

# 有机玻璃边缘连接元件疲劳性能实验研究

Experimental Study of Fatigue Failure of Polymethyl Methacrylate for Edge Attachment Element

高宗战<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 岳珠峰<sup>1</sup>, 杨治国<sup>1,2</sup>

(1 西北工业大学, 西安 710072; 2 航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

GAO Zong-zhan<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YUE Zhu-feng<sup>1</sup>, YANG Zhì-guo<sup>1,2</sup>

(1 Department of Mechanics, Northwestern Polytechnical University,

Xi'an 710072, China; 2 Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, Hunan, China)

**摘要:** 研究了有机玻璃边缘连接元件在不同温度下的拉伸和弯曲疲劳特性。实验结果表明: 温度对有机玻璃边缘连接元件静强度、刚度影响很大; 温度升高, 有机玻璃边缘连接元件结构拉伸强度、刚度大幅度降低, 同寿命下拉-拉疲劳强度也明显降低; 而弯曲强度和同寿命下弯曲疲劳强度在室温时最低, 低温时最高。

**关键词:** 有机玻璃; 边缘连接; 疲劳寿命; 温度

中图分类号: O 346; TB302 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)11-0007-04

**Abstract:** Tension and bending fatigue tests were carried out to investigate the fatigue behavior of polymethyl methacrylate for edge attachment element at different temperatures. Test results showed that the fatigue performances of the whole edge attachment assemble were extraordinary sensitive to experimental temperature. With increasing of temperature, the captive tension strength and tension fatigue strength decreased evidently. The captive bending strength and bending fatigue strength at uniform lifetime were maximal at lower temperature, and were minimum at room temperature.

**Key words:** polymethyl methacrylate; edge attachment; fatigue life; temperature

航空有机玻璃是一种具有一定强度和韧度的高分子聚合物材料, 是玻璃态高聚物的典型代表。由于有机玻璃对温度非常敏感<sup>[1-4]</sup>, 迄今为止, 国内外对有机玻璃在不同温度下的静态和动态力学性能已经有较多的实验研究。姚卫星等<sup>[5]</sup>采用局部应力法很好地估算有机玻璃结构疲劳寿命, 王泓等<sup>[6]</sup>对金属裂纹扩展表达式进行了修正, 提出了描述有机玻璃材料疲劳裂纹扩展的表达式。高镇同等<sup>[7]</sup>对有机玻璃的疲劳性能进行了全面系统的测试, 得到了室温下平均载荷、频率以及应力集中状态对有机玻璃疲劳性能的影响。姜军<sup>[8]</sup>研究了航空有机玻璃的疲劳寿命标准差和疲劳分散系数。黄正云<sup>[9]</sup>研究了不同时效时间下的有机玻璃疲劳特性, 提出将老化修正系数应用于疲劳寿命估算中的方法。杜江等<sup>[10]</sup>研究了单面受热环境对有机玻璃疲劳寿命的影响。近年来作者一直从事于有机玻璃力学能方面的研究<sup>[11-14]</sup>, 发现温度对有机玻璃静强度影响很大, 温度升高, 静强度明显降低, 疲劳强度大幅度降低, 断裂韧性增大, 裂纹扩展速率减小。

某型飞机座舱盖、风挡玻璃边缘采用软连接的形

式<sup>[15]</sup>, 通过一种类似于金属材料强度并对温度也比较敏感的非金属材料作为中间结构将有机玻璃与飞机结构连接起来, 这样可以克服有机玻璃与飞机金属材料线膨胀系数的差异以及温差的缺点。本工作所研究的某型飞机座舱盖有机玻璃通过涤纶钢作为中间过渡材料与飞机结构连接起来, 对不同温度下有机玻璃边缘连接结构进行拉伸、弯曲静态和疲劳实验分析, 研究有机玻璃边缘连接元件的危险区域, 以及温度对有机玻璃胶接试件的静强度以及疲劳性能的影响, 得到不同温度下有机玻璃边缘连接元件的拉伸、弯曲强度和拉拉、弯曲疲劳寿命( $S-N$ ) 曲线。为飞机风挡、舱盖的结构设计和寿命分析提供依据。

