

壳与实体连接

本模型基于《COMSOL 软件许可协议》 6.3 版本授权。
所有商标均为其各自所有者的财产。请参见 cn.comsol.com/trademarks。

简介

“壳”接口可用于在三维模式中对薄结构建模。壳的厚度在数学上是考虑在内的，但在几何中没有通过显式方法建模。由于仅需为边界划分网格，因此可以有效利用 “壳”接口。只要结构为薄结构，“壳”接口就可以提供良好的结果。在实践中，有时会发生在整个几何结构中未满足此要求的情况，因此局部区域需要完整的实体模型。在这种情况下，可以将 “壳”接口用于较薄的零件，然后将其耦合到用于其他零件的 “固体力学”接口。

本例演示如何对从壳到实体的过渡进行建模，还讨论了这种过渡的假设条件和精度。

模型定义

模型几何结构 （图 1）由一根圆柱型钢管组成，钢管的一侧沿其长度方向有三个圆形切口。与 1 m 的半径相比， 0.1 m 的壁厚是很小的。因此，可以使用 “壳”接口对整个结构进行建模。为了演示壳与实体域之间的连接，将几何结构分为三个部分。中间部分被模拟为两侧连接到壳的实体域。

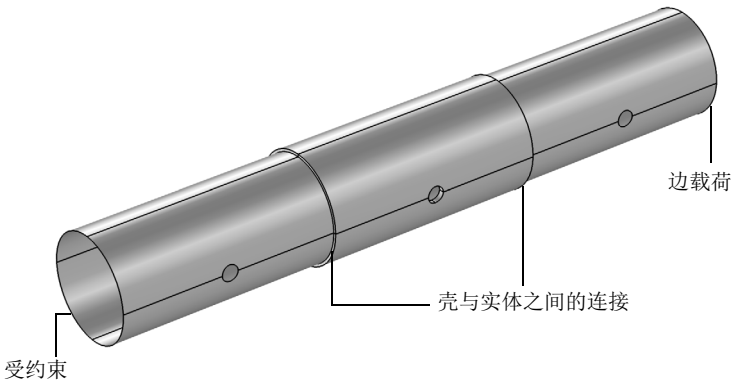


图 1：几何结构分为使用壳和实体模型模拟的区域。

模型的外部区域通过 “壳”接口设置，中心的实体域通过 “固体力学”设置。当壳中面的边与实体边界相交时，通过**实体 - 薄结构连接**多物理场耦合添加特殊的连接边界条件。左侧和右侧的连接使用不同类型的条件，以突出它们的属性。

分析了三种不同的载荷工况：拉伸、扭转和内压。几何形状的一端受到约束，而另一端则承受与张力和扭转相对应的不同边载荷。在第三种载荷工况中，管承受内压。

结果与讨论

压力载荷工况下的 von Mises 应力分布如图 2 所示。壳中的整体应力状态与固体域中获得的结果一致。但是，由于固体会正确地捕捉厚度方向上的应力变化，因此存在细微的差异。

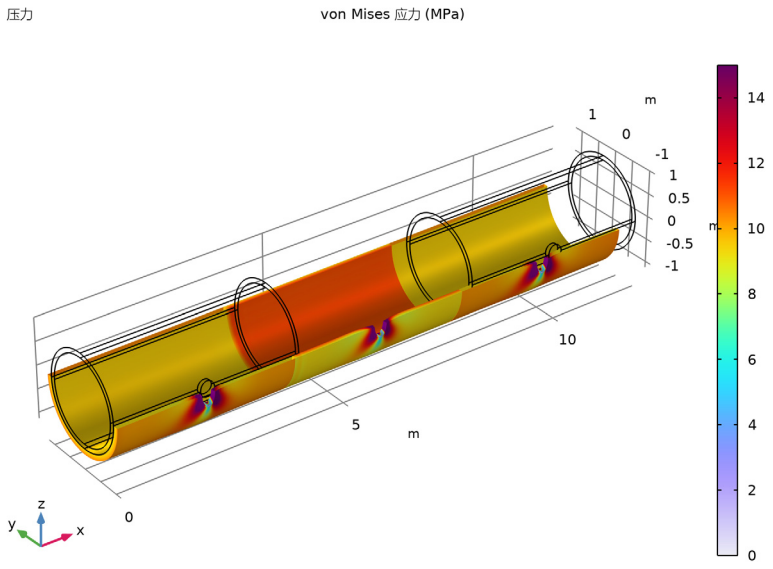


图 2：压力载荷工况下的 von Mises 应力分布。

图 3、图 4 和图 5 显示了所有三种载荷工况下沿管道顶部的应力分布。仔细观察会发现应力结果存在一些差异，尤其是在连接区域附近。要解释这些图形，请注意以下几点：

- 图形的方向是从管道的受约束端到受力端。
- 这些图表示的是沿着孔的周长的情况。
- 壳，刚性图的左端位于受约束端，约束可能会在该处引起局部干扰。
- 壳，刚性图的右端在刚性连接处连接到实体图的左端。
- 实体图的右端在柔性连接处连接到壳，柔性图的左端。
- 壳，柔性图的右端位于受力端，此处可能会出现一些局部干扰。

从这些图中可以看出：

拉伸工况

- 实体结果与壳结果非常吻合，由于轴向张力应在未受干扰的区域内给出均匀的应力状态，因此这是意料之中的。在孔边缘处，应力梯度很大，三维效应很重要，但存在一定的差异。
- 在壳与实体之间的两个连接处的结果都存在干扰，但在使用刚性公式的情况下更为明显。过渡效果仅在实体中可见。
- 过渡中的应力详细信息如图 6 和图 7 所示。在后一个图中，很明显，柔性条件表明横向应力应该比刚性条件好得多。对于柔性连接，还可以看到较小的弯曲应力，这取决于以下情况：中面内的材料实际上比其外部的材料少，对于平稳过渡，弯曲应力几乎完全消失。

扭转工况

- 壳与实体中的应力水平存在很大差异，前者在某种程度上高估了剪切应力的全厚度梯度。这与单元类型的混合无关。
- 看不到过渡效果，由于应力状态是壳平面中的纯剪切，因此这是意料之中的。没有横向应变，所以相同的应变状态应该可以由两种单元类型来表示，无需额外的假设。
- 连接处的应力如图 8 所示，标称应力水平是理论值。通过扭转理论预测了线性全厚度分布，等效应力对剪切应力以外的其他应力分量没有影响。

压力工况

- 同样在这种情况下，壳和实体的解的水平也存在差异。壳中仅表示出中面应力，而实体可以解析厚度方向上的梯度。
- 过渡效果相当小，但在两个连接处大小几乎相同。应力状态主要是在周向上的直接应力。
- 连接处的环向应力如图 9 所示，标称值表示理论值。可以看出，使用柔性连接的预测明显好于使用刚性连接的预测。

