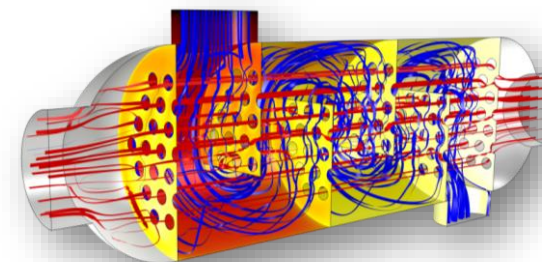


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL® 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

COMSOL Multiphysics® 传热建模

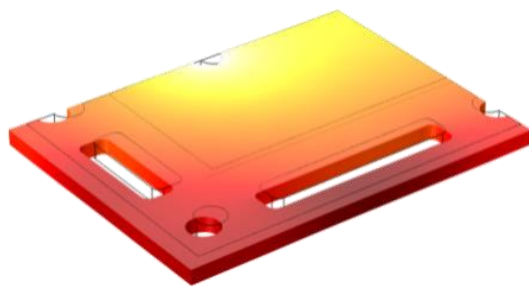
Part I

王刚 博士
技术总监
COMSOL 中国



日程安排

- 模块及传热接口简介
- 传热方程及边界条件
- 非等温流
- 管道与多孔介质传热
- 湿热传递
- 相变传热
- 电磁热
- 热辐射
- 集总热系统

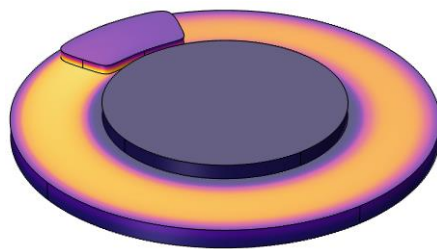


传导

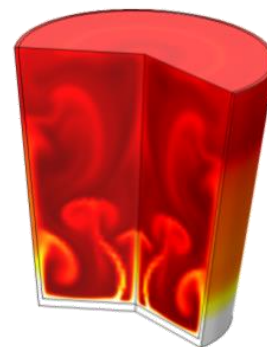


生物加热

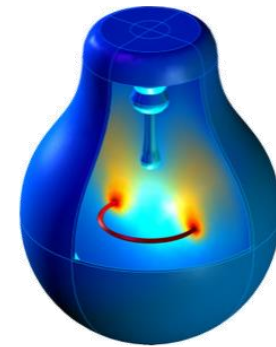
固体移动时的传热



流体中的对流



辐射



COMSOL 2019

■ 多物理场仿真建模工具

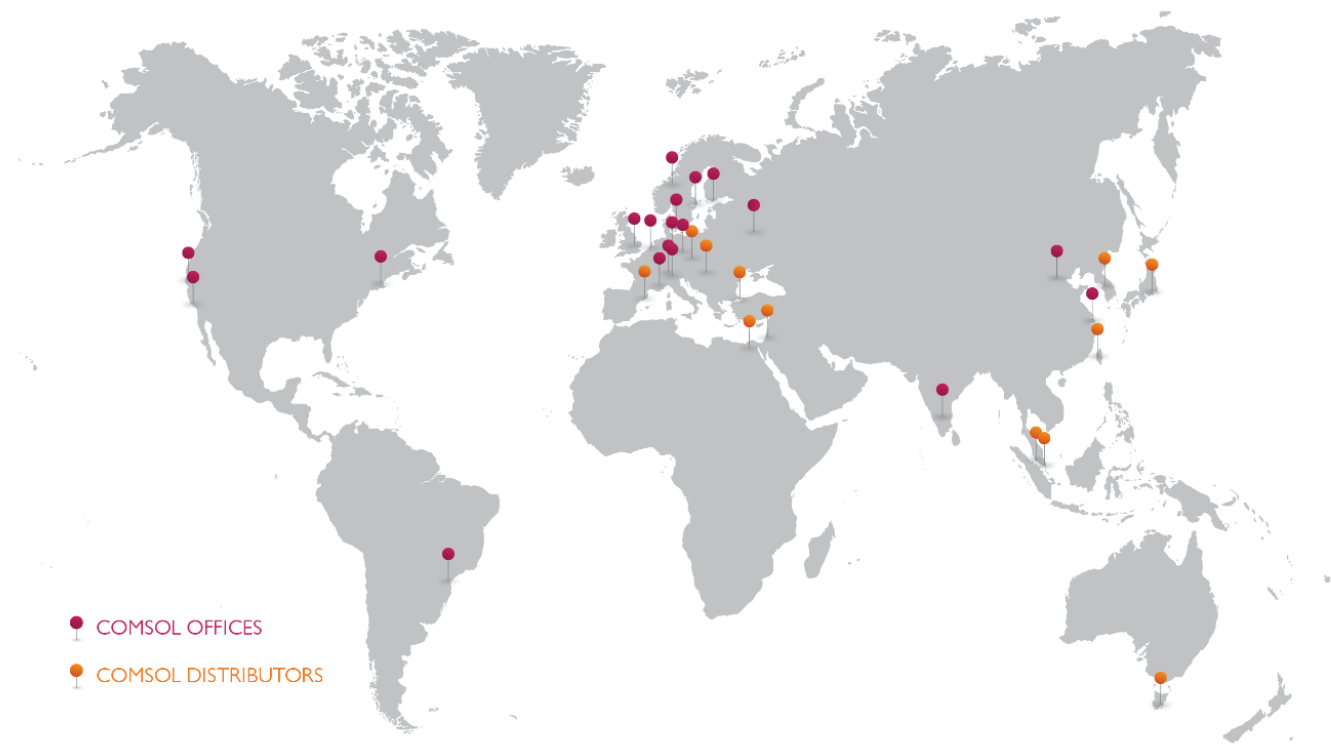
- 丰富的预置多物理场建模接口
- 灵活的通用数学接口
- 自带 CAD 建模工具
- 专业的附加模块
- 与第三方软件同步链接
 - 主流 CAD 工具
 - MATLAB®
 - Excel®

■ 开发工具

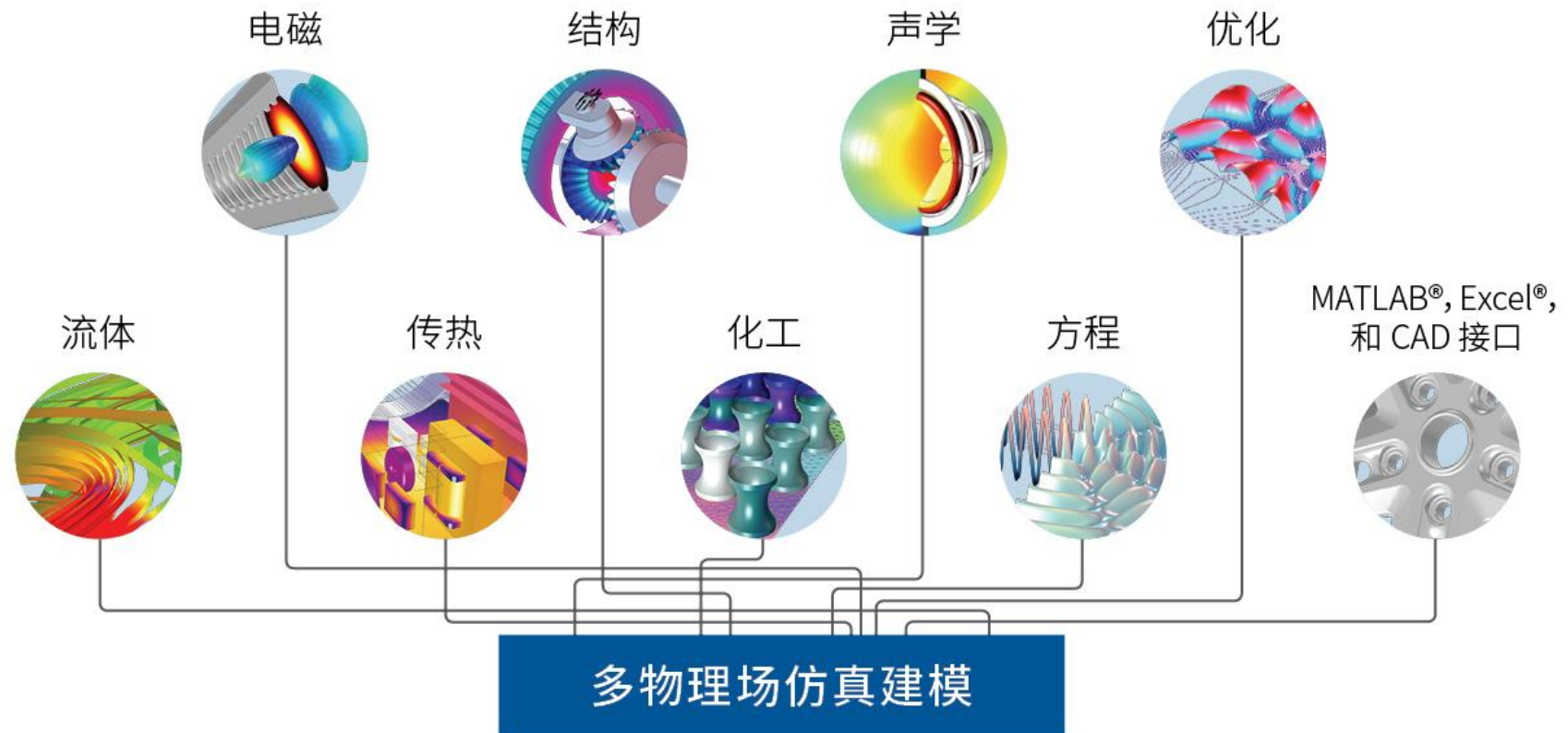
- 模型开发器
- 物理场开发器
- App 开发器

■ 仿真 App 部署工具

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

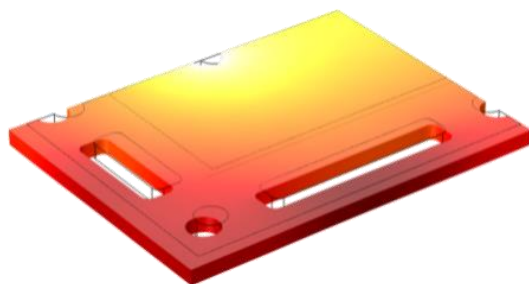


COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真平台



第一天

- 模块及传热接口简介
- 传热方程及边界条件
- 非等温流
- 管道与多孔介质传热
- 湿热传递
- 相变传热
- 电磁热
- 热辐射
- 集总热系统

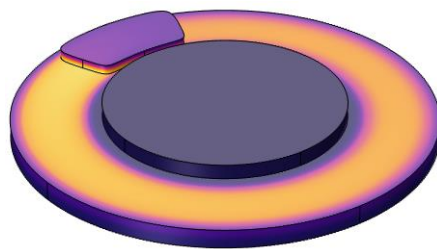


传导

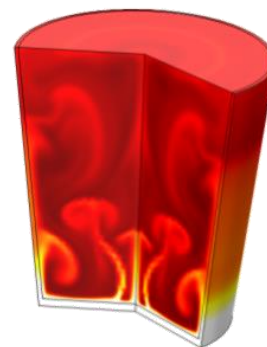


生物加热

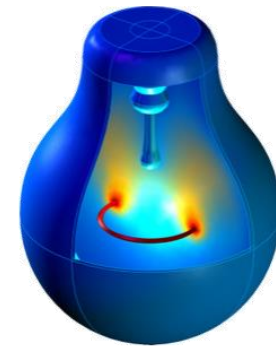
固体移动时的传热



流体中的对流



辐射



相关模块简介

基本功能

COMSOL® 软件 产品库

COMSOL
MULTIPHYSICS®

理解、预测和优化工程
设计的仿真建模平台

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

编译、管理和部署
仿真 App 的工具

COMSOL

COMSOL

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 等离子体模块
- 半导体模块

流体 & 传热

- CFD 模块
 - 搅拌器模块
- 微流体模块
- 多孔介质流模块
- 地下水流模块
- 管道流模块
- 分子流模块
- 金属加工模块
- 传热模块

结构 & 声学

- 结构力学模块
 - 非线性结构材料模块
 - 复合材料模块
 - 岩土力学模块
 - 疲劳模块
 - 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

- 化学反应工程模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块

接口

- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD 导入模块
- 设计模块
- ECAD 导入模块
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid Edge®
- File Import for CATIA® V5

• 基本功能

- 几何
- 求解器
- 网格
- 材料数据 (基本)
- 后处理

• 预置传热相关物理场

- 热传导
- 热对流 (手动)
- 焦耳热 (稳态, 瞬态)

传热模块

COMSOL® 软件 产品库

COMSOL
MULTIPHYSICS®

理解、预测和优化工程
设计的仿真建模平台

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

编译、管理和部署
仿真 App 的工具

COMSOL

COMSOL

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 等离子体模块
- 半导体模块

流体 & 传热

- CFD 模块
 - 搅拌器模块
- 微流体模块
- 多孔介质流模块
- 地下水流模块
- 管道流模块
- 分子流模块
- 金属加工模块
- 传热模块

结构 & 声学

- 结构力学模块
 - 非线性结构材料模块
 - 复合材料模块
 - 岩土力学模块
 - 疲劳模块
 - 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

- 化学反应工程模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块

接口

- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD 导入模块
- 设计模块
- ECAD 导入模块
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid Edge®
- File Import for CATIA® V5

传热

- 固体传热 (ht)
- 流体传热 (ht)
- 局部热不平衡
- 多孔介质传热 (ht)
- 生物传热 (ht)

热湿传递

- 建筑材料
- 湿空气

薄结构

- 薄壳传热 (htsh)
- 薄膜传热 (htsh)
- 裂隙传热 (htsh)

