

金属板材 K_R 曲线试验方法 研究报告文集



航空工业部第六二一研究所

1986

金属板材 K_R 曲线试验方法 研究报告文集

航空工业部第六二一研究所

1986

前 言

航空工业部金属板材 K_R 曲线试验方法课题小组在制订“金属板材 K_R 曲线试验方法”(HB5261—83)的过程中,课题组各单位对金属板材 K_R 曲线的有关问题进行了广泛的理论与试验研究,提出了27篇技术报告,这些资料不仅是制订“金属板材 K_R 曲线试验方法”的依据,而且对从事 K_R 曲线理论与试验研究及工程应用的人员有着重要的参考价值。因此,将其中主要技术报告汇编成文集出版,供航空、航天、机械、冶金等部门从事设计和试验的有关工程技术人员及高等院校有关专业师生参考。

本文集包括13篇技术报告全文和14篇技术报告摘要及金属板材 K_R 曲线试验方法。文集的技术报告经吴森、刘文珽、杨永安审阅。责任编辑朱之桢。

本文集的出版,承蒙《航空材料》杂志编辑部洪时藏、朱慕霞、祝印兰、关景茹、赵义善支持,谨致衷心谢意。

金属板材 K_R 曲线文集编辑小组:

杨永安 吴 森 刘文珽 官忠信

陈思一 蔡春玲 张 杰

一九八四年于北京

目 录

1、金属板材紧凑拉伸试样测定 KR 曲线的试验研究	(1)
2、关于用楔型加载法测定 KR 曲线的几个问题	(11)
3、中心裂纹拉伸试样不同 $2a_0/W$ 测定 KR 曲线的试验研究	(18)
4、中心裂纹拉伸试样人工切口和疲劳裂纹对测定 KR 曲线的影响	(23)
5、GC—11钢板的KR 曲线测定	(32)
6、中心裂纹拉伸试样不同 L/W 测定KR 曲线的影响	(38)
7、中心裂纹拉伸试样用目测法和柔度法测定有形裂纹长度的比较	(45)
8、用紧凑拉伸与楔型加载试样所测薄板 KR 曲线的有效性分析	(51)
9、CLWL试样的无量纲应力强度因子和柔度	(59)
10、R 曲线试验数据的统计处理	(67)
11、金属板材 KR 曲线试验方法适应性试验分析	(76)
12、用CCT、CS、CLWL试样所测KR 曲线的比较	(86)
13、LY12CZ薄板铝材裂纹扩展阻力曲线的实验研究	(97)

摘 要 目 录

1、紧凑拉伸试样测定LC9CS薄板KR曲线	(108)
2、LY12CZ 紧凑拉伸试样测定 KR 曲线的试验总结	(108)
3、紧凑拉伸试样的柔度标定及曲线拟合方法	(109)
4、GC—11钢板KR _J 曲线的试验研究	(109)
5、30CrMnSiA CCT试样KR曲线试验总结	(110)
6、中心裂纹拉伸试样几何相关性的试验研究	(110)
7、加载速率对金属板材 KR 曲线的影响	(111)
8、LY12CZ 铝合金板 KR 曲线的试验研究	(111)
9、30CrMnSiA紧凑拉伸试样KR曲线试验总结	(112)
10、钛合金板 KR 曲线试验研究	(112)
11、测定金属材料 KR 曲线用插入式位移计的制造、标定及使用	(113)
12、楔型加载试验用位移计的标定分析	(113)
13、位移计的研制及在 KR 曲线测试中的应用	(114)
14、高强度铝合金薄板K _c 值和KR曲线的测试及其在飞机设计选材中的应用	(114)

附 录

金属板材KR曲线试验方法	HB5261—83	(115)
--------------	-----------------	-------

金属板材紧凑拉伸试样测定 K_R 曲线的

试 验 研 究

杨永安 蔡春玲 王蕊华

一、引 言

飞机机身、机翼等薄壁板劲构件，大多采用板材或型材。它们多数处于平面应力或近似平面应力状态下承受载荷。因此，研究这些构件的许用临界裂纹尺寸、剩余疲劳寿命和剩余强度是十分重要的问题。

国外早期的工作局限于材料的临界应力强度因子 K_{Ic} 值，主要用以进行疲劳寿命估算及蒙皮破坏应力的计算。近几年来开始着眼于裂纹扩展的全过程，即裂纹扩展阻力 K_R 与经过塑性区修正的等效裂纹长度 Δa 的函数关系。材料的 K_R 曲线与构件裂纹扩展力曲线相结合，可以直接确定构件失稳断裂条件，即构件的断裂韧性 K_{Ic} 值。这对破损安全设计是十分重要的。如图 1 所示

