

气液属性模块

简介

气液属性模块简介

© 1998–2020 COMSOL 版权所有

受列于 cn.comsol.com/patents 的美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,219,373、8,457,932、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673、9,454,625、10,019,544、10,650,177 和 10,776,541 保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据《COMSOL 软件许可协议》(cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用或复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、COMSOL Desktop、COMSOL Compiler、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

版本：COMSOL 5.6

联系信息

请访问“联系我们”页面 cn.comsol.com/contact，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址和电话号码。您也可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/contact/offices，获取更多地址和联系信息。

如需联系技术支持，请访问 COMSOL Access 页面 cn.comsol.com/support/case，创建并提交在线请求表单。其他常用链接包括：

- 技术支持中心：cn.comsol.com/support
- 产品下载：cn.comsol.com/product-download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM025202

目录

- 热力学属性数据库..... 5
- 发动机冷却液属性..... 6
 - 简介 6
 - 模型定义 6
 - 结果 8
 - 参考资料 15
 - 建模操作说明：发动机冷却液属性 16
- 具有精确气液属性的热管..... 54
 - 模型定义 54
 - 结果与讨论 57
 - 参考资料 60
 - 建模操作说明：具有精确气液属性的热管 60

热力学属性数据库

本手册介绍“气液属性模块”内置的热力学属性数据库的用法。该数据库的目的是计算纯溶液和化合物混合物的热力学属性和传递属性。您可以使用一系列模型来计算生成焓、热容、导热系数、密度和扩散系数等属性。对于由单一气相或单一液相组成的流体，以及液 - 液、汽 - 液和汽 - 液 - 液系统，都可以计算这些属性。对于多相系统，还可以计算平衡组成，例如，计算液体混合物与它的气相平衡时的相包络线（闪蒸计算）。

- 本文介绍的第一个例子是[发动机冷却液属性](#)，演示了如何使用热力学属性数据库来研究内燃机冷却液。其中研究了乙二醇和水的混合物，并使用内置的热力学功能来表征沸点、密度、黏度、导热系数和热容如何与冷却液混合物的组分相关，以及这些属性的变化如何对冷却过程产生影响。
- 第二个例子分析[具有精确气液属性的热管](#)，描述了一个带有内腔和多孔水饱和铜芯的铜制圆筒，蒸发的水可以在其中从热端流向冷端，并释放潜热。本例分析工作流体损失产生的影响，并评估蒸汽在正常工作条件下传递的相对重要性。

“气液属性模块”中的热力学属性数据库可以与任何处理流体传输的模块中定义的模型结合使用，例如“CFD 模块”、“搅拌器模块”、“传热模块”、“管道流模块”和“地下水流模块”。

发动机冷却液属性

简介

汽车的发动机缸体带有一个冷却套，用来消除燃烧产生的多余热量。这个冷却套由气缸体和气缸盖中的开放空间组成。当发动机运行时，冷却液通过夹套泵入，以防止发动机过热。优化散热效果对于尽可能减少冷却液沸腾、防止发动机故障，以及近来出现的通过余热回收提高整体效率非常重要。本例演示如何使用“热力学”特征来评估不同发动机冷却液的性能。

虽然纯水可以用作冷却液，但为了防止在低温下结冰，人们通常使用乙二醇和水的混合物来降低冰点。本例使用“热力学”特征来演示沸点、密度、黏度、导热系数和热容如何与冷却液混合物的组分相关，以及这些属性的变化如何对冷却过程产生影响。

模型定义

图 1 显示典型四缸发动机冷却套中的流型。这是一个具有复杂几何形状，并包含与温度、压力和组分相关的冷却液属性的全耦合非等温湍流问题，求解时通常需要大量的计算时间。在较短的时间内获得可靠近似解的一种方法是：使用“热力学”特征提供的功能来研究冷却液的属性，并确定可以进行简化假设的位

置。您可以在简化的几何中有效研究这些假设的结果，为以后在更复杂的几何中使用它们提供信心。

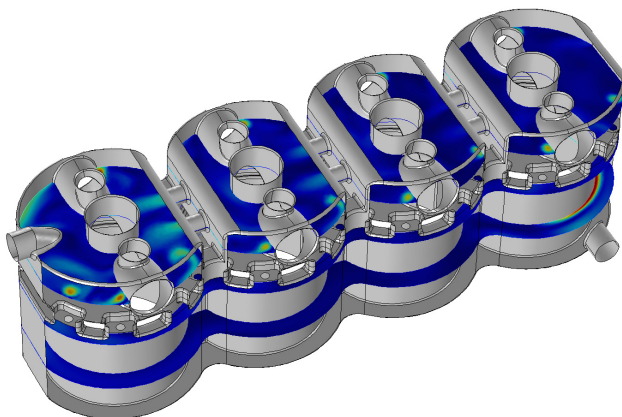


图1：冷却液在四缸发动机的冷却套内流动。

图 2 显示一个简化的二维轴对称几何，我们将其作为发动机冷却液测试装置。冷却液以指定的流率从装置底部引入，撞击钢制零件后发生转向，进入一个更大的流域。我们在较大部分的外边界上施加加热通量，并在顶部冷却液流出附近的固体结构中测得稳态下的最终温度。

当前模型采用“单相流”和“流体传热”接口来求解测试装置中的流体流动和传热问题，其中使用“非等温流动”多物理场特征来耦合这些接口，并采用 $k-\epsilon$ 模型对流体湍流进行建模。

本例使用“热力学”特征来定义冷却液的属性：首先定义“热力学系统”节点并将其添加到“热力学”特征中，该系统包含相关的化学物质，本例中为乙二醇和水。“热力学系统”节点又可以用来计算纯物质和所得混合物的热力学属性和传递属性的属性函数，由此可以创建冷却液混合物的密度、黏度、导热系数和热容的函数。

冷却液属性分析通过三个步骤进行。首先，通过绘制“热力学系统”创建的函数来计算混合物属性。然后，通过绘制（沸腾和冷凝的）平衡温度随组分的变化情况，将冷却液汽 - 液系统的相包络线可视化。通过在“热力学系统”中添加“平衡计算”特征来定义所需的平衡函数，并使用这些平衡函数来比较两种不同压力下的相包络线。

然后，求解测试装置中冷却液混合物的流体流动和传热问题，并将纯水与乙二醇混合物（体积百分比为 50%）的结果进行比较。对于这些化学品，体积百分比为 50% 的混合物相当于 52.7% 的质量百分比。最后，我们使用得到的结果来计算平均混合物属性。

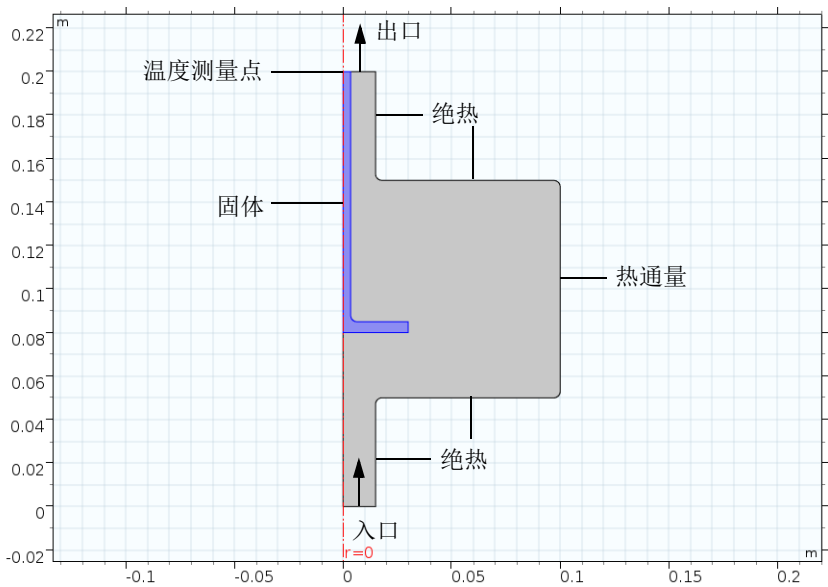


图2：轴对称发动机冷却液测试装置。

结果

图 3 显示热容对温度和组分的依赖性。本例对密度、黏度和导热系数也生成了类似的图表。从这些图中可以看出，与纯水相比，加入乙二醇可以增加密度和

黏度，但会减小导热系数和热容。可以预见的是，体积百分比为 50% 的混合物将产生更大的压降，并需要更高的流率来达到与纯水相同的冷却效果。

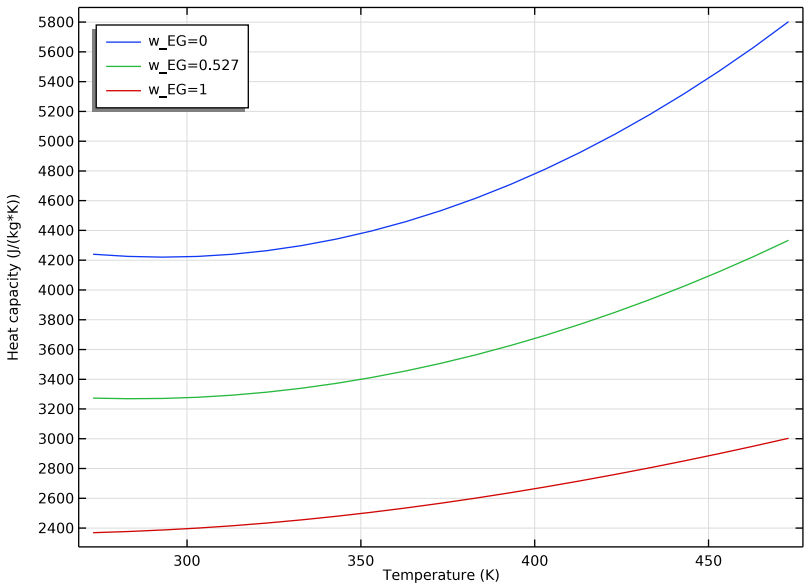


图3：乙二醇 - 水混合物的热容随温度和组分的变化情况。

图 4 显示使用“热力学系统”的“平衡计算”特征生成的乙二醇 - 水混合物的相包络线。汽车冷却液系统通常在大约 2 个大气压下工作。从图中可以看出，在

这个压力下，体积百分比为 50%（摩尔百分比为 24.4%）的混合物应在略高于 400 K 的温度下沸腾。

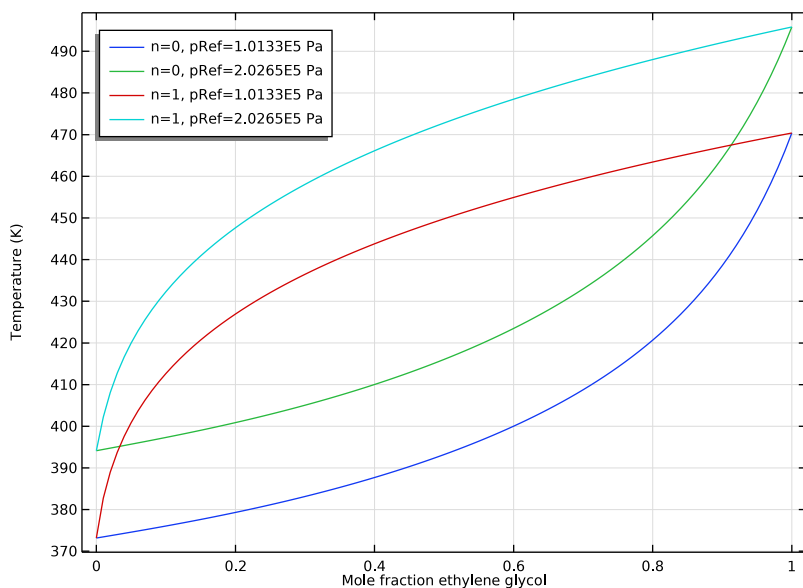


图4：两种压力下，乙二醇-水混合物平衡温度的相包络线。

图 5 显示水以 1 m/s 的速度流入测试装置时的内部流型。该测试装置中使用的冷却液流量为 42 l/min，热输入为 50 kW，与传统汽车冷却系统的数量级相同。

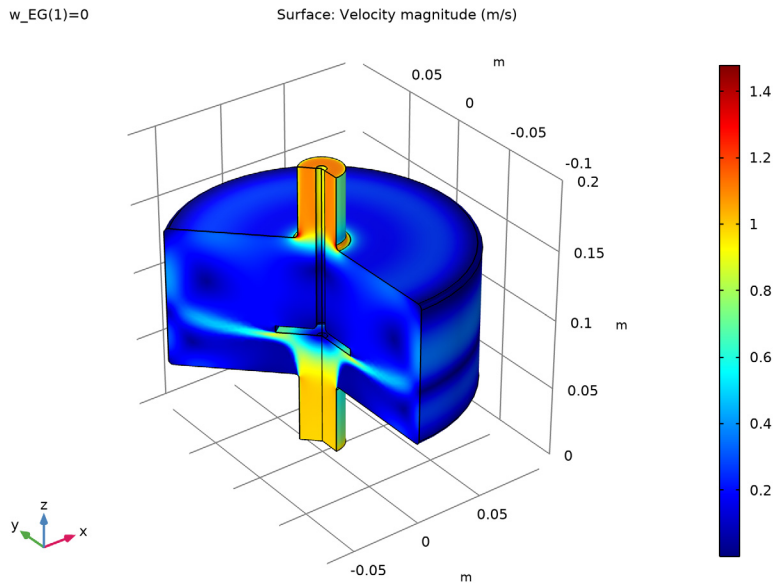


图5：水以 1 m/s 的速度流入测试装置时，其内部的流型。

通过图 6 可以看出，正如预期那样，在固定流率下，乙二醇 - 水混合物的冷却效率低于纯水。为了产生与使用纯水相同的冷却效果，需要增加大约 15% 的冷却

液流量。此外还可以看出，在装置外角的回流区，预计有一些冷却液会沸腾（在 $T > 400\text{ K}$ 的温度下）。

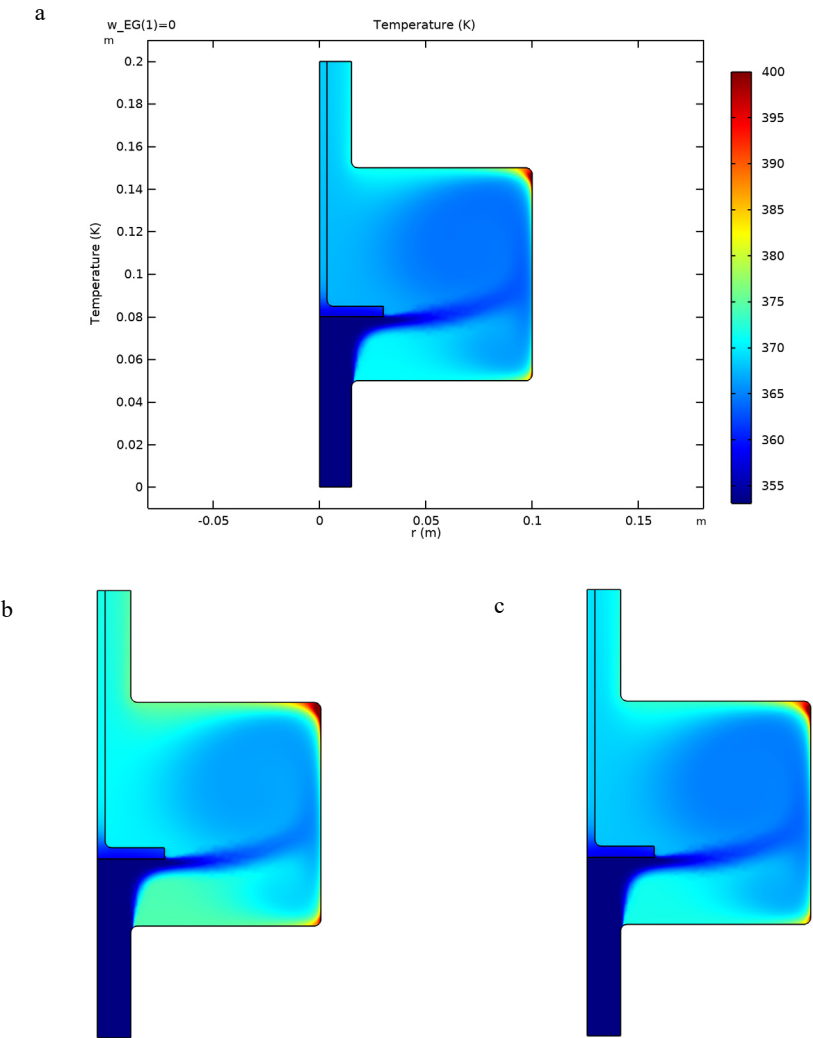


图6: 三种情况下测试装置内的温度: (a) 水以 1 m/s 流入时, (b) 体积百分比为 50% 的乙二醇的速度为 1 m/s 时, (c) 体积百分比为 50% 的乙二醇的速度为 1.15 m/s 时。

下表给出了压降、出口温度和出口密度的比较结果。

仿真结果

| 重量分数， 乙二醇 | 速度 (M/S) | 压降 (PA) | 出口温度 (K) | 出口密度 (KG/M) |
|--------------------|-------------|------------|-------------|----------------|
| 0 | 1 | 554 | 370 | 961 |
| 0.527 | 1 | 626 | 373 | 1007 |
| 0.527 | 1.15 | 822 | 371 | 1009 |
| 0.527 ¹ | 1 | 608 | 373 | 1010 |

