

· 569780

3325
3415.1

断裂韧性测试

褚武扬 林 实 王 彬 田中卓 编著

科学出版社

断裂韧性测试

褚武扬 林 实 编著
王 彬 田中卓

科 学 出 版 社

1 9 7 9

内 容 简 介

本书介绍了各种断裂力学参数 (如 K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IId} , K_{IId} , J_{Ic} , δ_c^* , $\frac{da}{dN}$, K_{Isc} , $\frac{da}{dt}$ 等) 的测试原理, 实验装置以及测试和计算步骤。

本书可供从事断裂韧性测试的工人、工程技术人员及有关的高等院校师生参考。

断 裂 韧 性 测 试

褚武扬 林 实 编著
王 棣 田中卓

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 12 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1979 年 12 月 第 一 次 印 刷 印张: 6 1/2

印数: 0001—8,600 字数: 146,000

统一书号: 13031·1133

本社书号: 1589·13—2

定 价: 0.82 元

前 言

本书是一本实验指导书。介绍了各种断裂力学参数(如 K_{Ic} , K_c , K_{Ia} , K_{Ia} , J_{Ic} , δ_c^* , da/dN , K_{Isc} , da/dt 等)的测试原理、实验装置以及测试和计算步骤。大多数章节都附有测试及计算实例,并备有较详细的计算图表。

参加本书编著工作的有褚武扬、林实、王彬和田中卓等。其中第一、二、三、四、五等章由褚武扬执笔(其中第一章初稿由冯万仁提供),第六章由田中卓和褚武扬执笔。

北京钢铁学院断裂力学小组的其他同志,特别是肖纪美、靳东来、郑报钧、李世谅、朱淑彦、陈雅琴等,对本书的编写和出版提供了很多帮助,钢铁研究院罗力更同志,西北工业大学郑书卿等同志对原稿提出了很多宝贵意见,特此表示感谢。

目 录

第一章 机械量电测法基本知识	1
一、机械量电测的基本概念.....	1
二、电阻片.....	2
1.电阻片的结构和工作原理.....	2
2.电阻片的测量性能.....	3
3.电阻片的粘贴工艺.....	4
三、电桥电路.....	5
1.电桥的基本原理.....	6
2.电桥参数的基本关系.....	7
四、 $x-y$ 函数记录仪的工作原理.....	9
五、传感器的制作.....	10
1.压力传感器.....	10
2.拉力传感器.....	11
3.简易测力传感器.....	12
4.双悬臂夹式引伸计.....	12
5.高低温夹式引伸计.....	15
6.传感器标定.....	16
第二章 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 测试	17
一、线弹性断裂力学的基本概念.....	17
1.应力场强度因子 K_I 和断裂韧性 K_{Ic}	17
2.裂纹扩展力 G_I	20
3.塑性区及其修正.....	21
4.阻力曲线和断裂判据.....	23
二、标准 K_{Ic} 测试法.....	26

1. 测试原理·····	28
2. 取样和标记·····	33
3. 测试步骤和要求·····	34
4. 计算实例·····	38
三、表面裂纹试样测 K_{Ic} ·····	40
1. 表面裂纹 K_{Ic} 计算公式·····	41
2. 测试步骤·····	46
3. 计算实例·····	48
四、测 K_{Ic} 的其它类型试样·····	49
1. 圆柱切口拉伸试样·····	49
2. 圆形紧凑拉伸试样·····	51
3. 拱形三点弯曲试样·····	52
4. 短跨距三点弯曲试样·····	53
五、高、低温 K_{Ic} 测试·····	53
1. 高温 K_{Ic} 测试·····	53
2. 低温 K_{Ic} 测试·····	54
附录 I. 张开位移量和裂纹扩展量的关系·····	55
附录 II. K_{Ic} 测试误差分析·····	56
附录 III. K_{Ic} 测试的有效性检验·····	60
1. 裂纹长度要求·····	60
2. 韧带和厚度要求·····	66
3. 载荷比要求·····	67
第三章 裂纹发展速率 da/dN 测试 ·····	68
一、 da/dN 测试原理·····	69
1. 基本原理·····	69
2. 柔度法测等效裂纹的原理·····	71
二、试样类型·····	76
1. 标准紧凑拉伸试样·····	76
2. WOL 型紧凑拉伸试样·····	76
3. 中心穿透裂纹试样·····	78

