

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 15970.9—2007/ISO 7539-9:2003

## 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第9部分：渐增式载荷或渐增式位移下的 预裂纹试样的制备和应用

Corrosion of metals and alloys—Stress corrosion testing—  
Part 9: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests  
under rising load or rising displacement

(ISO 7539-9:2003, IDT)

2007-05-14 发布

2007-12-01 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

## 前 言

GB/T 15970 在《金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验》总标题下,包括以下部分:

第1部分:试验方法总则(GB/T 15970.1—1995);

第2部分:弯梁试样的制备和应用(GB/T 15970.2—2000);

第3部分:U型弯曲试样的制备和应用(GB/T 15970.3—1995);

第4部分:单轴加载拉伸试样的制备和应用(GB/T 15970.4—2000);

第5部分:C型环试样的制备和应用(GB/T 15970.5—1998);

第6部分:恒载荷或恒位移下的预裂纹试样的制备和应用(GB/T 15970.6—2007);

第7部分:慢应变速率试验(GB/T 15970.7—2000);

第8部分:焊接试样的制备和应用(GB/T 15970.8—2005);

第9部分:渐增式载荷或渐增式位移下的预裂纹试样的制备和应用(GB/T 15970.9—2007)。

本部分等同采用国际标准 ISO 7539-9:2003《金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第9部分:渐增式载荷或渐增式位移下的预裂纹试样的制备和应用》。

本部分作了下列编辑性修改:

——删除国际标准前言。

本部分的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本部分由中国钢铁工业协会提出。

本部分由全国钢标准化技术委员会归口。

本部分起草单位:钢铁研究总院、冶金工业信息标准研究院。

本部分主要起草人:王玮、金明秀、柳泽燕、冯超。

# 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验

## 第9部分：渐增式载荷或渐增式位移下的 预裂纹试样的制备和应用

### 1 范围

1.1 本部分包括了研究金属在渐增式载荷或渐增式位移下应力腐蚀裂纹敏感性的预裂纹试样的设计、制备和应用等内容。恒定载荷或恒定位移下的试验见 GB/T 15970.6。

本部分中的术语“金属”也包括合金。

1.2 因为裂纹尖端需要维持弹性约束，所以预裂纹试样不适用于评价如薄板或线材等薄的产品。通常适用于评价板材、棒材和锻件等厚的产品。预裂纹试样也适用于焊接件。

1.3 预裂纹试样可以通过在加载点使用单调增加载荷或位移装置定量加载。

1.4 预裂纹试样的一个突出优点是：可以通过测得的数据计算出已知几何形状且承受已知应力构件的临界缺陷尺寸。如果缺陷尺寸超过临界值，应力腐蚀破裂可能会发生。预裂纹试样也可以用于测定应力腐蚀裂纹扩展速率。

1.5 本试验的一个主要优点是：考虑了动态应变对应力腐蚀破裂界限值的潜在影响。

1.6 在足够低的加载速率下，本方法可以更快地测定  $K_{Isc}$  值，且此值会小于或等于由恒载荷或位移方法测定的值。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本部分，然而，鼓励根据本部分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部分。

GB/T 15970.1 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第1部分：试验方法总则（GB/T 15970.1—1995，idt ISO 7539-1:1987）

GB/T 15970.6 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第6部分：恒载荷或恒位移下的预裂纹试样的制备和应用（GB/T 15970.6—2007/ISO 7539-6:2003，IDT）

GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第7部分：慢应变速率试验（GB/T 15970.7—2000/ISO 7539-7:1989，IDT）

GB/T 20120.2 金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第2部分 预裂纹试样扩展试验（GB/T 20120.2—2006/ISO 11782-2:1998，IDT）

### 3 术语和定义

GB/T 15970.6 确立的以及下列术语和定义适用于本部分。

#### 3.1

在加载面上裂纹张开位移的变化率 rate of change of crack opening displacement at loading plane  
 $\dot{V}_{LI}$

固定周期测量的加载点通路的挠度。

### 3.2

裂纹萌生时的应力强度因子 stress intensity factor at crack initiation

$K_{I-init}$

可测量的裂纹开始扩展时的应力强度。

### 3.3

疲劳状态下应力强度因子范围 range of stress intensity factor

$\Delta K_I$

一周期内最大与最小应力强度因子的代数差。

### 3.4

位移速率 displacement rate

$dq/dt$

在加载点轴线或远离加载线处测量的挠度增加率。

## 4 原理

4.1 要确保构件在加工制作或随后的使用过程中不产生裂纹状的缺陷是困难的,有鉴于此,使用预裂纹试样。这些缺陷的存在对应力腐蚀破裂是敏感的,而这种敏感性对某些材料(如钛),在光滑试样的恒载荷试验中不明显。应用线弹性断裂力学的原理,能够借助于平面应变应力强度定量地确定存在于预裂纹试样或构件中的裂纹尖端的应力状况。

4.2 对机械切口进行疲劳预制裂纹的试样,通过在施力点施加恒定载荷或位移,在化学侵蚀性介质中进行试验,目的是借助于应力腐蚀破裂界限应力强度因子  $K_{I SCC}$  和裂纹扩展动力学来定量地确定产生环境加速裂纹扩展的条件。

4.3 试验可在拉伸或弯曲条件下进行。试验的最重要特性是使用低加载/位移速率。

4.4 由于本方法与动态应变相关联,所以得到的数据也许与相同环境材料组合下的仅静态加载的预裂纹试样试验不同。

4.5 设计和寿命预测中可以应用经验数据。目的是为了保证大型构件内的应力不足以在预先存在的缺陷部位引发环境诱导开裂,或者是在设计寿命或检查周期内确保裂纹扩展量不会造成失稳破坏的危险。

4.6 由于在裂纹尖端化学和电极电位的变化,应力腐蚀破裂受力学和电化学驱动力影响,后者可随裂纹深度、开放程度或形状变化,不仅仅用断裂力学应力强度因子描述。

4.7 力学驱动力包括施加的和残余应力。在实验室试验和应用于更复杂的几何形状时,应考虑后者可能的影响。试样中的残余应力梯度可导致沿裂纹前端非均匀扩展。

4.8  $K_{I SCC}$  是环境和加载条件的函数,环境应模拟实际使用条件。

## 5 试样

### 5.1 总则

5.1.1 凡在断裂韧性试验中,所采用的大范围的标准试样几何尺寸都可以使用。最常用的试样在 GB/T 15970.6 中描述。试样具体类型可因原材料的形状、强度、对应力腐蚀破裂的敏感性以及试验目的的不同而异。

5.1.2 基本的要求是尺寸要满足以三轴应力为主的(平面应变)条件,在此条件下,塑性变形在裂纹尖端附近受到限制,断裂韧性试验的经验表明,为了测得正确的  $K_{Ic}$  值,试样的裂纹长度  $a$  和厚度  $B$  都不

能小于  $2.5(K_{Ic}/R_{p0.2})^2$ 。为保证足够的约束,应尽可能使用大试样,其  $a$  和  $B$  至少等于  $4(K_{Ic}/R_{p0.2})^2$ 。从断裂力学的观点看,此时不能具体规定可得到恒定  $K_{Isc}$  值的最小试样厚度。在应力腐蚀过程中,侵蚀性环境的存在,可以降低与破断有关以及因此与限制塑性变形所需的尺寸有关的塑性值。然而为了减少约束不足的危险,推荐了类似于断裂韧性试验中使用的有关试样尺寸的规范,即:

$$a \text{ 和 } B \text{ 不小于 } 2.5(K_{Ic}/R_{p0.2})^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{最好不小于 } 4(K_{Ic}/R_{p0.2})^2 \dots\dots\dots (2)$$

式中的  $K_I$  是试验中外加的应力强度,单位为 MPa/m。最后测定的界限应力强度值应该取代式(1)中的  $K_I$ ,以检验其有效性。

第一个表达式中的  $K_I$  来替代应力强度极限值以检验试验的有效性。

5.1.3 如果试样是用来测定  $K_{Isc}$ ,那么初始的试样尺寸可按材料  $K_{Isc}$  的估计值来考虑(开始最好将  $K_{Isc}$  值估计得高一点,因此采用较实际需要大一些的试样),在实际使用中,如遇到所用的材料的厚度不能满足有效的条件时,只要能清楚说明所测得的临界应力强度值只与此特殊应用有关,那么可以使用相同厚度的试样做试验。在需要测定作为应力强度函数关系的应力腐蚀裂纹扩展行为时,试样尺寸应按测定裂纹扩展速率的最高应力强度估计值确定。

5.1.4 根据试验材料的形状、现有的实验装置以及试验目的,试样的几何形状可以在很宽范围内进行选择。可以使用下面两种基本类型的试样:

- a) 用于拉伸加载的试样;
- b) 用于弯曲加载的试样。

这表示可以在弯曲或拉伸加载条件下研究裂纹的扩展。试样可用来测定  $K_{Isc}$  或裂纹扩展速率。用一组带预制疲劳裂纹的试样通过应力腐蚀裂纹萌生测定  $K_{Isc}$ 。因为试样暴露在试验环境中时是加载的,所以应避免出现不必要的孕育期。

5.1.5 可以通过许多连续监测方法进行裂纹长度测量,例如电阻方法。

5.1.6 原则上弯曲试样可在相对简单的悬臂梁试验机上进行试验,但受拉伸加载的试样则要求在拉伸试验机上进行。

## 5.2 试样设计

5.2.1 试样可拉伸或弯曲加载。根据不同设计,拉伸加载试样在裂纹尖端主要受拉应力(类似于中心裂纹板这一类远拉伸型试样)或者包含明显的弯曲应力(类似于紧凑拉伸这一类的裂纹线加载型试样)。裂纹尖端存在的明显的弯曲应力在应力腐蚀试验中能反过来影响裂纹通道的稳定性,并且对某些材料能促进裂纹的分叉。弯曲试样可以按三支点、四支点或悬臂弯曲装置加载。