## 1 实验方法以及过程

试件为 3 号有机玻璃与涤纶钢通过胶黏剂连接, 有机玻璃与涤纶钢材料参数见表 1。拉伸与弯曲试件尺寸如图 1 所示。

为确定试件疲劳循环应力水平, 并研究温度对有

表 1 有机玻璃与涤纶钢材料特性

Table 1 Material basic properties of adhered I and adhered II

M aterial	Young' s modulus/ M Pa	Poisson' s ratio	Yield strength/ M Pa	T ensile strength/ M Pa
Polymethyl methacrylate	3140	0.40	44.66	79.9
Polyester fiber	4800	0.35	65.2	78.5

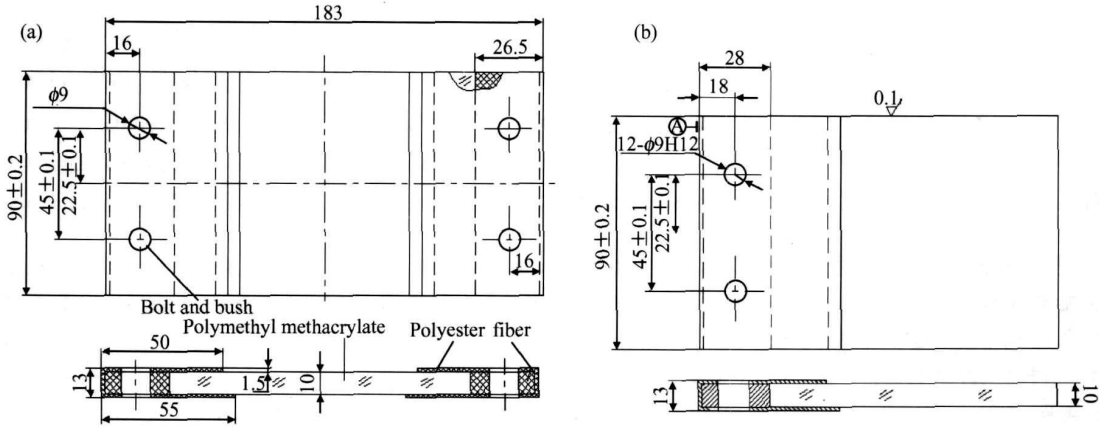


图 1 有机玻璃拉伸试件(a)和弯曲试件(b)尺寸图

Fig 1 Shape and size of tension specimen(a) and bending specimen(b)

机玻璃胶接试件强度的影响, 每组选取 3– 5 个试件进行不同温度下的静强度实验。疲劳实验与静强度实验均在配备 MT7006 高低温实验箱的 CSS-280 100kN 电液压伺服实验机上进行。实验温度为 - 30, 18, 75℃。实验前, 将试件在温控箱中置 1h, 确保整个试件温度均匀达到设定温度值。拉伸与弯曲静态实验采用位移加载, 加载速率为 1mm/ min。疲劳实验采用正弦波载荷加载, 载荷应力比为  $R = 0.1$ , 加载频率为 1Hz。

2 实验结果与分析

2.1 静态实验

不同温度下有机玻璃边缘连接元件静态拉伸及弯曲实验结果如表 2, 3 所示。

表 2 胶接试件在不同温度下的准静态拉伸强度

Temperature/℃	- 30	18	75
Tension strength/ M Pa	25	22	16.5
Tensile stretched/ mm	5.84	8.86	14.32

由实验结果可以看出, 有机玻璃边缘连接元件静态破坏发生在有机玻璃与涤纶钢胶接头较短的接头处, 并均在有机玻璃上发生破坏如图 2 所示。这是因为胶接结构由于上下两个表面胶接长度不同, 在单向拉伸载荷作用下, 使得胶接长度较短接头在承受拉伸

表 3 胶接试样件在不同温度下的准静态弯曲强度 (18℃时力臂为 79mm, - 30℃和 75℃时力臂为 57mm)

Table 3 Bending strength of the whole edge attachment

Temperature/℃	- 30	18	75
Average of max moment/( N · m)	109.2	68.8	84.9
Max deformation/ mm	3.04	6.04	15.56

