

脆性材料断裂韧性测定的山形缺口试件和方法*

张双寅

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文扼要地介绍了测定新型结构陶瓷、高强度金属、以及其他脆性材料断裂韧性的山形缺口试件与方法。概述了这个方法的发展史、优缺点、目前研究概况、主要理论分析与实验研究成果,以及存在的问题和发展动向。

关键词: 断裂韧性; 山形缺口试件; 陶瓷; 脆性断裂

一、引 言

新型结构陶瓷材料具有很多优异特性,如强度高、耐高温、耐腐蚀,因而在许多高技术领域内,已经得到或即将获得越来越广泛的应用。但是,这类材料有一个突出的缺点,就是它的断裂韧性很小,脆性很大。随着它在各种关键部件上的应用日益增加。其增韧(韧化)问题已受到中外有关科学家们的极大重视。相变增韧、微裂纹增韧和复合增韧(即研制陶瓷复合材料)是当前发展的主要增韧手段。与此同时,为了表征新型结构陶瓷材料、陶瓷涂层与陶瓷复合材料的断裂性能,测定这些材料断裂特性方法的研究也正取得很快的发展。譬如,测定与表征陶瓷材料断裂参数的压痕法和山形缺口试件法就是其中最具特色的两个方法。本文将只就山形缺口试件法的发展史、特点,目前已取得的主要理论分析与实验结果进行介绍,并对现存问题和主要应用情况进行讨论。

二、试件种类和优缺点

1. 试件种类

(1) 山形缺口弯曲试件(图1a): 按其加载方式又可分为三点弯曲试件和四点弯曲试件两种。

(2) 山形缺口短杆试件(图1b): 试件横截面为正方形与矩形两种,其中正方形试件更为常用。

(3) 山形缺口短棒试件(图1c): 其横截面形状为圆形。

2. 优缺点

大量研究表明使用山形缺口试件测定高强度脆性材料平面应变断裂韧性有如下优点:

* 1988年3月23日收到初稿,5月10日收到修改稿。

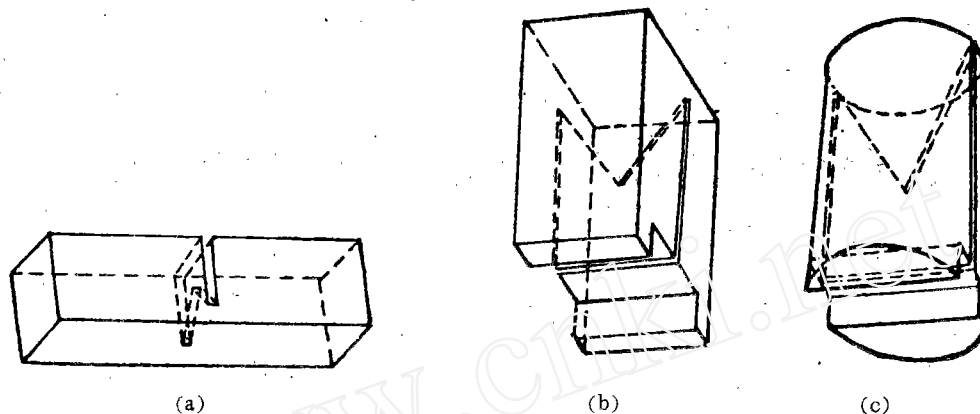


图 1 三类山形缺口试件的形状
Fig. 1. Configurations of the three types of chevron-notched specimens

(1) 试件形状简单, 尺寸小, 宽度与高度尺寸大约相同, 只有 5~25 mm, 因而非常适合于质量检验试验和评价新型材料, 因为新材料研制往往产量甚小。

(2) 与 ASTM E 399-83 规定的标准断裂试件相比, 山形缺口试件的缺口顶点存在极大的应力集中, 很小的载荷就可以引发裂纹。于是, 成本昂贵的疲劳裂纹预制工作就可以避免, 试验费用大大节省。

(3) 试验步骤简单。由于随着裂纹的慢速稳态扩展, 无量纲应力强度因子通过其最小值(有的文献上称这个最小无量纲应力强度因子为无量纲应力强度系数)。由它和最大断裂载荷可以计算材料的断裂韧性。于是, ASTM E 399-83 规定的必须记录试验过程中载荷~挠度曲线可以省去, 简化了试验步骤。