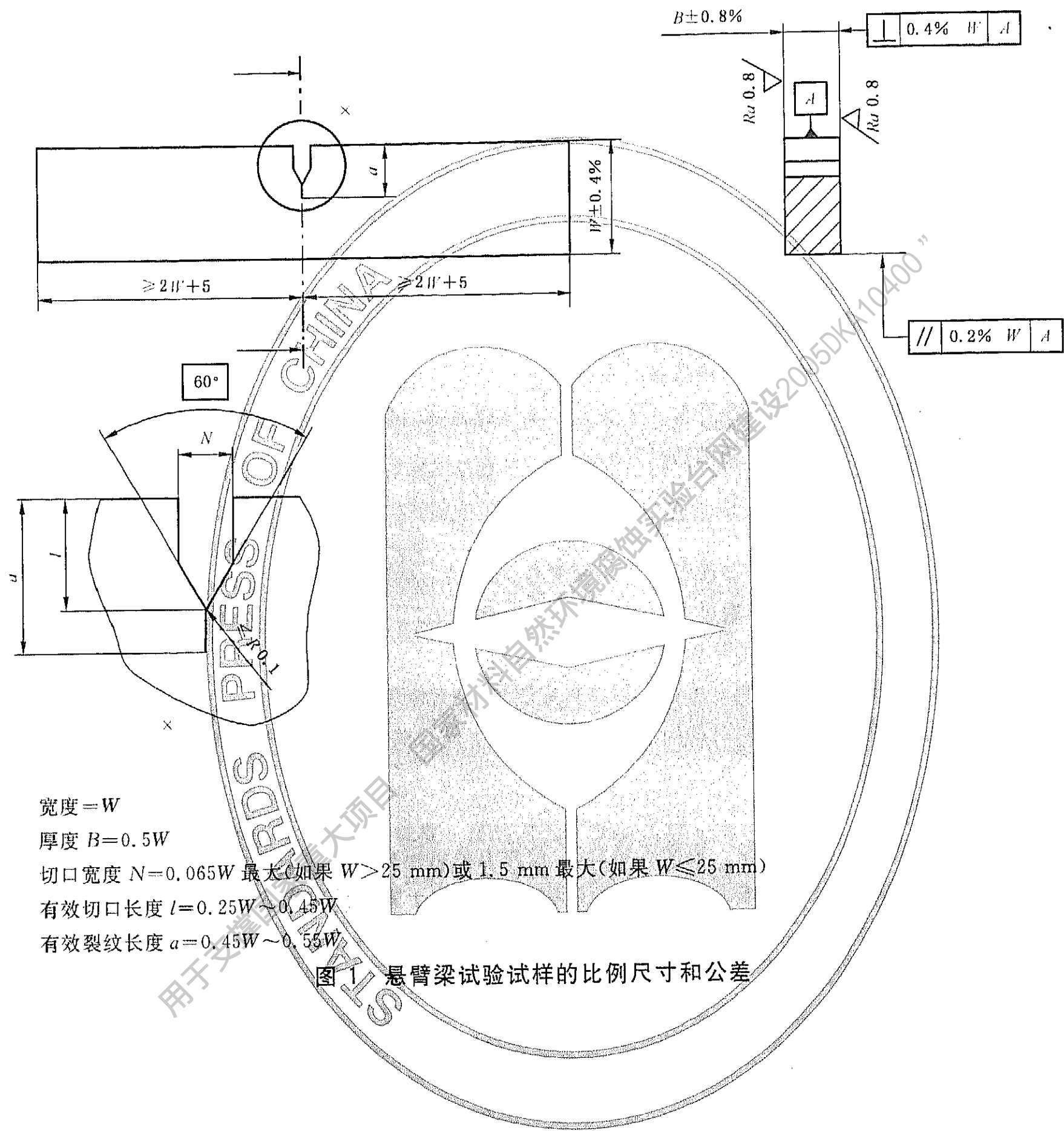
5.2.2 裂纹线弯曲会导致裂纹扩展具有偏离平面的倾向,可以通过在试样上开侧面槽来控制。

5.2.3 许多几何形状试样具有独特的优点,从而被广泛的应用于渐增载荷或渐增位移应力腐蚀破裂试验。这包括:

- a) 紧凑拉伸(CTS)试样,材料用量最少;
- b) 悬臂梁弯曲试样,易加工且试验费用低;
- c) C型试样,可由厚壁圆筒加工,从而研究纵向裂纹的径向扩展。

图1~图3给出各类标准试样的设计详图。

单位为毫米



单位为毫米

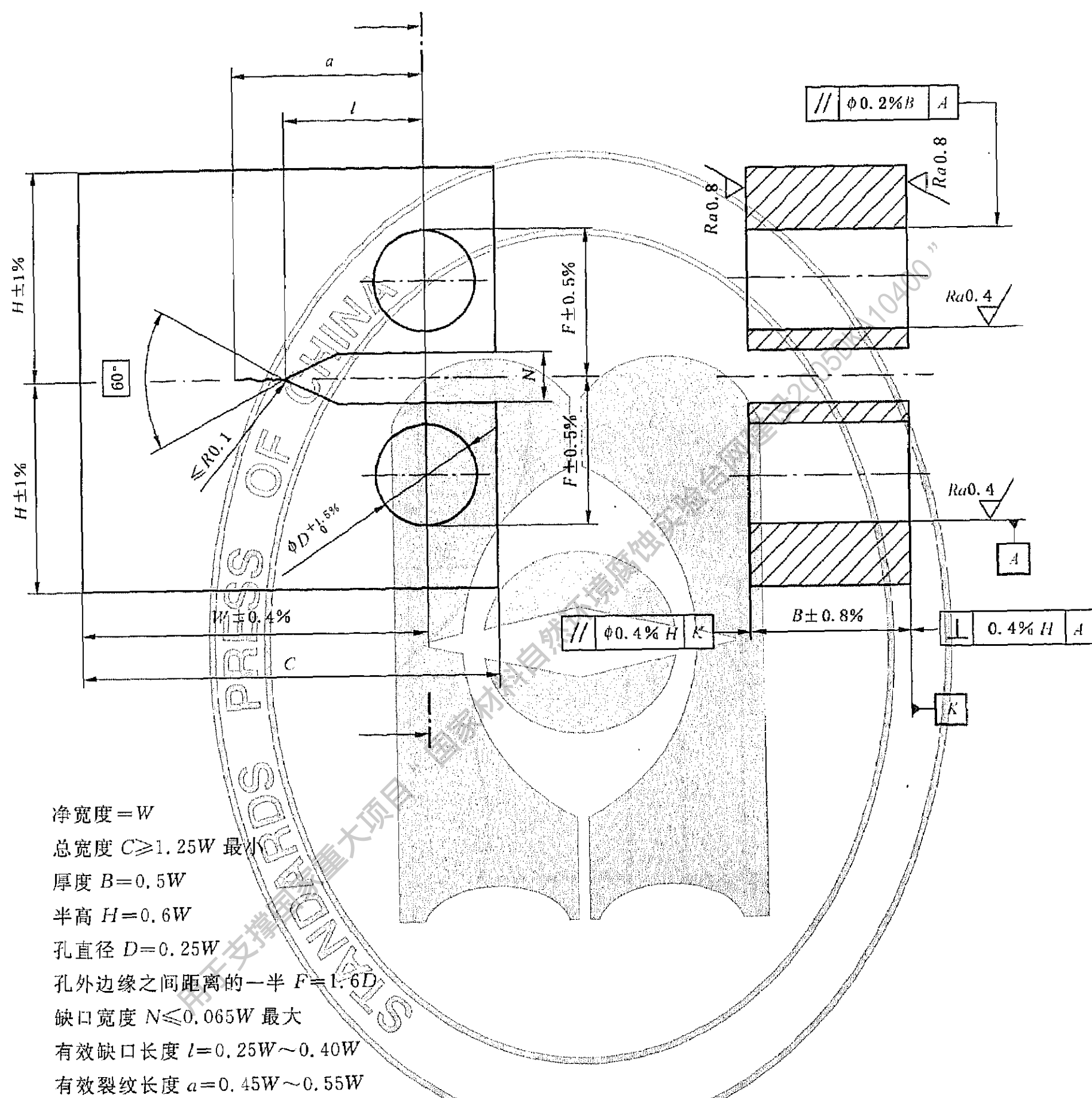


图 2 紧凑拉伸试样的比例尺寸和公差

单位为毫米

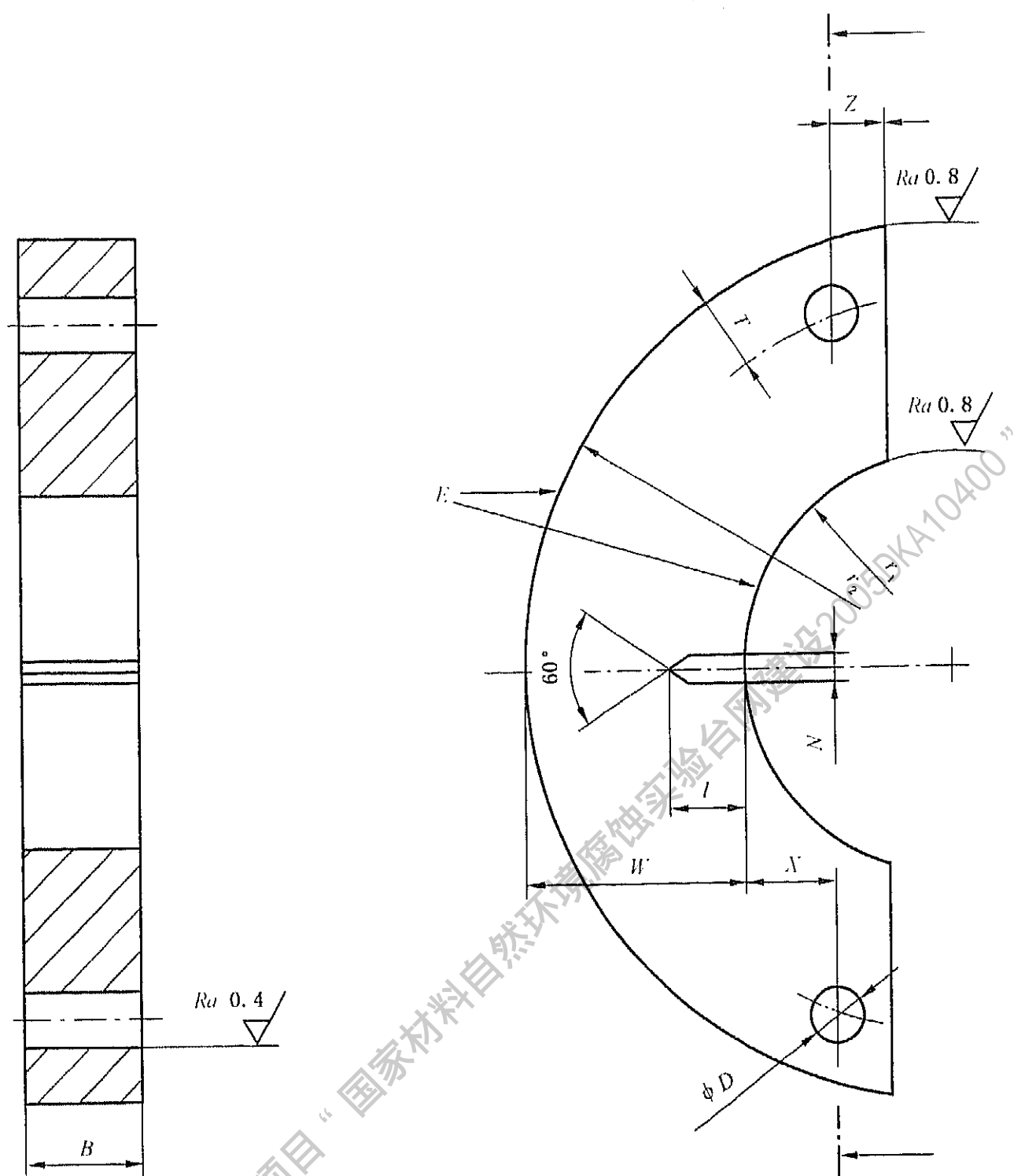
净宽度 =  $W$ 厚度  $B = 0.50W \pm 0.01W$ 孔轴线到内径切线  $X = 0.50W \pm 0.005W$ 切口宽度  $N \ 1.5 \text{ mm} \leq N \leq 0.1W$ 切口深度  $I = 0.3W$ 孔轴线到试样面  $Z = 0.25W \pm 0.01W$ 孔轴线到外表面  $T = 0.25W \pm 0.01W$ 孔的直径  $D = 0.25W \pm 0.005W$ 注：所有表面都应平行和垂直，偏差在  $0.002W$  范围内，“E”表面垂直于“Y”面，偏差在  $0.02W$  范围内。

