

铝合金薄板表面裂纹弹塑性 断裂测试中的两个实验技术

王 亨 解全升 周镜昆

近几年,我们开展了LD10cs 铝合金贮箱表面裂纹弹塑性断裂课题的实验研究。为了得到满意的实验结果,在测试技术上做了一些探讨。本文着重介绍两个实验技术:

1. 采用夹具代替粘接刀口,配合弓形位移传感器自动绘制 $P-V$ 曲线,不但结构简单、使用方便;更为可取的是,由于标距的缩小,提高了 $P-V$ 曲线的质量。

2. 具有很深表面裂纹的贮箱,受载时,容器往往产生先“泄漏”后“断裂”的情况。因此,准确地测定泄漏载荷并研究泄漏发生的条件,是很重要的。在国外对平板试件有的采用压力密封罩的方法测定泄漏载荷,其测试方法较为复杂,在实际结构上应用也是比较困难的。我们将电阻丝片作为敏感元件,配合简单的开关线路测定泄漏载荷,较好地解决了这个问题。

我们认为,上述两个实验技术,对于其它金属薄板也适用,具有参考价值。

一、U字形弹性夹及 $P-V$ 曲线

前表面裂纹中心处,裂纹嘴张开量 V 随载荷 P 变化的关系曲线,称为 $P-V$ 曲线。

当前,国内多采用粘接刀口夹持位移引伸计,由于附加刀口标距大,所测 V 值含有较大成份的基本金属伸长量;且经过复杂的传递路径,用来描述裂纹嘴张开量微小的变化也是有困难的。

我们采用既简单又方便的夹具—U字形弹性夹(以下简称U弹夹),代替了粘接刀口,其标距在3mm左右,改善了上述存在的问题,提高了 $P-V$ 曲线的质量。

1. U弹夹的结构及其使用

U弹夹由富有弹性的U形件、偏头尖螺钉及固紧螺栓组成(见图1)。

U形件是用厚2mm、宽8~10mm的钛合金板(或弹簧钢板)弯制成的“U”字形的弹性体,其尺寸 A 要比试件厚度大3mm左右,尺寸 B 视试件宽度而定。在U形件中间部位及开口端处,有M3的螺孔,分别用来旋入两个偏头尖螺钉和一个固紧螺栓。

旋紧固紧螺栓,使U形件上的两个偏头尖螺钉压紧在试件表面上,这样整个U弹夹便夹持在试件上了。U弹夹成对使用,裂纹面上、下两侧各夹一个,且使偏头螺钉的钉

尖位于裂纹中心处；两个U弹夹不能靠紧，须留0.2~0.5mm的间隙；两个U弹夹是各自独立的，试件拉断后便自行分开。

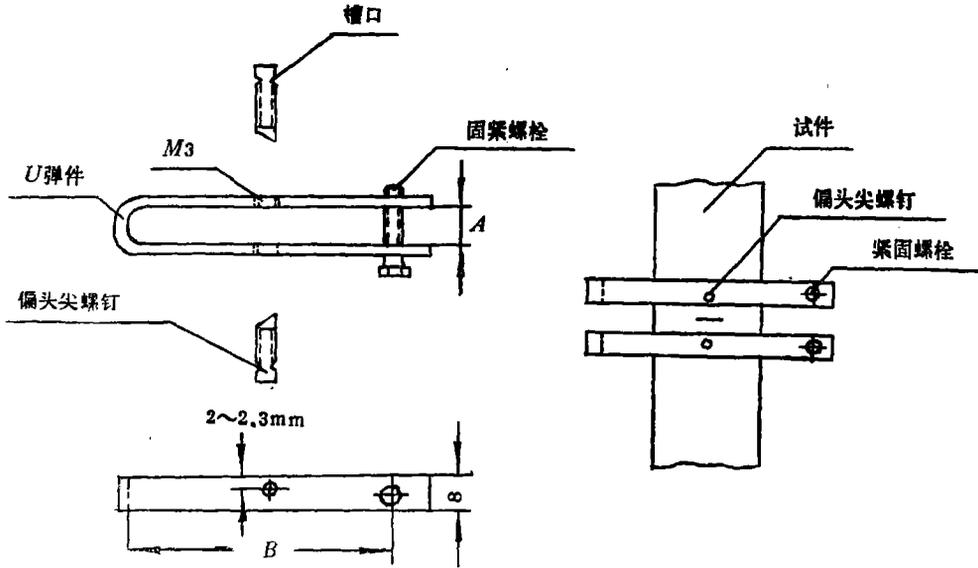


图 1. U弹夹及夹持示意图

U形件上旋入偏头尖螺钉的螺孔，其中心至U形件边缘为2~2.3mm，并采用偏头尖螺钉等，其目的均为使钉尖尽量靠近裂纹面，从而减小标距。这样位于裂纹面上、下两侧的U弹夹上的偏头螺钉的钉尖距离（即标距），约为3mm左右。

