

HB

中华人民共和国航空工业标准

HB 7623—1998

金属材料蠕变裂纹扩展速率 试验方法

1999-01-06 发布

1999-03-01 实施

中国航空工业总公司 批准

前　　言

本标准是在总结了二十年来国内外开展高温断裂力学、蠕变裂纹扩展研究成果的基础上，并参考了美国 ASTM E1457—92“金属蠕变裂纹扩展标准试验方法”而制定的。

本标准提供的数据应用到元件寿命预测时，要求考虑到小尺寸蠕变、过渡蠕变以及周期加载蠕变等复杂因素。

本标准的附录 A 是标准的附录。

本标准的附录 B 是提示的附录。

本标准由中国航空工业总公司航空材料热工艺标准化技术归口单位提出并归口。

本标准由中国航空工业总公司航空材料研究院负责、3007 厂参加起草。

本标准主要起草人：张行安、刘绍伦、杜正荣、黄宏发、夏慧琴、纪艳玲。

中华人民共和国航空工业标准

金属材料蠕变裂纹扩展速率试验方法 HB 7623-1998

1 范围

本标准规定了金属材料高温蠕变裂纹扩展速率试验方法的符号、定义、试样、试验设备、试验程序、试验结果处理和试验报告。

本标准适用于金属材料在高温下用紧凑拉伸(CT)试样施加恒定载荷, 测定蠕变裂纹扩展速率 da/dt , 并给出 da/dt 和裂纹尖端参量 $C^*(t)$ 的关系。

本标准限制使用在大范围蠕变情况下的蠕变裂纹扩展; 不适用于由高温腐蚀环境所引起的裂纹扩展。

2 引用标准

下列标准所包含的条文, 通过在本标准中引用而构成为本标准的条文, 本标准出版时, 所示版本均为有效。所有标准都会被修订, 使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 6398-86 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法

GB 8170-87 数值修约规则

HB 5151-96 金属高温拉伸蠕变试验方法

JJG 141-88 工作用铂铑 10-铂、铂铑 13-铂热电偶检定规程

JJG 276-88 高温蠕变、持久强度试验机检定规程

JJG 351-84 工作用镍铬-镍硅、镍铬-考铜热电偶检定规程

3 符号、定义

3.1 符号

本标准采用的符号、名称及单位见表 1。

表 1

符 号	名 称	单 位
CT	紧凑拉伸试样	-
W	试样宽度	mm
B	试样厚度	mm

中国航空工业总公司 1999-01-06 发布

1999-03-01 实施

表 1(完)

符 号	名 称	单 位
B_N	净厚度(侧槽试样中两侧槽根部之间距离)	mm
H	试样的半长度	mm
$W - a$	试样韧带尺寸	mm
a_0	试验开始时物理裂纹长度	mm
a_i	第 i 处的裂纹长度	mm
a_t	总的裂纹长度	mm
a_{pl}	总的裂纹长度预测值	mm
Δa_{pl}	裂纹扩展长度预测值	mm
$f(a/w)$	试样几何形状因子	-
P	试验载荷	kN
P_{fmax}	预制疲劳裂纹时的最大疲劳载荷	kN
P_{fmin}	预制疲劳裂纹时的最小疲劳载荷	kN
\dot{V}	总加载线位移	mm
\dot{V}	加载线位移速率	mm/h
V_i	瞬时加载线位移	mm
V_c	和时间相关蠕变变形引起的加载线位移	mm
\dot{V}_c	和蠕变相关加载线位移速率	mm/h
K	应力强度因子	MPam ^{1/2}
$C^*(t)$	C 星积分	N/mm ^h
$\dot{\epsilon}$	应变速率	mm/mm ^h
da/dt	蠕变裂纹扩展速率	mm/h
t_T	转变时间	h
σ_y	有效屈服强度	MPa
J_p	J 积分的塑性分量	N/mm
t'_T	用 $C^*(t)$ 代替 $C^*(t_T)$ 计算所得的 t_T	h

3.2 定义

本标准采用下列定义：

3.2.1 C 星积分 $C^*(t)$ ：围绕裂纹前沿从裂纹的一个面到另一个面的线积分或面积分，表征一物体经受大范围蠕变状态下，在任何瞬时裂纹前沿局部应力和应变速率场。见图 1。

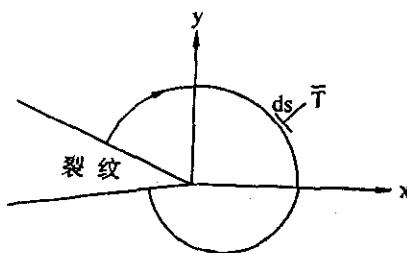


图1 围绕裂纹尖端积分路径示意图

在 $X - Y$ 平面内裂纹尖端平行 Z 轴的线性积分 $C^*(t)$:

$$C^*(t) = \int_{\Gamma} (W^*(t) dy - \vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial \chi} \cdot ds)$$