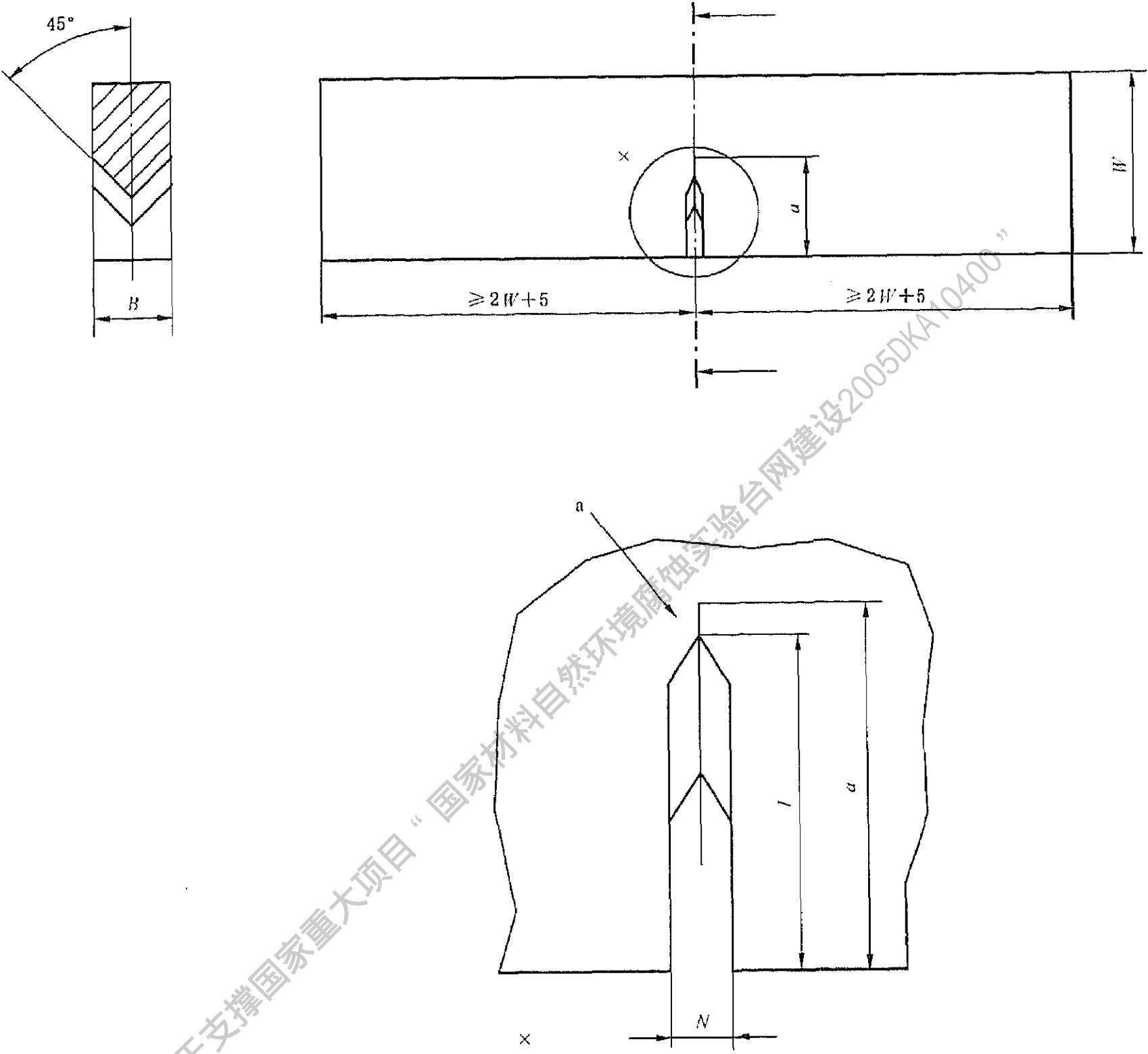
图 3 C 形试样的比例尺寸和公差

5.2.4 如果需要的话，例如，在难以准确地控制疲劳裂纹的萌生和(或)扩展的情况下，不妨采用如图 4 中所示的人字形切口试样。必要时，此缺口的角度可以从  $90^\circ$  增加到  $120^\circ$ 。

5.2.5 在需要测定裂纹张开位移的场合，安装引伸计的刀口可以加工成如图 5a) 所示的切口。切口也可分别用螺栓固定或粘在试样切口相对的两侧，如图 5b) 所示。图 6 给出了一种适用的锥形梁引伸计详图。



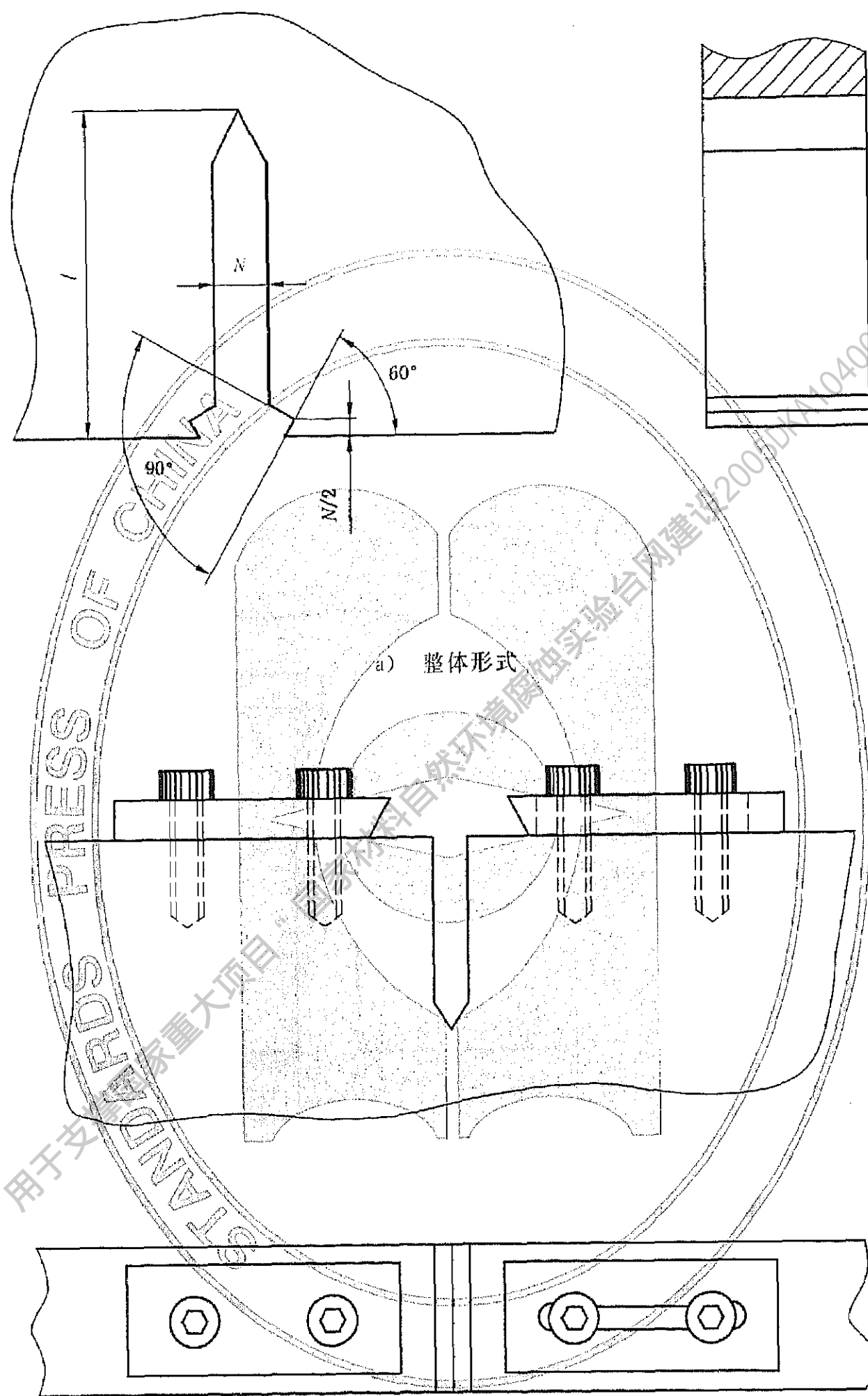
单位为毫米



a 用 60°刀具铣,对于全部试样切口根部半径最大为 0.3。

图 4 人字形缺口

单位为毫米



b) 螺钉形式

注：假设能够保证足够的强度，那么上面刀口可用粘合剂固定。

图 5 引伸计刀口的位置

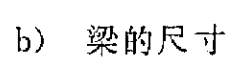
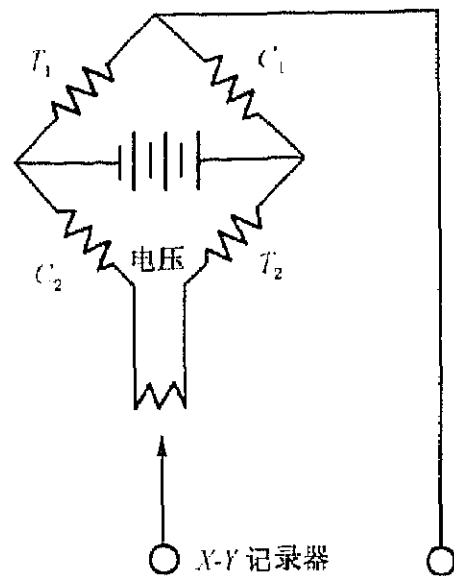


图 6 锥形梁引伸计详图



c) 桥式测量电路

- a 此处尺寸应为最小初始标准长度的 3.8 倍。
  - b 梁厚度的斜度为 0.5~0.8。
- 注：应选择应变计及材料以适应试验环境。

图 6 (续)

5.3 应力强度因子

5.3.1 用弹性理论可以证明,作用于不同形状的试样或构件的裂纹尖端处应力强度因子  $K_I$  可以用公式(3)表示:

$$K_I = Q \times \sigma \times \sqrt{a} \dots\dots\dots (3)$$

- 式中:
- $Q$ ——无量纲的几何常数;
  - $\sigma$ ——外加应力,单位为兆帕(MPa);
  - $a$ ——裂纹长度,单位为毫米(mm)。

5.3.2 对于特定几何形状和加载方法的试样, $K_I$  的数学解可以通过有限元应力分析或者根据试验或理论确定试样柔度值来计算。

5.3.3  $K_I$  可以通过一个无量纲应力强度因子系数  $Y$  来计算,此系数与由  $a/W$  来表示的裂纹长度有关,其关系式见公式(4):

