

前 言

本标准等效采用 ASTM E647—1995a《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》，主要技术内容与之相同，但较详细和具体，编写结构不完全对应。本标准与 ASTM E647—1995a 的小差异如下：

- 增加了单边缺口三点弯曲 SE(B)试样为疲劳裂纹扩展标准试样；
- 增加了含水介质中常用的标准 C(T),M(T)试样裂纹扩展用介质盒及介质循环系统；
- 增加了小裂纹扩展试验用的标准试样。

本标准此次修订对下列技术内容进行了修改：

- 增加单边缺口三点弯曲 SE(B)试样；
- 删去附录 A(补充件)中的 BASIC 语言计算程序；
- 将附录 B(参考件)和附录 C(参考件)的内容纳入标准正文；
- 删去附录 D(参考件)；
- 增加 5 个附录如下：

- 附录 B(标准的附录) 测定裂纹长度的柔度法；
- 附录 C(标准的附录) 含水介质中疲劳裂纹扩展测定的特殊要求；
- 附录 D(标准的附录) 裂纹长度的电位法测定；
- 附录 E(提示的附录) 疲劳小裂纹扩展测定方法；
- 附录 F(提示的附录) 疲劳裂纹张开力的测定方法。

自本标准实施之日起，代替 GB/T 6398—1986《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 是标准的附录。

本标准的附录 E、附录 F 是提示的附录。

本标准由国家冶金工业局提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：北京航空材料研究院。

本标准主要起草人：刘绍伦、欧阳辉、丁传富、朱亦刚、何玉怀。

本标准 1986 年 5 月首次发布。

中华人民共和国国家标准

金属材料疲劳裂纹扩展速率 试验方法

GB/T 6398—2000

代替 GB/T 6398—1986

Standard test method for fatigue crack
growth rates of metallic materials

1 范围

本标准规定了金属材料疲劳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、试验结果的处理和计算及试验报告。

本标准适用于在室温及大气环境条件下用标准紧凑拉伸 C(T) 试样(以下简称 C(T) 试样)、标准中心裂纹拉伸 M(T) 试样(以下简称 M(T) 试样)、标准单边缺口三点弯曲 SE(B) 试样(以下简称 SE(B) 试样)测定金属材料大于 10^{-5} mm/cycle 的恒力幅疲劳裂纹扩展速率;测定小于 10^{-5} mm/cycle 的低速疲劳裂纹扩展速率和疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ;以附录形式提供了测定疲劳裂纹长度的柔度法和电位法、含水介质中疲劳裂纹扩展测定的特殊要求、疲劳小裂纹扩展测定方法和疲劳裂纹张开力的测定方法。

本标准要求试样平面尺寸在试验力下保持弹性占优势,厚度足以防止屈曲,在此前提下试样厚度与强度不受限制。

本标准可采用规定以外的试样,但必须有适用的标定的应力强度因子。

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/T 228—1987 金属拉伸试验法

GB/T 4161—1984 金属材料平面应变断裂韧度 K_{Ic} 试验方法

GB/T 10623—1989 金属力学性能试验术语

GB/T 16825—1997 拉力试验机的检验

JJG 556—1988 轴向加力疲劳试验机检定规程

HB 6626—1992 金属材料在含水介质中疲劳裂纹扩展速率试验方法

3 符号、定义

3.1 符号

本标准所用符号、名称及单位见表 1。

表1 符号、名称及单位

符 号	名 称	单 位
da/dN	疲劳裂纹扩展速率	mm/cycle
a	计算裂纹长度	mm
a_0	试样切口长度	mm
N	循环数	cycle
P_{max}	最大力	N
P_{min}	最小力	N
ΔP	力值范围	N
$\sigma_{P0.2}$	规定非比例伸长(0.2%)应力	MPa
σ_{rs}	流变强度	MPa
E	弹性模量	MPa
K	应力强度因子	MPa \sqrt{m}
K_{max}	最大应力强度因子	MPa \sqrt{m}
K_{min}	最小应力强度因子	MPa \sqrt{m}
ΔK	应力强度因子范围	MPa \sqrt{m}
ΔK_{th}	疲劳裂纹扩展门槛值	MPa \sqrt{m}
ΔK_{eff}	有效应力强度因子范围	MPa \sqrt{m}
R	力值比	-
B	试样厚度	mm
W	试样宽度	mm

3.2 定义

本标准的术语除按照 GB/T 10623 的定义外,增加下列术语的定义。

3.2.1 循环 力或应力随时间作周期性变化的一个完整过程,通常称为力循环或应力循环。

3.2.2 循环数 N 力循环的次数。

3.2.3 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 力循环一次的疲劳裂纹扩展量,本标准中表示为裂纹尖端应力强度因子范围 ΔK 的函数。

3.2.4 应力强度因子 K 裂纹尖端附近区域弹性应力场强度的量值,在本标准中系指 I 型受力情况。

3.2.5 应力强度因子 K 标定 在特定试样平面几何条件下应力强度因子与力和裂纹长度的关系,它是基于试验和解析的数字表达式或曲线。

3.2.6 计算裂纹长度 a 与实际裂纹相当的直前缘裂纹长度。对于 C(T) 试样, a 从加力线开始计量(图 1)。对于 M(T) 试样, a 从试样中心线开始计量(图 2)。对于 SE(B) 试样, a 从试样边缘开始计量(图 3,从加力开始计量)。

3.2.7 最大力 P_{max} 循环力的最大代数值。

3.2.8 最小力 P_{min} 循环力的最小代数值。

3.2.9 力值范围 ΔP 最大与最小力之差,即: $\Delta P = P_{max} - P_{min}$

3.2.10 力值比 R 最小与最大力之比,即:

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \dots\dots\dots (1)$$

3.2.11 最大应力强度因子 K_{max} 对应于最大力的应力强度因子,并随裂纹长度的增长而变化。

3.2.12 最小应力强度因子 K_{min} 当力值比 R 大于或等于零时对应于最小力的应力强度因子;当力值比 R 小于零时取为零。在寿命预测中使用本定义提供的 $da/dN-\Delta K$ 的函数关系数据时应注意计算 K_{min} 的方法与使用状态的一致性。

3.2.13 应力强度因子范围 ΔK 最大与最小应力强度因子值之差,即:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \dots\dots\dots (2)$$

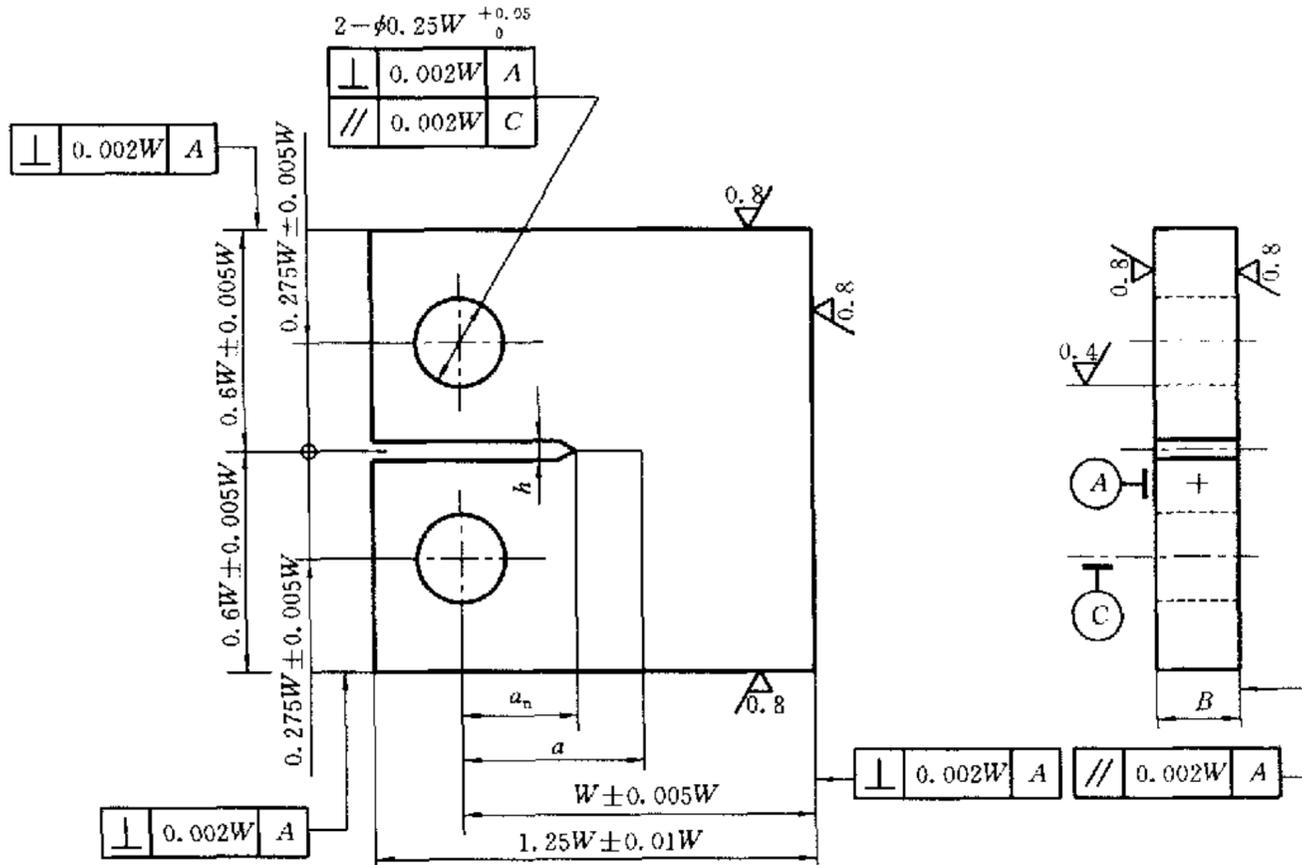


图 1 标准 C(T)试样图

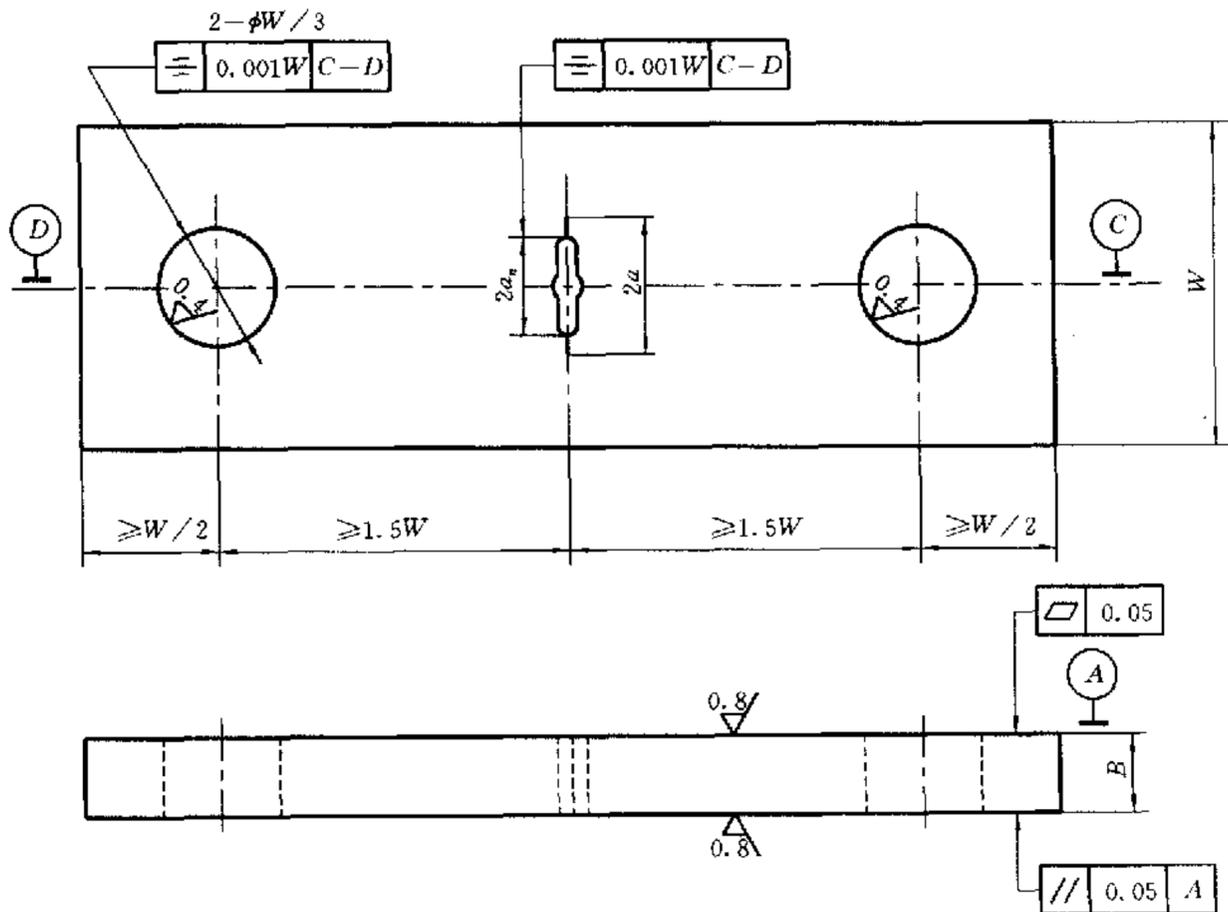


图 2 $W \leq 75$ mm 的 M(T)试样图

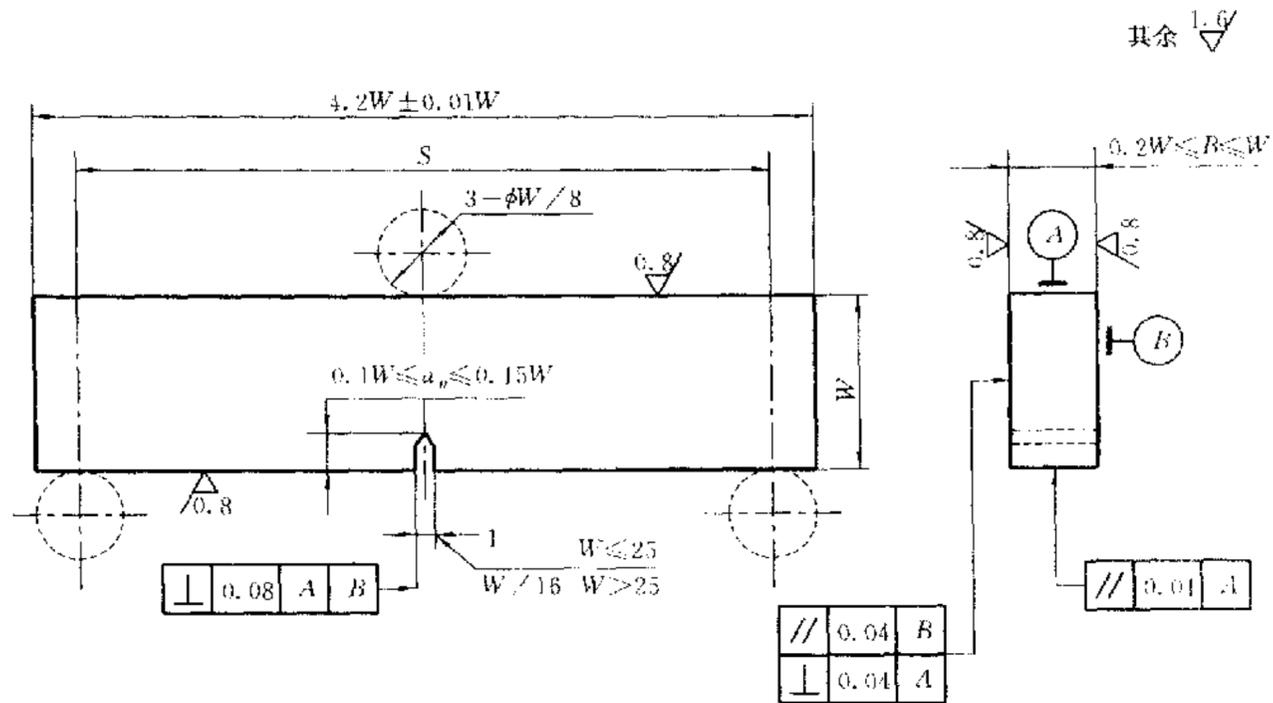


图 3 标准 SE(B) 试样¹⁾

3.2.14 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 在降力(K)试验中,疲劳裂纹扩展速率接近于零或裂纹停止扩展时所对应的裂纹尖端应力强度因子范围。通常定义疲劳裂纹扩展速率等于 10^{-7} mm/cycle 所对应的应力强度因子范围值为 ΔK_{th} 。

3.2.15 规范化的 K 梯度 K 随裂纹长度增加而变化的相对速率,其表达式如下:

$$C = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} \dots\dots\dots(3)$$

在恒力值比 R 的试验中式(4)成立:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} &= \frac{1}{K_{max}} \cdot \frac{dK_{max}}{da} \\ &= \frac{1}{K_{min}} \cdot \frac{dK_{min}}{da} \\ &= \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

3.2.15.1 增 K 试验 K 随裂纹长度增加而增加,式(3)的 C 值为正。对于 C(T)或 M(T)试样,在恒力试验中将导致增 K 试验,但 C 值是变化的,而且总是正值。

3.2.15.2 降 K 试验 K 随裂纹长度增加而降低,式(3)的 C 值为负。降 K 试验是通过降力实现的。

3.2.16 降力百分比 R_1 在降力试验中相邻两级力降低的百分比,其表达式如下:

$$R_1(\%) = \frac{P_{i-1} - P_i}{P_{i-1}} \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

式中 P_{i-1} 与 P_i 为相邻两级力。

3.2.17 流变强度 σ_{FS} 有效屈服强度值。按式(6)计算:

$$\sigma_{FS} = \frac{\sigma_{p0.2} + \sigma_b}{2} \dots\dots\dots(6)$$

式中 $\sigma_{p0.2}$ 和抗拉强度 σ_b 按照 GB/T 228 方法测定获得。

3.2.18 有效应力强度因子范围 ΔK_{eff} 在疲劳裂纹扩展过程中,用有效力值范围 ΔP_{eff} 计算得到的应力强度因子范围。

采用说明:

1) 为了使用者需要,根据国内的使用经验及国际标准草案,增加 SE(B) 试样为标准试样。

4 试样

4.1 试样形状

标准 C(T) 试样如图 1 所示。

标准 M(T) 试样如图 2 所示, 试样工作长度应满足如下要求:

拉-拉加力: 试样宽度 W 小于或等于 75 mm 时, 采用单销加力, 加力孔之间的距离应大于或等于 $3W$; 特殊几何形状 M(T) 试样的 W 大于 75 mm 时, 采用多排螺栓夹紧, 试样两端最里面一排螺钉孔之间的距离应大于或等于 $1.7W$ 。

拉-压加力: 采用夹板夹紧, 夹板内边缘之间的距离 L 应大于或等于 $1.2W$ 。

标准 SE(B) 试样, 如图 3 所示, 跨距 S 取 $4W$ 。

4.2 试样尺寸

4.2.1 试样厚度 B

4.2.1.1 对于 C(T) 试样, 推荐试样厚度的范围如下:

$$\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4} \dots\dots\dots(7)$$

式中 W 大于或等于 25 mm。

4.2.1.2 对于 M(T) 试样, 推荐的试样厚度上限为 $W/8$, 所必要的最小厚度要能避免屈曲, 并保证弯曲应变不超过名义应变的 5%。

4.2.1.3 对于 SE(B) 试样, 推荐试样厚度的范围为: $0.2W \leq B \leq W$ 。

4.2.2 试样宽度 W

4.2.2.1 为测得有效的试验数据, 应根据材料的规定非比例伸长应力 $\sigma_{P0.2}$ 以及预期的最大应力强度因子的极限值 K_{maxL} 和比值 a/W (C(T) 试样) 或比值 $2a/W$ (M(T) 试样) 的极限值选择试样的最小宽度 W , 见试样尺寸标准化曲线 (图 4), 即 $K_{maxL}/(\sigma_{P0.2} \sqrt{W}) - a/W$ 或 $2a/W$ 曲线。