(4) 山形缺口可引导裂纹扩展方向, 适于测定某些特定区域, 例如焊接热影响区内的材料断裂特性。此外, 此种小试件还适于测定大型板材断裂特性沿厚度的分布。

(5) 缺口对裂纹前缘有约束作用, 使裂纹前缘区域更符合平面应变条件。

由于这类试件有如上优点, 所以, 一经提出, 很快引起人们的兴趣与关注, 得到很快的发展。但是, 它还有如下缺点:

(1) 此种方法借助最大断裂载荷的测定来确定平面应变断裂韧性, 仅适用于脆性材料; 对于塑性变形大的高韧性材料此法不适用。但是它仍可用于材料筛选试验。

(2) 山形缺口切制比较困难。

(3) 试件宽度不能小于 5 mm。

三、山形缺口试件法的发展简史

最早提出使用这类试件的是 Nakayama^[1,2], 他在 1964 年使用非对称缺口试件(见图 2), 测量了脆性多晶耐火材料的断裂能。这个方法的独特之处是在低载荷下缺口顶端即引发裂纹, 然后慢速稳态扩展直到断裂。由于载荷低, 储存在试件与试验装置内的弹性势能较小。所以断裂能可由载荷~位移曲线进行估计。1966 年 Tattersall 与 Tappin^[3]提出对称缺口的弯曲试件(图 1 a), 用它测量了陶瓷与金属材料的断裂功, 即载荷~挠度曲线下之面积除以断裂面之面积。

1972年 Pook^[4]建议使用山形缺口弯曲试件测量材料的平面应变断裂韧性。他说“通过对试件侧面开槽,可以省去预制疲劳裂纹,并通过最大试验载荷获得 K_{Ic} 的合理的估计值”。Pook 说的“对试件侧面开槽”就是现在所说的“山形缺口”。它使用具有直穿透裂纹的三点弯曲试件的应力强度因子解和 Freed 与 Kraft^[6]对山形缺口试件提出的关于“侧边开槽”的修正,计算了山形缺口试件的近似解。山形缺口试件应力强度因子的近似解为

$$K_{CN} = K_{STC}(B/b)^{1/2} \quad (1)$$

其中 K_{CN} 与 K_{STC} 分别为山形缺口试件与直穿透裂纹试件的应力强度因子, B 为试件的总厚度, b 为裂纹前缘处的试件厚度。试件的形状与尺寸见图 3。



图 2 非对称山形缺口试件
Fig. 2. Unsymmetric chevron-notched bending specimen

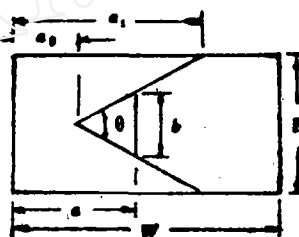


图 3 山形缺口断裂试件的尺寸与符号
Fig. 3. Chevron-notched fracture specimen nomenclature

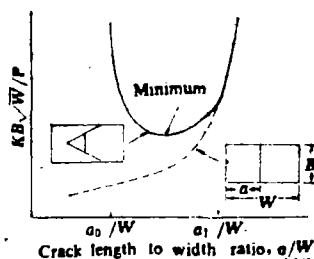


图 4 山形缺口试件和直穿透裂纹试件无量纲应力强度因子的对比
Fig. 4. Comparison of normalized stress-intensity factors for chevron-notched and straight-through crack specimens

图 4 表示山形缺口试件与直穿透裂纹试件的应力强度因子解的对比。虚线代表直穿透裂纹试件的无量纲应力强度因子, $KB\sqrt{W}/P$ 随相对裂纹尺寸 a/w 的变化。可见, 这个曲线是单调上升的。实线代表山形缺口试件 $KB\sqrt{W}/P$ 随 a/w 的变化。当 $a = a_0$ 时, 应力强度因子非常大; 但随着 a/w 变大, $KB\sqrt{W}/P$ 迅速变小。在 a 等于 a_0 与 a_1 之间的某一值时, $KB\sqrt{W}/P$ 达到极小值。当 $a \geq a_1$ 时, 两类试件的曲线重合在一起。文献[4]中 Pook 所采用的分析步骤只是一种工程近似方法。