4. 标准三点弯曲试样	79
5. 表面半椭圆裂纹试样	79
三、柔度法和表面直读法测 da/dN	81
1. 测试步骤	81
2. 测试实例	87
四、电阻法测高温下的 da/dN	97
1. 电阻法测裂纹长度的原理	97
2. 测试步骤	99
附录 回归分析简介	100

第四章 临界 J_{Ic} 积分 (J_{Ic}) 和临界 COD(δ_c^*) 测试 107

一、 J_{Ic} 测试原理	107
1. 多试样法测 J_{Ic}	108
2. 单试样法测 J_{Ic}	110
3. J_{Ic} 试样的尺寸要求	111
二、开裂点的确定	112
1. 声发射法	112
2. 金相法	114
3. 电位法和电阻法	115
4. 多试样法	117
三、单试样测量 J_{Ic}	119
1. 测试步骤	119
2. 计算实例	121
四、临界 COD 测试	123
1. 原理	123
2. 转动因子 r	124
3. 临界点的确定	127
4. 测试步骤	128
5. 计算实例	129

第五章 平面应力以及动态和止裂断裂韧性的测试 132

一、平面应力断裂韧性 K_{Ic} 测试原理	132
1. COD 方法	133
2. 直接测定法	134
3. 阻力曲线 (R 曲线) 方法	134
二、用 COD 法测 K_{Ic}	136
三、阻力曲线法测 K_{Ic}	140
1. 测试步骤	140
2. 计算实例	142
四、动态和止裂断裂韧性的概念	145
1. 传统的动态韧性指标	146
2. 裂纹的动态扩展和动态断裂韧性	148
3. 止裂原理	150
五、动态断裂韧性和止裂断裂韧性测试	152
1. 高速加载测动态断裂韧性	152
2. DCB 试样测 K_{Iad} 和 K_{Ia}	156
第六章 应力腐蚀测试方法	158
一、恒载荷法	159
二、悬臂梁测 K_{Isc} 实例	165
三、恒位移试样测 K_{Isc} 和 da/dt	168
1. 恒位移试样及其特点	168
2. 恒位移试样测 K_{Isc} , $\frac{da}{dt}$ 的原理	171
3. 恒位移试样测试 K_{Isc} 和 da/dt 步骤	175
4. 测试实例	176
四、恒 K_I 试样	179
附录 I. Kies 方程的论证	181
附录 II. DCB 试样 K_I 公式的论证	184
附录. 应力场强度因子计算表	187

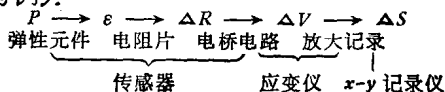
表 1. 三点弯曲试样的 $Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_1 B \sqrt{W}}{P}$ 值 $\left(\frac{S}{W} = 3.5\right)$	187
.....	
表 2. 三点弯曲试样的 $Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_1 B \sqrt{W}}{P}$ 值 $\left(\frac{S}{W} = 4.0\right)$	189
.....	
表 3. 标准紧凑拉伸试样的 $F\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_1 B \sqrt{W}}{P}$ 值.....	191
表 4. 圆形紧凑拉伸试样的 $Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_1 B \sqrt{W}}{P}$ 值.....	193
表 5. WOL 型紧凑拉伸试样的 $F\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_1 B \sqrt{W}}{P}$ 值...	195
表 6. 悬臂梁弯曲试样的 $F\left(\frac{a}{W}\right) = K_1 \frac{BW \sqrt{W}}{M}$ 值.....	197
参考文献	199

第一章 机械量电测法基本知识

一、机械量电测的基本概念

实验过程中变化的机械量，如力和位移，不便于直接记录，特别是变化很小的机械量就更难直接记录。应用电测法就可将微小变化的机械量转换成电参量，再自动记录下来。为此首先要将待测的机械量转换成电参量，这一般通过应变转换器(将应变转换成电参量的元件，如电阻片)来完成。因此，机械量电测法的第一步就是利用弹性元件，将机械量(力或位移)转换成应变，再和电参量(如电阻)的变化发生联系。由于电阻变化不便于自动记录，因此，第二步就是利用特定的电路形式(如电桥电路)将电阻的变化转换成电压或电流的变化，再经放大后，就能用标准电表或记录器(如 $x-y$ 记录仪)加以测量和自动记录。

由此可知，机械量电测法的实质是将信号进行一系列的转换和放大，再用电测仪表记录下来，以便分析。其转换过程如下(以力为例)：



其中 P 为外力， ε 是应变量， ΔR 是应变片电阻变化量， ΔV 是电桥两端电位差， ΔS 是记录笔移动距离。

整个测量装置包括以下几个组成部分：

(1) 传感器：是表面贴有电阻片的弹性元件：在力 P 作用下，各点产生一定的应变，贴上面的电阻片也产生同样的

应变,从而其电阻值发生变化;