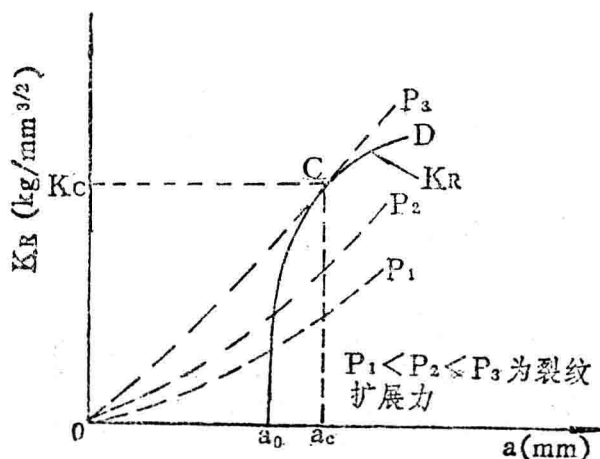


图 1、 K_R 曲线应用示意图

K_R 曲线还可以用来评定材料质量。它与材料厚度、温度及应变率有关。可以认为在一定范围内与初始裂纹长度 a_0 无关，所以工程上可以应用。

K_R 曲线的测试方法还是近几年建立起来的，国外早期大多采用大型中心裂纹拉伸试样。

若按有限宽板计算，试样的最小宽度 W 应为 $35r_y$ [$r_y = \frac{1}{2\pi} (\frac{K_{max}}{\sigma_y})^2$]，才能满足线弹性边界条件。试样长度应大于 $1.5W$ 才能近似无限长的理论计算。因此，需要高立柱，大空间

的试验机或专用加载装置。这对试样加工，断裂试验等方面都带来很多困难。特别是碰到故障分析、工艺对比试验等就难以进行。

近几年来，国外发展了薄板紧凑拉伸试样，这种试样除厚度尺寸较薄外，其余尺寸均与标准紧凑拉伸试样相同，所以采用的应力强度因子亦相同。

紧凑拉伸试验的一个突出的优点是在满足有效性判据的条件下，其试样尺寸仅为中心裂纹拉伸试样的12~15%，所以非常省料。由于试样小，便于热处理和试样加工，亦便于利用现有的试验机进行测试。试样形状如图2所示。

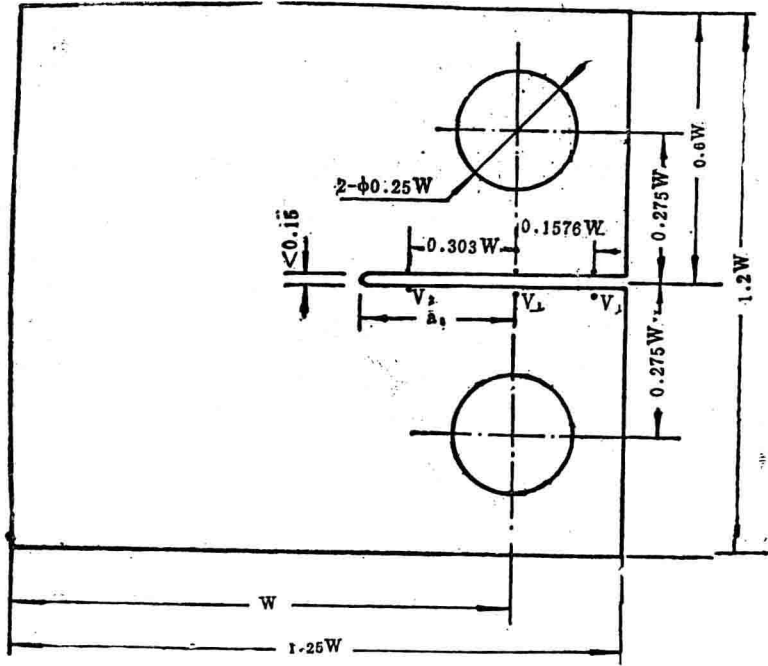


图2 紧凑拉伸试样

为了进行系统的试验研究，选用了高、中强度铝合金板、钛合金板和结构钢板。按照标准试样的比例尺寸（ $W = 65、100、120、150、200、270$ 毫米）加工，如图3所示。

