

# 人字形切槽短圆棒断裂韧度 试样及其 BEM 标定

## THE CHEVRON NOTCHED SHORT ROD FRACTURE TOUGHNESS SPECIMEN AND ITS BEM CALIBRATION

王启智 鲜学福  
Wang Qizhi Xian Xuefu  
(资源及环境工程系)

**摘要** 介绍了一种将会得到广泛应用的断裂韧度试样—人字形切槽短圆棒,以及三维边界元法(BEM)的标定结果。

**关键词** 人字形切槽;短圆棒;断裂韧度;边界元法;柔度;应力强度因子  
中图法分类号 O346.11

**ABSTRACT** In this paper, the chevron notched short rod fracture toughness specimen, which is soon to be widely applied, is introduced, results of BEM calibration for this specimen are given.

**KEY WORDS** chevron notch; short rod; fracture toughness; BEM; compliance; stress intensity factor

## 0 引 论

现在,断裂力学在许多高技术领域已成为必不可少的设计和分析工具,它在大多数具体问题中的成功应用都与断裂韧度有关,断裂韧度是材料抵抗裂纹扩展阻力的度量,在断裂力学中是一项重要的参数。1969年美国材料与试验学会(ASTM)首先制定出金属材料平面应变断裂韧度标准试验方法,即E399标准。1984年我国提出了一个类似的标准,即GB4161-84。E399标准在世界各国,在机械、冶金、矿业、航空航天等工业部门得到广泛的应用。但是,材料是千差万别的,在长期的应用实践中人们发现,对高强度钢,工业陶瓷,岩石等脆性材料用E399标准进行断裂韧度测试会遇到麻烦和困难;另外,E399测试方法的昂贵代价也常使人们耿耿于怀,希望能有一种方便而经济的测试方法。

ASTM经过长达7年之久的分析论证工作<sup>[1]</sup>,已经制定出一种测定平面应变断裂韧度的新方法,这就是“用人字形切槽试样测定金属平面应变断裂韧度的试验方法”(“Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metals Using Chevron Notched Specimens”),这个即将诞生的新

\* 收文日期 1990-06-12

标准,即 ASTM E1304标准,已经处在ASTM 有关技术委员会的投票表决的阶段<sup>[2]</sup>,一旦表决通过,此标准就正式成立。E1304并不是要取代 E399,而是对 E399的补充。新的测试方法具有很大的实用价值,美国的航空航天和汽车工业部门已经开始试用,并迫切地期待着 E1304新标准的正式诞生<sup>[1]</sup>。

ASTM 制定这项新标准的工作,得到了美国、加拿大、西德、澳大利亚、瑞典和英国等国家的许多实验室的支持,进行了大量的试验和计算。本文第一作者也曾从事过有关的实验研究<sup>[3]</sup>,因而比较关心这项工作的进展情况。ASTM 的这一标准的文本最近尚不可能得到。本文给出了作者最近完成的对一种试样的三维边界元法(BEM)标定结果,这一结果对目前在国内推广应用这一新的断裂韧度测试方法有好处,也留待日后与 ASTM E1304标准分析比较。

## 1 人字形切槽短圆棒拉伸试样的有关公式

试样如图1所示,它的两侧是呈中文“人”字形的切槽,切缝很窄,图1a 加以夸大是便于醒目。在试样的开口端施加拉伸载荷  $P$ ,由于切槽中部尖角部位高度的应力集中,在比较低的载荷下即由此处引发出裂纹(见图1a 的阴影部份),对应裂纹长度  $a$  的裂纹前沿宽度是  $b$ ,随着  $a$  的增加  $b$  也在增加,因而在测试过程中,裂纹在切槽的约束下稳定地向前扩展。可见这种试样不必予制疲裂纹,这一优点对于不易予制裂纹的脆性材料特别有利,同时还大大降低了测试的费用。

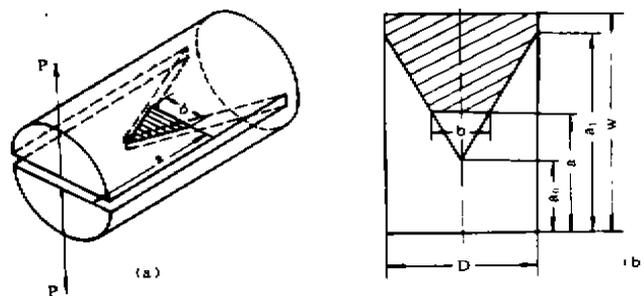


图1 人字形切槽短圆棒断裂韧度试样  
(a)试样加载 (b)人字形切槽剖面

以下的公式推导是对短圆棒试样进行的,但同样适用于短方棒试样(横截面是正方形或长方形),只要将直径  $D$  改为相应的矩形边长即可。

Irwin-Kies 关于能量释放率  $G_I$  的公式是

$$G_I = \frac{P^2}{2} \frac{dC}{dA} \quad (1)$$

其中  $P$  是载荷,  $C$  是试样柔度,  $A$  是裂纹扩展面积。

假设裂纹从  $a$  增加一个微量  $\Delta a$ ,则裂纹扩展面积的微小增量是  $\Delta A = b\Delta a$ ,故(1)式可写成

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{P^2}{2bD} \frac{dC}{d\alpha} \quad (2)$$

