

LD2-CS 铝材的断裂韧度和裂纹扩展速率

西北工业大学材料力学教研室断裂力学小组

一、概 述

某型直升机旋翼大梁由LD2铝材经挤压、热处理和机械加工制成。该大梁是空心变截面梁，毛坯横剖面示意图如图1实线所示。外表面经机械加工（内表面不加工）后，大梁厚度沿展向逐渐减小，翼根和翼尖剖面分别如图1中点划线和虚线所示。服役期中曾发现一旋翼的16截面上自上型面第一加强肋处已有沿弦向扩展达135毫米的穿透裂纹，其余某些旋翼大梁在不同的位置也曾出现长度不同的裂纹，有的已经穿透。进一步检查发现裂纹早在毛坯挤压成型过程中已形成，在服役期中逐步扩展而形成裂纹。为了给估算旋翼大梁寿命提供实验数据，试测了LD2-CS铝材的断裂韧度和裂纹扩展速率。裂纹扩展速率试样系从两个铝厂生产的旋翼大梁毛坯上制取，而部分J积分试样又系从裂纹扩展速率试样的残骸上制取的。为了区别和比较，试样号的第一位字码分别用“1”和“3”以表示不同厂产毛坯上的取样。另一部分J积分试样是从服役期满报废的原

苏联制造的旋翼大梁（苏联产品为AB合金，与国产LD2材料相同）上制取的，其第一位字码用“A”以资区别。所有取样方位均与挤压方向一致（图2）。上述各材料的化学成分和机械性能见表1。

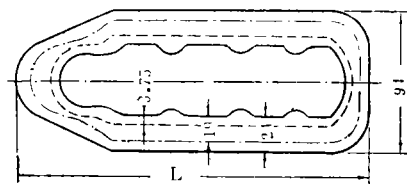


图 1

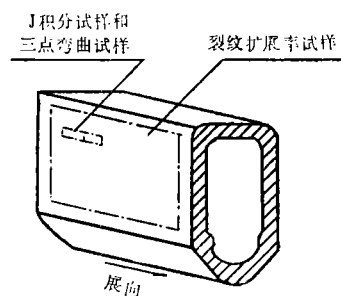


图 2

表 1 材料的化学成分和机械性能

试样材料	成 分 %				机 械 性 能			
	Cu	Mn	Si	Mg	σ_s 公斤/毫米 ²	σ_b 公斤/毫米 ²	$\delta\%$	$\psi\%$
“1”号	0.44	0.24	0.98	0.65	31.2	36.2	16.6	31.4
“3”号	0.38	0.22	0.85	0.61	28.9	34.8	16.9	31.9
合格范围	0.20~0.60	0.15~0.35	0.50~1.20	0.45~0.90				
AB合金	0.24	0.27	0.87	0.65	33.9	39.6	16.1	33.7

二、LD2-CS铝材的 断裂韧度

为了测定LD2-CS铝材的平面应变断裂韧度 K_{Ic} 值,曾参考E399-74规定的方法^[1],采用

三点弯曲试样进行实验,但结果无效,见表2。

由表2数据可知该材料的 K_{Ic}/σ_s 值较高,欲直接测定 K_{Ic} 值需用厚度 $B \geq 70$ 毫米的大试样,这从大梁毛坯上取样是不可能的,为此,改用测该材料的 J_{Ic} 值换算成 K_{Ic} 的方法^[2]。