共轭传热

- 层流
- 湍流

辐射

- 表面对表面辐射传热 (ht)
- 参与介质中的辐射传热 (ht)
- 表面对表面辐射 (rad)
- 吸收介质中的辐射束 (rbam)
- 参与介质中的辐射 (rpm)

电磁热

- 焦耳热
- 热电效应

多物理场-电磁热

COMSOL® 软件 产品库

COMSOL
MULTIPHYSICS®

理解、预测和优化工程
设计的仿真建模平台

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

编译、管理和部署
仿真 App 的工具

COMSOL

COMSOL

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 等离子体模块
- 半导体模块

流体 & 传热

- CFD 模块
 - 搅拌器模块
- 微流体模块
- 多孔介质流模块
- 地下水流模块
- 管道流模块
- 分子流模块
- 金属加工模块
- 传热模块

结构 & 声学

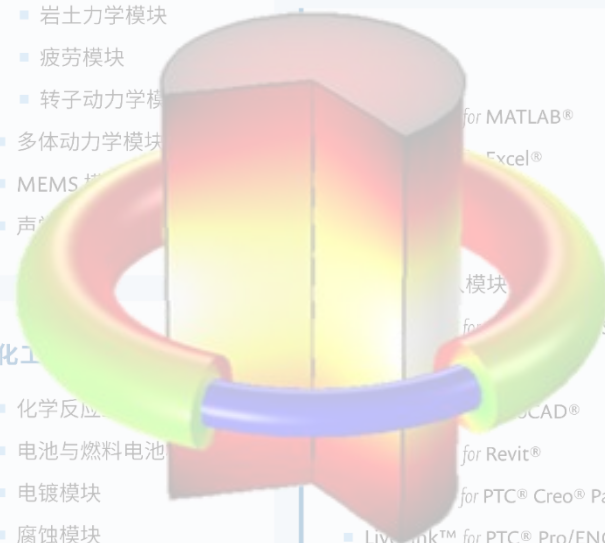
- 结构力学模块
 - 非线性结构材料模块
 - 复合材料模块
 - 岩土力学模块
 - 疲劳模块
 - 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

- 化学反应模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块



铜柱感应加热

- AC/DC
 - 焦耳热
 - 感应加热
 - 热电效应
- RF
 - 微波加热
- 波动光学
 - 激光加热
- 射线光学
 - 射线加热

多物理场-热结构耦合

COMSOL® 软件 产品库

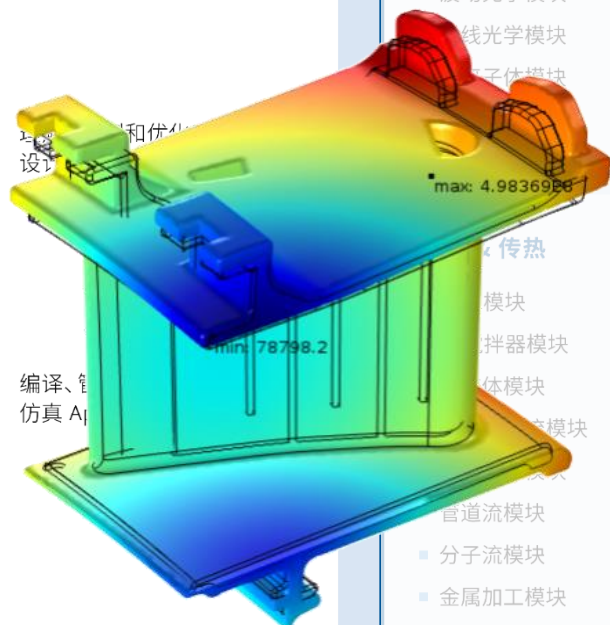
COMSOL
MULTIPHYSICS®

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

COMSOL

COMSOL



叶片上的热应力分析

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 光子晶体模块

结构 & 声学

- 结构力学模块
 - 非线性结构材料模块
 - 复合材料模块
 - 岩土力学模块
 - 疲劳模块
 - 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

- 化学反应工程模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块

接口

- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD 导入模块
- 设计模块
- ECAD 导入模块
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid Edge®
- File Import for CATIA® V5

■ 结构力学

- 热应力
- 焦耳加热 & 热膨胀

■ 声学

- 热粘性声学
- 热粘性声学-结构耦合

■ MEMS

- 热应力
- 焦耳加热 & 热膨胀
- 热弹性

多物理场-非等温流

COMSOL® 软件 产品库

COMSOL
MULTIPHYSICS®

理解、预测和优化工程
设计的仿真建模平台

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

编译、管理和部署
仿真 App 的工具

COMSOL

COMSOL

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 等离子体模块
- 半导体模块

流体 & 传热

- CFD 模块
 - 搅拌器模块
- 微流体模块
- 多孔介质流模块
- 地下水流模块
- 管道流模块
- 分子流模块
- 金属加工模块
- 传热模块

结构 & 声学

- 结构力学模块
 - 非线性结构材料模块
 - 复合材料模块
 - 岩土力学模块
 - 疲劳模块
 - 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

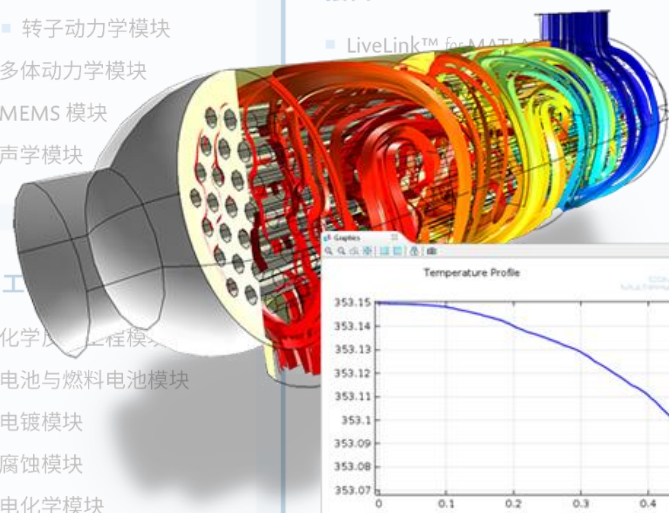
- 化学反应工程模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块

接口

- LiveLink™ for MATLAB



管式热交换器中的非等温流

- CFD模块
 - 层流 & 湍流
 - 多相流
- 搅拌器模块
 - 非等温湍流
- 多孔介质流模块
 - 多孔介质传热
- 传热模块
 - 非等温流
 - 热辐射

多物理场-化学及电化学热源

COMSOL® 软件产品库

COMSOL
MULTIPHYSICS®

理解
设计

仿真 App 部署产品

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

编译
仿真

COMSOL

COMSOL

附加产品

电磁

- AC/DC 模块
- RF 模块
- 波动光学模块
- 射线光学模块
- 等离子体模块

结构 & 声学

- 结构力学模块
- 非线性结构材料模块
- 复合材料模块
- 岩土力学模块
- 疲劳模块
- 转子动力学模块
- 多体动力学模块
- MEMS 模块
- 声学模块

化工

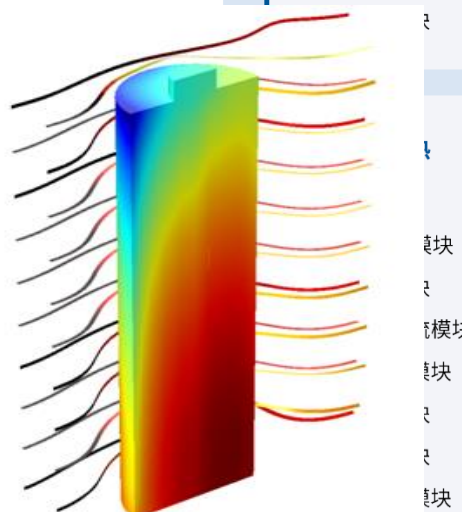
- 化学反应工程模块
- 电池与燃料电池模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块

接口

- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD 导入模块
- 设计模块
- ECAD 导入模块
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid Edge®
- File Import for CATIA® V5



■ 传热模块

锂离子电池的温度分布

■ 化学反应工程

- 通过组分热焓和等压热容计算不同状态下的化学反应热

■ 电化学及电池

- 通过相关的电化学接口计算化学反应热和欧姆热

传热接口简介

三种传热机制

传热机制：热传导

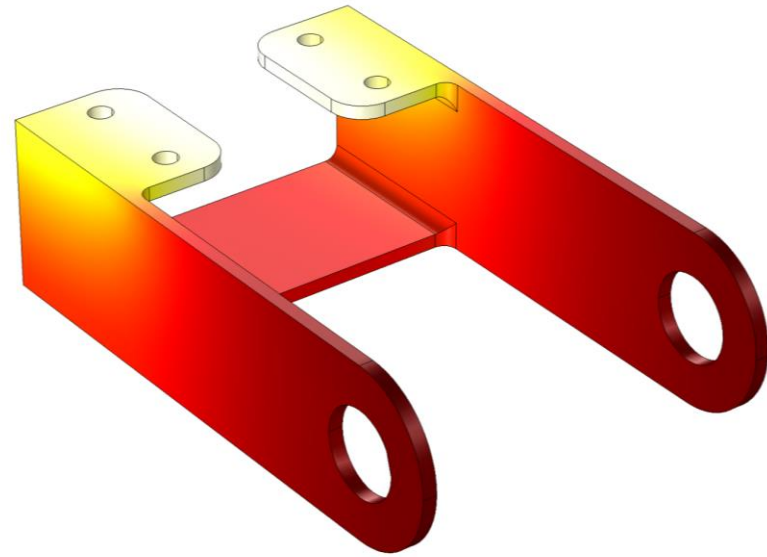
- 热传导

- 能量在相邻粒子之间进行传输，比如晶格震动, 气体分子碰撞, 电子迁移
- 与温度梯度成正比

- 主要特征

- 材料的导热性 k
- 温差

$$-k\nabla T$$



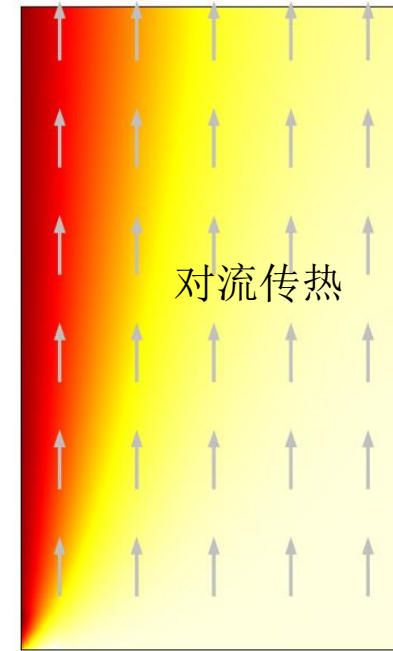
通过支架中的热传导

传热机制：热对流

- 热对流
 - 传热发生在一个以一定流速流动的流体内部
 - 通过流动/运输
- 主要特征
 - 材料具有热容
 - 质量流率
 - 温度

$$\rho C_p \mathbf{u} T$$

冷壁（红色）

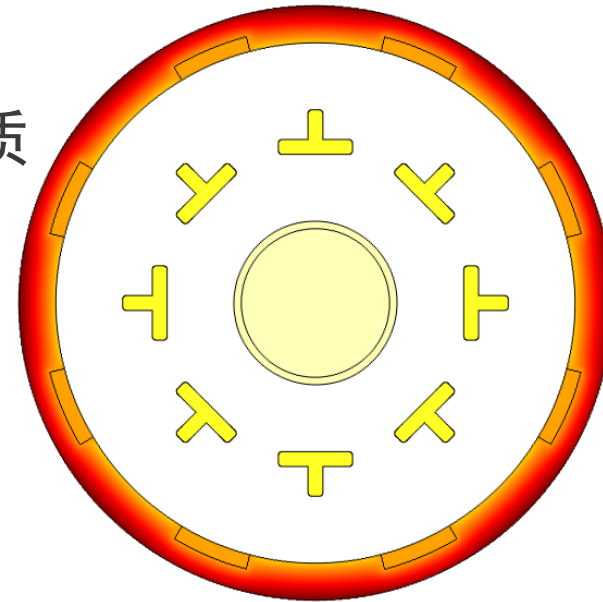


热入口（白色）

传热机制：热辐射

- 热辐射
 - 光子输运: 发射, 传播, 吸收和反射
 - 考虑视角因子
- 透明介质（空气，真空等, ...）或半透明介质
- 主要特征
 - 发射率和视角因子
 - 表面/环境的温差四次方