式中: $W^*(t)$ —— 单位体积瞬时应力功或能量率;

Γ —— 围绕(即包含)裂纹尖端的积分路径;

\vec{T} —— 在 ds 上外部拉应力矢量;

\vec{U} —— 在 ds 上位移率矢量;

x, y —— 直角坐标系;

ds —— 轮廓回线上的增量;

$\vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial \chi} ds$ —— 沿 Γ 进入闭合面积应力能率。

$C^*(t)$ 值是和路径无关的, 所试验的材料变形遵循下式规律, 即总变形为时间和应力单值函数。

$$\dot{\epsilon} = f_1(t)f_2(\sigma)$$

式中: $f_1(t)$ —— 时间函数;

$f_2(\sigma)$ —— 应力函数。

3.2.2 总加载线位移 V : 瞬时加载引起的线位移 V_i 和与时间相关蠕变变形引起的加载线位移 V_c 之和。

3.2.3 试样宽度 W : 参考平面到试样后背表面的距离。在紧凑拉伸试样中, 参考平面是指含有加载线并和侧面正交的平面。

3.2.4 转变时间 t_T : 在大范围蠕变状态下裂纹扩展需要的时间, 即试样蠕变变形扩展到无裂纹带的大部分区域所需的时间。

4 试样

4.1 试样形状和尺寸见图.2。

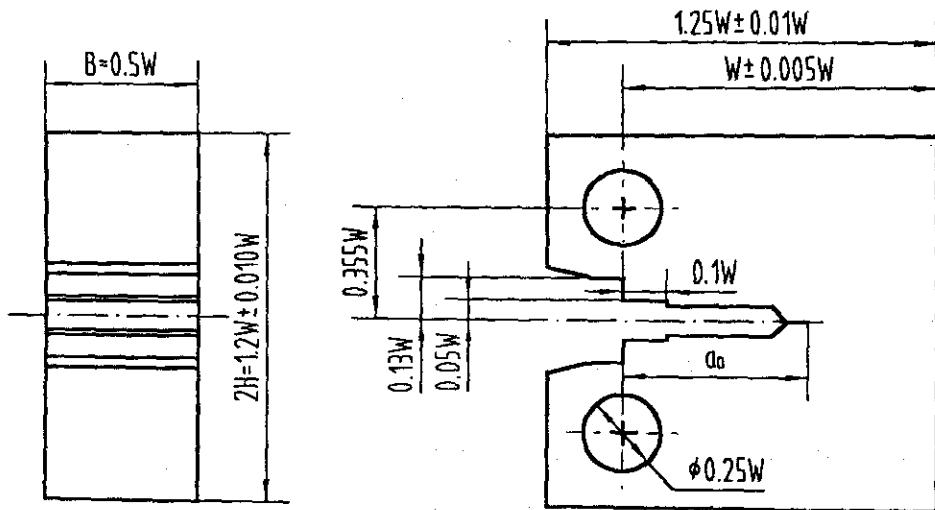


图 2 标准 CT 试样

4.2 物理裂纹长度 a_0 (初始缺口加上疲劳预制裂纹) 在 $0.4 \sim 0.5W$ 之间选取。 $W = 2B$, 推荐 B 值为 $10, 15, 20\text{mm}$ 。

4.3 为使裂纹平直, 可采用侧槽试样, 侧槽深度为厚度的 10% , 侧槽角度小于 90° , 根部半径为 $0.4\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 。