载荷的同时又要承受弯曲载荷, 所以胶接较短的接头处为应力集中区域, 首先发生破坏。

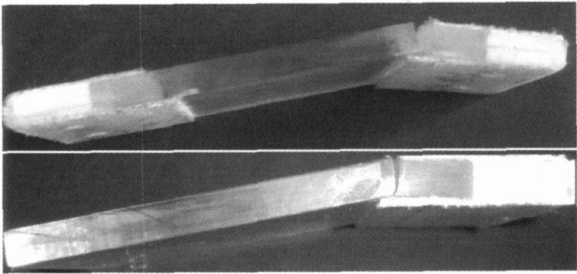


图 2 拉伸试件(a)和弯曲试件(b)宏观断口

Fig 2 Macroscopical fractography for tension specimen (a) and bending specimen(b)

从表 2 及表 3 实验结果可以看出, 温度对有机玻璃边缘连接元件静强度以及刚度影响很大, 温度升高, 有机玻璃胶接构件拉伸强度及刚度明显减小。有机玻璃胶接试件抗弯强度在温度较低时最大, 常温时最小, 温度较高时较大, 抗弯刚度随着温度升高明显减小; 这说明温度升高, 有机玻璃塑性增强。

2 2 疲劳实验

- 30, 18, 75℃三个温度点下的有机玻璃胶接构件进行了拉拉疲劳、弯曲疲劳实验, *S-N* 曲线在半对数坐标系如图 3, 4 所示, 对寿命取对数后, 在不同温度下的实验结果进行线性回归分析, 线形回归方程与相关性如表 4 所示。从图 3, 4 和表 4 可以得出有机玻璃胶接构件的疲劳性能符合指数公式:

$$e^{mS} \cdot N = C$$

式中 *m*, *C* 与材料、载荷比、加载方式等有关的参数。这说明有机玻璃胶接构件的疲劳性能也可以采用最常用的指数关系式进行研究, 这与大部分的金属材料疲劳性能相类似。

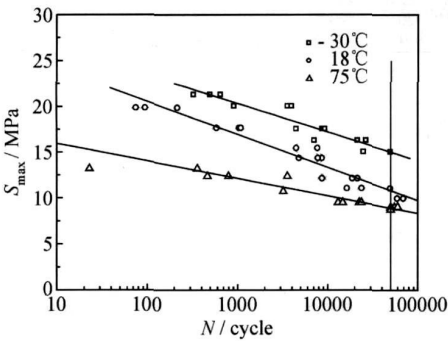


图 3 不同温度下拉拉疲劳寿命曲线  
Fig 3 The tension fatigue life and *S-N* curves at different temperature

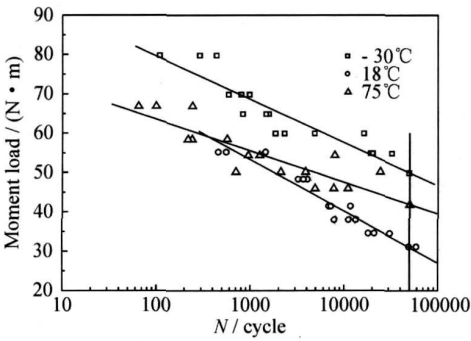


图 4 不同温度下弯曲疲劳寿命曲线  
Fig 4 The bending fatigue life and *S-N* curves at different temperature

表 4 试验数据线性回归结果

Table 4 Linear regression results of the experimental data		
Temperature/℃	Tension fatigue equation	Bending fatigue equation
- 30	$S = 29.72 - 3.13 \log N$	$S = 101.57 - 11.00 \log N$
18	$S = 27.76 - 3.61 \log N$	$S = 92.70 - 13.14 \log N$
75	$S = 14.99 - 1.21 \log N$	$S = 79.61 - 8.04 \log N$

由实验发现, 有机玻璃边缘连接元件疲劳破坏位置与静强度破坏位置相同, 破坏也发生在有机玻璃上如图 2 所示。不同于静态实验是在环境温度为 75℃时胶接结构疲劳载荷作用下有脱胶现象, 而在- 30℃和 18℃时, 无脱胶现象发生。可见, 在胶黏剂的选取上一定要考虑风挡玻璃的环境温度, 并尽量使胶层分布均匀。

