



中华人民共和国国家标准

GB/T 21143—2007
代替 GB/T 2038—1991, GB/T 2358—1994

金属材料 准静态断裂韧度的 统一试验方法

Metallic materials—Unified method of test for determination of quasistatic
fracture toughness

(ISO 12135:2002, MOD)

2007-09-11 发布

2008-02-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和说明	2
5 一般要求	4
6 稳定和非稳定裂纹扩展下的断裂韧度测定	21
7 δ - Δa 和 J - Δa 阻力曲线和稳定裂纹扩展下的启裂韧度 $\delta_{0.2BL}$ 、 $J_{0.2BL}$ 、 δ_i 和 J_i 的测定	27
8 试验报告	32
9 测定结果的数值修约	34
附录 A (规范性附录) 裂纹面的取向	35
附录 B (规范性附录) 应力强度因子和柔度关系	36
附录 C (规范性附录) 裂纹扩展数据的拟合	39
附录 D (资料性附录) δ_i 和 J_i 的测定	40
附录 E (资料性附录) 试验报告实例	43
附录 F (资料性附录) 在三点弯曲试验中的施力点位移 q 的测量	49
附录 G (资料性附录) pop-in 方程的推导	53
附录 H (资料性附录) 确定 V_p 及 U_p 的分析方法	54
附录 I (资料性附录) 单试样法指南	55
附录 J (资料性附录) 剖面法测定 CTOD 值	65
附录 K (资料性附录) 本标准章条编号与 ISO 12135:2002(E)章条编号对照	68
附录 L (资料性附录) 本标准与 ISO 12135:2002(E)技术性差异及其原因	69

前 言

本标准修改采用国际标准 ISO 12135:2002《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》(英文版)。

本标准根据 ISO 12135:2002(E)重新起草,为了方便比较,在附录 K 中列出了本标准章条编号与 ISO 12135:2002(E)章条编号的对照一览表。

考虑到我国国情,本标准在采用 ISO 12135:2002(E)国际标准时进行了修改,有关技术性差异已编入正文中在它们所涉及的条款的页边空白处用垂直单线标识。在附录 L 中给出了技术性差异及其原因的一览表以供参考。

本标准代替 GB/T 2038—1991《金属材料延性断裂韧度 J_{IC} 试验方法》和 GB/T 2358—1994《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》,与 GB/T 2038—1991 和 GB/T 2358—1994 相对比以下方面的内容进行了较大修改和补充:

- 阻力曲线及特征值的测定以及数据点的分布;
- 钝化线斜率的计算;
- 数据有效性的判定;
- 测定结果的数值修约。

本标准规定的 $J_{0.2BL}$ 相当于原国家标准中的 J_{IC} ;本标准规定的 $\delta_{0.2BL}$ 相当于原国家标准中的 δ_i ;本标准对 δ_i 另有定义应与原国家标准定义的 δ_i 严格区分。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 为规范性附录。

本标准的附录 D、附录 E、附录 F、附录 G、附录 H、附录 I、附录 J、附录 K 和附录 L 为资料性附录。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:钢铁研究总院、国营红岗机械厂、武汉钢铁公司、宝山钢铁股份有限公司、冶金工业信息标准研究院。

本标准起草人:刘涛、高怡斐、李颖、青映德、李荣峰、丁富连、董莉。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 2038—1980,GB/T 2038—1991;
- GB/T 2358—1980,GB/T 2358—1994。

金属材料 准静态断裂韧度的 统一试验方法

1 范围

本标准规定了均匀金属材料在承受准静态加载时断裂韧度、裂纹尖端张开位移、 J 积分和阻力曲线的试验方法。试样有缺口,采用疲劳的方法预制裂纹,在缓慢增加位移量的条件下进行试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 8170 数值修约规则

GB/T 12160 单轴试验用引伸计的标定(GB/T 12160—2002, idt ISO 9513:1999)

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第1部分:拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准(GB/T 16825.1—2002, idt ISO 7500-1:1986)

GB/T 20832 金属材料 试样轴线相对于产品结构的标识(GB/T 20832—2007, ISO 3785:2006, IDT)

3 术语和定义

本标准采用下列术语和定义。

3.1

应力强度因子 stress intensity factor

K

对于均匀线弹性体的弹性应力场的大小。

注:应力强度因子是施加力、试样尺寸、几何形状和裂纹长度的函数。

3.2

裂纹尖端张开位移 crack-tip opening displacement

δ

在预制疲劳裂纹尖端,裂纹两表面相对于原始未变形的裂纹平面的垂直位移。

3.3

J 积分 J -integral

围绕裂纹前缘,从裂纹的一侧表面到另一侧表面的线积分或面积分,用以表征裂纹前缘地区的应力-应变场。

3.4

J

加载参数,相当于 J 积分,通过本标准方法测定其特征值(J_c, J_i, J_u 等),用于表征不可忽略的裂纹尖端塑性变形条件下的断裂韧度。

3.5

稳定裂纹扩展 stable crack extension

在位移控制的试验条件下,位移保持恒定时,裂纹扩展停止或将停止时的裂纹扩展量。

3.6

非稳定裂纹扩展 unstable crack extension

失稳的裂纹扩展,之前可能有或者没有稳定裂纹扩展。

3.7

pop-in

在力-位移曲线上的突然不连续性,通常表现为位移的突然增加伴随力降低。

注 1: 位移和力的数值在发生 pop-in 之后仍会增加且会超过发生 pop-in 之前的数值。

注 2: 当利用本标准进行试验时,预裂纹平面的非稳定裂纹扩展可导致 pop-in 的发生,应将其与 1)垂直裂纹平面的分层和撕裂;2)在三点弯曲试验中的支撑辊滑动或紧凑拉伸试验加力链中的销子滑动;3)引伸计安装不当;4)在低温试验下裂纹表面冰的破碎;5)力和位移的测量与记录设备的电子干扰等区分开。

3.8

裂纹扩展阻力曲线(R 曲线) crack extension resistance curves(R-curves)

δ 或 J 随裂纹稳定扩展量的变化曲线。

4 符号和说明

本标准所采用的符号和说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	单位	说 明
a	mm	标称裂纹长度
a_f	mm	终止裂纹长度($a_f = a_0 + \Delta a$)
a_i	mm	即时裂纹长度
a_m	mm	机械加工切口长度
a_0	mm	初始裂纹长度
Δa	mm	包括钝化区的稳定裂纹扩展量
Δa_{max}	mm	δ 或 J 控制的裂纹扩展极限
B	mm	试样厚度
B_N	mm	两侧槽之间的试样净厚度
C	m/N	试样的弹性柔度
E	GPa	试验温度下的弹性模量
F	kN	施加的力
F_c	kN	当 Δa 小于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的力
F_f	kN	预制疲劳裂纹时的最大力
J	kJ/m ²	J 积分的试验当量
$J_{c(B)}$	kJ/m ²	当 Δa 小于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 J 值(B 为试样厚度)
J_g	kJ/m ²	J 控制裂纹扩展的上极限
J_i	kJ/m ²	稳定裂纹扩展开始时的 J 值
$J_{m(B)}$	kJ/m ²	对于全塑性特性的第一个最大力平台对应的尺寸敏感断裂抗力 J 值 (B 为试样厚度)
J_{max}	kJ/m ²	本标准方法定义的 J - R 材料特性的极限值

表 1(续)

符号	单位	说 明
$J_{u(B)}$	kJ/m^2	当 Δa 等于或大于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 J 值(B 为试样厚度)
$J_{uc(B)}$	kJ/m^2	当稳定裂纹扩展无法测量时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 J 值(B 为试样厚度)
J_0	kJ/m^2	稳定裂纹扩展对应的未修正的 J 值
$J_{0.2BL}$	kJ/m^2	稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 J 值
$J_{Q0.2BL}$	kJ/m^2	拟合阻力曲线与 0.2 mm 钝化偏置线的交点
$J_{0.2BL(B)}$	kJ/m^2	稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的尺寸敏感断裂抗力(B 为试样厚度)
K	$\text{MPam}^{1/2}$	应力强度因子
K_f	$\text{MPam}^{1/2}$	预制疲劳裂纹最后阶段的应力强度因子 K 的最大值
K_{IC}	$\text{MPam}^{1/2}$	平面应变断裂韧度
K_Q	$\text{MPam}^{1/2}$	K_{IC} 的条件值
q	mm	施力点位移
R_m	MPa	在试验温度下材料在垂直于裂纹平面的抗拉强度
$R_{p0.2}$	MPa	在试验温度下材料在垂直于裂纹平面方向 0.2% 的规定非比例延伸强度
S	mm	跨距
T	$^{\circ}\text{C}$	试验温度
U	J	力和施力点位移曲线下的面积
U_e	J	U 的弹性分量
U_p	J	U 的塑性分量
A_p	J	力和缺口张开位移曲线下面积的塑性分量
V	mm	缺口张开位移
V_g	mm	总缺口张开位移
V_e	mm	V 的弹性分量
V_p	mm	V 的塑性分量
W	mm	试样宽度
Z	mm	用于测定缺口张开位移的引伸计装卡位置距离试样表面之间的距离
δ	mm	裂纹尖端张开位移 CTOD
$\delta_{c(B)}$	mm	当 Δa 小于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 δ (B 为试样厚度)
δ_g	mm	δ 控制裂纹扩展的极限值
δ_i	mm	稳定裂纹扩展开始时的断裂抗力 δ
$\delta_{m(B)}$	mm	对于全塑性特性的第一个最大力平台对应的尺寸敏感断裂抗力 δ (B 为试样厚度)
δ_{max}	mm	本标准方法定义的 δ - R 材料特性的极限值
$\delta_{u(B)}$	mm	当 Δa 大于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 δ 值(B 为试样厚度)

表 1(续)

符号	单位	说 明
$\delta_{uc(B)}$	mm	当稳定裂纹扩展无法测量时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的尺寸敏感断裂抗力 δ 值 (B 为试样厚度)
δ_0	mm	裂纹稳定扩展的未修正的 δ 值
$\delta_{0.2BL}$	mm	稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 δ
$\delta_{0.2BL(B)}$	mm	稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的尺寸敏感断裂抗力 δ (B 为试样厚度)
$\delta_{Q0.2BL}$	mm	拟合阻力曲线与 0.2 mm 钝化偏置线的交点
ν	—	泊松比
注 1: 本表格只列举了主要用到的参数符号,其他参数符号将在相应的章节中予以说明。		
注 2: 除非特别说明,本表格所列举的各参数符号的数值均为试验温度下的测量或计算值。		

5 一般要求

5.1 总则

金属材料的断裂韧度可以表征为特征(单点)值(见第 6 章)或在有限的裂纹扩展范围内的连续曲线(见第 7 章)。用于测量断裂韧度的程序和参数随着试验过程中试样的塑性水平而发生变化。在试验过程中通过对试样塑性水平的逐步了解选用确定材料断裂韧度的试验程序和参数。在任何情况下,试验都是对试样缓慢地增加位移,测量试验过程中的力和位移,然后利用力和位移之间的关系通过特征化的裂纹扩展下的材料抗力测定断裂韧度。本标准提供了与所有断裂参数测定相关的试样的全部信息。本标准方法的使用流程图如图 1 所示。力随位移变化的特征曲线类型如图 2 所示。

5.2 断裂参数

断裂韧度的特征值是由单一试样定义的非稳定裂纹扩展或稳定裂纹扩展开始时的值。

注: K_{IC} 表征尖裂纹的扩展阻力,并应满足:1)裂纹前缘附近处于平面应变状态;2)裂纹尖端的塑性区与试样裂纹尺寸、厚度和裂纹前缘韧带相比要足够小。

K_{IC} 是上述条件下的断裂韧度非尺寸敏感的测量值。满足一定的有效性判据才能得到 K_{IC} 的测量值。

δ_c 、 δ_u 、 δ_{uc} 、 J_c 、 J_u 和 J_{uc} 也是材料阻止尖裂纹非稳定扩展抗力的特征值。然而,这些参数的测量值是尺寸敏感的,都与试样的厚度有关。因此在标注上述参数时都应以符号右下标的形式、以毫米为单位注明试样厚度。

当稳定裂纹扩展量很大时,试验程序和断裂韧度的测量应当按照第 7 章进行。稳定裂纹扩展特性可以用裂纹尖端张开位移 $\delta_{0.2BL}$ 或断裂韧度 $J_{0.2BL}$ 表征,也可以用连续的 δ 或 J 阻力曲线表征。 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$ 是非尺寸敏感的,并作为稳定裂纹扩展开始的工程估计值,不应与实际的启裂韧度值 δ_i 和 J_i 混淆。 δ_i 和 J_i 的测量参见附录 D。

测定 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$ 可以选用两种试验方法。多试样法试验需要几个标称尺寸相同的试样进行单调加载,每个试样对应不同的位移量,需同时测量并记录力和位移。试样裂纹前缘在试验后应进行标记(着色或二次疲劳),之后将每个试样破断成两半,在试样断口上测量稳定裂纹扩展量。铁素体钢试样的冷脆化特性有益于试样破断时裂纹前缘断口的保存。

多试样法需要至少 6 个试样。当试样数量受限时,也可通过基于卸载柔度法或电位法的单试样法进行试验。如果能够保证足够的试验精度单试样法的采用是不受限制的,但应保持足够数量的试样。在任何情况下, $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ 和 δ 或 J 阻力曲线满足本标准规定的有效性判据,则试验结果是有效的。

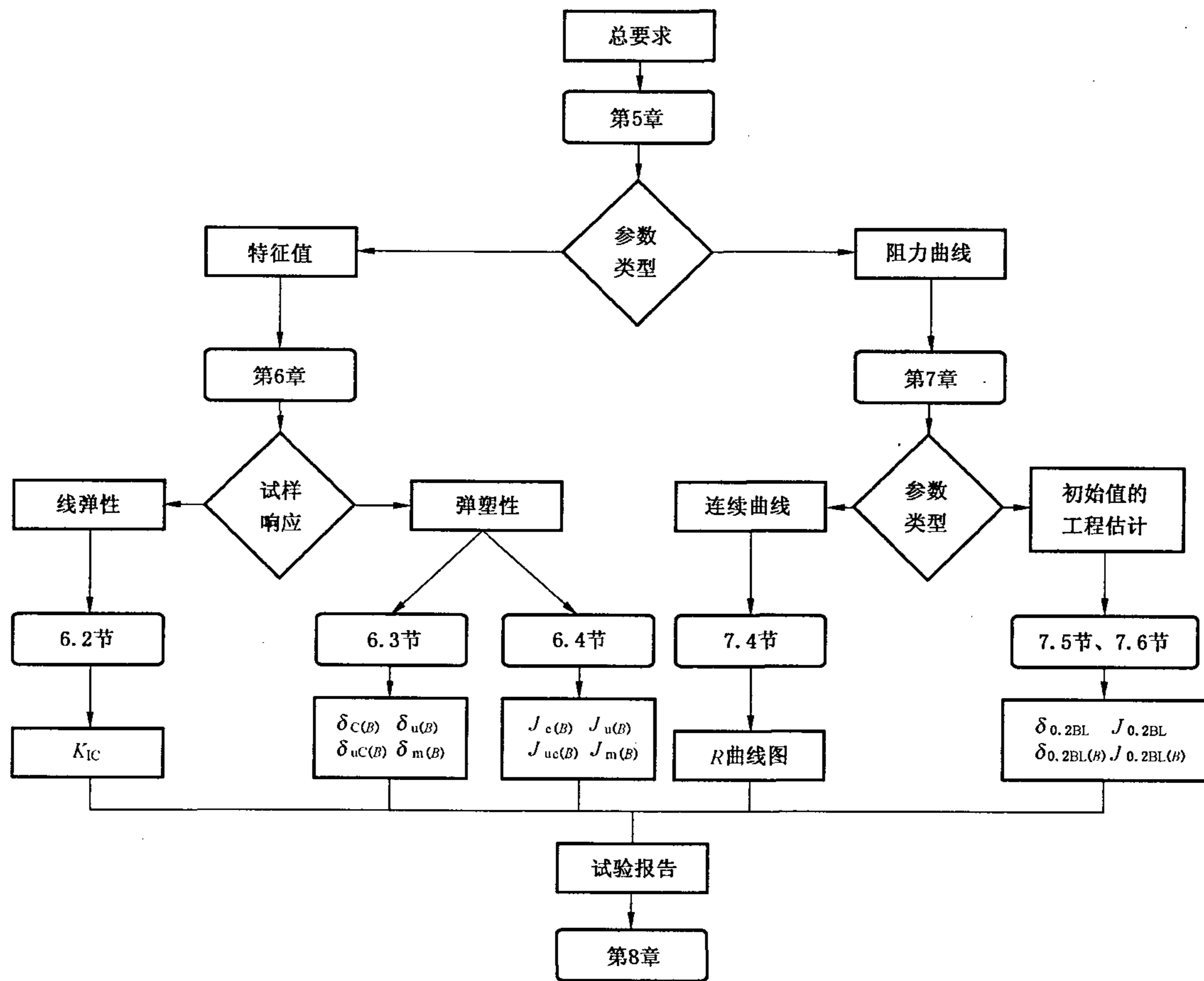
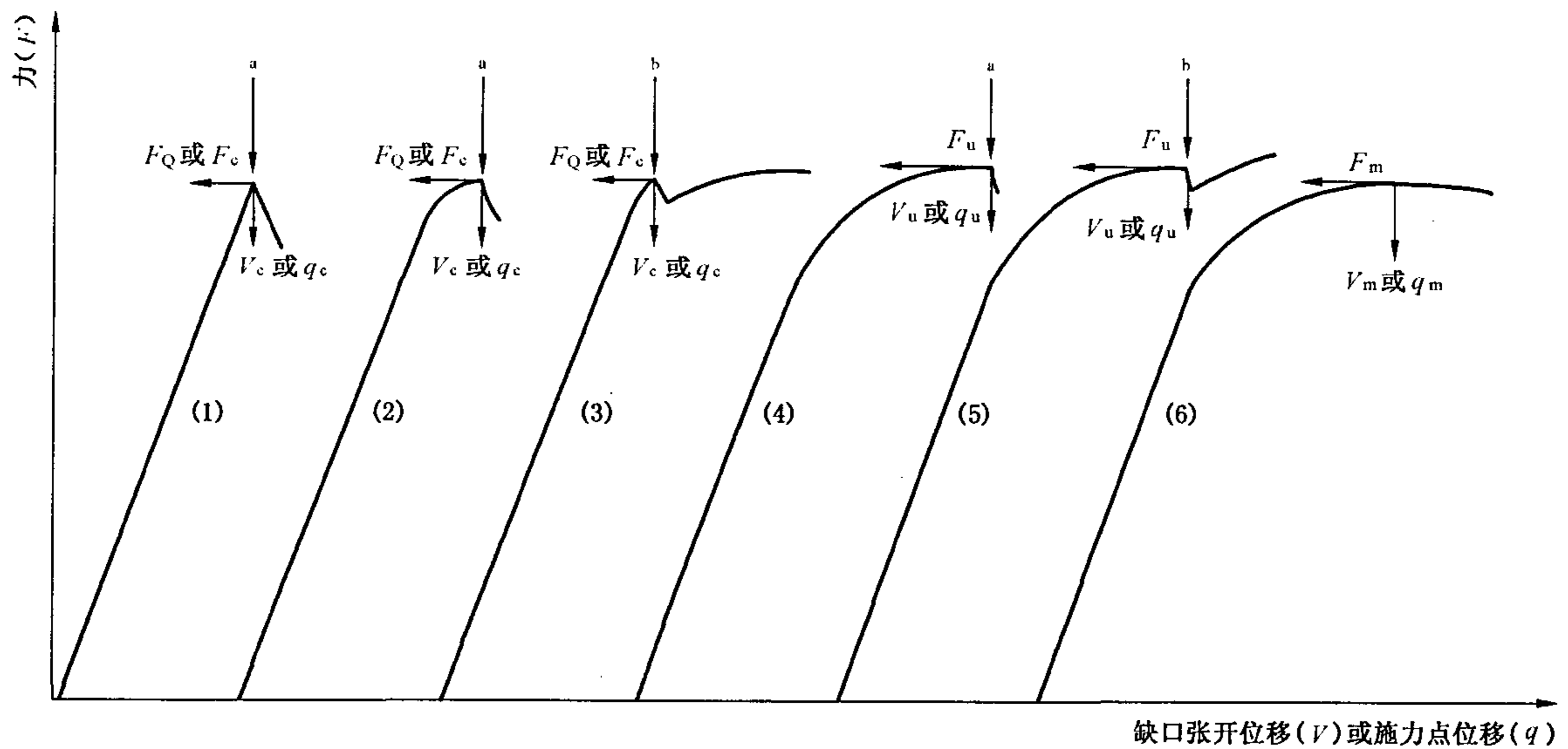


图1 本标准方法的总流程图



- 注1: F_Q 是最大力,用于测定 K_{Ic} 的条件值(见图16)。
- 注2: F_c, F_u 和 F_m 分别对应于 δ_c, δ_u 和 δ_m 或 J_c, J_u 和 J_m 。
- 注3: pop-in 特性与试验机或试样柔度和记录仪的响应速率成函数关系。
- a 断裂。
- b pop-in。

图2 断裂试验中力与位移记录曲线的特征类型

5.3 断裂韧度符号

断裂韧度符号指定如表 2 所示。

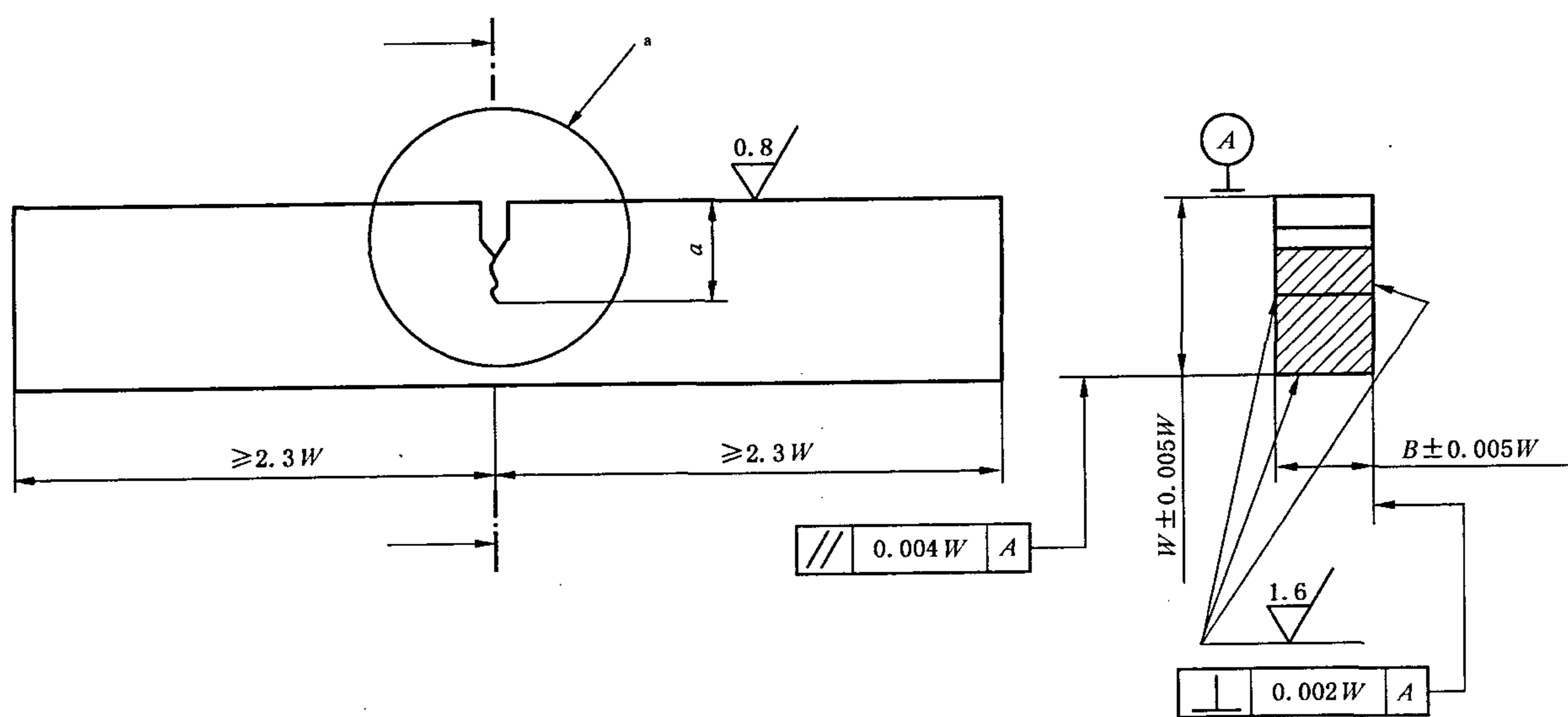
表 2 断裂韧度符号

参数	非尺寸敏感参数	尺寸敏感参数 (特指试样厚度 B)	R 曲线的极限
K	K_{IC}		
δ	δ_i $\delta_{0.2BL}$	$\delta_{c(B)}$ $\delta_{0.2BL(B)}$ $\delta_{u(B)}, \delta_{uc(B)}, \delta_{m(B)}$	δ_g $\delta_g(\Delta a_{max})$
J	J_i $J_{0.2BL}$	$J_{c(B)}$ $J_{0.2BL(B)}$ $J_{u(B)}, J_{uc(B)}, J_{m(B)}$	J_g $J_g(\Delta a_{max})$

5.4 试样

5.4.1 试样形状和尺寸

试样的尺寸和公差应满足图 3 至图 5 的要求。



注 1: 引发裂纹缺口尖端的纵切面(A 面)与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 $0.005W$ 以内。

注 2: 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计, 见图 8 和图 9。

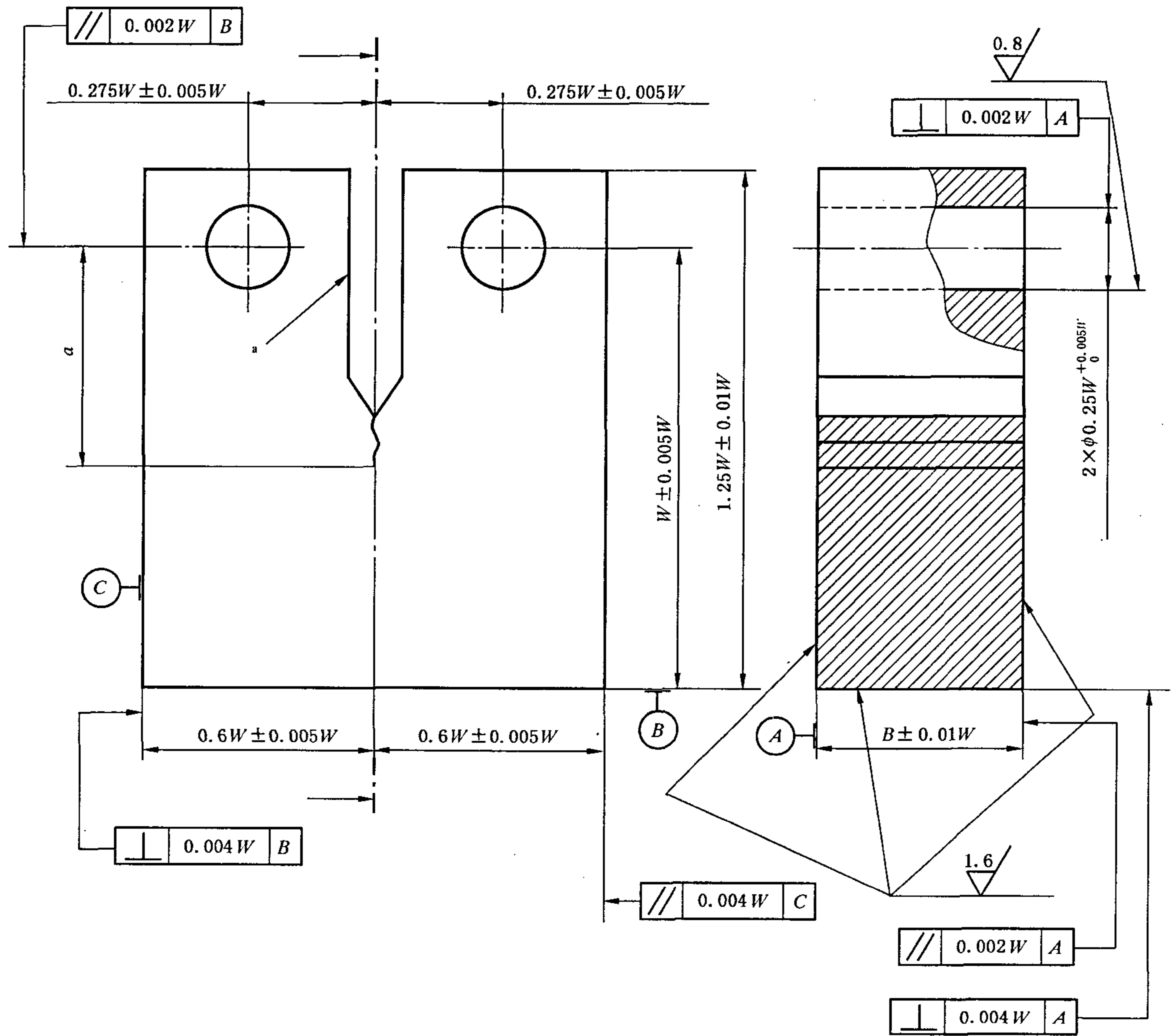
注 3: 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 6。

注 4: $1.0 = W/B = 4.0$ (推荐 $W/B = 2$)。

注 5: $0.45 = a/W = 0.70$ 。

^a 见图 6、图 7、图 8 和 5.4.2.3。

图 3 三点弯曲试样的尺寸比例和公差



注 1: 引发裂纹缺口尖端的纵切面(A 面)与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 $0.005W$ 以内。

注 2: 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计, 见图 8 和图 9。

注 3: 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 6。

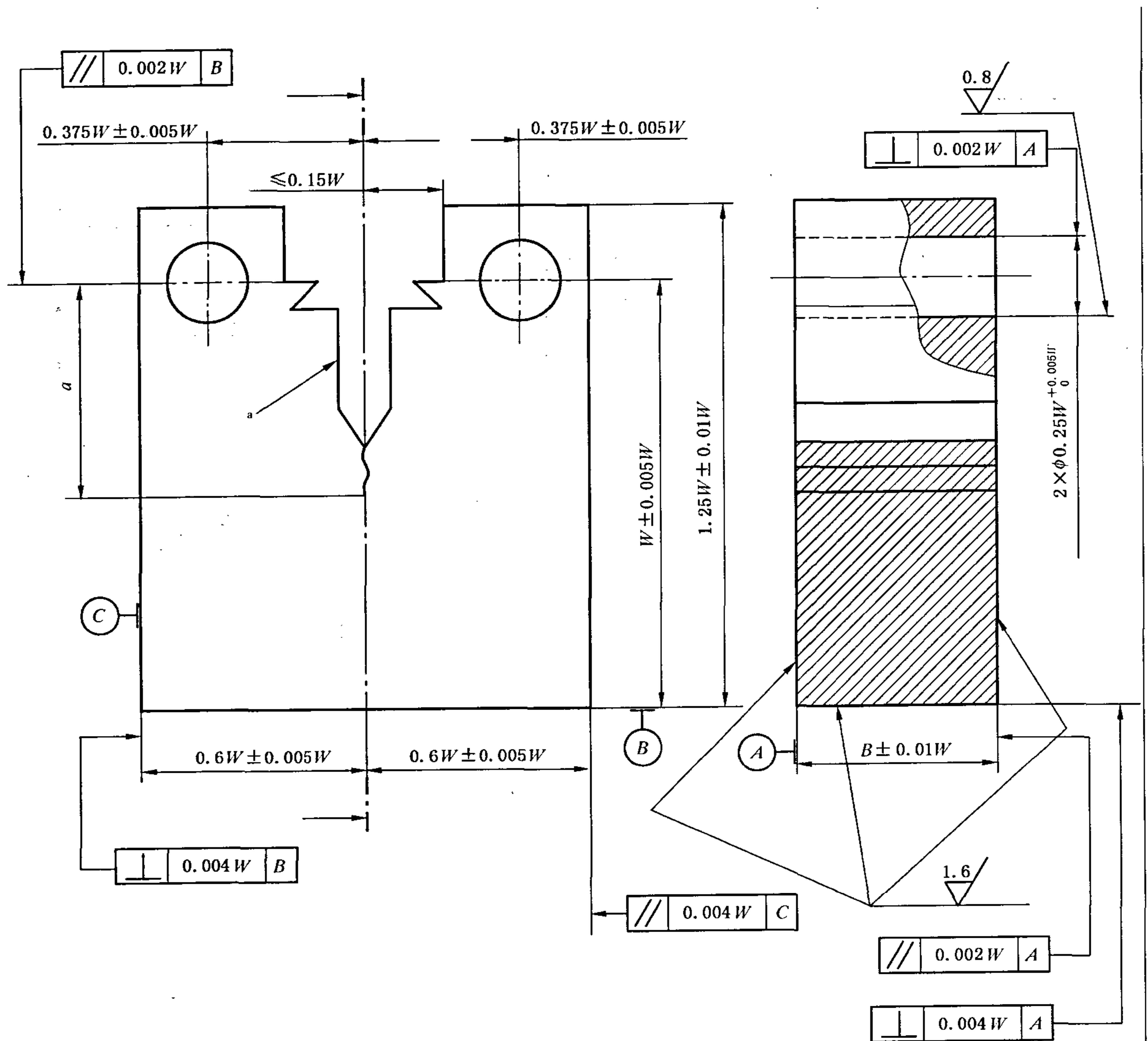
注 4: $0.8 = W/B = 4.0$ (推荐 $W/B = 2$)。

注 5: $0.45 = a/W = 0.70$ 。

注 6: 可以选择的销孔直径为 $\phi 0.188W + 0.004W$ 。

^a 见图 6、图 7、图 8 和 5.4.2.3。

图 4 直通型缺口紧凑拉伸试样的尺寸比例和公差



- 注 1: 引发裂纹缺口尖端的纵切面(A 面)与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 $0.005W$ 以内。
 注 2: 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计, 见图 8 和图 9。
 注 3: 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 6。
 注 4: $0.8 = W/B = 4.0$ (推荐 $W/B = 2$)。
 注 5: $0.45 = a/W = 0.70$ 。
 注 6: 第二个台阶对于一些引伸计是没必要的; 图 6 显示了疲劳裂纹前端缺口的包迹线图。
 注 7: 可以选择的销孔直径为 $\phi 0.188W + 0.004W$ 。当使用这个尺寸的销子时, 最大缺口张开位移应增加到 $0.21W$ 。
 a 见图 6 到图 8。

图 5 台阶型缺口紧拉试样的尺寸比例和公差

试样形状尺寸的设计应当考虑可能的试验结果(见图 1)、 δ 或 J 断裂韧度值、裂纹平面的取向(见附录 A)及被测材料取样的尺寸限制。

- 注 1: 尽管对于 J 值需要特殊的测量步骤即测量施力点的位移, 所有试样的设计(图 3 到图 5)对于 K_{IC} 、 δ 和 J 值的测定都是适用的。表 3 提供了 K_{IC} 测定所需的试样尺寸。
 注 2: 当在施力点测量缺口张开位移时, 对于台阶缺口紧凑拉伸试样 $V=q$ (见图 5)。这样的台阶缺口紧凑拉伸试样同样可以用于测定 K_{IC} 、 δ 和 J 。
 注 3: 对于三点弯曲和紧凑拉伸试样, 推荐试样的宽厚比(W/B)为 2, 对于三点弯曲试样宽厚比可以为 1~4 之间, 对于紧凑拉伸试样为 0.8~4 之间。数据表明 $W/B=4$ 的试样 R 曲线的屈服略高于 $W/B=2$ 的试样。

表 3 K_{IC} 试验的最小推荐厚度

非比例延伸强度/弹性模量/(MPa/MPa)	厚度/mm
$=0.005\ 0\sim<0.005\ 7$	75
$=0.005\ 7\sim<0.006\ 2$	63
$=0.006\ 2\sim<0.006\ 5$	50
$=0.006\ 5\sim<0.006\ 8$	44
$=0.006\ 8\sim<0.007\ 1$	38
$=0.007\ 1\sim<0.007\ 5$	32
$=0.007\ 5\sim<0.008\ 0$	25
$=0.008\ 0\sim<0.008\ 5$	20
$=0.008\ 5\sim<0.010\ 0$	13
$=0.010\ 0$	7

5.4.2 试样制备

5.4.2.1 材料状态

试样应当从最终热处理状态和(或)机械加工状态下的材料上截取。

注 1: 当试样不能从其最终热处理状态下截取时,最终热处理可以在机械加工后满足了试样的尺寸、公差、形状和表面光洁度要求时,并充分考虑了由于特殊的热处理(例如钢的水淬)而带来的试样尺寸变化等影响后进行。

注 2: 残余应力可能影响准静态断裂韧度的测量。当试件从具有明显残余应力的区域截取时,影响是显著的。例如焊接件、形状复杂的型钢(如热模锻、阶段式挤压、铸造)等,它们不可能完全释放应力或有局部感应残余应力。从有残余应力的产品上截取的试样可能也有残余应力。在试样的截取过程中可能部分释放或重新分配残余应力,残余应力的存在仍然可能导致试验数据的重大偏差。残余应力叠加到外加应力上,作用于裂纹尖端应力场,明显不同于单纯的外加力或位移。试样机械加工中的变形,试样几何形状的依赖性及在预制疲劳裂纹过程中的不规则裂纹扩展(例如裂纹前缘过渡弯曲或偏离扩展平面)经常是受残余应力的影响所致。在外加力为零时的缺口张开位移(裂纹闭合效应)表征残余应力的存在,并可能影响随后的断裂韧度测定。

