Mater. Rep. B, 2020, Vol. 34, No. 9
DOI: 10.11896/cldb.20020005
http://www.mater-rep.com http://www.mr-int.net

[补充信息]

复合材料非线性渐进损伤分析模型的建立及工程应用

张承承

北京航空航天大学能源与动力工程学院，北京 100191

[Supplementary Information]

Model of Composite Materials Nonlinear Progressive Damage and Engineering Application

ZHANG Chengcheng

School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

复合材料结构损伤演化规律数学分析

损伤变量作为材料的内部状态变量，损伤随着外加载荷的大小或时间而发展变化，如何建立损伤演化方程从理论上还没有很好解决。目前，在工程应用上建立损伤演化方程主要有以下几种方法：实验（或经验）方法、细观力学方法、不可逆热力学方法以及等价位移方法等，其中只从细观力学分析得到的损伤演化方程难以达到很好的精度，在工程上还没有实现很好地应用。目前，国内外学者对损伤演化方程的主要研究形式是由其他三种方法中得到的，得到了不同的损伤演化方程。

方程可分为两种：一种是与结构的应力、应变状态无关；另一种是与结构的应力、应变状态相关，例如等价位移法得到的损伤演化方程与结构应变相关等，此方法更符合实际情况。

从损伤变量的相关物理背景可知，损伤变量必须满足热力学不可逆定理，即损伤过程是不可逆的。损伤变量在材料等效应变 f 小于 1 的情况下为 0；当 f 大于 1 时，损伤发生并演化，同时是关于 f 的单调增函数，即

$$d=\begin{cases}0, |f|\le 1\\ 0\sim 1,\uparrow, |f|\succ 1\end{cases} \tag{1}$$

综合相关文献，损伤变量可通过多个内部函数表示，如下：

$$d_i=1-m_1(f_i)m_2(f_i)\cdots m_n(f_i) \tag{2}$$

式中：$m_1(f_i)$、$m_2(f_i)$、$m_n(f_i)$—是关于 f_i 的内部函数，并且同样是关于 f 的单调增函数，其值域为（0,1）。可根据材料以及实际情况，选择内部函数的个数。

理论上，只要满足内部函数基本要求的任何函数均可以用来定义内部函数，参考已有的损伤变量的定义，可给出几个通用的函数表达式。

$$\begin{aligned}
m_1(x)&=\frac{\left(a_m x^m+\cdots+a_1x^1\right)/\left(a_m+\cdots+a_1\right)}{\left(b_n x^n+\cdots+b_1x^1\right)/\left(b_n+\cdots+b_1\right)}, n\succ m\\
m_2(x)&=1-\left[1-(1/x)^n\right]^{(1/n+1)}\\
m_3(x)&=\exp\left(1-1/m_1(x)\right)\\
m_4(x)&=\exp\left(\left(a_n+\cdots+a_1\right)-a_nx^n-\cdots-a_1x\right)
\end{aligned} \tag{3}$$

✉cheng890630@163.com

式中，a_m、b_n 为待定系数，可根据试验或试错法确定。

采用不同的函数形式，其变化形式基本相同，均是从 0 单调递增到 1，但是变化过程的趋势是不同的，主要是在初始阶段的曲率不同。如果按照工程材料性质选定一个合适的函数序列，然后再根据其真实的应力-应变关系选择其中某个确定的函数，将会建立一个更为精确的本构模型，从而获得更好的数值结果。通过对损伤演化规律的研究方法和结构形式的分析可得，损伤演化方程一般为直线型和指数型，通过分析结构损伤的实际演化规律可得，在损伤初始时刻，损伤发展较快，但是随着损伤扩展，损伤发展更趋于平缓，损伤参数趋近于 1，所以对于指数型和直线型的损伤演化方程，指数型损伤演化规律更符合结构在受载时的工程实际状况。

有限元模型的建立

1）网格的划分

因为复合材料的强度失效理论采用单元的应力进行判定，所以计算受有限元网格的影响非常大，网格单元质量的好坏直接影响结构强度数值模拟的准确性，主要包括三个方面：有限元单元的选择、网格密度的大小以及网格的分布形式。

使用三维实体单元 solid185，具有 8 个节点，对于层合结构，可以以单元厚度为每层厚度，考虑各层间相互作用，并且可以构建三维实体结构的有限元分析模型。首先对结构的受力情况进行初步的计算分析，为了提高计算效率，在结构受力较小且比较均匀的区域，网格数量可以少一些，然后在结构受力较大区域例如开孔壁板结构的开孔附近加密网格。网格的分布形式。若结构受力状态具有对称性，则网格划分也应具有对称性。本文的三类典型结构的受力状态均具有对称性，所以网格的分布形式均具有对称性。如图 1 所示。