¹ 使用恒定的混合物属性。

考虑到各种冷却液属性的图形结果，对于相对较小的温度范围（353 到 400 K 之间），使用近似平均值可能比较合理。图 7 绘制了纯水和乙二醇 - 水两种混合物的最终热容。如前所述，在比较纯水和混合物时，我们发现热容差别很大。但是，每种冷却液的个体差异却很小，对于这种混合物的属性和位置来说约为 2%。以同样的方式分析密度，可以看到变化的数量级是相同的。

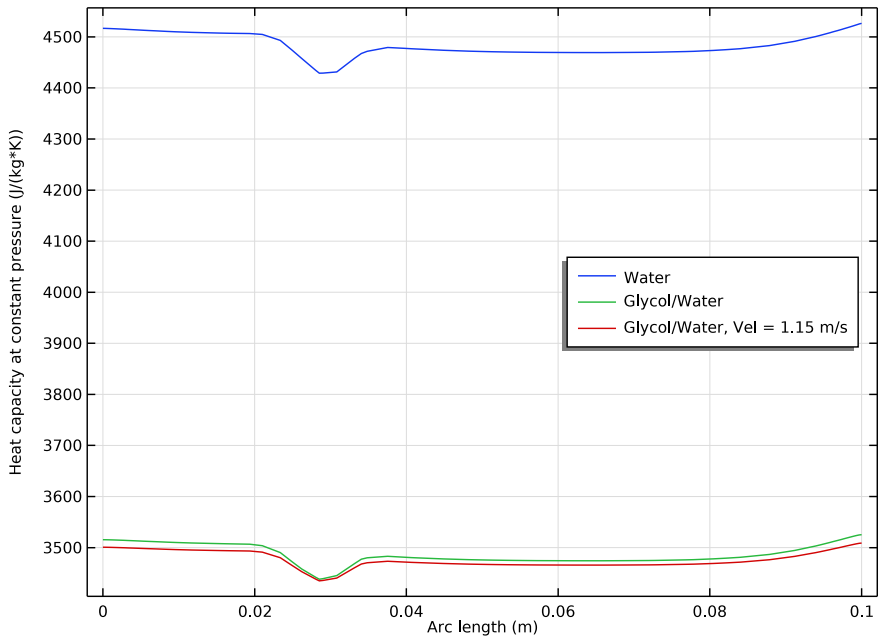
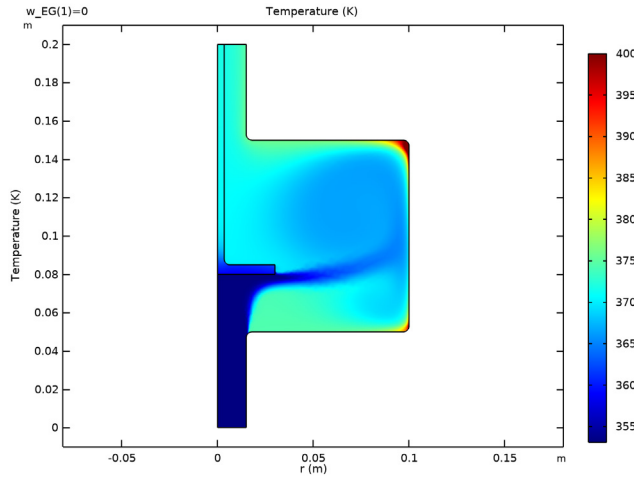


图7：沿测试装置腔半径一半处的垂直截线绘制的冷却液热容。

使用乙二醇（体积百分比为 50%）- 水混合溶液可以计算以下平均值：密度 = 1010 kg/m^3 ，黏度 = $9.07 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，导热系数 = $0.574 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 以及热容 = $3486 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。图 8 显示在测试装置中使用这些近似值与使用全耦合的温度相关属性得到的温度结果的比较图。这些结果之间的相似性足以证明，在具有逼真几何形状的冷却套模型中使用近似平均值是合理的。对于恒定平均属性值的情况，求解流动和传热方程所需的计算量要小得多。

a



b

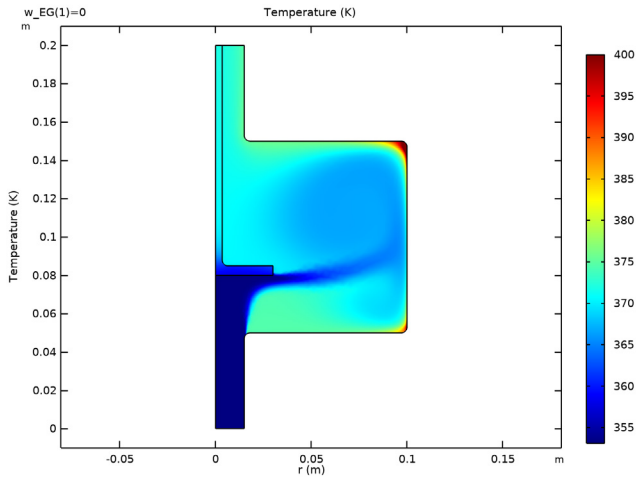


图8：使用以下两种属性时，乙二醇（（体积百分比为50%））- 水（速度为1 m/s）混合物的测试装置中的温度比较图：(a) 温度相关属性，(b) 近似平均属性。

参考资料

1. http://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html



建模操作说明：发动机冷却液属性

以下分步操作说明将指导您完成建立“热力学系统”的整个过程，构建几何，以及使用“单相流”和“流体传热”接口来模拟发动机冷却液的物理场。“热力学系统”通过提供所有必需的热力学和传递属性的 COMSOL 热力学数据库进行创建。


模型向导



注：这些操作说明适用于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 macOS 系统，只是略有不同。




- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标以启动软件。软件打开后，您可以选择使用“模型向导”来创建新的 COMSOL 模型，也可以选择“空模型”手动进行创建。对于本教程，单击“模型向导”按钮。

如果 COMSOL 已打开，您可以在“文件”菜单中选择  “新建”，然后单击  “模型向导”来启动它。

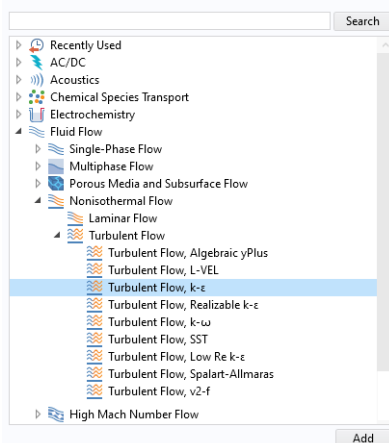
“模型向导”会引导您完成建立模型的最初几个步骤。接下来的窗口可供您选择建模空间的维度。

- 2 在“选择空间维度”窗口中单击  “二维轴对称”。

在“选择物理场”树中，展开“流体流动 > 非等温流动 > 湍流”节点，然后双击  “湍流，k- ϵ ”，以将其添加到“添加的物理场接口”列表中。您也可以右键单击“湍流，k- ϵ ”并选择  “添加物理场”。



- 3 单击  “研究”。在“选择研究”树的“一般研究”分支下，选择  “稳态”。
- 4 单击  “完成”。

Select Physics

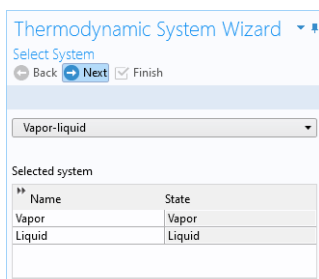


热力学


首先，我们添加“热力学系统”，稍后将使用它来计算冷却液的传递属性和热力学属性。

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击  “全局定义”并选择“热力学 >  热力学系统”。此时会打开“热力学系统向导”。第一步，选择系统中的相。您可以从以下系统中进行选择：

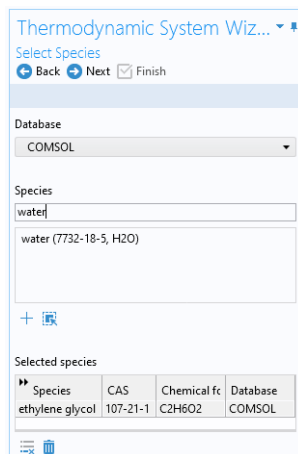
- 气体
- 液体
- 汽 - 液
- 汽 - 液 - 液
- 液 - 液






- 2 在“选择系统”窗口中，从列表中选择“汽 - 液”。在本例中，我们需要一个两相系统来研究冷却液混合物的相包络线。在求解测试装置中的传热问题时，我们假设混合物保持为液相。


- 3 单击窗口工具栏中的  “下一步”，继续该向导的下一步操作。


- 4 在“选择物质”窗口中，定位到“物质”列表，并在“物质”过滤器框中键入 **ethylene glycol**。在您键入时，可用的物质会在下方列表中动态更新。



- 5 在可用物质列表中选择 **ethylene glycol** (107-21-1, C2H6O2)，然后单击  “添加所选项”将其添加到“选定物质”列表中。
- 6 执行相同的步骤（步骤 4 和 5）来添加水，即：
 - 在“物质”过滤器框中键入 **water**。
 - 在可用物质列表中选择 **water (7732-18-5, H2O)**。
 - 单击  “添加所选项”。

- 7 单击窗口工具栏中的  “下一步”，继续“热力学系统向导”的最后一步操作。您可以在这里选择用于计算热力学属性和传递属性的模型。

- 8 在“选择热力学模型”窗口中，从列表中选择 UNIFAC VLE，然后在窗口工具栏中单击  “完成”。

此时会在“模型开发器”窗口的  “热力学”节点下添加一个“热力学系统”节点，其默认标签（名称）为“汽 - 液系统 1”，表明该系统中的相。



有关如何选择热力学模型的更多信息，请参阅 *Liquid & Gas Module User's Guide* 中的 [Selecting the Right Thermodynamic Model](#)。

生成材料

在对固定组分的混合物进行建模时，使用材料非常方便，这是因为物理场接口的默认特性是使用域材料的属性。您既可以从可用的“材料库”中选择现成的材料，也可以通过“热力学”生成。在此模型中，我们首先使用“热力学系统（汽 - 液系统 1）”为冷却液生成材料节点。随后，我们将使用“材料库”为任何的“固体部分”创建“材料”，然后将这两种材料指派给几何中的相关选择。这允许选择中的物理场接口访问材料属性。




因此，我们首先使用“热力学系统（汽 - 液系统 1）”为混合物的属性创建“材料”节点。

- 1 在“模型开发器”窗口的  “全局定义 >  热力学”节点下，右键单击  “汽 - 液系统 1 (pp1)” 并选择  “生成材料”。此时会打开“生成材料向导”。
- 2 在“选择相”窗口中，从列表中选择“液体”。在窗口工具栏中单击  “下一步”。


- 3 在“选择物质”窗口中，请注意两个物质是如何添加到“选定物质”列表中的。
- 4 在“材料成分”子栏中，单击“质量分数”按钮并保留默认的成分。稍后我们将在生成的“材料”中重新定义成分。
- 5 在窗口工具栏中单击  “下一步”。
- 6 在“选择属性”窗口中，使用默认属性。由于我们研究的是恒定组分的混合物，因此不需要扩散系数。
- 7 在窗口工具栏中单击  “下一步”。
- 8 在“定义材料”窗口中，将材料添加到“组件 1”，并保留函数类型设置：热力学。这意味着材料属性将直接使用“汽 - 液系统”定义的函数。您也可以创建插值函数并在材料属性中使用它们。
- 9 单击窗口工具栏中的  “完成”以创建材料。

Generate Material Wizard

Select Species



 Back
  Next
  Finish

ethylene glycol
water

+ 

Selected species

| Species | CAS | Chemical formula | Molecular weight |
|-----------------|-----------|--|------------------|
| ethylene glycol | 107-21-1 | C ₂ H ₆ O ₂ | 62.0687 |
| water | 7732-18-5 | H ₂ O | 18.0152 |

Material composition

☐ Mole fraction
☒ Mass fraction

| Species | Mass fraction |
|-----------------|---------------|
| ethylene glycol | 0.5 |
| water | 0.5 |

全局定义

从文件加载所需的参数。此外，您也可以直接在“参数”窗口中创建参数。

- 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”栏并单击“从文件加载”。
- 3 浏览到模型的“案例库”文件夹，然后双击文件 `engine_coolant_properties_parameters.txt`。

此时，txt 文件中的参数会添加到表格中。

SettingsParameters

Label: Parameters 1

Parameters

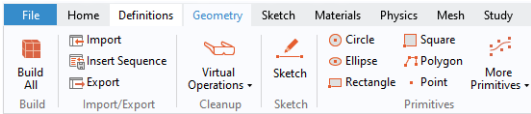
| Name | Expression | Value | Description |
|--------|----------------|-------------|-------------------------------|
| w_EG | 0.527 | 0.527 | Mass fraction, ethylene g... |
| w_W | 1-w_EG | 0.473 | Mass fraction, water |
| Vel | 1.0[m/s] | 1 m/s | Pipe inlet velocity |
| r_p | 1.5[cm] | 0.015 m | Pipe radius |
| l_p | 20[cm] | 0.2 m | Pipe length |
| r_c | 10[cm] | 0.1 m | Chamber radius |
| l_c | 10[cm] | 0.1 m | Chamber length |
| zpos_c | l_p/4 | 0.05 m | Chamber position along... |
| r_s1 | 3[cm] | 0.03 m | Solid part 1, radius |
| l_s1 | 0.5[cm] | 0.005 m | Solid part 1, length |
| r_s2 | 0.35[cm] | 0.0035 m | Solid part 2, radius |
| l_s2 | l_p-zpos_s | 0.12 m | Solid part 2, length |
| zpos_s | zpos_c+0.3*l_c | 0.08 m | Solid parts position along... |
| Tc | 353.15[K] | 353.15 K | Coolant temperature |
| pRef | 2[atm] | 2.0265E5 Pa | Coolant pressure |
| n | 0 | 0 | Phase fraction |
| P0 | 50[kW] | 50000 W | Combustion heat flux |

几何 1

现在，我们已经定义热力学系统并使用它来生成材料，接下来，为轴对称发动机冷却液测试装置构建几何（见图 2）。

管

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“组件 1 (comp1) > 几何 1”节点，然后右键单击“几何 1”并选择“矩形”。作为可选项，您也可以在“几何”功能区选项卡中单击“矩形”。




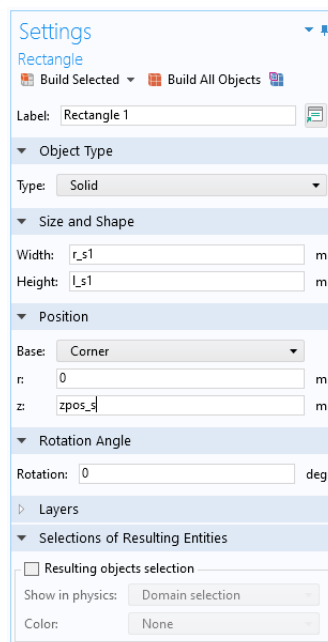
- 2 在“矩形”的“设置”窗口中，定位到“大小和形状”栏。

3 在“宽度”文本框中，键入 r_p （管半径的参数名称）。


4 在“高度”文本框中，键入 l_p （管长的参数名称）。

r_p 和 l_p 都是在“参数”节点中定义的，请参见[全局定义](#)一节。

5 单击  “构建选定对象”。



腔


1 在“几何”工具栏中单击  “矩形”。

2 在“矩形”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 r_c （腔半径的参数名称）。

4 在“高度”文本框中，键入 l_c （腔长度的参数名称）。

5 定位到“位置”栏。在 z 文本框中，键入 $zpos_c$ （沿管的腔位置）。

6 单击  “构建选定对象”。

固体部分 1


1 在“几何”工具栏中单击  “矩形”。

2 在“矩形”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 r_{s1} 。

4 在“高度”文本框中键入 l_{s1} 。


5 定位到“位置”栏。在 z 文本框中键入 $zpos_s$ 。

6 单击  “构建选定对象”。




固体部分 2

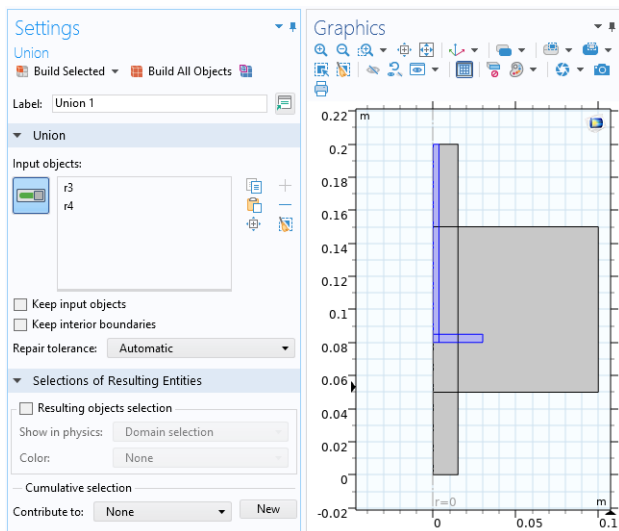
1 在“几何”工具栏中单击  “矩形”。

2 在“矩形”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 r_s2 。
- 4 在“高度”文本框中键入 l_s2 。
- 5 定位到“位置”栏。在 z 文本框中键入 $zpos_s$ 。
- 6 单击  “构建选定对象”。