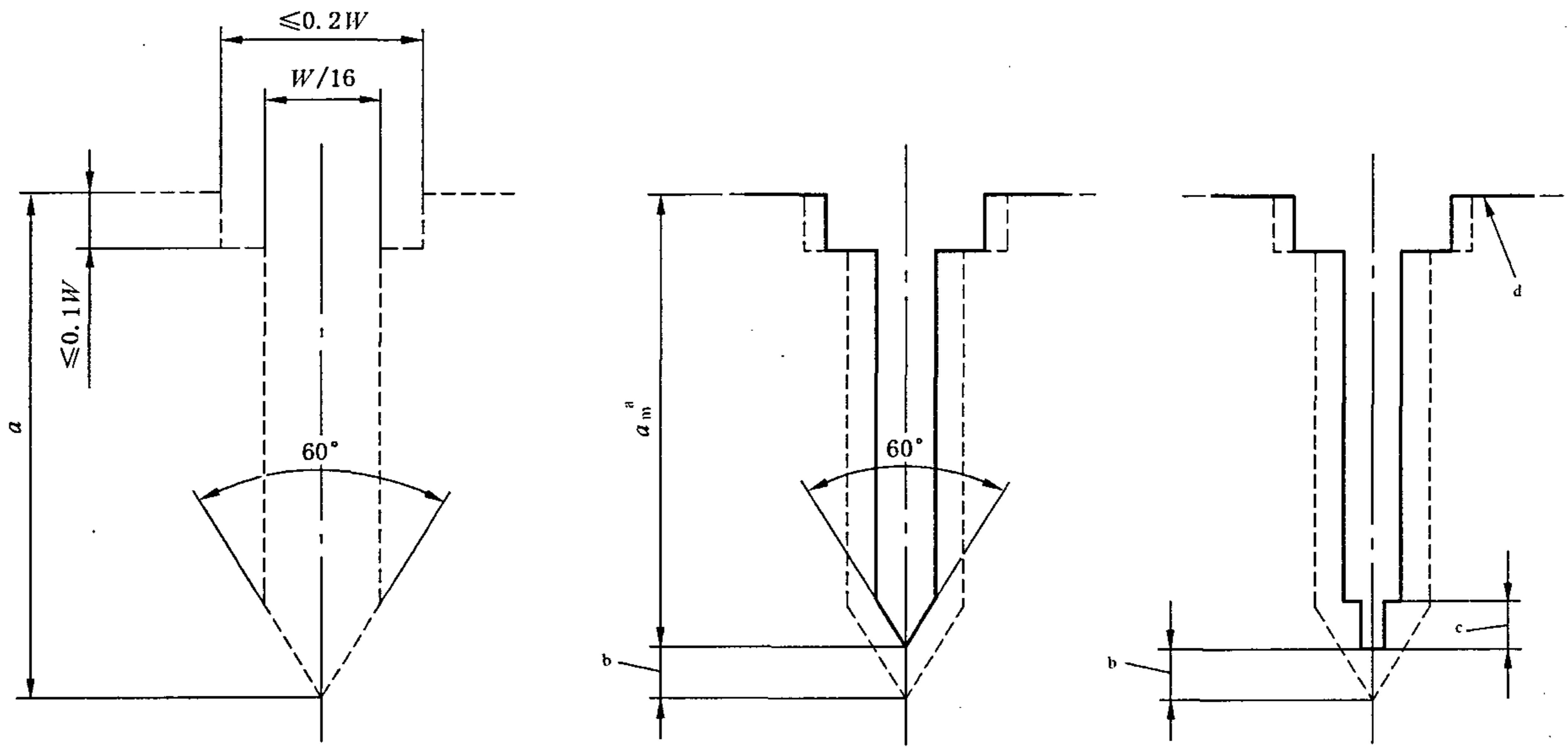
5.4.2.2 裂纹面取向

在机械加工之前确定裂纹平面取向,应与附录 A 和 ISO 3785 标识保持一致,同时要记录试样和材料的其他信息,如试验报告 E.1 示例:试样、材料和试验环境(见附录 E)。

注: 断裂韧度值与机械加工的主变形方向、各向异性(晶粒流变)、裂纹平面取向和裂纹扩展方向有关。

5.4.2.3 机械加工

a) 试样的缺口外形不应超过图 6 所示的包迹线。通过铣床加工的缺口底径不应大于 0.10 mm。通过锯、磨或火花腐蚀加工的缺口宽度不应大于 0.15 mm。试样缺口平面应垂直于试样表面,偏差在 2° 以内。



a) 包迹线

b) 缺口几何形状

注：如果疲劳裂纹萌生和(或)扩展很困难,可以使用图7的山形缺口。

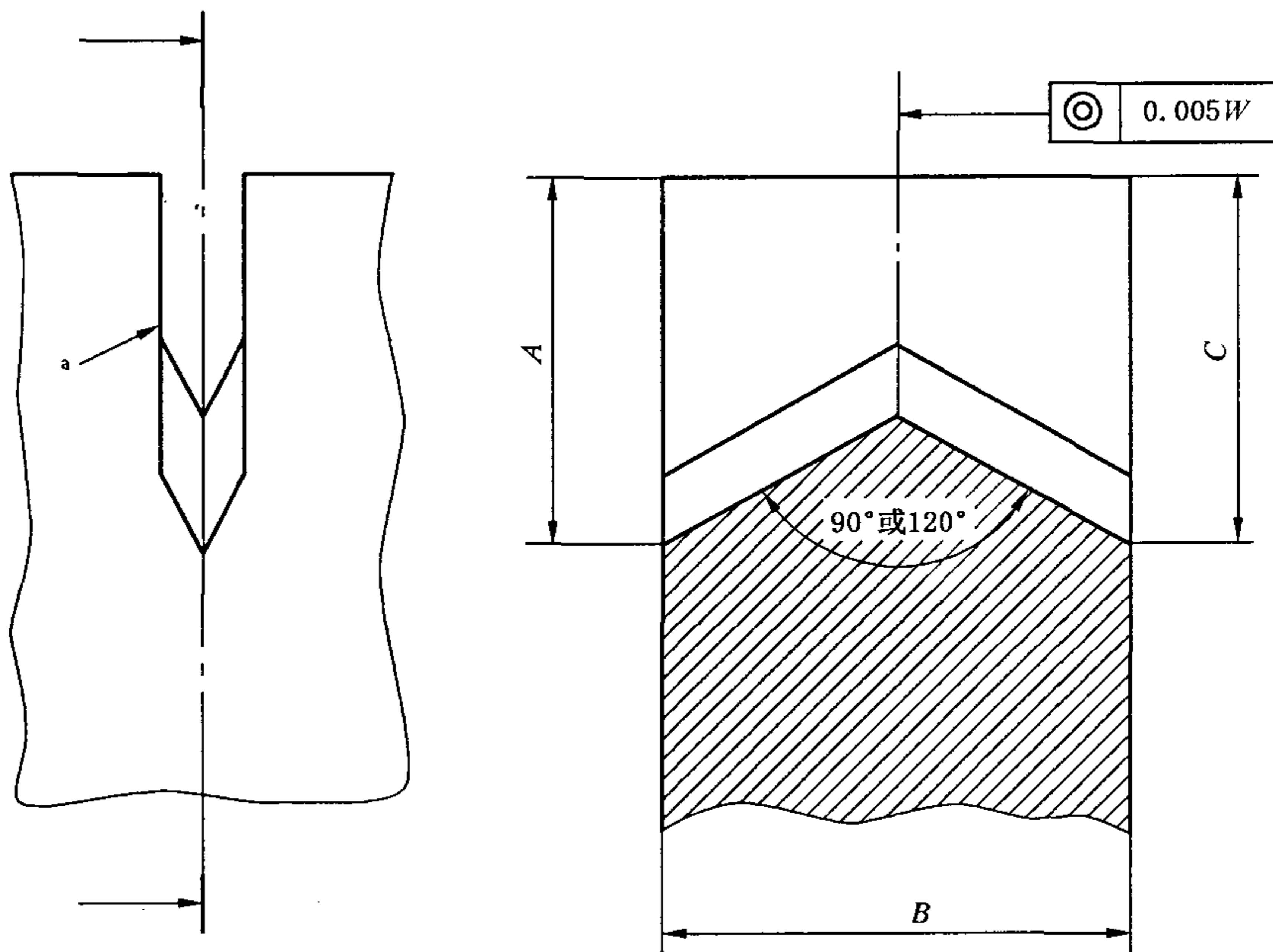
a 机械加工缺口。

b 疲劳预制裂纹。

c 火花腐蚀或机械加工的狭缝。

d 三点弯曲试样的边沿或紧凑拉伸试样的加力线。

图6 疲劳裂纹包迹和裂纹引发缺口



注1: $A=C\pm 0.010W$ 。

注2: 山形缺口底径不应大于0.25 mm。

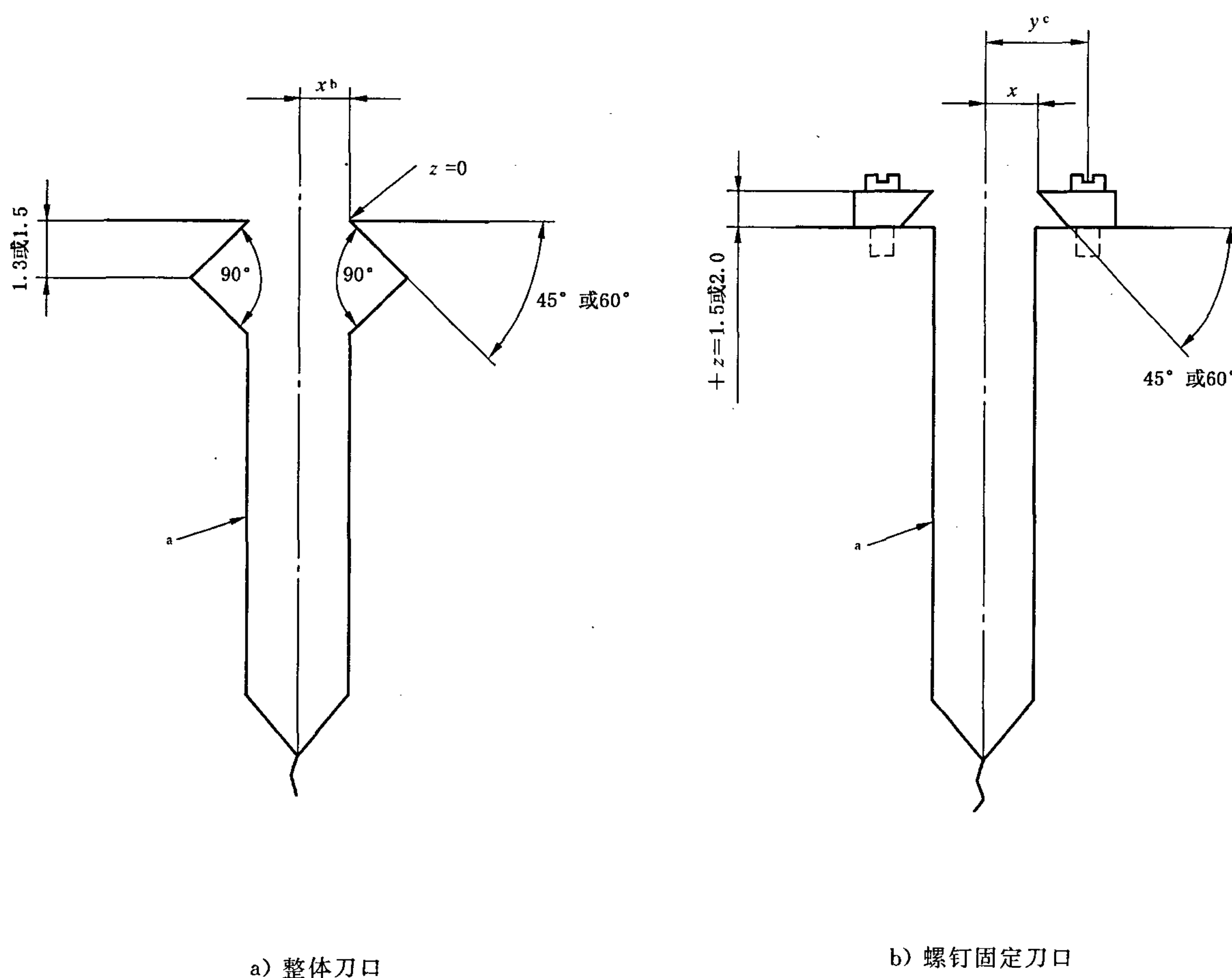
注3: 切口尖端的角度最大为 90° 。

注4: 为了8.2.2条的目的, a_m 应大于 A 和 C 。

^a 见图6。

图7 山形缺口

- b) 试样刀口可以是整体的,也可以是附加的。设计如图 8 和图 9 所示。图 8 和图 9 中的 $2x$ 尺寸应当在引伸计的工作范围以内,刀口边沿与试样表面成直角,并且应保持相互平行偏差在 0.5° 以内。对于两种类型图对应的引伸计,应保证引伸计与刀口接触点之间能自由转动。因此,当使用内置刀口或刚性很好的刀片时,应使用放大尺寸的缺口,参见图 5、图 6 和图 9 所示。也可以使用其他能满足试验精确度和测量要求的刀口或引伸计测量位移。当需要使用侧槽时(见 5.4.2.5),建议在预制疲劳裂纹之后再开侧槽。



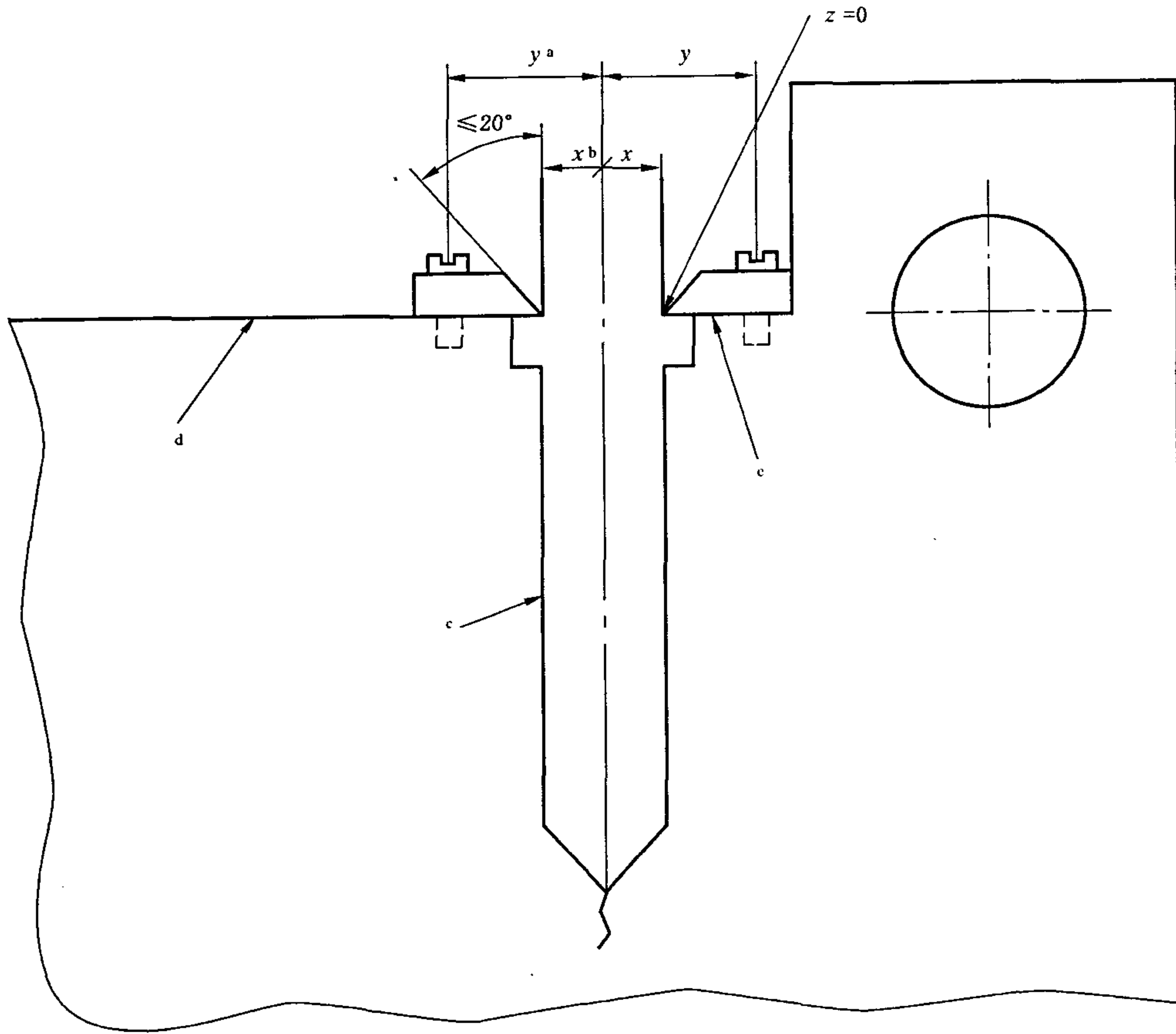
注: 如果刀口是通过胶粘或类似的方式固定在试样边沿, $2y$ = 刀口两外端点之间的距离。

a 见图 6。

b $2x$ 见 5.4.2.3 b)。

c $2y + \text{螺纹直径} = W/2$ 。

图 8 外置刀口和相应的缺口几何尺寸



注 1: 如果刀口是通过胶粘或类似的方式固定在试样边沿, $2y$ 为刀口两端点之间的距离。

注 2: 如果用刀片代替内置刀口, 那么通常在加力线上刀片厚度一半处测量位移(见 5.3.1)。

a $2y + \text{螺纹直径} = W/2$ 。

b $2x$ 见 5.4.2.3 b)。

c 见图 6 和图 7。

d 加载线。

e 台阶紧凑拉伸试样的加载线。

图 9 内置刀口和相应的缺口几何尺寸

5.4.2.4 疲劳预制裂纹

5.4.2.4.1 总则

疲劳预制裂纹应在试样最终热处理及机械加工后或特定环境条件下进行。疲劳预制裂纹后, 断裂试验前的中间处理仅在需要模拟特殊的结构应用时才是必要的。这一处理应在试验报告中注明。

在整个预制疲劳裂纹过程中最大疲劳裂纹预制力应准确至 $\pm 2.5\%$ 。

试样厚度 B 和宽度 W 应按照 5.5.1 测量并应记录, 根据 5.4.2.4.3 和 5.4.2.4.4 计算预制疲劳裂纹最大力。

疲劳过程中的最小力与最大力之比应该在 0 到 0.1 之间。

5.4.2.4.2 设备和装置

疲劳预制裂纹的装置应仔细地对中, 以保证施加的力在整个试样厚度上保持一致, 且相对于预期的

裂纹平面对称地分布。

5.4.2.4.3 三点弯曲试样

对于三点弯曲试样,在最后的 1.3 mm 或 50% 的预裂纹扩展量时的最大疲劳预制裂纹力应当取式(1)和式(2)的低值。

$$F_f = 0.8 \times \frac{B(W - a_0)^2}{S} \times R_{p0.2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{和 } F_f = \xi \times E \left[\frac{(W \times B \times B_N)^{0.5}}{g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right)} \right] \left(\frac{W}{S} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$$\xi = 1.6 \times 10^{-4} m^{1/2}$$

注 1: 对于无侧槽试样, $B_N = B$ 。

注 2: 附录 B 给出了 $g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ 值。

5.4.2.4.4 紧凑拉伸试样

对于紧凑拉伸试样,在最后的 1.3 mm 或 50% 的预裂纹扩展量时的最大疲劳预制裂纹力应当取式(3)和式(4)的低值。

$$F_f = \frac{0.6B(W - a_0)^2}{(2W + a_0)} \times R_{p0.2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{和 } F_f = \xi \times E \left[\frac{(W \times B \times B_N)^{0.5}}{g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right)} \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$$\xi = 1.6 \times 10^{-4} m^{1/2}$$

注 1: 对于无侧槽试样, $B_N = B$ 。

注 2: 附录 B 给出了 $g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ 值。

5.4.2.4.5 温度调整

当疲劳预制裂纹在温度 T_1 下进行,试验在温度 T_2 下进行。 F_f 应在式(2)或式(4)的基础上乘以修正因子 $(R_{p0.2})_1 / (R_{p0.2})_2$, 这里的 $(R_{p0.2})_1$ 和 $(R_{p0.2})_2$ 分别是温度 T_1 和 T_2 下的非比例延伸强度。应当取两温度下非比例延伸强度的低值代入式(1)或式(3)得到 F_f 。

5.4.2.5 试样侧面开槽

用于测定断裂韧性特征点(如 K_{IC} 、 δ_C 、 J_C)的试样可以是无侧槽试样或开侧槽试样。测定 R 曲线的全部试样都应当开侧槽。两侧槽应该深度相等,侧槽角度为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间(含 30° 、 90°),底部半径为 (0.4 ± 0.2) mm。侧槽深度 $(B - B_N)$ 应该为 $0.2B \pm 1\%$ 。

注 1: 考虑到全塑性稳定裂纹扩展,开侧槽试样与相同尺寸无侧槽试样相比, R 曲线要低要平。

注 2: 对于一些材料,为了协助预制疲劳裂纹,允许在开始预制疲劳裂纹之前开一个浅侧槽(低于全尺寸的 5%)。

预制完疲劳裂纹,再将浅侧槽开到全深度尺寸。

注 3: 推荐奥氏体钢的侧槽角度为 90° ,因为在试样背面产生的较大位移,可能导致侧槽部分或完全闭合。

5.5 预试验的要求

5.5.1 预试验的测量

试样尺寸应符合图 3 至图 5 的要求。测量厚度 B 、 B_N 和 W 应精确至 ± 0.02 mm 或 $\pm 0.2\%$,取其中较大值。

试样厚度的测量,应在试验前,沿着预期的裂纹扩展路径,至少在三个等间距位置处测量,取测量平均值为厚度 B 。对于带侧槽试样,试样净厚度应沿裂纹扩展路径在侧槽内至少三个等间距位置测量,取测量平均值为净厚度 B_N 。

试样宽度的测量应沿厚度方向(裂纹平面)至少三个等间距位置测量。测量的平均值为宽度 W 。当使用直通型缺口紧凑拉伸试样时,应当测量试样前端与试样末端之间的距离(例如 $1.25W$)。

当使用图 8b)所示的附加刀口时,应当测量刀口厚度 Z 。如果使用刀片之类的刀口,应取一半厚度作为 Z 。如果 Z 小于 $0.002a$ 时,可以忽略不计。

注:当使用图 8a)和图 9 所示的整体或附加刀口时, Z 等于 0。

5.5.2 裂纹形状与长度要求

从试样的机械加工缺口根部形成疲劳裂纹的过程如下。对于所有形状的试样(见图 3~图 5), a_0/W 应为 $0.45\sim 0.7$ 之间。最小的预制疲劳裂纹扩展量应大于 1.3 mm 或 $2.5\%W$,取其中较大者。缺口加上疲劳裂纹应当在图 6 所示的包迹线之内。

5.6 试验装置

5.6.1 校准

所有测量装置的检定应当直接或间接溯源到有证校准试验室。

5.6.2 力的施加

力传感器和记录装置应符合 GB/T 16825—1997 的要求。

试验机应在恒定的位移速率下操作。

试验机的标称测量能力应该超过 $1.2F_L$:

对于三点弯曲试样

$$F_L = \left(\frac{4}{3}\right) \frac{B(W - a_0)^2}{S} \times R_m \quad \dots\dots\dots(5)$$

对于紧凑拉伸试样

$$F_L = \frac{B(W - a_0)^2}{(2W - a_0)} \times R_m \quad \dots\dots\dots(6)$$

5.6.3 位移的测量

引伸计应当有表征缺口张开位移 V (裂纹嘴间相对位移)的电信号输出。引伸计(或适当的位移传感器)的设计应保证引伸计与刀口接触点之间能自由转动。

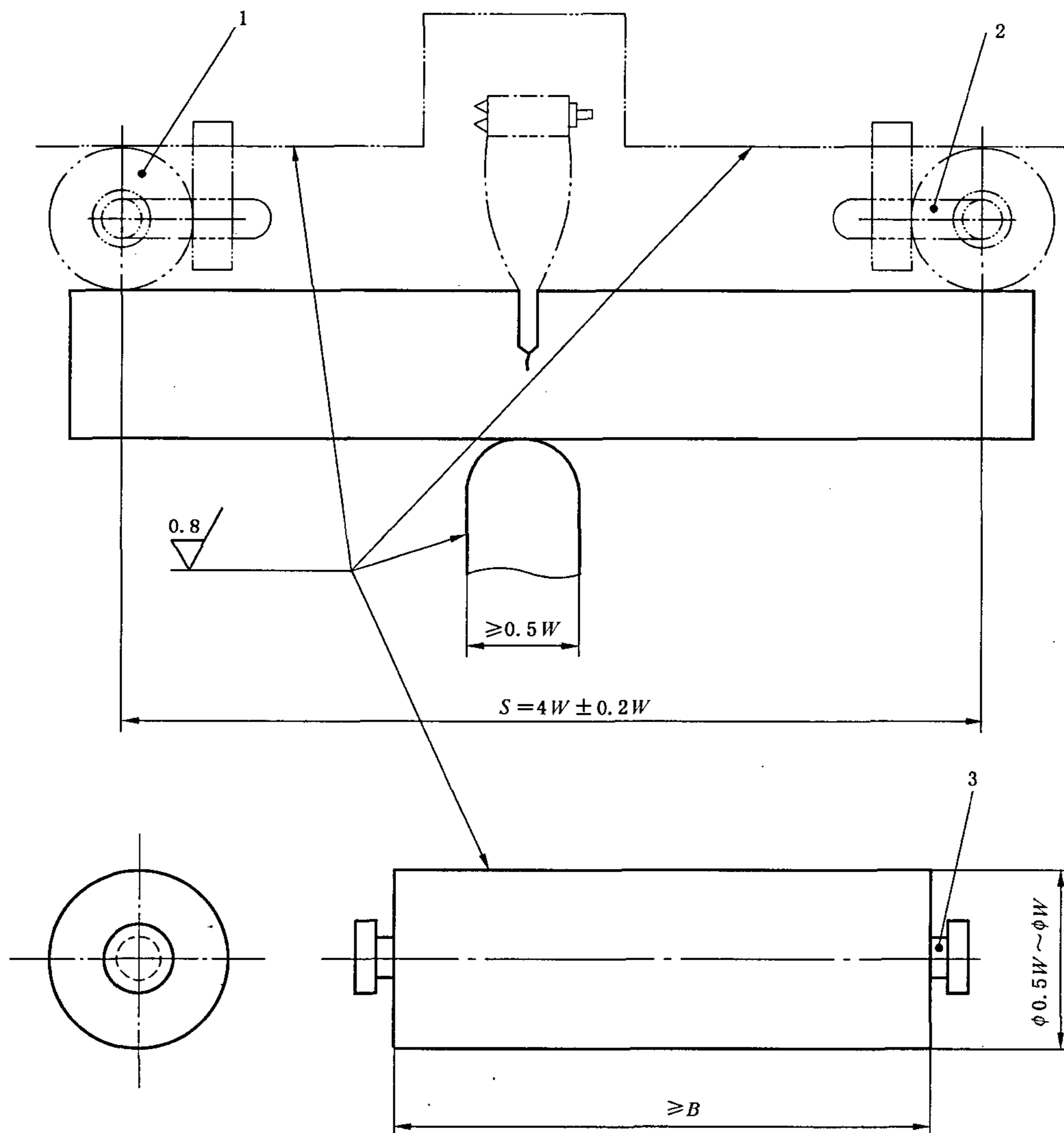
注:附录 F 描述了施力点位移 q 的测量(见 5.7.1.3)。

用于测定缺口张开位移和施力点位移的引伸计应按照 GB/T 12160—2002 进行校准,并应至少达到一级;在用的引伸计,至少每周进行一次校验。

引伸计的校准应在试验温度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围之内进行。引伸计的响应应当在位移达到 0.3 mm 时准确到 $\pm 0.003\text{ mm}$,而之后的准确度达到 $\pm 1\%$ 。

5.6.4 试验装置

三点弯曲试样使用的加载装置,在加载过程中允许支承辊自由向外移动(见图 10),并保持整个试验过程中辊的接触,以减少摩擦力的影响。辊的直径应为 $W/2\sim W$ 之间。加载装置受力面的硬度应大于 $40\text{HRC}(400\text{HV})$ 或试样硬度,取其大者。



支承辊尺寸

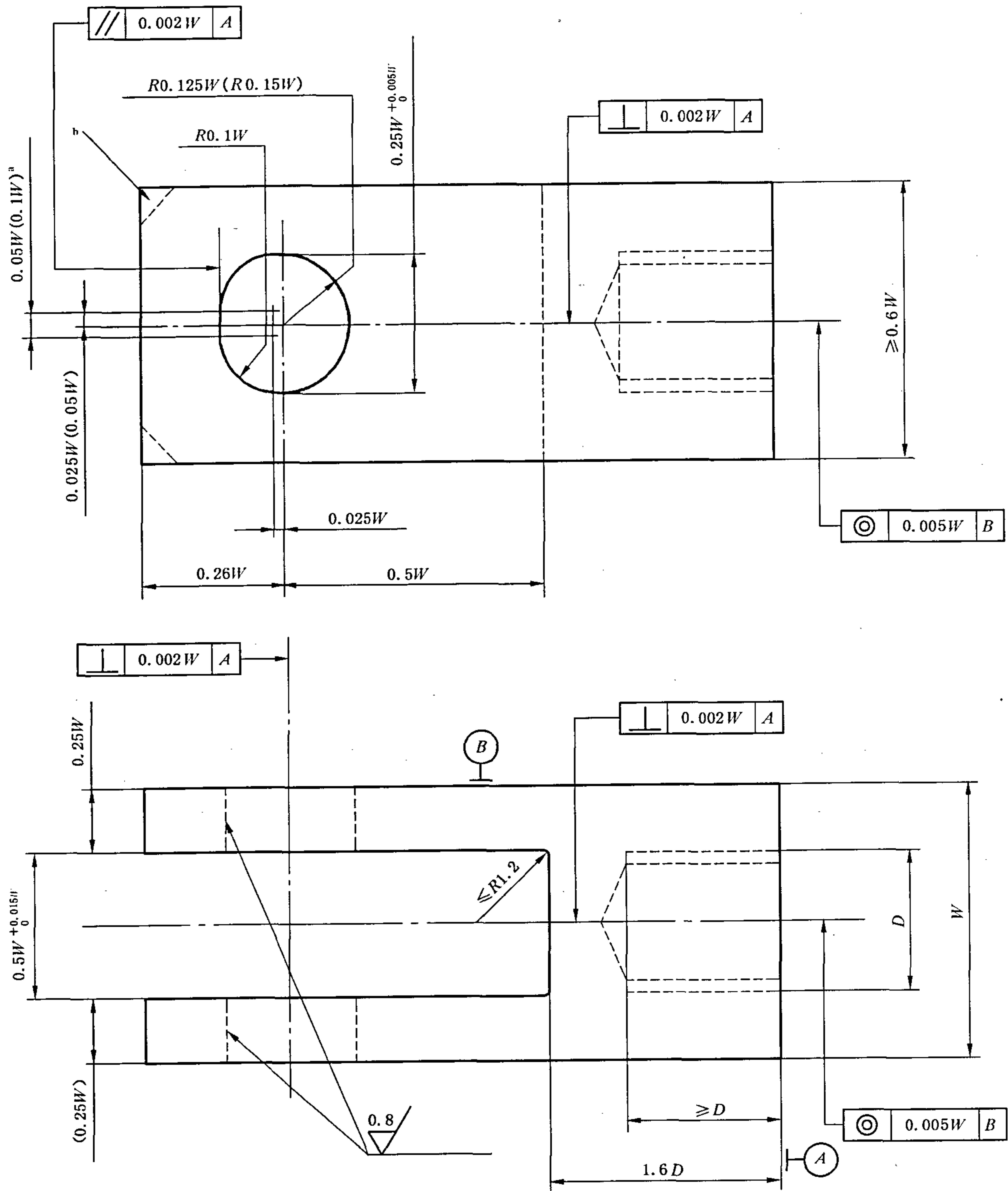
- 1——辊；
 2——橡皮筋或弹簧；
 3——固定橡皮筋或弹簧的箍。

注 1：两辊及上压头与试样的接触面应互相平行，且平行度达到 $\pm 0.002W$ 。

注 2：试验装置和辊的硬度不小于 40HRC 或试样硬度，取其大者。

图 10 三点弯曲试验装置

紧凑拉伸试样加载时使用的 U 型钩和加载销应尽量减少摩擦。试样在受拉力作用时，试验装置应保证同轴。用于测定阻力曲线的 U 型钩的销孔应是平底的(见图 11)以保证加载销在整个加载过程能自由转动。圆底销孔的 U 型钩(见图 12)不允许用于单试样法(卸载柔度)的试验。



注 1: 加载销的直径 = $0.24W -_{0.005W}^0$ 。

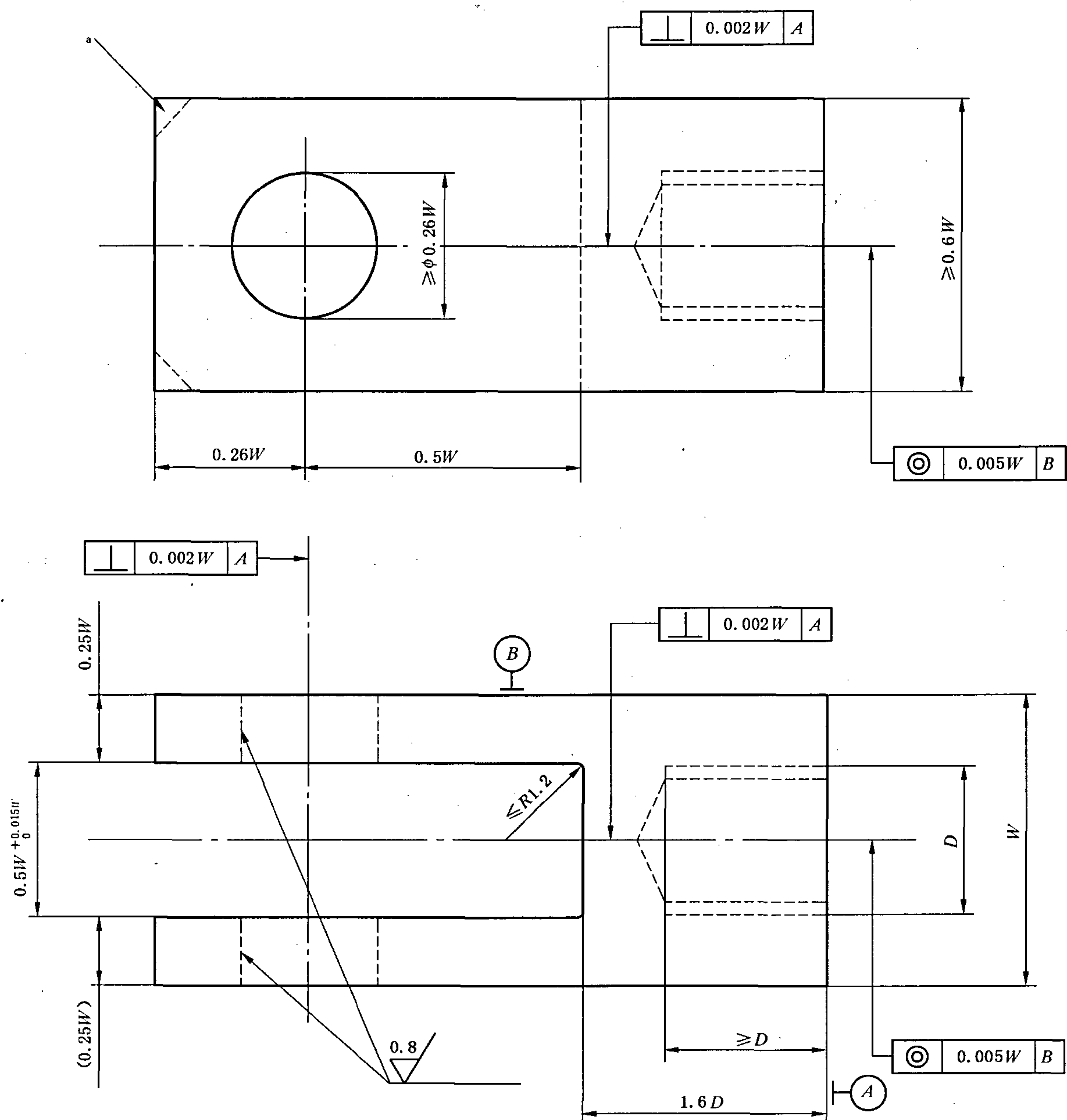
注 2: U 型钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度, 取其大者。

注 3: 对于大位移量的试样, U 型钩销孔的直径应放大到括号内的尺寸。

a 加载平面。

b 为便于安装引伸计可以将 U 型钩的角去掉。

图 11 用于紧凑拉伸试样的平底加载销孔 U 型钩的典型设计



注 1: 加载销的直径 $= 0.24W_{-0.005W}^0$ 。

注 2: U 型钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度, 取其大者。

^a 为便于安装引伸计可以将 U 型钩的角去掉。

图 12 用于紧凑拉伸试样的圆底加载销孔 U 型钩的典型设计

5.7 试验要求

5.7.1 三点弯曲试验

5.7.1.1 试验装置的同轴度

加载装置应同轴, 加载线应与两辊中心的间距相等, 且距离之差小于两辊间距的 1%。跨距 S 应当是 $4W \pm 1\%$ 。两辊的轴线保持相互平行, 且偏差在 $\pm 1^\circ$ 以内。试样的放置位置, 应使裂纹顶端位于两辊正中, 准确到 $\pm 1\%S$, 同时试样应与支承辊垂直, 偏差在 $\pm 2^\circ$ 以内。