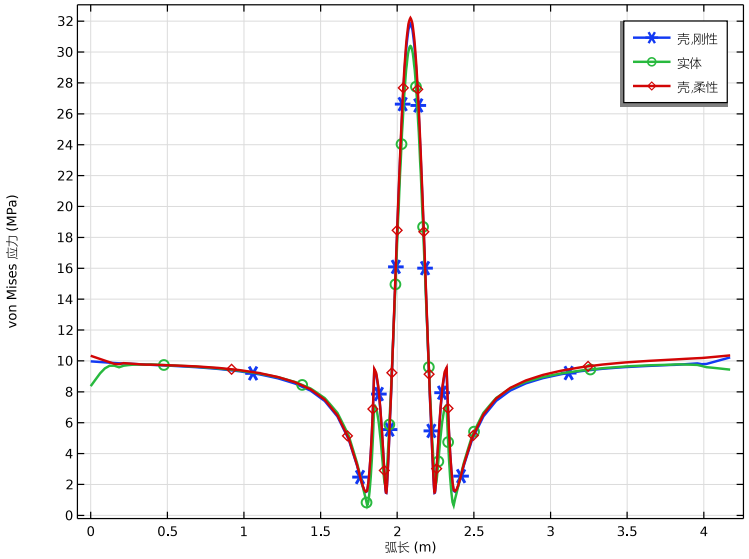


图 3：拉伸载荷工况下沿管顶部的 von Mises 应力图。

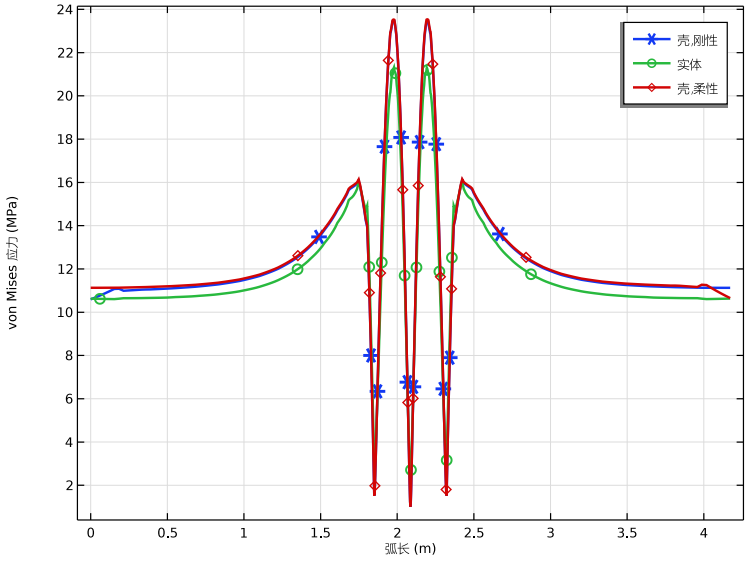


图 4：扭转载荷工况下沿管顶部的 von Mises 应力图。

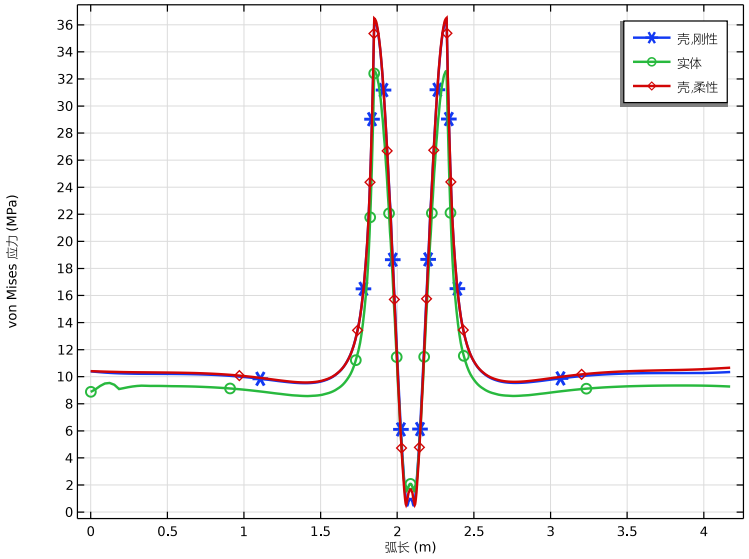


图5：压力载荷工况下沿管顶部的von Mises 应力图。

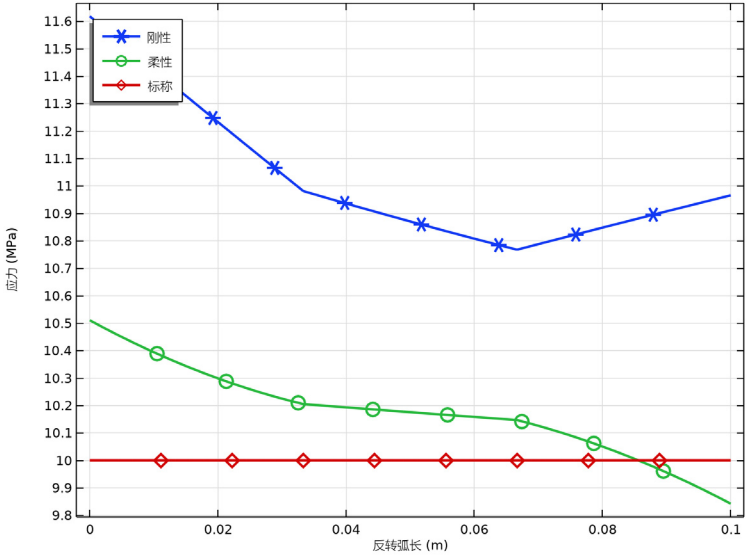


图6：穿过连接处的厚度的轴向应力 （拉伸）。

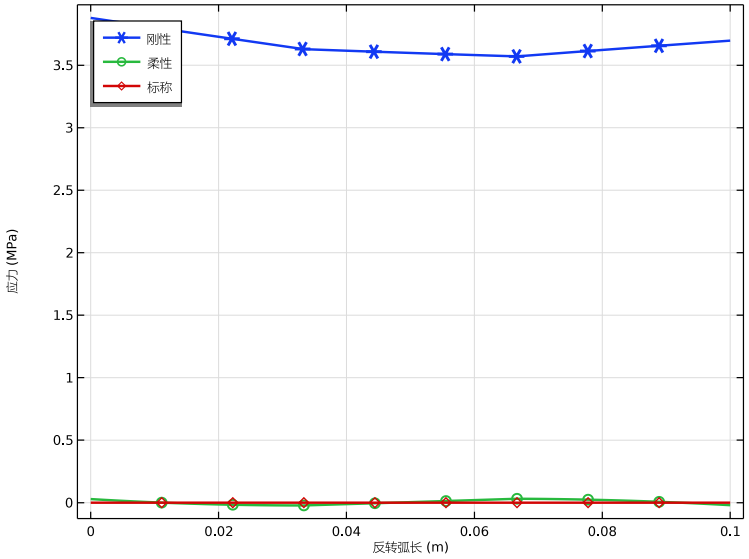


图 7：穿过连接处的厚度的横向应力（拉伸）。

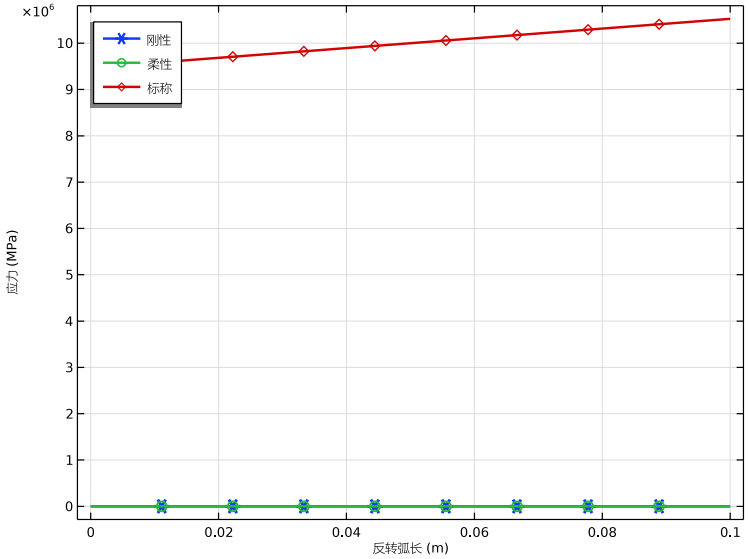


图 8：穿过连接处的厚度的等效应力（扭转）。

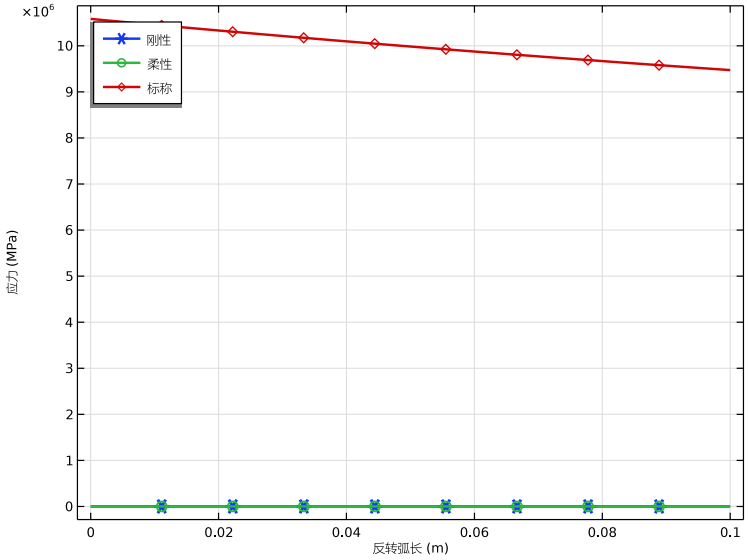


图 9：穿过连接处的厚度的环向应力（压力）。

COMSOL 软件功能实现说明

内置的**实体 - 薄结构连接**多物理场耦合用于连接“固体力学”接口和“壳”接口。用 6 个自由度、三个位移分量和三个壳法向旋转分量描述壳变形。在“固体力学”域中，由于变形的三维状态是用三维网格通过显式方法解析的，因此后一种自由度不存在。所以，壳边缘的每个节点的 6 个自由度必须连接到连接边界上的每个节点的 3 个自由度。这种连接有两个选项：**刚性**连接和**柔性**连接。第一种连接在某种程度上违反了壳的假设条件，导致连接处的局部非物理应力状态。这种偏差在离开连接处几个单元后逐渐消失，结果在许多情况下都是可以接受的。柔性连接引入了新的解变量，即软化函数，好处是连接处的应力结果更精确，但这也带来了额外的计算成本。如果实体厚度方向上的网格太粗化，则不能使用柔性连接。所需的单元数量取决于形函数阶次，但是对于标准的二次形函数，在厚度方向上至少需要三个单元。

有关连接类型的其他详细信息，请参见“壳”接口的文档。本例模型采用了两种连接类型，分别用于实体域的两侧。

案例库路径：`Structural_Mechanics_Module/Beams_and_Shells/shell_solid_connection`

建模操作说明

从**文件**菜单中选择**新建**。

新 建

在**新建**窗口中，单击 **模型向导**。

模 型 向 导

1 在**模型向导**窗口中，单击 **三维**。

2 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **壳 (shell)**。

3 单击**添加**。

4 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **固体力学 (solid)**。

5 单击**添加**。

6 单击 **研究**。

7 在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

8 单击 **完成**。

全 局 定 义

定义用于模型设置的参数和载荷组。

参数 1

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。

2 在**参数**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。

3 单击 **从文件加载**。

4 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 `shell_solid_connection_parameters.txt`。

拉伸载荷组

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**全局定义**并选择**载荷与约束组** > **载荷组**。

2 在**载荷组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “拉伸载荷组”。

3 在**参数名称**文本框中键入 “`lgFx`”。

扭转载荷组

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**载荷与约束组**并选择**载荷组**。

2 在**载荷组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“扭转载荷组”。

3 在**参数名称**文本框中键入“lgMx”。

压力载荷组

1 右键单击**载荷与约束组**并选择**载荷组**。

2 在**载荷组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“压力载荷组”。

3 在**参数名称**文本框中键入“lgP”。

几何 1

通过创建三个带有切口的实心圆柱型零件的阵列来构建几何结构。

圆柱体 1 (cyl1)

1 在**几何**工具栏中单击 **圆柱体**。

2 在**圆柱体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在**半径**文本框中键入“r_outer”。

