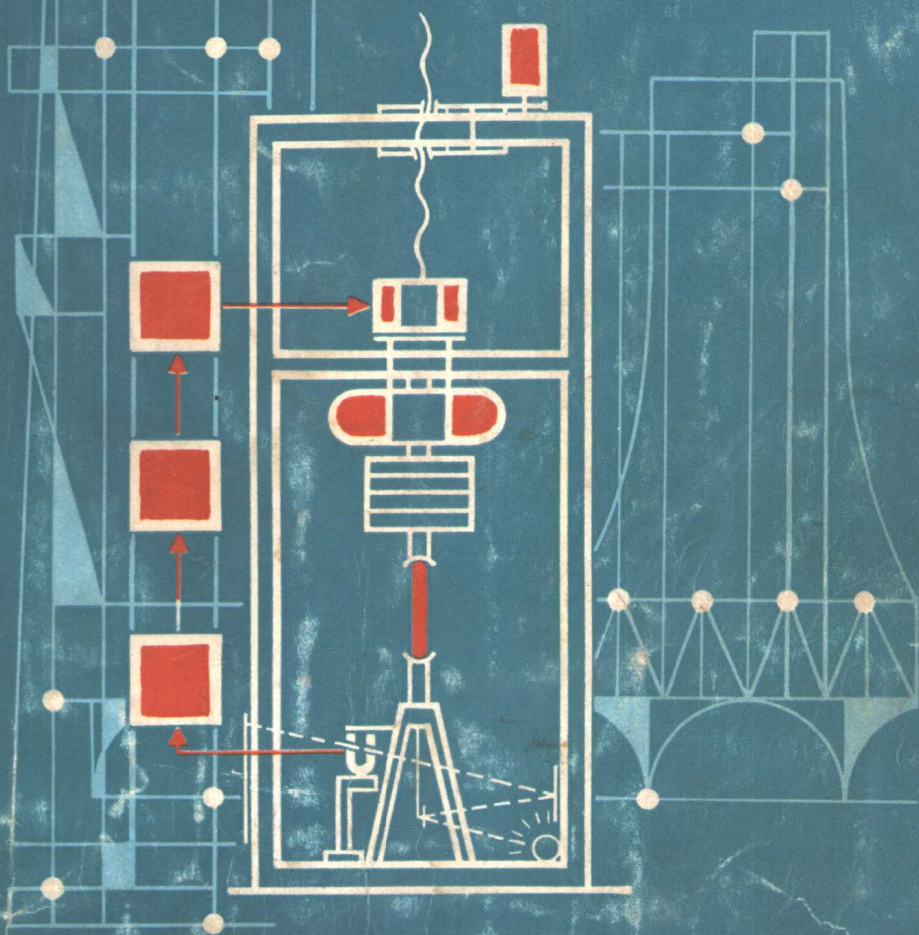


DUANLIE RENXING
CESHI YUANLI HE
FANGFA



断裂韧性
测试原理和方法

崔振源等编著

断裂韧性测试原理和方法

崔振源等编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书基本内容有十章。第一章为试验设备概述;第二~九章阐明常温下静荷、准静荷和动荷断裂韧性测试原理和方法;第十章介绍了高温下的材料断裂韧性参量及其测试方法。在每章中,为使读者能够掌握测定断裂韧性参量的方法,举有实例。书末十个附录中的内容,可供进一步钻研之用。

本书引用了国内外最新的断裂韧性测试方法,并论述了作者近年来的试验研究成果。

本书可作为高等工业学校工程力学专业“断裂韧性测试”课程的教材,亦可供工程技术人员和工科机械类各专业师生参考。

断裂韧性测试原理和方法

崔振源等编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张13.75 字数325,000

1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷

印数1—5,500

统一书号: 15119·2147 定价: (科五) 1.60元

前 言

我室 1974 年以来承担了普及断裂力学和培训断裂韧性测试技术人员的任务,先后主办过几期断裂力学短训班和进修班。为了教学需要,我曾编写了《断裂韧性测试原理和方法》讲义。第一届进修班使用后,又写了《讲授提纲》,对原讲义进行修订和补充。根据两届进修班的使用体会,并结合我室与兄弟厂、所协作对多种航材断裂韧性参量的测试和有关试验方法的研究,对上述讲义进行了集体改编,写成本书。

本书阐明了断裂力学的基本概念和定义,推导和论述了有关理论和原理,引用了最新国内外的断裂韧性测试方法和介绍了国内最近断裂韧性测试研究成果。本书初稿完成于 1978 年年底;在付印前,部分内容结合最新测试方法作了修订。

本书共分十章和十个附录。绪言、第二、三、六、八、九、十章和附录 III、IV、V、VI、VII、VIII、IX 由崔振源修改;第一章和附录 I、II 由施纪泽编写;第三章由石彩华参加修改;第四章由郑长卿修改;第五、七章由官忠信修改;附录 X 由陈宜周、田宗若和高佩琴等译校。郑长卿校读全文,并提出修改意见。最后,由崔振源负责修订。本书插图由金志刚、黄梅珠、高佩琴、楚康鸿、陈思一和李诚绘制,并由黄梅珠统一修改。