4.4 试样缺口可通过线切割、铣刀、拉刀等切割制成。

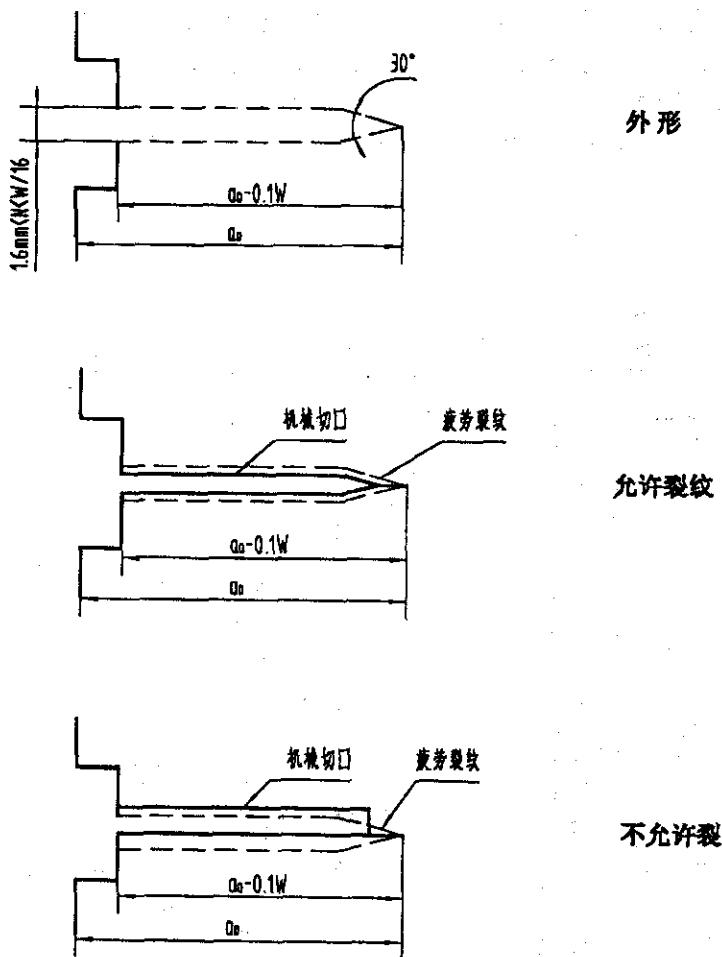
4.5 疲劳裂纹预制: 试样在室温或试验温度下预制疲劳裂纹, 疲劳预裂纹扩展到最后 0.64mm 时, 最大疲劳载荷 $P_{f_{max}}$ 不应超过 P_f :

$$P_f = \frac{0.4B_N(W - a_0)^2\sigma_y}{(2W + a_0)}$$

或应力强度因子对杨氏模量的比值等于或小于 $0.0025\text{mm}^{1/2}$ 疲劳载荷准确度应在 $\pm 5\%$ 以内, 载荷范围将不低于最大载荷的 90% , 裂纹扩展到最后 0.5mm 时, 最大疲劳载荷 $P_{f_{max}}$ 必须不超过蠕变裂纹扩展试验载荷。疲劳裂纹包络示意图见图 3。

4.6 疲劳预制裂纹后进行蠕变裂纹扩展试验, 预制疲劳裂纹和试验之间不允许进行中间热处理。

4.7 从机械加工的缺口到疲劳预制裂纹扩展前沿长度不超过物理裂纹长度 a_0 的 5% 和不少于 1.3mm 。



注 - 疲劳预裂纹开始端和机械切口上下两端等距离误差在 0.05mm 以内。

图 3 疲劳预裂纹包容示意图

5 试验设备

5.1 试验机

5.1.1 可采用静载或伺服加载蠕变试验机用作蠕变裂纹扩展试验，加载系统必须保证在整个试验过程中载荷恒定。

5.1.2 试验机加载、卸载应平稳，没有冲击和颤动现象，杠杆系统应灵敏。

5.1.3 试验机在使用范围内载荷示值误差不应超过 $\pm 1\%$ ，示值变动值不超过 1%。

5.1.4 试验机力值系统的检定按 JJG 276 进行。

5.1.5 采用杠杆型蠕变试验机,应配备有杠杆自动调平装置,以保证载荷满足 5.1.1、5.1.2、5.1.3 规定的要求,调平装置不能对试样产生震动、过载和扭力。