4 在**高度**文本框中键入“length”。

5 定位到**轴**栏。从**轴类型**列表中选择 **x 轴**。

6 单击以展开**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (m)
层 1	thickness

7 单击 **构建选定对象**。

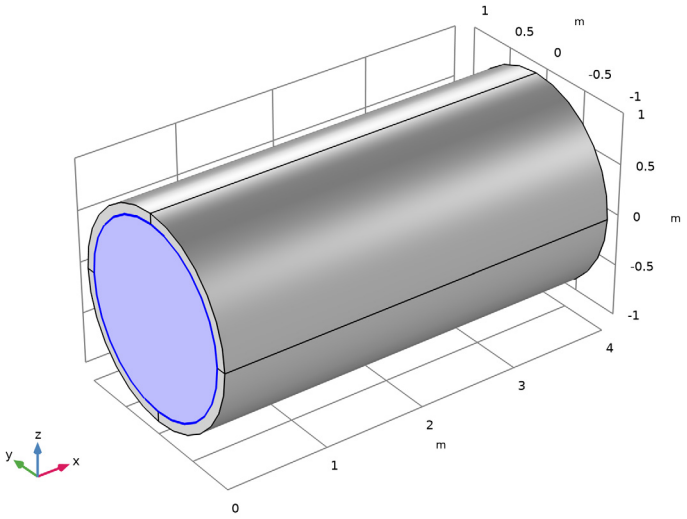
删除实体 1 (del1)

1 在**几何**工具栏中单击 **删除**。

2 在**删除实体**的**设置**窗口中，定位到**要删除的实体或对象**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**域**。

4 在对象 **cyl1** 中，选择“域” 3。



5 单击 **构建选定对象**。

圆柱体 2 (cyl2)

1 在**几何**工具栏中单击 **圆柱体**。

2 在**圆柱体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在**半径**文本框中键入“`r_hole`”。

4 在**高度**文本框中键入“`1.5*r_outer`”。

5 定位到**位置**栏。在 **x** 文本框中键入“`length/2`”。

6 在 **y** 文本框中键入“`-1.5*r_outer`”。

7 定位到**轴**栏。从**轴类型**列表中选择 **y 轴**。

8 单击 **构建选定对象**。

差集 1 (dif1)

1 在**几何**工具栏中单击 **布尔操作和分割**，然后选择**差集**。

2 选择“对象” **del1**。

3 在**差集**的**设置**窗口中，定位到**差集**栏。

4 单击以选择**要减去的对象**的 **激活选择**切换按钮。

5 选择“对象” **cyl2**。

6 单击 **构建选定对象**。

阵列 1 (arr1)

1 在**几何**工具栏中单击 **变换**，然后选择**阵列**。

2 选择 “对象” **dif1**。

3 在**阵列**的**设置**窗口中，定位到**大小**栏。

4 在 **x 大小**文本框中键入 “3”。

5 定位到**位移**栏。在 **x** 文本框中键入 “length”。

6 单击 **构建选定对象**。

7 在**图形**工具栏中单击**切换到默认视图**按钮。

定义

为各个边界组和边组创建**显式选择**。使用线框渲染更容易选择几何实体。

1 在**图形**工具栏中单击 **线框渲染**按钮。

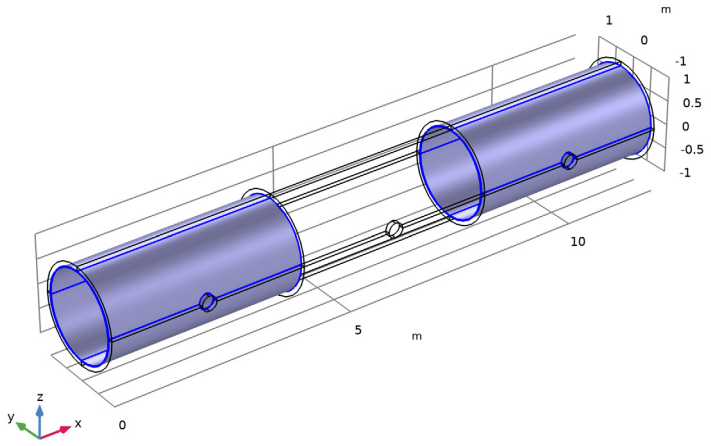
壳

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选择 “边界” 6、 7、 11、 14、 48、 49、 53 和 56。

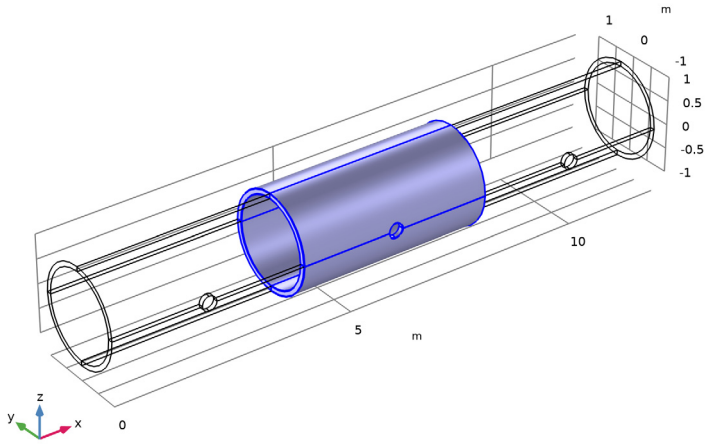


实体

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “实体”。

3 选择 “域” 5–8。



刚性连接的边

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

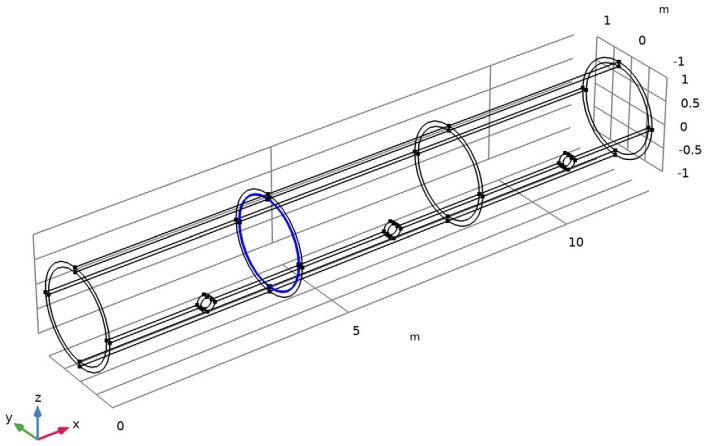
启用**按连续相切分组**选项后，仅需单击一下即可选择连续的边界和边。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “刚性连接的边”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择“边”39、40、45 和 48。



