

ICS 77.040.10

X XX



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX-20XX

---

## 铝合金断裂韧性试验方法

Aluminum Alloy—Determination of Fracture Toughness

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上  
(征求意见稿 2020-10-25)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

# 目 次

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 平面应变断裂韧度试验方法	2
4.1 方法概述	2
4.2 设备	2
4.3 试样	2
4.4 试验程序	3
4.5 试验结果的计算和评定	3
4.6 可用于批产放行的 $K_{Ic}$	5
5 平面应力断裂韧度试验方法	6
5.1 方法概述	6
5.2 设备	6
5.3 试样柔度测量要求	6
5.4 试样尺寸、形状和制备	6
5.5 试验程序	7
5.6 试验结果的计算和评定	8
6 报告	9
附 录 A (规范性附录) 带残余应力铝合金制品的平面应变断裂韧度试验方法	10
附 录 B (规范性附录) 中心裂纹试样平面应力断裂韧度试验	13
附 录 C (规范性附录) 紧凑拉伸试样平面应力断裂韧度试验	16
附 录 D (资料性附录) 试验夹具	19

## 前 言

本文件系首次制订。

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由中国有色金属工业协会提出。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）归口。

本文件起草单位：西南铝业（集团）有限责任公司、……。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX……。

本文件于 20XX 年首次发布。



# 铝合金断裂韧性试验方法

## 1 范围

本文件规定了铝合金平面应变断裂韧性或平面应力断裂韧性的试验方法。

本文件适用于铝合金板材、锻件、挤压材等产品的断裂韧性试验。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4161—2007 金属材料 平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 试验方法

GB/T 8170 数值修约规则

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 12160 单轴试验用引伸计的标定

GB/T 16475 变形铝及铝合金状态代号

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

## 3 术语和定义

GB/T 4161—2007及GB/T 10623界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**校正的平面应变断裂韧性** corrected plane-strain fracture toughness

$K_{Qc}$

校正残余应力影响后的平面应变断裂韧性，是消除了应力的试样测得的  $K_{Qc}$  或  $K_{Ic}$  的估计值。

### 3.2

**裂纹扩展阻力** crack growth resistance

$K_R$

材料抗裂纹扩展的能力。

### 3.3

**平面应力断裂韧性** plane stress fracture toughness

$K_{Ic}$

裂纹开始失稳扩展时的  $K_R$  值。

### 3.4

**条件断裂韧性** conditional fracture toughness

$K_{R25}$

紧凑拉伸试样的力-位移曲线与该曲线直线段斜率降低 25%的割线交点处的应力强度因子，该点有效裂纹长度  $a_e$  应满足剩余韧带尺寸的要求，如果在该点之前达到最大力，则应使用最大力点来确定  $K_{R25}$ 。

### 3.5

**表观平面应力断裂韧性** apparent plane-stress fracture toughness

$K_{app}$

用原始裂纹长度和最大力计算的应力强度因子。

## 4 平面应变断裂韧性试验方法

### 4.1 方法概述

本章内容包含铝合金平面应变断裂韧性测定及结果评定；对不满足平面应变断裂韧性试验有效性要求的试验结果的处理方法。附录 A 给出了带残余应力的试样的测试方法和试验结果校正方法。

本章内容适用于材料规范规定了  $K_{IC}$  指标的产品。

### 4.2 设备

#### 4.2.1 试验机

相关试验机要求见 GB/T 4161—2007 第 6.1 条和 6.2 条。

#### 4.2.2 引伸计

相关引伸计要求见 GB/T 4161—2007 第 6.3 条。

应校验引伸计的线性度，引伸计线性度校验方法按以下程序执行。

4.2.2.1 把引伸计量程 10 等分，在每个等分点处读数，满足每个位移读数偏离数据的最小二乘最佳拟合直线的偏差不超过 0.003mm。

4.2.2.2 应执行 3 次校验程序，每次校验后将引伸计从校验设备取下再重新安装。

#### 4.2.3 加载夹具

附录 D 给出了一种中心裂纹试样夹具，夹具的设计应使摩擦对测力的影响最小。其他相关加载夹具要求见 GB/T 4161—2007 第 6.4 条。

### 4.3 试样

#### 4.3.1 试样尺寸

按照本方法，只有在试样韧带尺寸  $(W-a)$  不小于  $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$  时，试验结果才认为是有效的。由于不能提前保证满足该要求，因此最初试验采用的试样尺寸应该是保守的。如果材料的形状不能满足试样韧带尺寸  $(W-a)$  不小于  $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$ ，则不能按照本方法进行有效的  $K_{IC}$  测定。

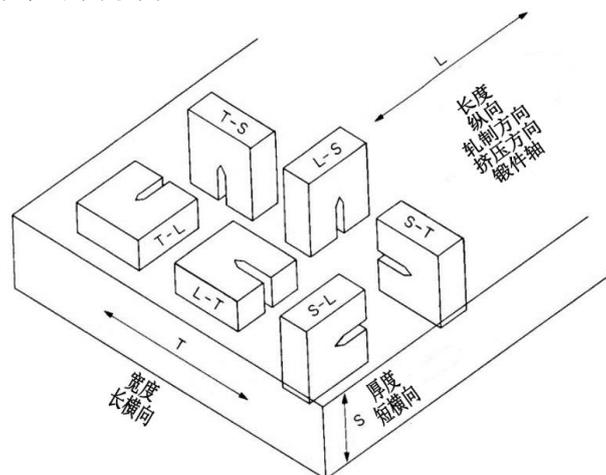
#### 4.3.2 试样类型与比例尺寸

相关试样类型与比例尺寸要求见 GB/T 4161—2007 第 7.2 条。

#### 4.3.3 试样的准备与疲劳预裂纹

相关试样的准备与疲劳预裂纹要求见 GB/T 4161—2007 第 7.3 条及 GB/T 4161—2007 附录 A，并且疲劳预裂纹的最后阶段的最大应力强度因子  $K_I$  与弹性模量  $E$  应满足  $K_I/E \leq 0.00032\sqrt{m}$ 。

应按图 1 标记试样裂纹平面取向。



a) 矩形截面---与基准方向对齐的试样

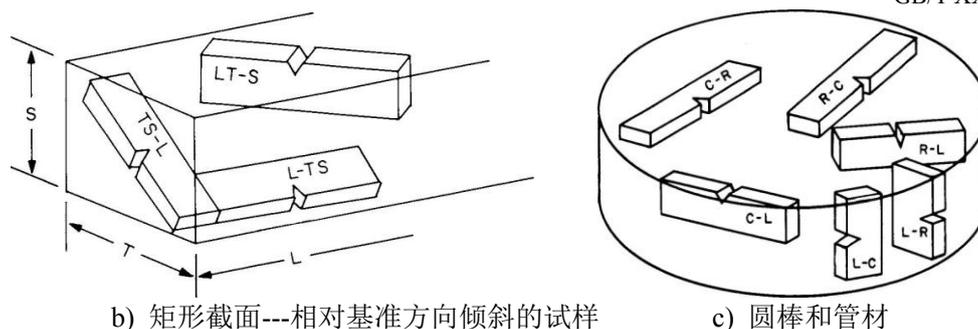


图1 裂纹平面取向标识

#### 4.4 试验程序

##### 4.4.1 试样测量

应在靠近缺口处测量试样厚度 ( $B$ )，测量值应至少准确到  $0.025\text{mm}$  或  $0.1\%$ ，以较大者为准。除表面剪切唇以外，疲劳预裂纹平面和后续的  $2\%$  裂纹扩展应与起始缺口平面平行，偏差在  $\pm 10^\circ$  以内。