$$n^2 \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$



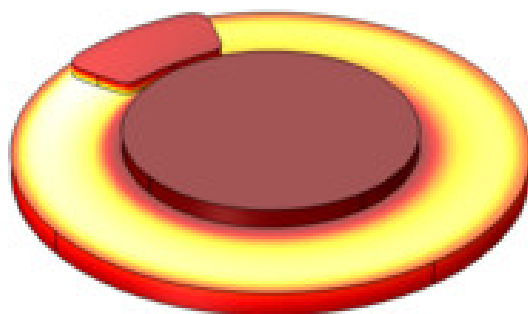
TPV 电池中的辐射传热

热传导相关接口

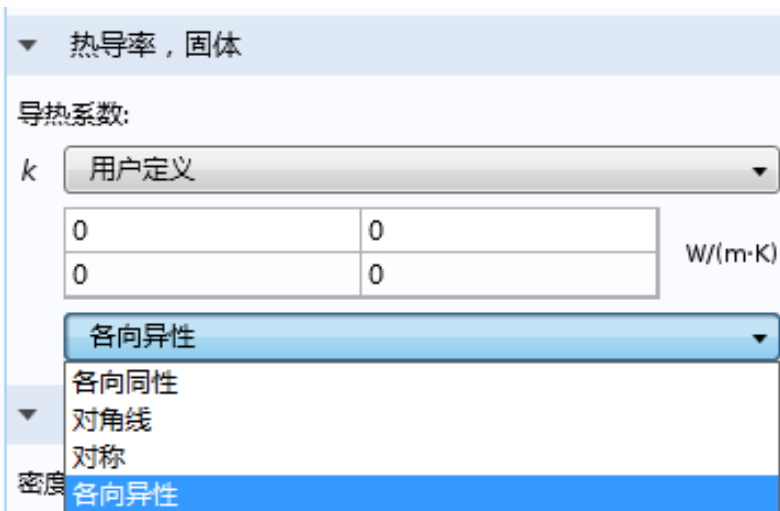
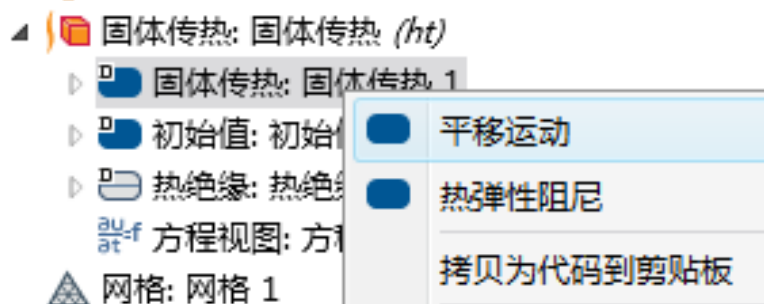
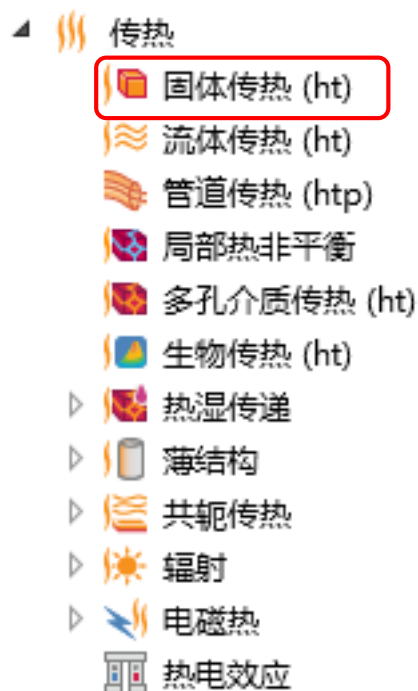
■ 固体中的传热

$$k \nabla T$$

- 通过传导传热
- 平移运动
- 基本模块包含功能



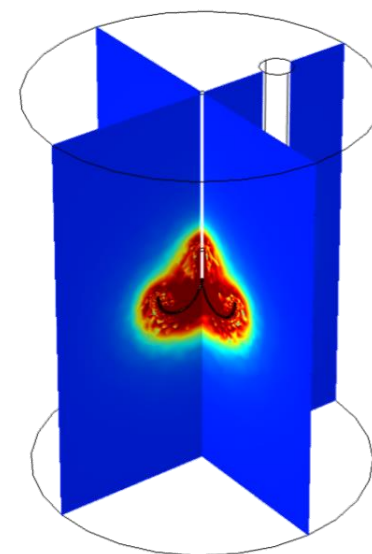
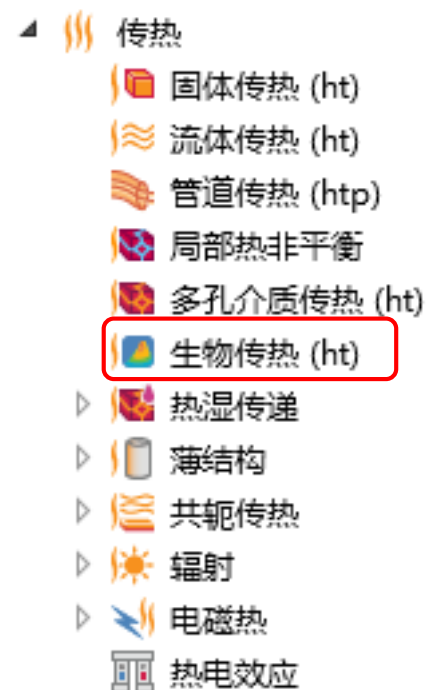
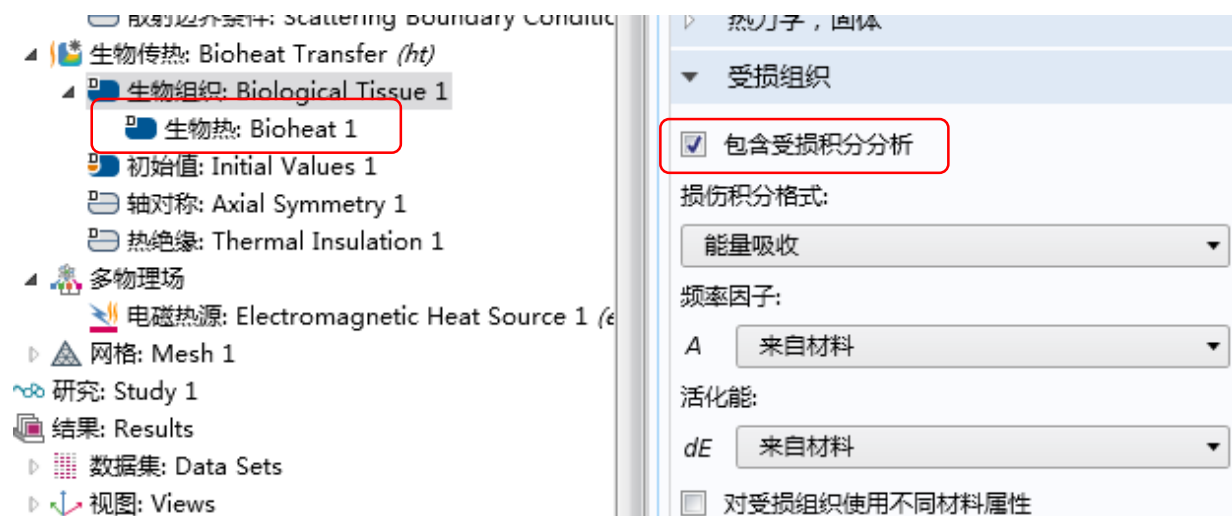
刹车片上的温度分布



热传导相关接口

■ 生物传热

- 生物组织中的热传导
- 预定义了关于生物热的源项
- 损伤积分分析

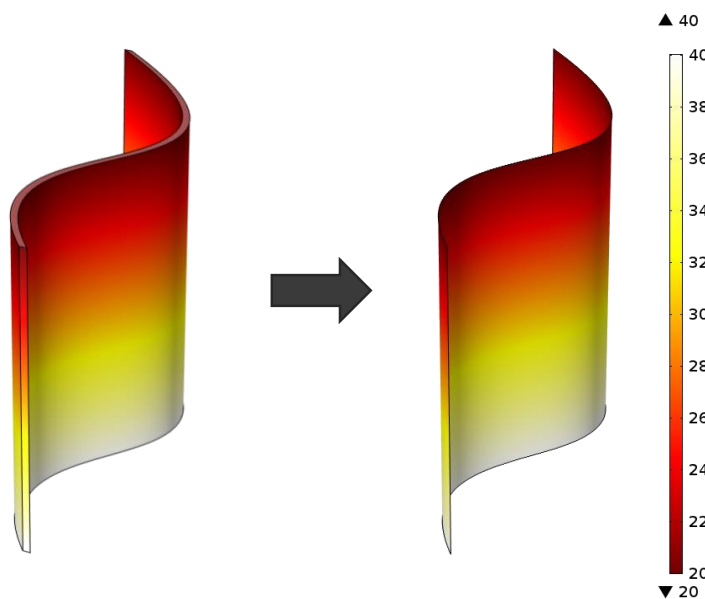


肿瘤治疗:
损伤组织的显示

热传导相关接口

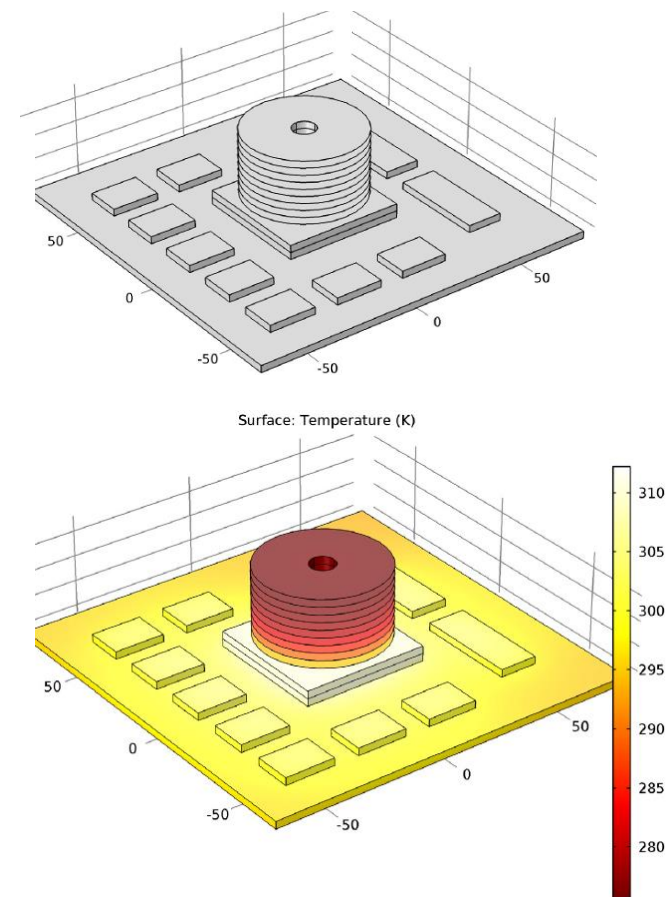
■ 薄壳传热

- 厚度方向上的温度变化可以忽略不计



将3D体简化为2D面

- 传热
 - 固体传热 (ht)
 - 流体传热 (ht)
 - 管道传热 (htp)
 - 局部热非平衡
 - 多孔介质传热 (ht)
 - 生物传热 (ht)
 - 热湿传递
 - 薄结构
 - 薄壳传热 (htsh)**
 - 薄膜传热 (htsh)
 - 裂隙传热 (htsh)
 - 共轭传热
 - 辐射
 - 电磁热
 - 热电效应

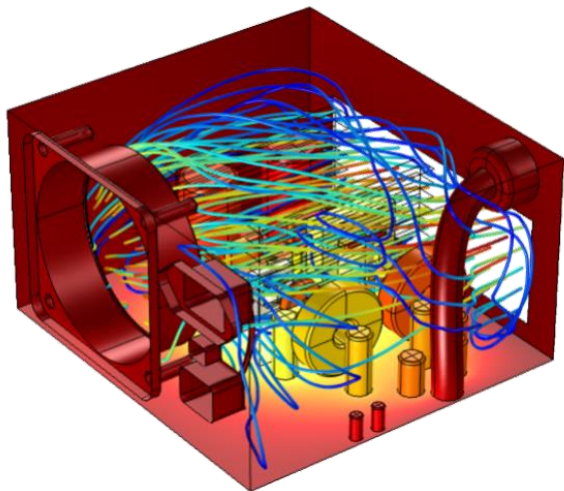


APP库案例: disk stack heat sink

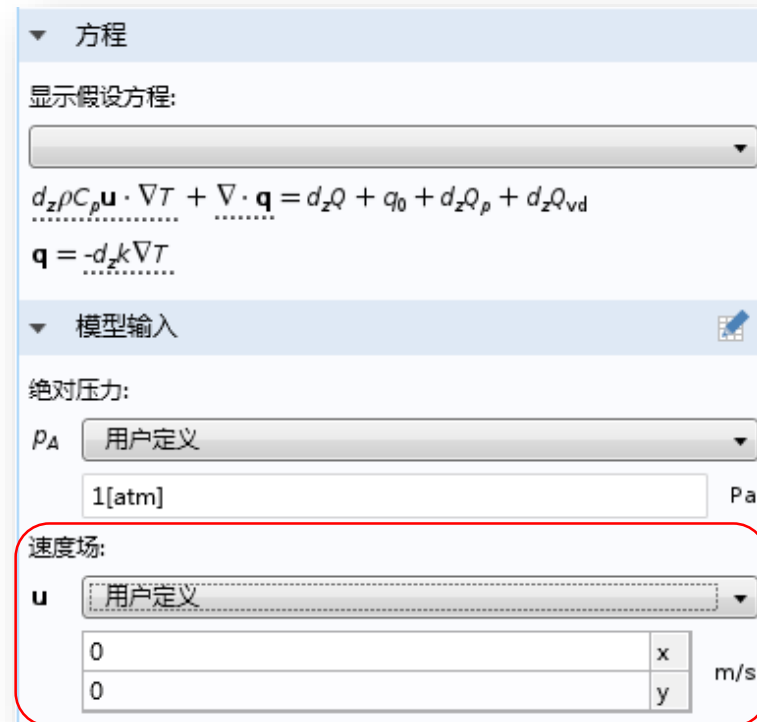
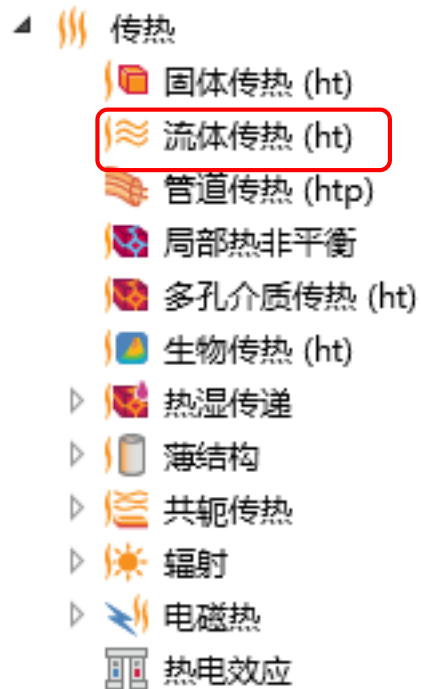
热对流相关接口