5.2 CT 试样夹具和固定

5.2.1 U 型槽和销子组合用于试样上、下部分(见图 4),允许试样加载时能平面旋转。销子直径为 0.24W 。

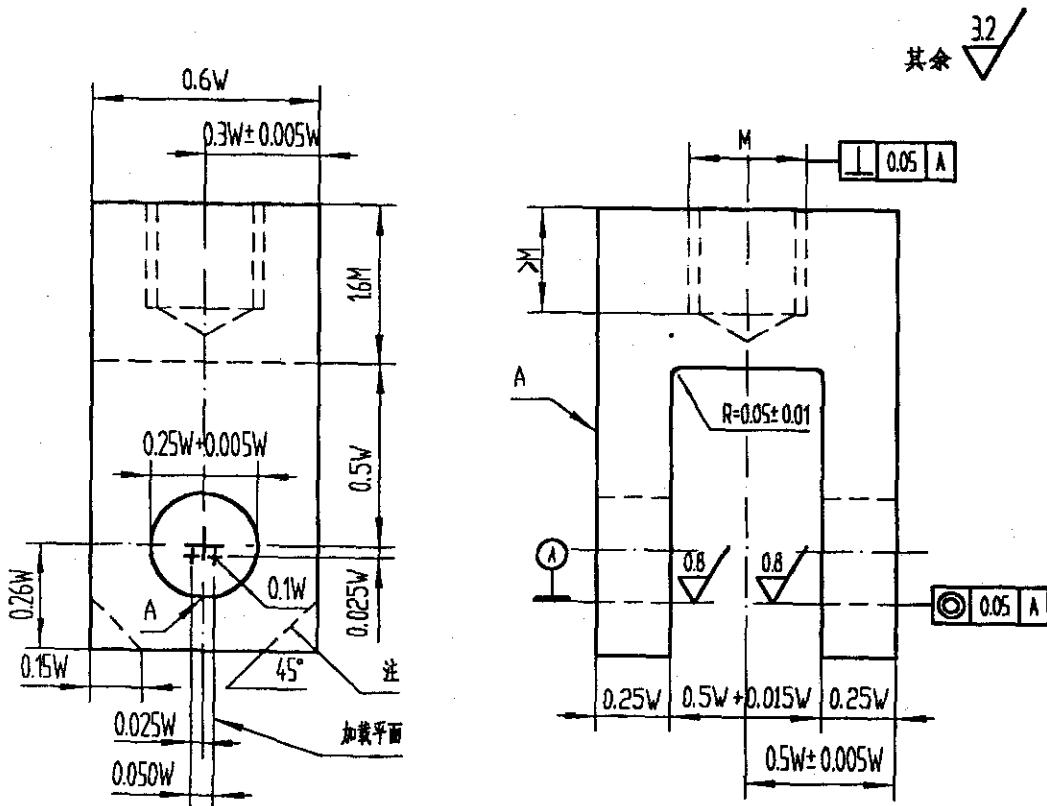


图 4 夹具图

5.2.2 销孔和 U 型槽尺寸均以试样宽度 W 确定,卡具和拉杆材料按试验温度和施加载荷水平选定。

5.3 加热装置

5.3.1 加热炉可采用电阻或辐射炉。在空气介质大气压下加热试样,加热炉的均热带应不小于试样工作部分长度的 1.5 倍。

5.3.2 加热装置应保证在整个试验过程中温度稳定在均热带范围内。温度波动及梯度应符合表 2 的规定。

5.4 温度测量装置

5.4.1 温度测量的方法必须灵敏和可靠,以保证试样上温度波动和温度梯度满足表 2 要求。

5.4.2 热电偶的校正应按 JJG 141 和 JJG 351 进行检定,热电偶应保持长时使用稳定,试验周期内允许变动值应符合 HB 5151 的规定。

5.4.3 温度测量系统和记录仪每年至少检定一次,按 HB 5151 进行。

5.4.4 在整个试验过程中,室温应保持在 $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。室温突变不超过 5°C 。

表 2

试验温度, $^{\circ}\text{C}$	温度波动, $^{\circ}\text{C}$	温度梯度, $^{\circ}\text{C}$
≤ 600	± 2	2
$> 600 \sim 900$	± 3	3
$> 900 \sim 1100$	± 4	4
$> 1100 \sim 1200$	± 5	5

注:

1 试验温度应包括对热电偶、补偿系统、测温仪器误差的修正。

2 温度波动指实测温度与试验温度之差。

3 温度梯度指试样计算长度范围内,任一瞬间所有被测温度的最高值与最低值之差。

5.5 变形测量装置

5.5.1 试验过程中需连续地测量位移,位移的测量必须在加载线上获得,推荐采用图 5 所示装置。

5.5.2 变形的引伸机构应如实传递试样加载点位移,位移规工作范围不大于试验过程中预见位移的二倍,位移规的准确度应该在规定满量程的 $\pm 1\%$,在计算中从拟合数据得到的个别数据点,最大的误差不超过工作范围的 $\pm 1\%$ 。