本书付印前,承孙训方教授审阅,提出指正意见;肖有谷和罗力更两同志提供有关资料。在此一并谨致深切的谢意。

由于时间仓促,水平所限,本书不能适应工程技术迅速发展的需要。内容和安排上也可能有缺点和错误,望读者提出批评和指正。

崔振源 写于西北工业大学断裂力学研究室

1980 年 7 月

常 用 符 号 表

- a ——试件单边裂纹长度;表面裂纹深度(毫米)
- B ——试件厚度(毫米)
- COD ——裂纹张开位移(毫米)
- E ——弹性模量(公斤力/毫米²)
- f ——应力强度因子修正系数
- G ——裂纹扩展力;应变能释放率(公斤力/毫米)
- G_{IC} ——临界裂纹扩展力;临界应变能释放率(公斤力/毫米)
- J —— J 积分(公斤力/毫米)
- J_{IC} ——与起裂点相应的 J 积分临界值(公斤力/毫米)
- J_R ——裂纹扩展阻力(公斤力/毫米)
- K_I ——张开型应力强度因子(公斤力/毫米^{3/2})
- K_{IC} ——平面应力断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- $K_{f\max}$ ——疲劳预裂最终阶段的最大 K_I 值(公斤力/毫米^{3/2})
- K_{IC} ——平面应变断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- K_{Id} ——动态平面应变断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- K_{IB} ——表面裂纹断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- K_{ISO} ——应力腐蚀断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- K_Q ——条件断裂韧性(公斤力/毫米^{3/2})
- K_R ——裂纹扩展阻力(公斤力/毫米^{3/2})
- ΔK ——交变载荷下应力强度因子范围(公斤力/毫米^{3/2})
- l ——试件工作长度(毫米)
- N ——循环数(周次)
- P ——载荷(公斤力)
- P_0 ——临界载荷(公斤力)
- $P_{\max}$ ——最大载荷(断裂载荷)(公斤力)
- Q ——裂纹形状系数
- R ——裂纹扩展阻力(公斤力/毫米);交变载荷下最小力和最大力的比值
- r_y ——裂纹端部塑性区域的半径(毫米)
- S ——施载跨距(毫米)
- U ——形变能(公斤力·毫米)
- u ——沿 x 轴的位移(毫米)
- V ——夹式引伸计位移(毫米)
- V_0 ——夹式引伸计临界位移(毫米)
- V_m ——最大载荷时夹式引伸计位移(毫米)
- v ——沿 y 轴的位移(毫米)
- W ——试件宽度或高度(毫米)
- w ——沿 z 轴的位移(毫米)
- z ——装卡夹式引伸计的刀口厚度(毫米)
- α_k ——冲击韧性(公斤力·米/毫米²)
- δ ——裂纹顶端张开位移(毫米)

δ_0 ——临界裂纹顶端张开位移(毫米)

δ_R ——裂纹扩展阻力(毫米)

δ_5 ——延伸率(%)

μ ——切变弹性模量(公斤力/毫米²)

ν ——泊松比

σ ——工作应力(公斤力/毫米²)

σ_b ——抗拉强度(公斤力/毫米²)

σ_c ——临界应力(公斤力/毫米²)

σ_N ——净截面平均应力(公斤力/毫米²)

σ_s ——屈服点(公斤力/毫米²)

$\sigma_{0.2}$ ——屈服强度(公斤力/毫米²)

Φ ——第二类完全椭圆积分 $\left[= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \theta \right)^{1/2} d\theta \right]$

ψ ——断面收缩率(%)

目 录

绪 言	1
第一章 试验设备概述	3
§ 1-1 引言	3
§ 1-2 试验机和载荷传感器	3
§ 1-3 位移传感器	4
§ 1-4 动态应变仪	7
§ 1-5 X-Y 函数记录仪	9
§ 1-6 高频疲劳试验机	10
第二章 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试	12
§ 2-1 引言	12
§ 2-2 测试 K_{IC} 的原理	14
§ 2-3 测试 K_{IC} 的步骤	27
§ 2-4 测试 K_{IC} 的误差分析	31
§ 2-5 测试 K_{IC} 的实例	32
§ 2-6 测试低温断裂韧性 K_{IC}	34
第三章 表面裂纹断裂韧性 K_{IS} 的测试	36
§ 3-1 引言	36
§ 3-2 测试 K_{IS} 的原理	36
§ 3-3 测试 K_{IS} 的步骤	44
§ 3-4 测试 K_{IS} 的实例	46
第四章 平面应力断裂韧性 K_C 的测试	52
§ 4-1 引言	52
§ 4-2 测试 K_C 的原理	53
§ 4-3 测试 K_C 的步骤	60
§ 4-4 测试 K_C 的实例	63
§ 4-5 断裂韧性测试中一些问题的进一步讨论	66
第五章 J 积分临界值 J_{IC} 的测试	70
§ 5-1 引言	70
§ 5-2 J 积分的基本理论	70
§ 5-3 测试 J_{IC} 的原理	75
§ 5-4 临界点的确定	78
§ 5-5 测试 J_{IC} 的步骤	83
§ 5-6 测试 J_{IC} 的实例	89
第六章 裂纹张开位移 COD 临界值 δ_C 的测试	94
§ 6-1 引言	94
§ 6-2 COD 的基本理论	94
§ 6-3 测试 δ_C 的原理	96
§ 6-4 测试 δ_C 的步骤	104