■ 流体传热

- 基本模块中包含
- 指定流速或者利用相关流体模块计算得到的流速
- 自然和强制对流

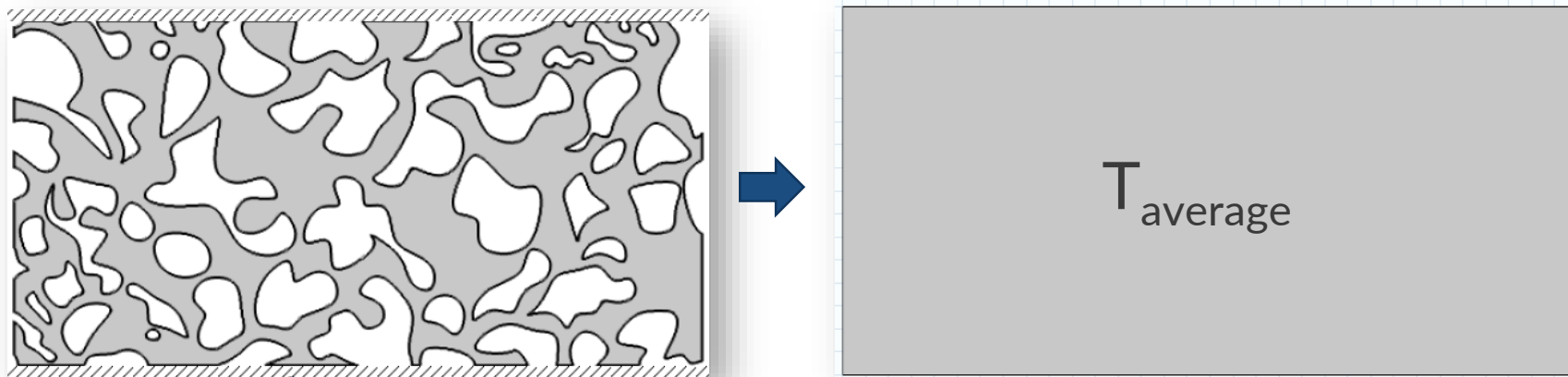


计算机机箱内部的强制对流冷却



热对流相关接口

- 多孔介质中的传热
 - 按平均热力学性质描述孔隙空间和孔隙材料
 - 从其他接口耦合速度 (比如: Darcy 定律接口)



- ▲ 传热
 - ▢ 固体传热 (ht)
 - ▢ 流体传热 (ht)
 - ▢ 管道传热 (htp)
 - ▢ 局部热非平衡
 - ▢ 多孔介质传热 (ht)
 - ▢ 生物传热 (ht)
 - ▢ 热湿传递
 - ▢ 薄结构
 - ▢ 共轭传热
 - ▢ 辐射
 - ▢ 电磁热
 - ▢ 热电效应

热对流相关接口

■ 局部热非平衡

- 分别计算孔隙空间和孔隙材料的温度

传热

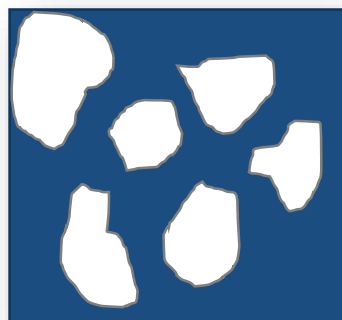
- 固体传热 (ht)
- 流体传热 (ht)
- 管道传热 (htp)
- 局部热非平衡**
- 多孔介质传热 (ht)
- 生物传热 (ht)
- 热湿传递
- 薄结构
- 共轭传热
- 辐射
- 电磁热
- 热电效应



$T_{average}$



T_s and T_f

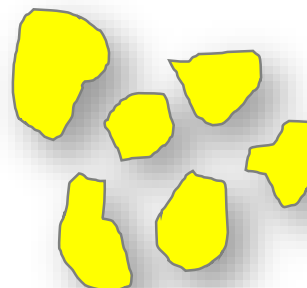


T_f

$$q_{sf}(T_s - T_f)$$



$$q_{sf} = a_{sf} h_{sf}$$

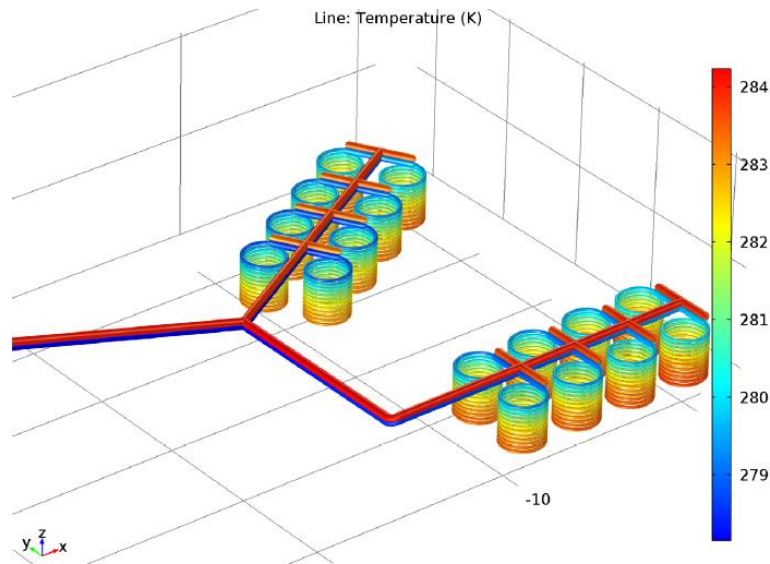


T_s

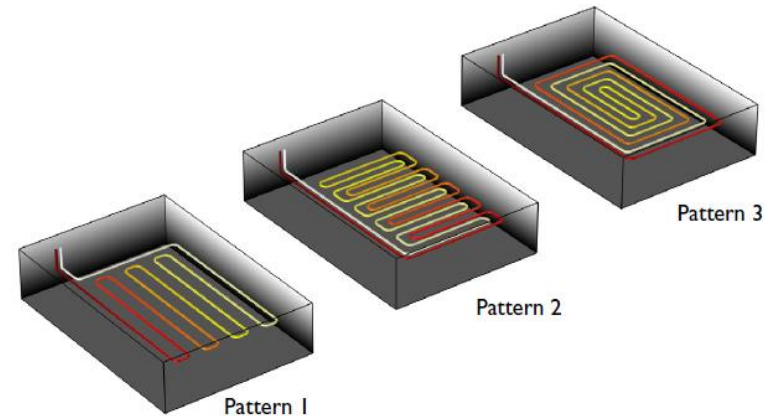
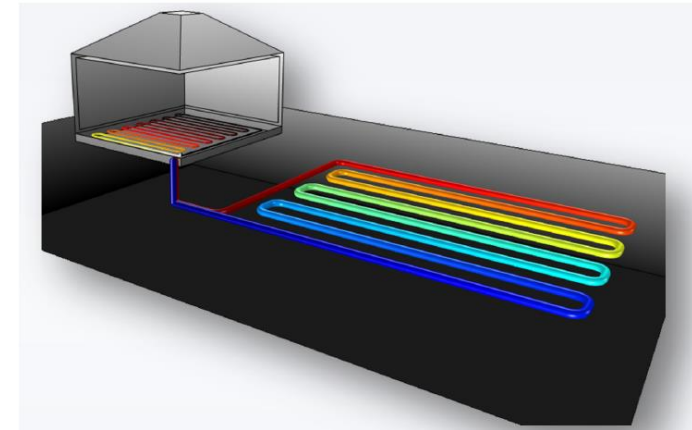
热对流相关接口

■ 管道传热

- 将3D尺度下的管道几何简化为1D下的线几何



- 传热
 - 固体传热 (ht)
 - 流体传热 (ht)
 - 管道传热 (htp)
 - 局部热非平衡
 - 多孔介质传热 (ht)
 - 生物传热 (ht)
- 热湿传递
- 薄结构
- 共轭传热
- 辐射
- 电磁热
- 热电效应



APP库案例: ground heat recovery

热对流相关接口

■ 共轭传热

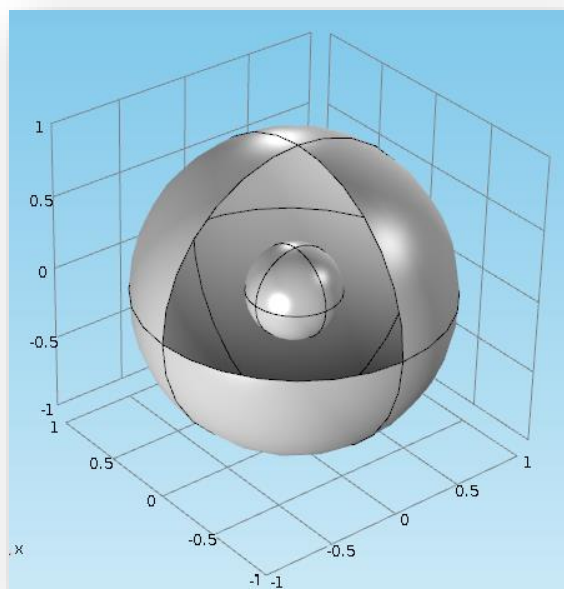
- 自动耦合流体流动与流体中传热和固体中传热
- 层流/湍流
- 应用
 - 部件的对流冷却
 - 热交换器



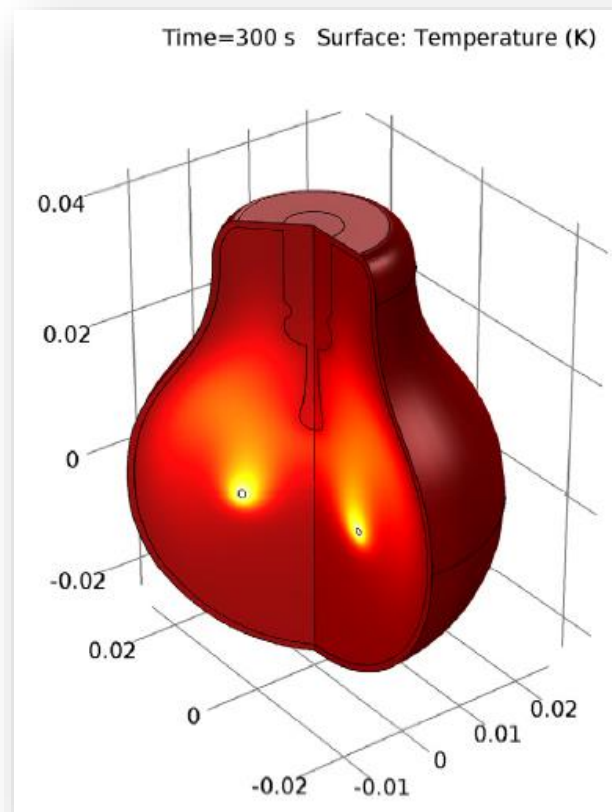
热辐射

■ 表面对表面辐射

- 辐射守恒 (视角因子)
- 只发生在表面上







- ▲ 传热
 - ▢ 固体传热 (ht)
 - ▢ 流体传热 (ht)
 - ▢ 管道传热 (htp)
 - ▢ 局部热非平衡
 - ▢ 多孔介质传热 (ht)
 - ▢ 生物传热 (ht)
 - ▢ 热湿传递
 - ▢ 薄结构
 - ▢ 共轭传热
- ▲ 辐射
 - ▢ 表面对表面辐射传热 (ht)
 - ▢ 参与介质中的辐射传热 (ht)
 - ▢ 表面对表面辐射 (rad)
 - ▢ 吸收介质中的辐射束 (rbam)
 - ▢ 参与介质中的辐射 (rpm)
- ▢ 电磁热
- ▢ 热电效应



APP案例: view factor

热辐射

- 在参与介质中的辐射
 - 参与介质中会发生吸收，发射，散射，反射
 - 体内辐射守恒
 - 比如：高炉，玻璃

光学厚度: $\tau = \int_0^s \kappa ds$			
$\tau \ll 1$	$\tau \sim 1$	$\tau \gg 1$	$\tau \gg \gg 1$
			
表面对表面辐射 (透明)	DOM	P1, Rosseland	表面对表面辐射 (不透明)

- ▲ 传热
 - ▢ 固体传热 (ht)
 - ▢ 流体传热 (ht)
 - ▢ 管道传热 (htp)
 - ▢ 局部热非平衡
 - ▢ 多孔介质传热 (ht)
 - ▢ 生物传热 (ht)
 - ▢ 热湿传递
 - ▢ 薄结构
 - ▢ 共轭传热
- ▲ 辐射
 - ▢ 表面对表面辐射传热 (ht)
 - ▢ 参与介质中的辐射传热 (ht)
 - ▢ 表面对表面辐射 (rad)
 - ▢ 吸收介质中的辐射束 (rbam)
 - ▢ 参与介质中的辐射 (rpm)
 - ▢ 电磁热
 - ▢ 热电效应

传热方程及边界条件

能量守恒(广义的传热)方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (-k \nabla T)}_{\text{传导项}} = \underbrace{Q}_{\text{热 源}} - \underbrace{\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T}_{\text{流体对流项}} + \underbrace{\tau : \mathbf{S}}_{\text{粘性发热}} + \underbrace{\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p_a \right)}_{\text{压力功}}$$

累积项

传热方程

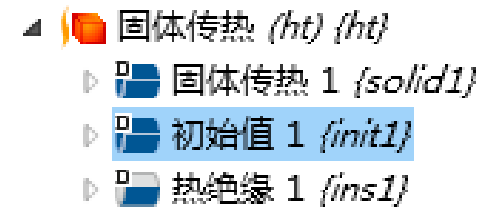
- 求解得到: $T = T(x, y, z, t) \rightarrow$ 因变量
- 输入参数:
 - 材料属性: 密度 ρ , 热容 C_p , 导热系数 k
 - 速度场 \mathbf{u} : 直接定义/来自其他物理场接
 - 等式右边: 热源 Q
- $$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$
- 求解该方程需要些什么条件呢?

