

中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准

GB/T 6398—2000

金属材料疲劳裂纹扩展速率
试 验 方 法

Standard test method for fatigue crack
growth rates of metallic materials

2000-11-17 发布

2001-06-01 实施

国家质量技术监督局 发 布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 引用标准	1
3 符号、定义.....	1
4 试样	5
5 试验设备	7
6 试验程序	9
7 试验结果的处理和计算.....	11
8 疲劳裂纹扩展门槛值的测定程序.....	12
9 试验报告.....	17
附录 A(标准的附录) 推荐的数据处理程序	18
附录 B(标准的附录) 测定裂纹长度的柔度法	23
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	27
附录 D(标准的附录) 裂纹长度的电位法测定	31
附录 E(提示的附录) 疲劳小裂纹扩展测定方法	33
附录 F(提示的附录) 疲劳裂纹张开力的测定方法	36

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。

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_n	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_{FS}	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:

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

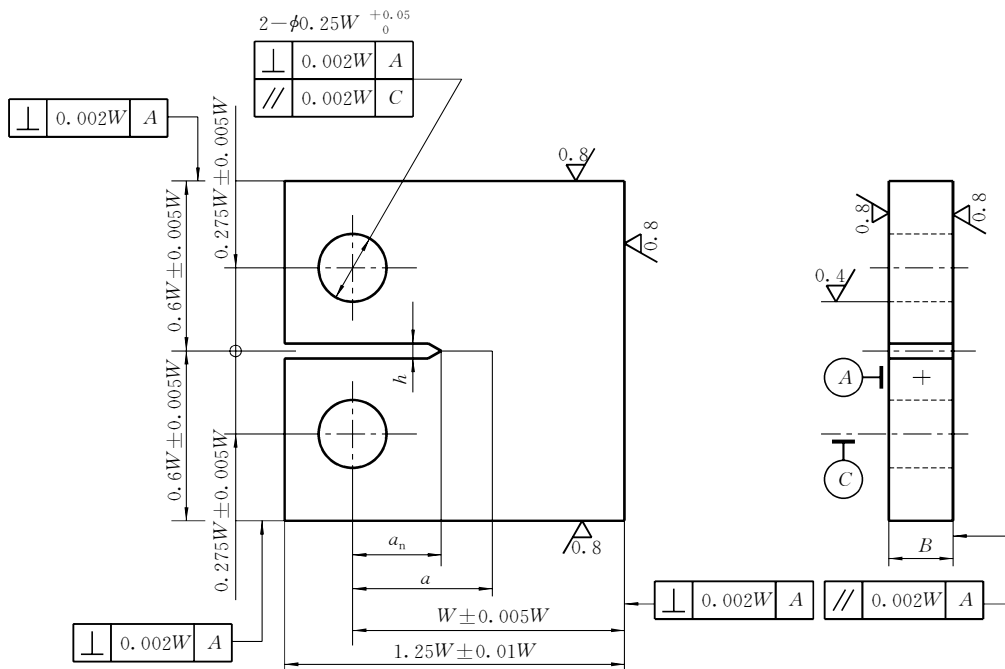


图 1 标准 C(T)试样图

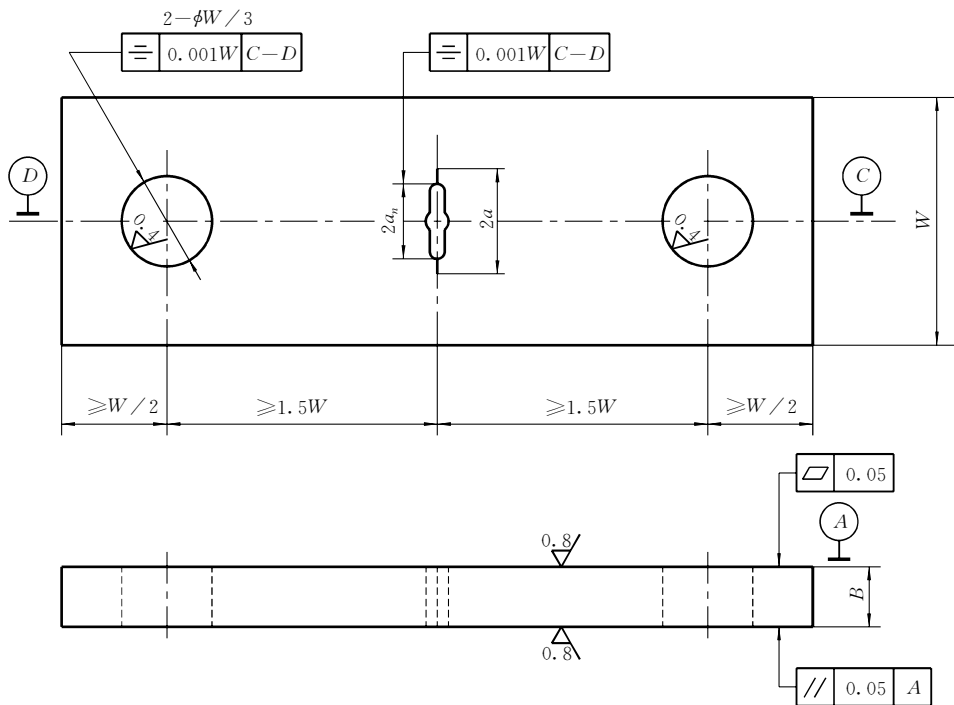


图 2 $W \leq 75$ mm 的 M(T)试样图

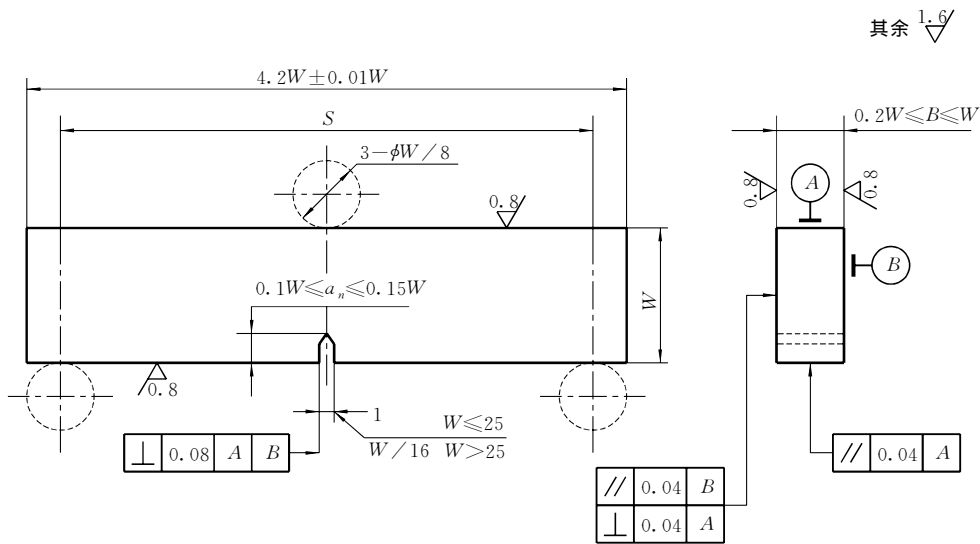


图 3 标准 SE(B) 试样¹⁾

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。

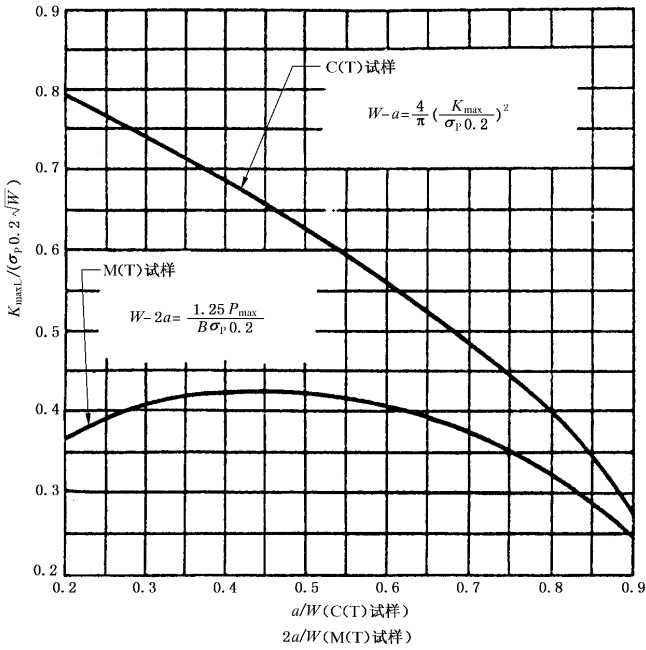


图 4 C(T)和 M(T)标准试样尺寸标准化曲线图

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:

$$W - a = \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{P0.2}} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

式中 $(W - a)$ 为试样无裂纹的韧带区。

对于 M(T) 试样:

$$W - 2a = \frac{1.25 P_{\max}}{B \sigma_{P0.2}} \dots\dots\dots (9)$$

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 $\sigma_{P0.2}$ 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。

$$W - a = \left[\frac{12WP_{\max}}{2B\sigma_{P0.2}} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