§ 6-5 测试 δ_o 的实例	108
第七章 裂纹扩展速率 da/dN 的测试	112
§ 7-1 引言	112
§ 7-2 疲劳裂纹扩展特性	112
§ 7-3 影响疲劳裂纹扩展的因素	117
§ 7-4 测试 da/dN 的原理	121
§ 7-5 测试裂纹长度 a 的一些方法	123
§ 7-6 测试 da/dN 的步骤	127
§ 7-7 测试 da/dN 的实例	132
第八章 应力腐蚀断裂韧性 K_{ISCC} 的测试	139
§ 8-1 引言	139
§ 8-2 恒定载荷法	140
§ 8-3 恒定位移法	142
§ 8-4 恒定 K_I 值法	145
§ 8-5 影响 K_{ISCC} 的因素	146
§ 8-6 测试 K_{ISCC} 的实例	148
第九章 动态断裂韧性 K_{Id}、δ_d、J_{Id} 的测试	151
§ 9-1 引言	151
§ 9-2 构件在使用中的加载条件	152
§ 9-3 测试 K_{Id} 、 δ_d 、 J_{Id} 的原理	153
§ 9-4 夏氏冲击机测绘载荷-位移的装置简介	156
§ 9-5 测试 K_{Id} 、 δ_d 、 J_{Id} 的步骤	157
§ 9-6 测试 K_{Id} 、 δ_d 、 J_{Id} 的实例	159
第十章 高温断裂韧性参量 K_{IC} 和 da/dN 的测试	162
§ 10-1 引言	162
§ 10-2 高温蠕变断裂特征	162
§ 10-3 测试高温 K_{IC} 和 da/dN 的方法	167
§ 10-4 测试高温 K_{IC} 和 da/dN 的步骤	171
§ 10-5 测试高温 K_{IC} 和 da/dN 的实例	173
附录 I 滑线式载荷传感器的设计原理和构造	176
附录 II 应变式位移计	177
附录 III 裂纹顶端附近区域的应力和位移	181
附录 IV 应力强度因子 K_I 的修正	185
附录 V 断裂韧性试验中的误差分析	188
附录 VI 扁平椭圆裂纹 K_I 的表达式	189
附录 VII 裂纹扩展力 G	192
附录 VIII J 积分测量数据点的回归处理方法	194
附录 IX 用柔度法测应力强度因子 K_I	195
附录 X R 曲线测定的推荐试行方法	201

绪 言

一、断裂力学的形成

传统的强度计算,概括起来,可以分为三个步骤:(1)按照构件的形状、尺寸和受力情况,计算构件的工作应力 σ 或所选用强度理论的相当应力 σ_r ;(2)用试验方法确定材料的极限应力 σ° ,在不同的情况下, σ° 分别表示材料的屈服点 σ_s 、抗拉强度 σ_b 或疲劳极限 σ_f ;(3)建立强度条件:

$$\sigma_r \leq \frac{\sigma^\circ}{n} = [\sigma] \quad (1)$$

式中: n 为安全系数; $[\sigma]$ 为许用应力。

计算工作应力时,认为材料是均匀连续、各向同性和变形微小的。用试验确定极限应力 σ° 时,一般采用表面光滑的试件。至于计算方法不尽精确、材料组织未必均匀和载荷估计难以准确等影响因素,都考虑在安全系数之中。

随着工业生产的发展,高强度钢结构、大型锻件和焊接结构等使用日广。实践表明,这些结构常常突然发生意外的脆性断裂。例如:第二次世界大战期间,美国五千艘“自由轮”货船共发生一千多次脆断事故,其中238艘完全报废;1938~1942年,欧洲有四十座桥梁倒塌;1954年,英国有两架“彗星”号喷气式飞机在地中海上空失事;此外,很多国家多次发生高压锅炉和石油、化工压力容器等的爆炸事故。起初,这些事故未能引起足够的重视,曾一度被认为是由偶然因素所造成的。随着高强、大型和焊接结构的广泛使用,事故有增无减,直到五十年代美国北极星导弹固体燃料发动机壳在实验时发生爆炸事故,才普遍地引起了重视。

人们围绕着事故进行了大量的调查研究后,发现脆断时工作应力远低于材料的屈服点。因此,这些断裂事故不能用传统的材料力学来解释。通过对断裂事故的分析 and 大量的实验研究,表明低应力脆性断裂总是由裂纹扩展所导致的。在实际构件中,理想的均匀连续材料是不存在的,它经常带有夹渣、裂纹和划痕等的缺陷。这些缺陷在使用过程中,将逐渐发展成为裂纹,裂纹的扩展导致了构件的断裂。

前已指出,材料组织不均匀等因素虽已包含在安全系数之中,但裂纹对构件强度的影响过去缺乏可靠的理论依据。因此,安全系数就会选取得时而太大时而太小。为了研究裂纹扩展的规律性,防止低应力脆断,形成了一门崭新的学科——断裂力学,它提供了裂纹对强度影响的理论依据。

断裂力学是最近二十年来迅速发展起来的科学。它是以构件内存在缺陷为前提,建立了符合客观情况的理论和试验方法。它的任务不仅研究裂纹扩展的规律性,还通过分析裂纹周围的应力和应变以及测试带有裂纹的试件的力学性质,建立了断裂的判据。它可以解决构件的选材,确定构件的允许最大初始裂纹尺寸,估计构件的疲劳寿命、剩余强度和检修周期等问题,从而保证构件的安全使用。

二、断裂韧性浅释

材料在低应力下发生脆断的现象,在日常生活中也是经常碰到的。如常见的玻璃、陶瓷

类产品,当它们有裂纹时,往往在很小的外力作用下就会断裂。裁玻璃就利用了这一特点,用钻石刀在玻璃表面上划一条很浅的刻痕,稍加外力,玻璃就会沿刻痕整齐地分成两块。如

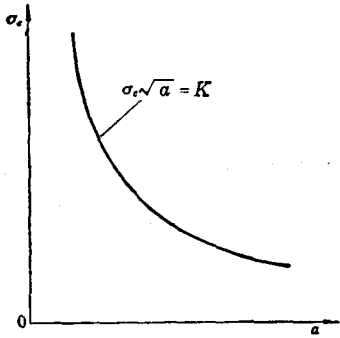


图1 σ_0 - a 曲线

玻璃没有划痕,将能承受大得多的外力作用。这一事实说明,玻璃、陶瓷这类脆性材料中有裂纹存在时,其强度将严重地削弱。

为了弄清楚裂纹对材料强度影响的规律,有人曾用玻璃制成试件,在其上预制深浅不同的裂纹。通过拉伸试验,发现玻璃试件被拉断的名义应力(常称为临界应力,用符号 σ_0 表示)与裂纹深度 a 的平方根成反比关系,如图1所示。这个试验结果说明了随着裂纹深度的增大,试件断裂的临界应力逐渐降低,也就是说裂纹是造成低应力脆断的主要原因。