(2) 动态电阻应变仪: 它在这里主要起放大作用, 应用桥式电路将电阻变化转换成电压信号, 通过放大后, 输出具有足够功率的电压信号。如果外界信号变化比较大, 而且 $x-y$ 记录仪的放大倍数足够大时, 也可不用动态电阻应变仪;

(3) $x-y$ 记录仪: 它将电压信号经过放大, 并把放大后的电压信号变成指示器的位移, 并由记录笔绘出来。

根据记录的位移值, 即能算出相应的外力 P , 但需要有两个前提条件:

(1) 各次转换和放大都成线性关系;

(2) 转换和放大系数应稳定。

这样记录的位移 (ΔS) 曲线, 才能正确反映力 P 的变化过程和绝对值大小。

要正确地进行测量, 必须了解每一转换和放大环节的工作原理和具体结构, 以便在不同工作情况下, 分析可能引起偏差的原因和消除偏差的方法, 这样才能保证一定的测量精度。

二、电 阻 片

1. 电阻片的结构和工作原理

电阻片是应变转换器的一种形式, 其作用是将要测的机械量转换成电参量, 以便进一步电测。

电阻片的种类很多, 这里仅以箔式电阻片为例, 其结构如图 1.1 所示。这种电阻片是用极薄康铜片 (厚度在 5—10 微米之间) 通过一系列的光学化学过程腐蚀出来的栅状薄片, 再在

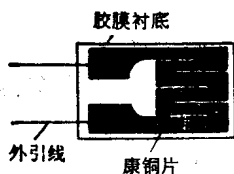


图 1.1 电阻片

两面贴上胶膜衬底制成的。用专门的胶水将电阻片贴在需测

应变之处。零件的应变通过胶膜衬底传给康铜薄片，使其阻值产生相应的变化，从而完成了非电量电测法的第一步转换。

在弹性范围内，电阻值的相对变化量 $\frac{dR}{R}$ 和应变 $\varepsilon = \frac{dL}{L}$ 成线性关系，即

$$\frac{dR}{R} = k\varepsilon \quad (1.1)$$

式中 k 是电阻片的灵敏系数，一般为 2.0—2.2。

2. 电阻片的测量性能

用电阻片测量机械变形是建立在式 (1.1) 基础上的，不仅应变对电阻片的电阻有影响，其它因素如温度等，对其电阻也有影响，甚至有时影响还很大。下面具体研究一下各种因素的影响：

(1) 机械应变。由于电阻片所用材料和胶合剂性质的限制，再考虑到仪表的灵敏度以及干扰信号的影响，一般来说，可以测得 $\frac{dR}{R} = 10^{-7}$ 。因此能测量的最小应变量为 $\varepsilon_{\min} = 5 \times 10^{-8}$ 。对钢质零件，相应的应力为 $\sigma_{\min} = 0.1$ 公斤/厘米²。为了保证测量精度，测量的最大应变应小于 5%，即 $\varepsilon_{\max} < 5 \times 10^{-2}$ 。故电阻片的测量范围为 $5 \times 10^{-8} < \varepsilon < 5 \times 10^{-2}$ 。为了增大电阻片的应用范围，可借助弹性元件来放大或缩小变形量，以适应电阻片的测量范围。

(2) 温度的影响。当温度变化时，电阻片的阻值也将发生变化，另外由于弹性元件和电阻片的热膨胀系数不同，还会产生附加变形，这些都会给实验结果带来误差。计算表明，对钢质零件上的康铜电阻片来说， $\sigma_t = 12$ 公斤/厘米²/1°C，这就

是说，温度变化 1°C ，就相当零件上附加了 12 公斤/厘米² 的应力。由此可知，温度影响是一个不可忽视的因素。在使用电阻片时，必须采取温度补偿措施，以降低或消除其影响。一般用和工作电阻片完全相同的电阻片贴在和工作弹性元件材质相同的试件上，使它处在和工作电阻片相同的温度条件下，但不受力作用。把这个补偿片作为工作片的相邻桥臂接入电桥，就可消除温度变化带来的误差。