合并固体部分

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “布尔操作和分割”并选择  “并集”。
- 2 在“并集”的“设置”窗口中，定位到“并集”栏，只选择对象 $r3$ 和 $r4$ 。为此，您可以在“图形”窗口中单击“固体部分 1”和“固体部分 2”。
- 3 清除“保留内部边界”复选框。
- 4 单击  “构建选定对象”。




接下来，我们执行相应的操作，将管和腔合并到一起。

合并管和腔

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “布尔操作和分割”并选择  “并集”。
- 2 在“图形”窗口中选择对象 $r1$ （管）和 $r2$ （腔）。
- 3 在“并集”的“设置”窗口中，定位到“并集”栏并清除“保留内部边界”复选框。
- 4 单击  “构建选定对象”。

下面，我们继续在几何中添加圆角。

倒圆角


1 在“几何”工具栏中，单击  “倒圆角”。

2 在对象 uni1（固体部分）中，仅选择“点”5。为了选择该点，您可以在“图形”窗口中单击，并在“倒圆角”“设置”窗口的“点”栏中的“要倒圆角的顶点”中检查点编号。

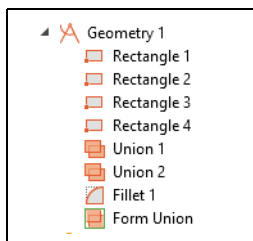
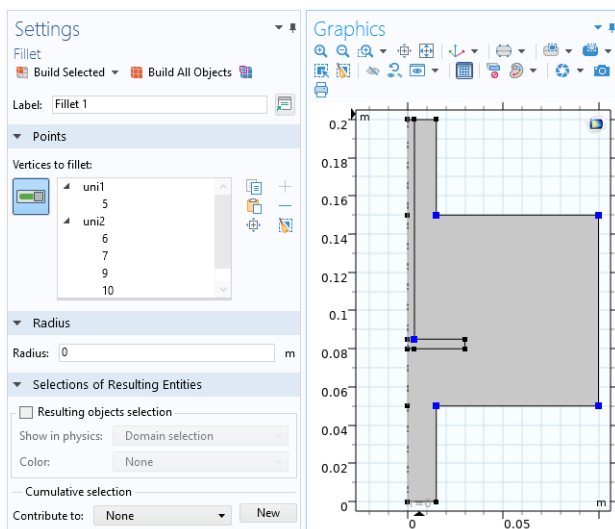
3 在对象 uni2（管和腔）中，仅选择“点”6、7、9和10。

4 在“倒圆角”的“设置”窗口中，定位到“半径”栏。

5 在“半径”文本框中键入 0.3[cm]。

6 单击  “构建所有对象”。

现在，“模型开发器”窗口中的“几何”节点应如下所示：



研究 1：混合物属性参数化

现在，我们已经为系统构建了几何，接下来，计算并绘制“热力学系统”定义的乙二醇 - 水冷却液的属性。

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“研究 1”。
- 2 在“研究”的“设置”窗口中，在“标签”文本框中键入**研究 1：混合物属性参数化**。
- 3 定位到“研究设置”栏。清除“生成默认绘图”复选框。

步骤 1：稳态

首先，您可以执行“辅助扫描”研究来了解改变乙烯的质量分数和冷却液温度所产生的影响。

- 1 在“模型开发器”窗口的“研究 1：混合物属性参数化”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，然后选中“辅助扫描”复选框。
- 3 单击“添加”两次（表格下方的按钮），此时表格中会添加两行。
- 4 在表格中，通过从下拉菜单中选择以下参数名称来编辑这两行，然后输入参数值，使表格如下所示：

| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|------------------|-------------------|------|
| w_EG (质量分数, 乙二醇) | 0 0.527 1 | |
| Tc (冷却液温度) | range(273,10,473) | K |


- 5 从“扫描类型”列表中，选择“所有组合”。

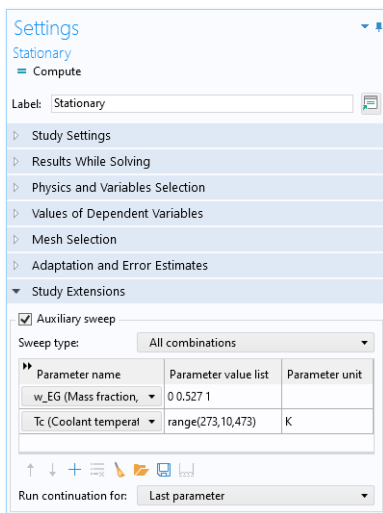
在首次执行“辅助扫描”研究的过程中，无需求解湍流和传热问题。我们可以通过更改设置来跳过求解这些接口。

- 1 定位到“物理场和变量选择”栏。在“物理场接口”表中，清除“湍流， $k-\epsilon$ (spf)”和“流体传热 (ht)”的“求解”复选框。
- 2 在“多物理场耦合”表中，清除“非等温流动 1 (nitfl)”的“求解”复选框。

现在，我们已经设置好参数化求解器来计算以下三种情况的函数值：纯水、体积百分比为 50% 的乙二醇和水混合物

以及纯乙二醇。此外，该求解器还将计算 273 K 到 473 K 温度范围的函数值。





- 3 在“主屏幕”工具栏（或“稳态”的“设置”窗口）中，单击  “计算”。



结果

现在，我们检查研究得到的混合物属性。为此，创建一个绘图组并绘制结果。我们首先绘制密度图。

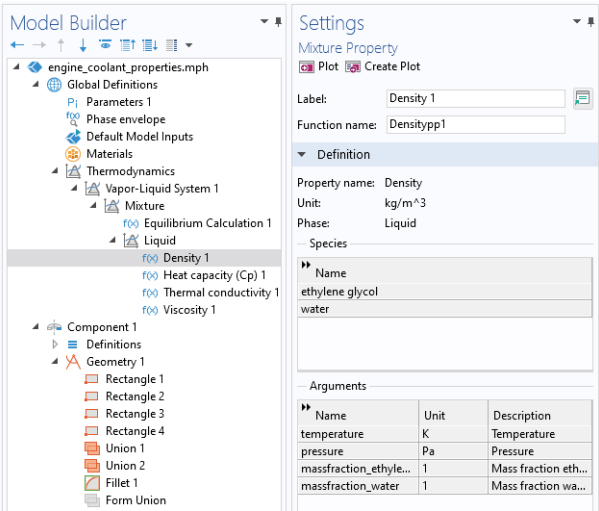
密度

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加绘图组”并选择  “一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入密度。
- 3 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 4 在“密度”工具栏中单击  “全局”。此时会在“密度”绘图组中添加“全局”绘图。
- 5 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。单击右上角的“替换表达式” ，然后在打开的窗口中搜索 **Densitypp1**，或在“模型 > 全局定义 > 函数”下选择 **Densitypp1(...)** - 密度 1。双击该表达式将其添加到表格中。

6 在表中为函数输入以下变元：**Tc, pRef, w_EG, w_W**。请确保按这个顺序添加变元，这是在“混合物”节点中定义的顺序。

7 定位到“图例”栏，并找到“包含”子栏。清除“描述”复选框。

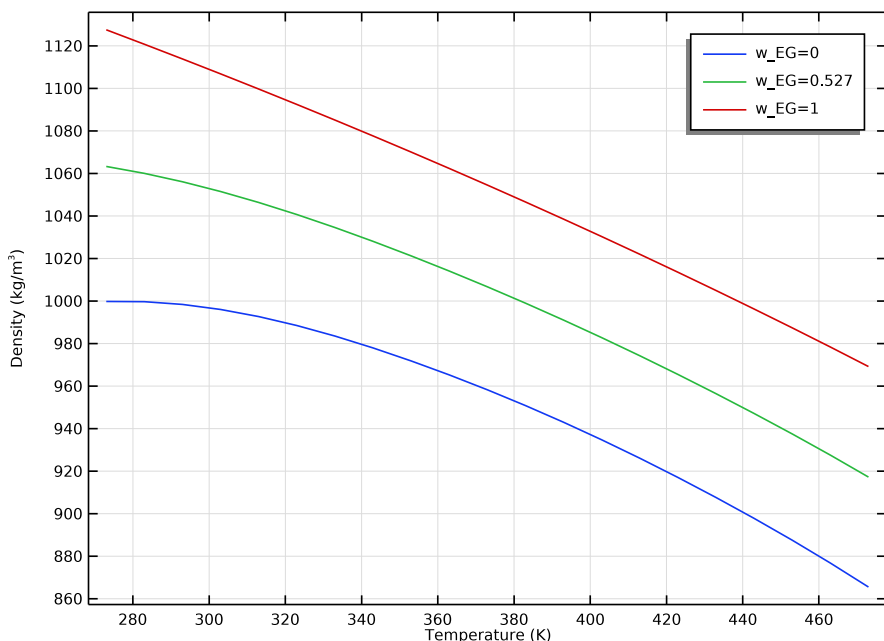
注：名为 **Densitypp1** 的函数位于“模型开发器”窗口的“全局定义 > 热力学”节点下。单击标签为“密度 1”的混合物密度函数，便可以在“设置”窗口中找到“函数名称”。该函数是由“热力学系统”创建的，可用于任何物理场接口。



现在，返回绘图组以改进绘图设置。





- 1 在“模型开发器”窗口中单击 “密度”。
- 2 在“设置”窗口中，定位到“绘图设置”栏。
- 3 选中“x 轴标签”复选框并键入**温度 (K)**。
- 4 选中“y 轴标签”复选框并键入**密度 (kg/m³)**。
- 5 单击 “绘制”。

生成的绘图显示三种组分的冷却液密度。



执行相同的步骤以完成黏度、导热系数和热容的绘图。

黏度



- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加绘图组”并选择  “一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入黏度。
- 3 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 4 在“黏度”工具栏中单击  “全局”。此时会在绘图组中添加“全局”绘图。
- 5 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。单击右上角的“替换表达式” ，然后在打开的窗口中搜索 **Viscositypp1**，或在“模型 > 全局定义 > 函数”下选择 **Viscositypp1(...)- 黏度 1**。双击该表达式将其添加到表格中。

6 在表中为函数输入以下变元：

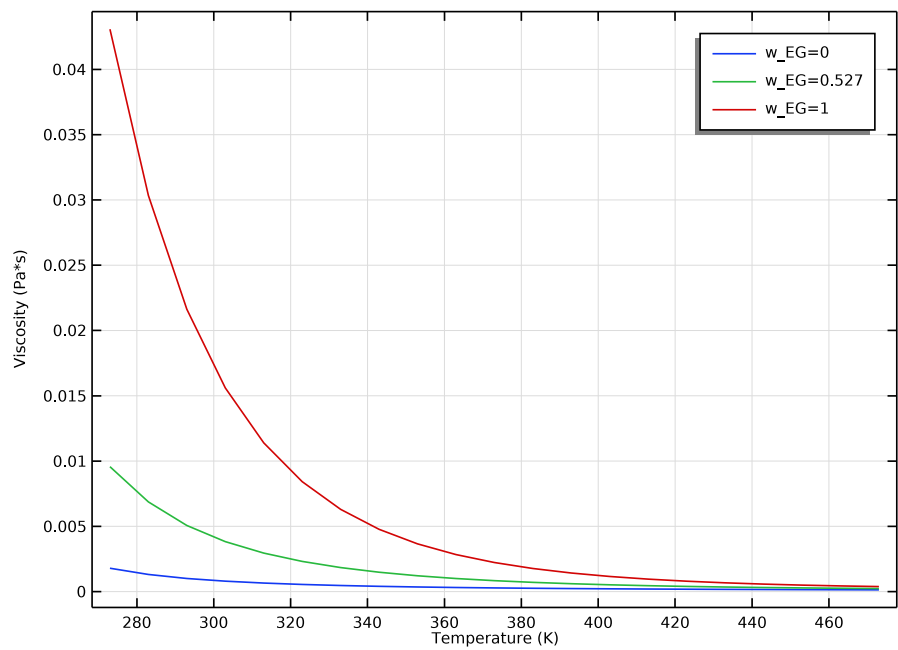
| 表达式 | 单位 | 描述 |
|--------------------------------|----|----|
| Viscositypp1(Tc,pRef,w_EG,w_W) | | |

7 定位到“图例”栏，并找到“包含”子栏。清除“描述”复选框。





现在，返回绘图组以微调绘图设置。

- 1 在“模型开发器”窗口中单击  “黏度”。
- 2 在“设置”窗口中，定位到“绘图设置”栏。
- 3 选中“x 轴标签”复选框并键入温度 (K)。
- 4 选中“y 轴标签”复选框并键入黏度 (Pa*s)。
- 5 单击  “绘制”。

生成的绘图显示三种组分的冷却液黏度。





导热系数

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加绘图组”并选择  “一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**导热系数**。
- 3 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 4 在“导热系数”工具栏中单击  “全局”。
- 5 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。单击右上角的“替换表达式” ，然后在打开的窗口中搜索 ThermalConductivitypp1，或在“模型 > 全局定义 > 函数”下选择 ThermalConductivitypp1(...) - **导热系数 1**。双击该表达式将其添加到表格中。
- 6 在表中为函数输入以下变元：

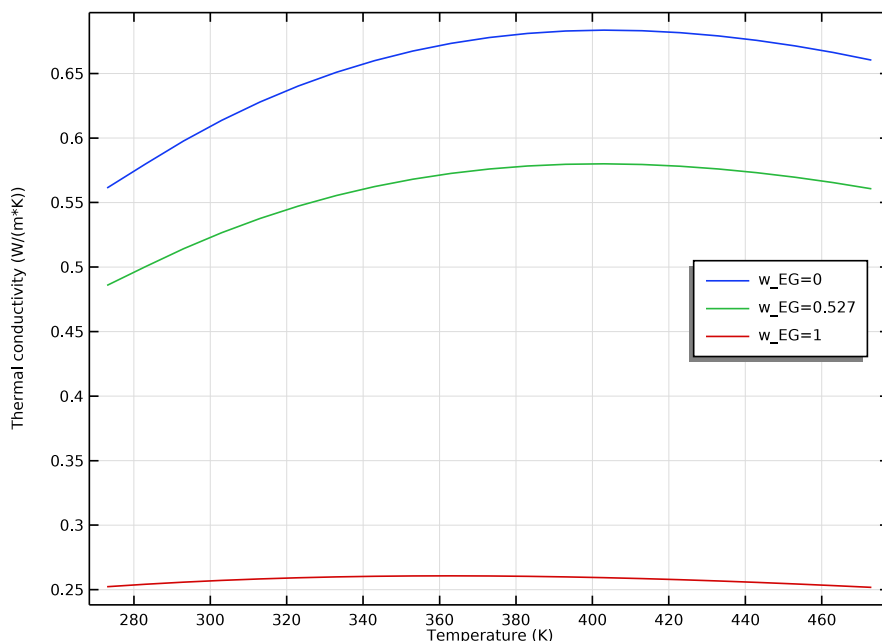
| 表达式 | 单位 | 描述 |
|--|----|----|
| ThermalConductivitypp1(Tc,pRef,w_EG,w_W) | | |

- 7 定位到“图例”栏，并找到“包含”子栏。清除“描述”复选框。

现在，返回绘图组以完善绘图设置。

- 1 在“模型开发器”窗口中单击  “导热系数”。
- 2 在“设置”窗口中，定位到“绘图设置”栏。
- 3 选中“x 轴标签”复选框并键入**温度 (K)**。
- 4 选中“y 轴标签”复选框并键入**导热系数 (W/(m*K))**。
- 5 定位到“图例”栏。从“位置”列表中选择“中间偏右”。
- 6 单击  “绘制”。

生成的绘图显示三种组分的冷却液导热系数。




热容

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击 “添加绘图组”并选择 “一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**热容**。
- 3 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 4 在“热容”工具栏中单击 “全局”。
- 5 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。单击右上角的“替换表达式” ，然后在打开的窗口中搜索 **HeatCapacity**，或在“模型 > 全局定义 > 函数”下选择 **HeatCapacityCppp1(...)** - 热容 1。双击该表达式将其添加到表格中。
- 6 在表中为函数输入以下变元：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-------------------------------------|----|----|
| HeatCapacityCppp1(Tc,pRef,w_EG,w_W) | | |

7 定位到“图例”栏，并找到“包含”子栏。清除“描述”复选框。

现在，返回绘图组以改进绘图设置。

1 在“模型开发器”窗口中单击  “热容”。

2 在“设置”窗口中，定位到“绘图设置”栏。

3 选中“x 轴标签”复选框并键入温度 (K)。

4 选中“y 轴标签”复选框并键入热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)。





5 定位到“图例”栏。从“位置”列表中选择“左上角”。

6 单击  “绘制”。


生成的绘图如图 3 所示。


平衡计算

现在，我们使用热力学系统来定义一个平衡函数，用于将冷却液混合物的相包络线可视化。

1 在“模型开发器”窗口的“ 全局定义 >  热力学”节点下，右键单击  “汽 - 液系统 1 (pp1)” 并选择  “平衡计算”。

2 转到“选择物质”窗口。

3 单击  “全部添加”。

4 在窗口工具栏中单击  “下一步”。


5 转到“平衡明细”窗口。

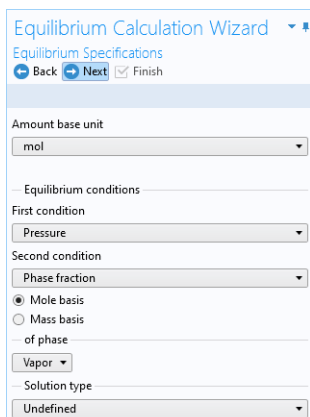
6 从“计量单位”列表中选择 mol。

指定平衡条件。使用两种平衡条件可以创建不同的平衡图，例如 T-x、h-x、P-x、x-y 等。可用的条件包括：温度、压力、相分数、焓、熵、能量、密度和体积。

7 定位到“平衡条件”子栏。从“第一个条件”列表中选择“压力”。

8 从“第二个条件”列表中选择“相分数”。

9 在窗口工具栏中单击  “下一步”。




The image shows the 'Equilibrium Calculation Wizard' dialog box. It has a title bar 'Equilibrium Calculation Wizard' with a dropdown arrow. Below the title bar is 'Equilibrium Specifications' with 'Back' and 'Next' buttons, and a 'Finish' checkbox. The 'Amount base unit' is set to 'mol'. Under 'Equilibrium conditions', 'First condition' is 'Pressure' and 'Second condition' is 'Phase fraction'. For 'Phase fraction', 'Mole basis' is selected, 'Mass basis' is unselected, and 'of phase' is 'Vapor'. 'Solution type' is 'Undefined'.

