



渐进损伤分析案例-叶片

渐进损伤分析的目的：在给定的边界条件和载荷下，考虑材料的非线性行为，查看结构的失效单元分布，判断结构是否失效，同时分析结构的应力应变分布，并对危险区域进行识别

渐进损伤分析的原理：对于给定载荷，对结构进行有限元分析，获得单元应力应变分布。基于单元失效准则，依次对每个单元进行判断，确定其是否失效。如果单元发生失效，则将单元初始弹性模量及剪切模量乘以较小的系数，从而对单元材料参数进行折减。所有单元判断完后，检查结构是否失效，如果结构失效则停止计算。否则，基于材料的非线性特性对单元材料参数进行修正。具体步骤为：提取单元应变，然后根据单元应力应变曲线获得当前应变下对应的单元割线模量。如果割线模量比单元当前模量小，则将割线模量赋予单元，更新单元材料参数。如果考虑单元不同方向材料非线性，则依次基于单元不同方向的应变对其材料参数进行修正。最终，如果单元存在失效或者基于非线性的单元材料参数变化较大，则重新施加载荷进行计算，并重复上述步骤，直至单元不存在失效且基于非线性的单元材料参数改变小于临界值。同时，为了程序的稳定性，通常会设定最大迭代次数。

下面，通过叶片承受旋转载荷的案例，对基于软件的渐进损伤分析流程进行介绍：

(1) 选择求解器和设置保存路径

打开软件后，首先需要选择 ansys 版本类型，如果有多个求解，选择一个合适即可。

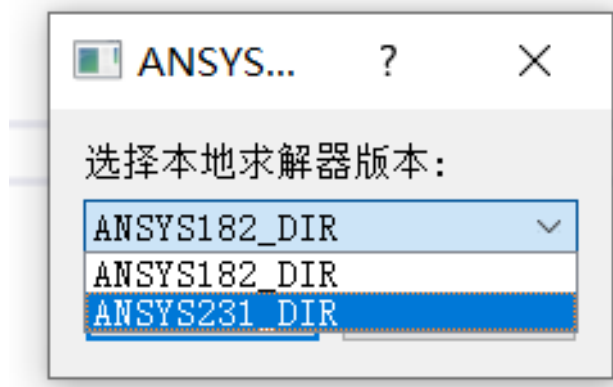


图 1 ansys 版本选择

选择好 ansys 版本后，进入软件，选择求解器类型，如下图 2 所示。在热力耦合分析模块的 HX 渐进损伤分析前打钩，并点击右下角确定按钮，进行软件界面。



图 2 选择求解器类型

进入软件界面后，定义算例名称及保存的路径，如下图 3 所示。首先，修改算例名称，本实例中算例名称为 yepian2；然后点击选择路径，选择算例保存的路径；最后，点击新建算例，进入算例。

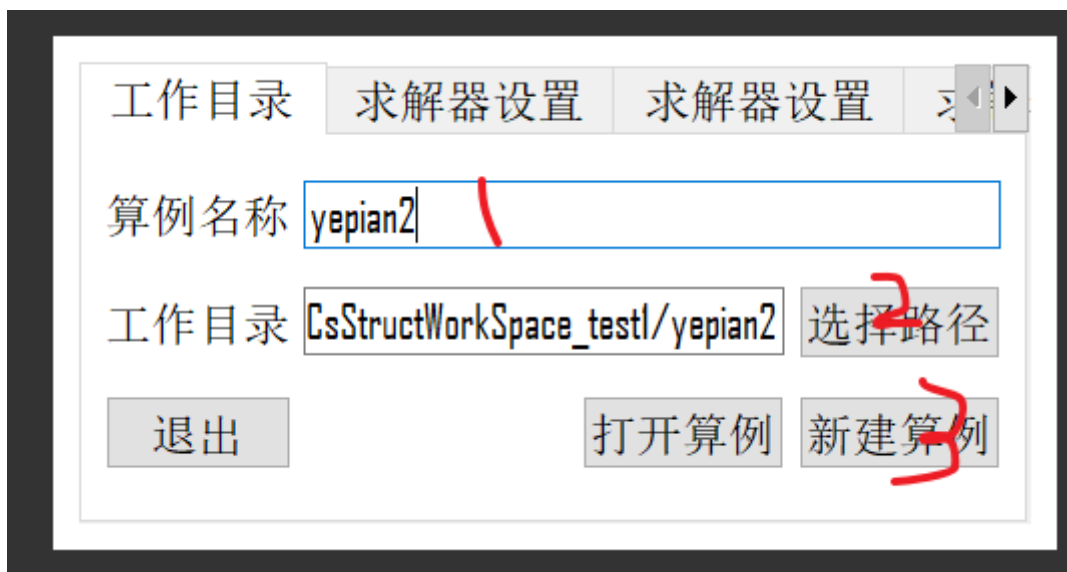


图 3 定义文件名及保存路径

(2) 导入模型

前处理工作之一是导入模型，导入过程示意图如图 4 所示。首先，右击几何体，点击导入，点击浏览，找到模型存储的位置，选中需要导入的模型，点击右下角打开按钮，即实现了模型导入。目前，软件只支持 stp 及 step 格式的模型。不过，不同模型类型之间可以通过画图软件进行转换。成功导入的模型如图 5 所示。

