

用 L-C 模型研究非线性弹性损伤

西安建筑科技大学

摘要: 重点研究了薄板在变截面拉伸试验中的非线性弹性损伤模型, 建立了 $\omega(E) = \epsilon^p$ 形式的相关三参数幂指数非线性弹性损伤模型。关键词: 非线性损伤; 幂指数; 薄板; 变截面; 拉伸试验; 分类号: O346

Labeling

file da

(1.

The test in

of non-linear

elastic damage

elasticity m

to the

or for

avior

n n-

ll

和 R

体完美, 但

各满足热力学的全

情况. 用 L-C

非线性弹性损伤模

材料. 此, 准

L-C 损伤模型的应用是非常必要的。

LY12-CZ 铝合金薄板是航空工程中一种常用的飞机蒙皮材料,其塑性损伤行为的研究是结构的耐久性和安全性分析中的基础课题之一。文献[3]、[4]针对该材料的损伤特性已开展了部分研究工作,介绍了一种薄板材料损伤变量 ω 的工程测试方法中,探讨了各种宏观与细观损伤变量的相关性,结果表明,损伤变量 ω 与表面空穴扩张状态及表面粗糙度具有较好的线性相关性。为推动损伤力学在结构分析中的应用,本文拟在以前工作的基础上,进一步研究材料的单轴塑性损伤曲线的测试方法,针对 LY12-CZ 薄板材料,重点研究非线性 L-C 塑性损伤模型参数的工程标定方法。

1 实验方法

1.1 材料与试样

材料为 LY12-CZ 铝合金薄板,厚度分别为 0.8 mm 和 2 mm,材料取向分别为纵向(L)和横向(T),其常规力学性能分别见表 1。

表 1 材料的常规力学性能

Tab. 1 Conventional dynamic property of the material

厚度/mm	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_l %	Ψ %	E /Pa
0.8	313	446	27	21	69
1.2	325	461	23	21	70

常用的等直拉伸试样的应力分布均匀,初始损伤虽然是均匀的,但经演化后逐步形成主损伤区出现的部位(破坏部位)具有随机性,不便于在实验中测控,很可能事先设定的测试部位不是最终的破坏部位,因而测不到完整的损伤演化曲线。理论分析和实验研究^[5]表明,采用图 1 所示大圆弧变截面拉伸试样,若试样形状尺寸和标距满足比例关系: $L/R, a/R \leq 15\%, l_0/R \leq 0.2$,则不仅能保证主损伤区基本固定在试样中心附近,而且能避免应力集中的显著影响。从而可以满足测试条件的要求,便于损伤的有效观测。本文采用试样的尺寸为 $R = 55 \text{ mm}, a = 7.5 \text{ mm}, l_0 = 10 \text{ mm}$ 。

1.2 拉伸试验

拉伸试验的目的是通过测试不同塑性变形状态下材料弹性模量的变化来确定损伤变量 ω 。在损伤测试中,宜采用单个引伸计实现弹塑性大应变和卸载弹性应变的同过程测量。如采用应变片测得全过程弹性模量,需要在试验中途重新贴片多次。

损伤材料的初始卸载曲线的线性差,且不稳定^[6]。在测试卸载弹性模量变化时,要经过多次加载卸载循环,直至卸载曲线斜率不再变化为止,再用稳定的斜率作为弹性模量。实验研究表明,经过 3~4 次应力循环后,弹性模量基本稳定。

拉伸试验在 Instron-1196 试验机上进行,横梁位移速率为 0.5 mm/min。采用自制高精度夹式引伸计,标距为 10 mm,量程为 50%,精度为 1%。

1.3 数据处理公式

通过拉伸试验获得的直接信息是材料整个塑性变形过程的 $P-\Delta l$ 曲线和每次卸载过程的 $P-\Delta l$ 曲线。利用下列公式,可以换算处理得到材料的损伤演化曲线。

1.3.1 单轴大应变公式

主损伤区临近破坏时其内的应变属弹塑性大应变,自然应变的计算公式为

$$\epsilon = \ln(1 + \Delta l/l_0) \quad (1)$$

式中: Δl 为标距段的变形量; l_0 为标距段的初始长度。

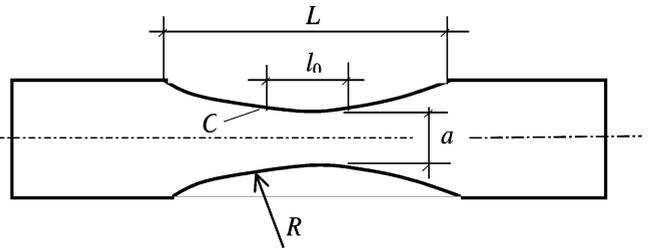


图 1 试样形状尺寸

Fig. 1 Configuration and size of the specimen

的断裂应变相差不到 4%。材料的塑性断裂应变通常与应力状态有关, 应力三轴度越大, 断裂应变越小^[7]。两种试样的断裂应变基本相同, 说明两种试样在破坏部位的应力状态是基本一致的, 故本文采用大圆弧变截面试样测试单轴塑性损伤演化曲线的方法是合理的。