条件

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

- 瞬态问题:

- 需要指定当 $t=0$ 时的 $T \rightarrow$ 初始值



- 边界处会发生什么?

- 区分信息 “外部” \rightarrow 边界条件
 - 模拟过程中边界条件是关键点: 怎样的边界条件才是正确的?



边界条件 $T = T_0$

- 狄氏边界条件
- 边界处的温度恒定
- 也可能是一个函数, 比如:

▼ 温度

温度:

T_0 K

- 几乎总是简化的假设

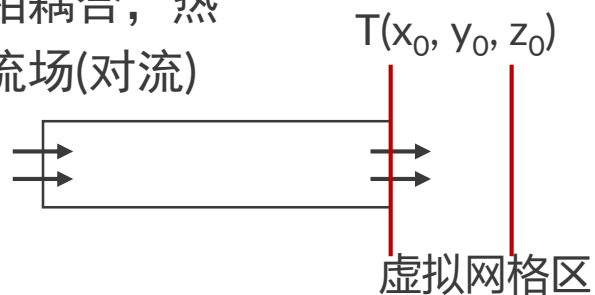
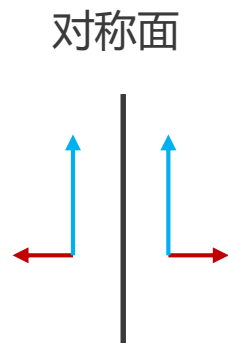


边界条件 $-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = q_0$

- 纽曼边界条件
- 指定边界处的热通量
- $q_0 = 0$

- 热绝缘(缺省)
- 对称边界
- 流出热通量

- 与流体流动相耦合，热量的传输由流场(对流)控制



边界条件 $-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = q_0$

■ $q_0 \neq 0$

— 常见的, ([W] 或 [W/m²])

热通量

☒ 广义向内热通量

q_0 W/m²

☐ 对流热通量

$q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$

☐ 热耗率

$q_0 = \frac{P_0}{A}$

对流: 定义换热系数
(请参阅[下一节](#))

边界热源

☒ 广义源

Q_b W/m²

☐ 热耗率

$Q_b = \frac{P_b}{A}$

边界 对 边 对 点 对 全局

流体传热

☐ 温度 ☐ 热绝缘 ☐ 流出

☐ 流入 ☐ 对称 ☒ 热通量

☐ 开放边界 ☐ 周期性条件 ☒ 边界热源

☐ 热接触 ☐ 薄层 ☐ 薄膜

☐ 沉积的束功率

辐射

☐ 漫反射表面

更多

☐ 弱贡献 ☐ 弱约束 ☐ 逐点约束

牛顿冷却定律: $-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h(T_{\text{ext}} - T)$

- 混合边界条件
 - 取决于 T 和 ∇T
- 换热系数 h [$\frac{W}{m^2 K}$] 和外部温度 T_{ext}
 - 用户定义
 - 从库中选择 h
- 对流热通量: 描述边界能吸收/释放多少热量, 比如:

Process	h [W/(m ² K)]
自然对流	
气体	2 - 25
液体	50 - 100
强制对流	
气体	25 - 250
液体	100 - 20,000

热通量

☐ 广义向内热通量

☒ 对流热通量

$q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$

传热系数:

用户定义

传热系数:

h 0 W/(m²·K)

外部温度:

T_{ext} 用户定义

293.15[K] K

☐ 热耗率

$q_0 = \frac{P_0}{A}$

换热系数

- 当出现以下情形时可以使用
 - 对参与冷却/加热的流体的速度和温度不关注.
 - h 不会沿着几何的边界发生严重的变化.
- 模型被简化, 有效地减少了计算时间和计算规模
- 实验/计算数值
- 基于Nusselt 数 $Nu(Re, Pr, Ra) = \frac{hL}{k}$

雷诺数

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

普朗特数

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

瑞利数

$$Ra = Gr Pr = \frac{\rho^2 g \beta C_p \Delta T L^3}{\mu k}$$

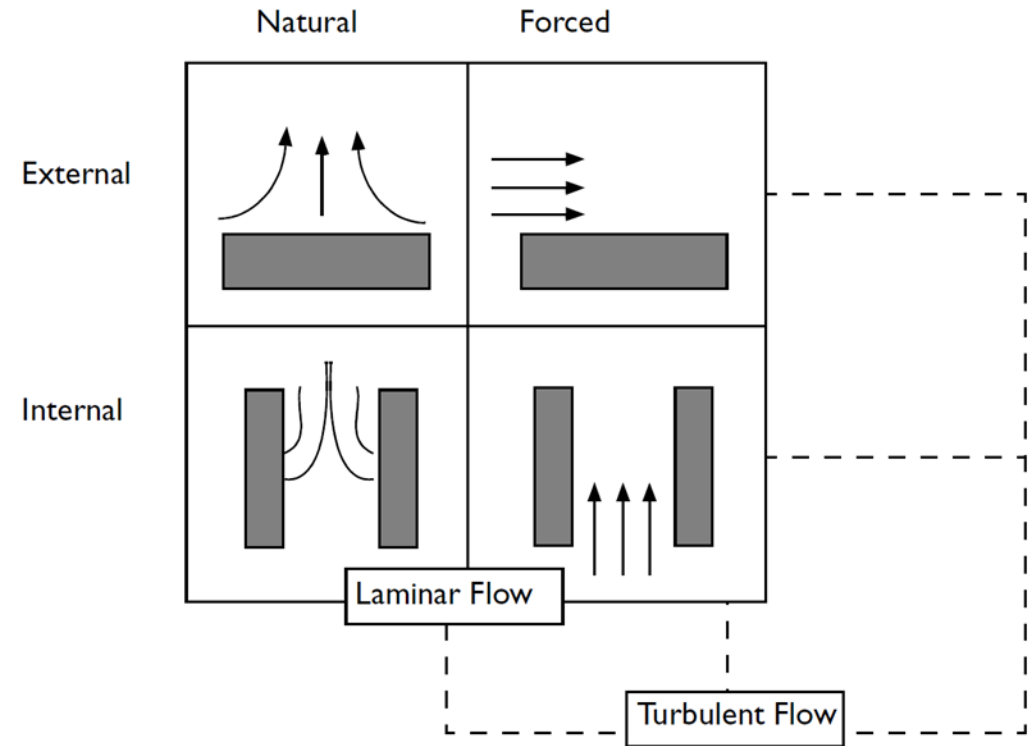
换热系数

■ 计算公式

- 常用配置库(传热模块中)
- 参考用户手册
- Heat Transfer Module Users Guide, Page 67-74

■ 预制流体

- 空气
- 水
- 变压器油
- 湿空气



换热系数

自然对流

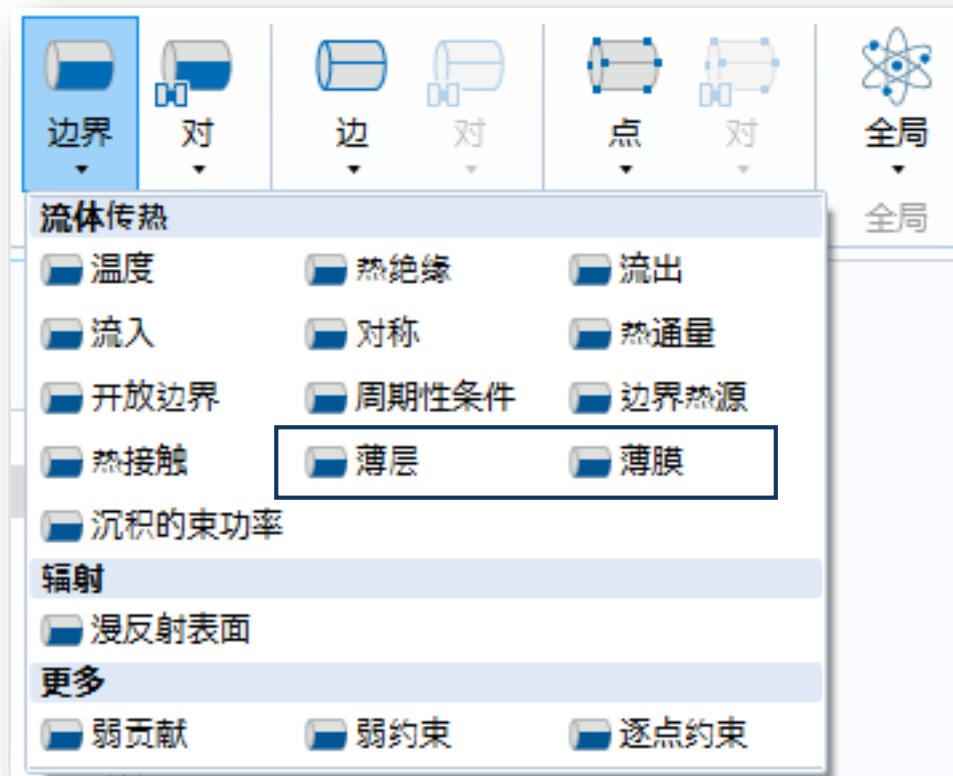
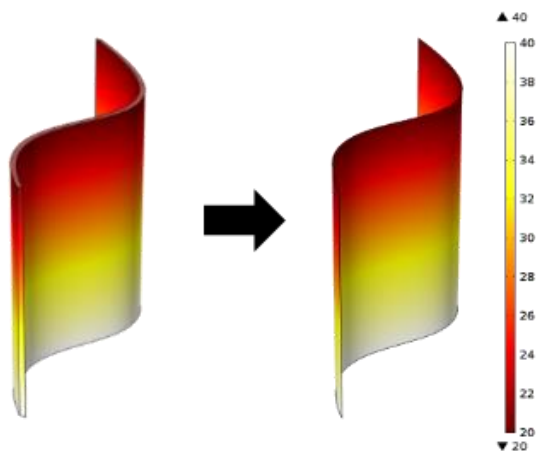
- Grashof 数为浮力和粘性力的比值
- 则有 $Nu = C Gr^m Pr^n$
 - C 取决于几何
- 外部自然对流
 - 垂直壁
 - 平板, 上方/下方
 - 倾斜壁
- 内部自然对流
 - 窄烟道, 平行板
 - 窄烟道, 圆形管

强制对流

- Reynolds数是惯性力和粘性力的比值 $Nu = C Re^m Pr^n$
- 则有:
 - C 取决于几何
- 两者类型的 Nu
 - 积分形式: 取决于被冷却表面的总长度, 导致一个平均的VCCR(传递系数)
 - 局部: 导致一个在被冷却表面上取决于位置的VCCR(传递系数)

薄层条件

- 将3D域简化为2D的边界
 - 简化网格
 - 减少计算量
- 应用：大区域中的薄层结构
 - 粘结剂、涂层
 - 薄板
 - 空气间隙
 - 润滑膜



薄层条件

■ 常规（通用）

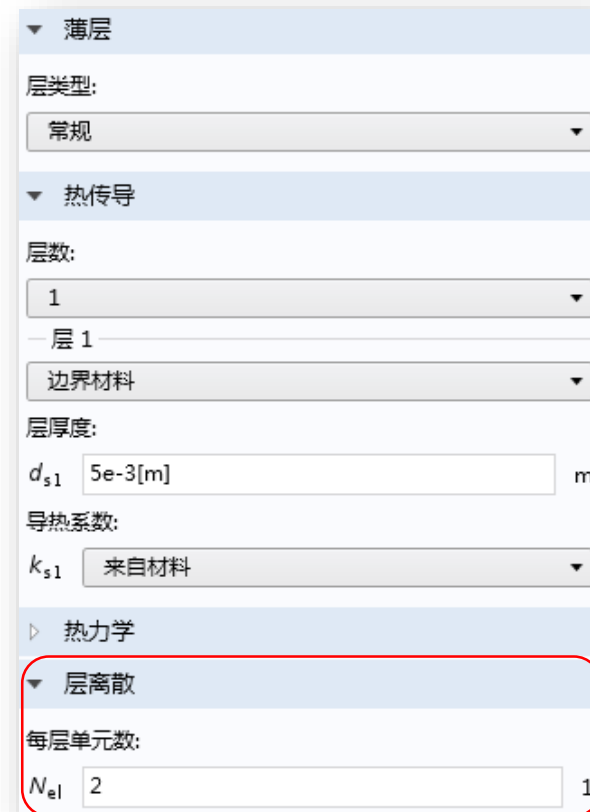
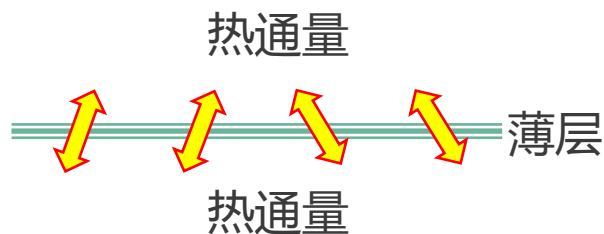
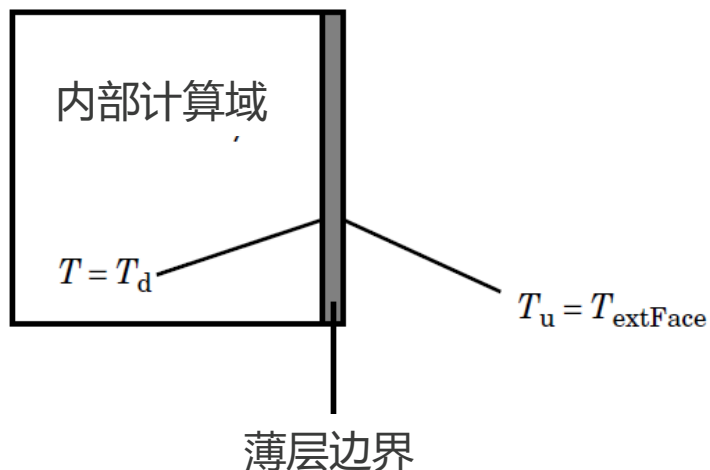
- 层被离散
- 厚度方向为衍生维度

