

76-6-VII-22

断裂力学测试方法

上海科技交流站

上海化工设计院石油化工设备设计建设组

一九七五、十二月

目 录



- I. K_{lc} 的测试方法
- II. COD 值的测试方法
- III. 丁积分的测试方法

I. K_{IC} 的实验测试方法

一 引言:	3
二 关于平面应变断裂韧性的一些概念	3
三 三点弯曲或紧凑拉伸试样的 K_{IC} 测试方法	7
(一) 试验所需设备	7
(1) 试验机	7
(2) 压力传感器	8
(3) 夹氏张开仪	8
(4) 前置放大器	10
(5) X-Y 记录仪	12
(二) 试验用夹具	12
(1) 弯曲试验夹具	12
(2) 紧凑拉伸试验用 U 形钩	13
(三) 试样的设计	13
(1) 试样的截取	13
(2) 试样方位的标记方法	13
(3) 试样的尺寸	16
(4) 标准试样	17
四 试样的疲劳裂纹	19
(五) 试验程序	20
(1)	
(2) 试样的测量	
(3) 弯曲试验	

(4) 紧凑拉伸试验	21
(5) 试验记录	21
六 试验结果的计算与说明	21
(1)	21
(2)	21
(3) p_Q 的定义	23
(4) 计算 $p_{\text{最大}}/p_Q$ 之值	23
(5) 弯曲试样的 K_Q 计算公式	24
(6) 紧凑拉伸试样的 K_Q 计算公式	24
(7) a/w 和 $f(a/w)$ 的对应表	24
(8) 计算 $2.5(K_{IC}/\sigma_s)^2$	25
(9) R_{sb} 的计算公式	25
(10) R_{sc} 的计算公式	25
(11)	25
七 试验报告的内容	25
四 板材表面裂纹试样 K_{IC} 的测定	26
(一) 引言	26
(二) 试样的尺寸要求	27
(三) K_I 表达式	28
(四) 表面裂纹的制备	30
(五) 板材表面裂纹试样的试验步骤	30
(1)	31
五 其他形状试样 K_{IC} 的测定	31
六 参考文献	32

断裂韧性的测试技术

I、 K_{Ic} 的实验测试方法

一、引言

前面已经用线弹性断裂力学介绍了裂纹尖端的应力强度因子的理论计算方法。但是发展简单而有效的实验技术具有更重大的实用意义。

在线弹性断裂力学中，材料发生脆断的判据是： $K_I = K_{Ic}$

所谓 K_{Ic} 是在平面应变条件下，材料中 I 型（张开型）裂纹发生临界扩^时张的应力强度因子的临界值，即材料的平面应变断裂韧性。它是材料固有的一种力学性质。因为平面应变情况下，裂纹处于三向拉伸应力状态，导致脆性破坏的危险最大，因此平面应变断裂韧性是安全设计或研究材料的重要性能指标，因而也是断裂韧性测试技术最主要的对象。这方面的测试方法，目前已比较成熟。国外已有定型的材料试验规范〔1〕可供参考。这里将作一些介绍。

二、关于平面应变断裂韧性的一些概念。

我们知道，平面应力与平面应变之间的区别在于是否存在第三向应力 σ_z 。平面应力状态时 $\sigma_z = 0$ ，而在平面应变状态时 $\sigma_z \neq 0$ 。

当测定材料的断裂韧性时，如所用试样为薄板，则在板的二个表面之间的材料，基本上都处在平面应力状态，裂纹尖端的范性区较大。但对于厚板试样中的穿透裂纹，虽然其表面层由于 $\sigma_z = 0$ 而处于平面应力状态，但是在中心层，由于与裂纹边界平行方向的弹性约束而建立起来的第三向应力 $\sigma_z \cong \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ ，因而处于平面应变的三向拉伸应力状态，因此中心区裂纹尖端的范性区较小。根据 von Mises 屈服判据並考虑到应力松弛而画出的范性区表示于图1。

