



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

# 材料计算与设计特色实验

ANSYS 有限元仿真

学院名称：材料科学与工程学院

姓 名：张朋朋

学 号：ZY2401325

2025 年 5 月 16 日

# Project 1 潜水艇的热力学分析

## 1. 问题描述

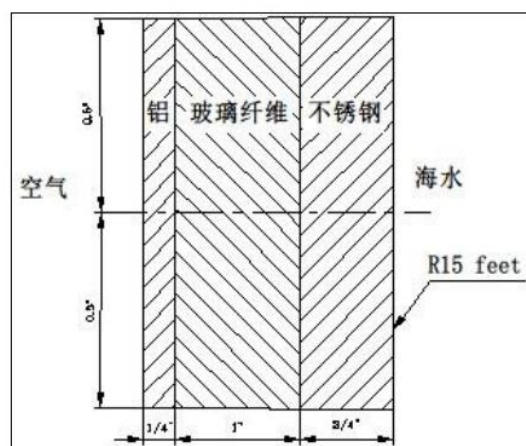
某潜艇可简化为一个由三层组成的圆筒结构，最外层为不锈钢，中间为玻璃纤维隔热层，最内层为铝层，圆筒内为空气，外部环境为海水。现要求求解该结构的内外壁面温度及内部的温度分布。

为解决该问题，采用有限元方法建立三层材料的稳态热传导模型，具体步骤包括：

- 几何建模，按照题目尺寸构建各层圆环区域；
- 指定各层材料热物理属性，分别赋予不锈钢、玻纤和铝对应的热导率；
- 进行网格划分，考虑各层厚度差异细分网格；
- 施加边界条件，其中包括内外表面对流换热参数；
- 利用热传导有限元单元进行求解，获得温度场分布；
- 最终输出内外壁面温度及温度分布等结果，评估潜艇结构的热稳定性。

**1 foot=12 inch, 1 英尺=12 英寸**

几何参数：	筒外径	30 feet
	总壁厚	2 inch
	不锈钢层壁厚	0.75 inch
	玻纤层壁厚	1 inch
	铝层壁厚	0.25 inch
导热系数	筒长	200 feet
	不锈钢	8.27 BTU/hr.ft.°F
	玻纤	0.028 BTU/hr.ft.°F
	铝	117.4 BTU/hr.ft.°F
边界条件	空气温度	70 °F
	海水温度	44.5 °F
	空气对流系数	2.5 BTU/hr.ft².°F
	海水对流系数	80 BTU/hr.ft².°F



沿垂直于圆筒轴线作横截面，得到一圆环，取其中 1 度进行分析,如图示

## 2. 实验步骤

### 2.1 作业名设置

- 进入 Utility Menu > File > change jobename, 输入 "Thermal".
- 进入 Utility Menu > File > change tittle, 输入 "潜艇稳态热分析"

### 2.2 单位和材料属性设置

- 进入 Main Menu: Preprocessor>Material Props>Material Library>Select Units, 选择 "BFT".
- 进入 Main Menu: Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete, 选择 "Thermal Mass-Solid-Plane55".
- 进入 Main Menu: Preprocessor>Material Prop>Material Model, 根据题目选材要求, 分别赋予相应的材料属性, 具体对应如下材料编号 1 (不锈钢) KXX=8.27, 材料编号 2 (玻纤) KXX=0.028, 材料编号 3 (铝) KXX=117.4

### 2.3 几何建模

根据题目要求, 完成几何模型的建立

进入: Main Menu: Preprocessor>-Modeling->Create>-Areas-Circle>By Dimensions

- 在 RAD1 中输入 15, 在 RAD2 中输入  $15 - (0.75/12)$ , 在 THERA1 中输入 -0.5, 在 THERA2 中输入 0.5, 点击 APPLY。
- 然后, 在 RAD1 中输入  $15 - (0.75/12)$ , 在 RAD2 中输入  $15 - (1.75/12)$ , 点击 APPLY。
- 接下来, 在 RAD1 中输入  $15 - (1.75/12)$ , 在 RAD2 中输入  $15 - 2/12$ , 点击 OK。

建模完成后进入 Main Menu:

Preprocessor>-Modeling->Operate>-Booleane->Glue>Area, 选择 PICK ALL, 完成各部分的粘接

模型如图所示

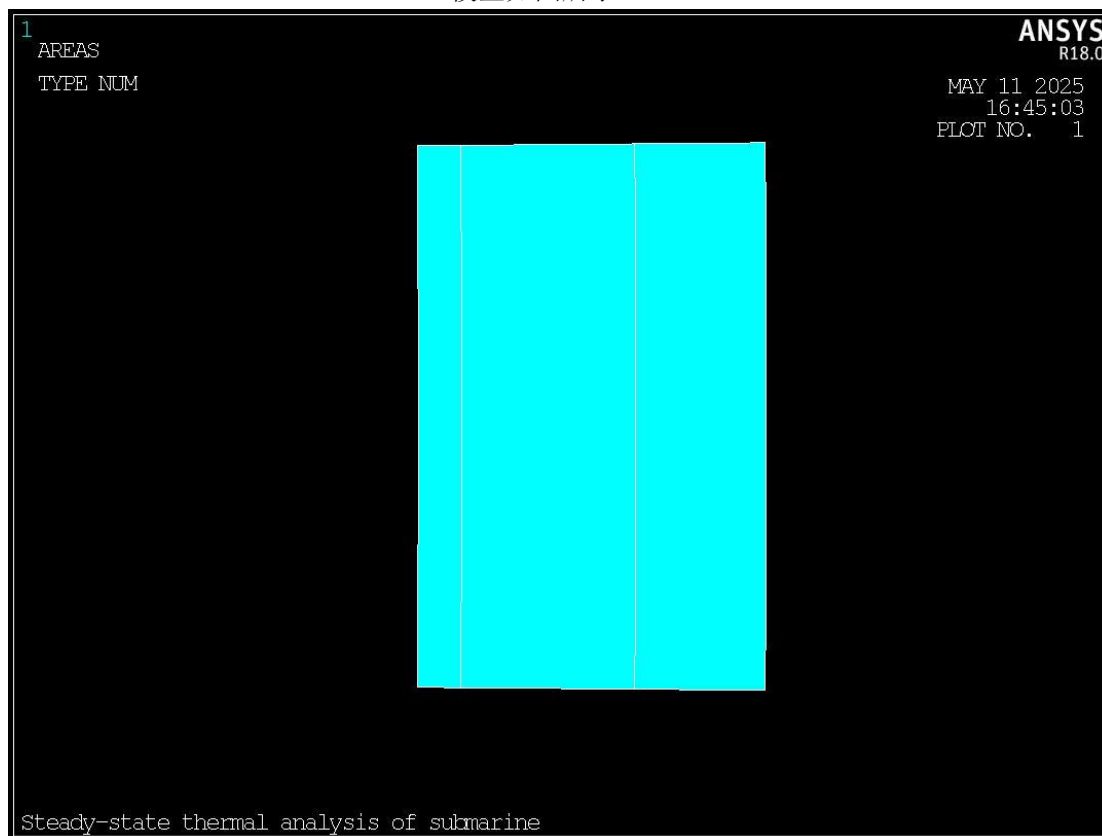


图 1-1

### 3. 建立有限元模型

根据几何模型进行网格划分、施加约束，完成有限元模型的搭建。由于各层厚度不同，网格划分时需分别处理各层。步骤如下：

#### 3.1 网格划分及材料属性赋予

- 进入 Main Menu: Preprocessor>-Meshing-Size Contrls>-Lines-Picked Lines:
  - ① 选择不锈钢层的短边，在 NDIV 框中输入 4，点击 APPLY。
  - ② 选择玻璃纤维层的短边，在 NDIV 框中输入 5，点击 APPLY。
  - ③ 选择铝层的短边，在 NDIV 框中输入 2，点击 APPLY。
  - ④ 选择四个长边，在 NDIV 中输入 16。
- 进入 Main Menu: Preprocessor>-Attributes-Define>-Picked Area:
  - ① 选择不锈钢层，在 MAT 框中输入 1，点击 APPLY。
  - ② 选择玻璃纤维层，在 MAT 框中输入 2，点击 APPLY。
  - ③ 选择铝层，在 MAT 框中输入 3，点击 OK。
- 进入 Main Menu: Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Mapped>3 or 4 sided，选择 "picked all"。

### 3.2 施加约束

- 进入 Main Menu: Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Convection>On lines:
  - ① 选择不锈钢外表面，在 VAL1 框中输入 80，在 VAL2I 框中输入 44.5，点击 APPLY。
  - ② 选择铝层内表面，在 VAL1 框中输入 2.5，在 VAL2I 框中输入 70，点击 OK