在高强度钢和大断面的中、低强度钢构件中也有类似现象,即随着裂纹深度的增加,构件断裂的临界应力逐渐降低。

上面讲的是对表面裂纹而言,如是贯穿整个厚度方向的穿透裂纹,那末临界应力就与裂纹长度的平方根成反比。这些试验结果可用数学表达式表示为

$$\sigma_0 \sqrt{a} = K \quad (2)$$

即构件断裂时的临界应力 σ_0 与裂纹深度(或长度) a 的平方根的乘积为一常数 K 。需要指出,对同一材料,常数 K 是不变的;对不同材料,常数 K 的值则不同。它是材料本身固有的物理性能。从式(2)可知,裂纹尺寸 a 一定时, K 值越大,裂纹扩展的临界应力 σ_0 就越高。因此,常数 K 表示了材料阻止裂纹扩展的能力,可以看成是材料抵抗脆性破坏能力的一个断裂韧性参量(断裂韧性更详细的定义见第二章)。

断裂韧性参量 K 比传统的韧性指标有较大的优越性。传统的韧性指标与强度指标是分开的,强度指标是在对试件均匀加载条件下测得的;冲击韧性是在摆锤一次打断试件时测定的,它是参考性的指标。断裂韧性参量既是强度指标,又是韧性指标。有了这个参量,就可以按式(2)计算出构件含有裂纹尺寸 a 时的临界应力 σ_0 ,从而能够确定构件的安全承载能力;也可以在给定的载荷下,确定裂纹的允许尺寸 a_0 ,从而能够建立相应的质量标准。

第一章 试验设备概述

§ 1-1 引言

断裂韧性的测试方法与常规机械性能者类似。不过在传统的强度计算中,认为材料是均匀连续的,所以用来测试常规机械性能的试件通常是光滑的;试验时,要测出载荷和试件工作长度伸长(或缩短)量间的关系。而断裂韧性是材料抵抗裂纹扩展能力的一种量度,所以用来测试这种性能的试件是带有裂纹的;试验时,要测出载荷和试件缺口(裂纹)张开位移间的关系。

按加载速率分,断裂韧性有静态、准静态和动态三种。静态断裂韧性可在普通全能材料试验机上测定。为了监视裂纹扩展情况,并相应地作出自动记录,需增添相应的仪器设备,例如载荷传感器、位移传感器、应变仪(或数据放大器)和 $X-Y$ 函数记录仪等。如用电子拉力机,或专用的断裂韧性试验机,则机器本身带有载荷传感器、 $X-Y$ 记录仪等仪器。本章概略介绍测试断裂韧性常用的一些设备和仪器。

§ 1-2 试验机和载荷传感器

一、试验机

在 YB 947-78《金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法》中,建议试件加载速率应能使应力强度因子增加速率在 $100\sim 500$ 公斤力/毫米^{3/2}·分范围内。对于厚为 25 毫米的试件,相应的加载速率约为 $1800\sim 9000$ 公斤力/分,拉伸速率约为 $0.5\sim 2$ 毫米/分。一般全能试验机能够满足上述的加载条件。强度和韧性不同的材料的试件尺寸差别很大,要求试验机的吨位也很不同。这可根据材料的屈服点 σ_s 和断裂韧性 K_{IC} (估计值),按照下式

$$\left. \begin{aligned} B &= 2.5(K_{IC}/\sigma_s)^2 \\ P &= 0.15K_{IC}B^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

计算试件厚度 B 和载荷 P 的大小。如采用标准三点弯曲试件(见第 14~15 页),则可从表 1-1 中选择所需的试验机吨位。

表 1-1 标准三点弯曲试件所需的试验机吨位

$\frac{K_{IC}}{\sigma_s}$ (毫米 ^{1/2})	B (毫米)	K_{IC} (公斤力/毫米 ^{3/2})							
		800	700	600	500	400	300	200	100
		P (吨)							
12	360	820	720	610	510	410	310	200	100
10	250	470	410	350	300	240	180	120	60
8	160	250	220	190	150	120	90	60	30
6	90	100	90	80	65	50	40	25	13
5	62.5	60	53	45	40	30	23	15	7.5
4	40	30	26	23	19	15	12	7.5	3.8
3	22.5	13	11	9.6	8.0	6.4	4.8	3.2	1.6
2	10	3.8	3.3	2.9	2.4	1.9	1.4	1.0	0.5

目前国内使用的试验机有油压式和机械传动式两种类型,载荷的大小都是由丝杆带动指针旋转而在示力盘上读出。

二、载荷传感器

为了绘制精确的载荷-张开位移图,需将载荷值转换成电量,此电量信号经放大后,由记录仪显示或绘成图线。因此,需在加载线上串接一个载荷传感器(图 1-1)。载荷传感器起着将机械量转换成电量的作用。为了便于监测出裂纹的局部突进,在测力计、夹具和连接件的设计中,应注意到它们的刚度,力求系统的刚度较大。