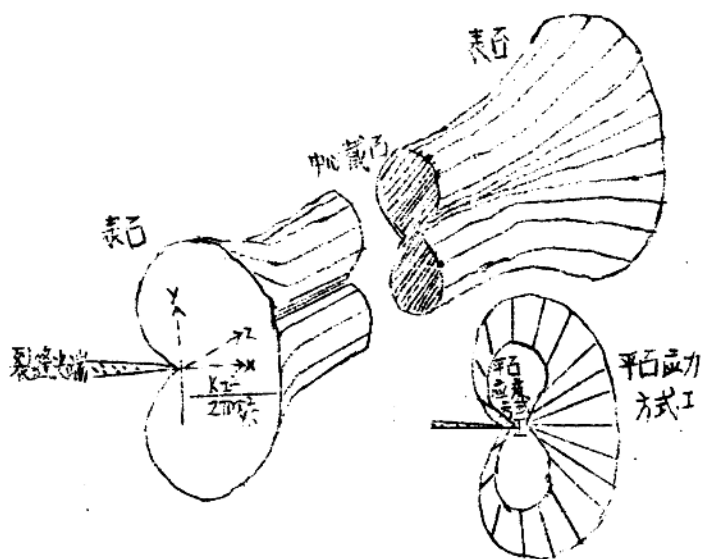


图1 厚板中的穿透裂纹前缘范性区的形状和相对尺寸

根据更复杂的弹塑性计算所得出的结果与图1所示有些不同，而且不同材料的硬化指数不一亦影响范性区的形状，但这些对现在我们所讨论的问题影响不大。

由于应力状态不同而造成范性区的不同也反映到裂纹扩张的断裂过程、断口特征和断裂韧性的数值上。图2列出一系列载荷——裂纹张开位移的 $p - v$ 曲线。假定裂纹尺寸大到足以使断裂在较低的应力水平下发生，例如 $\sigma/\sigma_s \leq 0.7$ 。当板材足够厚时，除了表层，大部份裂纹表界处于理想的平面应变状态，断口为平断口。当板厚略减或材料韧性较高时，在载荷提高到使 K_I 达到 K_{Ic} 时，中心层因处于平面应变状态，比较不易“屈服”而先扩张，但表层处于平面应力状态，比较容易“屈服”而不能扩张，因此中心层的扩张就被表面拖住。这时在 $p - v$ 曲线就出现所谓突进平台。以后继续加载导致的断口将是混合型的，即中心

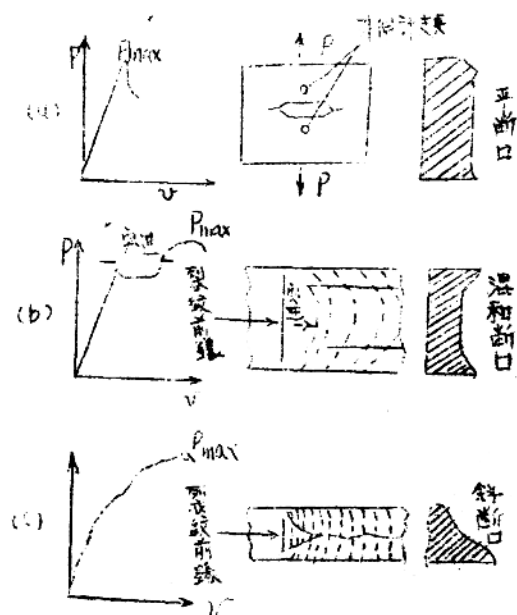


图2 不同厚度板材穿透裂纹扩张过程的
P-V 曲线和断口特征

部份为平面应变下扩张的平断口，而表层为平面应力下沿 45° 形变带切断的斜断口。如果继续减少板厚，则加载到 $K_I = K_{Ic}$ 以前，表层的平面应力范性区可能已发展到使中心层裂纹边界的第三向应力 σ_z 基本上消失，此时 P-V 曲线上将看不到中心层平面应变的局部扩张的突进现象。裂纹扩张将在平面应力状态下进行，并且得到完全斜断口。

由此可见，要获得材料的平面应变断裂韧性，关键问题是如何选择试样的尺寸以保证所测得的是材料的真实平面应变断裂韧性 K_{Ic} 。也就是说，在理想状态时祇有当范性区的尺寸接近零时才能得到真正的 K_{Ic} 值。但是在实际应用中，当裂纹尖端的范性区与其周围相比是相当小的时候，范性区相对尺寸的逐渐增大对 K_{Ic} 值的精确度的降

