

温度和加载速率对 LY12CZ 薄板材料 断裂韧性的影响

徐 绯¹, 刘 斌², 刘元镛²

(1. 西安交通大学工程力学系, 陕西 西安 710049; 2. 西北工业大学工程力学系, 陕西 西安 710072)

摘要: 以飞机结构常用的铝合金材料 LY12CZ 为研究对象, 研究了温度、加载速率对平面应力弹塑性 I 型裂纹起裂和扩展的影响。通过实验研究和数值分析, 得到了以下四点结论, (1) 用断裂丝片测量裂纹稳定扩展段的长度是可行的; (2) 静态载荷作用下的起裂韧性变化不大, 但随温度的升高, 材料在裂纹扩展过程中断裂韧性会降低; (3) 低速冲击载荷作用下的弹塑性动态起裂韧性比静态值要小 40%; (4) 与增量路径无关积分的计算结果进行比较, 说明在本研究情况下, J 积分可以作为材料断裂韧性的表征参量。

关键词: 弹塑性; 温度; 加载速率; 断裂韧性; 增量路径无关积分

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(2001)01-0027-05

目前在飞机及其它重要的工程结构中, 为了提高性能、造价、重量等综合指标, 结构倾向于采用高应力水平设计。于是在线弹性断裂力学及断裂动力学的基础上, 进一步研究材料非线性对裂纹动态行为的影响极为重要。同时, 飞机在使用过程中受环境温度的影响十分严重。随飞行高度的上升, 飞机表面温度不断下降, 通常在 10000 米高空, 飞机表面温度可降到 -60℃; 而对于高速飞机, 当 Ma 数为 2.2 时, 飞机表面温度平均可达 140℃, 当 Ma 数为 3.0 时, 飞机表面温度平均可达 300℃^[1]。因此飞机结构在出现裂纹后受温度影响也十分严重。

现役飞机的结构 50% 是由 LY12CZ 硬铝合金材料制作, 虽然已有资料^[2]表明铝合金材料在平面应变条件下, 断裂韧性 K_{IC} 对温度和应变率不是十分敏感, 但是, 飞机蒙皮等承受较高温度和应变率的结构部件均为薄板材, 从断裂类型分应属于平面应力型, 温度、加载速率对弹塑性 I 型平面应力断裂韧性影响的研究有实际的工程意义。

1 积分参数的选择

对于动态弹塑性断裂问题, Nishioka 和 Atluri 提出如下与路径无关的 J 积分^[3]:

$$J = \int_s [(W + K)n_1 - t_i u_{i,1}] d\mathbf{e} + \int_{\Omega} [u_{i,1} - u_i u_{i,1}] d\Omega \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

按增量理论, 并重新定义 W 为总的外力功密度累计增量, 用 J 积分式可导出一个新的与路径无关的积分^[4], 展开后表达式如下:

$$T^* = \int_s [(w + k)n_1 - (t_i + \dot{t}_i) u_{i,1} - t_i u_{i,1}] ds + \int_{\Omega} [\dot{u}_j (\dot{u}_{j,1} + \frac{1}{2} \ddot{u}_{j,1}) - \dot{u}_j (\dot{u}_{j,1} + \frac{1}{2} \ddot{u}_{j,1}) + (\dot{u}_i + \dot{u}_i) u_{i,1} + \dot{u}_i u_{i,1} - u_i u_{i,1}] d\Omega \quad (2)$$

式中 $W = \int_0^{\epsilon} \sigma_j d\epsilon_j$ 为应变能密度, $K = \frac{1}{2} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i$ 为动能密度, $W = (\sigma_{ik} + \frac{1}{2} \rho \dot{u}_j \dot{u}_j) \dot{u}_j$, $K = (\dot{u}_i + \frac{1}{2} \rho \dot{u}_i) \dot{u}_{i,1}$, \int_s 为任一包围裂纹顶端的闭路, s 为该闭路在裂纹面上的部分, Ω 为所包围的面积, $t_i = \sigma_{ij} n_j$ 为面力矢量, n_k 为面元的外法线矢量, u_i, \dot{u}_i 与 \ddot{u}_i 分别为位移、速率和加速度矢量。在 J 理论有效的情况下, T^* 与 J 相等。鉴于 T^* 积分广泛的适用性, 本文的目的之一就是通过对 T^* 与 J 的比较, 考察 J 积分可使用的范围。