拉-拉疲劳实验结果(图 3 所示)表明, 同等寿命下, 温度升高有机玻璃边缘连接元件拉-拉疲劳强度明显降低。弯曲疲劳实验结果表明(图 4 所示), 同等寿命下, 有机玻璃边缘连接元件在温度较低时弯曲疲劳强度最大, 其次是温度较高时弯曲疲劳强度。而在室温时, 弯曲疲劳强度最小, 这主要是由于在低温时, 有机玻璃拉伸强度较高, 而高温时, 有机玻璃韧性较好。

3 断口图谱分析

为了进一步分析断裂特性, 对拉伸和弯曲疲劳破坏之后的断口进行分析。由于有机玻璃不导电必须先对断口进行喷金处理, 再对断口裂纹源进行扫描电镜观察。由于静态弯曲与拉伸, 拉-拉疲劳与弯曲疲劳断口图谱基本相同, 所以本工作只对拉伸断口与拉-拉疲劳断口进行分析。为了便于比较此处也给出了静拉伸条件下发生断裂的断口微观图。静强度试样选取拉伸断裂试样, 疲劳试样选取应力水平为静强度的 70% 的拉-拉疲劳试样, 扫描电镜对裂纹源区观察结果如图 5 所示, 可以看出: 三种实验温度下发生断裂处的裂纹起始位置均在有机玻璃表面, 且随着温度升高, 疲劳源处的裂纹数量明显增大。在- 30℃下, 静态断裂与拉-拉疲劳断裂断口相差不是很明显, 即说明在低温条件下试样以脆性破坏为主。对于 75℃下的情况, 发生破坏时都存在明显的塑性变形。从 18℃下的断口对比中可以发现, 在静态情况下材料发生破坏时表现出了较大的塑性变形, 而疲劳断裂时塑性变形则没有那么明显。从 2.2 的实验结果中可以知道, 对于低温- 30℃下, 有机玻璃与其他聚合物相似, 拉伸强度较高, 表现出较低的韧性特性, 因而破坏主要是脆性断裂方式。而 75℃情况下, 由于温度升高, 有机玻璃的粘弹性增加, 因而主要以塑性破坏方式出现。总之, 断口图谱的分析也表明有机玻璃的疲劳特性表现出了明显的温度效应, 这也与 2.2 的宏观疲劳曲线相一致。

