


ANSYS

ANSYS 疲劳断裂复合材料

分析指标

The background of the slide is a dark blue, textured surface. A large, semi-circular grid pattern is centered in the upper half, resembling a dome or a fan. Below the grid, there are several dark, rectangular shapes that look like simulation components or parts. One of these shapes has a crack running through it, and there are arrows pointing towards the crack, indicating stress or force. The overall aesthetic is technical and futuristic.

*SIMULATIONS
CLOSEST
TO
REALITY*



数据加载失败，请稍后重试！

目录

第一章 断裂力学	1
断裂力学的定义	1
断裂力学的求解	1
裂纹区域的模拟:	2
2-D 断裂模型:	3
3-D 断裂模型	3
计算断裂参数	4
应力强度因子	4
J 积分	6
能量释放率	8
应用实例	9
第二章 疲劳	10
疲劳的定义:	10
ANSYS 程序处理疲劳问题的过程	10
基本术语	10
疲劳计算过程	11
应用实例	22
第三章 复合材料	21
复合材料定义	21
建立复合材料模型	21
复合材料分析实例 (命令流和批处理方式)	33

第一章 断裂力学

断裂力学的定义

在许多结构和零部件中存在的裂纹和缺陷，有时会导致灾难性的后果。断裂力学在工程领域的应用就是要解决裂纹和缺陷的扩展问题。

断裂力学是研究载荷作用下结构中的裂纹是怎样扩展的，并对有关的裂纹扩展和断裂失效用实验的结果进行预测。它是通过计算裂纹区域和破坏结构的断裂参数来预测的，如应力强度因子，它能估算裂纹扩展速率。一般情况下，裂纹的扩展是随着作用在构件上的循环载荷次数而增加的。如飞机机舱中的裂纹扩展，它与机舱加压及减压有关。此外，环境条件，如温度、或大范围的辐射都能影响材料的断裂特性。

典型的断裂参数有：

- 伴随着三种基本断裂模型的应力强度因子 (K_I 、 K_{II} 、 K_{III}) (见图 10-1)；
- J 积分，它定义为与积分路径无关的线积分，能度量裂纹尖端附近奇异应力与应变的强度；
- 能量释放率 (G)，它反映裂纹张开或闭合时功的大小；

注意：在本节大部分的图形中裂纹的宽度是放大了许多倍的。

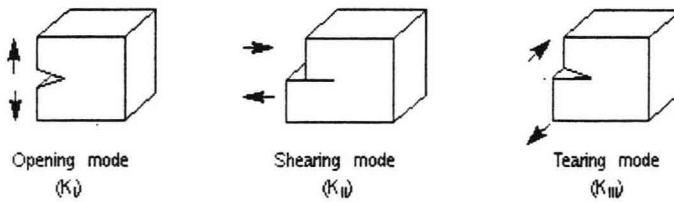


图 10-1 三种基本的断裂模型

断裂力学的求解

求解断裂力学问题的步骤，包括先进行弹性分析或弹塑性静力分析，然后用特殊的后处理命令，或宏命令计算所需的断裂参数。本章我们集中讨论下列两个主要的处理过程。

- 裂纹区域的模拟

- 计算断裂参数

请参考一般静力分析过程和结构非线性相关资料。

裂纹区域的模拟:

在断裂模型中最重要的区域是围绕裂纹边缘的部位。裂纹的边缘, 在 2D 模型中称为裂纹尖端, 在 3D 模型中称为裂纹前缘。如图 10-2 所示。

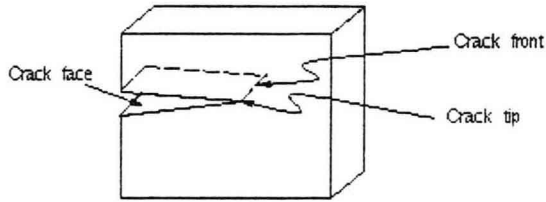


图 10-2 裂纹尖端和裂纹前缘

在线弹性问题中, 在裂纹尖端附近 (或裂纹前缘) 某点的位移随 \sqrt{r} 而变化, r 是裂纹尖端到该点的距离, 裂纹尖端处的应力与应变是奇异的, 随 $1/\sqrt{r}$ 变化。先选取应变奇异点, (相应的裂纹面需与它一致), 然后围绕裂纹顶点的有限元单元应该是二次奇异单元, 它是把单元边上的中节点放到 $1/4$ 边处。图 10-3 表示 2-D 和 3-D 模型的奇异单元