5.5.3 推荐用截面自由固定的刀刃规,刀刃的平行度必须调整到保证在 $\pm 1^{\circ}$ 以内。见图 6。

5.6 裂纹长度测量装置

5.6.1 裂纹长度测量技术必须能够测量横过试样厚度的平均裂纹长度,在所试温度测量裂纹长度的分辨率应不低于 0.1mm 。

5.6.2 测量裂纹长度使用电位技术,其方法见附录 A(标准的附录)。

5.6.3 裂纹长度测量的准确性,用重复测量裂纹长度并计算平均裂纹长度的标准偏差来确定。

5.7 计时装置

试验机应配有计时装置,该装置应定期校正,使之准确至总时间的 $\pm 1\%$ 以内。

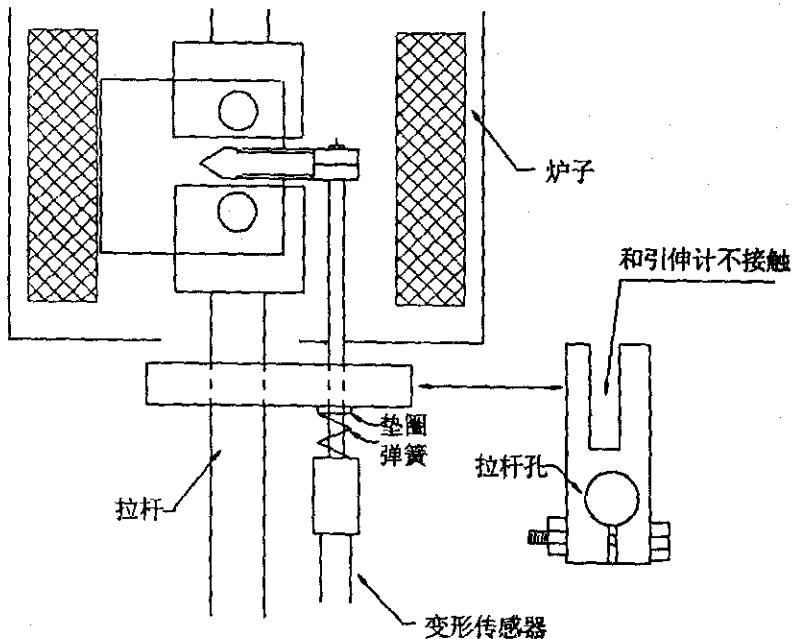
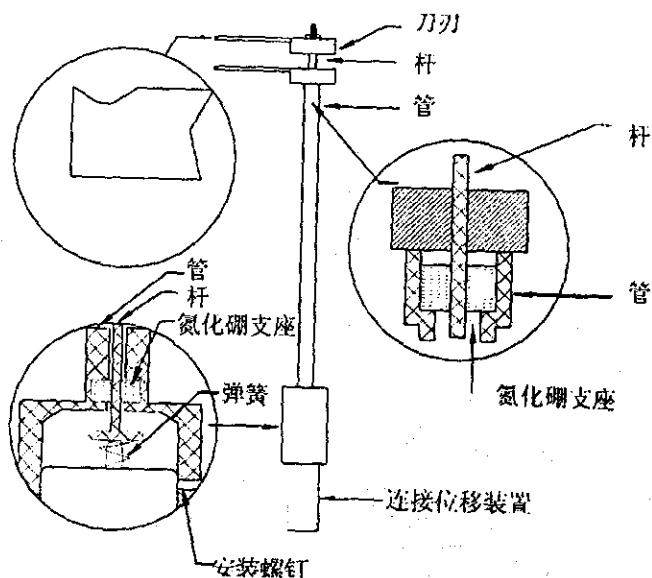


图 5 夹具和试样连接示意图



6 试验程序

6.1 试样安装

通过插入两个销钉,使试样安装在试验机上,施加大约预期试验载荷 10% 的初载荷。

6.2 热电偶安装

测量试验温度的热电偶应绑在无裂纹轮廓区,裂纹平面上或距裂纹平面 2~5mm 处,试样宽度大于 50mm 时,推荐用多根热电偶。热电偶与试样应紧密地接触。防止热辐射。整个测量回路绝对不能短路,热区域可采用陶瓷绝缘器。

