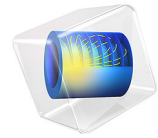


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



热电路板

简介

小型热电路板有多种应用。例如，在制造过程中加热反应流体。图 1 显示了此类模型的一个典型加热装置，它由沉积在玻璃板上的电阻层组成。向电路施加电压时，该电阻层产生焦耳热。该电阻层的属性决定了产生的热量。

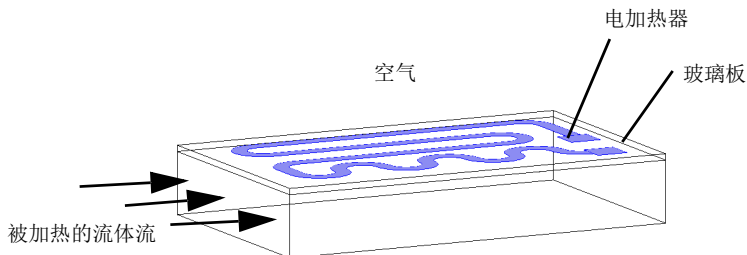


图1：加热装置的几何结构。

在这个特定模型中，必须遵守三个重要的设计注意事项：

- 非侵入式加热
- 加热装置的最小挠度
- 避免过程流体过热

电加热器还必须保证工作中不会失效。通过在热电路板和流体之间插入玻璃板来实现第一和第二个要求：玻璃板充当导热隔离板。玻璃是满足这两个目的的理想材料，因为玻璃不会发生反应，并且其热膨胀系数小。

还必须避免由于反应流体自燃引起的过热，这也是将电路与流体直接接触隔离的主要原因。加热装置是针对每个应用定制的，因此虚拟原型设计对制造商而言非常重要。

对于一般的热电路板，电阻层分离是常见的主要故障。这是由于热导致的界面应力过大引起的。电阻层一旦分离，其局部就会过热，这又加速了电阻层的分离。最后，在最糟糕的情况下，电路可能会过热并烧坏。从这一角度而言，研究由于电阻层和基板的不同热膨胀系数以及温差引起的界面张力也很重要。电阻层的几何形状是设计电路正常工作的关键参数。可以通过模拟电路来研究上述所有方面。

本多物理场示例模拟了热电路板装置的电热产生、传热以及机械应力和变形。模型同时使用了“传热模块”的“固体传热”接口、“AC/DC 模块”的“电流，壳”接口以及“结构力学模块”的“固体力学”和“膜”接口。

注：此 App 需要使用 “AC/DC 模块”、“传热模块” 和 “结构力学模块”。

模型定义

图 2 显示了模拟的加热电路图。

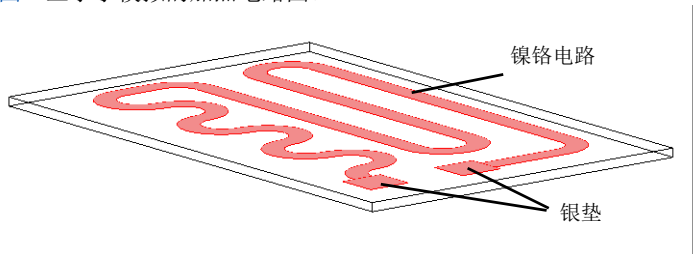


图2：沉积在玻璃板上的加热电路图。

该装置由玻璃板上沉积的厚度为 10 μm、宽度为 5 mm 的蛇形镍铬电阻层组成。其两端各有一块 10 mm x 10 mm x 10 μm 的银接触垫。在使用电路时，玻璃板的沉积侧与周围空气接触，背面与被加热的流体接触。假定玻璃板的边和侧面都是绝热的。

表格 1 给出了电阻器的尺寸。

表格 1：尺寸

对象	长度	宽度	厚度
玻璃板	130 mm	80 mm	2 mm
垫和电路	-	-	10 μm

在工作期间，电阻层产生热量。使用 “AC/DC 模块” 中的 “电流，壳” 接口模拟电产生的热量。对接触垫施加 12 V 的电势。在模型中，通过将第一个垫的一条边的电势设置为 12 V、另一个垫的一条边的电势设置为 0 V，来实现此效果。

要模拟薄导电层中的传热，请使用 “固体传热” 接口中的 “薄层” 特征。薄层内产生的单位面积热耗率（单位为 W/m²）由下式给出

$$q_{\text{prod}} = dQ_{\text{DC}} \tag{1}$$

其中 $Q_{\text{DC}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma |\nabla_t V|^2$ (W/m³) 是功率密度。产生的热量在玻璃板表面表现为向内热通量。

