

在 COMSOL Multiphysics 6.2 版本中创建



# 窗户热性能

## 简介

---

在设计建筑物期间，环境问题在整个项目中产生了相当大的影响。首要考虑的问题之一是如何提高热性能。在这个过程中，仿真软件提供了许多关键工具，可对建筑物的热损耗和热性能进行建模。

国际标准 ISO 10077-2:2012（[参考资料 1](#)）提供门、窗和百叶窗的热性能标准，可计算得到框架的热特性值，用于验证仿真软件的计算结果。

COMSOL Multiphysics 成功通过了整个基准测试。本文描述了 ISO 10077-2:2012 中仅与窗户相关的六种框架轮廓。此标准中的其他测试案例可在以下应用中找到：

- [卷帘百叶窗热性能](#)
- [玻璃对窗户热性能的影响](#)

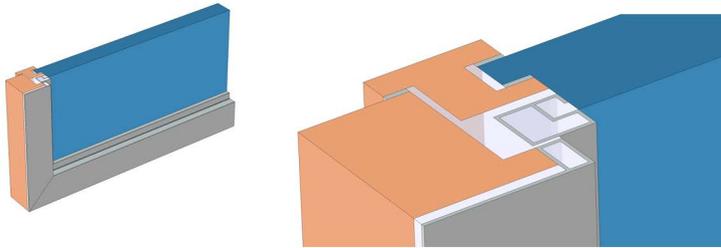


图1：其中一种窗户的几何结构及其横截面视图。

## 模型定义

---

在每个测试案例中，窗户将内侧的热空气与外侧的冷空气隔开，在这些应用中，隔热板代替了传统的玻璃。求解模型后，计算以下两个物理量，并与标准值作比较：

- 内外侧之间的热导率
- 窗框的热透射率

### 空气腔

窗户框架包含多个腔室，目的是确保热绝缘。依据上述标准，腔室以不同的方式进行建模，具体取决于它们的形状以及将它们连接到内部或外部环境的狭缝的宽度。腔室分为三类：

- **不通风腔**，腔室完全封闭，或者通过宽度不超过 2 mm 的狭缝与外部或内部相连；

- **微通风腔**，腔室通过宽度大于 2 mm 但不超过 10 mm 的狭缝与外部或内部相连；
- **通风良好腔**，此腔室的配置与前面任一类都不同

在不通风和微通风腔中，热流率由等效导热系数  $k_{eq}$  表示，包括传导、对流和辐射产生的热流，取决于腔室的几何形状和相邻材料。有关  $k_{eq}$  的定义，请参见**不通风的矩形腔**、**略通风的矩形腔**和**非矩形腔**。这些腔室在几何形状中明确表示为域。

在通风良好的腔中，假设腔的整个表面都暴露在内部或外部环境中。因此，这些腔室的内部并未明确表示为一个域，而是将对流热通量边界条件应用于腔室表面（有关更多信息，请参见**边界条件**部分）。如图 8 所示的示例构型包含连接到外部环境的这种腔体。

#### 不通风矩形腔

对于不通风矩形腔，当量热导率定义为：

$$k_{eq} = \frac{d}{R}$$

其中， $d$  是矩形腔在热流量方向的尺寸， $R$  是矩形腔的热阻，表示为：

$$R = \frac{1}{h_a + h_r}$$

其中， $h_a$  是对流传热系数， $h_r$  是辐射传热系数。这两个系数定义为：

$$h_a = \begin{cases} \frac{C_1}{d} & b \leq 5 \text{ mm 时} \\ \max\left(\frac{C_1}{d}, C_2 \Delta T^{1/3}\right) & \text{反之} \end{cases}$$

$$h_r = 4\sigma T_m^3 EF$$

其中：

- $C_1 = 0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- $C_2 = 0.73 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^{4/3})$
- $\Delta T$  是矩形腔中的最大表面温差
- $\sigma = 5.67\cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$  是斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数
- $T_m$  是矩形腔边界上的平均温度

- $E$  是界面辐射率，定义为：

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

- $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  是表面辐射率（在该模型中均为 0.90）
- $F$  是矩形截面的视角因子，定义为：

$$F = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left( \frac{d}{b} \right)^2} \right)$$

- $d$  是矩形腔在热流量方向的尺寸
- $b$  是矩形腔在垂直于热流量方向的尺寸

#### 微通风矩形腔

对于微通风矩形腔，其当量热导率是相同大小的不通风矩形腔的两倍。

#### 非矩形腔

根据下文描述的 ISO 10077-2:2012 中定义的规则，非矩形腔转换成面积和宽高比相同的矩形腔。然后就可以根据前两个矩形实例中的任一个来计算  $k_{\text{eq}}$ 。

