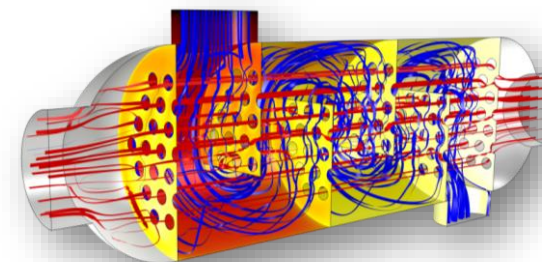


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL® 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

COMSOL Multiphysics® 传热建模

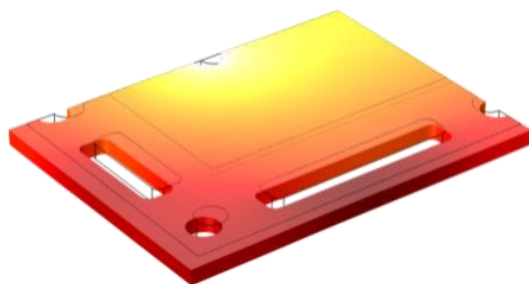
Part III

王刚 博士
技术总监
COMSOL 中国



第三天

- 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

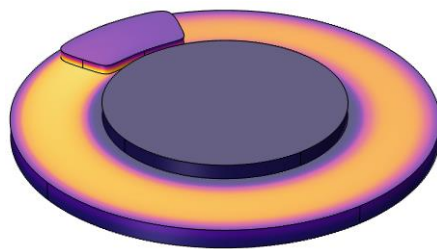


传导

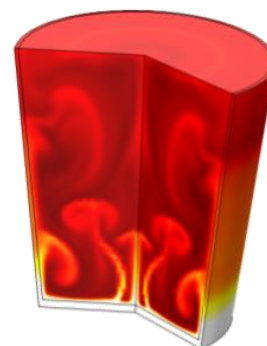


生物加热

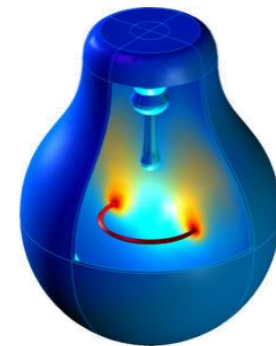
固体移动时的传热



流体中的对流



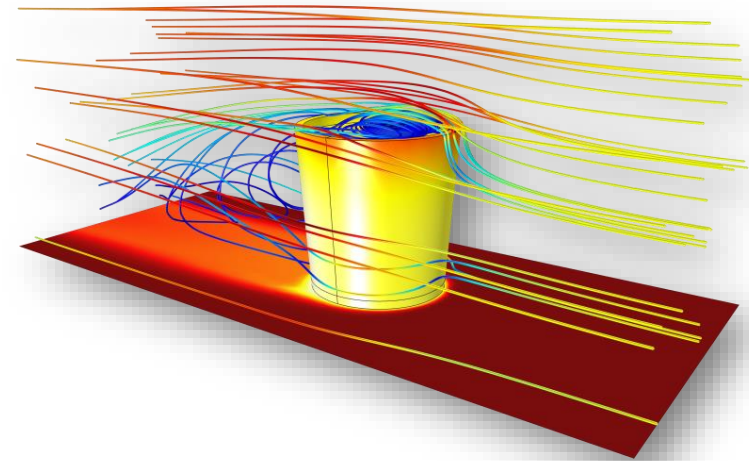
辐射



湿热传递

蒸发与冷凝

- 通常认为冷凝现象是一种风险
 - 材料损坏
 - 起皮
 - 金属氧化
 - 吸湿膨胀导致的应力
- 蒸发引起能量消耗
 - 建筑物的能效
 - 强化冷却



烧杯中水中相变的共轭传热模拟

自由空气中的湿热传递

空气中水分的测量

- 湿气含量, x_{vap} , 无量纲
- 浓度, c_v , [mol/m³]
- 蒸汽分压, p_v , [Pa]

$$x_{vap} = \frac{m_v}{m_a}$$

$$p_v = c_v RT$$

冷凝发生的时刻

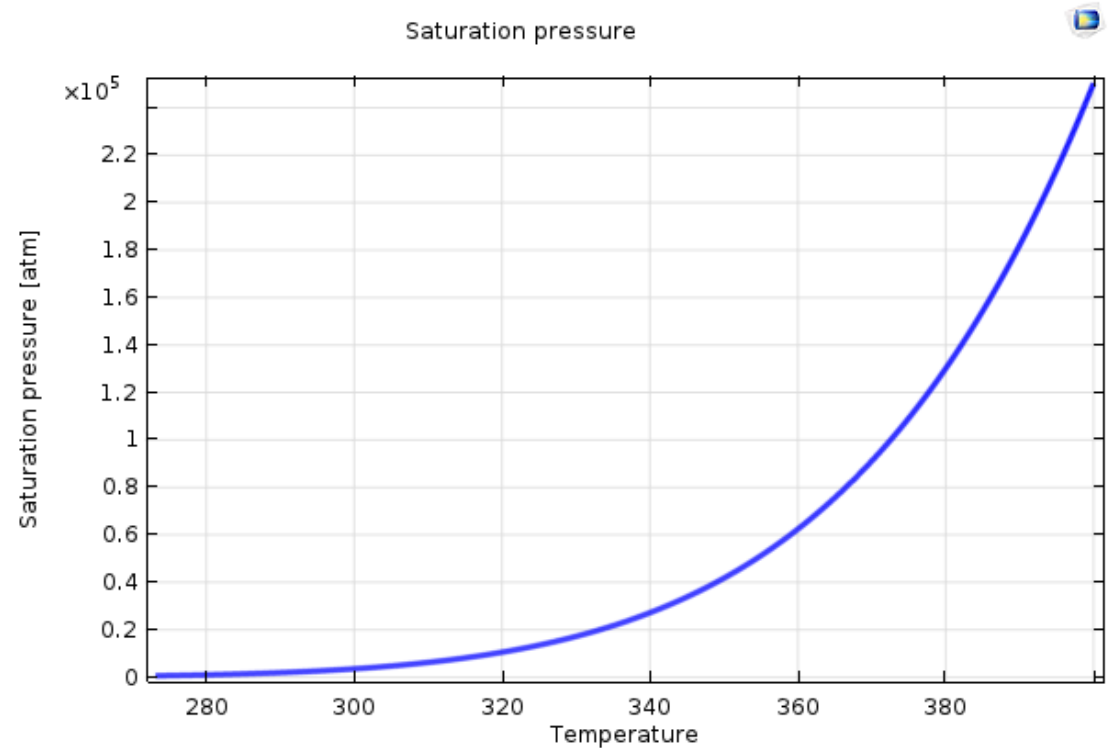
- 下含蒸汽的饱和空气达到饱和压力
 $p_{sat}(T)$

- 或者相对湿度等于1:

$$RH = \frac{p_v}{p_{sat}(T)}$$

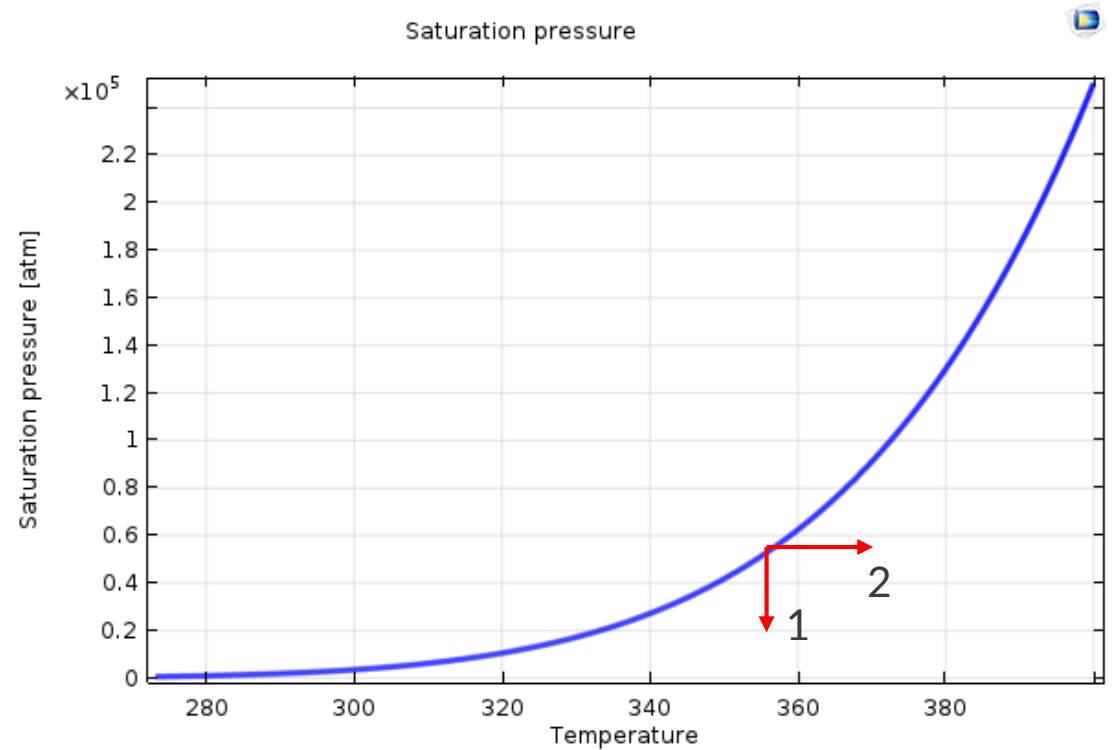
- 达到饱和浓度

$$c_{sat} = \frac{p_{sat}(T)}{RT}$$



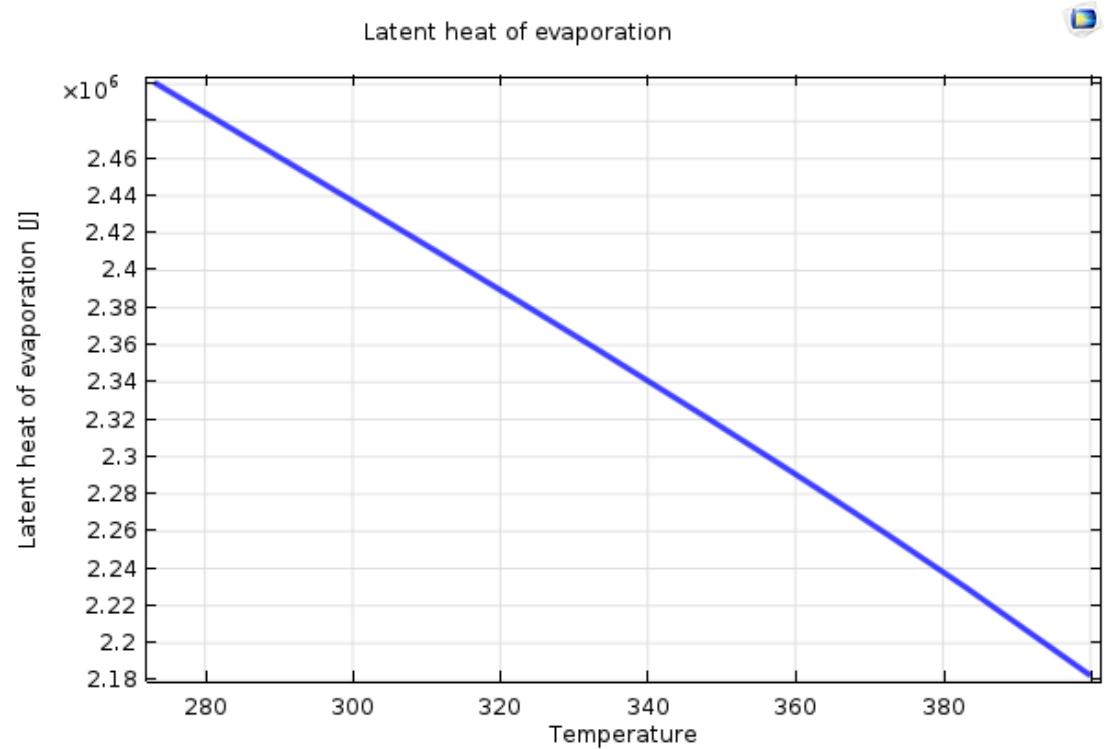
避免冷凝

- 设计一个系统，使相对湿度保持低于给定的阈值，例如90%
- 识别敏感区域
 - 更低的湿气含量
 - 升高温度



蒸发潜热

- 100°C时水的蒸发潜热
 $L_v \approx 2.26e6 \text{ J/kg}$
- 相比于水的热容
 $C_p \approx 4200 \text{ J/K/kg}$



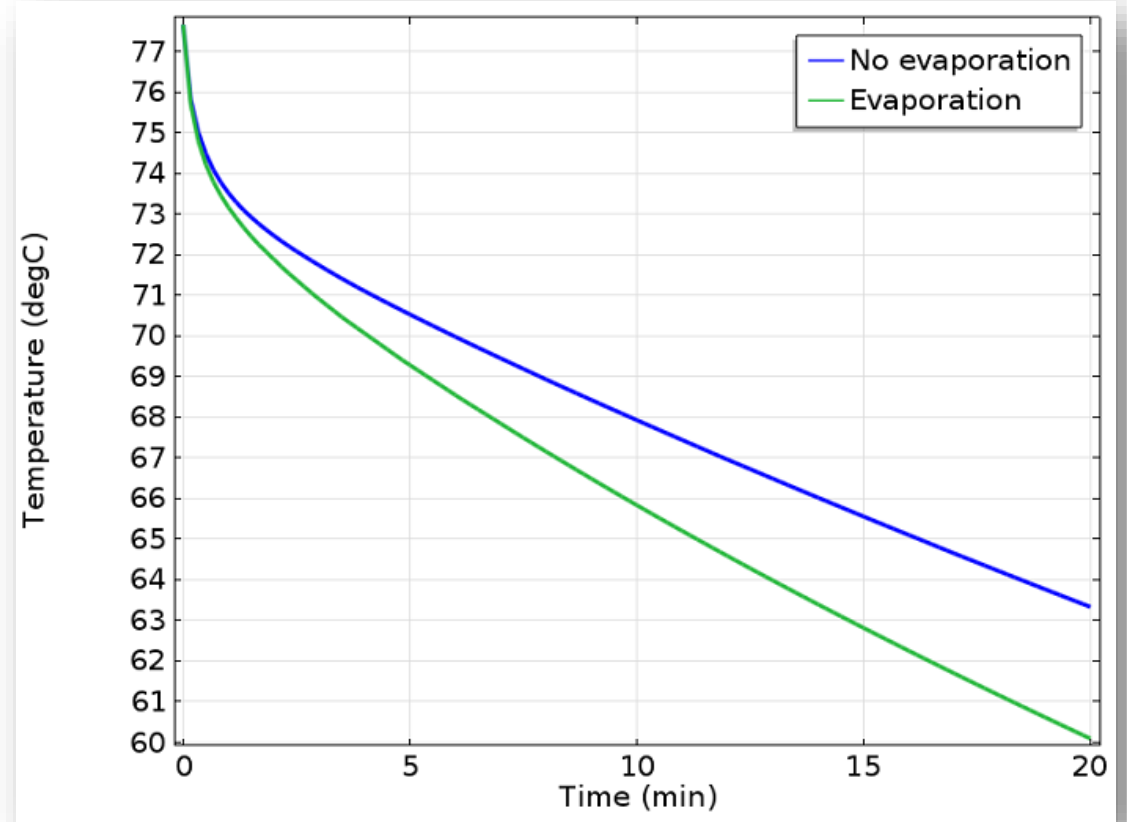
蒸发潜热

- 相变包含热量的源/汇

$$Q = -L_v M_v \frac{\partial c_v}{\partial t} = -H_v \frac{\partial c_v}{\partial t}$$