1975年 Bluhm^[6]用切片综合法(Slice Synthesis)分析了山形缺口试件。把试件沿纵向切成许多薄片。于是, 三维问题就化成近似的二维问题处理。对于每一薄片, 考虑其弯曲和剪切变形对柔度的影响, 但是忽略各薄片之间的剪应力, 然后通过对所有薄片行为进行综合决定整体试件的柔度。然而, 这个切片综合模型必须引入一个“剪切修正”因子 K , 才能得到正确的结果, K 可以通过测量试件的柔度来确定。Bluhm 估计, Tattersall—Tappin 试件的柔度用切片综合模型预测, 精度约在 3% 以内。后来, Munz 等^[7]利用 Bluhm 的切片模型计算了各种缺口试件的应力强度因子。

尽管山形缺口弯曲试件是最早采用的, 但是用刀口加载的山形缺口短杆和短棒试件则更引人注意。这两类试件型式是 Barker 在七十年代提出的^[8,9]。试件尺寸与加载点坐标可见图 5。加载作用点(或称加载线)为 L 点。

自从1977年山形缺口短棒与短杆试件提出之后,人们进行了广泛的研究工作,表1按年代列出了短棒试件最小无量纲应力强度因子的研究结果。

表1 山形缺口短棒试件的最小无量纲应力强度因子(F_m^*)的发展

Table 1 Development of minimum normalized stress intensity factors (F_m^*) for short chevron-notched rod

Investigators	W/B	a_0/W	a_1/W	F_m^*	Year	Ref
Barker ^(a)	1.45	0.31	0.96	26.5	1977	[8]
Barker and Guest ^(b)	1.474	0.343 ^(c)	0.992 ^(c)	29.6	1978	[12]
Barker	1.45	0.31	0.96	25.1	1979	[10]
Barker and Baratta ^(d)	1.45	0.343 ^(e)	0.992 ^(e)	26.5	1980	[11]
Beech and Ingraffea ^(d)	1.5	0.35	1.0	31.4(30.0) ^(e)	1980	[13]
Beech and Ingraffea ^(d)	1.5	0.35	1.0	32.7(31.2) ^(e)	1982	[14]
Bubsey ^(b)	1.45	0.332	1.0	29.0	1982	[15]
Barker ^(b)	1.45	0.332	1.0	28.2	1983	[17]
Raju and Newman ^(d)	1.45	0.332	1.0	28.4	1983	[18]
Ingraffea et al. ^(d,f)	1.45	0.332	1.0	28.3	1983	[19]
Bubsey et al. ^(b)	1.45	0.332	1.0	29.1	1985	[16]

(a) F_m^* determined from matching K_{Ic} from ASTM F 399 specimen

(b) F_m^* determined from experimental compliance

(c) Curved-sided chevron notch used in test, equivalent dimension for straight-sided chevron notch used for table

(d) F_m^* determined from finite-element analysis and compliance

(e) Values are from plane-strain (plane-stress) assumption

(f) F_m^* determined from boundary-element analysis and compliance

1977年Barker^[8]采用“匹配”方法(matching procedure)由ASTM E 399紧凑拉伸试件测得的2041-T 651铝合金的 K_{Ic} ,决定了山形缺口短棒试件的最小无量纲应力强度因子 F_m^* 的值,相应的临界应力强度因子 K_m 为:

$$K_m = P_{max} A / \sqrt{B^3(1-v^2)} \quad (2)$$

其中 A 就是Barker的最小无量纲应力强度因子,方程(2)可以改写成

$$K_m = (P_{max}/B\sqrt{W})F_m^* \quad (3)$$

其中 F_m^* 为26.3($v=0.3$)。1979年Barker^[10]用1代替 $(1-v^2)$,不改变 A 的值,于是 F_m^* 减小5%。1980年Barker与Baratta^[11]对几种钢、铝和钛合金进行试验,同时采用山形试件与ASTM标准试件,结果表明 F_m^* 等于26.5。在早些时候,Barker与Guest^[12]用实验柔度标定法得到 F_m^* 为29.6。然而他们用的试件 $W/B=1.474$,而通常用的为 $W/B=1.45$ 。1980与1982年Beech与Ingraffea^[13,14]用三维有限元法计算了应力强度因子。表1中列出了他们得到的 F_m^* 值,括号中的值为平面应力假设下的结果。表1中还列出了Bubsey等^[16-18]与Barker^[17]运用实验柔度关系确定的 F_m^* 值。Raju与Newman^[18]用