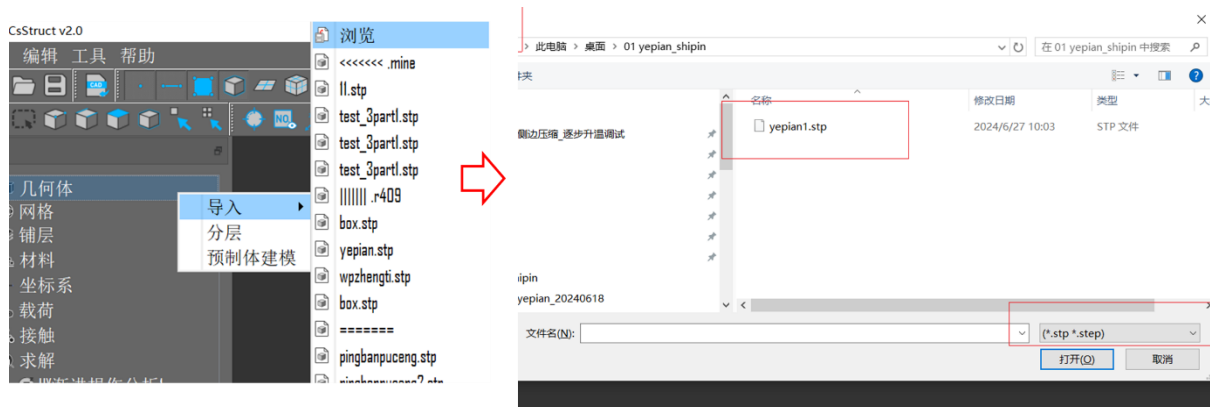


图 4 模型导入示意图

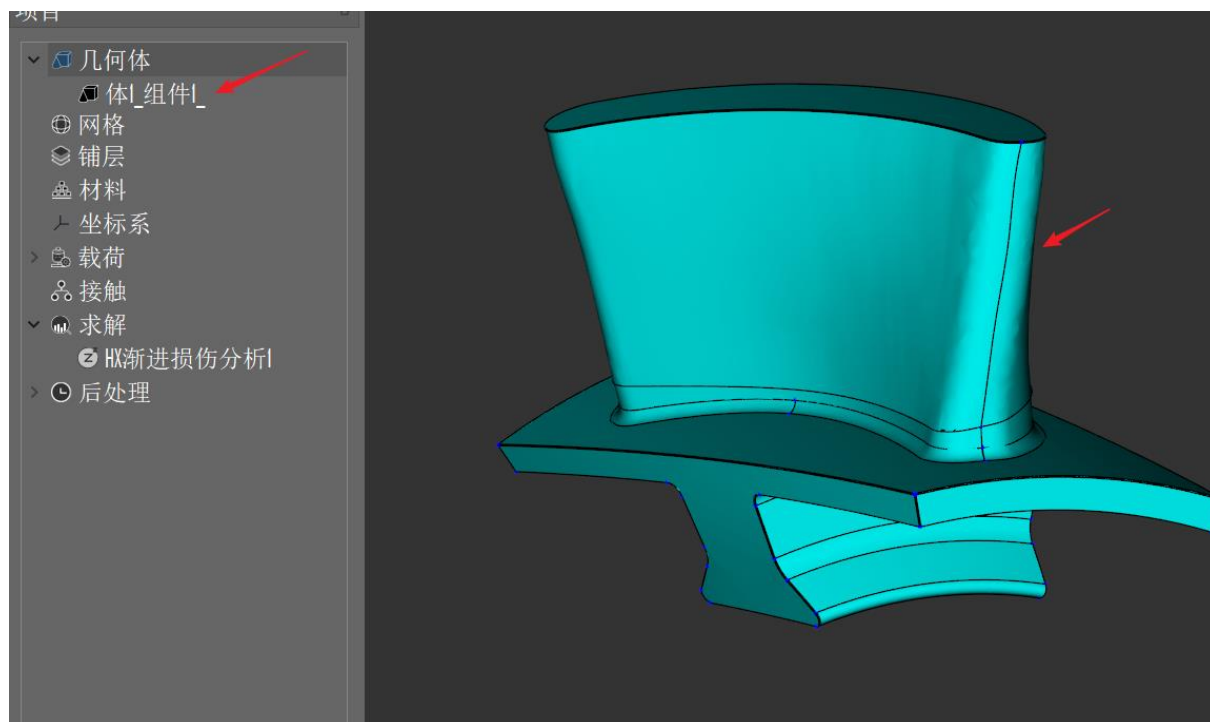


图 5 导入的叶片模型示意图

(3) 划分网格

导入模型后，进行网格划分。对于复杂模型，通常调整最小和最大单元尺寸，如果网格划分失败，减小最小单元尺寸。设置单元尺寸后，右击网格划分，生成网格。此时，软件会自动调用第三方软件进行网格划分，并跳出弹窗，第三方软件网格划分好后，会自动关闭。如下所示为划分好网格的叶片模型（图 6）。

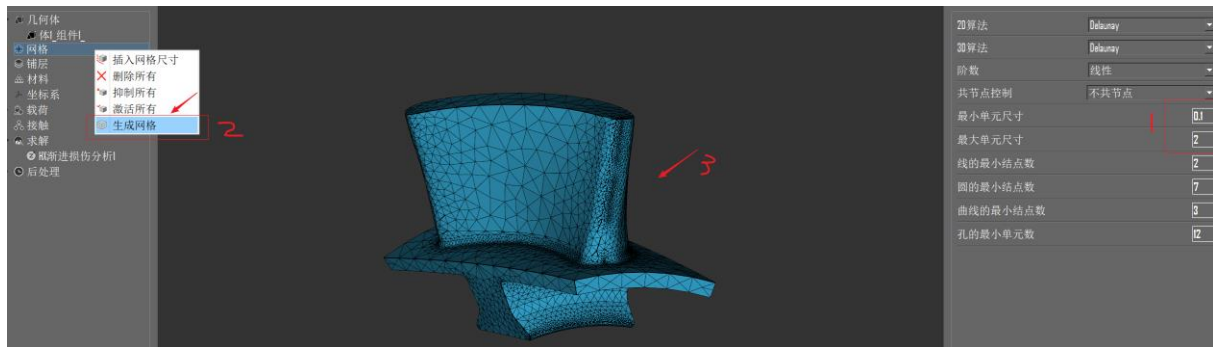


图 6 网格尺寸设置和划分

上图 6 所示是对全局网格进行控制。此外，用户也可以根据需要，对不同几何体网格尺寸进行单独设置。如下图 7 所示为修改面网格尺寸的例子，步骤如下：右击网格，选择插入网格尺寸，点击网格尺寸 1，并在右侧进行设置；其次，在工具栏中点击选择面的图标，选中需要定义网格尺寸的面，并点击右侧中的选择。按住 **ctrl** 可以同时选中不同的面；然后，设置网格尺寸，如图所示的案例中，设置面网格尺寸为 0.5。设置好局部对象的网格尺寸后，同上述步骤相同，点击生成网格选项，生成整体模型的网格。一般情况下，对应力集中区域或者几何形状变化的区域进行网格加密。

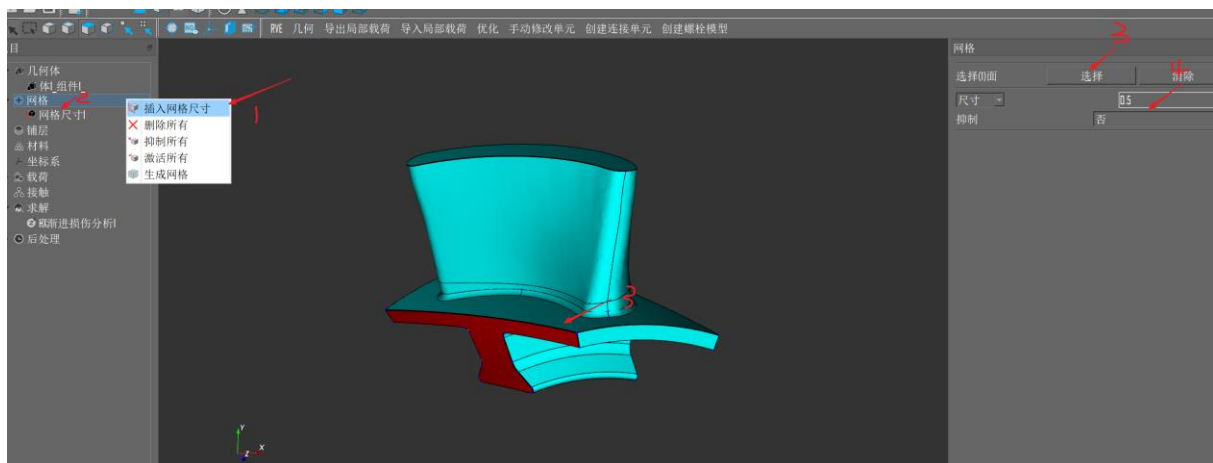


图 7 局部几何特征网格尺寸设置

(4) 材料参数定义

材料参数定义主要分为两种，第一种，已经有定义好的材料参数，可以直接导入，否则需要手动定义。定义好的材料参数可以导出保存，避免重复定义。材料参数文件后缀名为.xml。针对第一种情况，双击材料，进入材料参数定义界面。点击切换为工程数据源，点击读取材料库，找到已经定义好材料参数保存的位置，选中该材料数据库，并点击打开。选中 CaseMatlib（点击），可以在下面 CaseMatlib-材料数据库中看到已经定义好的材料参数，并点击拟采用的材料参数右侧的图标，