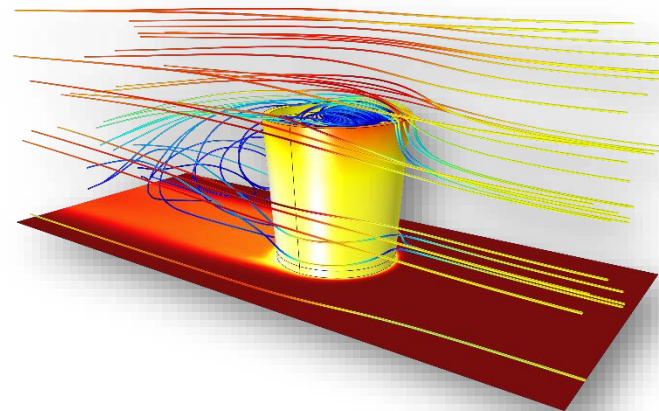
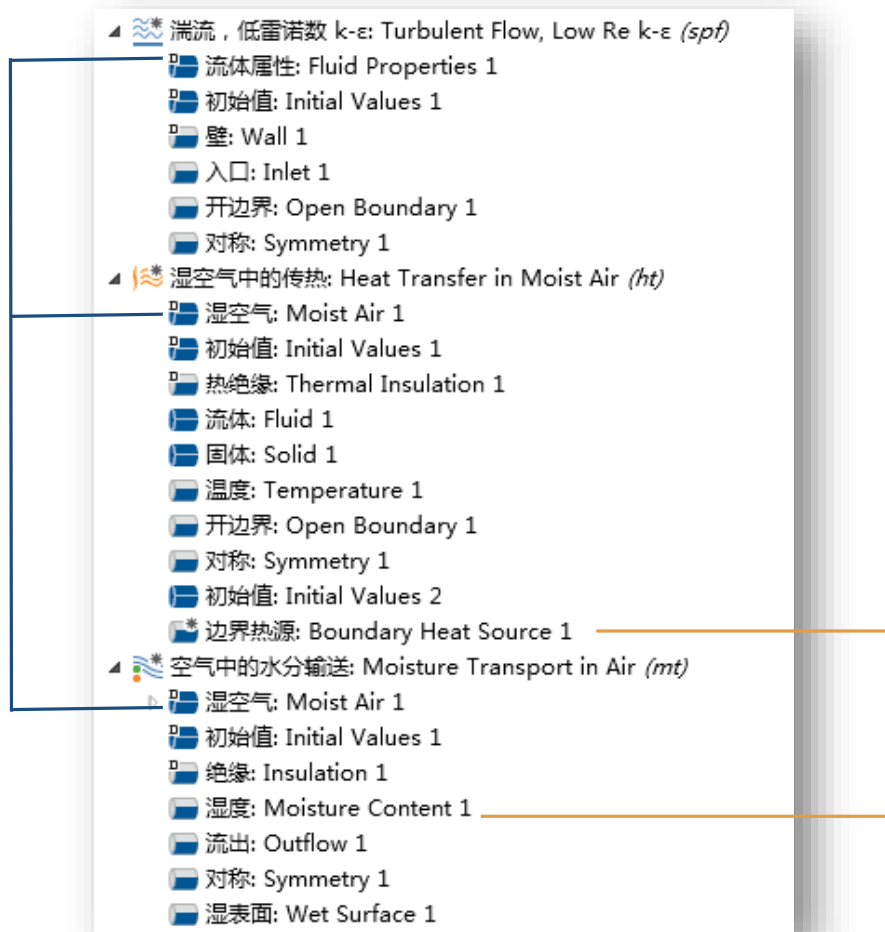
- 相变潜热通常具有显著影响

玻璃容器中水分蒸发对水温的影响



建立一个多物理场模型

流速、传热和
水蒸汽传递



蒸发导致热源;
饱和浓度依赖温度

多孔介质中的湿热传递

多孔介质中的湿度

- 多孔介质包含
 - 固体基质
 - 液态水
 - 含蒸汽的空气
- 当 $c_{eq} = a_w c_{sat}$ 时为平衡状态，其中 $a_w \in [0, 1]$ ，表示相对湿度
- 多孔介质中一旦含有液态水，则蒸汽浓度为 $c_v = c_{eq}$

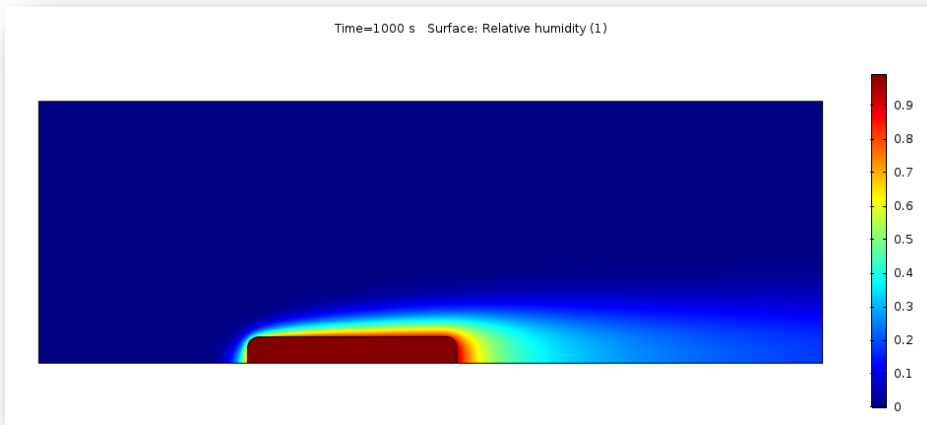
多孔介质中的流动

- 通常情况下蒸汽和液态水的流速不同
- 毛细效应
- 蒸汽扩散
- 储水效应
- 各种效应的大小取决于
 - 基质（孔隙率、迂曲度，...）
 - 水含量（接近干燥、饱和、...）
 - 流动状态（慢，快，...）

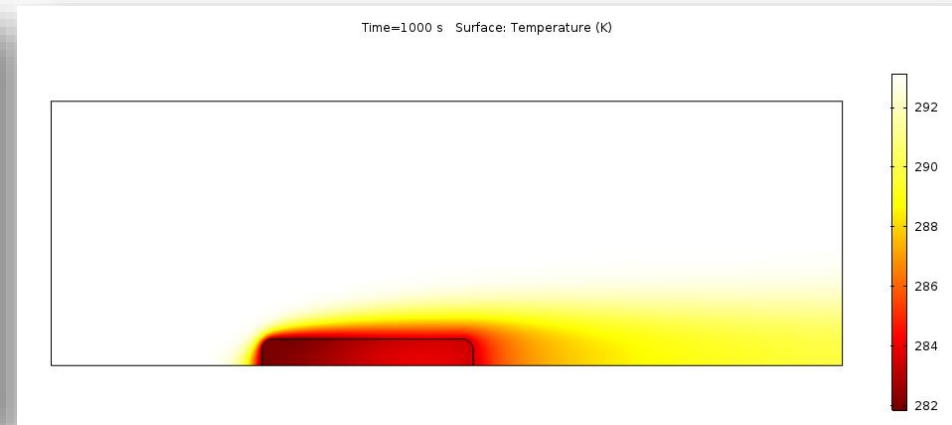
多孔介质中的蒸发

■ 案例库中的教学案例

- 小蒸发率下的多孔介质中的蒸发：
- comsol.com/model/evaporation-in-porous-media-with-small-evaporation-rate-21931
- 大蒸发率下的多孔介质中的蒸发：
- comsol.com/model/evaporation-in-porous-media-with-large-evaporation-rate-33731



相对湿度



温度

建筑材料中的湿热传递

- ISO 15026: 专用于建筑材料的简化物理模型
- 只计算相对湿度phi 和温度 T
- 传热属性依赖于湿气含量；同时考虑蒸发潜热；
- 使用标准的材料数据