3-D FEM 分析了泊松比 ν 对 F_m^* 的影响。1983 年 Ingraffea^[19] 用边界元方法 (又称边界积分法) 确定 F_m^* , 证明边界元法与 3-D FEM 的结果相符合。

下边介绍山形缺口短杆试件 (截面为正方形或矩形) 的主要研究结果。1978 年 Barker^[9,17] 提出矩形截面短杆试件, $H/B = 0.435$ 。1980 年 Munz 等采用正方形截面短杆试件, 试件尺寸变化范围为, $W/B = 1.5$ 与 2 , α_0 的范围为 $0.2 \sim 0.5$, $\alpha_1 = 1$ 。Munz 等假定山形缺口试件的柔度对裂纹长度的变化率与直穿透裂纹试件的相同, 得到

$$F^* = F \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} = F \left(\frac{B}{b} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha_0 < \alpha < \alpha_1 \quad (5)$$

当 $\alpha_0 = 0.2$ 或 0.35 时, 式(4)与(5)的计算结果与实验结果只相差 1%。当 $\alpha_0 = 0.5$ 时, 相差 3.5%。应该指出公式(4)只适合于求 F_m^* 的值。当 $\alpha (= a/w)$ 很小时, 这个式的分析结果与实验结果差别很大。在文献[20]中, Shanron 等也给出了 F_m^* 的表达式, 并将他们的表达式与实验柔度法的结果进行了拟合。

1981 年 ASTM 成立了山形缺口试件分析小组, 制定了一个对山形缺口短棒与短杆试件进行合作研究的计划。对表 2 列出的四种试件进行分析, 这些试件企图将以前研究过的试件尽可能多地包括进去, 试件示意图见图 5。在加载点 L 处对试件开成 V 形槽以使用刀口加载, 所有试件的 $\alpha_1 = 1$ 。共计算了五种裂纹长度 $a/w = 0.4, 0.5, 0.55, 0.6$ 与 0.7 。计算内容为:

- (a) 不同 a/w 的 K 值沿 Z 向分布,
- (b) 不同的 a/w 值, 根据平面应力柔度关系式计算 K 值

表 2 ASTM 分析小组研究的四种试件

Table 2 Four specimens analysed by the ASTM analytical round robin

Type of specimen	W/B	α_0/W	H/B
Short bar	1.45	0.332	0.5
Short bar	2	0.2	0.5
Short rod	1.45	0.332	0.5
Short rod	2	0.2	0.5

表 3 三维分析中所用的方法与试件

Table 3 Methods and specimens used in the 3-D analyses

Investigators	Analytical methods	W/B	Short rod		Short bar	
			1.45	2	1.45	2
Ingraffea et al [19]	Finite element		×			
	Boundary element		×			
Mendelson and Ghosn [21]	Boundary element					×
Rajn and Newman [18]	Finite-element		×	×	×	×

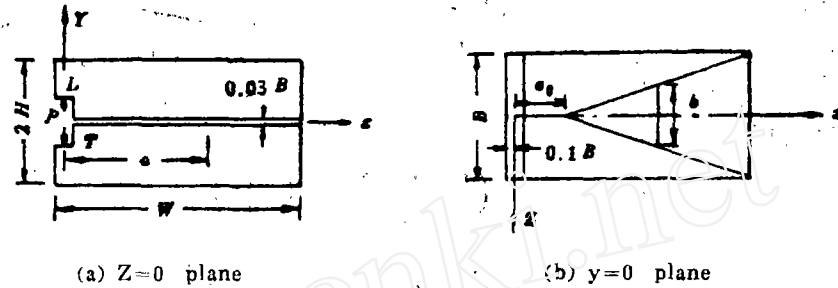


图 5 山形缺口短棒与短杆试件的尺寸和坐标系

Fig. 5. Coordinate system used to define dimensions of chevron notched rod and bar specimens