偏头螺钉上的槽口是夹持位移传感器刀口的部位。一对U弹夹上使用的四个偏头尖螺钉须一致，特别是槽口至钉尖的距离要一样。经过反复使用钉尖变钝时，可用什锦锉修磨。

2. U弹夹的位移分析

分析的目的在于找出偏头尖螺钉上的槽口（即位移传感器刀口）位移量 ΔL 与裂纹嘴张开量 V 的关系。

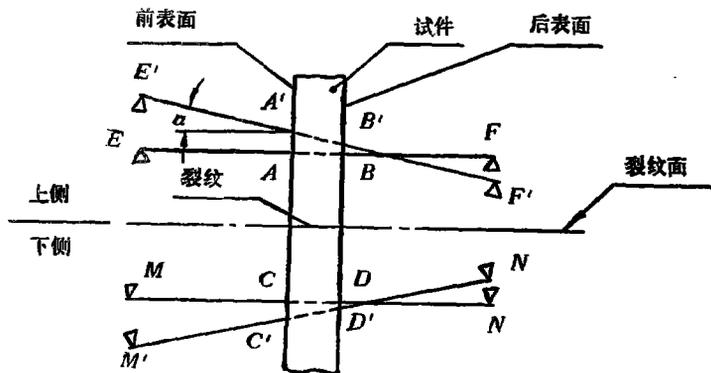


图 2. U弹夹位移分析示意图

将一对U弹夹分别夹持在试件裂纹面上、下两侧，四个偏头螺钉的钉尖分别压在A、B、C、D处，相应的槽口位置在E、F、M、N处。E、M与F、N组成两对槽口，用来夹持一对弓形位移传感器(见图2)。

受载时，由于前表面裂纹的张开及背表面基本金属的变形，钉尖A、B、C、D分别移到A'、B'、C'、D'处(由于偏头螺钉压紧在试件上，钉尖并不在试件上滑动)。因在3mm标距内，背表面变形量远小于前表面裂纹嘴的张开量，视为刚性体的U弹夹偏转 α 角，槽口位置分别移至E'、F'、M'、N'处。

可见，试件前后两对槽口的总位移量：

$$\begin{aligned} \Delta L &= EE' + MM' + EF' + NN' \\ &= 2(AA' + A'E' \sin \alpha) + 2(BB' - B'F' \sin \alpha) \end{aligned}$$

裂纹嘴张开量 $V = 2AA'$ ；令 $\Delta l = 2BB'$ ；又因 $A'E' = B'F'$ ；则有

$$\Delta L = V + \Delta l$$

即试件前后二对槽口总位移量，为裂纹嘴张开量 V 与背表面标距内金属变形量 Δl 之和。

3. 配用的弓形位移传感器及P-V曲线绘制

由上面的位移分析可知，要消除U弹夹偏转时的影响，就须用一对传感器。我们采用本室研制的弓形位移传感器(见图3)。

每个弓形传感器弹性片的内外侧，各贴有一个电阻应变片，构成一个半桥；两个弓形传感器为一对，组成全桥。这种传感器灵敏度高、线性好、工作稳定、夹持力小(约为0.5kg)，一对传感器重量为44g。