在稳态状态下，电阻层以两种方式耗散其产生的热量：在其上方包围的空气中（温度为 293 K），以及其下方的玻璃板上。同样地，玻璃板也以两种方式冷却：在其电路侧

通过空气冷却，以及在其背面通过过程流体冷却 (353 K)。可以使用传热系数 h 来模拟耗散到周围的热通量。向空气传热时， $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，代表自然对流。在玻璃板背面， $h = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，代表与流体进行对流传热。玻璃板的侧面是绝热的。

模型使用静态结构力学分析模拟热膨胀。将“固体力学”接口用于玻璃板，将“膜”接口用于电路层。*Structural Mechanics Module User's Guide* 中描述了这两个接口的方程。在温度为 293 K 时，应力设为零。可以通过固定一个角的 x -、 y - 和 z - 位移及旋转来确定“固体力学”接口的边界条件。

表格 2 汇总了模型中使用的材料属性。

表格 2：材料属性

材料	E [GPa]	ν	α [1/K]	k [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kg·K)]
银	83	0.37	1.89e-5	420	10500	230
镍铬合金	213	0.33	1e-5	15	9000	20
玻璃	73.1	0.17	5.5e-7	1.38	2203	703

结果与讨论

图 3 显示了电阻层产生的热量。

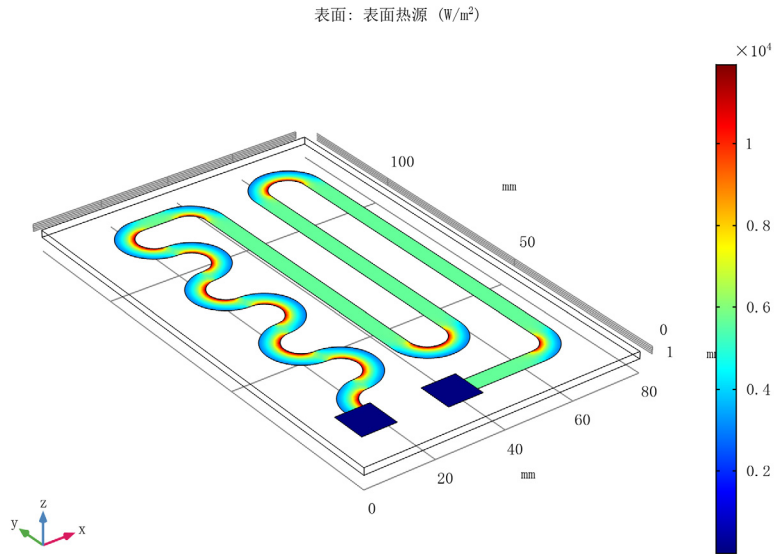


图3：施加 12 V 电压时电阻层中的稳态热量产生。

由于曲线内拐角处的电流密度较高，因此最大加热功率出现在这些点上。通过积分计算得出的总热量产生约为 13.8 W。

图 4 显示了稳态状态下电阻层和玻璃板的温度。

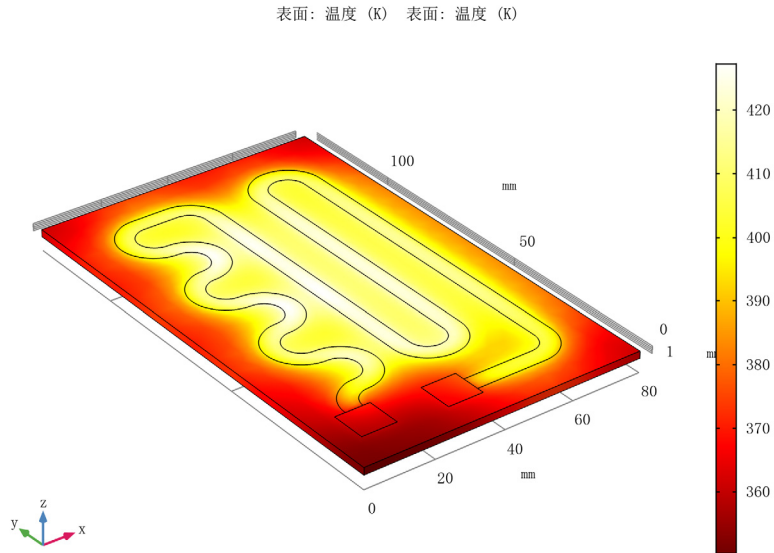


图 4：稳态状态下加热装置上的温度分布。

最高温度约为 428 K，出现在电路层的中心部分。有趣的是，玻璃板流体一侧与电路一侧之间的温差非常小，这是因为玻璃板非常薄。使用边界积分，得到流体侧的积分热通量约为 8.5 W。这意味着装置将其产生的大部分热量（13.8 W 中的 8.5 W）传递到了流体，从设计角度来看这是一个好结果，虽然玻璃板的热阻会导致一些损耗。

