

飞机壁板试样疲劳裂纹的 声发射定位和监视

沈阳市电子研究所声发射组

六二一所声发射组

本工作对一种飞机壁板试样疲劳试验中的裂纹进行了声发射定位和监视,以探索飞机某些构件强度试验时用声发射监视结构完整性的可能性。

一、定位的基本原理

假定零件中 x 、 y 位置有一声源释放出声发射弹性波,这一弹性波特定的波模态有一传播速度 C ,那么,在平板零件中波前相当于一个圆向外传播。如图1所示,弹性波首先到达第1号传感器,相继到达第3和第2号传感器。这就是说1、2、3三个传感器接收到同一声发射信号有一个时差(时间差),分别为 Δt_{12} 和 Δt_{13} 。这个时差可用仪器测量出来。如果,我们以第2、3号

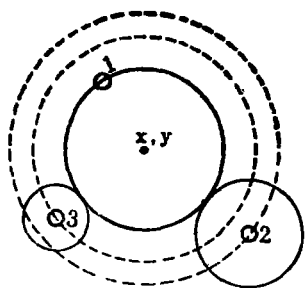


图1 声发射定位原理示意图

传感器为圆心,分别以 $\Delta t_{12} \times C$ 、 $\Delta t_{13} \times C$ 为半径可以画出两个圆。如果再作第三个圆,使其与前面的两个圆相切并经过第1号传感器,那么第三个圆的圆心就是声源的位置。

根据上述原理,只要测得波速和信号到达各传感器的时差,就可以用作图法求出声源位置。这就是声发射源定位的最简单方法。在实际定位处理时,由于声发射的数据量很大,用作图法求声源位置十分麻烦,需要借助于数学工具进行计算更为方便。

二、源定位计算公式

如图2所示, $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ 分别为三个传感器的座标位置,这三个位置在试验前可以测量出来。 x, y 为未知的声源位置。为简化起见,将座标原点取在 x_3, y_3 位置。根据几何关系和测得的声发射波到达各传感器的时差 $\Delta t_{13}, \Delta t_{23}$ 和声速 C ,可以获得以下两个基本公式:

$$\sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} = \Delta t_{13} \times C \dots \dots (1)$$

$$\sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} = \Delta t_{23} \times C \dots \dots (2)$$

转换为极坐标有:

$$x = \rho \cos \varphi$$

$$y = \rho \sin \varphi$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \rho^2$$

代入(1)、(2)式得

$$\rho = \sqrt{(\rho \cos \varphi - x_1)^2 + (\rho \sin \varphi - y_1)^2} = \Delta t_{13} \times C \dots \dots \dots (3)$$

$$\rho = \sqrt{(\rho \cos \varphi - x_2)^2 + (\rho \sin \varphi - y_2)^2} = \Delta t_{23} \times C \dots \dots \dots (4)$$

将(3)、(4)式展开, 并令

$$x_1^2 + y_1^2 = a^2$$

$$x_2^2 + y_2^2 = b^2$$

$$\Delta t_{13}^2 \times C^2 - a^2 = A$$

$$\Delta t_{23}^2 \times C^2 - b^2 = B$$

得

$$A = 2\rho(\Delta t_{13} \times C - x_1 \cos \varphi - y_1 \sin \varphi) \dots \dots \dots (5)$$

$$B = 2\rho(\Delta t_{23} \times C - x_2 \cos \varphi - y_2 \sin \varphi) \dots \dots \dots (6)$$

将(5)、(6)式相比, 两边除以 $\sqrt{(Ax_2 - Bx_1)^2 + (Ay_1 - By_2)^2}$, 并令

$$\sin \theta = \frac{Ax_2 - Bx_1}{\sqrt{(Ax_2 - Bx_1)^2 + (Ay_2 - By_1)^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{Ay_2 - By_1}{\sqrt{(Ax_2 - Bx_1)^2 + (Ay_2 - By_1)^2}}$$