有限元模型如图所示

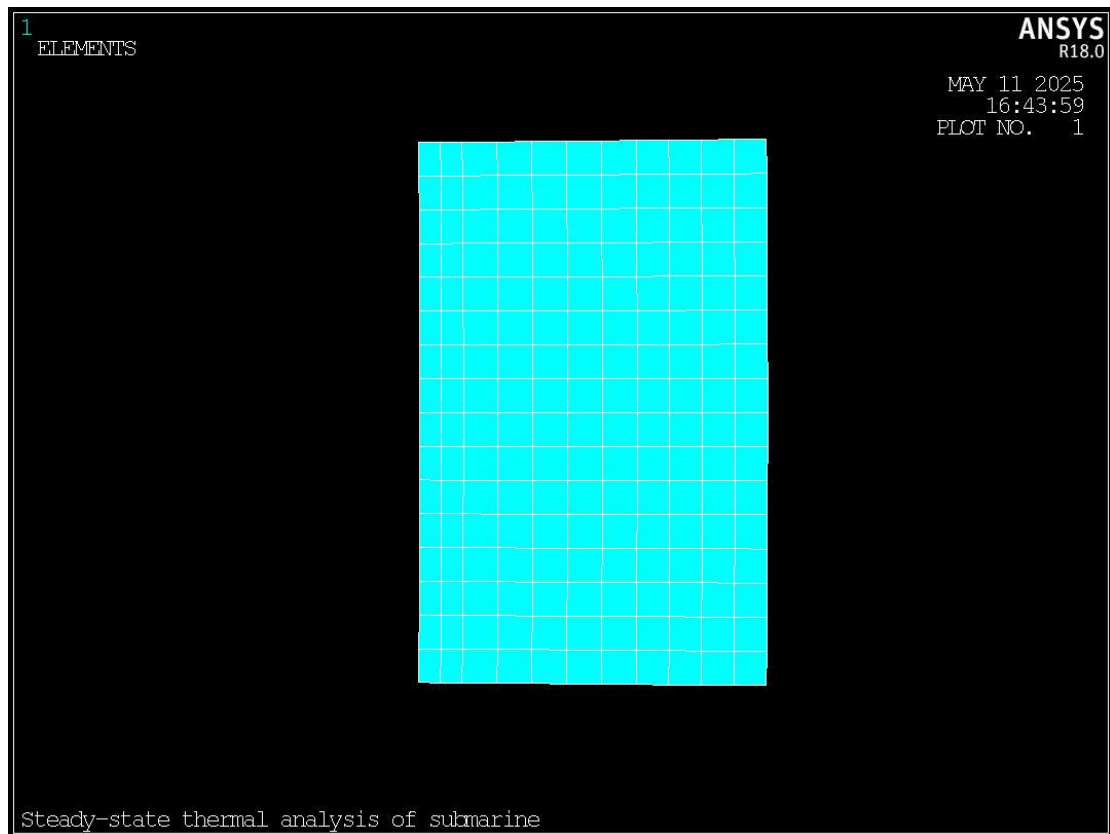


图 1-2

## 4. 实验数据

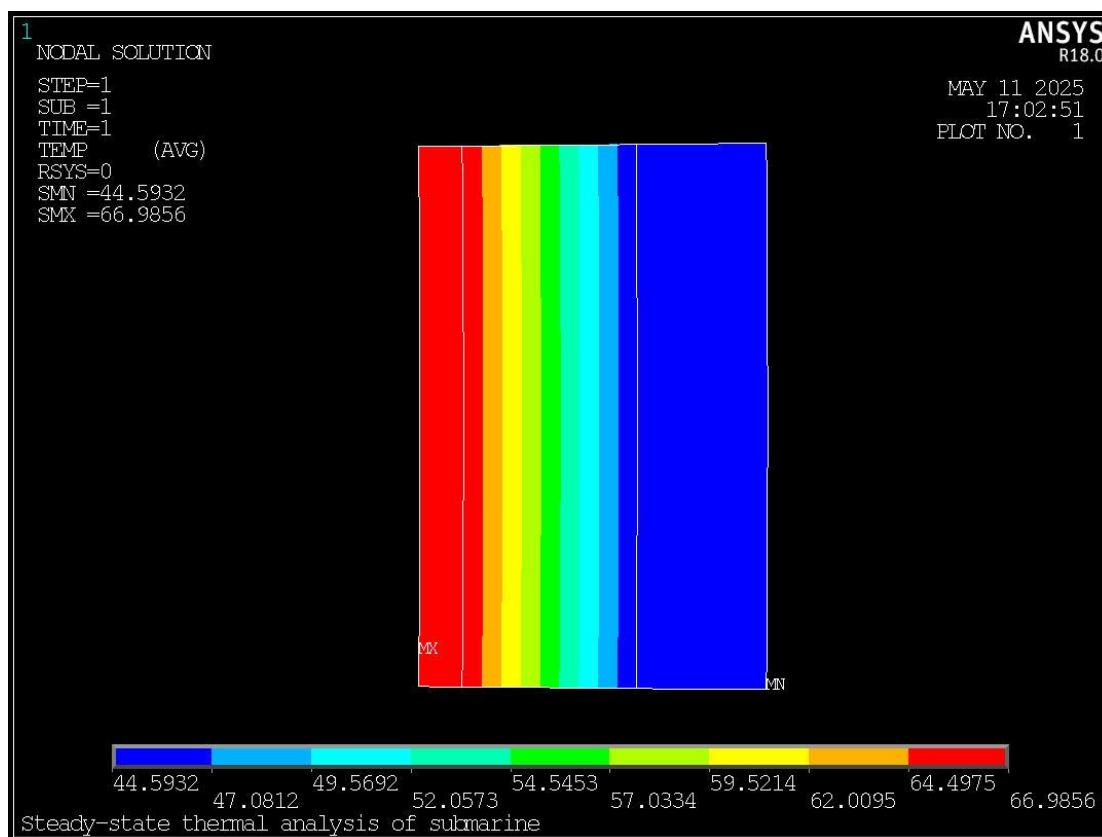


图 1-3

完成上述步骤后进入 Main Menu: Solution>-Solve-Current LS 即可运行模拟，完成后在 Main Menu: General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu 中选择 temperature 即可获得温度分布图，实验结果如图

## 5. 结果讨论

具体来看，内层铝材与外层不锈钢的整体温度几乎保持稳定，变化极小，说明这两层材料的热传导相对均匀且较快，不具备显著的隔热功能。而处于中间的玻璃纤维隔热层内部则存在明显的温度梯度，温度随距离的变化较大。这表明中间的玻纤层凭借其较低的热导率，有效地阻碍了热量传递，发挥了良好的隔热和保温作用。

三层结构中，玻纤隔热层是潜艇墙体热阻的主要来源，显著降低了热传递速度，从而保证了潜艇内部的温度稳定性。铝层和不锈钢层虽作为结构支撑和外壳保护，但其热传导性能使其温度变化较小，未能提供有效的隔热功能。

本模型的温度分布特征与实际潜艇热管理的需求相符，验证了多层复合材料在热稳态控制中的合理性和有效性，为潜艇及类似结构的热设计提供了理论依据。

## Project 2 薄板的平面应力问题分析

### 1. 问题描述

计算分析模型如图 2-1 所示，习题文件名：plane

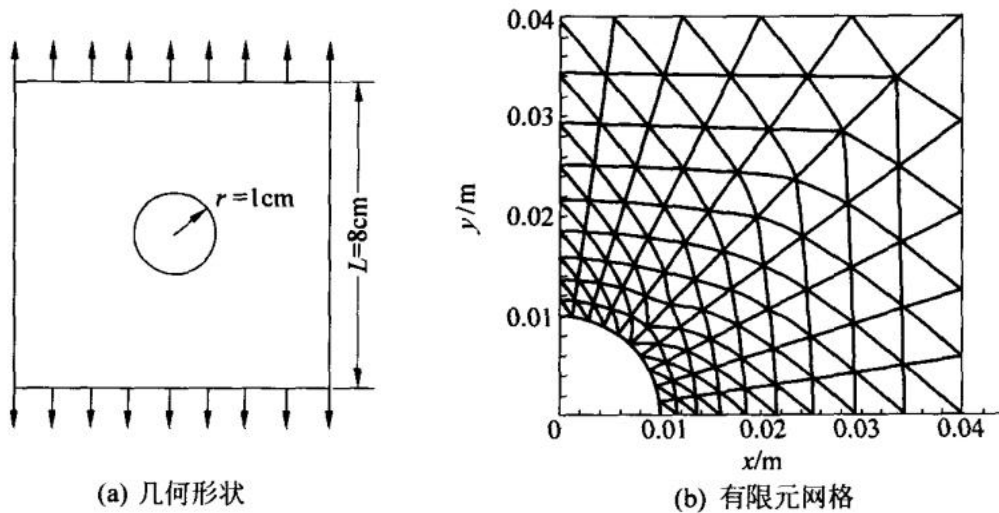


图 2-1 受均布载荷作用的薄板模型与单元网格图

一中心具有圆孔的方板，上下两边受  $y$  方向均匀拉伸载荷，如图 2-1 (a) 所示，方板边长  $L=8\text{cm}$ ，圆孔半径  $r=1\text{cm}$ ，板厚  $t=0.1\text{cm}$ ，拉伸的均布载荷  $q=10\text{Mpa}$ ，材料常数  $E=2.0 \times 10^5\text{MP}$ ，泊松比  $\nu=0.3$ 。分析其平面应力

为解决该问题，采用有限元方法建立平面应力模型，具体步骤包括：

- 几何建模，按照题目尺寸构建带圆孔的方板模型，并通过布尔运算完成圆孔的挖除；
- 定义单元类型及材料属性，选择适合平面应力分析的四节点实体单元，赋予材料弹性模量、泊松比及板厚度参数；
- 网格划分，采用映射划分方法，对模型进行细致网格划分，特别关注圆孔边缘区域的网格密度；
- 施加边界条件，对上下边界施加沿  $y$  方向均布拉伸载荷，同时设置对称边界条件和位移约束；
- 有限元求解，利用有限元软件对模型进行求解，获得结构的应力分布和变形；
- 结果输出与分析，输出应力和变形分布结果，分析圆孔边缘应力集中情况及整体变形性能，评估结构安全性。

## 2. 实验步骤

### 2.1 定义工作路径和工作文件名

- 选择 Utility Menu → File → Change Directory 命令，弹出 Change Working Directory 对话框，选择工作路径。
- 选择 Utility Menu → File → Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在 enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 plane, 单击 OK 按钮并关闭该对话框