5.7.1.2 裂纹尖端张开位移

裂纹尖端张开位移 δ 是由缺口张开位移 V 计算得到的。

5.7.1.3 加载线位移

加载线位移 q 用于测定 J 值。

注：附录 F 描述了直接或间接测量加载线位移的方法。

5.7.2 紧凑拉伸试验

5.7.2.1 试样和装置的同轴度

加载 U 型钩的同轴度应达到 0.25 mm, 试样应位于加载销的中心, 偏差在 0.75 mm 以内。

5.7.2.2 裂纹尖端张开位移

裂纹尖端张开位移 δ 是由缺口张开位移 V 计算得到。缺口张开位移 V 通过测量台阶型紧凑拉伸试样加载线的位移、直通型缺口紧凑试样距离加载线 ($Z+0.25W$) 前端处的位移或直通型缺口三点弯曲试样上距离为 (Z) 前端处的位移得到。

5.7.2.3 加载线位移

参数 J 是通过计算加载线位移 q 得到的。对于采用整体或内置刀口 (分别见图 8 和图 9) 的台阶型缺口紧凑拉伸试样 (见图 5), 引伸计应正确安装到位于试样加载线的刀口上。

注：对于直通型缺口 (非台阶缺口) 紧凑拉伸试样不允许直接测量加载线的位移 q 。如果能够证明导出的 q 相当于直接测量的 q , 允许通过 V 计算得到 q 。

5.7.3 试验温度

在环境温度试验条件下, 试验温度应控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$, 并作记录。为此, 应在距离裂纹尖端 5 mm 以内的区域用热电偶或铂电阻温度计与试样表面接触进行测量。试验应在适当的低温或高温介质下进行。冷却介质为液体时, 当试样表面温度达到试验温度, 每 mm 厚度浸泡时间至少为 30 s。冷却介质为气体时, 每 mm 厚度保温时间至少为 60 s。在试验温度下的浸泡时间最少为 15 min。试样温度应保持在试验温度的 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内, 并应按照第八章的要求进行记录。

5.7.4 记录

应该记录力和相关的位移。对于记录仪记录方式, 应调整记录仪的放大比, 使力-位移曲线的初始斜率在 0.85~1.15 之间。

注：在记录的开始阶段经常有非线性的情况发生。建议采用对试样加载至不超过最大预制疲劳裂纹的力再卸载的方法来减小非线性情况发生的可能性。

5.7.5 试验速率

试验应该在缺口张开位移、施力点位移或横梁位移的控制条件下进行。施力点位移速率应该保证在线弹性区, 应力强度因子速率在 $0.2 \text{ MPam}^{1/2} \text{ s}^{-1} \sim 3 \text{ MPam}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ 之间。对于同一组试验, 所有试样都应在同一标称速率下加载。

5.7.6 试验分析

第 6 章给出了断裂韧性特征点的分析, 第 7 章给出了阻力曲线的测定 (见图 1)。

5.8 试验后的裂纹测量

5.8.1 总则

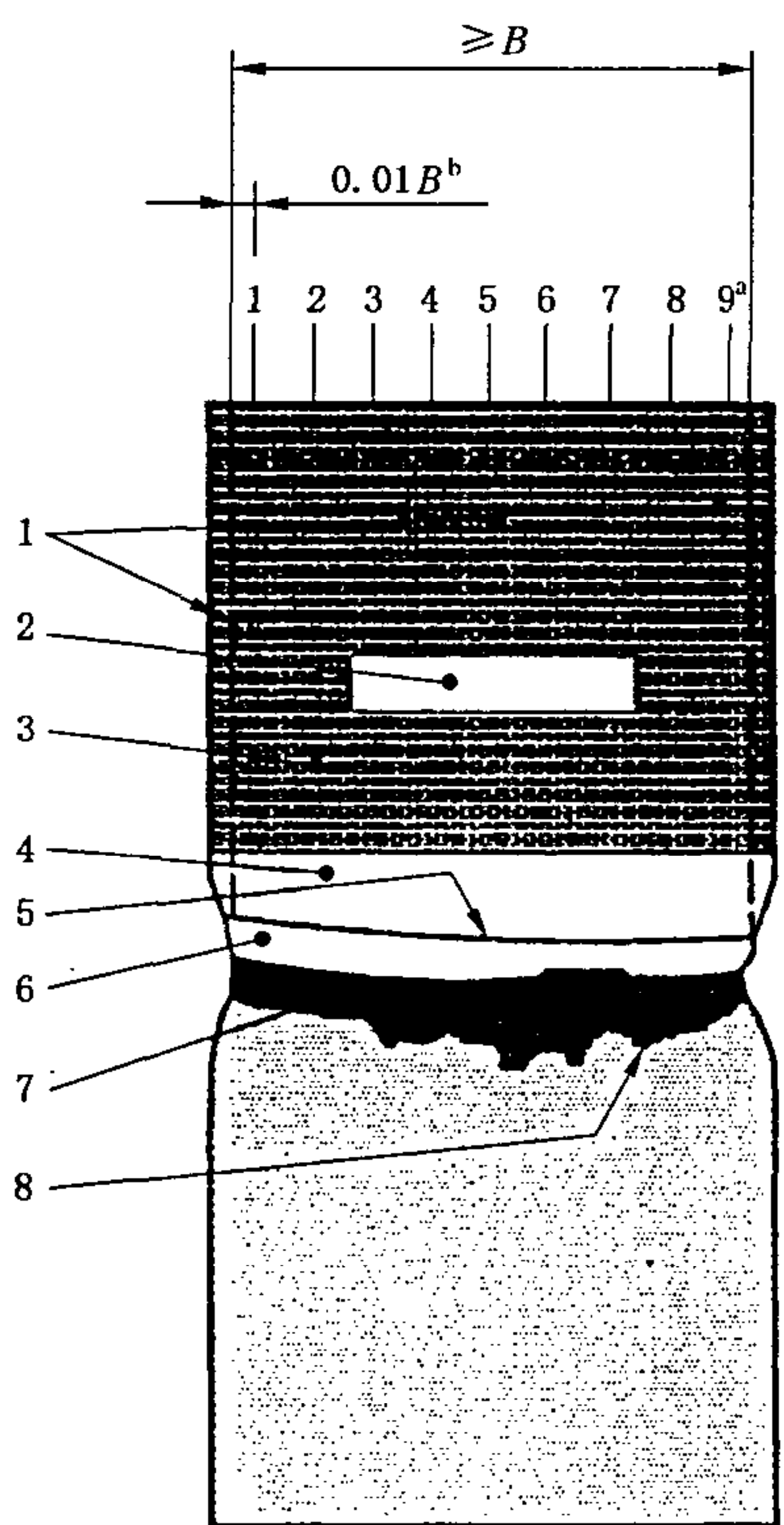
试样在试验后应被打断, 进行断口检查测定原始裂纹长度 a_0 及在试验过程中发生的稳定裂纹扩展量 Δa 。

注：对于某些试验, 有必要在试样打断之前标记出稳定裂纹扩展的范围。稳定裂纹扩展量可以通过着色或试验后二次疲劳的方法标记。注意尽量减小试验后试样的变形。对于铁素体钢通过冷却脆化的方法有助于试样打断时试样变形的减小。

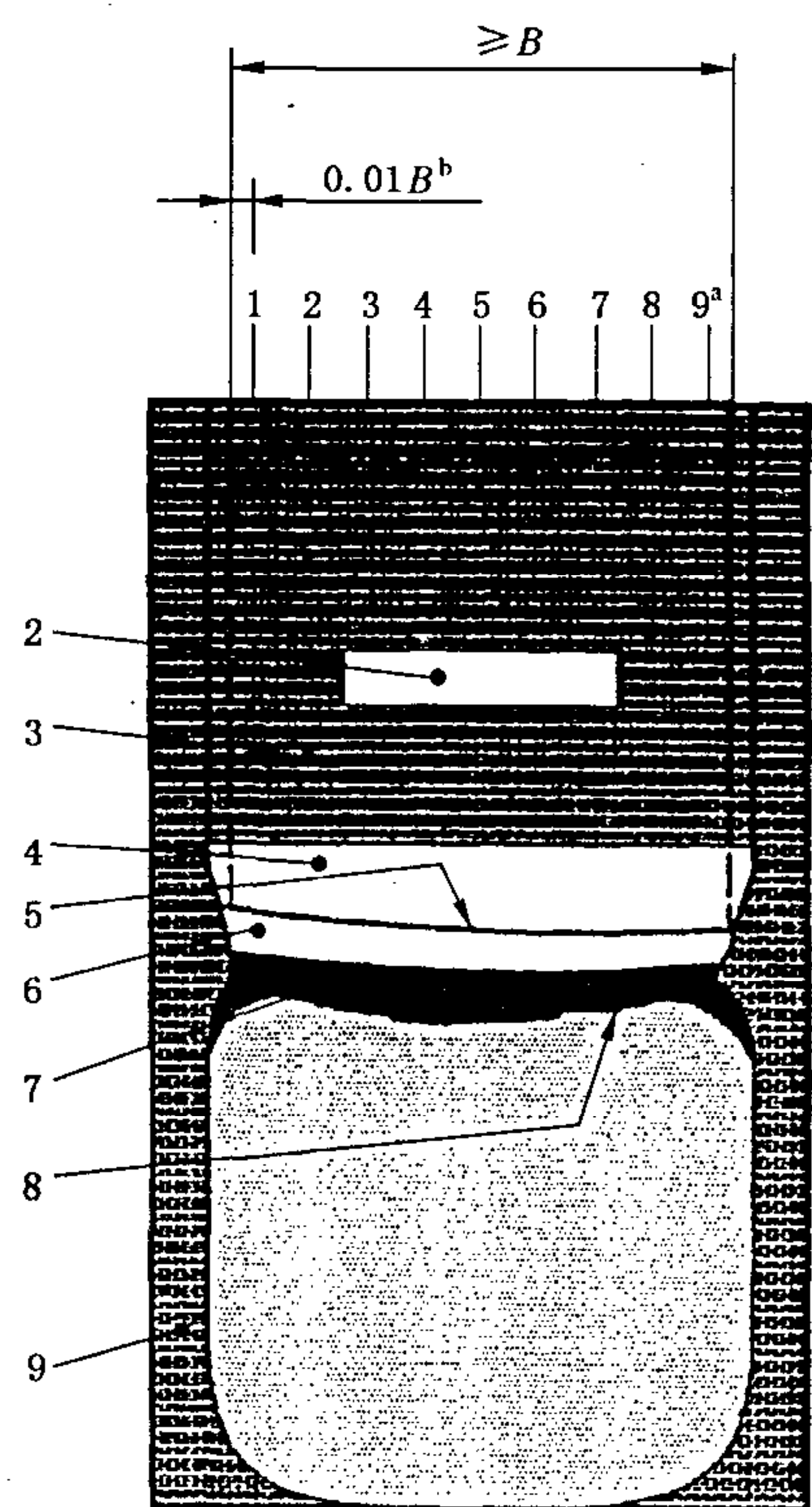
5.8.2 初始裂纹长度 a_0

测量初始裂纹长度 a_0 时,应该测量到疲劳裂纹的尖端,测量仪器的准确度应不低于 $\pm 0.1\%$ 或 0.025 mm ,取其大者。图 13 和图 14 显示了九点测量位置。 a_0 值是通过先对距离两侧表面 $0.01B$ 位置(对于开侧槽试样,从侧槽根部算)取平均值,再和内部等间距的七点测量长度取平均值得到的。

$$a_0 = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_1 + a_9}{2} \right) + \sum_{j=2}^8 a_j \right] \dots\dots\dots (7)$$



$$a = \frac{1}{8} \left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right)$$



a) 普通试样

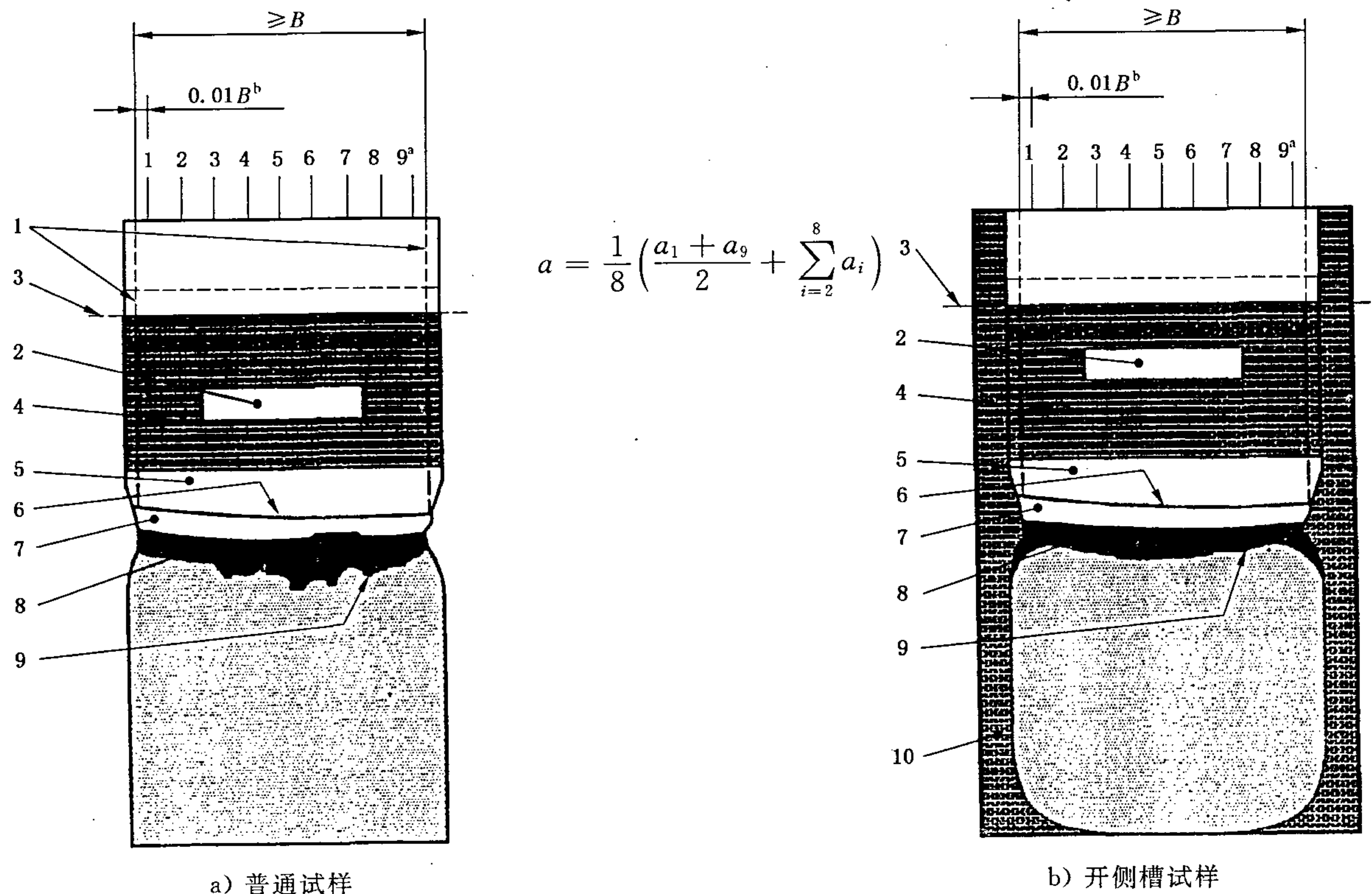
b) 开侧槽试样

- 1——参考线;
- 2——裂纹平面区域;
- 3——机械加工缺口;
- 4——疲劳预制裂纹;
- 5——初始裂纹前缘;
- 6——伸张区;
- 7——裂纹扩展区;
- 8——最终裂纹前缘;
- 9——侧槽。

^a 在 1 到 9 的位置测量初始和最终裂纹长度。

^b 未按比例。

图 13 三点弯曲试样裂纹长度的测量



a) 普通试样

b) 开侧槽试样

- 1——参考线；
- 2——裂纹平面区域；
- 3——销孔的中心线；
- 4——机械加工缺口；
- 5——疲劳预制裂纹；
- 6——初始裂纹前缘；
- 7——伸张区；
- 8——裂纹扩展区；
- 9——最终裂纹前缘；
- 10——侧槽。

^a 在 1 到 9 的位置测量初始和最终裂纹长度。

^b 未按比例。

图 14 紧拉试样裂纹长度的测量

初始裂纹长度应满足下列要求：

- a) a_0/W 应当在 0.45~0.70 之间；
- b) 试样中心七点任一点的裂纹长度与九点平均值之差不应超过 $0.1a_0$ ；
- c) 预制裂纹长度应超过 1.3 mm 或 $2.5\%W$ 中的大者；
- d) 疲劳预制裂纹应在图 6 所示的包迹线之内。

如果上述要求不能满足，那么初始裂纹长度就不满足本方法的要求，在试验结果中应明确注明。

5.8.3 稳定裂纹扩展 Δa

裂纹扩展量(包括任何的裂纹尖端钝化) Δa ，应借助测量准确度 ± 0.025 mm 的仪器按照 5.8.2 描述的九点平均值方法测量初始和终止裂纹长度。诸如星状和孤立的岛状等不规则形状的裂纹扩展，应当按照第 8 章的要求在报告中注明。

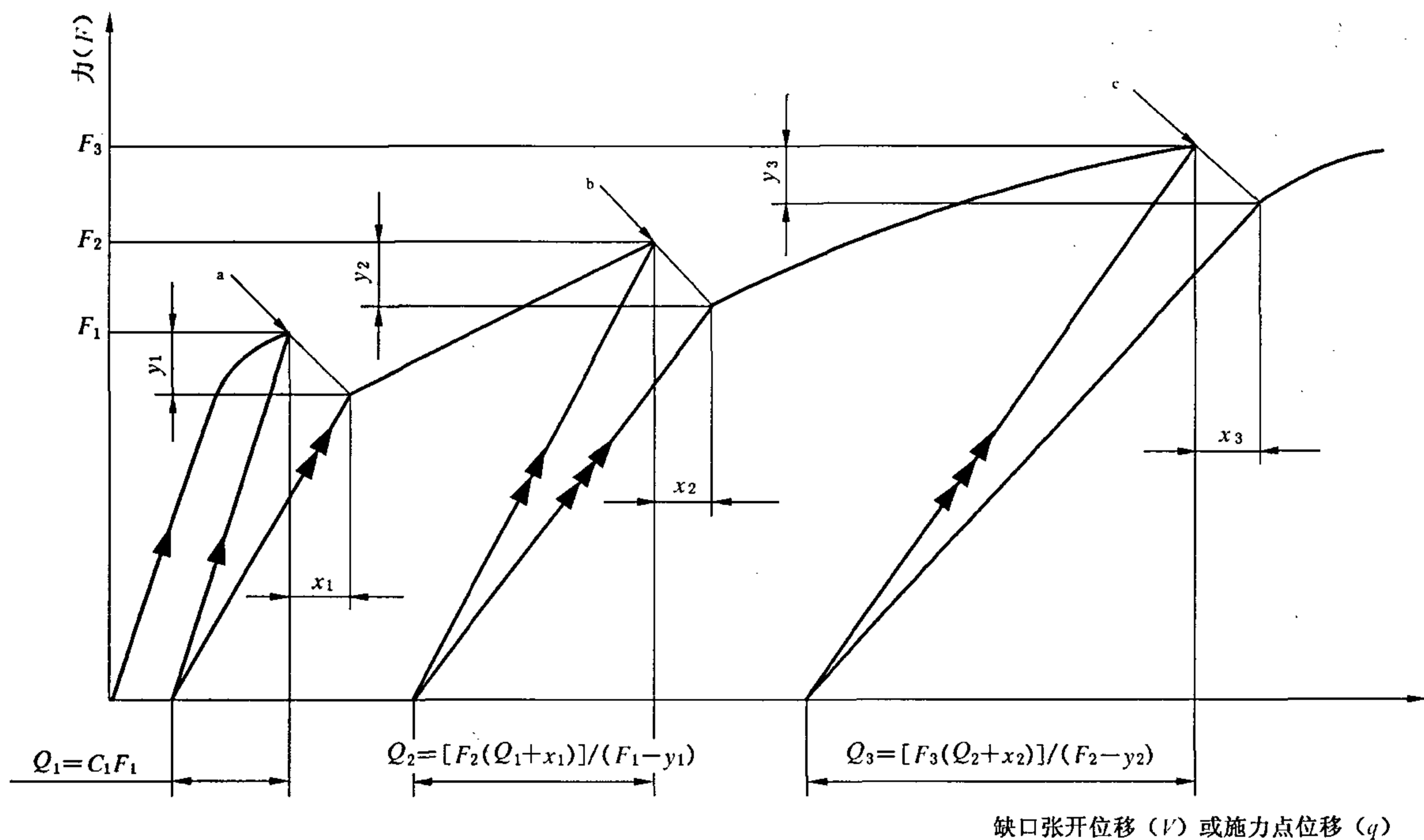
注：忽略星状扩展区域或主观地平均裂纹扩展区域对于估算不规则裂纹长度是唯一可行的办法。由高度不规则裂纹得到的试验结果应反复斟酌。在试验报告中注明裂纹的不规则性和提供附加的照片都是很有用的。

所有的试验前和试验后的测量都应记录并按照第 6 章和第 7 章进行计算。

5.8.4 非稳定裂纹扩展

当有证据表明不稳定裂纹的止裂和 pop-in 特性(见图 15)有联系时,在每一个 pop-in 之前的整个扩展量 Δa 都应按照 5.8.3 进行记录。

注: Δa 量包括全部的疲劳预制裂纹前的稳定裂纹扩展和特定的 pop-in 发生之前的与 pop-in 相关的或断裂事件记录的稳定裂纹扩展的总和。



注 1: C 是初始柔度。

注 2: Q_1 代表 V 或 q 。

注 3: 为了清晰将 pop-in 夸张。

a pop-in 1。

b pop-in 2。

c pop-in 3。

图 15 pop-in 特性的估计

6 稳定和非稳定裂纹扩展下的断裂韧度测定

6.1 总则

本条款描述了对应于图 1 左半部分的断裂韧度(单点)特征值的测定,图 2 显示了力-位移特性。

断裂韧度值考虑下列两种情况:

a) 非尺寸敏感性,相应的符号 K_{IC} 、 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$;

b) 尺寸敏感性,相应的符号 $\delta_{C(b)}$ 、 $\delta_{0.2BL(b)}$ 、 $\delta_{u(b)}$ 、 $\delta_{uc(b)}$ 、 $\delta_{m(b)}$ 、 $J_{C(b)}$ 、 $J_{0.2BL(b)}$ 、 $J_{u(b)}$ 、 $J_{uc(b)}$ 和 $J_{m(b)}$,其中 b 代表试样厚度。

试验记录的不连续性包括力的突然下降和相应的位移增加,如果变化量小于 1%,可以忽略。其他的突然不连续性可以用 pop-in 现象来解释。产生 pop-in 的原因应该进行研究和记录。当 pop-in 与预裂纹平面的非稳定裂纹扩展无关时,利用 pop-in 点来测定的断裂韧度是不合适的。当某一 pop-in 与预裂纹平面的非稳定裂纹扩展有关或者可以排除其他产生 pop-in 的原因时,按照下述条款进行评估 pop-in:

- a) 按照 6.2 测定 K_{IC} ;
- b) 分别按照 6.3 和 6.4 测定 δ 和 J 韧度值。

6.2 平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测定

6.2.1 总则

试验记录应按照 6.2.2 进行解释,按照 6.2.3 计算得到条件值 K_Q 。试样尺寸的检查应与 6.2.4 一致, $R_{p0.2}$ 应为试验温度下试样的非比例延伸强度。

6.2.2 试验记录 F_Q 的解释

如图 16 所示,从原点作直线 OF_d ,该直线的斜率比记录曲线的线性部分 OA 的斜率低 $\Delta F/F$ 倍。

$\Delta F/F$ 的值应满足下述要求:

a) 对于三点弯曲试样的力 F 与缺口张开位移 V 曲线: $\Delta F/F=0.05$ (8)

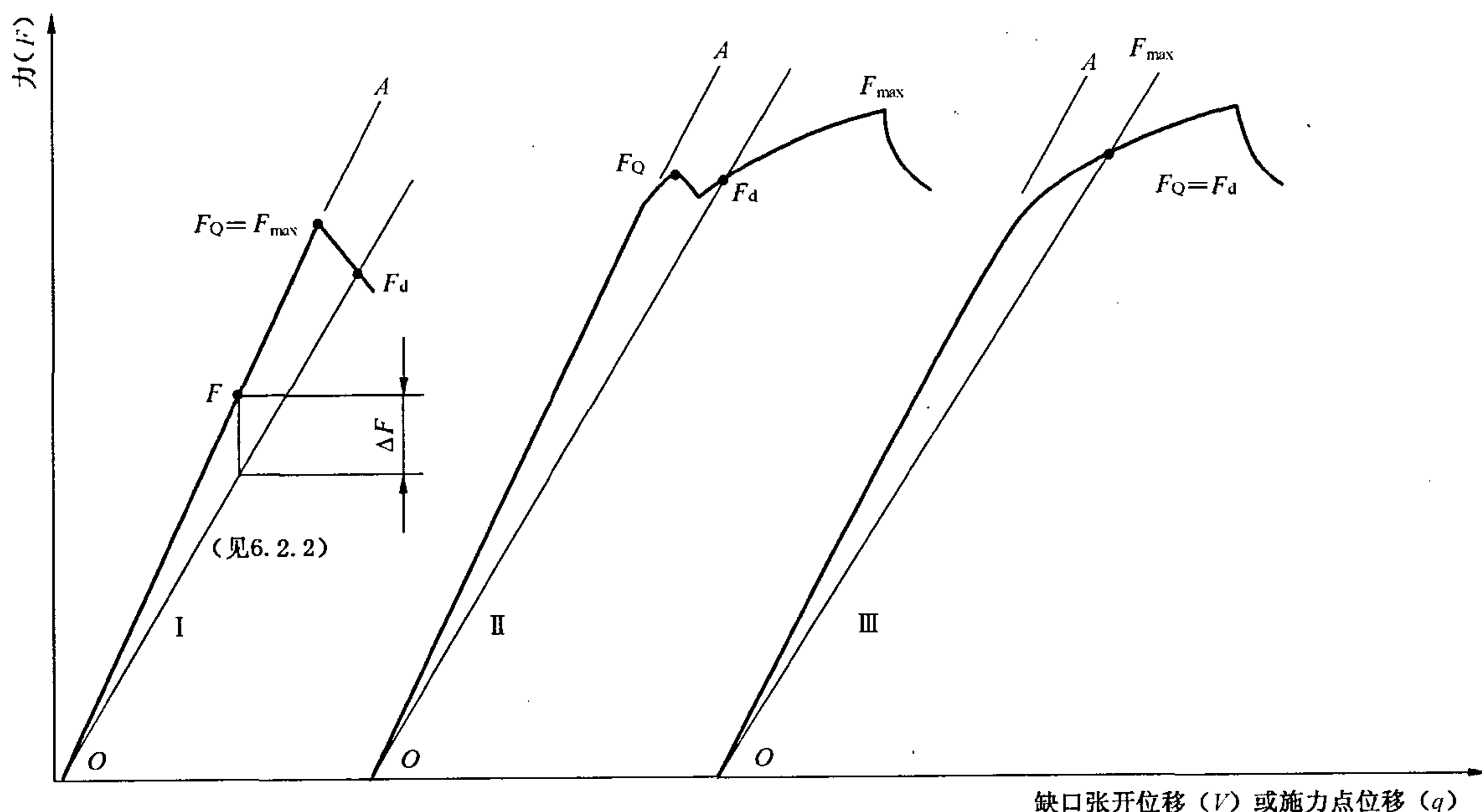
b) 对于三点弯曲试样的力 F 与施力点位移 q 曲线: $\Delta F/F=0.04$ (9)

注:对三点弯曲试样, V 和 q 都做记录时,仅需解释 $F-V$ 记录。

c) 对于紧凑拉伸试样,力 F 与缺口张开位移 V 及力 F 与施力点位移 q 曲线: $\Delta F/F=0.05$... (10)

图 16 中的 I 型和 II 型曲线 F_d 之前的最大力是 F_Q ,图 16 中的 III 型曲线 $F_d=F_Q$ 。

记录试样所能承受的最大力 F_{max} (见图 16),并计算 F_{max}/F_Q 。如果比值超过 1.1,则 K_Q 不等于 K_{IC} ,应按 6.3 和 6.4 进行解释。如果比值小于 1.1, K_Q 应按 6.2.3 直接进行计算。



注:为了清晰将 $\Delta F/F$ 的斜率夸张了。

图 16 F_Q 的定义(用于测定 K_Q)

6.2.3 K_Q 的计算

K_Q 值用按照 5.5.1、5.8.2、6.2.2 测定的 B 、 B_N 、 W 、 a_0 、 F_Q 来计算。

三点弯曲试样 K_Q 的计算公式如下:

$$K_Q = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F_Q}{(BB_N W)^{0.5}} \right] \left[g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right] \dots\dots\dots (11)$$

式中 S 是按 5.7.1.1 条定义的跨距(见图 10)。

注 1:对于无侧槽试样, $B_N=B$ 。

注 2:附录 B 给出了 $g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ 的关系。

注 3:应注意根据式(11)计算 K_Q 的单位。如果 B 和 W 用 m 为单位, F 用 MN 为单位,那么 K_Q 的单位就应是

MPam^{1/2}。如果 B 和 W 用 mm 为单位, F 用 kN 为单位, 那么为了保证 K_Q 的单位还是 MPam^{1/2} 就应在式右边乘以 $10^{3/2}$ 。

紧凑拉伸试样 K_Q 的计算公式如下:

$$K_Q = \left[\frac{F_Q}{(BB_N W)^{0.5}} \right] \left[g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right] \dots\dots\dots (12)$$

注 1: 对无侧槽试样, $B_N = B$ 。

注 2: 附录 B 给出了 $g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ 的关系。

注 3: 应注意根据式(12)计算 K_Q 的单位。如果 B 和 W 用 m 为单位, F 用 MN 为单位, 那么 K_Q 的单位就应是 MPam^{1/2}。如果 B 和 W 用 mm 为单位, F 用 kN 为单位, 那么为了保证 K_Q 的单位还是 MPam^{1/2} 就应在式右边乘以 $10^{3/2}$ 。

6.2.4 K_{IC} 的有效性判定

如果满足本标准下列两个条件的要求, K_Q 就是 K_{IC} 。

$$a_0 = 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2 \text{ 且 } B = 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right) \text{ 且 } (W - a_0) = 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2 \dots\dots\dots (13)$$

注: 必须注意式(13)使用的单位。 K_Q 必须用 MPam^{1/2} 为单位; $R_{p0.2}$ 用 MPa 为单位; a_0 、 B 、 $(W - a_0)$ 用 m 为单位, 并且

$$K_I = 0.6 K_Q \left[\frac{(R_{p0.2})_p}{(R_{p0.2})_t} \right] \dots\dots\dots (14)$$

$(R_{p0.2})_p$ 和 $(R_{p0.2})_t$ 分别是预裂纹和试验温度下偏置 0.2% 对应的非比例延伸强度。

如果不能满足式(13)和式(14)的要求及本方法的其他要求, 结果就不是有效的 K_{IC} , 并应根据 6.3 或 6.4 对可能的 δ 或 J 值进行计算。

6.3 断裂韧性 δ_0 的测定

6.3.1 F_c 和 V_c 、 F_u 和 V_u 或 F_{uc} 和 V_{uc} 的测定

常见的 F - V 记录曲线类型(1)~(5)(见图 2):

- 在图 2 的(1)、(2)和(4)型的情况下, 取断裂点的值为 F_c 、 F_u 或 F_{uc} ;
- 在图 2 的(3)、(5)型和图 15(见附录 F)的情况下, 并且

$$P = \frac{\Delta F}{F} \dots\dots\dots (15a)$$

则取断裂点之前的第一个 pop-in 值为 F_c 、 F_u 或 F_{uc} 。

- 当 pop-ins 发生在断裂之前, 并且

$$P < \frac{\Delta F}{F} \dots\dots\dots (15b)$$

取断裂点的值为 F_c 、 F_u 或 F_{uc} 。

式(15a)和式(15b)中的 P 按式(16)计算(见附录 G):

$$P = 1 - \frac{Q_1}{F_1} \left(\frac{F_n - y_n}{Q_n + x_n} \right) \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$\frac{\Delta F}{F}$ ——根据式(8)~(10)得到的计算值, 对三点弯曲或紧凑拉伸试样均适用;

P ——裂纹尺寸的增加和所有 pop-in 包括第 n 级 pop-in 柔度叠加的因子;

Q_1 ——pop-in 1 处的弹性位移(见图 15);

F_n ——第 n 级 pop-in 处的力;

Q_n ——第 n 级 pop-in 处的弹性位移量;

y_n ——第 n 级 pop-in 处的力下降;

x_n ——第 n 级 pop-in 处的位移增量;

n ——被考虑的最后一步 pop-in 的系列号(见图 15)。

注 1: 当只有一个 pop-in 发生时, $n=1$ 。当有多个 pop-ins 发生时, 取 $n=1, 2, 3$ 等按式(15)进行连续计算是必要的。

注 2: Q_n 可以通过图解或解析方法得到(见图 15)。另外, $(Q_n + x_n)$ 可以通过对试样卸载得到。

注 3: F 和 V 被用于按照 6.3.4 测定的 δ_0 值。

当 F 和 V 对应于稳定裂纹扩展(5.8.3)后的裂纹失稳(5.8.4)时, 且

$$\Delta a < 0.2 \text{ mm} + \left(\frac{\delta}{1.87} \right) \left(\frac{R_{p0.2}}{R_m} \right) \dots\dots\dots (17)$$

应将其记录为 F_c 和 V_c 。

当 F 和 V 对应于稳定裂纹扩展(5.8.3)后的裂纹失稳(5.8.4)时, 且

$$\Delta a = 0.2 \text{ mm} + \left(\frac{\delta}{1.87} \right) \left(\frac{R_{p0.2}}{R_m} \right) \dots\dots\dots (18)$$

应将其记录为 F_u 和 V_u 。

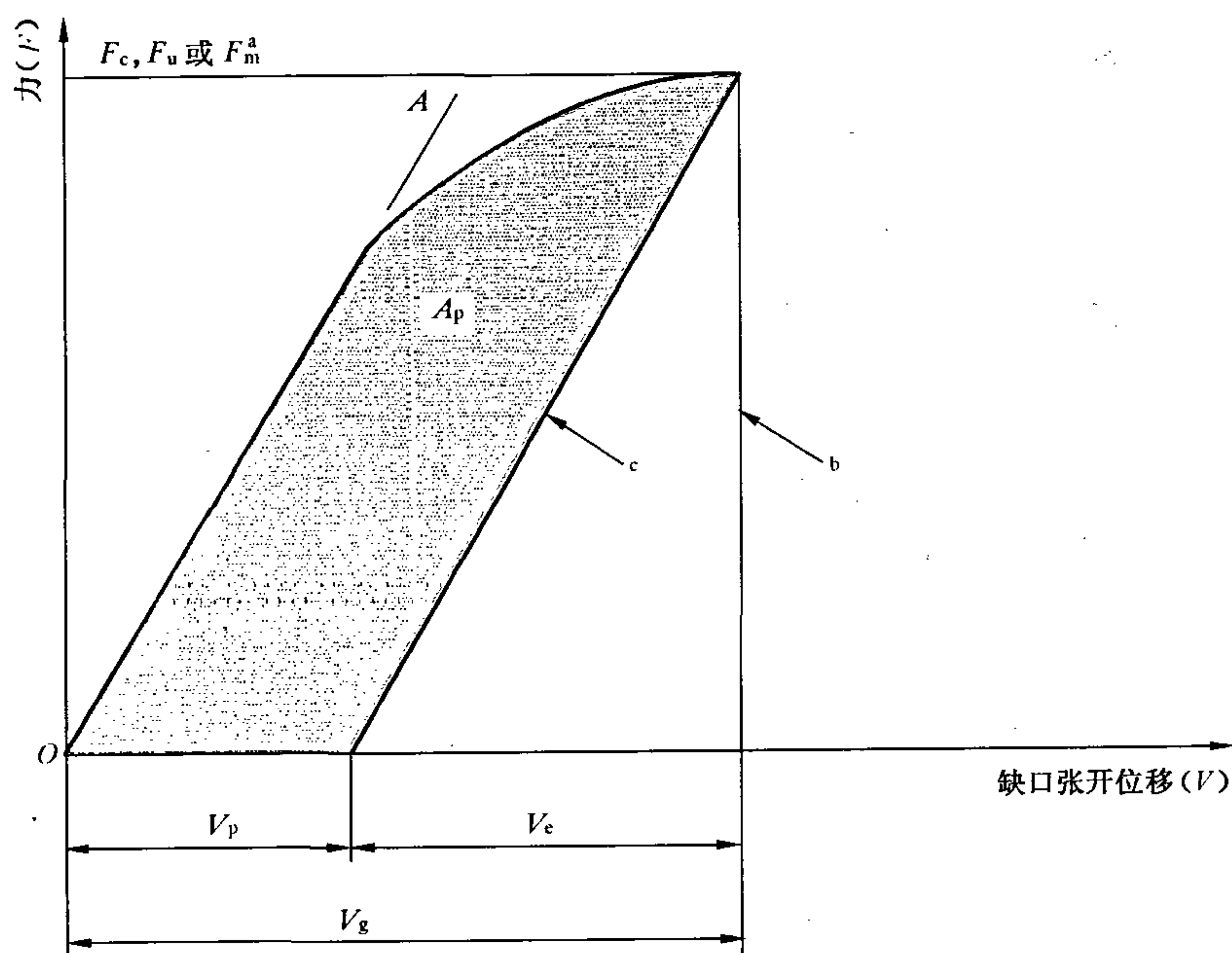
当不可能测定失稳(见 5.8.3)之前的稳定裂纹扩展量 Δa 时, F 和 V 应记录为 F_{uc} 和 V_{uc} 。