表2 三点弯曲试样的实验结果

试样号	B×W 毫米×毫米	\bar{a} 毫米	P_{max} 公斤	P_Q 公斤	$\frac{P_{max}}{P_Q}$	K_Q 公斤 毫米 ^{3/2}	$2.5(\frac{K_Q}{\sigma_s})^2$	实验无效原因	备注
01	23.30×46.25	24.40	2044	1500	1.37	110	27.8	$P_{max}/P_Q > 1.1; B < 2.5(\frac{K_Q}{\sigma_s})^2$	试样从旋翼大梁毛坯上制取
02	23.40×46.50	23.05	2390	2084	1.15	136	42.4		
03	23.40×46.00	25.28	1825	1546	1.18	123	32.8		
04	22.17×46.11	23.85	1950	1560	1.25	116	31.0		
05	23.62×46.12	24.90	1940	1580	1.23	120	31.5		
06	23.50×46.00	24.20	2000	1700	1.17	123.5	35.15		
135	50.3×100.1	51.2	7420	6667	1.11	146.5	67.5	$P_{max}/P_Q > 1.1; B < 2.5(\frac{K_Q}{\sigma_s})^2$	试样用与旋翼大梁毛坯成型工艺相同的原材料制成
124	50×100	53.28	6820	6278	1.085	147.9	69.5		
0	50×100	52.9	6700	6278	1.065	148	70		
123	50×100	54.5	6700	6055	1.1	152.5	74.5		
112	50×100	65.78	3660	3389	1.08	125.9	50.3	$P_{max}/P_Q > 1.1$	
111	50.2×100.1	62.7	4130	3500	1.18	117.5	43.8		

1. J积分试样

J积分试样均用B:W:S 1:1:4的三点弯曲试样,其尺寸为16×16×64和20×20×80毫米两种。试样经钼丝切割开槽后在高频疲劳试验机上预制裂纹,初始相对裂纹长度约在 $0.6 \leq \frac{a}{w} \leq 0.7$ 范围内。

2. 实验

实验在AVERY7110DCJ型试验机上进行。用电位法和声发射同时监测裂纹开裂点。实验所用的仪器如图3所示。

3. 实验结果

实验所得的载荷-位移曲线(即P-Δ曲

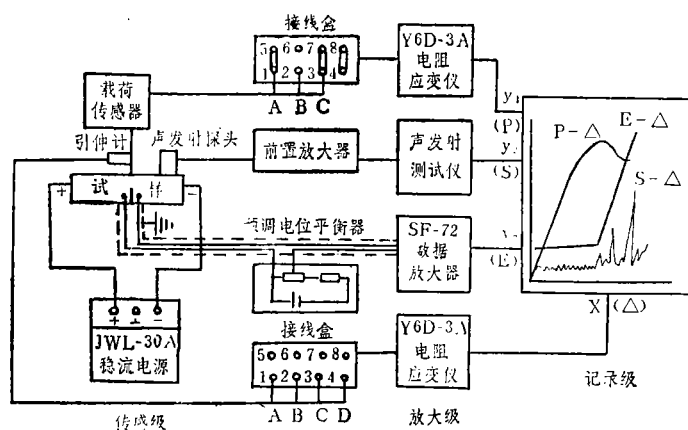


图3

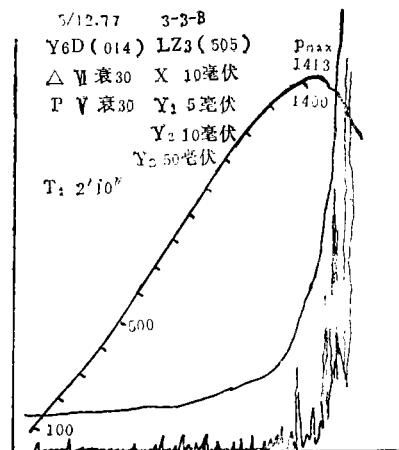


图4

线、电位 $E'-\Delta$ 曲线和声发射率 $S-\Delta$ 曲线如图4所示。P- Δ 曲线所围面积乘它的比列系数后表示试样受载变形的形变功。弹塑性断裂力学指出^[3,4],对于深裂纹($a/w \geq 0.4$),短跨距($s/w = 3 \sim 5$)的三点弯曲试样,在保证韧带屈服是平面应变型的条件下,J积分值为

$$J_1 = \frac{2U}{B(w-a)} \quad (1)$$

式中: B、W和a分别是试样的厚度、宽度和平均裂纹长度; U是试样的形变功。

如能确定裂纹刚开始扩展的临界点C,可

由P- Δ 图算得试样形变功的临界值 U_c ,从而得到临界点的J积分值

$$J_{1c} = \frac{2U_c}{B(w-a)} \quad (2)$$

J_{1c} 是材料平面应变J积分的临界值,在试样满足一定要求的条件下,它是仅与材料性质有关的常数。而 J_{1c} 与 K_{1c} 之间的关系为

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{EJ_{1c}}{1-\nu^2}} \quad (3)$$