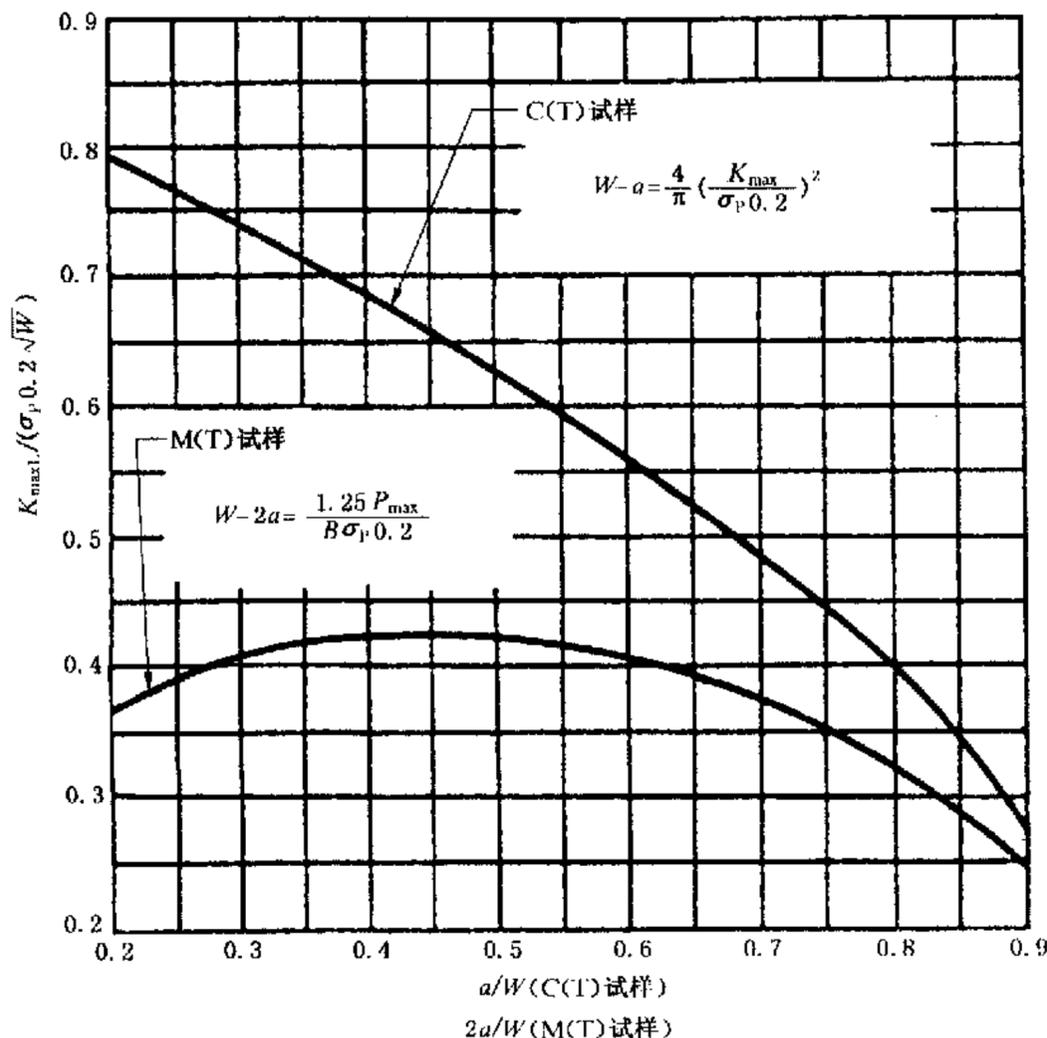


图 4 C(T) 和 M(T) 标准试样尺寸标准化曲线图

4.2.2.2 根据对无裂纹韧带最小值的要求按式(8)和式(9)绘制图4中的曲线:

对于C(T)试样:

$$W - a = \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{P_{0.2}}} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

式中 $(W-a)$ 为试样无裂纹的韧带区。

对于M(T)试样:

$$W - 2a = \frac{1.25 P_{\max}}{B \sigma_{P_{0.2}}} \dots\dots\dots (9)$$

式中 $(W-2a)$ 为试样无裂纹的韧带区。

4.2.2.3 对于SE(B)试样的最小宽度 W 的选择是根据规定非比例伸长应力 $\sigma_{P_{0.2}}$ 以及预期的最大应力强度因子的极限值 $K_{\max L}$ 和比值 a/W 的极限值获得。无裂纹韧带最小值按式(10)计算。

$$W - a = \left[\frac{12WP_{\max}}{2B\sigma_{P_{0.2}}} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

式中 $(W-a)$ 为试样无裂纹的韧带区。

4.3 试样切口

4.3.1 切口长度

4.3.1.1 C(T)试样的切口长度 a_n 应等于或大于 $0.2W$ 。

4.3.1.2 M(T)试样的切口长度 a_n 应不小于中心孔半径的3倍。当采用柔度法测量裂纹长度时,建议中心裂纹长度 $2a_n$ 不小于 $0.2W$ 。

4.3.1.3 SE(B)试样的切口长度 a_n 应大于或等于 $0.1W$,小于或等于 $0.15W$ 。

4.3.2 切口制备

试样切口可通过铣切、线切割和其他方法加工而成。图5给出了各种不同的切口几何形状。为便于预制出合格的疲劳裂纹,建议在热处理后进行线切割加工,切口根部曲率半径 ρ 小于或等于 0.08 mm (在预制出合格的疲劳裂纹的前提下曲率半径 ρ 可以稍大些);铣切的人字形切口及其他加工的切口形状其根部曲率半径 ρ 小于或等于 0.25 mm 。

4.4 试样取向

金属材料疲劳裂纹扩展速率与试样裂纹面的取向和裂纹扩展方向有关。试样取向规定参照GB/T 4161—1984中5.3。

4.5 试样的残余应力

试样不可避免地会存在残余应力,它有可能引起疲劳裂纹扩展速率的变化。通过选择合适的试样形状和尺寸(如M(T)试样和较小的 B/W 比值)及合理的试样加工与热处理工艺等,使残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响减至最小。

4.6 试样的厚度效应

疲劳裂纹扩展速率并非总是与试样的几何形状无关,试样厚度的变化对疲劳裂纹扩展速率的影响有可能增大、减小或保持不变,因此,对试样的厚度效应应当引起注意。

4.7 裂纹的闭合效应

裂纹闭合是指力循环的卸力过程中裂纹面接触并且力通过裂纹而传递的一种现象,因此裂纹闭合提供了解释长裂纹与小裂纹不同的扩展行为的依据,它是通过有效应力强度因子范围 ΔK_{eff} 来表征的。

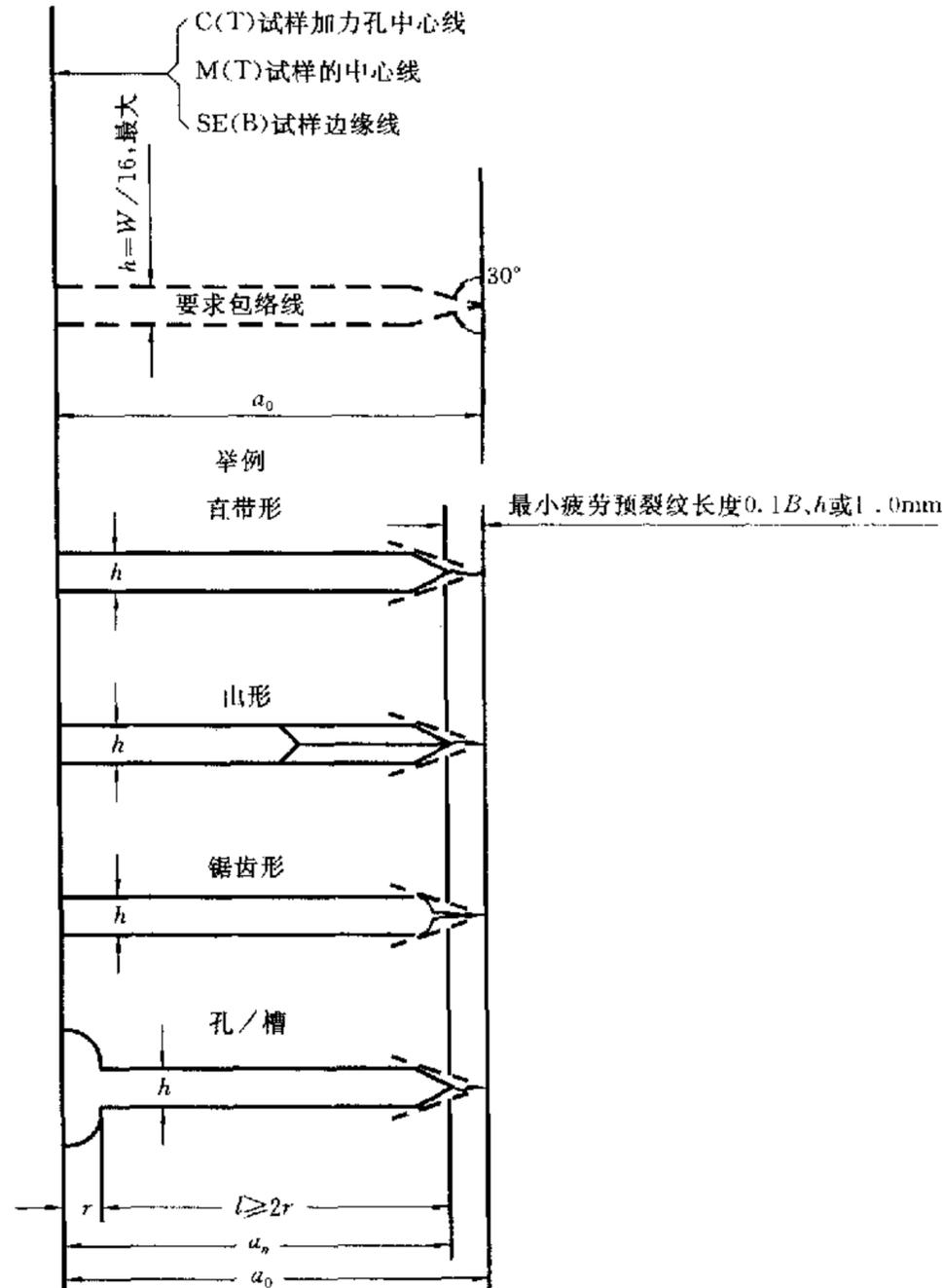


图 5 切口详图及最小疲劳预裂纹长度的要求

5 试验设备

5.1 疲劳试验机

试验允许在不同类型的拉压疲劳试验机上进行,但必须满足:

- a) 试验机的加力系统应有良好的同轴度,使试样受力对称分布;
- b) 按照 GB/T 16825 在静态下检验力值,最大允许误差为 $\pm 1\%$,示值变动度不超过 1% ;按照 JJG 556 在动态下检验力值,最大允许误差为 $\pm 3\%$;
- c) 带有准确的循环计数装置。

5.2 加力装置

5.2.1 C(T)试样的加力装置。U型夹具按图 6 设计。材料的规定非比例伸长应力 σ_{pe2} 应大于 980.7 MPa。销钉与销孔间隙应设计得使摩擦减至最小。

5.2.2 M(T)试样的加力装置。夹具设计应保证在整个试验过程中试样工作区域内应力均匀分布。为限制屈曲,薄板试验必须采用约束导板。

夹具夹紧形式随试样宽度和加力条件的变化如下:

- a) 拉-拉加力,宽度 W 小于或等于 75 mm 时,可采用单销夹紧或平板液压夹具夹紧;
- b) 拉-拉加力,宽度 W 大于 75 mm 时,采用多排螺栓夹紧或平板液压夹具夹紧;
- c) 拉-压加力,采用压板夹紧,其专用螺栓和凹槽夹具参照图 7 设计;夹紧力也可由液压和机械楔形系统提供。

5.2.3 SE(B)试样的加力装置。三点弯曲加力装置参照图 3 的要求,加力线和支承线的圆柱直径取 $W/8$,跨距 S 取 $4W$,圆柱与试样的接触应设计得使摩擦减至最小。

5.2.4 应保证加力装置具有足够的刚性和良好的同轴度。

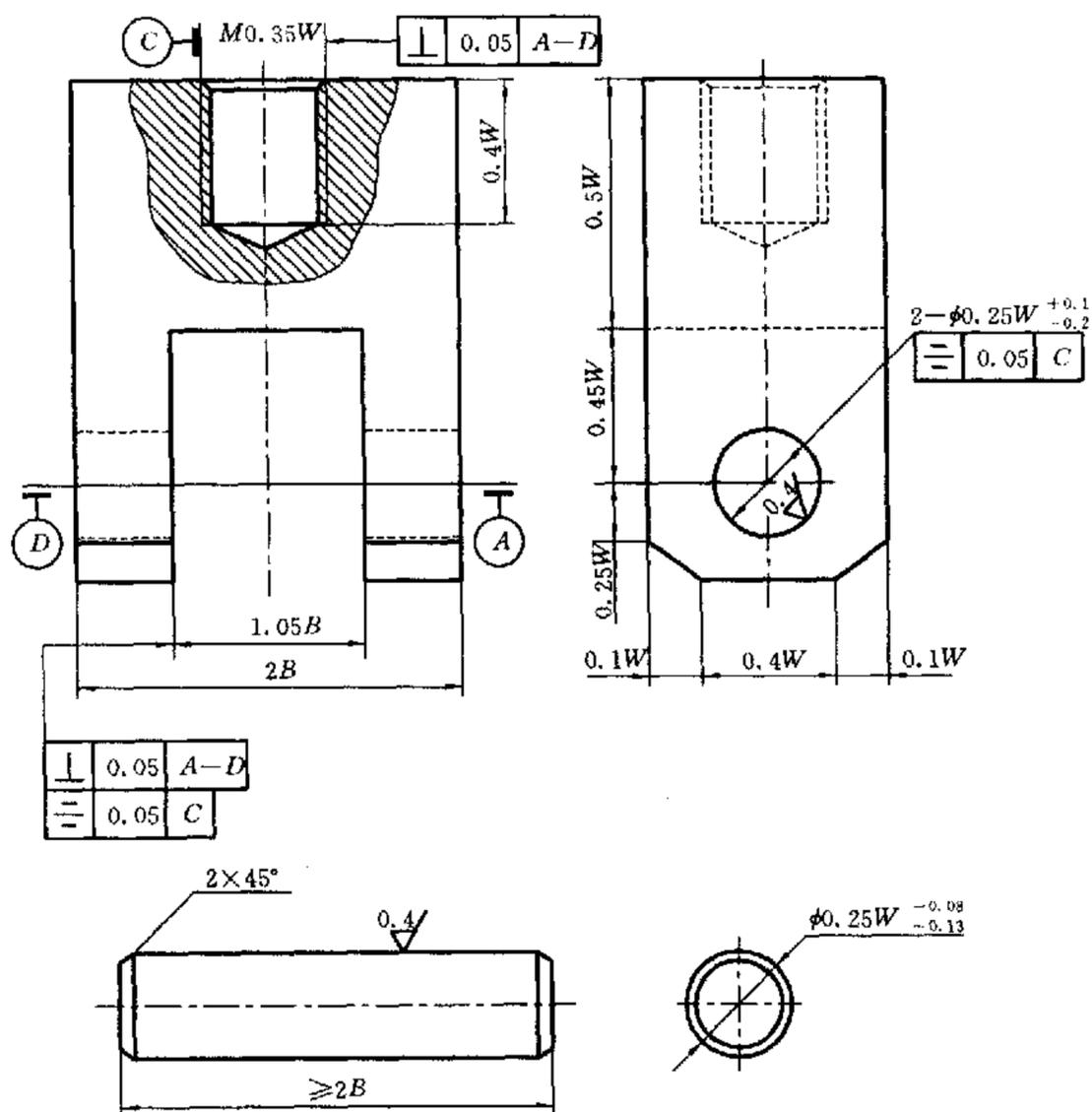
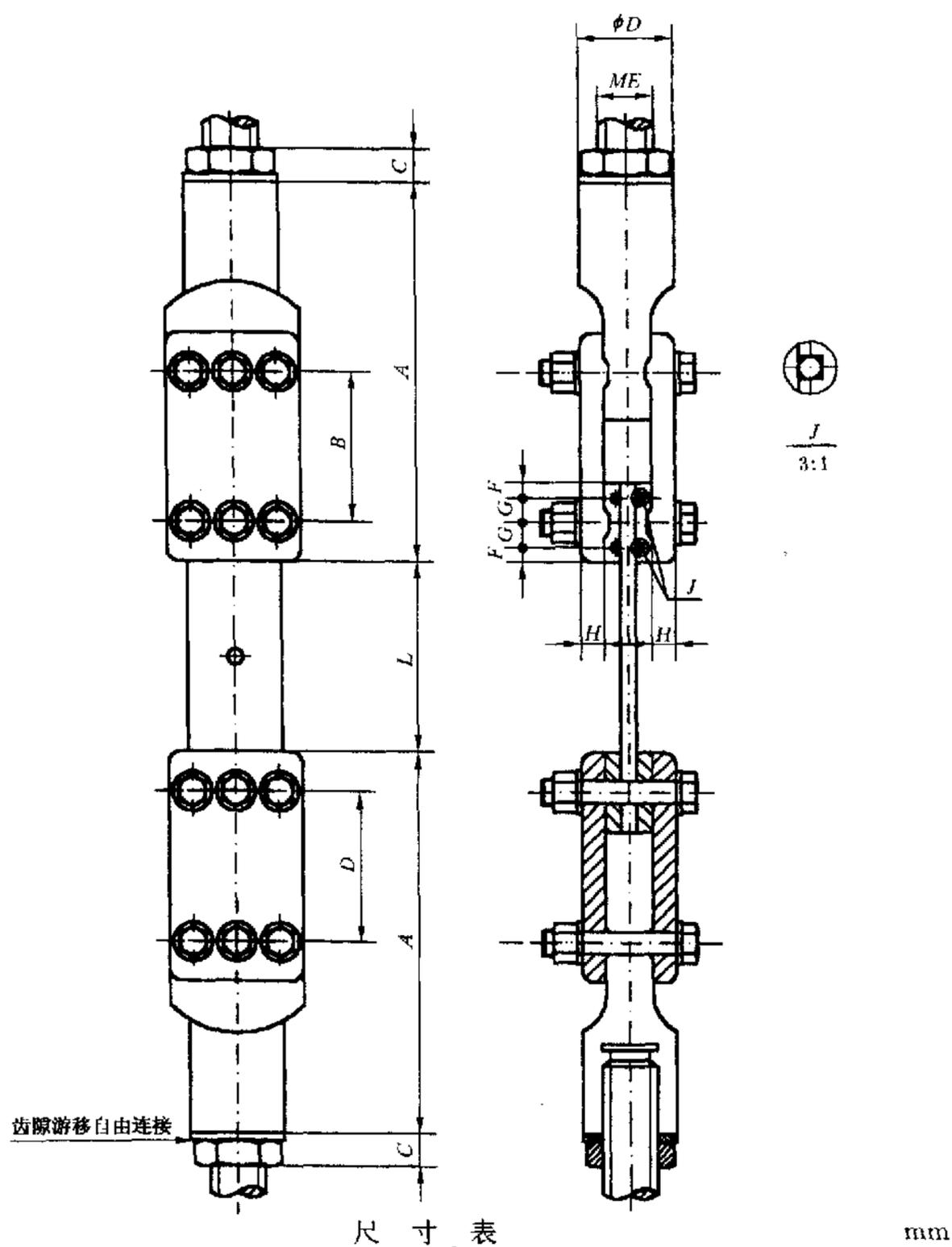