选择物理场

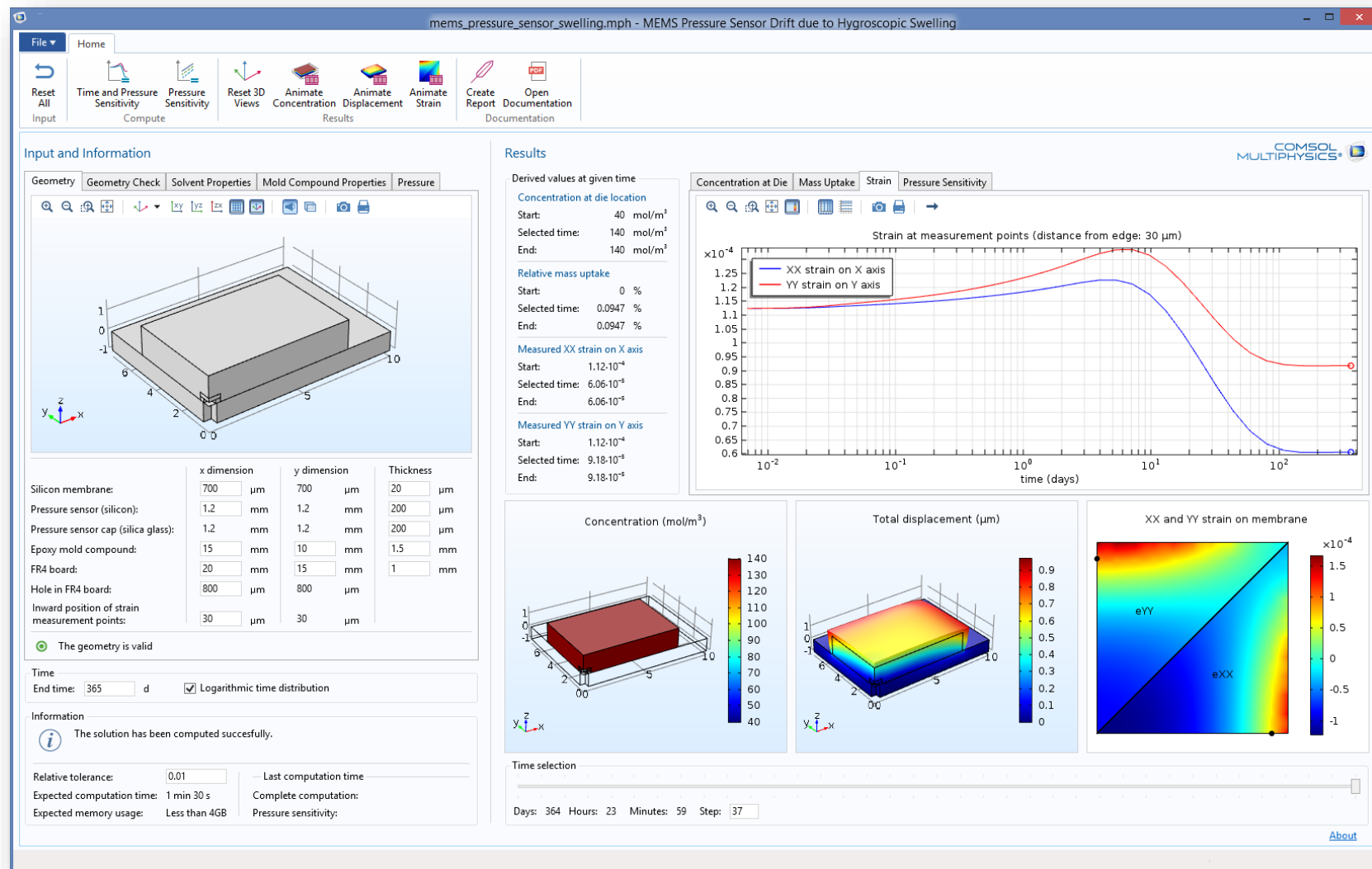


$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

$$\mathbf{q} = -(k_{\text{eff}} \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\phi p_{\text{sat}}))$$

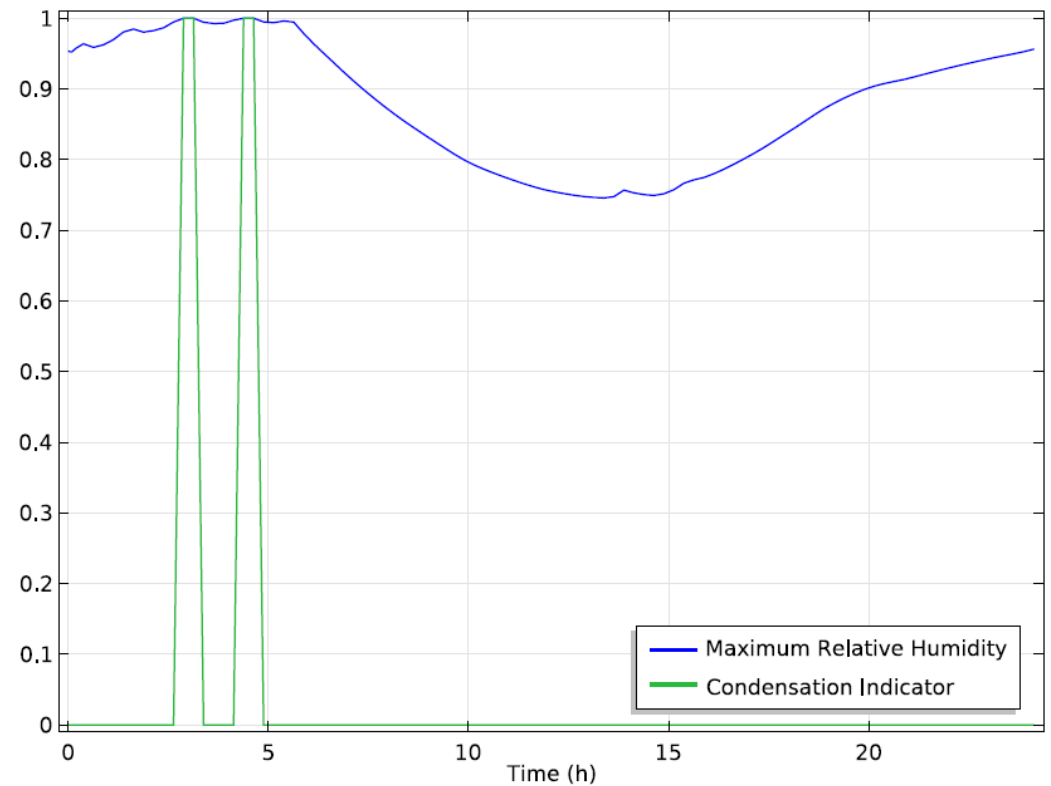
$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (-\xi D_w \nabla \phi - \delta_p \nabla(\phi p_{\text{sat}}(T))) = G$$