6.3.2 F_m 和 V_m 的测定

当试验记录在断裂之前没有 pop-in 而出现最大力平台(见 6.3.1), F_m 和 V_m 的值应通过试验记录的首个最大力点来计算[见图 2, 试验记录类型(6)]。

6.3.3 V_p 的测定

对应于缺口张开位移 V_c, V_u, V_{uc} 和 V_m (按 6.3.1 和 6.3.2 测定, 见图 17) 的缺口张开位移塑性分量 V_p 可以通过对试验记录进行手工计算或计算机自动计算得到。



- a 见图 2。
- b V_c, V_u 和 V_m 对应于 F_c, F_u 和 F_m 。
- c 平行于 OA。

图 17 V_p 的测定(用于 CTOD 的测定)

注 1: 可以用基于柔度关系的分析方法来计算 V_p , 应从 H.1 中规定的总的缺口张开位移 V_g 中扣除理论弹性缺口张开位移 V_e 。

注 2: 对于 $F=F_m$ 的情况(见图 2), V_p 的测定忽略了在该力值范围以外的稳定裂纹扩展或 pop-in 引起的裂纹扩展的影响。

6.3.4 δ_0 的计算

δ_0 值用按照 5.5.1、5.8.2、6.3.1、6.3.2、6.3.3 测定的 B 、 B_N 、 W 、 a_0 、 F 和 V_p 来计算。

注 1: δ_0 值不因裂纹扩展量 Δa 而进行修正。

注 2: 对无侧槽试样, $B_N = B$ 。

注 3: 当 V_p 的测量位置在试样缺口边缘以外(见图 8b)时, z 是正值; 当 V_p 的测量位置在试样缺口边缘以内时, z 是负值。

对于三点弯曲试样, δ_0 按下式计算:

$$\delta_0 = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{2R_{p0.2} E} \right] + \frac{0.4(W-a_0)V_p}{0.6a_0 + 0.4W + z} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中 S 是 5.7.1.1 中定义的跨距(见图 10)。

注 4: 系数 $g_1(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

对于直通型缺口紧凑拉伸试样, δ_0 按下式计算:

$$\delta_0 = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{2R_{p0.2} E} \right] + \frac{0.46(W-a_0)V_p}{0.54a_0 + 0.71W + z} \quad \dots\dots\dots(20)$$

注 5: 系数 $g_2(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

对于台阶型缺口紧凑拉伸试样, δ_0 按下式计算:

$$\delta_0 = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{2R_{p0.2} E} \right] + \frac{0.46(W-a_0)V_p}{0.54a_0 + 0.46W + z} \quad \dots\dots\dots(21)$$

注 6: 系数 $g_2(a_0/W)$ 与式(20)的直通型缺口紧凑拉伸试样相同。

6.3.5 断裂韧度 δ_0 的判定

按照 6.3 计算的断裂韧度 δ_0 值是尺寸敏感的, 与试样厚度直接相关。厚度应以 mm 为单位, 在断裂韧度符号的右下标括号中注明:

利用 F_c 和 V_c 计算 δ_0 , 得到 $\delta_{c(B)}$;

利用 F_u 和 V_u 计算 δ_0 , 得到 $\delta_{u(B)}$;

利用 F_{uc} 和 V_{uc} 计算 δ_0 , 得到 $\delta_{uc(B)}$;

利用 F_m 和 V_m 计算 δ_0 , 得到 $\delta_{m(B)}$ 。

注: 例如对于试样厚度 $B=25$ mm 的试验, 断裂韧度值 $\delta_{c(B)}$ 应标为 $\delta_{c(25)}$ 。

6.4 断裂韧度 J_0 值的测定

6.4.1 F_c 和 q_c , F_u 和 q_u 或 F_{uc} 和 q_{uc} 的测定

用和 6.3.1 相同的方法测定 F 和 q , 按照 6.4.4 计算 J_0 值。

当 F 和 q 对应于较小的稳定裂纹扩展量时(见 5.8.2), 例如

$$\Delta a < 0.2 \text{ mm} + \left(\frac{J}{3.75R_m} \right) \quad \dots\dots\dots(22)$$

应记录为 F_c 和 q_c 。

当 F 和 q 对应于较大的稳定裂纹扩展量时(见 5.8.3), 例如

$$\Delta a \geq 0.2 \text{ mm} + \left(\frac{J}{3.75R_m} \right) \quad \dots\dots\dots(23)$$

应记录为 F_u 和 q_u 。

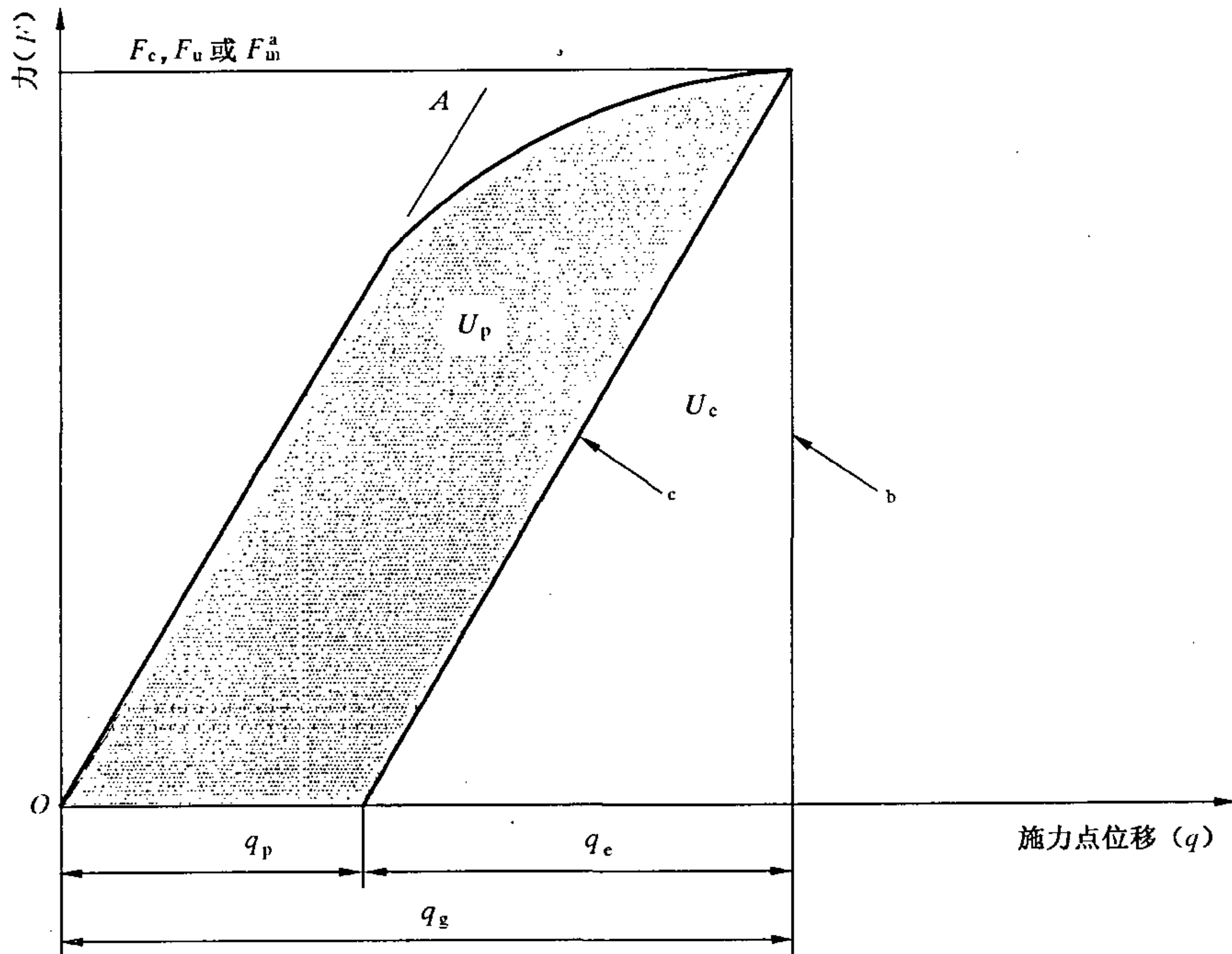
当不能测定 Δa 时(见 5.8.3), F 和 q 应记录为 F_{uc} 和 q_{uc} 。

6.4.2 F_m 和 q_m 的测定

当试验记录在断裂之前没有 pop-in 而展示了最大力平台(见 6.3.1), F_m 和 V_m 的值应当通过试验记录的首个最大力点来计算[见图 2, 试验记录类型(6)]。

6.4.3 U_p 的测定

通过试验记录适当的施力点位移 q_c 、 q_u 和 q_m (见 6.4.1 和 6.4.2), 从 H.3 中规定的总面积中减去理论的弹性面积 U_e 得到塑性分量 U_p 。有多种计算方法可以使用, 例如通过求积仪得到, 或利用计算机的数字积分技术, 还可以利用后面叙述的弹性柔度分析方法得到(见图 18)。



- a 见图 2。
- b q_c 、 q_u 和 q_m 对应于 F_c 、 F_u 和 F_m 。
- c 平行于 OA。

图 18 U_p 的测定(用于 J 的测定)

注：对于 $F=F_m$ 的情况(见图 2)， V_p 的测定忽略了在该力值范围以外的稳定裂纹扩展或 pop-in 引起的裂纹扩展的影响。

6.4.4 J_0 的计算

对于三点弯曲和紧凑拉伸试样的 J_0 值，可以借助下列关系和 5.5.1 中确定的 B 、 B_N 、 W ，5.8.2 中确定的 a_0 以及相应的 6.4.3 中确定的 U_p 值和 6.4.1 或 6.4.2 中确定的试验记录上的适当力值计算得到。

注 1： J_0 值不因裂纹扩展量 Δa 而进行修正。

注 2： 对无侧槽试样， $B_N = B$ 。

注 3： 当 V_p 的测量位置在试样缺口边缘以外(见图 8b)时， Z 是正值；当 V_p 的测量位置在试样缺口边缘以内时， Z 是负值。

对于三点弯曲试样， J_0 按下式来计算：

$$J_0 = \left[\frac{FS}{(BB_N)^{0.5} W^{1.5}} \times g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{E} \right] + \frac{2U_p}{B_N(W-a_0)} \quad \dots\dots\dots(24)$$

其中 S 是 5.7.1.1 定义的跨距(见图 10)。

注 4： 系数 $g_1(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

对于台阶型缺口紧凑拉伸试样， J_0 按下式来计算：

$$J_0 = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{E} \right] + \frac{\eta_p U_p}{B_N(W-a_0)} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$\text{式中 } \eta_p = 2 + 0.522(1 - a_0/W) \quad \dots\dots\dots(26)$$

注 5： 系数 $g_2(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

注 6： 对于直通型缺口紧凑拉伸试样，倘若确立了 U_p 与 A_p 之间的对应关系，那么 U_p 可以通过图 17 中的 A_p 得到；而 J_0 的计算则与台阶型缺口紧凑拉伸试样由式(25)给出。

6.4.5 断裂韧性 J_0 的判定

按照 6.4 计算的断裂韧性 J_0 值是尺寸敏感的，与试样厚度直接相关。厚度应以 mm 为单位，在断裂韧性符号的右下标括号中注明：

利用 F_c 和 q_c 计算 J_0 ，得到 $J_{c(B)}$ ；

利用 F_u 和 q_u 计算 J_0 ，得到 $J_{u(B)}$ ；

利用 F_{uc} 和 q_{uc} 计算 J_0 , 得到 $J_{uc(B)}$;

利用 F_m 和 q_m 计算 J_0 , 得到 $J_{m(B)}$ 。

注: 例如对于试样厚度 $B=25\text{ mm}$ 的试验, 断裂韧度值 $J_{c(B)}$ 应标为 $J_{c(25)}$ 。

7 δ - Δa 和 J - Δa 阻力曲线和稳定裂纹扩展下的启裂韧度 $\delta_{0.2BL}$ 、 $J_{0.2BL}$ 、 δ_i 和 J_i 的测定

7.1 总则

本条款描述了对应于图 1 右半部分显示的具有稳定裂纹扩展和非线性力-位移试样的断裂行为的测定, 根据 δ 或 J 与 Δa 的关系曲线取特征值。本方法给出了利用 δ - Δa 和 J - Δa 阻力曲线测定工程启裂韧度 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$ 的方法。

分析步骤适用于多试样或单试样的 δ 或 J 测定。

7.2 试验步骤

7.2.1 概述

按照 5.7 对试样加力, 按照 5.8 测量产生的裂纹扩展量。

注: δ 和 J 值按稳定裂纹扩展量 Δa 进行修正。

7.2.2 多试样法

对一系列标称尺寸相同的试样加载到预先选定的不同位移水平, 并测定相应的裂纹扩展量。每个试样都成为 δ - Δa 或 J - Δa 阻力曲线上的一个点(后面通称 R 曲线)。

注: 构成一条 R 曲线(见 7.4)需要 6 个或更多个合适位置的点, 在稳定裂纹开始附近处测量断裂韧度 $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ (见 7.6)。对第 1 个试样加载到刚刚超过最大力, 测量相应的稳定裂纹扩展量, 并根据此时位移量来估计其他合适位置的数据点。

7.2.3 单试样法

单试样法是利用弹性柔度或其他技术通过一个试样的试验得到阻力曲线上的多个点的方法。附录 I 描述了单试样法。

当 $\Delta a=0.2(W-a_0)$ 时, 利用直接法估计的最终裂纹扩展量 Δa 与测量的裂纹扩展量之差应当不超过后者的 15% 或 0.15 mm, 取其大者; 当 $\Delta a>0.2(W-a_0)$ 时, 这一差值应在 $0.03(W-a_0)$ 以内。为了后续的裂纹扩展量的测定需要对初始裂纹长度 a_0 作一个估计, 可以采用卸载柔度技术, a_0 的估计值与试验后测量 a_0 值的差应控制在试验后测量 a_0 值的 $\pm 2\%$ 以内。

间接测量技术需要将第一个试样用于建立试验输出与裂纹扩展量之间的关系。附加试验至少需要再做一次从而运用第一次的试验结果估计裂纹扩展量。

估计值与实际 Δa 测量值之差应不超过后者的 15% 或 0.15 mm, 取其大者; 否则试验结果无效。

7.2.4 最终裂纹前缘的平直度

最终裂纹长度定义为按照 5.8.2 和 5.8.3 描述的九点平均值法测定的初始裂纹长度加上稳定裂纹扩展量。中间七点的裂纹长度与九点平均值之差不应大于 $0.1a_0$; 否则试验结果无效。

7.3 δ 和 J 的计算

7.3.1 δ 的计算

对于三点弯曲试样, δ 按下式计算:

$$\delta = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{2R_{p0.2} E} \right] + \frac{0.6\Delta a + 0.4(W-a_0)V_p}{0.6(a_0 + \Delta a) + 0.4W + z} \quad \dots\dots(27)$$

式中 S 是 5.7.1.1 定义的跨距(见图 10)。

注 1: 对无侧槽试样, $B_N=B$ 。

注 2: 系数 $g_1(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

对于台阶型缺口紧凑拉伸试样, δ 按下式来计算:

$$\delta = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{2R_{p0.2} E} \right] + \frac{0.54\Delta a + 0.46(W-a_0)V_p}{0.54(a_0 + \Delta a) + 0.46W + z} \quad \dots\dots(28)$$

注 3: 对于台阶型缺口紧凑拉伸试样, V_p 等于施力点位移 q_p 。

注 4: 系数 $g_2(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

注 5: 对于直通型缺口紧凑拉伸试样直接测量加载线位移量 q 是不可能的, 但是可以通过 V 的计算得到; 如果能够证实计算得到的 q 与直接测量的 q 相差在 1% 以内, δ 可以按式(28)计算。

7.3.2 J 的计算

对于三点弯曲试样, J 按下式来计算:

$$J = \left[\frac{FS}{(BB_N)^{0.5}W^{1.5}} \times g_1\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{E} \right] + \left[\frac{2U_p}{B_N(W-a_0)} \right] \left[1 - \left(\frac{\Delta a}{2(W-a_0)} \right) \right] \dots (29)$$

式中 S 是 5.7.1.1 定义的跨距(见图 10)。

注 1: 对无侧槽试样, $B_N = B$ 。

注 2: 系数 $g_1(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

对于台阶型缺口紧凑拉伸试样, J 按下式来计算:

$$J = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{E} \right] + \left[\frac{\eta_p U_p}{B_N(W-a_0)} \right] \left[1 - \left(\frac{(0.75\eta_p - 1)\Delta a}{W-a_0} \right) \right] \dots (30)$$

式中 η_p 由公式(26)给定。

注 3: 系数 $g_2(a_0/W)$ 在附录 B 中给出。

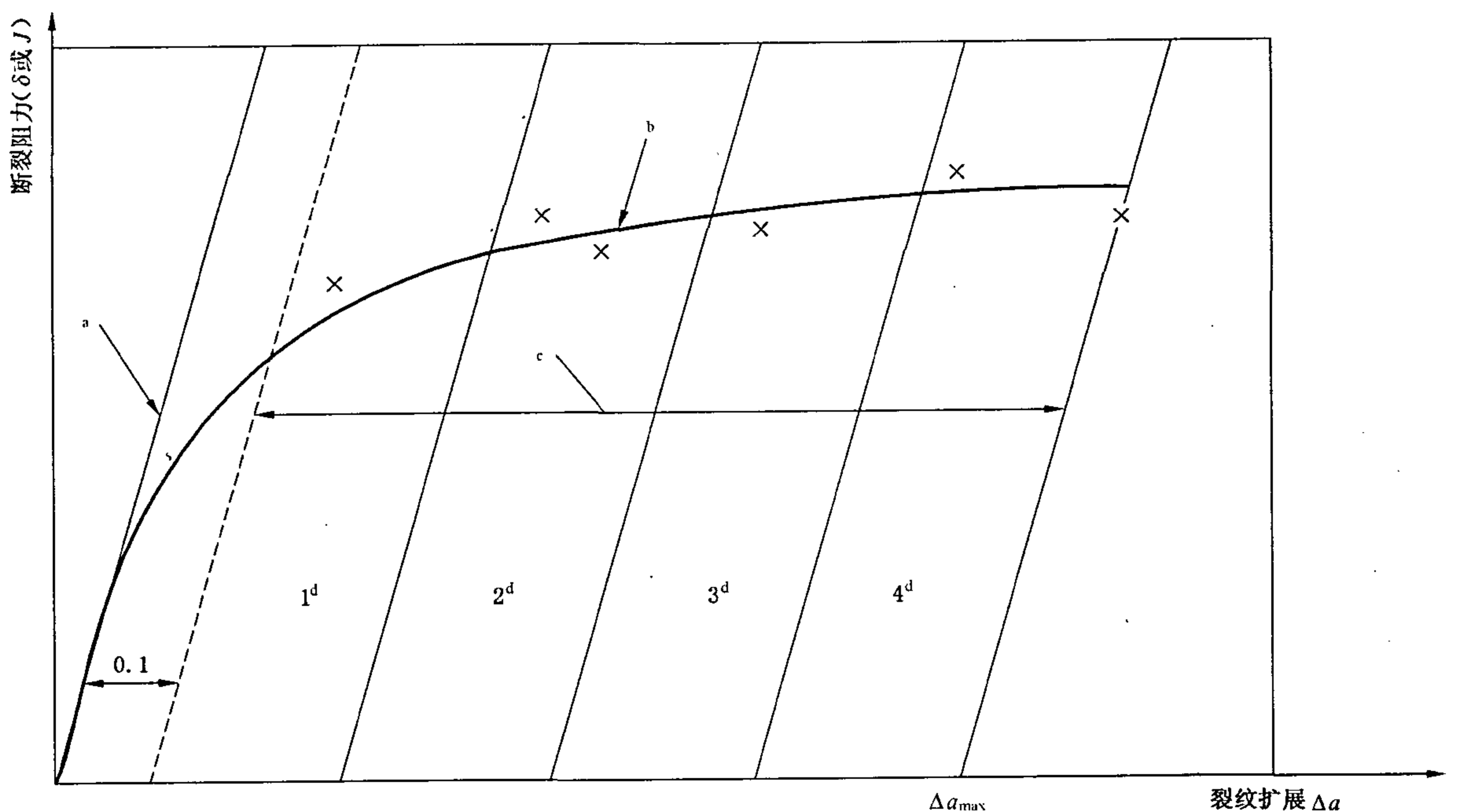
注 4: 对于直通型缺口紧凑拉伸试样直接测量加载线位移量 q 是不可能的, 但是可以通过 V 的计算得到; 如果能够证实计算得到的 q 与直接测量的 q 相差在 1% 以内, J 可以按式(30)计算。

7.4 R 曲线图

注: δ 或 J 与 Δa 的点组成了 R 曲线(例如图 I.1)。数据可以用表格或图形的形式表达。为了便于分析也可以将数据拟合成方程或将拟合的方程以曲线的形式作出来。

7.4.1 图的结构

7.4.1.1 δ 或 J 与 Δa 的断裂阻力曲线由 7.2 和 7.3 得到的数据点组成(见图 19)。



注: 至少需要六个数据点。每一个区间应至少包含一个数据点。如果需要方程, 可以使用 7.4.2.2 确定的偏置指数方程。

- a 钝化线。
- b 拟合曲线。
- c 左、右边界线。
- d 不同的裂纹长度区间。
- ×——试验数据。

图 19 用于测定 R 曲线的数据间隔

7.4.1.2 过 Δa 最大数据点作钝化线的平行线与横坐标轴交于一点,此点的横坐标值定义为 Δa_{\max} 。
 Δa_{\max} 应满足下面两式的要求:

$$\text{对于 } \delta \quad 0.5 \leq \Delta a_{\max} \leq 0.25(W - a_0) \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$\text{对于 } J \quad 0.5 \leq \Delta a_{\max} \leq 0.10(W - a_0) \quad \dots\dots\dots(32)$$

7.4.1.3 根据 7.4.1.1 的描述,用下面两种方法之一来确定钝化线:

$$\delta = 1.87(R_m/R_{p0.2})\Delta a \quad \dots\dots\dots(33)$$

$$\text{或 } J = 3.75R_m\Delta a \quad \dots\dots\dots(34)$$

式中 R_m 和 $R_{p0.2}$ 应在试验温度下测定。

注:式(33)是由式(34)导出的,对于 δ 钝化线的估计取 $\delta = J/2R_{p0.2}$ 。

7.4.1.4 按照 7.4.1.2(见图 19)得到 Δa_{\max} ,过 Δa_{\max} 作钝化线的平行线定义为有效裂纹扩展量的右边界线。

7.4.1.5 过 $\Delta a = 0.1 \text{ mm}$ (见图 19)处作钝化线的平行线定义为有效裂纹扩展量的左边界线。

7.4.1.6 当发生非稳定裂纹扩展时试验应终止,如果在断口上可以测量稳定裂纹扩展量,该数据点应包括在 R 曲线图上。不稳定断裂数据点应在 R 曲线上清晰地标明,并应在试验报告中注明(见附录 E)。

注:非稳定断裂点依赖于试样的几何尺寸。

7.4.2 数据间隔和曲线拟合

7.4.2.1 至少需要六个数据点定义 R 曲线。

7.4.2.2 拟合 R 曲线时,在四个等间距的裂纹扩展区内,至少有一个数据点,如图 19 所示。对 0.1 mm 和 Δa_{\max} 边界线之间的数据点按指数方程(35)进行拟合。

$$\delta(\text{或 } J) = \alpha + \beta\Delta a^\gamma \quad \dots\dots\dots(35)$$

式中 α 和 $\beta \geq 0, 0 \leq \gamma \leq 1$ 。

注 1:估算 α, β 和 γ 常数的方法见附录 C。

注 2:如果从附录 C 线性拟合得到的 α 或 β 小于 0,那么结果无效。这种情况下,建议作补充试验或用附录 I 的单试样法。

如果使用单试样法,所有位于 0.1 mm 偏置线以右的数据点都应参加曲线拟合。但是,只有达到 δ_g 或 J_g 时, R 曲线才有效(见图 20)。

7.5 阻力曲线的判定

7.5.1 δ - Δa 阻力曲线的判定

7.5.1.1 每个试样的 δ_{\max} 值按以下三个公式计算,取其中的最小值:

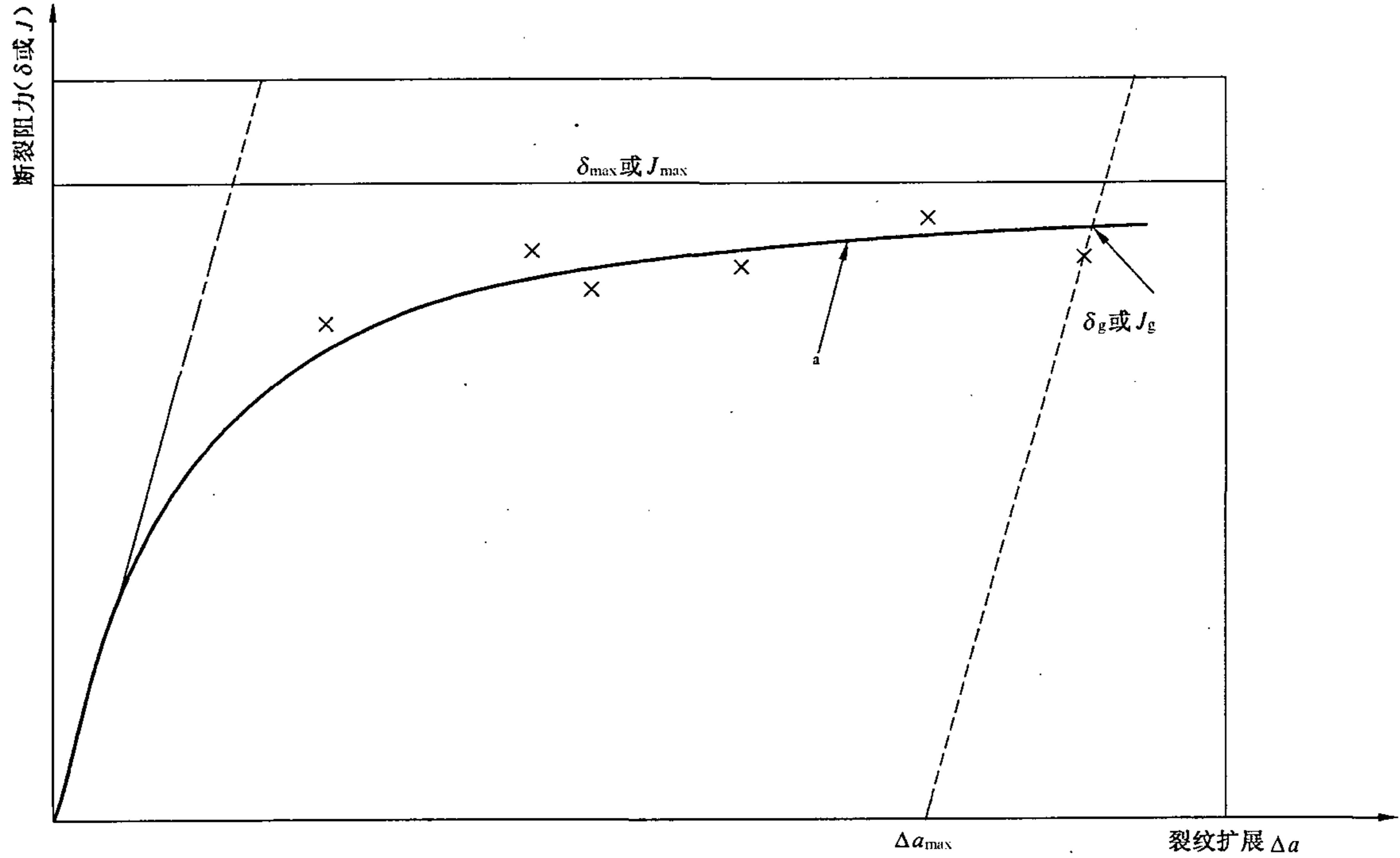
$$\delta_{\max} = B/30 \quad \dots\dots\dots(36)$$

$$\delta_{\max} = a_0/30 \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$\delta_{\max} = (W - a_0)/30 \quad \dots\dots\dots(38)$$

注:应优先采用上述公式确定阻力曲线的上边界线如果不能满足,也可用公式 $\delta_{\max} = (W - a_0)/20$ 确定。

7.5.1.2 按照 7.5.1.1 计算的最小 δ_{\max} 作 δ - Δa 阻力曲线的上边界线(见图 20)。



注：如果 R 曲线与 δ_{max} 或 J_{max} 极限值在 Δa_{max} 极限以内相交，那么 δ_{max} 或 J_{max} 等于 δ_g 或 J_g 。

^a 拟合曲线。

×——试验数据。

图 20 δ_g 或 J_g 的定义和极限判定

7.5.1.3 δ 与拟合曲线在 δ_{max} 或 Δa_{max} (由式(31)得到)边界线的交点定义为 δ_g (见图 20)。 δ_g 应作为被测试样尺寸 δ 控制的裂纹扩展行为的上极限。

7.5.2 J- Δa 阻力曲线的判定

7.5.2.1 每个试样的 J_{max} 按以下三个公式计算，取其中的最小值：

$$J_{max} = a_0 [(R_{p0.2} + R_m) / 40] \dots\dots\dots (39)$$

$$J_{max} = B [(R_{p0.2} + R_m) / 40] \dots\dots\dots (40)$$

$$J_{max} = (W - a_0) [(R_{p0.2} + R_m) / 40] \dots\dots\dots (41)$$

注：应优先采用上述公式确定阻力曲线的上边界线如果不能满足，也可用公式 $J_{max} = (W - a_0) [(R_{p0.2} + R_m) / 30]$ 确定。

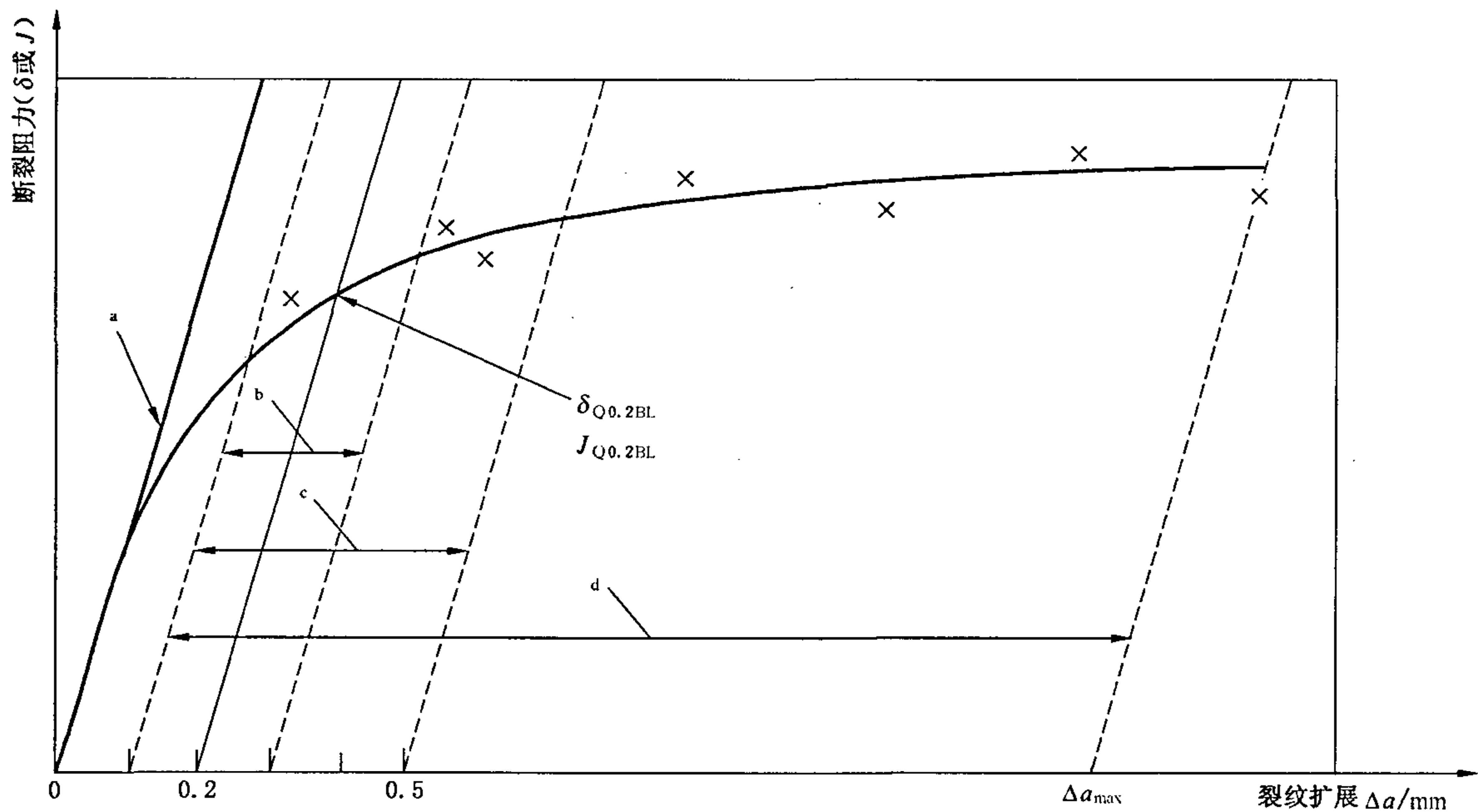
7.5.2.2 按照 7.5.2.1 计算的最小 J_{max} 作 J- Δa 阻力曲线的上边界线(见图 20)。

7.5.2.3 J 与拟合曲线在 J_{max} 或 Δa_{max} (由式(32)得到)边界线的交点定义为 J_g (见图 20)。 J_g 应作为被测试样尺寸 J 控制的裂纹扩展行为的上极限。

7.6 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$ 的测定和判定

7.6.1 $\delta_{0.2BL}$ 的测定

7.6.1.1 按照 7.4 绘制拟合 R 曲线，要求在 0.1 mm 和 0.30 mm 钝化线偏置线之间至少有一个数据点，在 0.1 mm 和 0.50 mm 钝化线偏置线之间至少有两个数据点(见图 21)。按照式(35)拟合的曲线应至少通过六个数据点。



注：要求至少六个数据点。

a 钝化线。

b 至少一个点。

c 至少两个点。

d 按照图 19 的数据分散区域。

×——试验数据。

图 21 $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ 的数据间隔

7.6.1.2 在图上偏置 0.2 mm 处作钝化线的平行线,见图 21。

注：拟合曲线与 0.2 mm 偏置线的交点定义为 $\delta_{Q0.2BL}$ 。为确定该交点,可采用如下步骤：

(1) 从图 21 上的数据点估计一个 $\delta_{Q0.2BL(1)}$ 值。按下式计算 $\Delta a_{(1)}$ ：
$$\Delta a_{(1)} = \frac{\delta_{Q0.2BL(1)}}{1.87R_m/R_{p0.2}} + 0.2;$$

(2) 根据幂乘关系计算 $\delta_{Q0.2BL(2)}$ ：
$$\delta_{Q0.2BL(2)} = \alpha + \beta \Delta a_{(1)}^\gamma。$$

重复(1)和(2)得到 $\Delta a_{(i)}$ 和 $\delta_{Q0.2BL(i+1)}$,直到两个 $\delta_{Q0.2BL}$ 值 [$\delta_{Q0.2BL(i)}, \delta_{Q0.2BL(i+1)}$] 之差不大于 0.2% 为止。

7.6.1.3 如果 $\delta_{0.2BL}$ 超过 δ_{max} (见 7.5.1.1),那么 $\delta_{0.2BL}$ 无效。

7.6.1.4 如果 δ - Δa 曲线在 0.2 mm 偏置线交点处的斜率 $(d\delta/da)_{0.2BL}$ 不能满足下式的要求：

$$1.87 \left(\frac{R_m}{R_{p0.2}} \right) > \left[2 \left(\frac{d\delta}{da} \right) \right]_{0.2BL} \dots\dots\dots (42)$$

那么按 7.6.1.2 确定的 $\delta_{0.2BL}$ 无效。

7.6.1.5 如果 $\delta_{0.2BL}$ 符合 7.6,也符合 8.7,那么按照 7.6.1.2 测定的 $\delta_{0.2BL}$ 是非尺寸敏感的。如果不是这样,就应该报告尺寸敏感值 $\delta_{0.2BL(B)}$,B 是试样厚度。

7.6.2 $J_{0.2BL}$ 的测定

7.6.2.1 按照 7.4 绘制拟合 R 曲线,要求在 0.1 mm 和 0.30 mm 钝化线偏置线之间至少有一个数据点,在 0.1 mm 和 0.50 mm 钝化线偏置线之间至少有两个数据点(见图 21)。按照式(35)拟合的曲线应至少通过六个数据点。