式中E和 ν 分别是材料的杨氏模量和泊松比。这样,用小试样测得的 J_{1c} 就可换算为用大试样测

表3 J积分试样的实验结果

试样号	B×W 毫米×毫米	a 毫米	a W	W-a 毫米	B W-a	P 公斤	P _{max} 公斤	J ₁ 公斤 毫米	J ₁ 公斤 毫米	K _{1c} *	K _{1c} *	K _{1c} *(总)
1-21	15.92×16.04	9.55	0.595	6.49	2.48	436	436	1.87		120		
1-24	15.90×15.88	9.74	0.606	6.14	2.59	378	378	1.74	1.84	116	118	
1-26	15.97×15.99	9.58	0.597	6.41	2.49	409	409	1.81		119		
1-2	19.93×20.03	11.99	0.598	8.04	2.48	600	600	1.79		118		
1-3	19.91×20.01	12.17	0.607	7.84	2.54	547	600	2.02		125		
1-4	19.93×20.00	12.43	0.622	7.57	2.63	531	539	1.64		113		
1-5	19.79×19.91	12.08	0.607	7.83	2.52	579	584	1.82		119		
1-6	19.63×20.00	12.18	0.609	7.82	2.51	580	580	1.87		120		
1-7	19.91×19.95	12.44	0.623	7.51	2.65	541	541	1.83	1.80	119	118	
1-8	20.00×20.00	12.23	0.612	7.77	2.57	593	593	1.92		122		
1-9	19.91×19.99	12.26	0.613	7.73	2.58	558	561	1.75		116		
1-13	19.91×20.03	11.83	0.592	8.20	2.43	614	617	1.75		116		
1-14	19.63×19.96	12.07	0.604	7.89	2.49	526	529	1.64		113		
3-2	16.09×16.04	9.76	0.608	6.28	2.56	385	385	1.67		114		
3-5	16.10×16.12	9.72	0.603	6.40	2.51	415	415	1.76	1.66	117	113.7	
3-6	16.16×16.09	9.93	0.617	6.16	2.62	284	284	1.56		110		
A-1	15.97×15.97	9.60	0.601	6.37	2.50	413	413	2.09		127		
A-2	15.95×16.24	9.72	0.597	6.52	2.45	413	413	1.97		124		
A-4	16.10×16.09	9.83	0.610	6.26	2.57	422	422	1.93		122		
A-5	16.04×16.06	9.77	0.608	6.29	2.55	410	410	1.91		122		
A-6	15.86×16.10	10.24	0.636	5.86	2.70	322	322	1.67		114		
A-7	16.20×15.94	9.90	0.621	6.04	2.68	393	393	2.28	2.16	133	126.5	
A-8	15.90×16.16	9.62	0.595	6.54	2.43	400	400	1.90		122		
A-9	15.85×16.25	9.87	0.607	6.38	2.48	423	423	2.43		138		
A-10	15.92×15.95	9.75	0.610	6.20	2.57	432	432	2.59		142		
A-11	15.85×15.91	10.27	0.645	5.64	2.81	338	338	1.87		121		
A-12	19.98×19.86	12.41	0.625	7.45	2.68	541	544	1.77	2.00	117	124.0	
A-13	19.58×19.76	11.93	0.605	7.83	2.50	581	581	2.22		131		

得的 K_{Ic} 。本实验由 $E'-\Delta$ 和 $S-\Delta$ 曲线确定出临界点,经计算后所得的实验结果如表3所示。为了与按E399-74规定方法测得的材料平面应变断裂韧性 K_{Ic} 相区别,表中用符号 K_{Ic}^* 表示用J_{Ic}换算得到的值。

4. 实验结果讨论

1) 临界点的确定

本实验采用裂纹刚开始扩展的开裂点作为临界点^[5,6]。实验所得 $E'-\Delta$ 曲线约可分为三种类型(图5):