吸湿膨胀



Hands on: 冷凝检测

- 一个暴露在环境中的电子箱
- 电子器件的耗散产生热量
- 应该避免产生冷凝

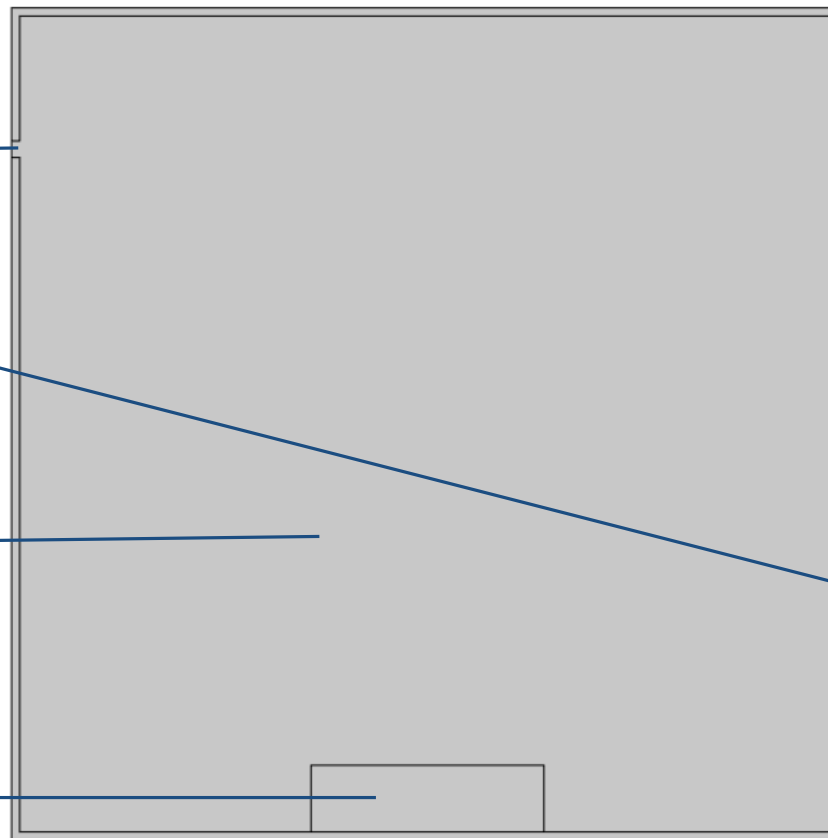


边界和域条件

压力、温度和
湿度与环境条
件相同

空箱内壁面产
生冷凝

加热器（电子
元件）



环境条件

环境数据:

气象数据

位置

气象站:

来自列表

区域:

North America

国家/地区:

United States of America

稳态:

New York/John F. Ke

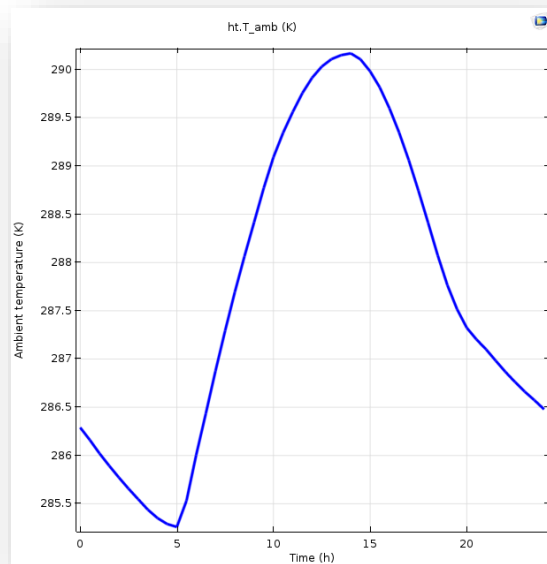
WMO = 744860

ϕ (+ to N) = $40,66^\circ$

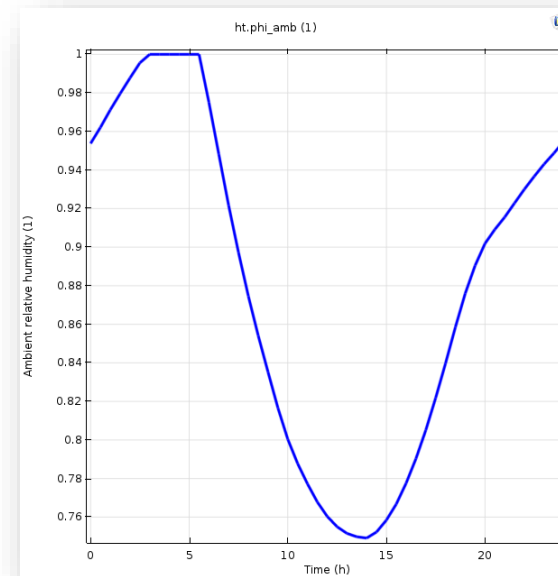
λ (+ to E) = $-73,80^\circ$

$h = 7$ m

气象站



环境温度

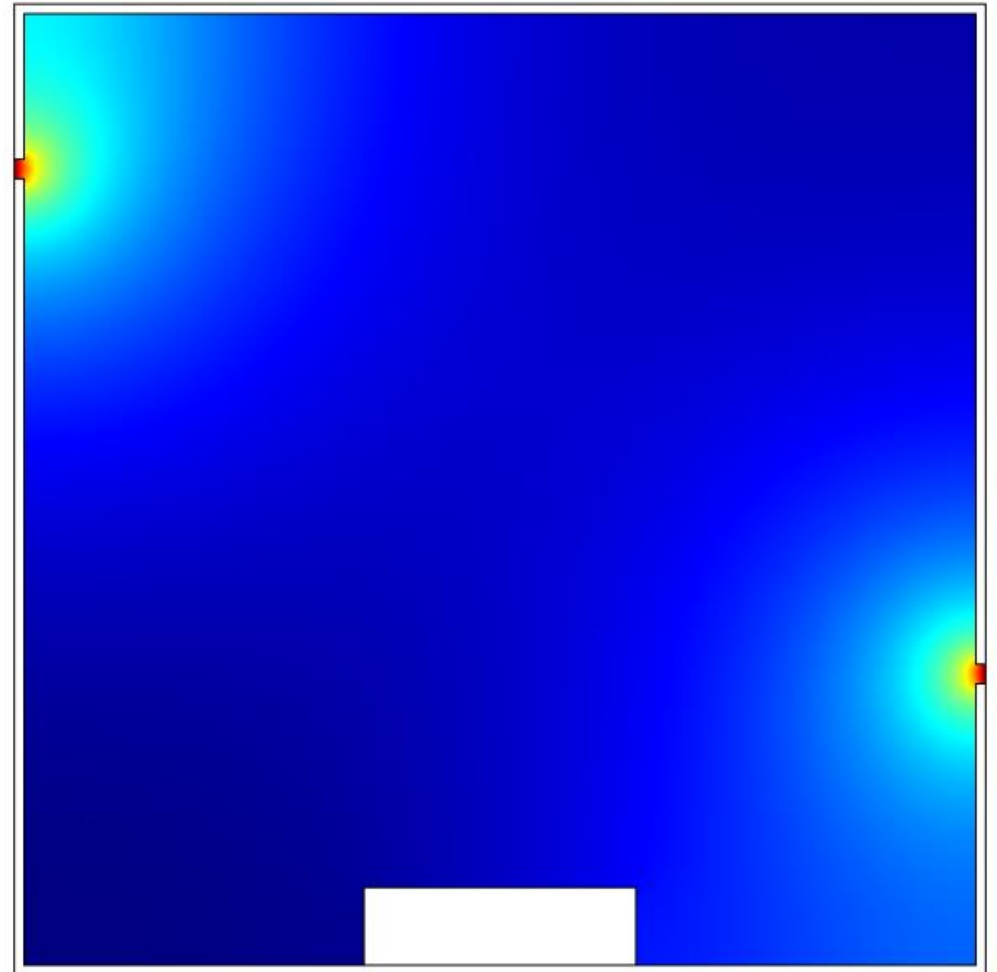


环境相对湿度

模型设置

- 预制的物理场和耦合接口用于
 - 温度
 - 流场
 - 水蒸汽浓度
- 两步建模
 - 假设空箱内水蒸汽瞬间混合，浓度均匀
 - 空箱内浓度不均匀
- 模型易于扩展
 - 多个热源
 - 小孔尺寸参数化

蒸汽浓度



练习: 建筑材料内的湿热传递

- 标准15026:2007 annex A中的标准模型
- 1D几何
- 时间长度为1年的瞬态分析
- 单一均匀的较厚材料
- 仅蒸发导致水分损失（液态水不流失）
- 温度和湿度
 - 初始条件: $\phi = 50 \%$, $T = 20^\circ \text{C}$
 - 外部条件: $\phi = 95 \%$, $T = 30^\circ \text{C}$

建模接口

- 多物理场接口：

- 建筑材料

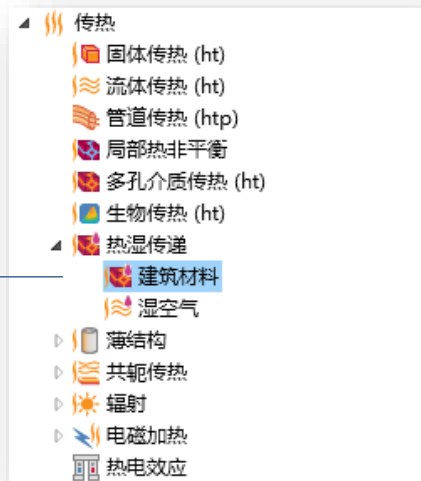
- 接口构成：

- 建筑材料传热 (ht)