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 $0.2 W$ 。

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 $2 a_n$ 不小于 $0.2 W$ 。

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

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。

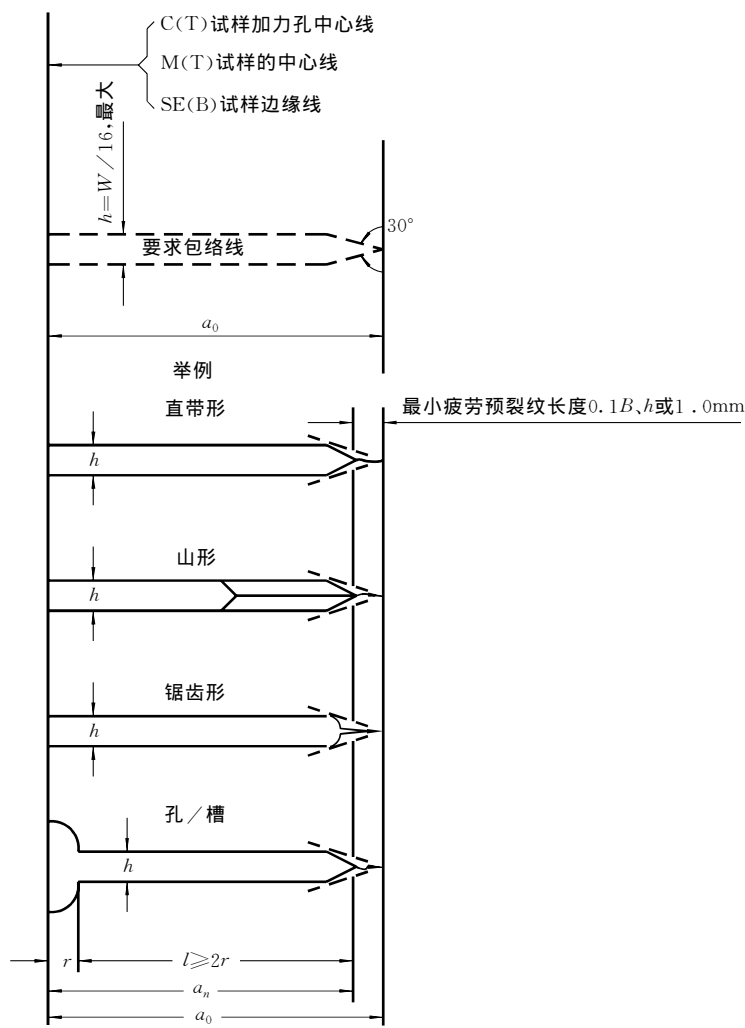


图 5 切口详图及最小疲劳预裂纹长度的要求

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 $\sigma_{P0.2}$ 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。

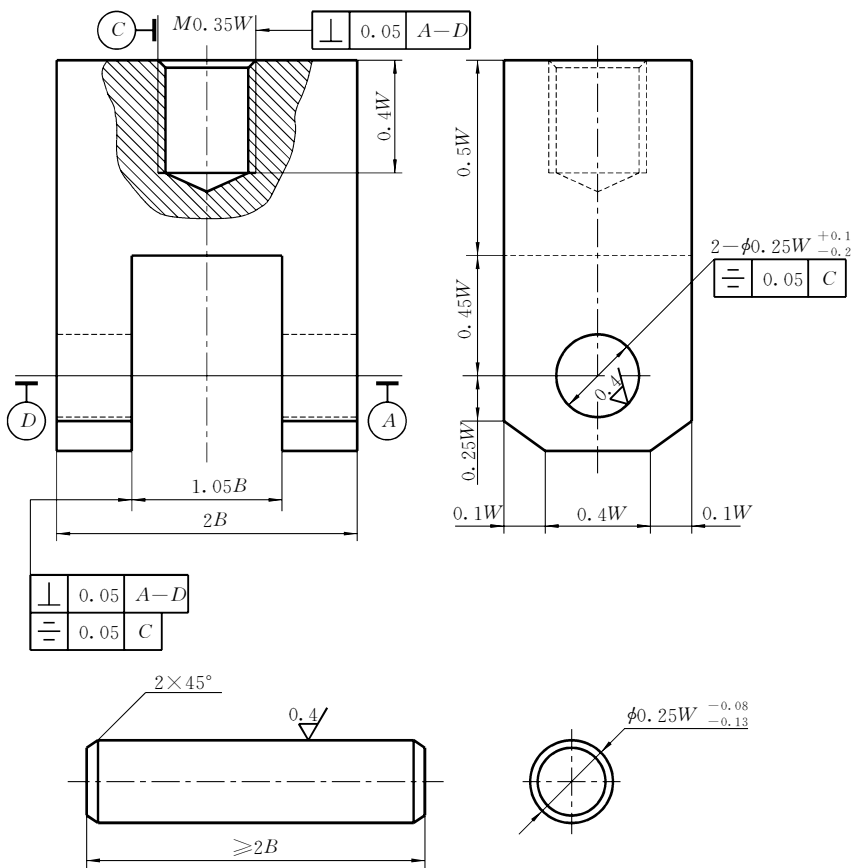
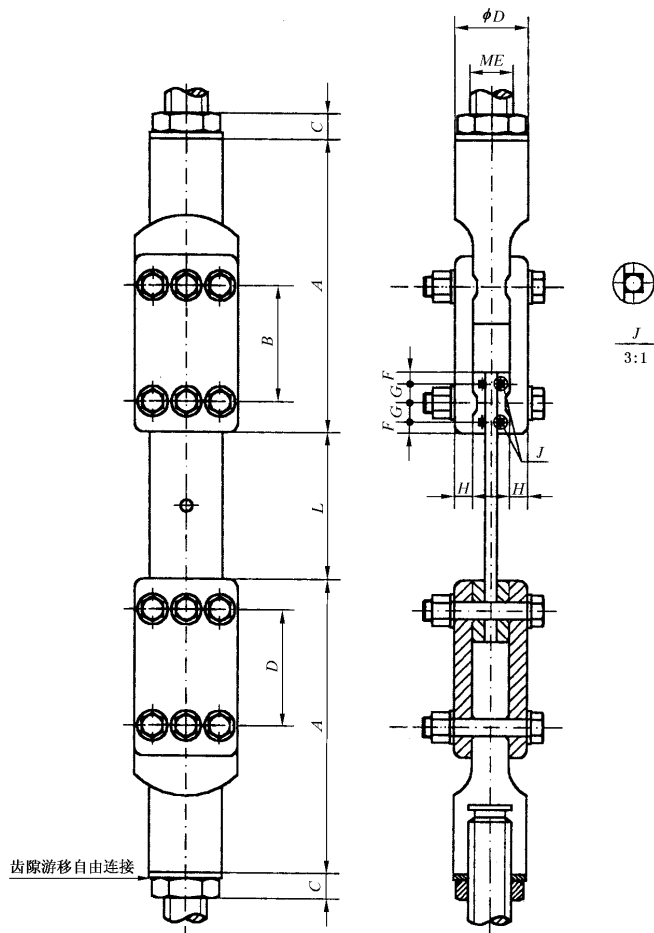