图 6 C(T)试样 U 形夹具和销钉图



尺寸表 mm

A	B	C	D	E	F	G	H	L	W	J
326	104	19	76	38	12	19	38	120	100	0.08

图 7 用于夹紧 100 mm 宽 M(T)试样的凹槽夹具和螺栓装配实例图

6 试验程序

6.1 试样尺寸测量

6.1.1 用最小分度值不大于 0.01 mm 的量具在试样的韧带区域三点处测量厚度 B ，取算术平均值。

6.1.2 用最小分度值不大于 $0.001 W$ 的量具在试样的裂纹所在截面附近测量宽度 W 。

6.2 预制疲劳裂纹

6.2.1 预制疲劳裂纹的加力要求如下：

a) 预制疲劳裂纹时应使最大力 P_{max} 的误差控制在 $\pm 5\%$ 以内；

b) 预制疲劳裂纹最后一级的最大力值不得超过开始记录试验数据时的最大力值；

c) 为减少预制疲劳裂纹所用时间，可以先用比试验最大力值较高的力产生疲劳裂纹，但必须把较高的力分级降到试验最大力值，每级下降率不得大于 20%；

d) 为防止试验中的瞬变效应,每一级加力范围应使裂纹长度扩展量不小于 $(3/\pi)(K'_{\max}/\sigma_{P0.2})^2$,其中 K'_{\max} 为上-级力最后的最大应力强度因子 K_{\max} 值。

6.2.2 预制疲劳裂纹长度的要求如下:

a) 在前后表面上从切口顶端到疲劳裂纹尖端测量裂纹长度[M(T)试样前后表面均要测左右两个裂纹长度]。测量应准确到 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 或 $\pm 0.002 W$ 中较大者;所测各个裂纹长度均应大于 $0.1 B$ 和切口宽度 h (见图5),但不得小于 1 mm ($W > 127 \text{ mm}$ 的试样,测量裂纹长度应准确到 0.25 mm 以内);

b) 若前后表面裂纹长度测量值之差超过 $0.25 B$ 或左右两侧裂纹长度测量值之差(取前后表面的算术平均值)超过 $0.025 W$,则预制裂纹无效。

6.3 疲劳裂纹扩展试验

在试验过程中记录若干个循环数及对应的裂纹长度。试验中应注意以下要求。

6.3.1 应保持力稳定和避免力过载引起的迟滞效应。

6.3.2 当存在环境影响时,必须考虑加力水平、频率和波形的影响。

6.3.3 若长时间中断试验,而中断后的裂纹扩展速率比中断前小,则试验无效。

6.3.4 试验中任何一点平均穿透疲劳裂纹与试样对称平面的最大偏离超过 $\pm 10^\circ$,此点数据无效。

6.3.5 在试验中某一点处前后表面裂纹长度测量值之差超过 $0.25 B$ 或左右两侧裂纹长度测量值之差(取前后表面的算术平均值)大于 $0.025 W$,则此点数据无效。

6.3.6 用目测法测量裂纹长度时,建议将裂纹长度 a 与循环数 N 的记录值随时标在坐标纸上。

6.4 裂纹长度测量

用目测法或等效的方法测量疲劳裂纹长度,测量准确到 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 或 $\pm 0.002 W$ 中较大者($W > 127 \text{ mm}$ 的试样,测量裂纹长度应准确到 0.25 mm 以内)。

6.4.1 测量裂纹长度最好在不中断试验的情况下进行,若需中断试验测量时,应满足:

a) 中断时间应减至最少(例如少于 10 min);

b) 为增加裂纹尖端清晰度,可加静力,其值应小于最大试验力。

6.4.2 裂纹增量 Δa 的测量间隔,应使 $da/dN-\Delta K$ 数据点接近均匀分布。

6.4.2.1 推荐测量裂纹增量间隔见表2。

表2 推荐测量裂纹增量的间隔

试样类型	测量范围	裂纹增量 $\Delta a \leq$
C(T)试样和 SE(B)试样	$0.25 \leq a/W \leq 0.40$	$0.04 W$
	$0.40 < a/W \leq 0.60$	$0.02 W$
	$a/W > 0.60$	$0.01 W$
M(T)试样	$2 a/W \leq 0.60$	$0.03 W$
	$2 a/W > 0.60$	$0.02 W$

6.4.2.2 在任何情况下,最小的 Δa 应 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 。然而为了在门槛值附近区域内至少得到5对 $da/dN-\Delta K$ 数据,需要将 Δa 降至 0.25 mm 以下。但是,在任何情况下,最小 Δa 都应10倍于裂纹长度测量的精确度。

6.4.3 用目测法测量裂纹长度时,当比值 B/W 小于 0.15 时,对C(T)试样和SE(B)试样只需在一个表面上测量裂纹长度;对于M(T)试样需在左右两侧测量裂纹长度,取算术平均值。当比值 B/W 大于或等于 0.15 时,C(T)试样和SE(B)试样需在前后两个表面上测量裂纹长度,取算术平均值;对于M(T)试样则需在前后表面的左右两侧测量4个裂纹长度,取算术平均值。

6.4.4 测定裂纹长度的柔度法见附录B(标准的附录)。

6.4.5 含水介质中疲劳裂纹扩展测定的特殊要求见附录C(标准的附录)。

6.4.6 裂纹长度的电位法测定见附录D(标准的附录)。

6.4.7 疲劳小裂纹扩展的测定方法见附录 E(提示的附录)。

6.5 试样数量

每组试样数量应不少于 3 个。

7 试验结果的处理和计算

7.1 裂纹曲率的修正

试验结束之后检验断口,以确定裂纹前缘曲率范围。若需要进行曲率修正,且裂纹前缘线条明显,则至少在两个位置(例如预制裂纹和极限裂纹)测量沿厚度方向 $(1/4)B$ 、 $(1/2)B$ 、 $(3/4)B$ 三点处的裂纹长度,其算术平均值(平均裂纹长度)与试验记录的相应裂纹长度之差即为曲率修正量。

7.1.1 在任何一个位置上,由断口测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子和由试验测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子相差大于 5%,则需进行曲率修正。

7.1.2 裂纹曲率修正量不是一个恒量,当它随裂纹伸长而单调增加或减少时,则采用线性内插法修正中间各数据点。

7.2 疲劳裂纹扩展速率的确定

采用拟合 $a-N$ 曲线求导的方法确定 da/dN 。附录 A(标准的附录)给出了推荐的割线法和递增多项式法。每一方法都适合于恒 ΔP ,增 K 试验。对于降 K 试验,推荐采用割线法。当降 K 试验是通过每一次循环自动连续降低时,则推荐采用递增多项式法。确立裂纹扩展速率不应跨越包括不同力级别的裂纹增量。

7.3 应力强度因子范围的计算

ΔK 分别按式(11)、式(12)和式(13)计算:

对于 C(T)试样:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \sqrt{W}} \cdot \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad \dots\dots(11)$$

式中: $\alpha = a/W$ 。

式(11)对于 $a/W \geq 0.2$ 的范围有效。

对于 M(T)试样:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中: $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ ($R \geq 0$);

$\Delta P = P_{\max}$ ($R < 0$);

$\alpha = 2a/W$ 。

式(12)对于 $2a/W \leq 0.95$ 的范围有效。

对于 SE(B)试样(跨距 S 取 $4W$):

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \left[\frac{6\alpha^{1/2}}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \right] [1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)] \quad \dots\dots(13)$$

式中: $\alpha = a/W$ 。

式(13)对于 $0.3 \leq a/W \leq 0.9$ 的范围有效。

7.4 试验数据的有效性检验

7.4.1 一般材料的有效性试验数据的判据

有效性试验数据应满足下式:

对于 C(T)试样:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{P0.2}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

对于 M(T) 试样:

$$W - 2a \geq \frac{1.25P_{\max}}{B\sigma_{P0.2}} \dots\dots\dots(15)$$

在试样尺寸标准化曲线图上(见图 4),数据点应位于标准化曲线之下。

对于 SE(B) 试样(跨距 S 取 $4W$):

$$W - a \geq \left[\frac{12WP_{\max}}{2B\sigma_{P0.2}} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(16)$$

7.4.2 高应变硬化材料的有效性试验数据的判据

对于比值 $\sigma_b/\sigma_{P0.2} \geq 1.3$ (σ_b 为材料的抗拉强度)的高应变硬化材料,测定疲劳裂纹扩展速率时试样尺寸在不符合 4.2.2 要求下,采用流变强度 σ_{FS} 代替规定非比例伸长应力 $\sigma_{P0.2}$ (即放宽对无裂纹韧带的要求)对疲劳裂纹扩展速率 da/dN 试验数据进行有效性检验。

有效性检验应满足下式:

对于 C(T) 试样:

$$W - a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{FS}} \right)^2 \dots\dots\dots(17)$$

对于 M(T) 试样:

$$W - 2a \geq \frac{1.25P_{\max}}{B\sigma_{FS}} \dots\dots\dots(18)$$

对于 SE(B) 试样(跨距 S 取 $4W$):

$$W - a \geq \left[\frac{12WP_{\max}}{2B\sigma_{FS}} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(19)$$

7.5 推荐的数据处理程序

推荐的数据处理程序(包括确定 da/dN 、计算 ΔK 和有效性检验)见附录 A(标准的附录)。在符合试验要求的准确度下也允许采用其他数据处理的方法。

8 疲劳裂纹扩展门槛值的测定程序

8.1 降 K 程序。在力值比 R 不变的条件下,用自动或手动控制的降 K 程序来实现。初始的应力强度因子范围可选择等于或大于预制疲劳裂纹时的最终 ΔK 值,以后要随着裂纹的扩展而连续降力或分级降力。分级降力时每级力下要使裂纹扩展增量 Δa 大于上一级 K_{\max} 对应的塑性区尺寸 r_y 的 4~6 倍,直至平均裂纹扩展速率 $\Delta a/\Delta N$ 接近 10^{-7} mm/cycle 时,降 K 试验结束。试验过程中记录每级力或每级应力强度因子范围下的终止裂纹长度 a_i 和对应的循环数 N_i 。

塑性区尺寸 r_y 按式(20)计算:

$$r_y = \alpha \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{P0.2}} \right)^2 \quad \alpha \begin{cases} 1/2\pi(\text{平面应力}) \\ 1/6\pi(\text{平面应变}) \end{cases} \dots\dots\dots(20)$$

降力程序的设计应考虑疲劳裂纹扩展增量与降力参数的范围,其最佳值取决于材料、力值比及试样宽度,推荐下列三种降力方法。

8.1.1 逐级降力法。逐级降力的示意图见图 8。每级力下降率不超过 10%,可取降力百分比 R_1 为 5%~10%,但力值比须保持不变;在每级力作用下可取 Δa 为 0.25~0.5 mm(与 R_1 值相对应,如 Δa 取 0.25 mm 时 R_1 为 5%, Δa 取 0.5 mm 时 R_1 为 10%或 5%)。

8.1.2 恒力控制的 K 梯度法。降力示意图如图 8 所示,在试验过程中 K 梯度 C 值保持为常数,按式(21)控制降力的量:

$$\Delta K = \Delta K_0 e^{C(a-a_0)} \dots\dots\dots(21)$$

式(21)中 ΔK_0 和 a_0 是降 K 开始时的初始应力强度因子范围和对应的裂纹长度。在每级裂纹长度间隔内 ΔP 保持恒定。 Δa 与 R_1 的取值与 8.1.1 相同,但 R_1 一般不超过 10%。为了确保试验结果的可靠性,

推荐下列 K 梯度 C 值的范围：

$$C = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} = -0.05 \text{ mm}^{-1} \sim -0.15 \text{ mm}^{-1} \dots\dots\dots(22)$$

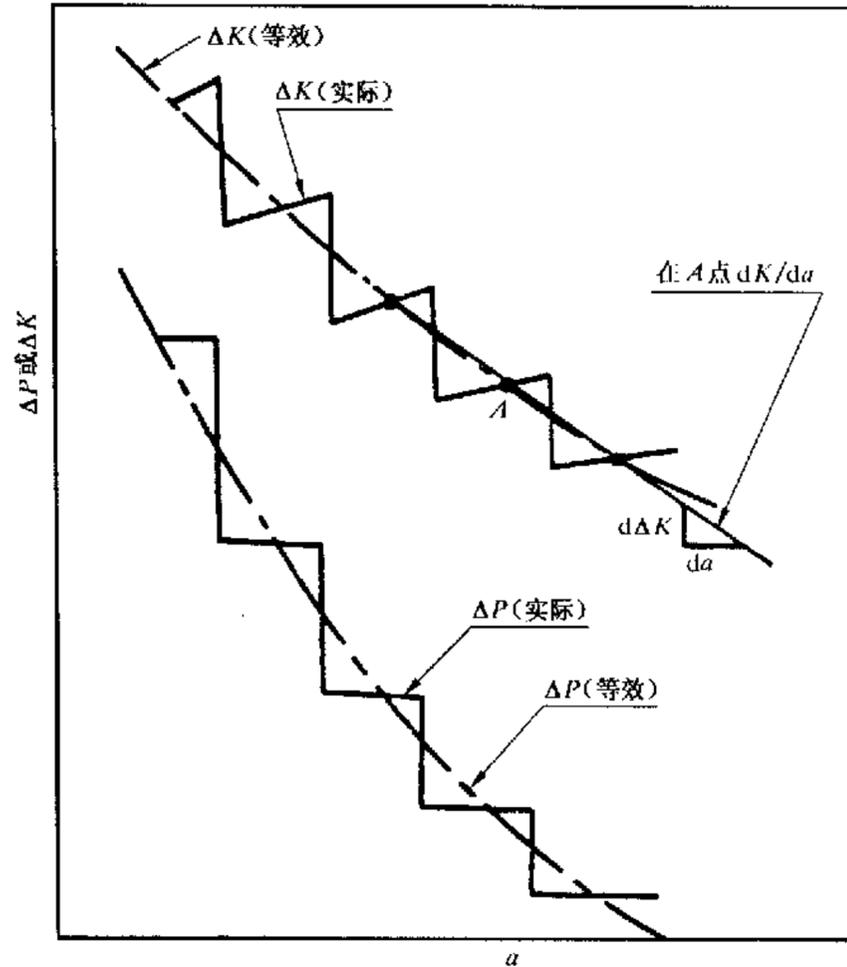


图 8 恒力 P 控制 K 梯度法示意图

8.1.3 恒 K 控制的 K 梯度法。恒 K 控制的降 K 示意图如图 9 所示。在试验过程中 K 梯度 C 值保持为常数，降 K 量按式(21)控制，在每级裂纹长度间隔内 ΔK 保持恒定。 Δa 的取值与逐级降力法相同。推荐 K 梯度 C 值的范围取 $-0.05 \text{ mm}^{-1} \sim -0.2 \text{ mm}^{-1}$ ，终止裂纹长度以控制 K 值稳定并达到准确度要求为限。

8.1.4 推荐一种测定 ΔK_{th} 的简易方法：每级力下降率不超过 10%，仍须保持力值比不变。在每级力作用下使 Δa 大于上一级的塑性区尺寸 r_y 的 4~6 倍，直至 N 等于 10^6 时裂纹不发生 0.1 mm 的裂纹扩展增量，或者提高测量疲劳裂纹的准确度可取 N 等于 5×10^6 时裂纹不发生 0.5 mm 的裂纹扩展量。记录后两级起始时的裂纹长度 a_k, a_{k-1} 和对应的力值范围 $\Delta P_k, \Delta P_{k-1}$ 。由 $(a_k, \Delta P_k)$ 和 $(a_{k-1}, \Delta P_{k-1})$ 代入 ΔK 表达式分别计算最后两级 $\Delta P_k, \Delta P_{k-1}$ 起始时的 ΔK 值，即 $\Delta K_k, \Delta K_{k-1}$ 两个值。按式(23)计算阈值：

$$\Delta K_{th} = \frac{\Delta K_k + \Delta K_{k-1}}{2} \dots\dots\dots(23)$$

a_k 与 a_{k-1} 值应取从断口上测量出的平均裂纹长度 \bar{a} ，即：

$$\bar{a} = \frac{a_2 + a_3 + a_4}{3} \dots\dots\dots(24)$$

式中 a_2, a_3, a_4 分别为沿试样厚度方向 $(1/4)B, (1/2)B, (3/4)B$ 处的裂纹长度。如果断口上的疲劳线不明显，则取从试样表面上测量出的裂纹长度，取算术平均值。

8.2 K 梯度 C 值与 R_1 最佳值的确定。选择最佳值时应当注意如下几点：

a) 对于过载迟滞效应较敏感的材料、力值比较小和在阈值附近的 $da/dN-\Delta K$ 曲线斜率较大的情况下，应选择较小的降 K 速率；反之则可选择稍大的降 K 速率；

b) 在试验过程中，应在 $10^{-6} \text{ mm/cycle} \sim 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ 的范围内获得 5~10 个数据点为宜，但是相邻两级的 K 值变化不得过大，以防止引起迟滞效应造成阈值数据反常。

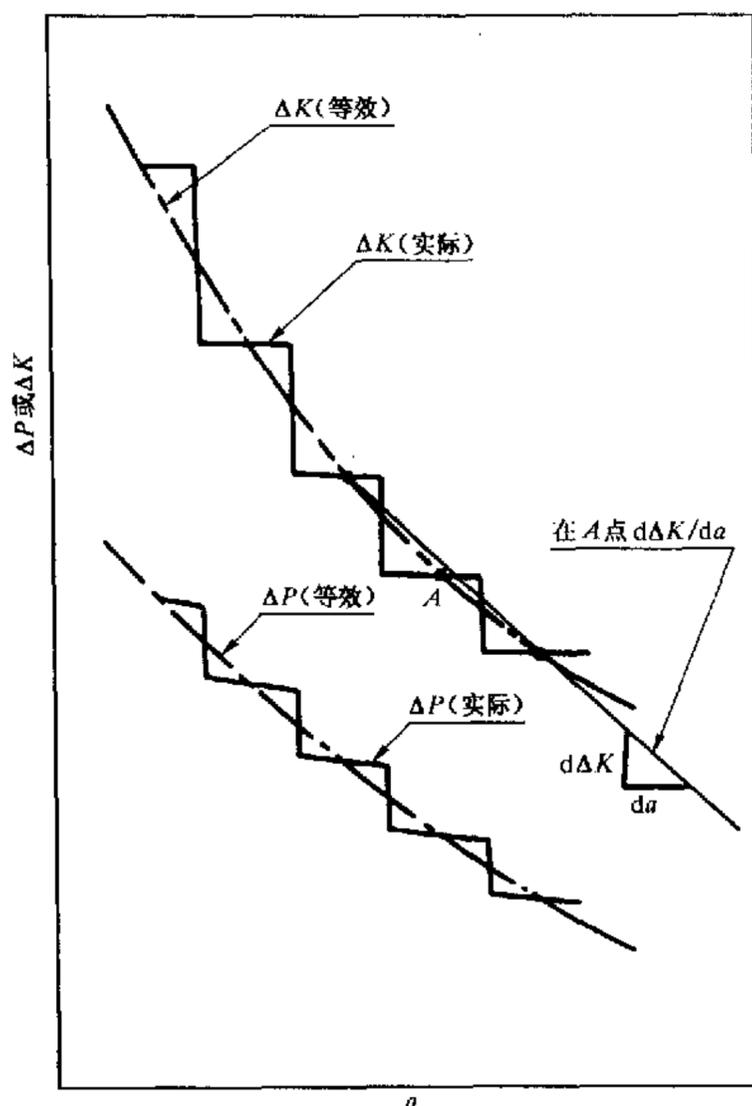


图9 恒K控制K梯度法示意图

8.3 K 梯度 C 值的估算。已知门槛值附近的 $da/dN-\Delta K$ 曲线的斜率 m 值时,可按式(25)预先估算 C 值:

$$C = -\frac{2.3}{m\Delta aQ} \dots\dots\dots(25)$$

式中: Δa 为给定的扩展增量;
 Q 为给定的试验数据点数;
 m 为门槛值附近 $da/dN-\Delta K$ 曲线斜率。

8.4 最大终止裂纹长度的确定

8.4.1 逐级降力法中最大终止裂纹长度的确定。等效 K 梯度 C 值(见图 8)是 $W, a/W, \Delta a$ 及 R_1 的函数关系。对于 C(T)和 M(T)试样,分别推荐图 10 与图 11 作为确定给定试样宽度下降 K 试验的最大终止裂纹长度的依据。