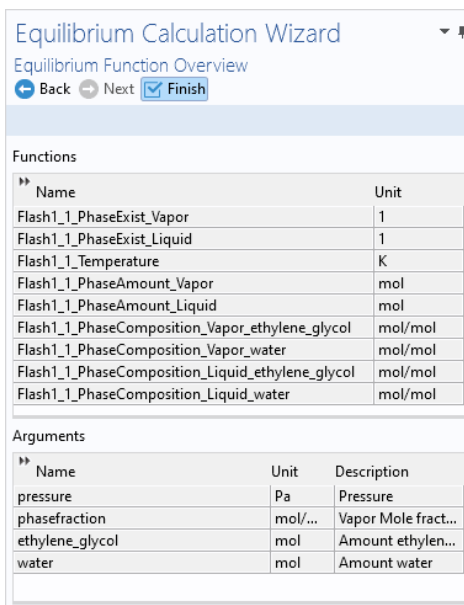
10 转到“平衡函数概述”窗口。

此时会显示要创建的函数及其变元。请特别注意

Flash1_1_Temperature，该平衡函数将用于绘制相包络线。

11 在窗口工具栏中单击  “完成”。此时会在“模型开发器”窗口中创建“平衡计算”节点。

您现在可以创建  “解析函数”来绘制相包络线。



The screenshot shows the 'Equilibrium Calculation Wizard' window, specifically the 'Equilibrium Function Overview' tab. It features navigation buttons: 'Back' (disabled), 'Next' (disabled), and 'Finish' (active). Below the navigation, there are two sections: 'Functions' and 'Arguments'.

Functions



| Name | Unit |
|--|---------|
| Flash1_1_PhaseExist_Vapor | 1 |
| Flash1_1_PhaseExist_Liquid | 1 |
| Flash1_1_Temperature | K |
| Flash1_1_PhaseAmount_Vapor | mol |
| Flash1_1_PhaseAmount_Liquid | mol |
| Flash1_1_PhaseComposition_Vapor_ethylene_glycol | mol/mol |
| Flash1_1_PhaseComposition_Vapor_water | mol/mol |
| Flash1_1_PhaseComposition_Liquid_ethylene_glycol | mol/mol |
| Flash1_1_PhaseComposition_Liquid_water | mol/mol |

Arguments

| Name | Unit | Description |
|-----------------|---------|---------------------|
| pressure | Pa | Pressure |
| phasefraction | mol/... | Vapor Mole fract... |
| ethylene_glycol | mol | Amount ethylen... |
| water | mol | Amount water |

解析函数

基于刚才定义的平衡函数创建解析函数。在编写解析函数时，表达式中不需要实际的变元名称，因此非常方便。我们可以使用解析函数将组分变元从摩尔改为摩尔分数。

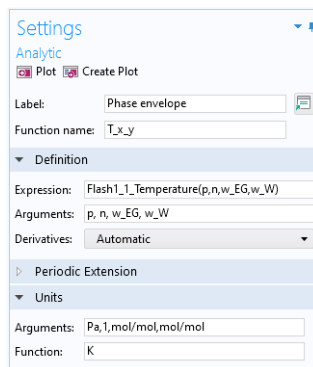
1 在“主屏幕”工具栏中单击  “函数”，然后在“全局”栏中选择  “解析”。

2 在“解析”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入相包络线。

3 在“函数名称”文本框中键入 **T_{x_y}**。

4 定位到“定义”栏。

- 在“表达式”文本框中键入 **Flash1_1_Temperature(p,n,w_EG,w_W)**。
- 在“变元”文本框中键入 **p, n, w_EG, w_W**。



The screenshot shows the 'Settings' window for an 'Analytic' function. It includes options for 'Plot' and 'Create Plot'. The 'Label' is set to 'Phase envelope'. The 'Function name' is 'T_x_y'. Under the 'Definition' section, the 'Expression' is 'Flash1_1_Temperature(p,n,w_EG,w_W)', the 'Arguments' are 'p, n, w_EG, w_W', and the 'Derivatives' are set to 'Automatic'. The 'Periodic Extension' section is collapsed. Under the 'Units' section, the 'Arguments' are 'Pa,1,mol/mol,mol/mol' and the 'Function' is 'K'.

请记住使用与“平衡计算”节点中定义的变元相同的顺序。





5 定位到“单位”栏。

- 在“变元”文本框中键入 $\text{Pa}, 1, \text{mol/mol}, \text{mol/mol}$ 。
- 在“函数”文本框中键入 K 。

注：您可以在“模型开发器”窗口的“全局定义 > 热力学 > 汽 - 液系统 1 (pp1) > 混合物”节点下找到“表达式” $\text{Flash1_1_Temperature}$ 以及要使用的变元。在“混合物”节点下，单击“平衡计算”。在“设置”窗口中，定位到“定义”栏中的“函数”和“变元”子栏。


添加研究

使用定义的解析函数添加“研究”，以计算混合物的相包络线。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以打开该窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口。
- 3 找到“研究”子栏，并在“选择研究”树的“一般研究”下选择  “稳态”。
- 4 单击  “添加研究”。此时会在“模型开发器”窗口中添加一个“研究”节点。
- 5 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以关闭该窗口。

研究 2：相包络线参数化

添加设置以执行“辅助扫描”研究，我们将改变乙二醇的质量分数、相分数和冷却液压力。

- 1 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。
- 2 选中“辅助扫描”复选框。
- 3 单击  “添加”三次。此时会在表格中添加三行。

4 在表中输入以下设置（使用关联的下拉列表）：

| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|--------------------|-----------------|------|
| w_EG (质量分数, 乙二醇) | range(0,0.01,1) | |
| n (相分数) | 0 1 | |
| pRef (冷却液压力) | 1[atm] 2[atm] | Pa |


5 从“扫描类型”列表中，选择“所有组合”。

现在已经设置好参数化求解器来计算这个二元混合物（仅蒸汽和液体）的整个组分范围的函数值以及两个压力水平。

6 定位到“物理场和变量选择”栏。在“物理场接口”表中，清除“湍流，k-ε (spf)”和“流体传热 (ht)”的“求解”复选框。


7 在“多物理场耦合”表中，清除“非等温流动 1 (nitf1)”的“求解”复选框。

返回“研究”节点。

1 在“模型开发器”窗口中，单击  “研究 2”。

2 在“研究”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**研究 2: 相包络线参数化**。

3 定位到“研究设置”栏。清除“生成默认绘图”复选框。



4 在“主屏幕”工具栏中单击  “计算”。

现在已经对指定的参数计算了平衡值的函数。您可以绘制在两个压力下，相包络线随乙二醇的摩尔分数的变化图。

结果

绘制在采用的两个压力下，相包络线随乙二醇的摩尔分数的变化图。

相包络线

1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加绘图组”并选择  “一维绘图组”。


2 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。

3 从“数据集”列表中，选择“研究 2: 相包络线参数化 / 解 2 (sol2)”。


4 定位到“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。

- 5 定位到“绘图设置”栏。选中“x 轴标签”复选框。
- 6 在关联文本框中键入**乙二醇的摩尔分数**。
- 7 选中“y 轴标签”复选框。
- 8 在关联文本框中键入**温度 (K)**。


全局 1

- 1 在“一维绘图组 5”工具栏中，单击  “全局”。
- 2 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。
- 3 在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|---------------------------|----|----|
| T_x_y(pRef, n, w_EG, w_W) | | |

- 4 定位到“x 轴数据”栏。从“轴源数据”列表中，选择 w_EG。
- 5 在“一维绘图组 5”工具栏中，单击  “绘制”。此时会生成图 4。从图中可以看出，当压力增加时，相包络线会向更高的温度移动。

您可以执行以下步骤来放置图例并重命名绘图组。



- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“一维绘图组 5”。
- 2 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“图例”栏。
- 3 从“位置”列表中选择“左上角”。
- 4 右键单击  “一维绘图组 5”并选择“重命名”。
- 5 在“重命名‘一维绘图组’”对话框的“新标签”文本框中，键入**相包络线**。
- 6 单击“确定”。

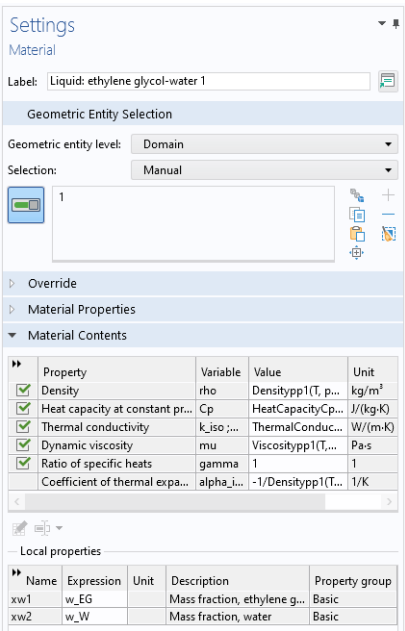
流体域的材料

将材料应用到流体域，此外，使用定义的参数来指定混合物组分，这样就可以轻松改变组分。

LIQUID: ETHYLENE

GLYCOL-WATER 1 (PP1MAT1)



- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“组件 1 (comp1)”>  “材料”节点，然后单击创建的材料  Liquid: ethylene glycol-water 1 (pp1mat1)。
- 2 仅选择“域”1。您可以通过单击“几何实体选择”栏中的 1 来完成此操作。
- 3 定位到“材料属性明细”栏。
- 4 找到“局部属性”子栏。在表中输入以下设置：



| 名称 | 表达式 | 单位 | 描述 | 属性组 |
|-----|------|----|-----------------------|-----|
| xw1 | w_EG | | 质量分数， ethylene glycol | 基本 |
| xw2 | w_W | | 质量分数， water | 基本 |



接下来，施加湍流和传热边界条件。

湍流， $k-\epsilon$ (spf)



- 1 在“模型开发器”窗口的  “组件 1 (comp1)”节点下，单击  “湍流， $k-\epsilon$ (spf)”。
- 2 仅选择“域”1。您可以通过单击“几何实体选择”栏中的 1 来完成此操作。此时，软件只求解“域”1 的流体流动。

现在，为流体流动添加入口和出口条件。



入口 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择  “入口”。
- 2 选择“边界” 2，即最底部的边界。
- 3 在“入口”的“设置”窗口中，定位到“速度”栏。
- 4 在 U_0 文本框中键入 **Vel**（入口速度参数）。



出口 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择  “出口”。
- 2 选择“边界” 11，即流体流动域顶部的边界。


流体传热 (ht)

- 1 在“模型开发器”窗口的  “组件 1 (comp1)” 节点下，单击  “流体传热 (ht)”。



流入 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择  “流入”。
- 2 仅选择“边界” 2，即最底部的边界。
- 3 在“流入”的“设置”窗口中，定位到“上游属性”栏。
- 4 在 T_{ustr} 文本框中键入 **Tc**。
- 5 选中“指定上游绝对压力”复选框。
- 6 在 p_{ustr} 文本框中键入 **pRef**。

流出 1


- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“流出”。
- 2 仅选择“边界” 11，即流体流动域顶部的边界。

热通量 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择  “热通量”。
- 2 选择“边界” 18，即：与流体流动域相邻的最右侧边界。



- 3 在“热通量”的“设置”窗口中，定位到“热通量”栏。
- 4 单击“热耗率”按钮。
- 5 在 P_0 文本框中键入 P_0 。

固体 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “域”并选择“固体”。
- 2 仅选择“域” 2。

添加材料

从“材料”中为钢制零件添加材料属性，您可以使用内置材料来执行此操作。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加材料”以打开该窗口。
- 2 转到“添加材料”窗口。
- 3 从树中选择“内置材料 > Structural steel”。
- 4 在窗口工具栏中单击“添加到组件”。
- 5 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加材料”以关闭该窗口。
- 6 在“设置”窗口中，仅选择“域” 2。为此，您可以在“图形”窗口中单击“固体部分 2”，然后在“几何实体选择”栏中确认“选择”。

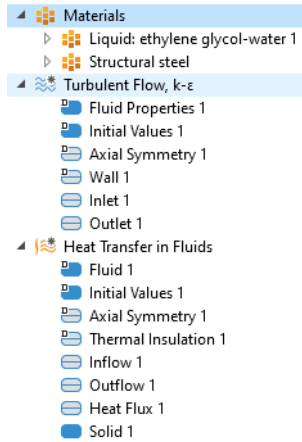
检查材料

比较好的做法是检查材料是否缺少任何信息。在本例中，没有为混合物定义比热率，由于它是液体，我们可以假设比热率为 1。

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击 Liquid: ethylene glycol-water 1 (pp1mat1)。
- 2 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏。
- 3 在表中输入以下设置：

| 属性 | 变量 | 值 | 单位 | 属性组 |
|-----|-------|---|----|-----|
| 比热率 | gamma | 1 | 1 | 基本 |



在“模型开发器”窗口中，“材料”、“湍流，k-ε”和“流体传热”节点现在应包含下图所示的子节点：



添加研究

现在，我们添加“稳态”研究，使用纯水作为冷却液来求解测试装置中的流体流动和传热问题。

需要使用两个稳态研究步骤。第一步仅求解流体流动，它是第二步的初始条件，后者求解流体流动和传热问题。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以打开该窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口。
- 3 找到“研究”子栏。在“选择研究”树中，选择“一般研究 >  稳态”。
- 4 找到“研究中的物理场接口”子栏。在表格中，清除“流体传热 (ht)”的“求解”复选框。
- 5 在窗口工具栏中单击“添加研究”。

研究 3：水



- 1 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。

- 2 选中 “辅助扫描” 复选框。
- 3 单击 + “添加”。
- 4 在表中输入以下设置：

| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|--------------------|-------|------|
| w_EG (质量分数, 乙二醇) | 0 | |







- 5 在 “主屏幕” 工具栏中，单击  “添加研究” 以关闭该窗口。
- 6 在 “研究” “设置” 窗口的 “标签” 文本框中，键入研究 3：水。

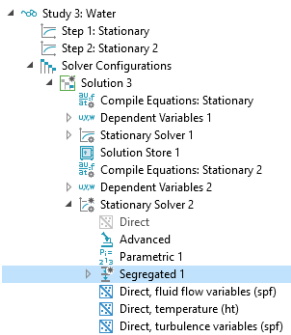
稳态 2

- 1 在 “研究” 工具栏中，单击  “研究步骤” 并选择 “稳态 >  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 “辅助扫描” 复选框。
- 4 单击 + “添加”。
- 5 在表中输入以下设置：

| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|--------------------|-------|------|
| w_EG (质量分数, 乙二醇) | 0 | |

解 3 (SOL3)


- 1 在 “研究” 工具栏中，单击  “显示默认求解器”。
- 研究步骤 2 使用流场的解（步骤 1 中）作为初始条件。在本例中，可以启用 Anderson 加速度来缩短仿真时间。
- 2 在 “模型开发器” 窗口中，展开  研究 3：水 >  求解器配置 >  解 3 (sol3) >  稳态求解器 2” 节点，然后单击  “分离 1”。
 - 3 在 “分离 1” 的 “设置” 窗口中，定位到 “常规” 栏。
 - 4 从 “稳定和加速” 列表中，选择 “Anderson 加速度”。
 - 5 在 “研究” 工具栏中单击 = “计算”。



求解器完成后，“三维速度 (spf)” 绘图组（使用旋转数据集）会显示装置中的流场。



结果

首先删除一些多余的绘图组。





- 1 在“模型开发器”窗口的  “结果”节点下，按住 Ctrl 并单击以选择
 - 速度 (spf)
 - 压力 (spf)
 - 三维温度 (ht)
 - 等温线 (ht)
- 2 右键单击并选择“删除”。
- 3 单击“是”。

接下来，创建温度的二维绘图组。

二维绘图组 10

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加绘图组”并选择  “二维绘图组”。
- 2 在“二维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 3: 水 / 解 3 (sol3)”。

表面 1

- 1 在“二维绘图组 10”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 T。
- 4 在“二维绘图组 10”工具栏中，单击  “绘制”。
- 5 单击以展开“范围”栏。选中“手动控制颜色范围”复选框。
- 6 在“最大值”文本框中键入 400。
- 7 在“二维绘图组 10”工具栏中，单击  “绘制”。
- 8 在“图形”工具栏中，单击  “缩放到窗口大小”按钮。

