified static fracture model developed for fatigue crack propagation (FCP) of metals was introduced to describe the FCP of polymethyl methacrylate (PMMA) because of the similar FCP behavior between metal and PMMA. The formula for cyclic FCP of PMMA was derived from the above model and modified to include the critical condition of FCP. It can be used to represent the test results of cyclic FCP of four types of PMMA in near-threshold-, intermediate- and rapid crack propagation regions well. The correlation between the FCP rate and the stress intensity factor (ΔK), the FCP coefficient (B), the FCP threshold (ΔK_{th}) and the fracture toughness (K_{Ic}) was revealed in the formula. The value of FCP coefficient can be calculated by Young's modulus as $B = 15.9/E^2$. So the coefficient and parameters involved in the formula all have definite physical meaning. Therefore, the above mentioned formulae could be thought as the almost perfect formulae for cyclic FCP of PMMA. The governing parameters of FCP of PMMA are, respectively, the effective stress intensity factor ($\Delta K - \Delta K_{th}$) in the near-threshold region and intermediate region, and the difference between the fracture toughness and the maximum value of stress intensity factor ($K_{Ic} - K_{max}$) in the rapid crack propagation region. The FCP coefficient (B) and the ratio of FCP threshold to fracture toughness ($\Delta K_{th}/K_{Ic}$) are the governing parameters in the intermediate region. Compared with those of the normal PMMA, the lower FCP rate of oriented PMMA during FCP experiments mainly results from the higher values of FCP threshold, higher fracture toughness and the smaller ratio value of FCP threshold to fracture toughness.

Key words: PMMA; fatigue crack propagation (FCP); fatigue crack propagation threshold; stress intensity factor; fracture toughness

舱盖有机玻璃的裂纹故障十分常见,是造成爆舱事故的主要隐患。舱盖外场的使用情况表明,其无裂纹使用寿命分散性很大且不易预测,而含裂纹舱盖一般在裂纹形成后仍然有一段较长的安全使用期,因此,如何科学地制定舱盖裂纹的检测周期并精确地估算含裂纹件的剩余寿命,成为提高舱盖经济性和保证安全可靠性的关键研究问题。由于有机玻璃疲劳裂纹扩展寿命比形成寿命

分散性小很多^[1],使该问题有可能通过有机玻璃疲劳裂纹扩展表达式的建立及对扩展控制参量的分析得到解决,而表达式的合理性和准确性则是解决问题的关键。对有机玻璃裂纹扩展行为的描述一般用 Paris 公式^[2~4],但该公式只适用于中部稳定扩展区,不能可靠估算寿命。本文的研究表明,有机玻璃的完整疲劳裂纹扩展曲线不但有中部区,而且存在明显的近门槛区和快速扩展区,且近门槛区占裂纹扩展寿命的很大部分,因此有必要建立更为完善的表达式,为含裂纹舱盖的定寿

及延寿提供依据,并为舱盖有机玻璃的选用提供具有明确物理意义的可检测参量。

1 有机玻璃裂纹扩展基本表达式

与金属相比有机玻璃的疲劳裂纹扩展速率要高得多,但用 $\Delta K/E$ 这一参量对实验结果进行归一化处理后,有机玻璃和金属的实验结果均落在同一分散带内,且有机玻璃疲劳断口存在明显的疲劳条带^[5],也与金属中裂纹扩展的条带机制相似。这表明有机玻璃和金属的裂纹扩展行为在本质上是相同或相似的。文献[6]中给出的疲劳裂纹扩展静态断裂模型,虽由金属的裂纹扩展研究中提出,但基本假设具有广泛意义,可引入有机玻璃研究中。其基本假设是:裂纹扩展是由裂纹顶端前方材料元的断裂引起的,若这些材料元在受力时不发生断裂,裂纹将不扩展。文献[6]~[8]由此给出了金属的疲劳裂纹扩展表达式(1)。

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \quad (1)$$

式中: ΔK_{th} 为理论疲劳裂纹扩展门槛值;系数 B 是与拉伸性能及断裂机制相关的材料常数,称为疲劳裂纹扩展系数。理论上可推导出当合金以条带机制扩展时有

$$B = 15.9/E^2 \quad (2)$$

其中: E 为弹性模量。对有机玻璃而言,扩展机制类似金属中的条带扩展机制,从而得到有机玻璃疲劳裂纹扩展基本表达式

$$\frac{da}{dN} = 15.9(\Delta K - \Delta K_{th})^2/E^2 \quad (3)$$

2 表达式的修正

有机玻璃裂纹扩展曲线明显分为前述的3个区(见图1中数据分布),式(3)不能描述快速扩展区的行为,这是因为未考虑 $K_{max} - K_{1c}$ 时, da/dN 的临界条件。由于快速扩展区只占扩展寿命的很小一部分,因此式(1)或式(3)仍具有大的工程应用价值。然而,为从理论上深入分析扩展整体行为,并建立更为完善的表达式,有必要对式(1)进行修正。