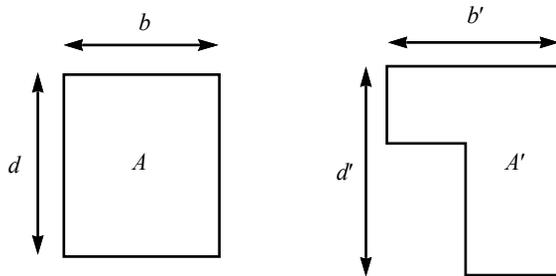


图2：非矩形腔的转换。

图2 显示面积为  $A'$  的非矩形腔。那么， $d'$  和  $b'$  就是可以包含非矩形腔的最小矩形的深度和宽度（在热流方向）。尺寸为  $b \times d$ 、面积为  $A$  的等效矩形腔必须满足以下条件：

$$A = A' \quad \frac{d}{b} = \frac{d'}{b'}$$

因此， $b$  和  $d$  的表达式为：

$$b = \sqrt{A' \frac{b'}{d'}} \quad d = \sqrt{A' \frac{d'}{b'}}$$

### 边界条件

内侧和外侧的热通量条件依据牛顿冷却定律确定：

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h(T_{\text{ext}} - T)$$

其中， $T_{\text{ext}}$  是外部温度（ $T_{\text{ext}} = T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$  表示内侧， $T_{\text{ext}} = T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$  表示外侧）。此标准定义了与传热系数  $h$  相关的表面热阻  $R_s$ ，两者的关系为：

$$h = \frac{1}{R_s}$$

内侧和外侧的表面热阻不相等。而且，在与内侧相连的边界上，边的热阻增大。图 3 解释了如何确定来应用这些边界。

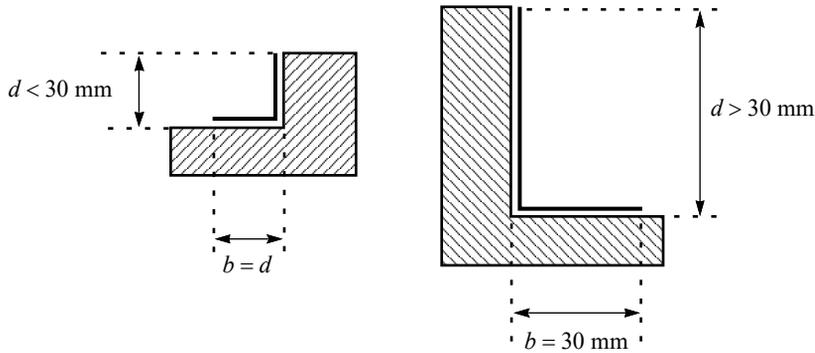


图 3：受保护的边界。

如果  $d$  大于 30 mm，则  $b$  设为 30 mm。否则，选择  $b = d$ 。另外，其中两个边界视为绝热边界：与壁及隔热板端部接触的境界。

### 六个测试案例的描述

图 4 到图 9 描述了每个测试案例的几何结构，但只显示了一部分隔热板。红色编号表示不通风腔，绿色编号表示微通风腔。黑粗线表示热阻增大的边界。与壁接触的隔热边界用带条纹的矩形表示。

#### 测试案例 1：使用隔热层的铝质框架

第一个测试案例研究使用带隔热层的铝质框架的热传导。框架结构由铝制成，其热导率  $k$  较高，为  $160\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。隔热层由四块挡板组成，材料为含 25% 玻璃纤维的聚酰胺 6.6。这种材料的热导率较低，为  $0.30\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。为了使窗户防水，还使用了三元乙丙

橡胶 (EPDM) 垫片。EPDM 的热导率为  $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。隔热板的热导率非常低，为  $0.035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

此框架分成多个腔：大部分（图 4 中红色编号 1 到 9）视为不通风腔，因为它们未连接到外侧。有一个腔连到了外侧。根据标准，由于其内部有一条  $2 \text{ mm}$  宽的狭缝，因此这个腔分成两个“子腔”。第一个腔（图 4 中的红色编码 10）视为不通风腔，第二个腔（图 4 中的绿色编码 1）视为微通风腔。

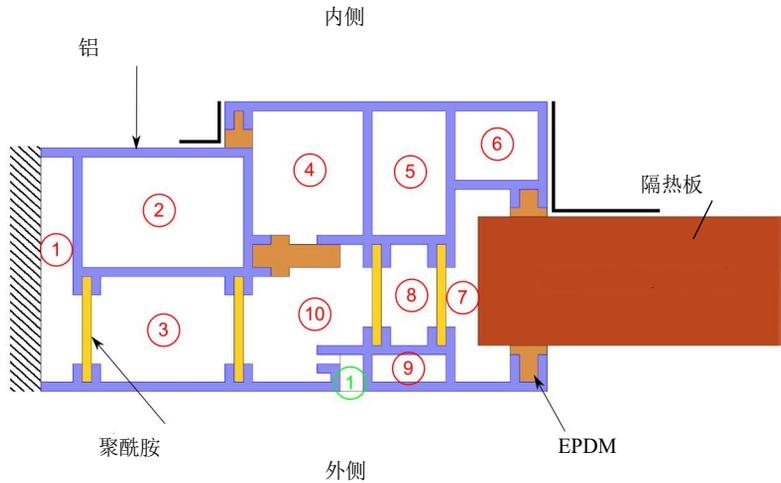


图 4：第一种窗的几何结构。

#### 测试案例 2：铝包木框架

第二个测试案例研究铝包木框架的热传导。框架为两块木块，其热导率为  $0.13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。在木块外侧镶嵌了热导率较高的铝。此测试案例也使用了 EPDM 垫片。