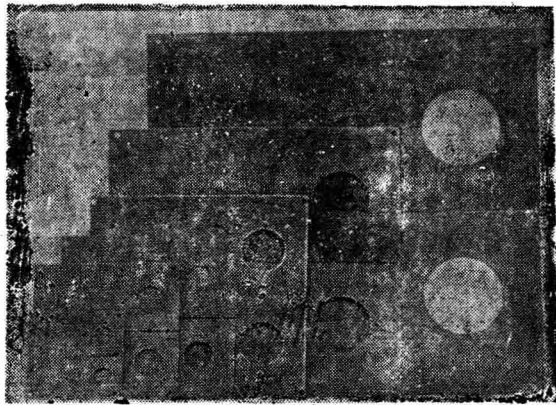


图3 不同尺寸的紧凑拉伸试样

二、板材 K_R 曲线实验

采用几种材料的化学成分及机械性能如表1所示。

表 1

序 号		1	2	3	4
材料牌号		LY12CZ	LC9CS	Ti-6Al-4V	GC-11
材料厚度		1.5 3.0	2.0 5.0	2.0	2.0
炉 批 号			5343		2233
化 学 成 分 %	Mn		Cr	Al	Mn
	0.30~0.90		0.25	6.1~6.2	1.6~1.9
	Cu		Cu	V	Si
	3.8~4.9		1.20	4.0~3.96	≤0.30
	Mg		Mg	Fe	Cr
	1.2~1.8		2.88	<0.078	1.0~1.3
	Fe		Zn	Si	Ni
	<0.50		5.41	<0.04	0.3
	Si			C	C
	<0.50			<0.002	0.16~0.21
机 械 性 能	E kg/mm ²	6700 6800	6800	10400	20300
	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	35.3 38.0	49.0	97.0	114.5
	σ_b kg/mm ²	48.0 49.0	54.9	110	136.2
	δ_5 %	19		11.4	16.25
	δ_{10} %	16	13.2		

试验均在 Instron1251 伺服液压万能材料试验机上进行。试样装入专用防屈曲装置后，在试样裂纹及其延长线特定的 V_1 、 V_L 、 V_2 位置上（ $\phi 6.0$ 孔中）按装插入式引伸计，以便测定裂纹张开位移。通过对试样的缓慢加载，就可以在X—Y记录仪上画出载荷与位移曲线，即P—2V曲线，如图所示。

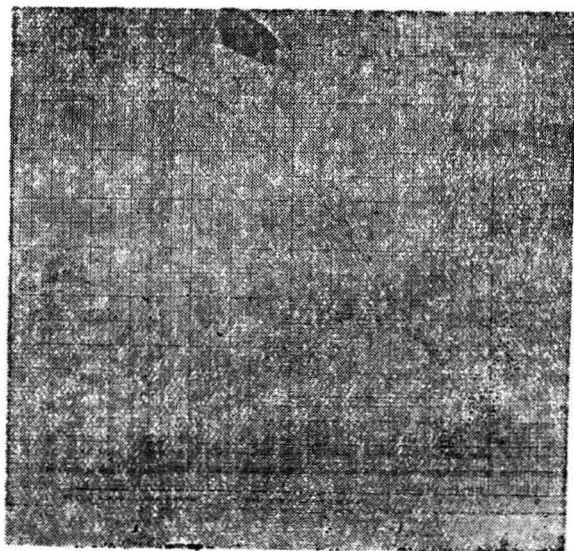


图 4、 GC—11钢P—2V曲线

由上述P—2V曲线取相应的（ P_i 、 Δa_i ）试验数据点，如图 5 所示。

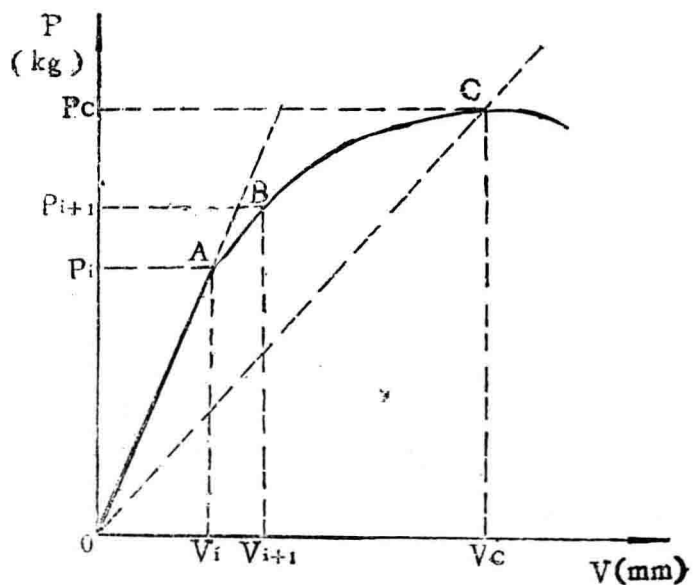


图 5、 P—2V曲线上取数据点

KRi按下式计算:

$$KRi = (Pi/BW^{1/2}) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$\text{式中 } f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.866 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) + 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$$

式中a为有效裂纹长度ae

当得到KRi— Δa_i 数据点后,就可以在直角坐标纸上画出KRi— Δa_i 散点图。作为例子图5中示出了LY12CZ铝合金板B=3.0毫米、W=270毫米, $\frac{a}{W} = 0.30、0.40、0.50$ 三种裂纹长度的散点图。