收稿日期: 2000-03-29; 修订日期: 2001-01-05

基金项目: 航空基金(96B53014)

作者简介: 徐绯(1970-), 女, 博士后。

2 试验方法

本文采用飞机结构常用的 LY12CZ 薄板材, 材料性能见表 1, 试样的几何尺寸如图 1 所示。由于试验的试件比较薄, 在标准圆孔加载的条件下有时会出现 II 型裂纹, 这与本实验的目的不符, 故采用非标准加载形式, 图 1 中的阴影为载荷夹持区。环境温度根据飞机飞行中的实际情况, 分别采用了 -55 、 20 和 150 。加载系统采用 MTS 试验机, 载荷速率有静态载荷和低速冲击载荷。在试验过程中, 分别对静载和低速冲击载荷测量了曲线, 裂纹起裂点、稳态裂纹扩展长度和快速裂纹扩展速度, 其中裂纹扩展量由断裂丝栅通过自制的线性仪来确定。所有的试验数据由四通道 TEK 数字存储示波器完成记录, 记录的试验数据还可通过该仪器回放, 并且进行数据处理。

表 1 材料在不同温度下的力学性能

Table 1 Mechanical properties of alloy LY12CZ at different temperature

Temperature/	-55	20	150
$E/\text{kg mm}^{-2}$	7458	7200	6400
$\nu/\text{kg mm}^{-2}$	0.33	0.33	0.33
$\sigma_s/\text{kg mm}^{-2}$	38.92	36.78	32.00
$E_t/\text{kg mm}^{-2}$	187	180	160

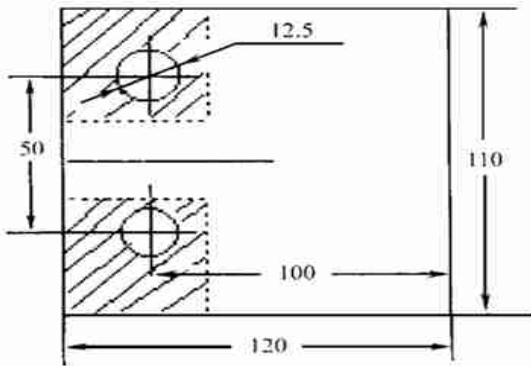


图 1 试样几何尺寸(mm)

Fig. 1 Specimen geometry(mm)

采用 DY15 动态应变仪和自制的线性仪分别记录了静态加载试验装置的外载荷、两组应变变化和一组断裂丝栅的电压变化。其中, 应变片分别位于裂尖上方 (5mm) 90 度方向和裂尖前方

(7mm) 45 度方向, 其中 90 度方向的应变片用于确定裂纹起裂时间, 45 度方向的应变片主要用于对比试验数值方法, 断裂丝栅紧靠裂尖粘贴, 丝栅间隔为 0.5mm , 共 20 根丝。当裂尖穿过电阻丝栅时, 会导致电阻丝栅断裂, 电阻丝栅两端的电压随之会发生变化, 这样就可以根据电阻丝栅两端的电压变化确定丝栅断裂的位置和时间。图 2 即是某一静载试验记录的波形变化, 图中的 1、2、3、4 曲线分别表示载荷-时间、断裂丝栅-时间、 90 度方向的应变-时间、 45 度方向的应变-时间的变化曲线, 各曲线的标定值是: 曲线 1 为 $1\text{V} = 2.5\text{kN}$, 曲线 3、4 约为 $1\text{V} = 1250$, 曲线 2 对于不同阻值的断裂丝栅标定值各不相同, 但通过曲线上台阶的变化可以得到不同载荷值所对应的裂纹扩展量。裂纹的起裂时刻通过 90 度方向的应变曲线的下降点来确定, 如曲线 3。