所有腔都视为不通风腔，因为它们是封闭的，或通过 2 mm 宽的狭缝与外部相连。

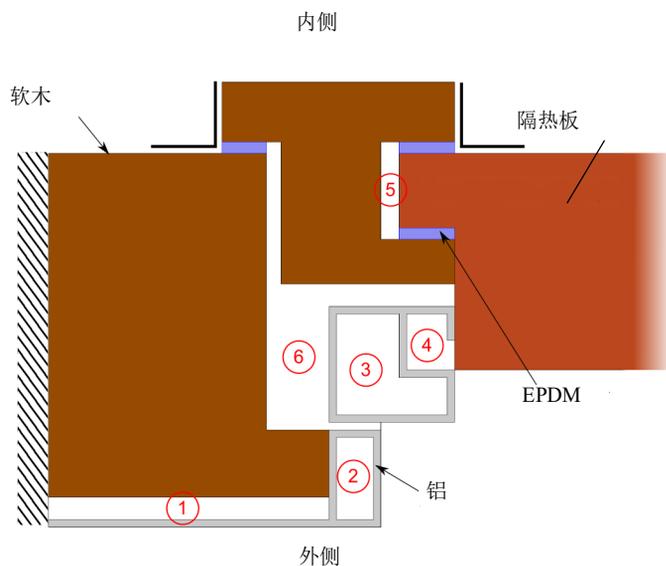


图 5：第二种窗的几何结构。

### 测试案例 3：内含钢条的 PVC 框架

第三个测试案例研究内含钢条的 PVC 框架的热传导。这种框架结构由 PVC 制成，其热导率为  $0.17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。其中还加了两根钢条。钢的热导率较高，为  $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。同样也使用了 EPDM 垫片。

空气腔完全封闭，或通过宽度不超过 2 mm 的狭缝与外部相连。因此可视为不通风腔。

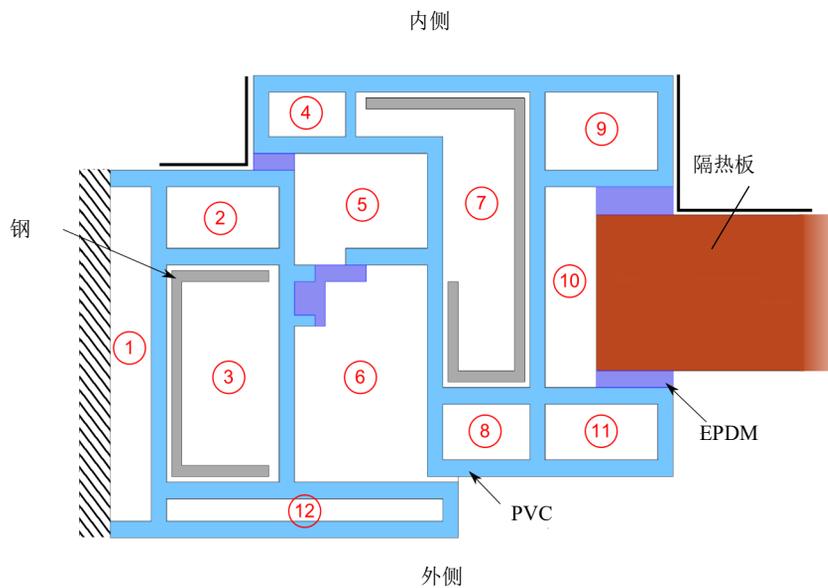


图6：第三种窗的几何结构。

测试案例4：天窗

第四个测试案例研究天窗框架的热传导。框架的主要部分由两个软木块制成。内部是铝包层，也使用了EPDM垫片。

三个空气腔未连到外部，或通过宽度小于2 mm的狭缝连到外部，可视为不通风。另外四个空气腔视为微通风腔。

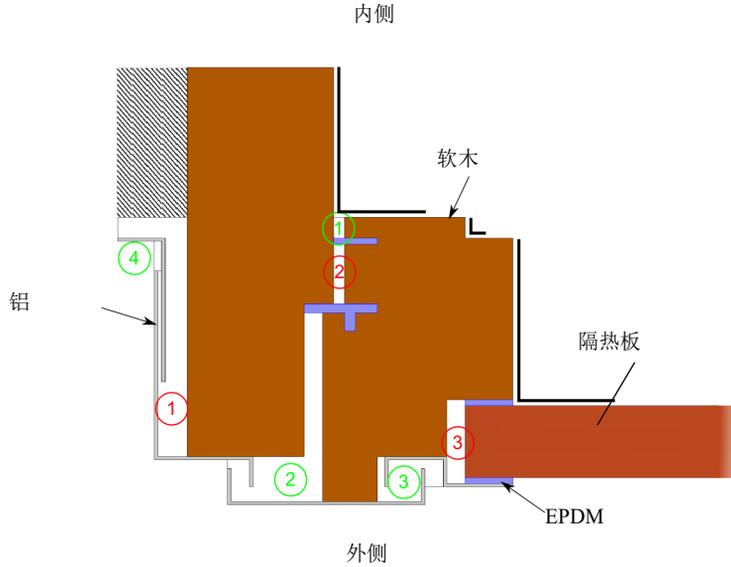


图7：第四种窗的几何结构。

测试案例5：推拉窗

第五个测试案例研究推拉窗框架的热传导。此框架为铝质结构，热导率较高。其中使用了含硬聚氨酯(PU)、聚酰胺以及聚酯马海毛的隔热层。这三种材料的热导率分别为  $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  和  $0.14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。为了使窗户防水，也使用了 EPDM 垫片。

四个空气腔完全封闭，另外两个空气腔通过  $2 \text{ mm}$  宽的狭缝连到外部。根据标准，这几个腔都视为不通风腔。有一个腔视为微通风腔，因为它通过  $6 \text{ mm}$  宽的较大缝隙连到外部。此外，最后一个腔视为通风良好的腔，因为它通过  $15 \text{ mm}$  宽的狭缝与外部相连。