### 2.2 单位和材料属性设置

- 进入 Main Menu: Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete, 选择 "Solid Quad 4node 42"。返回 Element Types 界面, Element Types → Options... → select K3: Plane stress w/thk (有厚度的平板应力问题, 须定义厚度实常数, 默认为 1)
- 进入 Main Menu: Preprocessor>Material Prop>Material Model, 根据题目选材要求, 分别赋予相应的材料属性
- 定义实常数 MainMenu→Preprocessor →Real Constants... →Add... →select Type 1 → OK → input THK: 在对话框中输入板的厚为 0.001

### 2.3 几何建模

- 生成平板: MainMenu > Preprocessor > Modeling Create > Areas > Rectangle > By Dimensions 依次输入两个角点的坐标 (0,0) 和 (0.04,0.04)
- 生成圆孔 MainMenu>Preprocessor >Modeling >Create >Areas>Circle>solid circle >在对话框中依次输入 0,0, 0.01>OK
- 面相减: MainMenu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas, 在弹出的对话框, 拾取四边形, 单击 OK; 拾取圆面, 单击 OK。



### 3. 建立有限元模型

#### 3.1 有限元模型建立采用映射划分方法:

- 连接 L2 和 L3: MainMenu→Preprocessor →Meshing →Mesh →Area→Mapped→Concatenate (连接) →Lines, 选择 L2 和 L3, 单击 OK。
- 定义线上的单元个数: MainMenu→Preprocessor →Meshing →Size Contrls →Lines: Picked Lines →选择 L5, 在对话框 NDIV 中输入 10, 单击 Apply; 再选择 L2 和 L3, 在对话框 NDIV 输入 5, 单击 Apply; 再选择 L9 和 L10, 在对话框 NDIV 输入 9, 同时在 SPACE (间距比, 非等距划分) 对话框中输入 0.15, 单击 OK。
- 划分网格: MainMenu→ Preprocessor →Meshing →Mesh Tool → Mesh: Areas, Shape: Tri, Mapped →Mesh →Pick All (in Picking Menu) → Close。

#### 3.2 施加载荷

- 给线 9 施加 Y 方向约束  
MainMenu→Solution→DefineLoads→Apply→Structural→Displacement → On Lines →拾取线 9: Lab2: UY →OK
- 给线 10 施加对称边界约束  
Main Menu → Solution → Define Load → Apply → Structural→Displacement →Symmetry B.C.→On Lines 命令, 出现 Apply SMMY on Lines 拾取菜单, 在 ANSYS 显示窗口选择线段 L10, 单击 OK 按钮。
- 给线 3 施加 Y 向均布载荷  
MainMenu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Pressure → On Lines, 选择线段 L3, 在对话框中输入-1E7 , 单击 OK。

### 4. 实验数据

完成上述步骤后, 使用 MainMenu →Solution →Solve →Current LS →OK 完成计算, 模拟结果如图所示

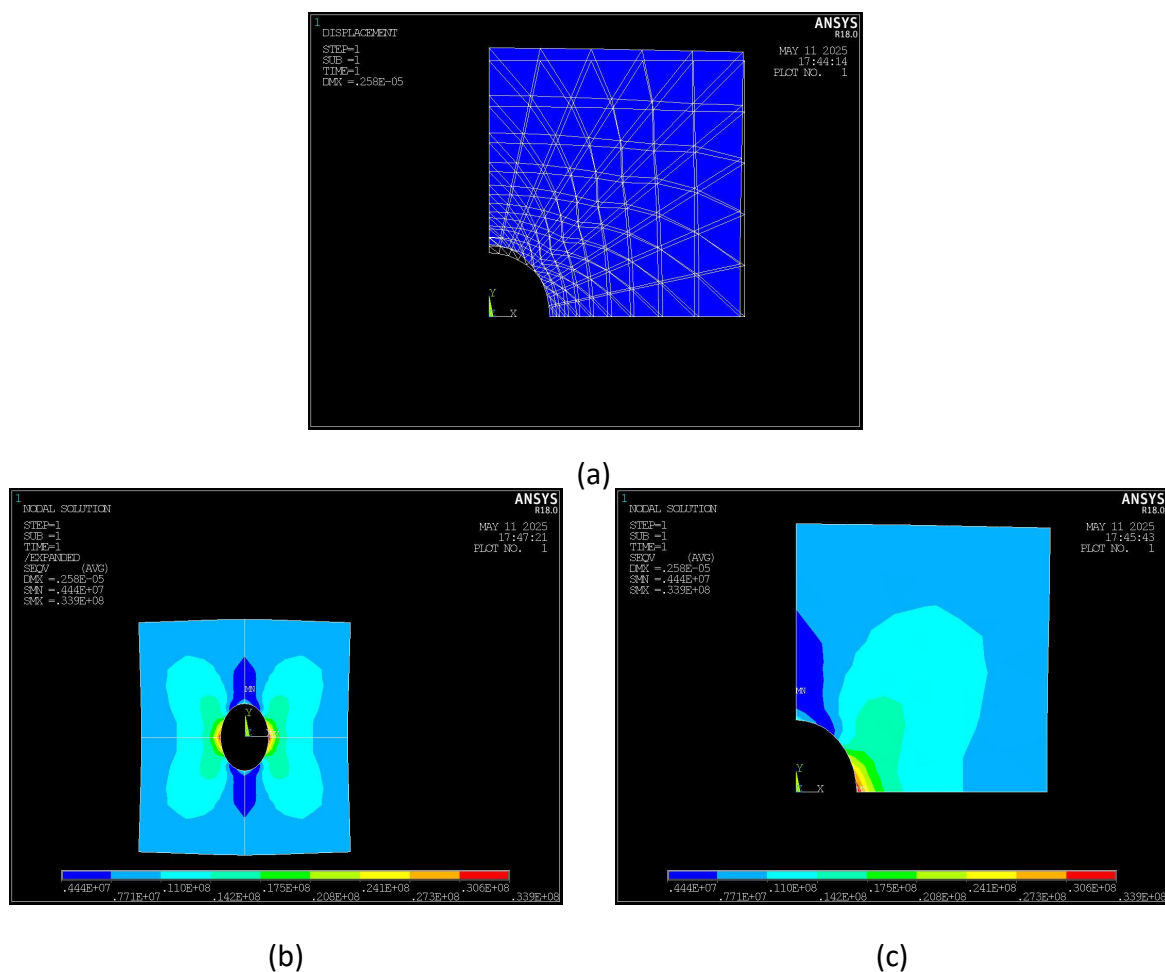


图 2-2

其中，图 2-2（a）为平板的形状变化，图 2-2（b）为平板的平均等效应力，图 2-2（c）为扩展后显示平板的平均等效应力

## 5. 结果讨论

由平板形状变化图可见，在沿 Y 方向拉力 的作用下，平板发生了沿 Y 方向拉伸，同时在 X 方向收缩 的变形。由于中心存在圆孔，导致平板在各个方向上的拉伸和收缩表现出明显的不均匀性。具体来说，靠近平板中线的位置，拉伸或压缩的程度更为显著。中心圆孔区域在载荷作用下沿 Y 方向拉伸、X 方向收缩，逐渐由圆形变形为以 Y 方向为长轴的椭圆形。

结合图 2-2（b）和 2-2（c）可见，在 Y 方向拉力作用下，平板的整体平均等效应力呈现出“蝴蝶状”的对称分布。最大应力集中在中心圆孔沿 X 方向的区域，即拉伸后形成的椭圆短轴处，且应力从该短轴区域向周围以“翅膀状”逐渐扩散并减小。相较之下，椭圆的长轴方向（Y 方向）应力最小。

由此分析可得，在 Y 轴拉伸载荷作用下，带中心圆孔的平板最容易发生破坏的位置集中在椭圆变形后形成的短轴处。应力集中区域是结构设计和安全评估时需重点关注的薄弱点。

## Project 3 坝体的平面应变问题分析

### 1. 问题描述

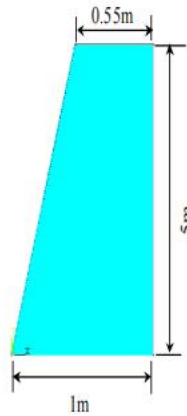


图 3-1 坝体的分析模型

如图一水坝, 材料为混凝土, 弹性模量为  $2.1 \times 10^{10} \text{Pa}$ , 泊松比为 0.2, 斜面所受均布载荷为  $1000 \text{Mpa}$  ( $1 \times 10^9 \text{Pa}$ )。分析其应变。现需分析该水坝结构在该载荷作用下的应变分布情况。

解决思路:

- 定义工作路径和作业名, 确保所有数据文件和计算结果有序保存。
- 单位与材料属性设置, 选择合适的单元类型 (Solid Quad 4node 42), 定义平面应变单元选项, 输入混凝土的弹性模量和泊松比。
- 几何建模, 根据题目尺寸, 建立水坝的二维截面模型, 绘制关键特征点并生成包含斜面的区域。
- 网格划分, 采用映射法生成规则四边形网格, 重点设置边界线的网格密度, 保证计算精度。
- 施加边界条件, 对水坝的下底边和垂直边分别施加位移约束, 限制结构的运动自由度; 对斜面施加给定的均布压力载荷。
- 有限元求解, 通过求解稳态结构力学方程, 获得水坝的位移和应变分布。
- 结果分析, 利用位移云图和应力分布图, 评估水坝结构的受力情况和变形特征, 为工程设计和安全评估提供依据。

## 2. 实验步骤

### 2.1 定义工作路径和工作文件名

- 更改工作目录：进入 Utility Menu > File > Change Directory 命令，这将打开一个对话框，允许您更改 ANSYS 的工作目录。在弹出的 Change Working Directory 对话框中，选择或输入新的工作路径
- 更改作业名：进入 Utility Menu > File > Change Jobname 命令，这将打开 Change Jobname 对话框。在输入框中，输入新的工作文件名，例如 dam。