则得

$$\frac{A\Delta t_{23} \times C - B\Delta t_{13} \times C}{\sqrt{(Ax_2 - Bx_1)^2 + (Ay_2 - By_1)^2}} = \sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi = \sin(\theta + \varphi)$$

$$\theta \pm \varphi = \sin^{-1} \frac{A\Delta t_{23} \times C - B\Delta t_{13} \times C}{\sqrt{(Ab)^2 + (Ba)^2 - 2AB(x_1x_2 + y_1y_2)}} \dots \dots \dots (7)$$

从前面得知:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{Ax_1 - Bx_2}{\sqrt{(Ab)^2 + (Ba)^2 - 2AB(x_1x_2 + y_1y_2)}} \dots \dots \dots (8)$$

根据上面的简单演算, 只要测得 Δt_{13} 、 Δt_{23} 和声速 C , 就可以按下列次序求算声源座

标 x 和 y 。先求得 a 、 b 和 A 、 B ，利用(8)式求出 θ ，利用(7)式求 φ ，利用(5)或(6)式求 ρ ，

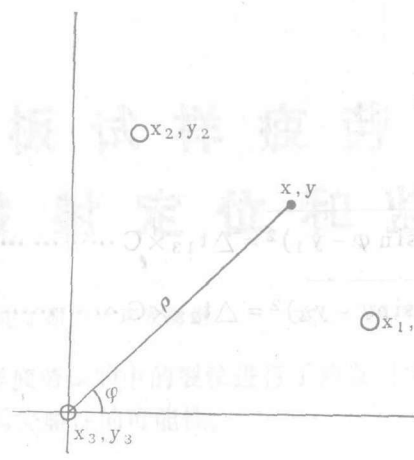


图 2 源定位计算公式说明图

最后就可以算出声源座标 x 和 y 。如将声发射装置配以电子计算机和监视器，就可以在试验过程中实时显示声源位置。

三、实验及定位结果

实验采用的试样如图 3 所示，共有两种，一种是LY12CZ铝平板，尺寸为900×300×4毫米；另一种是LY12CZ加筋板，其尺寸为900×300×3毫米，试样一面铆接五根 Z 型加筋条。试样中心均有 12.5 毫米长的线切割槽。试验机采用 AMSLER 立式疲劳试验机。试样与加载夹具用螺钉夹

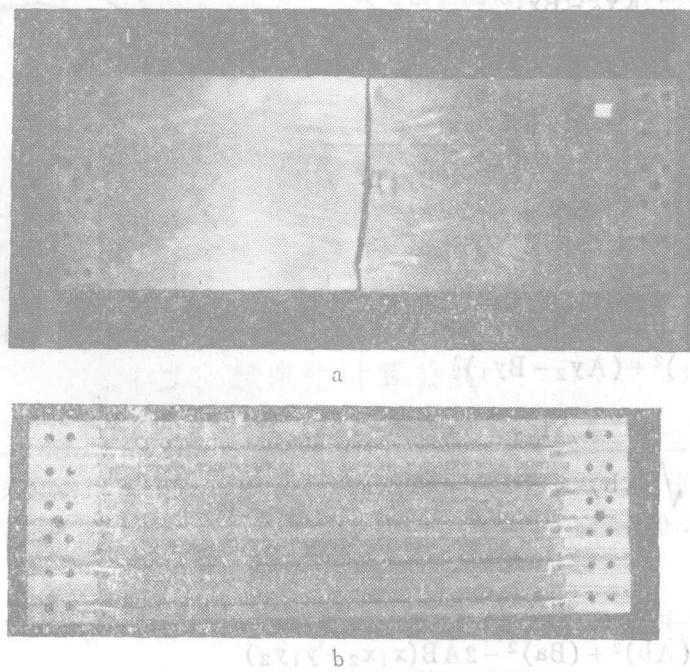


图 3 实验用的试样 a—平板试样； b—z型加筋板试样

紧连接。疲劳试验的频率为500次/分。施加的载荷分别为铝平板 $T_{max} = 10$ 吨, $T_{min} = 4$ 吨; 铝加筋板 $T_{max} = 11.7$ 吨, $T_{min} = 5.08$ 吨。