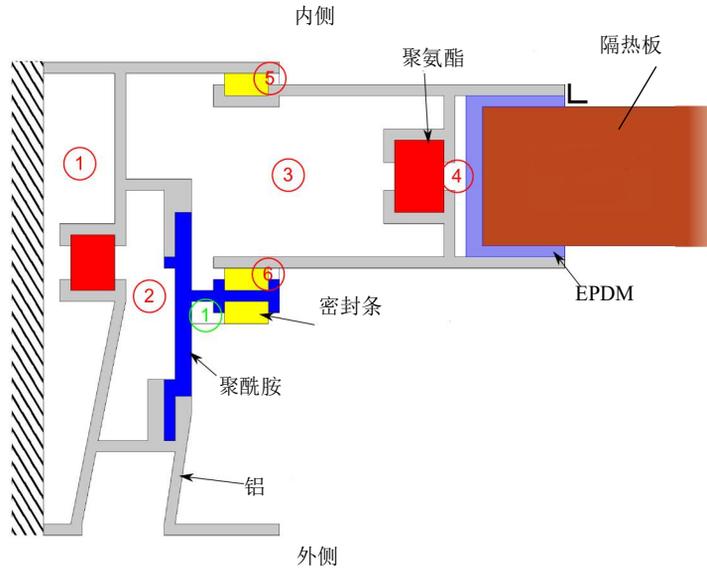


图8：第五种窗的几何结构。

#### 测试案例6：PVC 框架

第六个测试案例研究固定 PVC 框架的热传导。其中使用了热导率为  $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的聚酰胺。为了使窗户防水，也使用了 EPDM 垫片。