### 2.2 单位和材料属性设置

- 添加单元类型：进入 MainMenu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete。选择 Add 选项以添加新的单元类型。从可用的单元类型列表中，选择 Solid Quad 4node 42（这是一个 4 节点的实体四面体单元，通常用于 3D 分析）。
- 设置单元选项：在 Element Types 界面，选择 Element Types > Options…。在打开的选项菜单中，选择 K3: Plane Strain
- 定义材料模型：进入 MainMenu > Preprocessor > Material Props > Material Models。选择 Structural（结构分析）作为材料模型的类别。选择 Linear（线性）> Elastic（弹性）> Isotropic（各向同性），这表示材料的弹性特性是线性的，并且在所有方向上都是相同的。
- 输入材料参数：在弹出的材料属性对话框中，输入 EX（弹性模量）为  $2.1 \times 10^{10}$ （单位通常是帕斯卡，Pa）。输入 PRXY（泊松比）为 0.2，这表示材料在受力时横向和纵向的变形比例。

### 2.3 几何建模

- 生成特征点：MainMenu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS→依次输入四个点的坐标：input:1(0,0),2(1,0),3(1,5),4(0.45,5)→OK
- 生成坝体截面 MainMenu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPS→依次连接四个特征点，1(0,0),2(1,0),3(1,5),4(0.45,5)→OK

模型如图所示

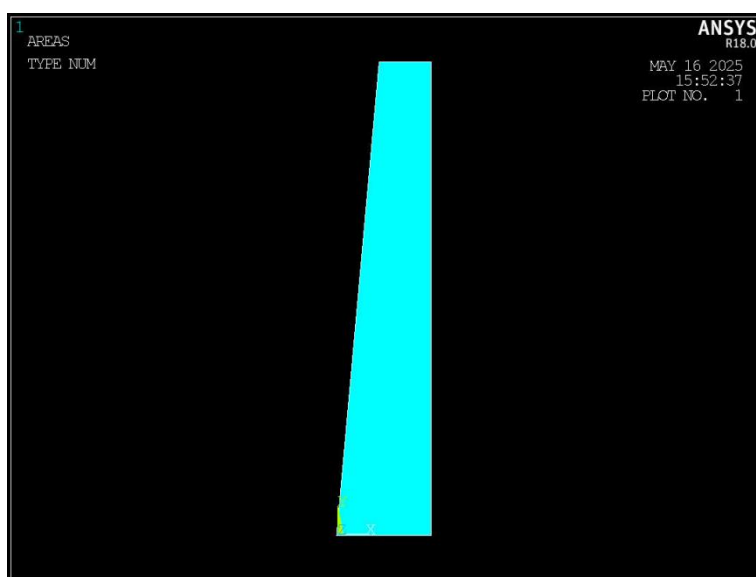


图 3-2

## 3.建立有限元模型

### 3.1 网格划分

- 进入网格工具：选择 MainMenu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool。
- 设置线网格划分控制：在 Mesh Tool 窗口中，选择 Size Controls，然后选择 lines: Set。
- 设置横向边的网格划分：依次选择模型中两条水平的边。输入 NDIV 值为 15，这表示每条边将被划分为 15 个网格段。点击 Apply，然后点击 OK。
- 设置纵向边的网格划分：依次选择模型中两条垂直的边。输入 NDIV 值为 20，这表示每条边将被划分为 20 个网格段。
- 进行区域网格划分：返回到 Mesh Tool 窗口，选择 Mesh: Areas, Shape: Quad, Mapped。
- 这表示将使用映射方式生成四边形网格。选择 Mesh，然后选择 Pick All（在 Picking Menu 中）以选择所有区域进行网格划分。点击 Close 完成网格划分。

### 3.2 模型施加约束

- 施加水平方向的位移约束：选择 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply。选择 Structural > Displacement > On lines。选择模型的下底边，然后点击 OK。在弹出的对话框中选择 ALL DOF（所有自由度），这将约束该边在所有方向上的位移。
- 施加垂直方向的位移约束：重复上述步骤，但这次选择模型的垂直边，并应用位移约束。
- 施加均布载荷：选择 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply。选择 Structural > Pressure > On Lines。选择模型的斜边，然后点击 OK。在弹出的

对话框中输入水平方向的均布载荷为  $1e9$ （默认单位为 Pa，帕斯卡）。

## 4. 实验数据

选择 MainMenu→Solution→Solve→Current LS→OK 完成计算，结果如下

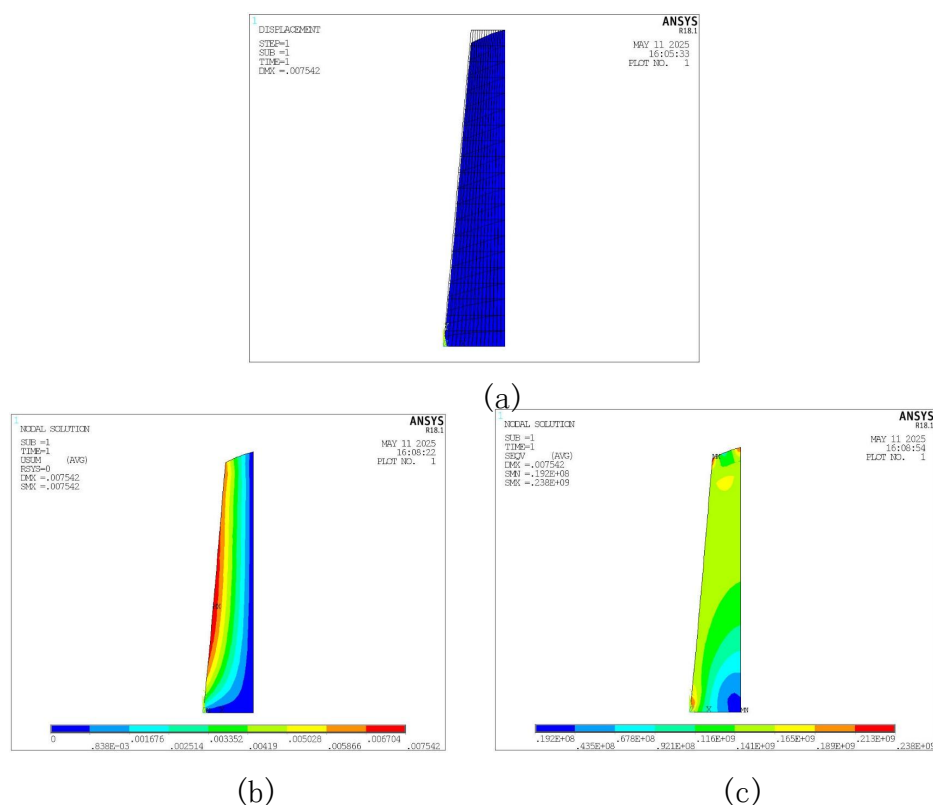


图 3-3

如图所示，图 3-3（a）为水坝形状变化情况，3-3（b）图为水坝节点总体位移云图，3-3（c）图为示水坝的平均等效应力变化。

## 5. 结果讨论

从图 3-3（a）可见，在斜面承受均布载荷作用下，水坝斜面整体发生了一定程度的压缩变形。由于地面的约束作用，竖直方向基本保持形状不变。进一步观察图 3-3（b）的节点总位移云图可知，斜面最大位移出现在斜面底部稍上方的位置，位移向两侧逐渐减小。正是这一位移分布导致水坝原本的竖直斜面逐渐变形为向内凹陷的弧形结构。

结合图 3-3（c）的等效应力分布分析，最大等效应力同样集中在斜面底部稍上方的位置，且斜面顶部也存在较大的应力集中区域。因此，在水坝的维护与管理过程中，应重点关注这两个区域的结构安全与力学性能，采取相应的加固措施以防止结构损伤或失效。

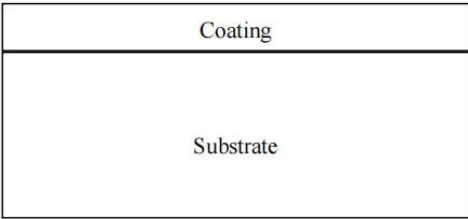
# Project 4 热障涂层降温过程应力场分析

## 1. 问题描述

试采用有限元程序 ANSYS 分析等离子喷涂热障涂层在冷却过程中的应力场分布。基体为高温合金 IC6，涂层为氧化锆，材料性能参数见下表：

表 1 IC6 材料的性能参数						
Temperature (°C)	100	300	500	700	900	1000
EX (1e9Pa)	131	127	121	115	104	93
ALPX (1e-6°C <sup>-1</sup> )	9.67	12.27	13.02	13.35	14.61	15.14
DENS (1e3kg/m <sup>3</sup> )	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
PRXY	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
REFT (°C)	1000	1000	1000	1000	1000	1000

表 2 氧化锆材料的性能参数						
Temperature (°C)	100	300	500	700	900	1000
EX (10 <sup>9</sup> Pa)	60	58	44	38	36	34
ALPX (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	9.68	9.78	9.82	9.88	10.02	10.34
DENS (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
PRXY	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
REFT (°C)	1000	1000	1000	1000	1000	1000



基体厚度：1mm，涂层厚度：0.1mm，宽度 2mm。  
分析涂层结构由 1000℃冷却到 100℃的应力场。

- 解决思路：
- 单位与材料属性设置，选用适合二维结构分析的四节点实体单元，定义材料弹性模量和泊松比。
  - 几何建模，分别创建基体和平涂层矩形区域，并通过布尔操作将其粘结成整体模型。
  - 网格划分，采用映射网格划分方法，细分基体和涂层不同高度的网格，确保计算精度和合理性。
  - 施加温度载荷和边界条件，设置均匀温度载荷和参考温度，施加节点位移约束以模拟实际受力和约束情况。