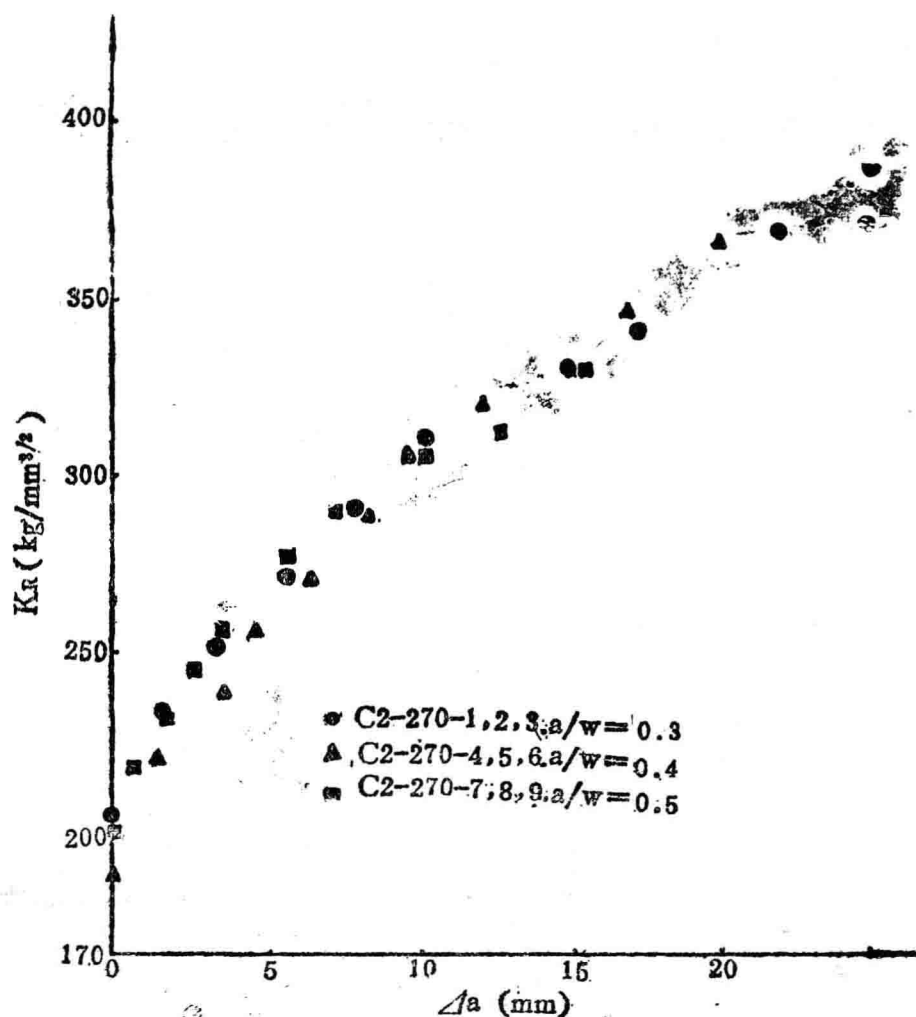


图 6、 LY12CZ KR— Δa 散点图

三、紧凑拉伸试验中的几个关键问题

(1) 关于防屈曲装置

由于板材很薄，试样受载时，将产生严重的屈曲。因此扰乱裂纹尖端应力—应变场。同时使裂纹张开位移无法测量。为消除屈曲的影响，我们设计了一套整体形的防屈曲板，将试样夹在中间，如图7所示。

防屈曲板周围用螺钉拧住，并在盖板上开有观察裂纹和安装探头引伸计的窗口，以便测量位移和观察裂纹扩展情况。通常，要求试样与防屈曲夹具之间的磨擦最小。但实际上难以检查。我们采用反复几次局部加载和局部卸载的办法，观察加载斜率与卸载斜率是否重合，然后通过周围螺钉松紧的调节，使其相对误差小于2%，则认为防屈曲情况良好，如图8所示。