柔性连接的边

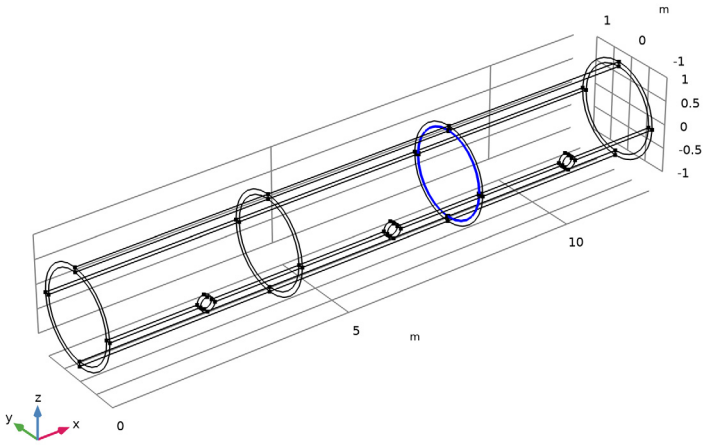
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“柔性连接的边”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择“边”73、74、79 和 82。



刚性连接的边界

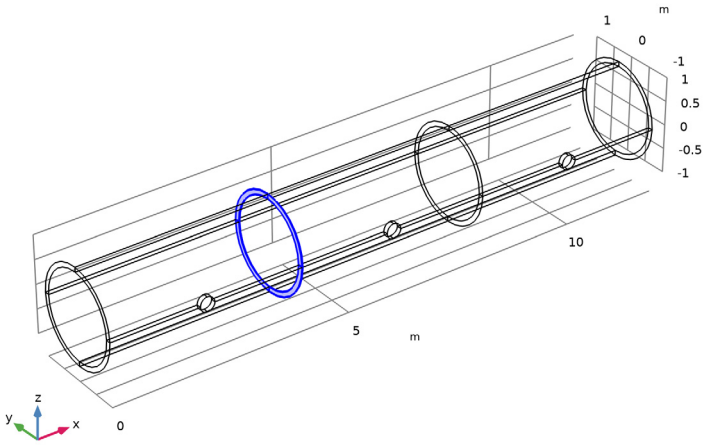
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“刚性连接的边界”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择 “边界” 22、 23、 29 和 33。



柔性连接的边界

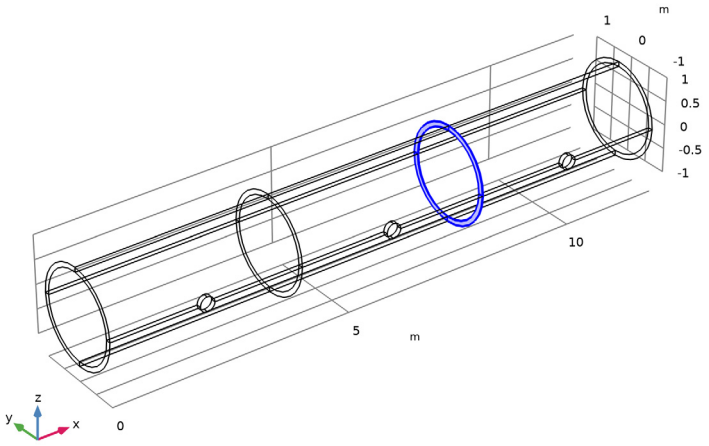
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “柔性连接的边界”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择 “边界” 43、 44、 50 和 54。



受约束的边

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

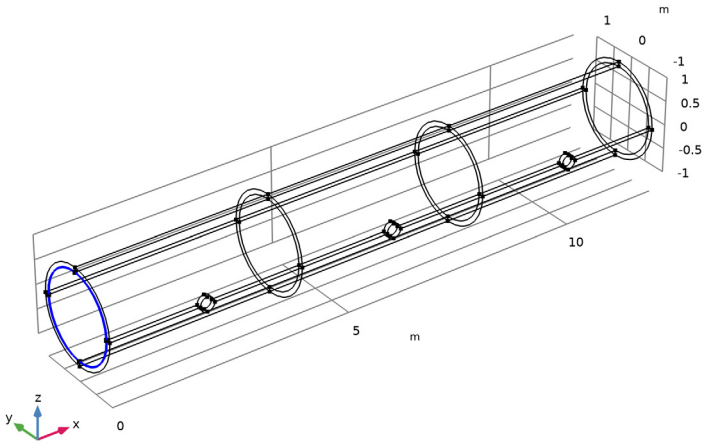
2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “受约束的边”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边**。

4 在**图形**工具栏中单击**切换到默认视图**按钮。

5 选中**按连续相切分组**复选框。

6 选择“边”5、6、11 和 14。



载荷边

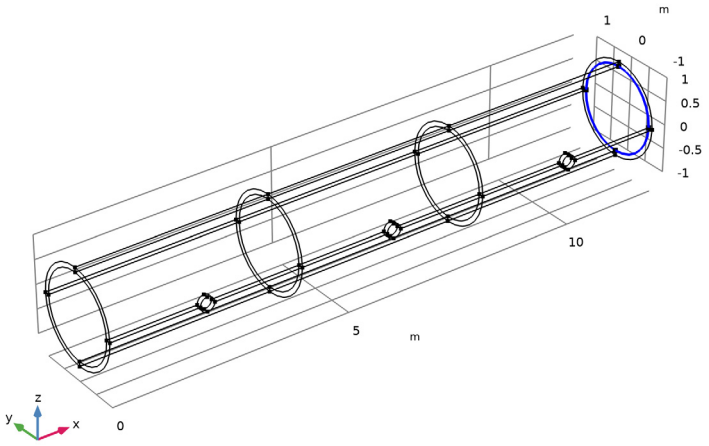
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “载荷边”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择“边”106、107、110 和 112。



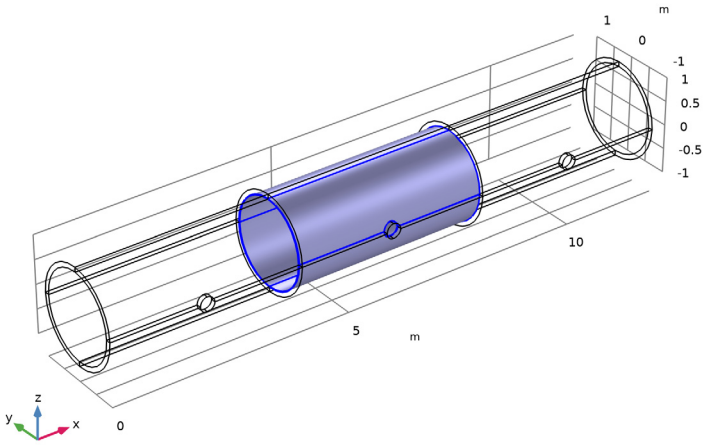
实体内部

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“实体内部”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选择 “边界” 27、 28、 32 和 35。