$$\rho_{si} c_{p,si} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla_t \cdot \mathbf{q}_{si} = Q_{si}$$

$$\mathbf{q}_{si} = -k_{si} (\nabla_t T_s + \nabla_n T_s)$$

$$T_u = (T_s)_{L=0}$$

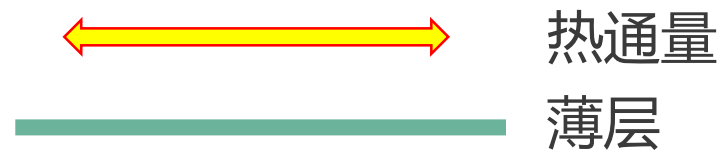
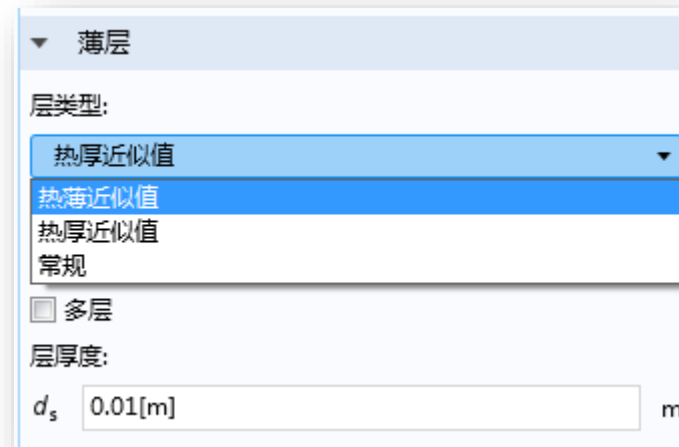
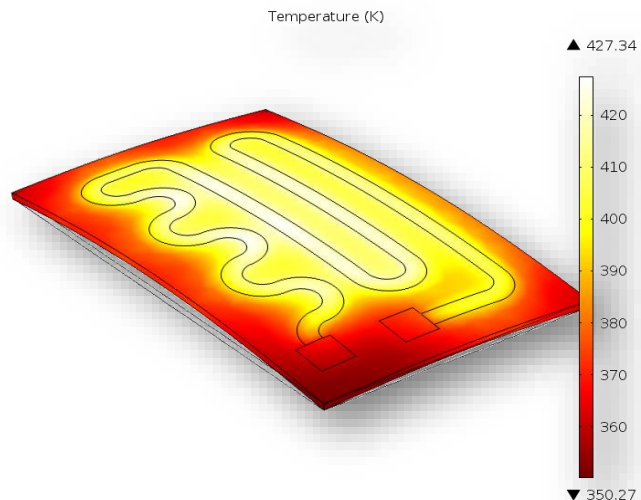
$$T_d = (T_s)_{L=d_s}$$



薄层条件

■ 热薄近似

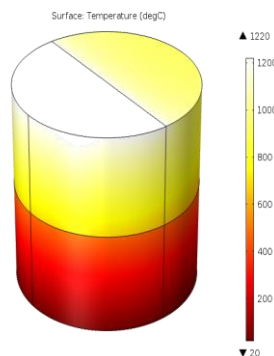
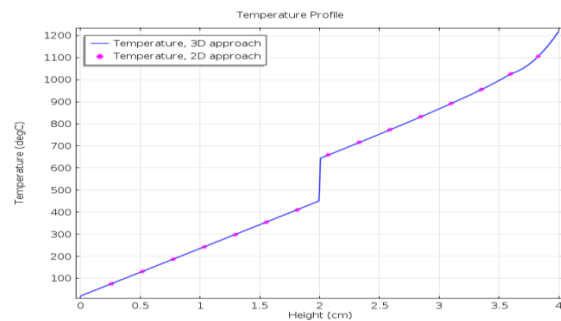
- 没有增加额外的自由度
 $-n \cdot (-k \nabla T) = d_s Q_s - (-d_s k_s \nabla_t T)$
- 沿着薄层进行导热
- 厚度方向上没有温度梯度，比如印刷电路板上的走线



薄层条件

■ 热厚近似

- 薄层具有很高的热阻 $R_S = \frac{d_S}{k_S}$
 $-n_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = -k_S \frac{T_u - T_d}{d_S}$ bzw.
 $-n_u \cdot (-k_u \nabla T_u) = -k_S \frac{T_d - T_u}{d_S}$
- 同一个边界上部和底部的温度差 \rightarrow 温度有个跃迁



薄层

层类型:
热厚近似

指定:
热阻

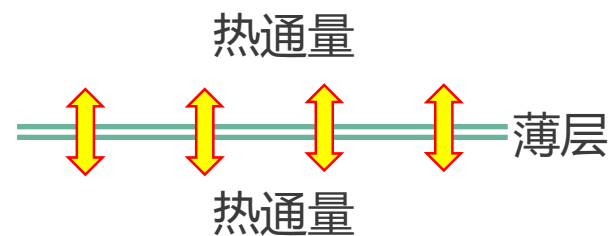
热阻:
 R_S 1/Heat_alfe K·m²/W

层厚度:
 d_S 0.01[m] m

热力学

层密度:
 ρ_s 来自材料

层热容:
 $C_{p,s}$ 来自材料



薄膜及薄杆条件

- 薄膜:
 - 输入速度场和化学组分的浓度
- 薄杆:
 - 简化为1D线



▼ 模型输入

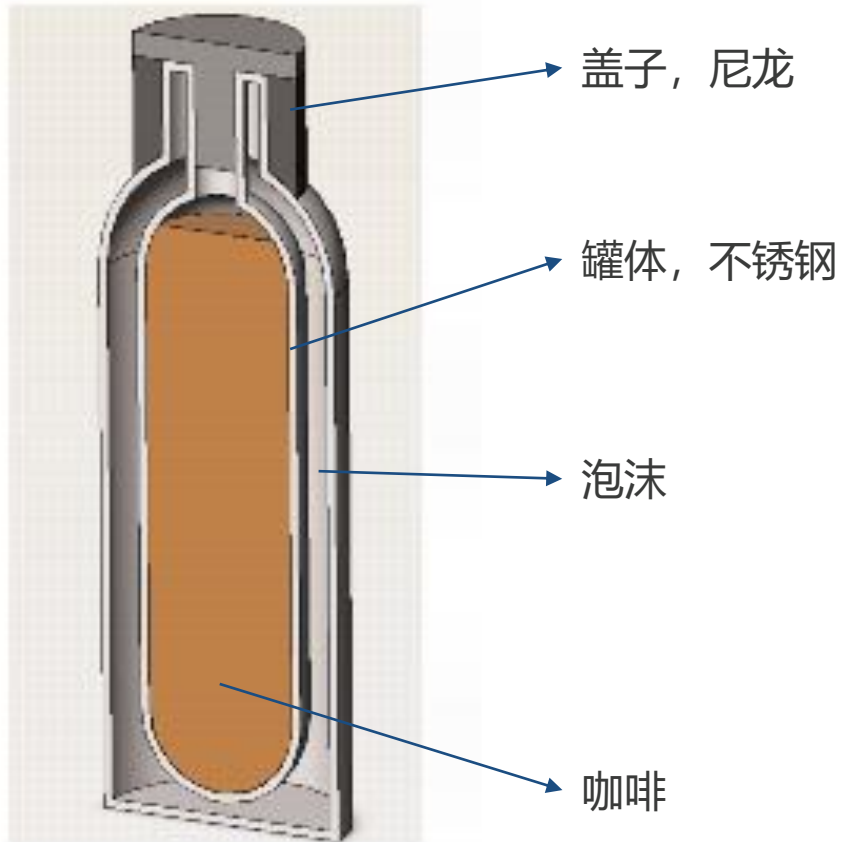
温度:
 T 温度 (ht)

绝对压力:
 p_A 用户定义
1[atm] Pa

速度场:
 u 用户定义
0 r
0 z m/s

浓度:
 c 用户定义
0 mol/m³

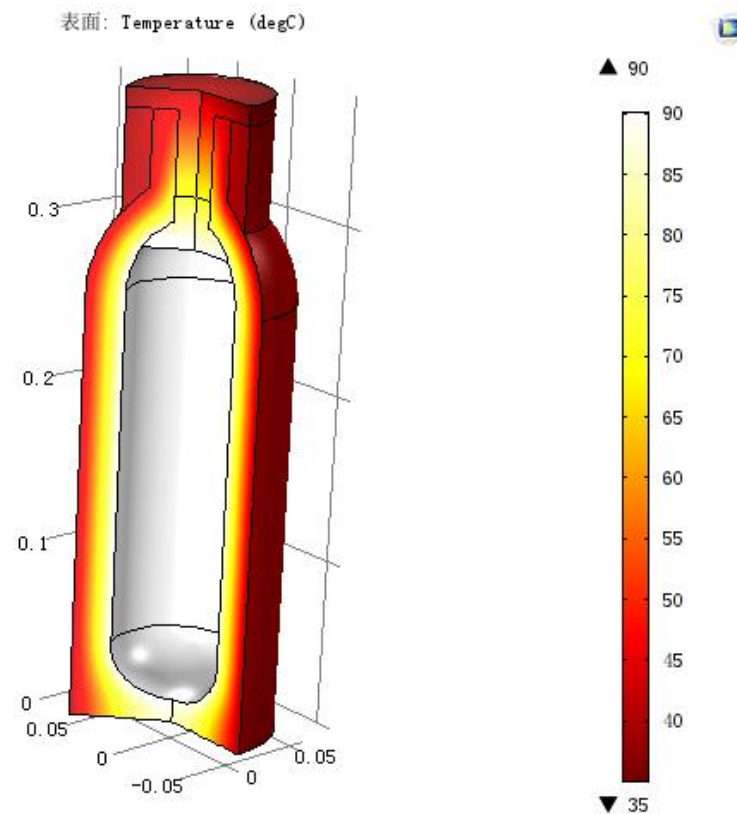
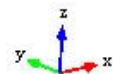
案例演示：Vacuum flask



- 问题：
 - 1.如何简化几何?
 - 2.边界条件如何设置?
 - 3.不锈钢罐体很薄, 可能会导致怎样的结果, 该如何处理?

案例演示: Vacuum flask

- 组件: Component 1 (*comp1*) {*comp1*}
 - 定义
 - 几何: Geometry 1 (*geom1*)
 - 材料
 - 固体传热: Heat Transfer in Solids (*ht*) {*ht*}
 - 固体传热: Heat Transfer in Solids 1 (*solid1*)
 - 初始值: Initial Values 1 (*init1*)
 - 轴对称: Axial Symmetry 1 (*axi1*)
 - 热绝缘: Thermal Insulation 1 (*ins1*)
 - 薄层: Thin Layer 1 (*tl1*)
 - 温度: Temperature 1 (*temp1*)
 - 热通量: Heat Flux 1 (*hf1*)
 - 热通量: Heat Flux 2 (*hf2*)



Vacuum flask进一步简化：等温域

- 具有均一温度分布的区域:

- $mC_p \frac{\partial T}{\partial t} = q$

▲ 固体传热: 固体传热 {ht} {ht}

■ 固体: 固体 1 {solid1}

■ 初始值: 初始值 1 {init1}

■ 轴对称: 轴对称 1 {axi1}

■ 热绝缘: 热绝缘 1 {ins1}

■ 等温域界面: 等温域界面 1 {idi1}

■ 等温域: 等温域 1 {id1}

■ 初始值: 初始值 2 {init2}

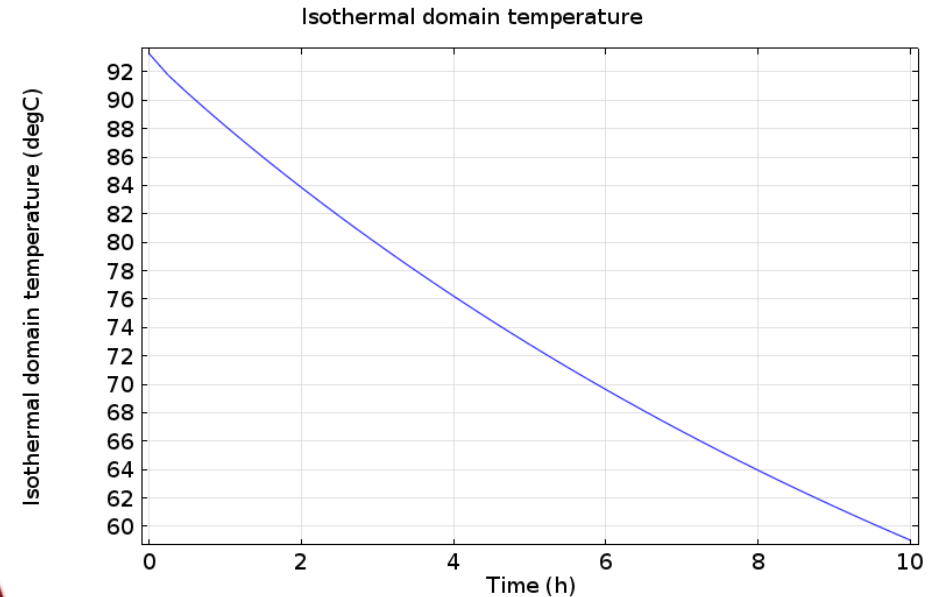
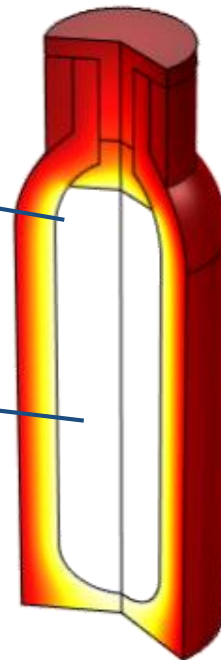
■ 薄层: 薄层 1 {tl1}