低的影响是缓慢的，所以可以近似地利用突进载荷来计算而获得真实的 K_{Ic} 值。但是要从理论上定量地分析中心层不受表层平面应力范性区应力松弛影响的几何和力学条件是很困难的，因此目前只能根据由实验获得确定而量化的 K_{Ic} 值时所需的尺寸来确定。因为裂纹的临界状态的范性区的尺寸和 $(K_{Ic}/\sigma_s)^2$ 这一特征参数成正比，因此用 $(K_{Ic}/\sigma_s)^2$ 作为试样尺寸的特征参数是适宜的。

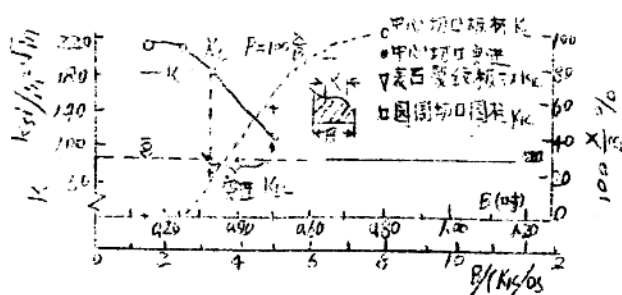


图3. 18Ni(300 KSI) 钢不同板厚和试样
断裂韧性和断口特征

图3，是300级18Ni马氏体时效钢不同板厚试样的试验结果。如要得到象图2(a)的理想平面应变情况，即可用 p 最大值来计算 K_{Ic} 值，常常需要板厚 $B \geq 6(K_{Ic}/\sigma_s)^2$ 的厚板试样。按这样的要求制作试样，尺寸往往很大，而相应的试验机的容量也要很大才能将试样拉断，这在一般实验室中是比较难以实现的。因此通常都采用减薄试样，利用上述的突进载荷进行计算。

Srawley and Brown [2] 根据大量实验数据归纳成表1。其中的数值是实验后确定的经验系数而不是通过理论分析求得的。

表1 利用板材穿透裂纹突进方法获得真实 K_{Ic} 所采用的试样的最小尺寸参数和需用的最小 P/σ_s 比

试样类型名称	最小板厚 $B/(K_{Ic}/\sigma_s)$	最小裂纹尺寸 $a/((K_{Ic}/\sigma_s)^2)$	最小宽度 $w/(K_{Ic}/\sigma_s)^2$	试样长度 $L/(K_{Ic}/\sigma_s)^2$	需用载荷 $P\sigma_s/(K_{Ic}/\sigma_s)^4$
中心切口板材拉伸试样	2.5	5.0 (2a)	10	40	7.5
单边缺口板材拉伸试样	2.5	2.5	5	20	1.6
^(4:1) 短跨距三点切口弯曲试样	2.5	2.5	5	21	0.50
线加载紧凑悬臂弯曲试样	2.5	2.5	6.0	6.25	0.58

三 三点弯曲或紧凑拉伸试样的 K_{Ic} 测试方法 [1]。

本试验方法是用弯曲或拉伸方法，对带有凹口并预制疲劳裂纹的试样，基于在可能测量的裂纹扩张条件下的最小载荷，即在载荷位移曲线上对线性部份，发生一定的偏离，也即裂纹长度扩张到比原长增大2%时的载荷或突进载荷来测定平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的方法。

(一) 试验所需的设备

它是由材料试验机，拉压力传感器，应变传感器，前置放大器，X—Y记录仪以及试验夹具等组成。当然电子式试验机是最理想的，因为它本身已带有拉压力传感器、前置放大器和X—Y记录仪，只需配上应变传感器（夹氏张开仪）及应变（张开位移）前置放大器以及必要的夹具即可进行试验。但是这种试验机目前国内尚不普遍。在土法上马自力更生的精神鼓舞下，国内很多单位利用普通的万能材料试验机以及自制仪器进行工作，已有很成功的报告 [3]。