可以将该材料导入本实例中。如图 8 所示，导入了已经定义好的 cmc_2 的材料参数。

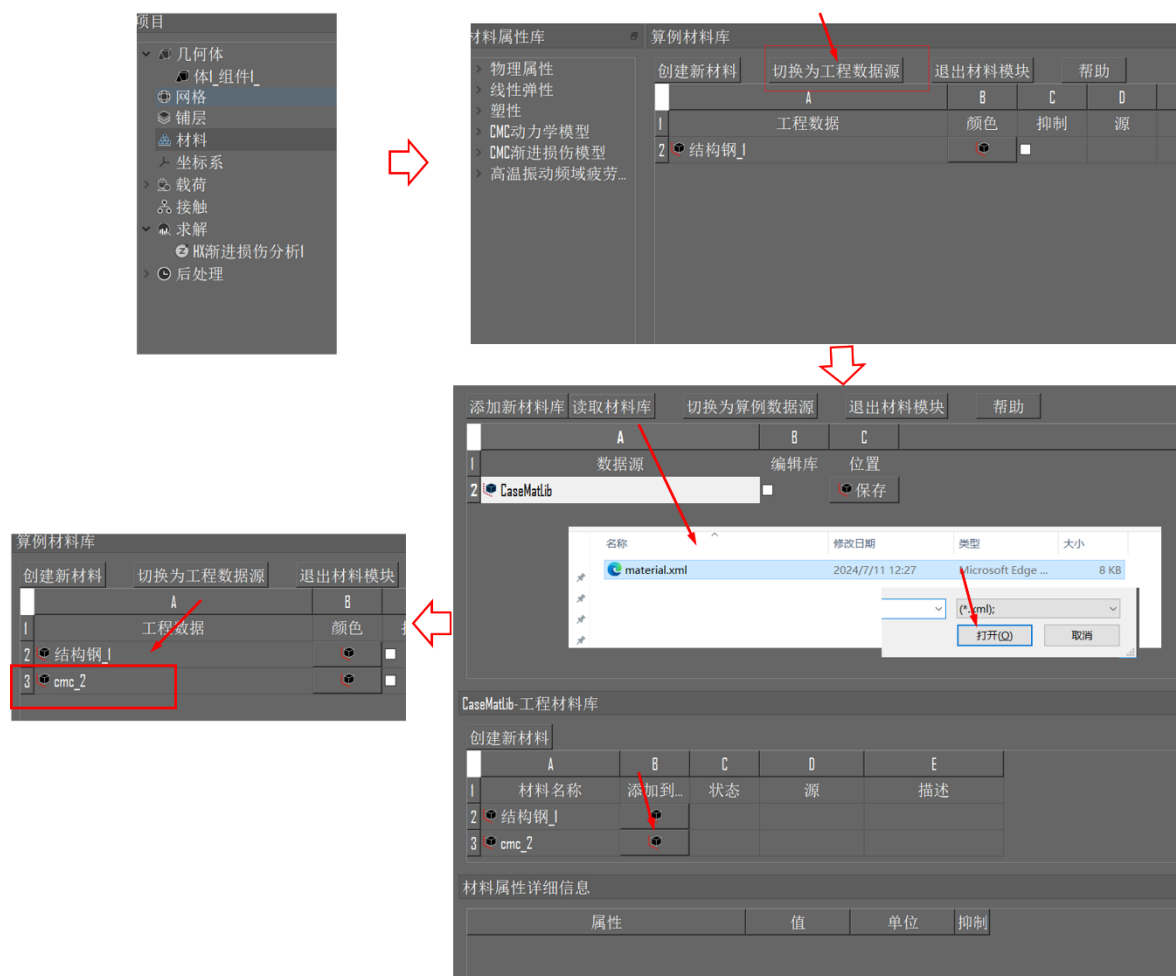


图 8 外部导入已经定义好的材料参数

另一种方法是对模型所需要的材料参数进行逐步定义。渐进损伤分析中需要定义的材料参数主要包括：初始弹性材料参数、非线性本构曲线相关参数、失效准则及失效后单元的折减系数，其中，后面三组参数被集成到渐进损伤模型中。此外，如果要考虑温度的影响，需要定义不同温度下的热膨胀系数。一般情况下，CMCs 结构在高温下使用，而 CMCs 性能与温度有关，因此，需要定义不同温度下 CMCs 材料参数。不同材料参数之间不需要保持温度点的一致。下面对材料参数的定义进行介绍。

1) 初始材料参数定义

双击材料选项，进入材料参数定义界面。点击创建新材料，并重命名。如下所示实例中，命名为“cmc”，则软件根据定义材料参数的个数，自动将材料参数名称补充为“cmc_2”。然后在左边材料属性库中，选择需要材料属性并双击，则材料属性被添加到新定义材料中。比如本实例中，基于 CMCs 的特点，主要选择了正交各向异性热膨胀系数、正交各向异性弹性模量及 HX 渐进损伤模



型。



图 9 新建材料参数

选择好属性后，定义相应的数值，具体点击 `cmc_2` 中下方热膨胀系数属性行（如图 10 所示），在最右边出现需要填写的表格，在表格中依次添加与温度相关的热膨胀系数。可以直接将外部数据复制进来，也可以依次输入。在最下方一行中输入新的温度，即可以添加新温度下的数据。表格会自动添加和保留最后一行空白行，便于添加新的温度载荷。

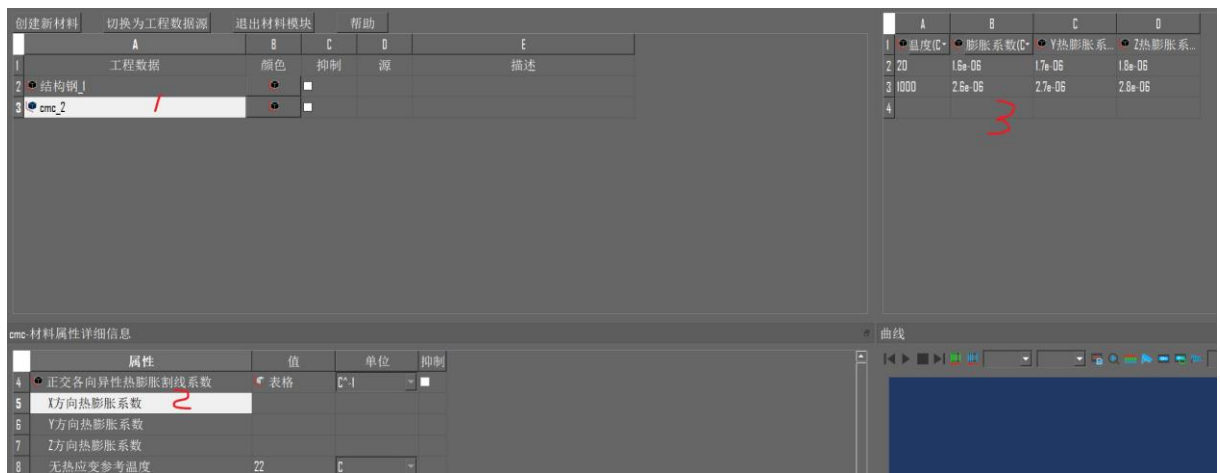


图 10 定义与温度相关的热膨胀系数

点击 `cmc_2` 下方任一弹性参数相关行，右侧弹性需要输入参数的表格（如图 11 所示）。同样，依次输入不同温度下的材料参数。每个温度下的材料参数共 9 个，三个弹性模量、三个剪切模量、三个泊松比。输入方式可以外部数据复制，也可以逐个输入。同时，注意输入参数的单位，而输入参数的单位也支持修改。

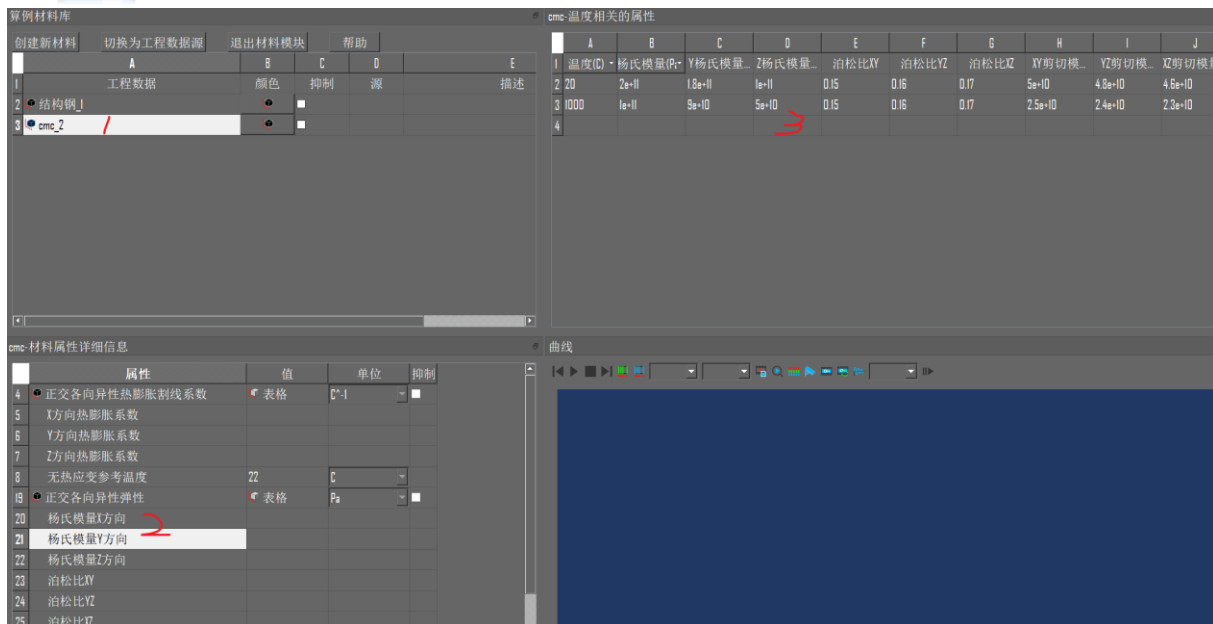


图 11 定义与温度相关的正交各向异性材料参数

2) 渐进损伤材料参数定义

除了初始材料参数外，最重要的是定义材料非线性材料参数。软件将非线性材料合并为渐进损伤模型。同样，点击 `cmc_2`，并点击下方渐进损伤模型，则跳转到非线性材料参数定义界面。下面对如何添加相关参数进行详细的介绍。