- 有限元求解，通过求解稳态热膨胀问题，获得结构的 X 和 Y 方向应变分布。
- 结果分析，结合应变云图，评估涂层与基体在温度载荷下的应变响应，为复合材料设计与热膨胀控制提供依据。

## 2. 实验步骤

### 2.1 单位和材料属性设置

- 添加单元类型：进入 MainMenu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete。选择 Add 选项以添加新的单元类型。
- 选择单元：在可用单元类型列表中，选择 Solid/Quad 4node 42，这是一个 4 节点的实体四边形单元，适用于平面应力或平面应变问题。
- 确认单元类型：确认选择后，点击 OK。此时，单元类型被赋予实体编号（ET, 1, PLANE42），其中 1 是实体编号，PLANE42 是单元类型的名称。
- 定义材料属性进入材料模型定义：进入 MainMenu > Preprocessor > Material Props > Material Models。在弹出的对话框中，根据需要定义材料的属性完成第一个材料属性的定义后，点击 Material 下拉菜单中的 New Model 以定义第二种材料的属性。
- 保存材料属性文件：进入 MainMenu > Preprocessor > Material Props > Write to File。输入文件名：输入要保存的材料属性文件名，例如 EX1.MP。保存文件：保存文件，以便将来可以直接通过文件导入这些材料属性，特别是在材料属性输入较为复杂时，保存为单独文件可以方便后续使用

### 2.2 几何建模

- 创建基体：进入 MainMenu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions。在弹出的对话框中，输入基体矩形的尺寸：对于 X 方向的尺寸，输入 X1 为-1 和 X2 为 1。对于 Y 方向的尺寸，输入 Y1 为 0 和 Y2 为-1。点击 Apply 预览创建的基体几何模型。
- 创建涂层：保持在相同的菜单路径下，再次选择 Rectangle > By Dimensions。输入涂层矩形的尺寸：对于 X 方向的尺寸，同样输入 X1 为-1 和 X2 为 1。对于 Y 方向的尺寸，输入 Y1 为 0 和 Y2 为 0.1（这将创建一个较薄的涂层区域）。点击 OK 完成涂层几何模型的创建。
- 粘结几何模型：进入 MainMenu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Areas，选择之前创建的两个矩形区域（基体和涂层）。选择完毕后，点击 OK 完成两个几何区域的粘结操作



## 3. 有限元模型建立

### 3.1 模型建立

设置线网格划分控制：进入 MainMenu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Lines > Picked Lines。

- 划分长度方向的网格：选择模型中长度方向上的三条线。这些线条可能是基体的长度边界线。点击 OK 后，在弹出的对话框中输入 NDIV 值为 20，这表示每条线将被划分为 20 个网格段。点击 Apply 应用此设置。
- 划分涂层高度的网格：选择模型中代表涂层高度的两条线段。点击 OK 后，在弹出的对话框中输入 NDIV 值为 5，这表示每条线将被划分为 5 个网格段。点击 Apply 应用此设置。
- 划分基体高度的网格：选择模型中代表基体高度的两条线段。点击 OK 后，在弹出的对话框中输入 NDIV 值为 10，这表示每条线将被划分为 10 个网格段。点击 OK 完成设置。
- 进行网格划分：进入 MainMenu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 solid。划分基体网格：在弹出的对话框中，选择基体区域。点击 Apply 预览网格划分效果。划分涂层网格：选择涂层区域。点击 OK 完成网格划分。

### 3.2 施加载荷

施加温度载荷

- 设置均匀温度：进入 MainMenu > Solution > Define Loads > Settings > Uniform Temp。在弹出的对话框中输入温度值，例如输入 100，这将设置一个均匀的温度载荷。
- 设置参考温度：选择 MainMenu > Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp。输入参考温度值，例如输入 1000，这通常用于热分析中的热膨胀计算。
- 施加约束载荷约束下端中心节点：进入 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes。选择模型中下端中心的节点，然后点击 OK。在弹出的对话框中，选择约束的自由度。通常在二维分析中，UX 和 UY 分别代表水平和垂直方向的位移。输入约束值为 0，表示完全约束这些自由度，然后点击 OK。
- 约束中心节点中间往上一系列节点：再次进入 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes。选择模型中心节点中间往上的一系列节点，这些节点可能是沿着某个特定路径或区域分布的。点击 OK 后，在弹出的对话框中选择 UX 自由度，表示只约束水平方向的位移。输入约束值为 0，然后点击 OK。

有限元模型如图

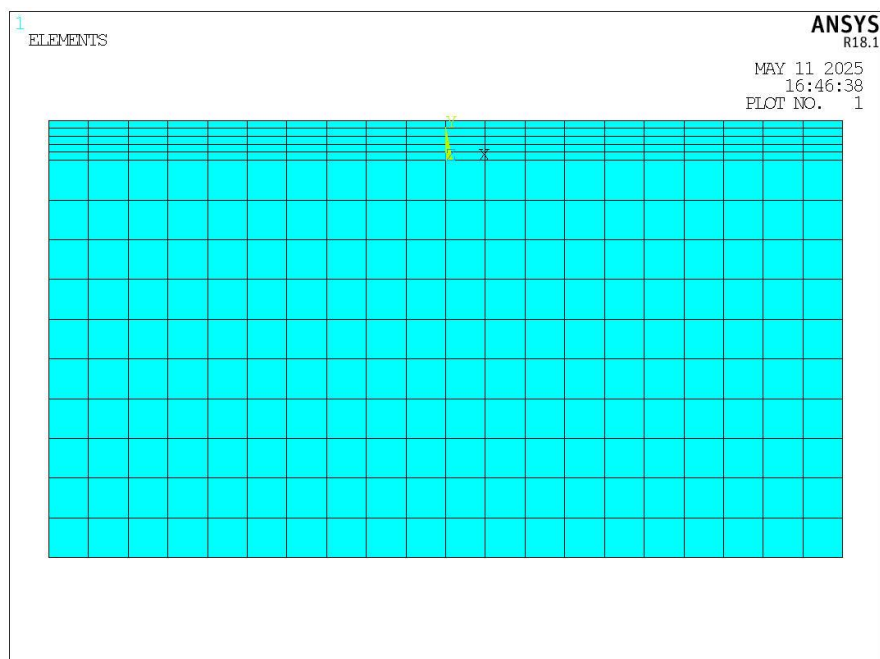


图 4-1

## 4. 实验数据

使用 Main Menu: Solution>Solve>Current LS 完成计算，结果如图，4-2、4-3 所示，分别为 X 和 Y 方向应变图

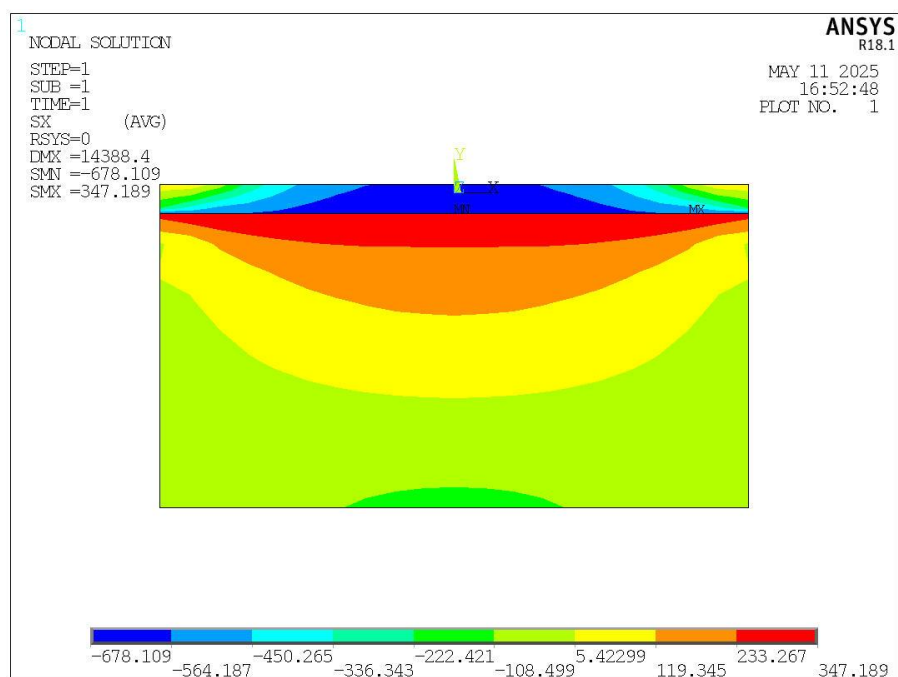


图 4-2

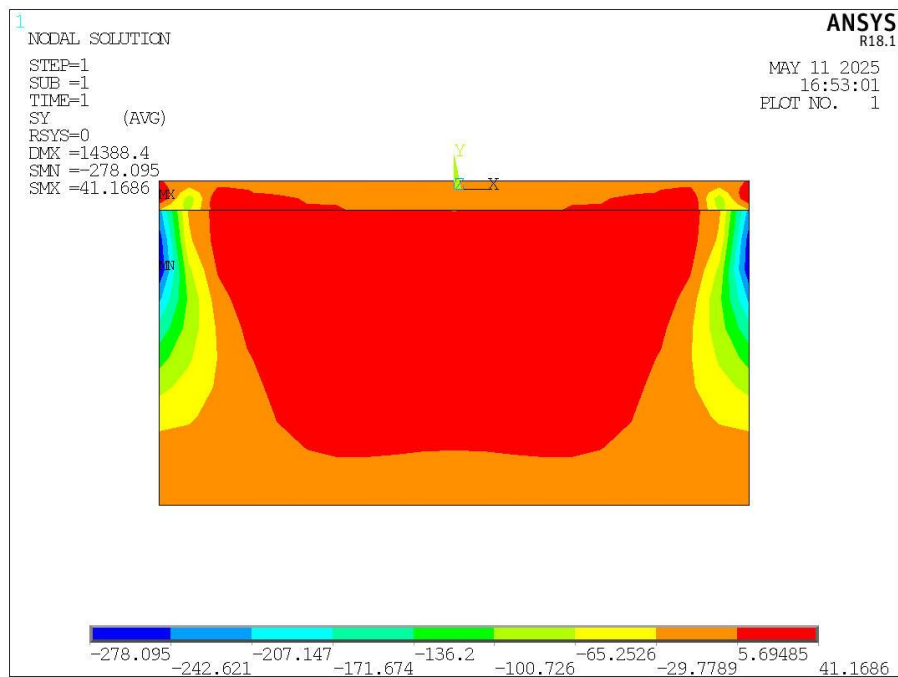


图 4-3

## 5. 结果分析

从图中可以看出，该热胀层结构在从 1000℃ 冷却至 100℃ 的过程中，涂层中心位置承受较大的 X 方向应力，而内部基体的应力较小，且随着靠近基体内部，应力逐渐减小。对于 Y 方向应力，最大值主要分布在基体两侧靠近涂层的区域，基体中心区域的应力较低，涂层部分在 Y 方向上未表现出明显的应力集中。