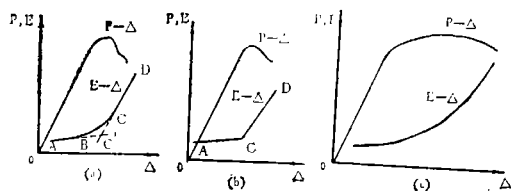


图 5

(1) $E'-\Delta$ 曲线由二段直线AB、CD及一曲线BC联接而成(图5a)。对这类 $E'-\Delta$ 曲线是将AB和CD直线延长,以其交点C'作为与裂纹刚开始扩展相应的开裂点。

(2) 对于尺寸较大的试样($20 \times 20 \times 80$ 毫米的试样),BC曲线消失, $E'-\Delta$ 曲线仅由二段直线AC和CD组成(图5b)。对这类曲线是将二直线的交点C作为开裂点的。

(3) 个别试样的 $E'-\Delta$ 曲线是一光滑的渐增曲线(图5c),曲线上无明显的电位突变点,且对应的声发射率 $S-\Delta$ 曲线也无明显的突变点。对这类曲线不能由它直接定出开裂点,故本实验不包含这部分结果。

用声发射法确定的开裂点与用电位法确定的非常接近,这证实了用电位法确定的开裂点是可信的。故本实验全部采用根据 $E'-\Delta$ 曲线确定的开裂点计算得到的数据,而将声发射法作为确定开裂点时的参考。

为了进一步检验用电位法确定的开裂点的可靠性,曾选用“1”号和“3”号试样, $16 \times 16 \times 64$ 和 $20 \times 20 \times 80$ 毫米两种尺寸共四组(每组3~5件)试样,用横剖面金相法观察

断口。将同组的不同试样分别加载到 $E'-\Delta$ 曲线上电位刚急剧上升点的前后不同位置停机、卸载,然后将此未压断试样再次疲劳,待裂纹扩展后打断并观察断口。在低倍显微镜下看到:电位曲线已急剧上升后停机的试样断口,在两疲劳区中间夹有或大或小的暗灰色开裂区;而电位曲线急剧上升前停机的试样断口,两疲劳区紧密相联,无法区别中间是否存在开裂区。为此,选择了部分试样断口用电子显微镜进行观察。发现即使在电位曲线刚急剧上升前停机的断口上,在两疲劳区(呈现明显的疲劳条带特征)中间也存在带有明显韧带特征的开裂区。虽然这开裂区尺寸很小,但说明对LD2-CS铝材而言,裂纹开始扩展是在电位曲线急剧上升前发生。因此,用 $E'-\Delta$ 曲线按前述方法确定的开裂点基本上是符合实际的。由表3的数据可见,用按电位法确定的开裂点计算的 J_{Ic} 值基本上是稳定的,这说明对该铝材用电位监测开裂点的方法是可行的。

2) J积分试样的尺寸

为了满足平面应变条件和保证J积分实验的有效性,试样的几何尺寸应满足下列条件^[2,3]:

$$\frac{B}{W-\bar{a}} \geq 2,$$

$$W-\bar{a} \geq \alpha \left(\frac{J_{Ic}}{\sigma_s} \right), \alpha = 25 \sim 80 \quad (4)$$

$$\frac{\bar{a}}{W} \geq 0.4,$$

$$\frac{S}{W} = 3 \sim 5$$

本实验的试样几何尺寸全部满足上述各项条件,且实验结果基本上稳定,不随试样大小而变化,实验结果是有效的。

值得注意的是,对 $20 \times 20 \times 80$ 毫米的试样,在 $0.6 \leq \frac{\bar{a}}{W} \leq 0.7$ 的范围内, $E'-\Delta$ 曲线仅由二段直线组成,由 $E'-\Delta$ 曲线确定的开裂点载荷 P_c 与 $P-\Delta$ 曲线上的最大载荷 P_{max} 基本上重合,且过 P_{max} 后 $P-\Delta$ 曲线急剧下降,有时甚至能