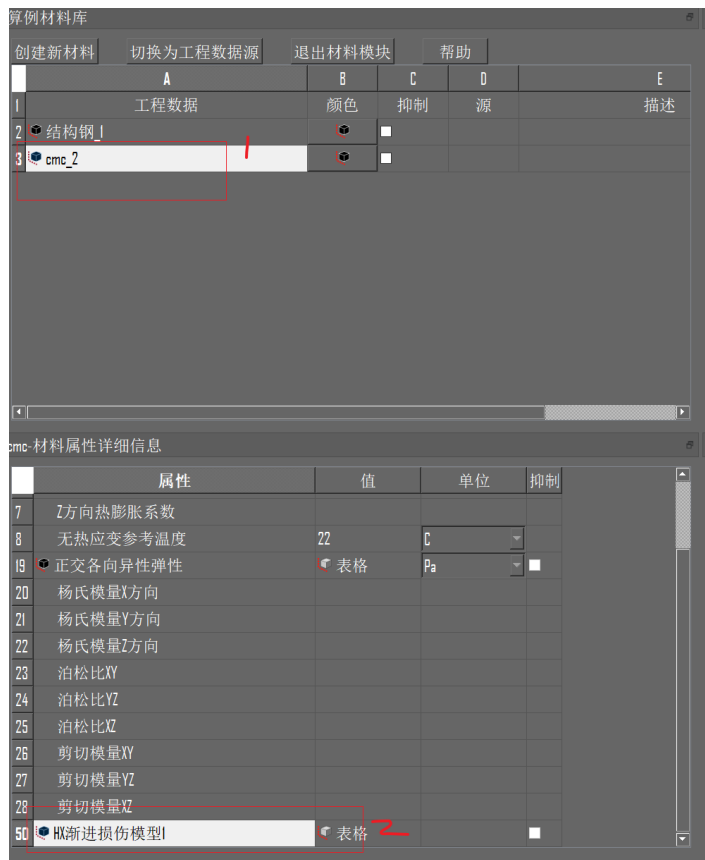




图 12 定义渐进损伤相关参数

如图 13 所示为渐进损伤模型定义界面，主要分为 2 个部分，定义温度及对应温度下的材料参数，每个温度下的材料参数主要包括非线性曲线系数、失效准则及折减系数。

图 13 展示了 20 温度下材料参数定义，过程如下所示：

①首先，左上角温度添加按钮，可以添加不同的温度，在对应表格中输入温度，本实例中第一个温度点为 20℃；

②其次，选中该温度，则可以在右侧输入该温度下相关材料参数；

③然后，选中材料非线性参数模块，定义不同方向非线性本构曲线系数。先在矩形框中打钩，表示要考虑该方向本构曲线的非线性；其次，在多项式系数下拉列表中选择多项式的系数（比实际多项式系数加 1，因为包含了常数项），在对应表格中输入多项式系数。支持不同曲线采用不同多项式系数。输入方式同样支持外部数据的复制。不同方向依次选择和输入对应的系数。如图 13 所示，考虑了 X/Y 方向拉伸非线性本构，及 XY 方向的剪切非线性本构。

④选择失效准则选项。CMCs 常用的失效准则为最大应变准则。软件依次考虑不同方向的失效，因此，在对应方向的矩形框中打钩，表示考虑该方向的失效，然后输入对应的最大应变值。如下图 13 所示，考虑了 X/Y/XY 方向的失效行为。

⑤最后，选择折减系数选项，定义失效单元的材料参数折减系数。一般情况下，采用各向同性折减方式，且可以采用默认的 0.1 折减系数。

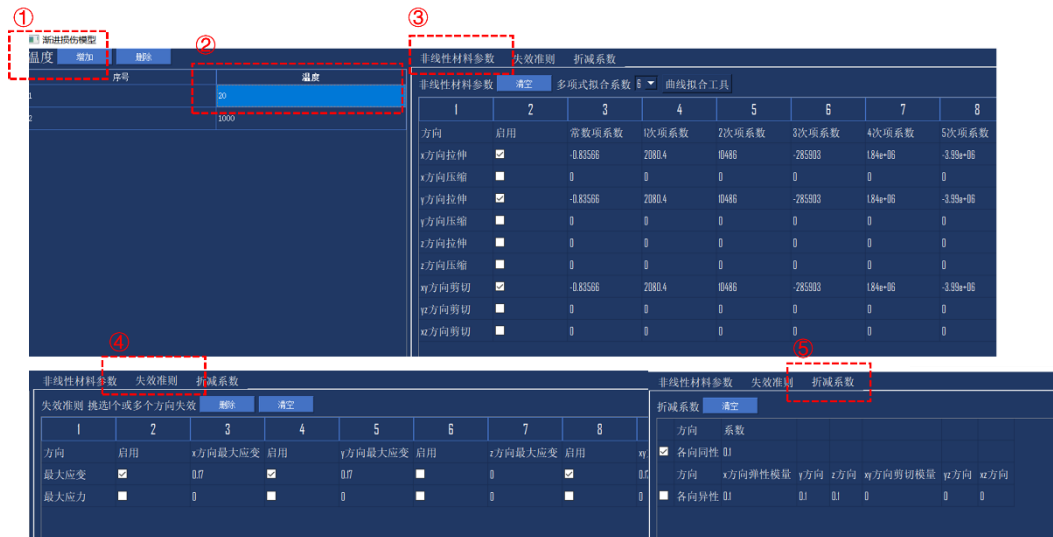


图 13 20℃下 CMCs 非线性材料参数定义示意图

上述介绍了 20℃下非线性本构模型的定义过程，然后点击左上温度的添加按钮，添加新的温度，新的温度为 1000℃。选中 1000℃选项，并在右边输入该温度下的材料参数。按照上述的步骤，依次输入不同方向非线性本构曲线系数、失效应变及折减系数，如下图 14 所示。

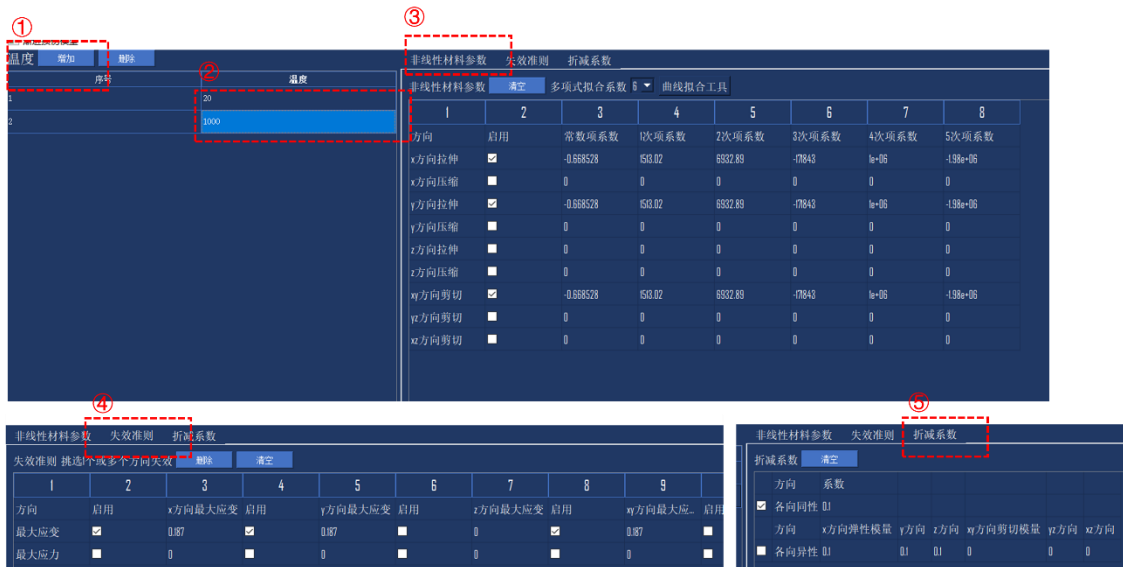


图 14 1000°C下 CMCs 非线性本构参数

至此，定义好了考虑温度的渐进损伤模型，点击图 15 右上角关闭按钮，则退出渐进损伤模型定义模块，并进入材料参数定义模块。进一步，点击图 15 中退出材料模块，则退出材料参数的定义。此外，需要注意的是，在材料参数模块，如果点击关闭按钮，则默认是关闭整个计算案例。



