

LY12和LC4板材的表面裂缝

断裂韧性 K_{IE} 测试报告*

崔振源 执笔

一、前 言

随着近二十多年来宇宙航行事业的迅速发展, 超高强度薄壁构件被广泛地采用, 因而脆性断裂事故相应地增多。对这类事故的研究分析表明, 在绝大多数情况下, 脆性断裂是由不穿透板厚的表面裂缝扩展引起的。由此, 推动了对表面裂缝端部应力强度因子的研究^[1]、对表面裂缝断裂力学的讨论^[2]以及对采用表面裂缝法测试板材的断裂韧性^[3]的研究。从而, 在宇航材料断裂力学研究中, 成功地运用了表面裂缝的理论。但到目前为止, 尚未制定出标准的测试方法。

用表面裂缝法测试板材断裂韧性的优点是: 方法简易, 所用仪器设备不复杂, 且能模拟实际上常遇到的表面缺陷引起的裂缝形状。

本文简要介绍用表面裂缝法在室温下研究

了LY12和LC4板材纵向(L-T)和横向(T-L)试件四种厚度(6、8、10和12毫米)的断裂韧性 K_{IE} 。具体分为以下三个方面的内容:

测试研究了LY12和LC4表面裂缝试件的厚度对断裂韧性的影响。

对采用的应力强度因子表达式计算 K_{IE} 值进行分析比较。

探索了试件在不同状态下制成人造裂缝源对断裂韧性的影响。

二、材料性能

LY12和LC4板材的化学成分列入表1。LY12的热处理状态为: 490℃盐溶槽保温1小时, 水淬, 自然时效。LC4的热处理状态是: 473℃盐溶槽保温1小时, 水淬, 122℃保温24小时, 人工时效。

LY12和LC4的常规机械性能列入表2。

表1 LY12和LC4的化学成分

合金牌号	代 号	主 要 化 学 成 分 (%)				
		Cu	Mg	Mn	Zn	Cr
12*硬铝	LY12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	—	—
4*超硬铝	LC4	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	5.0~7.0	0.10~0.25

表2 LY12和LC4的常规机械性能

代 号	取 向	板厚B(毫米)	$\sigma_{0.2}$ (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)
LY12	纵 向	6,8,10,12	30.9~31.8	48.3~49.5	17.8~20.2
	横 向	6,8,10,12	31.0~31.7	47.0~49.3	18.1~20.1
LC4	纵 向	6,8,10,12	53.1~54.2	56.7~58.2	9.1~12.3
	横 向	6,8,10,12	52.5~55.3	56.7~60.0	8.8~10.9

* 参加试件制备、试验及数据计算的有西南铝加工厂断裂力学组、宝鸡有色金属加工厂第三研究室、西北工业大学材料力学教研室断裂力学组及西工大断裂力学实验技术进修班有关同志。

三、选用的计算公式

表面裂缝在短轴端点的应力强度因子计算公式, 自从1962年Irwin提出第一个近似解答后^[1], 许多断裂力学研究人员(包括Irwin本人)提出了各种理论的和经验的修正系数, 以扩大其使用范围。有些文献^[4,5]对各种修正方法做了详细的介绍和分析, 现仅介绍 Irwin公式和Shah-Kobayashi^[6]公式。

1. Irwin公式

Irwin 导出的表面裂缝在椭圆短轴端点的应力强度因子计算公式为:

$$K_I = \frac{1.1\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{Q}} \quad (1)$$

式中: σ 为薄板两端面作用的拉应力; a 为椭圆半短轴的长度; Q 为裂缝形状参数, 其表达式为:

$$Q = \Phi^2 - 0.212 \frac{\sigma^2}{\sigma_{0.2}^2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ 为材料的名义屈服极限, Φ 为第二类完整的椭圆积分, 其表达式为:

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left(\sin^2 \phi + \frac{a^2}{C^2} \cos^2 \phi \right)^{1/2} d\phi \quad (3)$$