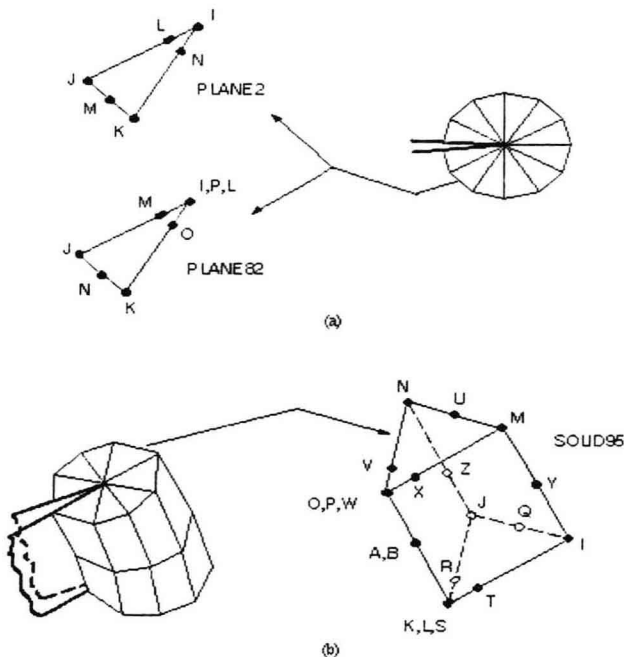


图 10-3 2-D 和 3-D 模型的奇异单元

2-D 断裂模型:

适用于 2D 断裂模型的单元, 是 PLANE2, 六节点三角形单元, 如图 10-3 (a) 所示, 围绕裂纹尖端的第一行单元, 必须具有奇异性, .PREP7 中 KSCON 命令 (GUI 路径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Shape&Size>-ConcentratKPS-Create) 用于指定围绕关键点 (keypoint) 的单元大小, 它适用于断裂模型。本命令自动围绕指定的关键点产生奇异单元。命令的其他功能可以控制第一行单元的半径, 以及控制周围的单元数目等, 图 10-4 显示用 KSCDN 命令产生的断裂模型。

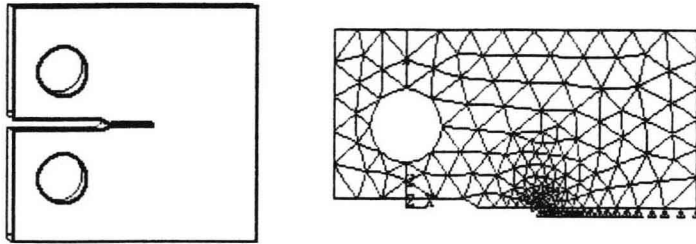


图 10-4 断裂试件及它的 2-D 断裂模型

其他 2-D 模型的建立请遵从如下规则:

- 尽可能利用对称条件。在许多情况下根据对称或反对称边界条件, 只需要模拟裂纹区的一半, 如下所示:

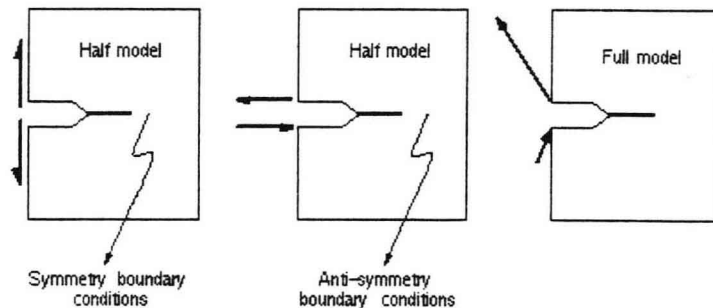


图 10-5 利用对称条件

- 为获得理想的计算结果, 围绕裂纹尖端的第一行单元, 其半径应该是八分之一裂纹长或更小。沿裂纹周向每一单元最好有 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 角度。
- 裂纹尖端的单元不能有扭曲, 最好是等腰三角形。