实体孔

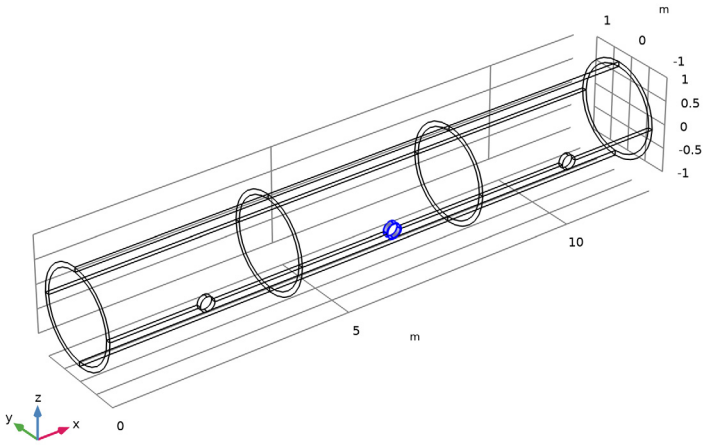
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “实体孔”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择“边界”38–41。



壳孔边

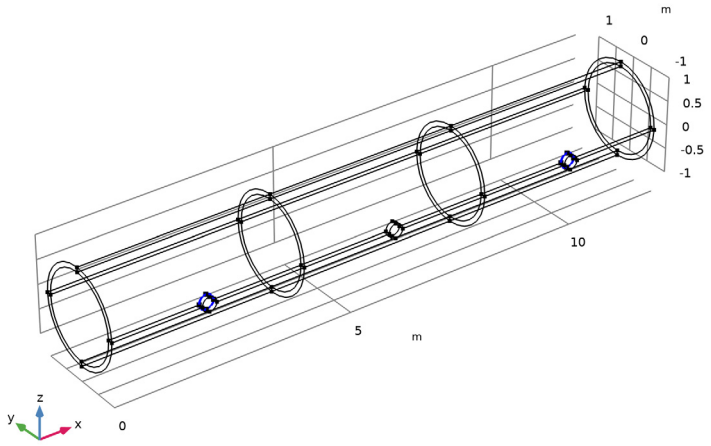
1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“壳孔边”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边**。

4 选中**按连续相切分组**复选框。

5 选择“边”24、25、30、31、92、93、98 和 99。



6 在**图形**工具栏中单击 **线框渲染**按钮。

柱坐标系 2 (sys2)

1 在**定义**工具栏中单击 **坐标系**，然后选择**柱坐标系**。

您将使用这个柱坐标系来定义约束和扭转载荷。

2 在**柱坐标系**的**设置**窗口中，定位到**设置**栏。

3 找到**纵轴**子栏。在表中输入以下设置：

x	y	z
1	0	0

4 找到**轴方向 ϕ=0** 子栏。在表中输入以下设置：

x	y	z
0	1	0

由于**壳**和**固体力学**零件使用相同的材料数据，因此首先将 “结构钢”添加为全局材料，然后在域和边界级别使用材料链接。

添加材料

在**材料**工具栏中，单击 **添加材料**以打开**添加材料**窗口。

添加材料

1 转到**添加材料**窗口。

2 在模型树中选择**内置材料** > **Structural steel**。

3 在窗口工具栏中单击**添加到组件**分割按钮的右端。

4 从菜单中选择**添加到全局材料**。

5 在**主屏幕**工具栏中，单击 **添加材料**以关闭**添加材料**窗口。

材料

材料链接 1 (matlnk1)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，右键单击**材料**并选择**更多材料** > **材料链接**。

材料链接 2 (matlnk2)

1 右键单击**材料**并选择**更多材料** > **材料链接**。

2 在**材料链接**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 从**选择**列表中选择**壳**。

壳 (SHELL)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**壳 (shell)**。

2 在**壳**的**设置**窗口中，定位到**边界选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**壳**。

厚度和偏移 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **壳 (shell)** 节点下，单击**厚度和偏移 1**。

2 在**厚度和偏移**的**设置**窗口中，定位到**厚度和偏移**栏。

3 在 d_0 文本框中键入“`thickness`”。

由于壳是由管内壁建模的，因此通过偏移量来描述实际的中面。

4 从**位置**列表中选择**顶面在边界**。

指定位移 / 旋转 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边**，然后选择**指定位移 / 旋转**。

2 在**指定位移 / 旋转**的**设置**窗口中，定位到**边选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**受约束的边**。

4 定位到**坐标系选择**栏。从**坐标系**列表中选择**柱坐标系 2 (sys2)**。

5 定位到**指定位移**栏。从 **phi 方向的位移**列表中选择**指定**。

6 从 **a 方向的位移**列表中选择**指定**。

边载荷，拉伸

1 在**物理场**工具栏中单击 **边**，然后选择**边载荷**。

2 在**边载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “边载荷，拉伸”。

3 定位到**边选择**栏。从**选择**列表中选择**载荷边**。

4 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**单位参考面积的力**。

5 将 $\mathbf{f}_A$ 矢量指定为

nominal_stress	x
0	y
0	z

请注意，即使壳接口在管的内部边界上处于活动状态，也可以将载荷视为作用于偏移量给定的真实中面上。

6 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**拉伸载荷组**。

边载荷，扭转

1 在**物理场**工具栏中单击 **边**，然后选择**边载荷**。

2 在**边载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “边载荷，扭转”。

3 定位到**边选择**栏。从**选择**列表中选择**载荷边**。

4 定位到**坐标系选择**栏。从**坐标系**列表中选择**柱坐标系 2 (sys2)**。

5 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**单位参考面积的力**。

6 将 $\mathbf{f}_A$ 矢量指定为

0	r
nominal_stress/sqrt(3)	phi
0	a

7 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**扭转载荷组**。

面载荷，压力

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**面载荷**。

2 在**面载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “面载荷，压力”。

3 定位到**边界选择**栏。从**选择**列表中选择**壳**。

4 定位到**全厚度位置**栏。从列表中选择**顶面**。

5 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**压力**。

6 在 *p* 文本框中键入 “p_int”。

壳上的压力施加在内部边界上，即壳的顶面，因此当施加压力时始终应该检查壳法向是指向内。

7 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**压力载荷组**。

边载荷，来自压力的外部载荷

1 在**物理场**工具栏中单击 **边**，然后选择**边载荷**。

2 在**边载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “边载荷，来自压力的外部载荷”。

3 定位到**边选择**栏。从**选择**列表中选择**壳孔边**。

4 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**总力**。

5 将 $\mathbf{F}_{tot}$ 矢量指定为

0	x
2*f_extp	y
0	z

6 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**压力载荷组**。

固体力学 (SOLID)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**固体力学 (solid)**。