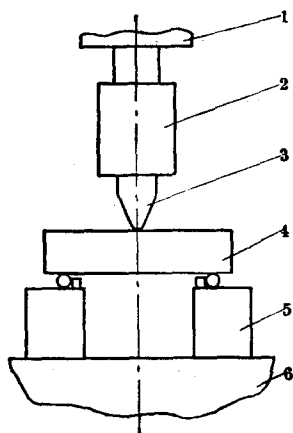


图 1-1 串接载荷传感器示意图

1—上压头支承；2—载荷传感器；3—上压头；
4—试件；5—支座；6—下横梁

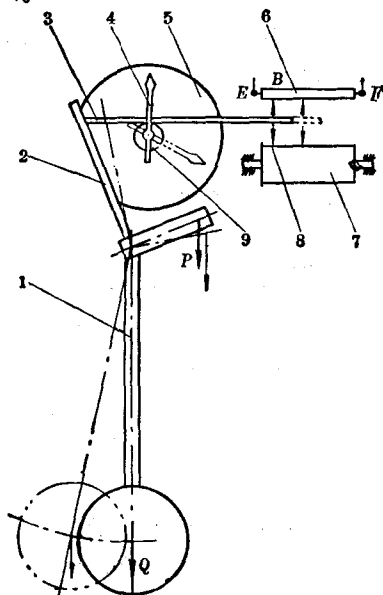


图 1-2 滑线式载荷传感器装置示意图

1—摆锤；2—推杆；3—丝杆；4—指针；5—示力盘；
6—电位器；7—滚筒；8—记录笔；9—齿轮

国内现已按系列生产不同量程的载荷传感器,可供选用。但在试验机加载线上串接载荷传感器后,会减小试验机的工作空间,有时甚至使测试工作不能进行。例如,做板材平面应力断裂韧性 K_{IC} 的试验时,试件一般较长,它和载荷传感器、夹具连接后,总长度常会超过上、下横梁间的距离。此时,可在试验机的绘图机构上装置一个线性电位器,将与载荷值成正比的绘图笔水平位移转换成电量输出,称为滑线式载荷传感器(图 1-2)。这种载荷传感器可不减小机器的有效工作空间,还具有制造简单和精确度高(误差 1% 左右)等的优点,适宜于做各种断裂韧性试验。它的设计原理和结构可参阅附录 I。

§ 1-3 位移传感器

一、基本原理

绪言中已指出,断裂韧性包含两个要素:临界应力 σ_0 (或临界载荷 P_0) 和裂纹长度(或深度) a 。因此在断裂韧性测试中,需要记录不同载荷下试件的裂纹长度,以求取对应的 P_0 - a 关系。测量裂纹长度的方法有直接法和间接法,直接法的精确度往往不能满足要求,故大多采用间接法,例如:切口张开位移法、柔度法、电位法、电阻法、声发射法、超声探伤法和涡流探伤法等,其中以切口张开位移法(包括柔度法)的灵敏度较高和操作较简便,故最常采用。

切口张开位移与裂纹长度间存在着一定关系,因而可借助于切口张开位移的变化,来监视裂纹长度扩展的情况。裂纹长度的扩展是非常微小的,这就要求测量张开位移的传感器灵敏度很高。应变式位移传感器具有这种性能。它的工作原理是弹性元件在小变形条件下,元件上某点的应变与其所受的应力(载荷)成正比,或与其变形(挠度或转角)成正比。在弹性元件某点处(最大应变处)贴应变片,可较灵敏地反映出它受力的大小。应变片的电阻变化率 $\Delta R/R$ 正比于应变 ε ($\Delta R/R = K\varepsilon$, K 是应变片的灵敏系数),即弹性元件的变形通过应变片转换成电阻变化,再借助于适当的测量电路(惠斯登电桥),把电阻变化 $\Delta R/R$ 线性地转换成电压输出。这样就将变形线性地转换成易于传递、控制和记录的电量。

位移传感器目前大多用夹式引伸计,常用的有悬臂梁式和纯弯曲(弓形)式两种类型,其基本工作原理均如上述,装上不同的端头,即可适用于测试不同的断裂韧性参量。下面分别介绍它们的具体构造。

二、悬臂梁夹式引伸计①

悬臂梁夹式引伸计(图 1-3)用两个弹簧片作弹性元件,将两个弹簧片的一端用螺栓固紧在垫块上,形成两个悬臂梁,另一端有切槽,用以夹持在试件的两个刀口上。试件刀口可以在试件本身上做出整体刀口,也可以另制两片刀口,用螺栓或胶水②固定在试件上。

引伸计两切槽以一定的夹持力装在试件刀口上的情况,如图 1-4, a 所示。这种引伸计用于测试平面应变断裂韧性 K_{IC} 或平面应力断裂韧性 K_{IC} 。用于测试 K_{IC} 的引伸计,有时将两悬臂梁的夹持端做成半圆杆形的插入探头,两插入探头以一定的夹持力装在试件受载线上,如图 1-4, b 所示。

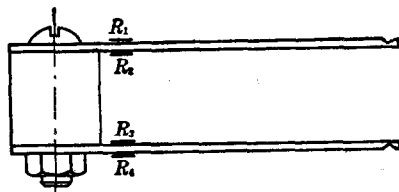


图 1-3 悬臂梁夹式引伸计
 R_1, R_2, R_3, R_4 —应变片

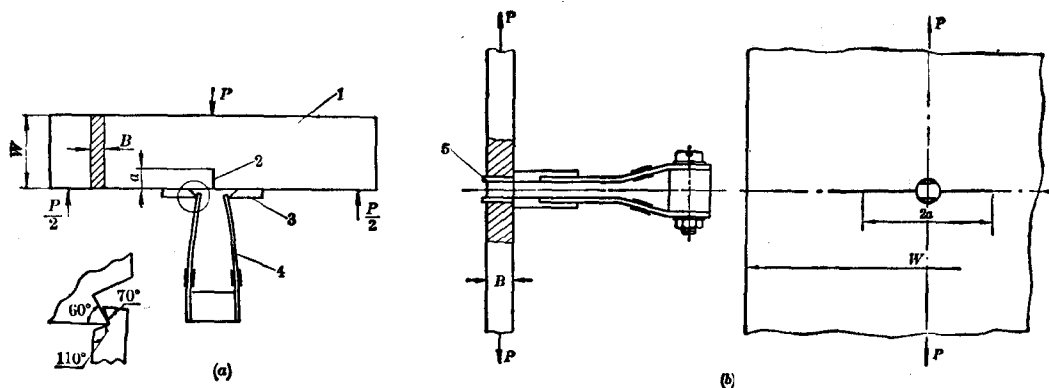


图 1-4 悬臂梁夹式引伸计安装示意图

1—试件; 2—裂纹; 3—刀口; 4—引伸计; 5—半圆杆

为了提高引伸计的灵敏度,在两悬臂梁上、下表面都贴上应变片,组成全桥(参阅 §1-4)。将电桥输出的电压,经过放大后,送到 X-Y 记录仪,记下切口的张开位移输出量。通过标定比例尺,可以确定张开位移的数值。这种引伸计需具有下列的技术性能指标:

① 参阅《应变式位移计》,西北工业大学科技资料 682 号(1978)。

② 目前国内大多用胶水粘贴。但胶水性能和粘贴质量对测试结果的影响有待作深入研究。

(1) 线性偏差 Δx , 按美国材料试验协会 E24 委员会制定的金属材料平面应变断裂韧性标准试验方法 (ASTM E399-78) 规定, $\Delta x < 0.0025$ 毫米^①。

(2) 标定范围, 保证切口张开位移 V 线性输出有一定的测量范围。例如: 三点弯曲试件 $B=450$ 毫米时, $V \geq 4.3$ 毫米; $B=45$ 毫米时, $V \geq 0.9$ 毫米。

(3) 灵敏度, 即传感器输出量与张开位移量的比值, 需具有足够大的数值。

三、纯弯曲夹式引伸计^②

我室还研制出数种纯弯曲夹式(弓形夹式)引伸计, 这类引伸计有时对测表面裂纹或平

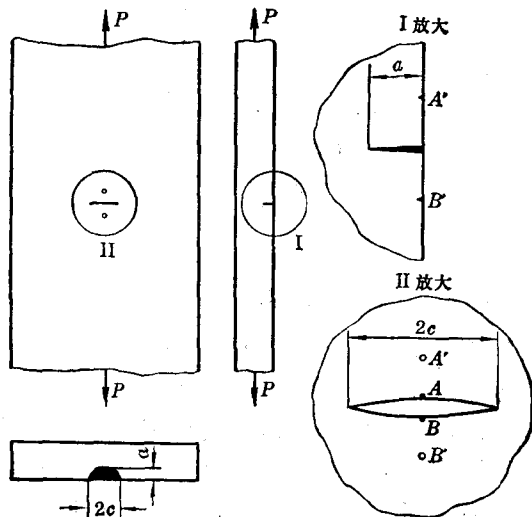


图 1-5 表面裂纹附近区域

面应力试件显得比较灵便。例如当表面裂纹中点上、下唇 A, B 两点间 (图 1-5) 距离太小, 不便装置悬臂梁夹式引伸计时, 可使用纯弯曲夹式引伸计。另外, 根据光弹性应力分析可知, 在裂纹的 A, B 点附近存在“零应力区”, 即在这一区域内应力和应变均近似地等于零; 且在拉力方向的“零应力区”宽度约等于表面裂纹深度 a 。因此, 可选 A', B' 两点代替 A, B 两点, 使 $AA' = BB' \leq a$ 。由于在拉伸过程中, AA' 和 BB' 的长度保持不变, 所以 $A'B'$ 的张开位移就等于 AB 的张开位移。

纯弯曲夹式引伸计 (图 1-6) 采用厚度为 0.5 毫米的含磷锡青铜片弯曲成弓形, 在其上下表面各贴两片应变片, 组成全桥; 引伸计的两腿各焊接一钢针。将钢针针尖分别固定在裂纹上、下唇的 A', B' 两点, $A'B'$ 的张开

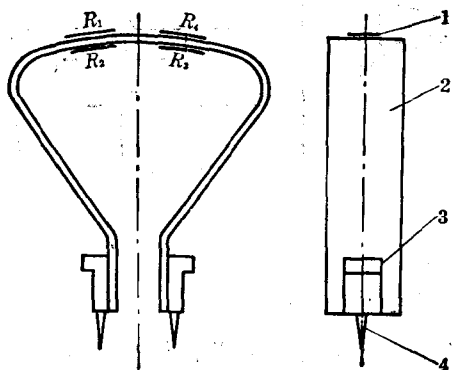


图 1-6 纯弯曲夹式引伸计

1—应变片; 2—弹性元件; 3—凸肩块; 4—钢针

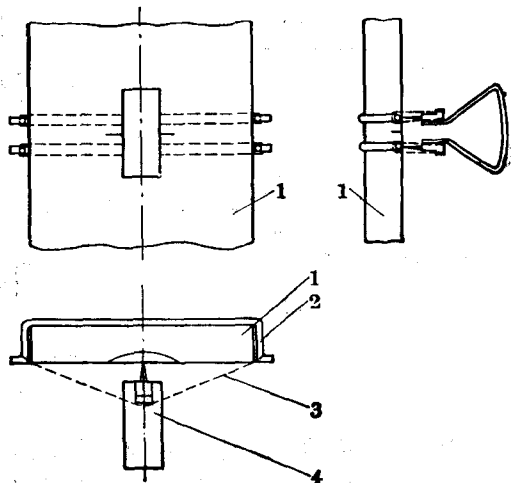


图 1-7 纯弯曲夹式引伸计安装示意图

1—试件; 2—弓形钢丝; 3—橡皮筋; 4—引伸计

① 参阅本书附录 II。

② 参阅《几种应变式位移计的研制及使用情况》, 西北工业大学科技资料 707 号 (1978)。

位移量通过引伸计后,转换成电量。

测试前,在试件裂纹上下唇相距约小于 $2a$ 处的 A' 、 B' 两点,各压制深为 0.3 毫米的 60° 锥坑(用 60° 锥形压头装在硬度计上,选择适当的载荷加力,以控制锥坑的深度)。测试时,将引伸计两钢针针尖分别插入锥坑,再用橡皮筋将引伸计压紧在试件上,如图 1-7 所示。弓形夹式引伸计的输出量经过标定比例尺,可以求得张开位移的数值。