试样厚度 ( $W$ )、裂纹长度 ( $a$ ) 的测量要求以及裂纹扩展量、试样各部位裂纹长度差、裂纹条数要求见 GB/T 4161—2007 第 8.1 条。

##### 4.4.2 加载速率

试样加载速率应使试样在初期弹性阶段的应力强度因子增大的速率在  $0.55\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s} \sim 2.75\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  之间。

##### 4.4.3 试验记录

应采用计算机数据采集系统，且系统应能采集足够按照第 4.5 条进行计算的数据。

#### 4.5 试验结果的计算和评定

##### 4.5.1 计算 $K_{Ic}$

要确定  $K_{Ic}$  测定值的有效性，首先计算条件结果  $K_Q$ ，然后确定是否满足 4.5.2 条要求。

##### 4.5.1.1 确定条件值 $F_5$

通过试验记录的原点 ( $O$  点) 画一条斜率  $(F/V)_5$  等于  $0.95(F/V)_0$  的割线  $OF_5$ ，与记录曲线相交于  $F_5$ ，如图 2，其中原点 ( $O$  点) 为记录的初始线性部分的最佳拟合直线与位移轴的交点， $(F/V)_0$  是记录的线性部分的切线  $OA$  的斜率。力  $F_Q$  的定义如下：如果记录曲线上在  $F_5$  之前的每点的力都小于  $F_5$  (图 2, I 型)，则取  $F_Q$  等于  $F_5$ ；如果  $F_5$  之前有一个最大力超过  $F_5$  (图 2, II 型或 III 型)，则取该最大力为  $F_Q$ 。具体算法可由用户决定。

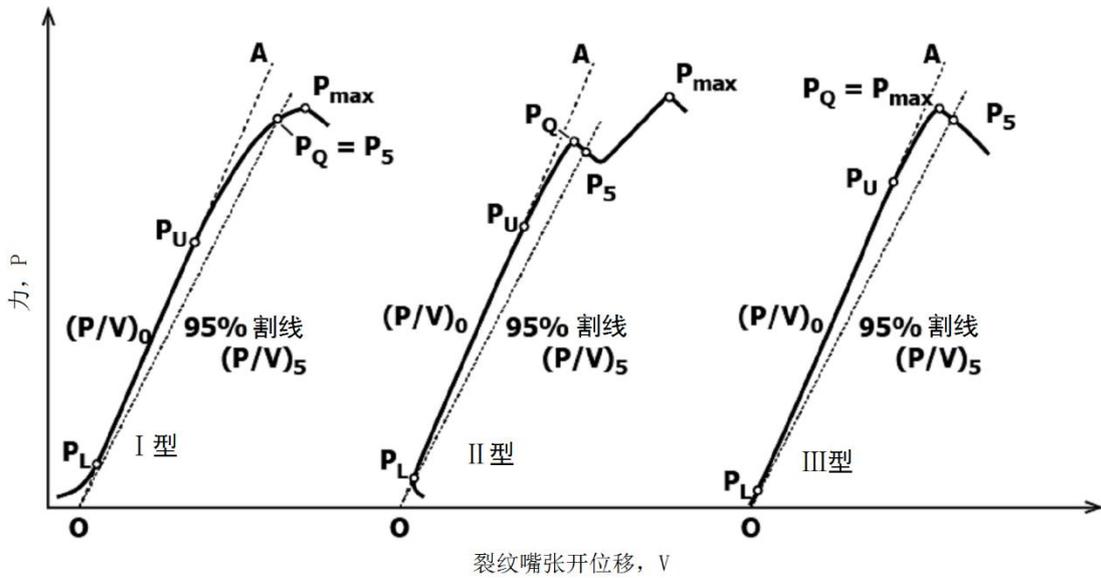


图2 力-位移记录的主要类型

4.5.1.2 计算  $K_Q$

采用紧凑拉伸试样时，将  $F_Q$  替代式 (1) 的  $F$  计算得到的应力强度因子  $K$  即为  $K_Q$ 。

$$K = 10^{1.5} \cdot \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

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

例如： $a/W=0.500$  时， $f(a/W)=9.66$ 。

$K$  —— 单位为兆帕米的二分之一次方， $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ；

$F$  —— 单位为千牛， $\text{kN}$ ；

$B$  —— 单位为毫米， $\text{mm}$ ；

$W$  —— 单位为毫米， $\text{mm}$ ；

$a$  —— 单位为毫米， $\text{mm}$ 。

采用 GB/T 4161—2007 规定的其他试样时，GB/T 4161—2007 附录 B、附录 E、附录 F 里给出了每种试样类型的  $K_Q$  计算表达式。

4.5.1.3 计算  $F_{\text{max}}/F_Q$  比率

$F_{\text{max}}/F_Q$  比率要求见 GB/T 4161—2007 第 10 章。

4.5.1.4 计算  $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$

如果该计算量小于试样的韧带尺寸 ( $W-a$ ) 且满足所有其他有效性要求，那么  $K_Q$  等于  $K_{IC}$ 。否则，该试验不是一个有效的  $K_{IC}$  试验。附录里给出了每种试样类型的  $K_Q$  计算表达式。

如果试验结果不能满足 4.5.1.3 或 4.5.1.4，则需要使用更大的试样来测定  $K_{IC}$ 。

4.5.2 结果评定

试验结果应满足本文件对采用的试样类型的全部适用要求，以评定是否为有效的  $K_{IC}$  试验结果。以下列出了本文件与 GB/T 4161—2007 对平面应变断裂韧度试验要求的差异。

## 4.5.2.1 本文件不作要求

试样厚度： $B \geq 2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$ 。

试样裂纹长度： $a \geq 2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$ 。

## 4.5.2.2 本文件要求

最后阶段的最大应力强度因子： $K_f/E \leq 0.00032\sqrt{m}$

## 4.5.2.3 本文件与 GB/T 4161-2007 要求存在差异

裂纹平面对称性：除表面剪切唇以外，疲劳预裂纹平面和后续的 2% 裂纹扩展应与起始缺口平面平行，偏差在  $\pm 10^\circ$  以内。

加载速率： $K$  速率在  $0.55\text{MPa}\sqrt{m}/s \sim 2.75\text{MPa}\sqrt{m}/s$  之间。

4.6 可用于批产放行的  $K_{IC}$ 

采用紧凑拉伸试样进行试验，试验结果不能按 4.5.2 评定为  $K_{IC}$  时，可按下列内容评定结果是否为“可用于批产放行的  $K_Q$ ”。

## 4.6.1 与疲劳预裂纹相关的评定

## 4.6.1.1 施加载荷

预制裂纹最后阶段最大应力强度因子  $K_f$  大于  $K_Q$  值的 60%，但  $K_f$  不大于  $K_Q$  的 80%，且  $K_f/E \leq 0.00032\sqrt{m}$ 。