此案例中有七个封闭的腔，都视为不通风。此外，还有一个腔通过  $3 \text{ mm}$  宽的狭缝连到外部，因此可视为微通风。

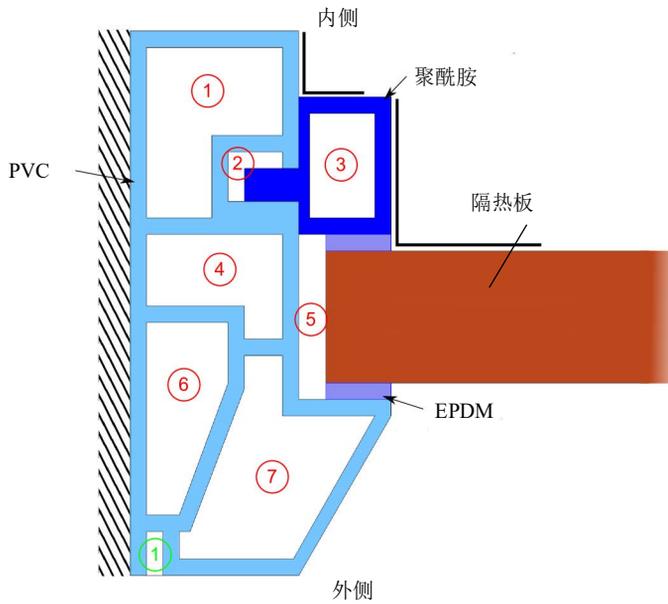


图9：第六种窗的几何结构。

## 结果与讨论

### 温度曲线

图 10 到图 15 分别展示了各个测试案例的温度曲线。

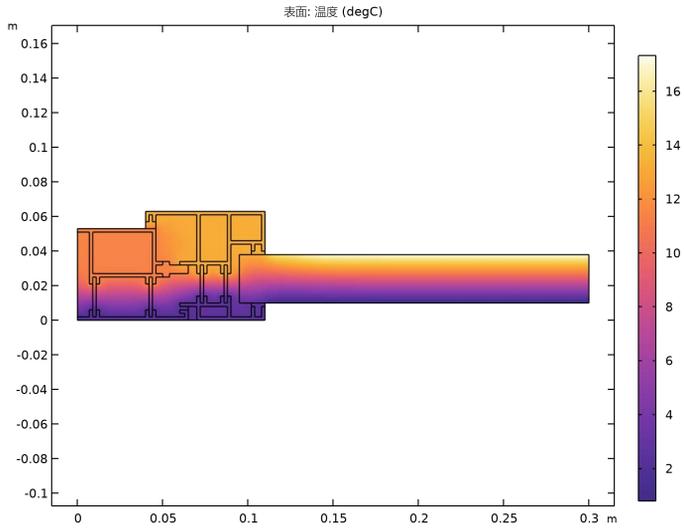


图10: 带隔热层的铝质框架的温度分布。

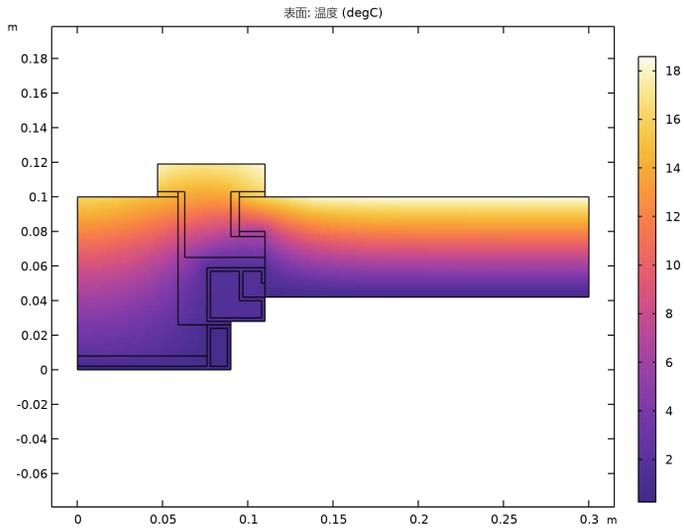


图11: 铝包木框架的温度分布。

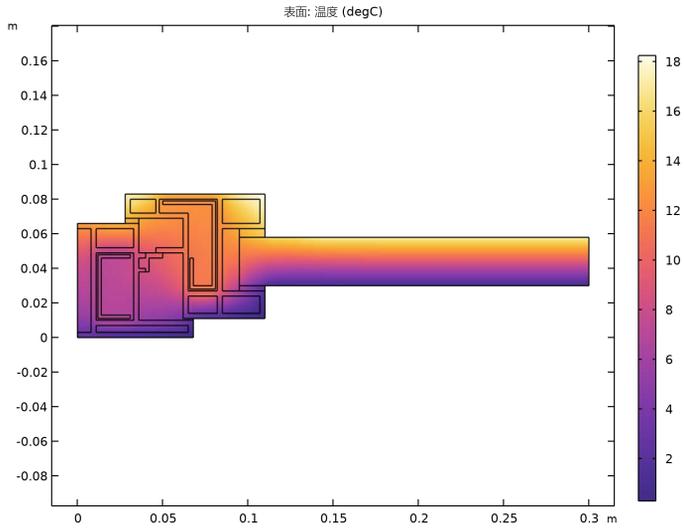


图 12: 内含钢条的 PVC 框架的温度分布

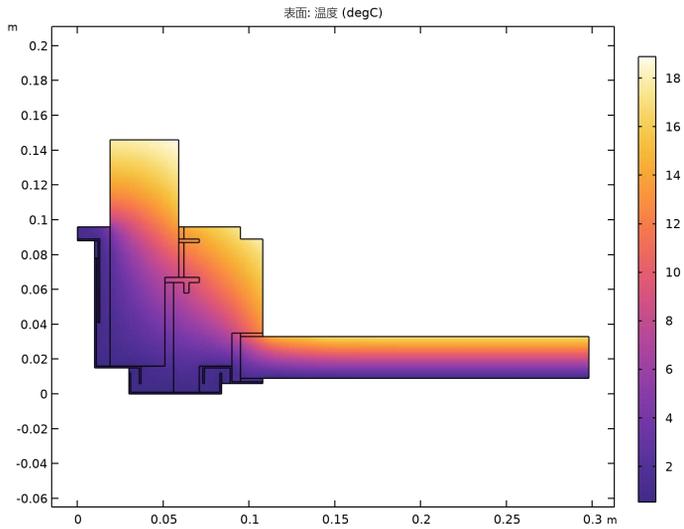


图 13: 天窗的温度分布。

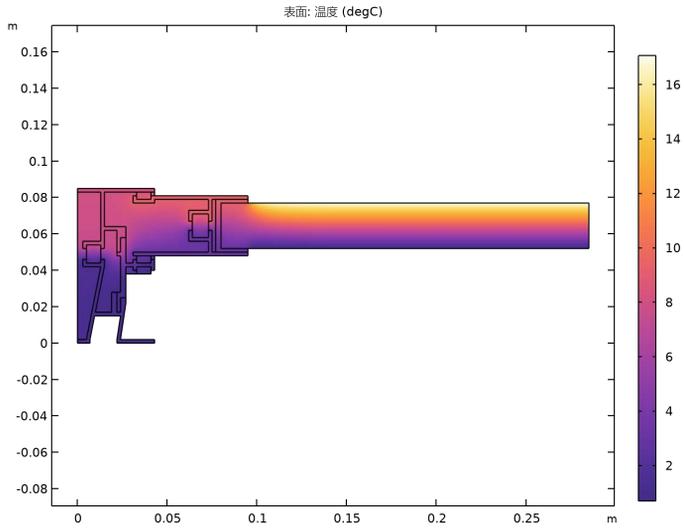


图 14: 推拉窗的温度分布。

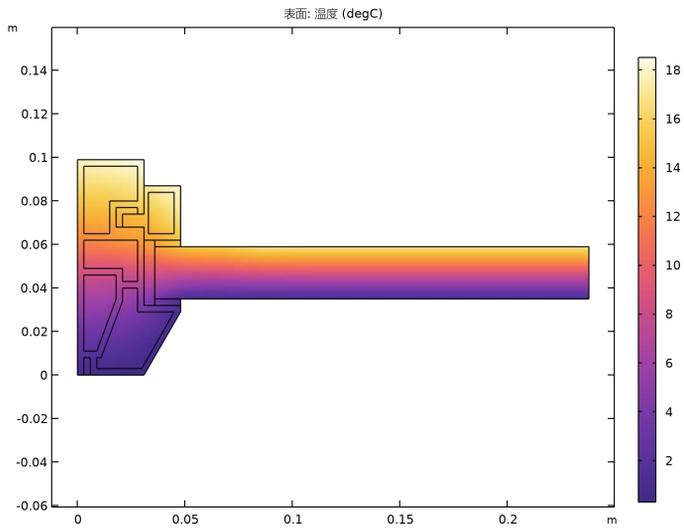


图 15: PVC 框架的温度分布。

## 相关物理量

相关物理量如下所示：

- 整个框架的热导率  $L^{2D}$  表示为：

$$L^{2D} = \frac{\phi}{T_e - T_i}$$

其中， $\phi$  是流经窗户的热流量（单位为 W/m）， $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$  是外部温度， $T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$  是内部温度。

- 框架的热透射率  $U_f$  定义为：

$$U_f = \frac{L^{2D} - U_p b_p}{b_f}$$

其中， $b_p$  是面板的可见宽度，单位为米， $b_f$  是框架的投影宽度，单位为米， $U_p$  是面板中心区域的热透射率，单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