■ 热通量: 热通量 1 {hf1}

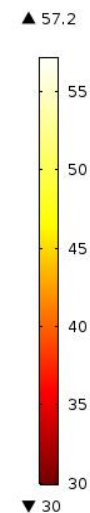
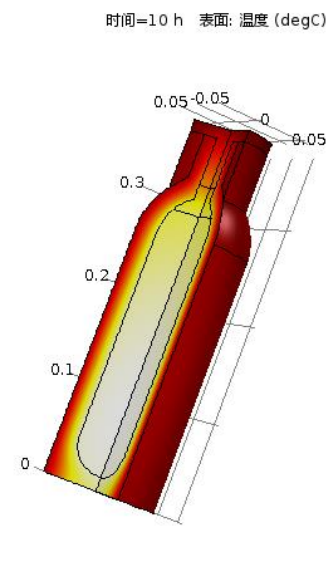
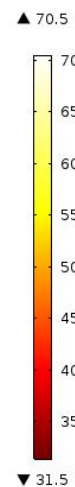
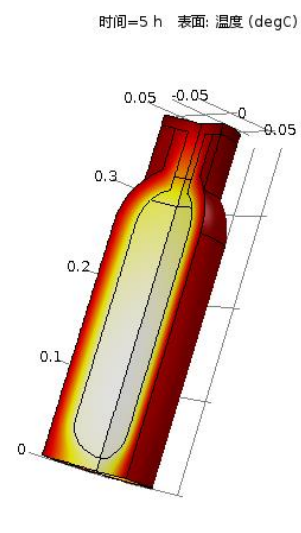
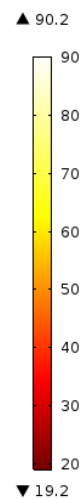
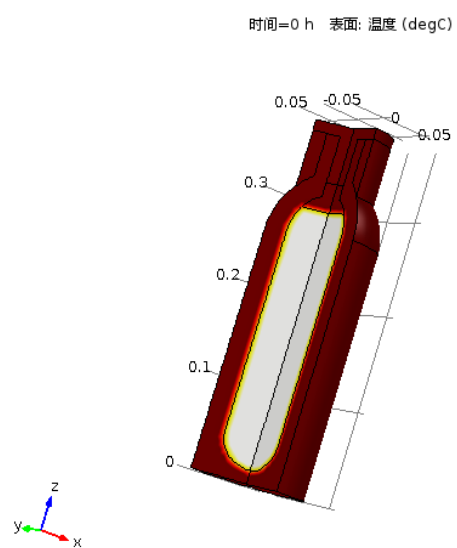
■ 热通量: 热通量 2 {hf2}

与其他域之间的边界条件

材料属性

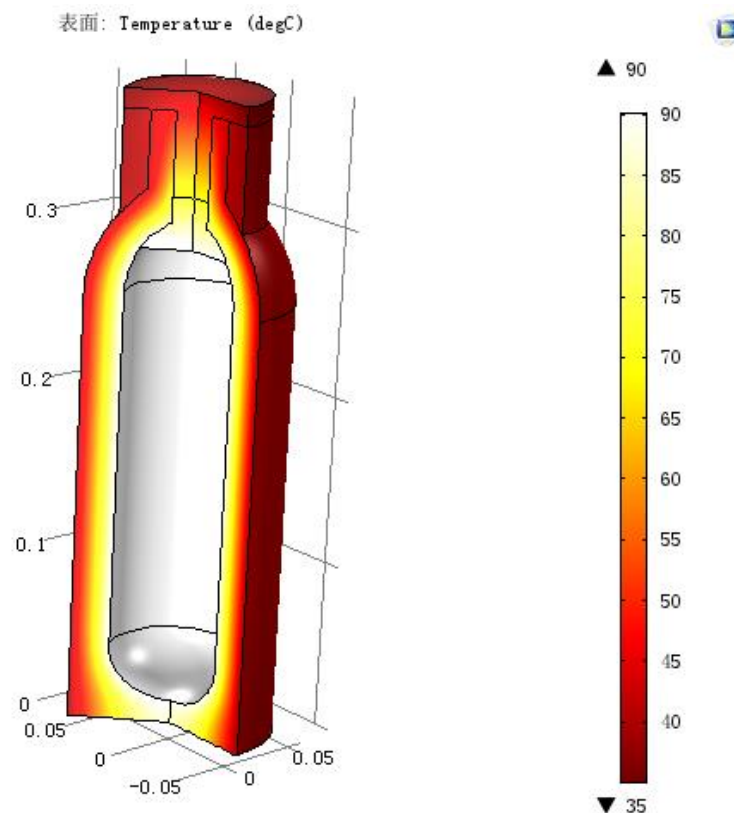
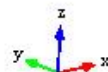


考虑咖啡的温度变化



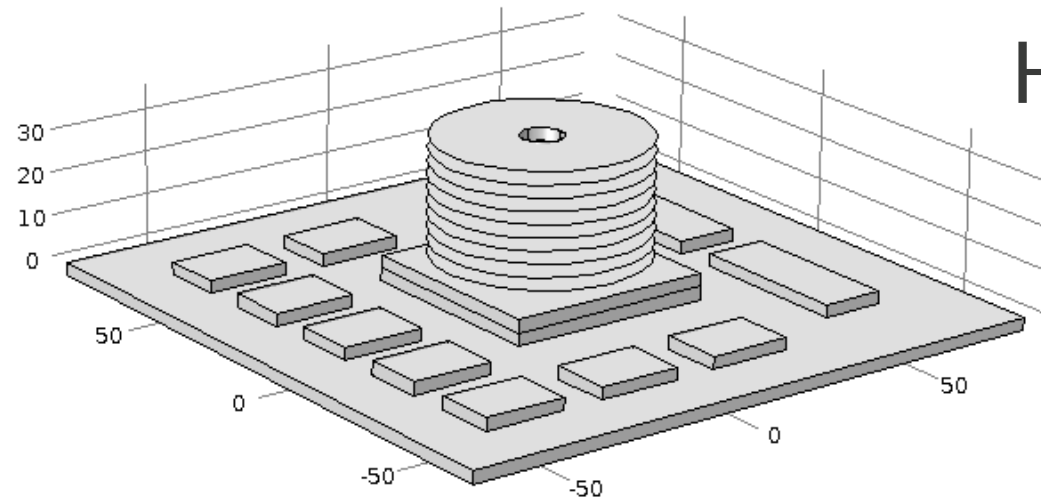
案例演示: Vacuum flask

- 组件: Component 1 (*comp1*) {*comp1*}
 - 定义
 - 几何: Geometry 1 (*geom1*)
 - 材料
- 固体传热: Heat Transfer in Solids (*ht*) {*ht*}
 - 固体传热: Heat Transfer in Solids 1 (*solid1*)
 - 初始值: Initial Values 1 (*init1*)
 - 轴对称: Axial Symmetry 1 (*axi1*)
 - 热绝缘: Thermal Insulation 1 (*ins1*)
 - 薄层: Thin Layer 1 (*tl1*)
 - 温度: Temperature 1 (*temp1*)
 - 热通量: Heat Flux 1 (*hf1*)
 - 热通量: Heat Flux 2 (*hf2*)

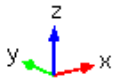


如果薄层不属于固体的外边界？

- 作为边界条件(薄层/薄膜) 或者本身就是一个接口 (薄结构中的传热)



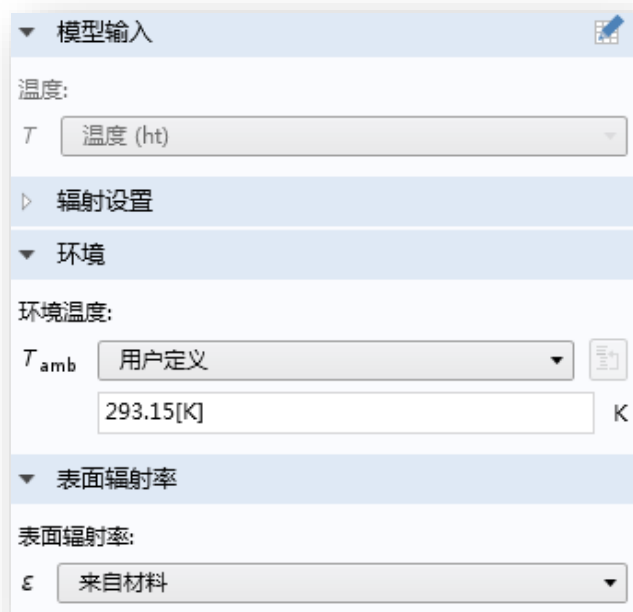
Hands on: disk_stack_heat_sink



Vacuum flask 案例中考虑薄层

边界条件 $-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = \varepsilon\sigma(T_{\text{amb}}^4 - T^4)$