听到裂纹突进的“迸发”声。因此，当从毛坯上取样时，采用上述几何尺寸的试样进行实验是适宜的。

三、LD2-CS铝材的裂纹扩展速率

1. 裂纹扩展速率试样

采用中心穿透裂纹平板试样，选用厚度 $B=20$ 毫米，中心孔半径 $R=3$ 毫米。用线切割机在平板正中切出一条中心穿透裂纹，单边线切割长度为 3 毫米，使用钼丝直径 $d=0.15$ 毫米。试样(图 6)采用销轴加载，销轴孔用特制钻模径钻孔、铰孔制成，以使试样受载尽可能对称，并保证试样装入专用加载夹具时的互换性。

2. 采用直接读数法

该实验采用直接读数法进行。实验前，用高度尺在试样上划好刻线，单边标距为 1 毫米。为了使裂纹与实际存在的尖锐疲劳裂纹相符合，在正式实验前将试样进行预裂以形成尖锐的初始裂纹。预裂和正式实验都在 ZD100 PU 试验机上进行。用专用夹具将试样通过球形铰联接在试验机的上、下夹头中，预裂完成后即开始正式实验。实验时，用显微镜观察裂纹扩展情况，当裂纹单边每扩展 1 毫米时，记下相应的循环次数 N 。实验一直进行到断裂为止，断裂时的循环次数记为 N_f 。记录得到的部分试样的 a 、 N 数据之曲线如图 7 所示。

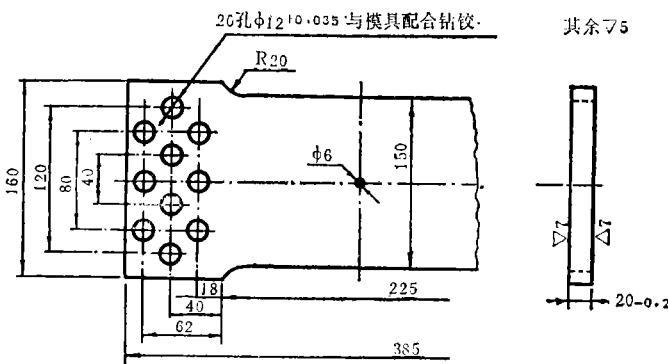


图 6

考虑到使实验能接近实际受载情况，选用载荷为 $P_{min}/P_{max}=6t/20t, 7.5t/20t, 9t/20t$ 三组。由于在第一组实验中，实验用的表盘名义读数为 $P_{min}/P_{max}=6t/20t$ ，经修正后实际载荷值应为 $P_{min}/P_{max}=5.6/20.4t$ 。其余二组是修正后的载荷值。

用上述载荷进行的三组实验全部采用频率 $f=300$ 次/分，另一组载荷为 $P_{min}/P_{max}=6t/20t$ 的试样采用频率 $f=700$ 次/分，以对比频率对实验结果的影响。

全部实验是在室温下进行的，温度变化在 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围内。

3. N - a 曲线及 $a^*(N)$ 值

将不同载荷和频率条件下实验得到的部分试样的 a 、 N 值绘在 N - a 座标平面上，得到 N - a 曲线如图 7 所示。采用文献〔7〕介绍的数据处理方法，在不同裂纹长度 a 时，可算得相应的裂纹扩展速率 $a^*(N)$ 值（即 da/dN 的最佳值）及其对数值。部分试样的结果列入表 4。

为了应用的方便，通常希望将 $a^*(N)$ 用一解析函数表示。由于应力强度因子 K 能表示裂纹前缘区域应力场强弱程度，显然，可以认为它是控制裂纹扩展速率的重要参数。对于中心穿透裂纹平板，应力强度因子

$$K = \frac{P}{BW} \sqrt{\pi a/2 \cdot F(a/2)}, \quad (5)$$

式中： P —试样承受的载荷；

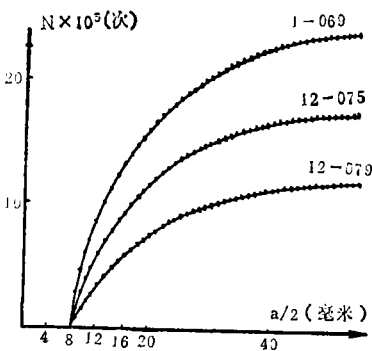


图 7

表4 不同裂纹长度时的 $a^*(N)$ 值(频率 $f=300$ 次/分,
载荷 $P_{min}/P_{max}=5.6t \sim 20.4t$)