图 6 C(T)试样 U 形夹具和销钉图



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 $K'_{\max}$ 为上一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：

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

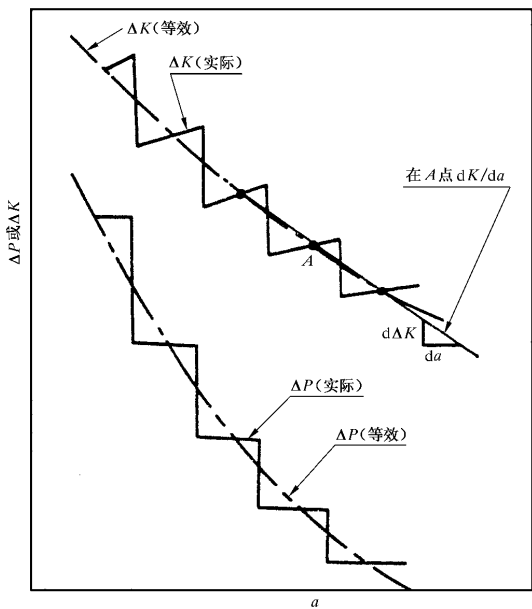


图 8 恒力 P 控制 K 梯度法示意图

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、力值比较小和在门槛值附近的 $da/dN-\Delta K$ 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门槛值数据反常。

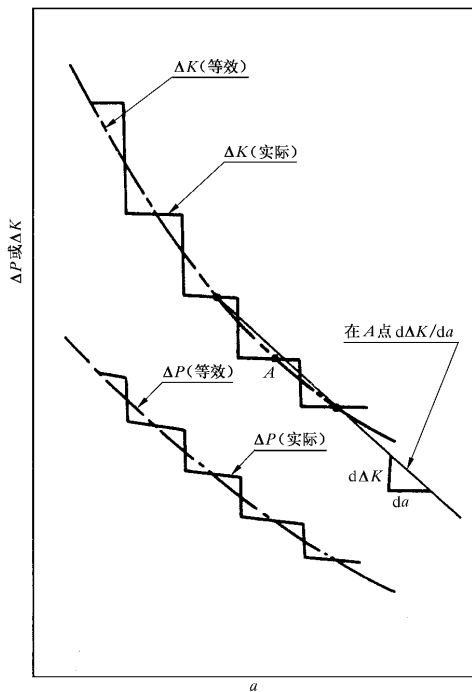


图 9 恒 K 控制 K 梯度法示意图

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:

$$C = - \frac{2.3}{m \Delta a Q}$$

.....(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 、 Δa 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