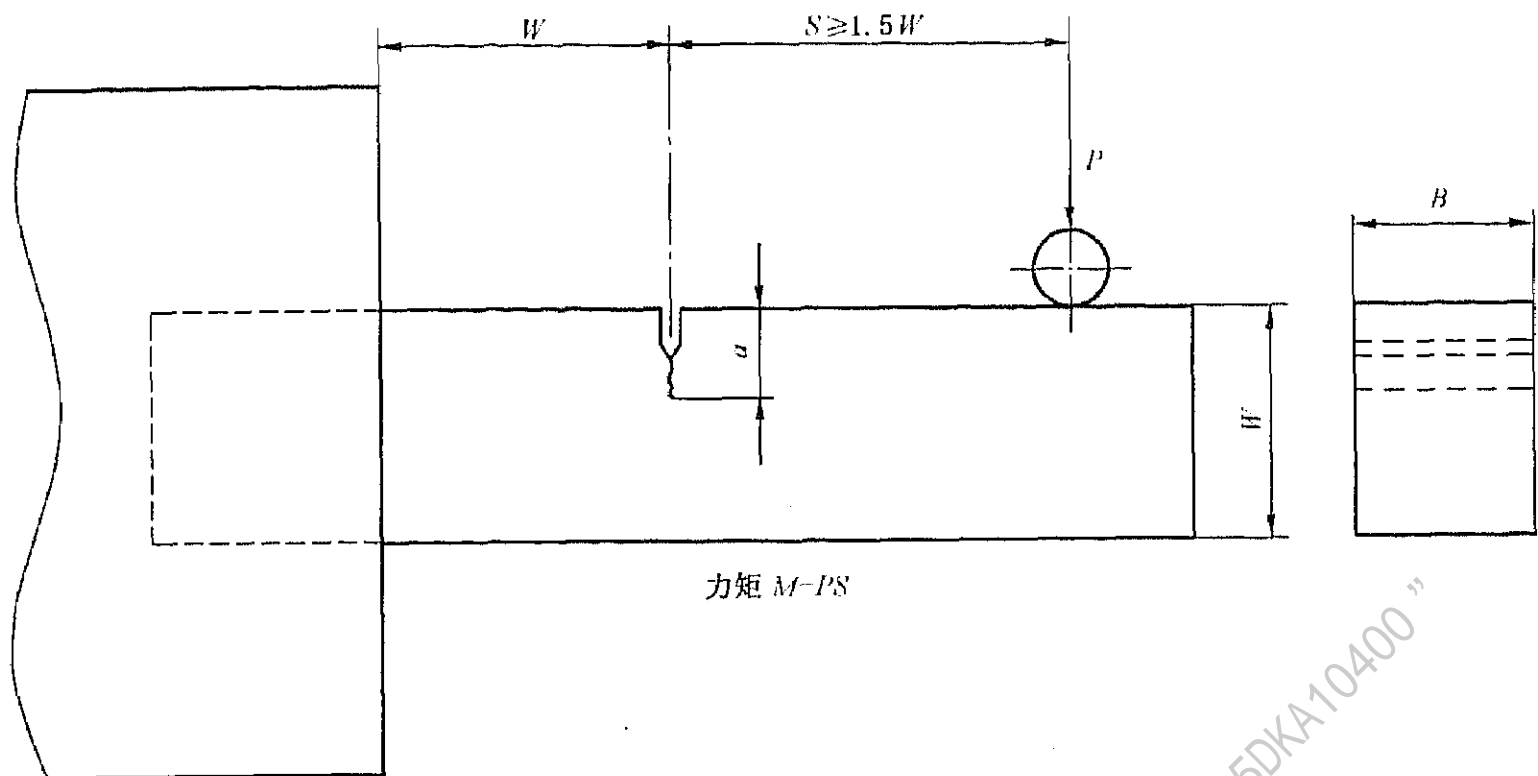
$$K_I = \frac{YP}{BW^{1/2}} \dots\dots\dots (4)$$

- 对于紧凑拉伸试样和 C 形试样,
- 式中:
- $W$ ——试样的宽度,单位为米(m);
  - $P$ ——施加载荷。

5.3.4 为了抑制裂纹分叉,可采用浅的侧面槽(一般在试样两侧面的槽深总共为试样厚度的 5%)。侧面槽可采用半圆形或 60° V 形,但是要注意即使采用高达 50% 试样厚度的半圆侧面槽,有时也不一定能达到保持裂纹在所要求的平面内扩展的目的。对于使用侧面槽的试样,开槽后的厚度  $B_n$ 。由于开槽对应力强度的作用可以在上面的表达式中用  $\sqrt{BB_n}$  代替  $B$  来解决。然而,侧面槽对应力强度因子的影响还远远没有确定,所以在采用修正系数时要特别谨慎,尤其是在侧面槽较深的情況下更应如此。

5.3.5 图 7~图 9 给出了在应力腐蚀试验中常用试样几何形状的  $Y$  的解。

单位为毫米



$$K_1 = \frac{YP}{B \sqrt{W}}$$

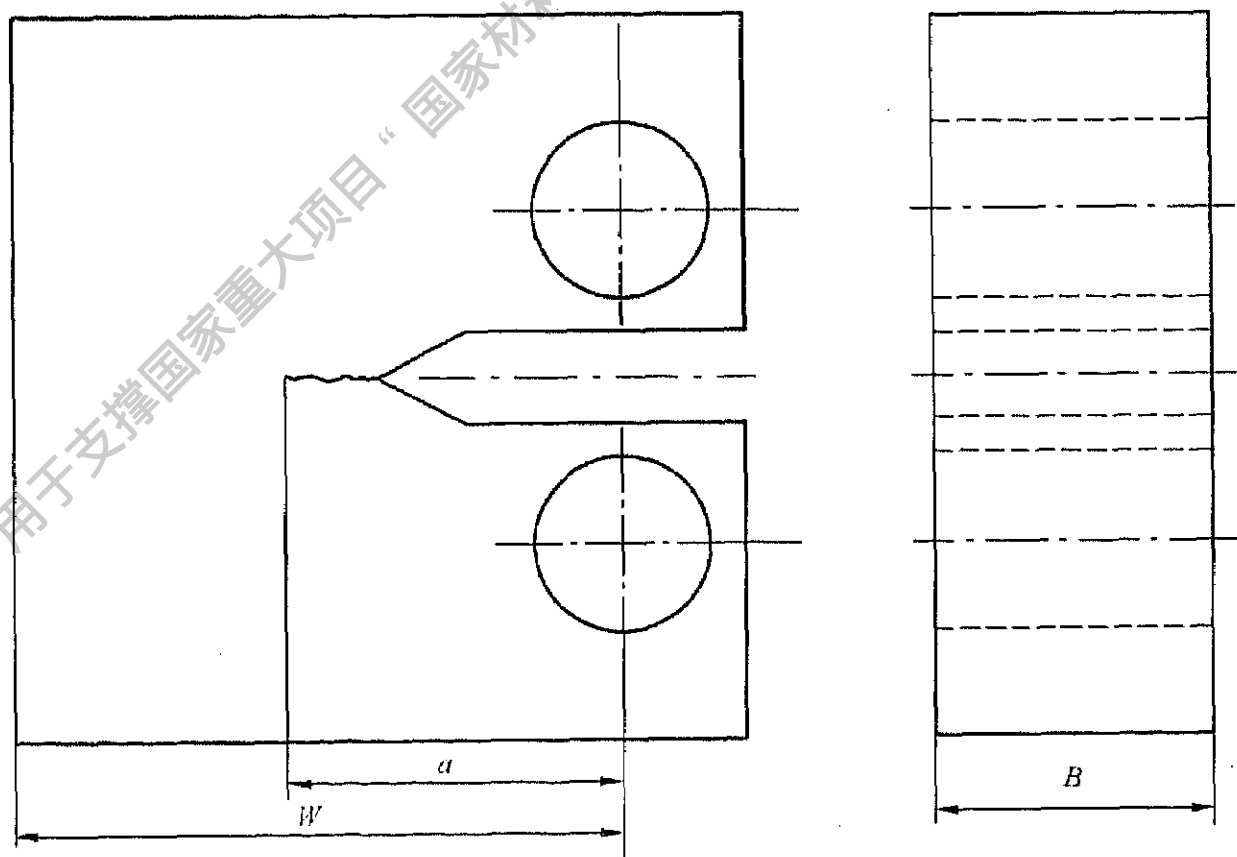
在  $S=1.5W$  情况下, 式中:

$$Y = 6.21 \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^3} - \left(1 + \frac{a}{W}\right)^3}$$

注: 此公式最初是通过应力分析和柔度的组合方法推导出来的。虽然没有规定公式的准确性和有效程度, 但它适用于  $0.2 \leq \frac{a}{W} \leq 0.6$  的范围。为了更有把握, 推荐采用经验柔度定标。

图 7 悬臂梁试样的应力强度因子解

单位为毫米



$$K_1 = \frac{YP}{B \sqrt{W}}$$

式中:

$$Y = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\sqrt{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^3}} \left[ 0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

