



# 有机玻璃疲劳和 断口图谱

有机玻璃疲劳和断口图谱编委会 编



科学出版社

# 有机玻璃疲劳和断口图谱

有机玻璃疲劳和断口图谱编委会 编

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书介绍了有机玻璃的断裂过程、机理及疲劳试验技术,汇集了我国常用的有机玻璃疲劳性能数据,并给出了五种国产航空有机玻璃的疲劳曲线图和断口图谱。本书为飞机座舱设计及故障分析提供了重要依据,具有较强的实用价值。

本书可供从事航空、航天、建材、化工和轻工等研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

## 有机玻璃疲劳和断口图谱

有机玻璃疲劳和断口图谱编委会 编

责任编辑 童安齐

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年3月第一版	开本:787×1092 1/32
1987年3月第一次印刷	印张:8 1/4
印数:精 1—1,150	插页:精 4 平 3
平 1—1,000	字数:188,000

统一书号:15031·790

本社书号:5335·15—6

定价: 布脊精装 3.00 元  
平 装 2.10 元

## 前 言

有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯)是一种重要的高分子材料,由于其透明度好,又具有一定的强度和韧性,因此常用作某些结构的受力件,例如飞机座舱用的透明部件。飞机座舱是飞机的关键部件,其可靠性直接影响飞机的性能和飞行员的安全。因此,世界各国都花费大量资金来研究有机玻璃的使用性能。

航空工业部科学技术局于1982年5月召开了“航空有机玻璃疲劳和断口技术讨论会”,同时成立了“航空有机玻璃疲劳和断口专题组”,负责研究和测试五种国产航空有机玻璃的疲劳性能和断口图谱。该专题组于1983年7月经方案论证确定了研究工作大纲,提出了如下具体技术要求:

加载方式: 轴向应力控制。

应力比:  $R = -1, -0.4, 0.1, 0.3, 0.4$ 。

频率: 0.5 Hz。

试验温度:  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 。

应力集中系数:  $K_t = 1, 2.5, 4$ 。

指定条件疲劳极限:  $5 \times 10^4$  次循环。

为了保证试验结果的准确性、可靠性和可比性,在开展正式试验之前,专题组进行了下列工作:

(1) 研究并制订了《航空有机玻璃拉伸疲劳试验方法》和《断口观察显示技术说明书》等两种标准(已被航空工业部正式采用)。

(2) 统一了试样加工方法,制定了《光滑疲劳试样加工工

艺说明书》和《缺口疲劳试样加工工艺说明书》。对各单位的试样加工人员进行了技术培训，使其达到了加工出合格疲劳试样的水平。

(3) 组织了“疲劳试验技术和数据处理”技术讲座，使参加试验人员掌握了有机玻璃疲劳试验技术和数据处理方法。

(4) 对参加试验的疲劳试验机，统一进行了静态和动态载荷的校准，通过对比考核试验表明，所测得的数据之间没有显著差异。

(5) 解决了试样不断裂在工作段、夹持打滑及缺口疲劳试验的技术问题。

经过承担任务单位的努力，试验测试工作于 1985 年底全部完成。航空工业部组织召开了部级鉴定会，通过的技术鉴定结论如下：

(1) 按照我部统一确定的《航空有机玻璃拉伸疲劳试验方法和测试方案》，所完成的  $S-N$  曲线都达到了技术要求，技术文件齐全，试验精度和数据可靠。

(2) 在有机玻璃疲劳特性研究方面，所完成的  $S-N$  曲线具有国内先进水平，填补了国内空白。

(3) 试验中所汇集的大量数据及断口图谱可编成手册正式发表，供设计选材时使用。

断口形貌对材料科学研究及失效分析等方面具有十分重要的意义。本书提供的有机玻璃典型断口图谱 214 帧，是国内首次较系统地应用光学和扫描电子显微镜研究高分子材料断口形貌，因此本书成为我国高分子材料学科中的第一部描述典型断口的图谱集。

本书由“航空有机玻璃疲劳和断口专题组”组织的“有机玻璃和断口图谱编委会”编写，编委会由下列人员组成：

主审：何薰

主编：高镇同

副主编：许凤和 刘观兴 赵 进

编委：邸祥发 吴离离 荣德勋 陆本立 王山根

殷旭红 李德钧 张素芳 鄢良全 陆明勋

刘阳九 熊哲清 何富阶 申德强 肖 敏

杨 克 谭 莹

本书第一章由高镇同、许凤和、荣德勋编写，第二章由沈嗣唐、许凤和编写，第三章由吴离离、邸祥发、殷旭红编写，第四章由严子健、赵进、过梅丽编写，断口图由满淑鹏等整理。全书由许凤和统一整理。