3-D 断裂模型

三维模型推荐使用的单元类型为 SOLID95, 20 节点块体元, 如图 10-3 (b) 所示。围绕裂纹前缘的第一行单元应该是奇异单元, 这种单元是楔形的, 而单元

的 KLPO 面退化成 KO 线。

产生三维断裂模型要比二维模型复杂，命令 KSCON 不能用于三维模型，必须要保证裂纹前缘是沿着单元的 KO 边。

建立三维断裂模型请遵从如下的规则：

- 推荐的单元尺寸与二维模型一样，此外在所有的方向上，单元的相邻边之比不能超过 4: 1。
- 在弯曲裂纹前缘上单元的大小取决于局部曲率的数值，例如，沿圆环状弯曲裂纹前缘，在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 的角度内至少有一个单元。
- 所有单元的边（包括在裂纹前缘上的）都应该是直线。

计算断裂参数

在静态分析完成后就可以使用通用后处理器 POST1 来计算断裂参数，如前面提到的应力强度因子、J 积分及能量释放率。

应力强度因子

用 POST1 中的 KCALC 命令（在 GUI 中路径为 Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > stressInt Factr）计算复合型断裂模式中的应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 。该命令仅适用于在裂纹区域附近具有均匀的各向同性材料的线弹性问题。使用 KCALC 命令的步骤如下：

1. 定义局部的裂纹尖端或裂纹前缘的坐标系，以 X 轴平行于裂纹面，（在三维模型中垂直于裂纹前缘），Y 轴垂直于裂纹面，如下图所示。当使用 KCALC 命令时，坐标必须是激活的模型坐标系 [CSYS] 和结果坐标系 [RSYS]。

命令：LOCAL（或 CLOCAL，CS，CSKP 等）

GUI：Utility Menu>Workplane>Local Coordinate Systems>Creat Local CS>AT Specified Loc.

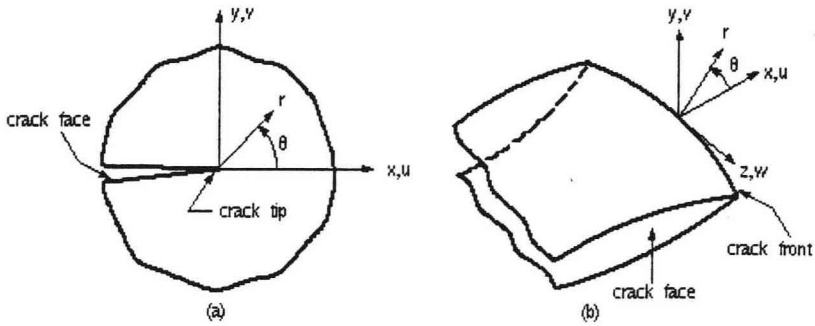


图 10-6 (a) 二维和 (b) 三维模型的裂纹坐标系

2. 定义沿裂纹面的路径，应以裂纹尖端作为路径的第一点。对于半个裂纹模型而言，沿裂纹面需有两个附加点；对于整体裂纹模型，则应包括两个裂纹面共需四个附加点，两个点沿一个裂纹面，其他两个点沿另一个裂纹面。下列图形给出了二维模型的情况。

命令：PATH, PPATH

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operation>Define Path.