由于材料的热膨胀系数不同，温升还会引起热应力。结果，在电阻层和玻璃板中出现了机械应力和变形。图 5 显示了装置中的有效应力分布以及产生的变形。在工作期间，玻璃板朝空气侧弯曲。

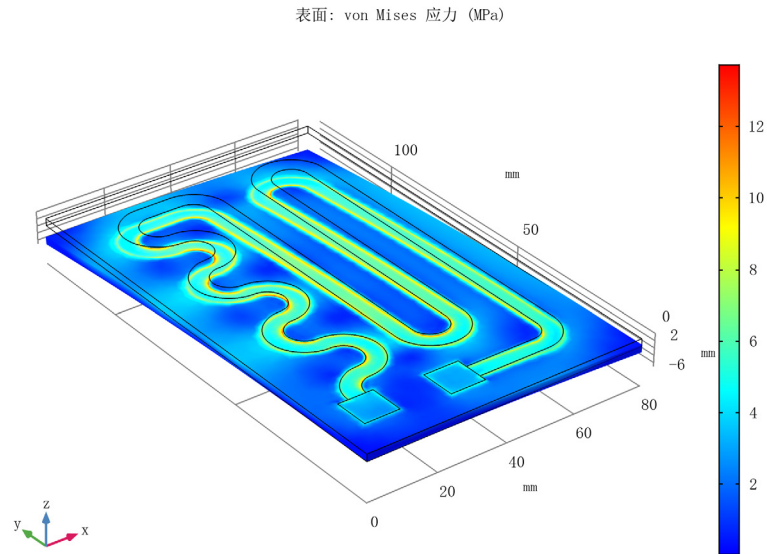


图5：热导致的 von Mises 有效应力和变形图。

最大的有效应力约为 13 MPa，出现在镍铬电路曲线的内拐角处。高质量玻璃的屈服应力大致为 250 MPa，镍铬合金为 360 MPa。这意味着各个部件在所模拟的加热功率负载下结构保持完整。

还必须考虑电阻层与玻璃板界面上的应力。假定界面处表面粘附的屈服应力约为 50 MPa，该值明显低于装置中其他材料的屈服应力。如果有效应力增大至该值以上，则电阻层将与玻璃局部分离。一旦发生分离，局部传热将受阻，可能使电阻层过热，最终导致设备故障。

