

# 板 损

究 江 门

方法.  
单轴型  
演化力  
标定  
分析

ra da

& T..., Xi'an... 5, C...  
v., Jiangmen 5290... China

damage and... technique...  
model were stu...  
ion tests on th...  
unoti...

两

只能适用...  
方法,对扩...

飞机蒙皮材料,其塑性损伤行为的研究是... 针对该材料的损伤特性已开展了部分... 探讨了各种宏观与细观损伤变量... 精度具有较好的线性相关性.为推... 进一步研究材料的单轴塑性损伤... 塑性损伤模型参数的工程标准

度分别为0.8

其常

的部  
位,因  
标,未  
固定  
交观

1

下  
劣  
变和  
刺  
多次

6  
或卸  
次

作  
计,标  
距为10 mm,量程为100%,精度为

1.3

据  
过拉  
和

应  
变

算

$$\ln(1 + \Delta/l_0)$$

(1)

### 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:

$$E = f \frac{Pl_0}{A_0 \Delta l} \quad (2)$$

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<sup>[2]</sup>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

$$\omega = 1 - \tilde{E}/E \quad (3)$$

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  $\omega$  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

$$\epsilon_p = (\sigma/K)^n \quad (4)$$

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.

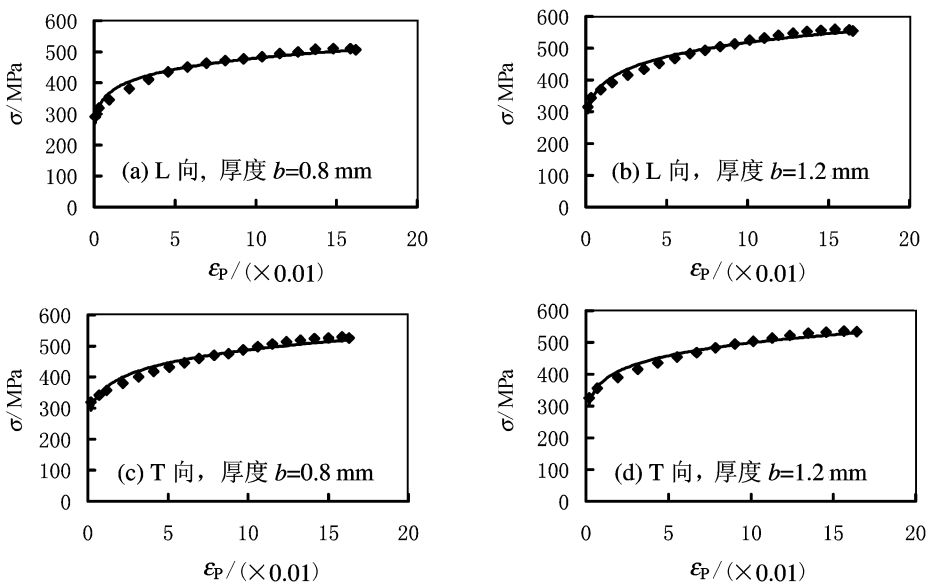


图 2 材料的塑性应力应变曲线

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, $b = 1.2 \text{ mm}$ |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $K/\text{MPa}$ | 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  $\epsilon_r$  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且较小<sup>[7]</sup>。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

| 材料状态               | L, b= 0.8 mm | L, b= 1.2 mm | T |
|--------------------|--------------|--------------|---|
| $\epsilon_f$ (等截面) | 0.163        | 0.165        |   |
| $\epsilon_f$ (变截面) | 0.157        | 0.159        |   |
| 相差/%               | 3.7          | 3.6          |   |

### 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拉伸临界值  $\omega_c$ 。选择不同目标函数对损伤变量的测试值进行回归分析, 说明严格讲损伤演化曲线是非线性的。

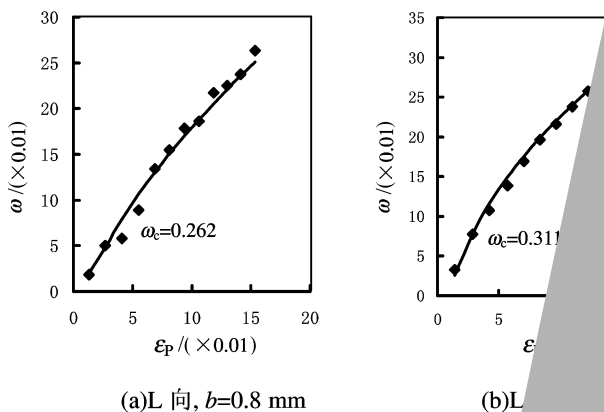


图 3 材料的塑性损伤演化曲线  
Fig. 3 The ductile damage evolution curve

### 2.4 非线性损伤演化方程的数值迭代拟合方法

Lemaitre<sup>[2]</sup> 提出的三维各向同性非线性塑性损伤演化方程为

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 \left[ \frac{\epsilon_p - \epsilon_0}{\epsilon_f - \epsilon_0} \right]^{2s_0} + \omega_2 \left[ \frac{\epsilon_p - \epsilon_0}{\epsilon_f - \epsilon_0} \right]^{2s_0+n}$$

式中:  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_f$  分别为损伤起始应变和损伤临界应变;  $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为材料参数, 称为损伤影响指数。在  $\epsilon_0$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$  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形式为

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $M$  为待定拟合参数。对比式(5)和式(6)可得

$$\begin{aligned} A &= \omega_0 + \omega_1 \left[ \frac{\epsilon_f - \epsilon_0}{\epsilon_f - \epsilon_0} \right]^{2s_0} \\ B &= \omega_2 \left[ \frac{\epsilon_f - \epsilon_0}{\epsilon_f - \epsilon_0} \right]^{2s_0+n} \\ M &= (2s_0 + n) / n \end{aligned} \tag{7}$$

由关系式(7)可得

$$B(A, M) = A \epsilon_f^M - \omega_0 \tag{8}$$

故称式(8)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, 其拟合精度

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 $\epsilon_0$ 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 $\epsilon_0$ 和破坏应变 $\epsilon^f$ 分别为 0.01 和 0.16 左右, 且不敏感于材料的