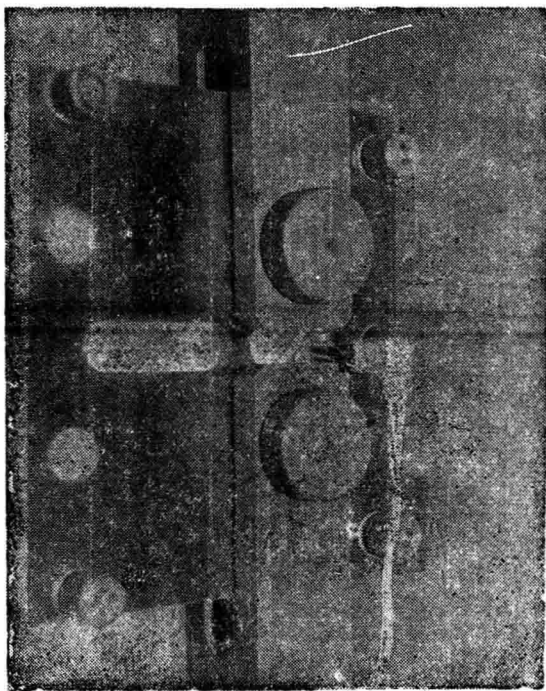


图7、 防屈曲板

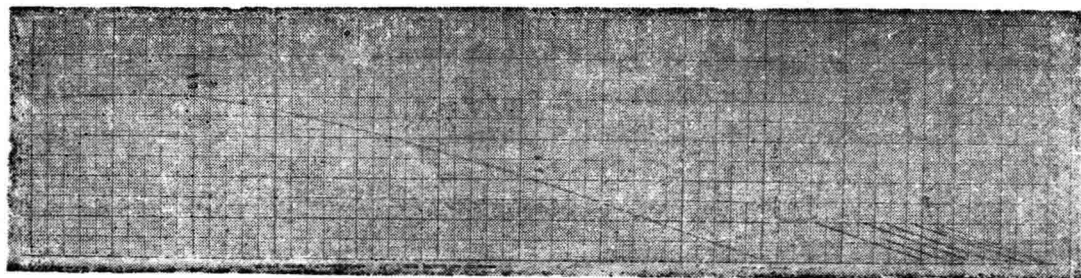


图8、 防屈曲探测

(2) 关于柔度标定

柔度法是目前KR曲线试验中广泛采用的方法，柔度曲线可以采用表达式计算得到，也可用边界配位法、有限元素法以及实验标定求得。我们选择了钢、铝、钛不同厚度的板

材，加工成不同宽度的比例试样。裂纹长度与试样宽度比为0.30、0.40、0.50、0.60、0.70，裂纹用钼丝切割制成。在试样的 V_1 、 V_L 、 V_2 三个位置上，钻上 $\phi 6.0$ 的小孔，以便安装插入式探头位移计，测量裂纹张开位移。试样在试验机上安装好后，应限制在弹性范围内反复加载多次。并用 X-Y 记录仪记录 P-V 曲线。图 9 为 GC-11 钢板 CS 试样（ $B = 2.0$ 毫米， $W = 150$ 毫米）在试样 V_1 、 V_L 、 V_2 三个位置上的 P-V 曲线、

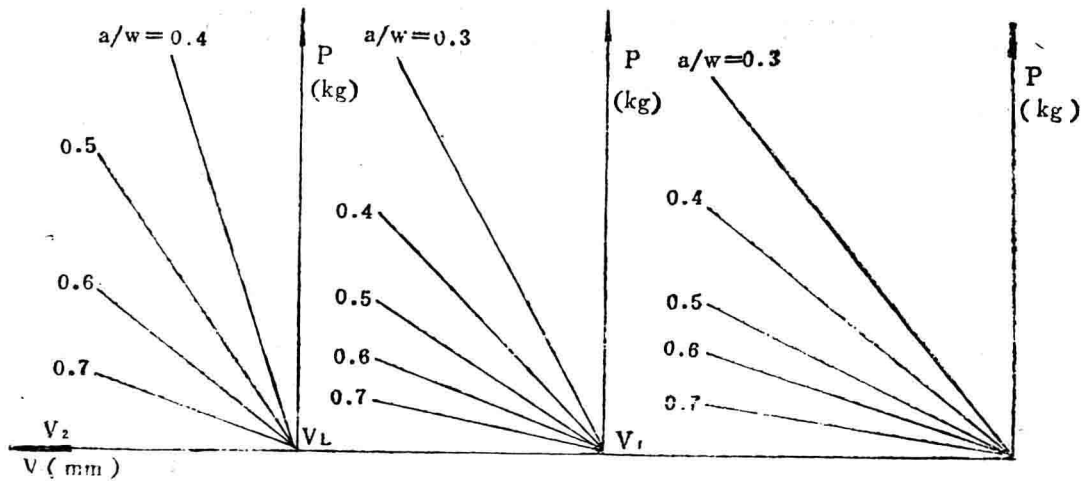


图 9、 紧凑拉伸试样不同测量位置上的 P-V 曲线

以上曲线经过计算，不同位置的柔度值列于表 2。

表 2

$\frac{E2V}{\sigma W}$ a/W V	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
V_1	20.51	30.95	49.49	79.61	150.48
V_L	—	22.97	27.57	62.01	115.83
V_2	—	8.04	17.46	33.23	72.58