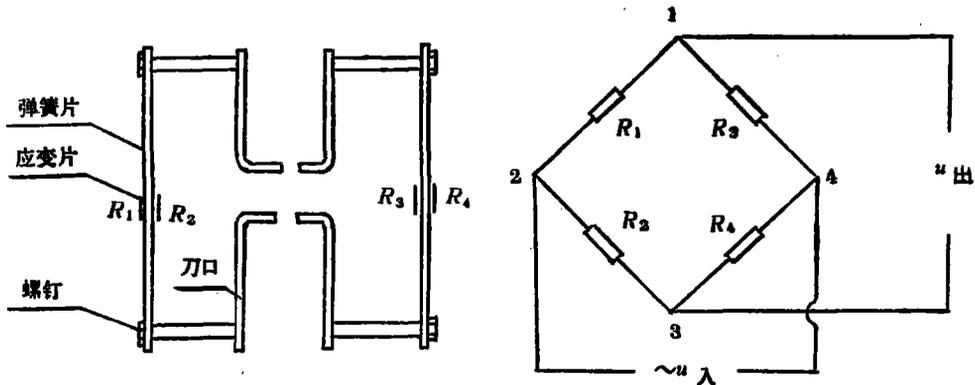


图 3. 弓形位移传感器

将一对弓形传感器夹持在U弹夹偏头螺钉的槽口内，受载时，其位移信号及试验机上的载荷传感器信号，经过动态应变仪放大，输送给函数记录仪，就可自动绘制出P-V曲线。

实验前，对位移及载荷传感器要进行仔细的标定。位移标定值代表一对刀口位移量之和，因此，要注意标定器的给定值与刀口位移量之间的相应关系。

4. 不同方法V的测量值比较及修正

对裂纹嘴张开量 V 的测量，我们在多根不同的试件上，同时对用工具显微镜、U弹

夹法、附加刀口法进行了考核比较。 U 弹夹法不但使用方便,而且测量的准确度也比附加刀口法好。表1给出了在同一根试件上,用不同方法测得的 V 值。

不同方法测得 V 值的比较

表 1

方法	载荷						备注	
	$V \cdot 10^{-2}$ mm	kg	0	1500	3000	4500		标距 mm
工具显微镜	0		0	2.0	4.5	7.0	/	
U 弹夹法 I	0		0	2.1	4.5	7.1	3	近似扣除了背表面变形量
U 弹夹法 II	0		0	2.3	4.9	7.7	3	包含标距内背表面变形量
附加刀口法	0		0	3.0	6.1	9.3	12	

如果我们用工具显微镜的测量值(有读数误差)作为比较标准,可见 U 弹夹法优于附加刀口法。 U 弹夹法 II是把一对刀口位移量之和(包括背表面标距内金属变形量)当作裂纹嘴张开量 V 。尽管如此,所得结果仍相当满意,我们认为比粘接刀口法更能满足工程上的需要。若想得到更满意的结果建议用经过近似修正的 U 弹夹法 I。该方法也比较简单,即在一组相近的试件中拿出一根试件为代表,用其它方法(如基距为3mm的应变片)测出这根试件的应力与裂纹背表面标距内金属变形量的关系曲线,并将曲线做近似的线性处理,得到了应力与背表面标距内金属变形量的线性关系。于是,这组试件均可按此线性关系,将背表面标距内金属变形量近似地扣除掉(可在位移标定值中予以修正)。

二、泄漏(穿透)载荷的测试方法

当表面裂纹尺寸足够大时,有些试件在失稳断裂前,表面裂纹稳定扩展达到背表面而泄漏(穿透)。确定泄漏载荷 P_x 并研究其泄漏条件,对薄壁容器来说是很重要的。

国外通常是采用在平板试件前后表面装夹压力密封罩的办法测 P_x ;前罩内充压且装有测裂纹嘴张开量的传感器,后罩还附有相应的测量装置,可见,这套装置的结构和使用都较复杂,在实际结构上加以应用也是比较困难的。