6.3 升温

6.3.1 升温过程中带着初载荷升温。

6.3.2 升温和试验过程中温度波动和温度梯度不允许超过表 2 的规定。

6.3.3 到达试验温度后保温时间不少于 1h。

6.3.4 升温过程中,电位系统的电流应同时接通到试样上。

6.4 加载

施加主载荷时,应避免冲击和惯性地过载,逐渐施加载荷,监控位移,以确保引伸计位置合适,施加载荷时间应尽可能短。

6.5 试验过程

6.5.1 试验过程中测量电位、载荷、加载线位移、试验温度。

6.5.2 采用循环数字采集系统,采样周期一般不低于 15min,当试样接近断裂时,采样周期可加快到 3min 至 1min。

6.5.3 试验过程中温度偏差超过表 2 规定的下限值时试验不报废,当温度偏低过程中获得的裂纹扩展数据相当于 0.5mm 时,为无效数据。

6.5.4 采用电流电位技术测量裂纹长度时,应每 24h 内测量一次无电流的电位。

6.6 试验后的测量

6.6.1 如果试验结束时,试样不断裂,则应在室温条件下拉断,最好采用循环加载破断,铁素体钢可冷却到延-脆性转变温度以下拉断。

6.6.2 最好在试样断裂前结束试验,这样便于精确测量最终裂纹长度,从侧槽根部向内延伸 0.005 W,在试样厚度中心线 9 个相同距离测量裂纹长度。

6.6.3 沿疲劳预裂纹前端到标志蠕变裂纹扩展的前沿测量裂纹长度,通过两个接近表面测量的平均值和余下七个裂纹长度测量结果一起计算物理裂纹长度 a_0 及最终裂纹长度 a_f 值。测量仪器应具有 0.025mm 准确度。

7 试验结果处理

7.1 确定裂纹长度

从电位读数确定裂纹长度,最终裂纹长度预测值 a_{pf} 减去物理裂纹长度 a_0 即为预计的裂纹扩展长度 Δa_{pf} 。

7.2 试验有效性

7.2.1 如果满足下式再确定试验结果有效性：

$$0.85 \leq [\Delta a_p / (a_f - a_0) - 1] \leq 1.15$$

7.2.2 物理裂纹长度：6.6.3 中 9 个物理裂纹长度测量值的任一个比 a_0 大 10% 试验无效。

7.2.3 最终裂纹长度：6.6.3 中 9 个最终裂纹长度测量值的任一个比 a_f 大 10% 试验无效。对于后续的试样，侧槽轮廓能够进行修正使其容易满足要求。

7.2.4 所有温度偏差必须在表 2 允许的范围之内，否则试验无效。

7.3 确定裂纹扩展速率和加载线位移速率

7.3.1 根据裂纹长度、加载线位移和所对应的时间来记录数据点。第一个数据点将预制裂纹长度、累积挠度和对应时间设为零，后续数据点由裂纹长度、对应的加载线位移和时间组成。相邻数据点之间的最小裂纹扩展量是 0.25mm，其最小位移的增量应不大于引伸计满量程的 0.1%，相邻读数之间最大允许的 Δa 是 0.02 W。

7.3.2 蠕变裂纹扩展速率和加载线位移速率根据裂纹长度对时间 (a 对 t) 和加载线位移对时间 (v 对 t) 的数据确定。推荐用割线法或递增多项式方法逐步近似拟合，见附录 B(提示的附录)。

7.4 计算蠕变位移率

按下列公式计算蠕变位移率 dV_c/dt 或 V_c ：

$$V_c = \dot{V} - \frac{\dot{a}B_N}{P} \left[\frac{2K^2}{E} + (m+1)J_p \right]$$

式中：
 \dot{a} ——裂纹扩展速率 da/dt ；

E ——弹性模量；

J_p ——J 积分的塑性分量；

m ——应力指数，由雷姆勃格 - 奥斯古德(Ramberg - Osgood)应力 - 应变关系中得出：

$$\epsilon_p = D_l (\sigma/\sigma_y)^m$$

式中：
 ϵ_p ——塑性应变；

D_l ——常数。

计算 K 的方程式及计算 J_p 方法在附录 B(提示的附录)中给出。

7.5 确定 $C^*(t)$ 积分

每一点 $C^*(t)$ 积分大小由下式确定：

$$C^*(t) = \left[\frac{PV_c}{B_N(W-a)} \right] \left[\frac{n}{(n+1)} \right] \left[2 + 0.522 \frac{(W-a)}{W} \right]$$

