

用非线性塑性模型标定 LY 12-CZ 薄板的损伤参数

周利^{1,2}, 黄义¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 五邑大学土木建筑系, 广东 江门 529020)

摘要: 重点研究了薄板材料的非线性 Lemaitre-Chaboche 塑性损伤模型参数的测试与标定方法. 首先, 利用大圆弧变截面拉伸试样检测不同塑性损伤状态下材料弹性模量的变化, 进而换算得到材料单轴塑性损伤演化曲线, 即 $\omega(E) - \epsilon P$ 曲线; 然后, 参照 Lemaitre-Chaboche 塑性损伤模型中的非线性塑性损伤演化方程, 拟定一个相关三参数幂指数函数作为目标函数, 并采用了数值迭代-拟合方法确定拟合参数; 最后标定出了材料的非线性塑性损伤模型参数. 文中还就 LY 12-CZ 薄板材料的损伤与破坏行为进行了实验测试与分析.

关键词: 非线性损伤; Lemaitre-Chaboche 模型; 损伤参数; 大圆弧变截面试样; LY 12-CZ 薄板

中图分类号: O 346

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2005) 04-0468-05 *

The labeling of non-linear model parameters for ductile damage of LY12-CZ thin-slabs

ZHOU Li^{1,2}, HUANG Yi¹

(1. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Dept. of Civil & Arch. Eng., Wuyi Univ., Jiangmen 529020, China)

Abstract: The testing methods for determining the uniaxial ductile damage and the techniques for labeling the material parameters of non-linear Lemaitre-Chaboche's ductile damage model were studied based on the experimental results. Firstly, the plastic damage variables were determined through tension tests on the necked-in specimens by measuring the damage elasticity modulus. Secondly, an exponential objective function with three related parameters was proposed according to the non-linear damage equation of Lemaitre-Chaboche's model and a numerical iterative-fit method was suggested for fitting the damage curves and determining the material damage constants. Finally, the ductile damage and failure behaviors of aluminum alloys LY 12-CZ thin-slabs were investigated both analytically and experimentally.

Key words: non-linear ductile damage, Lemaitre-Chaboche's model, damage parameter, necked-in specimen, thin-slabs of aluminum alloys LY12-CZ

Lemaitre-Chaboche 模型和 Rousselier 模型是两种最具有代表性的三维各向同性损伤理论^[1]. Rousselier 模型理论体系完美, 但其中损伤测试烦杂, 应用不多; Lemaitre-Chaboche 模型^[2] (简称 L-C 模型) 虽没有严格满足热力学的全部方程, 但因其简单方便而受到结构工程界欢迎, 并被推广用于蠕变、疲劳及其相互作用的情况. 用 L-C 损伤模型进行结构分析时, 需要通过单轴向拉伸实验标定几个材料损伤参数, 由于非线性塑性损伤模型参数的标定存在一定困难, 所以 L-C 模型往往被认为只能适用于线性塑性损伤材料. 因此, 准确测得材料的损伤演化曲线, 研究非线性损伤模型参数的标定方法, 对扩大

* 收稿日期: 2004-06-23

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(04011764)

作者简介: 周利(1961-), 男, 陕西西安人, 教授, 研究方向为材料与结构的破坏理论与应用研究.

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_s /MPa	δ_l %	Ψ %	E /GPa
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: $L = R, a/R = 15\%, l_0/R = 0.2$,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。

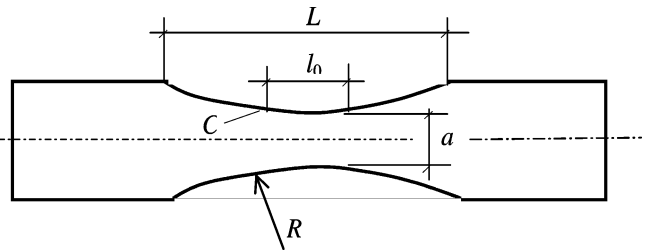


图 1 试样形状尺寸

Fig. 1 Configuration and size of the specimen

1.3.2 用变截面试样测 E 公式

文献[3]详细推得大圆弧变截面拉伸试样的测 E 公式为:

$$E = f \frac{Pl_0}{A_0 \Delta l} \tag{2}$$

式中: f 称为变截面试样按等直截面计算 E 时的形状修正系数; A_0 为试样颈部的初始横截面面积. 实验研究表明, 试样在整个弹塑性变形过程中, 系数 f 基本保持为常数.