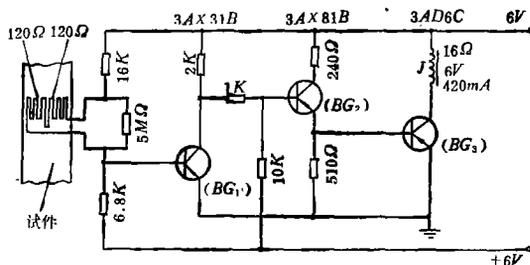


图 4. 自动停机装置线路图

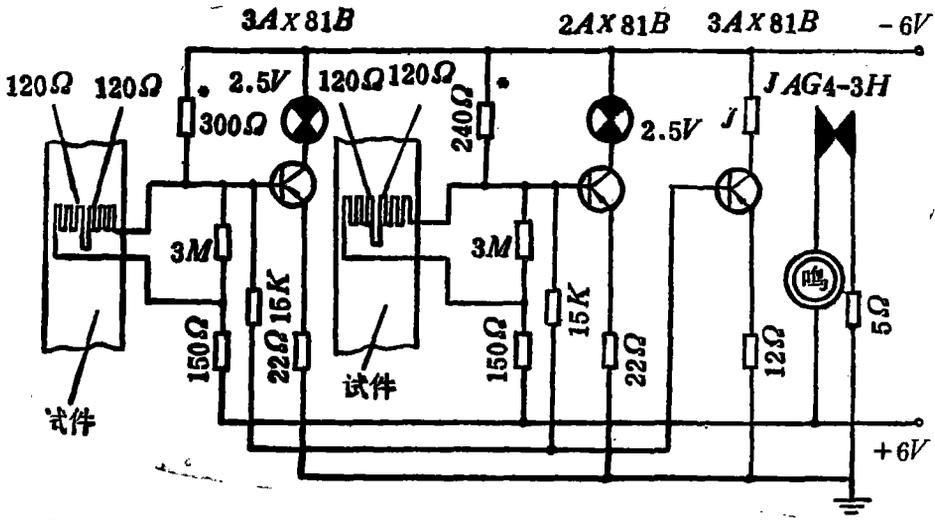


图 5. 动报警显示装置线路图 (二路)

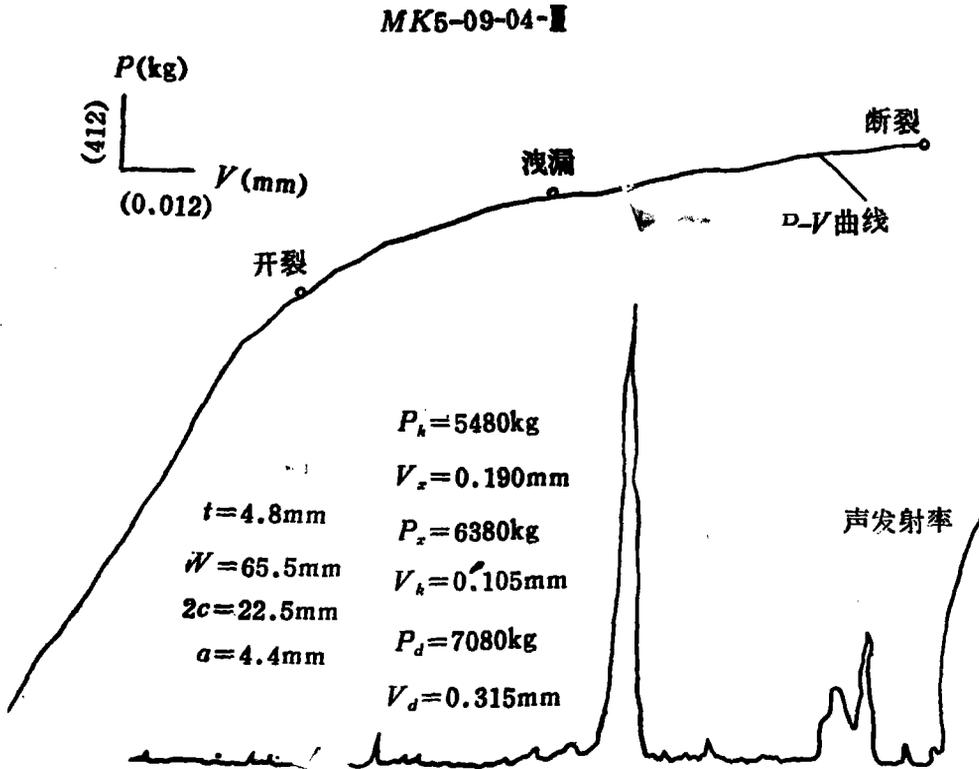


图 6.