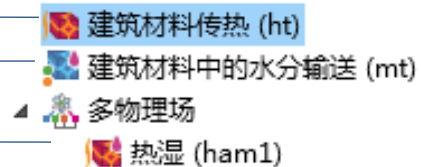
- 建筑材料中的水分输送 (mt)

- 多物理场耦合节点：

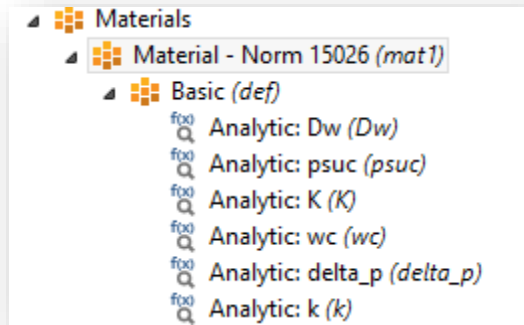
- 热湿 (ham)



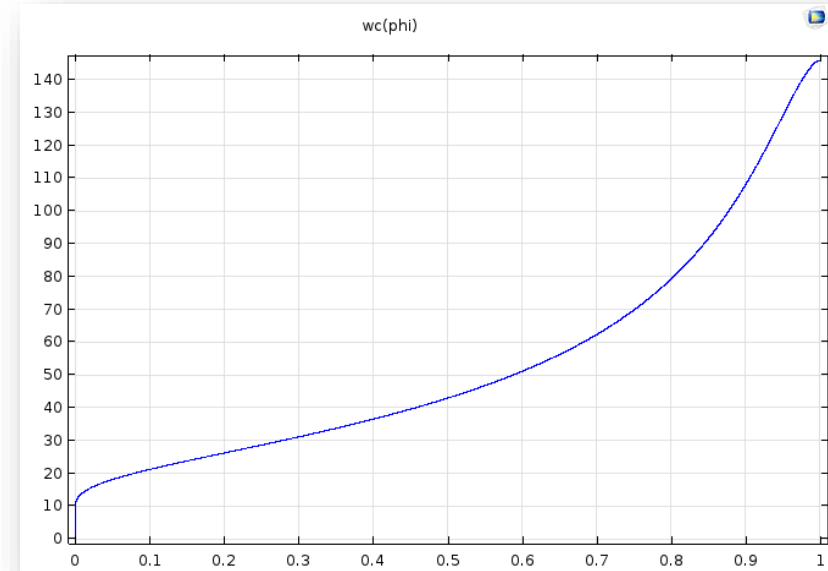
添加的物理场接口：



标准 15026:2007 中的材料物性



Material Contents				
	Property	Name	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k	k(wc(phi))	W/(...)
<input checked="" type="checkbox"/>	Diffusion coefficient	D	Dw(wc(phi))	m ² /s
<input checked="" type="checkbox"/>	Water content	w_c	wc(phi)	kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Vapor permeability	delta...	delta_p(wc(phi))	s
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	2145.88	kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pr...	Cp	850	J/(kg...
	Vapor resistance factor	mu	130	1



储水量 w_c 是关于相对湿度 ϕ 的函数。

模型定义

- ▲ 建筑材料传热: Heat Transfer in Building Materials (*ht*)
 - 建筑材料: Building Material 1
 - 初始值: Initial Values 1
 - 热绝缘: Thermal Insulation 1
 - 温度: Temperature 1
 - 温度: Temperature 2
- ▲ 建筑材料中的水分输送: Moisture Transport in Building Materials (*mt*)
 - 建筑材料: Building Material 1
 - 初始值: Initial Values 1
 - 绝缘: Insulation 1
 - 湿度: Moisture Content 1
 - 湿度: Moisture Content 2
- ▲ 多物理场
 - 热湿: Heat and Moisture 1 (*ham1*)