图 6 显示了在加热器工作过程中作用在粘附层上的有效力。如图所示，此装置经受的最大界面应力比屈服应力小一个数量级。这意味着该装置在粘附应力方面满足要求。

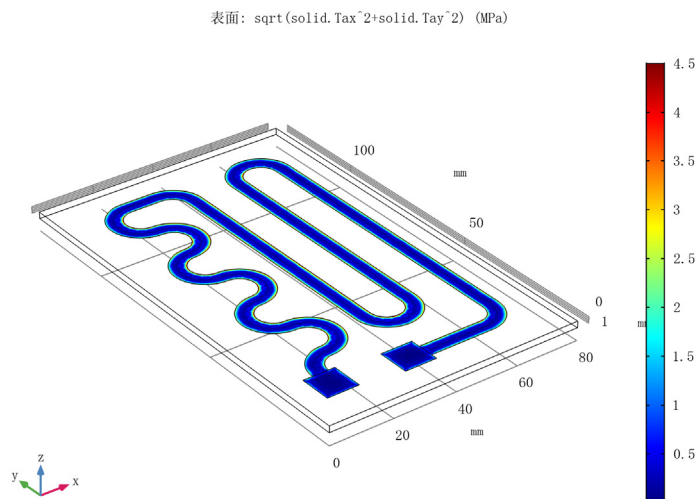


图6：电阻层与玻璃板界面上的有效力。

最后研究装置的挠度，如图7所示。

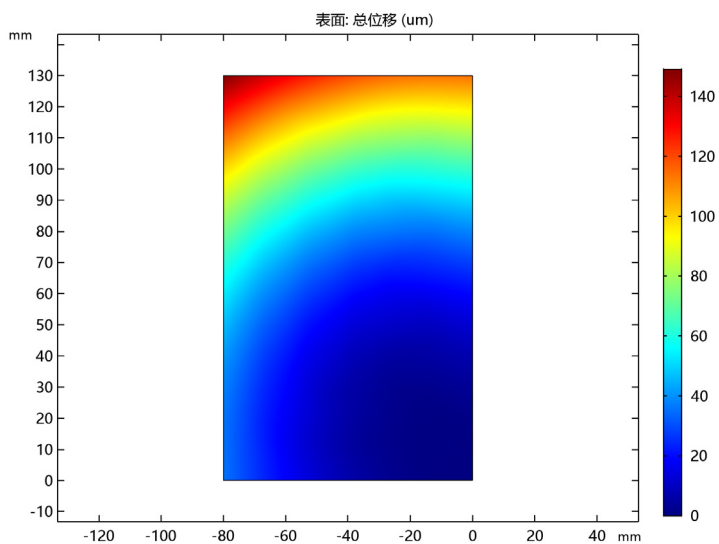


图7：与玻璃板流体侧平面的偏差。

相对于平面的最大偏差约为 50 μm 。对于半导体加工等高精度应用，这可能是限制装置工作温度的重要值。

案例库路径: ACDC_Module/Layered_Shell/heating_circuit

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 > 热应力**。
- 3 单击**添加**。
- 4 在**选择物理场树**中选择**AC/DC > 电流，多层壳 (ecls)**。
- 5 单击**添加**。
- 6 在**选择物理场树**中选择**结构力学 > 膜 (mbrn)**。
- 7 单击**添加**。
- 8 单击**研究**。
- 9 在**选择研究树**中选择**一般研究 > 稳态**。
- 10 单击**完成**。

几何 1

热应力接口包含**固体传热**和**固体力学**。在体中，这两个接口分别求解温度和位移。在表示电路的壳中，分别通过**固体传热**、**电流**、**壳**和**膜**接口求解温度、电势和位移。

全局定义

- 1 在**模型开发者**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 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
V_in	12[V]	12 V	输入电压
d_layer	10[um]	1E-5 m	层厚度
sigma_silver	6.3e7[S/m]	6.3E7 S/m	银的电导率
sigma_nichrome	9.3e5[S/m]	9.3E5 S/m	镍铬合金的电导率
T_air	20[degC]	293.15 K	空气温度
h_air	5[W/(m^2*K)]	5 W/(m²·K)	空气层的传热系数
T_fluid	353[K]	353 K	流体温度
h_fluid	20[W/(m^2*K)]	20 W/(m²·K)	流体层的传热系数

几何 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**几何 1**。
- 2 在**几何**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。
- 3 从**长度单位**列表中选择 **mm**。

长方体 1 (blk1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**长方体**。
- 2 在**长方体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**宽度**文本框中键入 “80”。
- 4 在**深度**文本框中键入 “130”。
- 5 在**高度**文本框中键入 “2”。
- 6 单击**构建选定对象**。

工作平面 1 (wpl)

- 1 在**几何**工具栏中单击**工作平面**。
- 2 在**工作平面**的**设置**窗口中，定位到**平面定义**栏。
- 3 在**z 坐标**文本框中键入 “2”。
- 4 单击**显示工作平面**。

工作平面 1 (wpl) > 平面几何

在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。

工作平面 1 (wp1) > 正方形 1 (sq1)

- 1 在工作平面工具栏中单击**体素**，然后选择**正方形**。
- 2 在正方形的**设置**窗口中，定位到**大小**栏。
- 3 在**边长**文本框中键入“10”。
- 4 定位到**位置**栏。在 **xw** 文本框中键入“7”。
- 5 在 **yw** 文本框中键入“10”。
- 6 单击**构建选定对象**。

工作平面 1 (wp1) > 正方形 2 (sq2)

- 1 右键单击**组件 1 (comp1)**>**几何 1**>工作平面 1 (wp1)>平面几何>正方形 1 (sq1)并选择**生成副本**。
- 2 在正方形的**设置**窗口中，定位到**位置**栏。
- 3 在 **xw** 文本框中键入“30”。
- 4 在 **yw** 文本框中键入“8”。
- 5 单击**构建选定对象**。

工作平面 1 (wp1) > 多边形 1 (poll)

- 1 在工作平面工具栏中单击**体素**，然后选择**多边形**。
- 2 在**多边形**的**设置**窗口中，定位到**坐标**栏。
- 3 从**数据源**列表中选择文件。
- 4 单击**浏览**。
- 5 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 heating_circuit_polygon.txt。
- 6 单击**构建选定对象**。