(3) 湿度的影响。空气中的湿度较大时，电阻片的胶层绝缘度就降低，严重时胶层粘结强度也会降低，以致无法工作。绝缘电阻的变化将使桥臂总阻值发生变化，另外胶剂吸收水份后发生膨胀，也使电阻片产生附加变形。这些非工作因素的影响，会给测量带来较大的误差。因此除了在实验室工作条件较好的情况外，一般都需采取防水（潮）、防油等措施。

3. 电阻片的粘贴工艺

(1) 表面处理。要求弹性元件表面光洁度为 W_6 左右，用细砂纸将表面交叉打毛，用划针划好定位线。用丙酮（或无水酒精、四氯化碳）洗擦，晾干后涂 2—3 层底胶，可用 1720 胶（天津漆包线厂产）或 201 胶（上海新光化工厂产）。在室温晾干后，放入恒温箱中聚合处理，规程如下：

以每分钟上升 $1-2^{\circ}\text{C}$ 的速度升温到 $70^{\circ}-80^{\circ}\text{C}$ ，然后保温 1—2 小时，再以 $1-2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的速度升温到 $160^{\circ}-170^{\circ}\text{C}$ ，仍保温 1—2 小时，此后随炉冷至 $50^{\circ}-60^{\circ}\text{C}$ 后出炉。

(2) 贴片。选择阻值相同（波动 $\leq \pm 0.5\%$ ）的电阻片（预先用惠斯登电桥逐片测量电阻值），用放大镜检查片内是否有汽泡和锈斑。用丙酮或无水酒精擦洗贴片处及电阻片，晾干后涂一层薄而匀的胶（1720 胶或 201 胶）。待溶剂挥发

得差不多时将片贴上，垫上一层玻璃纸，用手指向一个方向挤压几次，把多余的胶和汽泡排出使片贴牢。

(3) 加压聚合。在贴好的片上盖一层聚四氟乙烯薄膜或玻璃纸，垫一层 2—4 毫米厚的橡皮（应较软，且能耐 180℃ 温度），用特制夹具夹紧（或用布带捆紧），一般应使电阻片受到 2 公斤/厘米² 的压力，以保证聚合时不产生汽泡和电阻片变形。压力不宜太大，否则将会把电阻片内的电阻丝压断。加压后放在恒温箱内聚合，规程和 (1) 相同。

(4) 检查。用万能表逐片检查有无损坏，然后用高阻表或兆欧表检测电阻片和弹性元件间的绝缘电阻，一般应大于 500 兆欧。如绝缘度低于 100 兆欧或汽泡较大，甚至断丝，都应按上述步骤补贴。

(5) 组桥连线。用粗细合适的铜导线（如 $\phi 0.2$ 毫米左右的高强度漆包线），按一定的组桥方式连接。所有焊接点都应焊牢。

(6) 涂保护层。检查桥路连接无误，在应变仪上调试平衡后，在整个贴片表面和引线上涂 2—3 层胶（1720 或 201）晾干后聚合处理，规程同 (1)。

如果传感器在室温干燥条件下使用，则可不涂保护层，第 (6) 步可省去。

如果传感器是在短期内使用，则可在传感元件上直接用 501 胶或 502 胶（快干胶）粘贴，几小时后就可使用。也可用其它胶粘贴。为延长使用时间，可在连线后涂 2—3 层防潮的氯丁橡胶（北京皮革化工厂生产）。

三、电桥电路

电阻片的作用是将机械量 (ϵ) 转换成电参量 (R)，从而

为进一步电测打下基础。但电阻的变化难以测量和记录，可以把电阻参量进一步转换成易于放大、测量和记录的电流或电压。一般用电桥电路来完成这个转换。

1. 电桥的基本原理

电桥电路的构成如图 1.2 所示。其中 R_1 是工作电阻片，

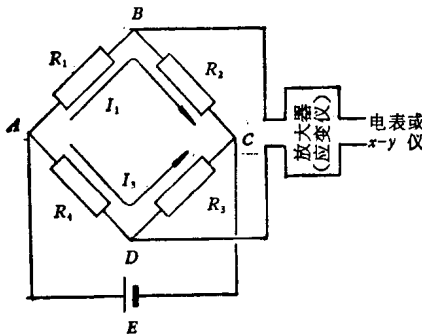


图 1.2 电桥原理

R_2 为温度补偿片， R_3 和 R_4 是固定电阻（也可以 R_1, R_3 是工作片， R_2, R_4 是补偿片）。在对角线 AC 上接直流电源，另一对角线 BD 接入放大器（应变仪）。当电桥平衡时