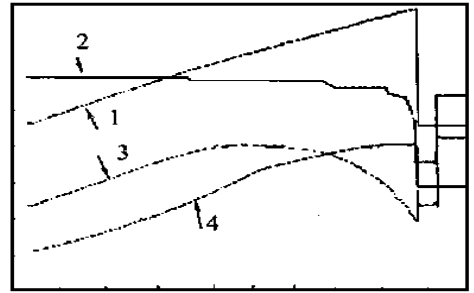


图 2 静载试验记录的波形变化

Fig. 2 Static test results of load and strains etc

1- load; 2- strain gage grid;

3- strain gage; 4- strain gage

采用超动态应变仪和自制的线性仪, 分别记录了动态加载试验装置外载荷、一组应变变化和两组断裂丝栅的电压变化。其中, 应变片位于裂尖上方 (5mm) 90 度方向, 两组断裂丝栅较均匀地粘贴在韧带, 丝栅间隔为 $2 \sim 3\text{mm}$, 总长为 20mm 。图 3 即是某一动载试验记录的波形变化, 图中的 1、2、3、4 曲线分别表示第一组断裂丝栅-时间、载荷-时间、第二组断裂丝栅-时间、 90 度方向的应变-时间的变化曲线。各曲线的标定值是: 曲线 2 为 $1\text{V} = 5\text{kN}$, 曲线 4 约为 $1\text{V} = 5000$, 通过应变曲线的上升点来判断裂纹起裂时间和对应的载荷, 通过曲线 1、3 电阻丝栅两端的电压变化, 在已知丝栅断裂间隔的情况下, 可以很方便地计算出裂纹的扩展速度。

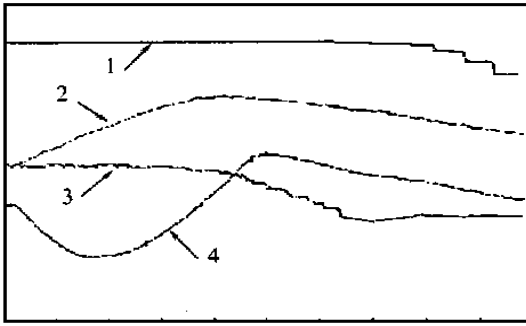


图 3 动载试验记录的波形变化

Fig. 3 Dynamic test results of load and strains etc

1- strain gage grid; 2- load;

3- strain gage grid; 4- strain gage

3 试验结果分析

3.1 数据处理

表 2 试验结果列表

Table 2 Static and dynamic test results for three different temperatures

Temperature <i>t</i>	Static Experiment			Dynamic experiment at low impact loading			
	Max. load P_{max}/kg	Initial load P_i/kg	Stable crack growth length a/mm	Max. load P_{max}/kg	Initial load P_i/kg	Initial time $t/\text{m s}$	Crack growing velocity $v/\text{m s}^{-1}$
- 55	774	480	3.0	849	423	10	0.3
20	740	463	3.5	798	401	11	0.3
150	699	435	4.0	726	361	12	0.3

4.2 稳定扩展段长度的电镜分析

稳定扩展段长度通常是采用多试件或单试件的 J 阻力曲线方法获得, 试验过程比较复杂。从本文试验图 2 可以看到, 通过排列细密的断裂丝栅也可以获得的稳定扩展段长度。