(1) 试验机

要求能连续加载，速度平稳，加载速度要适当地低如 1.5 毫米/分。例如当试样厚度为 25 毫米时，加载速度要控制在每分钟载荷增加 1800~9000 公斤范围以内。621 研究所将德国 ZDM-10T 型材料试验机改装，已满意地使用。

(2) 拉压力传感器

其结构是在弹性体上贴上电阻应变片，构成桥路。当弹性体受力时，电桥失去平衡而产生微应变信号，经放大后可经 X-Y 记录仪记录下来。此信号的大小与施加的力成线性关系，只要知道微应变值就可知道与其对应的力的大小。冶金部建筑研究院〔4〕曾自制了最大容量为 5 吨的载荷传感器，通用机械研究所〔5〕自制了最大容量为 10 T 及 30 T 的载荷传感器，而上海华东电子仪器厂则有定型的产品 BLR-1 系列可供选配。

(3) 夹氏张开仪（应变传感器）

它能将试样的张开位移转变为电讯号，经放大后由 X-Y 记录仪记录，结构见示意图 4。现在一般常用的是参照〔6〕而设计的详见图 5。

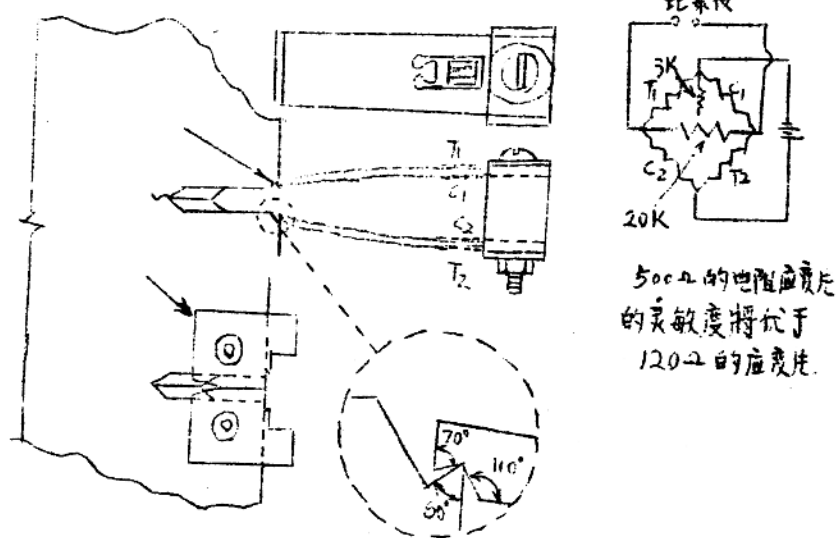
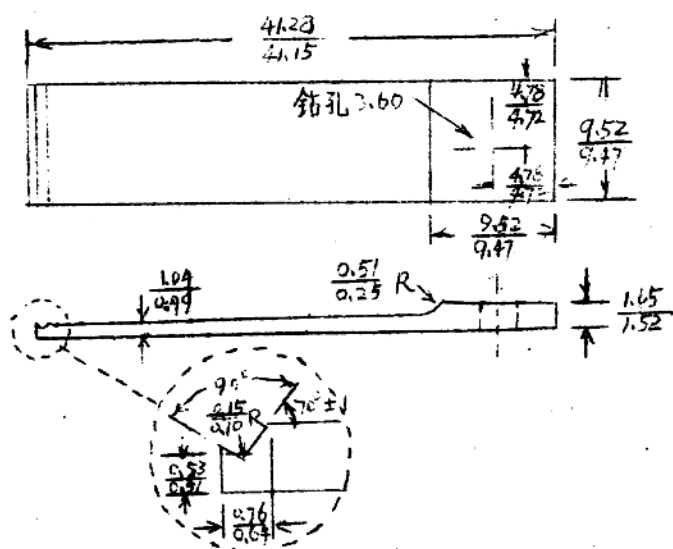
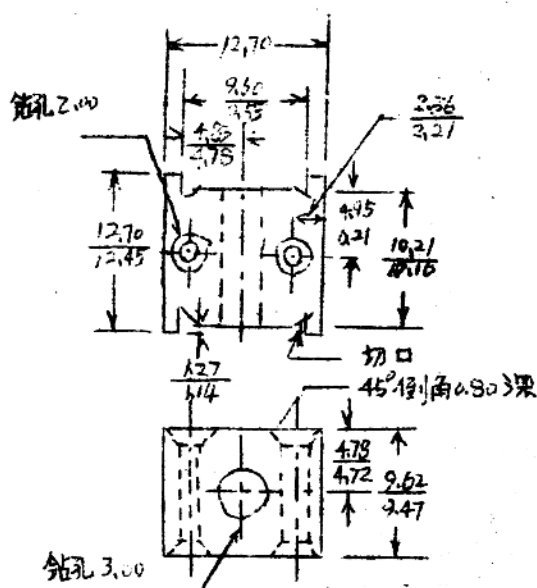