2 在**固体力学**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**实体**。

面载荷，压力

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**边界载荷**。

2 在**边界载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “面载荷，压力”。

3 定位到**边界选择**栏。从**选择**列表中选择**实体内部**。

4 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**压力**。

5 在 *p* 文本框中键入 “p_int”。

6 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**压力载荷组**。

面载荷，来自压力的外部载荷

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**边界载荷**。

2 在**边界载荷**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “面载荷，来自压力的外部载荷”。

3 定位到**边界选择**栏。从**选择**列表中选择**实体孔**。

4 定位到**力**栏。从**载荷类型**列表中选择**总力**。

5 将 $\mathbf{F}_{tot}$ 矢量指定为

0	x
f_extp	y
0	z

6 在**物理场**工具栏中单击 **载荷组**，然后选择**压力载荷组**。

多物理场

实体 - 薄结构连接 1 (sshc1)

1 在**物理场**工具栏中单击 **多物理场耦合**，然后选择**全局** > **实体 - 薄结构连接**。

2 在**实体 - 薄结构连接**的**设置**窗口中，定位到**连接设置**栏。

3 选中**手动控制选择**复选框。

4 定位到**边界选择，实体**栏。从**选择**列表中选择**刚性连接的边界**。

5 定位到**边选择，壳**栏。从**选择**列表中选择**刚性连接的边**。

实体 - 薄结构连接 2 (sshc2)

1 在**物理场**工具栏中单击 **多物理场耦合**，然后选择**全局** > **实体 - 薄结构连接**。

2 在**实体 - 薄结构连接**的**设置**窗口中，定位到**连接设置**栏。

3 选中**手动控制选择**复选框。

4 从**方法**列表中选择**柔性**。

5 定位到**边界选择，实体**栏。从**选择**列表中选择**柔性连接的边界**。

6 定位到**边选择，壳**栏。从**选择**列表中选择**柔性连接的边**。

网格 1

映射 1

在**网格**工具栏中单击 **更多生成器**，然后选择**映射**。

大小

1 在**模型开发器**窗口中，单击**大小**。

2 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。

3 单击**定制**按钮。

4 定位到**单元大小参数**栏。在**最大单元大小**文本框中键入 “0.2”。

5 在**最小单元大小**文本框中键入 “0.01”。

映射 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**映射 1**。

2 选择 “边界” 7、 11、 14、 32、 35、 53 和 56。

3 在**映射**的**设置**窗口中，单击 **构建选定对象**。

分布 1

1 右键单击**映射 1** 并选择**分布**。

2 选择 “边” 34。

3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

4 从**分布类型**列表中选择**预定义**。

5 在**单元数**文本框中键入 “16”。

6 在**单元大小比**文本框中键入 “4”。

分布 2

1 右键单击**分布 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**边选择**栏。

3 单击 **清除选择**。

4 选择 “边” 7。

5 定位到**分布**栏。选中**反向**复选框。

映射 1

在**模型开发器**窗口中，右键单击**映射 1** 并选择**构建选定对象**。

复制面 1

1 在**网格**工具栏中单击 **复制**，然后选择**复制面**。

2 选择 “边界” 7。

3 在**复制面**的**设置**窗口中，定位到**目标边界**栏。

4 选择**激活选择**切换按钮。

5 选择 “边界” 6、 27、 28、 48 和 49。

6 单击 **构建选定对象**。

扫掠 1

1 在**网格**工具栏中单击 **扫掠**。

2 在**扫掠**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**域**。

4 从**选择**列表中选择**实体**。

分布 1

1 右键单击**扫掠 1**并选择**分布**。

2 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

3 在**单元数**文本框中键入“3”。

4 单击 **构建选定对象**。

研究 1

步骤 1：稳态

1 在**模型开发器**窗口的**研究 1**节点下，单击**步骤 1：稳态**。

2 在**稳态**的**设置**窗口中，单击以展开**研究扩展**栏。

3 选中**定义载荷工况**复选框。

4 单击 **添加**。

5 在表中输入以下设置：

载荷工况	lgFx	权重	lgMx	权重	lgP	权重
拉伸	√	1.0		1.0		1.0

6 单击 **添加**。

7 在表中输入以下设置：

载荷工况	lgFx	权重	lgMx	权重	lgP	权重
扭转		1.0	√	1.0		1.0

8 单击 **添加**。

9 在表中输入以下设置：

载荷工况	lgFx	权重	lgMx	权重	lgP	权重
压力		1.0		1.0	√	1.0

10 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

设置默认的结果显示单位。

结果

首选单位 1

1 在**结果**工具栏中单击 **配置**，然后选择**首选单位**。

2 在**首选单位**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

3 单击 ＋ **添加物理量**。

4 在**物理量**对话框中，选择模型树中的**固体力学** > **应力张量 (N/m^2)**。

5 单击**确定**。

6 在**首选单位**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

7 在表中输入以下设置：

物理量	单位	首选单位
应力张量	N/m^2	MPa

8 单击 **应用**。

应力、实体和壳

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**应力 (shell)**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “应力、实体和壳”。

将壳和实体结果放在同一绘图中，并检查三个荷载工况。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**应力、实体和壳**节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，单击以展开**标题**栏。

3 从**标题类型**列表中选择**手动**。

4 在**标题**文本区中键入 “von Mises 应力 (MPa)”。

过滤器 1

1 右键单击**表面 1** 并选择**过滤器**。

2 在**过滤器**的**设置**窗口中，定位到**单元选择**栏。

3 在**包含逻辑表达式**文本框中键入 “Z<-10*eps”。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，单击以展开**范围**栏。

3 选中**手动控制颜色范围**复选框。

4 在**最大值**文本框中键入 “15”。

体 1

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**应力、实体和壳**并选择**体**。

2 在**体**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**研究 1/ 解 1 (sol1)**。

4 从**解参数**列表中选择**来自父项**。

5 定位到**表达式**栏。在**表达式**文本框中键入 “`solid.mises`”。

6 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

变形 1

右键单击**体 1** 并选择**变形**。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**体 1** 并选择**选择**。

2 选择 “域” 5 和 7。

体 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**体 1**。

2 在**体**的**设置**窗口中，单击以展开**继承样式**栏。

3 从**绘图**列表中选择**表面 1**。

4 在**应力、实体和壳**工具栏中单击 **绘制**。

应力、实体和壳

1 在**模型开发器**窗口中，单击**应力、实体和壳**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**载荷工况**列表中选择**扭转**。