$$K = (EP/b \cdot dv^2/da)^{1/2} \quad (6)$$

(c) 对各 a/w 计算 L 与 T 点的无量纲位移值 EVB/P 。

表 3 列出了 ASTM 分析小组各研究人员进行分析的方法与试件类别, 其详细研究内容和结果见表 3 中注明文献。

四、确定最小无量纲应力强度因子的方法

首先, 概述使用山形缺口试件测定平面应变断裂应力强度因子的基本概念。图 6 是应力强度因子 K 随裂纹长度 a 的变化曲线, 水平线代表理想脆性材料裂纹扩展阻力曲线。虚线代表几个外加载荷作用下的“裂纹驱动力”, 由于 $a = a_0$ 时, K 值非常之大, 很小的载荷, 例如 P_1 , 就能引发试件开裂; 并且在 P_1 的作用下裂纹继续扩展, 直到裂纹驱动力等于 K_{IC} 时, 虚线与实线出现一个交点 A 。进而加大载荷, 对应的裂纹扩展量与点 B 或点 C 相应。当最大载荷 P_{max} 达到时, 裂纹驱动力曲线与材料的裂纹扩展阻力曲线相切于 D 点。材料破坏时的 K 值等于 K_{IC} , 切点 D 相应于最小无量纲应力强度因子 F_m^* 。山形缺口试件测得的断裂韧性 K_{ICV} 为:

$$K_{ICV} = (P_{max}/B\sqrt{W})F_m^* \quad (7)$$

由上式可知, 一旦 F_m^* 已经确定, 用山形缺口试件测定断裂韧性时, 只需测量最大载荷。几种确定 F_m^* 的方法如下:

(1) K_{IC} 匹配法: 同时使用山形缺口试件与 ASTM 标准试件进行试验, 然后令山形缺口试件测得的 K_m 与标准试件的 K_{IC} 相符合, 即令

$$K_m = (P_{max}/B\sqrt{W})F_m^* = K_{IC} \quad (8)$$

由此确定 F_m^* 的值。

(2) 由 Pook 方程(1)确定。这是基于如下假设导出来的, 即假定山形缺口试件的柔度对裂纹长度的变化率与直穿透裂纹试件的变化率相等。由此导出方程(1)。此法对短棒与短杆试件比较精确, 对三点弯曲试件误差较大。

(3) 切片综合法: 此法比较精确, 广泛用于弯曲试件。Munz^[7]也把它用于短杆试件上。问题的关键在于用实验柔度测量来决定“剪切修正系数” K , 用无裂纹山形缺口试件实验标定 K 后, 此方法可给出很好的结果。

(4) 三维弹性力学解。例如三维有限元和边界元法。此法可以得出精确的结果。然而计算工作量大, 比较贵。

(5) 实验柔度标定法: 此法很精确, 但是, 它限于所研究的特定的试件形状。若将此法与切片综合法联合使用, 可以给出便宜而可靠的结果。此法适合于范围很广的试件形状。

表4列出5种试件最小无量纲应力强度因子 F_m^* 的典型值, 其中包括ASTM的结果。表中的值可用来计算山形缺口试件的应力强度因子 K_m 。

表4 山形缺口试件最小无量纲应力强度因子的典型值

Table 4 Typical values of minimum normalized stress intensity factors for chevron-notched specimens

Type of specimen	W/B	α_0	α_1	H/B	F_m^*
Bar	1.45	0.332	1	0.435	27.8±0.3
Bar	1.45	0.332	1	0.5	24.8±0.3
Bar	2	0.2	1	0.5	29.8±0.3
Rod	1.45	0.332	1	0.5	28.9±0.3
Rod	2	2	1	0.5	36.2±0.4