工作平面 1 (wp1) > 圆角 1 (fil1)

- 1 在工作平面工具栏中单击**圆角**。
- 2 在对象 **poll** 中，选择“点” 2-8、23-29、34、36、37、41 和 42。
- 3 在圆角的**设置**窗口中，定位到**半径**栏。
- 4 在**半径**文本框中键入“10”。
- 5 单击**构建选定对象**。

工作平面 1 (wp1) > 圆角 2 (fil2)

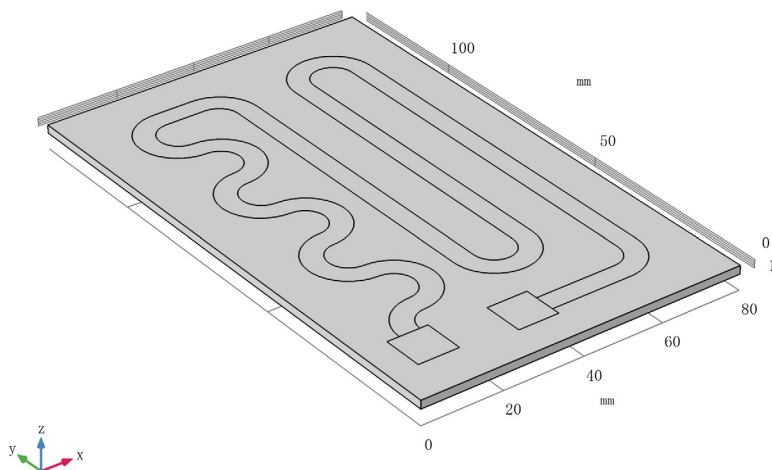
- 1 在工作平面工具栏中单击**圆角**。
- 2 在对象 **fil1** 中，选择“点” 6-12、26-31、37、40、43、46、49 和 50。
- 3 在圆角的**设置**窗口中，定位到**半径**栏。

- 4 在半径文本框中键入“5”。
- 5 在工作平面工具栏中单击**全部构建**。

形成联合体 (fin)

- 1 在主屏幕工具栏中单击**全部构建**。

几何应如下图所示。



定义

添加一个选择，稍后可在应用边界条件以及设置壳物理场设置时使用。

显式 1

- 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“电路”。
- 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”6–8。

在创建用于此模型的材料之前，最好指定要将哪些边界模拟为传导壳。使用这一信息，COMSOL Multiphysics 可以检测到需要哪些材料属性。

固体传热 (HT)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**固体传热 (ht)**。

薄层 1

- 1 在物理场工具栏中单击**边界**，然后选择**薄层**。
- 2 在**薄层**的设置窗口中，定位到**边界选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。
- 4 定位到**层模型**栏。从**层类型**列表中选择**热薄近似**。

电流，多层壳 (ECLS)

- 1 在模型开发器窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**电流，多层壳 (ecls)**。
- 2 在**电流，多层壳**的设置窗口中，定位到**边界选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。

膜 (MBRN)

在物理场工具栏中单击**电流，多层壳 (ecls)**，然后选择**膜 (mbrn)**。

- 1 在模型开发器窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**膜 (mbrn)**。
- 2 在**膜**的设置窗口中，定位到**边界选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。
- 4 定位到**厚度**栏。在 d 文本框中键入 “d_layer”。
- 5 单击以展开**因变量**栏。在**位移场**文本框中键入 “u”。

线弹性材料 1

在模型开发器窗口的**组件 1 (comp1)**> **膜 (mbrn)**节点下，单击**线弹性材料 1**。

热膨胀 1

- 1 在物理场工具栏中单击**属性**，然后选择**热膨胀**。
- 2 在**热膨胀**的设置窗口中，定位到**模型输入**栏。
- 3 从 T 列表中选择**温度 (ht)**。

添加材料

- 1 在主屏幕工具栏中，单击**添加材料**以打开添加材料窗口。
- 2 转到**添加材料**窗口。
- 3 在模型树中选择**内置材料 > Silica glass**。
- 4 单击窗口工具栏中的**添加到组件**。
- 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

Silica glass (mat1)

现在设置材料。

单层材料 1 (slmat1)

- 1 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层 > 单层材料。
- 2 在单层材料的设置窗口中，在标签文本框中键入 “银层”。
- 3 定位到边界选择栏。从选择列表中选择电路。
- 4 定位到层定义栏。在厚度文本框中键入 “d_layer”。
- 5 单击空材料。