通过对金属、陶瓷和有机玻璃疲劳裂纹扩展整条曲线的分析,认为 $(K_{max})_{th}$ 和 K_{1c} 不但是疲劳裂纹扩展曲线的上限和下限,而且其比值 $(K_{max})_{th}/K_{1c}$ 也对曲线的形态产生重要影响。对金属而言, $(K_{max})_{th}/K_{1c}$ 的比值很小,多数小于0.1,对中部区影响较小,但对于陶瓷材料,比值在0.4

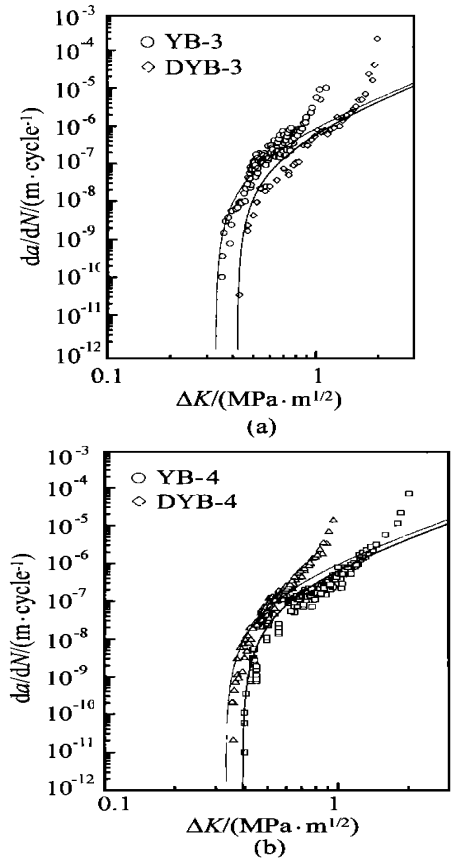


图1 4种有机玻璃疲劳裂纹扩展实验结果及由式(3)得到的曲线

Fig. 1 The test data of four types of PMMA and the curves obtained from formula(3)

~0.6之间变化;对有机玻璃,其值在0.2~0.4之间,对中部区所产生的影响不可忽略。为此,对式(1)修正可得到关于修正函数 g 的关系式(4),且 $(K_{max})_{th}/K_{1c}$ 值越大,中部区曲线斜率就越大,该比值在修正函数中应该处于指数位置,即给出式(5)。

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 g \cdot \left[\frac{K_{max} - (K_{max})_{th}}{K_{1c} - K_{max}}, \frac{(K_{max})_{th}}{K_{1c}} \right] \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \cdot \left[\frac{K_{max} - (K_{max})_{th}}{K_{1c} - K_{max}} \right]^{\frac{(K_{max})_{th}}{K_{1c}}} \quad (5)$$

当应力比 $R=0$ 时,有 $\Delta K_{th} = (K_{max})_{th}$;当 $R=0$ 时,关系式 $\Delta K_{th} = (1-R)(K_{max})_{th}$ 是否成立有待进一步的验证,但仍可假设在 $R=0.1$ 时成立,则可得到式(6)。式(5)或式(6)即为经过修正后能描述完整疲劳裂纹扩展曲线的新公式。

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \cdot \left[\frac{K_{max} - (K_{max})_{th}}{K_{1c} - K_{max}} \right]^{\frac{(K_{max})_{th}}{K_{1c}}} \quad (6)$$

$$\left[\frac{(\Delta K - \Delta K_{th}) / (1 - R)}{K_{Ic} - \Delta K / (1 - R)} \right]^{(1-R)/K_{Ic}} \quad (6)$$

3 实验验证

实验所用材料为非定向 YB-3, YB-4 和定向 DYB-3, DYB-4 4 种航空有机玻璃板材试件, 试样尺寸为 400mm × 100mm × 10mm, 预制中心裂纹 $2a_0 = 10 \sim 15\text{mm}$ 。裂纹扩展实验在电液伺服疲劳试验机上进行, 温度 23 ± 2 ; $f = 2.5\text{Hz}$; $R = 0.1$ 。定向玻璃裂纹沿非层间扩展。4 个试件的实验结果见图 1 中的散点分布。

表 1 中 E 和 K_{Ic} 为实测值; ΔK_{th} 和 B 是由式 (2) 用尾差法对数据回归分析得到的^[8], r 为相关系数; B^* 是 B 的预测值 ($B^* = 15.9/E^2$)。将表 1 数据 ($R = 0.1$) 分别代入式 (3) 和式 (6), B 取 B^* 的值, 得到图 1 和图 2 扩展曲线。可见式 (3) 能较好地描述在近门槛区和中部区的扩展行为, 但在