下面具体介绍一个运用三点弯曲试件结合切片综合法确定材料应力强度因子的工作。我国Wu Shangxian^[22,23]研究了山形缺口弯曲试件解折柔度公式。这些公式对使用非标准试件的人尤其有用。据根线弹性断裂力学能量法, 可以有如下公式

$$K_{IC} = (P/B\sqrt{W})Y(\alpha_0, \alpha_1, \alpha) \quad (8)$$

$$Y(\alpha_0, \alpha_1, \alpha) = \left\{ \frac{1}{2} \frac{dC_v(\alpha)}{d\alpha} \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

其中 $C_v(\alpha)$ 为具有梯形裂纹前缘的试件的无量纲柔度, $C_v = BE'q/p$, $E' = E/(1-\nu^2)$ 。当裂纹扩展到临界值时, $\alpha = \alpha_c$, $Y(\alpha_0, \alpha_1, \alpha)$ 达到其最小值 $Y_c(\alpha_0, \alpha_1)$ 。需要指出 $Y_c(\alpha_0, \alpha_1)$ 相当于前边用的 F_m^* 。此时载荷达到最大值 P_{max} , 即

$$K_{IC} = (P_{max}/B\sqrt{W})Y_c(\alpha_0, \alpha_1) \quad (10)$$

令 $Y(\alpha_0, \alpha_1, \alpha)$ 对 α 的一阶微分等于零, 得到 Y 的极小值条件,

$$\frac{1}{\alpha - \alpha_0} \left(\frac{dC_v(\alpha)}{d\alpha} \right) = \frac{d^2C_v(\alpha)}{d^2\alpha} \quad (11)$$

由上式确定 α_c 值, 代入(8)与(9)可得 K_{IC} 。

前已提到, 由Bluhm提出的切片综合法^[6,25], 可以得到山形缺口试件的解析柔度式

$$\frac{1}{C_v(\alpha)} = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_1 - \alpha_1} \frac{1}{C_s(\alpha)} + \frac{K}{\alpha_1 - \alpha_0} \int_{\alpha}^{\alpha_1} \frac{1}{C_s(\xi)} d\xi \quad (12)$$

其中 K 为“剪切修正系数”, $C_s(\alpha)$ 为直穿透裂纹三点弯曲试件的柔度。根据文献[24]有:

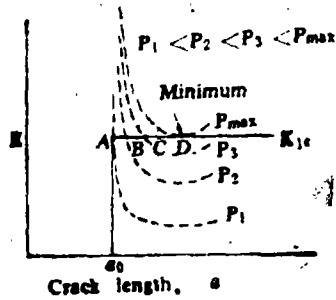


图6 理想脆性材料山形缺口试件的断裂曲线

Fig. 6. Fracture curve of a chevron-notched specimen for an ideal brittle material

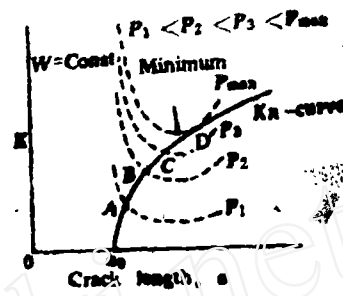


图7 具有上升 K_R 曲线的材料用山形缺口试件的断裂

Fig. 7. Fracture of a chevron-notched specimen with "rising K_R -curve" material.

$$C_s(\alpha) = \gamma + \beta \tan^2(\pi\alpha/2) \quad (13)$$

其中

$$\gamma = \frac{1}{4} \left(\frac{S}{W} \right)^3 \left[1 + 3(1+\nu) \left(\frac{W}{S} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \left(\frac{S}{4W} \right)^2 \left[7.31 + 0.21 \sqrt{\frac{S}{W} - 2.9} \right]^2 \quad (15)$$

将式(13)代入(12)并考虑到(14)与(15), 就可得 C_s 的表达式。关于剪切修正系数 K 由下式给出

$$K = \begin{cases} 1 + 0.444(\alpha_1)^{3.12} & \phi \geq 1 \\ 1 + (\alpha_1)^{3.12} (2.236\phi - 4.744\phi^2 + 4.699\phi^3 - 1.77\phi^4) & \phi < 1 \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\phi = (\pi - \theta)/2$, θ 为山形缺口的角度, 见图3。