表格 1 到表格 6 比较了 COMSOL Multiphysics 得到的数值结果与 ISO 10077-2:2012 提供的预期值。

表格 1：测试案例 1 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

物理量	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.550	0.557	1.27%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	3.22	3.30	2.48%

表格 2：测试案例 2 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

物理量	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.263	0.265	0.76%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	1.44	1.47	2.1%

表格 3：测试案例 3 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

L2D (W/(M·K))	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.424	0.428	0.94%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	2.07	2.13	2.9%

表格 4：测试案例 4 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

L2D (W/(M·K))	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.408	0.412	0.98%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	2.08	2.17	4.3%

表格 5：测试案例 5 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

L2D (W/(M·K))	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.659	0.662	0.45%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	4.67	4.71	0.85%

表格 6：测试案例 6 中物理量的预期值与计算所得值的比较。

L2D (W/(M·K))	预期值	计算所得值	相对误差
$L^{2D}$ (W/(m·K))	0.285	0.284	0.35%
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	1.31	1.35	3.1%

要通过此测试案例，热导率的最大容许偏差值为 3%，热透射率的最大容许偏差值为 5%。测量值全部在容许的偏差范围内，且满足验证标准。

## 参考资料

1. European Committee for Standardization, *ISO 10077-2:2012, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames*, 2012.

案例库路径：Heat\_Transfer\_Module/Buildings\_and\_Constructions/  
windows\_thermal\_performances

## 建模操作说明

### 根节点

先打开以下现有的文件，其中包含了全局定义、几何结构、局部变量、选择、算子和材料属性。

- 1 从文件菜单中选择打开。

- 2 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 windows\_thermal\_performances\_preset.mph。

### 第一种窗户 (COMP1)

在图形工具栏中单击  缩放到窗口大小按钮。

## 第一种窗户

---

### 第一种窗户 (COMP1)

在模型开发器窗口中展开第一种窗户 (comp1) 节点。

### 定义 (COMP1)

#### 变量 1

- 1 在模型开发器窗口中展开第一种窗户 (comp1)> 定义节点，然后单击变量 1。
- 2 在变量的设置窗口中，定位到变量栏。
- 3 定义框架部分的热导率，供后处理时使用，如下所示。

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

请注意，连到壁的边界和连到隔热板端部的边界视为绝热边界，因此流经内部边界和外部边界的热流率相等（绝对值）。

- 4 在模型开发器窗口，折叠第一种窗户 (comp1)> 定义节点。

### 固体和流体传热 (HT)

#### 流体 1

- 1 在模型开发器窗口中展开固体和流体传热 (ht) 节点，然后单击流体 1。
- 2 选择“域”2、5、6、10、12、14、15、17、18、20 和 21。

#### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择外侧。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流热通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/Rse$ ”。

6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Te”。

#### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（平直区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_n”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。

#### 热通量 3

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择热通量。
- 2 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（拐角区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_p”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。
- 7 在模型开发器窗口，折叠固体和流体传热 (ht) 节点。

#### 研究 1

需要确定流经框架内侧（或外侧）的热流率，用于计算框架的热导率。为了使该值的精度足够高，求解器的默认相对容差已改为  $10^{-6}$ 。要访问该值，请展开求解器 1 节点，然后单击稳态求解器 1 节点。在稳态求解器设置窗口中，定位到通用栏。

- 1 在主屏幕工具栏中单击  计算。

#### 结果

##### 温度 ( $ht$ )

添加一个全局计算节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

##### 框架的热导率 (L2D) 1

- 1 在模型开发器窗口中展开结果 > 派生值节点。
- 2 右键单击结果 > 派生值并选择全局计算。
- 3 在全局计算的设置窗口中，在标签文本框中键入 “框架的热导率 (L2D) 1”。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D-Up*pv1)/f\_wtot$	W/ (m^2*K)	框架的热透射率 (Uf)

5 单击  **计算**。

### 表格 1

1 转到**表格 1**窗口。

结果应接近**表格 1**中的预期值。

### 结果

#### 表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht)**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 **degC**。

4 在**温度 (ht)**工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 10**进行了比较。

对其他五个基准案例使用相同的仿真方法，以下操作说明描述了要得到计算值所需的步骤。

### 第一种窗户 (COMP1)

在**模型开发器**窗口，折叠**第一种窗户 (comp1)**节点。

### 第二种窗户

---

### 第二种窗户 (COMP2)

在**模型开发器**窗口中展开**第二种窗户 (comp2)**节点。

### 定义 (COMP2)

#### 变量 2

1 在**模型开发器**窗口中展开**第二种窗户 (comp2)> 定义**节点，然后单击**变量 2**。

2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht2.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

4 在**模型开发器**窗口，折叠**第二种窗户 (comp2)**> 定义节点。

## 固体和流体传热 2 (HT2)

### 流体 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**固体和流体传热 2 (ht2)** 节点，然后单击**流体 1**。
- 2 选择“域”2、6、8-10 和 14。

### 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 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**外侧**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rse”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Te”。

### 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 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**内侧（平直区域）**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_n”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。

### 热通量 3

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**，然后选择**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**内侧（拐角区域）**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_p”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。