图 4 双悬臂夹氏张开仪结构及安装示意图



双悬臂张开仪的悬臂



双悬臂张开仪的间隔块

图5 双悬臂夹式张开仪的悬臂及间隔块

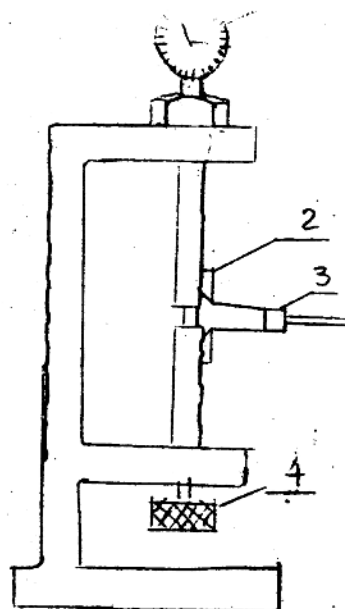
它是由二个弹簧片和一个间隔块用螺钉和螺帽装紧在一起，构成一个悬臂式的夹子。在弹簧片的拉伸和压缩表面贴上四片阻值相同（阻值为 120Ω ，如有 500Ω 的应变片灵敏度将更高）的电阻应变片，连成惠斯顿电桥并装上合适的平衡电阻。电桥电源可用 $6-12V$ ，工作范围为 $3.8\sim7.6$ 毫米能有满意的输出（如工作范围要改变，只要换上另一块尺寸不同的间隔块即可）。

弹簧片的材料弹性要好，应具有高的屈服强度与弹性模量比（ σ_s/E ）。例如处理到 σ_s 为 140 公斤/毫米²的 4340 钢； $18M$ 马氏体时效钢（ $860^\circ C$ 加热保温 30 分钟空冷，机械加工后 $480^\circ C$ 时效 3 小时后 $\sigma_b = 105\text{ Kg/mm}^2$ ， $\sigma_{0.2} = 100\text{ Kg/mm}^2$ ， $E = 1.9 \times 10^4\text{ Kg/mm}^2$ [3]），钛合金（ $Ti-13V-11Cr-3Al$ ）经固溶处理都能应用。

张开仪制成后要进行线性检验。可将张开仪夹持到标定器上，靠转动标定器上的螺旋测微器实现定刀口位移（见图6）。在工作范围内分十个等级记录张开仪张开量与输出毫伏的数据，如此重复三次，每次张开仪要折下并重新夹持上去。数据用最小二乘法处理画出直线，个别数据不可偏离直线 $\pm 0.025\text{mm}$ 。张开量的绝对值的精确度并不重要，因为本试验方法所要求的主要是张开量的相对值。

(4) 前置放大器

它在本装置中主要起放大作用，即拉压力传感器和应变传感器的信号经过放大器与 $X-Y$ 记录仪匹配，进行有选择的放大，使 $X-Y$ 记录仪能画出所要求的 $p-V$ 曲线。比较理想的是苏州仪表元件厂出品的 $SF-72$ 型数据放大器。但若自行制造亦能满足一般要求。例如冶金研究所自行配制的张开仪用前置放大器（图7）与岛津 $IS-10T$ 电子拉伸机的记录仪配合使用，效果尚好。