声发射测试装置是 SFS-106 型六通道声发射仪器, 关于这台仪器的详细介绍见参考文献^[1]。实验时传感器的布置示于图4。在实验中, 为排除外来噪声采用了频率鉴别、前沿鉴别和主副鉴别。传感器的谐振频率为 100 KHz, 滤波器的中心频率与传感器的谐振频率是匹配的。使用主副鉴别时, 1号、2号通道为主通道, 4号、5号、6号为副通道。如果4号、5号、6号通道在1号、2号通道之前先收到信号, 表明信号来自上下夹头或试验机, 是假信号, 予以排除。如果1号、2号通道在4号、5号、6号通道之前先收到信号, 表明信号来自监视区, 是真信号, 予以接收。声发射测试系统的增益前放为 40 分贝, 主放 43~49 分贝。因传感器的灵敏度稍有差别, 为了保证定位精度, 事先用模拟声发射源对主放大器的增益进行标定。同时还用模拟声发射源作标定, 测出声速为2800米/秒。

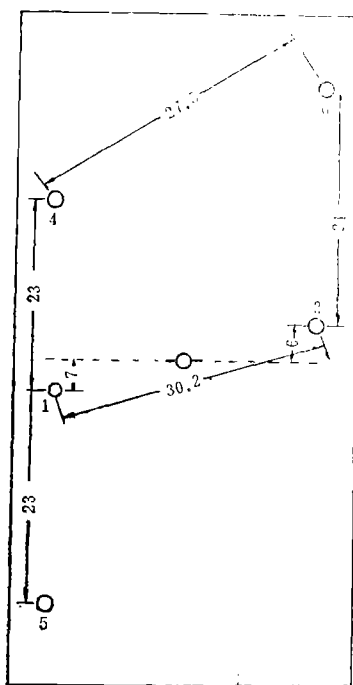


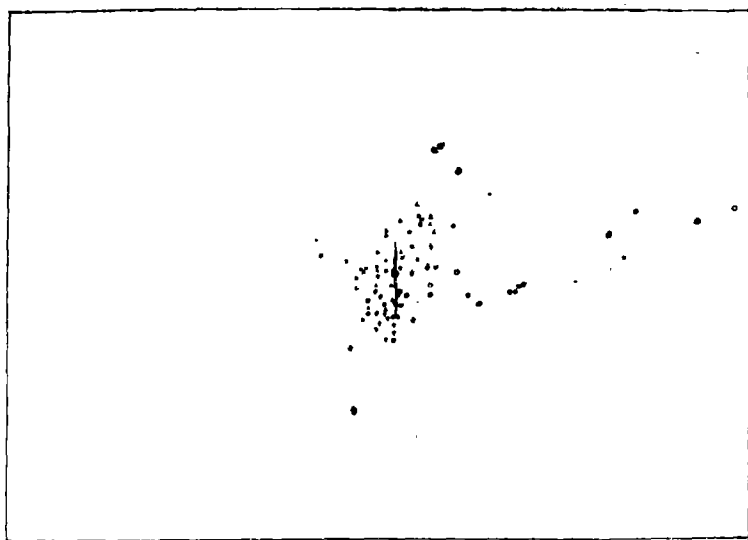
图4 传感器的布置 (单位: 厘米)