试样号	a/2 毫米									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$-\log a'^*(N)$									
1-060	3.90661	3.83885	3.78888	3.73759	3.69636	3.64540	3.61013	3.57229	3.54220	3.52048
12-77	3.91566	3.86153	3.80550	3.74312	3.71096	3.67746	3.62377	3.59715	3.53403	3.49624
12-79	3.90173	3.85703	3.82543	3.77670	3.72428	3.68574	3.65706	3.62992	3.58546	3.55206
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
3.48430	3.43457	3.39533	3.35316	3.33143	3.28330	3.24304	3.23045	3.20003	3.17026	3.13672
3.48001	3.44170	3.43297	3.36267	3.32222	3.29667	3.23045	3.22401	3.21748	3.17609	3.14613
3.50650	3.46982	3.44716	3.40398	3.39620	3.37199	3.32531	3.28892	3.24180	3.20412	3.20003
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
3.10551	3.08990	3.07372	3.02938	3.00647	2.97543	2.95424	2.90848	2.89763	2.86923	2.82930
3.07556	3.06818	3.02938	3.01284	3.00000	2.94939	2.94201	2.93450	2.91908	2.89209	2.83885
3.15076	3.10037	3.09884	3.07918	3.07555	3.04013	2.98453	2.96497	2.94448	2.88081	2.83569
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
2.78888	2.73640	2.70329	2.65801	2.59660	2.51188	2.49831	2.46982	2.41497	2.37107	
2.79934	2.74819	2.70757	2.68574	2.67210	2.62839	2.59106	2.53148	2.43938	2.43136	
2.79588	2.78533	2.77452	2.74036	2.71181	2.67745	2.63347	2.60206	2.57978	2.51851	

W—试样的宽度;

B—试样的厚度;

a—中心裂纹的全长;

F—几何修正系数; 且^[8]

$$F(a/2) = \begin{cases} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2w}\right)}, & \text{当 } a \leq 50 \text{ 毫米} \\ \frac{\sqrt{1+8\left(\frac{a}{2w}\right)^4}}{1-2\left(\frac{a}{2w}\right)^2-8\left(\frac{a}{2w}\right)^4}, & \text{当 } a > 50 \text{ 毫米} \end{cases} \quad (6)$$

在重复应力作用下, 应力强度因子幅值 ΔK 可表为

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}, \quad (7)$$

式中 K_{max} 、 K_{min} 分别为最大、最小的应力强度因子。

对于许多金属材料, 实验结果说明裂纹扩展速率可用 Paris 给出的经验公式

$$a^*(N) = C_0 (\Delta K)^{C_1} \quad (8)$$

表示。式中 C_0 、 C_1 是由材料决定的常数。

(8)式说明, 在双对数坐标平面上, $a^*(N)$ 是 ΔK 的线性函数。

将本实验的结果绘制在双对数坐标平面上, 如图8所示。为了求得 $a^*(N)$ 的最佳表达式, 本实验采用三片试样为一组, 将所得原始数据按文献〔7〕介绍的方法, 用Paris公式(8)

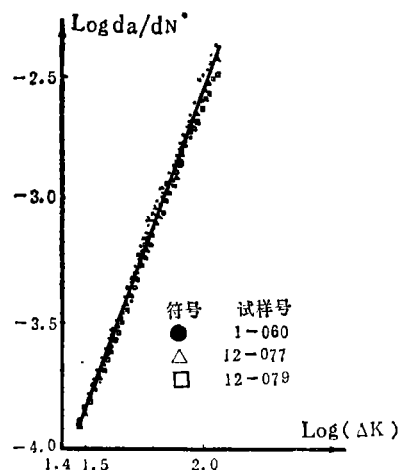


图8

拟合。在不同条件下求得的材料常数 C_0 、 C_1 和相关系数 γ ^[9]见表5。从表5所列数据可见, γ 值接近于1,这说明在研究条件下,这样处理是符合实际的。