7 在**模型开发器**窗口，折叠**固体和流体传热 2 (ht2)** 节点。

## 研究 2

在主屏幕工具栏中单击  **计算**。

## 结果

添加一个**全局计算**节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

### 框架的热导率 (L2D) 2

- 1 在**结果**工具栏中单击  **全局计算**。
- 2 在**全局计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“框架的热导率 (L2D) 2”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究 2/ 解 2 (8) (sol2)**。
- 4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D - Up * pv1) / f\_wtot$	W/ (m^2*K)	框架的热透射率 (Uf)

- 5 单击  **计算**。

## 表格 2

- 1 转到**表格 2**窗口。

结果应接近**表格 2**中的预期值。

## 结果

### 表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht2)**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 **degC**。
- 4 在**温度 (ht2)**工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 11**进行了比较。

## 第二种窗户 (COMP2)

在**模型开发器**窗口，折叠**第二种窗户 (comp2)**节点。

## 第三种窗户

---

### 第三种窗户 (COMP3)

在模型开发器窗口中展开第三种窗户 (comp3) 节点。

#### 定义 (COMP3)

##### 变量 3

- 1 在模型开发器窗口中展开第三种窗户 (comp3)> 定义节点，然后单击变量 3。
- 2 在变量的设置窗口中，定位到变量栏。
- 3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht3.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

- 4 在模型开发器窗口，折叠第三种窗户 (comp3)> 定义节点。

### 固体和流体传热 3 (HT3)

##### 流体 1

- 1 在模型开发器窗口中展开固体和流体传热 3 (ht3) 节点，然后单击流体 1。
- 2 选择“域” 2-5、9、10、12、13 和 15-18。

##### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择外侧。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/R_{se}$ ”。
- 6 在  $T_{ext}$  文本框中键入 “ $T_e$ ”。

##### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（平直区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/R_{si\_n}$ ”。

6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。

### 热通量 3

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择热通量。
- 2 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（拐角区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流热通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_p”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。
- 7 在模型开发器窗口，折叠固体和流体传热 3 (ht3) 节点。

编辑默认的网格设置，提高狭窄区域的网格分辨率。

### 网格 3

在模型开发器窗口的第三种窗户 (comp3) 节点下，右键单击网格 3 并选择编辑物理场引导的序列。

### 大小

- 1 在模型开发器窗口的第三种窗户 (comp3)> 网格 3 节点下，单击大小。
- 2 在大小的设置窗口中，单击以展开单元大小参数栏。
- 3 在狭窄区域分辨率文本框中键入 “2”。
- 4 在模型开发器窗口，折叠网格 3 节点。

### 研究 3

在主屏幕工具栏中单击  计算。

### 结果

添加一个全局计算节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

### 框架的热导率 (L2D) 3

- 1 在结果工具栏中单击  全局计算。
- 2 在全局计算的设置窗口中，在标签文本框中键入 “框架的热导率 (L2D) 3”。
- 3 定位到数据栏。从数据集列表中选择研究 3/ 解 3 (15) (sol3)。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D - Up * pv1) / f\_wtot$	W/ (m <sup>2</sup> *K)	框架的热透射率 (Uf)

5 单击  **计算**。

### 表格 3

1 转到**表格 3**窗口。

结果应接近**表格 3**中的预期值。

### 结果

#### 表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht3)**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 **degC**。

4 在**温度 (ht3)**工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 12**进行了比较。

### 第三种窗户 (COMP3)

在**模型开发器**窗口，折叠**第三种窗户 (comp3)**节点。

### 第四种窗户

---

### 第四种窗户 (COMP4)

在**模型开发器**窗口中展开**第四种窗户 (comp4)**节点。

### 定义 (COMP4)

#### 变量 4

1 在**模型开发器**窗口中展开**第四种窗户 (comp4)> 定义**节点，然后单击**变量 4**。

2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht4.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

4 在**模型开发器**窗口，折叠**第四种窗户 (comp4)**> 定义节点。

提高解精度的另一种方法是对温度场的离散化使用二阶单元。对于像这里研究的纯导热模型，二阶单元特别有效。

#### 固体和流体传热 4 (HT4)

- 1 在**模型开发器**窗口的**第四种窗户 (comp4)**节点下，单击**固体和流体传热 4 (ht4)**。
- 2 在**固体和流体传热**的**设置**窗口中，单击以展开**离散化**栏。
- 3 从**温度**列表中选择**二次拉格朗日单元**。

#### 流体 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**固体和流体传热 4 (ht4)**节点，然后单击**流体 1**。
- 2 选择“域”2、4、7、10、12、13和15。

#### 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 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**外侧**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rse”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Te”。

#### 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 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**内侧 (平直区域)**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “1/Rsi\_n”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “Ti”。

#### 热通量 3

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**，然后选择**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**内侧（拐角区域）**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流传热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/Rsi\_p$ ”。
- 6 在  $T_{ext}$  文本框中键入 “ $T1$ ”。
- 7 在**模型开发器**窗口，折叠**固体和流体传热 4 (ht4)** 节点。

编辑默认的网格设置，提高狭窄区域的网格分辨率。

#### 网格 4

在**模型开发器**窗口的**第四种窗户 (comp4)** 节点下，右键单击**网格 4** 并选择**编辑物理场引导的序列**。

#### 大小

- 1 在**模型开发器**窗口的**第四种窗户 (comp4)**>**网格 4** 节点下，单击**大小**。
- 2 在**大小**的设置窗口中，定位到**单元大小**参数栏。
- 3 在**狭窄区域分辨率**文本框中键入 “ $2$ ”。
- 4 在**模型开发器**窗口，折叠**网格 4** 节点。