同样的结果。

表 1 4 种材料的弹性模量、断裂韧性、门槛值和 B 值

Table 1 The values of young's modulus, fracture toughness, crack propagation threshold and FCP coefficient

| 材料 | E /(GPa) | K_{Ic} /(MPa·m ^{1/2}) | ΔK_{th} /(MPa·m ^{1/2}) | B /(10 ⁻⁶ MPa ⁻²) | r | B^* /(10 ⁻⁶ MPa ⁻²) |
|-------|---------------|--------------------------------------|---|---|--------|---|
| YB-3 | 2.9 | 1.25 | 0.33 | 2.93 | 0.9561 | 1.89 |
| DYB-3 | 3.1 | 2.23 | 0.42 | 1.38 | 0.9767 | 1.65 |
| YB-4 | 2.8 | 1.10 | 0.33 | 2.62 | 0.9748 | 2.03 |
| DYB-4 | 3.1 | 2.20 | 0.39 | 1.13 | 0.9813 | 1.65 |

4 分析及讨论

(1) 有机玻璃在近门槛区和中部区的裂纹扩展速率主要取决于裂纹扩展系数 B 和有效应力场强度因子 $(\Delta K - \Delta K_{th})$, 由于室温下各种有机玻璃弹性模量相差不大, 即 B 值差别不大, 因此, ΔK_{th} 的差别是主要影响因素。指数 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 对整条曲线形状起修正作用。当 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 值较大时, 中部稳定扩展区较短, 斜率较大, 说明材料韧性低, 裂纹一旦开始扩展, 将很快引起断裂; 反之当 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 值较小时, 则裂纹有较长的中部稳定扩展区且斜率较小, 含裂纹构件要经历较长的裂纹稳定扩展才会产生断裂。定向与非定向有机玻璃之所以有非常不同的疲劳裂纹扩展特性, 是因为定向有机玻璃不但 ΔK_{th} 和 K_{Ic} 都较高, 且 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 有较小的值。若定向玻璃裂纹沿层间扩展, 则应考查沿层面法线方向加载时的 ΔK_{th} 和 K_{Ic} , 同时扩展速率也必然会有较大变化, 但表达式与实验数据仍应有一致的相合性。

(2) 门槛值 ΔK_{th} , 断裂韧性 K_{Ic} 和扩展系数 B (或弹性模量 E) 三者完全决定了疲劳裂纹扩展曲线的形状和位置, 因此若已知三者的值, 则不做裂纹扩展试验也可得到曲线。同时也表明 E , ΔK_{th} 和 K_{Ic} 可作为评定室温下各种有机玻璃疲劳裂纹扩展行为的关键参量。

(3) 式 (5) 所依据的理论模型和假设条件具有普遍性, 各参量和系数都具有明确的物理意义, 等式两边量纲正确, 无需再引入其它系数对量纲进行修正。 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 的数值大小, 体现了脆性材料和塑性材料的差别, 该值越大则说明材料越脆。故式 (5) 应该对陶瓷和金属材料都适用, 而它的普遍有效性还有待采用多种材料进行验证。

5 结论

(1) 关系式 (5) 揭示了 da/dN 和 ΔK 与弹性

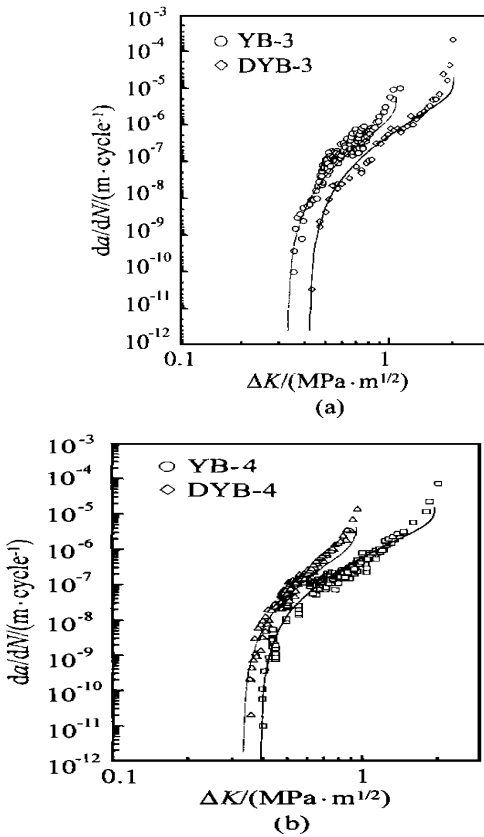


图 2 4 种有机玻璃实验结果及由修正后的式 (6) 得到的曲线

Fig. 2 The test data of four types of PMMA and the curves obtained from formula (6)