8.4.2 恒力控制的 K 梯度法中最大终止裂纹长度的确定。降 K 程序中 R_1 是 $W, a/W$ (或 $2a/W$)、 Δa 及 K 梯度 C 值的函数关系。对于 C(T)和 M(T)试样,分别推荐图 12 与图 13 作为确定给定试样宽度下恒 P 降 K 试验最大终止裂纹长度的依据。

8.5 增 K 试验

8.5.1 增 K 试验的目的。在降 K 试验中,对于 $da/dN-\Delta K$ 曲线斜率较大(例如大于 30),即使采用很小的 K 梯度 C 值也难以得到 5 个以上的数据点时,可用增 K 试验补充试验数据点。对降 K 试验结果的可靠性有疑义时,也可用增 K 试验进行验证。降 K 试验结束后,反过来进行增 K 试验,同样可获得若干个 $da/dN-\Delta K$ 的数据对。降 K 试验与增 K 试验的数据相吻合时,则认为降 K 试验结果有效。

8.5.2 增 K 试验程序。在降 K 试验中获得预期的 $da/dN-\Delta K$ 数据以后,根据增 K 试验的目的,参考降 K 试验的结果,把力提高到获得门槛值的前一级或较高级的力值继续进行逐级升力的试验。推荐每级升力不超过前级力的 10%,或按式(21)的要求增加。对 Δa 的要求与降 K 试验相同。推荐的 K 梯

度 C 值等于或小于 $0.0625/\Delta a$ 。

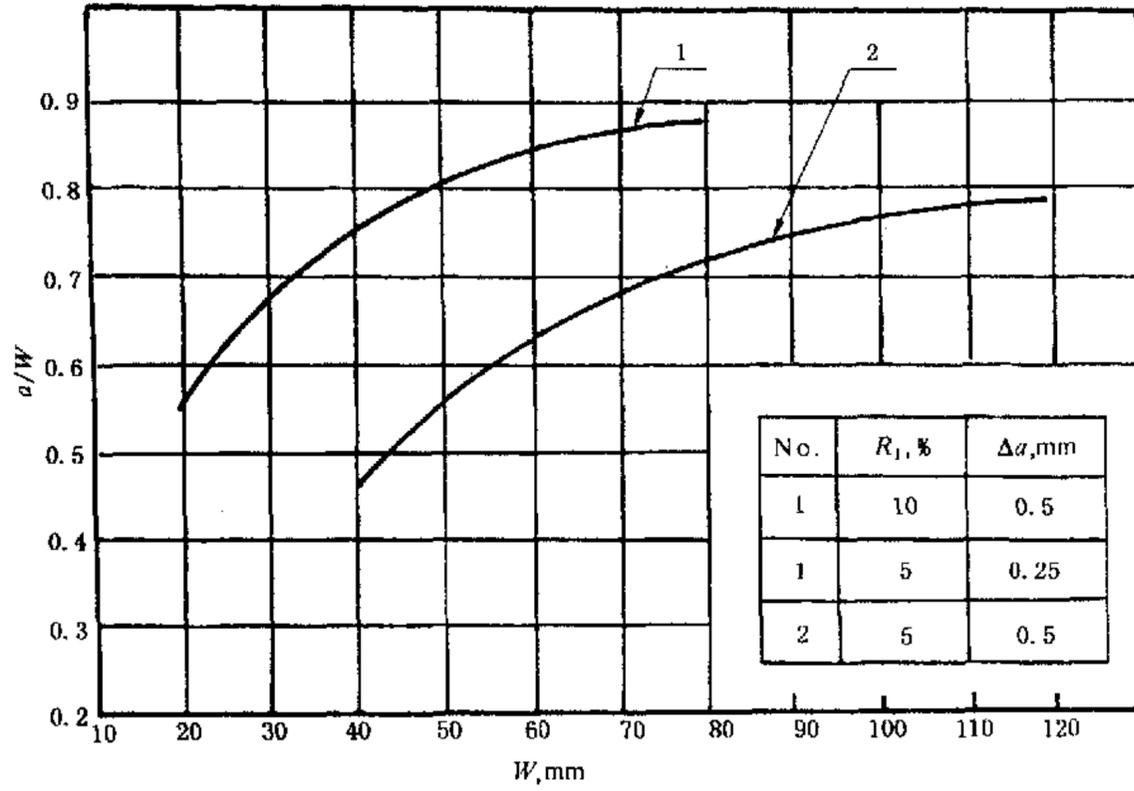


图 10 逐级降力法降 K 试验终止裂纹长度与试样宽度的关系曲线 $C(T)^{2)}$

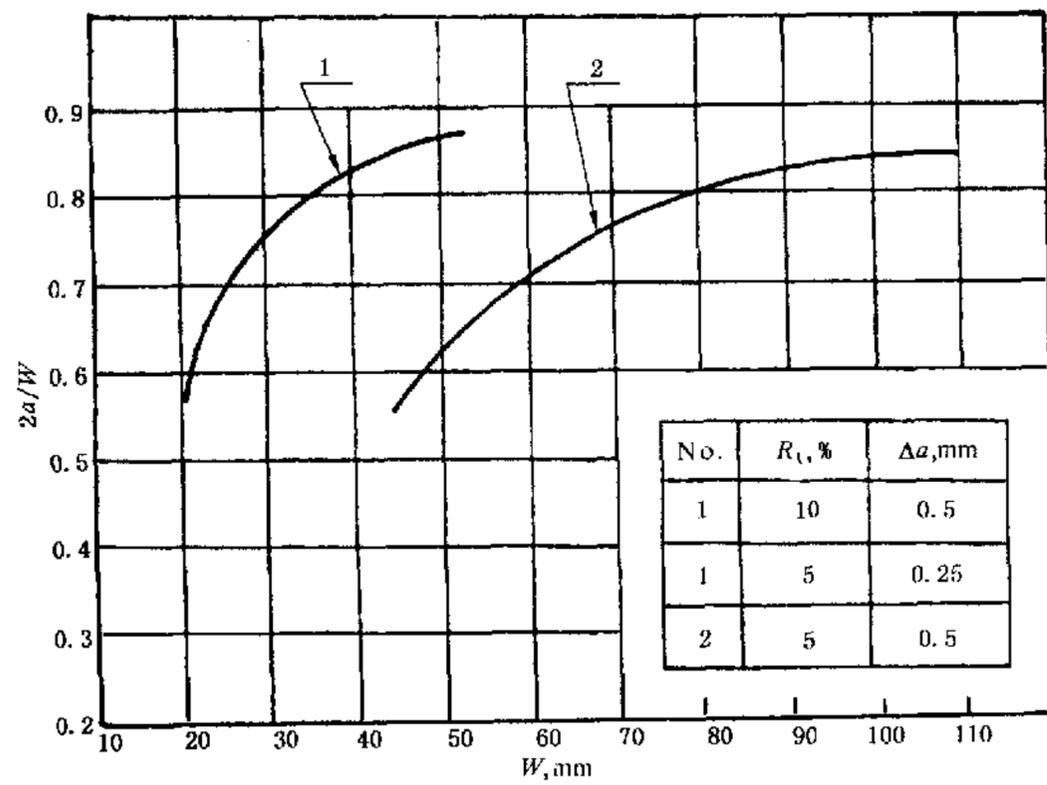


图 11 逐级降力法降 K 试验终止裂纹长度与试样宽度的关系曲线 $M(T)^{3)}$

采用说明：

2]、3] 为了方便使用者进行逐级降力法的试验而增加的曲线图。

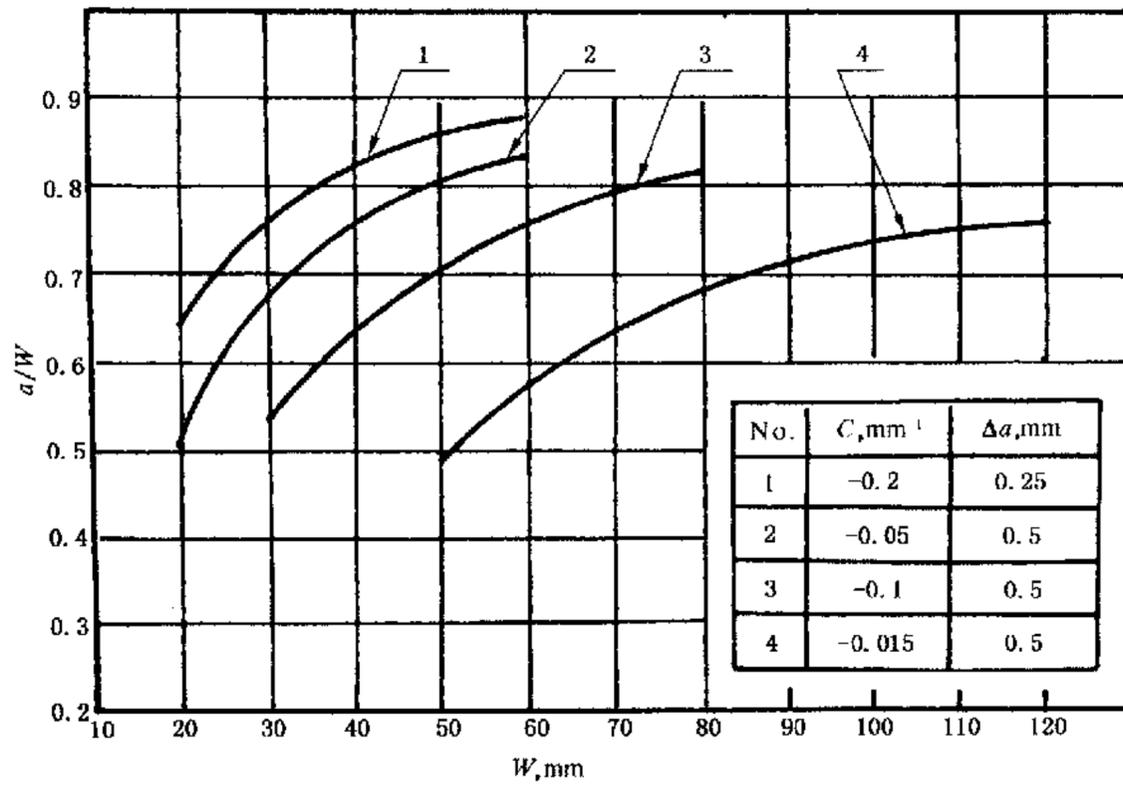


图 12 恒力 P 控制的 K 梯度法降 K 试验终止裂纹长度与试样宽度的关系曲线 $C(T)^{[2]}$

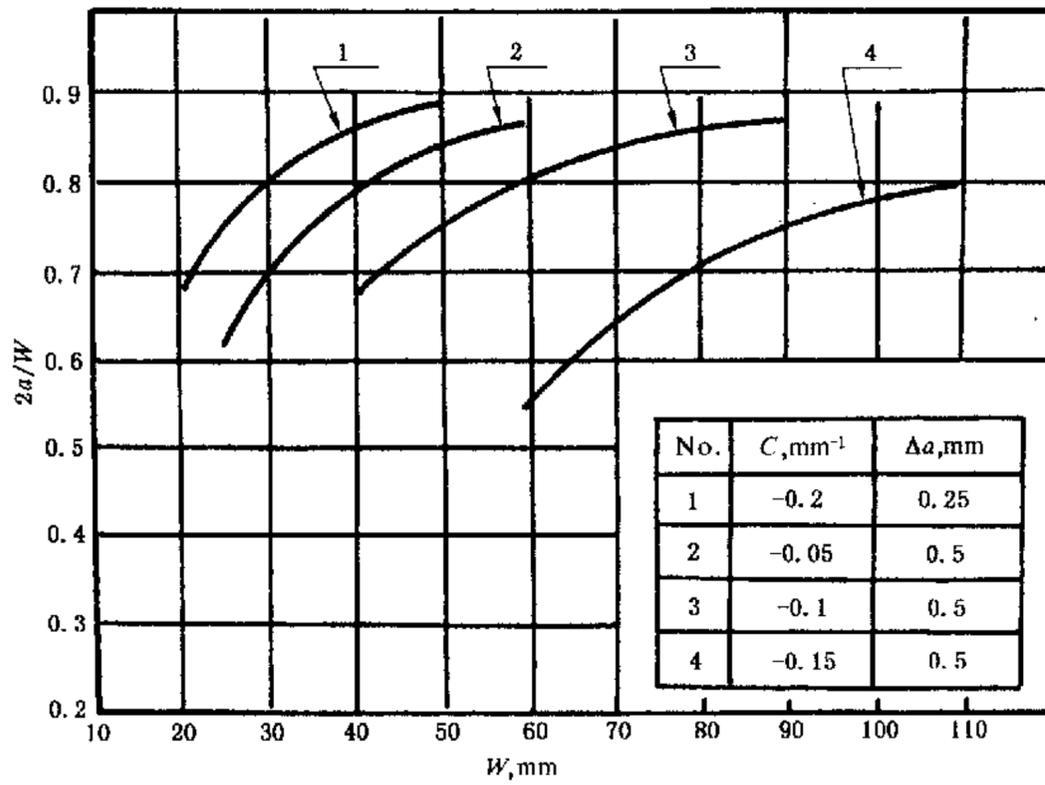


图 13 恒力 P 控制的 K 梯度法降 K 试验终止裂纹长度与试样宽度的关系曲线 $M(T)^{[2]}$

8.6 疲劳裂纹扩展门槛值的计算。

8.6.1 近门槛值附近的 da/dN 推荐用割线法处理,其表达式如下:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \dots\dots\dots (26)$$

采用说明:

4]、5] 为了方便使用者进行恒力 P 控制的 K 梯度法试验而增加的曲线图。

式中： a_{i+1} 和 a_i 为对应于 N_{i+1} 和 N_i 时的裂纹长度。

8.6.2 ΔK 的表达式与7.3相同。对应于 $(da/dN)_i$ 的 $(\Delta K)_i$ 的值通过取每级力值下的平均裂纹长度 a_i 和对应的力值 P_i 代入相应的 ΔK 表达式计算得到。

8.6.3 疲劳裂纹门槛值的确定

8.6.3.1 取 10^{-7} mm/cycle $\leq da/dN \leq 10^{-6}$ mm/cycle 的 $(da/dN)_i$ 对 $(\Delta K)_i$ 一组数据(至少5对数据点),推荐按式(27)以 $\lg da/dN$ 为自变量,用线性回归的方法拟合 $\lg(da/dN) - \lg(\Delta K)$ 数据点:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^{n_1} \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中： C_1 和 n_1 为最佳拟合直线的截距和斜率。

8.6.3.2 由式(27)的拟合结果,取 $da/dN = 10^{-7}$ mm/cycle 计算对应的 ΔK 值被定义为疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。

9 试验报告

9.1 试验报告应包括下列内容:

- a) 试样类型、厚度和宽度,除标准C(T)、M(T)和SE(B)试样外均应给出试样图;
- b) 试验机型号,测量裂纹长度的装置和准确度;
- c) 材料规格、热处理制度、化学成分和常规力学性能;
- d) 取样方位,从结构件取样时应给出取样图;
- e) 加力变量,包括力值范围、力值比、加力频率和波形;
- f) 有关参数,包括温度、环境介质、相对湿度以及整个试验期间各参数的最大误差;
- g) 数据处理方法,包括疲劳裂纹速率修正、计算 da/dN 和 ΔK 的方法。为了使预测寿命的方法与本标准所给数据条件一致,当 R 小于零时,说明计算最小应力强度因子 K_{min} 的方法。采用本标准规定以外的试样时应给出应力强度因子 K 标定曲线或公式;
- h) da/dN 与 ΔK 图表,在双对数坐标纸上给出 $da/dN - \Delta K$ 曲线数据点时,为了更好地对比数据,建议横坐标($\lg \Delta K$)尺寸为纵坐标($\lg da/dN$)尺寸的2~3倍;
- i) 反常数据现象的说明。

9.2 疲劳裂纹扩展门槛值的试验报告还应增加如下内容:

- a) 对降 K 试验应给出降力方式、 K 梯度 C 值、开始试验时的初始 ΔK_0 和相应的 a_0 值;若用增 K 试验补充降 K 试验中的试验数据点或者验证降 K 试验的结果时,应标明增 K 试验的数据点;
- b) 采用拟合曲线求门槛值时应给出: da/dN 小于 10^{-6} mm/cycle 各级力下的 ΔP_i 、 a_i 、 N_i ; $(da/dN)_i$ 、 ΔK_i ;门槛值附近 $da/dN - \Delta K$ 的拟合方程式和 ΔK_{th} 值;
- c) 采用8.1.4推荐的简易方法测定 ΔK_{th} 时应给出:最后两级力下的 ΔP_k 、 ΔP_{k-1} 和 a_k 、 a_{k-1} ; ΔK_k 、 ΔK_{k-1} 及 ΔK_{th} 。

附录 A

(标准的附录)

推荐的数据处理程序

A1 割线法

用于计算裂纹扩展速率的割线法,仅适用于在 $a-N$ 曲线上计算连接相邻两个数据点的直线斜率。通常表示如下:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = (a_{i+1} - a_i) / (N_{i+1} - N_i) \quad \dots\dots\dots (A1)$$

由于计算的 da/dN 是增量 $(a_{i+1} - a_i)$ 的平均速率,故平均裂纹长度 $\bar{a} = (a_{i+1} + a_i) / 2$ 只用来计算 ΔK 值。

A2 递增多项式

推荐递增多项式方法进行局部拟合求导以确定疲劳裂纹扩展速率和裂纹长度的拟合值。对任一试验数据点 i 即前后各 n 点,共 $(2n+1)$ 个连续数据点,采用如下二次多项式进行拟合求导。点数 n 值可取 2、3、4,一般取 3。

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (A2)$$

式中:

$$-1 \leq \frac{N_i - C_1}{C_2} \leq +1$$

$$C_1 = \frac{1}{2}(N_{i-n} + N_{i+n})$$

$$C_2 = \frac{1}{2}(N_{i+n} - N_{i-n})$$

$$a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n} \quad \dots\dots\dots (A3)$$

系数 b_0, b_1, b_2 是在式(A3)区间按最小二乘法(即使裂纹长度观测值与拟合值之间的偏差平方和最小)确定的回归参数。拟合值 \hat{a}_i 是对应于循环数 N_i 上的拟合裂纹长度。参数 C_1 和 C_2 是用于变换输入数据,以避免在确定回归参数时的数值计算困难。在 N_i 处的裂纹扩展速率由式(A2)求导而得:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_1}{C_2} + \frac{2b_2(N_i - C_1)}{C_2^2} \quad \dots\dots\dots (A4)$$

