

复合材料厚板失效分析方法

1、Ramberg-Osgood 非线性本构

传统的各向异性线弹性本构并不能较好地表征复合材料厚板的应力-应变关系，此处参考《伍春波.复合材料厚板双轴非线性渐进失效分析[D].上海:上海交通大学,2012.》采用 Ramberg-Osgood 非线性本构。

使用 Ramberg-Osgood 非线性本构，共有六个相互间并不耦合的方向上的应力应变关系，写成显式方程如下式所示

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{\left(1 + \left|\frac{E_0 \varepsilon}{\sigma_0}\right|^n\right)^{\frac{1}{n}}}$$

式中：E₀为初始切线模量；σ₀为塑性应力；n为应力应变曲线形状参数，ε为应变值。对于考虑厚度方向应力应变的三维单向带模型而言，此处的所有参数均有 11、22、33、12、13、23 六个对应的值。

在有限元计算时，需要知道增量计算过程中的瞬时模量，以更新刚度矩阵，由下式可以推导出瞬时切线模量值：

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{E_0}{\left(1 + \left|\frac{E_0 \varepsilon}{\sigma_0}\right|^n\right)^{\left(1 + \frac{1}{n}\right)}}$$

2、3D-Hashin 失效准则（应力形式）

①纤维拉伸失效模式：

$$\xi_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{31}^2}{S_{13}^2} - 1 \geq 0$$

②纤维压缩失效模式：

$$\xi_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \geq 0$$

③基体拉伸失效模式：

$$\xi_{Mt} = \frac{1}{Y_t^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_{23}^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_{12}^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{31}^2) - 1 \geq 0$$

④基体压缩失效模式：

$$\xi_{Mc} = \frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_{23}^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_{23}^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_{12}^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{31}^2) - 1 \geq 0$$

3、Camaho 刚度折减方案

非线性本构较难同指数化损伤演化协同使用，此处使用广泛应用的 Camaho 刚度折减方案，不同失效模式下的折减系数如下所示：

失效模式	折减方案
基体拉伸或剪切失效	$(E_2^d = 0.2E_2), (G_{12}^d = 0.2G_{12}), (G_{23}^d = 0.2G_{23})$
基体压缩或剪切失效	$(E_2^d = 0.4E_2), (G_{12}^d = 0.4G_{12}), (G_{23}^d = 0.4G_{23})$
纤维拉伸失效	$(E_1^d = 0.07E_1)$
纤维压缩失效	$(E_1^d = 0.14E_1)$

4、层合板的本构模型（经典层合板理论）

在定义好复合材料单层的非线性本构、失效准则、刚度折减方案后，暂以经典层合板理论作为层压板的本构模型，后续也可考虑改用 Chou 提出的三维介质层压理论。

5、UMAT 实现

编写 UMAT 子程序代码如附件 [UMAT_for_ROR_Hashin.for](#) 所示，基本实现上述功能。

6、本构参数定义

请参考《伍春波.复合材料厚板双轴非线性渐进失效分析[D].上海:上海交通大学,2012.》。