银层 (slmat1)

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1)> 材料节点下，单击银层 (slmat1)。
- 2 在单层材料的设置窗口中，定位到层定义栏。
- 3 从材料列表中选择材料 2 (mat2)。
- 4 单击以展开非多层材料设置栏。从材料列表中选择材料 2 (mat2)。

全局定义

材料 2 (mat2)

- 1 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料节点下，单击材料 2 (mat2)。
- 2 在材料的设置窗口中，在标签文本框中键入 “银”。
- 3 定位到材料属性明细栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
导热系数	k_iso ; kii = k_iso, kij = 0	420	W/(m·K)	基本
密度	rho	10500	kg/m³	基本
恒压热容	Cp	230	J/(kg·K)	基本
电导率	sigma_iso ; sigma_ii = sigma_iso, sigma_ij = 0	sigma_silver	S/m	基本
杨氏模量	E	83e9	Pa	基本
泊松比	nu	0.37	1	基本
热膨胀系数	alpha_iso ; alpha_ii = alpha_iso, alpha_ij = 0	18.9e-6	1/K	基本

材料

单层材料 2 (slmat2)

- 1 在模型开发者窗口的组件 1 (comp1) 节点下，右键单击材料并选择层 > 单层材料。
- 2 选择“边界”7。
- 3 在单层材料的设置窗口中，在标签文本框中键入“镍铬合金层”。
- 4 定位到层定义栏。在厚度文本框中键入“d_layer”。
- 5 单击空材料。

镍铬合金层 (slmat2)

- 1 在模型开发者窗口的组件 1 (comp1)> 材料节点下，单击镍铬合金层 (slmat2)。
- 2 在单层材料的设置窗口中，定位到层定义栏。
- 3 从材料列表中选择材料 3 (mat3)。
- 4 单击以展开非多层材料设置栏。从材料列表中选择材料 3 (mat3)。

全局定义

材料 3 (mat3)

- 1 在模型开发者窗口的全局定义 > 材料节点下，单击材料 3 (mat3)。
- 2 在材料的设置窗口中，在标签文本框中键入“镍铬合金”。
- 3 定位到材料属性明细栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
导热系数	k_iso ; kii = k_iso, kij = 0	15	W/(m·K)	基本
密度	rho	9000	kg/m³	基本
恒压热容	Cp	20	J/(kg·K)	基本
电导率	sigma_iso ; sigma_ii = sigma_iso, sigma_ij = 0	sigma_nichrome	S/m	基本
杨氏模量	E	213e9	Pa	基本
泊松比	nu	0.33	1	基本
热膨胀系数	alpha_iso ; alpha_ii = alpha_iso, alpha_ij = 0	10e-6	1/K	基本

添加两个均匀壳特征用于描述薄导电层。需要使用一个均匀层特征描述每种分层材料。均一化过程可逐步消除垂直于层方向的电势降。涉及薄层时，均匀层是首选。在此 App

中存在的条件下，不同导电材料之间应实现连续性，**均匀层**具有额外的优势，能自动应用连续性。

电流，多层壳 (ECLS)

在**物理场**工具栏中单击**膜 (mbrn)**，然后选择**电流，多层壳 (ecls)**。

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**电流，多层壳 (ecls)**。

均质壳 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**均质壳**。
- 2 在**均质壳**的设置窗口中，定位到**边界选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。

均质壳 2

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**均质壳**。
- 2 在**均质壳**的设置窗口中，定位到**层选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**镍铬合金层 (slmat2)**。
- 4 定位到**边界选择**栏。从**选择**列表中选择**电路**。

根据所定义的材料，设置模型的其余物理场。在下一节中，电路内的电阻损耗定义为热应力物理场的热源。电阻损耗在**电流，分层壳**物理场接口中自动计算，添加耦合特征**边界电磁热源**以考虑电阻损耗。

多物理场

电磁热，多层壳 1 (ehls1)

在**物理场**工具栏中单击**多物理场耦合**，然后选择**边界 > 电磁热，多层壳**。

固体传热 (HT)

热通量 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**热通量**。
- 2 选择“边界”4和6–8。
- 3 在**热通量**的设置窗口中，定位到**热通量**栏。
- 4 单击**对流热通量**按钮。
- 5 在 h 文本框中键入 “ h_{air} ”。
- 6 在 T_{ext} 文本框中键入 “ T_{air} ”。