在编写本书过程中得到了航空工业部科学技术局、航空工业部 601 研究所、603 研究所、611 研究所、621 研究所、011 基地第一设计所、011 基地理化测试中心、沈阳飞机制造公司、成都飞机公司、上海航空工业公司、南昌飞机制造公司、哈尔滨飞机制造公司和北京航空学院等有关单位的支持，并得到了范棠、陆履平、贾国荣、胡世炎、董荫宏、梁美训等同志的热情指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

# 目 录

第一章 有机玻璃疲劳试验和结果分析.....	1
1.1 符号和术语.....	1
1.2 试样.....	2
1.3 疲劳试验机.....	7
1.4 影响疲劳寿命的主要因素.....	10
1.5 疲劳统计分析基础.....	14
1.6 成组法和升降法.....	31
1.7 $S-N$ 曲线拟合法.....	36
附表.....	44
参考文献.....	49
第二章 有机玻璃.....	50
2.1 引言.....	50
2.2 有机玻璃的结构.....	52
2.3 有机玻璃的粘弹特性.....	53
2.4 有机玻璃的成型工艺.....	55
2.5 有机玻璃的性能.....	57
2.6 银纹现象.....	62
2.7 应用.....	63
参考文献.....	64
第三章 疲劳数据和曲线.....	65
3.1 YB-2 有机玻璃.....	65
3.2 YB-3 有机玻璃.....	77
3.3 YB-4 有机玻璃.....	89
3.4 DYB-3 有机玻璃.....	102
3.5 DYB-4 有机玻璃.....	117

3.6 弯曲疲劳试验 .....	131
第四章 断口形貌特征和断裂机理 .....	133
4.1 断口显示技术 .....	133
4.2 断口形貌特征 .....	136
4.3 断裂机理概述 .....	141
参考文献 .....	146
断口图谱 .....	147



# 第一章 有机玻璃疲劳试验和结果分析

## 1.1 符号和术语

循环应力:  $S$ (MPa), 泛指随时间作周期性变化的应力。在循环应力中各应力分量均采用符号  $S$  表示, 以与静应力  $\sigma$  相区别。

最大应力:  $S_{\max}$ , 循环应力中具有最大代数值的应力。拉伸应力为正, 压缩应力为负。

最小应力:  $S_{\min}$ , 循环应力中具有最小代数值的应力。拉伸应力为正, 压缩应力为负。

平均应力:  $S_m$ , 循环应力中的最大应力与最小应力代数和的一半, 即

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$$

应力幅:  $S_a$ , 循环应力中最大应力与最小应力代数差的一半, 即

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$$

应力比:  $R$ , 最小应力与最大应力的代数比值, 即

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

应力水平: 应力水平由一对应力分量  $S_{\max}$  和  $S_{\min}$  来确定。当给定应力比  $R$  时, 应力水平可由最大应力  $S_{\max}$  表示; 当给定平均应力  $S_m$  时, 应力水平可由应力幅  $S_a$  表示。

极限拉伸强度:  $\sigma_b$ (MPa), 材料在抵抗拉伸变形中所能达到的最大应力值。

疲劳寿命:  $N$ (次), 在给定应力下, 材料至破坏时的应力循环次数。

对数疲劳寿命:  $\log N$ , 疲劳寿命  $N$  的对数值。

名义应力:  $\sigma_n$ (MPa), 按截面积计算出的应力, 不考虑材料缺口处几何形状的不连续性的影响。

应力集中系数:  $K_t$ , 局部应力  $\sigma_{\max}$  与名义应力  $\sigma_n$  的比值, 即

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

加载系数:  $K$ , 最大应力  $S_{\max}$  与极限拉伸强度  $\sigma_b$  的比值, 或最大载荷  $P_{\max}$  与破坏载荷  $P_b$  的比值, 即