图 15 渐进损伤模块及材料参数定义模块退出示意图



定义好材料参数后，需要在几何体模块，点击几何体中不同的体，并在右侧几何体详细信息框中，修改体的对应的材料，即将新定义的材料参数赋予对应的几何体。

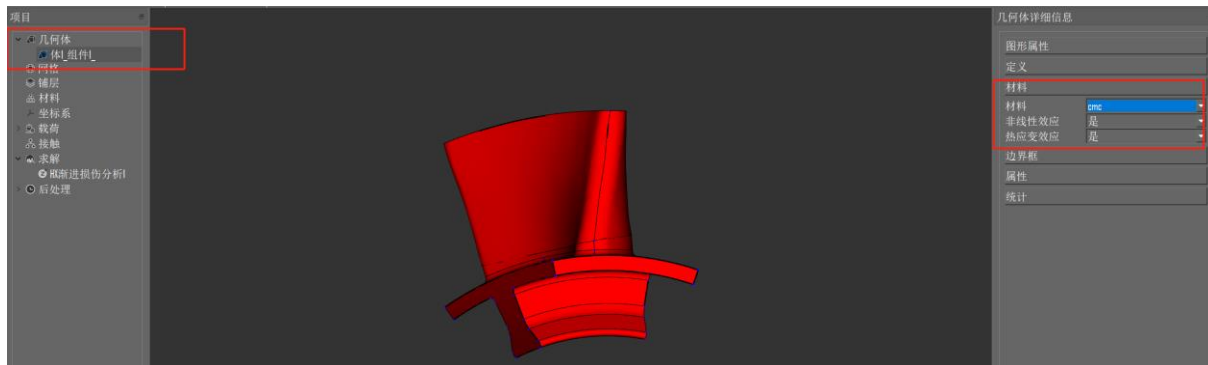
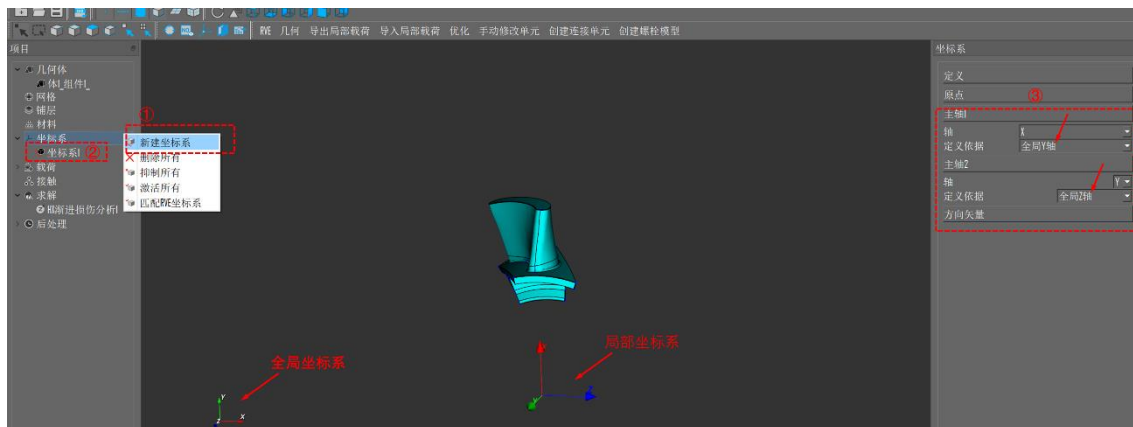


图 16 几何体赋予新定义的材料参数

(4) 局部坐标系定义

考虑叶片的叶身是材料大致的主方向，且与叶片所处的整体坐标系不同，因此，需要定义局部坐标系来表示材料的主方向。如下图 17 所示，右击坐标系选项，插入坐标系，然后在下方坐标系框中定义坐标系方向。本实例中，局部坐标系原点与整体坐标系相同，局部坐标系 X 方向为整体坐标系（也成为全局坐标系）Y 轴，局部坐标系局部坐标系赋予该几何体。系 Y 方向为整体坐标系（也成为全局坐标系）Z 轴，进而定义了局部坐标系。定义好局部坐标系后，需要在几何体中，选择对应的几何体体，并赋予修改后单元坐标系。



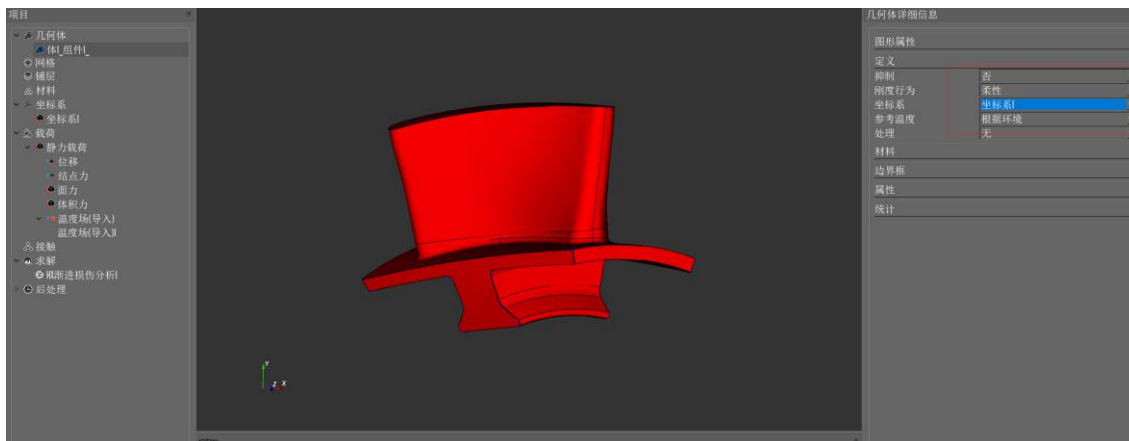


图 17 局部坐标系定义及赋予

(5) 载荷定义

下面需要定义载荷和边界条件，对于本实例中叶片，主要定义温度场、位移约束条件和面载荷（类比旋转加速度）。下面对每种载荷的定义依次进行介绍。

1) 温度场定义

叶片的温度场通常由气动分析得到，因此，通常需要导入气动计算得到的温度场分布，然后插值得到当前模型的温度场。如图 18 所示，首先点击载荷->静力载荷->温度场，并右击增加，则增加了新的温度载荷。选中新增加的温度载荷，在右侧设置中导入温度场。点击浏览，打开温度场文件存放的路径，选择对应的文件并选择打开。进而在右侧设置框中，点击导入，则软件自动完成导入温度场与现有模型（节点单元）之间的温度插值。