温度







- 1 在“模型开发器”窗口的  “结果”节点下，单击  “二维绘图组 10”。
- 2 在“二维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**温度**。
- 3 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中，选择“手动”。
- 4 在“标题”文本区中键入**温度 (K)**。
- 5 定位到“绘图设置”栏。选中“x 轴标签”复选框。
- 6 在关联文本框中键入 r (m)。
- 7 选中“y 轴标签”复选框。
- 8 在关联文本框中键入**温度 (K)**。

图 6a 的设置就完成了。

添加研究


添加一个新“研究”，用于求解在测试装置中使用等体积的乙二醇和水组成的冷却液混合物时的流体流动和传热问题。其中使用两个研究步骤：一个采用与纯水情况相同的入口速度，另一个是乙烯 / 水混合物的流率增加 15%。


- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以打开该窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口并找到“研究”子栏。在“研究”树中，选择“ 一般研究 >  稳态”。
- 3 在窗口工具栏中单击“添加研究”。如果要关闭“添加研究”窗口，可以转到“主屏幕”工具栏，并单击  “添加研究”。

研究 4：乙二醇和水

为添加的研究输入设置。如前所述，我们将使用两个稳态研究步骤，其输出结果将生成图 6 的 b 和 c。

步骤 1：稳态

- 1 在“ 步骤 1：稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。

- 选中“辅助扫描”复选框。
- 单击  “添加”两次以在表格中添加两行。
- 在表中输入以下设置：

| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|------------------|-------|------|
| w_EG (质量分数, 乙二醇) | 0.527 | |
| Vel (管道入口速度) | 1 | m/s |

下面通过复制第一个步骤来添加第二个步骤。


步骤 2：稳态

- 右键单击“研究 4> 步骤 1：稳态”，并选择“复制粘贴”。
- 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。
- 在表中输入以下设置：






| 参数名称 | 参数值列表 | 参数单位 |
|--------------|-------|------|
| Vel (管道入口速度) | 1.15 | m/s |

现在，为这两个步骤输入所需的设置。

步骤 1：稳态













- 在“模型开发器”窗口中，单击  “步骤 1：稳态”。
- 在“稳态”的“设置”窗口中，单击以展开“因变量值”栏。
- 找到“待求解变量的初始值”子栏。从“设置”列表中选择“用户控制”。
- 从“方法”列表中选择“解”。
- 从“研究”列表中选择“研究 3：水，稳态 2”。

步骤 2：稳态

- 在“研究”工具栏中，单击  “显示默认求解器”。
- 对于使用乙二醇的情况，也应用“Anderson 加速度”。请注意，这里使用上一个解（用水作为冷却液）作为初始条件。
- 在“模型开发器”窗口中，展开“研究 4 >  求解器配置 >  解 5(sol5)>  稳态求解器 1”节点，然后单击  “分离 1”。

- 3 在“分离”的“设置”窗口中，定位到“常规”栏。
- 4 从“稳定和加速”列表中，选择“Anderson 加速度”。
- 5 在“模型开发器”窗口中，折叠“研究 4 > 求解器配置 > 解 5 (sol5) > 稳态求解器 1”节点。




现在，为步骤 2 的求解器添加相同的设置。


- 6 在“模型开发器”窗口中，展开“ 研究 4 >  求解器配置 >  解 5 (sol5) >  稳态求解器 2”节点，然后单击  “分离 1”。
- 7 在“分离”的“设置”窗口中，定位到“常规”栏。
- 8 从“稳定和加速”列表中，选择“Anderson 加速度”。
- 9 在“模型开发器”窗口中，单击  “研究 4”。
- 10 在“研究”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入研究 4：乙二醇和水。
- 11 定位到“研究设置”栏。清除“生成默认绘图”复选框。
- 12 在“研究”工具栏中单击  “计算”。
- 13 在“模型开发器”窗口的“ 研究 4: 乙二醇和水 >  求解器配置 >  解 5 (sol5)”节点下，单击  “解存储 2 (sol6)”。
- 14 在“解存储”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入 $Vel = 1.0 \text{ m/s}$ 。
- 15 在“模型开发器”窗口中，单击  “解 5 (sol5)”。
- 16 在“解”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入 $Vel = 1.15 \text{ m/s}$ 。

结果

现在，我们来看看刚才添加的两个研究步骤的结果。绘制乙二醇 / 水混合物的温度图以重现图 6。


温度图

- 1 在“模型开发器”窗口的  “结果”节点下，单击  “温度”。
- 2 在“二维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 / $Vel = 1.0 \text{ m/s}$ (sol6)”。
- 4 在“温度”工具栏中单击  “绘制”，即可生成图 6b。请注意，装置中的温度通常比使用纯水时更高，主要是因为乙二醇 / 水混合物的热容较低。

- 5 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.15 m/s (sol5)”。
- 6 在“温度”工具栏中单击  “绘制”，此时会生成图 6c。现在请注意，增加的流率会使温度降低至使用水时的水平。

接下来，我们计算装置中产生的混合物属性。创建三个截线数据集，以计算整个装置腔部分的热容。

二维截线 1

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “二维截线”。
- 2 在“二维截线”的“设置”窗口中，定位到“线数据”栏。
- 3 在“点 1”行中，将 r 设为 $r_c * 0.5$ 。
- 4 在“点 2”行中，将 r 设为 $r_c * 0.5$ 。
- 5 在“点 2”行中，将 z 设为 1。
- 6 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“研究 3: 水 / 解 3 (sol3)”。

我们再为这两个解各创建一个数据集。

二维截线 2

- 1 右键单击“二维截线 1”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“二维截线”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.0 m/s (sol6)”。

二维截线 3


- 1 右键单击“二维截线 2”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“二维截线”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.15 m/s (sol5)”。


现在，我们使用这三个数据集来创建图 7。

热容，腔截线图


在“结果”工具栏中，单击  “一维绘图组”。

线图 1

- 1 在“一维绘图组 11”工具栏中，单击  “线图”。

- 2 在“线图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“二维截线 1”。
- 3 定位到“y 轴数据”栏。在“表达式”文本框中键入 `ht.Cp`。
- 4 在“一维绘图组 11”工具栏中，单击  “绘制”。
- 5 单击以展开“图例”栏。选中“显示图例”复选框。
- 6 从“图例”列表中选择“手动”。
- 7 在表中输入以下设置：


| 图例 |
|----|
| 水 |

- 8 在“一维绘图组 11”工具栏中，单击  “绘制”。

线图 2

- 1 右键单击“线图 1”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“二维截线 2”。
- 3 定位到“图例”栏。在表中输入以下设置：

| 图例 |
|---------|
| 乙二醇 / 水 |

- 4 在“一维绘图组 11”工具栏中，单击  “绘制”。


线图 3

- 1 右键单击“线图 2”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“二维截线 3”。
- 3 定位到“图例”栏。在表中输入以下设置：

| 图例 |
|-----------------------------------|
| 乙二醇 / 水， $Vel = 1.15 \text{ m/s}$ |

- 4 在“一维绘图组 11”工具栏中，单击  “绘制”，以针对求解的三种情况沿垂直截线将热容可视化（见图 7）。



重命名该绘图组并改进绘图设置。

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击  “一维绘图组 11”。
- 2 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“图例”栏。
- 3 从“位置”列表中选择“中间偏右”。
- 4 定位到“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 5 右键单击“一维绘图组 11”并选择“重命名”。
- 6 在“重命名‘一维绘图组’”对话框的“新标签”文本框中，键入**热容，腔截线**。
- 7 单击确定。


计算




计算平均混合物属性值，它们将用于计算测试装置中的流动和传热问题，如图 8 所示。

表面平均值 1



- 1 在“结果”工具栏中，单击  “更多派生值”并选择“平均值 >  表面平均值”。
- 2 在“表面平均值”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.0 m/s (sol6)”。
- 4 仅选择“域”1。为此，您可以在“图形”窗口中按“域 1”，然后在“表面平均值”“设置”窗口的“选择”栏中确认该选择。
- 5 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|--------|----------|------------|
| ht.rho | kg/m^3 | 密度 |
| ht.Cp | J/(kg*K) | 恒压热容 |
| ht.krr | W/(m*K) | 导热系数 rr 分量 |
| spf.mu | Pa*s | 动力黏度 |

- 6 在“设置”窗口的工具栏中单击  “计算”。

计算得到的平均值列于“模型开发器”的“ 中。现在，将平均属性值作为参数存储。 节点下添加的“表格 1” 结果”下的“表格”

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 在表中输入以下设置：

| 名称 | 表达式 | 值 | 描述 |
|------|---------------|---------------|---------|
| rhoC | 1010[kg/m^3] | 1010 kg/m³ | 平均恒定密度 |
| CpC | 3486[J/kg·K] | 3486 J/(kg·K) | 平均恒定热容 |
| kC | 0.574[W/m·K] | 0.574 W/(m·K) | 平均恒定电导率 |
| muC | 9.07e-4[Pa·s] | 9.07E-4 Pa·s | 平均恒定黏度 |

最后，我们使用混合物属性的平均值来计算测试装置中的流动和传热问题。首先应用混合物参数。

流体传热 (ht)

最后，使用混合物属性的平均值来计算测试装置中的流动和传热。

- 1 在“模型开发器”窗口的“ 组件 1 (comp1) >  流体传热 (ht)”节点下，单击  “流体 1”。
- 2 在“流体”的“设置”窗口中，定位到“热传导，流体”栏。
- 3 从 k 列表中选择“用户定义”。在关联文本框中键入 kC 。
- 4 定位到“热力学，流体”栏。从“流体类型”列表中选择“气体 / 液体”。
- 5 从 ρ 列表中选择“用户定义”。在关联文本框中键入 ρC 。
- 6 从 C_p 列表中选择“用户定义”。在关联文本框中键入 CpC 。

Heat Conduction, Fluid

Thermal conductivity:

k

User defined

kC

W/(m·K)

Isotropic

Thermodynamics, Fluid

Fluid type:

Gas/Liquid

Density:

ρ

User defined

rhoC

kg/m³

Heat capacity at constant pressure:

C_p




User defined

CpC





J/(kg·K)

湍流， $k-\varepsilon$ (spf)

流体属性 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“ 组件 1 (comp1) >  湍流， $k-\varepsilon$ (spf)”节点下，单击  “流体属性 1”。
- 2 在“流体属性”的“设置”窗口中，定位到“流体属性”栏。
- 3 从 μ 列表中选择“用户定义”。在关联文本框中键入 **muC**。

添加研究


- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以打开该窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口。
- 3 找到“研究”子栏。在“研究”树中，选择“ 一般研究 >  稳态”。
- 4 在窗口工具栏中单击“添加研究”。
- 5 在“主屏幕”工具栏中，单击  “添加研究”以关闭该窗口。

研究 5：乙二醇和水，恒定属性

我们在本教程示例中添加最终“研究”的设置，使用“研究 3”的解作为初始值。

步骤 1：稳态




- 1 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“因变量值”栏。
- 2 找到“待求解变量的初始值”子栏。从“设置”列表中选择“用户控制”。
- 3 从“方法”列表中选择“解”。
- 4 从“研究”列表中选择“研究 3：水，稳态 2”。
- 5 在“模型开发器”窗口中，单击“研究 5”。
- 6 在“研究”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**研究 5：乙二醇和水，恒定属性**。
- 7 定位到“研究设置”栏。清除“生成默认绘图”复选框。

8 在“主屏幕”工具栏中单击  “计算”。

结果

我们使用混合物属性的平均值来绘制这种情况下的温度图。

温度


- 1 在“模型开发器”窗口中，单击 “ 结果 >  温度”。
- 2 在“二维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 5: 乙二醇和水，恒定属性 / 解 7(sol7)”。
- 4 在“温度”工具栏中单击  “绘制”。

现在，您可以为执行的四个仿真计算出口温度、平均压降和平均出口密度：








- 水
- 乙二醇和水，Vel = 1.0 m/s
- 乙二醇和水，Vel = 1.15 m/s
- 乙二醇和水，恒定属性

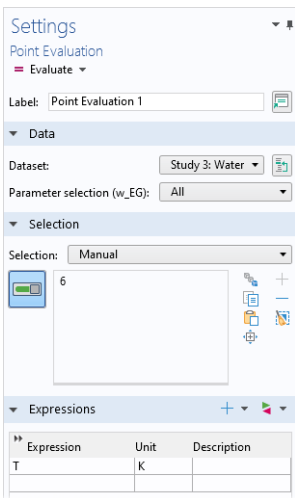
首先，添加“点计算”节点以研究出口温度。


点计算：出口温度

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “点计算”。
- 2 选择“点 6”，即对称线上、固体域中的最高点。为此，您可以在“图形”窗口中单击，然后在“点计算”“设置”窗口的“选择”栏中确认该选择。
- 3 定位到“表达式”栏，并在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----|----|----|
| T | K | |



- 4 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“研究 3：水 / 解 3 (sol3)”。
- 5 在“设置”窗口顶部单击  “计算”。
- 6 从“数据集”列表中，选择“研究 4：乙二醇和水 /Vel = 1.0 m/s (sol6)”。
- 7 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“新表格”将该计算添加到新表中。
- 8 从“数据集”列表中，选择“研究 4：乙二醇和水 /Vel = 1.15 m/s (sol5)”。
- 9 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“新表格”。
- 10 从“数据集”列表中，选择“研究 5：乙二醇和水，恒定属性 / 解 7 (sol7)”。
- 11 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“新表格”。




通过这种方式，可以在“表格” 节点下添加四个表格（2-5，包含出口温度），每个表格对应于执行的一个冷却液仿真。

接下来，我们添加“线平均值”节点来计算入口的平均压力。由于出口处施加的参考压力为零，因此入口压力表示系统上的压降。










线平均值：压降

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “更多派生值”并选择“平均值 >  线平均值”。
- 2 选择几何底部的“边界 2”（对应于入口）。
- 3 在“线平均值”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。
- 4 在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----|----|----|
| p | Pa | |




- 5 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“研究 3：水 / 解 3 (sol3)”。
- 6 单击  “计算”（表格 2 - 点计算 1）。

以同样的方式，执行相同的步骤来推导其余流动解的压降。将压降添加到包含相同情况出口温度的表格中。







- 7 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.0 m/s (sol6)”。
- 8 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“表格 3 - 点计算 1”。单击  “计算”。
- 9 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.15 m/s (sol5)”。
- 10 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“表格 4 - 点计算 1”。单击  “计算”。
- 11 从“数据集”列表中，选择“研究 5: 乙二醇和水，恒定属性 / 解 7 (sol7)”。
- 12 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“表格 5 - 点计算 1”。单击  “计算”。







最后，再添加一个“线平均值”节点以计算出口的平均密度。

线平均值：出口密度

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “更多派生值”并选择“平均值 >  线平均值”。
- 2 选择“边界” 11，即出口边界。
- 3 在“线平均值”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。
- 4 在表中输入以下设置（流体传热 (ht)  接口定义的密度）：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|--------|--------|----|
| ht.rho | kg/m^3 | |

- 5 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“研究 3: 水 / 解 3 (sol3)”。
- 6 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“表格 2 - 点计算 1”。单击  “计算”。
- 7 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.0 m/s (sol6)”。
- 8 单击  “计算”旁边的 ，然后选择“表格 3 - 点计算 1”。单击  “计算”。
- 9 从“数据集”列表中，选择“研究 4: 乙二醇和水 /Vel = 1.15 m/s (sol5)”。

- 10 单击  “计算”旁边的  ，然后选择“表格 4 - 点计算 1”。单击  “计算”。
- 11 从“数据集”列表中，选择“研究 5: 乙二醇和水，恒定属性 / 解 7 (sol7)”。
- 12 单击  “计算”旁边的  ，然后选择“表格 5 - 点计算 1”。单击  “计算”。

具有精确气液属性的热管

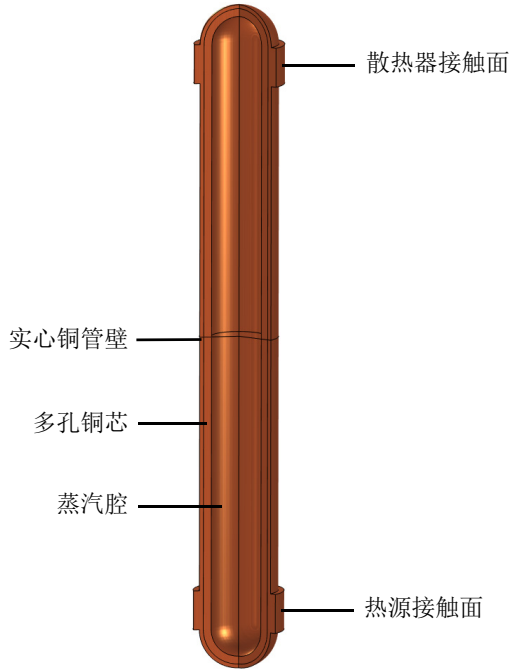
热管旨在通过工作流体的蒸发、质量传递和冷凝有效地传递热量，被广泛用于热控制具有重要意义的各种应用中，电子冷却便是一个突出的例子。

在热管内部，冷热侧之间的温差加上蒸汽压的温度依存性，会在整个蒸汽室引起压差，这种压差反过来又会驱使蒸汽从热侧流向冷侧。蒸发在热侧的蒸汽 - 芯界面处充当散热器，相反，冷凝在冷侧充当热源。该模型演示如何将热管蒸汽室中的层流与通过多孔芯的液相传递进行耦合，以及如何从“气液属性模块”的数据库中获取水的热力学属性；并将蒸汽输送的重要性与管壁中的传导传热进行比较，前者比后者高出几个数量级。