$$K = \frac{S_{\max}}{\sigma_b}$$

或

$$K = \frac{P_{\max}}{P_b}$$

母体: 研究对象的全体。

个体: 母体中的一个基本单位。

子样(样本): 母体中的一部分个体。

子样大小(样本容量): 子样所包含的个体的数目, 即一组试验中观测值的个数。

子样平均值:  $\bar{X}$ , 一组试验中各个观测值的平均值。

## 1.2 试 样

### 1.2.1 光滑疲劳试样

选择试样形状和尺寸的目的是使试样经受循环应力时,

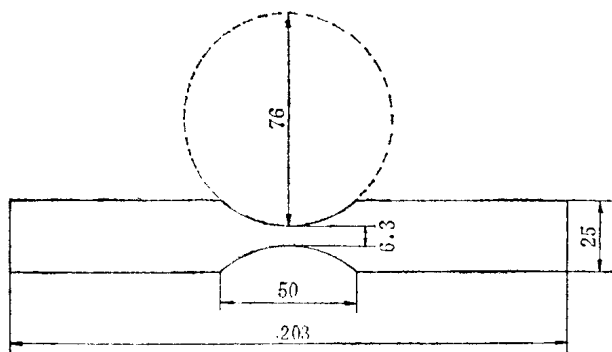


图 1.1 哑铃型疲劳试样

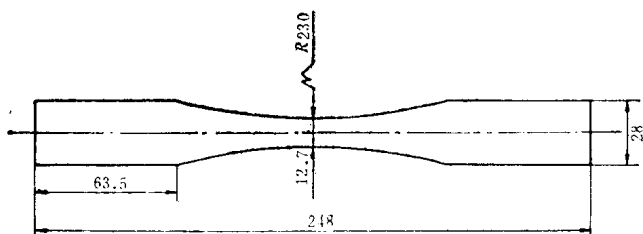


图 1.2 疲劳试样

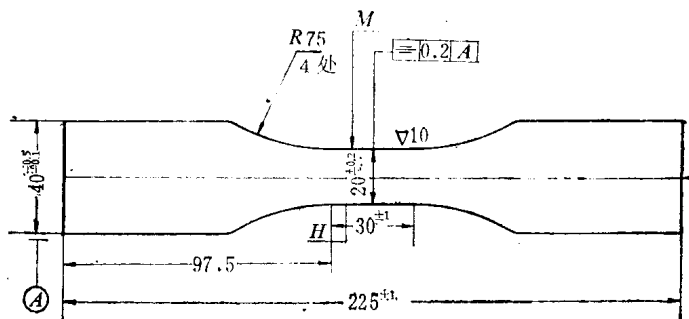


图 1.3 有机玻璃拉伸疲劳试样

M、H 两平面在 30mm 范围内与中心线平行度允差  $\geq 0.1$ ;

圆弧 R 与 30mm 段光滑连接

应力集中在试样的工作段上,并使断裂出现在工作段范围内。国外有些资料介绍了哑铃型试样,例如图 1.1 和图 1.2,尺寸分别是  $6.3 \times 203$  和  $12.7 \times 248$  mm。本书讨论了与静态拉伸试样相似的哑铃型试样,工作段宽度增加到 20 mm,目的是提高试样总的承载能力,以便于选择疲劳试验机的载荷范围。试样的形状和尺寸如图 1.3 所示。经疲劳试验证明,试样形状和尺寸是适宜的,断在有效部位(工作段内)的几率是很高

表 1.1 有机玻璃拉伸疲劳试样断裂部位的统计

材料 牌号	试验条件	试样 数量	断在有效部 位的数目	断在夹头 内的数目
YB-2	36.9~51.5 MPa	70	70	0
YB-3	42.7~54.4 MPa	24	24	0
YB-4	48.6~61.9 MPa	28	27	1
DYB-3	57.5~64.9 MPa	21	21	0
DYB-4	56.8~70.9 MPa	25	25	0
YB-4	$f = 0.033 \sim 1.0$ Hz	36	36	0
DYB-4	$f = 0.033 \sim 5$ Hz	52	52	0
DYB-4	抛光与未抛光	13	13	0
YB-3	预处理与未处理	10	10	0

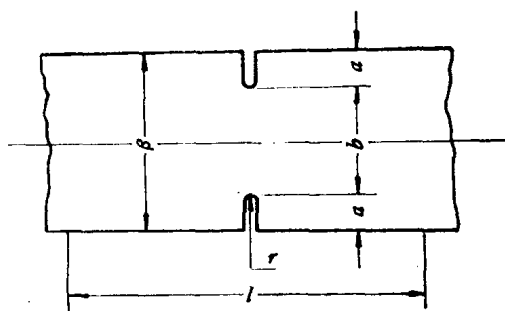


图 1.4 缺口疲劳试样

的(见表 1.1)。试样断在夹头内主要是试验操作问题。

## 1.2.2 缺口疲劳试样

缺口疲劳试样用于不同应力集中系数的疲劳试验。缺口疲劳试样采用U型缺口(见图 1.4)，其尺寸(见表 1.2)根据不同应力集中系数 ( $K_t$  值) 选择。本书中  $K_t = 2.5$  和  $K_t = 4$  的缺口疲劳试样尺寸分别在图 1.5 和图 1.6 中示出。