图 4 是某静拉伸断裂试件的电镜扫描分析照片, (a) 为全景图, 从中可以看出明显的稳定扩展和快速扩展的分界线, 在稳定扩展段断面与加载面垂直且较平坦, 在快速扩展段断面与加载面成 45 度, 呈剪切断口。通过图中的比例尺, 可测量出稳扩段长度; (b) 为稳定扩展段和快速扩展段的过渡区, 这里表现为一条棱带, 是不同断裂过程的分水岭。在稳定扩展段内有明显的空穴长大, 且分布比较均匀, 具有韧性断裂的显著特点; 而在快速扩展段基本没有空穴的长大过程, 具有剪切唇断裂区的断口特征。通过比较冲击拉伸断裂试件

由于 LY12CZ 材料韧性较好, 所以无论静态载荷(载荷速率 1.8kg/s)还是低速冲击的动态载荷(载荷速率 36000kg/s), 在断裂过程中起裂载荷都明显小于失稳断裂载荷。对于三种温度情况的静态载荷, $P_{max}/P_i = 1.6$, 动态载荷 $P_{max}/P_i = 2.0$ 。各组试验数据的平均结果如表 2 所示。

从表中可以看出, 随温度的升高, 断裂时的起裂载荷和最大载荷不断下降, 说明对含裂纹体, 材料的断裂韧性有所下降。但是随温度的升高, 静态加载情况下, 稳扩段的长度的增加和低速冲击载荷作用下, 起裂时间的延迟, 说明材料的韧性有所增加。裂纹扩展速度较低主要是由于加载速率和材料性能共同决定的。众所周知, 在塑性变形过程中, 材料的塑性功耗散(主要是热耗散)要消耗掉大量外部流入的能量, 其裂纹运动速度与纯弹性材料相比会有明显降低。

的电镜扫描分析照片还会发现, 上述三段区域在冲击试件中仍然存在, 只是与静拉伸试件相应的稳定扩展段明显减小, 韧窝的分布也不是很均匀。以上的电镜分析说明, 对于 LY12CZ 材料的平面应力试件, 在试验的两种载荷条件下, 断裂类型是完全一致的, 并且本文由断裂丝片测量裂纹稳定扩展段长度的结果是可信的。

4 数值分析

本文在上述试验的基础上, 利用有限元程序对裂纹起裂和扩展过程进行了模拟, 目的在于给出不同温度和加载速率情况下的断裂韧性。本文采用固定网格法, 为了避免将裂纹的连续扩展模式变为跳跃式扩展, 在计算中取裂纹扩展一步(0.5mm), 每一处约束反力按 5 步释放到零, 在每