式中: C 为椭圆半长轴的长度。 ϕ 可按 a/c 比值, 从已知表格中查得。

在计算平面应变断裂韧性 K_{IE} 值时, σ 应采用净断面上的平均应力 σ_N :

$$\sigma_N = \frac{P_{max}}{BW - \frac{\pi ac}{2}} \quad (4)$$

式中: P_{max} 为拉断试件时的最大载荷; B 和 W 各为试件的厚度和宽度。

需要指出, 用 Irwin 公式计算 K_{IE} 值时, 裂缝尺寸必须满足 $a < c$ 和 $a/B \leq 1/2$ 两个条件。故此式适用范围较窄, 但因其形式简单, 所以在很多表面裂缝问题中仍被采用。

2. Shah-Kobayashi 公式

Shah-Kobayashi 对于前表面修正系数

M_1 采用下式计算。

$$M_1 = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{2c} \right)^2,$$

对于后表面修正系数 M_2 采用交替迭代法, 逐步逼近靠近表面内部椭圆裂缝的弹性解。如不考虑 M_1 和 M_2 间的相互作用, 则总修正系数 M_K 就等于前后表面修正系数的乘积。于是在椭圆短轴端点的应力强度因子计算公式为:

$$K_I = \frac{M_K \sigma \sqrt{\pi a}}{Q} \quad (5)$$

式中: 总修正系数 M_K 可从 M_K 与 a/c 和 a/B 间的关系图线中查得。

此解较为全面, 能满足自由表面的边界条件, 且 a/c 和 a/B 的适用范围也较广。

四、试验结果与分析

1. 用LY12两种试件的 K_{IE} 值^[7] 绘制 $K_{IE}-B$ 曲线

从图1(a)、(b)曲线可见, LY12两种试件的 K_{IE} 值均随 B 的增加而增大, 未能获得稳定的 K_{IE} 值。但它们均满足了习惯上规定的平面应变断裂韧性条件^[8-10]: $B \geq 1.0 (K_{IE}/\sigma_{0.2})^2$, $a \geq 0.5 (K_{IE}/\sigma_{0.2})^2$, $(B-a) \geq 0.5 (K_{IE}/\sigma_{0.2})^2$ 和 $r_g/(B-a) \leq 10\%$ 。由此可知, 习惯上规定的平面应变断裂韧性条件, 对LY12材料是不恰当的。

2. 用LC4两种试件的 K_{IE} 值^[7] 绘制 $K_{IE}-B$ 曲线

从〔7〕可知, LC4两种试件均满足了习惯上规定的平面应变断裂韧性的条件。但从图2(a)可见, 在 $B \geq 10$ 毫米时, 纵向试件的 K_{IE} 值趋于恒定值, 它约为 90 公斤/毫米^{3/2};

这时 $B / \left(\frac{K_{IE}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 = 3.65$, $a / \left(\frac{K_{IE}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 = 1.83$ 。

从图2(b)可见, 在 $B \geq 8$ 毫米时, 横向试件的 K_{IE} 值趋于恒定值, 等于 58 公斤/毫米^{3/2}。

这时 $B / \left(\frac{K_{IE}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 = 7.02$, $a / \left(\frac{K_{IE}}{\sigma_{0.2}} \right)^2 = 3.51$ 。

因此, 习惯上规定的平面应变断裂韧性条件, 对LC4材料也是不恰当的。

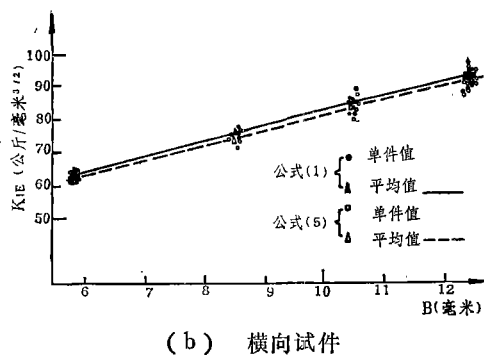
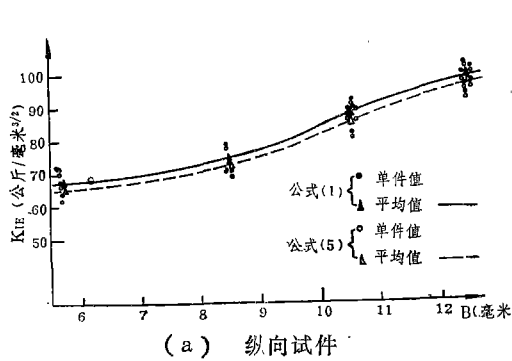