## 4.6.1.2 裂纹长度

裂纹长度  $a$  超出  $0.45W \sim 0.55W$ ，但在  $0.4W \sim 0.6W$  内。

## 4.6.2 与试样尺寸相关的评定

4.6.2.1 试样不满足  $W-a \geq 2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$  要求，但试样宽厚比满足  $2 \leq W/B \leq 4$ ，且试样宽度是材料规范规定的尺寸，或者在产品形状限制下已选用表 1 中  $W$  尺寸尽可能大的试样。

4.6.2.2 试样不满足  $F_{\max}/F_Q \leq 1.1$  要求而无效，但试样韧带尺寸满足  $W-a \geq 2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$  要求，试样宽厚比满足  $2 \leq W/B \leq 4$ ，且试样厚度是材料规范规定的尺寸，或者在产品规格限制下已选用表 1 中  $B$  尺寸尽可能大的试样。

4.6.2.3 试样既不满足  $W-a \geq 2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$  也不满足  $F_{\max}/F_Q \leq 1.1$  要求，但试样宽厚比满足  $2 \leq W/B \leq 4$ ，且试样尺寸是材料规范规定的尺寸，或者在产品规格限制下已选用表 1 中  $W$  尺寸与  $B$  尺寸尽可能大的试样。

表 1 可选紧凑拉伸试样  $W$  尺寸表

W尺寸 (mm)	B尺寸范围 (mm)	紧凑拉伸试样高度 (mm)	W尺寸 (英寸)
12.70	$\geq 3.18 \sim 6.35$	15.24	0.5
25.40	$\geq 6.35 \sim 12.70$	30.48	1
38.10	$\geq 9.53 \sim 19.05$	45.72	1.5
50.80	$\geq 12.70 \sim 25.40$	60.96	2
63.50	$\geq 15.88 \sim 31.75$	76.20	2.5
76.20	$\geq 19.05 \sim 38.10$	91.44	3
88.90	$\geq 22.22 \sim 44.45$	106.68	3.5
101.60	$\geq 25.40 \sim 50.80$	121.92	4
114.30	$\geq 28.58 \sim 57.15$	137.16	4.5
127.00	$\geq 31.75 \sim 63.50$	152.40	5

### 4.6.3 其他评定

试样应满足本文件除 4.6.1 条和 4.6.2 条以外的其他全部平面应变断裂韧性试验有效性要求。

### 4.6.4 “可用于批产放行的 $K_Q$ ”

无效的平面应变断裂韧性  $K_Q$  值，在满足了第 4.6.1 条、4.6.2 条和 4.6.3 条时，为“可用于批产放行的  $K_Q$ ”，可用于判断批产的材料是否满足材料规范的平面应变断裂韧性指标。

## 5 平面应力断裂韧性试验方法

### 5.1 方法概述

在裂纹缓慢-稳定扩展期间，发展的裂纹扩展抗力  $K_R$  等于施加的应力强度因子  $K$ 。裂纹受匀速增大的力或加速增大的力或位移驱动向前扩展。定期测量以确定有效裂纹长度并计算  $K$  值，得到一条连续记录韧性变化的  $K_R$  曲线， $K$  值是在规定试验条件下定义  $K_R$  曲线的单独的数据点，从  $K_R$  曲线可以计算得到  $K_C$ 、 $K_{app}$ 、 $K_{R25}$ 。

本章内容适用于材料规范规定了  $K_C$  或  $K_{app}$  或  $K_{R25}$  指标的产品。

注：部分材料规范用  $K_{co}$  或  $K_A$  表示用中心裂纹试样测定的  $K_{app}$ ，用  $K_{A(s)}$  表示用紧凑拉伸试样测定的  $K_{app}$ 。

### 5.2 设备

按 4.2 条和以下规定执行。

#### 5.2.1 光学设备

如果试样足够薄，从表面到中间厚度位置的裂纹长度不会有大的变化，那么可以使用光学设备跟随表面裂纹扩展，并以 0.2mm 精度测定裂纹长度。

### 5.3 试样柔度测量要求

可以直接测量物理裂纹长度并调整裂纹尖塑性区域或测定有效裂纹长度的试样柔度。

试样柔度是在试验过程中试样位移变化量与试样承载力变化量之比 ( $\Delta v/\Delta F$ )。加载柔度和校准信息用来直接确定有效裂纹长度  $a_e$  以计算  $K_R$ 。卸载柔度可以用来确定物理裂纹长度  $a_p$ ，在试验过程中卸载时测量试样柔度，把试样卸载柔度代入到校准曲线或柔度计算式中，以确定物理裂纹长度  $a_p$ ，然后加上塑性区尺寸以计算有效裂纹长度  $a_e$ 。

在试验过程中同时记录力和裂纹嘴张开量来测量试样柔度计算  $\Delta v/\Delta F$ ，可以直接确定有效裂纹长度。

### 5.4 试样尺寸、形状和制备

#### 5.4.1 试样类型

本文件采用两种试样测试  $K_R$  曲线：中心裂纹试样 (M(T) 试样) 和紧凑拉伸试样 (C(T) 试样)。参考附录 B 与附录 C。

#### 5.4.2 试样尺寸

为使计算得出的结果有效，裂纹平面内剩余韧带必须主要为弹性状态，在本文件的后续部分提供了确定有效数据点的方法。

5.4.2.1 厚度小于或等于 6.35mm 的产品，应采用中心裂纹试样，试样厚度应为产品的全厚度。

5.4.2.2 厚度大于 6.35mm 的产品，采用中心裂纹试样时，除非另有规定，否则应在 T/2 位置加工 6.35mm 厚度的试样。

5.4.2.3 中心裂纹试样宽度应满足  $76.2\text{mm} \leq W \leq 760\text{mm}$ 。

- 5.4.2.4 中心裂纹试样初始裂纹长度应满足  $0.25W \leq 2a_0 \leq 0.40W$ ，宜为  $2a_0/W=0.25$ ，初始裂纹长度的公差应为  $+0.0125W/-0W$  或  $+2.5/-0$  mm，以较大者为准。
- 5.4.2.5 厚度大于或等于 6.35mm 的产品，采用紧凑拉伸试样时，试样宽度  $W$ 、厚度  $B$ 、初始裂纹长度  $a_0$  和裂纹平面取向应符合材料规范。
- 5.4.2.6 材料规范未作规定时，紧凑拉伸试样厚度应为产品厚度，试样宽度宜不小于 76.2mm。
- 5.4.2.7 紧凑拉伸试样初始裂纹长度应满足  $0.35W \leq a_0 \leq 0.55W$ 。

#### 5.4.3 试样制备

按附录 B 与附录 C 执行。

### 5.5 试验程序

#### 5.5.1 试样测量

在缺口尖和试样表面之间的缺口平面两个位置处测量，取其平均值作为试样厚度  $B$ ，至少精确到  $\pm 0.5\%B$ ；测量试样宽度  $W$ ，至少精确到  $\pm 0.5\%W$ 。