式中：
 n ——最小蠕变速率和施加应力关系曲线的蠕变指数，如果不进行蠕变试验，使用的 n 值和它的来源必须在报告中注明。

7.6 有效性的判据

试验方法数据的有效性，必须满足下列有效性判据。需报告所有数据，但是对不满足下列有效性判据的数据应该分别作出标记：

a) 只有获得数据的时间超过转变时间 t_T 才是有效的。 t_T 按下式估计：

$$t_T = \frac{K^2(1-v^2)}{E(n+1)C^*(t_T)}$$

式中: v —— 泊桑比。

t_T 的计算取决于 $C^*(t_T)$ 值, 用下列步骤确定 t_T 。与每个数据点相对应的时间 t 用上式计算 t_T , 用 $C^*(t)$ 代替 $C^*(t_T)$ 。 t_T 是 t_T 数据中的最大值。

b) 最初 0.5mm 裂纹扩展以前获得的裂纹扩展数据, 属于过渡蠕变裂纹扩展的数据, 是无效的。

c) 为保证裂纹扩展速率和 $C^*(t)$ 唯一相关, 数据必须满足 $V_c/V \geq C$ 的要求。C 在 0.5 ~ 0.8 之间。当数据满足 $V_c/V \geq 0.8$, 是有效的; 在 $0.5 \leq V_c/V < 0.8$ 之间的数据, 如果在 da/dt 对 $C^*(t)$ 图中可分辨, 并且与满足 $V_c/V \geq 0.8$ 趋向是一致的, 也可认为是有效的。

d) 如果试验过程中材料外侧的裂纹和原始裂纹扩展平面的裂纹, 取向偏差在 5°以上, 则试验数据无效。

e) 累积加载线位移后, 所获得的数据超过 0.05 W, 试验数据无效。

7.7 准确度

da/dt 对 $C^*(t)$ 的准确度是材料可变性以及裂纹长度、测量温度、蠕变位移率和施加载荷水平误差的固有函数。载荷变化 ±1%, 能够引起 $C^*(t)$ 值的 ±(6~12)% 的变化; 在给定的 $C^*(t)$ 转换到 da/dt 值, 有 ±(3~10)% 的变化。

7.8 数值修约

数值的修约按 GB 8170 进行, 修约到有效数字 4 位。

8 试验报告

- 8.1 委托试验单位;
- 8.2 试验材料及生产厂;
- 8.3 冶金方法、炉号及规格;
- 8.4 热处理制度;
- 8.5 试样编号;
- 8.6 试样取向、类型和尺寸;
- 8.7 试验机和测量裂纹长度的仪器及其测量准确度;
- 8.8 试验温度、相关的材料特性和被鉴别产品的尺寸和类型(例如薄板、厚板和锻件);
- 8.9 如果试样从大的产品中切取, 给出试样在母体中取样的位置;
- 8.10 预制疲劳裂纹的温度、加载频率、 $P_{f\max}$ 、 $P_{f\min}$ 的最终值和循环数。
- 8.11 da/dt 对 $C^*(t)$ 曲线图, 推荐 $C^*(t)$ 是横坐标, da/dt 是纵坐标。通常使用 $\lg - \lg$ 双对数座标, 报告中要指明所有违背 7.6 有效性判据的数据。以表格形式给出 a 、 t 、 da/dt 、 V 、 V_c 、 $C^*(t)$ 、 K 、 J_p 、 t_T 等数据并作图。

附录 A
(标准的附录)

蠕变裂纹长度直流电位测量方法

A1 CT 试样输入电流和电位引线位置见图 A1。通过测量 U/U_0 并按下式计算裂纹长度：

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi Y_0/2W)}{\cosh[\frac{U}{U_0} \cosh^{-1}(\frac{\cosh \pi Y_0/2W}{\cos \pi a_0/2W})]} \right\}$$

式中： Y_0 ——输出电位引线之间的半距离，mm；

U ——对应于裂纹长度 a 的输出电位，mV；

U_0 ——对应 a_0 的初始电位，mV。

A2 直流热电势测量，在 A1 方程式中测量裂纹尺寸的 U 和 U_0 电位，实际值可能与指示读数不同，这些不同由于热电势引起的。 U_{th} 热电势是由两个输出端接点性能或两输出端电阻的较小差别引起的。 U_{th} 的最初值必需测量，通过切断电流和记录输出电位可以得到。除测量初始值外， U_{th} 值也应该通过在试验过程中，短时间切断电流周期地测量。在 A1 给出的方程式中使用 U 和 U_0 值前必须先减去 U_{th} 值。