图 1 LY12试件 K_{IE} -B曲线

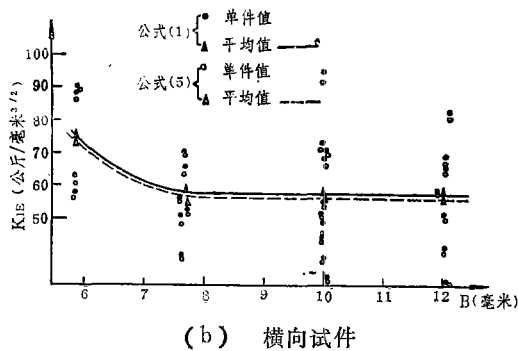
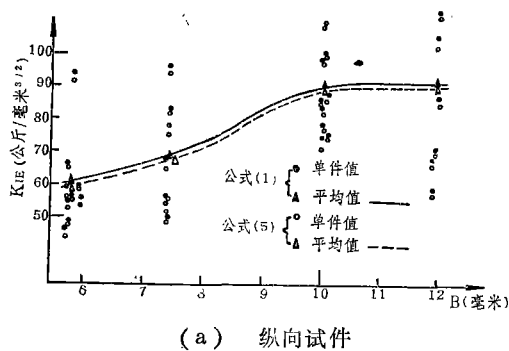


图 2 LC4试件 K_{IE} -B曲线

在 $B < 10$ 毫米时(图2 a), 纵向试件 K_{IE} 值随试件厚度减小而降低, 而 $B < 8$ 毫米时(图2 b), 横向试件 K_{IE} 值随试件厚度减小而增高。同种材料不同取向的两种试件, 在小于恒定 K_{IE} 值的厚度时, 它们的 K_{IE} -B曲线走向相反, 这是因为纵向试件的韧性较高而横向试件韧性较低的缘故。

3. LC4断口分析

从图1和2可见, LY12试件 K_{IE} 值的自恰性较好, 而LC4试件 K_{IE} 值的分散度很大, 最大的竟达106.2%。根据LC4试件断口分析, 发现各种厚度的横向试件断口均有与裂缝扩展垂直方向的裂纹, 图3(a)、(b)分别为 C_{10-02} 和 C_{10-05} 试件的低倍断口照片, 其 K_{IE} 值分别为95.9和38.2公斤/毫米^{3/2}, C_{10-02} 试件断口有六层不同长度的裂纹, 而 C_{10-05} 试件断口则未发现裂纹。有裂纹试件的 K_{IE} 值普遍较高。这是因为裂缝在扩展时遇到这种垂直于裂缝扩展方向的小裂纹, 就要消耗较多的能量。

4. 用Shah-Kobayashi公式(5)计算四种试件的 K_{IE} 值^[7]

根据不同厚度 B 的 K_{IE} 值, 绘制 K_{IE} -B曲线, 如图1和2中虚线所示。由图可见, 按两种公式计算四种试件的 K_{IE} 值极为接近, 相对误差约为2%。按Irwin公式计算值的分散度较小, 因此, 该式不仅形式简单, 且在使用条件范围内, 数值较稳定, 故在工程实践中被广泛采用。

5. 试件在不同状态下打制压痕对 K_{IE} 值的影响

用LY12 $B=8$ 和10毫米以及LC4 $B=6$ 毫米的横向试件, 分别在软状态、淬火后和时效后打制压痕, 但试件最终均处于相同的热处理制度下。试验结果的平均值 K_{IE} 和分散度^[7]列入表3。