#### 5.5.2 疲劳预裂纹

试样应在最终热处理状态下预裂纹，疲劳裂纹扩展量不小于 1.3mm，还应满足 B.1 条或 C.1 条。应力比可选，但推荐使用  $R=0.1$ 。预裂纹可包括两级或多级：裂纹引发、中间传播和最终结束，从中间传播级的最后一级到最终结束级的最大力减小量应不超过 30%。最终结束级裂纹扩展不小于 0.65mm，并且必须在恒定循环负载下进行，循环次数不少于  $5 \times 10^3$  次。预制裂纹时  $K_{\max}$  不超过  $16.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

#### 5.5.3 试样安装

在夹持试样执行  $K_R$  试验之前，负载读数应置零。安装试样时应保持试样平直，避免翘曲或扭弯，应在试验机器上小心地对中试样以消除加载偏心。除非材料规范中另有规定，否则应安装防屈曲装置，例如在试样上使用表面加强筋，以防止中心槽附近发生屈曲，安装防屈曲装置时，应在试样与装置之间加入润滑剂。

#### 5.5.4 试验机设置

试验机宜采用位移控制操作来获得超过最大力的  $K_R$  曲线数据点。如果采用力反馈控制，试样会在最大力处断裂，并且在该点之后机器不再受控。试验前需要预热机器及传感器，初始化传感器并置零，然后在开始试验之前启动全部数据采集系统。

#### 5.5.5 试验速度

试样加载速率应使试样在初期弹性阶段的应力强度因子增大的速率在  $0.55\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s} \sim 2.75\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  之间。

#### 5.5.6 使用柔度测量测量有效裂纹长度

以满足第 5.5.5 条要求的恒定速度给试样加载，在连续施加变形的同时监视并成对记录力与裂纹嘴张开位移。

按图 3 所示对试样定期局部卸载，可以检测到试样褶皱或摩擦是否影响试验。卸载时把试样卸载到大约试验力的 80%，如果在试验期间发生了试样褶皱或摩擦，卸载和重新加载的斜率会有一定差异，如果斜率相差大于 2%，或者两个斜率的一个或两个不是线性的，或者如果卸载-重新加载轨迹形成一个环路，那么试样褶皱或摩擦可能严重地影响试验结果，足以引起柔度方法测得的裂纹长度计算的  $K$  值出现明显的误差。

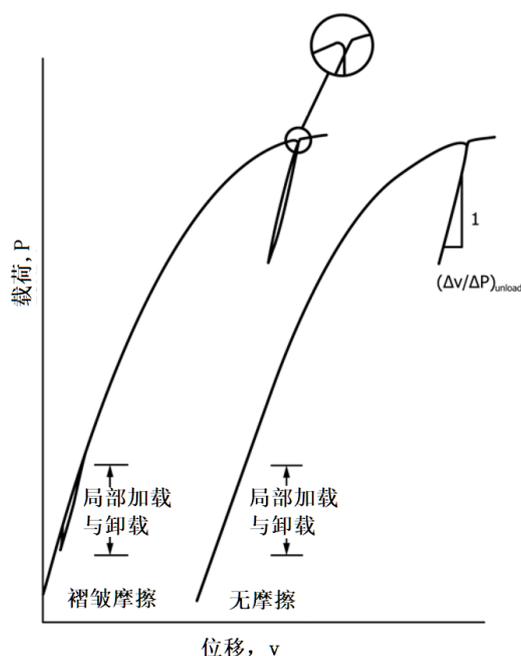


图3 从试样的柔度试验记录检测试样褶皱

### 5.5.7 测量起始裂纹长度 $a_0$

在试样断裂后，检查断裂表面的预裂纹区域并确定是否出现了多条裂纹。起始裂纹长度  $a_0$  是在试样中间厚度处和两个四分之一厚度处测量的三个内部裂纹长度的平均值。如果测量结果不大于任何一个最终结果的 1% 误差，也可以取表面裂纹长度的平均值作为起始裂纹长度  $a_0$ 。裂纹长度测量精确至 0.2mm。

### 5.5.8 裂纹偏差测量

需要注意物理裂纹扩展超出试样中间平面  $\pm 10^\circ$  偏差（起源于机加工缺口尖）之处的全部数据点。

## 5.6 试验结果的计算和评定

### 5.6.1 构建 $K_R$ 曲线

根据本文件确定的  $K_R$  曲线绘制为裂纹扩展阻力与有效裂纹扩展  $\Delta a_e$  之间的函数关系曲线。可以通过加载柔度来直接测量有效裂纹长度，然后计算确定有效性所需要的物理裂纹长度。

至少需要记录 20 对  $K_R - \Delta a_e$  值来确定  $F-V$  曲线。使用割线偏移法计算  $K_R - \Delta a_e$  值，其斜率衰减台阶不能超过初始线性斜率的 5%，按 B.4.1 或 C.4.1 计算  $K_R$ 。

### 5.6.2 绘制 $K_R$ 曲线

把  $K_R$  绘制成已试验试样的满足净截面有效性要求的数据点的  $\Delta a_e$  的函数曲线。设若满足了本方法的其他条件，该曲线是符合本文件的  $K_R$  曲线的有效部分。

### 5.6.3 计算 $K_{R25}$

通过  $K_R$  曲线的原点 ( $O$  点) 画一条割线  $OF$ ，其斜率  $(F/V)$  等于  $0.75(F/V)_O$ ， $(F/V)_O$  是在下限力 ( $F_L$ ) 和 (包括) 上限力 ( $F_U$ ) 之间的记录的初始线性部分的切线  $OA$  的斜率，以割线  $OF$  与曲线交点或最大力对应的点两者中先出现的点作为评估点。通过评估点计算评估点处的有效裂纹长度  $a_e$ ，然后按 C.4.1 计算  $K_{R25}$ 。

#### 5.6.4 计算 $K_C$ 与 $K_{app}$

采用最大力对应的点作为评估点，将最大力与最大力点处的有效裂纹长度  $a_e$  代入 B.4.1 或 C.4.1 中公式计算  $K_C$ ，如果试样在最大力下产生了过大的裂纹扩展，则  $a_e$  应为初次达到最大力值的裂纹长度。

采用最大力对应的点作为评估点，将最大力与初始裂纹长度  $a_0$  代入 B.4.1 或 C.4.1 中公式计算  $K_{app}$ 。

需要在最大力下确定  $K_C$  或  $K_{app}$  值的净截面有效性。若计算  $K_C$  或  $K_{app}$  值时，净截面应力超过材料屈服强度，则试验结果无效；若  $K_C$  或  $K_{app}$  值大于等于规定的最小值，并且  $K_C$  或  $K_{app}$  是基于相同或更大宽度的试样进行的试验，则试验结果可作为判断材料是否合格的有效数据。