由此可见，降温过程中，涂层主要承受较大的横向（X 方向）应力，而基体则主要受纵向（Y 方向）应力的影响。针对这一特点，涂层在冷却时需特别关注其横向的破坏风险，应加强该方向的强度设计；同时，也需重视涂层与基体连接部位可能出现的纵向破坏，采取相应的强化措施以保证结构的整体稳定性和安全性。

# Project 5 热电制冷分析

## 1. 问题描述

半导体热电偶制冷元件由 N 型和 P 型半导体材料通过厚度为  $t$  的铜带连接，N 型和 P 型半导体长度  $L$ ，截面积为  $A=W^2$ ， $W$  为宽度，热端温度为  $T_h$ ，通过电势差  $U$  散热，保持冷端温度为  $T_c$ ，电流正方向从 N 型半导体到 P 型半导体如表 6-4 所示。相关材料参数见表

- 解决思路：
- 单位与材料属性设置，选用适合热电偶热电分析的三维实体单元（Solid 8-node Brick 69 单元），分别定义 N 型半导体、P 型半导体和铜带的材料热电属性。
  - 几何模型建立，依据题目尺寸创建三部分几何体：底层铜带、中间的 N 型和 P 型半导体体积、顶层铜带，并通过布尔操作将其粘接成整体结构。
  - 网格划分，对整体结构采用自由四面体网格划分，细化关键区域，确保计算精度。
  - 施加边界条件，设置热端与冷端的温度载荷，施加对应的电压载荷，模拟热电偶的实际工作状态。
  - 有限元求解，通过求解耦合的热电场问题，得到温度场和电位场的分布情况。
  - 结果分析，结合温度分布和电位变化图，评估热电偶制冷元件的性能，为设计优化提供理论支持。

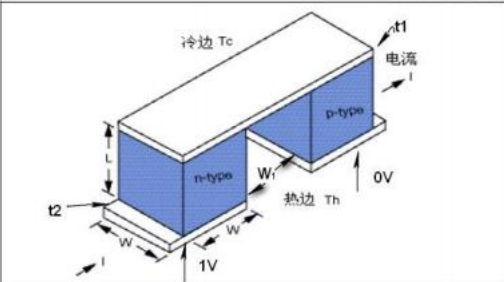
表 6-4 热电偶制冷元件模型	
	模型参数
	半导体长度 $L=1\text{ cm}$
	半导体宽度及厚度 $W=1\text{ cm}$
	冷端温度 $T_c=0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	热端温度 $T_h=54\text{ }^{\circ}\text{C}$
	输入电压 $U=1\text{ V}$
	铜带厚度 $t_1=0.1\text{ cm}$
	铜带边缘宽度 $t_2=0.2\text{ cm}$
	半导体间距 $W_1=1\text{ cm}$

表 6-5 热电偶制冷元件模型材料参数			
名称模型	电阻率 $\text{ohm}\cdot\text{m}$	热传导率 $\text{w}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Seebeck 热电系数 $(\text{v}/\text{K})$
N 型半导体	$\rho_N=1.05\times 10^{-5}$	$\lambda_N=1.3$	$\alpha_N=-165\times 10^{-6}$
P 型半导体	$\rho_P=0.98\times 10^{-5}$	$\lambda_P=1.2$	$\alpha_P=+210\times 10^{-6}$
铜带	$1.7\times 10^{-8}$	400	

## 2. 实验步骤

### 2.1 定义工作路径和工作文件名

- 更改目录：选择 File（文件）> Change Directory（更改目录）命令。设置工作路径：弹出的 Change Working Directory（更改工作目录）对话框中，浏览或输入新的工作路径，例如 D:\file 选择正确的路径后，点击 OK 按钮以确认更改。
- 更改作业名：打开文件菜单：再次进入 Utility Menu（实用工具菜单）。更改作业名：选择 File（文件）> Change Jobname（更改作业名）命令。输入新的作业名：弹出的 Change Jobname（更改作业名）对话框中，在\*\*[/FILNAM]\*\*输入栏中输入新的工作文件名，例如 thermal-electric。

### 2.2 单位和材料属性设置

- 选择单元类型：MainMenu→Preprocessor →Element Type→Add/Edit/Delete →Add →select thermal electric Brick 8node 69→OK (ET,1,SOLID69)
- 定义材料属性：MainMenu→Preprocessor →Material Props →Material Models 1(n-type 半导体) →thermal →conductivity→Isotropic →input KXX:1.3→OK ; Electromagnetism → resistivity → constant → 输入 数值 → OK ; Thermoelectricity→Isotropic→SBKX: -165e-6→ok。左上角 material→new model→define material ID:2(p-type 半导体),同上方法定义材料属性。再添加 material ID: 3（铜片）

### 2.3 几何模型建立

- 底层铜片几何体创建：进入 MainMenu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions。定义体积尺寸：输入第一个角点的坐标（0, 0, 0）。输入第二个角点的坐标（0.012, 0.01, 0.001），这些坐标定义了体积的尺寸。点击 Apply 预览创建的体积。创建第二个体积：输入第一个角点的坐标（0.022, 0, 0）。输入第二个角点的坐标（0.034, 0.01, 0.001）。点击 OK 完成第二个体积的创建。
- 中间 n-type 与 p-type 几何体创建：重复上述步骤，但这次输入不同的坐标：第一个角点的坐标（0.002, 0, 0.001）。第二个角点的坐标（0.012, 0.01, 0.011）。创建 p-type 体积：输入第一个角点的坐标（0.022, 0, 0.001）。输入第二个角点的坐标（0.032, 0.01, 0.011）。点击 OK 完成 p-type 体积的创建。
- 顶层铜片几何体创建：再次进入 MainMenu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions。定义顶层体积尺寸：输入第一个角点的坐标（0.002, 0, 0.011）。输入第二个角点的坐标（0.032, 0.01, 0.012）。点击 OK 完成顶层铜片体积的创建。
- 将几何体粘接在一起：进入 MainMenu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Volumes。

模型如图所示

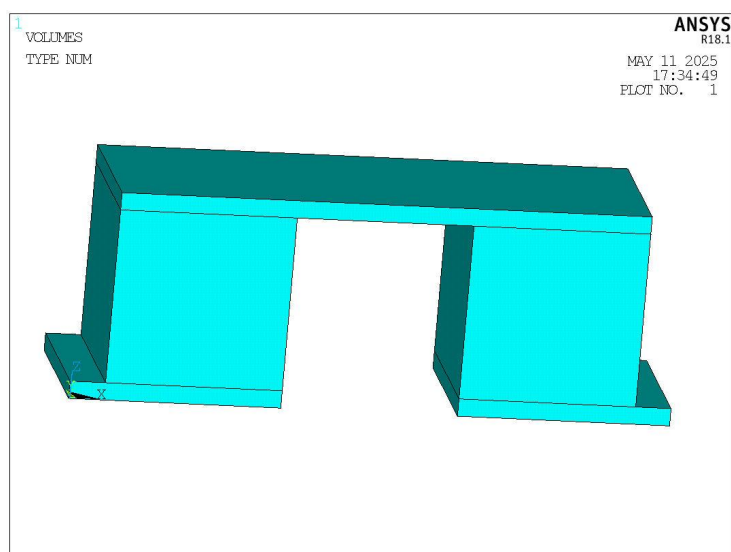


图 5-1

### 3. 有限元模型建立

#### 3.1 模型建立

- 设置体积属性：进入 MainMenu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Element Attributes > Volumes > Set。
- 分配材料编号：依次选择底层和顶层铜片几何体，点击 OK。在弹出的对话框中，设置 Material number 为 3，表示铜片的材质，然后点击 Apply。分配 n 型半导体材料编号：选择 n 型半导体几何体，点击 OK。设置 Material number 为 1，表示 n 型半导体的材质，点击 Apply。分配 p 型半导体材料编号：选择 p 型半导体几何体，点击 OK。设置 Material number 为 2，表示 p 型半导体的材质，点击 OK。
- 设置面积尺寸控制：在 Mesh Tool 窗口中，选择 Size Controls: Areas，点击 Set。选择 Pick All 以选择所有区域。设置 Size 为 0.0005，这是网格的大小，然后点击 OK。
- 网格划分体积：选择 Mesh > Volumes > Tet > Free，这表示将使用自由四面体网格划分。选择 Pick All 以选择所有体积，然后点击 Mesh 开始网格划分。完成后点击 Close。