我们将电阻丝片作为敏感元件,贴在裂纹的背表面处,配以简单的开关线路测 P_x ,较好地解决了上述问题。自动加载时,配以自动停机装置(见图4);手摇加载时,配以自动报警显示装置(见图5)。它们的工作原理是:当泄漏发生时,形成的穿透裂纹将贴在背表面上的电阻丝拉断,使电路的工作状态改变,继电器触点位置变动:断开试验机马达的供电,从而实现自动停机,或者自动报警显示。

载荷值 P_x 可直接从读数盘上获得。为避免误读,我们是在 $P-V$ 曲线上得到 P_x 值的。发生泄漏(电阻丝被拉断)的瞬间,裂纹嘴张开量也突然加大,因而在 $P-V$ 曲线上出现一个很明显的平台(见图6),此平台对应的载荷就是 P_x 。

要保证这种方法能可靠的工作,应该满足两个条件:

首先,在泄漏时能可靠地将电阻丝拉断。我们测得一般纸基电阻应变片,当裂纹嘴张开量为 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 时,就可以将电阻丝拉断。在泄漏载荷作用下,我们又测得刚刚形成的穿透裂纹,在背表面中心处裂纹嘴张开量不小于 0.04mm 。泄漏的瞬间往往伴随着清脆的响声,背表面被撕开实际上是一个动态过程,这就更有利于把电阻丝拉断。对LD10cs板材,裂纹背表面贴上纸基电阻应变片,当泄漏发生时,在我们的实践中还没有发现电阻丝未被拉断的情况。

需要说明的是,为避开裂纹背表面中心处 U 弹夹上的偏头螺钉钉尖,我们把两个电阻丝片贴于钉尖的两侧,并将电阻丝串联起来。两电阻丝片上邻近的电阻丝相距约为 1mm 。从我们实测的结果来看,泄漏时背表面的裂纹长度约为板厚的 $2\sim 3$ 倍,或约为前表面裂纹长度的三分之一。因此,泄漏时背表面裂纹长度远远大于 1mm ,这样贴电阻丝片仍能保证可靠地工作。

要保证可靠的工作,还需满足一个条件,即在泄漏前出现很大的塑坑时,电阻丝不断。如果选用的电阻丝片不当,这种情况有可能产生。我们在LD10cs铝合金板材测试中,选用基距 $3\times 20\text{mm}$ 的纸基电阻应变片,就没有出现这种现象。根据不同的试件材料,选用或自制相应的电阻丝片,满足此条件是办得到的。

总之,只要满足上述两个条件,就能保证可靠的工作,这在我们的测试工作中已得到了证实。

三、几点看法

1. 断裂形式

对155根试件的实验结果进行分析,我们认为LD10cs薄板表面裂纹的断裂形式可分为三类:

脆断型:失稳断裂前,裂纹无稳定扩展。当初始裂纹深度与试件厚度之比 $a/t < 0.4$,即较浅的裂纹,其断裂形式基本属于此类(见图7a)。

稳定扩展型:失稳断裂前,表面裂纹产生稳定扩展,但未形成穿透裂纹。当 $a/t > 0.5$,即较深的表面裂纹,其断裂形式往往属于这一类(见图7b)。

泄漏型:失稳断裂前,表面裂纹的稳定扩展直达背表面,形成了穿透裂纹。只有当初始裂纹相当深时,才有可能发生这种情况(见图4)。

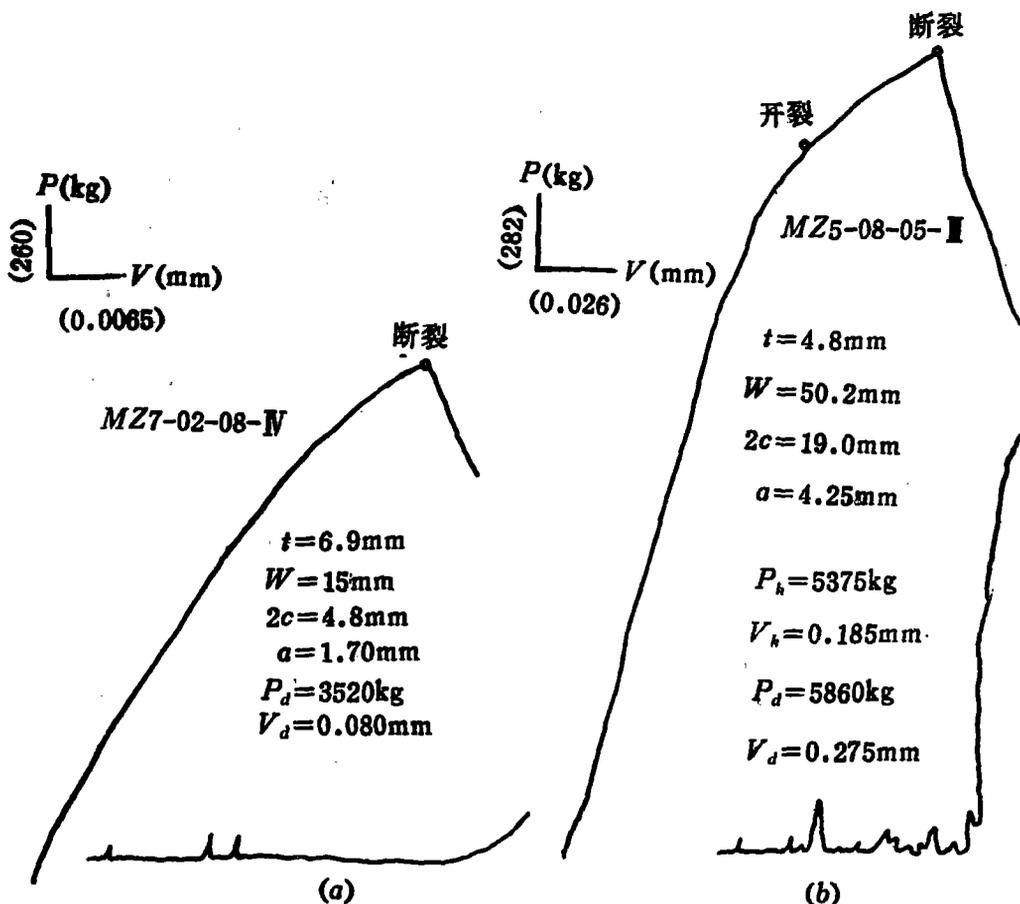


图 7.

2. 稳定扩展的形式

实验结果表明，LD10cs 薄板表面裂纹稳定扩展不是均匀连续进行的，而是若干次“突进”扩展累积的结果。在 $P-V$ 曲线上，体现在多次“平台”的出现。

在某一载荷下，表面裂纹是否有稳定扩展，可通过 $P-V$ 曲线加以判断。若卸载线斜率不变则无稳定扩展；若卸载线斜率下降则有稳定扩展(见图 8)。斜率下降越多，稳定扩展量亦愈大。

3. 影响泄漏的因素

泄漏(穿透)只有当裂纹相当深时才有可能发生。实验结果表明： a/t 越大、 a/c (表面裂纹的短、长半轴比) 越小、试件越薄 (t 小)、试件越宽 (W 大)，越容易产生泄漏(见表 2)。

MK5-08-03-5

曲线斜率数据

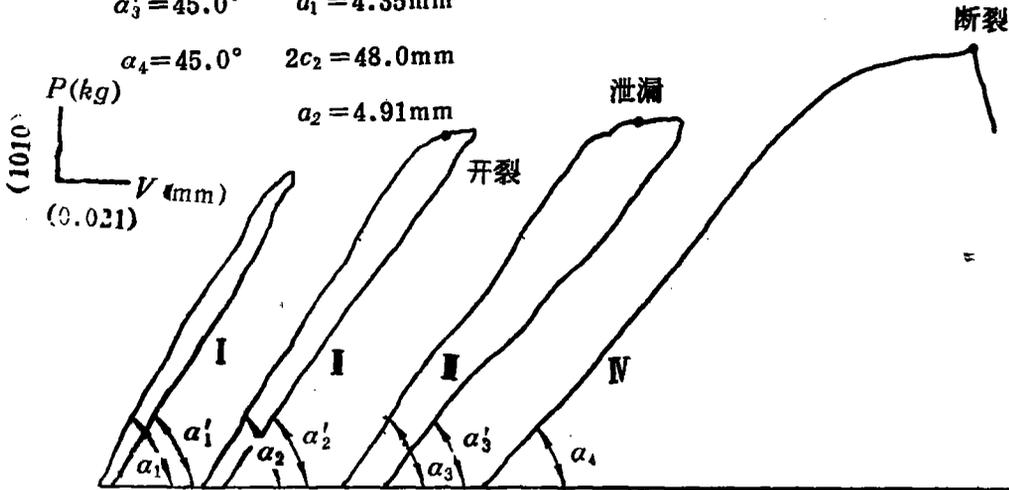
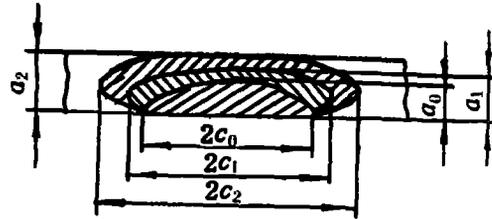
 $\alpha_1 = 60.0^\circ$ $t = 4.91\text{mm}$ $\alpha'_1 = 57.0^\circ$ $W = 134\text{mm}$ $\alpha_2 = 57.0^\circ$ $2c_0 = 40.5\text{mm}$ $\alpha'_2 = 53.5^\circ$ $a_0 = 3.60\text{mm}$ $\alpha_3 = 53.5^\circ$ $2c_1 = 42.5\text{mm}$ $\alpha'_3 = 45.0^\circ$ $a_1 = 4.35\text{mm}$ $\alpha_4 = 45.0^\circ$ $2c_2 = 48.0\text{mm}$ $a_2 = 4.91\text{mm}$ 