4 在**应力、实体和壳**工具栏中单击 **绘制**。

5 从**载荷工况**列表中选择**拉伸**。

6 在**应力、实体和壳**工具栏中单击 **绘制**。

沿顶部的应力，拉伸

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “沿顶部的应力，拉伸”。

3 定位到**数据**栏。从**参数选择（载荷工况）**列表中选择**来自列表**。

4 从**载荷工况**列表中选择**拉伸**。

5 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

壳，刚性

1 右键单击**沿顶部的应力，拉伸**并选择**线结果图**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳，刚性”。

3 选择 “边” 7、 25、 31 和 34。

4 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “`shell.mises`”。

5 找到**参数**子栏。在表中输入以下设置：

名称	值	单位	描述
shell.z	-1		厚度相关结果的局部 z 坐标 [-1,1]

6 单击以展开**着色和样式**栏。从**宽度**列表中选择 **2**。

7 找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**循环**。

8 从**定位**列表中选择**内插**。

9 在**数量**文本框中键入 “12”。

10 单击以展开**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

11 找到**包含**子栏。清除**解**复选框。

12 选中**标签**复选框。

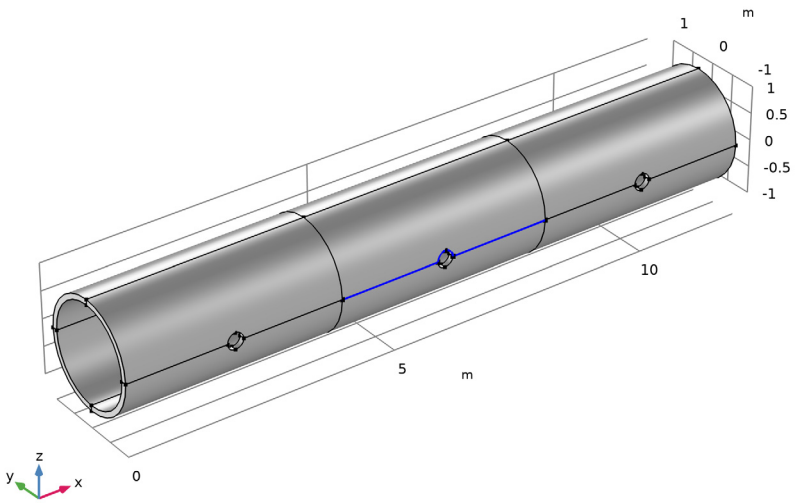
实体

1 右键单击**壳，刚性**并选择**复制粘贴**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “实体”。

3 定位到**选择**栏。单击 **清除选择**。

4 选择 “边” 38、 57、 63 和 67。



5 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “solid.mises”。

6 定位到**着色和样式**栏。找到**线标记**子栏。在**数量**文本框中键入 “13”。

壳，柔性

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**壳，刚性**并选择**复制粘贴**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳，柔性”。

3 定位到**选择**栏。单击 **清除选择**。

4 选择 “边” 75、 93、 99 和 102。

5 定位到**着色和样式**栏。找到**线标记**子栏。在**数量**文本框中键入 “14”。

6 在**沿顶部的应力，拉伸**工具栏中单击 **绘制**。

沿顶部的应力，扭转

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**沿顶部的应力，拉伸**并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “沿顶部的应力，扭转”。

3 定位到**数据**栏。从**载荷工况**列表中选择**扭转**。

4 在**沿顶部的应力，扭转**工具栏中单击 **绘制**。

沿顶部的应力，压力

1 右键单击**沿顶部的应力，扭转**并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “沿顶部的应力，压力”。

3 定位到**数据**栏。从**载荷工况**列表中选择**压力**。

4 在**沿顶部的应力，压力**工具栏中单击 **绘制**。

穿过厚度方向的轴向应力，拉伸

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “穿过厚度方向的轴向应力，拉伸”。

3 定位到**数据**栏。从**参数选择（载荷工况）**列表中选择**来自列表**。

4 从**载荷工况**列表中选择**拉伸**。

5 定位到**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

6 定位到**绘图设置**栏。

7 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “应力 (MPa)”。

8 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**左上角**。

刚性

1 右键单击**穿过厚度方向的轴向应力，拉伸**并选择**线结果图**。

2 选择 “边” 47。

3 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “刚性”。

4 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “solid.sx”。

5 定位到 **x 轴数据**栏。从**参数**列表中选择**反转弧长**。

6 定位到**着色和样式**栏。从**宽度**列表中选择 **2**。

7 找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**循环**。

8 从**定位**列表中选择**内插**。

9 定位到**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

10 找到**包含**子栏。清除**解**复选框。

11 选中**标签**复选框。

柔性

1 右键单击**刚性**并选择**复制粘贴**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “柔性”。

3 定位到**选择**栏。单击  **清除选择**。

4 选择 “边” 81。

标称

1 右键单击**柔性**并选择**复制粘贴**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “标称”。

3 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “10”。

4 在**穿过厚度方向的轴向应力，拉伸**工具栏中单击  **绘制**。

穿过厚度方向的横向应力，拉伸

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**穿过厚度方向的轴向应力，拉伸**并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “穿过厚度方向的横向应力，拉伸”。

刚性

1 在**模型开发器**窗口中展开**穿过厚度方向的横向应力，拉伸**节点，然后单击**刚性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.sz”。

柔性

1 在**模型开发器**窗口中，单击**柔性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.sz”。

标称

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标称**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “0”。

4 在**穿过厚度方向的横向应力，拉伸**工具栏中单击 **绘制**。

穿过厚度方向的等效应力，扭转

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**穿过厚度方向的轴向应力，拉伸**并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “穿过厚度方向的等效应力，扭转”。

3 定位到**数据**栏。从**载荷工况**列表中选择**扭转**。

刚性

1 在**模型开发器**窗口中展开**穿过厚度方向的等效应力，扭转**节点，然后单击**刚性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.mises”。

柔性

1 在**模型开发器**窗口中，单击**柔性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.mises”。

标称

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标称**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “nominal_stress*sys2.r/r_mid”。

4 在**穿过厚度方向的等效应力，扭转**工具栏中单击 **绘制**。

穿过厚度方向的环向应力，压力

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**穿过厚度方向的轴向应力，拉伸**并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “穿过厚度方向的环向应力，压力”。

3 定位到**数据**栏。从**载荷工况**列表中选择**压力**。

刚性

1 在**模型开发器**窗口中展开**穿过厚度方向的环向应力，压力**节点，然后单击**刚性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.sy”。

柔性

1 在**模型开发器**窗口中，单击**柔性**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`solid.sy`”。

标称

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标称**。

2 在**线结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`p_int*r_inner^2/(r_outer^2-r_inner^2)*(1+r_outer^2/sys2.r^2)`”。

4 在**穿过厚度方向的环向应力，压力**工具栏中单击 **绘制**。