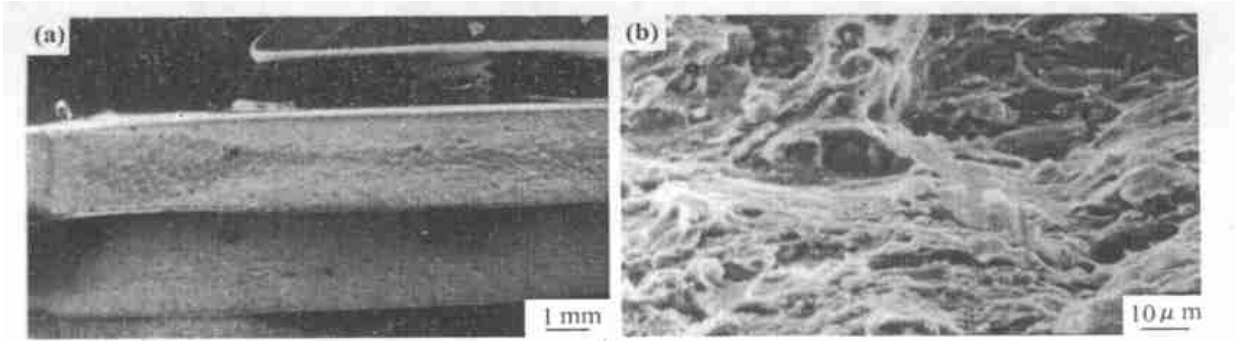


图 4 电镜扫描分析图

Fig. 4 Photographs of SEM analysis showing stable crack propagation

1- strain gage grid; 2- load; 3- strain gage grid; 4- strain gage

一步释放过程中,反复调整未释放约束的约束反力。在程序中,约束由变刚度弹簧杆元组成,杆元刚度的变化由 ADINA 程序中单元的死活来控制。同时,编制了处理裂纹扩展和计算各断裂参量(J 积分、 T^* 积分等)的有限元计算程序,扩充了该程序在弹塑性断裂分析中的计算功能。由于试验的非标准加载形式,在计算中首先应该考查有限元模拟的合理性。为此我们将试验(E)和计算(C)的载荷-加载点位移曲线(1)、载荷-裂纹张开位移(2)进行了比较,如图 5 所示。试验曲线与计

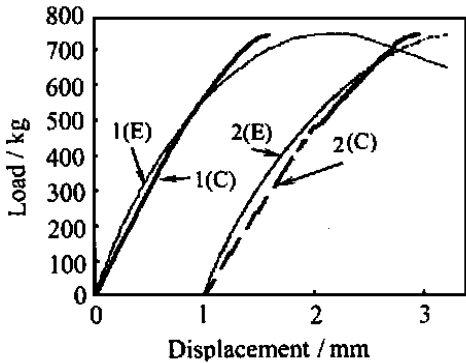


图 5 载荷位移曲线

Fig. 5 Loads vs. displacements curve

算曲线吻合较好,由此计算模型就确定了。

通过数值分析,首先可以对动态 J 积分在本实验条件下的适用性作肯定的回答,图 6 的四条曲线分别表示静态载荷作用下的积分、 J 积分,以及动态载荷作用下的积分和 J 积分。通过上述对比曲线说明,对静态实验的裂纹起裂和稳定裂纹扩展和对低速冲击实验的裂纹起裂和低速的裂纹扩展过程,如表 2 所给出的扩展长度小于 4 mm 的范围内,积分与 J 积分都基本一致,在相同

刻积分比 J 积分稍大。因此可以用动态 J 积分表征材料的断裂韧性,依照应力强度因子的定义,本文用代表准静态的弹塑性起裂断裂韧性,代表动态的弹塑性起裂断裂韧性。

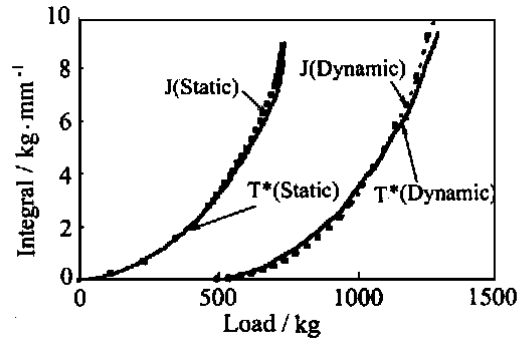
图 6 $J-T^*$ 积分对比曲线

Fig. 6 Comparisons of different integral parameters

图 7 和图 8 分别表示静态加载的 $J-a$ 阻力曲线和动态加载情况下的 $J-t$ 动态 J 积分曲线。从图 7 中可以看出三种环境温度条件下,起裂的弹塑性断裂韧性 J_c 变化不大,但随温度的升高,阻力曲线的斜率减小,失稳时断裂韧性明显降低。在低速冲击载荷作用下,随环境温度的升高, J 积分的变化趋势与静态情况完全相同,并且失稳时的 J 积分断裂韧性与静态情况也十分一致,数值上略有增大。然而值得注意的是,起裂的弹塑性动态断裂韧性 J_d 比 J_c 小得较多,对三种温度情况 J_c 分别为 4.07 kg/mm 、 3.69 kg/mm 和 3.37 kg/mm , J_d 分别为 2.49 kg/mm 、 2.27 kg/mm 和 2.03 kg/mm , J_d/J_c 约为 60%,它说明了尽管在低