热通量 2

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**热通量**。

- 2 选择“边界”3。
- 3 在**热通量**的设置窗口中，定位到**热通量**栏。
- 4 单击**对流热通量**按钮。
- 5 在 h 文本框中键入“h_fluid”。
- 6 在 T_{ext} 文本框中键入“T_fluid”。

为了解决问题，必须对玻璃板施加约束，使其不可能发生任何刚体平移或旋转。约束必须确保抑制热膨胀时不会产生应力。

固体力学 (SOLID)

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

刚体运动抑制 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**域**，然后选择**刚体运动抑制**。
- 2 选择“域”1。

电流，多层壳 (ECLS)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**电流，多层壳 (ecls)**。

电势 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边**，然后选择**电势**。
- 2 选择“边”10。
- 3 在**电势**的设置窗口中，定位到**电势**栏。
- 4 在**电势**文本框中键入“V_in”。

接地 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边**，然后选择**接地**。
- 2 选择“边”43。

网格 1

自由三角形网格 1

- 1 在**网格**工具栏中单击**边界**，然后选择**自由三角形网格**。
- 2 选择“边界”4和6-8。

大小 1

- 1 右键单击**自由三角形网格 1**并选择**大小**。
- 2 在**大小**的设置窗口中，定位到**几何实体选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。

- 4 定位到**单元大小**栏。单击**定制**按钮。
- 5 定位到**单元大小参数**栏。选中**最大单元大小**复选框。
- 6 在关联文本框中键入“2”。

分布 1

- 1 在**网格**工具栏中单击**扫掠**。
- 2 在**网格**工具栏中单击**分布**。
- 3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。
- 4 在**单元数**文本框中键入“3”。
- 5 单击**全部构建**。

研究 1

为了提高求解器的性能，将分离式求解器设为分别计算温度、电压和位移，最佳顺序为 V、T、u。

- 1 在**研究**工具栏中单击**显示默认求解器**。

解 1 (sol1)

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**解 1 (sol1)** 节点。
- 2 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1>求解器配置>解 1 (sol1)>稳态求解器 1>分离 1**节点，然后单击**分离步 2**。
- 3 在**分离步**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“电势 V”。
- 4 右键单击**研究 1>求解器配置>解 1 (sol1)>稳态求解器 1>分离 1>电势 V**并选择**上移**。
- 5 定位到**常规**栏。从**变量**列表中选择**位移场 (comp1.u)**。
- 6 在**变量**下，单击**删除**。
- 7 从**变量**列表中选择**法向应变 (comp1.mbrn.unn)**。
- 8 在**变量**下，单击**删除**。
- 9 在**模型开发器**窗口的**研究 1>求解器配置>解 1 (sol1)>稳态求解器 1>分离 1**节点下，单击**分离步 3**。
- 10 在**分离步**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“位移 u”。
- 11 定位到**常规**栏。在**变量**下，单击**添加**。
- 12 在**添加**对话框中，从**变量**列表中选择**法向应变 (comp1.mbrn.unn)**。
- 13 单击**确定**。
- 14 在**研究**工具栏中单击**计算**。

结果

默认绘图显示了 von Mises 应力，包括全三维几何表面上的变形（图 5）和温度（图 4），以及电路层上的电势和 von Mises 应力。

表面 1

- 1 在模型开发器窗口中展开结果 > 应力 (solid) 节点，然后单击表面 1。
- 2 在表面的设置窗口中，定位到表达式栏。
- 3 从单位列表中选择 MPa。
- 4 在应力 (solid) 工具栏中单击绘制。

电势，厚度平均值

- 1 在模型开发器窗口中展开结果 > 基选择电势 (ecls) 节点，然后单击电势，厚度平均值。
- 2 在表面的设置窗口中，定位到表达式栏。
- 3 在单位编辑框中键入 “MPa”。
- 4 在基选择电势 (ecls) 工具栏中单击绘制。

研究 1/ 解 1 (sol1)

在模型开发器窗口中展开结果 > 数据集节点。

研究 1/ 解 1 (2) (sol1)

- 1 右键单击研究 1/ 解 1 (sol1) 并选择生成副本。
- 2 在模型开发器窗口的结果 > 数据集节点下，右键单击研究 1/ 解 1 (2) (sol1) 并选择选择。

选择

- 1 在模型开发器窗口的结果 > 数据集 > 研究 1/ 解 1 (2) (sol1) 节点下，单击选择。
- 2 在选择的选择窗口中，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 从选择列表中选择电路。