五、材料断裂韧性对山形缺口试件法正确性的影响

如前所述, 对于理想脆性材料, 裂纹扩展阻力曲线为一条水平线(见图6)。采用山形缺口试件测 K_{Ic} 是可靠的。但是, 如果材料的裂纹扩展阻力曲线是上升的, 结果如何呢? 回答这个问题是极为重要的。因为多数工程材料在非平面应变条件下, 裂纹扩展阻力曲线都是上升的。

图7系将文献[26]的 K_R 曲线概念应用于具有上升阻力曲线的材料。实线为材料中裂纹扩展阻力曲线, 初始点为裂纹的初始长度 a_0 。虚线为不同外载荷下山形缺口试件($W = \text{常数}$)的裂纹扩展驱动力曲线。不同载荷下裂纹扩展驱动力曲线与阻力曲线相交于不同的点(例如A、B、C与D), 当载荷达到最大值 P_{max} 时, 它对应的驱动力曲线与阻力曲线相切于D点。它就是材料的断裂失稳点。不难看出, D点并非 K 的极小值。因此, 前面讲的用最大试验载荷与最小无量纲应力强度因子计算断裂韧度的方法不再适用。如果试件宽度较小, 断裂失稳点将发生在 K_R 曲线的较低的位置上; 相反, 若试件宽度偏大, 失稳点将发生在 K_R 曲线较高的位置。所以, 存在明显的尺寸效应。关于这个问题已有一些文章发表, 例如文献[11]就是其中之一。

六、山形缺口试件的应用实例

文献[27]用山形缺口短棒试件对六种金属材料进行了试验,其中包括三种铝合金(2124-T 851, 6061-T 651 与 7475-T 7351),二种钢材(4340 钢和 17-4 不锈钢)和一种钛合金(Ti-6 Al-4 V Titanium)。用不同尺寸试件检验尺寸对结果的影响。结果表明,当试件直径小于 $1.25(K_{Ic,SR}/\sigma_{ys})^2$ 时,测定结果与尺寸有关。线弹性断裂力学分析给出偏小的韧性值;而强塑性断裂力学将导致偏大的结果,二者为上下限。 $B \geq 1.25(K_{Ic,SR}/\sigma_{ys})^2$ 应为试件最小尺寸,这时它只有 ASTM 标准试件质量的 3%。文献[28]介绍了用山形弯曲试件测玻璃断裂韧性的结果与问题,由于很难造成裂纹的稳态扩展,导致 K_{Ic} 测定值偏大,并且数据分散。文献[22]用山形缺口三点弯曲试件对两种热处理条件下的轴承钢 G Cr 15 作了测试,并与 ASTM 方法作了比较, K_{Iov} 与 K_{Ic} 符合较好。

在出版物 ASTM STP 855 中发表了一些山形缺口试件方法的应用实例,除已提及的一些外,还有: Ingraffea 等对岩石断裂韧性的测定; Wang Chizhi 等对四种钢材和四种铝合金的断裂韧性进行了研究; Shannon 等用短杆与短棒试件对三氧化二铝陶瓷进行了测试; Hong 等和 Tingle 等分别研究了烧结碳化钨-钼合金的断裂韧性,分析了成分与微结构参数对韧性的影响; Krause 等对八种聚合物水泥用几种不同山形缺口试件进行了测定; Mecholsky 等用短杆试件测定了陶瓷与金属界面的断裂韧性。

山形缺口试件除用于单一脆性材料之外,也见它用于纤维增强复合材料。文献[29, 30]报导了用山形缺口弯曲试件测纤维增强复合材料断裂功的试验方法。最近, Barker 等将山形缺口试件用于测定高温下铍(CIP-HIP Beryllium)的断裂韧性^[31]。

七、结 束 语

山形缺口试件法作为一种新型断裂力学试验方法已得到相当大的发展。它试件尺寸小,省材料,试验步骤简单,试验成本低,深受人们欢迎。美国材料实验学会很重视这一方法的开发,组织专门小组进行分析研究,取得了肯定的结果。笔者深信,随着这一方法更广泛的应用和测试技术与分析方法日臻完善,一定会得到国际标准化组织的承认,制定出相应的试验标准来。