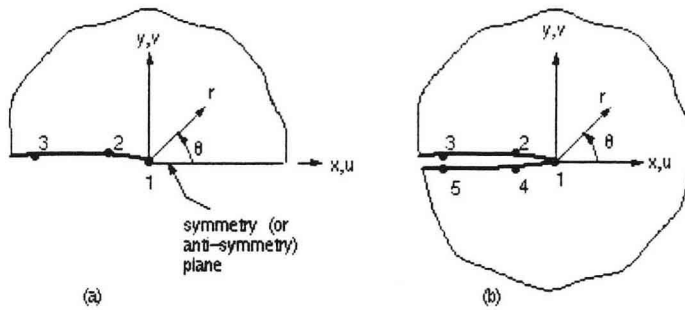


图 10-7 (a) 半个裂纹模型 (b) 整个裂纹模型的典型路径定义

3. 计算 K_I 、 K_{II} 和 K_{III} ，KCALC 命令中的 KPLAN 域用于指定模型是平面应变或平面应力。除了薄板的分析，在裂纹尖端附近和它的渐近位置，其应力一般是考虑为平面应变，KCSYM 域用来指定半裂纹模型是否具有对称边界条件、反对称边界条件或是整体裂纹模型。

命令：KCALC

GUI: Main Menu>General Postproc>Nodal calcs>Stress Int Factr

J 积分:

J 积分的最简单形式可以定义为与路径无关的曲线积分, 它能标志裂纹尖端附近的奇异应力和应变的强度。式 10-1 是二维情况下的定积分表达式:

$$J = \int_{\gamma} W dy - \int_{\gamma} \left(t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) ds \quad 10-1$$

其中,

γ = 围绕裂纹尖端的积分路径

ω = 应变能密度 (单位体积的应变能)

t_x = 沿 X 轴的牵拉向量 = $\sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y$

t_y = 沿 Y 轴的牵拉力向量 = $\sigma_y n_y + \sigma_{xy} n_x$

σ = 应力分量

n = 路径 γ 的单位外径法向线分量

μ = 位移矢量

s = 路径 γ 的距离

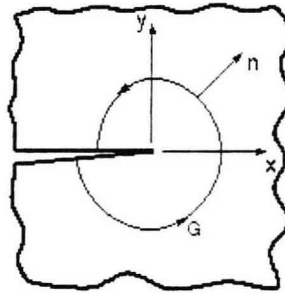


图 10-8 围绕裂纹尖端的 J 积分路径

二维模型计算 J 积分的步骤:

1、读入所要的结果

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>First Set

2、储存每个单元的应变能和体积

命令: ETABLE

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table

3、计算每个单元的应变能密度

命令: SEXP

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table>Exponentiate

4、定义线积分路径。

命令: PATH, PPATH

GUI: Main Menu>General Postproc>Path>Operations>Define Path

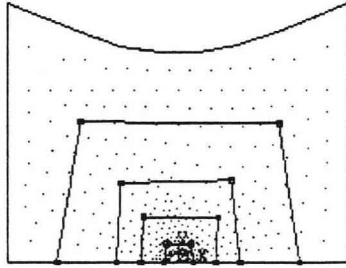


图 10-9 路径的示例

5、将应变能密度映射到积分路径上，它是储存在步骤 1 生成的单元表中

命令: PDEF

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operations>Map Onto Path

6、对 Y 轴的积分

命令: PCALC

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operations>Integrate

7、将积分的最后值赋值给一个参数，它就是方程 10-1 的第一项

命令: *GET, Name, PATH,, LAST

GUI: Utitity Menu> Parameters>Get Scalar Data

8、将应力分量 SX、SY 和 SXY 映射到积分路径上。

命令: PDEF

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operations> Map Onto Path

9、定义路径法向量

命令: PVECT

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operations>Unit Vecton

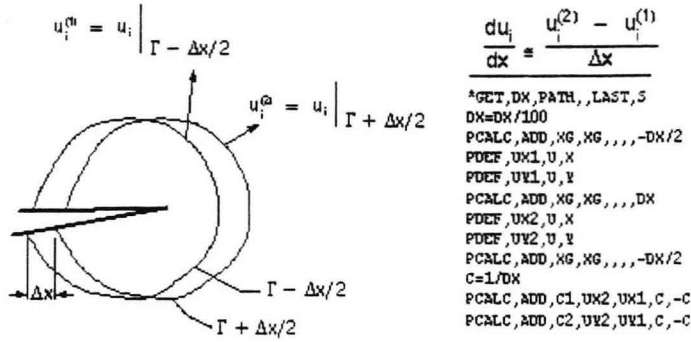


图 10-10 计算位移向量的导数

10、计算方程 10-1 中的 TX 和 TY

命令: PCALC

GUI: Main Menu>General Postproc>Path Operations>Operation

11、沿 X 轴的正方向和负方向沿路径移动一小段距离计算位移向量的导数 ($\partial u_x/\partial x$ 和 $\partial u_y/\partial y$)。图 10-10 显示了该步骤

- , 建议将计算路径移动的距离 DX 取为路径总长度的 1%, 采用“*GET, Name, PATH, , LAST, S”命令可以得到路径的总长度。
- 沿 X 轴的负方向移动 DX/2 距离 (PCALC, ADD, XG, XG, , , , -DX/2), 将 UX 和 UY 映射到路径上, 可以取名 UX1 和 UY1。
- 沿 X 轴的正方向移动 DX/2 距离 (PCALC, ADD, XG, XG, , , , DX/2), 将 UX 和 UY 映射到路径上, 可以取名 UX2 和 UY2。
- 移回原始位置(取-DX/2)然后采用 PCALC 计算(UX2-UX1)/DX 和(UY2-UY1)/DX, 它就代表 $\partial u_x/\partial x$ 和 $\partial u_y/\partial y$ 。

12、采用第 10 步骤和第 11 步骤计算的数据, 计算 J 积分的第二项[PCALC]。然后对路径的距离 S[PCALC]积分, 得到方程 10-1 中的第二项

13、采用 5-7 步和 12 步所获得的数值, 根据方程 10-1 计算 J 积分值。可把上述步骤写入 Macro, 以简化 J 积分的计算 (Macro 的使用在 ANSYS APDL Programmers Guide 一书有叙述)。

能量释放率

能量释放率是用于计算裂纹张开或闭合时所用的功的数值 (能量改变)。计算能量释放率的一个方法是虚拟裂纹扩展方法。在虚拟裂纹扩张方法中, 必须做

两次分析：一次是裂纹长度为 a ，另一次是裂纹长度为 $a+\Delta a$ 。如果这二种情况下的位能（应变能）被储存，能量释放率就可从下列公式算出：

$$G = -\frac{U_{a+\Delta a} - U_a}{B\Delta a}$$

其中 B 是断裂模型的厚度

在第二次分析中 Δa 作为裂纹的扩展，选择裂纹附近的所有节点，并在 X 方向以因子 Δa 给予缩放 [NSCALE]（GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Operate>Scale）以得到扩展了 Δa 分裂纹模型。

注意：若采用实体模型，在对所有节点缩放前必须首先把实体模型与有限元模型解除关联 [MODMSH, DETACH]（GUI：Main Menu>Preprocessor>Checking ctrls）裂纹附近通常是指裂纹尖端在半径 $a/2$ 内的全部节点，同样对节点的 Δa 缩放，一般应取裂纹长度的 0.5%~2%。

应用实例

ANSYS Verification Manual(On-line help)中的 VM143 包含了 ANSYS 的二维与三维的断裂力学分析的例子。

第二章 疲 劳

疲劳的定义:

疲劳是指结构在低于静态极限强度载荷的重复作用下出现断裂破坏的现象。例如:一根能够承受 300KN 拉力作用的钢杆,在 200KN 循环载荷作用下,经历 1000000 次循环后亦会破坏。疲劳破坏的主要因素如下:

- 载荷的循环次数
- 每一个循环的应力幅
- 每一个循环的平均应力
- 存在局部应力集中现象

ANSYS 程序处理疲劳问题的过程

ANSYS 疲劳计算根据 ASME 锅炉和压力容器的规范的第三部分(和第八部分,第二分册)作为计算的依据,采用简化的弹塑性假设和 Miner 的累积疲劳准则。

除了根据 ASME 规范所建立的规则进行疲劳计算外,也可编写用户自己的宏指令,或选用合适的第三方程序,利用 ANSYS 结果进行疲劳计算。《ANSYS APDL 指南》讨论了上述二种功能。

ANSYS 程序具有下列疲劳计算能力:

- 后处理所得的应力结果来确定体单元或壳单元模型疲劳寿命耗用系数(用以疲劳计算的线单元模型的应力必须人工输入)
- 可以在一系列预先选定的位置上,确定一定数目事件及组成这些事件的载荷(一个应力状态),然后把这些位置上的应力储存起来。
- 可以在每一个选定的位置上定义应力集中系数和给每一个应力循环定义比例系数。

基本术语

位置(Location):在模型上储存疲劳应力的节点,这些节点是结构上某些可能产生疲劳破坏的位置。

事件(Event):是在特定的应力循环过程中,在不同时刻的一系列应力状态,

见本章后面的章节——“获得正确的疲劳寿命耗用系数的方法”

载荷 (Loading): 是事件 (event) 的一部分, 是其中一个应力状态。

应力幅: 两个载荷之间应力状态之差的一半。程序不考虑应力平均值对结果的影响。

疲劳计算:

疲劳计算在通用后处理器 POST1 中进行, 但必须是已经完成了应力计算。一般有五个主要步骤。

- 1、进入后处理 Post1, 恢复数据库;
- 2、建立位置 (Location)、事件 (Event) 和载荷 (Loadings) 的数目, 定义材料疲劳性质, 确定应力位置和定义应力集中系数;
- 3、存储不同事件 (Events) 和不同载荷 (Loadings) 下关心位置的应力, 并指定事件 (Event) 的重复次数和比例系数;
- 4、激活疲劳计算;
- 5、查看结果。

第一步: 进入 POST1 和恢复数据库

为了进行疲劳计算, 必须依照下列步骤:

- 1、进入 POST1

Command: POST1

GUI: Main Menu>General Postproc

- 2、在当前内存中读入数据库文件 (Jobname.DB) (假使所要做的疲劳计算是正在进行 ANSYS 计算过程的继续, 则 Jobname.DB 文件已在内存中), 节点应力结果文件 Jobname.RST 必须已经存在并将其读入内存。

Command: RESUME

GUI: Utility Menu>File>Resume From

第二步: 建立疲劳计算的规模、材料的疲劳性质和需要进行疲劳计算的位置

定义下列数据:

- 位置、事件和载荷的最大数目
- 材料的疲劳性质
- 应力位置与应力集中系数

1、定义位置、事件和载荷的最大数目

缺省情况下，疲劳计算的节点位置 5 个，事件 10 个，每一个事件中 3 个载荷。根据需要可以选择较大的规模（允许采用较多的位置、事件和载荷）。

Command: FTFSIZE

GUI: Main Menu>General Postproc>Fatigue>Size Settings

2、定义材料的疲劳性质

为了计算各种耗用系数，必须定义材料的疲劳性质并包含简化的弹塑性效应。在疲劳计算中感兴趣的材料性质有：

- S-N 曲线：应力幅 $(S_{max}-S_{min})/2$ 与疲劳循环次数的关系曲线。ASME S-N 曲线考虑了最大平均应力的影响，如果需要，应把输入的 S-N 曲线进行调节以便计及平均应力强度效应。必要时，可以不输入 S-N 曲线，那么对于各种应力状态的组合，应力幅将降阶排列，但不计算耗用系数。