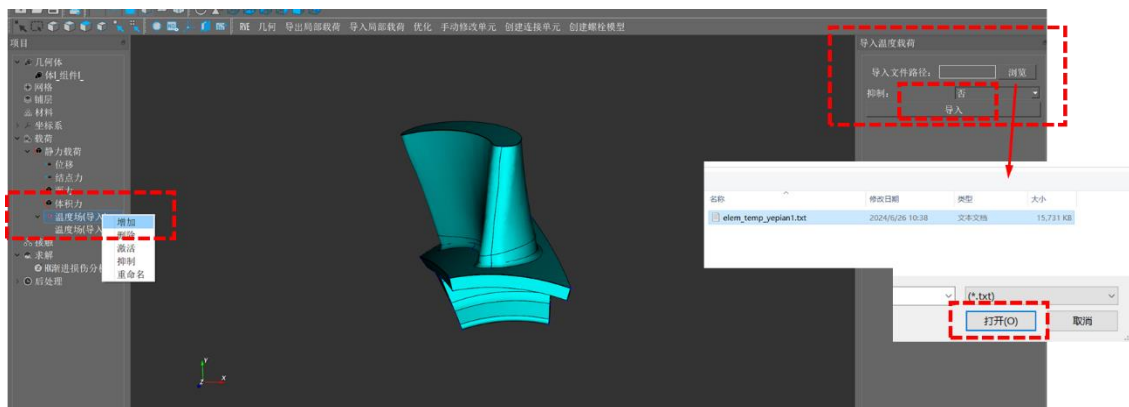


图 18 选择导入的温度场数据

最后，导入的温度场示意图如图 19 所示。可以看出叶片温度分布不均匀，叶身温度较高。

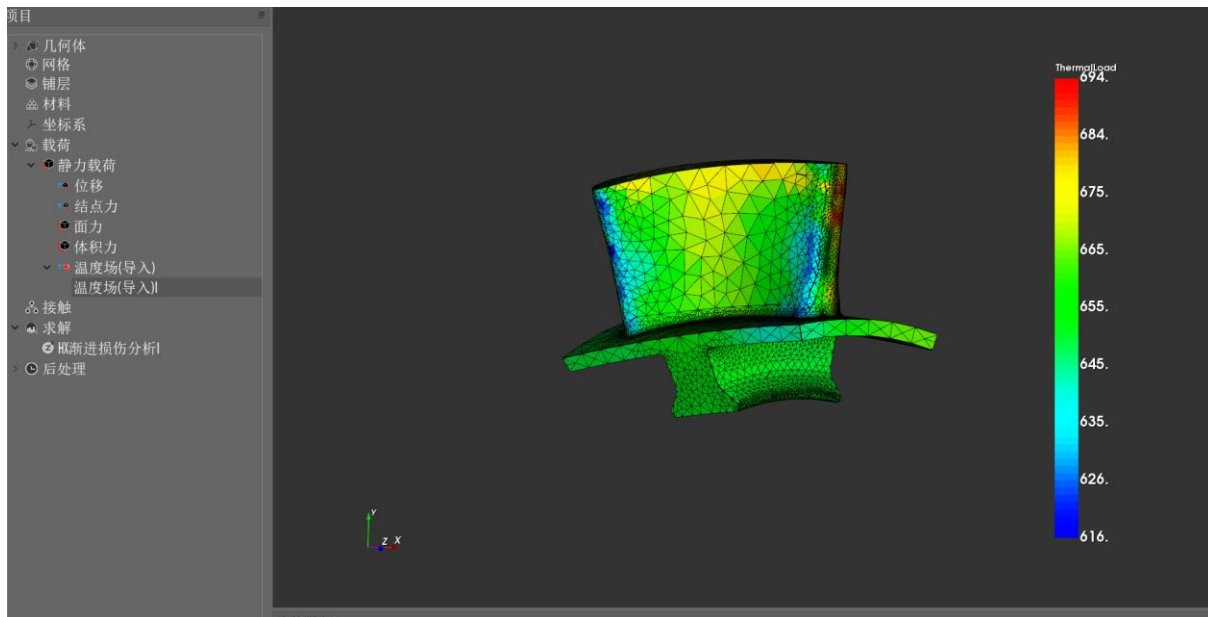


图 19 导入温度场结果

备注：外部温度场数据共 4 列，分别是三列坐标和一行温度，如图 20 所示。

elem_temp_yepian1.txt - 记事本				
文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)
	x坐标	y坐标	z坐标	温度数据
0.75778	18.13452	-12.60580	648.13346	
-2.12965	17.99484	-12.60513	649.46493	
-1.94088	18.04279	-12.60969	649.31620	
-7.42002	16.63391	-12.60365	651.19907	
-7.24477	16.60677	-12.60543	651.15858	
-7.07499	16.72299	-12.60547	651.18584	
-4.49675	16.58385	-12.99384	650.54424	
-1.31470	16.03364	-13.99977	649.68515	
-3.29003	17.11418	-12.82040	650.19053	
-3.32339	17.30190	-12.75203	650.21954	
-5.60766	16.23843	-12.99204	650.73819	
-1.10767	16.88155	-13.03501	649.41573	
-0.88879	16.59717	-13.35492	649.43827	
-0.99505	16.57461	-13.29451	649.46359	
-1.07755	16.61106	-13.30344	649.48499	
-0.81715	16.71884	-13.37644	649.40505	
-0.91919	16.92540	-13.23060	649.37705	
-0.82623	16.86294	-13.23361	649.36143	
0.01014	16.77146	-13.11540	649.38588	

图 20 外部导入温度场数据示意图

2) 位移约束定义

对于三维有限元计算，需要对模型三个方向的位移进行约束。本实例中，为了简化，将叶片与轮盘交接的位置定义固支约束。定义步骤如下，首先点击载荷->静力载荷->位移，并右击增加，则增加了新的位移载荷。此外，位移载荷 2 表示是本实例中施加的第二个载荷。在右侧位移载荷施加属性框中，定义相关参数。首先，在软件上方，点击选择面的示意图按钮，然后按住 **ctrl** 键，依次选中需要施加位移约束的面，点击右侧选择按钮，面变为黄色，表示选择成功。其次，定义位移载荷。本实例中，需要施加固支约束，因此，将位移定义中 X/Y/Z 自由前面矩形框中去掉 \checkmark ，结果如图 21 所示。默认情况下，X/Y/Z 三个方向施加的位移载荷为 0，即表示施加了固支位移载荷。此外，



可以根据需要，在下方的表格中定义不同方向的位移。

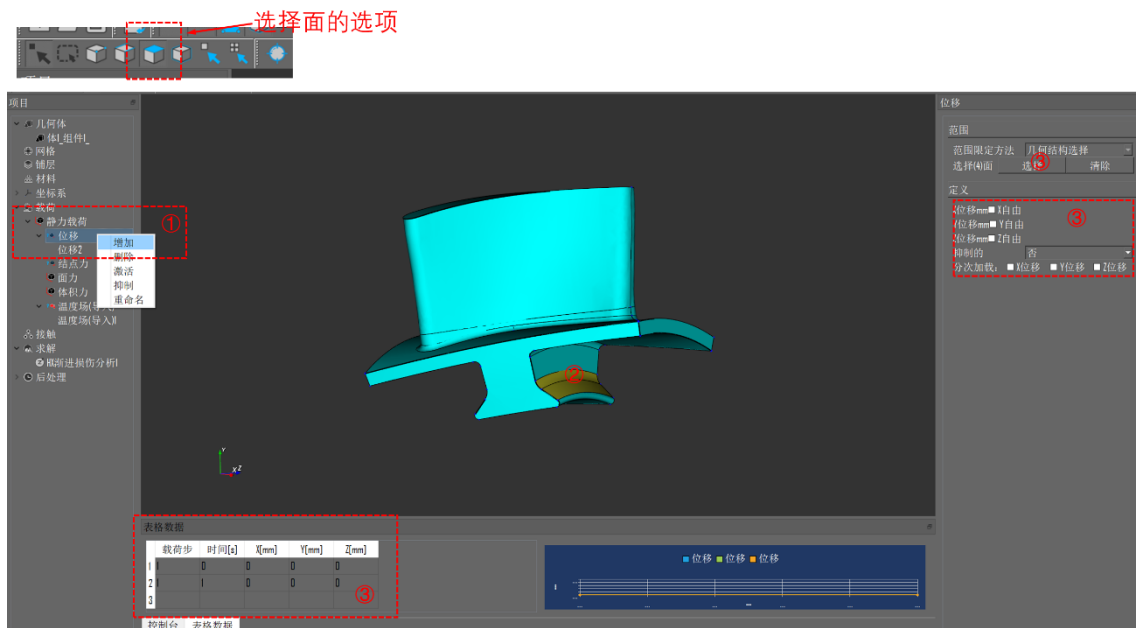


图 21 固支约束施加示意图

3) 压力载荷

叶片除了受到不均匀的温度场，另一个主要的载荷形式为旋转载荷。而循环载荷下，叶片主要受到沿着叶高方向的拉伸载荷，因此，实际实验时，通常用沿着叶高方向的拉伸来等效叶片受到的旋转离心载荷。本实例中，对叶片顶端施加向外的压力（加载方向沿着法线朝外）来模拟叶片的拉伸行为。面载荷施加过程与上述相似，首先点击载荷->静力载荷->面力，并右击增加，则增加了新的面力载荷。然后选择要施加面积载荷的面，并定义面力载荷的大小。载荷在图 22 下方的表格中定义。时间 0 和 1 都施加为 100MPa，表示采用阶跃式载荷施加形式。

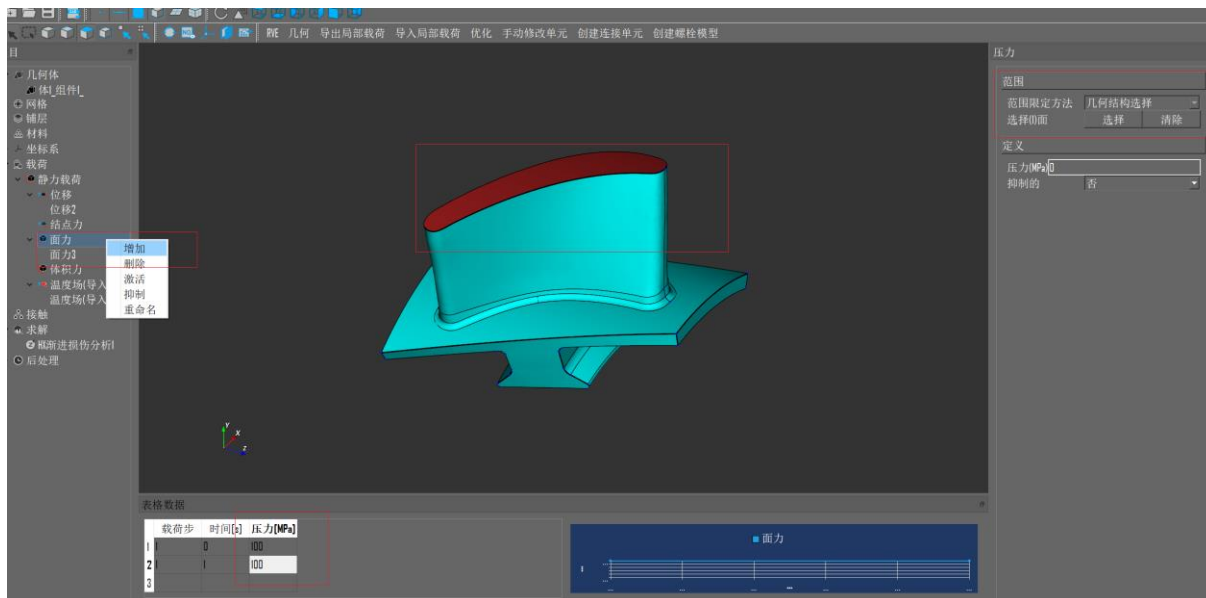


图 22 施加压力载荷示意图

(6) 求解设置

至此，完成了模型带入，网格划分，材料参数定义，材料坐标系定义，载荷定义等有限元全部的前处理过程。在计算前，可以进一步对求解进行相关设置，以求更快可靠的得到求解结果。定义过程如下图 23 所示，点击求解->HX 渐进损伤分析，在右侧分析中修改求解设。其中，最常见的是修改 CPU 数量。然后点击计算按钮，弹出开始计算的弹框，点击是，则软件在后台调用 ansys 开始计算。