表5 裂纹扩展速率 $a^*(N)$ 的系数值

试样号	f 次/分	P_{max} t	系 数			γ
			$C_0 \times 10^{-8}$	$C_0 (max) \times 10^{-8}$	C_1	
“1”	300	20.4	1.390	1.638	2.696	0.9963
		20	2.064	2.987	2.581	0.9803
	700	20	2.027	2.586	2.541	0.9919
“3”	300	20.4	1.391	2.163	2.757	0.9578
		20	1.430	1.699	2.723	0.9946
	700	20	3.571	3.856	2.406	0.9946

综上所述,LD2-CS铝材中心穿透裂纹平板的裂纹扩展速率 $a'(N)$ 的最佳值 $a^*(N)$ 可表示为

$$a'(N) = a^*(N) = C_0(\Delta K)^{C_1}, \quad (9)$$

在不同条件下,系数 C_0 、 C_1 值见表5。

4. 裂纹扩展速率的变化规律

将(9)式表示的裂纹扩展速率的变化规律用表5中的系数描绘在双对数座标平面上如图9所示。由图可见,当频率从 $f=700$ 次/分降低到 $f=300$ 次/分时,裂纹扩展速率有明显的增加。可见加载频率对该铝材的裂纹扩展速率有明显的影响,这与文献〔11〕、〔12〕介绍的频率影响相符。

5. 检查数据处理效果

为了检查以上数据处理结果的效果,将求得的裂纹扩展速率 $a^*(N)$ 〔公式(9)〕用表5给出的 C_0 、 C_1 值进行积分^[7],可得不同裂纹长度 a_i 时相应的循环次数的计算值 N_i 如表6所示。由表6可见公式(9)表示的实验结果是可信的。

四、小 结

LD2-CS铝材的J积分实验说明:用电位法监测裂纹扩展的开裂点是可行的、方便的,

* 关于裂纹扩展速率 $a'(N)$ 的最佳表达式应按对数正态分布型估计误差^[10,10],这里为计算简便,是按正态分布型计算的。

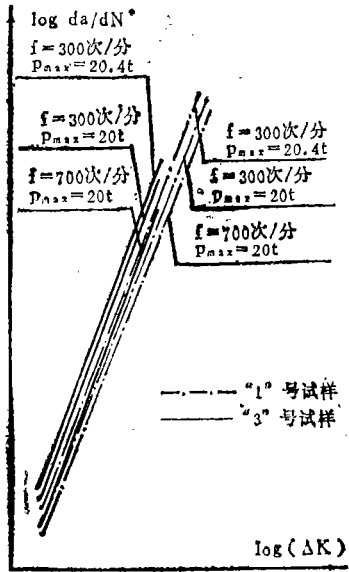


图9

用测材料的 J_{Ic} 值换算得出的 K_{Ic}^* 值是可信的。试样尺寸以 $20 \times 20 \times 80$ 毫米为宜。实验测得LD2-CS铝材“1”号试样的 $K_{Ic}^* = 118 \pm 10$ 公斤/毫米^{3/2},“3”号试样的 $K_{Ic}^* = 114 \pm 6$ 公斤/毫米^{3/2};AB合金的 $K_{Ic}^* = 126 \pm 16$ 公斤/毫米^{3/2},LD2-CS铝材与AB合金二者的 K_{Ic}^* 相近。

LD2-CS铝材中心穿透裂纹平板的裂纹扩展速率实验得出“1”和“3”号试样的裂纹扩展速率 $a'(N)$ 的最佳值可用公式(9)表示,常数 C_0 、 C_1 见表5。加载频率对裂纹扩展速率有明显影响,“1”号试样比“3”号试样的扩展速率稍低。(表6见下页)

参 考 文 献

- 〔1〕金属材料平面应变断裂韧性标准试验方法,ASTM E399—74,西北工业大学力学教研室译。
- 〔2〕用测 J_{Ic} 的方法测定中强度钢的 K_{Ic} ,中国科学院力学研究所十二室断裂力学组,北京地区断裂力学交流会文集,1974。
- 〔3〕弹塑性断裂力学原理和应用,新金属材料,1975,11、12。
- 〔4〕论单试样测定 J_{Ic} 的方法,新金属材料,1975,11、12。