模型定义

热管的形状多种多样，管式热管可能是最常见的一种类型。本例将研究一个具有多孔铜芯和蒸汽室的轴对称铜管模型。热管底部有一个接触面，它与要去除的热源相连。我们在管的顶部使用一个类似的散热器接触面。后者通常对应于

金属翅片结构，可以很容易地通过风扇进行冷却。下图显示本例使用的几何形状（包含不同的部分）。



热管几何结构概览。

在建立模型之前，我们将研究在什么条件下我们对饱和芯的假设成立。

对于在近环境条件下运行的热管，毛细压力 Δp_c 通常是限制因子（[参考资料 2](#)）：

$$\Delta p_c = 2 \frac{\sigma}{r_c} \quad (1)$$

这里的 σ 为表面张力， r_c 为毛细管半径。在毛细极限处，此压力等于驱动蒸汽所需的压力、重力引起的静压以及驱动液体通过管芯所需的压力，可通过下式表示：

$$\Delta p_c = \Delta p_v + \Delta p_g + \Delta p_l \quad (2)$$

对于大多数应用，我们可以忽略除液体项以外的所有项，它可以通过达西定律得到：

$$\Delta p_l = \frac{\mu_l L_{\text{eff}}}{KA_w} \dot{V} \quad (3)$$

其中， μ_l 是液体的动力黏度， L_{eff} 是热管的有效长度， K 是管芯的渗透率， A_w 是管芯的横截面积， \dot{V} 是体积流率。后者受蒸发速率的控制：

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{\text{vap}} \rho} \quad (4)$$

其中， \dot{Q} 是传热速率， ρ 是液体密度， ΔH_{vap} 是汽化潜热（以每质量单位的能量为量纲）。将方程 2-4 代入方程 1，并忽略 Δp_v 和 Δp_g ，可得：

$$\dot{Q} = 2 \frac{KA_w \Delta H_{\text{vap}} \rho \sigma}{\mu_l L_{\text{eff}} r_c} \quad (5)$$

当 $K=1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ 、 $A_w=1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ 、 $\Delta H_{\text{vap}}=2.5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ 、 $\rho=1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\sigma=7 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$ 、 $\mu=1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $L=0.15 \text{ m}$ 且 $r=3.1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ 时，计算方程 5 可以得到值 7.5 kW。在该模型中，我们将采用 30 W 的适度热流量，从而远离毛细极限。相比而言，典型家用 PC 的 CPU 功率为 10-100 W。

物理场设置

我们使用层流接口求解蒸汽腔中的层流，除轴对称线以外，它还受单一边界条件的约束。我们指定压力等于腔 - 芯界面处的饱和蒸汽压。

$$p = p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}}(T) \quad (6)$$

这意味着假定水和气相在该位置处于平衡状态。蒸汽压随温度的增加而增加，这是驱动蒸汽从高温区域到低温区域的原因。对于多孔芯内的液体流动，我们使用 Brinkman 方程接口进行求解，腔 - 芯界面处芯的速度根据腔侧的蒸汽流率进行计算

$$\mathbf{u}_l = \frac{\mathbf{u}_v \rho_v}{\rho_l} \quad (7)$$

本例通过在几何中间的固体壁上施加压力点约束使压力水平保持固定；并使用多孔介质传热接口求解几何各个部分（包括管壁、管芯和蒸汽腔）的传热，该接口包含每种域类型的域特征。

材料属性

本例使用**热力学**节点创建材料属性。为蒸汽相建立了使用理想气体定律的蒸汽系统，并为管芯中的液相创建了使用 IAPWS 模型（[参考资料 3](#)）的液体系统；为液体系统创建了蒸汽压函数来描述饱和压力。为了方便在模型中应用属性，本例使用热力学系统的**生成材料**选项创建了两种材料，并使用材料库中的铜来描述管壁属性。

结果与讨论

首先，我们分析管内能量仅以传导方式进行传递时的温度。这相当于使用干燥管芯，没有液态水，并且蒸汽中的自然对流可以忽略不计。此时得到的温度如下的图 9 所示。

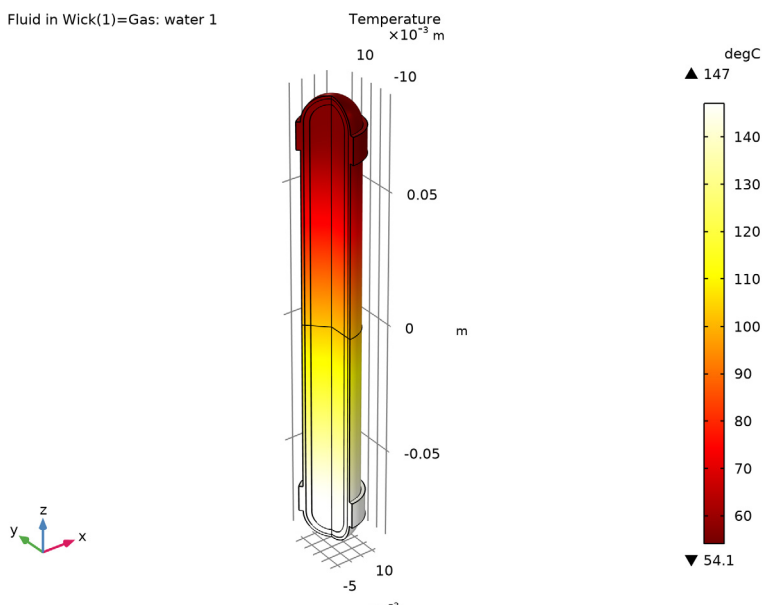


图9：带干燥管芯的热管的温度。

从图中可以看出，热源的温度比散热器的温度几乎高 100°C。在有温度敏感部件（电子、塑料等）的应用中，如此高的温度是有害的。

在第二个仿真中，我们假设管芯被液态水饱和，相当于在其设计点有热管运行。此时得到的温度分布（见图 10）看起来明显不同。

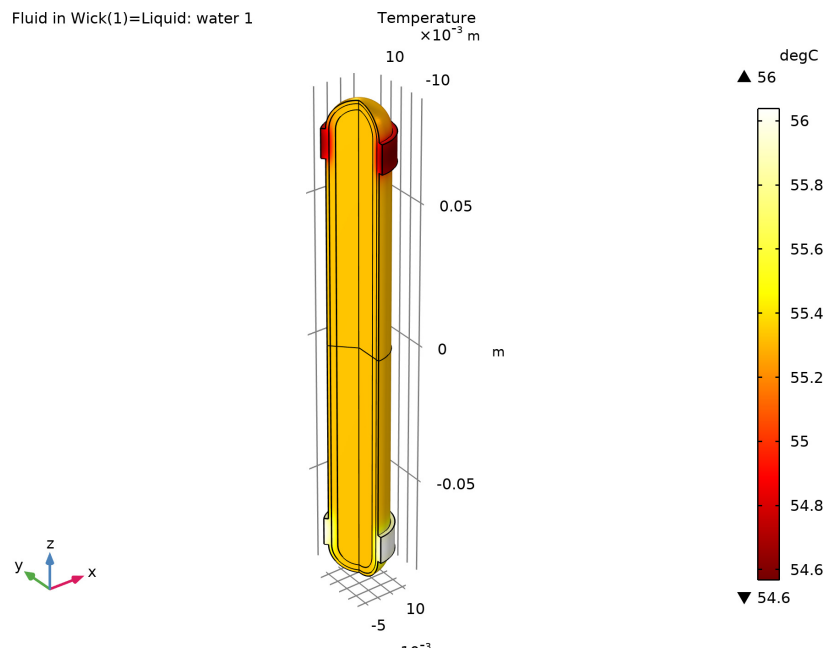


图10：带饱和和管芯的热管的温度。

现在，散热器和热源之间的预测温差小于 2°C ；并且，接触区域外的热管表面基本上是等温的。图 11 绘制了计算得到的两种流体中的速度场以及整个几何的温度，二者彼此相邻。

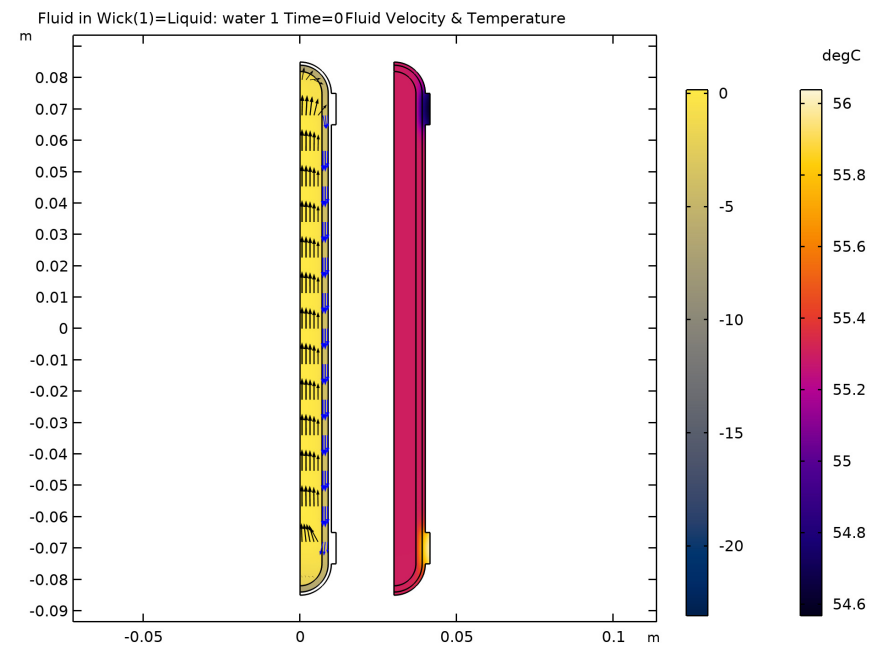


图 11：流体速度 — $\lg(|u| / \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ，以及在设计点运行的热管中的温度。

通过计算管中间的腔体、管芯和管套的线积分，可以将传热过程分解为不同的贡献。下面的表格列出了饱和热管中不同传热机制的相对重要性。

能量平衡计算组的结果

| 过程 | 热流量 / W |
|----------|-------------------|
| 管套中的传导传热 | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| 管芯中的传导传热 | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| 腔体中的潜热传热 | 30 |

由此可见，在正常工作条件下，蒸汽质量传递（及其关联的相变）是热管传热的完全主导机制。

参考资料

2. I. Shishido, I. Oishi, S. Ohtani *Capillary Limit in Heat Pipes*, J. Chem. Eng. of Japan, 17 (2) pp. 179-186, 1986
3. W. Wagner, H.J. Kretzschmar *IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. International steam tables: properties of water and steam based on the industrial formulation IAPWS-IF97*, pp. 7-150, 2008



建模操作说明：具有精确气液属性的热管

通过执行下面描述的步骤，您将能够建立一个“热管”模型，分析它在工作条件下的表现，并了解液态水在多孔芯中的重要性。


模型向导

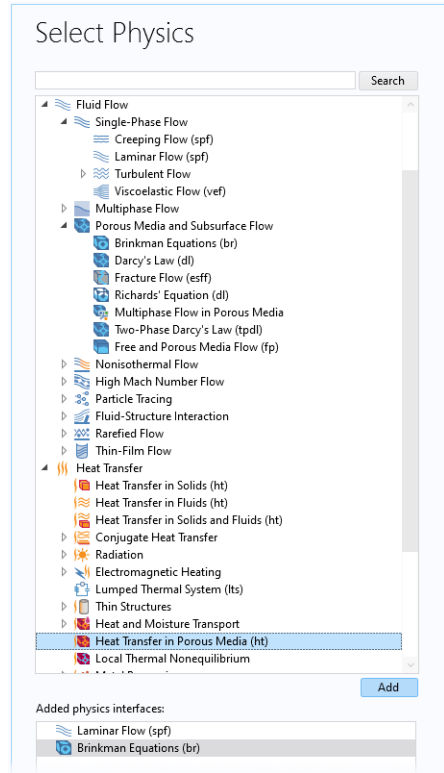
注： 这些操作说明适用于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 macOS 系统，只是略有不同。

- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标以启动软件。软件打开后，您可以选择使用“模型向导”来创建新的 COMSOL 模型，也可以选择“空模型”手动进行创建。对于本教程，单击“模型向导”按钮。

如果 COMSOL 已打开，您可以在“文件”菜单中选择  “新建”，然后单击  “模型向导”来启动它。

“模型向导”会引导您完成建立模型的最初几个步骤。接下来的窗口可供您选择建模空间的维度。


- 2 在“模型向导”窗口中，单击  “二维轴对称”。
- 3 在“选择物理场”树中，选择“流体流动 > 单相流 > 层流 (spf)”。
- 4 单击“添加”。
- 5 在“选择物理场”树中，选择“流体流动 > 多孔介质和地下水流 > Brinkman 方程 (br)”。
- 6 单击“添加”。
- 7 在“选择物理场”树中，单击“传热 > 多孔介质传热 (ht)”。
- 8 单击“添加”。
- 9 单击  “研究”。
- 10 在“选择研究”树中，选择“一般研究 > 稳态”。
- 11 单击  “完成”。



全局定义

首先，读取一组定义尺寸和特定属性的参数。


参数

- 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 浏览到模型的“案例库”文件夹，然后双击文件 `heat_pipe_parameters.txt`。

几何


我们将使用一个圆的扇区、三个矩形和一个镜像平面来定义几何形状。

圆 1

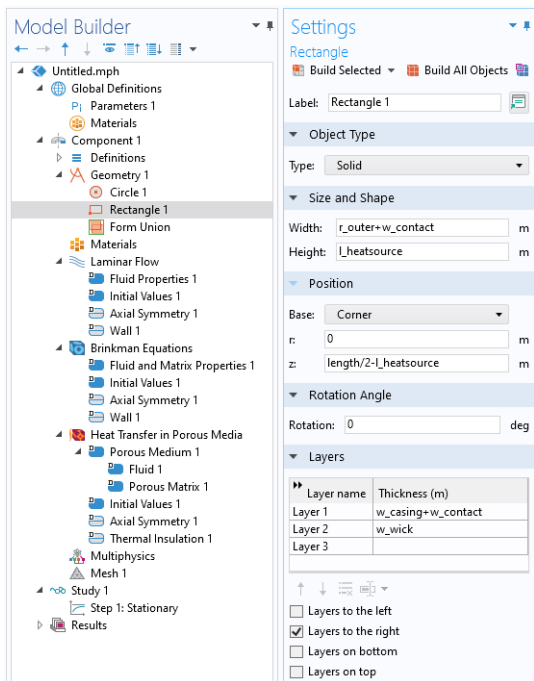
- 1 在“几何”工具栏中，单击  “圆”。
- 2 在“圆”的“设置”窗口中，定位到“大小和形状”栏。
- 3 在“半径”文本框中，键入 `r_outer`。
- 4 在“扇形角”文本框中键入 `90`。
- 5 定位到“位置”栏。在 `z` 文本框中键入 `length/2`。
- 6 单击以展开“层”栏。在表中输入以下设置：

| 层名称 | 厚度 (M) |
|-----|----------|
| 层 1 | w_casing |
| 层 2 | w_wick |

矩形 1

- 1 在“几何”工具栏中单击  “矩形”。
- 2 在“矩形”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 $r_{\text{outer}} + w_{\text{contact}}$ 。
- 4 在“高度”文本框中键入 $l_{\text{heatsource}}$ 。
- 5 定位到“位置”栏。在 z 文本框中键入 $\text{length}/2 - l_{\text{heatsource}}$ 。
- 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 | $w_{\text{casing}} + w_{\text{contact}}$ |
| 层 2 | w_{wick} |



- 7 选中“层在右侧”复选框。
- 8 清除“层在底面”复选框。

矩形 2

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击“矩形 1”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“矩形”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 r_{outer} 。
- 4 定位到“位置”栏。在 z 文本框中键入 $\text{length}/2 - l_{\text{heatsource}} * 2$ 。
- 5 定位到“层”栏。在表中输入以下设置：




| 层名称 | 厚度 (M) |
|-----|---------------------|
| 层 1 | w_{casing} |
| 层 2 | w_{wick} |

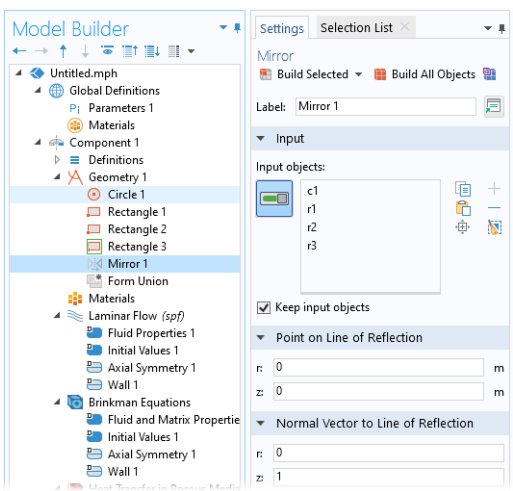
矩形 3

- 1 右键单击 “矩形 2” 并选择 “复制粘贴”。
- 2 定位到 “大小和形状” 栏。在 “高度” 文本框中键入 $\text{length}/2-1_heatsource*2$ 。
- 3 在 “矩形” 的 “设置” 窗口中，定位到 “位置” 栏。
- 4 在 z 文本框中，键入 0。