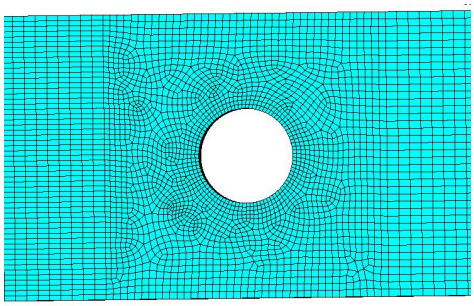

图 1 开孔壁板结构开孔附近网格示意图

2）边界条件和加载方式的确定

通过分析构件的试验条件和夹持方式，确定有限元模型的边界条件。例如开孔壁板典型样件的试验加载方式，为两端加厚位置通过销钉孔加载试验工装，因为试验工装的刚度、强度远远大于试验件，则在结构工装位置处，其位移值很小，所以在建立其分析模型时，可在结构工装加载面位置处施加全约束。确定分析模型的载荷施加方式。例如开孔壁板和肋板结构在施加拉伸或弯曲载荷时，均是同时在分析模型加载面的所有节点上施加位移载荷。

而对肋板结构施加扭转载荷即对其施加扭转角度时，因 solid185 单元的节点位移载荷只有 UX、UY、UZ 三个方向，可采用对加载面每一个对称位置的节点施加相反的位移载荷，此种方法理论上可行，但是实际操作比较复杂，且节点数必须是偶数。本文在对肋板结构施加扭转载荷时，使用了定义局部刚性区域施加扭矩的方法。在加载面的中心位置生成一个节点，并在此节点上生成一个质量单元（mass21），然后将加载面上的所有节点构成一个组件，与质量单元之间建立刚性连接。而在 ANSYS 软件中，可在质量单元的节点上直接施加扭转载荷。此方法可简便地对不同结构形式、不同加载面加载扭转载荷，但是此方法在加载面额外的增加了一定的刚度，所以只适用于结构的小变形分析。

渐进损伤分析程序

程序的编制难点在于把损伤演化方程代入到有限元分析中，建立含损伤的本构关系，并随着时间变化

而变化，其本质上是非线性问题。重点是把强度失效准则和刚度退化方程加入到有限元计算中。

Tsai-Wu 强度准则的部分 APDL 程序，如下所示。

```
*DO,J,1,N!定义 Tsai-Wu 强度失效准则公式
U1(J)=QT11(J)*FF1+(QT11(J)**2)*FF11+(QT11(J)*QT22(J))*FF12+(QT11(J)*QT33(J))*FF13
U2(J)=QT22(J)*FF2+(QT22(J)**2)*FF22+(QT11(J)*QT22(J))*FF12+(QT22(J)*QT33(J))*FF23
U3(J)=QT33(J)*FF3+(QT33(J)**2)*FF33+(QT11(J)*QT33(J))*FF13+(QT22(J)*QT33(J))*FF23
U4(J)=((QT12(J))**2)*FF44
U5(J)=((QT13(J))**2)*FF55
U6(J)=((QT23(J))**2)*FF66
UU(J)=U1(J)+U2(J)+U3(J)+U4(J)+U5(J)+U6(J)
*ENDDO
```

通过引入指数型损伤演化方程，建立含损伤的本构关系，损伤演化方程的部分程序如下所示。

```
*DO,J,1,N!初始强度因子计算
*IF,CS(J),EQ,1,THEN
U10(J)=ABS(U1(J))
U20(J)=ABS(U2(J))
U30(J)=ABS(U3(J))
U40(J)=ABS(U4(J))
U50(J)=ABS(U5(J))
U60(J)=ABS(U6(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U1(J),GT,U10(J),THEN!计算损伤因子
O1(J)=ABS(((U1(J)-U10(J))/(1-U10(J)))**0.8)
D1(J)=1-EXP(-4.6*O1(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U2(J),GT,U20(J),THEN
O2(J)=ABS(((U2(J)-U20(J))/(1-U20(J)))**0.8)
D2(J)=1-EXP(-4.6*O2(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U3(J),GT,U30(J),THEN
O3(J)=ABS(((U3(J)-U30(J))/(1-U30(J)))**0.8)
D3(J)=1-EXP(-4.6*O3(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U4(J),GT,U40(J),THEN
O4(J)=ABS(((U4(J)-U40(J))/(1-U40(J)))**0.8)
D4(J)=1-EXP(-4.6*O4(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U5(J),GT,U50(J),THEN
O5(J)=ABS(((U5(J)-U50(J))/(1-U50(J)))**0.8)
D5(J)=1-EXP(-4.6*O5(J))
*ENDIF
*IF,CS(J),GE,2,AND,U6(J),GT,U60(J),THEN
O6(J)=ABS(((U6(J)-U60(J))/(1-U60(J)))**0.8)
D6(J)=1-EXP(-4.6*O6(J))
*ENDIF
*ENDDO
```