利用对应于 N_i 的拟合裂纹长度 \hat{a}_i 计算与 da/dN 值相对应的 ΔK 值。

表 A1 给出了点数 n 等于 3 时的 FORTRAN 计算程序。在 FORTRAN 程序的末尾给出了输入变量说明。

表 A1 七点递增多项式数据处理 FORTRAN 计算程序

c	fatigue crack growth rates programme
c	this programme file name—GB.FOR
cc	m—total test points
cc	P_{max} —maximun load
cc	P_{min} —minimun load
cc	b—specimen thickness
cc	w—specimen widthness

```

cc      a0——initial crack length
cc      ys——yield strength
cc      Sratio——Stress ratio
cc      Ni(I)——load cycle number
cc      Ai(I)——a set of crack length
1      dimension ni(100),ai(100),dadn(100),
2      &delk(100),aa(10),nn(10),bb(3),name(20)
3      integer qq
4      parameter (PI=3.1415926)
5      Character * 15 finname,foutname,key * 5,
6      &ancurve * 15,dkdadn * 15,name * 50
7      write(*,*)'input Title:'
8      read(*,'(A)')name(8)
9      write(*,*)'input data file name:'
10     read(*,'(A)')finname
11     write(*,*)'output data file name:'
12     read(*,'(A)')foutname
13     write(*,*)'enter A-N curve name:'
14     read(*,'(A)')ancurve
15     write(*,*)'enter DELT K-da/dN curve name:'
16     read(*,'(A)')dkdadn
17     open(15,file=finname,status='old')
18     open(16,file=foutname,status='new')
19     open(17,file=ancurve,status='new')
20     open(18,file=dkdadn,status='new')
21     write(*,*)'Material Name:'
22     read(*,'(A)')name(1)
23     write(*,*)'No. of Specimen'
24     read(*,'(A)')name(2)
25     write(*,*)'environment'
26     read(*,'(A)')name(3)
27     write(*,*)'test frequency'
28     read(*,'(A)')name(9)
29     write(*,*)'Temperature'
30     read(*,'(A)')name(4)
31     write(*,*)'Moisture'
32     read(*,'(A)')name(5)
33     write(*,*)'Test Date'
34     read(*,'(A)')name(6)
35     write(*,*)'Testers'
36     read(*,'(A)')name(7)
37     write(16,300)name(8)
38 300   format(1x,'*****TEST REPORT:',A35,'*****')
39     write(16,299)
40 299   format(/)
41     write(16,400)name(1)
42 400   format(1X,'Material Name & Orientation:',2x,A40)
43     write(16,410)name(2)
44 410   format(1x,'No. of Specimen:',2x,A20)

```

```

45      write(16,420)name(3)
46 420  format(1x,'environments:',2x,A20)
47      write(16,430)name(9)
48 430  format(1x,'Test Frequency:',3x,A3,'Hz')
49      write(16,440)name(4)
50 440  format(1x,'Temperature:',2x,A3,'c')
51      write(16,450)name(5)
52 450  format(1x,'Moisture:',2x,A4,'%','RH')
53      write(16,460)name(6)
54 460  format(1x,'Test Date:',2x,A15)
55      write(16,470)name(7)
56 470  format(1x,'Testers:',2x,A20)
57      write(*,*)'asking for specimen kind;SEB,CT OR MT'
58      read(*,'(A)')key
59 c    begin to operate seven points poly
60      read(15,*) m,pmax,pmin,b,w,ys,a0,Sratio
61      write(16,20)
62 20   format(/)
63      write(16,21)
64 21   format(5x,'=====',1x,'RESULTS OF TEST DATA PROCESSING',
65      &1x,'=====')
66      write(16,22)
67 22   format(/)
68      write(16,25)m,pmax,pmin,b,w,a0,ys,Sratio
69 25   format(1x,'the test points:',i4,2x,'pmax=',
70      &f8.1,'N',2x,'pmin=',f8.1,'N',/,1x,'b=',f5.2,'mm',2x,'w=',
71      &f6.2,'mm',2x,'A0=',f6.3,'mm',/1x,'yield limit ys=',f8.2,
72      &'MPa',5x,'Stress Ratio R=',f6.3)
73      read(15,*)(Ni(I),Ai(I),I=1,m)
74      DO 30 I=1,m
75      AI(I)=A0+AI(I)
76 30   Continue
77      write(16,105)
78 105  format(1x,'cbs. no',1x,'cycle',2x,'a(means)',2x,'a(areg.)'
79      &.,3x,'m. c. c.',4x,'delk',6x,'dadn')
80      k=0
81      pp=pmax-pmin
82      r=pmin/pmax
83      write(16,95)(i,Ni(i),Ai(i),I=1,3)
84      m=m-6
85      do 100 i=1,m
86      l=0
87      k=k+1
88      k1=k+6
89      do 64 j=k,k1
90      l=l+1
91      aa(1)-ai(j)
92      nn(1)-ni(j)
93 64   continue

```

```

94      c1=0.5*(nn(1)+nn(7))
95      c2=0.5*(nn(7)-nn(1))
96      sx=0.0
97      sx2=0.0
98      sx3=0.0
99      sx4=0.0
100     sy=0.0
101     syx=0.0
102     syx2=0.0
103     do 70 j=1,7
104     x=(NN(j)-c1)/c2
105     yy=aa(j)
106     sx=sx+x
107     sx2=sx2+x**2
108     sx3=sx3+x**3
109     sx4=sx4+x**4
110     sy=sy+yy
111     syx=syx+x*yy
112     syx2=syx2+yy*(x**2)
113 70   continue
114     den=7.0*(sx2*sx4-sx3**2)-sx*(sx*sx4-sx2*sx3)+sx2*(sx*sx3
115     &-sx2**2)
116     t2=sy*(sx2*sx4-sx3**2)-syx*(sx*sx4-sx2*sx3)+syx2*(sx*sx3
117     &-sx2**2)
118     bb(1)=t2/den
119     t3=7.0*(syx*sx4-syx2*sx3)-sx*(sy*sx4-syx2*sx2)+
120     &sx2*(sy*sx3-syx*sx2)
121     bb(2)=t3/den
122     t4=7.0*(sx2*syx2-sx3*syx)-sx*(sx*syx2-sx3*sy)+sx2*(sx*syx
123     &-sx2*sy)
124     bb(3)=t4/den
125     yb=sy/7.0
126     rss=0.0
127     tss=0.0
128     do 75 j=1,7
129     x=(nn(j)-c1)/c2
130     yhat=bb(1)+bb(2)*x+bb(3)*(x**2)
131     rss=rss+(aa(j)-yhat)**2
132     tss=tss+(aa(j)-yb)**2
133 75   continue
134     r2=1.0-rss/tss
135     dadn(i)=(bb(2)/c2+2.0*bb(3)*(nn(4)-c1)/(c2**2))
136     x=(nn(4)-c1)/c2
137     ar=bb(1)+bb(2)*x+bb(3)*(x**2)
138     s=|e|0
139     snet=0.0
140     qq=i+3
141     IF(key.se.'SEB'.or.key.eq.'seb')THEN
142     t=ar/w

```

```

143      ft=6*t**0.5/(1.0+2.0*t)/(1.0-t)**1.5*
144      &(1.99-t*(1-t)*(2.15-3.93*t+2.7*t**2))
145      delk(i)=(ft*pp/(b*sqrt(w)))/(10**1.5)
146      s=ys*(w*(1-t))**2
147      ax=pmax*6.0*w/b
148      snet=pmax/(b*w*(1.-t))
149      else if(key.eq.'ct'.or.key.eq.'CT')then
150      t=ar/w
151      ft=(2+t)*(0.8866+4.64*t-13.32*t*t+14.72*t**3-5.6*t**4)
152      &/((1-t)**1.5)
153      delk(i)=(ft*pp)/(b*sqrt(w))/10**1.5
154      s=ys*sqrt(pi*w*(1-t))/2
155      snet=pmax/(b*w*(1.-t))
156      ax=delk(i)/(1.-r)
157      else
158      if(key.EQ.'MT'.or.key.eq.'mt')then
159      t=2.*ar/w
160      sec=1./(cos(pi*t/2.))
161      ft=sqrt((pi*t*sec)/2.)
162      snet=pmax/(b*w*(1.-t))
163      delk(i)=(ft*pp)/(B*sqrt(w))/10**1.5
164      ax=delk(i)/(1.-r)/1.25
165      end if
166      end if
167      if(ax.ge.s)go to 398
168      if(snet.ge.ys)go to 398
169 392      write(16,92)qq,Ni(qq),Ai(qq),ar,r2,delk(i),dadn(i)
170      go to 100
171 398      write(16,98)qq,Ni(qq),Ai(qq),ar,r2,delk(i),dadn(i)
172 100      continue
173 92      format(i4,1x,i8,2x,f7.3,2x,f7.4,2x,f7.5,2x,f8.4,2x,e10.4)
174 98      format(i4,1x,i8,2x,f7.3,2x,f7.4,2x,f7.5,2x,f7.4,2x,e10.4,
175      &2x,'***')
176      j=m+4
177      k=m+6
178      write(16,95)(i,Ni(i),Aai(i),i=j,k)
179 95      format(I4,1X,I8,2X,F7.3)
180      write(17,200)(Ni(i),Ai(i),i=1,m+6)
181 200      format(1x,18,5X,F6.3)
182      write(18,350)(delk(i),dadn(i),i=1,qq-3)
183 350      format(1x,F8.5,5X,E12.5)
184      close(17)
185      close(18)
186      close(16)
187      close(15)
188      end

```

FORTRAN 程序输入变量说明

输入数据文件中数据依次为：

$m, P_{\max}, P_{\min}, b, W, ys, a_0, sratio$

Ni(I), Ai(I) (I=1, m)
 变量说明见程序说明

附录 B
 (标准的附录)
 测定裂纹长度的柔度法

B1 在疲劳裂纹扩展速率试验中,可以用柔度法测定裂纹长度。最理想的方法是使用高速数据采集和处理系统。但是也可以使用低速的自动绘图仪器记录力和位移信号。根据数据采集设备和循环加力频率的条件,在采集数据期间有时必须降低频率。

B2 由解析法计算出的几种标准试样的柔度和归一化裂纹长度的关系通常用无量纲柔度 $(EBV)/P$ 和归一化裂纹长度 a/W 来表达。所有柔度-裂纹长度关系仅适用于它所对应的试样上的测量位置。除解析法计算的柔度关系外,也可以通过试验建立用于疲劳裂纹扩展速率试验中任何类型试样的柔度曲线。这种曲线不仅仅限于对位移的测量,也可以是有关的应变变量。

B3 本附录给出了 C(T)试样在不同测量位置的柔度表达式(B1)。式中的常数见表 B1。测量位置 X 见图 B1。

$$U_x = \left\{ \left[\frac{BEV_x}{P} \right]^{1/2} + 1 \right\}^{-1} \dots\dots\dots (B1)$$

式中: E ——弹性模量;

V_x ——测量点的位移。

式(B1)的有效范围为: $0.2 \leq a/W \leq 0.975$ 。

柔度与归一化裂纹长度的关系式为:

$$a/W = C_0 + C_1 U_x + C_2 U_x^2 + C_3 U_x^3 + C_4 U_x^4 + C_5 U_x^5 \dots\dots\dots (B2)$$

表 B1

试样测量位置	X/W	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
V_{x1}	-0.345	1.001 2	-4.916 5	23.057	-323.91	1 798.3	-3 513.2
V_0	-0.250	1.001 0	-4.669 5	18.460	-236.82	1 214.9	-2 143.6
V_1	-0.157 6	1.000 8	-4.447 3	15.400	-180.55	870.92	-1 411.3
V_{LL}	0	1.000 2	-4.063 2	11.242	-106.04	464.33	-650.68

上述公式适用于平面应力状态,因为这种应力状态最适用于远离裂纹尖端的测量,不考虑裂纹尖端的局部应力状态。

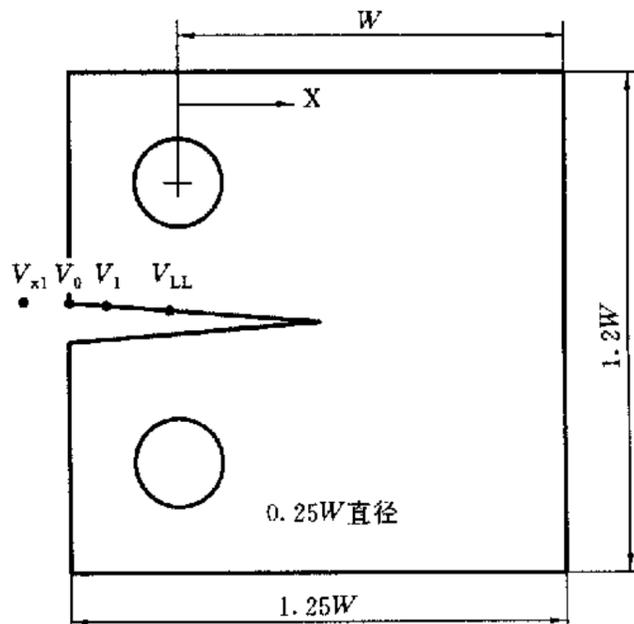


图 B1 C(T)试样柔度测量位置示意图

B4 M(T)试样中心线柔度测量位置见图 B2。其平面应力柔度表达式为：

$$X = 1 - \exp \left[- \frac{\sqrt{(BEV/P + \eta)(BEV/P - \eta + C_1\eta + C_2\eta^2)}}{2.141} \right] \dots\dots\dots (B3)$$

式中：V——试样中心线上测量的位移；

$$\eta = 2Y/W;$$

Y——位移规的半跨距；

W——试样宽度。

C_1, C_2, C_3 值取决于加力条件，对于图 B2 的三种加力情况，其数值分别如下：

对于均匀应力：

$$C_1 = 0.0$$

$$C_2 = 0.0$$

$$C_3 = 0.0$$

对于销钉加力：

$$C_1 = 0.005$$

$$C_2 = 0.0184$$

$$C_3 = 3.0$$

对于夹持均匀位移：

$$C_1 = -0.03$$

$$C_2 = 0.013$$

$$C_3 = 4.0$$

式(B3)的有效范围为： $0 \leq 2Y/W \leq 0.8$ ； $0 \leq 2a/W \leq 1$ ；泊松比 $\mu = 0.3$ 。

归一化裂纹长度与柔度的关系为：

$$a/W = A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + A_4X^4 \dots\dots\dots (B4)$$

式中：

$$A_1 = 1.06905, A_2 = 0.588106, A_3 = -1.01885, A_4 = 0.361691。$$

B5 对于 SE(B)试样(见图 3)，其柔度表达式如下：

$$U_x = \frac{1}{1 + \left[\frac{EBV}{P} \left(\frac{4W}{S} \right) \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (B5)$$

归一化裂纹长度与柔度的关系为：

$$a/W = C_0 + C_1U_x + C_2U_x^2 + C_3U_x^3 + C_4U_x^4 + C_5U_x^5 \dots\dots\dots (B6)$$

式中： $C_0 = 0.99975, C_1 = -3.9504, C_2 = 2.9821, C_3 = -3.2141, C_4 = 51.516, C_5 = -113.03$ 。

B6 对于位移规、刀口位置以及刀口的固定方法的选择随试验条件，如频率、环境、力值比和温度等而定。在位移测量范围内，位移规必须是线性的，并具有足够的分辨率和频率响应。一般较小试样需要具有较高分辨率的位移规。刀口必须精确地固定在试样上，而且，在疲劳加力期间不易受到磨损。

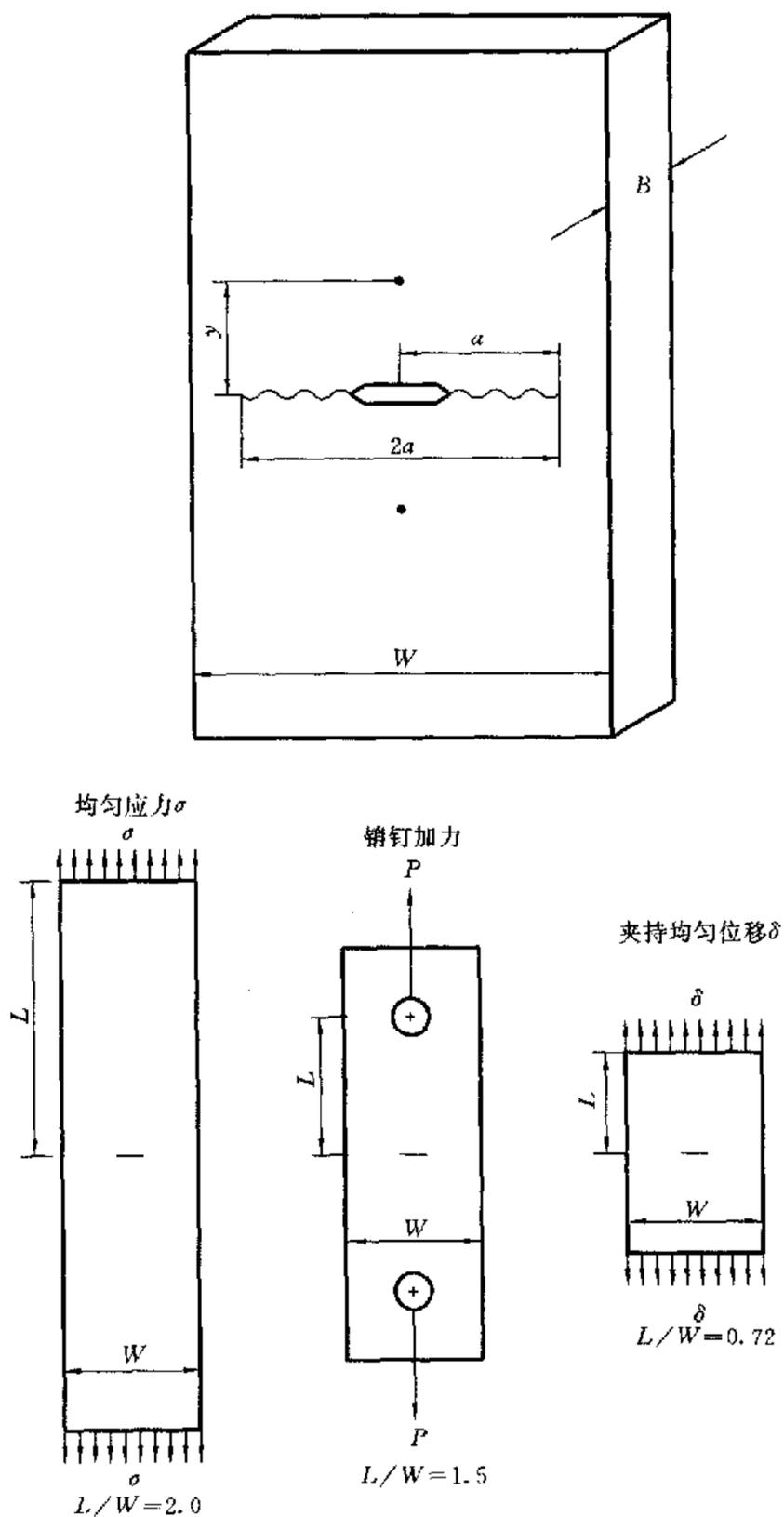
B7 对于承受弯距的试样，例如 C(T)试样，已观察到装夹方法会影响柔度的读数。如图 B3 所示的平底孔或滚动轴承的夹具，可以用来解决 C(T)试样的这类问题。

B8 一个完整的疲劳力循环的力-位移曲线一般是非线性的。较低部分通常是非线性的，靠上部分是线性的。要通过拟合力-位移曲线较上部的直线段来计算柔度。用位移规所测量的柔度值换算成裂纹长度值时，为排除闭合效应和力反向带来的测定误差，建议 β 取 $0.95 P_{max}$ 和 α 取 $0.5 P_{max}$ 两点间的直线段计算 P-V 曲线上的斜率，如图 B4 所示。

