

用非线性损伤模型标定 LY 12-CZ 薄板的损伤参数

利^{1,2}, 黄 义¹

西安 710055; 2. 五邑大学土木建筑系, 广东 江门 529020

(1. 西安建筑科技大学)

摘要: 重点研究了薄板材料非线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验得到材料非线性损伤演化曲线, 即 $\omega(E) \sim \epsilon^p$ 形式, 然后提出一个相关三参数幂指数的非线性塑性损伤模型. **关键词:** 非线性损伤; 损伤参数; 大圆弧变截面试样; LY 12-CZ 薄板
中图分类号: O 346

Lemaiter-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验得到材料非线性损伤演化曲线, 进而换算得到材料单轴塑性损伤演化曲线, 然后提出一个相关三参数幂指数的非线性塑性损伤演化方程, 假定材料损伤演化符合幂指数形式, 最后采用数值迭代-拟合方法确定拟合参数; 最后标定出了材料 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; 损伤参数; 大圆弧变截面试样; LY 12-CZ 薄板
文章编号: 1006-7930(2005) 04-0468-05 *

The labeling of model parameters for ductile damage LY 12-CZ thin-slabs

Li^{1,2}, HUANG Yi¹

Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
Wuyi Univ., Jiangmen 529020, China)

(1. Sch...
2. I...

Abstract: The testing method and the techniques for labeling the material damage model parameters of non-linear ductile damage model were studied based on the experimental results. Firstly, the plastic damage evolution curve was obtained through tension tests on the necked-in specimens by measuring the damage evolution curve. Then a three-parameter power-law objective function with three related parameters was proposed according to the non-linear damage evolution curve. A numerical iterative-fit method was suggested for fitting the damage evolution curve. Finally, the ductile damage and failure behaviors of aluminum LY12-CZ thin-slabs were investigated both analytically and experimentally.
Key words: non-linear ductile damage model, damage parameter, necked-in specimen, thin-slabs of aluminum alloys LY12-CZ

ductile damage and the techniques for labeling the material damage model parameters of non-linear ductile damage model were studied based on the experimental results. Firstly, the plastic damage evolution curve was obtained through tension tests on the necked-in specimens by measuring the damage evolution curve. Then a three-parameter power-law objective function with three related parameters was proposed according to the non-linear damage evolution curve. A numerical iterative-fit method was suggested for fitting the damage evolution curve. Finally, the ductile damage and failure behaviors of aluminum LY12-CZ thin-slabs were investigated both analytically and experimentally.
Key words: non-linear ductile damage model, damage parameter, necked-in specimen, thin-slabs of aluminum alloys LY12-CZ

Lemaiter-Chaboche 模型理论体系. Rousselier 模型理论体系(模型)虽没有严格满足并疲劳及其相互作用的情损伤参数, 由于非线性损伤演化曲线, 研究非线性损伤模型参数的标定方法, 对扩大

模型是两种最具有代表性的三维各向同性损伤理论^[1]. 试验烦杂, 应用不多; Lemaiter-Chaboche 模型^[2](简称 L-C 模型)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损伤参数, 需要通过单轴向拉伸实验标定几个材料损伤模型参数, 标定存在一定困难, 所以 L-C 模型往往被认为只能适用于非线性损伤演化曲线, 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

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 /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 $R = 55$ mm, $a = 7.5$ mm, $l_0 = 10$ 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。

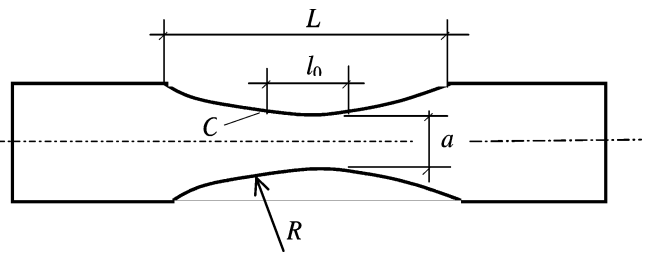


图 1 试样形状尺寸

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 * Pl_0 / (A_0 * \Delta l) (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 \omega

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 - E/E_0 (3)

式中: E_0、E 分别为材料受损伤前后的弹性模量. 由于损伤变量 \omega 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 (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.

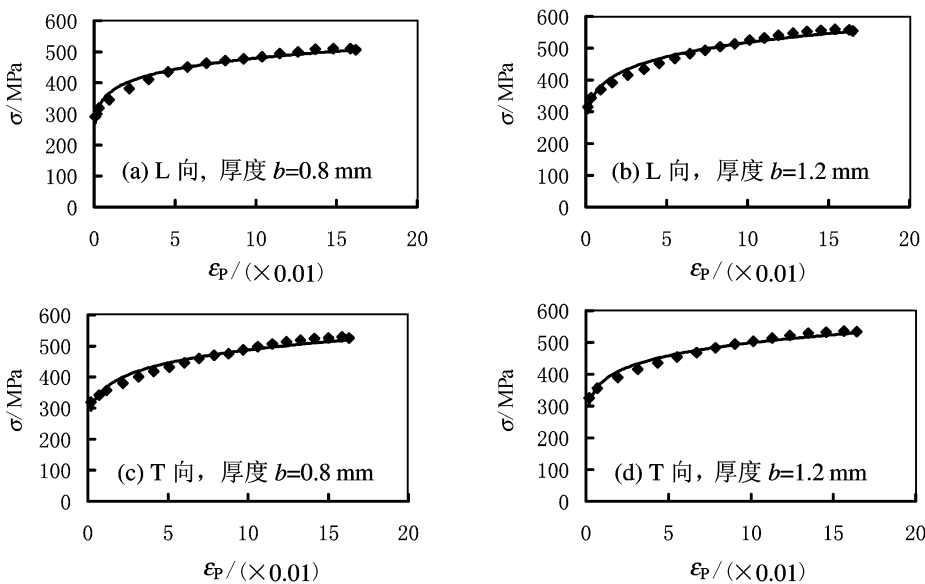


图 2 材料的塑性应力应变曲线

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

Table with 5 columns: Material State, L, b = 0.8 mm, L, b = 1.2 mm, T, b = 0.8 mm, T, b = 1.2 mm. Rows for K/MPa and n.

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 \epsilon_r 列于表 3. 对比分析可见, 不同材料状态下两种试样

2
10
p/(×0
向, b=

20
(
向, b=0.8 mm

非... 方程的...
Le... 的三维

可简化为:

(3)

式中... 为... 引起...
与状态... 效, ... 损伤...
过员伤... 的类... 拟合...
根据损... 系...), 损

界损伤变量; s_0 也是一个描述...
中, 三个是独立的. ϵ_0 和 s_0 需要

(6)

R, M 为... 拟合参数.

参数之间存在关系

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