注: 在  $0.2 \leq \frac{a}{W} \leq 1.0$  范围内使用此公式, 误差  $\leq \pm 0.5\%$ 。

图 8 紧凑拉伸试样的应力强度因子解

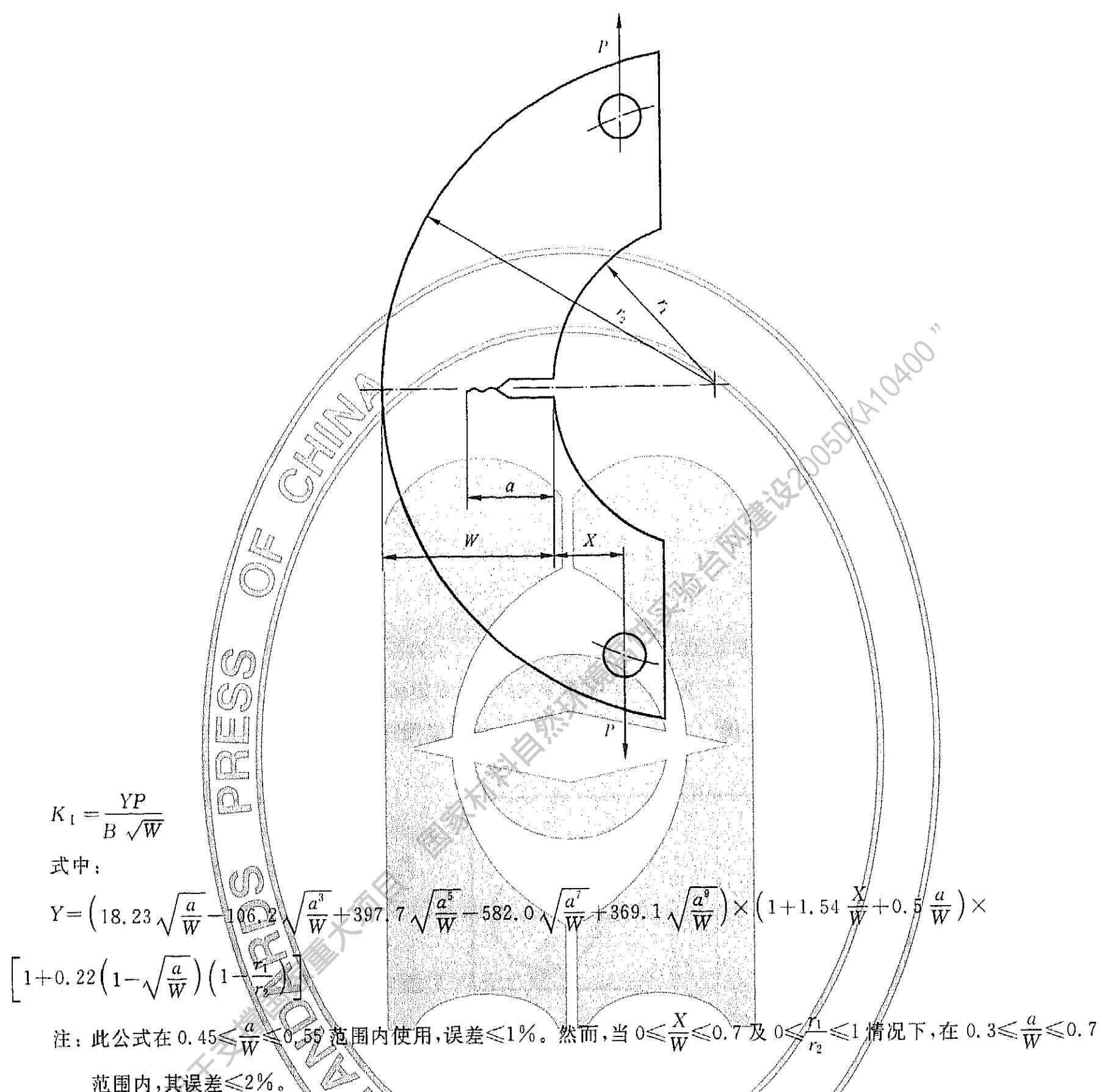


图9 C形试样的应力强度因子解

#### 5.4 试样制备

5.4.1 残余应力对应力腐蚀破裂有影响，对切取试样的材料不能进行完全的应力释放时，影响明显，例如焊接件、淬火材料和复杂的锻造或挤压形状。残余应力加上施加的应力可使局部裂纹尖端的应力强度因子与单独由外加载荷计算出的有所差别。残余应力的存在经常表现出不规则的裂纹扩展，即裂纹前端弯曲或非同一平面裂纹成长，这一般暗示残余应力在影响行为。考虑测量残余应力。

5.4.2 对于有取向要求的试样(如图10)应尽可能在完成热处理后机加工。对完成热处理后难以进行加工的某些材料，最后一道热处理必须在开缺口和精加工之前进行，这种情况下应考虑到最终机加工阶段，每个面至少要去掉0.5 mm厚。然而，对于已经完成机加工的试样，也可以进行热处理，但这种热处理必须不损害表面状态，不产生残余应力及淬火裂纹或者变形的情况下才行。

5.4.3 机加工后，应对试样进行充分的除油处理，以保证在随后预制疲劳裂纹或应力腐蚀试验期间试样的裂纹尖端不会被污染。当采用电阻法检测裂纹扩展时，需要用锡焊或铜焊方法将电极与试样连接起来，这时为了除去少量残余焊剂，应该在焊接之后和预制裂纹之前进行除油。

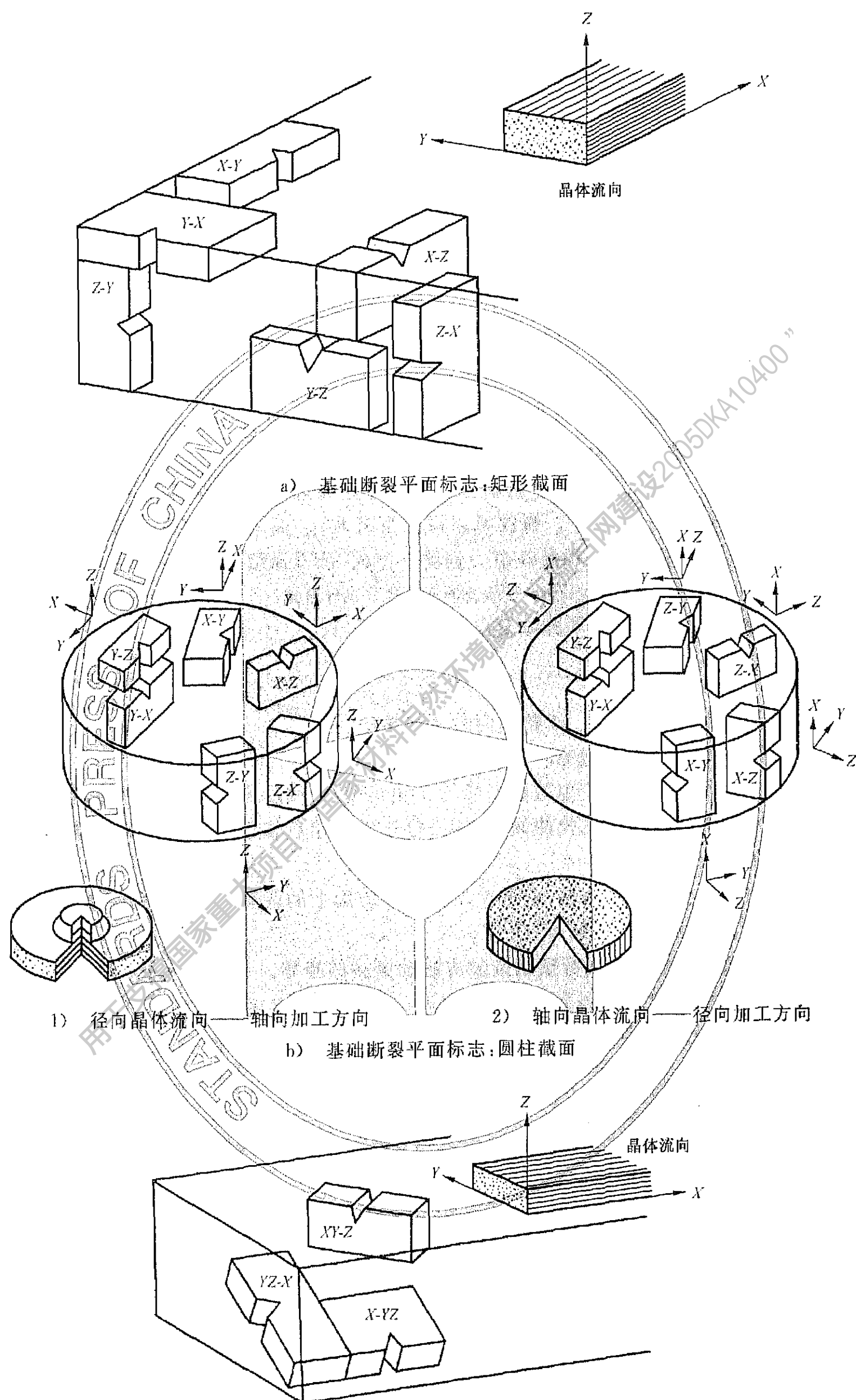


图 10 断裂平面标志

5.5 试样标记

试样的标识号可以压印或刻写在试样的切口面上,或者平行于切口的端面上。

6 疲劳裂纹的萌生和扩展

6.1 用预制裂纹的试验机对试样加载时,应使切口附近的应力分布对称,并且施加力的准确度在 $\pm 2.5\%$ 以内。

6.2 在预制疲劳裂纹过程中,试样所处的环境条件及受力状态都影响其在以后应力腐蚀试验中的行为。对于某些材料,在预制裂纹操作时,引入应力腐蚀试验环境,将促使裂纹从一般的塑性穿晶疲劳开裂模式转变为很类似于应力腐蚀开裂的模式。这有利于以后的应力腐蚀裂纹的萌生以及  $K_{I\text{SCC}}$  起始值的测定。然而,除非在预制疲劳裂纹后直接开始应力腐蚀试验,否则存在于裂纹尖端的腐蚀剂由于腐蚀作用能使裂纹尖端变钝。再者,当在含侵蚀性物质的环境中预制疲劳裂纹时,由于腐蚀疲劳破断形式对循环加载格外敏感,因此试验结果的重现性要受影响。另外,在预制疲劳裂纹时,为了达到控制环境的目的,要求更完备的疲劳试验装置。为此,建议除非相关双方同意采用其他的方法外,一般预制疲劳裂纹都要在正常的实验室空气环境中进行。

6.3 试样要用  $R$  值为  $0\sim 0.1$  的疲劳载荷预制裂纹,直到裂纹至少在侧面越过切口  $2.5\%W$  或  $1.25\text{ mm}$ (选用两者中的较大值)为止。裂纹可以在比预期  $K_{I\text{SCC}}$  高的  $K_I$  值下开始,但在裂纹扩展的最后  $0.5\text{ mm}$ ,疲劳裂纹要在尽可能低的最高应力强度下完成(低于预期的  $K_{I\text{SCC}}$  值)。

注:当期望低的  $K_{I\text{SCC}}$  值时,GB/T 20120.2 中描述的卸载程序也许有益。

6.4 最终的疲劳裂纹长度,要满足平面应变条件见公式(5):

$$a \geq 2.5 \left( \frac{K_I}{R_{p0.2}} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

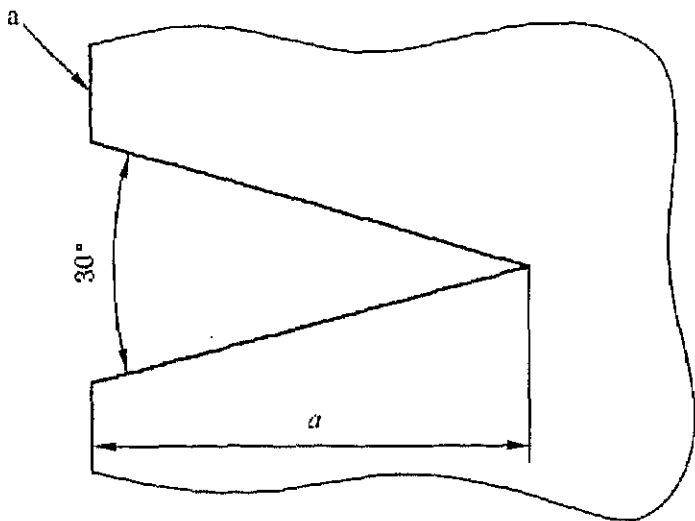
当最终的  $a/W$  比值在  $0.45\sim 0.55$  范围内时条件最佳。

注:与 SCC 相关联的裂纹尺寸非常重要。

6.5 为了避免分别由切口和裂纹产生的应力场的互相作用,裂纹应限制在图 11 所示弯曲和拉伸试样的包络线内,例如对于有效的弯曲或拉伸试样,如果包络线的顶点位于疲劳裂纹的尖端,整个机械切口应位于图 11c)中的包络线内。

6.6 为了确保应力强度分析的有效性,应检查试样两个侧面上的疲劳裂纹,以保证疲劳裂纹面不得偏离切口平面  $10^\circ$  以上,长度差值不得超过  $5\%W$ 。