以上柔度值在直角坐标上呈现二次曲线。因此，需采用多元线性回归拟合。但因其计算量随着自变量个数增加而增加，而且由于回归系数间存在相关性，以至剔除一个自变量后，还必须重新计算，所以计算相当复杂。由于我们采用的 X 自变量是等步长递增的，因此可以采用正交多项式通过查正交表进行计算比较方便。通常自变量 $X = \frac{a}{W}$ 取四次方精度已足够，即可采用如下表达式：

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \left(\frac{a}{W} \right) + b_2 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + b_3 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + b_4 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

将表 2 中的 V_1 、 V_L 、 V_2 三个位置的柔度值进行拟合后，其方程为：

$$\hat{y}_{V_1} = 353.981 - 3264.71\left(\frac{a}{W}\right) + 11452.5\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 17283.07\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 9984\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

$$\hat{y}_{V_L} = -1011.676 + 8873.258\left(\frac{a}{W}\right) - 27663.3\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 36743.333\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 17191.66\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

$$\hat{y}_{V_2} = -310.7406 + 1933.4838\left(\frac{a}{W}\right) - 3990\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2871.667\left(\frac{a}{W}\right)^3$$

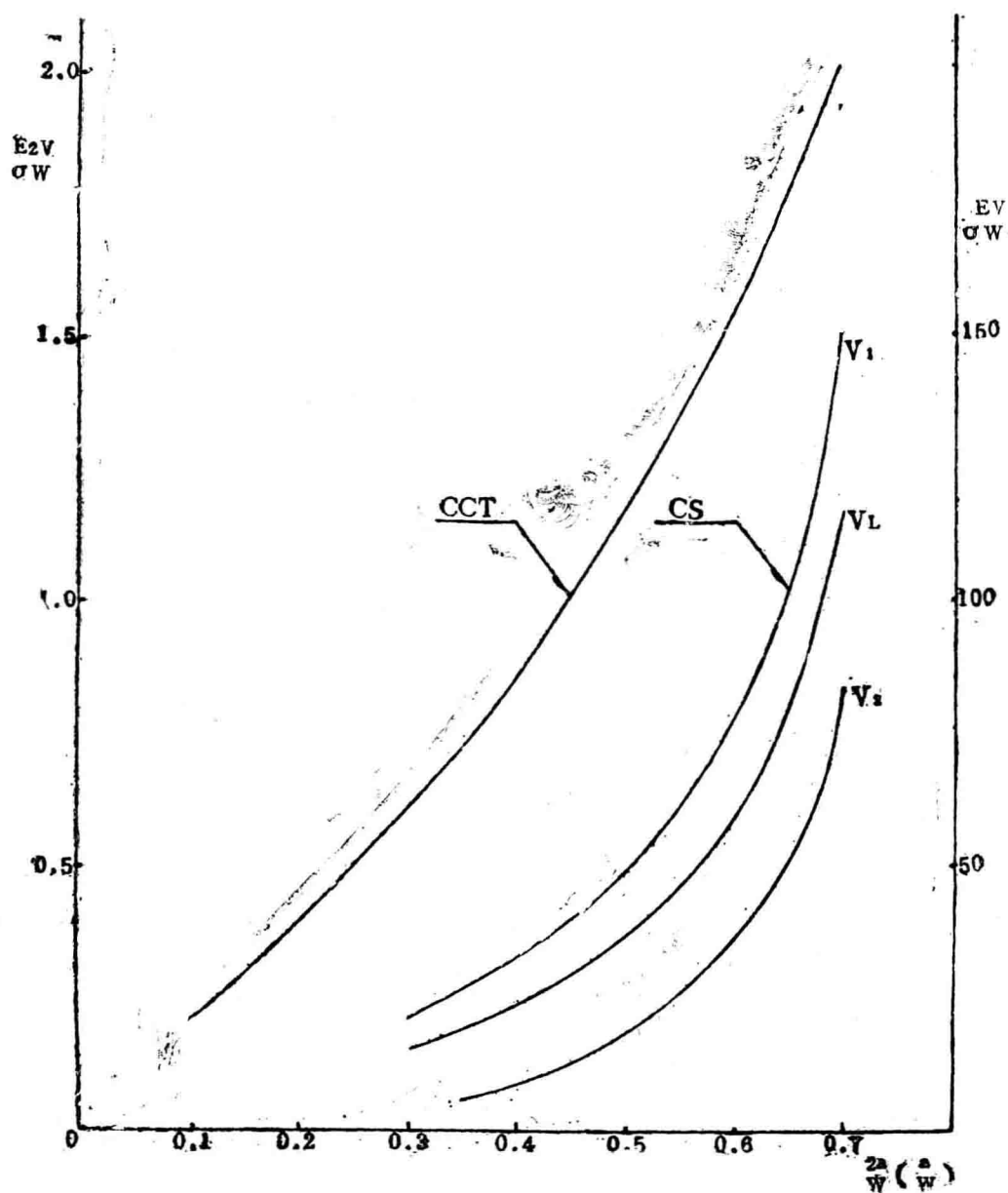


图10、 不同测量位置上的柔度标定曲线

以上方程的拟合值,与国外资料[2]相比,相差在2%以内。柔度标定曲线如图10所示。

(3) 关于最小试样宽度的确定

紧凑拉伸试样在工作宽度 W 是基本尺寸,这个尺寸一确定,试样的各部分尺寸均按 W 尺寸比例变化。所以确定允许的最小宽度是一个极重要的问题。在ASTME561“R曲线测定方法”中规定:紧凑拉伸试样的有效性判据为试样失效时试样的剩余未裂韧带至少为 $\frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2$ 。这相当于塑性区修正量的8倍,即 $8r_y$ 。对特定条件下材料的 $\left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2$ 是一定的,试样的初始裂纹长度 $a_0 = 0.30 \sim 0.70W$ 之间变化,如取上限,可以减小试样尺寸。试样宽度应为:

$W_{min} = (0.30 \sim 0.70) W_{min} - r_y + 8r_y = (8 \sim 20)r_y + 7r_y$, 试样宽度可以有一个较大范围的变化,如表3所示。

表 3

a/W	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70
W_{min}	15 r_y	16 r_y	18 r_y	19 r_y	21 r_y	23 r_y	26 r_y

(4) 关于KR曲线为 Δa 的函数而与 a_0 无关性

KR曲线是描述裂纹承受外载时,处于稳定扩展阶段的韧性记录。它取决于试样厚度、温度和应变率。

Krafft等人曾提出,R曲线是 Δa 的函数,而与初始裂纹长度 a_0 无关。同时又认为,临界裂纹长度 a_c 近似地与 a_0 成正比关系:

$$a_c = \alpha a_0$$

我们取了三组LY12CZ($B=3.0$ 、 $W=270$ 毫米)铝板初始裂纹长度 $a_0 = 0.30W$ 、 $0.40W$ 、 $0.50W$,其中试验数据点如图6。

将三组数据进行了统计分析,拟合成一条KR曲线方程:

$$KR = e^{4.943} (\Delta a + 2.5)^{0.305}$$

四、初步结论

(1) 通过四种合金板二百多个试样的各种因素的试验研究,证明了紧凑拉伸试样能够测定出良好的KR曲线。不但掌握了这种试样的试验方法,而且比较详细地摸清了这种试样的主要影响因素。

(2) 采用自行设计的整体型防屈曲装置,能较好地防止薄板试样加载时产生屈曲。通过大量试验取得了一批有效的KR曲线。

(3) 紧凑拉伸试样由于所需试样尺寸小,可以省原材料。而且在热处理、试样加工及测试等方面非常方便。

(4) 紧凑拉伸试样目前国内使用单位还不多,尚有一些问题需要深入研究。如防屈曲磨擦问题等。

参 考 文 献

- 〔1〕 J.C.Newman Crack - opening displacement in Centre - Crack Compact and Crack - line Wedgeloaded specimen NASA TND8268 July 1976.
- 〔2〕 D.E McCabe and G.T sha compliance calibration of specimen used in the R-curve practice. ASTM STP463
- 〔8〕 D.Brock《工程断裂力学基础》王克仁译。
- 〔4〕 高金华、刘文琰, R曲线试验数据的统计处理。
北京航空学院 科学报告HB816 1982
- 〔5〕 ASTM, E561 standard practice for R-curve Determination 1981 part -10
- 〔9〕 杨永安等紧凑拉伸试样柔度标定及曲线拟合方法。
北京航空材料研究所 YG9—38—9 1982

关于用楔形加载法测 K_R 曲线的几个问题

西北工业大学 张剑英 卢智先

国营燎原机械厂 顾洪根

一、引言

用载荷控制（例如中心裂纹拉伸或紧凑拉伸）试验法测定 $K_R-\Delta a$ 曲线，裂纹驱动力 K 随裂纹扩展量 Δa 的增加而递升。当 K 曲线与 K_R 曲线相切时，裂纹失稳扩展，据此确定了试样的临界条件，但测不到 K_c 以上的 K_R 曲线段（图1）。

裂纹线楔形加载（CLWL）试验法，则是用楔铁通过弓形块（图2）施加一定量的位移 V 。这样，裂纹一经扩展，在位移控制条件下，试样受力逐渐减小，使 K 值降低，即 $K_R-\Delta a$ 曲线具有负斜率。由于 K 曲线与 K_R 曲线只相交而不相切，因此没有失稳现象，能够画出较完整的 K_R 曲线。