快速扩展区给出偏保守的结果。经修正后的式 (6) 则对 4 种有机玻璃的裂纹扩展行为进行了较全面的描述。4 种玻璃其它试件的实验数据均可得到

模量 E , 阈值 ΔK_{th} 和断裂韧性 K_{Ic} 之间的内在关系, 且不含无明确物理意义的待定系数, 是较为完善的疲劳裂纹扩展公式。

(2) 有效应力场强度因子 $(\Delta K - \Delta K_{th})$ 是近门槛区和中部区裂纹扩展控制参量; 阈值与断裂韧性之比值 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 是中部区扩展参量; 断裂韧性与最大应力强度因子之差 $(K_{Ic} - K_{max})$ 是快速扩展区的控制参量; E 值主要影响中部区的扩展速率。

(3) 定向有机玻璃具有较好的抗裂纹扩展和断裂能力是因为定向有机玻璃不但 ΔK_{th} 和 K_{Ic} 都较高, 且 $(\Delta K_{th}/K_{Ic})$ 有较小的值。

参 考 文 献

- [1] 姜军. 航空有机玻璃标准差及疲劳分散系数研究[J]. 飞机设计, 1990, 49(1): 50~60.
- [2] 邓增杰, 周敬恩. 工程材料的断裂与疲劳[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 252~256.
- [3] Elsayed A A, Mohamed A H, Kiyoshi T. Study of fatigue crack propagation in a glassy polymer by the optical method

of caustics[J]. JSME Mechanics and Material Engineering, 1994, 37(4): 466~471.

- [4] Tetsuro S, Hiroyuki O, Hitoshi T. Effect of compressive stress on fatigue crack propagation in polymers[J]. Journal of the Society of Materials Science. (Japan), 1997, 46(11): 1255~1260.
- [5] 高镇同. 有机玻璃疲劳和断口图谱[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 26~53.
- [6] Zheng Xiulin, Hint M A. Fatigue Crack Propagation in Steels[J]. Eng Fract Mech, 1983, 18(5): 965~973.
- [7] 郑修麟. 金属疲劳定量理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. 127~134.
- [8] Zheng Xiulin. Mechanical model for fatigue crack propagation in metals[A]. In: Carpinteri A ed. Handbook of fatigue crack propagation in metallic structures [Z]. Elsevier Science B V, 1994. 363~396.

作者简介:



王泓男, 1963年生, 汉族, 籍贯: 浙江乐清, 讲师, 硕士。研究方向: 材料的疲劳与断裂。

中国航空学会代表团参加 ICAS2000 航空科学大会

在国防科工委有关部门、企事业单位的大力支持下, 中国航空学会组织北航、西工大、南航、中科院金属所、空军第一航院、603所、624所的9位论文作者共10人代表团, 于2000年8月27日至9月1日参加了在英国约克(York)郡哈罗盖特(Harrogate)镇国际会议中心举行的第22届国际航空科学大会(ICAS 2000)和会间召开的国际航空科学理事会会员国协会代表大会; 会后, 在大会组委会的安排下, 代表团部分成员参观了英宇航(BAE)空客分部和罗罗公司; 访问了总部设在伦敦的英国皇家航空学会(RAeS), 就双方建立合作关系等事宜进行了初步接触与商讨。

大会于8月28日开幕。东道主英国皇家航空学会主席 T. Truman 先生致欢迎词; 本届国际航空科学理事会主席 J. P. Marec 先生致开幕词。本届国际航空科学大会共收到论文498篇, 经 ICAS 程序委员会(Programme Committee)评选, 最终采用了279篇作为会议报告, 45篇预报告, 35篇在会场张贴交流。来自全世界50几个国家和地区的500多名代表参加了大会和交流。这次大会仅安排了5篇大会报告, 英国、美国、日本的专家分别就“CFD技术在航空领域的应用”、“空气动力学的发展机遇与挑战”、“高性能、低成本、高速度飞机的设计与制造技术”、“大型民用飞机动力系统的发展前景”和“高超音速飞机推进系统研究进展”等题目作了大会发言, 270余名作者在7个分会场做了为期4天的学术报告。

中国航空学会共报送论文28篇, 程序委员会通知我们采用21篇。根据大会日程安排, 我会作者有8人发言, 实际发言7位(西工大1位博士因故未去), 预备论文6篇, 张贴3篇。

会议研究确定奖励事项。英国的 B. E. Launder 教授获 Guggenheim 奖; 日本、美国、英国、法国的超音速飞机推进系统国际合作研究项目组(HYPR)获 Von Karman 奖; 空客公司的 J. Roeder 先生获 Maurice Roy 奖章。

大会选举上届程序委员会主任、德国人 Wolfgang Schmidt 先生为新一届 ICAS 主席, 瑞典人 B. Fredriksson 任程序委员会主任。

2004年第24届 ICAS 大会由日本横滨获得了主办权。