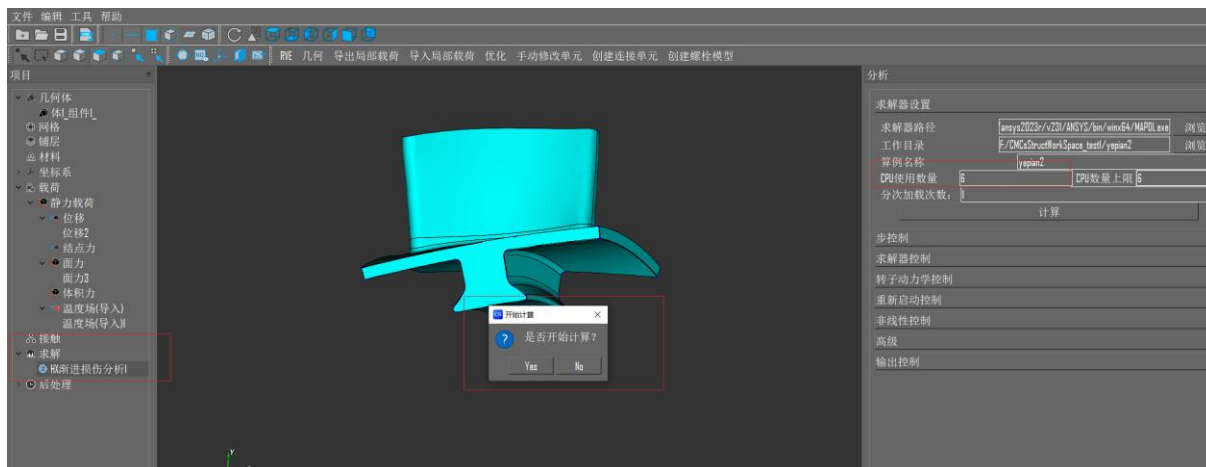


图 23 求解设置及开始计算示意图

计算结束后，弹窗弹出计算完成，点击 Yes，则可以计算结果的查看。

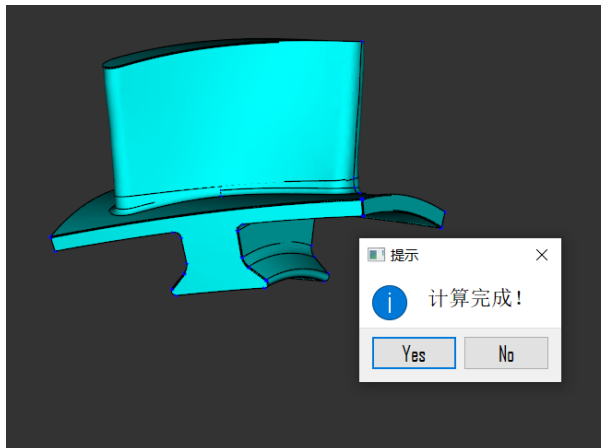


图 24 求解结束示意图

(7) 结果查看

求解结束后，点击后处理，软件自动导入节点和单元计算结果。右击后处理，依次插入变形、应力、应变、失效单元，并依次对每种求解结果选择作用对象。以变形为例，需要选择查看那个对象的位移。本实例中，查看整体叶片的变形。因此，先在界面上方工具栏中，选中选择体的图标，然后单机选择体，并在界面右侧点击选择，则选中变形作用的范围。对于应变、应力也是相同的操作，而查看失效单元则不需要。设置好查看的结果后，右击后处理，点击评估所有，软件对所有查看结果进行评估，得到的几秒钟，可以查看结果。

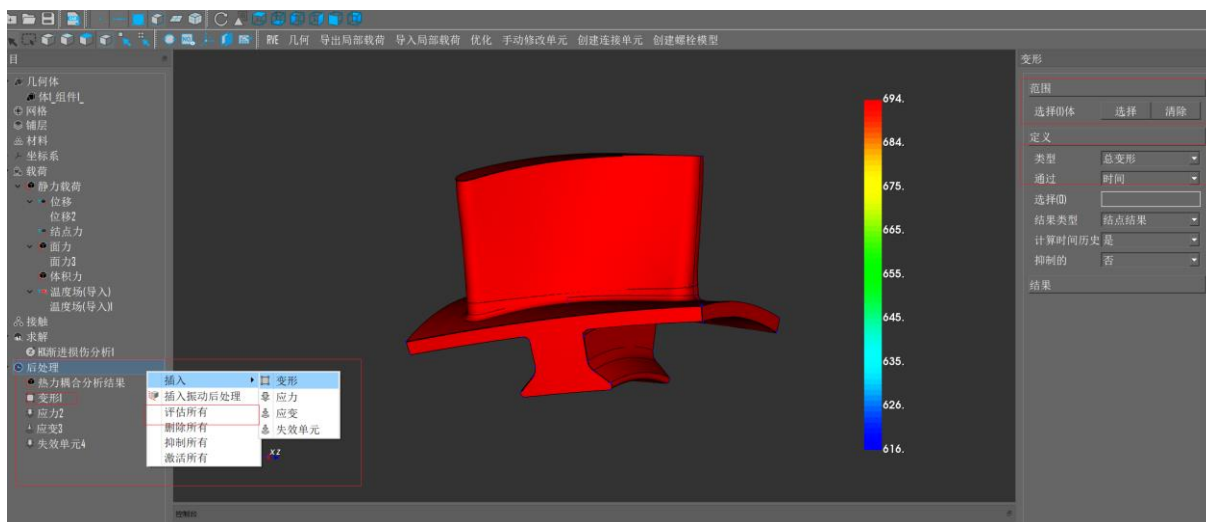


图 25 后处理结果查看设置

如下图 26-27 为叶片总变形、应变及应力计算结果。可以看出，叶片总体变形由叶根处向叶身处增加。应变和应力集中分布相似，主要集中于叶片榫头中。图 28 为失效单元分布，可以看出，失效单元主要分布在应力应变集中区域。由于失效单元的存在，叶片的结构设计需要进一步优化。同时，后续可以建立叶盘，与叶片之间定义接触，进一步提高计算精度。