感谢: 本文是在中国科学院重大科研项目支持下完成的,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Nakayama, J., Jpn. Appl. Phys., 3, 1964: 422
- [2] Nakayama, J., J. Amer. Ceram. Soc., 43, 1965: 583
- [3] Tattersall, H. G. and Tappin, G., J. Mater. Sci., 1, 1966: 296
- [4] Pook, L. P., Inter. J. Fracture Mechanics, 8, 1972: 103
- [5] Freed, C. N. and Kraft, J. M., J. Mater., 1, 1966: 770
- [6] Bluhm, J. I., Eng. Fracture Mechanics, 7, 1975: 593
- [7] Munz, D., et al., Inter. J. Fracture, 16, 1980: 359
- [8] Barker, L. M., Eng. Fracture Mechanics, 9, 1977: 361
- [9] Barker, L. M., ASTM STP 678, 1979: 73

- [10] Barker, L. M.; *Inter. J. Fracture*, 15, 1979; 515
- [11] Barker, L. M. and Baratta, F. I.; *J. Test. and Evaluation*, 8, 1980; 97
- [12] Barker, L. M. and Guest, R. V.; "Compliance Calibration of the Short-Rod Fracture Toughness Specimen", Terra Tek Report, TR-20, 1978
- [13] Beech, J. F. and Ingraffea, A. R.; "Three Dimensional Element Calibration of the Short-Rod Specimen", Geotech. Eng. Report 80-3, Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 1980
- [14] Beech, J. F. and Ingraffea, A. R.; *Inter. J. Fracture*, 18, 1982: 217
- [15] Bubsey, R. T., et al.; *Inter. J. Fracture*, 18, 1982: 125
- [16] Bubsey, R. T., et al.; NASA TM-83796, 1985
- [17] Barker, L. M.; *Eng. Fracture Mechanics*, 17, 1983: 289
- [18] Raju, I. S. and Newman, J. C. Jr.; *ASTM STP 855*, 1984: 32
- [19] Ingraffea, A. R., et al.; *ASTM STP 855*, 1984: 49
- [20] Shannon, J. L. Jr., et al.; *Inter. J. Fracture*, 19, 1982: R 55
- [21] Mendelson, A. and Ghosn, L. J.; *ASTM STP 855*, 1984: 69
- [22] Wu Shangxian, *ASTM STP 855*, 1984: 176
- [23] Wu Shangxian; *Inter. J. Fracture*, 19, 1982: R 27
- [24] 陈茂、姚麟、金志英; *科学通报*, (1) 1974: 41
- [25] Bluhm, J. I.; «Fracture», vol. 3, D. M. R. Taplin, ed. Univ. of Waterloo Press, Canada, 1977: 409
- [26] "Fracture Toughness Evaluation by R-curve Method", *ASTM STP 527*, 1973
- [27] Barker, L. M.; *ASTM STP 855*, 1984
- [28] Chuck, L., Fuller, E. R. Jr. and Freiman, S. W.; *ASTM STP 855*, 1984: 167
- [29] 张双寅; *力学进展*, 10(2~3) 1980: 99
- [30] Philips, D. C.; *J. Composite Mater.*, 8, 1974: 130
- [31] Barker, L. M. and Jones, A. H.; «Theoretical and Applied Fracture Mechanics», vol. 7, 1987: 45

Chevron-Notched Specimen and Method for Measuring Fracture Toughness of Brittle Materials

Zhang Shuangyin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In the present paper, a brief review on the chevron-notched specimen and the related testing method is presented. Since this kind of specimens is quite small and saving in material, and the experimental procedure is simple and economical, the chevronnotched specimen method is being increasingly used to measure fracture toughness of ceramics, glass, rock and high strength metals.

At first, the categories of the specimens and the advantages and disadvantages of this method are described. Then, a concise account on the developing history of the method in the last decade, the main theoretical and experimental achievements obtained and the up-to-date research status are given. The approaches to determining the minimum normalised stress intensity factor are reviewed. Finally, some typical applications are exemplified: the encountered problems and the developing trend are critically commented.

Keywords: Fracture toughness; Chevron-notched specimen; Ceramics; Brittle fracture