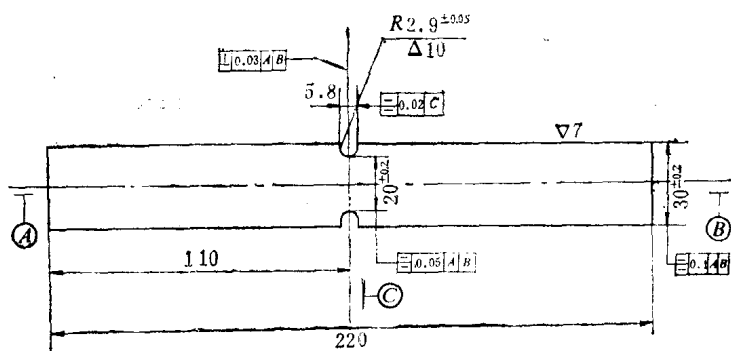


图 1.5  $K_t = 2.5$  的有机玻璃拉伸疲劳试样

表 1.2 U型缺口疲劳试样尺寸

B (mm)	b (mm)	a (mm)	$l = 4.5B$	r (mm)	$K_t$
30	20	5.0	135	5.3	2.0
30	20	5.0	135	2.9	2.5
30	21	4.5	135	1.5	3.0
30	20	5.0	135	0.75	4.0
57	38	9.5	256	10.0	2.0
57	38	9.5	256	3.5	3.0
56	38	9.0	252	1.4	4.0

注:  $l$  为试样工作段, 不包括夹持部分。

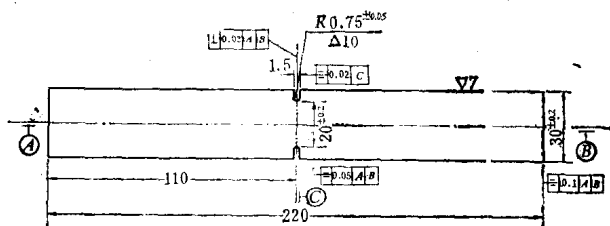


图 1.6  $K_t = 4$  的有机玻璃拉伸疲劳试样

### 1.2.3 试样的加工

疲劳试样加工质量的好坏直接影响到试验结果，特别是缺口疲劳试样更为突出。因此，加工疲劳试样要认真、仔细。有机玻璃板材表面都有保护纸，在下料时应保存至毛坯加工完毕。此外，下料时应留有加工余量 5 mm。加工时用带锯或圆盘锯将板材锯成试样毛坯（最好使用压缩空气强制冷却带锯和有机玻璃板材），带锯速度应为 300~500 m/min，圆盘锯线速度应为 1200~1500 m/min。用手送料速度为 0.5~1.0 m/min。

在铣切试样过程中，要求机床平稳，操作熟练，中途不能停止工作台的进给而让铣刀空转，以免在加工表面形成凹坑，影响加工质量。铣刀切削部分几何参数以及切削用量可参考表 1.3。铣削时使用通风机吸屑。精铣时可用毛刷加水冷却。

表 1.3 切削参数

切削部分的几何参数(°)			切 削 规 范		
后角	主前角	螺旋倾角	切削速度 (m/min)	进给量 (mm/齿)	切削深度 (mm)
16	8.5	15	≥224	≥0.015	≥4

铣切缺口时，需用专用刀具。铣削缺口深度可用百分表测量。铣削深度随缺口底部半径  $r$  的加深而逐渐减小。最大进刀量为 1.5 mm。

铣切好的试样需进行抛光。YB-2 和 YB-3 有机玻璃使用 2 号抛光膏；YB-4 有机玻璃使用 4 号抛光膏。抛光加工面应达到  $\nabla_{10}$  的光洁度。

加工好的试样需进行检验，只有符合试样尺寸公差要求和没有加工缺陷的试样方可用于疲劳试验。

### 1.3 疲劳试验机

这里测定疲劳曲线用的电液伺服疲劳试验机，型号分别为 Instron 1332、1251、1253 和 PL9-6、MTS810 等。

电液伺服试验机主要由主机、液压源和控制系统三部分组成。

#### 1.3.1 主机

电液伺服疲劳试验机的主机是加载系统的主要部件，由底座、立柱、横梁、作动器、液压夹头和电液伺服阀等组成。这里主要介绍横梁和作动器。

横梁是主机的关键部件，横梁的升降除用普通的丝杠传动外，还可用液压系统直接驱动立柱来达到升降横梁的目的，如 Instron 1332 及 PL9-6 型疲劳试验机。这种型式的试验机，操作方便、行程大。