表6 循环次数的实验值与计算值

N (次)	试 样 号	裂 纹 长 度 a 毫 米											
		20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
N _i (实验 值)	1-060	0	7800	15250	21400	27700	32350	37100	41550	45250	46650	52200	55500
	12-77	0	9350	17850	23150	29450	35500	39350	43900	48500	51950	55100	57700
	12-79	0	7400	14950	22250	28550	34050	38950	43550	48050	52200	55950	58850
	\bar{N}_i (平均值)	0	8180	16020	22270	28570	33970	38470	43000	47270	50930	54420	57350
\tilde{N}_i (计 算值)	\tilde{N}_i	0	8470	15910	22510	28410	33730	38540	42920	46930	50800	53980	57100
	$(\tilde{N}_i - \bar{N}_i)$	0	290	-110	240	-160	-240	70	-80	-340	-130	-440	-250
	\tilde{N}_i^{\pm} (上限值)	0	7190	13500	19100	24110	28620	32700	36420	39820	42940	45810	48460
		44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
		58400	60800	63150	65550	67300	69450	70800	72550	74250	75660	76650	78200
		61300	63950	65800	69000	70300	72200	74100	75600	77400	78800	80000	81300
		62550	64950	67650	70300	72550	74950	77100	78600	80450	82000	83400	85050
		60750	63230	65530	68280	70050	72200	74000	75580	77370	78820	80020	81520
		59990	62670	65160	67480	69650	71670	72840	75390	77030	78600	80030	81360
		-760	-560	-370	-800	-400	-530	-360	-190	-340	-220	10	-160
		50910	53180	55290	57260	59110	60820	62490	63980	65370	66700	67910	69040
		68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
		79350	80450	81450	82500	83400	84200	85100	85700	86600	87150	87750	88200
		82100	83600	84200	85400	86200	87050	88100	88750	89500	90250	90800	91250
		86000	87000	88700	89700	90600	91650	92550	93550	94050	94700	95400	96000
		82480	83680	84780	85870	86730	87630	88580	89330	90050	90700	91320	91820
		82610	83910	84990	86000	86940	87810	88620	89450	90140	90730	91320	91960
		130	230	210	130	210	180	40	120	90	30	0	140
		70100	71200	72120	72980	73780	74520	75210	75900	76500	77040	77540	78030
		92	94	96	98	100	102	104	106	108	备 注 循环次数的实验值 与计算值均从 a = 20毫米开始计算		
		88800	89150	89550	89800	90100	90450	90700	90800	91100			
		91800	92300	92700	93150	93500	93850	94050	94260	94650			
		96550	97100	97600	98050	98400	98850	99200	99550	99700			
		92380	92850	93280	93670	94000	94380	94650	94870	95150			
		92450	92900	93310	93680	94000	94360	94630	94870	95090			
		70	50	30	10	20	-20	-20	0	-60			
		78450	78840	79180	79500	79790	80080	80300	80510	80690			

〔5〕试样韧带宽度对开裂点的影响,中国科学院力学研究所十二室断裂力学组。

〔6〕J积分方法概论,冶金部钢铁研究院,新金属材料,1977,3、4。

〔7〕LD2-CS铝材中心穿透裂纹平板裂纹扩展速率实验报告,西北工业大学学报,1978,1。

〔8〕裂纹扩展速率实验数据处理与寿命估算,北京大学数学力学系断裂力学小组,621所,1975,10。

〔9〕回归分析方法,中国科学院数学研究所数理统计组编,科学出版社,1975年。

〔10〕数据处理方法,西北工业大学,1976,4。

〔11〕断裂力学在疲劳裂纹扩展方面的应用,一机部机械研究院郑州机械研究所,1974,10。

〔12〕断裂力学在电站大锻件中的应用,西安交通大学,金属材料强度研究室,材料力学试验室,1976,4。