1.3.3 损伤变量 ω

Lemaitre^[2]利用有效应力的概念, 按照弹性模量定义的损伤变量 $\omega(E)$ 为

$$\omega = 1 - \tilde{E}/E \tag{3}$$

式中: E 、 \tilde{E} 分别为材料受损伤前后的弹性模量. 由于损伤变量 ω 只与弹性模量的相对变化有关, 而试样的形状修正系数 f 又不敏感于塑性变形, 故由实验结果计算损伤变量时, 可直接取 $f = 1$.

2 结果分析与讨论

2.1 材料的应力应变曲线

图 2a、b、c 分别为由常规等直拉伸试样测得的 LY12-CZ 薄板材料在 3 种状态下的塑性应力应变曲线. 设考虑材料应变硬化的 Ramberg-Osgood 塑性应力应变关系为

$$\epsilon_p = (\sigma/K)^n \tag{4}$$

则材料常数 K 、 n 的回归结果见表 2. 可见材料拉伸常规性能与取向和厚度有关, 但差异不太明显.

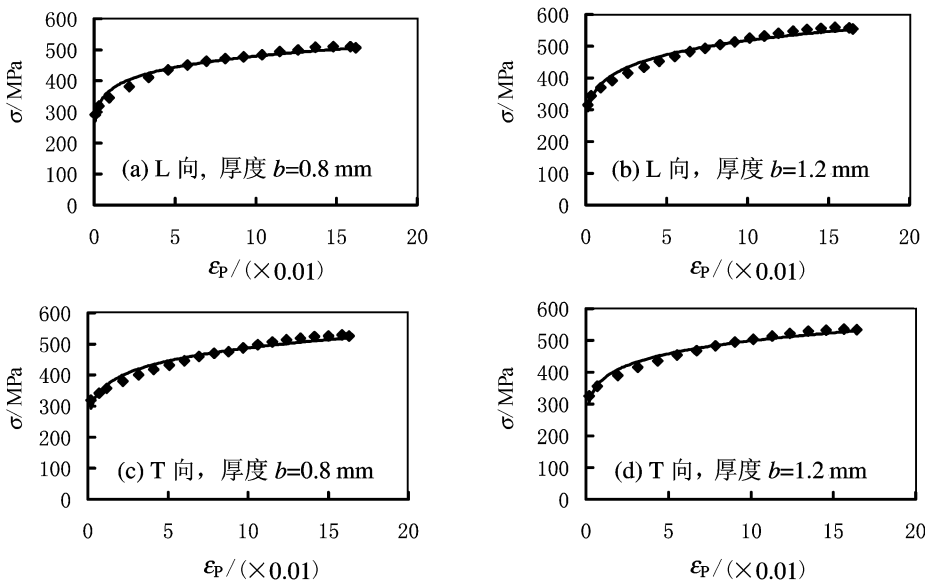


图 2 材料的塑性应力应变曲线

Fig. 2 The plastic stress-strain curves of materials

表 2 材料的应变硬化系数与指数

Tab. 1 The material strain-hardening coefficients and exponents

材料状态	L, $b = 0.8 \text{ mm}$	L, $b = 1.2 \text{ mm}$	T, $b = 0.8 \text{ mm}$	T, $b = 1.2 \text{ mm}$
K/MPa	370	383.6	360.7	376.7
n	8.92	7.68	7.67	8.20

2.2 两种试样的断裂应变对比分析

材料的单轴拉伸断裂应变是损伤分析中的重要参数之一. 本文分别采用等直拉伸试样和大圆弧变截面拉伸试样测得的薄板材料的单轴断裂应变值 ϵ_r 列于表 3. 对比分析可见, 不同材料状态下两种试样