其中,  $C$  是人字形切槽试样在裂纹长度为  $a$  时的柔度,  $D$  是试样直径,  $\alpha = a/D$  是无量纲裂纹长度

从图1b 可以看出

$$b = D \cdot \frac{a - a_0}{a_1 - a_0} = D \cdot \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_1 - \alpha_0} \quad (3)$$

其中,  $\alpha_0 = \frac{a_0}{D}$ ,  $\alpha_1 = \frac{a_1}{D}$ 。

将(3)式代入(2)式

$$G_I = \frac{P^2}{2D^2} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \cdot \frac{dC_I}{d\alpha} \quad (4)$$

利用应力强度因子(SIF)  $K_I$  和  $G_I$  的关系式

$$K_I = \sqrt{E' G_I} \quad (5)$$

其中,  $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$  对应于平面应变,  $E$  是弹性模量,  $\nu$  是泊松比。

将(4)式代入(5)式就得到短圆棒试样的平均 SIF  $K_{I,v}$

$$\begin{aligned} K_{I,v} &= P \cdot \left[ \frac{E'}{2D^2} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \cdot \frac{dC_I}{d\alpha} \right]^{1/2} \\ &= \frac{P}{D^{3/2}} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \cdot \frac{d(E' C_I D)}{d\alpha} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $E' C_I D$  是无量纲柔度。

定义无量纲 SIF 是  $Y^*$ , 即

$$Y^* = \frac{K_{I,v}}{P} = \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \cdot \frac{d(E' C_I D)}{d\alpha} \right]^{1/2} \quad (7)$$

于是

$$K_{I,v} = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot Y^* \quad (8)$$

许多脆性材料具有比较平坦的阻力曲线, 因此可由最大载荷  $P_{max}$  来决定 SIF 的临界值即断裂韧度  $K_{I,vm}$

$$K_{I,vm} = \frac{P_{max}}{D^{3/2}} \cdot Y_{min}^* \quad (9)$$

式中采用  $K_{I,vm}$  表示断裂韧度是为了和 E399 的  $K_{Ic}$  加以区别, 符号中的  $m$  表示由最大载荷确定,  $Y_{min}^*$  是  $Y^*$  的最小值, 如果认为断裂韧度是材料常数, 这也是必然的。对这种试样也可以考虑塑性变形等因素的影响, 有关的修正系数不在此文讨论。

由以上推导可知, 标定这种试样的  $Y_{min}^*$  值是重要的, 为此, 首先要分析试样的柔度  $E' C_I D$ , 这项工作是用三维 BEM 完成的。

## 2 试样的柔度和 $Y_{min}^*$ 值的标定

如图2所示, 标定的试样参数为  $H=54.6^\circ$ ,  $\alpha_0=0.48$ ,  $\alpha_1=1.45$ ,  $w=1.45D$ 。

由于对称性, 只须对试样的1/4进行网格剖分, BEM 分析又只须对研究对象的表面加以离散, 比之有限单元法, 其输入的数据量大为减少, 共用了50个8节点的等参单元, 共计201个节点。网格剖分如图3, 此图给出的是  $\alpha=0.725$  的情况。在裂纹的前沿采用了中节点奇异元<sup>[4]</sup>, 这种特殊的单元可以模拟裂纹尖端的应力的  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  奇异性和位移的  $\sqrt{r}$  变化规律。人字形切槽的缝宽在分析模型中取为0。载荷是以均布线载荷的方式加在开口处的棱边上。泊松比  $\nu=0.3$ 。

计算是在重庆大学计算中心的富士通 M340S 机上进行的, 分别对  $\alpha=0.5, 0.6, 0.65, 0.725, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0$  共 8 种裂纹长度的试样进行了计算, 每次计算占用 CPU 大约 15 分钟。

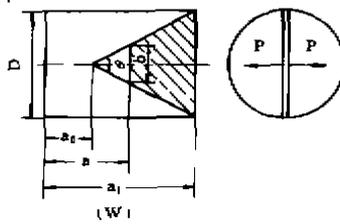


图2 本文标定的人字形切槽短圆棒试样

( $\theta=54.6^\circ; \alpha_0=a_0/D=0.48; \alpha_1=a_1/D=1.45; w=a_1$ )

定义试样的柔度是  $C_s = u/P$ ,  $u$  是载荷施力棱边中点的位移,  $P$  是此棱边上的总载荷。计算结果列在表 1。

表1 BEM 计算的 8 种裂纹长度的无量纲柔度  $E' C_s D$

$\alpha$	0.5	0.6	0.65	0.725	0.85	0.9	0.95	1.0
$E' C_s D$	85.9	104.4	114.9	136.6	177.5	201.3	224.7	255.3