§ 1-4 动态应变仪

国产的动态应变仪有 Y6D-3 型、Y6D-3A 型(均系电子管电路)、Y6D-2 型和 Y8DB-5 型(均系晶体管电路)等。

一、基本原理

使用应变片测量应变时,应变片的作用仅是将应变 ε 转换成电阻的变化 ΔR , 而此电阻的变化通常采用惠斯登电桥进行再变换。应变片作为惠斯登电桥的一个桥臂,当它的电阻 R 发生变化 ΔR 时,电桥的输出电压 U 亦将发生变化 ΔU 。在一定的条件下, ΔU 正比于 ΔR , 亦正比于相应的 ε 。 ΔU 经过放大后输出、显示或记录,从而可以测得变形(对线弹性结构,应变正比于变形)的大小。于是整个变换过程可简单地表示为:

$$\varepsilon \xrightarrow{\text{应变片}} \frac{\Delta R}{R} \xrightarrow{\text{电桥}} \Delta U \xrightarrow{\text{放大}} \text{显示或记录}$$

动态应变仪就是以电桥、放大器和电源(包括供桥电源)等部分组成的仪器,如图 1-8 所示。

二、电桥电路

电桥是应变测试仪器的主要组成部分之一。现在着重讨论电桥各桥臂的电阻变化与电桥输出电压的关系。为叙述简明,设电桥为纯电阻电桥,电桥输出阻抗无限大;电桥四个桥臂电阻分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 (图 1-8)。对角 AC 接电源,电压为 U_{AC} , 对角 BD 为电桥输出,输出电压为 U_{BD} 。输出电压 U_{BD} 与桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 间有下述关系①:

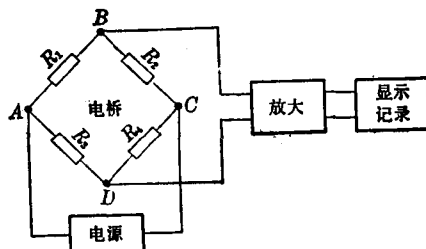


图 1-8 动态应变仪原理图

$$U_{BD} = U_{AC} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-2)$$

如果四个桥臂系由贴在构件上的电阻相同的应变片组成,则在构件应变为零时, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$, 由式(1-2)可知 $U_{BD} = 0$ 。

在构件有应变时,四个桥臂电阻均将发生变化,设其增量各为 ΔR_i , 则

$$\Delta U_{BD} = U_{AC} \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)}$$

由于 $\Delta R_i \ll R_i$, 故可略去式中 ΔR 的高次项,上式简化后,可得

$$\Delta U_{BD} = U_{AC} \frac{\Delta R_1 + \Delta R_4 - \Delta R_2 - \Delta R_3}{4R_0} \quad (1-3)$$

如果电阻增量 ΔR_i 仅是由于应变 ε 改变而引起的,即

$$\Delta R_i = K \varepsilon_i R_i$$

则式(1-3)可改写成

① 参阅孙一康等:《电阻应变仪及其在轧机测定中的应用》,第三章 III-4,冶金工业出版社(1960)。

$$\Delta U_{BD} = \frac{KU_{AC}}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3) \quad (1-4)$$

从式(1-3)和(1-4)可以看出:

(1) 电桥输出的电压 ΔU_{BD} , 与供桥电压 U_{AC} 成正比, 与各桥臂的电阻改变量 ΔR_i 成线性关系; 也就是与各桥臂上应变片所感受的应变量 ε 成线性关系。

(2) 对于电桥输出电压 ΔU_{BD} 的作用, 当相邻两臂 ΔR 或 ε (例如 ε_1 与 ε_2) 的正负号相同时相消, 相异时相加。相反的, 相对两臂 ΔR 或 ε (例如 ε_1 与 ε_4) 的正负号相同时相加, 相异时相消。

恰当地利用上述结论(2), 可提高测量灵敏度减少误差。例如, 在夹式引伸计弹性元件上贴四片 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 应变片(图 1-9, a), 接成如图 1-9, b 所示的全桥。因 $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon$; 故

$$\Delta U_{BD} = \frac{KU_{AC}}{4} \cdot 4\varepsilon = KU_{AC}\varepsilon$$

这时电桥输出电压是单桥臂工作输出的四倍; 是两桥臂工作的两倍。但若接成如图 1-9, c 所示的全桥, 则其输出电压为零。由此可知, 必须正确地接成全桥。

又如图 1-10 所示的圆柱形载荷传感器, 由于种种原因, 载荷作用线往往偏离传感器理想轴心线。正确地选贴应变片, 可以消除由于载荷偏心所引起的应变, 准确地测得载荷值。图上所示各应变片的应变为

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_p + \varepsilon_M$$

$$\varepsilon_4 = -\varepsilon_p - \varepsilon_M$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \nu \varepsilon_p$$

式中: ε_p 为轴向载荷引起的应变; ε_M 为偏心载荷引起的应变; ν 为泊松比。则全桥输出的电压为

$$\begin{aligned} \Delta U_{BD} &= \frac{KU_{AC}}{4} (-\varepsilon_p + \varepsilon_M - \varepsilon_p - \varepsilon_M - \nu \varepsilon_p - \nu \varepsilon_p) \\ &= \frac{KU_{AC}}{2} (1 + \nu) (-\varepsilon_p) \end{aligned}$$