## 6 报告

试验报告至少应包括以下内容：

- a) 本文件编号；
- b) 材料特性（合金代号或化学成分、热处理状态）和产品类型（薄板、厚板、棒材、锻件、铸造件等）；
- c) 规定非比例强度  $R_{p0.2}$ ；
- d) 试样类型；
- e) 裂纹平面取向（见图 1）；
- f) 试验和预制疲劳裂纹时的温度和环境；
- g) 试验机型号和规格；
- h) 每个试样的结果还包括：
  - $F-V$  记录曲线及相关数值；
  - 试样厚度 ( $B$ ) 和试样宽度 ( $W$ )；
  - 裂纹长度 ( $a$ )，包括平均裂纹长度以及从一侧表面到另一侧表面每 1/4 厚度测量的五个点的裂纹长度；
  - 预制疲劳裂纹条件，包括全程的最大应力强度因子  $K_{max}$ ，最后阶段（裂纹长度 ( $a$ ) 的 2.5% 范围内）最大应力强度因子  $K_f$ ，应力比  $R$  和循环次数；
  - 加载速率；
  - 载荷比  $F_{max}/F_Q$ ；
  - $K_{IC}$ （或  $K_Q$ ，并注明试验无效原因），或  $K_C$ ，或  $K_{R25}$ ，或  $K_{app}$ 。
- i) 对于受残余应力影响的结果还包括：
  - 判断试验结果受残余应力影响的细节和理由；
  - 如果试验后校正了  $K_Q$  值， $K_Q$  或  $K_{IC}$  以及  $K_{QC}$ ，校正断裂韧度值所用方法（载荷校准法或裂纹校准法）以及校正过程中的测量值。

## 附录 A (规范性附录)

### 带残余应力铝合金制品的平面应变断裂韧度试验方法

#### A.1 范围

本章附录规定了不能完全消除应力的铝合金的平面应变断裂韧度试验方法及试验结果的校正和评定。

#### A.2 概述

铝合金固溶处理与时效强化可能产生明显的残余应力，通常采用拉伸、压缩等方式消除残余应力，但是，对于截面超厚的产品（如厚板、大型自由锻件）或者复杂型材（例如模锻件、阶段挤压材、铸件），通常不可能完全消除内应力，或者产品在加工过程中（如矫直、成型或焊接）也可能导致残余应力。

从带残余应力的产品中加工的试样也会有残余应力，试样加工可以释放部分应力并重新分配初始应力，但剩余的应力仍可能导致后续试验结果产生重大误差。残余应力叠加在外部施加的应力上，导致实际的裂纹尖端应力强度因子与无残余应力时的应力强度因子不同。

当残余应力较大时试样在机加工过程中特别容易变形。一般说来，当残余应力由淬火引起时，测得的  $K_{IC}$  或  $K_Q$  会明显偏大，即高于消除了残余应力的试样测得的结果，这种偏倚是由于试样加工过程中残余应力再分配导致的试样变形及弯曲以及疲劳预制裂纹前缘过大的曲率造成的。

#### A.3 标志

有多种标志指示残余应力已经影响或可能影响到断裂韧度试验结果，当出现下列一种或多种情况时，就应怀疑断裂韧度试验结果受残余应力影响，且残余应力导致试验结果发生偏倚的可能性随着标志数量的增加而增加。

##### A.3.1 铝合金状态代号

可热处理强化铝合金的状态代号不是消除应力状态，T<sub>51</sub>、T<sub>510</sub>、T<sub>511</sub>、T<sub>52</sub>、T<sub>54</sub> 表示消除应力状态。

##### A.3.2 试样变形

试样加工后发生变形，可在紧凑拉伸试样加工缺口前后直接测量试样的高度以量化试样变形。经验表明，对一个起始裂纹长度与宽度之比  $a_0/W=0.45$  的铝合金 C(T) 试样来说，在加工缺口前后测量高度的差大于或等于 0.076mm 时，断裂韧度试验结果将会明显地受残余应力影响。

##### A.3.3 过大的裂纹前缘曲率

预制裂纹前缘曲率不满足 4.4.1 节对裂纹前缘平直度的要求，通常而言，是试样表面裂纹太短而内部裂纹太长。

##### A.3.4 预制裂纹载荷或次数过高

与相同或相似合金/产品比，预制裂纹时需要异常高的载荷或循环次数。

##### A.3.5 与试样形状或尺寸有关的异常断裂韧度变化

在改变试样类型（例如从紧凑拉伸变为三点弯曲）或者改变试样尺寸时，测得的断裂韧度发生了用其它方法不能解释的明显变化。例如，如果残余应力导致断裂韧度试验结果发生偏倚，那么增

加试样尺寸会导致  $K_Q$  增大。

### A.3.6 非线性的力-位移曲线

力-位移曲线弹性段的最初部分非线性，这种情况说明需要逐步增加载荷来克服残余应力后裂纹才张开。

### A.4 减小残余应力对断裂韧性试验的影响

按本附录进行未消除应力的铝合金制品平面应变断裂韧性试验，有两种方式来减小或消除残余应力对结果的影响，第一种方式是减小试样的残余应力对试验的影响，第二种方式是校正试验结果来评估无残余应力试样的  $K_Q$  或  $K_{IC}$ 。

### A.5 减小残余应力影响的试验方法

#### A.5.1 尽量减小试样尺寸

在满足 4.3.1、4.3.2 以及  $W/B=2$  的条件下，尽可能减小试样厚度  $B$ ，以减小试样变形所引起的夹紧（或张开）力矩以及预制裂纹前缘曲率过大对试验的影响。

#### A.5.2 增大应力比

在获得有效  $K_{IC}$  要求的试样尺寸太大而不能采用 A.5.1 条时，可以在预制裂纹时采用较大的应力比，这种方式能够形成较直的疲劳预制裂纹，并能减小残余应力对试验的影响。

经验表明，应力比为 0.7 时的预制裂纹所形成裂纹比应力比为 0.1 时所形成的裂纹更直。此外，已经证明采用较高的应力比预制裂纹所形成的较直的裂纹前缘可减少断裂韧性测量值偏差可达 75%。

### A.6 试验结果的校正方法

#### A.6.1 方法 1（载荷校准法）

方法 1 利用图 A.1 所述的试样高度变化测量值  $\Delta\delta$  重建力-位移曲线并分析  $F_Q$ 。如图 A.2 所示，将原点移动至  $\Delta\delta$  与其对应的载荷处以重建力-位移曲线，然后按 4.5.1 节所述的方法分析，获得新的  $F_Q$ ，用这个  $F_Q$  计算的  $K_Q$  即为  $K_{QC}$ 。