用表 1 的数据和最小 2 乘拟合出  $E' C_s D - \alpha$  的多项式关系如下

$$E' C_s D = 319.52 - 1595.55\alpha + 3619.28\alpha^2 - 3362.15\alpha^3 + 1274.10\alpha^4 \quad (10)$$

用 (10) 式计算的  $E' C_s D$  值与表 1 的误差不大于 0.6%。求  $d(E' C_s D)/d\alpha$  采用了两种方法, 其一是用准 Hermite 插值方法<sup>[5]</sup>, 其二是直接利用 (10) 式求导, 这样做的目的是为了互相验证, 作者过去的经验表明, 有时拟合函数很准确, 但其导数却会出现导数的情况。从  $\alpha=0.50$  起按增量  $\Delta\alpha=0.01$  算到  $\alpha=1.0$  为止, 共得到 50 点的  $d(E' C_s D)/d\alpha$  值, 再将此值代入 (7) 式得到对应的  $Y^*$  值 (为节省篇幅, 只将其中的 15 个点的数值列于表 2), 从表 2 可看出, 两种方法的结果吻合得很好。

由表 2 还可以看出  $Y_{\min}^* = 22.87$ , 其对应的裂纹长度是  $\alpha_c = 0.84$ 。

据作者所知, 在公开文献中用 BEM 算过这种短圆棒试样的只有 A. R. Ingraffea 等人<sup>[6]</sup>, 他们经过收敛性分析后认为在 BEM 中用 152 个节点就够了, 采用的是 6 节点和 8 节点等参单元, 特殊的裂尖单元是 1/4 节点奇异单元。本文用了 201 个节点, 全部采用 8 节点等参单元, 裂尖单元是 1/2 中节点奇异元。两次分析的结果应该是可以比较的。文献 [6] 对平均无量纲 SIF  $Y^*$ , 对  $a_0, \alpha, a_1$  的定义均与本文不同, 将文献 [6] 的结果均换算成与本文对应的变量, 则文献 [6] 算出的  $Y_{\min}^* = 23.5, \alpha_c = 0.83$ , 本文的值与其相差分别是  $-2.7\%, 1.2\%$ 。

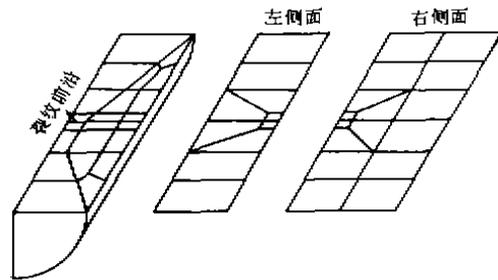


图3 BEM 单元剖分 ( $\alpha=0.725$ )

表2 平均无量纲应力强度因子  $Y^*$

序	裂纹长度 $\alpha$	$Y^*$	
		方法1	方法2
1	0.500	58.126	58.093
4	0.530	40.183	40.168
8	0.570	32.605	32.395
12	0.610	28.884	28.882
16	0.650	26.576	26.577
20	0.690	25.020	25.023
24	0.730	23.964	23.968
28	0.770	23.293	23.298
32	0.810	22.945	22.951
34	0.830	22.881	22.885
35	0.840	22.871	22.878
36	0.850	22.880	22.886
40	0.890	23.069	23.074
44	0.930	23.481	23.488
48	0.970	24.095	24.101

### 3 结 论

本文介绍了一种既方便又经济的断裂韧度试样—人字形切槽短圆棒拉伸试样,采用这种试样的断裂韧度测试方法即将成为ASTM的一个新标准。作者认为有必要在我国的有关工业部门尽早推广应用这一新的测试方法。

本文用三维BEM对一种短圆棒试样(图2)进行了标定,其平均无量纲SIF的最小值是 $Y_{min} = 22.87$ ,对应的无量纲临界裂纹长度是 $a_c = 0.84$ 。表2的 $Y^* - a$ 数据还可以用于疲劳裂纹扩展速率和 $K_{ISCC}$ 的测试。

### 参 考 文 献

- 1 Brown K R. The Chevron Notched Fracture Toughness Test, ASTM Standardization News, 1988, 16(11), 66—69
- 2 ASTM Standardization News, 1989, 17(6), 48
- 3 Wang Qizhi et al. An Investigation on the Method for Determination of Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials with Chevron-Notched Short Rod and Short Bar Specimens, ASTM STP 855, 1984, 193-204
- 4 Luchi M L et al. Boundary Elements for Three-Dimensional Elastic Crack Analysis, Int. J. of Num. Meth. in Engr, 1987, 24, 2253-2271
- 5 Akima H. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedure, Journal of ACM, 1970, 17(4), 589-602
- 6 Ingraffea A R et al. Three-Dimensional Finite and Boundary Element Calibration of the Short-Rod Specimen, ASTM STP 855, 1984, 49-68