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。

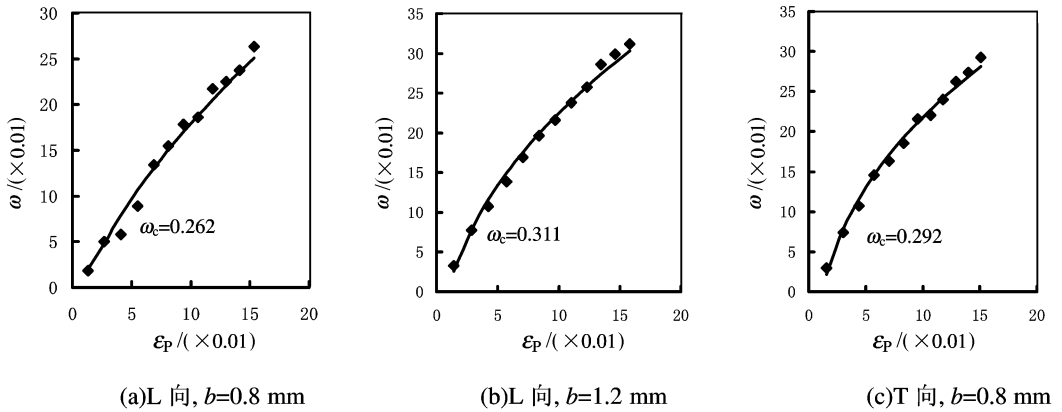


图 3 材料的塑性损伤演化曲线

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 、 ω_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

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

由关系式(7)可知系数 A 、 B 存在关系

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

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

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

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, 且不敏感于材料的厚度与取向; (3) 损伤影响指数 s_0 均为负, 其绝对值随硬化指数 n 的增加而减小。

表 4 材料损伤参数测试结果

Tab. 4 The test results of damage parameters

材料状态	n	ϵ_0	ω	A	M	ϵ_0	s_0
L, $b=0.8\text{ mm}$	8.92	0.163	0.262	0.057 63	0.615	0.010 15	-1.717
T, $b=0.8\text{ mm}$	7.68	0.162	0.292	0.119 93	0.452	0.00 908	-2.104
L, $b=1.2\text{ mm}$	7.67	0.165	0.311	0.192 45	0.339	0.011 56	-2.530

4 结 论

本文采用大圆弧变截面拉伸试样测试分析了 LY12-CZ 薄板材料的损伤演化曲线, 并针对 Lemaitre-Chaboche 塑性损伤模型, 提出了一种标定材料非线性塑性损伤参数的数值迭代拟合方法。针对 LY12-CZ 薄板材料的实验研究和分析, 可得出以下结论:

(1) 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;

(2) 采用相关三参数幂指数拟合目标函数及其数值迭代-拟合方法对于确定非线性损伤演化方程和模型参数是切实可行的;

(3) 对于本文所研究的三种材料状态, 其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; 而破坏应变基本相同; 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, 且不敏感于材料的厚度与取向; ③损伤影响指数 s_0 均为负, 其绝对值随硬化指数 n 的增加而减小。

本文介绍的损伤测试方法和提出非线性损伤模型参数的标定方法, 有待于采用多种材料做进一步的适用性研究, 使其更加完善。关于塑性损伤起始应变的门槛值的确定, 还需要从细观损伤机理方面进行深入细致的测试分析。

(说明: 本文有关实验是在作者指导下, 由赵银燕同志在作硕士论文过程中完成的)

参考文献:

- [1] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [2] Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. J. of Engng. Materials and Technology, 1985, 107: 83-89.
- [3] 赵银燕, 周利. LY12-CZ 薄板拉伸过程中宏、细观损伤变量间的相关性分析[J]. 航空学报, 1998, 19(2): 164-168.
- [4] 赵银燕, 周利. 用变截面试样测量损伤变量 $D(E)$ [J]. 航空学报, 1998, 19(2): 164-168.
- [5] 周利, 黄义. 利用位移引伸计测定薄板单轴损伤演化曲线的试验方法研究[J]. 实验力学, 2004, 19(1): 56-60.
- [6] 吴鸿遥. 损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [7] 郑长卿, 周利, 张克实. 金属韧性破坏的细观力学及其应用研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.