- 混合边界条件
 - 取决于 T^4 和 ∇T
- 发射到环境中的热辐射量是根据 Stefan-Boltzmann 方程计算得到



表面辐射

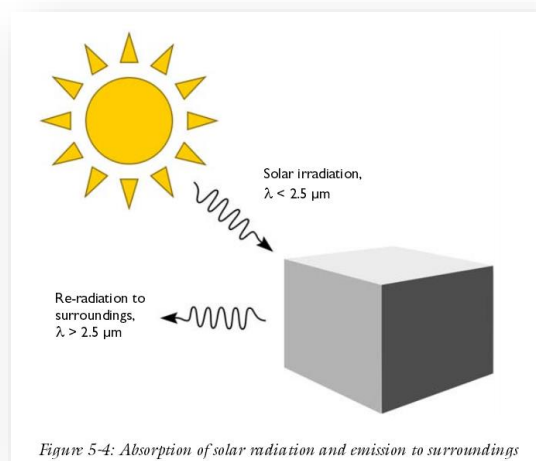
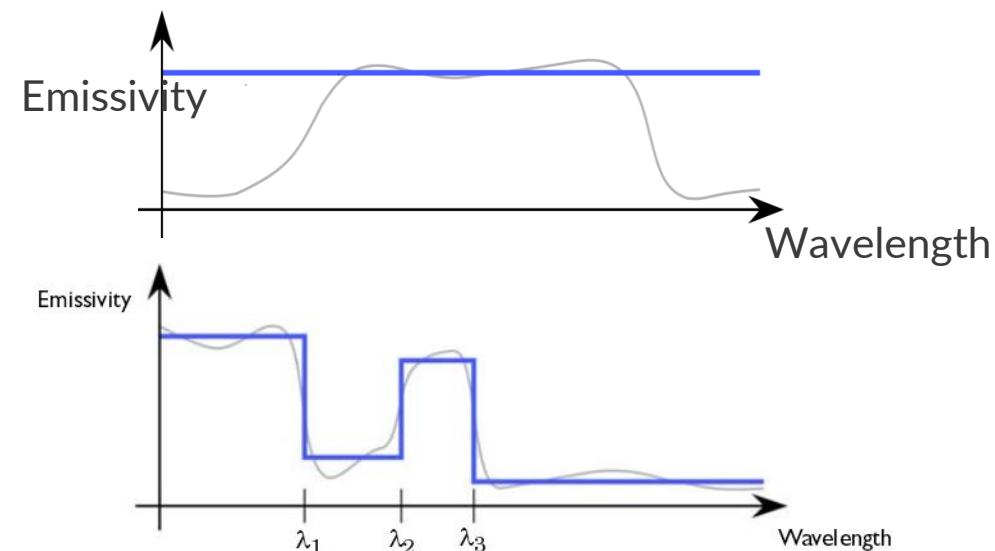
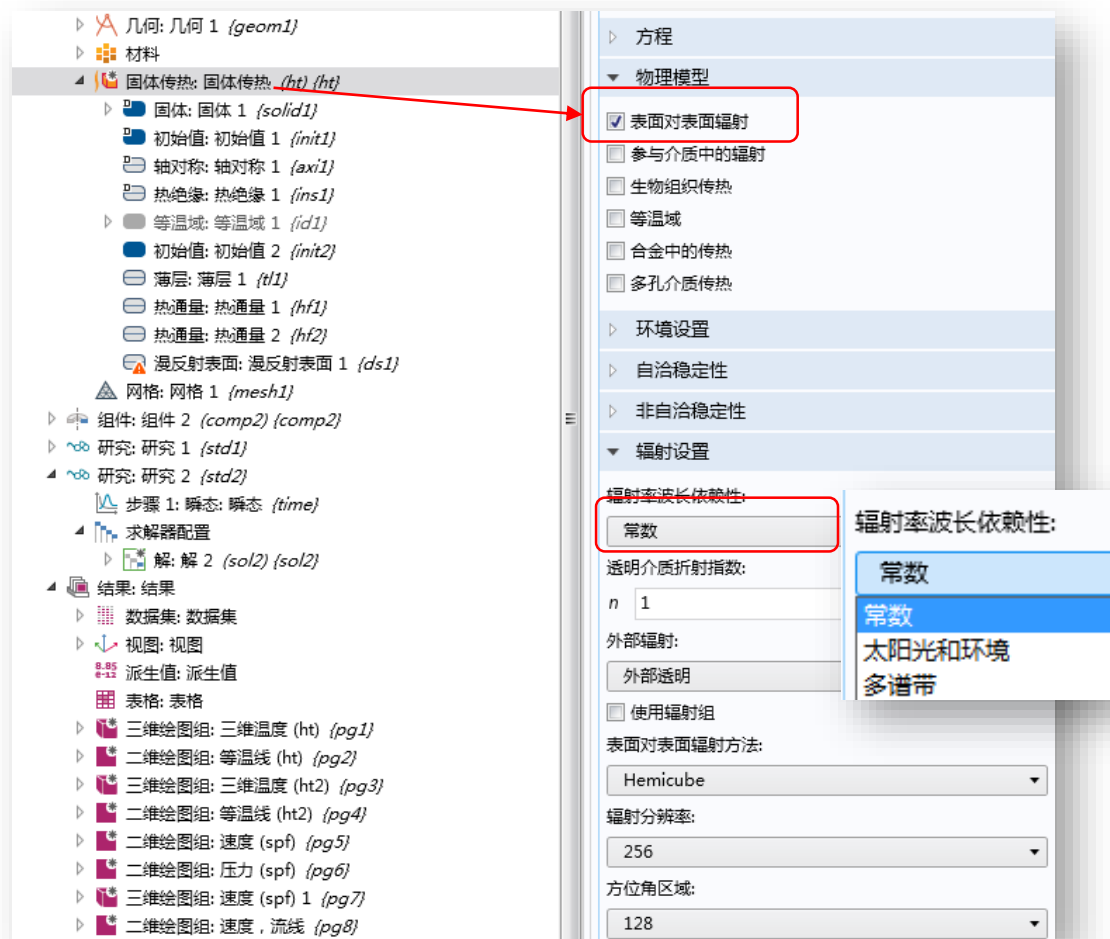
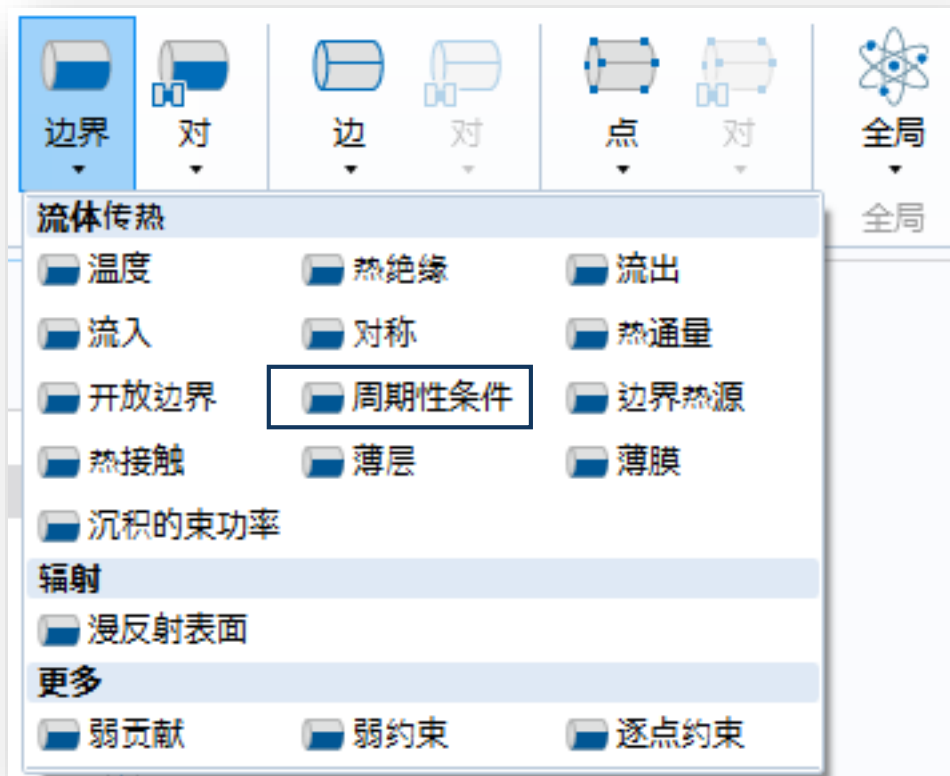


Figure 5-4: Absorption of solar radiation and emission to surroundings

周期性边界条件

- “有多少从一边进入则一定有多少从另一边出去”



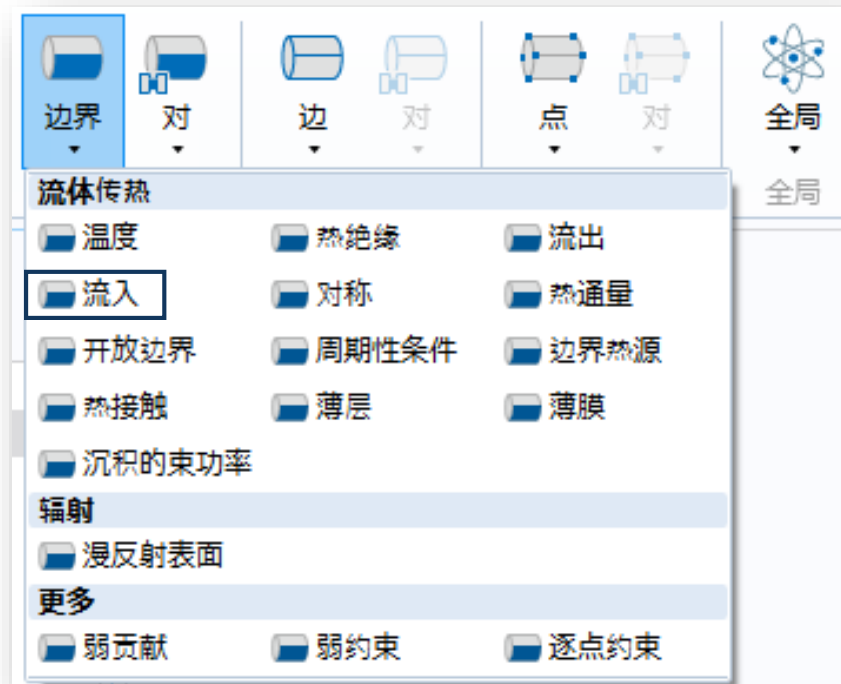
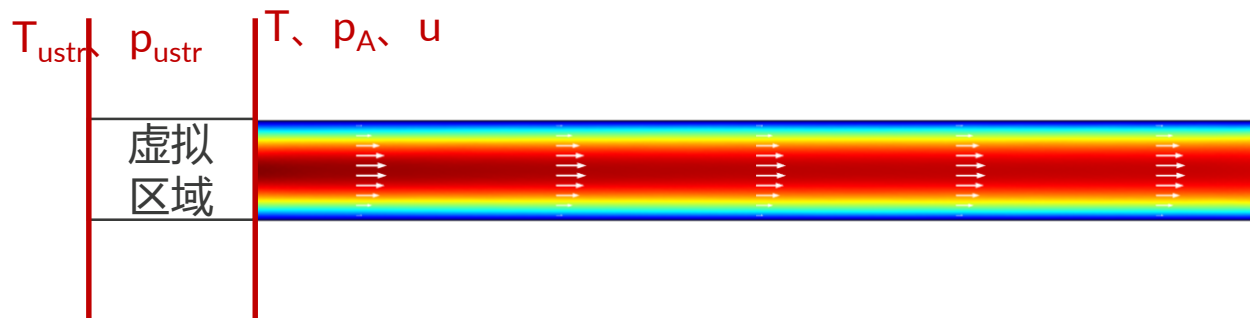
流入条件

■ 流入（热通量）

- 热流通过一个虚拟区域
- 考虑到进口处的速度场
- 流体入口处一般使用“温度”边界

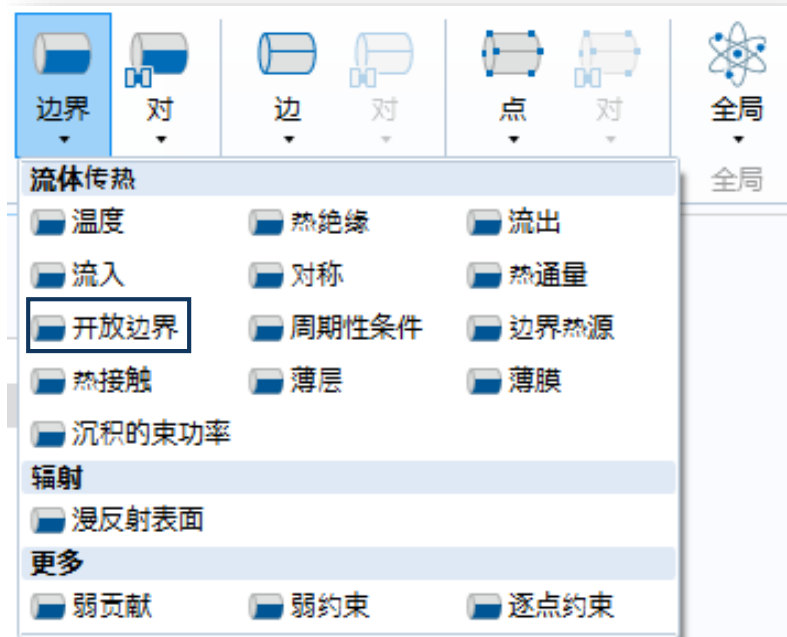
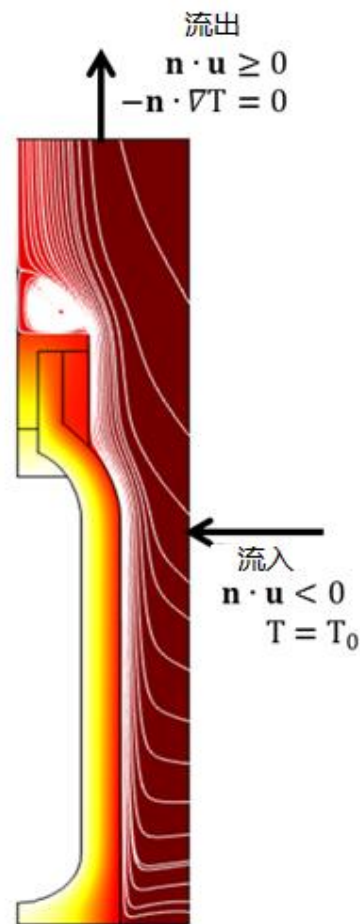
$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \rho \Delta H \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$$

$$\Delta H = \int_{T_{ustr}}^T C_p dT + \int_{p_{ustr}}^{p_A} \frac{1}{\rho} (1 - \alpha_p T) dp$$



开放边界

- 为了限制计算区域，但实际上该区域是开放的
- 根据流场，边界条件会自动设定
- 边界可以是出口也可以是入口
- 优势: 灵活
- 缺点: 收敛性较差



热接触

- 边界约束, 非理想热接触

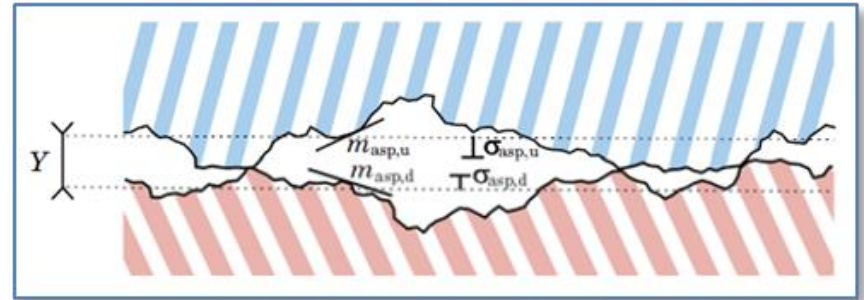


热接触

- 非理想热接触
- 作为边界条件或对(接触对)
- 表面粗糙度的影响
表面之间的传热:

$$- h = h_c + h_g + h_r$$

- 接触传导率 h_c 取决于表面属性和接触压力(来自SME)
- 气隙传导率 h_g 通过空间中的介质(空间)
- 辐射传导率 h_r 取决于表面之间的热辐射, 与电接触耦合



表面粗糙度的示意图

热接触

接触模型:

间隙气体的收缩电导率

收缩电导率:

h_c Cooper-Mikic-Yovanovich 相关性

间隙热导率:

h_g 平行板气隙传导系数

辐射热导率:

h_r 灰体漫射平行面

接触面属性

表面粗糙度, 粗糙平均高度:

σ_{asp} 1[um] m

表面粗糙度, 粗糙平均斜率:

m_{asp} 0.4 1

接触压力:

p 用户定义
接触压力 (solid/cnt1)
用户定义

硬化定义:

微硬度

微硬度:

H_c 165[MPa] Pa

辐射热导率

表面辐射率:

ϵ_u 来自材料

表面辐射率:

ϵ_d 来自材料

相关函数

如果选择平行板气隙传导系数

表面属性

与结构力学相耦合

由于热辐射引起的传导率

不如启用表面对表面辐射

气隙中的材料属性

气隙属性

气体热导率:

k_{gap} 来自材料

气压:

p_{gap} 1[atm] Pa

气体热调节参数:

α 1.7 1

气体流体参数:

β 1.7 1

气体粒子直径:

D 0.37[nm] m

摩擦加热

热摩擦

热分配系数:

r Charron 关系

☒ 广义源

Q_b 用户定义 0 W/m²

☐ 热耗率

$Q_b = \frac{P_b}{A}$

总结

- 边界条件规定了模拟的区域
- 选择正确的边界条件是建模的一个重要环节
- 边界条件可以用来简化体传热模型
 - 对称
 - 换热系数
 - 薄膜条件