- 1. 千分表
- 2. 夹式张开仪刀口
- 3. 张开仪
- 4. 调节螺帽

图 6 张开仪标定装置

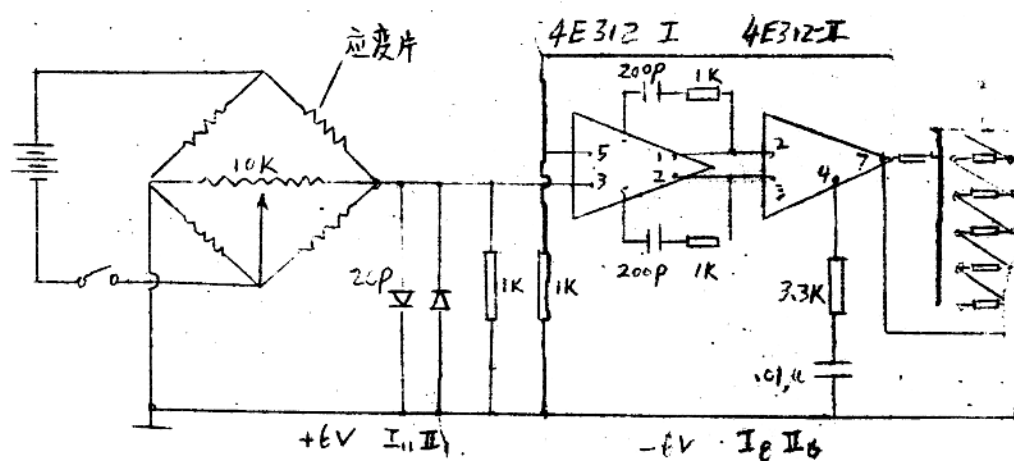


图 7

(5) X-Y 记录仪

上海自动化仪表二厂出品的一笔或二笔记录的 X-Y 记录仪, 型号为 LZ 2-100 或 LZ 2-200。

(二) 试验用夹具

(1) 利用原材料试验机上做弯曲试验的夹具改装一下即可。其改装要点是使支撑辊在试验时可以转动并稍许分离一些以减少试样与支撑辊在试验进行中由于相互摩擦而造成实验上的误差, 其结构示意图如图 8。加工要求使加载线通过二支撑辊中心间距的中心, 偏差不超过支承中心距的 0.5%, 跨距要精确到标长的 0.5% 以内, 支撑辊的直径最小为 $\frac{W}{4}$, 压头直径最小为 $\frac{W}{8}$, W 为试样高度。