B9 要确保至少读出一目测的裂纹长度，一般是试验的初始值，或是试验的终止值。目测的读数必须按实际的裂纹长度的曲率加以修正。其修正的方法按照 7.1。实测裂纹长度和柔度裂纹长度之间的任何

偏差应用对所有柔度测定的裂纹长度进行修正。大多数情况常常是通过计算有效弹性模量 E' 来调整，即在柔度方程中使用 E' 来计算所有的裂纹长度。如果有效弹性模量与典型的弹性模量相差大于 10%，则认为装置的使用有误，用这种有误的方法得到的试验数据视为无效。

通常 $E \leq E' \leq E/(1-\mu^2)$ ，此处 μ 是泊松比。



$C_1=0.0$	$C_1=0.005$	$C_1=-0.03$
$C_2=0.0$	$C_2=0.0184$	$C_2=0.013$
$C_3=0.0$	$C_2=3.0$	$C_3=4.0$

图 B2 M(T)试样中心线柔度测定位置示意图

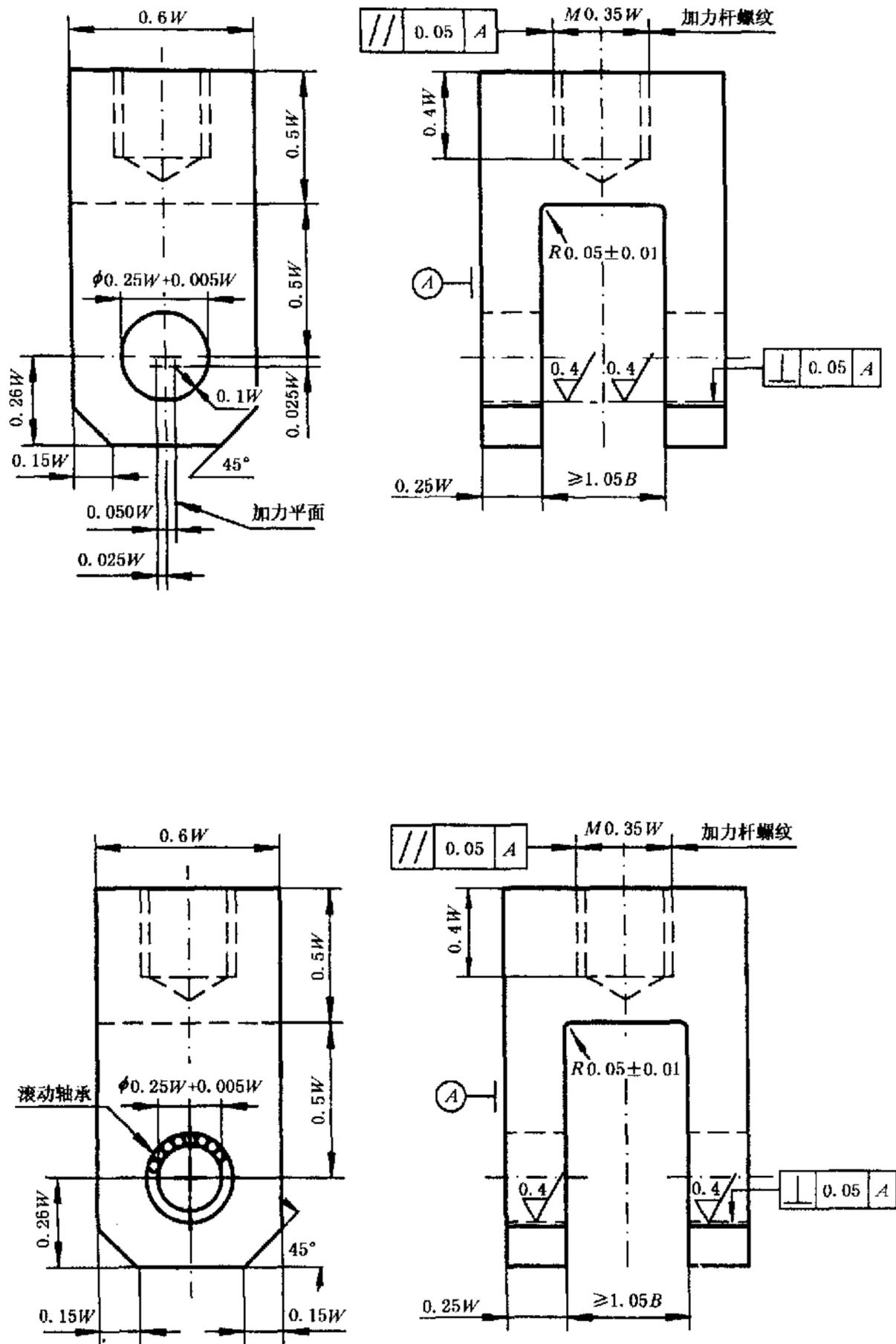
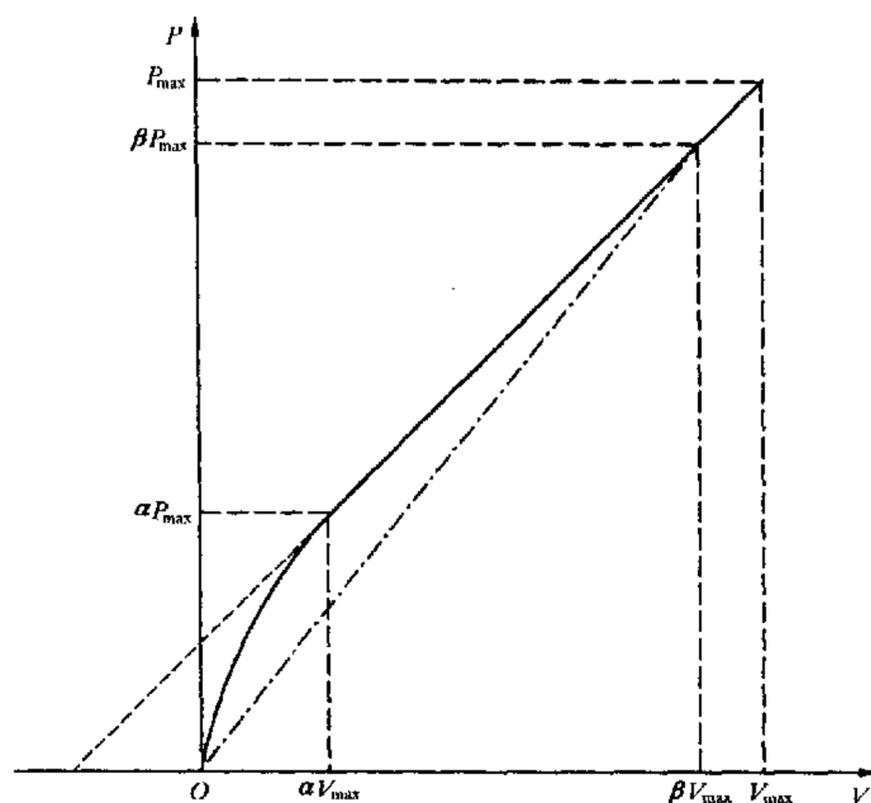


图 B3 用于 C(T) 试样试验的 U 形夹具图

图 B4 P-V 曲线的非线性^{6]}**B10 其他细则**

B10.1 使用柔度法测定裂纹长度时,在开始试验期间,建议定期目测裂纹长度。

B10.2 位移规的标定对于 $W=40\text{ mm}$ 的 C(T) 试样,位移规所处的位置(在图 B1 中所示的四种位置的任一种)在 $\pm 10\text{ V}$ 的量程内标定到 $50\text{ }\mu\text{m/V}$,一般将提供足够的分辨率。对于 $W=80\text{ mm}$ 和 $2Y/W \leq 0.4$ 的 M(T) 试样,在同样的量程内对位移规的标定要求标到 $15\text{ }\mu\text{m/V}$ 。对于刚性较大的 M(T) 试样,需要增加分辨率,以满足测量准确度的要求,否则就不应使用这种方法。在试验中, M(T) 试样允许存在少量的弯距,但会使柔度测量更复杂化。

B10.3 采用数字化数据采集系统,当产生裂纹扩展速率比较小时,允许从几个连续循环中获得数据。在多重循环采样中,归一化裂纹长度 a/W 的变化不应大于 0.001 ($\Delta a/W \leq 0.001$)。

附录 C

(标准的附录)

含水介质中疲劳裂纹扩展测定的特殊要求**C1 范围**

本附录规定了金属材料在含水介质中疲劳裂纹扩展测定的特殊要求。提供采用紧凑拉伸 C(T) 试样和中心裂纹拉伸 M(T) 试样在含水介质中测定疲劳裂纹扩展速率的试验装置及试验程序。

C2 定义

C2.1 腐蚀疲劳 金属同时受到腐蚀和交变应力或交变应变作用的破坏过程。

C2.2 腐蚀介质 含有一种或多种腐蚀剂的环境。

C2.3 腐蚀电位 金属在给定腐蚀体系中的电极电位。

C2.4 电化学腐蚀 至少包含一对电极反应的腐蚀。

采用说明:

6] 为了方便使用者,增加力-位移曲线图。

C2.5 人造海水 用化学试剂模拟海水的化学成分而配置的海水溶液。

C3 试验装置

C3.1 介质盒和循环系统

C3.1.1 推荐采用如图 C1 所示的循环系统装置供应试验溶液。

C3.1.2 循环系统的流量要确保每分钟至少置换介质盒内溶液一次。

C3.1.3 介质盒和循环系统应全部由有机玻璃、塑料制品等非金属材料制成。

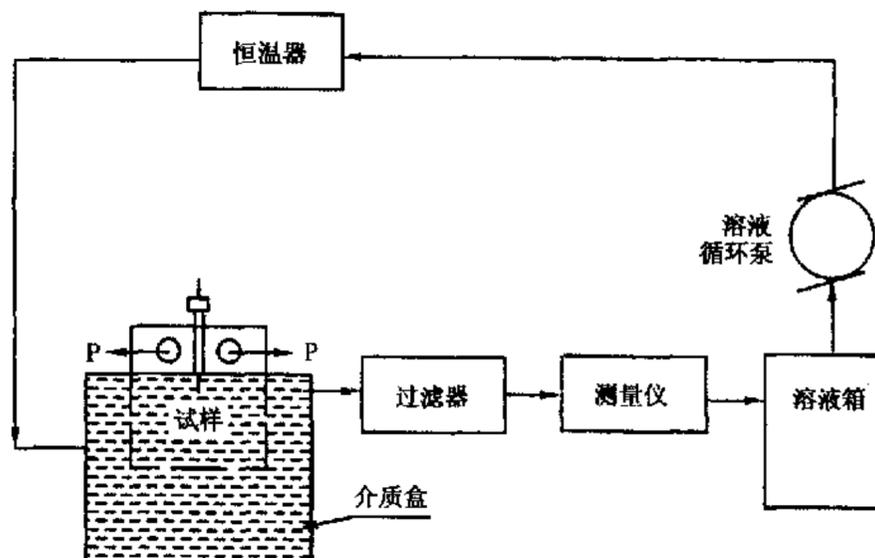
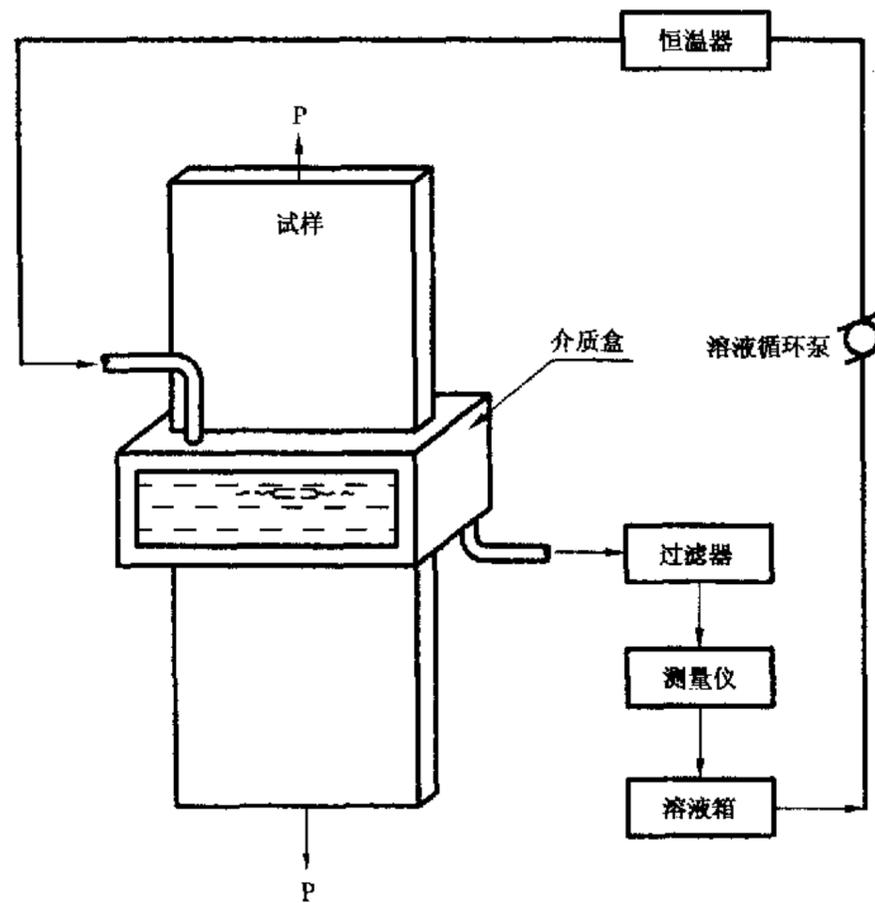


图 C1 推荐采用的溶液循环系统⁷⁾

采用说明：

7) 为方便使用者，增加 C(T)、M(T) 试样用试验介质盒及溶液循环系统图。

C3.1.4 介质盒应能将试样的裂纹扩展部分整个装入,选择好人水口和出水口位置,以确保试验溶液能围绕试样的裂纹扩展部分流动。

C3.1.5 介质盒的设计应避免夹具和试验溶液之间的接触。

C3.1.6 含水介质的体积:含水介质应具有足够的体积,该体积与试样被浸表面成正比,推荐大于 20 mL/cm²。

C3.2 加力装置按照 5.2。

C4 主要试验程序

C4.1 按照 6.1 和 6.2 测量试样尺寸及预制疲劳裂纹。

C4.2 安装试样前,应清洗试样表面和切口。建议采用酒精或丙酮清洗,但不应引起试样表面的腐蚀和损伤。

C4.3 配置试验溶液:

C4.3.1 盐水溶液 用蒸馏水或去离子水配置的氯化钠溶液。氯化钠重量百分比浓度通常是 3.5%。

C4.3.2 人造海水

C4.3.2.1 制备 10 L 人造海水的方法为:在 8~9 L 水中缓慢添加 245.34 g NaCl 和 40.94 g 无水 Na₂SO₄ 不断搅拌,待其溶解,将 200 mL 为 1 号备用溶液和 100 mL 为 2 号备用溶液稀释至 10 L。用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 值调到 8.2 仅需要几毫升 NaOH 即可。

C4.3.2.2 使用前制备溶液并立即调准 pH 值。

C4.3.3 把 10 mL 的 3 号备用溶液缓慢添加到按 C4.3.2 方法制备的 10 L 人造海水中,不断搅拌,即可得到具有重金属的人造海水。

C4.3.4 1 号、2 号、3 号备用溶液的制备

C4.3.4.1 1 号备用溶液 按下列浓度溶解如下三种盐,并稀释到 7 L,贮存在密闭的玻璃容器中。

MgCl ₂ · 6H ₂ O	3 889.0 g (=555.6 g/L)
CaCl ₂ (无水的)	405.6 g (=57.9 g/L)
SrCl ₂ · 6H ₂ O	14.8 g (=2.1 g/L)

C4.3.4.2 2 号备用溶液 按下列浓度溶解如下化合物,并稀释到 7 L,贮存在密闭的棕色玻璃容器中。

KCl	486.2 g (=69.5 g/L)
NaHCO ₃	140.7 g (=20.1 g/L)
KBr	70.4 g (=10.0 g/L)
H ₃ BO ₃	19.0 g (=2.7 g/L)
NaF	2.1 g (=0.3 g/L)

C4.3.4.3 3 号备用溶液 按下列浓度溶解如下 6 种盐,并稀释到 10 L,贮存在密闭的棕色玻璃容器中。

Ba(NO ₃) ₂	0.994 g
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0.546 g
Cu(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O	0.396 g
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0.151 g
Pb(NO ₃) ₂	0.066 g
AgNO ₃	0.004 9g

C4.3.4.4 制备 3 号备用溶液,AgNO₃ 的添加方法为:首先配成 1 L 中含 0.049 g 的 AgNO₃ 溶液,然后将 100 mL 的这种 AgNO₃ 的溶液加到没有 AgNO₃ 的 3 号备用溶液中,稀释到 10 L 即可。

C4.3.5 根据第 C4.3.2 条制备的人造海水需具有表 C1 中所列的成分(表 C1 的 A 部分)。根据 C4.3.3 制备的具有重金属的人造海水需具有表 C1 中的各种成分。

表 C1 人造海水化学成分

序 号	成 分	含量, g/L
A	NaCl	24.53
	MgCl ₂ · 6H ₂ O	5.20
	Na ₂ SO ₄	4.09
	CaCl ₂	1.16
	KCl	0.695
	NaHCO ₃	0.201
	KBr	0.101
	H ₃ BO ₃	0.027
	SrCl ₂ · 6H ₂ O	0.025
	NaF	0.003
B	Ba(NO ₃) ₂	0.000 099 4
	Mn(NO ₂) ₂	0.000 034 0
	Cu(NO ₃) ₂	0.000 030 8
	Zn(NO ₃) ₂	0.000 009 6
	Pb(NO ₃) ₂	0.000 006 6
	AgNO ₃	0.000 000 49

C4.3.6 允许根据需要配制其他含水介质成分。

C4.4 介质盒安装在试样上后,通入试验溶液,对试样进行预浸泡,建议预浸泡的时间不小于 24 h。

C4.5 建议在夹具的销子和 U 型夹具的承力表面涂防腐润滑油,以使腐蚀和摩擦减至最小,但要注意防止润滑油对溶液的污染。

C4.6 对于腐蚀作用明显的试验过程,允许清除试样侧表面的腐蚀产物,以利于试验溶液浸入裂纹尖端区域,并利于目测观察裂纹长度以及裂纹尖端形态。

C4.7 环境监测与控制:

C4.7.1 试验开始时,应使用新鲜溶液,即没有与其他金属件接触过的溶液。

C4.7.2 对于使用闭环的循环流动溶液应不超过一星期更换全部试验溶液。

C4.7.3 建议试验中至少每 4~8 h 测量一次腐蚀电位、溶液的 pH 值、电导率和溶解氧,并进行记录。

C4.7.4 电化学参数测量具体细则见 HB 6626 中的附录 C(参考件)。

C4.7.5 在试验室环境温度下试验时,建议用恒温器对溶液的温度进行控制和监测。

C4.7.6 必须细心监测试验中环境诱发裂纹现象的特征。例如,裂纹扩展加速或减速,裂纹停滞、分岔、倾斜等,并记录。

C4.7.7 对于一个特殊试验,如果 $da/dN-\Delta K$ 数据出现大的瞬变特征,应进行重复试验。

C4.8 裂纹长度测定:

推荐用非目测法和目测法测定裂纹长度。如果采用非目测法,建议用目测法作为辅助方法,用来观测裂纹走向尤其是监测裂纹分岔、倾斜等可使试验数据无效的现象。

C4.8.1 非目测法通常包括柔度法、电位法等,而以柔度法应用更为广泛。

C4.8.1.1 用柔度法测定裂纹长度的具体细则见附录 B(标准的附录)。

C4.8.1.2 如果采用电位法见附录 D(标准的附录),要注意确保它对 $da/dN-\Delta K$ 数据没有电化学的影响。

C4.8.2 用目测法测定裂纹长度,其测量准确度不低于 0.1 mm 或 0.002 W 中较大者。其余部分如试验过程中各种规定与要求、试样与夹具的装夹、 $a-N$ 曲线的测定均与本标准正文部分相同。

C5 试验报告

试验报告除按照第 9 章的要求外,还应包括如下内容:

- a) 溶液的化学成分;
- b) 环境监测与控制方法;
- c) 环境参数:电位、pH 值、溶解氧、电导率、温度。

附录 D
(标准的附录)
裂纹长度的电位法测定

D1 原理

在含裂纹试样上,电流场是试样几何形状,尤其是裂纹尺寸的函数。通一恒电流,电势随试样裂纹长度增加而升高。

D2 基本方法

D2.1 直流电位(DC)法(如图 D1 所示)是给试样通一恒电流,电流在 5~50 A 时,典型的电位输出在 0.1~50 mV 范围,为得到足够的电位分辨率,应特别注意干扰信号和零漂。直流电位法受热电势的影响,由于热电势是由温度变化引起的,可通过关闭电流而测得热电势或反转电流加以消除。

D2.2 交流电位(AC)法(如图 D2 所示),给试样通一恒幅(一般是正弦波)电流,交流法又分低频法和高频法。低频交流法与直流法类似,但其缺点是当加力频率是电流频率的整数倍时,可能产生不可靠的信号。高频交流法,与低频法相比,同样的输入电流得到较高的裂纹尺寸准确度。

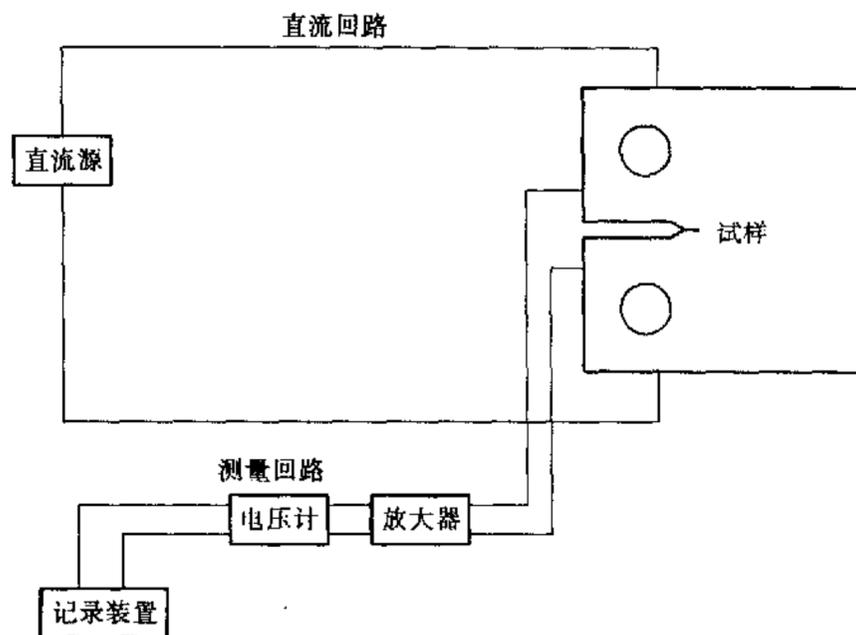


图 D1 直流电位法示意图

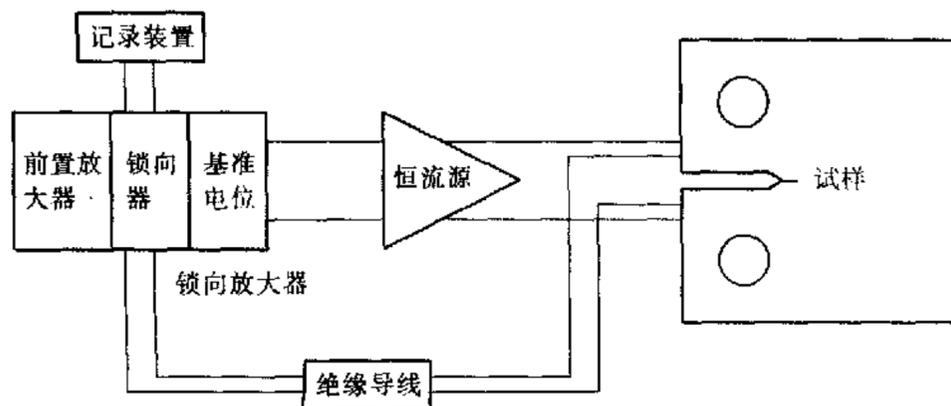


图 D2 交流电位法示意图

D3 氧化物和环境的影响

许多材料在试验条件下产生氧化产物,它沿着新生成的断裂表面起绝缘作用。在这种情况下,一个循环中的电压是不变的(假设一个循环中裂纹不扩展)。在没有氧化产物的情况下,裂纹闭合可导致低于实际尺寸的结果。在接近门槛值附近应特别注意这一点。

试样或仪器的变化将引起测量电位的变化。例如,试样温度变化 1℃,将使电信号产生几微伏的变化。基准电位可以直接从试样上测得,但应使基准电位不随裂纹长度而变化。

D4 裂纹长度与电位间的关系

对于中心裂纹试样和半穿透裂纹,裂纹长度和电位关系的封闭解已被推导出。另外,基于数值分析的其他形状试样的解也可查得。这些关系一般表达为无量纲电位(V/V_r)和参考裂纹间的函数形式:

$$a = f(V/V_r, a_r) \dots\dots\dots (D1)$$

- 式中: V ——测量电位, mV;
- V_r ——参考裂纹电位, mV;
- a ——裂纹尺寸, mm;
- a_r ——与 V_r 对应的参考裂纹长度或缺口尺寸, mm。

导线与试样连接位置对测量准确度有影响。靠近裂纹尖端的测量点有较好的测量准确度,但裂纹尖端处的电场极不均匀,导线位置细微的变化将引起电位较大的变化。对于同样的裂纹尺寸,在多数情况下,测量准确度最高的地方也是对位置最敏感的地方。

式(D2)是针对直流电位法中具有锋利裂纹尖端的裂纹得出的,如以钝的缺口作参考裂纹将引起误差。

C(T)试样裂纹尺寸与电位关系式如下(只有在如图 D3 所示的测量位置时,方程中的系数才适用):

$$a/W = C_0 + C_1(V/V_r) + C_2(V/V_r)^2 + C_3(V/V_r)^3 \dots\dots\dots (D2)$$

- 式中: $0.24 \leq a/W \leq 0.7$;
- $C_0 = -0.5051, C_1 = 0.8857, C_2 = -0.1398, C_3 = 0.0002398$ 。

对于 M(T)试样,裂纹尺寸与电位之间的关系式如下(测量位置如图 D4):

$$a = \frac{W}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{W} \times Y_0\right)}{\cosh\left[\frac{V}{V_{ar}} \times \cosh^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{W} \times Y_0\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{W} \times a_r\right)}\right]\right]} \right] \dots\dots\dots (D3)$$

对于 $0 \leq \frac{2a}{W} \leq 1$

- 式中: a ——裂纹长度, mm;
- W ——试样宽度, mm;
- V ——测量电位, mV;
- V_{ar} ——与初始裂纹 a_r 相对应的电位, mV;
- a_r ——初始裂纹长度, mm;
- Y_0 ——从裂纹面到电位测量点的距离, mm。

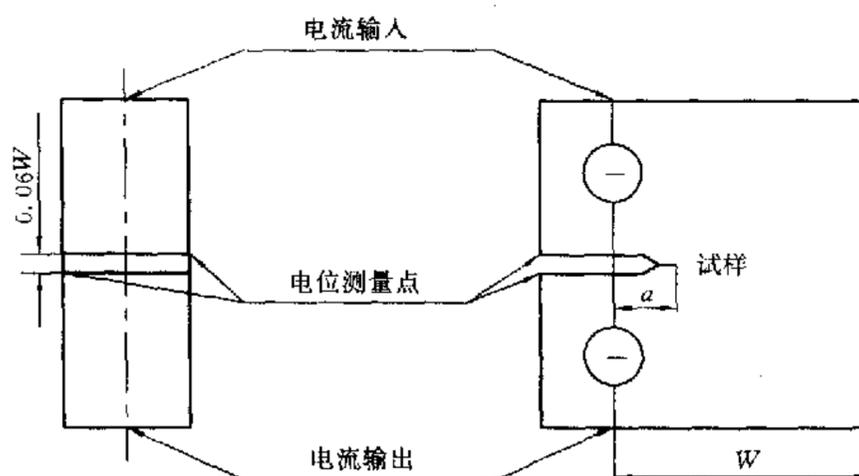


图 D3 C(T)试样导线连接示意图

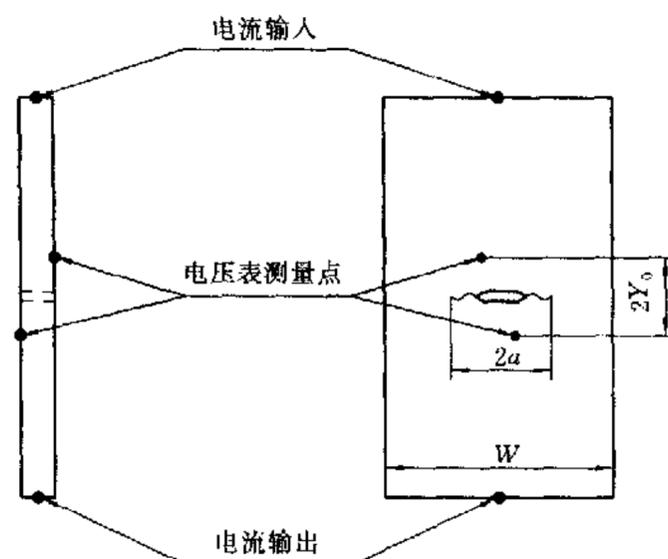


图 D4 M(T)试样几何形状和电位导线位置

D5 装夹

电位法依赖一恒电流通过试样，测量不同裂纹扩展阶段电位的变化。多数试验机系统环路电阻远大于试样电阻。但有些试验机环路电阻与试样相比不可忽略，则应在试样和加力系统间采取绝缘措施。

D6 电位系统的分辨率

有效分辨率定义为实际中能分辨出的最小裂纹尺寸，不单是记录装置的最佳分辨率。对于一般试验室试样，直流电流 5~50 A 和电压分辨率为 $\pm 0.1 \mu\text{V}$ 或 $\pm 0.1\%V_t$ ，将能产生 $0.1\%W$ 的裂纹尺寸分辨率。对导电性能好的材料（如铝、铜）在低电流水平，分辨率会下降，但导电性能差的材料（如钛、镍），可得到 $0.01\%W$ 的分辨率，对于给定试样形状、材料、试验设备，裂纹尺寸的分辨率应给予分析。

附录 E

（提示的附录）

疲劳小裂纹扩展测定方法

E1 范围

本附录中给出了室温小裂纹试样形状与尺寸、裂纹长度测定方法和试验数据处理方法。

E2 小裂纹长度测定方法

本附录推荐三种测量方法，根据具体情况，优选一种。

a) 复型法：在一定循环间隔下终止循环载荷，加一静力（不大于最大试验力的 80%），用丙酮清洗试

样表面,滴适量丙酮再将一小而薄的醋酸纤维素薄膜轻轻压在试样表面,待干燥后,取下复型,在显微镜下观察复型并测量裂纹长度,记下小裂纹长度与相应的力循环数。如发现气泡和其他夹杂物使复型不清晰,必须重新复型。

循环间隔的确定一般应保证一个试样在试验的全过程中至少要 25~30 个复型。

b) 直流电位法:建议使用电流源能提供 10~50 A,干扰信号小于 0.05% 的长时稳定电流,电位计能测出初始 200 μV 中的 0.2 μV 变化,增益为 10^4 ,这要求从 2 V 到最终 6 V 的过程中,能测出 2 mV 的变化,见附录 D(标准的附录)。

c) 长焦距显微镜法:如同室温下用读数显微镜观察长裂纹一样,以长焦距显微镜镜头对准要测的小裂纹扩展区域,同时还需要配备用来处理图像、数据的计算机系统。

E3 试样

E3.1 试样尺寸和形状

在试样上制造一小尺寸切口诱导裂纹萌生,切口可用电火花或薄砂轮加工。为了消除机械加工的影响,预制裂纹长度应至少两倍于切口尖端半径。有些小裂纹试样几何形状在裂纹萌生后不对称,如产生角裂纹,应特别注意减小试样的弯曲和扭转变形。推荐的小裂纹试样如图 E1 和图 E2 所示。

图 E1 为半椭圆表面裂纹试样,这一形状有利于避免形成角裂纹和适用于大应力范围。

图 E2 为半圆缺口拉伸试样,其优点是可以产生自然萌生的裂纹。

E3.2 试样表面制备

机加工引起的近表面残余应力和粗糙表面对裂纹扩展行为有影响,所以应在试验前加以消除。机加工后,应进行低应力研磨,表面抛光可采用电解抛光或化学抛光,也可用手工抛光,但应随后去除残余应力。

E3.3 小裂纹的预制

对于半椭圆表面裂纹试样(图 E1),可以用电火花预制一个 0.5 mm 长 \times 0.05 mm 深的半椭圆表面裂纹。

对于半圆缺口拉伸试样(图 E2),可以用电火花在半圆底部预制 0.5 mm 长 \times 0.05 mm 深的表面裂纹;或在半圆缺口边缘处预制 0.10 mm 长 \times 0.10 mm 深的角裂纹;如果做自然萌生的裂纹扩展,则不必预制裂纹。

E3.4 应力水平和应力比

对于许多材料,取名义的最大应力相当于 0.6 倍的 $\sigma_{P0.2}$ 将有助于在相对较短时间内产生小裂纹,接近 $\sigma_{P0.2}$ 的应力易产生多条裂纹,分析时需考虑塑性变形,应力比对小裂纹起裂也有影响。

E3.5 裂纹深度测量

除了要测量表面裂纹的长度(2a)以外,计算裂纹的驱动力时,还需要裂纹形状。通常假设为半椭圆表面裂纹,但必须获得一些深度数据,这可通过一次拉断不同试验阶段的小裂纹试样,从断口上测量得到。

E4 计算和说明

E4.1 ΔK 的计算

许多小裂纹试验方法中假设裂纹为半椭圆形,应力强度因子范围一般表达式为:

$$\Delta K = F_j \Delta \sigma_i \sqrt{\pi a / Q} \quad \dots\dots\dots (E1)$$

式中: $\Delta \sigma_i$ ——远方均匀拉伸应力范围;

Q ——形状因子;

F_j ——边界修正因子。

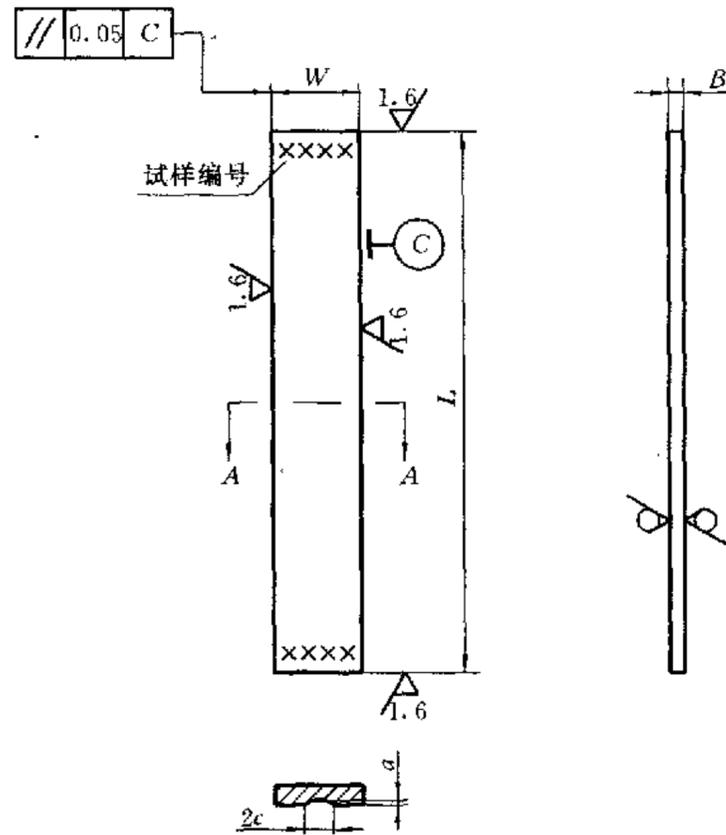
对于半椭圆表面小裂纹,受均匀拉伸应力的试样(图 E1, E3),其应力强度因子范围的计算见有关参考文献。

对于半圆缺口小裂纹,受均匀拉伸应力的试样(图 E2,E4),其应力强度因子范围的计算见有关参考文献。

应当注意,半椭圆的裂纹形状适用于细晶和各向同性材料。在晶粒粗大或各向异性材料中,半椭圆裂纹形状与实际相差较大。

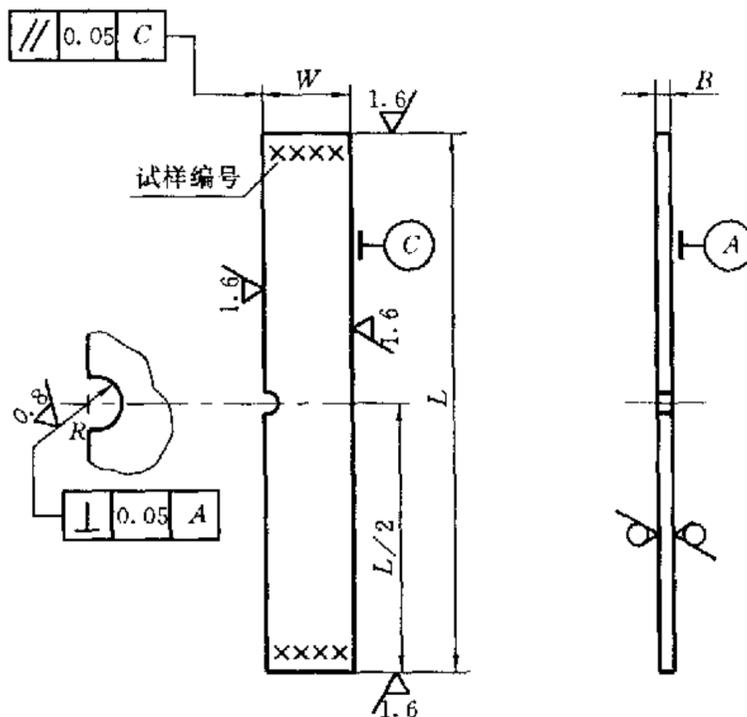
E4.2 裂纹扩展速率计算

测量误差使 da/dN 的计算结果分散。如果裂纹长度测量间隔 Δa 减小,则测量误差对 da/dN 的影响增大;不同的数据处理方法也影响裂纹增长速率的分散度。在小裂纹 da/dN 处理中,为尽可能得到较小的裂纹长度数据,推荐使用割线法处理。



注:对于铝合金、钢,通常取 $B=6.36, W=50, L=300$

图 E1 半椭圆表面裂纹拉伸试样^{8]}



注: $R/W=1/16$,对于铝合金结构钢, B 通常取 $2.5\text{ mm}, W=50, L=300$

图 E2 半圆缺口表面裂纹拉伸试样^{9]}

采用说明:

8]、9] 为方便使用者,增加小裂纹试样图。

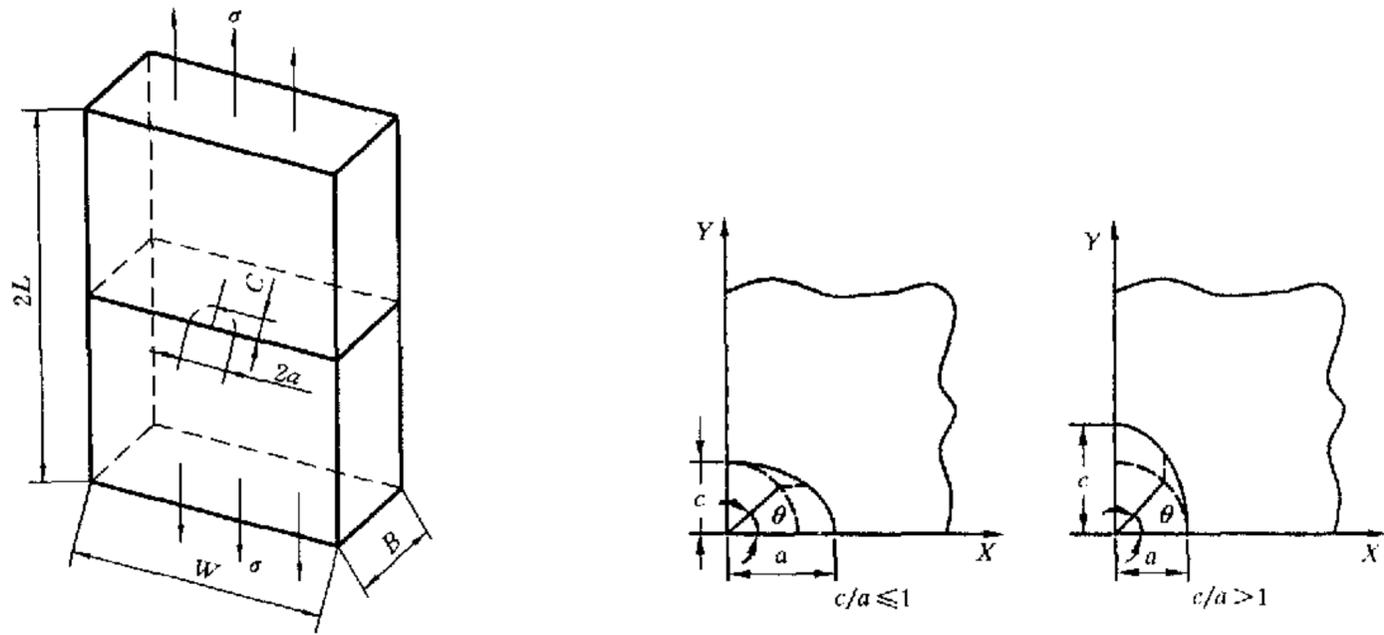


图 a 图 b
图 E3 半椭圆表面裂纹几何图形以及参量角 θ 的定义^[10]

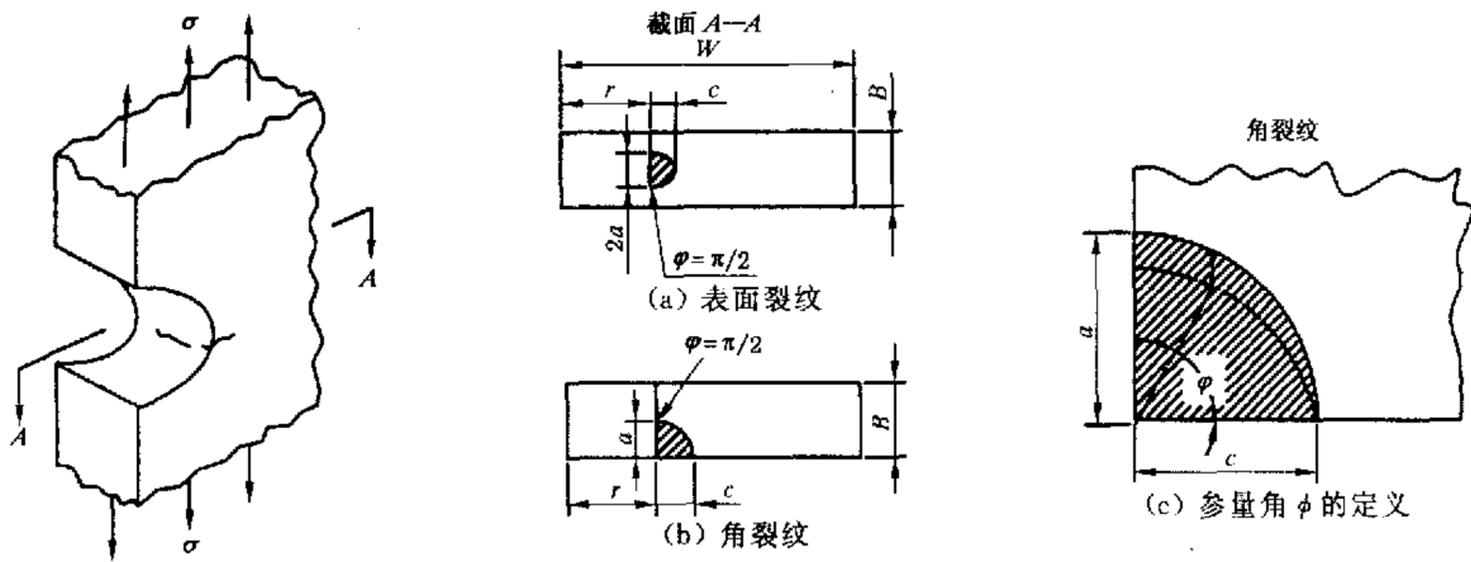


图 E4 试样尺寸、表面裂纹和角裂纹几何图形以及参量角 ϕ 的定义^[11]

附录 F

(提录的附录)

疲劳裂纹张开力的测定方法

F1 范围

本附录给出了采用紧凑拉伸 C(T) 试样或中心拉伸 M(T) 试样, 利用柔度法确定疲劳裂纹张开力的测定方法。条件是试样承受恒幅力或很低速变化的力(类似于门槛值试验中恒力值比的降力试验)。

F2 定义

F2.1 张开力 P 。 循环加力的升力过程中, 使疲劳裂纹尖端张开的最小力。

已有许多试验技术被用以确定张开力。其中包括: 超声波, 电位法, 涡流, 声发射, 高倍摄像和应变或

采用说明:

10]、11] 为计算小裂纹应力强度因子方便起见, 增加小裂纹几何图形。

位移对力(柔度)测量等方法。其中由于柔度法试验简便,因而被广泛采用。

F2.2 裂纹闭合 裂纹闭合是描述疲劳裂纹扩展中的一种现象,即在循环力的卸力过程中裂纹面接触且力通过裂纹面传递。许多材料在一次循环中,裂纹闭合能够发生在大于最小循环力的情况下,甚至发生在最小力是拉伸的情况。从最小力开始重新加力时,必须施加一部分拉伸力用以使裂纹面完全张开。这样,裂纹闭合提供了一种解释裂纹尖端附近的不同于名义施加的 ΔK 的有效应力强度因子(ΔK_{eff})的机理,因此,裂纹闭合效应是解释裂纹扩展行为的关键。

F2.3 有效力值范围 ΔP_{eff} 在疲劳过程中,产生裂纹张开的循环力部分。有效力可表示为:

$$\Delta P_{eff} = P_{max} - P_0 \quad \text{若 } P_0 > P_{min} \dots\dots\dots (F1)$$

$$\Delta P_{eff} = \Delta P = P_{max} - P_{min} \quad \text{若 } P_0 \leq P_{min} \dots\dots\dots (F2)$$

F2.4 有效应力强度因子范围 ΔK_{eff} 在疲劳过程中,用有效力值范围 ΔP_{eff} 所计算的应力强度因子范围。

F3 用柔度测定裂纹张开力的基础

当含裂纹试样完全张开时,柔度(应变/位移-力曲线的斜率)达到一特征值并保持恒定,直到力进一步增大到足以引起裂纹尖端产生大范围屈服,柔度法确定张开力正是以这一发现为基础的。当从最大循环力卸力,柔度仍然具有裂纹处于完全张开时的特征值,而不考虑在最大力达到之前是否产生大范围屈服。在概念上,实验是很简单的,就是确定应力或应变-力曲线开始成线性时的力(类似于拉伸试验中确定比例极限),但在实际操作中,由于柔度渐渐变化,也由于柔度数据中的非线性、可变性或干扰信号,确定裂纹张开力是非常困难的。测量中的非线性和干扰信号能引起张开力的明显变化。

减小由于干扰信号和非线性引起的张开力分散性的方法是,定义张开力为柔度对应于偏离(低于)裂纹完全张开时的力。因为采用偏离(低于)的柔度值时,由于柔度变化而引起力的变化比接近线性段的点小,因而张开力的分散性减小。当然,偏离柔度法确定的张开力低于裂纹完全张开时的值。应当选择一个合适的偏离柔度准则,以减小张开力分散性和使其与裂纹完全张开时的力相差最小。

F4 试验装置

F4.1 本附录在测定疲劳裂纹张开力时,需一个装夹在试样上的应变或位移规及一个能从试验机的力和应变/位移规上采集数据的数据获得和处理系统。

F4.2 对应变/位移规的要求是,一般应符合柔度法测裂纹长度的要求,但高质量的(高线性和高抗干扰性)应变/位移数据对柔度法测量张开力特别重要。

F4.3 应变或位移测量点可以靠近裂纹尖端或远离尖端。本附录推荐后者,因为后者试验简单而且具有更好的重复性。C(T)试样推荐测量点为:(1) 裂纹嘴位移,(2) 背面中心点处应变。M(T)试样测量点为试样中心线上的位移,见图 F1。

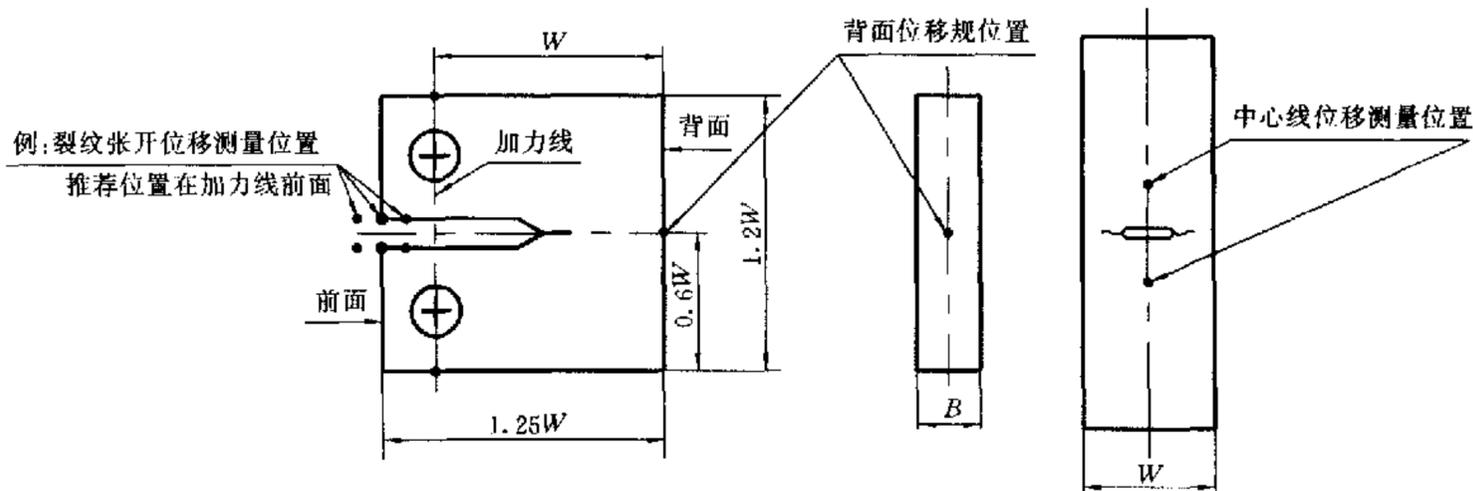


图 F1 推荐的用于确定 C(T)试样与 M(T)试样的位移与应变测量位置

F5 试验程序

F5.1 采集一完整的力循环的应变/位移数据。采样速率应保证数据点的间隔小于力值范围的 2% (不同力的波形需用不同的最小采样速率, 以保证每点间隔为 2%)。

F5.2 在卸力线上, 从稍低于最大力点开始 (不小于最大力的 0.95), 用最小二乘法对 25% 力值范围部分做直线拟合。该直线的斜率确定为裂纹完全张开时的柔度。

应当注意: 对于具有高张开力的某些材料和加力条件, 用张开力拟合的直线段, 可能会造成计算的裂纹张开柔度和张开力偏低。

F5.3 在加力线上, 从稍低于最大力点开始 (不小于最大力的 0.9), 用最小二乘法, 分段直线拟合 10% 力值范围的曲线, 相邻直线段的重叠为 5% 的力值范围 (见图 F2)。确定每个直线段的柔度 (斜率) 及其平均力。

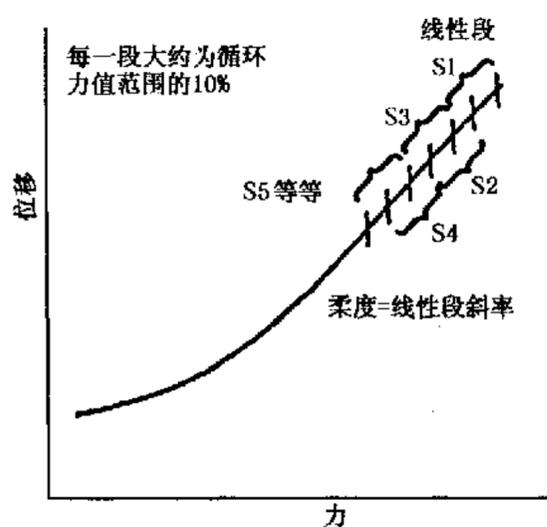


图 F2 在张开力确定中柔度随力变化的估计

F5.4 计算每段的柔度偏离如下:

$$\text{柔度偏离} = (\text{张开裂纹柔度} - \text{柔度}) / (\text{张开裂纹柔度})$$

张开柔度由 F5.2 确定。柔度偏离用百分数表示。

F5.5 以每段的柔度偏离和平均力作图, 并以直线连接各点 (见图 F3)。按最小力确定对应于所选偏离准则的力为张开力 (P_o), 在连接线的该点上的柔度值等于偏离基准。

如果不止一条连接线通过偏离基准水平 (见图 F4), 柔度数据的波动可能会引起较大的张开力误差。应采取措施将其降低, 通过传感器屏蔽线或在采集前采取适当的电子滤波信号能有效地降低产生的变化量。必须采用匹配滤波器, 以免带来力和应变/位移信号之间的相位漂移。

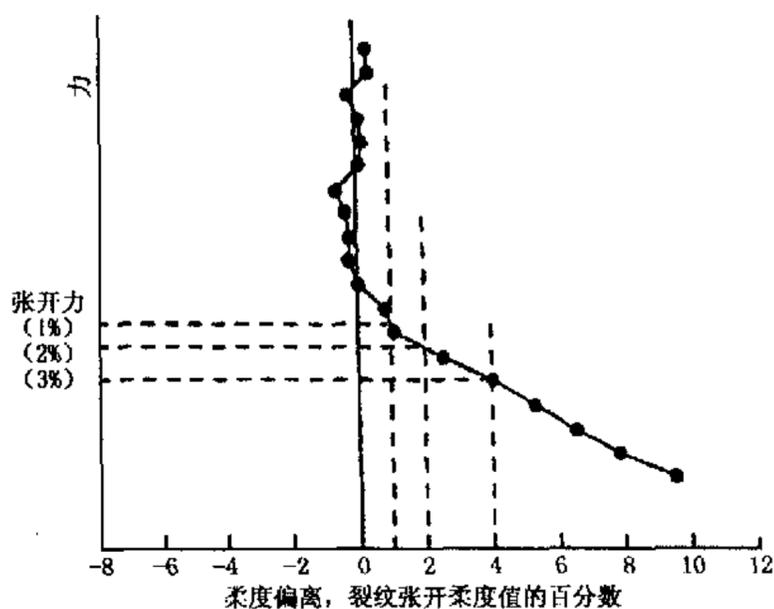


图 F3 使用柔度偏离法确定张开力

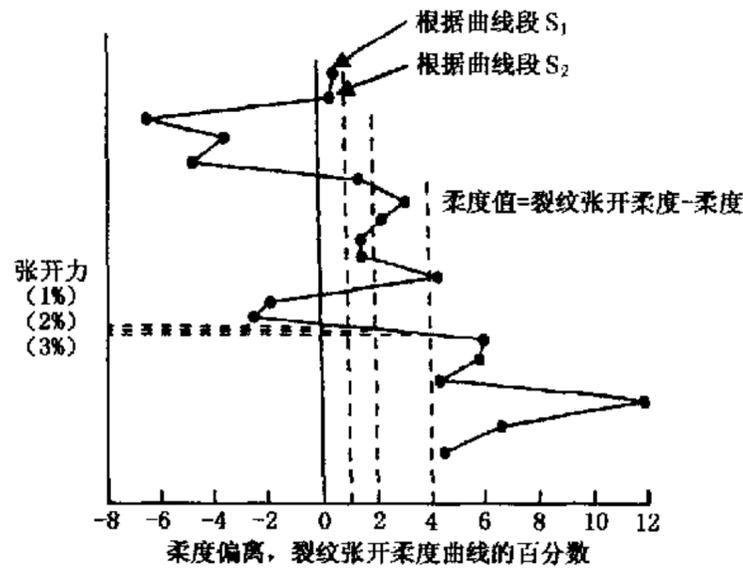


图 F4 柔度偏离数据中出现较大变化量的例子

F5.6 如果在 F5.5 中发现张开力大于 $0.5 P_{max}$, 为了检查张开裂纹柔度的合理性, 回到 F5.2 找出拟合小于 25% 和大于 25% 力值范围的直线斜率, 以斜率和拟合力值范围作图, 找出使其以下斜率不变的最大力值范围。如果范围小于 25%, 应采用新的小范围的斜率值作为张开裂纹柔度, 重新进行张开力分析。

F6 数据要求

F6.1 原始的应变/位移-力数据影响着张开力。应用柔度偏离去, 数据质量受两方面因素影响: (1) 系统的线性, (2) 系统的干扰信号和可变性。这两点都影响张开力的结果。因此, 建议对每根试样的试验数据都要进行检查。

F6.2 为了检查每根试样的试验结果, 在试样产生裂纹前, 获得应变/位移-力数据, 在相同的加力速率下获得一个完整力循环的数据, 并采用试验程序中描述的方法分析这些数据。用力循环的加力部分的柔度值, 计算柔度偏离值和平均柔度偏离的标准偏差。对于一个完全线性和无干扰信号的测量系统, 柔度偏离值的平均值和标准偏差应为零。如果偏离值的平均值(以张开裂纹柔度的百分数表示)大于 1% 或标准偏差大于 2% 时, 用柔度偏离法确定的张开力值视为无效。此时, 应检查位移规的线性、试样的平直度、加力部分的同轴度、装夹结构和位移规的干扰信号。

F7 试验报告

试验报告除按照第 9 章的要求外, 还应将下列内容和张开力一起提出报告:

- 应变或位移的测量位置和所用的位移规;
- 用于定义张开力的柔度偏离基准值;
- 非开裂试样的柔度偏离的平均值和标准偏差;
- 非开裂试样和已开裂试样的力-柔度偏离的典型图;
- 试样厚度;
- 张开力测量前的疲劳加力史;
- 建议确定并报告 1%、2% 和 4% 柔度偏离基准的张开力。至少应该给出 2% 柔度偏离基准的张开力。