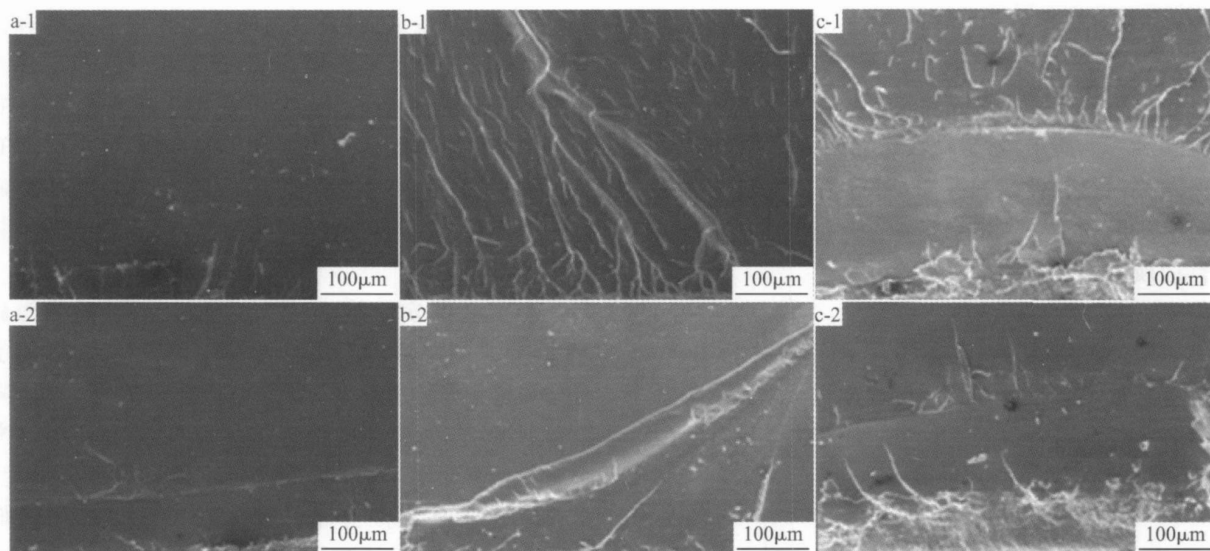


图 5 断裂断口扫描电镜图谱

(a) - 30 °C; (b) 18 °C; (c) 75 °C

(1) 静态断口; (2) 拉-拉疲劳断口

Fig 5 SEM fractography of the whole adhesive assembly (a) - 30 °C; (b) 18 °C; (c) 75 °C

(1) static fractography; (2) fatigue fractography

## 4 结论

(1) 有机玻璃边缘连接元件上的危险区域均位于涤纶纲和有机玻璃胶接接头处, 并均在有机玻璃上发生破坏。

(2) 温度对有机玻璃边缘连接元件静强度以及刚度影响很大。温度升高, 有机玻璃胶接构件拉伸强度及刚度明显减小; 抗弯强度在温度较低时最大, 常温时最小, 温度较高时较大。

(3) 同等寿命下, 温度升高有机玻璃边缘连接元件拉-拉疲劳强度明显降低; 而在温度较低时, 弯曲疲劳强度最大, 其次是温度较高时弯曲疲劳强度, 在室温时, 弯曲疲劳强度最小。

### 参考文献

- [1] SURESH S. Fatigue of Materials [M]. Cambridge University Press, 1991. 193- 218.
- [2] WANG Q. Discussion on the measurement and expression of fatigue crack growth rate [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25: 687- 689.
- [3] BARTER S, MOLENT L, GOLDSMITH R, et al. An experimental evaluation of fatigue crack growth [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12: 99- 128.
- [4] ZHENG X L, HIRT A. Fatigue crack propagation in steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 18: 965- 973.
- [5] 张志林, 姚卫星. 飞机座舱盖有机玻璃结构疲劳寿命估算的局部应力法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 298- 301.

- [6] 王泓, 鄢君辉, 郑修麟, 等. 有机玻璃裂纹扩展表达式及控制参量 [J]. 航空学报, 2001, 22(1): 83- 86.
- [7] 高镇同. 疲劳性能测试 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [8] 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, (1): 50- 60.
- [9] 黄正云. 国产航空有机玻璃户外暴露后疲劳性能研究 [J]. 材料工程, 1995, (2): 12- 15.
- [10] 杜江, 蒋军亮, 刘海燕, 等. 单面受热环境对有机玻璃疲劳寿命影响研究 [J]. 结构强度研究, 接受待发表.
- [11] 刘伟, 高宗战, 岳珠峰, 等. MDYB-3 有机玻璃疲劳性能温度效应研究 [J]. 航空学报, 接受待发表.
- [12] 高宗战, 刘伟, 岳珠峰, 等. MDYB-3 有机玻璃裂纹扩展温度效应实验研究 [J]. 机械强度, 接受待发表.
- [13] 高宗战, 刘伟, 岳珠峰, 等. 有机玻璃疲劳裂纹扩展研究 [J]. 材料科学与工程学报, 接受待发表.
- [14] GAO Z Z, YUE Z F. Fatigue failure of polymethyl methacrylate in adhesive assembly under unsymmetrical bending [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48(1): 89- 96.
- [15] 王佳莹, 邱祥发. 飞机座舱盖有限元模型分析及验证 [J]. 飞机设计, 2006, (4): 43- 45.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10472094); 863 项目 (2006AA04Z401)

收稿日期: 2007-04-11; 修订日期: 2007-08-30

作者简介: 高宗战 (1979—), 男, 博士研究生, 主要从事疲劳裂纹扩展方面的研究, 联系地址: 西北工业大学 (710072). E-mail: gaozongzhan@mail.nwpu.edu.cn