图 8. 裂纹扩展时卸载后斜率的变化

影响泄漏的因素及初步结论

表 2

影响因素	比较条件	实验结果	初步结论
a/t	$t=5\text{mm}$ $a/c \approx 0.3$	$a/t < 0.8$ 时无泄漏 $a/t \geq 0.8$ 时一般有泄漏	a/t 大, 易泄漏
a/c	$t=5\text{mm}$ $a/t \approx 0.8$	$a/c \approx 0.8$ 时无泄漏 $a/c \approx 0.3$ 时一般有泄漏	a/c 小, 易泄漏
试件厚度 t	$a/c \approx 0.3$	$t=7\text{mm}$ $a/c \approx 0.8$ 时无泄漏 $t=5\text{mm}$, $a/t \approx 0.8$ 时, 部分试件泄漏 $t=1.5\text{mm}$, $a/t \approx 0.72$ 时, 部分试件泄漏	板薄易泄漏
试件宽度 W	$t=1.5\text{mm}$ $a/t \approx 0.8$ $a/c \approx 0.4$	$W=15\text{mm}$ 时无泄漏 $W=41\text{mm}$ 时, 全部试件泄漏	板越宽越易泄漏

泄漏发生前,背表面有明显的塑坑;泄漏发生瞬间,有时会伴随着清脆的响声;泄漏之后,在试件表面裂纹顶端处呈现“叉形”尾迹线。

4. 利用声发射技术在 $P-V$ 曲线上确定开裂载荷 P_k ,是个很有前途的方法。在我们的实验中,对应于 P_k 的声发射率信号,大部分试件均较明显。由于各种原因,有些试件的声发射率信号不够明显,就难以判断 P_k 。可见,在应用声发射技术时,有些具体技术问题有待进一步完善。

尽管如此,我们测得的开裂载荷 P_k 值,仍有使用或参考价值。

5. 用 U 字形弹性夹夹持弓形位移传感器,将经过标定的载荷信号及位移信号通过动态应变仪送给函数记录仪,便可自动绘制 $P-V$ 曲线。受载过程中,当初始裂纹开裂时,曲线上将出现第一个小平台(或斜率明显改变),同时声发射率信号加大;当形成穿透裂纹而泄漏时,曲线上会出现更大的平台,声发射率信号更强,配用的装置同时实现了自动停机或自动报警显示。总之,与其它技术相配合,在 $P-V$ 曲线上可以得到开裂载荷,泄漏载荷、断裂载荷及相应的裂纹嘴张开量,以及可供分析的断裂过程。

参 考 文 献

- [1] Finger, R.W.: "Analysis and Test of Deep Feaws in Thin Sheets of Aluminum and Titanium" NASA CR-135369 (1976)
- [2] 郑文龙、张占琴:《电阻式弓形变形传感器的设计和精度分析》。国防科技大学学术论文(报告、资料) 81.1015号,1981年3月。
- [3] 宋先邨:《改造旧试验机总结》。国防科技大学学术论文(报告、资料) 81.1016号,1981年3月。
- [4] 七机部七〇三所五室:《用表面裂纹方法研究LD10cs铝合金的断裂特性》。

Two Experimental Fechniques in the Elasto-plasticity Fracture Test of the Surface Crackle of the Aluminium-alloy Sheer

Wang Heng Xie Quan-sheng Zou Jing-kun