表 3 两种试样的塑性断裂应变对比

Tab. 3 The comparison of plastic failure strains between two specimens

材料状态	L, b 0.8 mm	L, b 1.2 mm	T, b 0.8 mm	T, b 1.2 mm
ϵ_F (等截面)	0.163	0.165	0.162	0.165
ϵ_F (变截面)	0.157	0.159	0.167	0.163
相差/%	3.7	3.6	3.1	1.2

2.3 材料的单轴塑性损伤演化曲线及其拟合方程

针对 LY12-CZ 薄板, 图 3 描述了三种材料状态在不同单轴塑性变形时所测得的损伤变量 ω 值及其临界值 ω_c 。选择不同目标函数对损伤变量的测试值进行回归分析发现, 采用高次多项式拟合结果较好, 说明严格讲损伤演化曲线是非线性的。

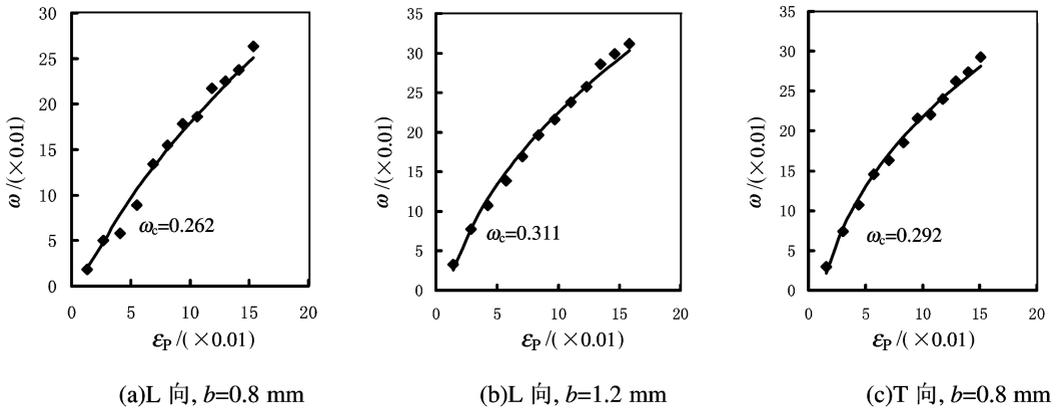


图 3 材料的塑性损伤演化曲线

Fig. 3 The ductile damage curve of the material

2.4 非线性损伤演化方程的数值迭代拟合方法

Lemaitre^[2] 提出的三维各向同性非线性塑性损伤演化方程在单轴情况可简化为:

$$\omega = \omega_c \left[\frac{\epsilon_F^{(2s_0 - n)/n} - \epsilon_0^{(2s_0 - n)/n}}{\epsilon_F^{(2s_0 - n)/n} - \epsilon_0^{(2s_0 - n)/n}} \right] \quad (5)$$

式中: ϵ_0 、 ϵ_F 分别为损伤起始应变和损伤临界应变(断裂应变); ω_c 为临界损伤变量; s_0 也是一个描述损伤状态的材料参数, 称为损伤影响指数。在 ϵ_0 、 ϵ_F 、 ϵ_c 和 s_0 四个材料常数中, 三个是独立的。 ϵ_0 和 s_0 需要通过损伤演化方程的数值拟合来确定。

根据损伤演化方程(5), 损伤曲线方程的数值拟合采用目标函数

$$\omega = A \epsilon_F^M - B \quad (6)$$

式中, A 、 B 、 M 为待定拟合参数。对比式(5)和式(6)可知, 拟合参数与损伤参数之间存在关系

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\omega_c}{\epsilon_F^{(2s_0 - n)/n} - \epsilon_0^{(2s_0 - n)/n}} \\ B &= \frac{\omega_c \epsilon_0^{(2s_0 - n)/n}}{\epsilon_F^{(2s_0 - n)/n} - \epsilon_0^{(2s_0 - n)/n}} \\ M &= (2s_0 - n)/n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由关系式(7)可知系数 A 、 B 存在关系

$$B(A, M) = A \epsilon_F^M - \omega_c \quad (8)$$

故称式(6)为相关三参数幂指数拟合目标函数。对于这种特殊形式的拟合目标函数, 由式(6)、(7)、(8),

可建立迭代方程

$$Y = \omega B(A_{i-1}, M_{i-1}) A_i \epsilon^M \quad (9)$$

迭代拟合时, 初始假定一组参数 (A_0, M_0) , 由式(8)求得 B 后, 代入式(9)可拟合求出 (A_1, M_1) ; 再将 (A_1, M_1) 代入式(8), 求得 B 后, 再代入式(9)可拟合求出 (A_2, M_2) ; 依次迭代拟合, 直至两次拟合结果相同为止. 故这种拟合方法称为非线性损伤演化方程的数值迭代-拟合方法.

采用上述方法对图 3 所示三组损伤测试数据进行拟合, 结果均比较满意, 相关指数均约为 0.99. 得到拟合参数 A 、 B 和 M 后, 便可利用关系式(7)得到损伤参数 ϵ_0 和 s_0 . 最终确定的 LY12-CZ 铝合金薄板三种状态的损伤参数汇总结果于表 4.

由表 4 可见: 对于本文所研究的三种状态, 材料的损伤与破坏具有以下规律: (1) 硬化指数 n 越大, 损伤指数 M 也越大; (2) 损伤起始应变 ϵ_0 和破坏应变 ϵ_f 分别为 0.01 和 0.16 左右, 且不敏感于材料的