▼ 研究设置

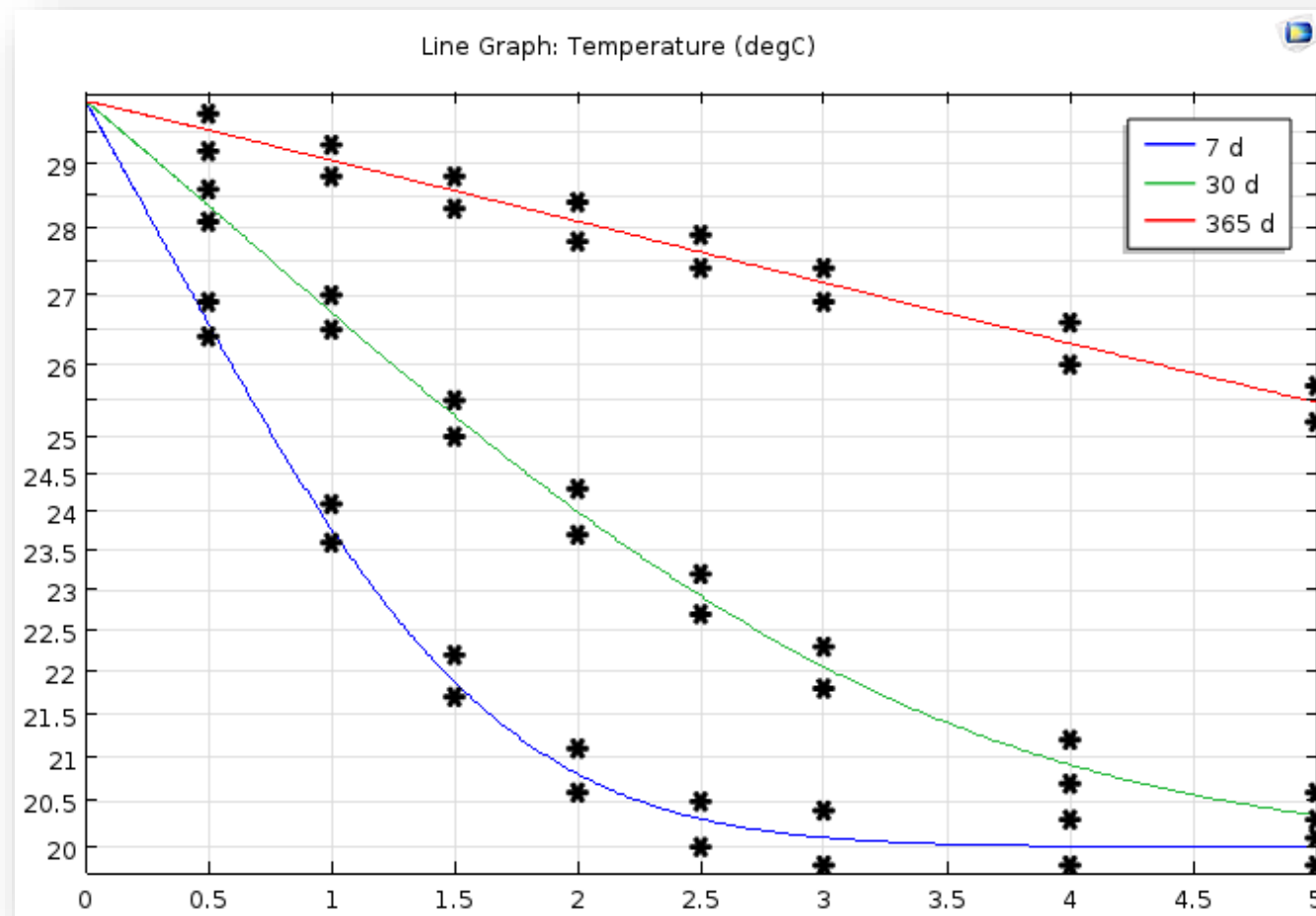
时间单位: d

时间步: range(0,1,365) d

容差: 物理场控制

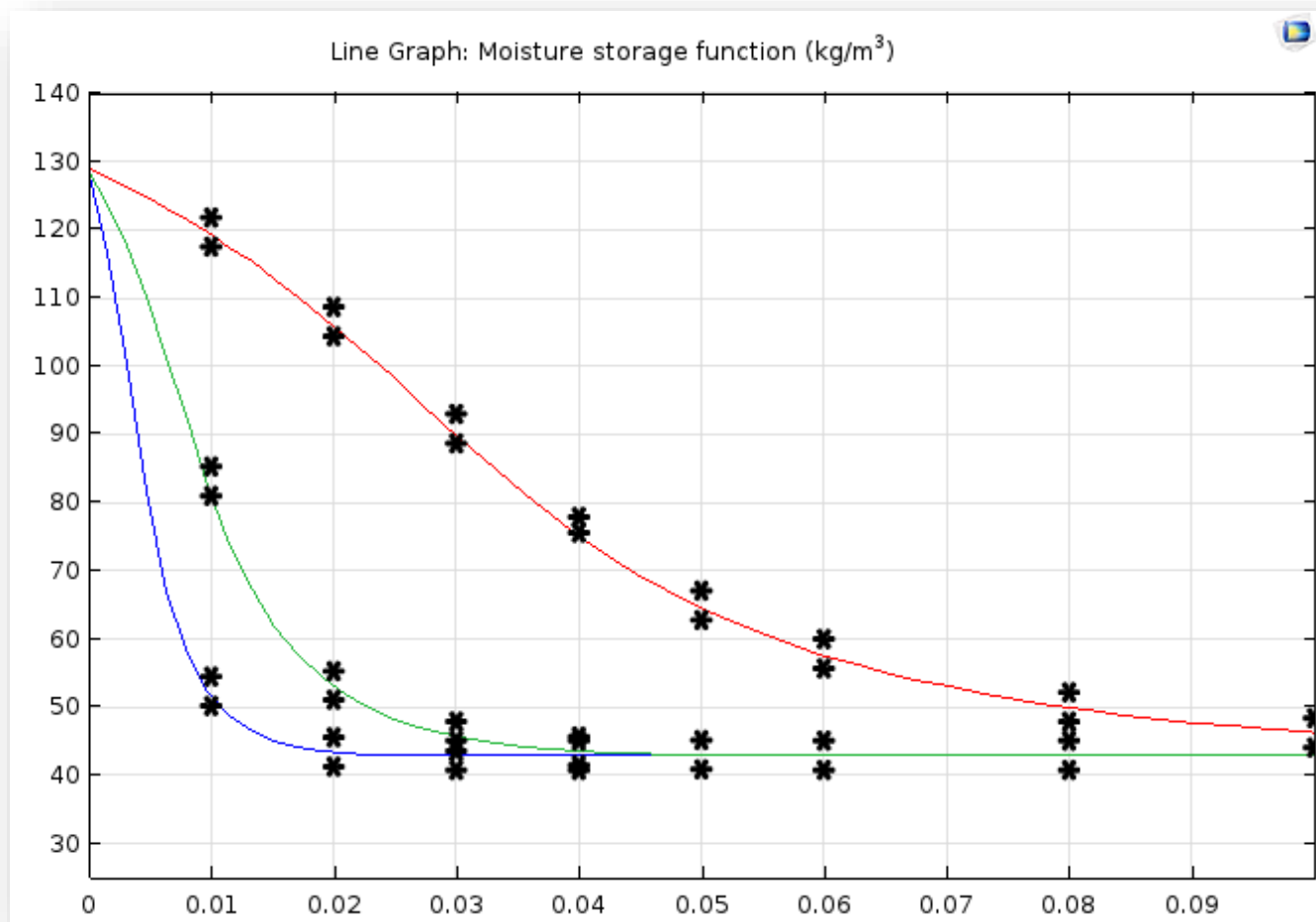
- 内外边界热量和湿气通量
- 初始的温度和相对湿度与环境条件相同，而环境条件在建筑材料接口的节点内设置。
- 计算的物理时间是1年。