到此，我们已经添加了热管上半部分的几何体素，下面我们继续添加镜像平面以得到完整的热管。

镜像 1

- 1 在 “几何” 工具栏中，单击  “变换” 并选择 “镜像”。
- 2 单击 “图形” 窗口并按 **Ctrl+A** 以选择所有对象。
- 3 在 “镜像” 的 “设置” 窗口中，定位到 “输入” 栏。
- 4 选中 “保留输入对象” 复选框。
- 5 定位到 “反射线法矢” 栏。在 r 文本框中，键入 0。
- 6 在 z 文本框中，键入 1。
- 7 在 “几何” 工具栏中单击  “全部构建”。
- 8 在 “图形” 窗口中单击  “缩放到窗口大小”。

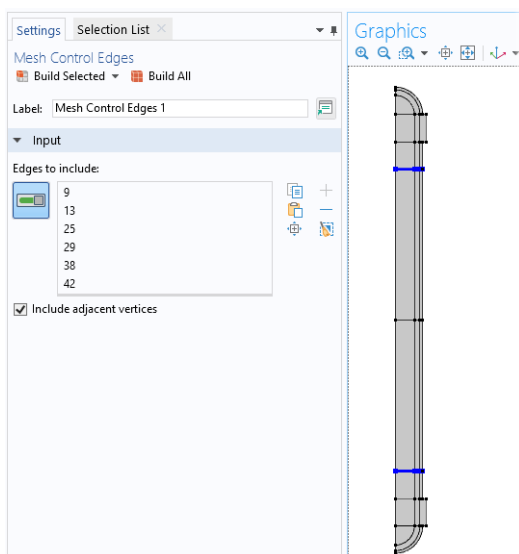


网格控制边 1


- 1 在“几何”工具栏中单击  “虚拟操作”，并选择“网格控制边”。

我们将在热管的中间部分使用四边形网格，在两端使用三角形网格。为了方便进行网格过渡，我们定义了网格控制边，它可以在网格划分时被引用，而不会在其他情况下导致域分裂。

- 2 在“图形”窗口中，单击右图所示的边以选择“边界”9、13、25、29、38和42。在“设置”窗口中确认选定的边与这些边界编号相符。如果有问题，请确保“激活选择”滑块按钮处于活动状态（绿色）。

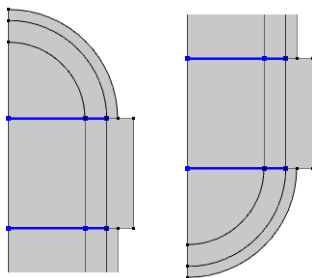


忽略边 1


- 1 在“几何”工具栏中，单击  “虚拟操作”并选择“忽略边”。

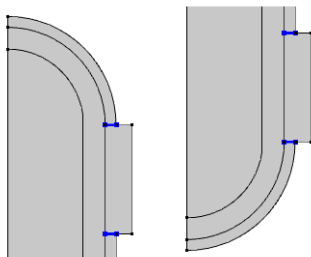
类似地，我们不仅希望在网格划分过程中忽略一些边，还想要完全忽略其他一些边。

- 2 在“忽略边”“设置”窗口中的“输入”选择处于活动状态时，在“图形”窗口中选择“边界”5、7、11、13、17、19、23和24。





忽略边 2

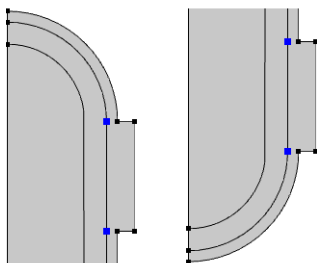
- 1 在“几何”工具栏中，单击  “虚拟操作”并选择“忽略边”。
- 2 选择“边界”12、14、18和19。
- 3 在“忽略边”的“设置”窗口中，定位到“输入”栏。
- 4 清除“忽略相邻顶点”复选框。




忽略顶点 1

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “虚拟操作”并选择“忽略顶点”。
- 2 选择“点”9、10、12和13。
- 3 在“几何”工具栏中单击  “全部构建”。


引入具有描述性名称的显式选择是一个较好的做法，这有助于稍后在物理场接口中执行选择操作。因此，我们为三个域定义选择，并定义一些所需的边界。



蒸汽腔

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“显式选择”。
- 2 选择“域”3和4。
- 3 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入蒸汽腔。

多孔铜芯


- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“显式选择”。
- 2 选择“域”2和5。
- 3 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入多孔铜芯。

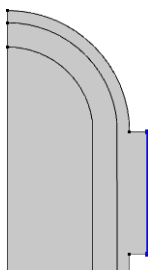
实心铜管套

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“显式选择”。
- 2 选择“域”1和6。


- 3 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**实心铜管套**。

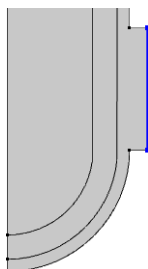
散热器

- 1 在“几何”工具栏中，单击“选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**散热器**。
- 3 定位到“选择实体”栏。从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”21。




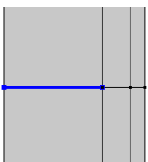
热源

- 1 在“几何”工具栏中，单击“选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”的“设置”窗口中，定位到“选择实体”栏。
- 3 从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”20。
- 5 “标签”文本框中键入**热源**。




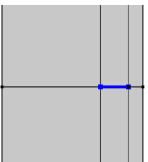
腔横截面

- 1 在“几何”工具栏中，单击“选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**腔横截面**。
- 3 定位到“选择实体”栏。从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”5。




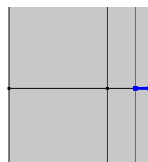
芯横截面

- 1 在“几何”工具栏中，单击“选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**芯横截面**。
- 3 定位到“选择实体”栏。从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”10。




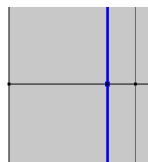
管套横截面

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**管套横截面**。
- 3 定位到“选择实体”栏。从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”13。





内芯边界

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“显式选择”。
- 2 在“显式选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**内芯边界**。
- 3 定位到“选择实体”栏。从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 4 选择“边界”8和9。



接下来，创建这些横截面的并集选择。这些横截面不具有物理重要性，仅在后处理阶段用于分析，因此，可以在建模过程中将其隐藏。

所有横截面

- 1 在“几何”工具栏中，单击  “选择”并选取“并集选择”。
- 2 在“并集选择”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**所有横截面**。
- 3 定位到“几何实体层”栏。从“层”列表中选择“边界”。
- 4 定位到“输入实体”栏。单击  “添加”。选择以下边界（按住 Ctrl 键可以选择多个对象）：
 - 腔横截面。
 - 芯横截面。
 - 管套横截面。
- 5 单击“确定”。


对几何隐藏 1

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“组件 1 (comp1)> 定义”节点。
- 2 右键单击“视图 1”并选择“对几何隐藏”。
- 3 在“对几何隐藏”的“设置”窗口中，定位到“选择”栏。
- 4 从“几何实体层”列表中，选择“边界”。
- 5 从“选择”列表中选择“所有横截面”。


网格 1

以下步骤将设置单元大小由全局参数控制的网格，并对热管的中段部分使用不同的网格。

映射 1

- 1 在“网格”工具栏中单击  “映射”。
- 2 在“映射”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 仅选择“域” 4、7-9、11 和 12。

分布 1

- 1 右键单击“映射 1”并选择“分布”。
- 2 在“分布”的“设置”窗口中，定位到“分布”栏。
- 3 从“分布类型”列表中选择“预定义”。
- 4 在“单元数”文本框中键入 `length/r_outer/mesh_factor`。
- 5 在“单元大小比”文本框中键入 10。
- 6 选中“对称分布”复选框。
- 7 单击  “构建选定对象”。

自由三角形网格 1

在“网格”工具栏中单击  “自由三角形网格”。




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 $0.9 \cdot \min(w_{\text{casing}}, w_{\text{wick}}) \cdot \text{mesh_factor}$ 。
- 5 在“最小单元大小”文本框中键入 $0.3 \cdot \min(w_{\text{casing}}, w_{\text{wick}}) \cdot \text{mesh_factor}$ 。



边界层 1

- 1 在“网格”工具栏中单击  “边界层”。
- 2 在“边界层”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 仅选择“域” 2-5 和 8-11。

边界层属性



- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“边界层属性”。
- 2 在“选择”下拉框中，选择“内芯边界”。
- 3 单击  “全部构建”。



材料

我们需要为金属管套和管芯以及工作流体（气态和液态形式）添加材料，可以从内置材料中添加铜。对于水蒸气和液态水，我们将创建两个热力学系统，然后从中生成材料。请注意，需要将铜添加到全局材料中，以便在多孔材料节点中访问它，该节点将添加到“组件 1”中。为了将“组件 1”中的全局铜材料用于“实心铜管套”域选择，我们将添加材料链接。


添加材料

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “窗口”并选择“从库中添加材料”。
- 2 转到“添加材料”窗口。
- 3 从树中选择“内置材料 > Copper”。
- 4 单击  “添加到全局材料”。

全局定义


我们将使用理想气体模型分析水蒸气，并使用 IAPWS 模型分析液态水。

水蒸气热力学系统

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击“全局定义”并选择“热力学 > 热力学系统”。
- 2 在窗口工具栏中单击“下一步”。
- 3 在“物质”列表中选择 water (7732-18-5, H₂O)。
- 4 单击  “添加所选项”。
- 5 在窗口工具栏中单击“下一步”。
- 6 从“气相模型”列表中选择“理想气体”。
- 7 在窗口工具栏中单击“完成”。
- 8 在“模型开发器”窗口的“全局定义 > 热力学”节点下，右键单击“气体系统 1 (pp1)”并选择“生成材料”。
- 9 在窗口工具栏中单击“下一步”三次（直到显示“定义材料”窗口）。
- 10 从“组件”列表中选择“全局”，然后单击“完成”。



液态水热力学系统

- 1 在“模型开发器”窗口的“全局定义”节点下，右键单击“热力学”并选择“热力学系统”。
- 2 从下拉列表中选择“汽 - 液”。
- 3 在窗口工具栏中单击“下一步”。

- 4 在“物质”列表中选择 water (7732-18-5, H₂O)。
- 5 单击  “添加所选项”。
- 6 在窗口工具栏中单击“下一步”，然后单击“完成”。


水的属性

有些边界条件需要水的物理属性，您可以从“热力学系统”生成它们。

- 1 在“模型开发器”窗口的“全局定义>热力学”节点下，右键单击“汽-液系统 1 (pp2)”并选择“物质属性”。
- 2 从“计量单位”列表中选择 kg。
- 3 从列表中选择以下两项并为每一项单击  “添加所选项”：
 - 汽化热 (J/kg)
 - Ln 蒸汽压, Pa
- 4 在窗口工具栏中单击“下一步”。
- 5 选择“液体”并单击“下一步”。
- 6 单击  “全部添加”并单击“下一步”。
- 7 在窗口工具栏中单击“完成”。

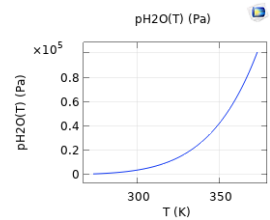
水的蒸汽压

为方便起见，我们设置一个辅助函数，以便从生成的函数（它返回以帕斯卡为单位的蒸汽压的自然对数）访问水的蒸汽压。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “函数”并选择“全局>解析”。
- 2 在“解析”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入水的蒸汽压。
- 3 在“函数名称”文本框中键入 pH2O。
- 4 定位到“定义”栏。在“表达式”文本框中键入 `exp(LnVaporPressure_water22(T))`。
- 5 在“变元”文本框中键入 T。
- 6 定位到“单位”栏。在“变元”文本框中键入 K。
- 7 在“函数”文本框中键入 Pa。

8 定位到“绘图参数”栏。在表中输入以下设置：

| 变元 | 下限 | 上限 |
|----|--------|--------|
| T | 273.15 | 373.15 |



9 您可以选择单击“绘制”来查看蒸汽压曲线。

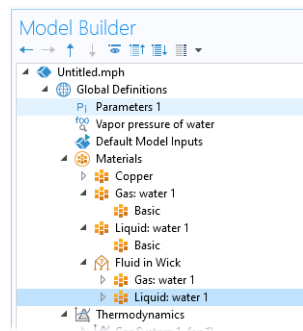
液态水材料

- 1 右键单击“汽 - 液系统 1 (pp2)”并选择“生成材料”。
- 2 从列表中选择液体，然后在窗口工具栏中单击“下一步”三次。
- 3 单击“完成”。

管芯中的流体

我们将研究两种情况：干燥管芯和饱和管芯。通过引入材料 switch，后续接口可以引用这个 switch，它可以引用蒸汽或液体；其状态将通过“研究”节点进行控制。

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击“全局定义 > 材料”节点，并选择“材料 Switch”。
- 2 在“材料 Switch”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**管芯中的流体**。
- 3 在“模型开发器”窗口中，右键单击 Gas: water 1 (pp1mat1) 并选择“复制”。
- 4 在“模型开发器”窗口中，右键单击“管芯中的流体 (sw1)”并选择“粘贴材料”。
- 5 在“模型开发器”窗口中，右键单击 Liquid: water 1 (pp2mat1) 并选择“复制”。
- 6 在“模型开发器”窗口中，右键单击“管芯中的流体 (sw1)”并选择“粘贴材料”。

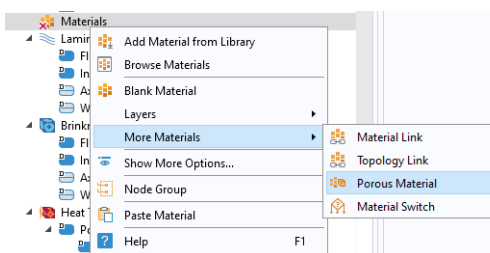


材料

添加要在管芯中使用的“多孔材料”，会在“多孔材料”节点中添加两个子特征，一个用于流体，一个用于固体。

多孔材料 1

- 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“更多材料 > 多孔材料”。
- 2 在“多孔材料”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“多孔铜芯”。



流体 1

- 1 右键单击“多孔材料 1 (poromat1)”并选择“流体”。
- 2 在“流体”的“设置”窗口中，定位到“流体属性”栏。
- 3 从“材料”列表中选择“管芯中的流体”。

固体 1

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击“多孔材料 1 (poromat1)”并选择“固体”。
- 2 在“固体”的“设置”窗口中，定位到“固体属性”栏。
- 3 在 θ_s 文本框中键入 1-wick_porosity。

现在，我们已定义芯材料，下面继续添加水蒸气和铜的链接。

水蒸气

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1”节点下，右键单击“材料”并选择“更多材料 > 材料链接”。
- 2 在“材料链接”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入水蒸气。

- 3 在“材料链接”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。
- 4 从“选择”列表中选择“蒸汽腔”。
- 5 定位到“链接设置”栏。从“材料”列表中选择 Gas: water 1 (pp1mat1)。


铜金属

- 1 右键单击“材料”（“组件 1”节点下）并选择“更多材料 > 材料链接”。
- 2 在“材料链接”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**铜金属**。
- 3 在“材料链接”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。
- 4 从“选择”列表中选择“实心铜管套”。

现在我们已经完成几何、选择和材料的设置，接下来继续设置物理场。

多物理场

非等温流动 1 和 2


- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “多物理场耦合”并选择“域 > 非等温流动”。
- 2 重复以上步骤，然后在“非等温流动 2”的“设置”窗口中，定位到“耦合接口”栏。
- 3 从“流体流动”列表中选择“Brinkman 方程 (br)”。

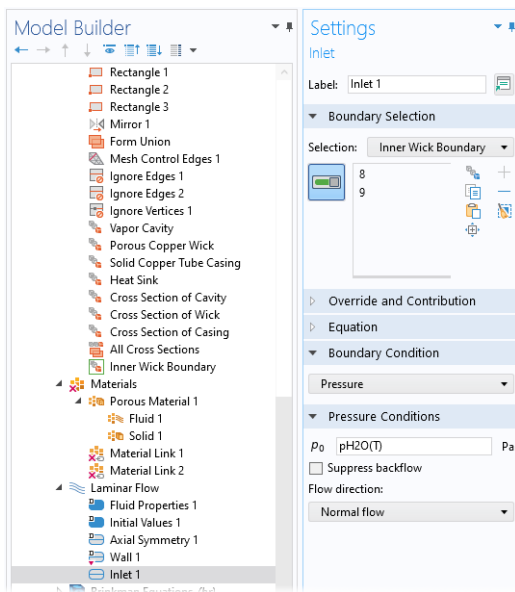
层流

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“层流 (spf)”。
- 2 在“层流”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“蒸汽腔”。
- 4 定位到“物理模型”栏。从“可压缩性”列表中选择“可压缩流动 (Ma<0.3)”。
- 5 在 p_{ref} 文本框中键入 p_{ref} 。

入口 1

我们将对腔边界施加压力条件，并将其设置为等于水的蒸汽压。通过不抑制回流，允许蒸汽从热侧进入，从冷侧排出。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“入口”。
- 2 在“入口”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“内芯边界”。
- 4 定位到“边界条件”栏。
从列表中选择“压力”。
- 5 在 p_0 文本框中键入 $p_{H2O}(T)$ 。
- 6 定位到“压力条件”栏。
清除“抑制回流”复选框。



初始值 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 > 层流”节点下，单击“初始值 1”。
- 2 在“初始值”的“设置”窗口中，定位到“初始值”栏。
- 3 在 p 文本框中键入 p_{ref} 。