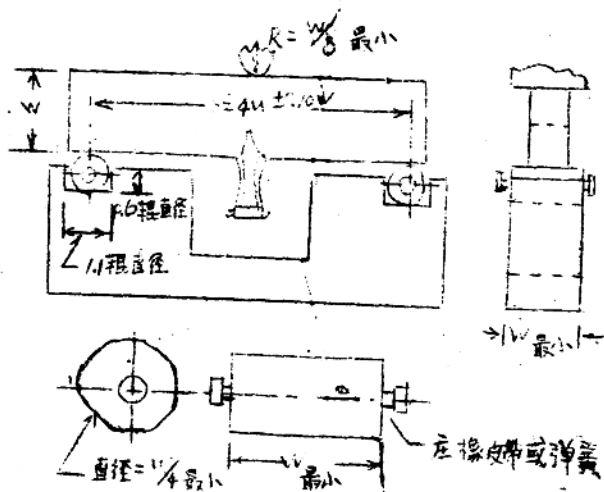


图 8 弯曲试验装置示意图

(2) 紧凑拉伸试样用 U 形钩

结构如图 9。所用材料为屈服强度达 200 kg/mm^2 的超高强度钢，例如 4340 30CrMnSiNiA 或马氏体时效钢等。

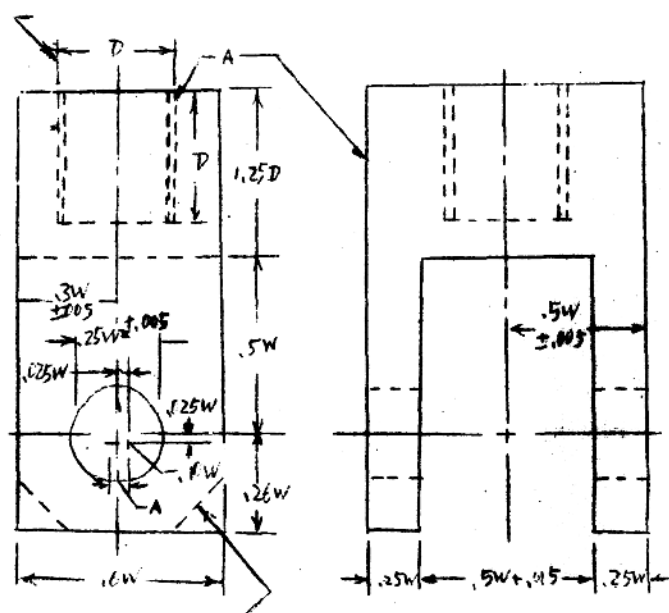


图 9 紧凑拉伸试样用 U 形钩

(三) 试样的设计

(1) 试样的截取

在各向异性材料中，断裂韧性常常和裂纹的方位以及扩展方向有关，并且和主要的机械加工方向或晶粒流动方向有关。因此在截取试样时应考虑将裂纹的扩张方向选择在最易扩张的方向。

(2) 试样方位的标记方法

对于矩形截面材料、薄板、挤压件以及具有不对称晶粒流动的锻压

件中截取试样的方位标记如图 10 所示，图中：

- L——代表主要变形方向（最大晶粒流动方向）。
- T——最小变形方向。
- S——六面体的第三方向。

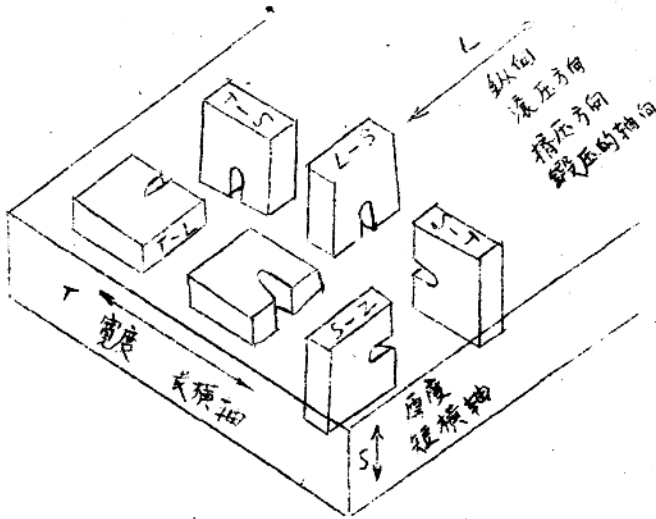


图 10 板材裂纹平面方位标记法

采用两个字母的标记规则。第一字母表示垂直于裂纹面的方向，第二字母为预期的裂纹扩展方向。例如 T—L 试样的断裂平面与平板的宽度方向垂直。预期的裂纹扩展方向与最大晶粒流动方向或平板的纵向一致。

如试样和上述参考轴倾斜，则裂纹面方位用三个字母标记。例如

L-T S表示裂纹面垂直于主要的变形方向（L方向）。预期的断裂方向在T与S之间。TS-L表示裂纹面垂直于TS之间某一方向。预期在L方向断裂。见图11。

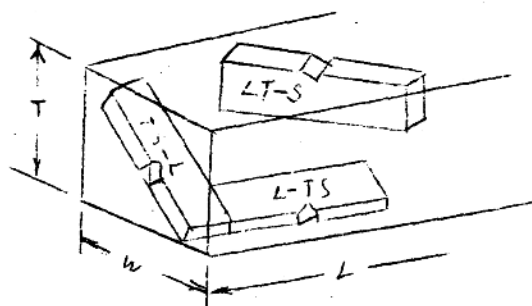


图11 试样与参考方向倾斜时裂纹平面方位的标记法

对某些园柱形材料来说，主要的变形方向平行于园柱的纵轴，参考方向如图12标记。此规则对挤压件及具有园截面的锻件也适用。