#### 3.2 施加载荷

- 施加温度载荷：进入 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Areas。选择底层铜片的下表面，点击 OK。选择 ALL DOF（所有自由度），在 Value Load Temp Value 中输入温度值 54，然后点击 Apply。选择顶层铜片的上表面，点击 OK。选择 ALL DOF，在 Value Load Temp Value 中输入温度值 0，然后点击 OK。
- 施加电压载荷：进入 MainMenu > Solution > Define Loads > Apply > Electric >

Boundary > Voltage > On Areas。选择左侧底层铜片的下表面，点击 OK。输入 Constant Value 为 0.01，然后点击 Apply。选择右侧底层铜片的下表面，点击 OK。输入 Constant Value 为 0，然后点击 OK

有限元模型如图

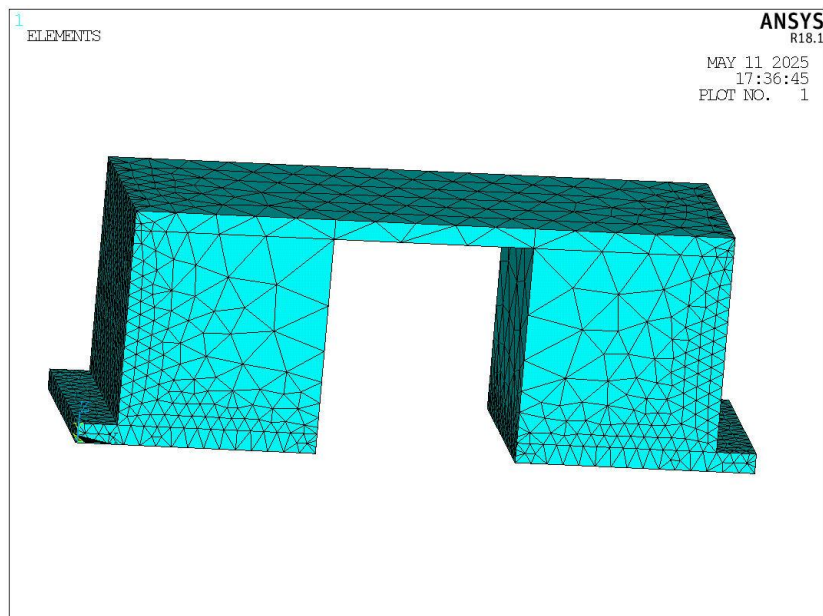


图 5-2

## 4. 实验数据

执行 MainMenu→Solution→Solve→Current LS→OK(会显示非线性解，不是报错)完成计算相关数据如图所示。其中，5-3 为温度变化图，5-4 为电位变化图

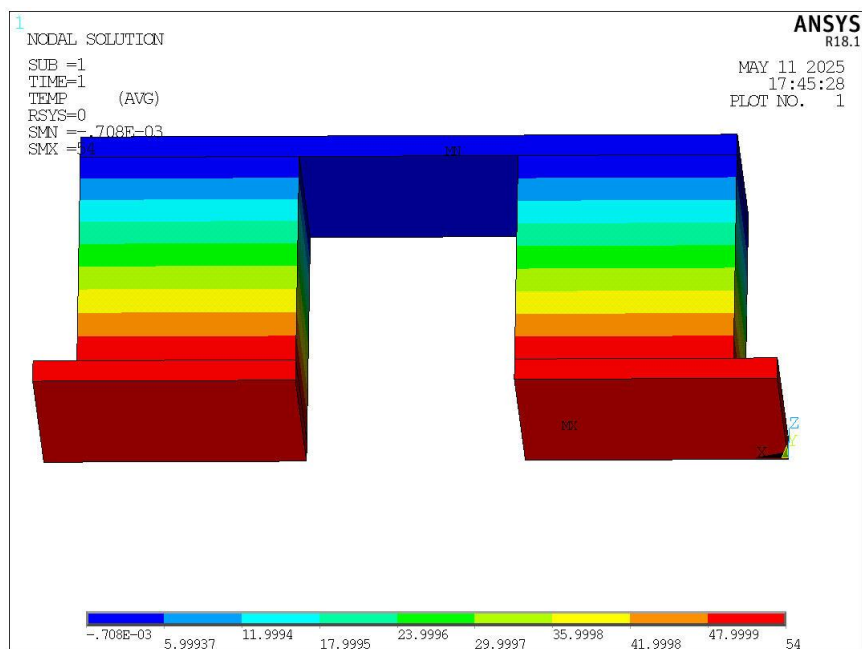


图 5-3

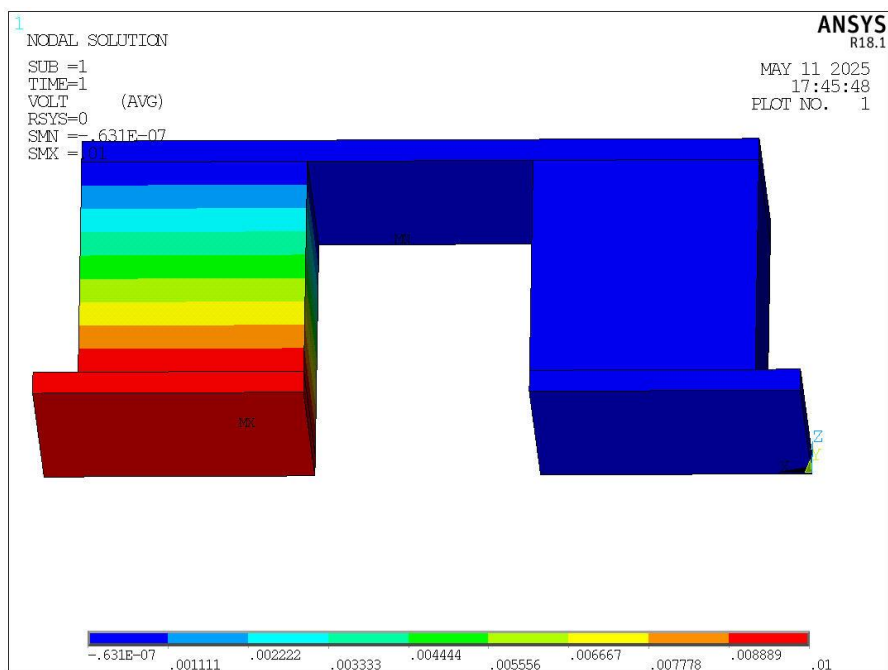


图 5-4

## 5. 结果分析

从图 5-3 可以看出，该热电制冷装置的上下两侧存在显著的温度差异。铜片的表面温度保持基本不变，而内部的半导体材料温度则自下而上逐渐降低，说明制冷效果主要由半导体材料实现。

结合图 5-4 观察，当在装置左侧施加 0.1 V 电压，右侧保持 0 V 电压时，左侧半导体内部的电势呈现由下向上的递减趋势，最终在上部铜片处趋近于零。由于右侧保持零电压，右侧半导体内部无明显电位差。由此推断，该热电制冷元件通过施加电位差实现散热，从而保持冷端低温。电流方向由 N 型半导体流向 P 型半导体，符合热电偶的工作原理。



# Project 6 简单直流致动器电磁分析

## 1. 问题描述

本实验研究一个包含线圈与铁芯的电磁场模型，空气作为外部环境介质。模型采用轴对称二维平面，分别定义空气、铁芯及线圈三种材料的电磁参数，其中空气的相对磁导率近似为 1，铁芯和线圈分别赋予对应的磁导率和电磁属性。通过施加线圈电流密度和边界通量条件，模拟电磁场的分布特性。

解决思路：

- 单位与材料属性设置，选择适合电磁分析的二维 8 节点四边形磁矢量单元（Quad 8-node 53），并分别定义空气、铁芯及线圈的磁导率和电磁参数。
- 几何模型建立，根据题目尺寸创建线圈、铁芯及空气区域的二维几何面，并通过布尔运算实现区域重叠与整合。
- 网格划分，采用映射网格方式生成四边形网格，细化关键区域，确保计算精度，同时将模型单位由米转换为毫米以满足分析需求。
- 施加边界条件，对外围边界施加平行通量边界条件，在线圈区域施加电流密度激励，模拟实际运行工况。
- 有限元求解，执行静态电磁场分析，求解磁力线、磁密及磁密矢量的分布。
- 结果分析，结合磁力线和磁密分布图，评估模型的磁场特性及线圈与铁芯的电磁耦合效果，为电磁设备设计提供参考依据。

## 2. 实验步骤

### 2.1 定义工作路径和工作文件名

- 选择 Utility Menu → File → Change Directory 命令，弹出 “Change Working Directory” 对话框，选择工作路径（例如 D:\file）。若路径不存在，请先创建。
- 选择 Utility Menu → File → Change Jobname 命令，弹出 “Change Jobname” 对话框，在 Enter new job name 输入框中输入新的工作文件名，如 electric-magnetic，并将 New log and error files 设置为 Yes，点击 OK 关闭对话框。

## 2.2 单位和材料属性设置

- 进入 Main Menu → Preference, 勾选 Magnetic-Nodal, 点击 OK。
- 进入 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete, 选择 Add, 在可用单元类型列表中选择 Magnetic Vector → Quad 8 node 53。
- 在 Options 中, 选择 Element Behavior, 勾选 Axisymmetric (轴对称) 选项。
- 进入 Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models, 开始定义材料属性。
- 定义空气的磁导率: 选择材料编号 1 (代表空气), 在 Electromagnetics 部分, 选择 Relative Permeability, 设置为常数 (constant), 输入  $\text{MURX} = 1$ , 表示空气的相对磁导率近似为 1, 点击 OK 保存。
- 定义铁芯的磁导率: 点击右上角 Material → New Model 新建材料编号 2, 重复上述步骤设置铁芯磁导率。
- 添加线圈材料: 再次选择 New Model 新建材料编号 3, 设置线圈的磁导率及其它电磁属性。