表1 铝平板试样时差数据的部份原始记录

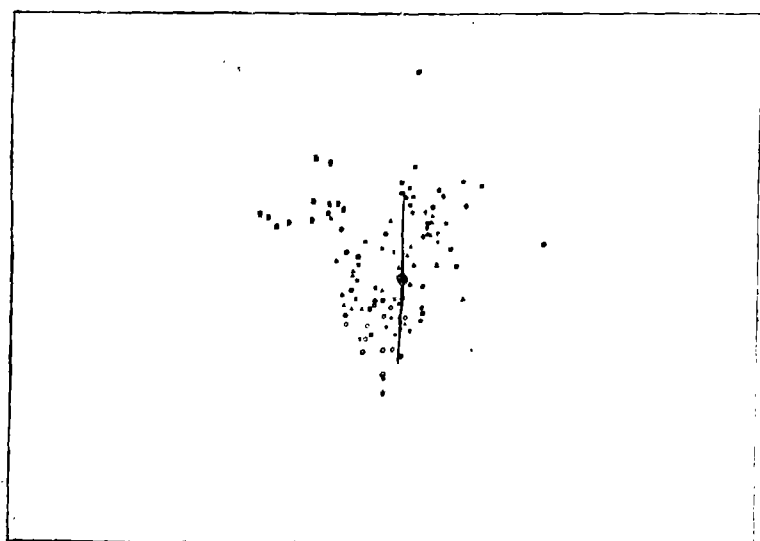
传感器次序	时 差 (μS)	声发射总计数	符 号
1 6 4	37 11	5245	V
1 4 5	58 16	5282	V
1 4 5	49 08	5297	V
1 4 6	33 05	5315	V
1 2 4	43 30	5400	V
1 4 6	16 13	5400	V
1 2 4	46 34	5416	V
1 6 5	52 02	5494	V
2 1 4	34 29	5517	V
1 6 4	46 30	5550	V

表1 示出平板试样试验时打印机输出的部份原始结果。这些数据中包括收到信号的传感器次序、时差数据、声发射总计数和数据的有效性符号。根据这些数据就可算出声源位置。

收到裂纹扩展声发射信号的传感器共有 10 组, (1 2 4)、(2 1 4)、(1 4 6)、(2 4 6)、(2 6 4)、(2 6 5)、(1 6 5)、(1 6 4)、(2 1 6)和(1 4 5)。表2列出其中(2 1 4)一组数据的计算结果。



a

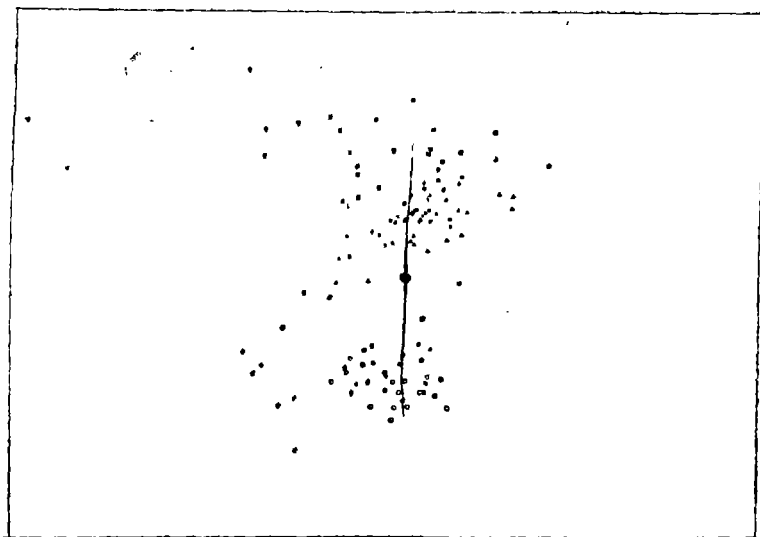


b

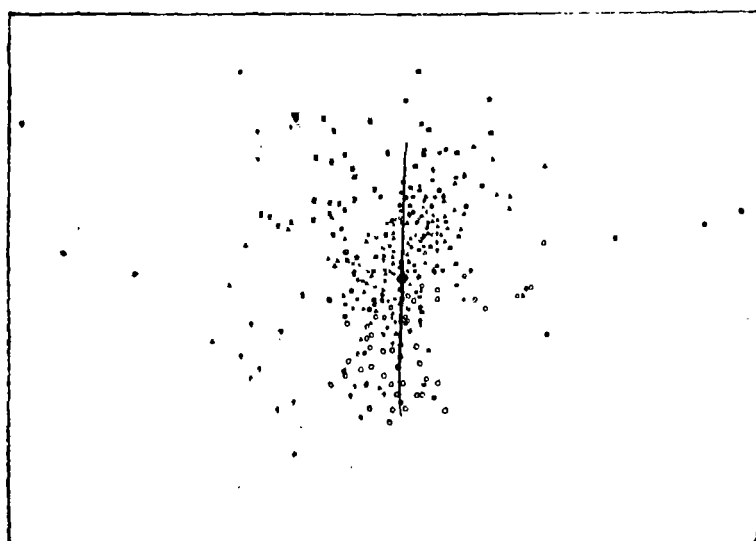
图 5 平板试样

a ---- 初期 b ---- 中切

符号: ○ — (1 2 4); × — (2 1 4); △ — (1 4 6); ● — (2 4 6);
 ▲ — (2 1 6); □ — (1 4 5)



c



d

声源定位结果

c——后期 d——综合

⊗ — (2 6 4) ; △ — (2 6 5) ; Φ — (1 6 5) ; ■ — (1 6 4) ;