上式中仅反映出 ε_p , 而不包含 ε_M 。一般载荷传感器常用 8~32 个应变片, 均需对称均匀地粘贴。

三、故障处理

在使用应变仪过程中, 遇到的故障可概括地分为两类: 一是应变片及其连接的故障; 一是应变仪主体的故障。在遇到故障时, 首先要查清是哪一类的, 以便及时处理。如发生常见的“电桥调不平衡”(指示电表指针倒向一边)或“漂移”(电桥调平衡后指针向一边缓慢偏转)等现象, 检查时, 可将电桥的 B、D 两点短路。如故障依旧, 表明应变仪主体有毛病, 应送仪器修理部门检修。如指针正常, 则故障在测量电桥上。此时, 应变仪如是半桥接法, 则可将

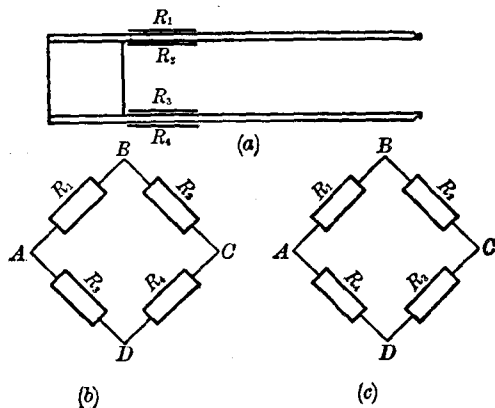


图 1-9 正确选接引伸计的桥臂

a—引伸计; b—正确接法; c—错误接法

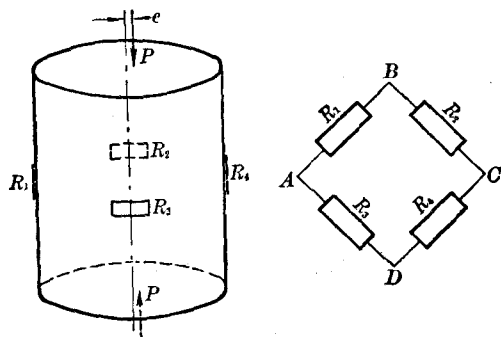


图 1-10 圆柱形载荷传感器

桥臂 R_1 与 R_2 的应变片接线位置互换 (BD 不短路)。如指针“反向”,表明 R_1 或 R_2 有故障;如指针没有“反向”,则说明应变仪电桥盒内的 R_3 或 R_4 有故障。如是全桥接法,则可先按上述半桥接法检查桥臂 R_1 与 R_2 ;再用同法检查桥臂 R_3 与 R_4 。当检查结果表明故障在测量电桥上时,一般检查:(1)接线质量,(2)有无供桥电压 U_{AC} , (3)应变片是否损坏等,再作相应的处理。

§ 1-5 X-Y 函数记录仪

一、基本原理

X-Y 函数记录仪是一种通用的自动记录仪。它在直角坐标中自动地描绘两个电量间的关系曲线图,具有记录面积大 (250×300 毫米²)、灵敏度高 (0.05 微伏/毫米) 和精确度高 (0.8%, 如坐标刻度用标准信号直接标定,精确度还可提高) 等优点,适用于自动记录静态 (频率小于 2 周次/秒、全过程大于 0.5 秒) 两电量间的关系曲线。配上各种非电量-电量变换器后,则可描绘力-转角、应力-应变、压力-流量和温度-时间及其它物理量的关系曲线。故在断裂韧性参量测试中常用它来记录载荷-变形和载荷-裂纹张开位移曲线等。

X-Y 函数记录仪是一种自动平衡的记录仪,其两个轴各由一套独立的随动系统带动,仪器的原理图如图 1-11 所示。

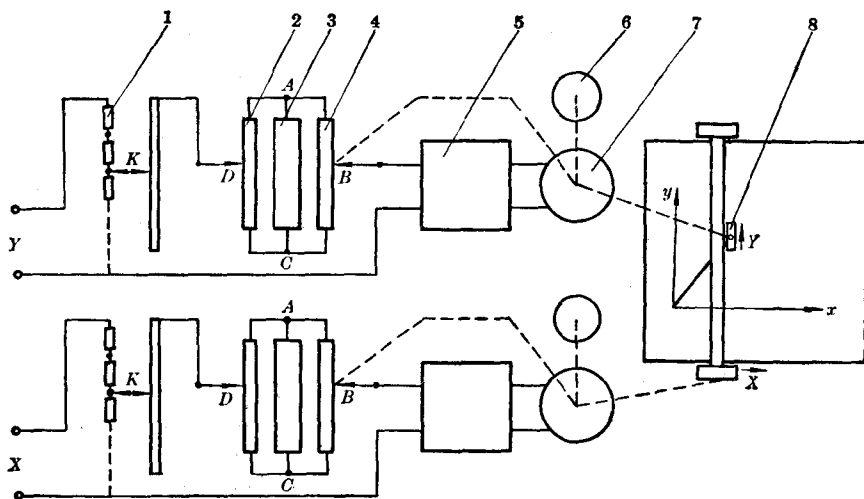


图 1-11 X-Y 函数记录仪的原理图

1—衰减器; 2—调零电位器; 3—稳压电源; 4—测量电位器; 5—放大器;
6—测速发电机; 7—伺服电机; 8—记录笔

被测电压信号 X 、 Y 分别通过衰减器, 送入测量电路。测量电路实际上是一个以直流电桥为补偿电路的自动电位差计, 电桥由测量电位器和调零电位器组成四个桥臂, 用一个稳压电源供桥。被测信号与电桥输出电压相比较后, 其电压差经放大成为具有一定功率的输出, 使伺服电机转动, 并带动测量电位器的触头 B , 改变电桥输出电压的大小, 使测量电路输出电压差趋向于零。记录仪的记录笔通过齿轮、拉线等与伺服电机相连, 随电机转动而在 X 轴或 Y 轴上移动, 绘出相应的曲线。当电压差等于零时, 伺服电机停止转动, 记录笔立即停止描绘。

X-Y 函数记录仪也可描绘一个电量和时间的关系曲线, 时间坐标是由记录纸在 X 方