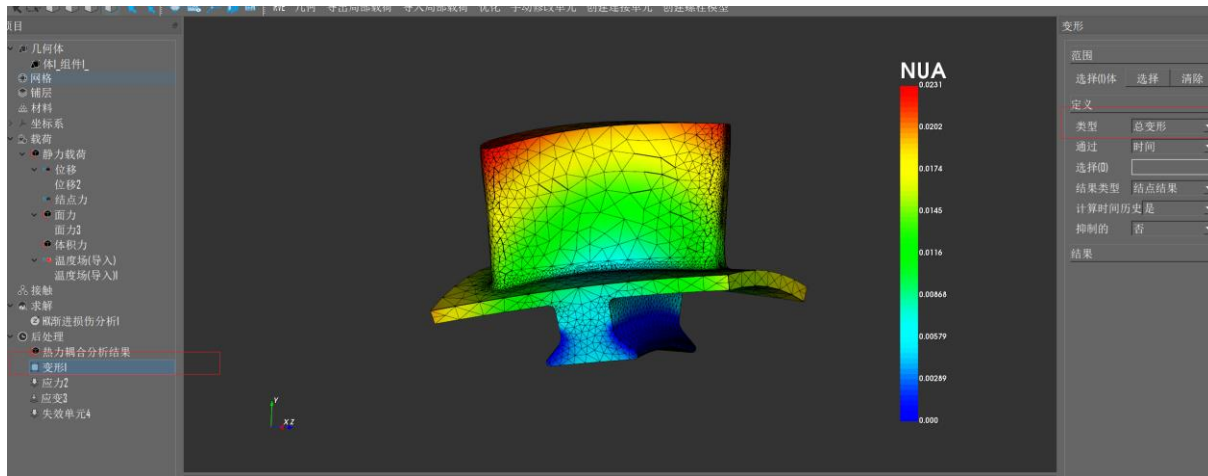


图 26 后处理结果-总变形

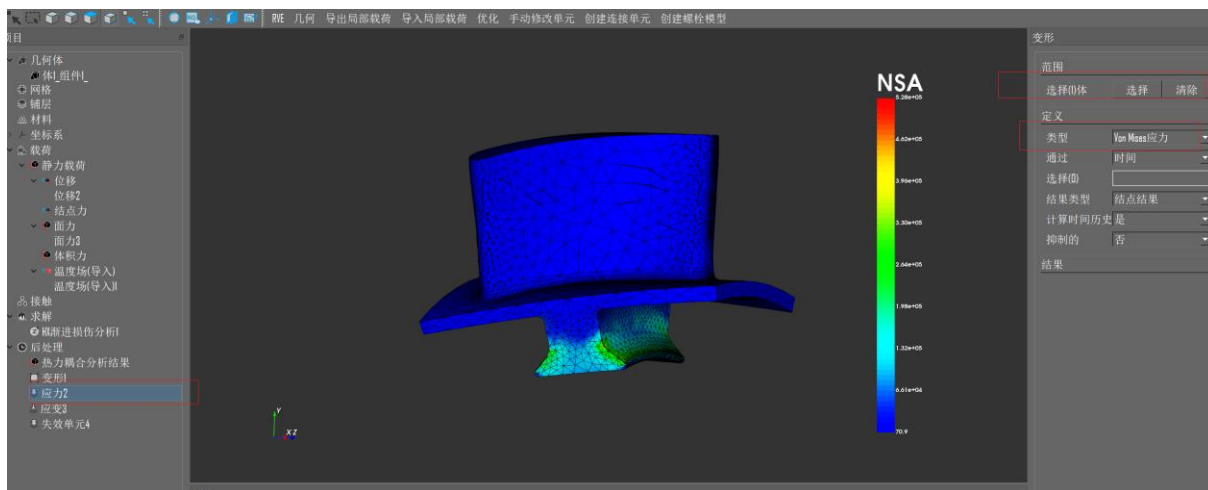


图 27 后处理结果-总应变分布

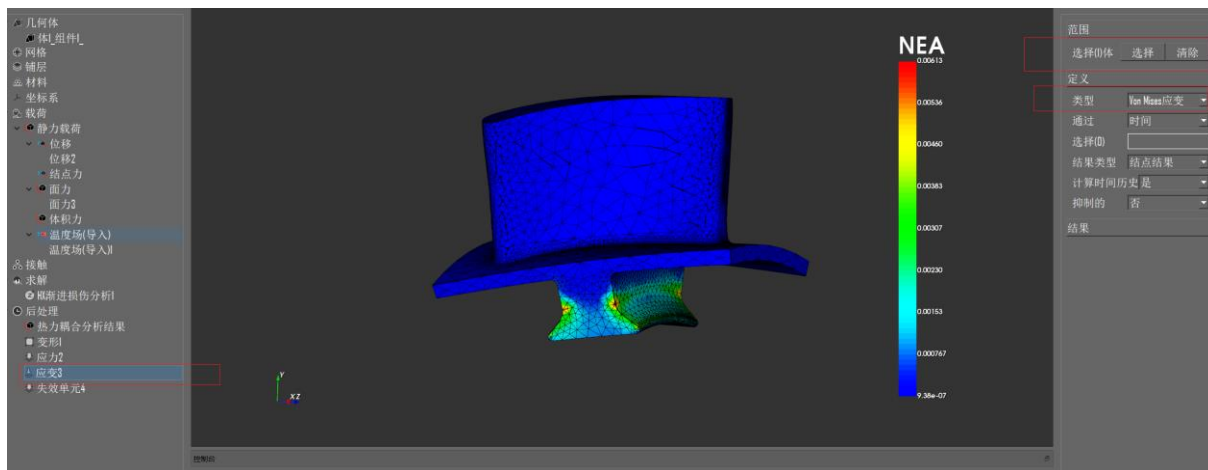


图 28 后处理结果-总应力分布

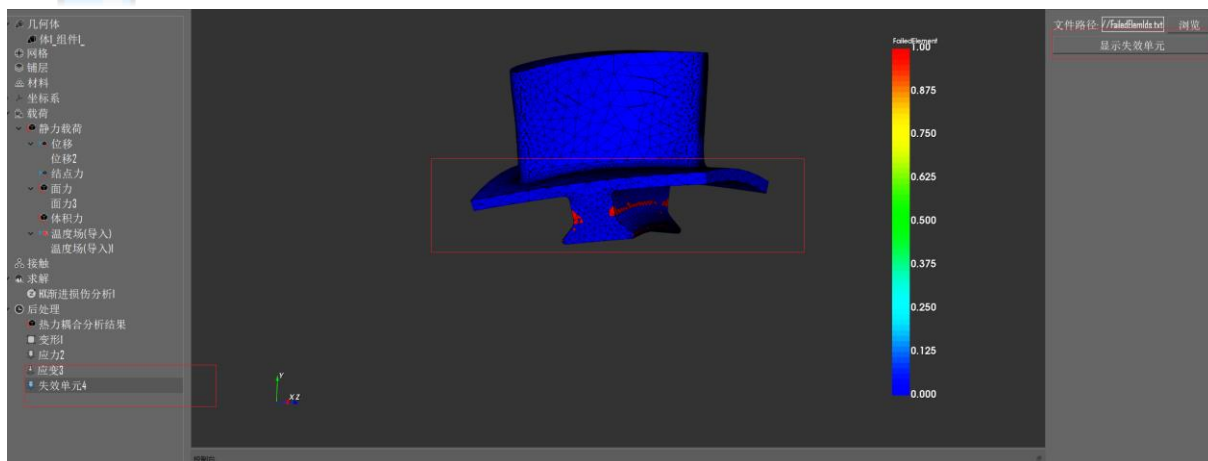


图 29 后处理结果-失效单元分布

上述默认位移、应变、应变是总的结果，在下图所示的下拉菜单中，可以修改和查看不同方向的结果。

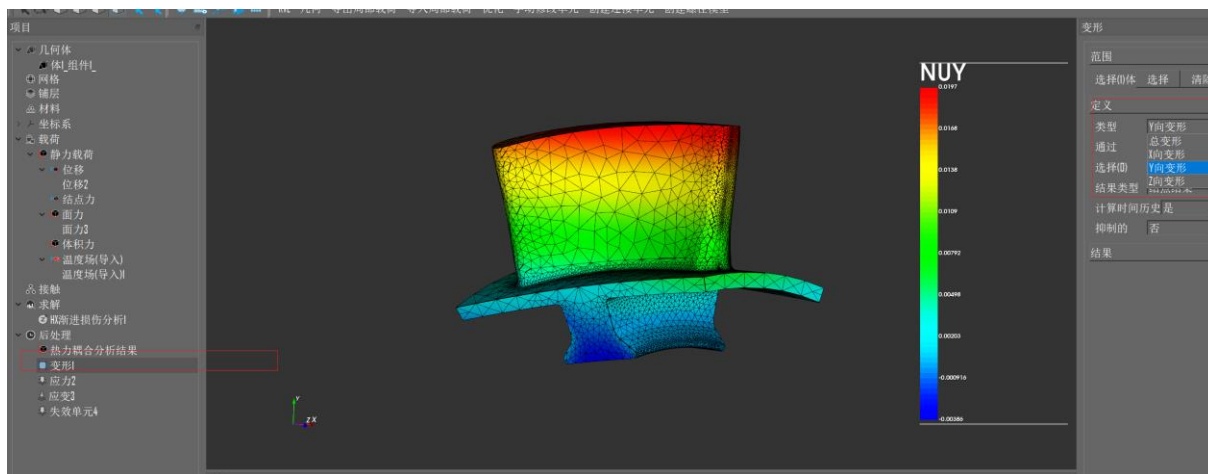


图 30 后处理中修改查看结果

(8) 结果保存

结果计算时，点击右上角关闭按钮，则结束计算，弹窗如下所示弹框。点击是，则对计算结果进行保存。后续可以打开已经保存的文件，进行查看。

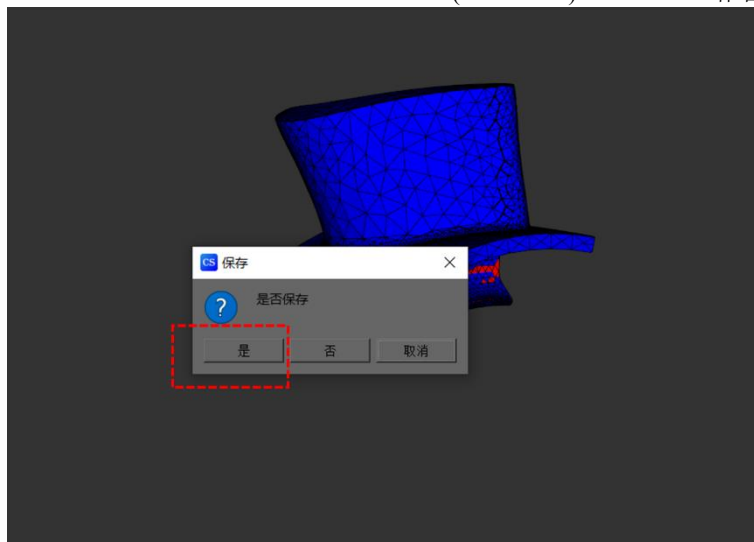


图 31 后处理结果-总的应变分布