要生成图 3，请按照下面的步骤操作。

三维绘图组 7

- 1 在主屏幕工具栏中单击添加绘图组，然后选择三维绘图组。
- 2 在三维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入 “表面损耗”。
- 3 定位到数据栏。从数据集列表中选择研究 1/ 解 1 (2) (sol1)。

表面 1

- 1 在表面损耗工具栏中单击表面。

- 2 在**表面**的**设置**窗口中，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**模型 > 组件 1 > 电流，多层壳 > Heat > ecls.Qsh - 表面热源 - W/m²**。
- 3 在**表面损耗**工具栏中单击**绘制**。
- 4 在**图形**工具栏中单击**场景光**按钮。
- 5 在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。

按照以下步骤操作可生成表面上的表面拉力矢量模的图（参见图 6）：

三维绘图组 8

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击**添加绘图组**，然后选择**三维绘图组**。
- 2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“界面应力”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究 1/ 解 1 (2) (sol1)**。

表面 1

- 1 在**界面应力**工具栏中单击**表面**。
- 2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。
- 3 在**表达式**文本框中键入“ $\sqrt{\text{solid.Tax}^2 + \text{solid.Tay}^2}$ ”。
- 4 从**单位**列表中选择**MPa**。
- 5 在**界面应力**工具栏中单击**绘制**。

最后，要获得图 7，请继续执行以下操作：

表面 1

- 1 在**结果**工具栏中单击**更多数据集**，然后选择**表面**。
- 2 选择“边界” 3。
- 3 在**结果**工具栏中单击**二维绘图组**。

二维绘图组 9

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**二维绘图组 9**。
- 2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“底部边界上的位移”。

表面 1

- 1 右键单击**结果 > 底部边界上的位移**并选择**表面**。
- 2 在**表面**的**设置**窗口中，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**模型 > 组件 1 > 固体力学 > 位移 > solid.disp - 总位移 - m**。
- 3 定位到**表达式**栏。在**单位**编辑框中键入“um”。

- 4 在**底部边界上的位移**工具栏中单击**绘制**。
- 绝对位移本身并不是一个很重要的量，因为它只是一个如何施加刚体约束的函数。相反，您可能更希望看到边界从平面形状变形了多少。为此，使用最小二乘拟合创建一个线性近似，然后绘制出平面的变形情况。

定义 (COMP1)

积分 1 (intop1)

- 1 在**定义**工具栏中单击**组件耦合**，然后选择**积分**。
- 2 在**积分**的**设置**窗口中，在**算子名称**文本框中键入 “intBelow”。
- 3 定位到**源选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。
- 4 选择 “边界” 3。
- 5 定位到**高级**栏。从**坐标**列表中选择**材料 (X, Y, Z)**。

变量 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，右键单击**定义**并选择**变量**。
- 2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**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 heating_circuit_variables.txt。

矩阵求逆 1 (matinv1)

- 1 在**定义**工具栏中单击**矩阵变量**，然后选择**矩阵求逆**。
- 2 在**矩阵求逆**的**设置**窗口中，在**名称**文本框中键入 “AInv”。
- 3 定位到**输入矩阵**栏。从**矩阵格式**列表中选择**对称**。
- 4 在表中输入以下设置：

A1	Ax	Ay
Ax	Axx	Axy
Ay	Axy	Ayy

研究 1

在**研究**工具栏中单击**更新解**。

结果

表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果 > 底部边界上的位移**节点下，单击**表面 1**。

- 2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。
- 3 在**表达式**文本框中键入 “ $w - (w_0 + w_x * X + w_y * Y)$ ”。
- 4 在**底部边界**上的**位移**工具栏中单击**绘制**。

要计算产生的总热量值和流体侧的热通量积分值，请执行边界积分：

- 5 在**结果**工具栏中单击**更多派生值**，然后选择**积分 > 表面积分**。

表面积分 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果 > 派生值**节点下，单击**表面积分 1**。
- 2 选择“**边界**”3。
- 3 在**表面积分**的**设置**窗口中，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**模型 > 组件 1 > 固体传热 > 边界通量 > ht.q0 - 向内热通量**。
- 4 单击**计算**。

表格

- 1 转到**表格**窗口。
- 结果应接近 8.5 W。

结果

表面积分 2

- 1 在**结果**工具栏中单击**更多派生值**，然后选择**积分 > 表面积分**。
- 2 在**表面积分**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**电路**。
- 4 单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**模型 > 组件 1 > 电流，多层壳 > Heat > ecls.Qsh - 表面热源**。
- 5 单击**计算**。

表格

- 1 转到**表格**窗口。
- 结果应接近 13.8 W。