## 2.3 模型建立

- 建立线圈和铁芯二维面: 进入 Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle → By Dimensions, 依次输入:
  - 铁芯区域第一点坐标 (0, 5), 第二点坐标 (10, 40), 点击 Apply;
  - 线圈面第一点坐标 (12.5, 0), 第二点坐标 (20, 15), 点击 Apply;
  - 空气面第一点坐标 (0, 0), 第二点坐标 (40, 80), 点击 OK 完成创建。
- 将各几何面重叠链接: 进入 Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Overlap → Areas, 选择所有区域完成重叠。

模型如图

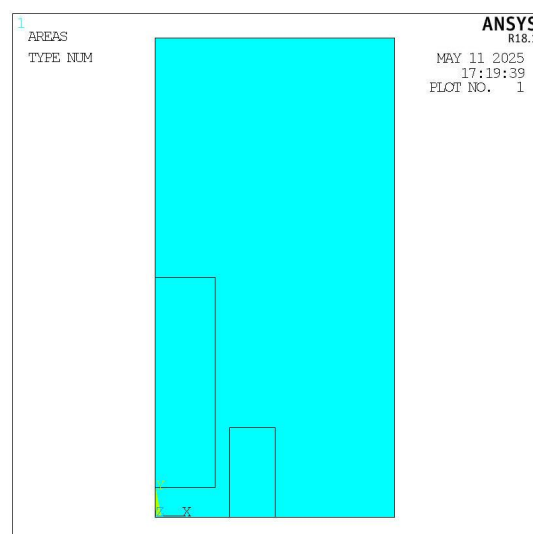


图 6-1

### 3. 有限元模型建立

#### 3.1 模型建立

- 进入 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh Tool → Element Attributes → Areas → Set, 依次拾取空气面、铁芯面和线圈面, 分别设置材料编号为 1、2 和 3, 点击 Apply 确认。
- 在 Mesh Tool 窗口中, 将智能网格尺寸滑块调整至 2。选择网格类型为 Quad, Free, 点击 Mesh 并选择 Pick All, 开始网格划分。
- 模型单位由米(m)转换为毫米(mm): 进入 Preprocessor → Modeling → Operate → Scale → Areas → Pick All, 分别在 RX、RY、RZ 输入框中填入 0.001、0.001、1, 选择 Moved, 点击 OK。

#### 3.2 施加约束

- 施加通量平行边界条件: 进入 Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Boundary → Vector Poten (向量势) → Flux Par' l (平行通量) → On Lines, 选择外围所有线段, 点击 OK。
- 施加线圈电流密度激励: 进入 Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Excitation → Curr Density → On Areas, 选择线圈面, 在 VAL3 输入框输入数值 2000 / 0.0001125, 点击 OK。

有限元模型如图

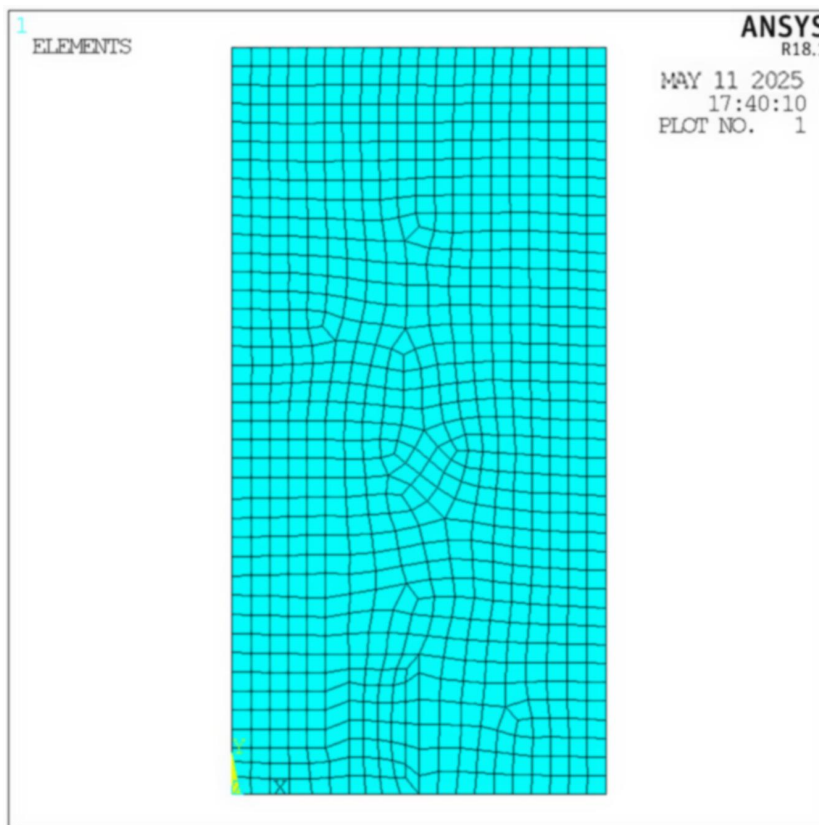


图 6-2

## 4. 实验数据

通过以下步骤完成计算：

- 进入 Solution → Analysis Type → New Analysis, 选择 Static, 点击 OK。
- 进入 Solution → Solve → Electromagnetic → Static Analysis → Opt & Solv, 点击 OK。
- 在 Main Menu → Solution → Solve → Current LS, 点击 OK 开始计算。

计算结果如图所示，图（a）为磁力线分布，图（b）为磁密分布，图（c）为磁密矢量分布。

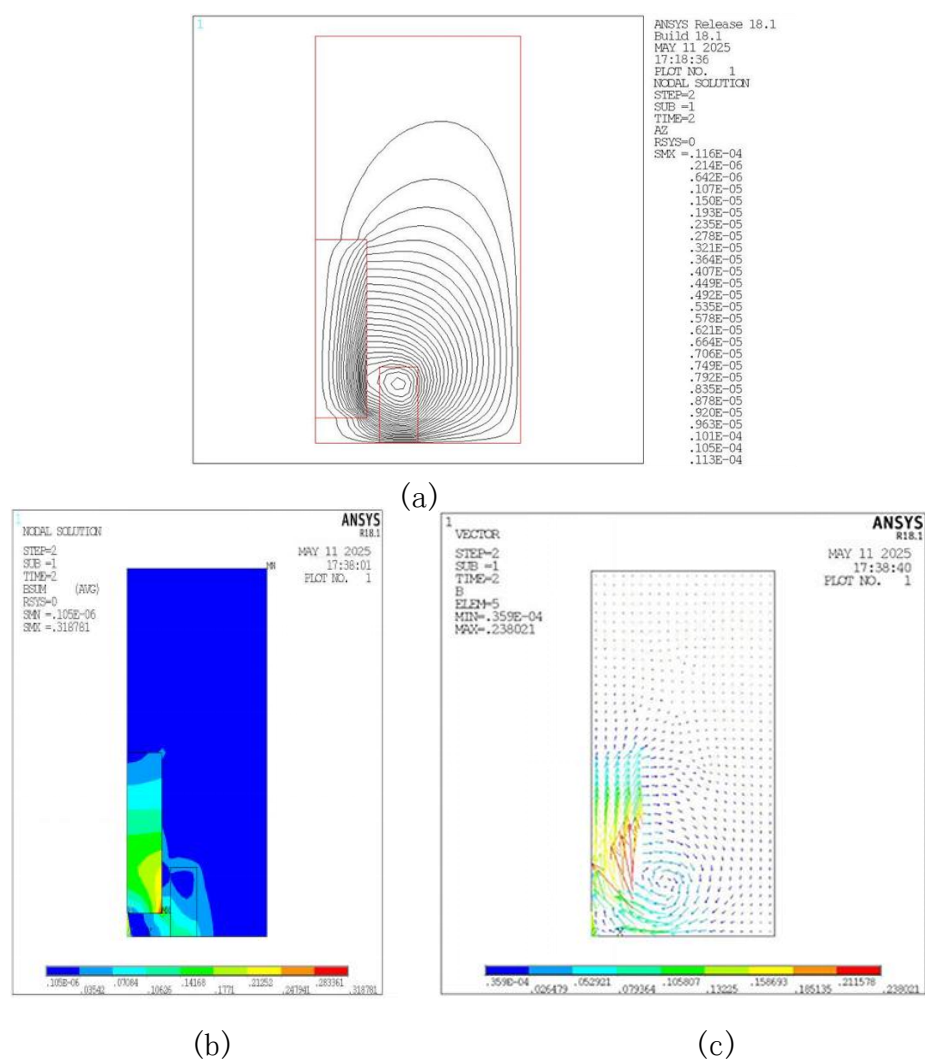


图 6-3

## 5. 结果分析

由图 6-3(a)可见，与正常空气环境相比，线圈与衔铁内部及其周围空气中的磁力线分布发生了显著变化。在线圈和衔铁的共同作用下，线圈附近磁力线密度明显增大，穿过线圈及衔铁的磁力线更加密集。在线圈内部，磁力线密度在与空隙对应的位置达到最大；而在衔铁内部，靠近线圈的位置磁力线密度亦达到峰值。这些观察结果与磁密分布图和磁密矢量图中的数据高度一致。

此外，从图 6-3(b)可见，最大磁密集中在衔铁内部、靠近线圈的区域。值得注意的是，线圈内部也存在部分区域，其磁场密度与正常空气中的磁场密度相当，表明磁场分布存在局部差异。

结果表明，该结构显著影响了周围磁场的分布特征，表明线圈与衔铁的配置对磁场产生了重要的调控作用。