表 2 (2 1 4)传感器的一组数据

时 差 (μS)		声源座标 (厘米)		时 差 (μS)		声源座标(厘米)	
Δt_{24}	Δt_{14}	x	y	Δt_{24}	Δt_{14}	x	y
40	30	14.04	-20.82	56	43	16.11	-24.23
45	40	14.44	-22.55	60	44	16.83	-24.72
45	45	15.47	-19.30	52	36	15.77	-22.53
45	35	14.60	-22.02	52	33	15.93	-21.80
43	40	14.56	-21.01	52	39	15.59	-23.15
44	41	14.70	-21.12	61	35	13.42	-22.73
44	26	15.02	-20.22	57	35	16.71	-22.55
34	29	13.07	-20.42	55	31	16.57	-21.61
45	43	15.08	-20.60	60	33	17.35	-22.27
40	34	13.75	-21.55	62	34	17.64	-22.56
				54	26	16.70	-20.52

上述10组数据中除溢出无效的数据外,共计算了307个数据,其结果示于图5。图5中根据裂纹发展情况分为初期(5-a)、中期(5-b)和后期(5-c)。可以看出,随着裂纹向试样两边扩展,定位计算出来的点也向两边移动。图5-d是全部实验点的综合。可以看出,在307个数据中有86个数据比较分散,其余数据均位于裂纹两旁 ± 2.5 厘米之内。可见定位结果还是较为满意的。

在实验中看到,裂纹扩展初期,[1 2 4]、[2 6 5]和[1 4 6]数据较多,[2 4 6]、[2 6 4]、[1 6 4]和[2 1 6]数据很少。随着裂纹扩展,长度增大,前述10组传感器均收到信号。另一情况是,在一直线上的[1 4 5]传感器也收到信号,可能与试样中的裂纹影响声波的传递有关,使离裂纹较近的2号传感器收不到信号,而较远的4号和5号传感器却先收到了信号。

四、声发射监视的可能性

构件强度试验时能否用声发射技术监视结构完整性是值得关心的问题,本工作为构件强度试验的声发射监视提出了依据。图6示出平板试样疲劳试验至断裂的声发射计数率和裂纹增大曲线。引人注意的是计数率开始明显增大的第一个信号,出现于约8000次循环时,此后观察试样,在背面出现了第一条微细裂纹。以后随着裂纹扩展,声发射计数率时而增大,时而减少。大约在70000次循环之后,声发射计数率明显增大,频度增加,相应的裂纹扩展速度也增大。大约从83000次循环开始计数率急增,在86200次循环试样断裂。可见计数率开始急增预示着试样已临近断裂。

图7示出Z型加筋板疲劳试验中的裂纹扩展和声发射计数率变化。图8示出对同样试样实测的和理论计算的裂纹扩展速率随裂纹长度的变化关系^[2]。从图8可以看出,裂纹开始扩展,其扩展率逐渐增大;而当裂纹扩展到大约45毫米左右开始,加筋板的桁条对力的传递起到了止裂作用,使裂纹扩展率减小。当裂纹穿过桁条,桁条的止裂作用消失,裂纹扩展率又开始增大,直至断裂。