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (1.2)$$

这时 BD 对角线上电流为零，放大器没有信号输出，电表（或记录仪）指针在零位。

当被测构件由于受力而变形时，紧贴在上面的工作电阻片也跟着变形，其阻值由 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_1$ 。这时式 (1.2) 不再成立，电桥平衡被破坏，对角线 BD 上有电流通过，电流表指针（或记录仪画笔）离开零位。如事先经过标定，就可从电流表指针偏转的角度（或画笔移动的距离）来计算构件受力的大小。

2. 电桥参数的基本关系

在实际工作中常遇到零件受力复杂的情况，如受拉件当作用力偏心时，将承受附加弯矩，扭转轴同时受扭矩和弯矩的联合作用等等。这时如在组桥时采取一定的措施，就可正确地测出某一外力的作用，从而排除其它外力或附加力的影响。另外，合理组桥还可提高电桥灵敏度及测量精度。为此需要了解电桥参数间的关系。

如图 1.2, 显然

$$U_{AC} = I_1(R_1 + R_2) = I_3(R_3 + R_4)$$

$$U_{BD} = I_1R_1 - I_3R_4 = R_1 \cdot \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2} - R_4 \cdot \frac{U_{AC}}{R_3 + R_4}$$

$$U_{BD} = U_{AC} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1.3)$$

当电桥四个臂阻值都发生变化时，电桥输出电压 U_{BD} 的变化量 dU_{BD} ，可以通过将式 (1.3) 对 R_1, R_2, R_3 和 R_4 求微分获得：

$$\begin{aligned} dU_{BD} &= U_{AC} \left[\frac{(R_1 + R_2)dR_1 - R_1dR_2}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{-R_4dR_2}{(R_1 + R_2)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(R_3 + R_4)dR_4 - R_4dR_3}{(R_3 + R_4)^2} + \frac{R_4dR_3}{(R_3 + R_4)^2} \right] \\ &= U_{AC} \left[\frac{R_2dR_1}{(R_1 + R_2)^2} - \frac{R_1dR_2}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{R_4dR_3}{(R_3 + R_4)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_4dR_4}{(R_3 + R_4)^2} \right] \end{aligned}$$

组桥时令 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ ，并利用式 (1.1)，则

$$dU_{BD} = U_{AC} \cdot \frac{1}{4} \left[\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right]$$

$$= \frac{U_{AC}}{4} \cdot k(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (1.4)$$

由此可知,当四个臂的电阻都发生变化时, R_1 和 R_3 的变化为正, R_2 和 R_4 的变化为负, 故如四个臂的 R 相等, 且其增量也相同时, 则 $dU_{BD} = 0$ 。利用式 (1.4), 可以根据需要进行不同的组合。举例如下:

(1) 温度补偿: 设 R_1 为工作电阻片, R_2 为补偿电阻片, 采用性能相同的电阻片, 贴在同样材料的构件上, 并处在同样的温度条件下。这样, 二者由于温度变化所引起的阻值变化是相同的。但由于它们接在相邻的电桥桥臂上, 根据式 (1.4),

它们的温度影响恰好互相抵消, 从而达到了温度补偿的目的。

(2) 在拉伸和弯曲同时作用下, 需要测拉伸。如图 (1.3) 示, 在试件的上、下表面分别贴上电阻片 R_1 和 R_3 。这时 R_1 和 R_3 所受弯曲作用的大小相等, 正负相反。如将 R_1 和 R_3 串联后接在一个桥臂上, 补偿片 R_2 和 R_4 串联后接在相邻的桥臂上, 构成半桥接法 (即电桥的两个臂由电阻片构成, 另两个臂由固定电阻构成), 则弯曲作用可以抵消, 所测结果仅受拉伸的影响。

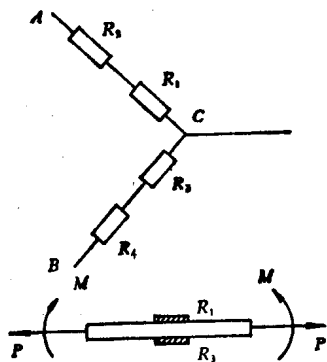


图 1.3 消除弯曲影响的桥路

另外, 若将 R_1 和 R_3 分别接入电桥中相对两臂, 补偿片 R_2 , R_4 接入另外两臂, 构成全桥接法 (即电桥的四个臂都由电阻片组成), 如图 1.2 示, 这样根据式 (1.4) 可知, 不仅可以消除弯曲作用的影响, 还可使测量信号增大 1 倍, 从而提高了电