作动器安装在底座下，基本结构为单缸双腔，即一个活塞杆两端带有等面积的活塞，杆是空心的，便于安装线性位移传感器。有些作动器还附加偏压作动筒，可使静态拉伸或压缩时的最大载荷增加一倍。作动器组件还包括贮压器和 10  $\mu\text{m}$

的过滤器等,这里就不一一介绍了。

### 1.3.2 液压源

液压源由液压动力箱、连接阀和管接头组成。这里主要介绍液压动力箱。

液压动力箱包括电动机、油泵、贮压器、卸压阀、过滤器及冷却器等,并设有安全保护装置。在油温升高、液面降低至极限位置、过滤器阻塞、输出压力过低及遇到外部故障等情况下,安全保护装置均能使液压源自动停机,并发出警告信号(指示灯亮),在故障消除之前,液压源不能重新启动。

### 1.3.3 控制系统

控制系统是试验机的核心,它控制和测量负荷、位移、应变等,根据其工作性质可分为输入与控制、输出与测量和记录与显示等三部分。

输入与控制部分由控制中心、函数发生器、平均电平发生器、极限组件和信号调节器等组成。函数发生器可以提供各种波形、频率和振幅,其中双极波形用于动态试验。平均电平发生器对伺服放大器输入信号施加偏置。极限组件用来预先设定负荷、位移、应变的上、下限,在达到极限时,由安全保护装置使机器停机。信号调节器中的输出与传感器参量成比例,用于控制系统,又可将其输出导向记录或显示装置。

输出与测量部分由信号选择器、峰值监视器和消零、定标装置组成。信号选择器主要用于选择监视、控制信号或记录显示信号。峰值监视器可以给定并监视从信号选择器中输入的各种信号的最大或最小峰值。消零与定标装置接受信号选择器的输入信号,经过消零并放大后输出至记录装置。

记录与显示部分由 X-Y 记录仪、数字伏特计、计数器和



示波器等组成,数字伏特计可直接读出输入和输出信号,记录仪和示波器可读出应力的峰值。

电液伺服试验机框图如图 1.7 所示。该型试验机可以控制负荷、位移和应变。横梁伺服控制系统(虚线部分)用于大行程静态试验。系统控制中心用于选择控制参数、试验机工作状态和所需的输入函数。当控制状态为动态时,横梁由液

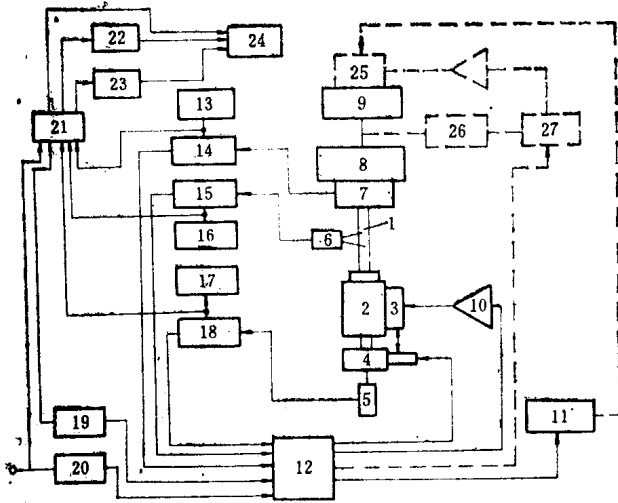


图 1.7 Instron 1250 系列试验机框图

1. 试样; 2. 作动器; 3. 伺服阀; 4. 偏压作动筒; 5. 差动变压器;
6. 引伸计; 7. 负荷传感器; 8. 横梁; 9. 横梁驱动系统;
10. 伺服放大器; 11. 液压源; 12. 系统控制中心; 13. 负荷极限;
14. 负荷信号调节器; 15. 应变信号调节器; 16. 应变极限;
17. 位移极限; 18. 位移信号调节器; 19. 内部输入; 20. 外部输入;
21. 监视选择器; 22. 清零与标定; 23. 峰值监视器;
24. 记录与显示装置; 25. 伺服阀; 26. 同步机;
27. 横梁速度控制

压夹具装置紧固在主机立柱上,横梁传动装置脱开,作动器给试样加载。此时与夹头相连的载荷传感器、作动筒中的差动变压器和连接在试样上的引伸计的信号,经各自的信号调节