7.6.2.2 在图上偏置 0.2 mm 处作钝化线的平行线,见图 21。

注：拟合曲线与 0.2 mm 偏置线的交点定义为 $J_{Q0.2BL}$ 。为确定该交点,可采用如下步骤：

(1) 从图 21 上的数据点估计一个 $J_{Q0.2BL(1)}$ 值。按下式计算 $\Delta a_{(1)}$ ：
$$\Delta a_{(1)} = \frac{J_{Q0.2BL(1)}}{3.75R_m} + 0.2;$$

(2) 根据式(35)计算 $J_{Q0.2BL(2)}$ ：
$$J_{Q0.2BL(2)} = \alpha + \beta \Delta a_{(1)}^\gamma。$$

重复(1)和(2)得到 $\Delta a_{(i)}$ 和 $J_{Q0.2BL(i+1)}$,直到两个 $J_{Q0.2BL}$ 值 [$J_{Q0.2BL(i)}$, $J_{Q0.2BL(i+1)}$] 之差不大于 0.2% 为止。

7.6.2.3 如果 $J_{0.2BL}$ 超过 J_{max} (见 7.5.2.1),那么 $J_{0.2BL}$ 无效。

7.6.2.4 如果 $J-\Delta a$ 曲线在 0.2 mm 裂纹扩展位移偏置线交点处的斜率 $(dJ/da)_{0.2BL}$ 不能满足下式的要求:

$$3.75R_m > \left[2 \left(\frac{dJ}{da} \right) \right]_{0.2BL} \dots\dots\dots (43)$$

那么按 7.6.2.2 测定的 $J_{0.2BL}$ 无效。

7.6.2.5 如果 $J_{0.2BL}$ 符合 7.6,也符合 8.8,那么按 7.6.2.2 测定的 $J_{0.2BL}$ 是非尺寸敏感的。

如果不是这样,就应该报告尺寸敏感值 $J_{0.2BL(B)}$, B 是试样厚度。

7.7 通过扫描电镜测定启裂韧度 δ_i 和 J_i

注:附录 D 给出了利用伸张区的宽度(SZW)测定启裂韧度 δ_i 和 J_i 值的方法。扫描电镜操作者应该具备解析扫描电镜照片的经验。如果 SZW 不能与稳定裂纹扩展区分,那么不能用此种方法测定 δ_i 或 J_i 。

8 试验报告

8.1 结构

根据本标准制定试验报告,应包括 7 个部分(8.2 至 8.8)。被测材料的描述、试样和试验条件、包括试验环境都应按照 8.2 注明。机械加工、疲劳裂纹、裂纹前缘的平直度和裂纹长度数据都应符合 8.3。导出的断裂参数应该符合 8.4 到 8.8。

8.2 试样、材料和试验环境(见 E.1)。

8.2.1 试样描述

- 试样编号;
- 类型;
- 裂纹面取向;
- 取样位置。

8.2.2 试样尺寸

- 厚度 B 和净厚度 B_N (mm);
- 宽度 W (mm);
- 初始相对裂纹长度 a_0/W 。

8.2.3 材料描述

- 材料的成分和标识编号;
- 产品形状(板,锻造,铸造等)和状态;
- 在预制裂纹温度下的拉伸性能,参考的或测量的;
- 在试验温度下的拉伸性能,参考的或测量的。

8.2.4 辅助尺寸

- 跨距 S (mm);
- 刀口厚度 Z (见 5.5.1)。

8.2.5 试验环境

- 温度(°C);
- 加载位移速率(mm/min);
- 位移控制的类型。

8.2.6 预制疲劳裂纹的条件

- K_f (MPam^{1/2});
- F_f (kN);

——预制疲劳裂纹温度(°C)。

8.3 试验数据的判定

8.3.1 限定条件

所有满足特定要求的数据都应按照本方法进行判定,只有合格的数据才能用以定义断裂韧度。建议按照表 E.2 编排 8.3.2 至 8.3.4 中描述的数据。

力-位移的记录应满足 5.7.4 的要求。

8.3.2 裂纹长度的测量

按照图 13 和图 14 所示,在等间隔的 9 点上测量裂纹长度。下述值应该在报告中注明:

- 机械加工缺口长度(a_m);
- 初始裂纹长度(a_0);
- 预制疲劳裂纹长度($a_0 - a_m$);
- 最终裂纹长度(a_f);
- 平均的裂纹扩展量($\Delta a = a_f - a_0$)。

8.3.3 断口的形貌

- 记录断口特殊形貌的信息;
- 记录非稳定裂纹扩展的信息。

8.3.4 pop-in

- 力-位移记录上的每一个 pop-in 对应的 F, x, y 和 Q ;
- 发生明显 pop-in 的数量;
- 第一个明显 pop-in 的位置和表 E.2 中注明的信息。

8.3.5 阻力曲线

——表 E.3 单试样试验阻力曲线的数据。

8.3.6 数据判定的检查表

如果符合下述要求,则数据有效:

- a) 试样应满足 5.4.1 尺寸和误差的要求;
- b) 试验装置应满足 5.7 误差和同轴度的要求;
- c) 试验机和引伸计应符合 5.6 的准确度要求;
- d) 平均初始裂纹长度 a_0 应在 $0.45W \sim 0.7W$ 之间;
- e) 预制疲劳裂纹的长度(从机械加工缺口的根部算起)应不小于 1.3 mm 或 $2.5\%W$,取其中大者;
- f) 试样两表面的疲劳预制裂纹应在包迹线之内(见图 6);
- g) 预制疲劳裂纹的应力强度因子应满足 5.4.2.4 的要求;
- h) 中间 7 点的初始裂纹长度与 9 点初始裂纹平均值之差应不超过 $0.10a_0$;
- i) 中间 7 点的最终裂纹长度与 9 点最终裂纹平均值之差应不超过 $0.10(a_0 + \Delta a)$;
- j) 力-位移记录的初始斜率应在 0.85 和 1.5 之间(便于手工记录的分析);
- k) 对于单试样法直接计算的裂纹扩展量,当裂纹扩展量小于 $0.2(W - a_0)$ 时,计算的最终裂纹扩展量与 9 点平均测量的裂纹长度之差应小于后者的 15% 或 0.15 mm,取其大者;当裂纹扩展量大于 $0.2(W - a_0)$ 时,这一差值应小于 $0.03(W - a_0)$;
- l) 单试样法估计的初始裂纹长度 a_0/W 与测量的初始裂纹长度 a_0/W 之差应小于后者的 2%;
- m) 对于单试样法间接计算裂纹扩展量,当裂纹扩展量小于 $0.2(W - a_0)$ 时,计算的最终裂纹扩展量与 9 点平均测量的裂纹长度之差小于后者的 15% 或 0.15 mm,取其大者;当裂纹扩展量大于 $0.2(W - a_0)$ 时,这一差值应小于 $0.03(W - a_0)$;
- n) 7.4.2 和 7.6.1 中要求的数据点数量和间隔应满足 δ - Δa 曲线和 $\delta_{0.2BL}$ 的测定要求;

o) 7.4.2 和 7.6.2 中要求的数据点数量和间隔应满足 $J-\Delta a$ 曲线和 $J_{0.2BL}$ 的测定要求。

8.4 K_{IC} 的判定

如果 K_Q (按照 6.2.3 计算得到的) 满足下列有效性判据, 则 K_Q 等于 K_{IC} , 建议按照 E.4 的格式报告:

- a) 满足 8.3 的全部要求;
- b) $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2 = a_0$;
- c) $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2 = B$;
- d) $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2 = (W - a_0)$;
- e) $F_{max}/F_Q = 1.10$, 式中 F_{max} 是试样承受的最大力。

8.5 δ -R 曲线的判定

按照 7.4.2 对数据进行幂乘拟合, 拟合 δ -R 曲线。应满足下述要求:

- a) 按 8.3 判定合格的数据;
- b) 按 7.5.1.3 设定 δ -R 曲线的极限 δ_g 。

8.6 J-R 曲线的判定

按照 7.4.2 对数据进行幂乘拟合, 拟合 J-R 曲线。应满足下述要求:

- a) 按 8.2 判定合格的数据;
- b) 按 7.5.1.3 设定 J-R 曲线的极限 J_g 。

8.7 $\delta_{0.2BL(B)}$ 判定为 $\delta_{0.2BL}$ 的条件

按照 7.6.1 计算得到的 $\delta_{0.2BL(B)}$ 如果符合下述条件, 则判定为 $\delta_{0.2BL}$:

- a) 满足 8.3 的全部要求;
- b) 幂乘拟合线与 0.2 mm 偏置钝化线交点的切线斜率 $d\delta/da$ 小于 $0.935(R_m/R_{p0.2})$;
- c) $30\delta_{0.2BL} = a_0$;
- d) $30\delta_{0.2BL} = B$;
- e) $30\delta_{0.2BL} = (W - a_0)$ 。

8.8 $J_{0.2BL(B)}$ 判定为 $J_{0.2BL}$ 的条件

按照 7.6.2 计算得到的 $J_{0.2BL(B)}$ 如果符合下述条件, 就判定为 $J_{0.2BL}$:

- a) 满足 8.3 的全部要求;
- b) dJ/da 幂乘拟合线在 0.2 mm 偏置钝化线交点的切线斜率小于 $1.875R_m$;
- c) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) = a_0$;
- d) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) = B$;
- e) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) = (W - a_0)$ 。

9 测定结果的数值修约

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如未规定具体要求, 应按照以下要求进行修约。对于 K_{IC} , K_Q 以及 $J_{c(B)}$, J_i , $J_{m(B)}$, $J_{u(B)}$, $J_{uc(B)}$, $J_{0.2BL}$, $J_{0.2BL(B)}$ 应保留三位有效数字; 对于 $\delta_{c(B)}$, δ_i , $\delta_{m(B)}$, $\delta_{u(B)}$, $\delta_{uc(B)}$, $\delta_{0.2BL}$, $\delta_{0.2BL(B)}$ 应准确到 0.001 mm。修约的方法按照 GB/T 8170。

附录 A
(规范性附录)
裂纹面的取向

下列各项符号将用来使裂纹面和扩展方向的选择符合产品的特性方向。我们使用一串带有连字符的字母,在连字符前的字母表示常规的裂纹面的方向,连字符后面的字母表示预期的裂纹扩展方向(见图 A.1)。对于锻造金属字母 X 表示主变形(最大晶粒流动)的方向;字母 Z 表示最小变形的方向;字母 Y 表示垂直于 X-Z 平面的方向。如果试样的取向与产品的特性方向不一致,那么将使用二个字母来表示裂纹面和(或者)预期的裂纹扩展方向(见图 A.1b)。如果没有晶粒流的方向(比如说铸件),可以任意指定参考轴但是必须能够清晰的识别它们。

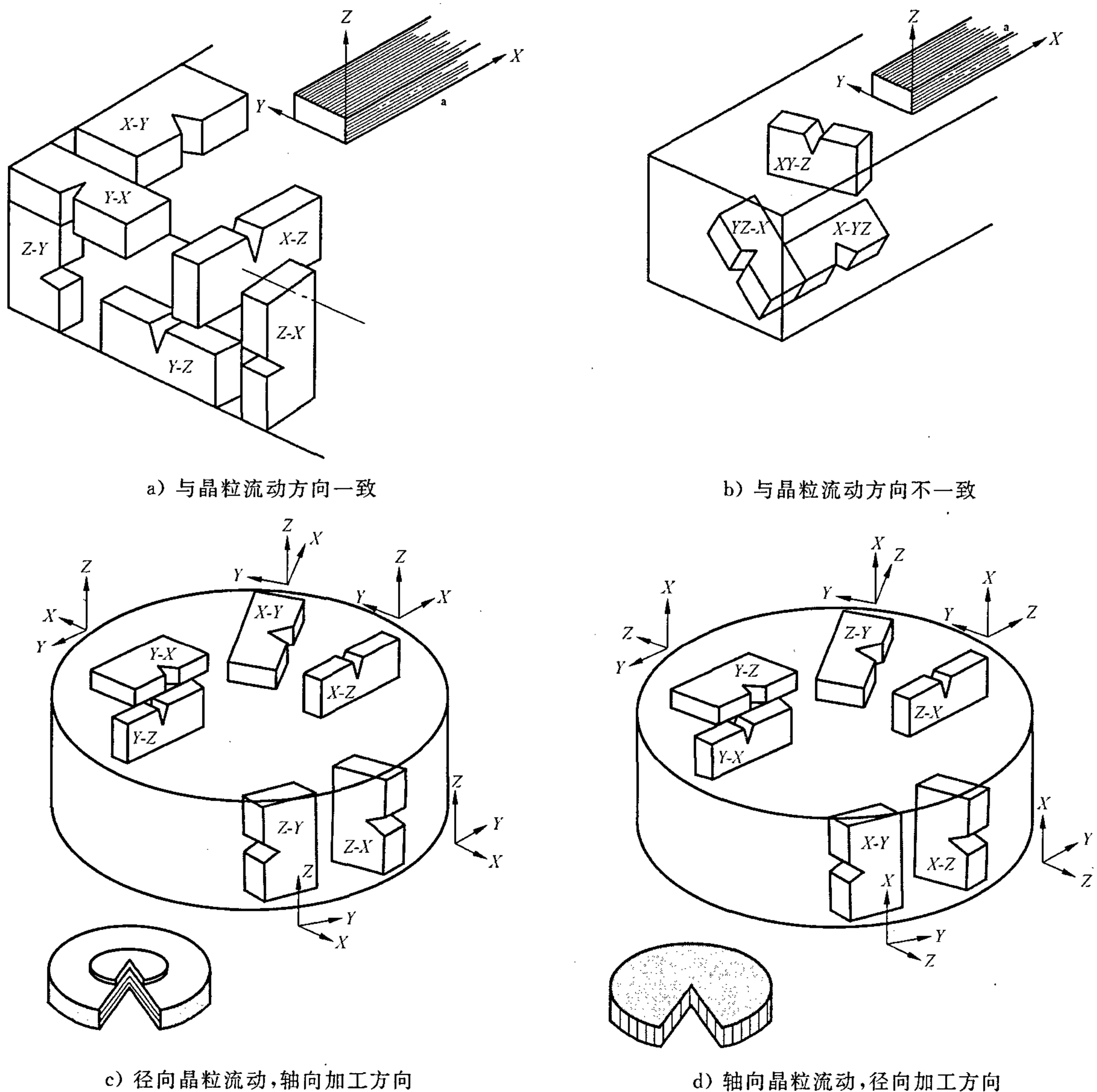


图 A.1 断裂平面的确定

附录 B
(规范性附录)
应力强度因子和柔度关系

B.1 应力强度因子

B.1.1 三点弯曲试样

对于三点弯曲试样,应力强度因子系数 $g_1(a_0/W)$ 由式 B.1 给出。

$$g_1\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{0.5} \left[1.99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left(2.15 - \frac{3.93a_0}{W} + \frac{2.7a_0^2}{W^2} \right) \right]}{2\left(1 + \frac{2a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{1.5}} \dots\dots (B.1)$$

注:为了简化 K 的计算,在表 B.1 中给出了对应 a_0/W 的 $g_1(a_0/W)$ 的值。

B.1.2 紧凑拉伸试样

对于紧凑拉伸试样,应力强度因子系数 $g_2(a_0/W)$ 由式 B.2 给出。

$$g_2\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a_0}{W} - 13.32 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{1.5}} \dots (B.2)$$

注:为了简化 K 的计算,在表 B.2 中给出了对应 a_0/W 的 $g_1(a_0/W)$ 的值。

表 B.1 三点弯曲试样的 $g_1(a_0/W)$ 值

a/W	g ₁ (a ₀ /W)	a/W	g ₁ (a ₀ /W)
0.450	2.29	0.575	3.43
0.455	2.32	0.580	3.50
0.460	2.35	0.585	3.56
0.465	2.39	0.590	3.63
0.470	2.43	0.595	3.70
0.475	2.46	0.600	3.77
0.480	2.50	0.605	3.85
0.485	2.54	0.610	3.92
0.490	2.58	0.615	4.00
0.495	2.62	0.620	4.08
0.500	2.66	0.625	4.16
0.505	2.70	0.630	4.25
0.510	2.75	0.635	4.34
0.515	2.79	0.640	4.43
0.520	2.84	0.645	4.53
0.525	2.89	0.650	4.63
0.530	2.94	0.655	4.73
0.535	2.99	0.660	4.84
0.540	3.04	0.665	4.95
0.545	3.09	0.670	5.06
0.550	3.14	0.675	5.18
0.555	3.20	0.680	5.30
0.560	3.25	0.685	5.43
0.565	3.31	0.690	5.57
0.570	3.37	0.695	5.71
		0.700	5.85

表 B.2 紧凑拉伸试样的 $g_2(a_0/W)$ 值

a/W	$g_2(a_0/W)$	a/W	$g_2(a_0/W)$
0.450	8.34	0.575	12.42
0.455	8.46	0.580	12.65
0.460	8.58	0.585	12.89
0.465	8.70	0.590	13.14
0.470	8.83	0.595	13.39
0.475	8.96	0.600	13.65
0.480	9.09	0.605	13.93
0.485	9.23	0.610	14.21
0.490	9.37	0.615	14.50
0.495	9.51	0.620	14.80
0.500	9.66	0.625	15.11
0.505	9.81	0.630	15.44
0.510	9.96	0.635	15.77
0.515	10.12	0.640	16.12
0.520	10.29	0.645	16.48
0.525	10.45	0.650	16.86
0.530	10.63	0.655	17.25
0.535	10.80	0.660	17.65
0.540	10.98	0.665	18.07
0.545	11.17	0.670	18.52
0.550	11.36	0.675	18.97
0.555	11.56	0.680	19.44
0.560	11.77	0.685	19.94
0.565	11.98	0.690	20.45
0.570	12.20	0.695	20.99
		0.700	21.55

B.2 弹性柔度关系

B.2.1 三点弯曲试样力 F 与缺口张开位移 V_{M1} 关系的公式

对于三点弯曲试样力 F 与缺口张开位移 V_{M1} ，其弹性柔度关系 V_{M1}/F 由式 B.3 给出。

$$\frac{V_{M1}}{F} = \frac{S(1-\nu^2)}{EB_e W} \times g_3\left(\frac{a}{W}\right) \quad \dots\dots\dots(B.3)$$

式中：

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B}$$

$$g_3\left(\frac{a}{W}\right) = 6\left(\frac{a}{W}\right) \left[0.76 - 2.28\left(\frac{a}{W}\right) + 3.87\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2.04\left(\frac{a}{W}\right)^3 + \frac{0.66}{(1-a/W)^2} \right]$$

B.2.2 直通型缺口紧凑拉伸试样力 F 与缺口张开位移 V_{M2} 关系的公式

对于直通型缺口紧凑拉伸试样力 F 与缺口张开位移 V_{M2} ，其弹性柔度关系 V_{M2}/F 由式 B.4 给出。

$$\frac{V_{M2}}{F} = \frac{(1-\nu^2)}{EB_e} \times g_4\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots(B.4)$$

式中:

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B}$$

$$g_4\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\frac{19.75}{1 - \left(\frac{a}{W}\right)^2} \right] \left[0.5 + 0.192\left(\frac{a}{W}\right) + 1.385\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2.919\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1.842\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

B.2.3 三点弯曲试样力 F 与施力点位移 q_{e1} 关系的公式

对于三点弯曲试样力 F 与施力点位移 q_{e1} , 其弹性柔度关系 q_{e1}/F 由式 B.5 给出。

$$\frac{q_{e1}}{F} = \frac{(1-\nu^2)}{EB_e} \left(\frac{S}{W-a}\right)^2 \times g_5\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots(B.5)$$

式中:

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B}$$

$$g_5\left(\frac{a}{W}\right) = \left[1.193 - 1.980\left(\frac{a}{W}\right) + 4.478\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 4.443\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1.739\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

B.2.4 台阶型缺口紧凑拉伸试样力 F 与施力点位移 q_{e2} 关系的公式

对于台阶型缺口紧凑拉伸试样力 F 与施力点位移 q_{e2} , 其弹性柔度关系 q_{e2}/F 由式 B.6 给出。

$$\frac{q_{e2}}{F} = \frac{(1-\nu^2)}{EB_e} \times g_6\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots(B.6)$$

式中:

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B}$$

$$g_6\left(\frac{a}{W}\right) = \left(\frac{W+a}{W-a}\right)^2 \left[2.163 + 12.219\left(\frac{a}{W}\right) - 20.065\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0.9925\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 20.609\left(\frac{a}{W}\right)^4 - 9.9314\left(\frac{a}{W}\right) \right]$$

附 录 C
(规范性附录)
裂纹扩展数据的拟合

对于裂纹扩展数据 y_i 与 Δa_i 满足下式

$$y = c + m\Delta a^n \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

上式等同于正文中提到的幂乘拟合方程

$$\text{例如: } \delta \text{ 或 } J = \alpha + \beta(\Delta a)^\gamma \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中 y 即为 δ 或 J , Δa 即为裂纹扩展量, 而常数 $m = \beta, n = \gamma, c = \alpha$ 。

将 $x = \Delta a^n$ 代入式即可通过线性拟合法使用分析软件或手动确定 m 及 c 。

n 值的确定应使式的相关系数达到最高。

更详细的算法如下:

n 值的选择是从 0 到 1, 步长值为 0.001。对于每一个有效的 $n, x = \Delta a^n$ 的相关系数 r 由下式计算:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

当能使 r 最大化的 n 值确定后, 由下式计算相应的 m 及 c 值:

$$m = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \text{ 和 } c = \bar{y} - m\bar{x} \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

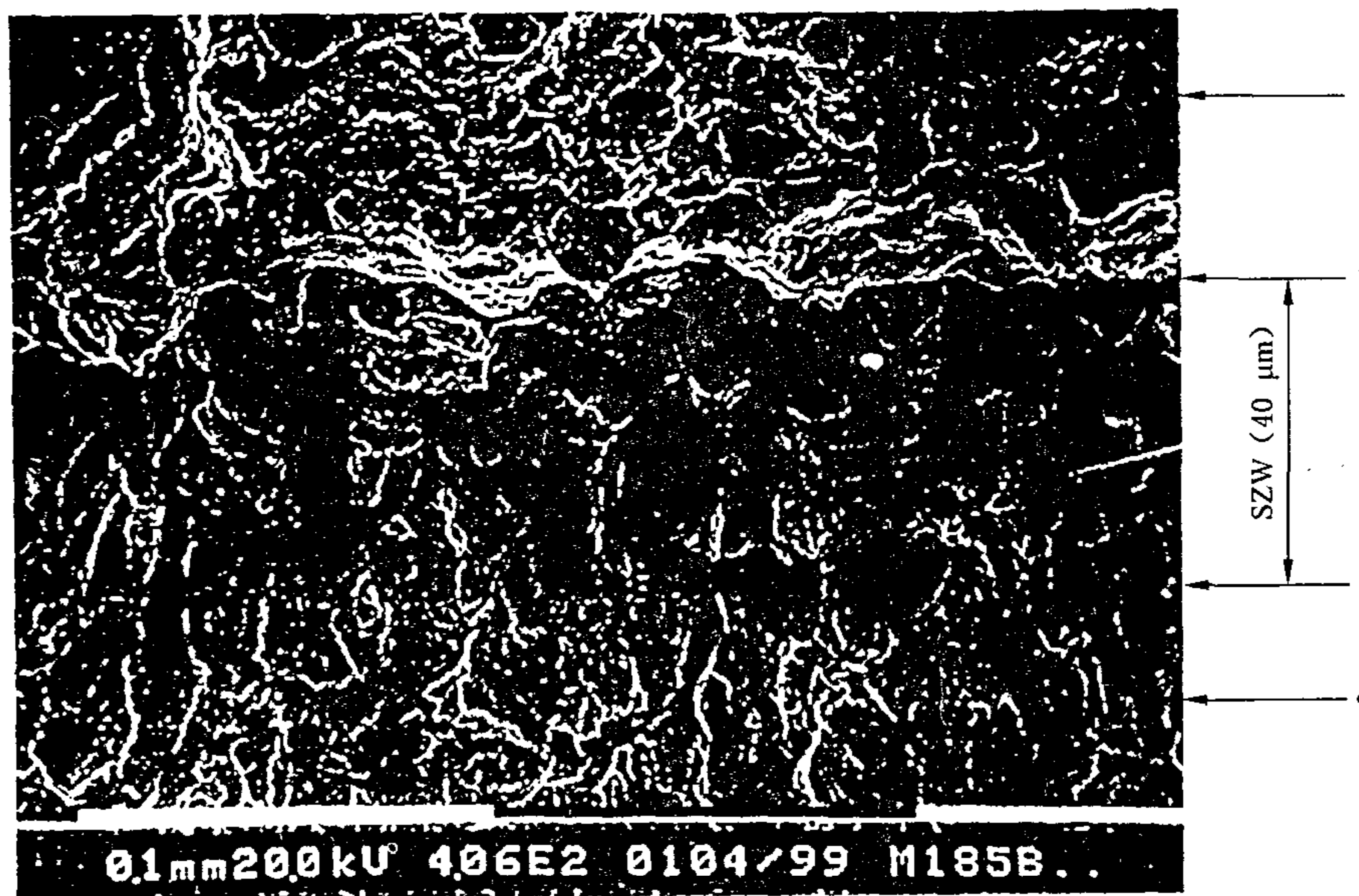
$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} \text{ 和 } \bar{y} = \frac{\sum y}{N} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

附录 D
(资料性附录)
 δ_i 和 J_i 的测定

注： δ_i 和 J_i 的测定要求在失效的试样断口上利用扫描电镜(SEM)测量伸张区的宽度(SZW)。 δ_i 和 J_i 值固有的分散性较大,导致对伸张区宽度的测量和解释具有很大的主观性。为了减小分散性,建议对扫描电镜照片具有丰富经验的人员才能用此方法。如果伸张区与韧性裂纹扩展不能区分,则 δ_i 和 J_i 不能用此种方法测定。

D.1 临界伸张区宽度(SZW)的测量

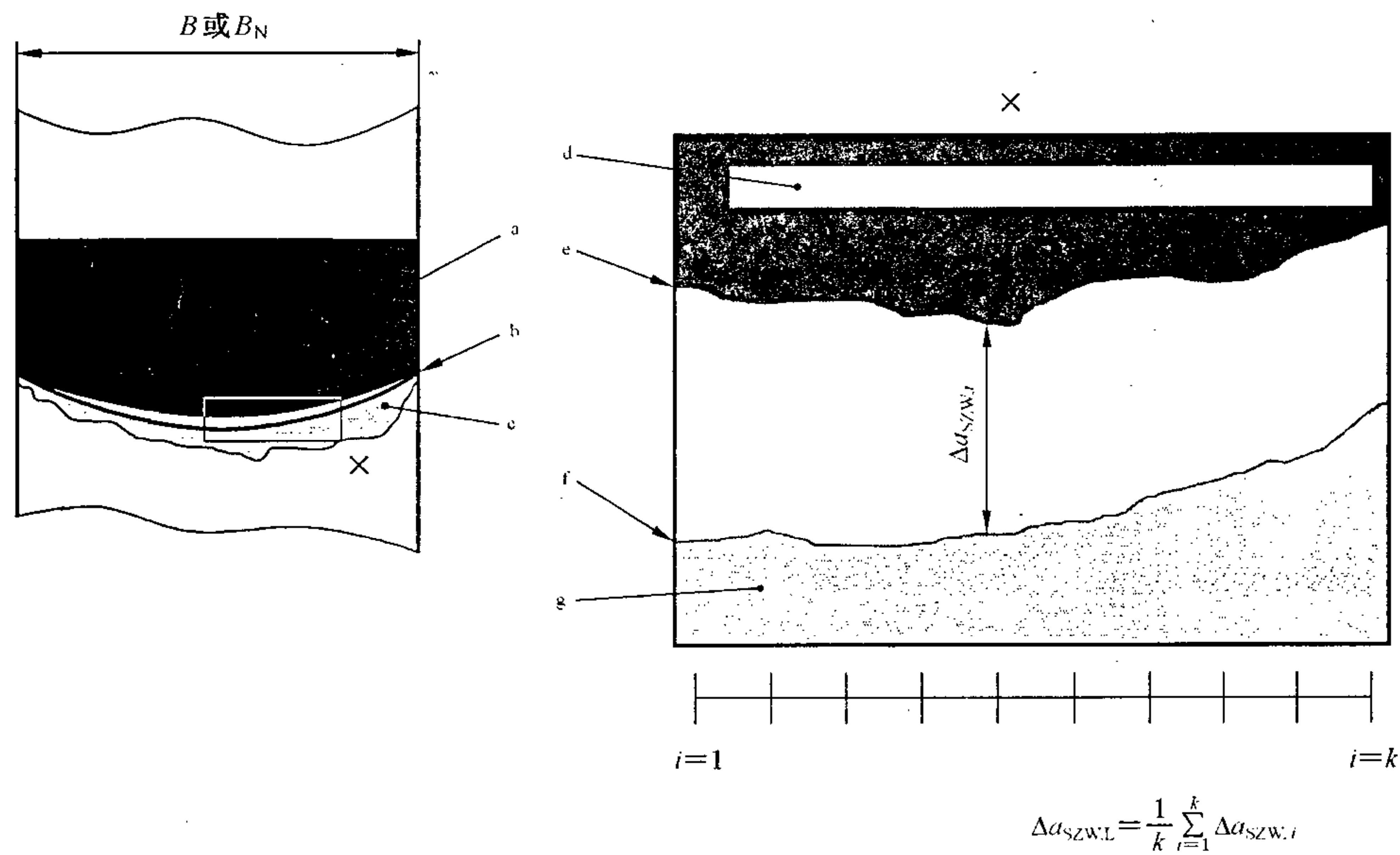
D.1.1 借助扫描电镜对试样断口拍照,在标有比例尺的照片上按照图 13 和图 14 在九个位置测量临界伸张区宽度(SZW)。扫描电镜照片的示例如图 D.1 所示。



- a 断裂区。
- b 伸张区结束。
- c 伸张区开始。
- d 疲劳区。

图 D.1 典型伸张区宽度的测量

扫描电镜照片的放大倍数应适当调整,使得在一个独立的视场里能够看清楚伸张区的开始和结束(见图 D.2)。



- a 疲劳裂纹。
- b 伸张区。
- c 稳定裂纹扩展。
- d 与疲劳裂纹平面平行的图像平面。
- e 伸张区开始。
- f 伸张区结束。
- g 断口裂纹。

图 D.2 Δa_{szw} 的测定

在九点测量每点的伸张区宽度,并至少重复测量五次,取五次的平均值。

$$\Delta a_{szw,L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta a_{szw,i} \dots\dots\dots (D.1)$$

其中 $k=5$ 。

D.1.2 临界伸张区的宽度为九点测量值的平均值;因此

$$\Delta a_{szw} = \frac{1}{9} \times \sum_{L=1}^9 \Delta a_{szw,L} \dots\dots\dots (D.2)$$

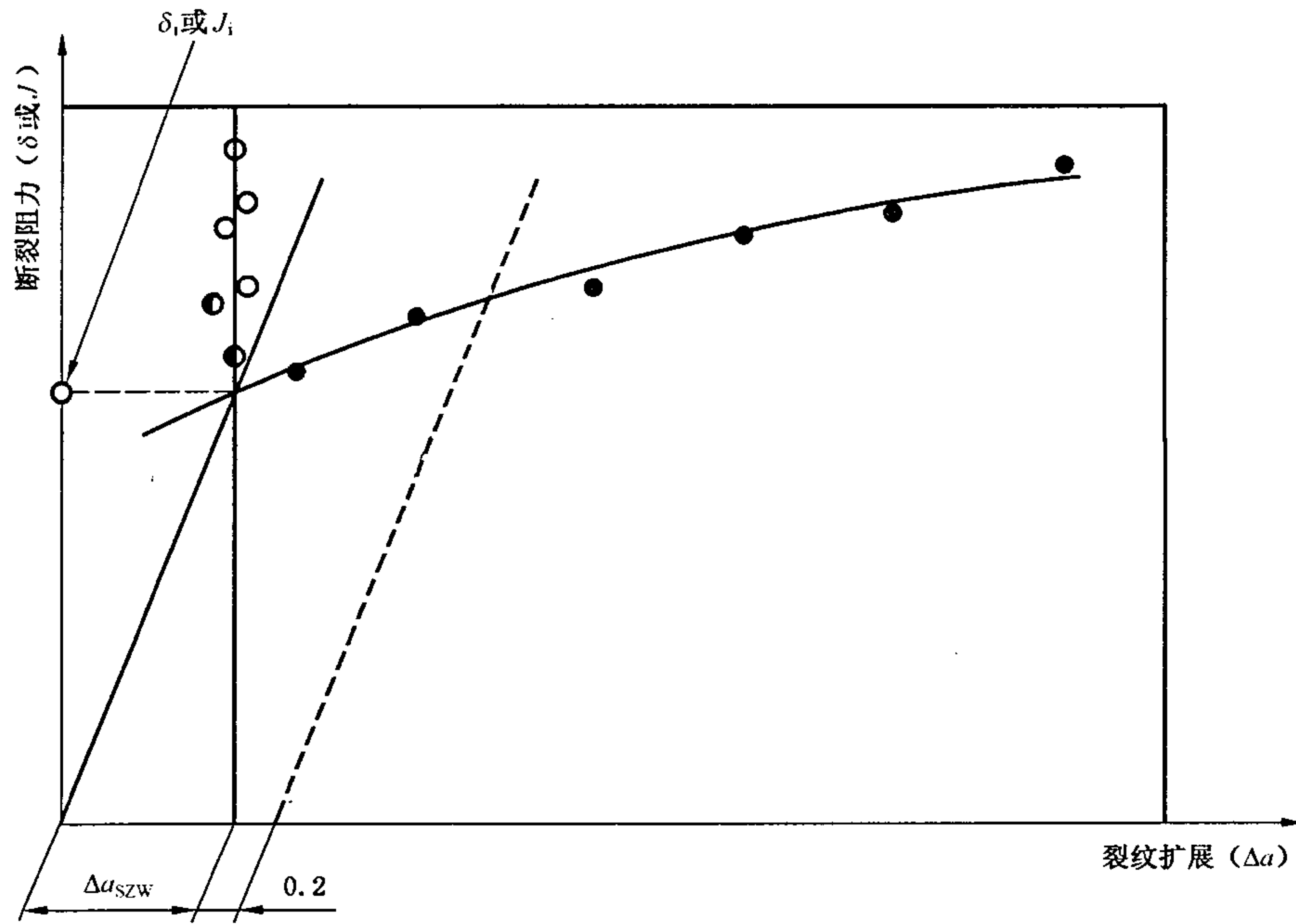
D.1.3 根据 5.8.3 测量的裂纹扩展量 Δa 应大于 $(\Delta a_{szw} + 0.2 \text{ mm})$ 。不满足该项要求的数据点不能用于临界伸张区宽度 Δa_{szw} 的计算。建立 Δa_{szw} 至少需要三个数据点;因此:

$$\Delta a_{szw} = \frac{1}{j} \times \sum_{N=1}^j \Delta a_{szw,N} \dots\dots\dots (D.3)$$

其中 $J=3$ 。

D.2 δ_i 的测定

D.2.1 临界伸张区宽度 Δa_{szw} 应叠加于 $\delta-\Delta a$ 数据图(按 7.3.1 和 5.8.3 得到的)上,如图 D.3 所示。



- δ - Δa 或 J - Δa 数据
- 有效的伸张区宽度数据
- 无效的伸张区宽度数据

图 D.3 δ_i 和 J_i 的测定

D.2.2 平行于 δ 轴通过临界伸张区宽度的平均值作一条直线,如图 D.3 所示。按照 7.4.2.2 描述的方法,用所有横坐标大于 Δa_{szw} 的 δ - Δa 数据点拟合最佳曲线。拟合得到的曲线与平行线的交点定义为 δ_i 。

D.2.3 通过原点和 δ_i 点作一条直线(见图 D.3)。至少应有一个点位于 $(\Delta a_{szw} + 0.2 \text{ mm})$ 偏置线以内。如果 δ_i 超过了按 7.5.1.1 定义的 δ_{max} ,则按照附录 D 方法测定的 δ_i 无效。

D.2.4 计算按照附录 C 确定的拟合方程在交点 δ_i 的斜率。如果按 D.2.3 得到的钝化线的斜率 $(d\delta/da)_L < 2(d\delta/da)_i$ 。则按照本方法得到的 δ_i 无效。

D.3 J_i 的测定

D.3.1 临界伸张区宽度 Δa_{szw} 应叠加于 J - Δa 数据图(按 7.3.1 和 5.6.2 得到的)上,如图 D.3 所示。

D.3.2 平行于 J 轴通过临界伸张区宽度的平均值作一条直线,如图 D.3 所示。按照 7.4.2.2 描述的方法,用所有横坐标大于 Δa_{szw} 的 J - Δa 数据点拟合最佳曲线。拟合得到的曲线与平行线的交点定义为 J_i 。

D.3.3 通过原点和 J_i 点作一条直线(见图 D.3)。至少应有一个点位于 $(\Delta a_{szw} + 0.2 \text{ mm})$ 偏置线以内。如果 J_i 超过了按 7.5.1.1 测定的 J_{max} ,则按照附录 D 方法测定的 J_i 无效。

D.3.4 计算按照附录 C 确定的拟合方程在交点 J_i 的斜率。如果按 D.3.3 得到的钝化线的斜率 $(dJ/da)_L < 2(dJ/da)_i$ 。则按照本方法得到的 J_i 无效。

附 录 E
(资料性附录)
试验报告实例

注：重要的是试验报告实例的内容而不是格式。

E.1 试样、材料和试验环境

试样标识：

试验员：

日期：

试样

类型(紧凑拉伸或三点弯曲)

试样编号

取向

取样位置

材料

材料名称

材料的形状或状态

试样尺寸

B

= _____ (mm)

B_N

= _____ (mm)

W

= _____ (mm)

a_0/W (标称)