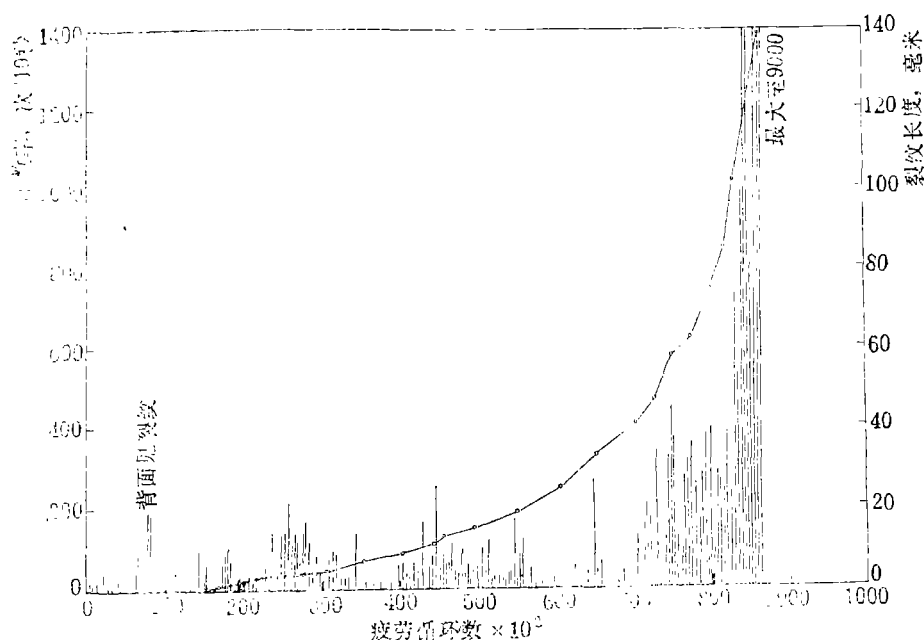


图 6 平板试样的裂纹扩展和声发射计数率

图7的结果与图8是对应的。从图7看到，大约在200多次循环，裂纹就已产生，随着裂纹扩展，声发射计数率越来越大，大约在18000次循环，裂纹长度达到40毫米左右，桁条的止裂作用使计数率明显减小。当裂纹接近60毫米（22000次循环）左右，桁条的止裂作用消失，裂纹扩展加快，计数率开始急增，达到了试验过程中的最大值，到25900次循环试样断裂。桁条止裂作用消失后声发射计数率急增意味着试样已临近断裂。声发射计数率与裂纹扩展率变化的对应关系表明，用声发射技术能有效地监视结构完整性，预报构件破坏的危险性。