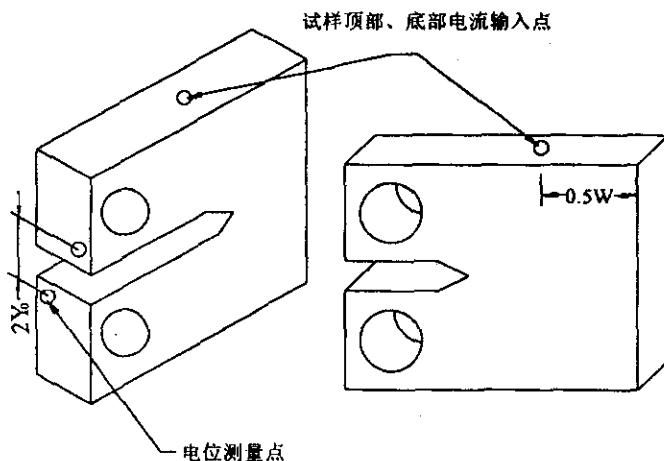


图 A1 输入电流电压引线示意图

附录 B (提示的附录)

数据处理方法

B1 割线方法

割线法是在 $a - t$ 和 $V - t$ 的曲线上, 连接两相邻的数据点计算其直线斜率, 即裂纹扩展速率和位移速率分别按 B1、B2 式计算:

式中： da/dt ——裂纹增量的平均速率；

dV/dt ——挠度增量的平均速率;

a ——平均裂纹长度, $a = (a_{i+1} - a_i)/2$ 。

B2 递增多项式方法

递增多项式方法见 GB 6398—86 附录 A。

B3 K 、 J_p 、 C_t 的计算:

按下式计算 K :

$$K = \frac{P}{\sqrt{BB_NW}} \left[\frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{3/2}} \right] f(a/W) \quad \dots \dots \dots \quad (B3)$$

式中: $f(a/w) = 0.866 + 4.64(a/w) - 13.32(a/w)^2 + 14.72(a/w)^3 - 5.6(a/w)^4$

按下式计算 J_p :

$$J_p = \frac{Dh_1(a/W, m)}{\left[\sigma_c(W-a)\right]^m} \left(\frac{P}{1.455B_{N2}}\right)^{m+1} \quad \dots \quad (B4)$$

式中: $a = (\phi^2 + 2\phi + 2)^{1/2} - (\phi + 1)$

$$\phi = \frac{2a}{(W-a)}$$

D, m ——常数, 和材料的应力-应变行为有关, $\epsilon = \sigma/E + D(\sigma/\sigma_s)^m$

$h_1 = a/W$ 和 m 函数在表 B1 中列出。

按下式计算 C_1 :

$$C_t = \frac{PV_c}{(BB_v)^{1/2}W} F'/F \quad \dots \dots \dots \quad (B5)$$

$$\text{式中: } F'/F = \left[\frac{1}{2 + a/W} + \frac{3}{2(1 - a/W)} \right] + \frac{f'}{f}$$

f 在 B3 中定义, 而

$$f' = 4.64 - 26.64(a/W) + 44.16(a/W)^2 - 22.4(a/W)^3$$

上述 C_i 值仅仅作为小范围蠕变状态，在大范围蠕变下 $C_i = C^*(t)$ 。

表 B1 CT 试样在平面应变状态下的 $h_i(a/W, m)$ 值

a/W	h_i								
	m=1	m=2	m=3	m=5	m=7	m=10	m=13	m=16	m=20
0.250	2.230	2.050	1.780	1.480	1.330	1.260	1.250	1.320	1.570
0.375	2.150	1.720	1.390	0.970	0.693	0.443	0.276	0.176	0.098
0.500	1.940	1.510	1.240	0.919	0.685	0.461	0.314	0.216	0.132
0.625	1.760	1.450	1.240	0.974	0.752	0.602	0.459	0.347	0.248
0.750	1.710	1.420	1.260	1.033	0.864	0.717	0.575	0.448	0.345
1.000	1.570	1.450	1.350	1.180	1.080	0.950	0.850	0.730	0.630

中华人民共和国航空工业标准
金属材料蠕变裂纹扩展速率
试验方法

HB 7623 - 1998

*
中国航空工业总公司第三〇一研究所出版
(北京东外京顺路7号)
三〇一研究所印刷车间印刷
北京市1665号信箱发行
版权专有 不得翻印

*
开本 787×1092 1/16 印张 1 1/4 字数 28千字
1999年7月第一版 1999年7月第一次印刷

印数 1—500

书号：标301.A0453 定价 8.00 元