= _____

附加尺寸

跨距

S = _____ (mm)

刀口厚度

Z = _____ (mm)

拉伸性能-疲劳预制裂纹温度
温度

= _____ (°C)

参考温度(R) 测量温度(M)

E (杨氏模量)

= _____ (GPa) _____

ν (泊松比)

= _____

$R_{p0.2}$ (非比例延伸强度)

= _____ (MPa) _____

R_m (抗拉强度)

= _____ (MPa) _____

拉伸性能-试验温度
温度

= _____ (°C)

参考温度(R) 测量温度(M)

E (杨氏模量)

= _____ (GPa) _____

ν (泊松比)

= _____

$R_{p0.2}$ (非比例延伸强度)

= _____ (MPa) _____

R_m (抗拉强度)

= _____ (MPa) _____

预裂纹

疲劳温度

= _____ (°C)

最后的 K_I

= _____ (MPam^{1/2})

最后的 F_f = _____ (kN)
 最后的 K_f/E = _____ ($m^{1/2}$)
 试验信息
 位移控制类型 _____ (行程/ 缺口张开量)
 位移速率 _____ (mm/min)
 试验温度 _____ ($^{\circ}C$)

E.2 数据条件

裂纹长度测量信息: 试样编号 _____
 a_0 平均初始裂纹长度* _____ (mm)
 $a_0 - a_m$ 平均疲劳预制裂纹长度* _____ (mm)
 a 平均裂纹扩展量* _____ (mm)
 $a_0 + a$ 平均最后裂纹长度* _____ (mm)
 * 见 5.8。

表 E.1 裂纹测量表

点	位置/mm	预裂纹长度/mm	Δa /mm
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

估计裂纹长度
 $a_{0,est}$ 估计疲劳裂纹长度 _____ (mm)
 $a_{f,est}$ 估计最后裂纹长度 _____ (mm)
 断口形貌
 发生解理断裂记录 _____ (是/否)
 断裂表面特征记录

pop-in 信息
 试样类型 _____
 $\Delta F/F$ _____
 Q_1 _____
 F_i _____
 C_1 _____

E.4 K_Q 成为 K_{Ic} 的判定条件

F_{max}	= _____	(kN)
$R_{p0.2}$	= _____	(MPa)
F_Q	= _____	(kN)
K_Q	= _____	(MPam ^{1/2})
a_0	= _____	(mm)
B	= _____	(mm)
$W - a_0$	= _____	(mm)
$2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$	= _____	(mm)

要求 (见 8.3):

- a) 数据需要符合 8.2 的要求;
- b) $2.5(K_Q/R_{p0.2}) = a_0$;
- c) $2.5(K_Q/R_{p0.2}) = B$;
- d) $2.5(K_Q/R_{p0.2}) = (W - a_0)$;
- e) $F_{max}/F_Q = 1.10F_{max}$ 为试样所受的最大力;
- f) $K_I < 0.6K_Q$ (预裂纹温度下的 $R_{p0.2}$ /试验温度下的 $R_{p0.2}$);

如果满足所有条件: $K_{Ic} =$ _____ (MPam^{1/2})

E.5 δ -R 曲线的判定条件

a_0	= _____	(mm)
B	= _____	(mm)
$W - a_0$	= _____	(mm)

幂乘拟合方程 $\delta = \alpha + \beta \Delta a^\gamma$ 系数:

$\alpha =$ _____
$\beta =$ _____
$\gamma =$ _____

$\delta_{max} = B/30, a_0/30$ 或 $(W - a_0)/30$ 取其中最小者 _____ (mm)

$\Delta a_{max} = 0.25(W - a_0)$ _____ (mm)

δ_g (由 δ_{max} 及 Δa_{max} 决定的有效范围) _____ (mm)

测量的最后裂纹扩展量
(使用单试样法时) _____ (mm)

计算的最后裂纹扩展量
(使用单试样法时) _____ (mm)

计算最后裂纹长度的误差百分率 _____ (%)

要求 (见 8.6):

- a) 数据需要符合 8.2 的要求;
- b) δ -R 曲线的适用边界由 δ_g 决定。

如果满足所有的要求, 则用本方法拟合的 δ -R 曲线在 δ_g 范围内有效。

E.6 J-R 曲线的判定条件

a_0	_____	(%)
B	_____	(mm)
$W - a_0$	_____	(mm)

幂乘拟合方程 $J = \alpha + \beta \Delta a^\gamma$ 系数:

$\alpha =$ _____

$\beta =$ _____

$\gamma =$ _____

$J_{\max} = a_0 [(R_{p0.2} + R_m)/40]$ 、 $B [(R_{p0.2} + R_m)/40]$ 、 $(W - a_0) [(R_{p0.2} + R_m)/40]$ 取其中最小者
_____ (kJ/m²)

$\Delta a_{\max} = 0.1(W - a_0)$

_____ (mm)

J_g (由 J_{\max} 及 Δa_{\max} 决定的有效范围)

_____ (kJ/m²)

测量的最后裂纹扩展量

(使用单试样法时)

_____ (mm)

估计的最后裂纹扩展量

(使用单试样法时)

_____ (mm)

计算最后裂纹长度的误差百分率

_____ (%)

要求(见 8.7):

a) 数据需要符合 8.2 的要求;

b) J - R 曲线的适用边界由 J_g 决定。

如果满足所有的要求,则用本方法拟合的 J - R 曲线在 J_g 范围内有效。

E.7 $\delta_{Q0.2BL(B)}$ 成为 $\delta_{0.2BL}$ 的判定条件

$R_{p0.2}$ _____ (MPa)

R_m _____ (MPa)

$\delta_{Q0.2BL(B)}$ _____ (mm)

$30\delta_{Q0.2BL(B)}$ _____ (mm)

拟合线在 Δa_Q 点的斜率 _____ (MPa)

$(W - a_0)$ _____ (mm)

测量的最后裂纹扩展量

(使用单试样法时)

_____ (mm)

估计的最后裂纹扩展量

(使用单试样法时)

_____ (mm)

试样数或数据点(使用单试样法时)

指数规律的拟合公式 $J = \alpha + \beta \Delta a^\gamma$ 系数:

$\alpha =$ _____

$\beta =$ _____

$\gamma =$ _____

要求(见 7.6.1):

a) 数据要求满足 8.2 的要求;

b) 钝化线 0.2 mm 偏置线与曲线交点的切线斜率 $d\delta/da$ 应小于 $0.935(R_m/R_{p0.2})$;

c) $30\delta_{0.2BL} \leq a_0$;

d) $30\delta_{0.2BL} \leq B$;

e) $30\delta_{0.2BL} \leq (W - a_0)$ 。

如果满足所有的要求: $\delta_{0.2BL} =$ _____ (mm)

E.8 $J_{Q0.2BL}$ 成为 $J_{0.2BL}$ 的判定条件

a_0 _____ (mm)

B _____ (mm)

$(W - a_0)$	_____	(mm)
$R_{p0.2}$	_____	(MPa)
R_m	_____	(MPa)
$J_{Q0.2BL}$	_____	(kJ/m ²)
$(R_{p0.2} + R_m)/2$	_____	(MPa)
拟合线在 Δa_Q 点的斜率	_____	(MPa)
$40J_Q(R_{p0.2} + R_m)$	_____	(mm)
测量的最后裂纹扩展量 (使用单试样法时)	_____	(mm)
估计的最后裂纹扩展量 (使用单试样法时)	_____	(mm)
试样数或数据点(使用单试样法时)	_____	
幂乘拟合方程 $J = \alpha + \beta \Delta a^\gamma$ 系数:	$\alpha =$ _____	
	$\beta =$ _____	
	$\gamma =$ _____	

要求(见 7.6.2):

- a) 数据需要满足 8.2 的要求;
- b) 钝化线 0.2 mm 偏置线与曲线交点的切线斜率 dJ/da 应小于 $1.875R_m$;
- c) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) \leq a_0$;
- d) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) \leq B$;
- e) $40J_{0.2BL}/(R_{p0.2} + R_m) \leq (W - a_0)$ 。

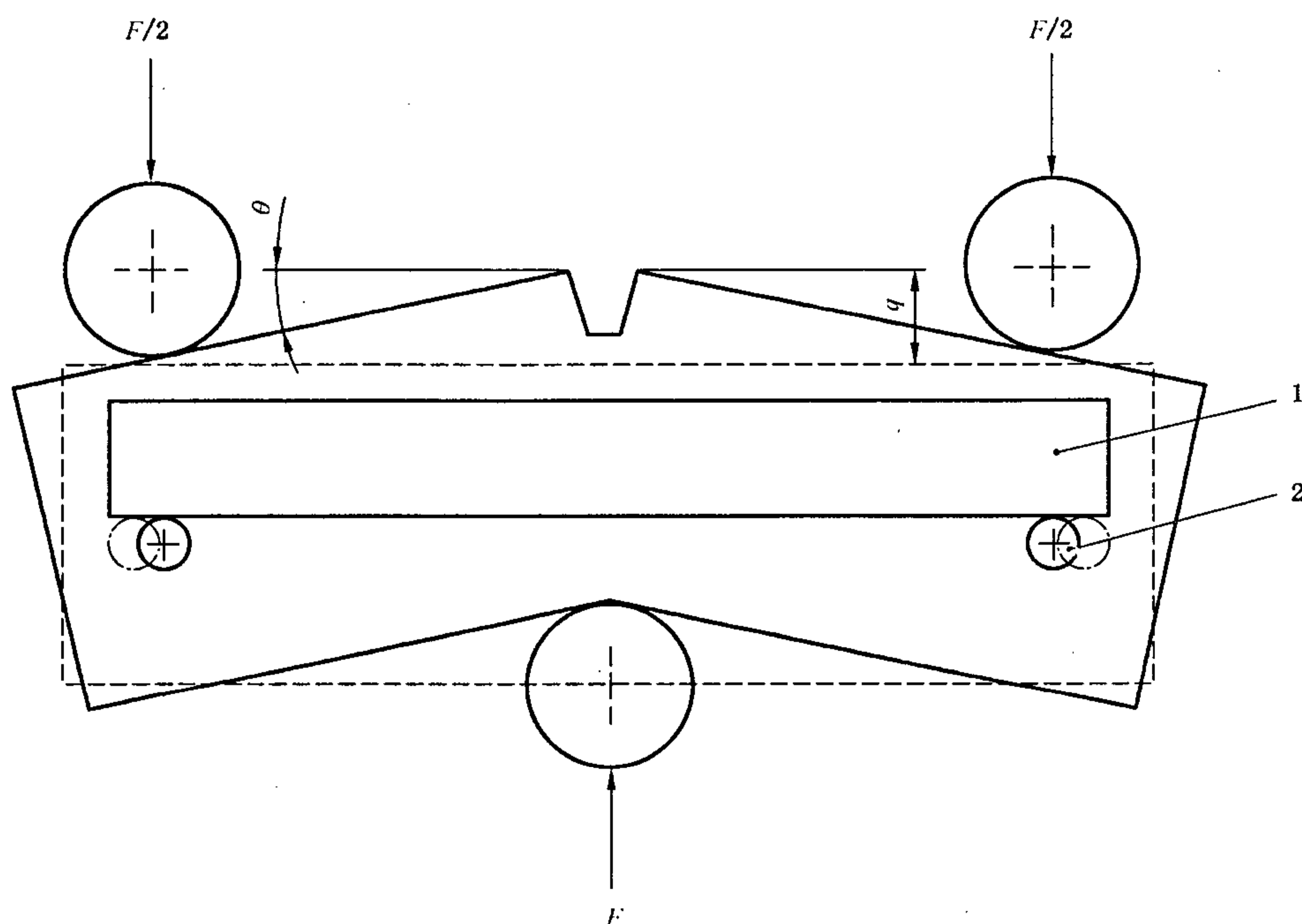
如果满足所有的要求: $J_{0.2BL} =$ _____ (kJ/m²)

附录 F
(资料性附录)

在三点弯曲试验中的施力点位移 q 的测量

有一种确定 K_{IC} 值的方法(见 6.2)及确定 J 值的一般方法(见 6.4)中需要用到施力点位移 q 的测量;然而,对于三点弯曲试样想要直接获得施力点位移量是很困难的。困难来源于将试样的真实施力点位移与在三点弯曲加载中试样的弹性位移及试验夹具的弹性位移区分开来。这些外来的位移量是附加的。所以设备的内部位移、横梁位移或其他的测量试样和试验机之间的位移量,全部高于真实的施力点位移量。多出来的部分与试样的材料、试验条件和温度、加载速率、试样的尺寸、夹具及试验机等因素有关。

获得施力点位移的唯一方法是直接测量试样上适当点的位移量。藉由测量试样加载点之上的中性轴处的固定点与试样裂纹顶端点之间的垂直距离可以达到这一目的。在试验中这种做法是相反的。将水平比较器做成的棒用于测量其与裂纹缺口或顶端点的垂直距离,如图 F.1 所示。

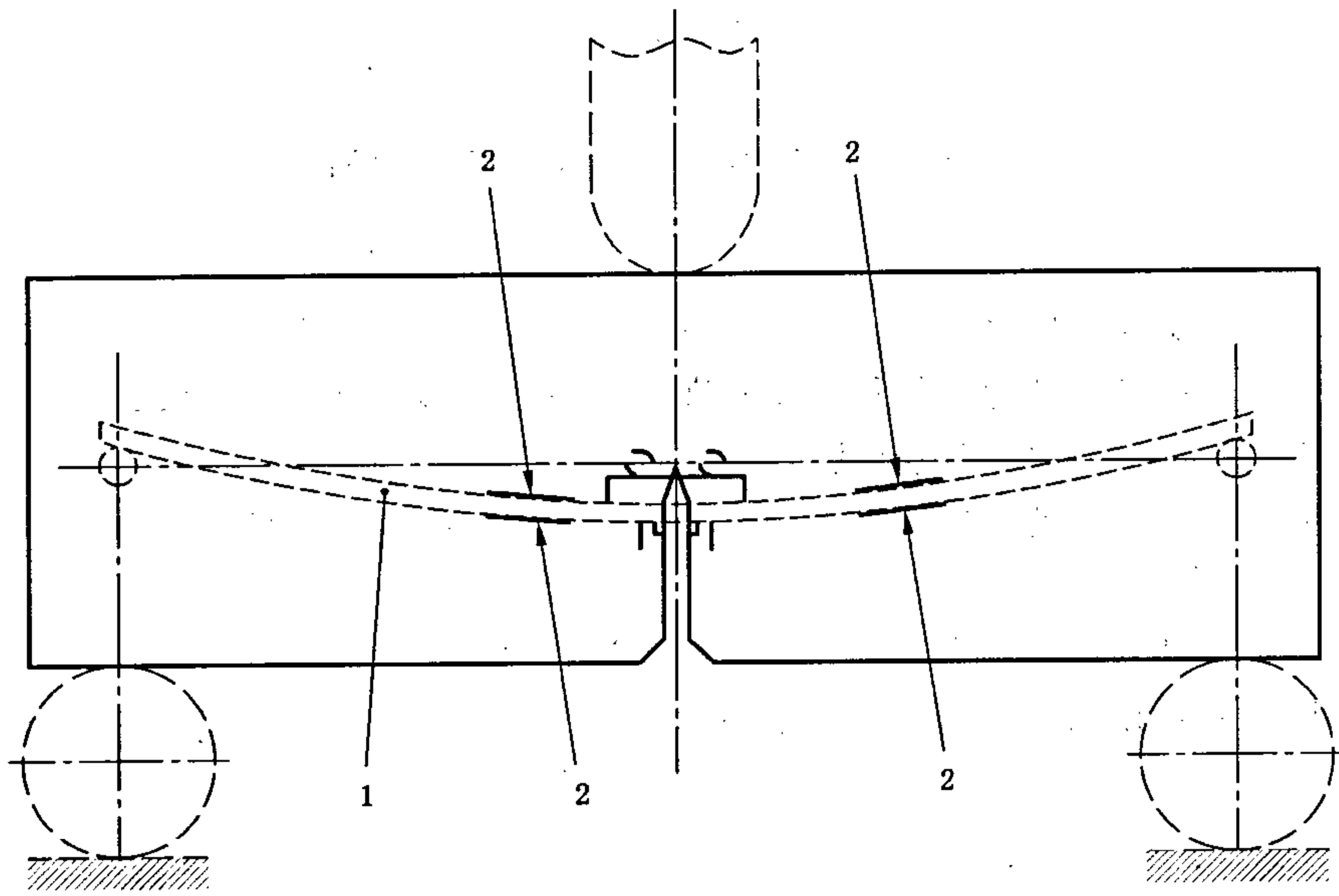


- 1——比较器;
2——销钉。

图 F.1 用比较器测量的原理

注:采用上述测量结果(见图 F.1)表示施力点位移 q 时其准确度应高于 $\pm 2\%$ 且 q 应不大于 $0.14W$ 以保证裂纹的总张开角度 θ 不大于 8° 。

一种用于直接测量施力点位移的可选设备弯曲杆如图 F.2 所示。四臂桥式应变片安装于厚度为 0.50 mm 到 0.75 mm 的弯曲杆上保证传感器给出准确度为 $\pm 2\%$ 且不大于 $0.14W$ 的 q 值。



1—弯曲杆。
2—应变片。

图 F.2 三点弯曲静力试验弯曲杆及试样支撑系统图

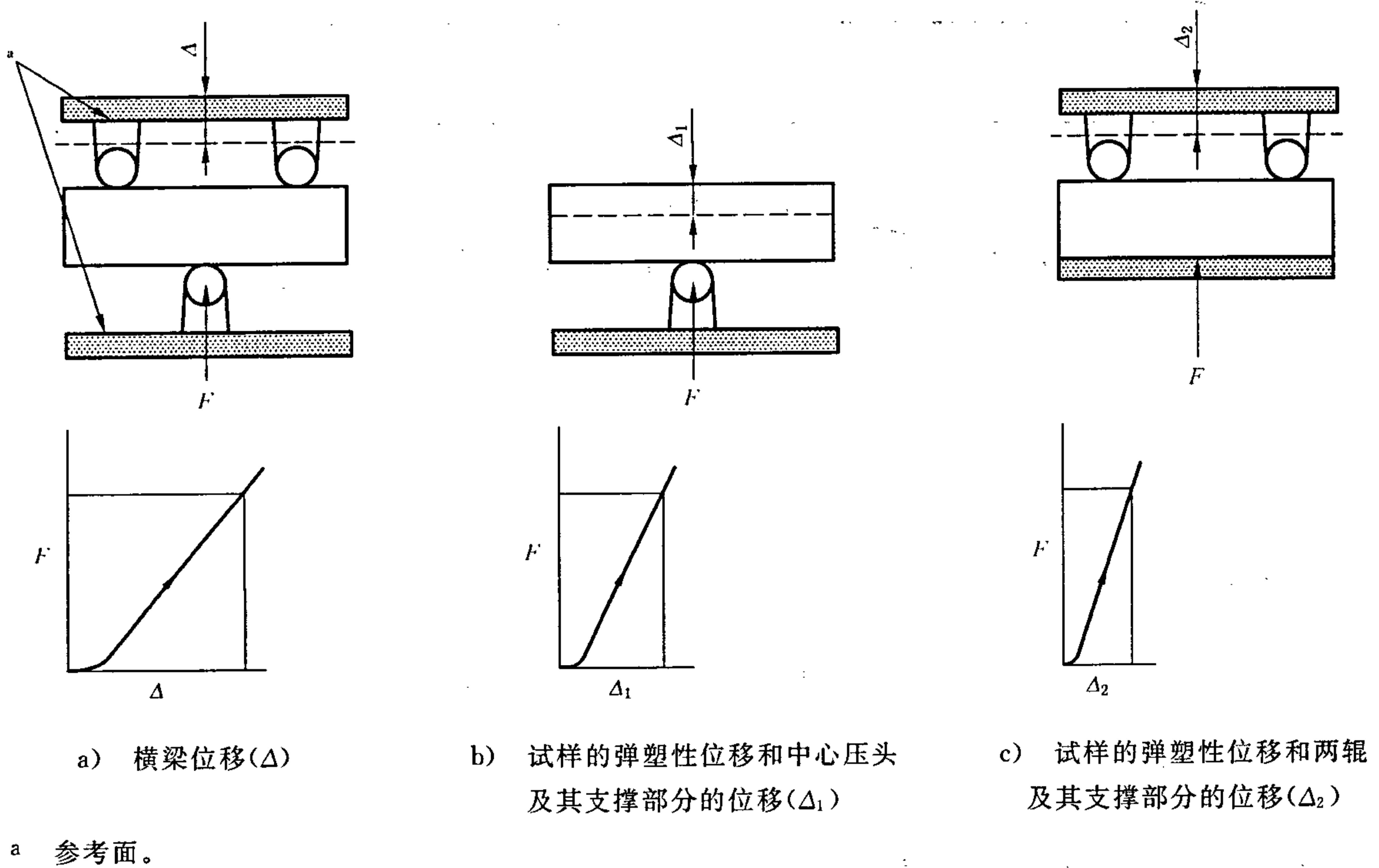
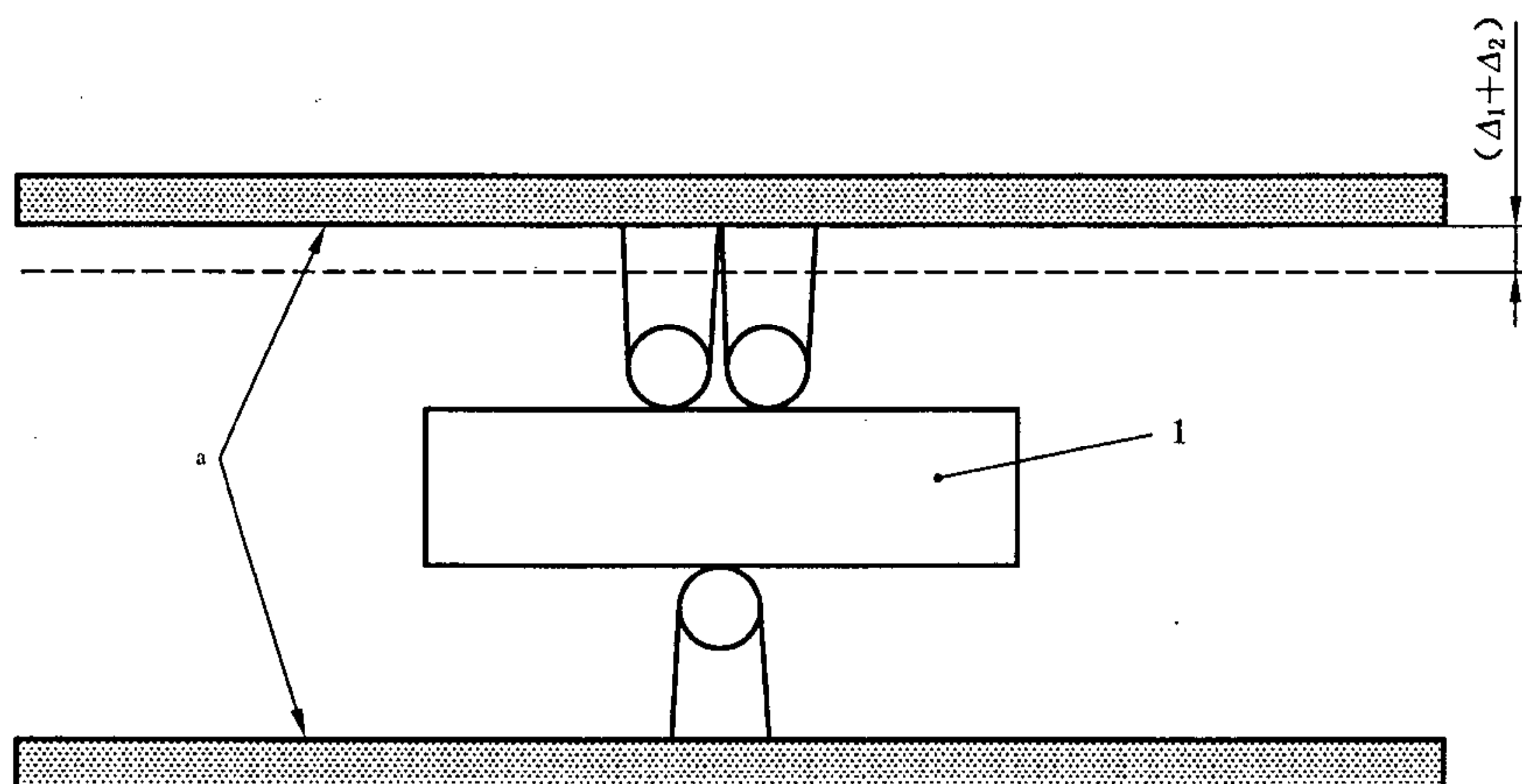


图 F.3 三点弯曲试样的相关位移



1——无裂纹试样。

a 参考面。

图 F.4 同时发生的附加位移的测定($\Delta_1 + \Delta_2$)

对于试验结束于最大力点或在此之前的情况,可按如下步骤间接测量施力点位移:

- 分别测量外来位移量,然后在总的位移量中将其扣除。因此,根据图 F.3,在任意力 F 下施力点位移 $q = \Delta - \Delta_1 - \Delta_2$ 。附加位移 $\Delta_1 + \Delta_2$ 的测定方法为将受力点靠在一起测量,如图 F.4 所示。
- 加载的无裂纹试样应与预裂纹试样有着相同的几何尺寸及材料,为了从间接施力点位移测量中确定系统柔度,加载大小应高于预期的试样断裂力。无裂纹试样柔度的计算应利用弹性公式,等于总施力点柔度减去机架及夹具的柔度。机架及夹具的柔度是由后来断裂试验中的间接施力点柔度减去断裂试验中获得的施力点柔度 q/F ,于是得到施力点位移。

注:当超过最大力时,上述的间接方法需要对测量的 q 进行修正。

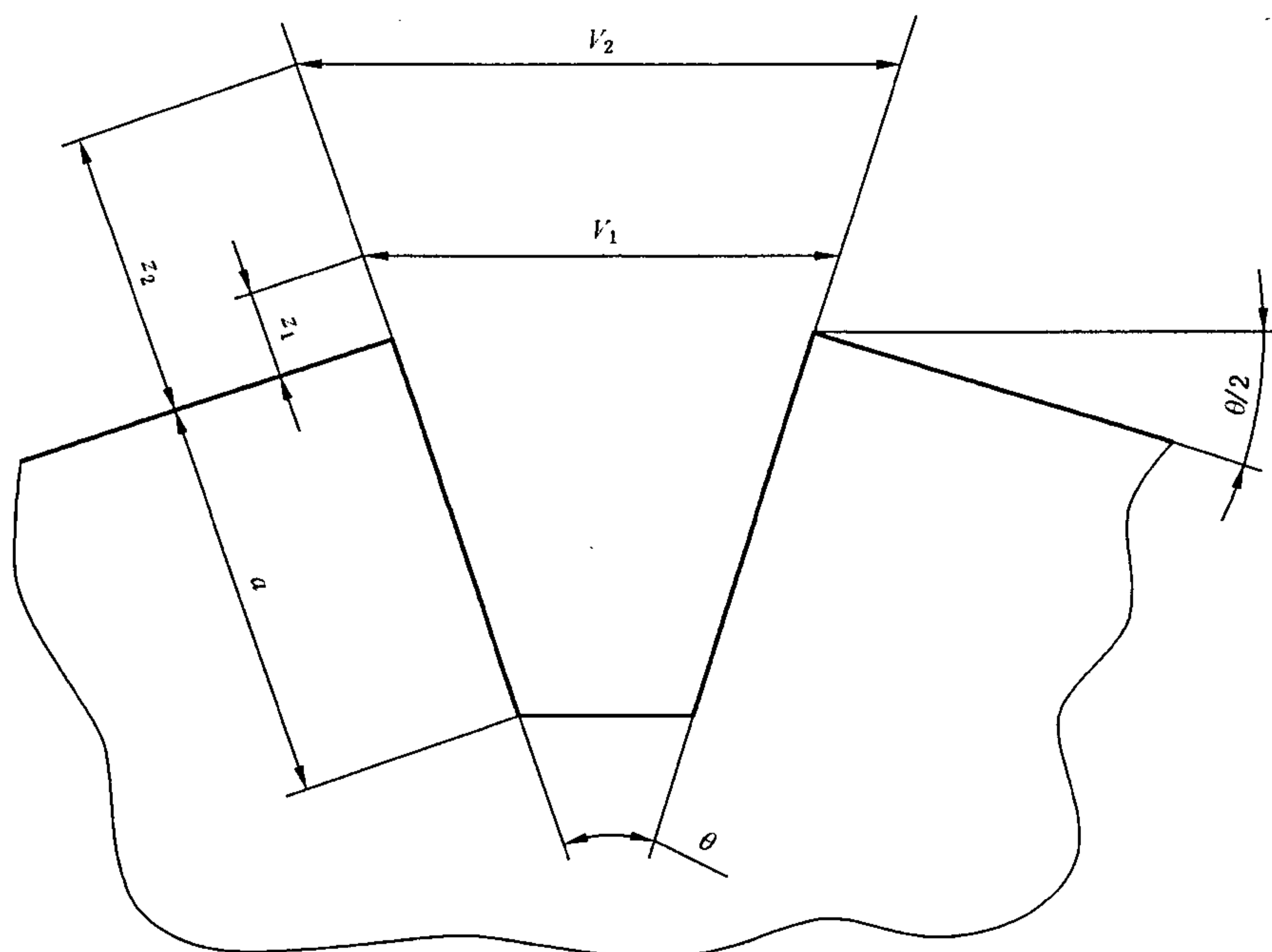


图 F.5 确定施力点位移的二种缺口张开位移测量(V_1 和 V_2)位置

另外,可以选择间接测量施力点位移的方法,这一方法适用于达到最大力前后施力点位移的测算。分两部分独立且同时测量缺口张开位移,将一引伸计置于靠近裂纹嘴的位置,另一个置于裂纹嘴上方

(见图 F.5),则施力点位移由下式计算:

$$q = \frac{S(V_2 - V_1)}{4(z_2 - z_1)} \dots\dots\dots(F.1)$$

注:式(F.1)假设三点弯曲试样的变形是两个刚性部分围绕一个中心的旋转,且跨距是固定的(尽管它在试验过程中可能改变)。在这些情况之下,当裂纹嘴张开角度 $\theta < 8^\circ$ 时,式(F.1)计算的 q 可能偏小。当裂纹嘴张开角度 $\theta \geq 8^\circ$ 时,施力点位移可由下式计算:

$$q = \frac{S}{2} \tan \left\{ \arcsin \left[\frac{V_2 - V_1}{2(z_2 - z_1)} \right] \right\} \dots\dots\dots(F.2)$$

附录 G
(资料性附录)
pop-in 方程的推导

根据图 G.1, 及相似三角形 OAD 和 OBC, 可以得到下式:

$$AD = BC \times \frac{OD}{OC} = \frac{Q_1(F_n - y_n)}{(Q_n + x_n)} \dots\dots\dots(G.1)$$

而且

$$\Delta F_n = F_1 - AD = F_1 - \frac{Q_1(F_n - y_n)}{(Q_n + x_n)} \dots\dots\dots(G.2)$$

因此

$$\frac{\Delta F_n}{F_1} = 1 - \frac{Q_1(F_n - y_n)}{F_1(Q_n + x_n)} \dots\dots\dots(G.3)$$

如果

$$\frac{\Delta F_n}{F_1} = P \dots\dots\dots(G.4)$$

那么

$$P = 1 - \frac{Q_1(F_n - y_n)}{F_1(Q_n + x_n)} \dots\dots\dots(G.5)$$

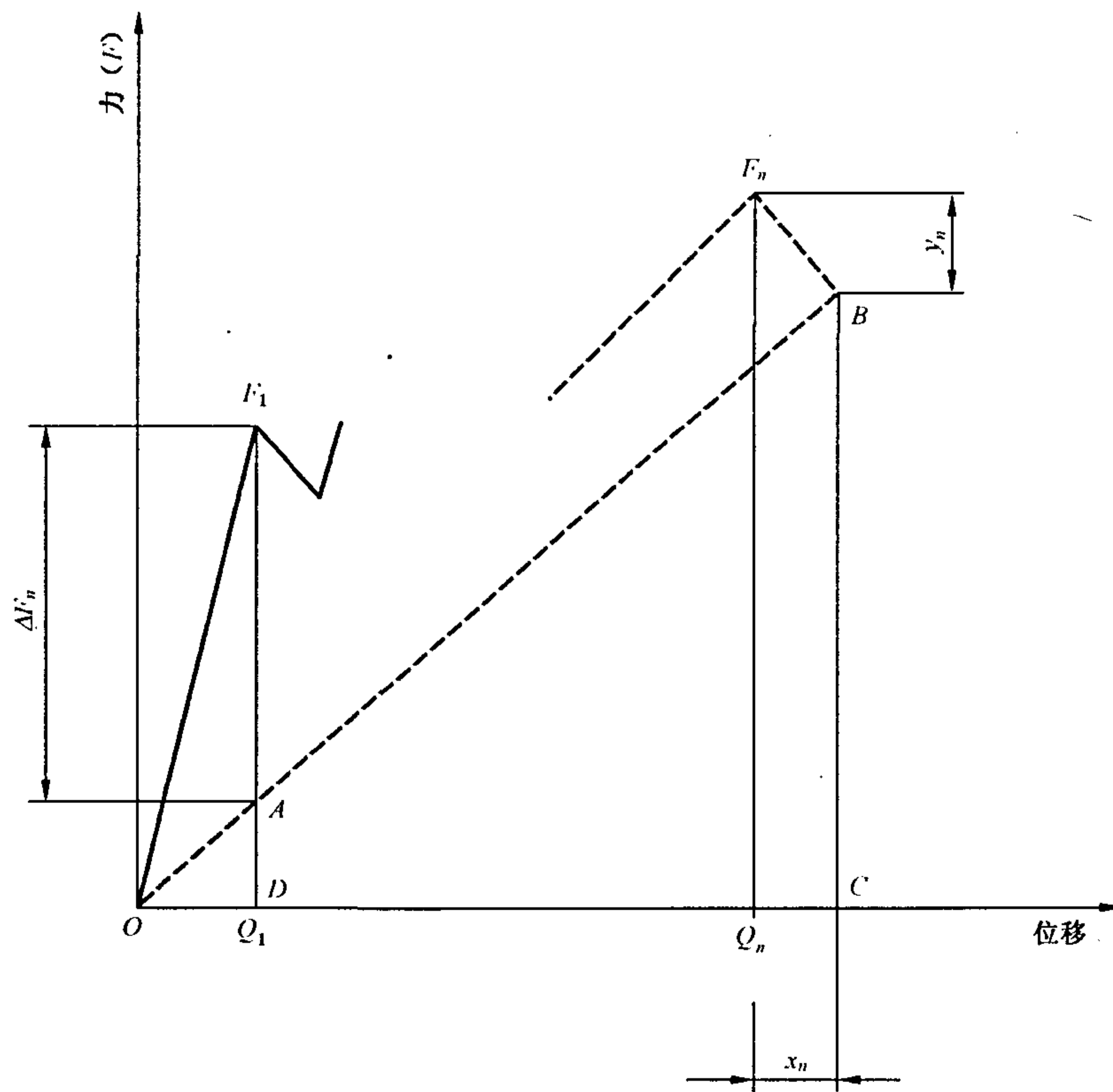


图 G.1 力与多个 pop-in 弹性位移的曲线

附录 H
(资料性附录)
确定 V_p 及 U_p 的分析方法

H.1 概述

这一分析方法建立在弹性柔度理论的基础上。

H.2 塑性位移 V_p

塑性位移 V_p (见图 17) 是由在一定的力 F 下所产生的总缺口张开位移 V_g 按式 H.1 关系决定:

$$V_p = V_g - V_e \quad \dots\dots\dots(\text{H.1})$$

式中 V_e 由式 H.2~式 H.4 给出:

a) 三点弯曲单边裂纹试样, 且 $S=4W$

$$\text{对于 } \frac{z}{a} \leq 0.2 \quad V_e = V_{M1} \left[1 + \left(\frac{z}{0.8a + 0.2W} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{H.2})$$

式中 V_{M1} 由式(B.3)给出。

b) 直通型缺口紧凑拉伸试样

$$\text{对于 } \frac{z}{a} \leq 0.2 \quad V_e = V_{M2} \left[1 + \left(\frac{z}{0.8a + 0.2W} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{H.3})$$

式中 V_{M2} 由式(B.4)给出。

c) 台阶型缺口紧凑拉伸试样

$$\text{对于 } \frac{z}{a} \leq 0.2 \quad V_e = q_{e2} \left[1 + \left(\frac{z}{0.8a + 0.2W} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{H.4})$$

式中 q_{e2} 由式(B.6)给出。

H.3 塑性区域 U_p

塑性区域 U_p (见图 18) 是由在一定比率的力下所产生的总区域 U 按式 H.5 关系决定:

$$U_p = U - U_e \quad \dots\dots\dots(\text{H.5})$$

式中 U_e 由式 H.6~式 H.7 给出:

a) 三点弯曲试样;

$$U_e = \frac{Fq_{e1}}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{H.6})$$

式中 q_{e1} 由式(B.5)给出。

b) 台阶型缺口紧凑拉伸试样;

$$U_e = \frac{Fq_{e2}}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{H.7})$$