速的冲击载荷作用下,用准静态断裂韧性作为设

计参数的结构将不能保证其安全性。

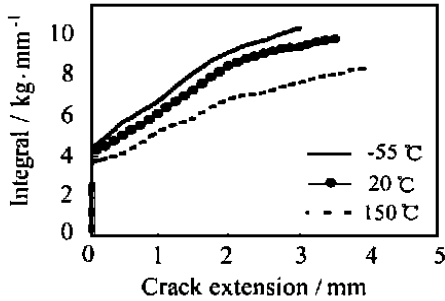


图 7 静态载荷作用下的 $J-a$ 曲线

Fig. 7 J integral with various temperatures during stable crack propagation

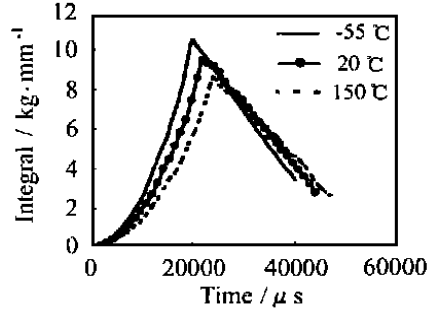


图 8 动态载荷作用下的 $J-t$ 曲线

Fig. 8 J integral with various temperatures during dynamic loading

5 结论

(1) 无论静态载荷还是动态载荷作用下的弹塑性断裂,在断裂过程中起裂载荷都小于失稳断裂载荷,对本文试验的最大载荷与起裂载荷的比值,静态载荷 $P_{max}/P_i = 1.6$,动态载荷 $P_{max}/P_i = 2.0$ 。

(2) 通过电镜扫描分析照片可以看到,平面应力弹塑性断裂的断口由三部分组成,在静拉伸和低速冲击载荷的作用下,断裂形式相同。

(3) 在低速冲击载荷作用和较短的裂纹扩展长度条件下,动态 J 积分完全能够表征材料的弹塑性断裂韧性。

(4) 铝合金材料平面应力弹塑性裂纹起裂时,如果温度范围在 $-55 \sim 150$,起裂断裂韧性 J_c 或 J_d 变化不大,但随温度的升高,阻力曲线的斜率减小,失稳时断裂韧性明显降低。

(5) 对本文研究的材料、以及温度和加载速率情况,起裂时弹塑性动态断裂韧性 J_d 比静态断裂韧性 J_c 约为 60%。

参考文献

- [1] 屈其曼. D. 现代飞机设计 [M], 北京: 国防工业出版社, 1992. 10
- [2] 赵亚溥. 裂纹动态起始问题的研究进展 [J]. 力学进展, 1996, 26(3): 362- 370.
- [3] NISHIPKA T, ALTLURI S N. On the computation of mixed mode K-factors for a dynamically propagating crack using path-independent integrals [J]. J Eng Fract Mech, 1984, 120(2): 193- 208.
- [4] ALTLURI S N, NISHIOKA T, NAKAGAKI M. Incremental Path-Independent Integrals in Inelastic and Dynamic Fracture Mechanics [J]. Eng Fract Mech, 1984, 120(2): 209- 244.

Effect of different temperature and strain rates on thin plate aluminum alloy LY12CZ

XU Fei, LIU Bin¹, LIU Yuan-yong²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, the effects of three kinds of temperature and two kinds of strain rates on the LY12CZ plate are studied. From the experimental study and the numerical analysis, four conclusions can be made. Firstly, the method to determine the stable crack growth in experiment is workable. Secondly, the initiation fracture toughness is unchanged under different temperature, while for the crack propagating process, the fracture toughness decrease as the environment temperature increase. Thirdly, the dynamic initiation fracture toughness is 40% lower than that of the quasi-static condition. Fourthly, by comparing with the incremental path-independent integral, the dynamic J integral can be used widely.

Keywords: elastic-plastic; temperature; strain rates; fracture toughness; incremental path-independent integral