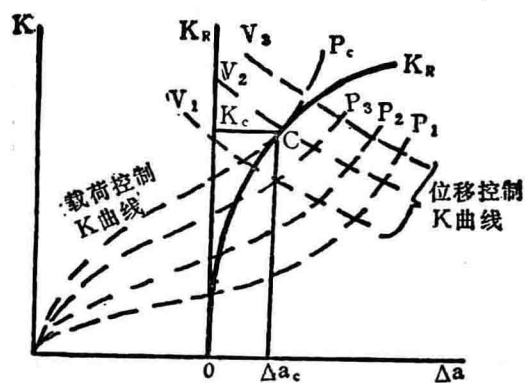


图 1

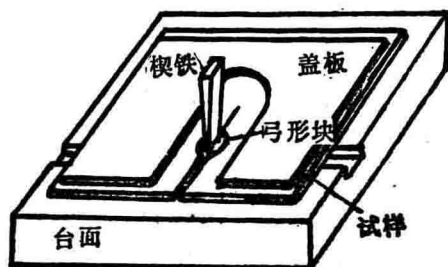


图 2

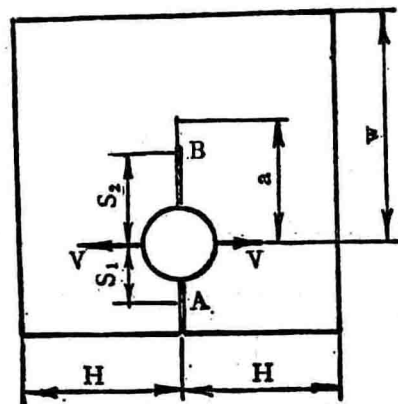


图 3

二、双柔度法

单边裂纹试样的KR 计算式为〔1〕

$$KR = \frac{P}{BW^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{3/2}} [0.886 + 4.64\frac{a}{W} - 13.32(\frac{a}{W})^2 + 14.72(\frac{a}{W})^3 - 5.6(\frac{a}{W})^4] \quad (2)$$

其中B、W为试样厚度及宽度，a为裂纹长度，P为试样所受载荷。由于CLWL试样在加载孔处承受的是受控位移，因此弓形块和试样间的力P不能直接测定，从而不能直接由式(1)计算KR。通常采用双柔度法测定KR及Δa，其原理如下：

在距加载线为 $S_1 = 0.1576W$ 和 $S_2 = 0.303W$ 处测量裂纹张开量，分别表以 $2V_1$ 和 $2V_2$ ，则对应的无量纲柔度及其比值为：

$$EB2V_1/P = f_1\left(\frac{a}{W}\right) = 101.9 - 948.9\left(\frac{a}{W}\right) + 3691.5\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 6064\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 4054\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (3)$$

$$EB2V_2/P = f_2\left(\frac{a}{W}\right) = 6.48 - 198.7\left(\frac{a}{W}\right) + 1117\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2207.5\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1712.5\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (4)$$

$$2V_1/2V_2 = \frac{f_1(a/W)}{f_2(a/W)} = F_1(a/W) \quad (5)$$

式中E为弹性模量。又由式(1)、(3)可得：

$$KR = \frac{P}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{E2V_1}{W^{1/2}} \cdot \frac{f(a/W)}{f_1(a/W)} = \frac{E2V_1}{W^{1/2}} \cdot F_2\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

实验中只要测出若干组 $2V_1$ 和 $2V_2$ 值，或直接绘出 $2V_1-2V_2$ 曲线（见图4），以曲线上得到若干组 $(2V_1, 2V_2)$ 值，对每组 $(2V_1, 2V_2)$ 经式(5)求得 a/W ，从而算得Δa，并通过(6)式求出KR值。由若干组(KR, Δa)值便可绘KR—Δa曲线。

双柔度法实验测得的柔度值包括有屈服区的影响，因此用上述程序做出的是KR—Δa_e曲线，a_e表示等效裂纹长度，若用 $2V_2-2V_1$ 的卸载曲线斜率代入式(5)，则可得到真实裂纹长度a_p，并可进一步画出KR—Δa_p曲线。

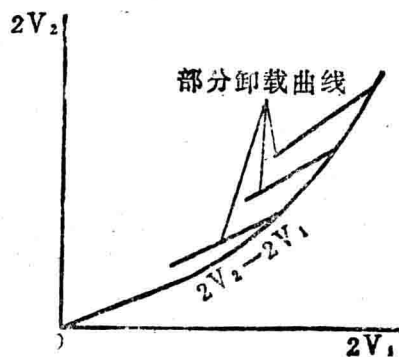


图4