式中 q_{e2} 由式(B.6)给出。

附录 I
(资料性附录)
单试样法指南

I.1 概述

本附录指导的对试样裂纹扩展的测量是建立在卸载柔度和电压降技术的基础上的。

借助卸载柔度技术,试验过程中在特定的时间间隔,试样部分卸载然后再加载。卸载线的斜率趋于线性并且不受先前的塑性变形的影响,通过分析弹性柔度,该斜率用于估算每次卸载时的裂纹长度。试样的柔度取决于缺口张开柔度或施力点柔度,裂纹长度的计算公式如下所示。如果在其他适当点测量位移,那么要使用相应的柔度系数。对于三点弯曲试样,用施力点位移测量的柔度被用于计算 J 积分值。建议使用安装在裂纹嘴张开位置的引伸计计算裂纹长度。传感器的非线性可能导致柔度测量的错误。通过标定数据对曲线函数最低级多项式的调整可以显著改进测量准确度。

电势技术是建立在当裂纹扩展时裂纹附近的电压分布会发生变化的事实上的。通过适当的仪器,可以监测和校准电压的变化用来计算裂纹长度的增加。应用的电压是直流的或交流的分别用 D. C 或 A. C 来表示。

这两种技术都适用于计算机控制以及随后的试验数据分析。因而,要注意的是要想充分了解这两种技术就必须依靠详细的试验方法及成熟的试验设备。

通过准确的试验设备测定的有效试验数据点可以组成一条裂纹扩展阻力曲线。数据点的分布如 7.4.2 中所述。

I.2 卸载柔度技术

以下提供了几种裂纹长度计算所用到的卸载柔度技术。

弹性柔度 C 由在试验过程中每次(第 k 次)卸载/再加载的数据通过下式计算出来:

$$C_k = \left(\frac{\Delta q}{\Delta F} \right)_k \quad \dots\dots\dots (I.1)$$

式中 q 指适当的位移。

每次卸载的裂纹长度 a_k 通过测量的柔度 C_k 利用理论或经验公式确定。

$$(a/W)_k = f(C_k) \quad \dots\dots\dots (I.2)$$

数据的记录和部分卸载的计算需要通过计算机或记录仪完成。

I.3 试验建议

注:下列附加的项目有助于获得高质量的单试样数据。

I.3.1 柔度测量

传感器的非线性可能导致柔度测量的误差。通过标定数据对曲线函数最低级多项式的调整可以显著改进测量精度。

I.3.2 数字信号的分辨力

对于卸载柔度的测量,数字位移量的分辨力 Δq 应高于:

$$\Delta q = \frac{W'R_{p0.2}}{500E} \quad \dots\dots\dots (I.3)$$

式中 W' 为 50 mm 或是试样的宽度取其中小者。

相关的数字力的分辨力 ΔF 应高于:

$$\Delta F = \frac{BW'R_{p0.2}}{15\,000} \dots\dots\dots (I.4)$$

对于绝大多数的试验一个 16 位的模拟-数字转换器就可以达到试验要求了。它可以对数字化的力和位移信号进行放大从而获得满意的水平。

在试验期间,数字化的力和位移信号的波动要在 $4\Delta F$ 和 $4\Delta q$ 之内。最大的干扰信号应小于 $\pm 2\Delta F$ 和 $\pm 2\Delta q$ 。

I.3.3 记录信号的分辨力

当从 X-Y 图直接测量卸载柔度时,记录笔在两个轴向上的最大位移量均应大于 100 mm。在试验期间,记录笔的波动应在 ± 3 mm 之内。

I.4 程序

I.4.1 预循环

建议在试验开始之前,在试验温度下,在试样的弹性段内对试样循环加载几次以消除间隙。在此过程中施加力的最大值不能超过预制疲劳裂纹最后阶段的力值。

用低于 5.4.2.4.3 或 5.4.2.4.4 中规定的允许最大疲劳预制裂纹力的力测量卸载柔度,至少 3 次。计算的裂纹长度与平均值的偏差不能大于 $0.002W$ 。循环卸载/再加载的最大范围不能超出用于测量的前 3 次卸载实际最大力的 50%。

在低载条件下,由于裂纹的闭合效应而引起的力-位移记录的非线性将被排除在柔度计算之外。

I.4.2 加载速率

在卸载/再加载时的加载速率应尽可能的快,以使时间效应减到最小,但是要能够采集充足的数据以保证试样柔度计算的精确度。如果可能,在卸载/再加载循环时的加载速率应不低于试验阶段的加载速率。建议在每次卸载前,位移应保持一定的时间直到由时间效应引起的塑性力松弛的影响消失。

I.4.3 裂纹长度的测量

在选定的位移间隔对试样进行部分卸载再加载,确保获取数据的位置点均匀。通常对于确定裂纹扩展的断裂阻力行为,为了满足 7.4.2 中提出的数据间隔的要求,30 次卸载就足够了。建议卸载范围尽可能的大,但不能超过按照 5.6.2 计算的最大力 F_L 的 25% 或目前力的 50%,取其中小者。

每次卸载,裂纹长度 a 和 J 都要按照 I.5 和 7.3 给出的公式进行计算。对于计算机试验系统,对已记录数据进行拟合分析得到柔度。

I.4.4 试验的终止

在最后一次卸载后,试验力应当降到零,确保位移没有进一步的增加。按照 5.8 的方法确定稳定裂纹扩展长度。

试样在等于或低于室温的温度下打开用于观察断裂表面,测量初始裂纹长度 a_0 ,按照 5.8 的方法测量总裂纹扩展量。

I.5 裂纹长度计算

I.5.1 三点弯曲试样:试样表面缺口张开位移(CMOD)柔度

可以根据试样表面测量的缺口张开位移通过下式计算试样的柔度 C 对应的裂纹长度:

$$a/W = 0.999\,748 - 3.950\,4\mu + 2.982\,1\mu^2 - 3.214\,08\mu^3 + 51.515\,6\mu^4 - 113.031\mu^5 \dots\dots\dots (I.5)$$

式中:

$$\mu = \frac{1}{\left[\left(\frac{4W}{S}\right)B_e\lambda EC\right]^{1/2} + 1} \dots\dots\dots (I.6)$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B;$$

$$\text{系数 } \lambda = \frac{g_3(a_0/W)}{g_3(a_{0,\text{est}}/W)} \quad \dots\dots\dots(\text{I.7})$$

式中:

a_0 ——按照 5.8.2 测量的原始裂纹长度;

$a_{0,\text{est}}$ ——按照式(I.5)计算的原始裂纹长度。

系数 $g_3(a/W)$ 由附录 B 获得。

系数 λ 用于纠正在卸载柔度试验过程中发生的不确定性。系数 λ 与 1 的差值不能大于试样卸载柔度的 10%，否则试验无效。

I.5.2 三点弯曲试样:施力点位移柔度

对于 $S/W=4$ 可以根据施力点位移通过下式计算试样的柔度 C 对应的裂纹长度:

$$a/W = 0.9874 - 3.625\mu - 13.98\mu^2 + 94.52\mu^3 - 327.8\mu^4 \quad \dots\dots\dots(\text{I.8})$$

式中:

$$\mu = \frac{1}{[B_e \lambda EC]^{1/2} + 1};$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B;$$

$$\text{系数 } \lambda = \frac{g_5(a_0/W)}{g_5(a_{0,\text{est}}/W)}; \quad \dots\dots\dots(\text{I.9})$$

式中:

a_0 ——按照 5.8.2 测量的原始裂纹长度;

$a_{0,\text{est}}$ ——按照公式(I.8)计算的原始裂纹长度。

系数 $g_5(a/W)$ 由附录 B 获得。

系数 λ 用于纠正在卸载柔度试验过程中发生的不确定性。系数 λ 与 1 的差值不能大于试样卸载柔度的 10%，否则试验无效。

I.5.3 紧凑拉伸试样:施力点位移柔度

可以根据施力点位移通过下式计算试样的柔度 C 对应的裂纹长度:

$$a/W = 1.000196 - 4.06319\mu + 11.242\mu^2 - 106.043\mu^3 + 464.335\mu^4 - 650.677\mu^5 \quad \dots\dots\dots(\text{I.10})$$

式中:

$$\mu = \frac{1}{[B_e \lambda EC]^{1/2} + 1}; \quad \dots\dots\dots(\text{I.11})$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B;$$

$$\text{系数 } \lambda = \frac{g_6(a_0/W)}{g_6(a_{0,\text{est}}/W)}; \quad \dots\dots\dots(\text{I.12})$$

式中:

a_0 ——按照 5.8.2 测量的原始裂纹长度;

$a_{0,\text{est}}$ ——按照公式(I.10)计算的原始裂纹长度。

系数 $g_6(a/W)$ 由附录 B 获得。

系数 λ 用于纠正在卸载柔度试验过程中发生的不确定性。系数 λ 与 1 的差值不能大于试样卸载柔度的 10%，否则试验无效。

I.5.4 紧凑拉伸试样的旋转修正

为了计算在加载过程中发生的试样几何形状的变化,对测量的施力点柔度进行旋转修正公式如下:

$$C_c = \frac{C}{\left[\left(\frac{h}{r} \sin\theta - \cos\theta \right) \left(\frac{D}{r} \sin\theta - \cos\theta \right) \right]} \quad \dots\dots\dots(\text{I.13})$$

式中：

C_c ——旋转修正后的柔度；

C ——测量的柔度；

h ——两销孔中心(见图 4 和图 5)原始距离的一半；

r ——由公式 $r = \frac{W+a}{2}$ 计算的旋转半径,式中 a 为当前的裂纹长度；

θ ——由公式 $\theta = \arcsin\left[\left(\frac{q}{2} + D\right)/(D^2 + r^2)^{1/2}\right] - \arctan\left(\frac{D}{r}\right)$ 计算的旋转角度；

D ——测量点原始位移距离的一半；

q ——总的施力点位移。

I.6 裂纹扩展的阻力

I.6.1 概述

在理想状态下,裂纹扩展时对应的阻力是裂纹长度的单调递增函数(见图 I.1)。然而,卸载柔度技术不总是出现这种理想化的结果。差异包括原始裂纹长度计算的正、负偏差、数据的分散,明显的裂纹负增长。试验夹具的问题、传感器引伸计的固定、杂波以及信号的非线性都会使得试验结果变差。

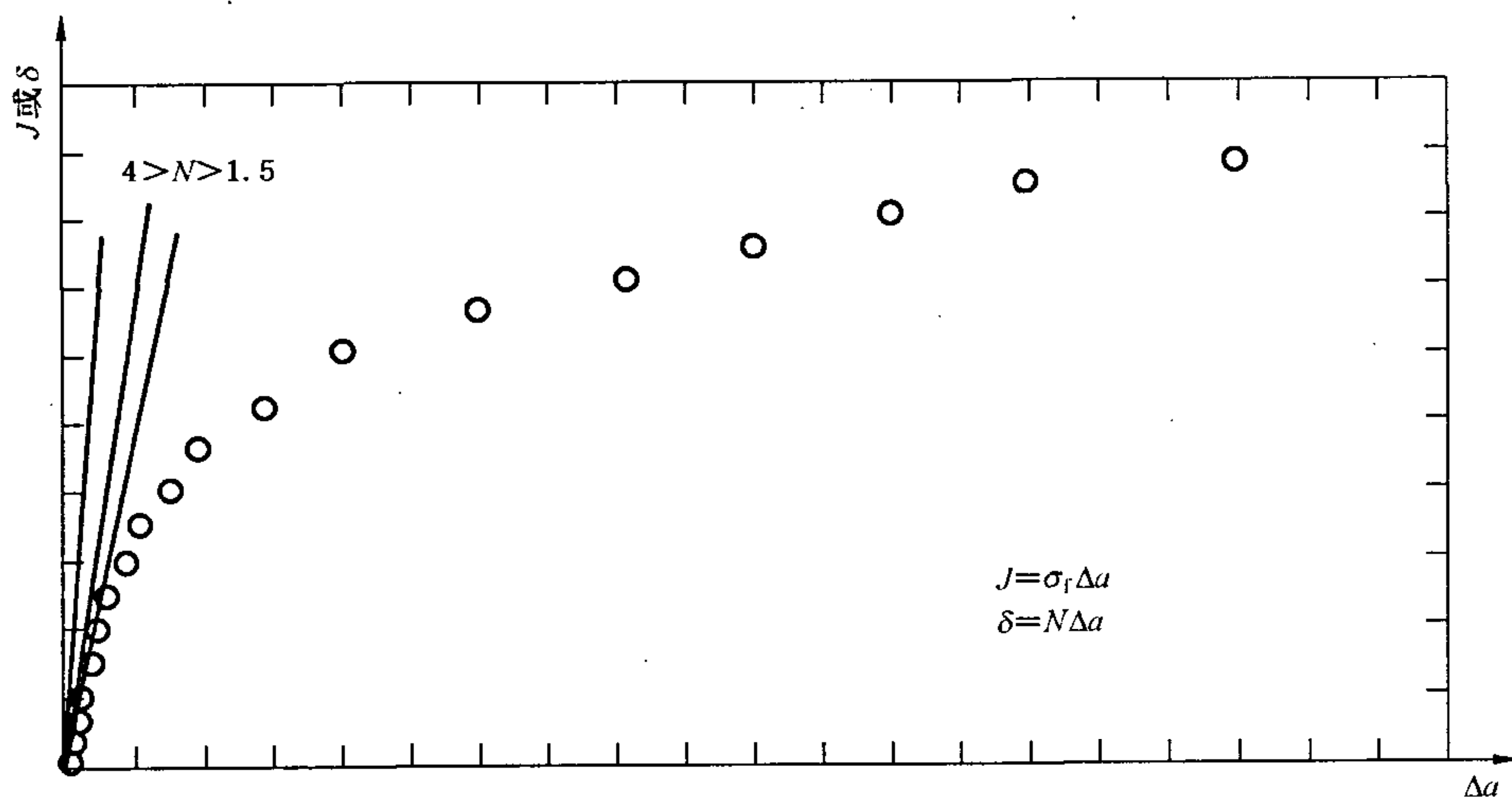


图 I.1 理想的裂纹扩展断裂阻力图

I.6.2 初始裂纹长度的估计

估计的裂纹长度 a 与 δ 或 J 的曲线图如图 I.2 所示。

按照式

$$a_k = A_0 + A_1 \delta_k + A_2 \delta_k^2 + A_3 \delta_k^3 \quad \dots\dots\dots (I.14)$$

其中 $0 \leq A_1 \leq 1/1.4$ 或

$$a_k = A_0 + A_1 J_k + A_2 J_k^2 + A_3 J_k^3 \quad \dots\dots\dots (I.15)$$

其中 $0 \leq A_1 \leq 1/(R_m + R_{p0.2})$

将最小 a_k 到最小 $a_k + 2$ mm 的估计值带入上式并用最小二乘法进行处理,如果得到的 $A_1 < 0$,则取 $A_1 = 0$ 并重新进行处理;如果得到的 $A_1 > 1/1.4$ (对于 δ)或 $A_1 > 1/(R_m + R_{p0.2})$ (对于 J),则取 $A_1 = 1/1.4$ (对于 δ)或 $A_1 = 1/(R_m + R_{p0.2})$ (对于 J)并重新进行处理。经过上述处理,得到初始裂纹长度的估计值 $a_{0,est} = A_0$ 。如果这一初始裂纹长度 $a_{0,est}$ 与用于计算 δ 或 J 的初始裂纹长度的偏差大于 2%,则 δ 或 J 的值需要按照 7.3 式带入新的初始裂纹长度 $a_{0,est}$ 重新计算。

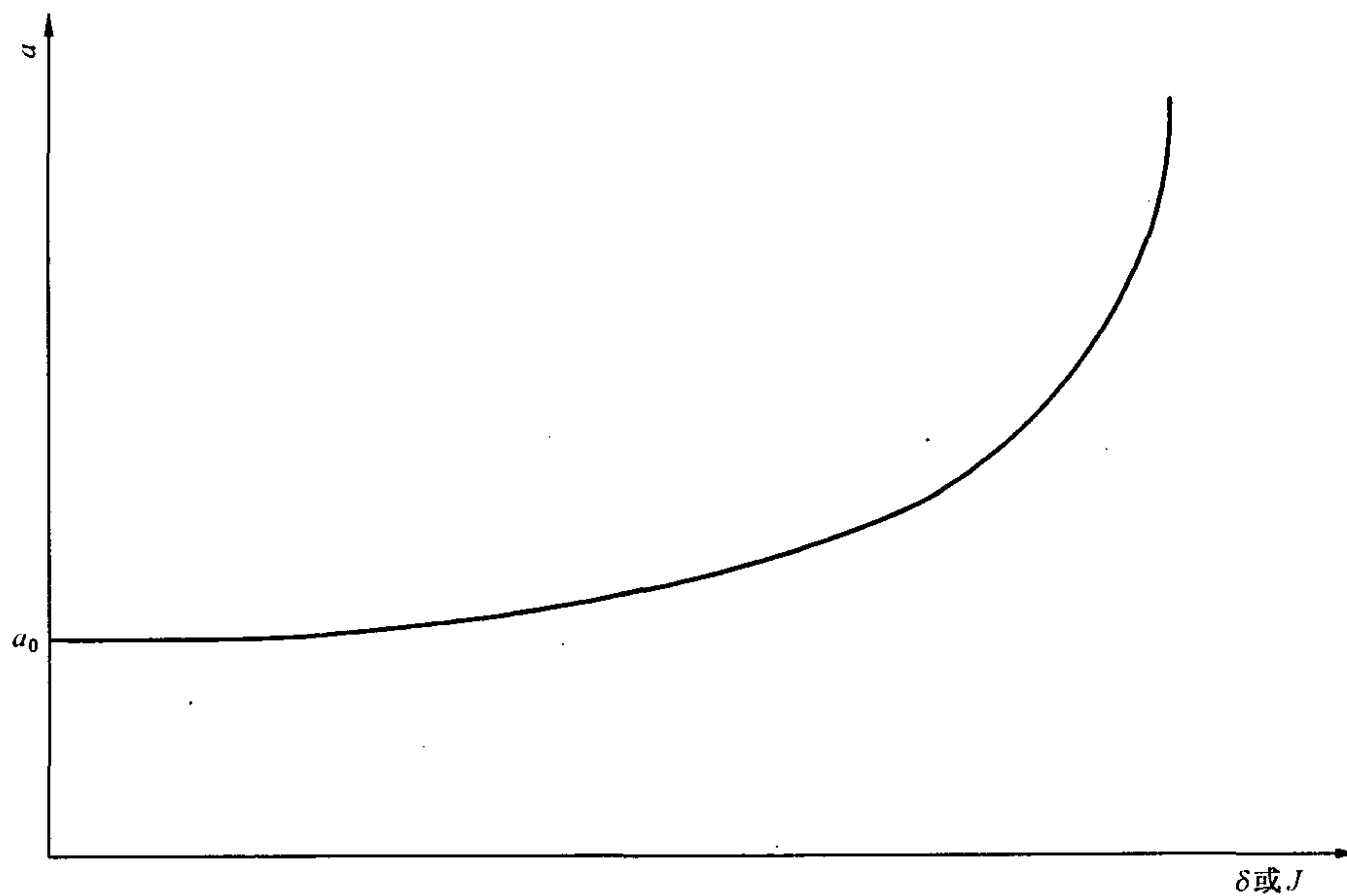


图 I.2 在单试样断裂试验中计算裂纹长度 a 与 δ 或 J 的典型图
(用式(I.14)及(I.15)计算)

I.6.3 裂纹扩展的计算

用下式计算第 k 次卸载时的裂纹扩展量 Δa_k :

$$\Delta a_k = a_k - a_{0,est} \dots\dots\dots (I.16)$$

I.6.4 阻力曲线

建立计算裂纹扩展量 Δa_k 和 δ 或 J 的曲线图。

I.7 电位法

I.7.1 交流电压法

典型的交流电压试验系统见图 I.3。这是一种间接的技术。在这种系统中试验试样压降的测定需要与具有相同几何尺寸的参考试样相对比。

本方法只能用于最小电压变化也能被测试到的情况(见图 I.4),这个最小的电压对应初始裂纹长度 a_0 。

按照 5.7 和 5.8 中所述对试样进行加载,试验同时记录力和施力点或缺口张开位移所对应的电压。通常的试验记录形式如图 I.4 所示。

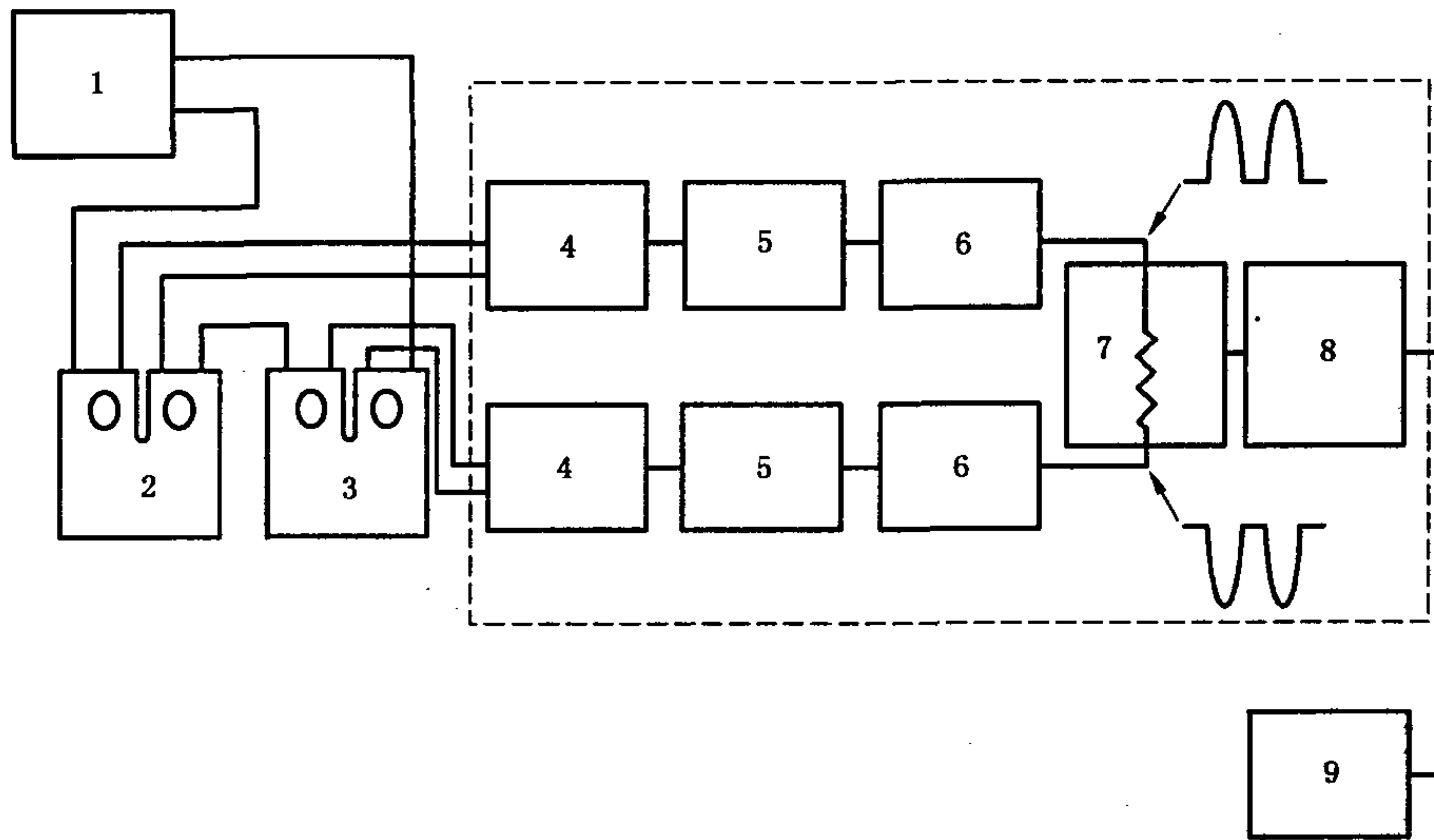
在试验的完成阶段,应在试样破断前,对稳定裂纹伸长区按照 5.8 所述进行标记。

按照 5.8 所述测量初始裂纹长度 a_0 和总裂纹扩展量 Δa 。

依据 7.3 在图 I.4 标记 F_i 点的位置确定 δ_i 或 J_i 的值。

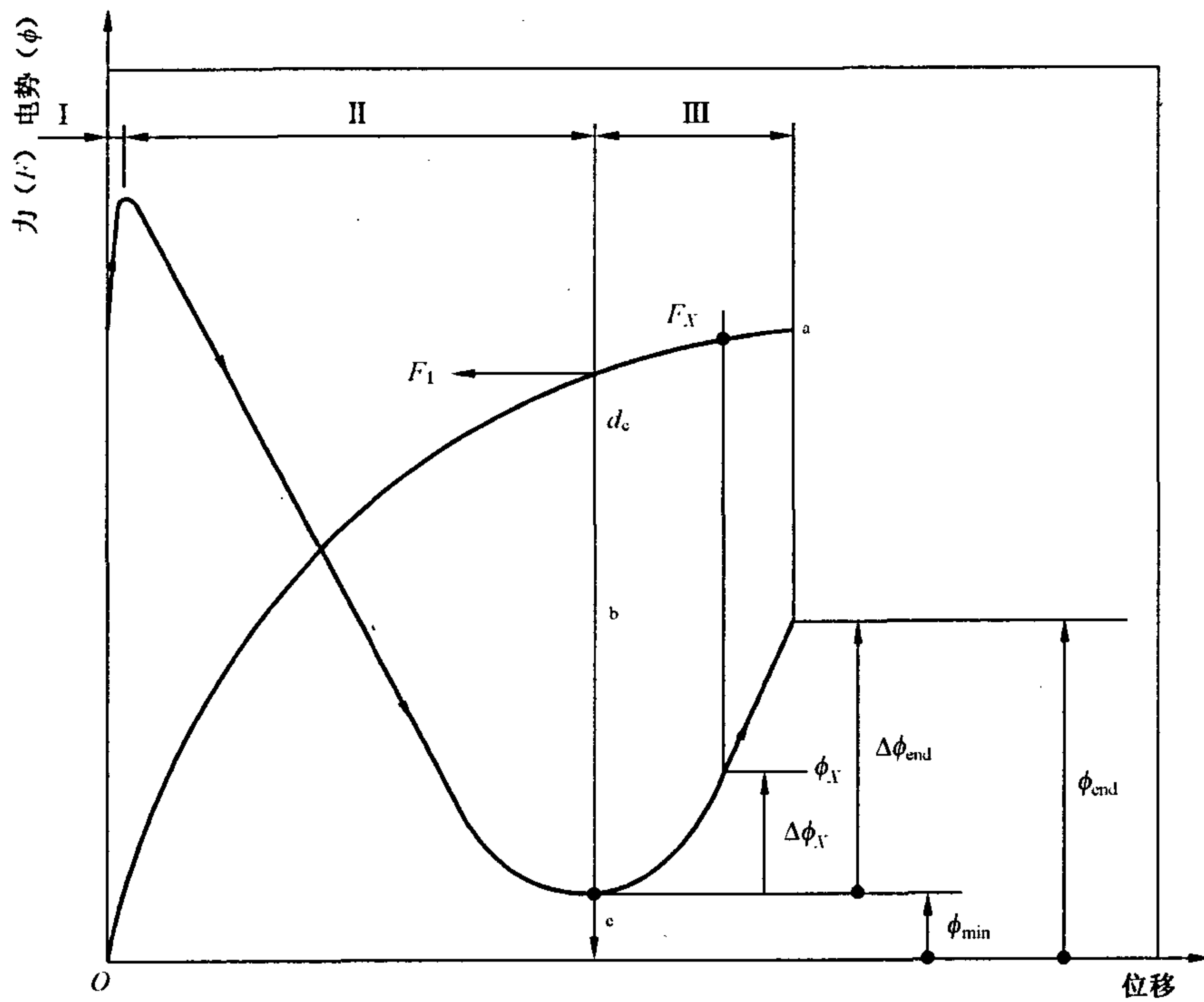
确定临界伸长区的宽度, Δa_{szw} 。见附录 D。

或者用扫描电镜测定临界伸长区的宽度。



- 1——可调电流源; $F=50\text{ Hz}$, $I=20\text{ A}$;
- 2——参考试样;
- 3——试验试样;
- 4——微分放大器;
- 5——双向可选放大滤波器;
- 6——线性探测器;
- 7——计数器;
- 8——输出可调的直流放大器;
- 9——模拟信号记录仪(X-Y 记录仪)。

图 I.3 典型交流压降试验系统



- a 加载终止点。
- b 计算的初始点。
- c 裂纹扩展量。

图 I.4 典型的交流压降试验记录

I.7.2 试验记录的解释

在电压对位移的记录中确定最小能够识别的电压 f_{\min} 。

在 f_{\min} 以及试验结束时的电压 f_{end} 之间的电压变化范围 Δf_{end} 应当被测量。

应建立如图 I.5 所示的总裂纹扩展量与电压变化范围的曲线。

点 $(\Delta a_{\text{SZW}}, \Delta f=0)$ 和 $(\Delta a, \Delta f_{\text{end}})$ 应在图中标出, 在二者间用直线连接(见图 I.5)。它是试样的基准线。

为了在力-位移记录上确定点 F_x 对应的总裂纹扩展量, 应记录 f_{\min} 与 f_x 之间的电压变化范围, 如图 I.4 所示。利用图 I.5 所示的校准线计算总裂纹扩展量 Δf_x 。

利用 7.3 给出的公式计算力 F_x 对应的 δ 或 J 值。应建立 δ 或 J 值与计算裂纹扩展量之间的曲线图。

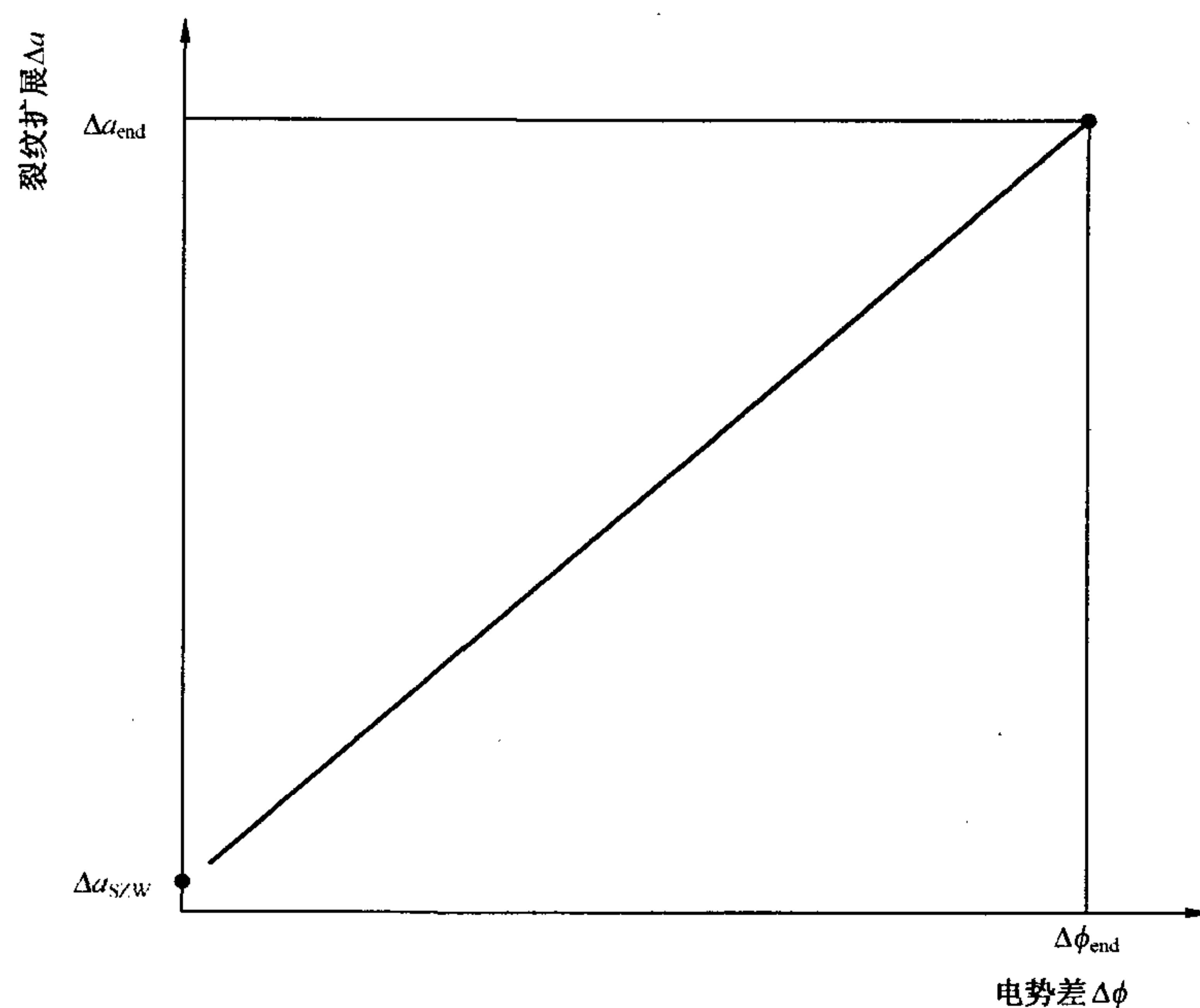


图 I.5 裂纹扩展与电势差对应图

I.8 直流电位法

I.8.1 方法 1

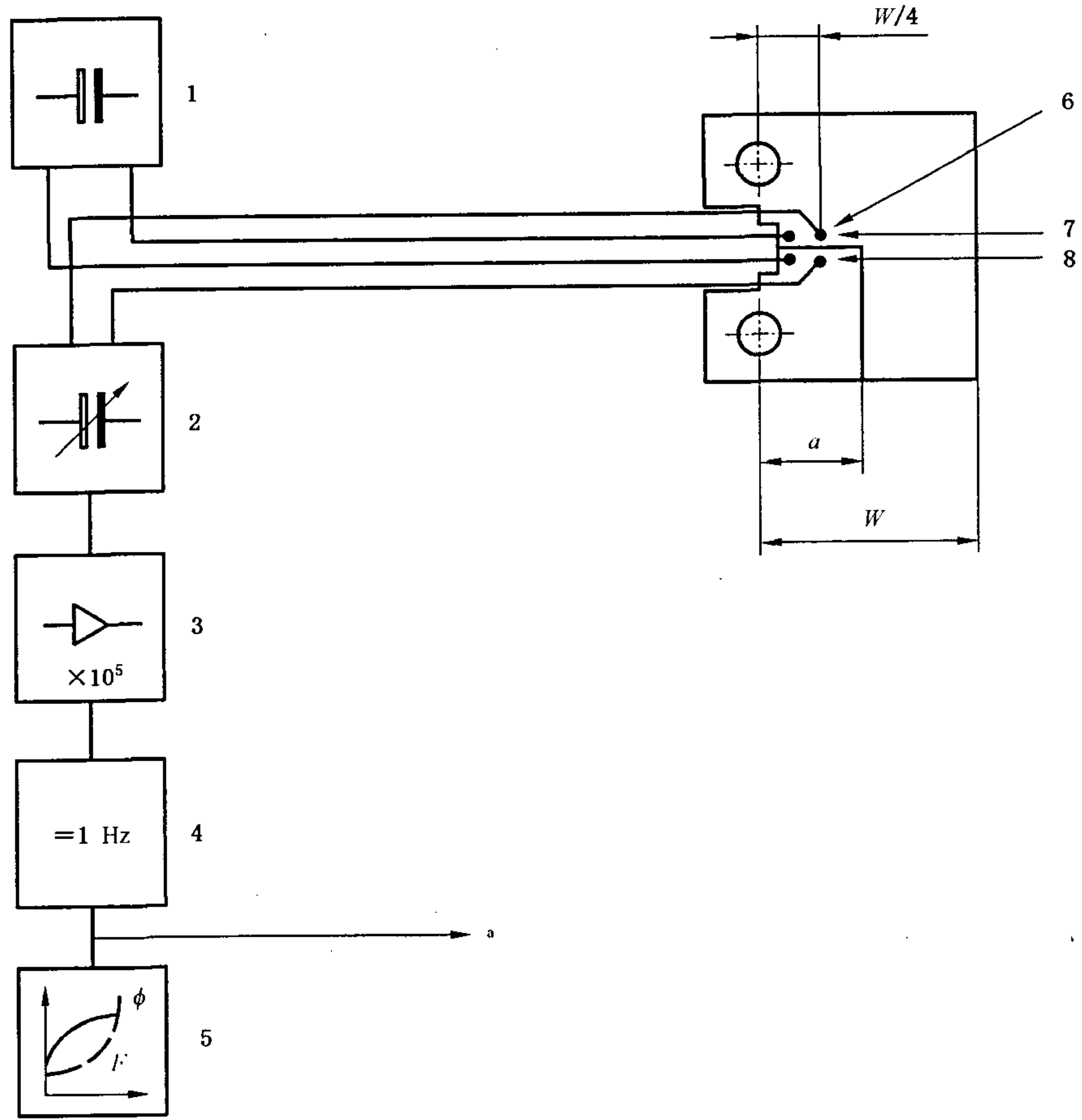
I.8.1.1 程序

典型的应用方法 1 的直流压降试验系统如图 I.6 所示。它是一种间接的测量技术。

按照 5.6 和 5.7 中所述对试样进行加载, 试验同时记录力和施力点或缺口张开位移所对应的电压。通常的试验记录形式如图 I.7 所示。

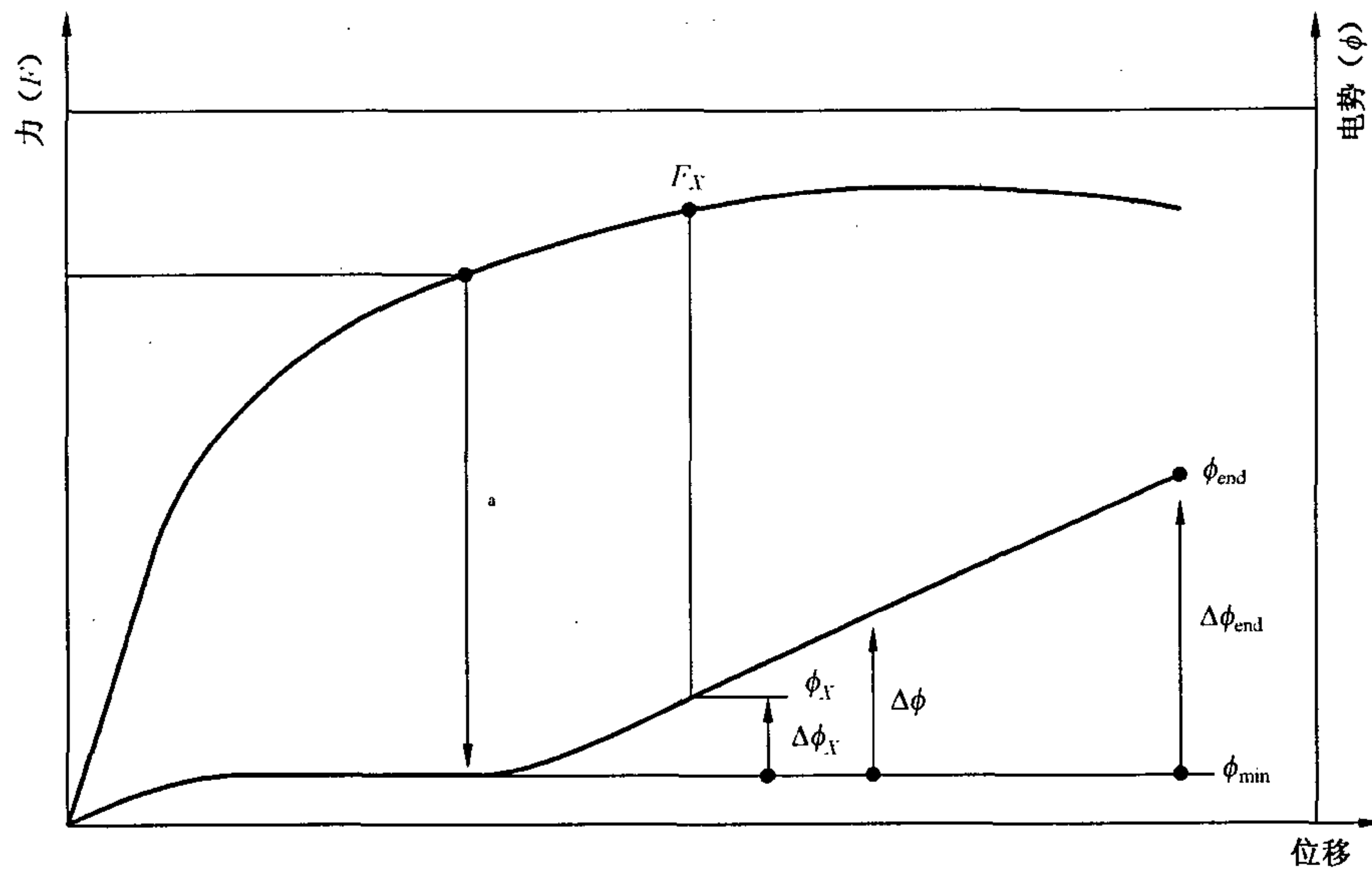
在试验的完成阶段, 应在试样破断前, 对稳定裂纹伸长区按照 5.8 所述进行标记。