从表可见, LY12, $B=8$ 和12毫米两种横向试件, 在软状态打压痕的试件 K_{IE} 值较高, 其分散度较小; 在淬火后打压痕的试件, K_{IE} 值略低, 其分散度较大; 在时效后打压痕的试

件, K_{IE} 值又略低, 其分散度又较大, 但它们的波动范围极微。LC4, $B=6$ 毫米横向试件, K_{IE} 值在淬火后打压痕的试件为最稳定, 其值

最低。因此, 对 LY12 板材试件应在软状态下打制压痕较好, 而 LC4 板材试件似在淬火后打制压痕为宜。

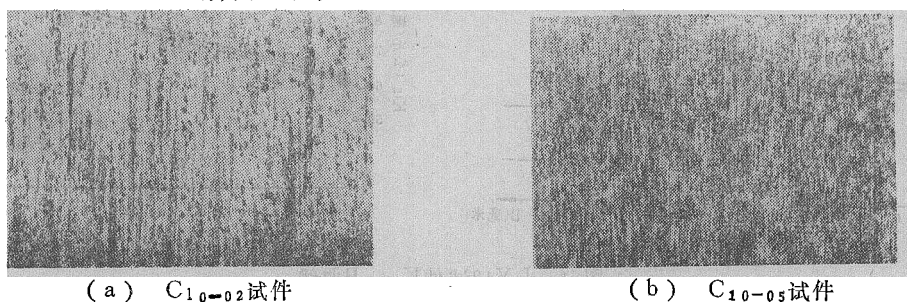


图 3 LC4 横向试件断口

表 3 试件在不同状态下打制压痕对 K_{IE} 的影响

试 件 编 号	打压痕状态	\bar{K}_{IE} (公斤/毫米 ^{3/2})	$(K_{IE_{max}} - K_{IE_{min}}) / \bar{K}_{IE}$ (%)
Y8—01~06	软 状 态	75.9	5.5
Y8—07~011	淬 火 后	71.9	11.7
Y8—012~017	时 效 后	68.8	17.5
Y10—01~06	软 状 态	84.8	10.1
Y10—07~012	淬 火 后	83.8	15.8
Y10—013~018	时 效 后	81.8	19.9
C6—01~07	软 状 态	75.6	44.2
C6—08~013	淬 火 后	51.8	22.7
C6—014~018	时 效 后	76.3	30.3

参 考 资 料

- [1] G. R. Irwin, "Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate", Journal of Applied Mechanics, Ser E, Vol.29, No.4, Dec. 1962, 651~654.
- [2] J. L. Swedlon, 《The Surface Crack Physical Problems and Computational Solutions》, ASME, 1972 西北工业大学材料力学教研室译印。
- [3] 《Fracture Toughness Testing and Its Applications》, ASTM, STP381, 1964.
- [4] 北京钢铁学院断裂韧性组: 《表面裂缝法测定高强度钢板断裂韧性的研究》, 1975, 9。
- [5] 七〇三所五室断裂韧性小组: “用表面裂纹法研究铝合金的断裂特性”, 《断裂》, 1977, 1。

- [6] R.C. Shah, A.S. Kobayashi, 《On The Surface Flaws Problem》, ASME, Nov. 26-30, 1972, 79~124.
- [7] 西北工业大学材料力学教研室断裂力学小组等, “LY12 和 LC4 板材的表面裂缝断裂韧性 K_{IF} 测试报告”, 《表面裂缝断裂韧性测试报告汇编》, 科技资料总字第740期, 1979年, 1~18。
- [8] ASTM STP 496, 40~60, 1970. 西北工业大学材料力学教研室译印。
- [9] 《断裂韧性的基本原理测试技术及应用》, 新金属材料编辑部, 1972, 8, 31~33, 39~44。
- [10] T.W. Orange, T.L. Sullivan, F.D. Calfo, “带有穿透型和部分透入型裂缝的薄截面板材的断裂”, 科技资料总字第296期, 西北工业大学材料力学教研室译印, 1976年4月, 49~66。