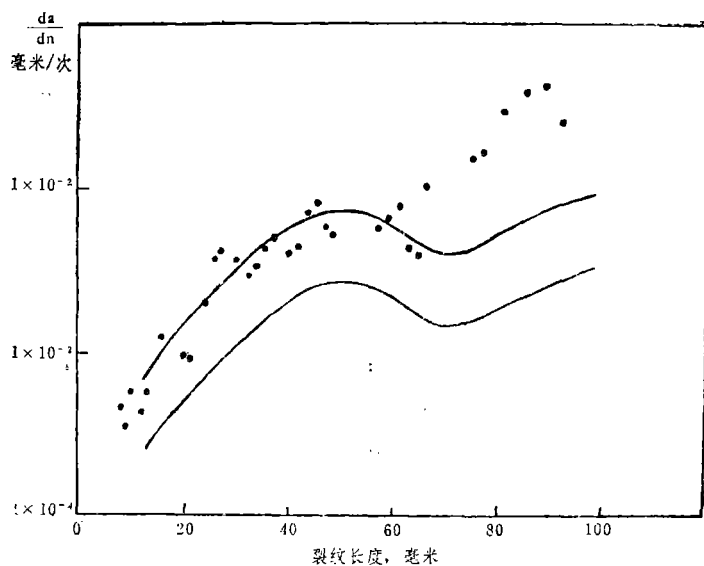


图 7 加筋板的裂纹扩展和声发射计数率

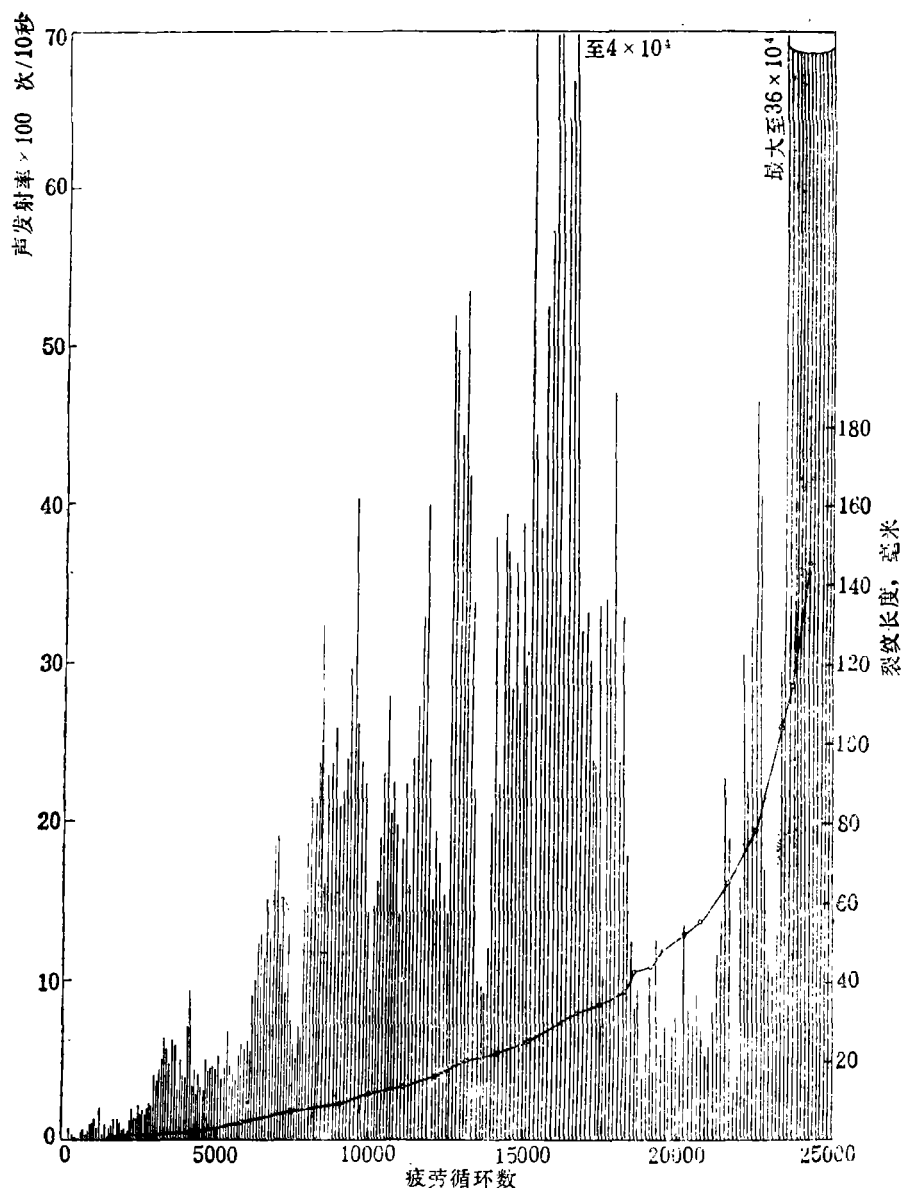


图 8 加筋板疲劳
裂纹扩展速率

五、结 论

根据上述结果可以作出结论：采用SFS-106型六通道声发射装置，获得两组时差数据，并采用上述计算声源座标的公式，可以用三个传感器对裂纹进行平面定位。定位精度可以达到±2.5厘米。将频率鉴别、前沿鉴别和主副鉴别等鉴别噪音的方法结合使用，能较好地排除噪音的干扰。声发射技术对疲劳裂纹的起始很灵敏。接收到的声发射信号与疲劳裂纹的严重性有密切关系。声发射技术用于监视飞机某些构件的断裂过程是很有希望的。

参 考 资 料

- 〔1〕 沈阳市电子研究所，《电子技术与应用》，1957年第4期。
- 〔2〕 六二一所、六二八所、北航等“加筋板断裂特性的初步研究”，《航空科技》，1976年7月。