Brinkman 方程


- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“Brinkman 方程 (br)”。
- 2 在“Brinkman 方程”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“多孔铜芯”。
- 4 定位到“物理模型”栏。从“可压缩性”列表中选择“可压缩流动 ($Ma < 0.3$)”。
- 5 在 p_{ref} 文本框中键入 $p_{H2O}(T)$ 。

流体和基体属性 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > Brinkman 方程 (br)”节点下，单击“流体和基体属性 1”。
- 2 在“流体和基体属性”的“设置”窗口中，定位到“流体属性”栏。
- 3 从“流体材料”列表中选择“管芯中的流体 (sw1)”。
- 4 定位到“多孔基体属性”栏。从 κ 列表中选择“用户定义”。在关联文本框中键入 `wick_permeability`。


入口 1

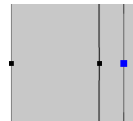
在“层流”和“Brinkman 方程”接口中，通过腔 - 芯界面的水的质量通量必须相等。我们可以使用蒸汽和液体之间的密度比，在管芯上设置速度边界条件。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“入口”。
- 2 在“入口”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“内芯边界”。
- 4 定位到“速度”栏。单击“速度场”按钮。
- 5 将 \mathbf{u}_0 矢量指定为

| | |
|---|---|
| $\mathbf{u} \cdot \text{spf.rho} / \text{br.rho}$ | r |
| $\mathbf{w} \cdot \text{spf.rho} / \text{br.rho}$ | z |

压力点约束 1


- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “点”并选择“压力点约束”。
对管芯与管套之间界面处的 r 轴上的点施加 0[Pa] 压力约束。
- 2 仅选择“点”9。
- 3 在“压力点约束”的“设置”窗口中，定位到“压力约束”栏。
- 4 在 p_0 文本框中键入 0[Pa]。




多孔介质传热

在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“多孔介质传热 (ht)”。

固体 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “域”并选择“固体”。
- 2 在“固体”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“实心铜管套”。

流体 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “域”并选择“流体”。
- 2 在“流体”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“蒸汽腔”。

多孔基体 1


我们希望使用铜作为多孔材料中的固相，但是该材料包含高密度本体材料的属性，因此我们需要相应地指定一个设置。

- 1 在“模型开发器”窗口的“多孔介质 1”节点下，单击“多孔基体 1”。
- 2 定位到“基体属性”栏。从“定义”列表中选择“固相属性”。

如果我们有一个预定义的材料，并包含其多孔状态（如“铜海绵”）的数据，则应在“基体属性”栏中保留当前的“定义”选择：“干本体属性”。


热通量 1

接下来，我们指定热源对应的边界条件。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“热通量”。
- 2 在“热通量”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“热源”。
- 4 定位到“热通量”栏。在 q_0 文本框中键入 `phi_in`。


热通量 2

我们通过类似的方式来设置散热器的边界条件，但还添加了对流热通量条件。也就是说，通过散热器从管道流出的热通量与散热器和外部环境之间的温差成正比。这个比例常数（传热系数）的大小取决于外部流动条件，例如，存在外部风扇（及其速度）或者翅片的表面积和几何形状（如果存在）。此模型不对这些细节进行显式建模，而是通过单个参数来捕获它们。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“热通量”。
- 2 在“热通量”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“散热器”。
- 4 定位到“热通量”栏。单击“对流热通量”按钮。
- 5 在 h 文本框中键入 `h_conv`。

边界热源 1

与水的相变关联的热量会去除热侧的热量（蒸发），并在冷侧产生热量（冷凝），其中涉及的能量是汽化热。为此，我们在腔 / 芯界面处添加边界热源。



- 1 在“物理场”工具栏中，单击  “边界”并选择“边界热源”。
- 2 在“边界热源”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“内芯边界”。
- 4 定位到“边界热源”栏。在 Q_b 文本框中键入
`(u*spf.nr+w*spf.nz)*HeatOfVaporization_water21(T)*spf.rho`。

研究 1

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“研究 1”。
- 2 在“研究”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入研究 1 - 干燥管芯。


材料扫描

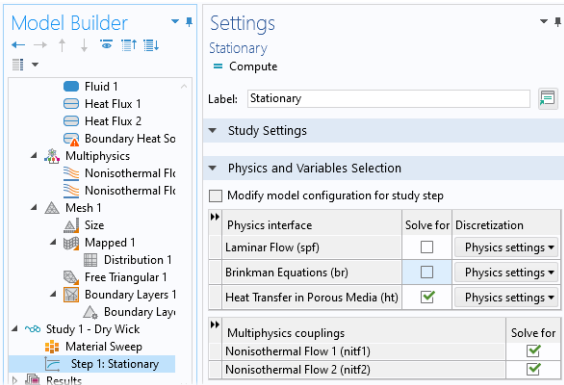
为了选择材料 switch “管芯中的流体”的状态来对应干燥的情况，我们在研究中添加材料扫描，但只给出单个实例，即 switch 中第一个材料“Gas: water 1”的指数 (1)。

- 1 在“研究”工具栏中单击  “材料扫描”。
- 2 在“材料扫描”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏。
- 3 单击  “添加”。
- 4 在表中输入以下设置：

| SWITCH | 实例 | 实例数 |
|--------------|------|-----|
| 管芯中的流体 (sw1) | 用户定义 | 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，定位到“物理场和变量选择”栏。
- 3 在表格中，清除“层流 (spf)”和“Brinkman 方程 (br)”的“求解”复选框。
- 4 在“研究”工具栏中单击  “计算”。



求解完成后，您可以查看在“干燥”情况下沿热管的温度分布情况。

结果


接下来，我们编辑绘图组以创建图 9。

三维温度 (HT) - 干燥管芯

- 1 在“三维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**三维温度 (ht) - 干燥管芯**。
- 2 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中，选择“手动”。
- 3 在“标题”文本区中键入**温度**。

- 4 定位到“颜色图例”栏。选中“显示最大值和最小值”复选框。
- 5 选中“显示单位”复选框。

表面

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“三维温度 (ht) - 干燥管芯”节点，然后单击“表面”。
- 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 degC。
- 4 在“三维温度 (ht) - 干燥管芯”工具栏中单击  “绘制”。


这是上面“结果”一节中的图 9。从图中可以看出，对于当前使用的参数，管道会变得非常热。在继续操作之前，我们先移除其中一个绘图。

等温线 (HT)

在“模型开发器”窗口中，右键单击“等温线 (ht)”并选择“删除”。

添加研究

下面，我们求解管芯中有实际液体时，正常情况下的模型。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击  “窗口”并选择“添加研究”。
- 2 定位到“添加研究”窗口，在“选择研究”树中选择“一般研究 > 稳态”。
- 3 单击 + “添加研究”。

研究 2 - 饱和管芯

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“研究 2”。
- 2 在“研究”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入研究 2 - 饱和管芯。

材料扫描

- 1 在“研究”工具栏中单击  “材料扫描”。
- 2 在“材料扫描”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏。

3 单击  “添加”。

4 在表中输入以下设置：


| SWITCH | 实例 | 实例数 |
|--------------|------|-----|
| 管芯中的流体 (sw1) | 用户定义 | 2 |

步骤 2：稳态 1

我们将分两步来求解“研究 2”，首先不使用 Brinkman 方程，然后使所有接口都处于活动状态。按这种顺序求解将为 Brinkman 方程给出一个接近最终解的初始猜测值，从而使该过程更加稳定、有效。

在“模型开发器”窗口的“研究 2 - 饱和管芯”节点下，右键单击“步骤 1：稳态”并选择“复制粘贴”。

步骤 1：稳态

- 1 在第一步（研究 2：“步骤 1：稳态”）的“设置”窗口中，定位到“物理场和变量选择”栏。
- 2 在表格中，清除“Brinkman 方程 (br)”的“求解”复选框。
- 3 在“研究”工具栏中单击  “获取初始值”。

通过请求初始值可以创建默认绘图组，我们现在可以对其进行修改。

结果

速度 (SPF) 和温度 (HT)

- 1 在“二维绘图组：速度 (spf)”“设置”窗口的“标签”文本框中，在现有名称后添加“和温度 (ht)”。
- 2 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中，选择“手动”。
- 3 在“标题”文本区中键入**流体速度和温度**。
- 4 定位到“颜色图例”栏。选中“显示单位”复选框。

表面 1 - 流体速度, $\lg(|U|)$

- 1 在“模型开发器”窗口中, 展开“速度 (spf) 和温度 (ht)”节点, 然后单击“表面”。
- 2 在“表面”“设置”窗口的“标签”文本框中, 键入**表面 1 - 流体速度, $\lg(|u|)$** 。
- 3 定位到“表达式”栏。在“表达式”文本框中键入 $\log_{10}(ht.uz^2 + ht.ur^2)/2$ 。
- 4 定位到“着色和样式”栏。从“颜色表”列表中选择 Cividis。

面上箭头 1

在“模型开发器”窗口中, 右键单击“速度 (spf) 和温度 (ht)”节点, 并选择“面上箭头”。

面上箭头 1, 表面 1 - 流体速度, $\lg(|U|)$

在“模型开发器”窗口的“结果 > 速度 (spf) 和温度 (ht)”节点下, 按住 Ctrl 并单击以选择“表面 1 - 流体速度, $\lg(|u|)$ ”和“面上箭头 1”。

表面 2 - 温度

- 1 右键单击“复制粘贴”。
- 2 在“表面”“设置”窗口的“标签”文本框中, 键入**表面 2 - 温度**。
- 3 在“表面”的“设置”窗口中, 定位到“表达式”栏。
- 4 在“表达式”文本框中键入 T。
- 5 定位到“表达式”栏。从“单位”列表中选择 degC。
- 6 定位到“着色和样式”栏。从“颜色表”列表中选择 HeatCamera。

变形 1

通过使用变形来并排显示两个绘图。

- 1 右键单击“表面 2 - 温度”并选择“变形”。
- 2 在“变形”的“设置”窗口中, 定位到“表达式”栏。
- 3 在“r 分量”文本框中键入 r_{outer} 。
- 4 定位到“比例因子”栏。选中“比例因子”复选框。

5 在关联文本框中键入 3。

面上箭头 1 - 蒸汽流动

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“面上箭头 1”。
- 2 在“面上箭头”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**面上箭头 1 - 蒸汽流动**。
- 3 定位到“箭头位置”栏。找到“r 栅格点”子栏。在“点数”文本框中键入 9。
- 4 定位到“着色和样式”栏。从“箭头长度”列表中选择“对数”。
- 5 选中“比例因子”复选框。
- 6 在关联文本框中键入 0.005。
- 7 从“颜色”列表中选择“黑色”。

面上箭头 1 - 蒸汽流动 1

右键单击“面上箭头 1 - 蒸汽流动”并选择“复制粘贴”。

面上箭头 2 - 液体流动

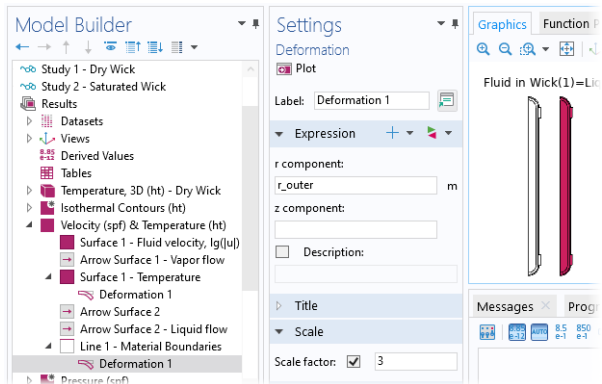
- 1 在“面上箭头”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**面上箭头 2 - 液体流动**。
- 2 定位到“表达式”栏。在“r 分量”文本框中键入 u2。
- 3 在“z 分量”文本框中键入 w2。
- 4 定位到“着色和样式”栏。输入 50 作为“比例因子”的值。
- 5 从“颜色”列表中选择“蓝色”。

线 1 - 材料边界

- 1 在“模型开发器”窗口中，右键单击“速度 (spf) 和温度 (ht)”节点，并选择“线”。
- 2 在“线”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**线 1 - 材料边界**。
- 3 定位到“表达式”栏。在“表达式”文本框中键入 1。
- 4 定位到“着色和样式”栏。从“着色”列表中选择“均匀”。
- 5 从“颜色”列表中选择“黑色”。

变形 1

- 1 右键单击“线 1-材料边界”并选择“变形”。
- 2 在“变形”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。
- 3 在“r 分量”文本框中键入 `r_outer`。
- 4 定位到“比例因子”栏。选中“比例因子”复选框。
- 5 在关联文本框中键入 3。



研究 2 - 饱和管芯


求解器配置

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“研究 2 - 饱和管芯 > 求解器配置 > 解 4(sol4)”节点。
- 2 右键单击“稳态求解器 1”并选择“全耦合”。
- 3 在“全耦合”的“设置”窗口中，单击以展开“求解时显示结果”栏。
- 4 选中“绘制”复选框，并选择“速度 (spf) 和温度 (ht)”作为“绘图组”。
- 5 在“模型开发器”窗口中，右键单击“稳态求解器 2”并选择“全耦合”。
- 6 在“全耦合”的“设置”窗口中，定位到“求解时显示结果”栏。
- 7 选中“绘制”复选框，并选择“速度 (spf) 和温度 (ht)”作为“绘图组”。

结果

为了帮助分析结果，我们在“计算组”中创建一系列跨边界热通量的线积分，使它们穿过管道的中间部分（在 r 轴上），以及热源和散热器的接触面。

能量平衡

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “计算组”。
- 2 在“计算组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**能量平衡**。
- 3 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中，选择“研究 2 - 饱和管芯 / 参数化解 2 (sol6)”。
- 4 定位到“变换”栏。选中“转置”复选框。

散热器

- 1 右键单击“能量平衡”并选择“积分 > 线积分”。
- 2 在“标签”文本框中键入**散热器**。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“散热器”。
- 4 单击“表达式”栏右上角的“替换表达式”。从菜单中选择“组件 1 (comp1) > 多孔介质传热 > 边界通量 > ht.ndflux - 法向传热通量 - W/m²”。
- 5 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----------|----|----------|
| ht.ndflux | W | 汇：ndflux |

热源

- 1 右键单击“散热器”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线积分”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**热源**。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“热源”。
- 4 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----------|----|----------|
| ht.ndflux | W | 源：ndflux |

管套

- 1 右键单击“热源”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线积分”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入**管套**。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“管套横截面”。

4 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----------|----|-----------|
| ht.ndflux | W | 管套：ndflux |

管芯

- 1 右键单击“管套”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线积分”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入管芯。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“芯横截面”。
- 4 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|-----------|----|-----------|
| ht.ndflux | W | 管芯：ndflux |


腔体

- 1 右键单击“管芯”并选择“复制粘贴”。
- 2 在“线积分”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入腔体。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“腔横截面”。
- 4 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：

| 表达式 | 单位 | 描述 |
|---|----|-----------|
| ht.ndflux | W | 腔体：ndflux |
| w*spf.rho*HeatOfVaporization_wat er21(T) | W | 腔体：潜热 |

相变引起的潜热通量


为了研究沿管芯的相变如何传递热能，我们创建一个线图来绘制沿腔-芯边界的热通量。

- 1 在“结果”工具栏中，单击  “一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入相变引起的潜热通量。

线图 1

- 1 右键单击“相变引起的潜热通量”并选择“线图”。
- 2 在“线图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中，选择“研究 2 - 饱和管芯 / 参数化解 2 (sol6)”。
- 4 定位到“选择”栏。从“选择”列表中选择“内芯边界”。
- 5 定位到“y 轴数据”栏。在“表达式”文本框中键入 $(u \cdot \text{spf.nr} + w \cdot \text{spf.nz}) \cdot \text{spf.rho} \cdot \text{HeatOfVaporization_water21}(T)$ 。
- 6 定位到“y 轴数据”栏。选中“描述”复选框。
- 7 在关联文本框中键入 $(\frac{du}{dn}) \cdot \rho \cdot \Delta H_{\text{vap}}$ 。
- 8 单击以展开“标题”栏。从“标题类型”列表中，选择“手动”。
- 9 在“标题”文本区中键入相变引起的潜热通量。
- 10 定位到“x 轴数据”栏。从“参数”列表中选择“表达式”。
- 11 在“表达式”文本框中键入 z 。


研究 2 - 饱和管芯

在“主屏幕”工具栏中单击  “计算”。

结果

我们首先可以查看前面定义的线积分，通过其中的数字来分析结果。

能量平衡

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”节点下，单击“能量平衡”。
- 2 在“能量平衡”工具栏中单击  “计算”。


请注意通过散热器和热源的热通量如何以相反的符号匹配，以及“腔体：潜热”的大小与这一数字的接近程度。

最后，我们对三维温度图进行一些润色。

三维温度 (HT)

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“三维温度 (ht)”。
- 2 在“三维绘图组”“设置”窗口的“标题”栏中，将“标题类型”列表选择改为“手动”。
- 3 在“标题”文本区中键入**温度**。
- 4 定位到“颜色图例”栏。选中“显示最大值和最小值”复选框。
- 5 选中“显示单位”复选框。

表面

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“三维温度 (ht)”节点，然后单击“表面”。
- 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 degC。
- 4 单击  “绘制”。

此时会生成前面“结果”一节中的图 10。从图中可以看出，整个热管的温度分布非常均匀，与之前研究的干燥管芯情况相比，最高温度也明显更低。