#### 研究 4

在**主屏幕**工具栏中单击  **计算**。

#### 结果

添加一个**全局计算**节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

#### 框架的热导率 (L2D) 4

- 1 在**结果**工具栏中单击  **全局计算**。
- 2 在**全局计算**的设置窗口中，在**标签**文本框中键入 “**框架的热导率 (L2D) 4**”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究 4/ 解 4 (22) (sol4)**。
- 4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D-Up*pv1) / f\_wtot$	W/ (m <sup>2</sup> *K)	框架的热透射率 (Uf)

- 5 单击  **计算**。

#### 表格 4

1 转到**表格 4** 窗口。

结果应接近**表格 4** 中的预期值。

#### 结果

##### 表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht4)** 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 **degC**。

4 在**温度 (ht4)** 工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 13** 进行了比较。

#### 第四种窗户 (COMP4)

在**模型开发器**窗口，折叠**第四种窗户 (comp4)** 节点。

#### 第五种窗户

---

#### 第五种窗户 (COMP5)

在**模型开发器**窗口中展开**第五种窗户 (comp5)** 节点。

#### 定义 (COMP5)

##### 变量 5

1 在**模型开发器**窗口中展开**第五种窗户 (comp5)> 定义**节点，然后单击**变量 5**。

2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht5.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

4 在**模型开发器**窗口，折叠**第五种窗户 (comp5)> 定义**节点。

#### 固体和流体传热 5 (HT5)

##### 流体 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**固体和流体传热 5 (ht5)** 节点，然后单击**流体 1**。

2 选择“域”2、5、6、8、14、15 和 17。

### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择外侧。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/Rse$ ”。
- 6 在  $T_{ext}$  文本框中键入 “ $Te$ ”。

### 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 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（平直区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/Rsi_n$ ”。
- 6 在  $T_{ext}$  文本框中键入 “ $Ti$ ”。

### 热通量 3

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择热通量。
- 2 在热通量的设置窗口中，定位到边界选择栏。
- 3 从选择列表中选择内侧（拐角区域）。
- 4 定位到热通量栏。从通量类型列表中选择对流通量。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/Rsi_p$ ”。
- 6 在  $T_{ext}$  文本框中键入 “ $Ti$ ”。
- 7 在模型开发器窗口，折叠固体和流体传热 5 (ht5) 节点。

### 研究 5

在主屏幕工具栏中单击  计算。

### 结果

添加一个全局计算节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

### 框架的热导率 (L2D) 5

- 1 在结果工具栏中单击  全局计算。
- 2 在全局计算的设置窗口中，在标签文本框中键入 “框架的热导率 (L2D) 5”。
- 3 定位到数据栏。从数据集列表中选择研究 5/ 解 5 (29) (sol5)。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D - Up * pv1) / f\_wtot$	W/ (m^2*K)	框架的热透射率 (Uf)

5 单击  **计算**。

#### 表格 5

1 转到**表格 5**窗口。

结果应接近**表格 5**中的预期值。

#### 结果

##### 表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht5)**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 **degC**。

4 在**温度 (ht5)**工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 14**进行了比较。

#### 第五种窗户 (COMP5)

在**模型开发器**窗口，折叠**第五种窗户 (comp5)**节点。

#### 第六种窗户

---

#### 第六种窗户 (COMP6)

在**模型开发器**窗口中展开**第六种窗户 (comp6)**节点。

#### 定义 (COMP6)

##### 变量 6

1 在**模型开发器**窗口中展开**第六种窗户 (comp6) > 定义**节点，然后单击**变量 6**。

2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
L2D	$\text{int\_internal}(\text{ht6.ntflux}/(\text{Te}-\text{Ti}))$	W/(m·K)	框架的热导率

4 在**模型开发器**窗口，折叠**第六种窗户 (comp6)**> 定义节点。

### 固体和流体传热 6 (HT6)

#### 流体 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**固体和流体传热 6 (ht6)** 节点，然后单击**流体 1**。
- 2 选择“域” 2-7、9 和 10。

#### 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 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**外侧**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/\text{Rse}$ ”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “ $\text{Te}$ ”。

#### 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 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**内侧（平直区域）**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/\text{Rsi}_n$ ”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “ $\text{Ti}$ ”。

#### 热通量 3

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**，然后选择**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**内侧（拐角区域）**。
- 4 定位到**热通量**栏。从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。
- 5 在  $h$  文本框中键入 “ $1/\text{Rsi}_p$ ”。
- 6 在  $T_{\text{ext}}$  文本框中键入 “ $\text{Ti}$ ”。

7 在**模型开发器**窗口，折叠**固体和流体传热 6 (ht6)** 节点。

### 研究 6

在主屏幕工具栏中单击  计算。

### 结果

添加一个**全局计算**节点，用于计算框架的热导率和热透射率。

#### 框架的热导率 (L2D) 6

- 1 在**结果**工具栏中单击  **全局计算**。
- 2 在**全局计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“框架的热导率 (L2D) 6”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究 6/ 解 6 (36) (sol6)**。
- 4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
L2D	W/ (m*K)	框架的热导率 (L2D)
$(L2D-Up*pv1)/f\_wtot$	W/ (m^2*K)	框架的热透射率 (Uf)

- 5 单击  计算。

### 表格 6

- 1 转到**表格 6**窗口。

结果应接近**表格 6**中的预期值。

### 结果

#### 表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 温度 (ht6)**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 **degC**。
- 4 在**温度 (ht6)**工具栏中单击  **绘制**。

当前绘图组显示了温度分布；与**图 15**进行比较。