按照 5.8 所述测量初始裂纹长度 a_0 和总裂纹扩展量 Δa 。



- 1——直流恒流电源；
- 2——零漂抑制；
- 3——纳伏放大器；
- 4——滤波器；
- 5——记录仪；
- 6——电极；
- 7——前方；
- 8——后方。
- a 数据采集。

图 I.6 典型直流压降试验系统



a 稳定裂纹扩展初始点。

图 I.7 典型直流压降的试验记录系统

I.8.1.2 试验记录的解释

在记录中电压对位移曲线上的斜率的突进点是计算裂纹扩展量的原始点。

如 I.2.1 所述的临界伸长区的宽度 Δa_{szw} 需要测量出来。

在 Δa_{min} 以及试验结束时的电压 Δa_{end} 之间的电压变化范围 Δf_{end} 应当被测量。

应建立如图 I.5 所示的总裂纹扩展量与电压变化范围的曲线。

点 $(\Delta a_{szw}, \Delta f=0)$ 和 $(\Delta a_{end}, \Delta f_{end})$ 应在图中标出, 在二者间用直线连接(见图 I.5)。它是试样的校准线。

为了在力-位移记录上测定点 F_X 所对应的总裂纹扩展量的值, 应记录 f_{min} 与 f_X 之间的电压变化范围, 如图 I.7 所示。利用图 I.5 所示的校准线计算总裂纹扩展量对应的 Δf_X 。

利用 7.3 给出的公式计算力 F_X 对应的 δ 或 J 值。应建立 δ 或 J 值与计算裂纹扩展量之间的曲线图。

I.8.2 方法 2

I.8.2.1 程序

典型的应用方法 2 的直流压降试验系统如图 I.8 所示。它是一种直接计算裂纹长度的技术。

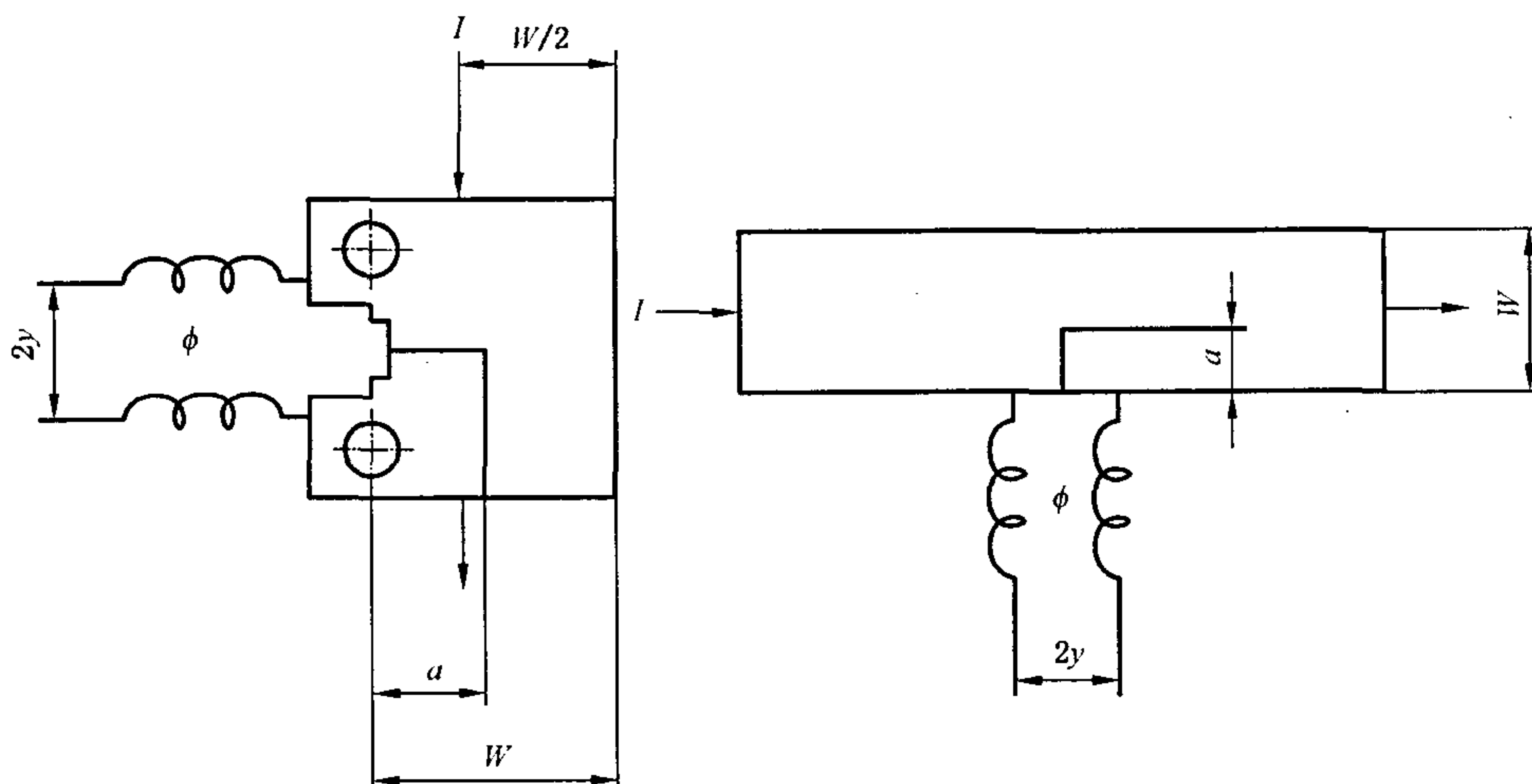
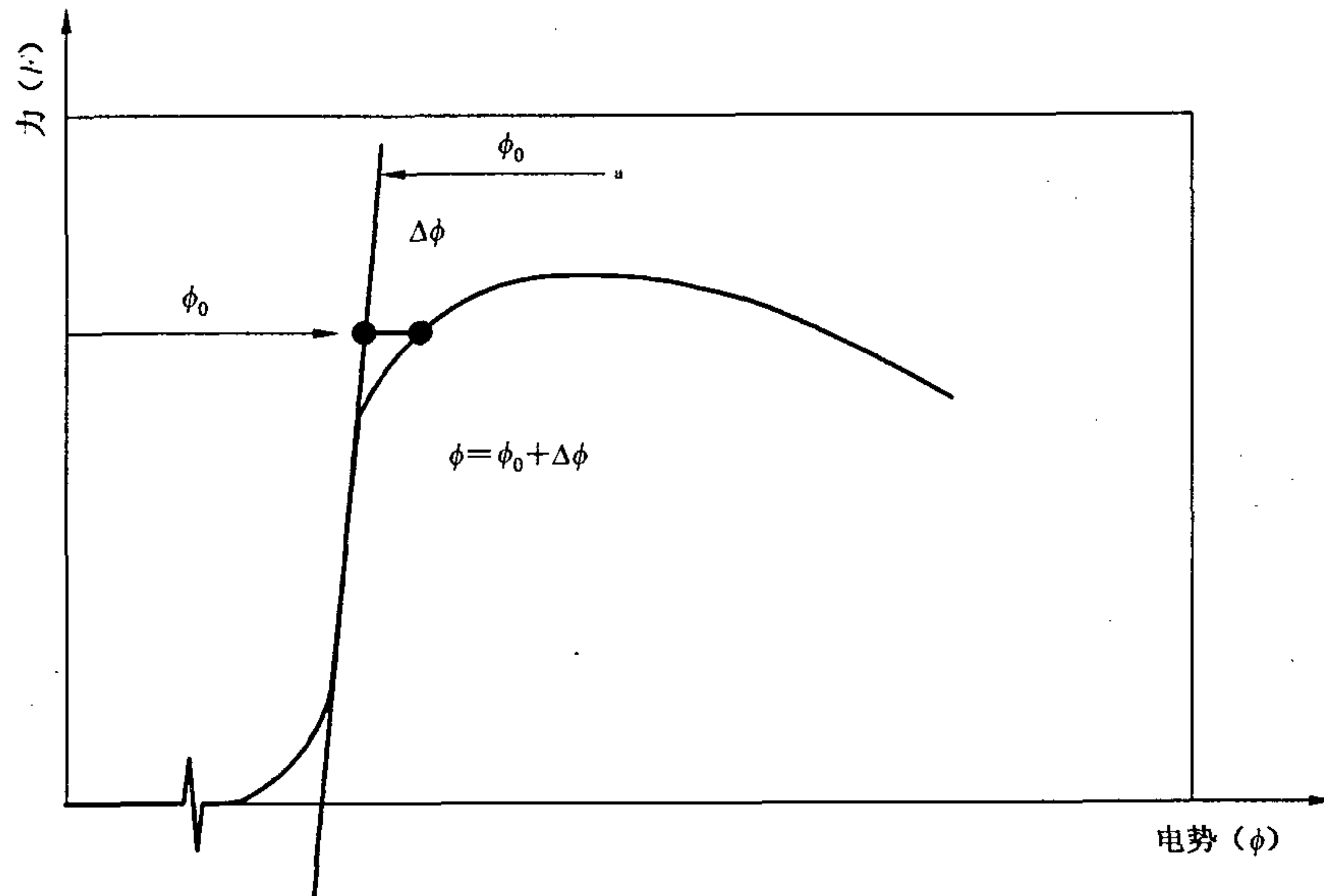


图 I.8 直流压降试验系统

按照 5.6 和 5.7 中所述对试样进行加载, 试验同时记录力及位移所对应的电压。通常的试验记录形式如图 I.9 所示。



a 基准线。

图 I.9 典型直流压降试验记录系统

在试验的完成阶段, 应在试样破断前, 对稳定裂纹伸长区按照 5.8 所述进行标记。按照 5.8 所述测量初始裂纹长度 a_0 和总裂纹扩展量 Δa 。

I.8.2.2 试验记录的解释

在力与电压记录上, 过直线上升部分做一直线如图 I.9 所示。

对于任意的力, 应测量出 ϕ_0 与 $\Delta\phi$, 如图 I.9 所示。且有下列式:

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi \quad \dots\dots\dots(I.17)$$

所选力对应的裂纹长度由下式计算:

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh[(\phi/\phi_0) \cosh^{-1}\{\cosh(\pi y/2W)/\cos(\pi a_0/2W)\}]} \quad \dots\dots\dots(I.18)$$

式中 y 由图 I.8 给出。

对应的裂纹扩展量 Δa 由下式给出

$$\Delta a = a - a_0 \quad \dots\dots\dots(I.19)$$

利用 7.3 给出的公式计算力 F_x 对应的 δ 或 J 值。应建立 δ 或 J 值与计算裂纹扩展量之间的曲线图。

附 录 J
(资料性附录)
剖面法测定 CTOD 值

J.1 术语

J.1.1 伸张区

裂纹尖端钝化所形成的塑性变形区。

J.1.2 剖面

本方法中专指垂直于裂纹面而且包括裂纹在内的试样纵剖面。

J.1.3 δ_{is}

以饱和伸张区高度加上 δ_{is} 所表示的 CTOD 特征值。

J.1.4 δ_e

根据试验力计算的 CTOD 弹性分量：

$$\delta_e = \frac{F^2(1-\mu^2)g^2}{2WB^2R_{p0.2}E} \dots\dots\dots(J.1)$$

式中：

g ——应力强度因子系数，由附录 B 给出(根据试样类型不同选用 g_1 或 g_2)。

J.2 测试原理

剖面法的基本原理是把启裂 CTOD 与伸张区高度联系起来，见图 J.1。由于卸载过程中裂纹尖端的塑性区要受到周围弹性区的压缩，从而使得裂纹尖端的塑性张开位移缩小。只有当裂纹启裂后继续加载到某一裂纹扩展量以后卸载。由于此时新的裂纹尖端已距原始尖端有一定距离，原始尖端所受到的“卸载效应”影响才可能完全或部分消除。图 J.1(a)适用于裂纹面对称的情况。大多数情况下，裂纹面不完全对称，如图 J.1(b)，但饱和伸张区的高度只要能测准仍可给出 δ_{is} 值。

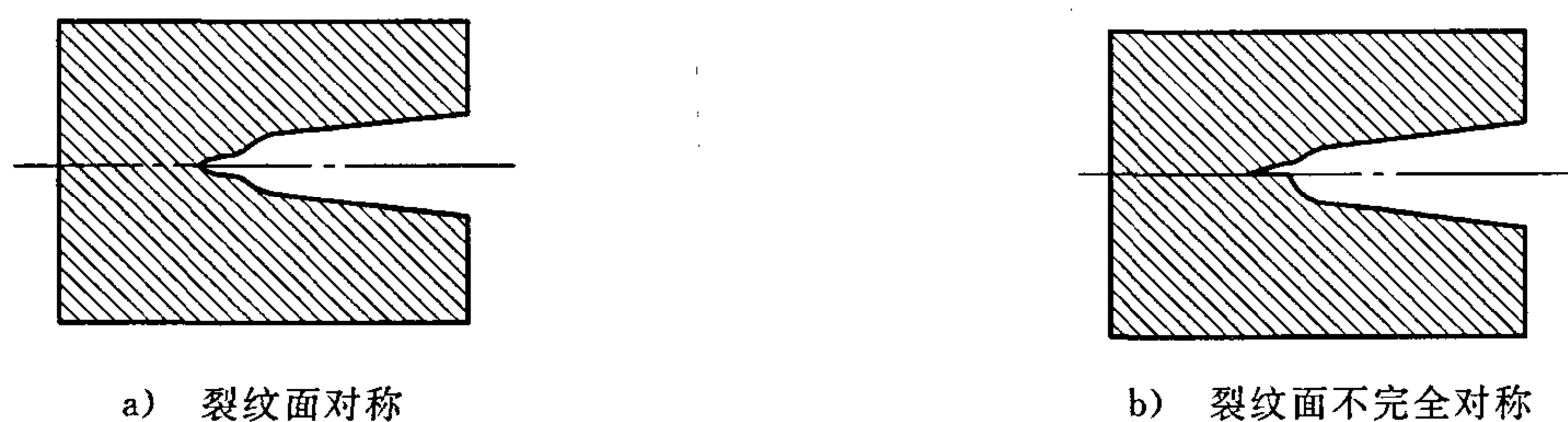


图 J.1 剖面示意图

J.3 试样

J.3.1 试样形状，尺寸和预制裂纹应符合本方法正文中第 5 章的规定。

J.3.2 试样数量，可以采用单试样，按图 J.2 预制裂纹及切取试片，试样切取试片数不少于 5 个。

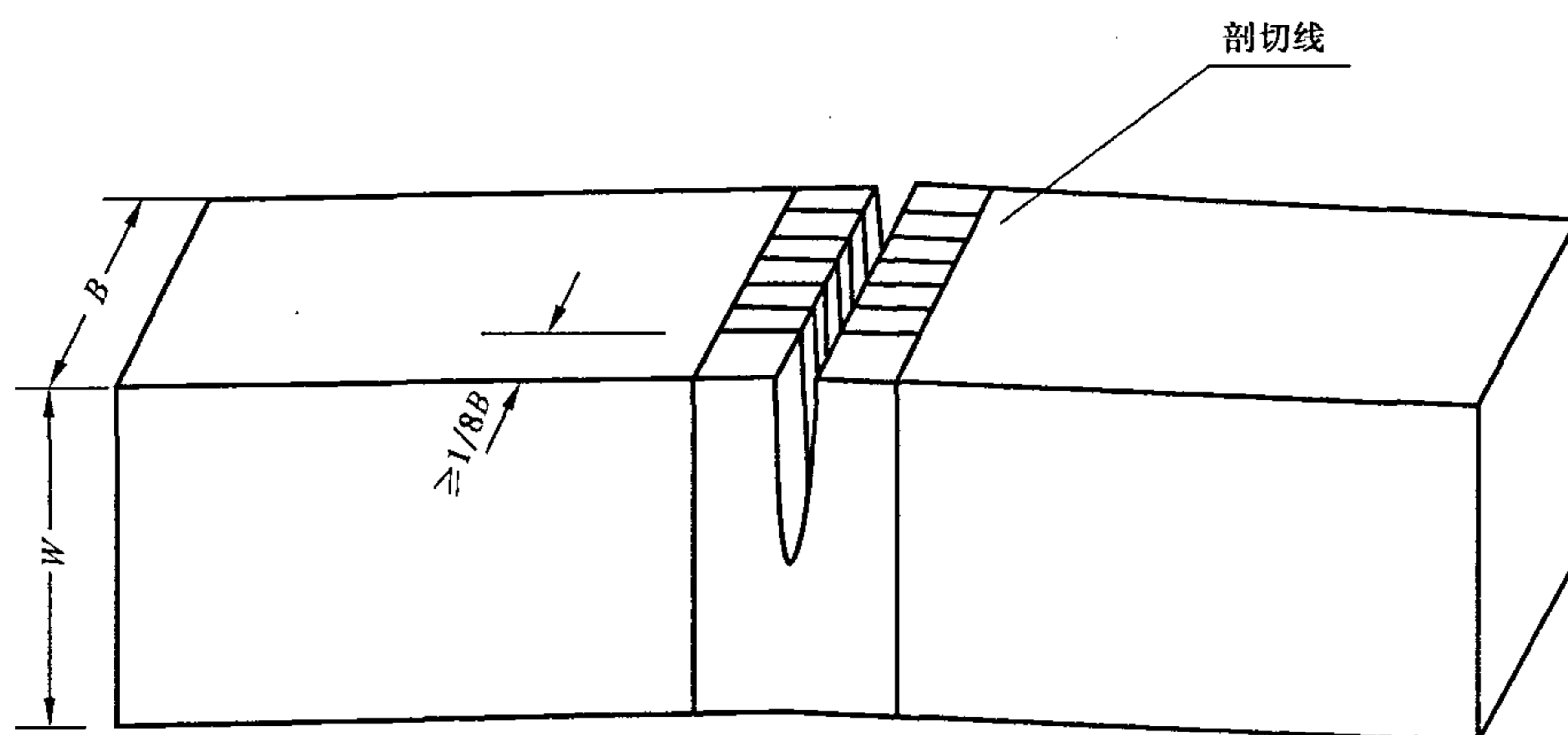


图 J.2 试样剖切位置示意图

J.4 试验程序

J.4.1 试验按本方法正文中第五章规定进行,过最大力点后停机,记录加载中的最大力,试样不得断裂。

J.4.2 卸载后将试样用线切割机切片,剖切位置可定在距试样表面大于 $B/8$ 的位置处,见图 J.2。

J.4.3 切割好的试片应用丙酮或乙醇清洗干净,但不得在裂纹尖端产生倒角或脱落,以避免裂纹尖端轮廓的改变。

J.5 测量

J.5.1 测量工具采用工具显微镜或能保证测量精度的其他仪器。目镜和物镜的总放大倍数一般以 (30~50) 倍为宜,测量应精确到 0.01 mm。

J.5.2 测量时以裂纹嘴的连线方向作为裂纹的法线方向,经裂纹面切点 D_1 和 D_2 作为裂纹原始尖端,以裂纹扩展面与伸张区交点作为 T_1 和 T_2 测量点,以 A 点作为裂纹新尖端点,见图 J.3。

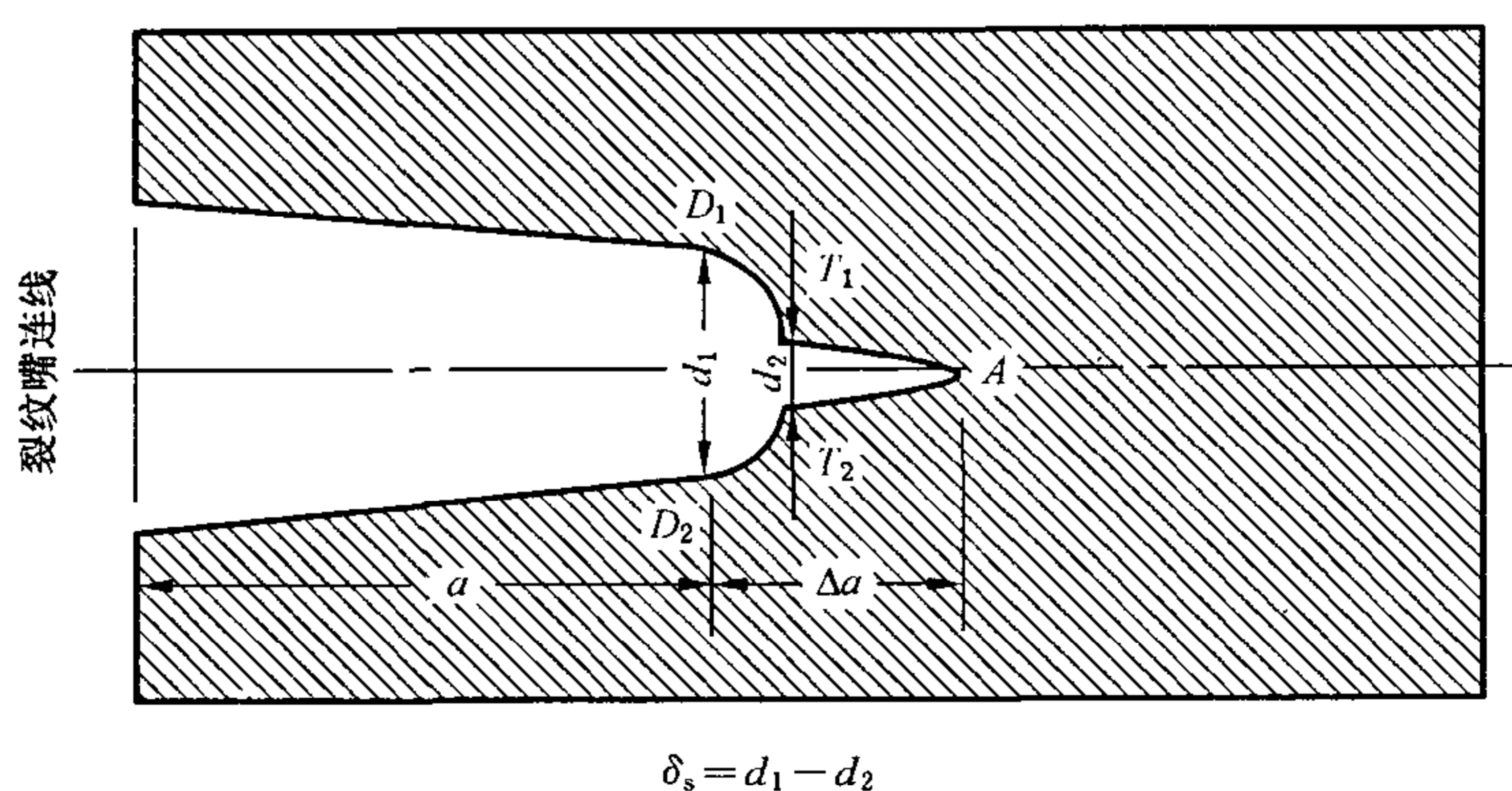


图 J.3 δ_s 的测量点选取位置

J.5.3 对于裂纹轮廓线不规则的试片,测量点可参照图 J.4 选取。

J.5.4 每个试片测量(2~3)次,取其平均值。

J.5.5 裂纹开裂点超出 2 处时,该试片无效,如图 J.5(a)。

J.5.6 裂纹面产生不对称或 $D_1(D_2)$ 与 $T_1(T_2)$ 在同一连线上时,该试片无效,如图 J.5(b)。

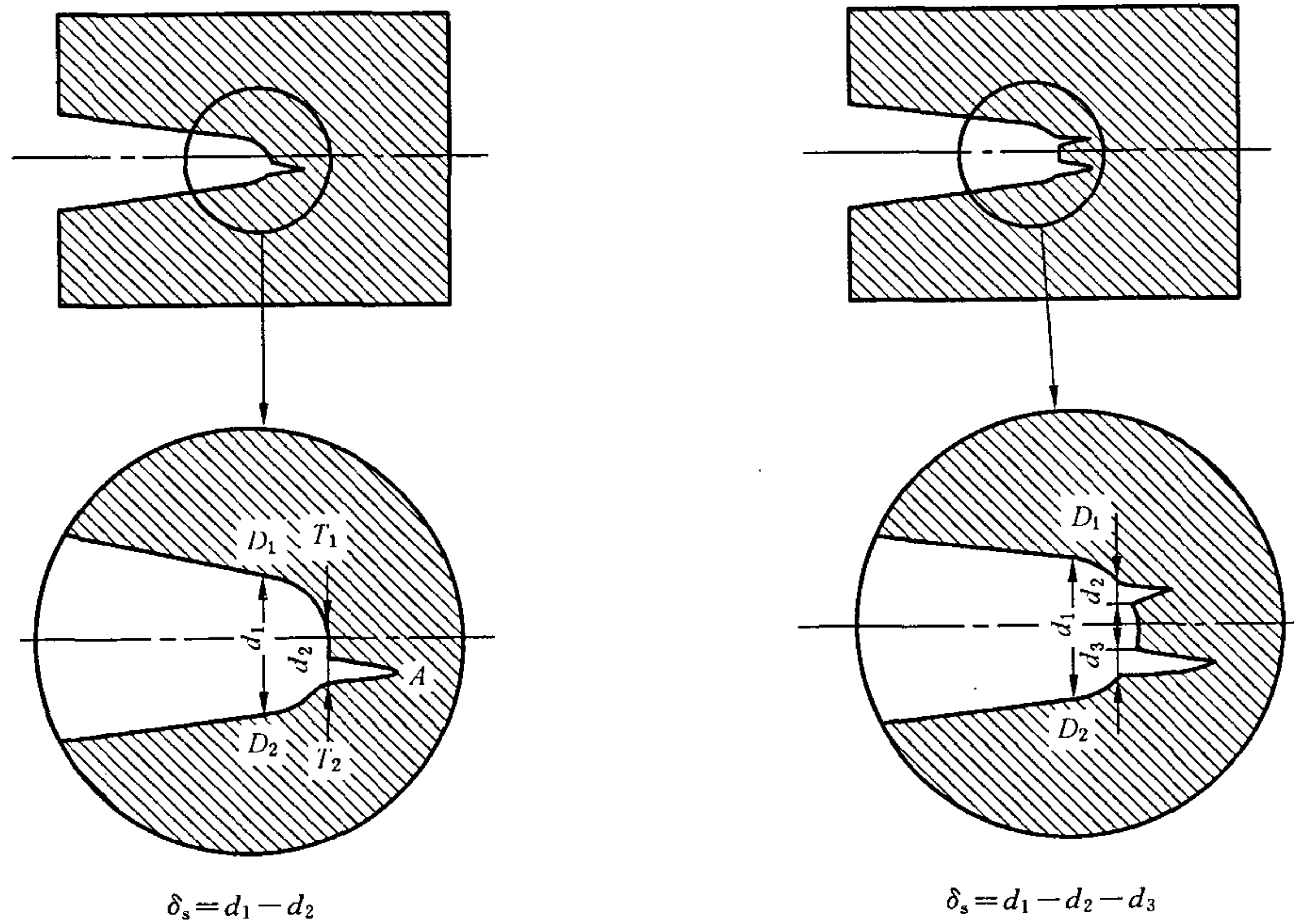


图 J.4 裂纹轮廓不规则试片的测量点选取位置

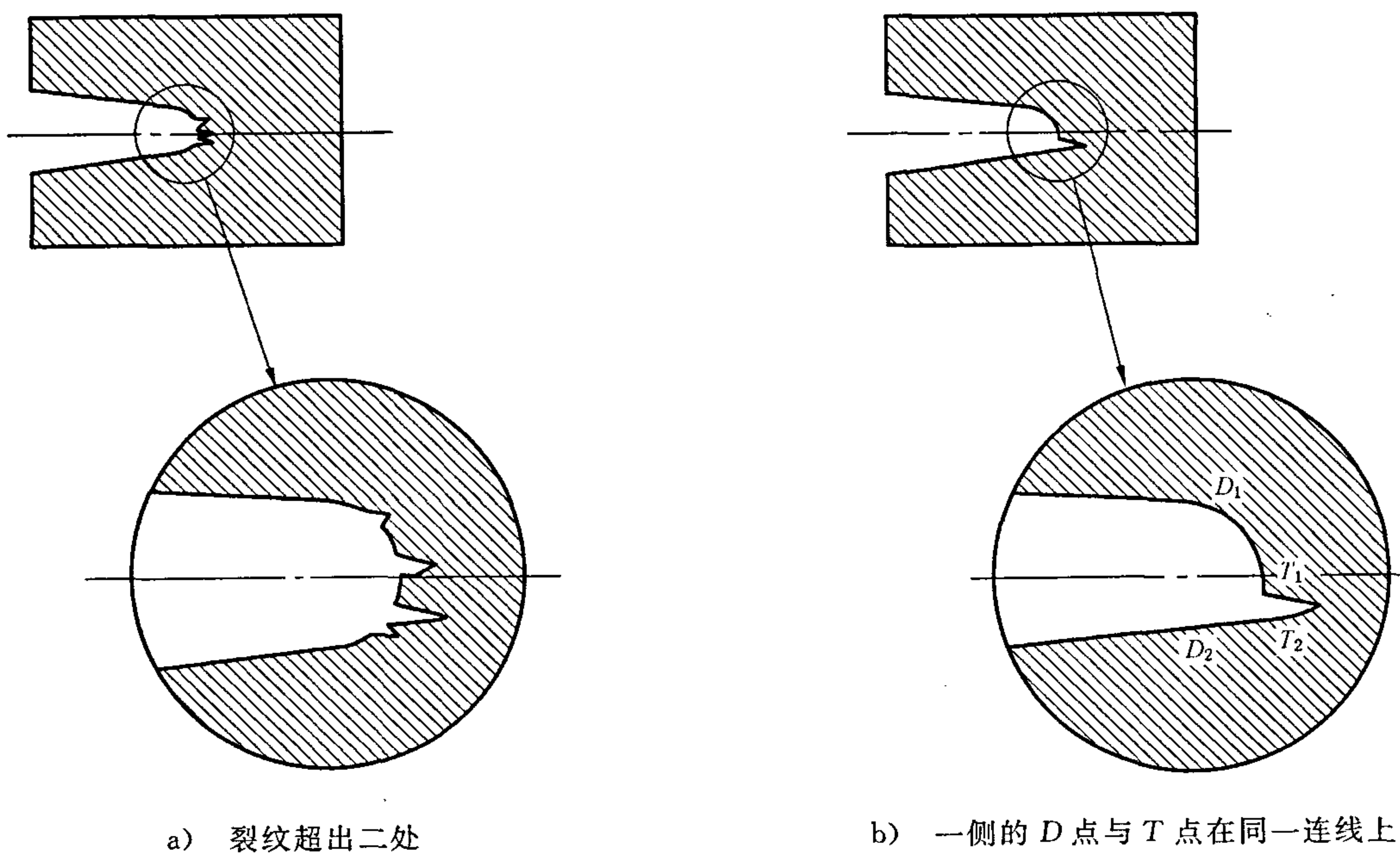


图 J.5 无效试片

J.6 试验结果处理

J.6.1 根据每个试片的测量记录,按下式计算每个试片的 CTOD 值和裂纹及扩展量:

$$\delta_s = d_1 - d_2 \quad \dots\dots\dots (J.2)$$

$$\Delta a = A - D \quad \dots\dots\dots (J.3)$$

J.6.2 如 $a < 0.2 \text{ mm}$,该试片结果无效。

J.6.3 对于均质试样,以该试样全部试片的平均值作为 δ_{is} ,即

$$\delta_{is} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_s + \delta_e \quad \dots\dots\dots (J.4)$$

J.6.4 得出 δ_{is} 值的有效试片数不少于 3 个。

附 录 K
(资料性附录)

本标准章条编号与 ISO 12135:2002(E)章条编号对照

表 K.1 给出了本标准章条编号与 ISO 12135:2002(E)章条编号对照一览表。

表 K.1 本标准章条编号与 ISO 12135:2002(E)章条编号对照表

本标准章条编号	对应的 ISO 标准章条编号
9	—
附录 A	附录 B
附录 B	附录 D
附录 C	附录 I
附录 D	附录 A
附录 E	附录 C
附录 F	附录 E
附录 G	附录 F
附录 H	附录 G
附录 I	附录 H
附录 J	—
附录 K	—
附录 L	—

注：表中章条以外的本标准其他章条编号与 ISO 12135:2000(E)的章条编号均相同且内容相对应。

附 录 L
(资料性附录)

本标准与 ISO 12135:2002(E)技术性差异及其原因

表 L.1 给出了本标准与 ISO 12135:2002(E)技术性差异及其原因的一览表。

表 L.1 本标准与 ISO 12135:2002(E)技术性差异及其原因

本标准的章条编号	技术性差异	原因
2	引用与 ISO 标准相对应的我国标准,保留一项国际标准。 增加引用了 GB/T 8170—1987。	以符合我国国情。 与后续增加内容保持一致。
4	增加 V_g 、 A_p 、 $\delta_{Q0.2BL}$ 、 $J_{Q0.2BL}$ 的定义。	明确符号的名称定义,使后续的图例和公式计算更清晰。
图 5	修改台阶位置,增加燕尾槽。	便于实际操作。
5.6.3	删除注 1、注 3。	两项注释引用了国际标准的参考文献及说法,不适用于国标。
图 10、11、12	在注中增加装置硬度应大于试样硬度。	增加标准的可操作性,以适用于硬度更高的材料。
图 19、20、21	移动图中数据点的位置。	与文中右边界定义的修改相对应。
7.4.1.2	重新定义 Δa_{max} 。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
7.5.1.1	增加 $\delta - \Delta a$ 阻力曲线上边界线的定义方法。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
7.5.2.1	增加 $J - \Delta a$ 阻力曲线上边界线的定义方法。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
7.6.1.2	明确 $\delta_{Q0.2BL}$ 的定义,增加其确定方法。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
7.6.2.2	明确 $J_{Q0.2BL}$ 的定义,增加其确定方法。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
9	增加性能测定结果数值的修约。	增加标准的可操作性,便于标准的执行。
附录 C	改变数值计算的步长值。	提高数据的准确度。
I.6.2	改变初始裂纹长度的计算公式。	提高数据的准确度。
附录 J	增加剖面法测定 CTOD。	增加试验的可操作性,便于标准的执行。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 准静态断裂韧度的
统一试验方法

GB/T 21143—2007

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 4.75 字数 138 千字
2008年3月第一版 2008年3月第一次印刷

*

书号: 155066·1-30616

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533



GB/T 21143—2007