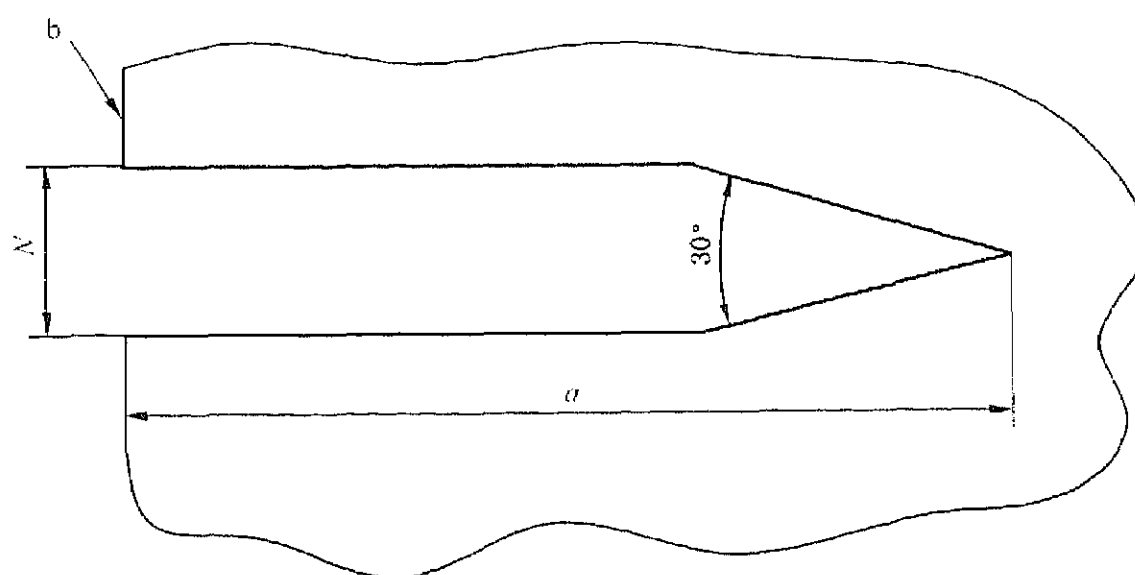
6.7 在 GB/T 20120.2 中有关于疲劳预制裂纹方法的更多的指导。



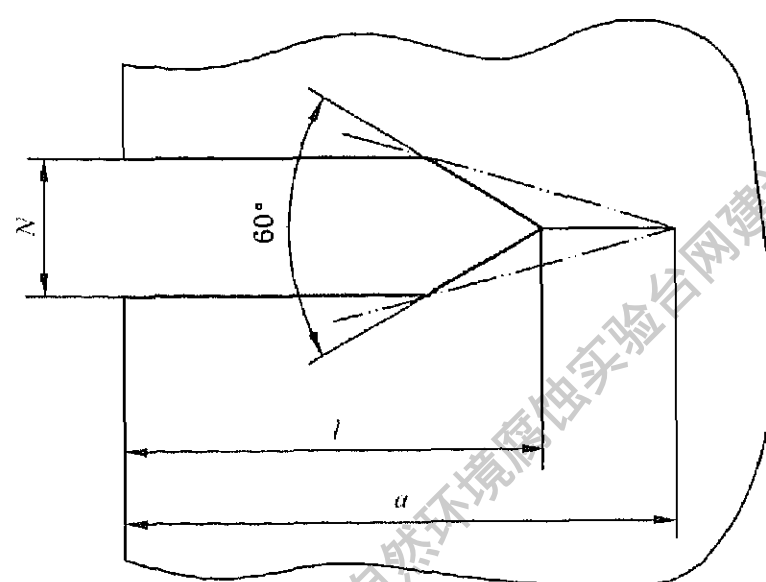
a) 弯曲试验段

图 11 切口和疲劳裂纹的包络线极限尺寸和形式





b) 拉伸试验段



c) 弯曲或拉伸试验段

- a 试验段边缘。  
b 试验段加载线。

图 11 (续)

## 7 试验步骤

### 7.1 总则

试验前测定试样厚度  $B$  和宽度  $W$ , 精确到  $0.1\%W$  以内, 测量线离裂纹平面不能大于  $10\%W$ 。还要测定试样两侧面上疲劳预裂纹的平均长度, 并用该值估计产生期望初始应力强度  $K_I$  所需载荷 (见 7.6)。

### 7.2 环境因素

7.2.1 因为金属-环境交互作用的特殊性, 有必要在严格控制的环境条件下进行应力腐蚀裂纹扩展试验 (见 7.2.3 和 7.2.4)。

7.2.2 试验所采用的环境条件取决于试验目的。但是理想情况下应该与合金使用的实际环境条件相同或相近。

7.2.3 重要的环境因素有电极电位、温度、溶液组分、pH 值、溶解气体的浓度、流速和压力。GB/T 15970.1 给出了有用的背景信息。与气体有关的环境中, 一个关键的因素是气体的纯度。

7.2.4 试验可在开路条件下进行, 在此条件中金属的电极电位依赖于特定的试验环境条件, 其中充气程度是一个重要因素。替代之一, 可用恒电位仪或静电计方法测的开路值代替电极电位。

7.2.5 施加外电流的辅助电极应设计成在试样上产生均匀的电流分布, 即恒定的电极电位。

7.2.6 实际操作时, 建议试样与试验环境接触后再加载。否则, 试样在加载后应尽快地暴露到试验环

境中。

### 7.3 环境箱

7.3.1 环境试验箱应能完全封闭试样的试验部位。夹持部位尽可能避免与溶液环境接触,防止电池效应和缝隙腐蚀。这些问题可通过使用图 12 所示的局部的环境槽解决,环境在缺口、预裂纹和预期的试样裂纹扩展区域循环。在试样从试验槽的伸出处也可发生缝隙问题,可通过合适的槽设计或在这样位置使用防护涂层解决。如果期望完全浸没在腐蚀剂中,加载点应进行腐蚀防护。如果这不可行,可采用合适的措施,如相似的金属、电绝缘或涂层。

7.3.2 要求足够的溶面比(依赖于反应速率和暴露时间)和必要的循环系统。对于施加电位或施加电流的条件,为了限制电极反应产物产生的任何效应,电极间设置分离隔板。在考虑应力腐蚀破裂机制时,应当注意随裂纹长度增加,在应力腐蚀裂纹尖端的恒电位控制可遭受更大的变化。

7.3.3 推荐环境试验箱和循环系统使用非金属材料,这些材料应为惰性。注意玻璃和某些塑料在高温时不是惰性,在有必要使用金属试验箱时,为防止电池效应,应与试样电绝缘。

7.3.4 对于气体环境试验,应首选全金属试验箱。

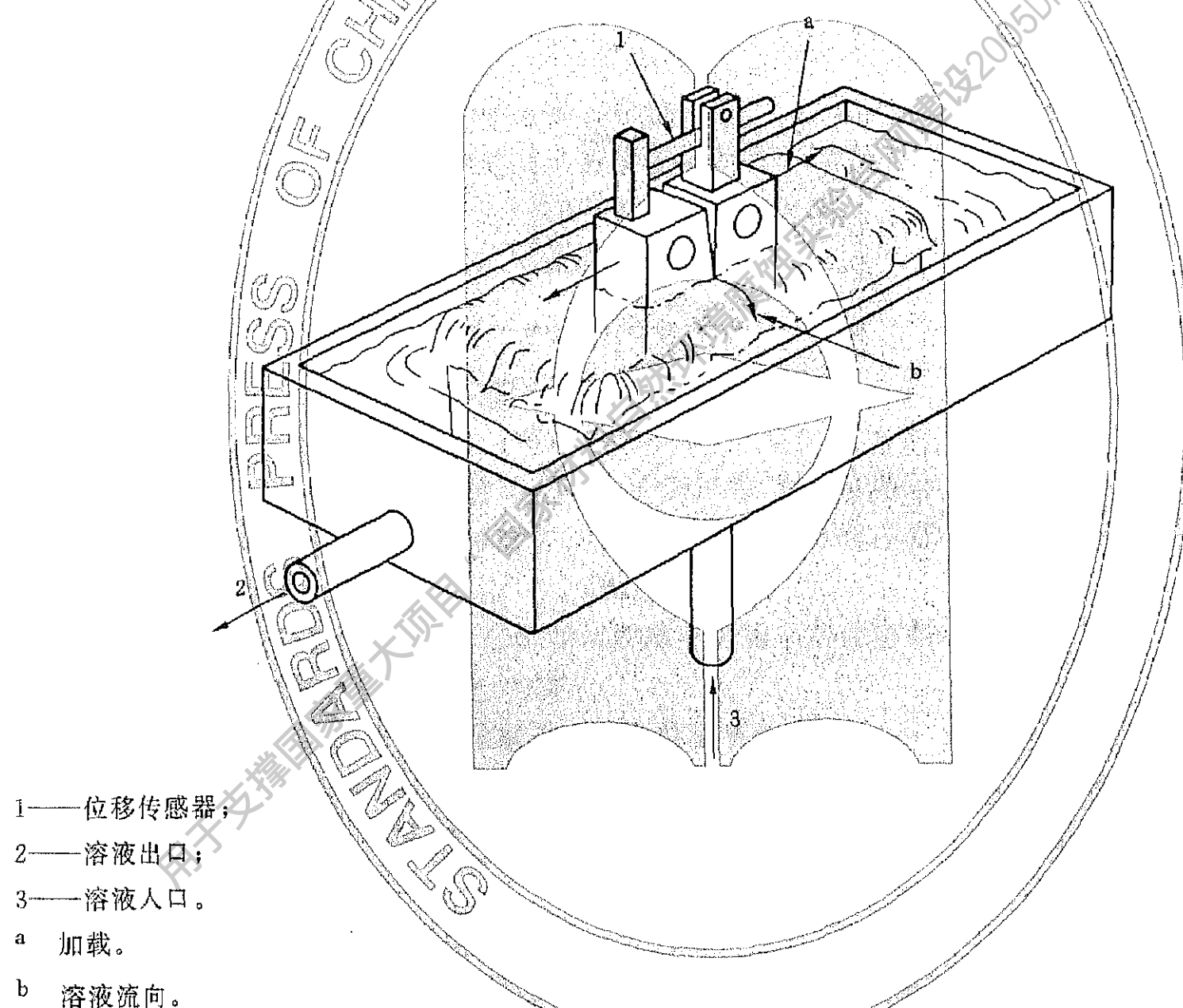


图 12 断裂力学试样在环境箱中安置

### 7.4 环境控制及监测

7.4.1 在试验期间,要求对试验环境进行监控和控制。在非缓冲体系中,用自动 pH 控制系统维持 pH 值恒定。否则,应评价 pH 值的变化对裂纹成长的影响。

7.4.2 在对大气开放体系中,可通过向溶液中空气冒泡维持充气。在封闭系统中,要求监控。因为流动能影响电极电位,如影响氧的流通和裂纹里与溶液之间的物质传输,试验使用的流速应模拟实际使用的条件。在后一种情况中,相对裂纹的流动方向可能是重要的。应考虑对裂纹侧面密封以限制人为的沿厚度方向的传输,但也许引进局部缝隙问题。