第 7, 30, 365 天的温度分布



* 表示标准参考值

第 7, 30, 365 天的水含量分布

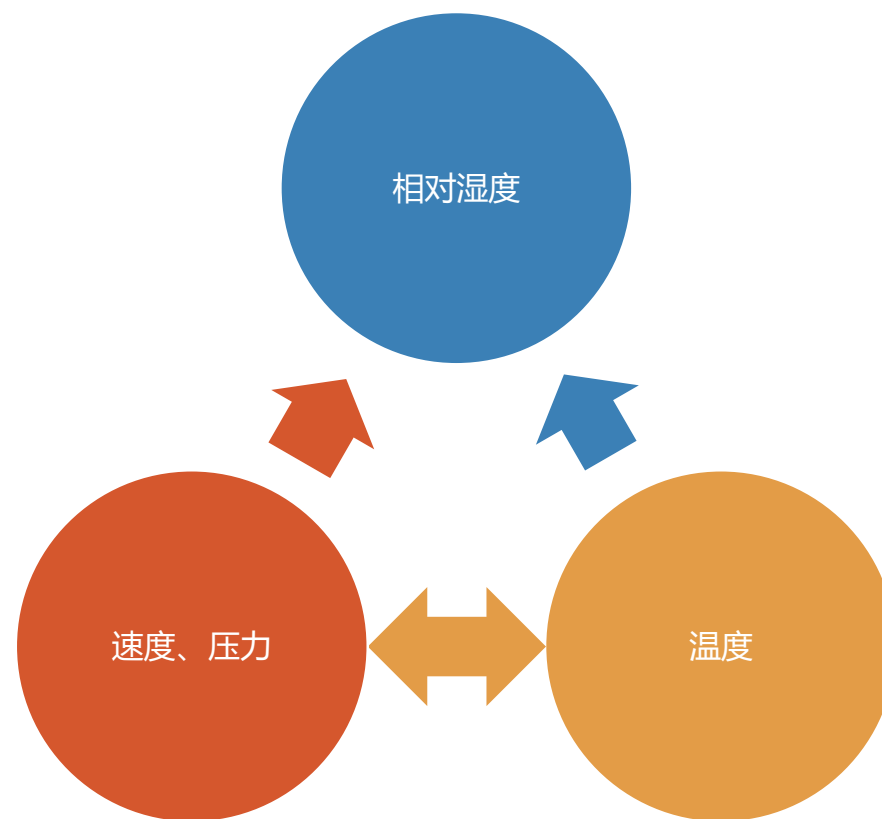


* 表示标准参考值

相变传热

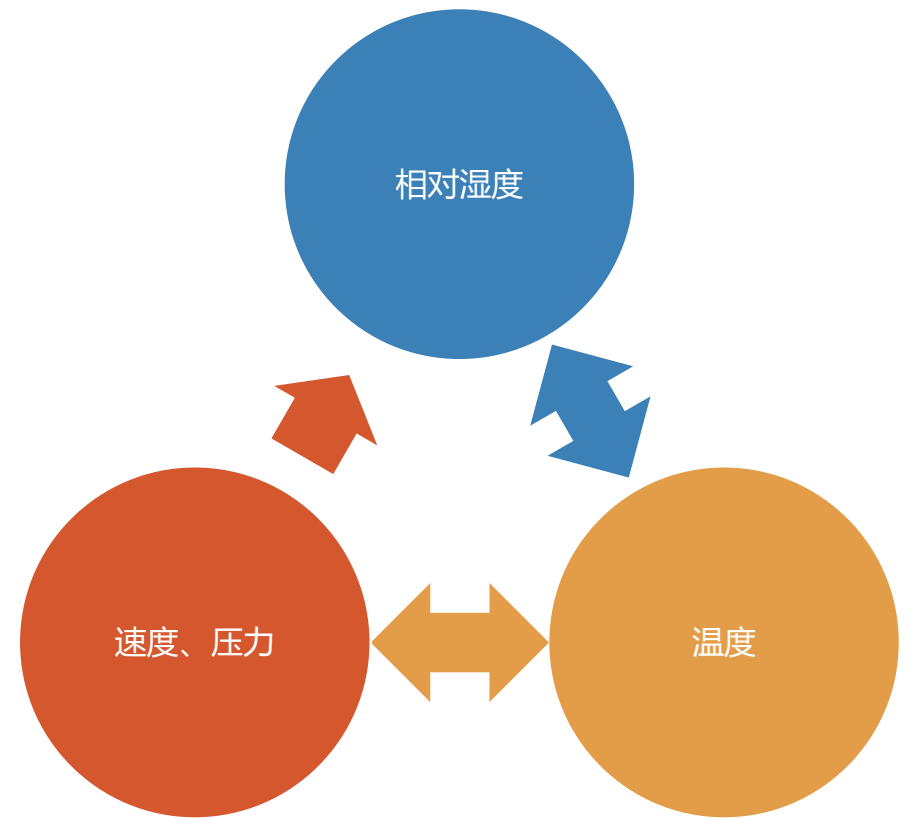
两种相变仿真方法

- 避免冷凝现象
 - 通过冷凝条件，检测存在高冷凝风险的空间位置
 - 在相变发生之前停止仿真



两种相变仿真方法

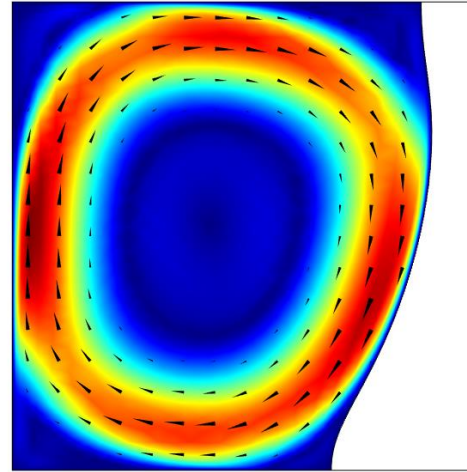
- 避免冷凝现象
 - 通过冷凝条件，检测存在高冷凝风险的空间位置
 - 在相变发生之前停止仿真
- 控制相变
 - 模拟相变
 - 考虑相变潜热



相变类型及建模思路

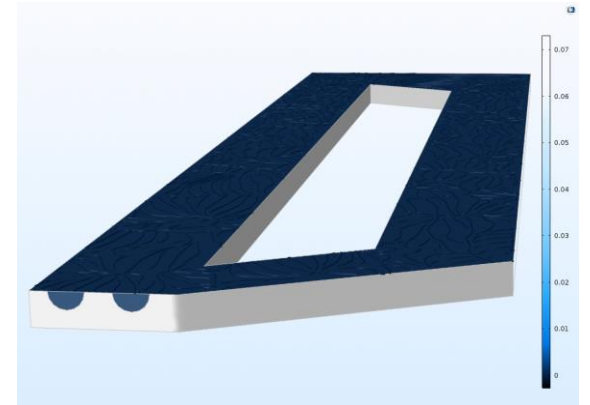
■ 考虑界面

- 分离型两相流：水平集、相场法
 - 应用：气液相变
- 单相流：移动网格
 - 应用：液固相变、气固相变
- 相变材料（模糊界面）
 - 应用：液固相变、气液相变（慎用）



■ 不考虑相界面

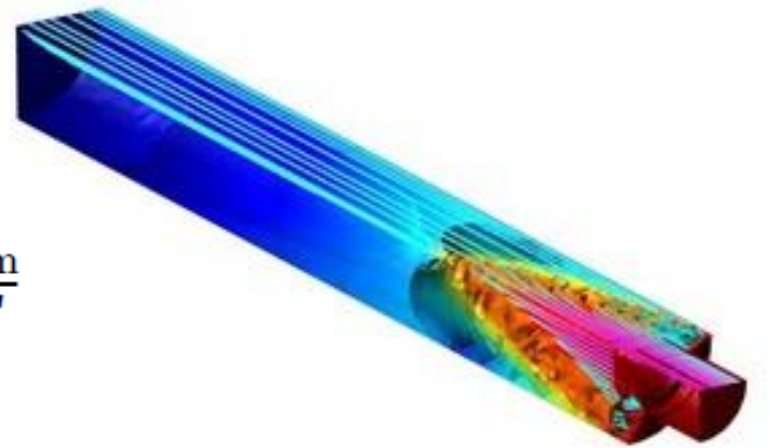
- 分散型两相流：气泡流、混合物模型和双欧拉
 - 应用：气液相变、液固相变和气固相变（反应）



相变材料模型

- 使用显热容公式计算有相变的传热
- 每种相态的材料属性由温度判断
- 相变温度及相变温度区间（材料属性的平滑）
- 潜热（热容法）

$$C_p = \frac{1}{\rho}(\theta_1 \rho_{ph1} C_{p, ph1} + \theta_2 \rho_{ph2} C_{p, ph2}) + (H_{ph2} - H_{ph1}) \frac{d\alpha_m}{dT}$$



金属棒从熔融态到固态的连铸相变模拟

固体中的不可逆转变

■ 温度阈值模型

▼ 不可逆变换

变换模型:

温度阈值

☒ 过热分析

变换温度:

$T_{it,h}$ 293.15[K] K

变换时间:

$t_{it,h}$ 0 s

焓变:

$L_{it,h}$ 0 J/kg

☐ 过冷分析

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{1}{t_{it,h}} (T > T_{it,h})$$
$$\theta_{it} = \min(\alpha, 1)$$
$$Q = -\rho L_{it,h} \frac{\partial \theta_{it}}{\partial t} (T > T_{it,h})$$

过热分析:
转变依赖局部温度变量
超过温度阈值的时间

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{1}{t_{it,c}} (T < T_{it,c})$$
$$\theta_{it} = \min(\alpha, 1)$$
$$Q = \rho L_{it,c} \frac{\partial \theta_{it}}{\partial t} (T < T_{it,c})$$

过冷分析:
转变依赖局部温度低于
温度阈值的时间

固体中的不可逆转变

- 为转变后的状态指定不同的材料属性

☒ 为变换状态指定不同的材料属性

变换材料:

域材料

▼ 热导率

导热系数:

k_{it} 来自材料

▼ 热力学

密度:

ρ_{it} 来自材料

恒压热容:

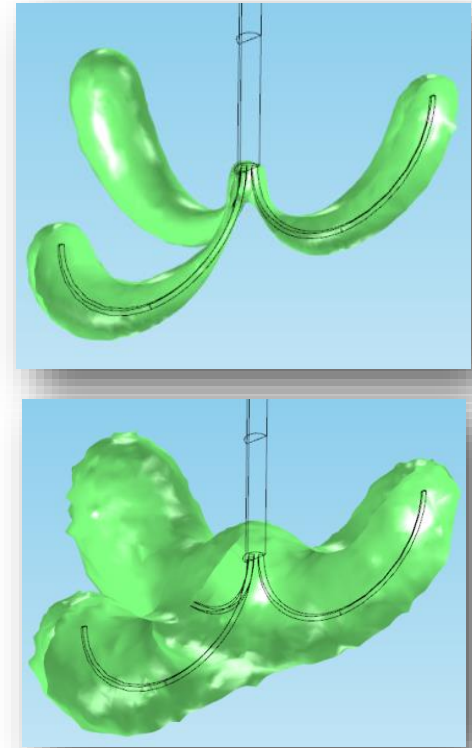
$C_{p,it}$ 来自材料

根据转变情况动态更新材料属性，例如：

$$k_{eq} = \theta_{it} \cdot k_{it} + (1 - \theta_{it}) \cdot k$$

生物组织中的传热

- 活体组织中的传热
 - 组织和血液性质
 - 血液灌流速率
 - 动脉血液温度
 - 新陈代谢热速率
- 生物热源
- 活体组织的破坏（相变）
 - 温度阈值模型
 - 能量吸收模型
 - 低温伤害
- 外部热源（RF，直流电流）



肿瘤切除过程中组织坏死面积， 100s (上) 和 300s (下)