Command: FP

GUI: Main Menu>General Postproc>Fatigue>S-N Table

- Sm-T 曲线：设计应力强度值对于温度的曲线。假定要考虑定义应力范围是否进入塑性，必须计及该曲线。

Command: FP

GUI: Main Menu>General Postproc>Fatigue> Sm -T Table

- 弹塑性材料参数 M 和 N（应变硬化指数）。如果需要使用简化的弹塑性准则，必须输入 M、N 参数，这些参数可以从 ASME 的规范中获得。

Command: FP

GUI: Main Menu>General Postproc>Fatigue> Elas-plas Par

下述例子说明了用于输入疲劳性质的 FP 命令的使用方法：

! Define the S-N table:

```

FP, 1, 10, 30, 100, 300, 1000, 10000      ! Allowable Cycles, N
FP, 7, 100000, 1000000                    !
FP, 21, 650, 390, 240, 161, 109, 59      ! Alternating Stress-
FP, 27, 37, 26                             ! Intensity Range, S, ksi
! Define the Sm-T table:
FP, 41, 100, 200, 300, 400, 500, 600    ! Temperature, deg F
FP, 47, 650, 700, 750, 800              !
FP, 51, 20, 20, 20, 18.7, 17.4, 16.4    ! "Design Stress-Intensity
FP, 57, 16.1, 15.9, 15.5, 15.1         !Value", Sm (=2/3*Sy or 1/3 *Su), ksi
! Define the elastic-plastic material parameters:
FP, 61, 1.7, .3                          ! M and N

```

3、定义应力位置和应力集中系数

该步骤说明如何定义疲劳计算中关心的节点位置、该位置的应力集中系数以及在该位置的一个短的标题（可用 20 个字母）。

Command: FL

GUI: Main Menu>General Postproc>Fatigue> Stress Locations

注意：不是所有的疲劳分析都需要使用 FL 命令。如果使用 FS、FSNODE 或 FSSECT 等命令，则疲劳节点位置是自动定义的。假使在建模时包含有足够细的网格，则所计算的应力是准确的，因此不必指定应力集中系数 SCFs（但是如果考虑表面影响、尺寸影响和腐蚀影响，则仍然需要指定 SCFs）。在计算疲劳时如果只需要考察一个位置，则可以省略标题。假使定位明确，或是不需要应力集中系数和标题，则 FL 命令可完全不使用。

这里给出了一个圆柱筒的例子。整体坐标 Y 轴为旋转轴。在其外壁给出了应力集中系数 SCFs（针对轴向线性应力）。

```

FL, 1, 281, , , , Line 1 at inside
FL, 2, 285, , 1.85, , Line 1 at outside
FL, 3, 311, , , , Line 2 at inside
FL, 4, 315, , 2.11, , Line 2 at outside

```

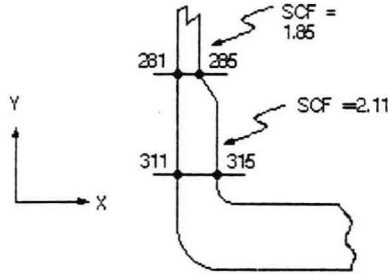



图 12-1 具有应力集中系数 (SCFs) 的筒壁

第三步：储存应力、指定事件循环次数和比例因子

储存应力

为了进行疲劳计算，程序必须知道每一个位置上不同事件、不同载荷下的应力以及每一个事件的循环次数。存储每一个位置、事件和载荷组合情况下的应力，可采用下列选项：

- 人工储存应力
- 从 Jobname. RST 文件中取得节点应力
- 横截面应力

注意：程序不对未输入位置假设零应力。如果有零应力存在，就必须在每一个事件中明确地输入何处产生零应力。

- 人工储存应力：FS
- 从 Jobname. RST 中取出节点应力：SET, FSNODE
- 横截面应力：PATH, PPATH, SET, FSSECT。横截面计算也需从 Jobname. RST 的数据中取得。

可以用不同的方法在一个事件中储存应力。

人工储存应力

可以人工存储应力和温度（不从 Jobname. RST 的结果文件中取得）。在上述情况下，你实际并没有将 POST1 的疲劳模块作为后处理器，而是仅仅作为疲劳计算器使用。线单元如梁单元的应力必须人工输入，因为疲劳模块不能如体元或壳元那样从结果文件中读取数据。