7.4.3 强烈建议使用合适的参比电极测量电极电位。在测量电位时,应注意限制 IR 降。溶液温度应

控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内。

### 7.5 动态加载前初始 $K$ 值的选择

7.5.1 如果研究的材料无在空气中的断裂韧性试验数据,应在试验室空气中进行一个初步试验。这需要一个原始试样采用推荐方法测定材料的断裂韧性  $K_{Ic}$  (如不满足,则是  $K_Q$ )。此值为  $K_{Isc}$  的上限。

7.5.2 如果在试验开始时不知道破裂条件,在给定的金属/环境组合下破裂条件可能与时间有关。在这种情况下,如果足够慢的位移速率能确保在经过必要的时间前不会发生纯力学断裂,仅能观察到应力腐蚀破裂,由此建立了破裂的环境条件。在动态应变开始前将试样暴晒在试验环境中一段时间,往往可以使这些困难减到最小。建议在试验开始前,将施加了预载荷的试样放置在试验环境中至少 24 h。环境中初次试验的典型预载荷值相当于  $K_{Ic}$  (或  $K_Q$ ) 的 5% 的初始  $K$  值。

7.5.3 初始  $K$  值的选择是非常重要的,因为此值决定了试验的时间。

7.5.4  $K$  的初始值可相当于疲劳预裂后的  $K_{max}$  终值。在认为  $K_{Isc}$  值可能高时,动态加载前载荷可逐步增加到一个更高的随机值。如果随后发生的破裂不会使后来的  $K$  值增加,那么应该选择较低的初始  $K$  值。因为相对于静态加载,动态加载通常是加速试验方法,可采用低的初始  $K$  值。然而,初始  $K$  值可以基于  $K_{I-init}$  的最初估计值来精确选择。

### 7.6 $K_{Isc}$ 的测定

#### 7.6.1 总则

在每次试验之前要选择位移速率,且此位移速率在整个试验期间应保持恒定。

#### 7.6.2 测定程序

7.6.2.1 在大多数体系中,裂纹萌生时的应力强度因子  $K_{I-init}$  可能是使用的位移速率的函数。因此,对于研究的体系,试验应该在合适的位移速率范围内进行,以确保得到  $K_{Isc}$  的守恒值。根据 7.6.2.2 至 7.6.2.9 中的概述的方法,让许多试样在不同的位移速率下进行试验。

7.6.2.2 应选择一个随机但低的位移速率来测定初步的  $K_{I-init}$  值,当超过此值时应力腐蚀破裂可能会开始。尽管对于初步试验,钛合金的  $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  ( $36 \mu\text{m/h}$ ) 和高强度钢和铝合金的  $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  ( $3.6 \mu\text{m/h}$ ) 的位移速率也许是合适的,但此速率取决于研究的材料和环境,应得到相关双方的同意。附录 A 给出了确定合适的初始位移速率的一些建议。

试验从 7.5.2 条中选择的预加载开始后不能对试样卸载。

7.6.2.3 在试验期间,裂纹长度可以通过电阻法、支撑面应变法或可替代的技术连续监测。具体的监测方法要根据试验条件而定。这些测量方法应能监测出裂纹的萌生,并能够测定裂纹扩展率随应力强度因子变化的函数关系。

7.6.2.4 试样的载荷-位移变化及试验开始后所持续的时间均应测量并记录。试验机应该在间接裂纹长度测量或记录的载荷下降之后停止。记录的载荷下降表明裂纹萌生及随后的裂纹扩展开始。

7.6.2.5 试验完成时,从试验环境中取出试样,通过在空气中热着色或疲劳破裂标记裂纹前端。疲劳破裂应该在  $R$  比值大于 0.6 下进行,以避免由于裂纹闭合作用导致断裂面的损伤。最大疲劳载荷应不超过试验期间测量的载荷终值的四分之三。在某些环境中,试验终止时的裂纹前端已经被环境的可见残留物标识,所以不需要额外标识。

7.6.2.6 试样应被破坏,并分别在两个侧面和  $0.25B$ 、 $0.50B$  和  $0.75B$  三个位置测量疲劳预裂纹长度。这五个测量的平均值应作为计算  $K_{I-init}$  时有效的初始裂纹长度  $a_0$ 。

下述情况试验无效:

- a) 后三个测定值中的任意两个之间的差超过  $2.5\%W$ ;
- b) 最大和最小裂纹长度之间的差超过  $5\%W$ ;
- c) 疲劳裂纹面的任一部分所处的平面偏离切口平面超过  $10^{\circ}$ ;
- d) 疲劳裂纹不在一个平面上,即存在多核效应;

- e) 因子  $2.5 \left( \frac{K_{I-init}}{R_{p0.2}} \right)^2$  大于试样的厚度和/或裂纹的长度;
  - f) 疲劳裂纹长度存在不确定性。
- 7.6.2.7 一个新试样在同样的环境条件下以低位移速率进行试验,初始  $K$  值可以修正。

注:通过显微镜法检查断裂面,对在空气中试验的试样的断裂表面和应力腐蚀裂纹扩展区比较,作为选择新位移速率的指导;在临近初始裂纹前端的稳定裂纹扩展区,依据表 1 所示,用断裂面上环境破裂所占的百分数作为在随后试验中合适的位移速率估计值。

如果环境破裂覆盖稳定裂纹扩展的全部区域,尽管这被证实是合理的,但没必要进一步减小位移速率。否则,位移速率应为前述试验中选择的速率的十分之一。

表 1 根据断裂表面中应力腐蚀破裂所占百分比  
应变速率减少的推荐倍数

断裂表面中 SCC 百分比/%	位移速率减少倍数
<10	50
10~30	20
30~50	10
50~80	5
>80	2

- 7.6.2.8 如果由随后的两个试验测得的  $K_{I-init}$  值相差不超过 5% (或  $K_{I-SCC}$  值所需的精确度),那么这两个值中较低的值可以被认为是  $K_{QSCC}$  的初步值。
- 7.6.2.9 如果时间允许,  $K_{QSCC}$  的初步值的可靠性可以通过进一步的应力腐蚀试验来核实,位移速率要低于 7.6.2.8 中应用的速率,减少系数是 5~10。如果该试验显示出  $K_{I-init}$  的测量值进一步的减小,那么有必要进行进一步试验。此外,可以通过绘制  $K_{I-init}$  的测量值和位移速率的函数曲线,看曲线是否渐进  $K_{QSCC}$  值,如图 13 中所示,可获得取决于  $K_{I-init}$  的位移速率的一些信息。

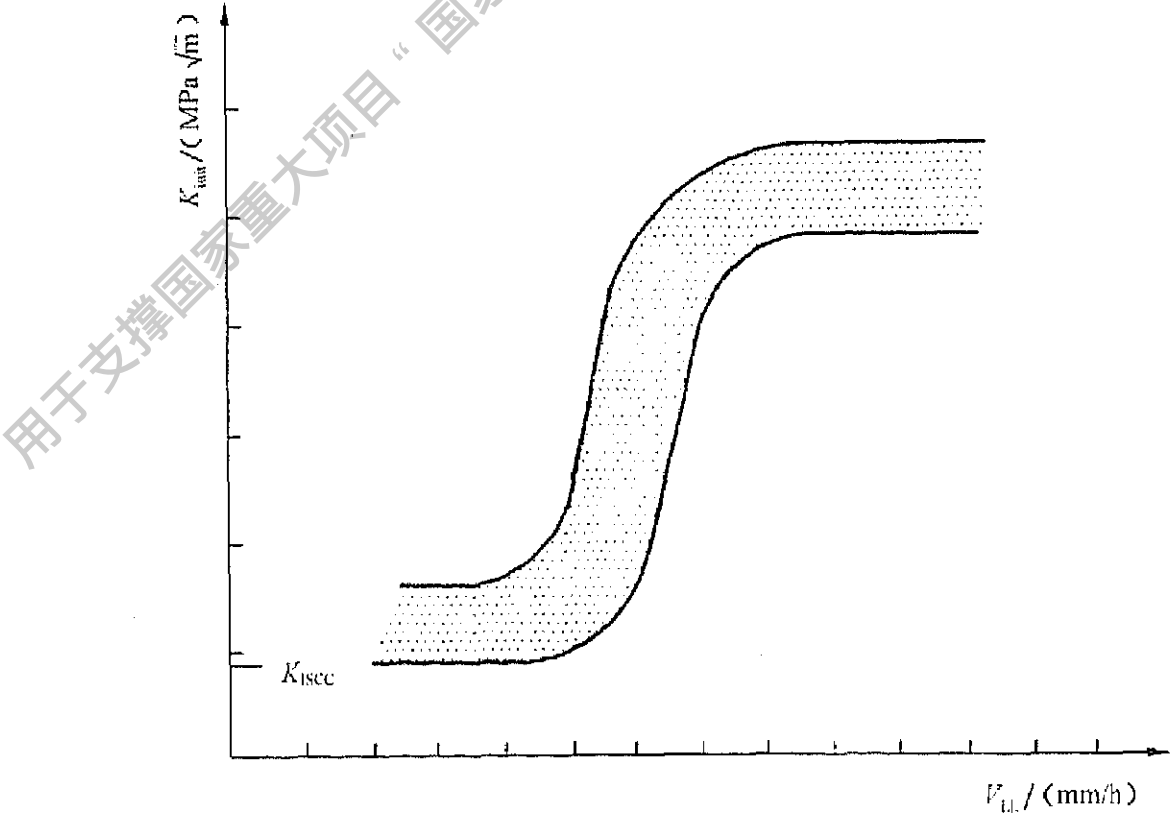


图 13 应力强度因子初始值与施加位移速率的函数关系

- 7.6.3 试验结果的有效性
- 当  $K_{QSCC} = K_{I-SCC}$  时试验结果有效,下述情况无效:
- a) 后三个测定值中的任意两个之间的差超过 2.5%W;
  - b) 最大和最小裂纹长度之间的差超过 5%W;
  - c) 疲劳裂纹面的任一部分所处的平面偏离切口平面超过 10°;

- d) 疲劳裂纹不在一个平面上,即存在多核效应;
- e) 因子  $2.5 \left( \frac{K_{I-init}}{R_{p0.2}} \right)^2$  大于试样的厚度和/或裂纹的长度;
- f) 疲劳裂纹长度存在不确定性。

## 7.7 裂纹速率测定

7.7.1 条款 7.6 中进行的试验,与  $K_{Isc}$  (或  $K_{Qsc}$ ) 相一致的  $K_{I-init}$  的屈服值可用于确定环境裂纹扩展速率,可以作为平均数据或应力强度因子  $K$  的函数,附录 B 给出了方法。为了测定这些数据,应破坏掉试样,然后通过显微镜法检查断裂面。

7.7.2 应测量最终裂纹前端,测量精度尽可能在  $0.5\%W$  内。在两边和  $0.25B$ 、 $0.50B$  和  $0.75B$  位置处,这五点测量的平均值作为有效的最终裂纹长度  $a_f$ 。

7.7.3 用最终裂纹长度和初始裂纹长度的差值( $a_f - a_0$ )除以裂纹萌生和试验终止的时间差,获得平均裂纹速率  $\Delta a / \Delta t$ 。

## 8 试验报告

试验报告应至少包含以下信息:

- a) 详细描述试验材料,包括化学成分、组织状态、力学性能、产品类型和截面厚度。测定  $K_{Ic}$  (或如果不遵从有效性准则时,则为  $K_Q$ );
- b) 试验机和测量裂纹长度的设备以及测量精度;
- c) 环境箱和所有用于环境监控的设备;
- d) 溶液的初始组分、pH 值、充气程度(或其他相关气体的浓度),流动状况、温度和电极电位。根据再循环速率,用流经试样的近似线性速度来说明流速;

注:应指出使用的参比电极;应报告电位和参照的合适的标准电极(例如:在  $25^\circ\text{C}$  下的标准氢电极或饱和甘汞电极);在整个试验期间这些参数的变化。

- e) 试验初始步骤;
- f) 在试验期间环境或加载的瞬间变化(包括试验中断),说明特征和持续时间以及相关的裂纹长度;
- g) 对于每个试样:
  - 1) 试样类型和加载方式;
  - 2) 厚度  $B$  (如有侧面槽则为  $B_n$ ),单位为毫米(mm);
  - 3) 宽度  $W$ ,单位为毫米(mm);
  - 4) 疲劳预裂纹:
    - i) 裂纹扩展终止段的疲劳强度因子  $K_{Ic}$ ;
    - ii) 疲劳载荷比  $R$ ;
    - iii) 预制裂纹期间的温度和环境。
  - 5) 疲劳预裂纹的长度  $a$ ;
  - 6) 初始应力强度  $K_{Ic}$ ;
  - 7) 暴露在环境中的初始时间及总的试验时间;
  - 8) 是否发生稳定的裂纹扩展;
  - 9) 裂纹平面和扩展方向,如图 10 所示标记。
- h) 使用的位移速率范围;
- i)  $K_{Isc}$  值(如果不满足有效判据,则为  $K_{Qsc}$ ),要注明测定的位移速率和判断准则;
- j) 裂纹扩展数据(平均值或作为应力强度的函数)。

## 附录 A

(资料性附录)

恒位移速率试验中确定  $K_{I,SCC}$  的合适位移速率的测定

## A.1 总则

为了评价系统的  $K_{I,SCC}$  值,此方法假设在腐蚀性环境试验中的位移速率  $(dq/dt)_{SCC}$  可以通过在惰性环境中测量的裂纹扩展速率  $(da/dt)_{inert}$  与环境诱导破裂平稳阶段的裂纹扩展速率  $(da/dt)_{SCC}$  的比值,依据  $(dq/dt)_{SCC} < \frac{(da/dt)_{SCC}}{(da/dt)_{inert}} (dq/dt)_{inert}$  而估计得到。

环境诱导破裂的裂纹扩展速率  $(da/dt)_{SCC}$  可在试验中合理的时间得到,使用高应力强度可避免长孕育期。根据 GB/T 15970.6 使用紧凑拉伸试样、DBC 试样或 WOL 试样,在充分的裂纹扩展后终止的恒位移试验可获得粗略的  $(da/dt)_{SCC}$  估计值。阶梯式加载同样适合此目的。在同样的环境条件下,根据 GB/T 15970.7 平滑试样的慢应变速率试验确定的平均裂纹速率值可作为更低的界限值。

## A.2 步骤

A.2.1 与随后的 SCC 试验试样尺寸和形状相似的试样,在空气(或惰性环境)中进行试验。加载速率产生的载荷作用点位移速率  $(dq/dt)_{inert}$  在  $0.1W/min \sim 0.1W/h$  之间。试样的载荷位移行为及从试验开始的持续时间均应测量并记录。试验应持续到测得的裂纹扩展至少为  $0.1W$  为止。

A.2.2 通过热着色或疲劳预裂标记裂纹扩展程度。

A.2.3 破坏试样以便显露断裂面,并在两个侧面和  $0.25B$ 、 $0.50B$  和  $0.75B$  三个位置处测量初始裂纹长度  $a_0$  及最终的裂纹长度  $a_f$ 。

这 5 个测量值的平均值应作为有效的裂纹长度  $a_0$  和  $a_f$ 。

A.2.4 平均惰性裂纹扩展速率  $(\Delta a/\Delta t)_{inert}$  可通过最终裂纹长度和初始裂纹长度的差值  $(a_f - a_0)$  除以当裂纹萌生和试验终止时间的差得到。

A.2.5 应力腐蚀破裂的裂纹扩展速率  $(da/dt)_{SCC}$  可通过附录 C 中的任一种方法确定。

A.2.6 为了确定  $K_{I,SCC}$ ,渐进位移试验的合适位移速率可以由公式(A.1)得到:

$$(dq/dt)_{SCC} = 0.5 \frac{(da/dt)_{SCC}}{(\Delta a/\Delta t)_{inert}} (dq/dt)_{inert} \dots\dots\dots (A.1)$$

## 附录 B

(资料性附录)

## 裂纹扩展速率的确定

裂纹扩展速率  $da/dt$ , 是由裂纹长度与所用时间的比值( $a/t$ )计算得到。如果数据有干扰或有假象, 建议在计算裂纹扩展速率前, 建立  $a$  与  $t$  的多项式拟合曲线, 否则在裂纹扩展中可发生明显的波动。应注意确保由拟合方法获得  $a$  与  $t$  的清楚的真实波动。

一个推荐方法是在 GB/T 20120.2 中描述的疲劳裂纹扩展速率( $da/dN$ )的递增多项式方法。这种方法涉及到拟合一个二次多项式(抛物线), 设定  $(2n+1)$  个连续数据点, 此处  $n$  通常为 1、2、3 或 4。

局部拟合方程式见公式(B.1):

$$a = b_0 + b_1 \frac{(T_i - C_1)}{C_2} + b_2 \left( \frac{T_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$$-1 \leq \frac{(T_i - C_1)}{C_2} \leq +1;$$

$T_i$ ——试验时间;

$b_0$ 、 $b_1$  和  $b_2$ ——回归参数, 用在  $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$  范围的最小二乘法确定;

$a_i$ ——裂纹长度在  $T_i$  的拟合值。

参数  $C_1 = 0.5 \times (T_{i-n} + T_{i+n})$  和  $C_2 = 0.5 \times (T_{i+n} - T_{i-n})$  用于定标输入数据。从上面抛物线导出在  $T_i$  的裂纹成长速率。由式(B.2)给出:

$$(da/dt)a_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \frac{T_i - C_1}{C_2^2} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

与  $da/dt$  有关的  $K_I$  使用相应于  $T_i$  的拟合裂纹长度  $a_i$  计算。



## 附录 C

(资料性附录)

## 裂纹长度的间接测量方法

## C.1 电阻测量法

## C.1.1 直流电位降法

试样被电绝缘,恒定电流横穿过裂纹平面。在铁素体钢试样净断面上使用的典型的电流密度为  $10^4 \text{ A/m}^2 \sim 10^5 \text{ A/m}^2$  数量级,但是对于低电阻金属可能会要求更高的电流密度。在裂纹平面任一侧上两点之间的电位降被检测,并且用与试验、分析或者计算得到校准值来确定裂纹的长度。在后面情况中希望进行试验验证。

试验方法应很好的建立,并且试验仪器具备一定的稳定性和可靠性。由于需要很高的电流,此方法不适用于大的或低电阻率的试样。然而由这种方法的派生方法,可在这些环境中使用。这包括监测附在试样上易碎的金属箔上面的裂纹长度,测得的金属箔上的裂纹长度等于下面试样上裂纹表面长度。

下面是一般方法可能的误差来源:

- a) 热阻系数的变化;
- b) 热电磁力(emfs)。

可以使用一个比较仪技术来克服 a)。用一块与第一个试样相似,并且在电学上与其串联,物理上与其靠近,但不循环加载的试样上两点之间测得的电位降,或者在试验中的试样上另一对探针之间测得的电位降来对横穿裂纹的电位降进行划分。对于后者,尽管试验简单,但是需要注意校准,因为两个测量电位值可随着裂纹的长度而变化。

热电磁力可以用与试样材料相似的金属电压探针来消除。当两块不同金属不可避免连接时,探针应该插入一块相对大的热量块中。一个切开的边长为 50 mm 的中空铝块比较合适。

这种方法提供了对于横穿试样的平均裂纹长度的测量。它能良好的适合自动数据收集和机械控制。

## C.1.2 交流电电位降法

电位降法分为两类:低频和高频系统。

低频率系统(典型的操作范围为 10 Hz~100 Hz)本质上是 DC 法的发展。使用相位灵敏检测系统可以得到一个高的信噪比,并且因此提高了灵敏度。热电磁力也不再是一个难题了。但是,与 DC 法一样需要校准。

高频率系统(5 kHz~8 kHz)是利用在这些频率范围内的流向试样表层的电流定位。这将电流的需求减到最小,而且导致电压和不受试样尺寸约束的裂纹长度成线性关系。因此这种方法尤其适合大试样中的裂纹测量。

AC 的电子学系统相对复杂,而且不易达到所要求的长期稳定性。依赖于系统的特性,必须特别谨慎以避免由干扰导致的伪信号。因此,由探针导线和试样表面构成的物理回路应尽可能的小,并且探针导线应该缠绕在一起或使用小型屏蔽/防护导线。导线应该被遮蔽以防止其移动,探针和励磁电流导线应很好的隔离。

由于电压与裂纹长度的线性关系,将高频方法加入到自动监测系统中是特别方便的。

## C.2 柔度方法

下列是两种最通用的方法:

- a) 横穿缺口的每单位载荷位移的测量;



b) 每单位载荷的承载面应变的测量。

在 a) 中, 一个合适的传感器, 例如, 夹式延伸仪, LVDT (线性变化位移传感器) 或者安装在通过缺口处 (SENB3、SENB4 和 CT 试样) 或者缺口中央 (CCT 试样) 环形测力计。确定每单位力的位移, 而且通过校准与裂纹长度相关联。如果使用第二块试样, 它应该被放置在与试验试样相同的环境条件下。这将确保相似的瞬时热量等性质。使用反向极性技术也可以将热量影响减到最小。

“承载面应变” (BFS) 方法在原理上是相似的。在这个条件下传感器是一个位于试样“承载面”上应变计桥, 例如缺口对面。这种方法对于 CT 试样尤其成功, 而且对于 SENB4 也可以得到预期的相似灵敏度。但由于载荷点位于缺口的对面, 这种方法并不适合 SENB3。此方法也不适合 CCT, 因为这种几何形状下 BFS 对于裂纹的长度并不是特别敏感。由于在高频率下不存在实际的惯性效应, 与其他柔度方法相比, 更应优先选择 BFS。位移传感器和应变计应该避免与溶液接触, 以保证其完整性和避免电池影响。

这些方法提供了测量平均裂纹长度的方法, 非常适合自动数据采集和机械控制。

用于支撑国家重大项目“国家材料自然环境腐蚀实验台网建设2005DKA10400”

用于支撑国家重大项目“国家材料自然环境腐蚀实验台网建设2005DKA10400”

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准

金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验  
第 9 部分：渐增式载荷或渐增式位移下的  
预裂纹试样的制备和应用

GB/T 15970.9—2007/ISO 7539-9:2003

\*

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](http://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 1.75 字数 45 千字  
2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月第一次印刷

\*

书号：155066·1-29834 定价 22.00 元

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 15970.9-2007