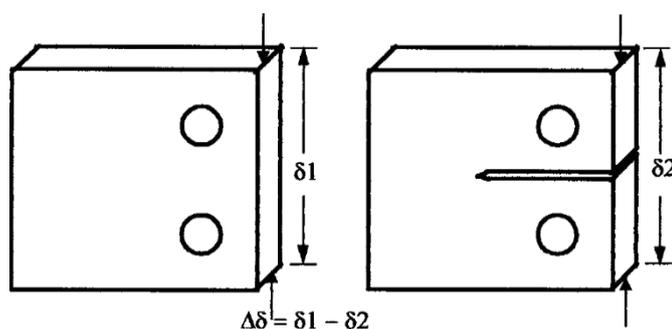


图 A.1 在加工缺口前后测量试样的高度

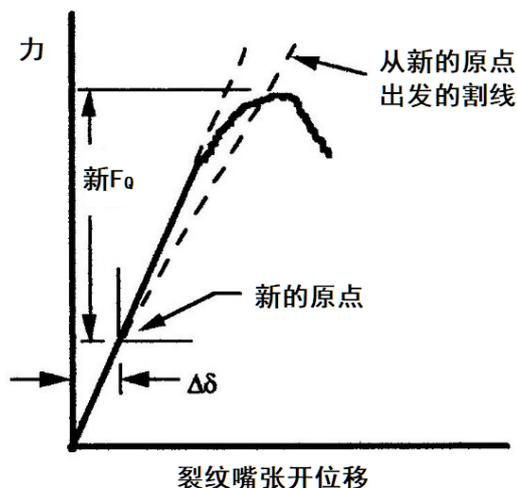


图 A.2 重建力-位移曲线并分析

有限的实验证据表明，试样裂纹前缘曲率过大时，用方法 1 测得的  $K_{QC}$  的偏差在无残余应力试样中测得的  $K_{IC}$  或  $K_Q$  的 15% 以内。

#### A.6.2 方法 2（裂纹校准法）

方法 2 利用试样两侧表面位置的裂纹长度的平均值作为裂纹长度计算  $K_Q$ ，实验性证据表明，在较高的应力比下（如 0.7）预制裂纹，这种方法比 A.6.1 条中所述方法的精确度更高。有限实验证据表明，由方法 2 获得的  $K_{QC}$  偏差在无残余应力试样中获得  $K_{IC}$  或  $K_Q$  的 10% 以内。淬火所产生的典型残余应力在试样表面是压缩的，且在试样中心是拉伸的，因此两个表面的预制裂纹长度比试样中心的要小。对于残余应力在中心压缩且在表面拉伸的非典型试样来说，这种方法不适用。

注：如果校正的  $K_Q$  不满足本文件平面应变断裂韧度试验部分对试样尺寸或  $F_{max}/F_Q$  的要求，则  $K_{QC}$  可能不能代表或接近  $K_{IC}$ 。

#### A.7 结果的评定

对于符合第 A.3.1 条至第 A.3.6 条其中任意一条的铝合金产品，可按以下三种方式进行试验并评定结果：按第 A.5.1 条或第 A.5.2 条进行试验，且试验满足本文件平面应变断裂韧度试验部分除应力比以外的其他有效性要求；或者按第 A.6.1 条或第 A.6.2 条校正  $K_Q$ ，且试验满足本文件平面应变断裂韧度试验部分除预制裂纹前缘曲率（即两侧表面裂纹长度都比裂纹长度平均值小，且任意一条与裂纹长度平均值的差异超过了平均裂纹长度的 15%）以外的其他有效性要求；或者按第 A.5.1 条或第 A.5.2 条进行试验并按第 A.6.1 条或第 A.6.2 条校正  $K_Q$ ，且试验满足本文件平面应变断裂韧度试验部分除应力比与预制裂纹前缘曲率以外的其他有效性要求，则  $K_{QC}$  是消除应力的试样的  $K_{IC}$  的估计值，可用于判断产品是否满足材料规范的平面应变断裂韧度指标。

## 附录 B (规范性附录)

### 中心裂纹试样平面应力断裂韧性试验

#### B.1 试样

中心裂纹试样 (M(T)试样) 是有一个正中间的起始缺口的矩形试样, 起始缺口在试样的长度方向上处于拉伸状态。图 D.1 给出了用于  $K_R$  曲线试验的中心裂纹试样的示意图, 图 B.1 给出了缺口类型和包迹线尺寸。

可以采用试样端部的单插销加载, 或者用多螺栓夹具或楔形夹具沿试样的两端夹持加载, 如图 D.1 所示。使用单插销加载时, 为了保证裂纹平面的应力均匀分布, 插销之间的距离至少为  $3W$ 。对于宽度大于  $305\text{mm}$  的试样, 必须使用沿试样宽度施加均匀位移的多螺栓夹具或楔形夹具, 最内侧夹持点之间的距离至少为  $1.5W$ 。

起始缺口长度应在  $0.25W \sim 0.40W$  之间, 垂直于拉伸方向, 并在试样长度和宽度的中间, 偏离试样宽度中间位置不超过  $0.002W$ , 且必须在图 B.1 所示的包迹线内。

按 5.5.2 条规定从裂纹尖引发疲劳预裂纹。疲劳预裂纹必须至少从起始槽口扩展  $1.3\text{mm}$ , 起始裂纹长度  $a_0$  (机加工缺口加上疲劳预裂纹) 必须在  $0.25W \sim 0.40W$  之间, 且必须超出图 B.1 所示的包迹线。

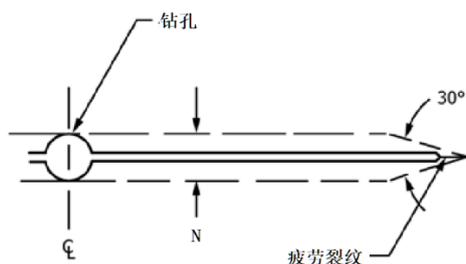


图 B.1 中心裂纹试样缺口及裂纹包迹线右半部分

#### B.2 拉伸试验夹具

按 D.2 规定执行。

#### B.3 试验步骤

对于中心裂纹试样, 裂纹长度  $a$  是两个裂纹尖端的距离的一半。在试样中间宽度处测量裂纹嘴张开位移以计算试样柔度。

#### B.4 计算

##### B.4.1 计算应力强度因子

按式 (B.1) 或 (B.2) 计算中心裂纹试样的应力强度因子  $K$ , 其 SI 制单位为  $\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$ 。

$$K = \frac{F}{BW} \cdot \sqrt{\pi a \cdot \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (\text{B.1})$$

$$K = \frac{F}{BW} \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{\cos\left(\frac{\pi a}{W}\right)}} \quad (\text{B.2})$$

式中:

- $F$  = 载荷, 单位为牛, N;  
 $B$  = 试样厚度, 单位为米, m;  
 $W$  = 试样宽度, 单位为米, m;  
 $a$  = 有效裂纹长度  $a_e$  或物理裂纹长度  $a_p$ , 单位为米, m。

#### B.4.2 中心裂纹试样柔度解析表达式

图 B.2 给出了  $Y/W$  接近 0 时, 中心裂纹试样的柔度曲线。式 (B.3) 给出了计算作为中心裂纹试样几何尺寸和有效裂纹长度函数的标准化柔度  $EB(\Delta v/\Delta F)$  的最佳分析公式:

$$EB\left(\frac{\Delta v}{\Delta F}\right) = \frac{2Y}{W} \cdot \sqrt{\frac{\pi a/W}{\sin(\pi a/W)}} \cdot \left\{ \frac{2W}{\pi Y} \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh(\pi Y/W)}{\cos(\pi a/W)} \right] - \frac{1+\nu}{\sqrt{1 + \left[ \frac{\sin(\pi a/W)}{\sinh(\pi Y/W)} \right]^2}} + \nu \right\} \quad (\text{B.3})$$

式中:

- $E$  = 杨氏模量或有效杨氏模量  $E_{eff}$ , 单位为 MPa;  
 $\Delta v/\Delta F$  = 试样柔度;  
 $B$  = 试样厚度, 单位为米, m;  
 $W$  = 总试样宽度, 单位为米, m;  
 $Y$  = 位移测量点的半跨距, 单位为米, m;  
 $a$  = 有效裂纹长度  $a_e$  或物理裂纹长度  $a_p$ , 单位为米, m;  
 $\nu$  = 材料泊松比。

计算结果在  $0.2 \leq 2a/W \leq 0.8$  以及  $Y/W \leq 0.5$  时有效。

#### B.4.3 中心裂纹试样裂纹长度解析表达式

根据标准化柔度计算中心裂纹试样标准化裂纹长度的公式如下:

$$X = 1 - \exp \left\{ - \frac{\sqrt{[E_{eff}B(\Delta v/\Delta F)]^2 - (2Y/W)^2}}{2.141} \right\} \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{2a}{W} = 1.2235X - 0.699032X^2 + 3.25584X^3 - 6.65042X^4 + 5.54X^5 - 1.66989X^6 \quad (\text{B.5})$$

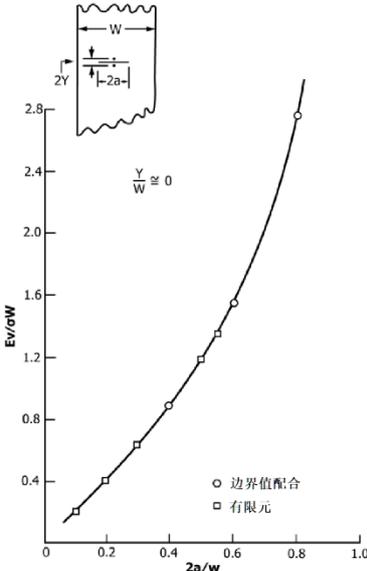


图 B.2 中心裂纹试样的柔度曲线

## 附录 C (规范性附录)

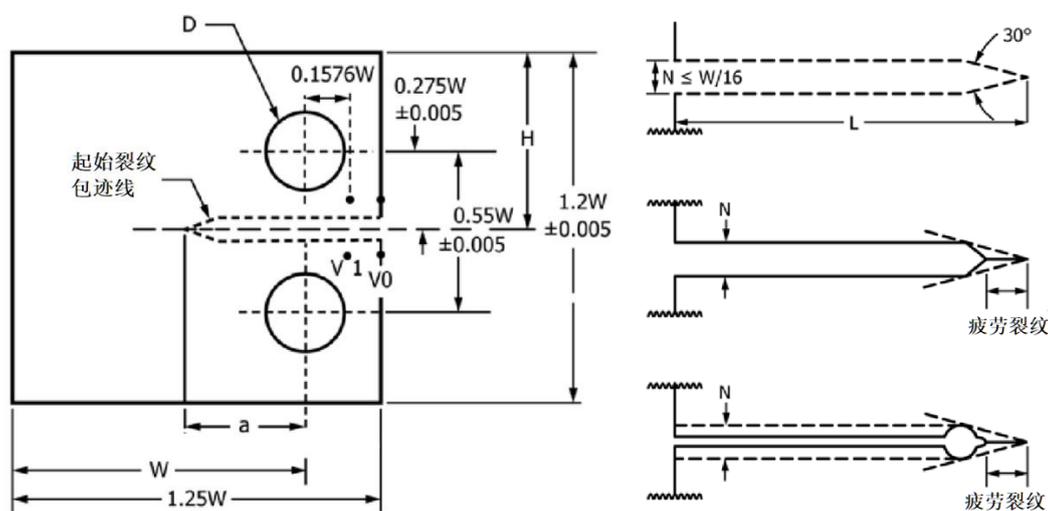
### 紧凑拉伸试样平面应力断裂韧性试验

#### C.1 试样

图 C.1 给出了用于  $K_{R}$  曲线试验的紧凑拉伸试样的一般比例；可选的缺口类型和包迹线尺寸。缺口应垂直于加力线并在试样的顶部和底部表面的中间。按 5.5.2 条规定从裂纹尖引发一个疲劳预裂纹。疲劳预裂纹必须至少从起始槽口扩展 1.3mm，且必须超出图 C.1 所示的包迹线。

#### C.2 拉伸试验挂钩

按 4.2.3 规定执行。



注 1: 试样厚度  $B$  变化量不能大于 0.127 mm 或  $0.01W$  的较大者；

注 2:  $N$  不小于 1.6mm，但绝不能超过  $W/16$ ；

注 3: 裂纹起始缺口尖端与试样两个表面的交叉处，到试样的顶部和底部距离之差应在  $0.005W$  内。；

注 4: 按下表尺寸加工孔；

试样宽度 $W$ (mm)	$D$ (mm)	试样宽度 $W$ (in.)	$D$ (in.)
$75 < W \leq 125$	25	$3 < W \leq 5$	1.0
$125 < W \leq 250$	40	$5 < W \leq 10$	1.5
$250 < W$	65	$10 < W$	2.5

图 C.1 紧凑拉伸试样、缺口类型及裂纹包迹线

#### C.3 试验步骤

从加载孔的中心线平面测量试样宽度  $W$ 、裂纹长度  $a$ 。可将缺口边作为参考线，减去孔的中心线到缺口边的距离，就可得到  $W$  和  $a$ 。

在装配加载链（挂钩及其附接到拉伸机器上）时，应当尽量减小错位而引起的加载偏心度。

在图 C.1 所示位置  $V_0$  或者  $V_1$ （加载孔中心线前面  $0.25W \pm 0.0006W$  之处或者  $0.1576W \pm 0.0006W$  之处）测量裂纹嘴张开位移以计算试样柔度。

## C.4 计算

### C.4.1 应力强度因子 $K$

当  $a/W \geq 0.35$  时, 可按式 (1) 计算紧凑拉伸试样应力强度因子  $K$ , 其中  $a$  为有效裂纹长度  $a_e$  或物理裂纹长度  $a_p$ 。

### C.4.2 剩余韧带尺寸

为保证计算的  $K_R$  值有效, 未开裂的韧带必须保持为弹性状态, 当剩余韧带  $W-a_p$  大于等于 8 倍塑性区尺寸时, 满足该条件, 即:

$$(W - a_p) \geq \frac{4}{\pi} \left( \frac{K_R}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

时认为  $K_R$  是有效的, 其中  $a_p$  为物理裂纹长度。

### C.4.3 紧凑拉伸试样柔度解析表达式

图 C.2 给出了紧凑拉伸试样的柔度曲线。计算作为紧凑拉伸试样几何尺寸和有效裂纹长度函数的标准化柔度  $EB(\Delta v / \Delta F)$  的表达式如下:

$$EB \left( \frac{\Delta v}{\Delta F} \right) = A_0 + A_1 \left( \frac{a}{W} \right) + A_2 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + A_3 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + A_4 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \quad (C.2)$$

下表给出了图 C.1 所示两个测量位置  $V_0$  和  $V_1$  处的反向柔度系数, 在  $0.35 \leq a/W \leq 0.60$  范围内,  $EBv/F$  的准确度为 60.04%。

测量位置	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$V_0$	120.7	-1065.3	4098.0	-6688.0	4450.5
$V_1$	103.8	-930.4	3610.0	-5930.5	3979.0

### C.4.4 紧凑拉伸试样裂纹长度解析表达式

根据标准化柔度计算紧凑拉伸试样标准化裂纹长度的表达式如下:

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U + C_2 U^2 + C_3 U^3 + C_4 U^4 + C_5 U^5 \quad (C.3)$$

式中:

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{EB \left( \frac{\Delta v}{\Delta F} \right)}} \quad (C.4)$$

下表给出了图C.1所示两个测量位置 $V_0$ 和 $V_1$ 处的柔度系数, 在 $0.35 \leq a/W \leq 0.60$ 范围内,  $a/W$ 的准确度为 $\pm 0.0005\%$ 。

测量位置	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$V_0$	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.90	-2143.6
$V_1$	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3

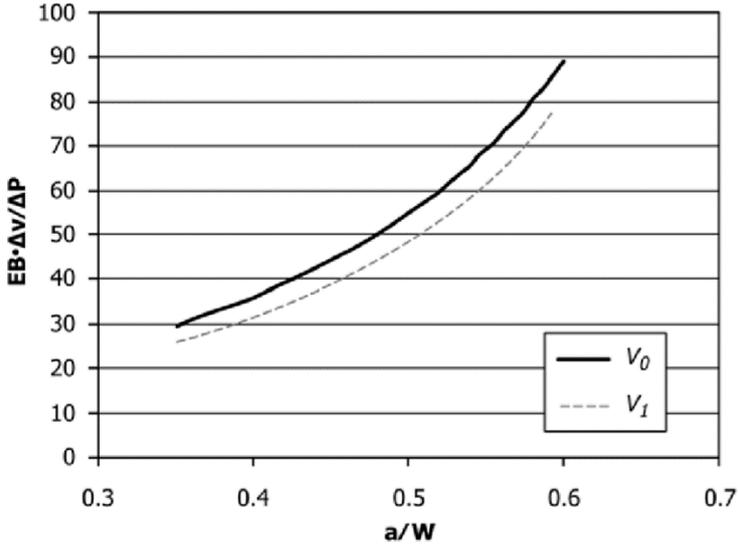


图 C.2 紧凑拉伸试样两个位移测量位置  $V_0$  和  $V_1$  处的柔度曲线

附录 D  
(资料性附录)  
试验夹具

D.1 紧凑试样加载挂钩

按 4161

D.2 中心裂纹试样夹具

图 D.1 给出了一种适用于中心裂纹试样的夹具。

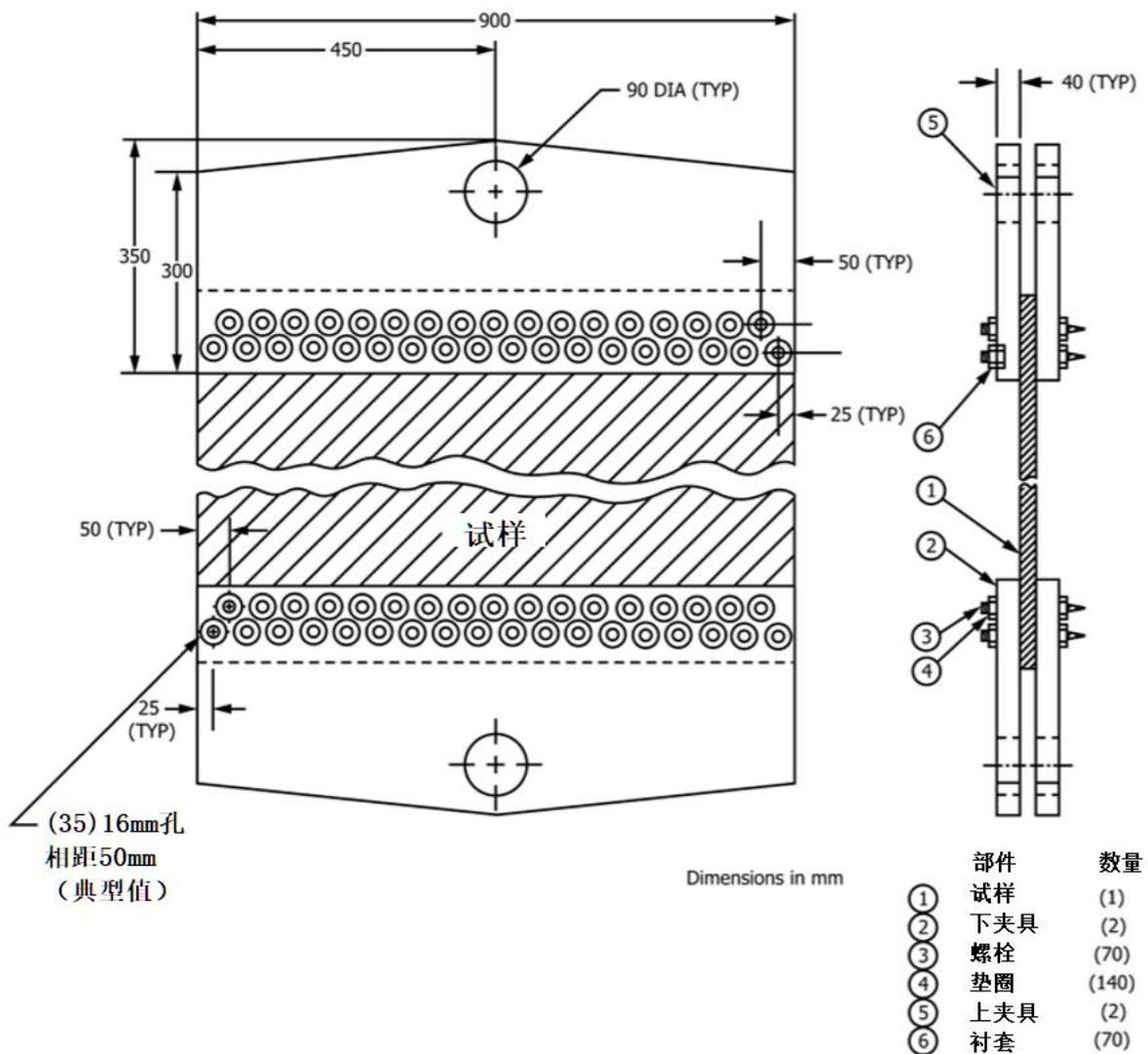


图 D.1 中心裂纹试样的夹具

D.3 防屈曲装置

进行  $K_R$  曲线试验时，为保证试验时  $K$  值的真实性，需根据试样形状、尺寸、材料性能、裂纹长

GB/T XXXXX-20XX

度等设计合适的防屈曲装置。此装置应具有足够的刚度，并与试样表面保持光滑接触。

试样与防屈曲装置之间的摩擦不能干扰试样内部的应力分布。可以用两种方法来最大程度减小摩擦：在接触面上涂润滑剂，如聚四氟乙烯塑料薄膜或重油；只使用刚好足够的夹持力。