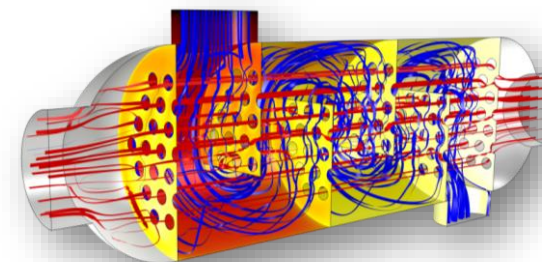


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL® 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

COMSOL Multiphysics® 传热建模

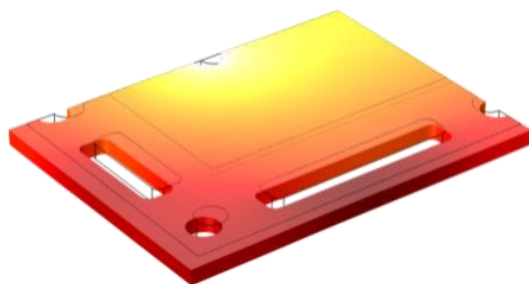
Part II

王刚 博士
技术总监
COMSOL 中国



第二天

- 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

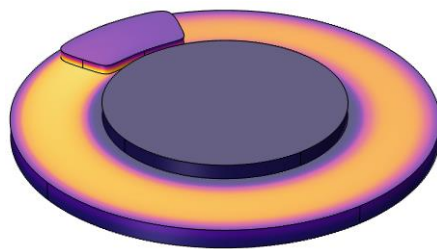


传导

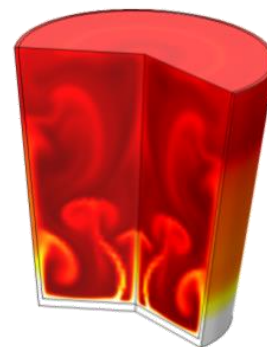


生物加热

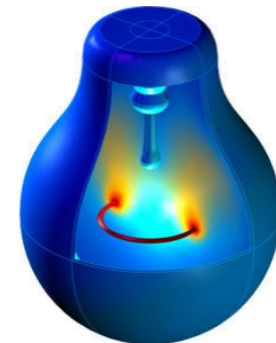
固体移动时的传热



流体中的对流



辐射



非等温流

非等温流

- 具有对流项的传热方程(能量守恒)

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

- Navier-Stokes方程 (动量守恒)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

- 连续性方程 (质量守恒)

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

2 耦合

5 因变量(T, u, v, w, p)
温度依赖材料属性

非等温流

- 层流: 层流 2 (spf2)
 - 流体属性: 流体属性 1
 - 初始值: 初始值 1
 - 轴对称: 轴对称 1
 - 壁: 壁 1
 - 入口: 入口 1
 - 出口: 出口 1

- 固体传热: Heat Transfer in Solids (ht)
 - 固体传热: Heat Transfer in Solids 1
 - 初始值: Initial Values 1
 - 轴对称: Axial Symmetry 1
 - 热绝缘: Thermal Insulation 1
 - 等温域接口: Isothermal Domain Interface
 - 等温域: Isothermal Domain 1
 - 初始值: Initial Values 2
 - 薄层: Thin Layer 1
 - 热通量: Heat Flux 1
 - 热通量: Heat Flux 2

- 多物理场
 - 流动耦合: 流动耦合 1 (fc1)

Navier Stokes 方程:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

传热方程:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

速度场用于传热方程中

流动耦合

- 仅流体方程影响传热
- 在流体方程中没有考虑材料的温度依赖性
- 对于许多应用是一个很好的假设, 比如
 - 热交换器
 - 散热片
 - 强制对流

非等温流

层流: 层流 2 (spf2)

- 流体属性: 流体属性 1
- 初始值: 初始值 1
- 轴对称: 轴对称 1
- 壁: 壁 1
- 入口: 入口 1
- 出口: 出口 1

固体传热: Heat Transfer in Solids (ht)

- 固体传热: Heat Transfer in Solids 1
- 初始值: Initial Values 1
- 轴对称: Axial Symmetry 1
- 热绝缘: Thermal Insulation 1
- 等温域接口: Isothermal Domain Interface
- 等温域: Isothermal Domain 1
- 初始值: Initial Values 2
- 薄层: Thin Layer 1
- 热通量: Heat Flux 1
- 热通量: Heat Flux 2

多物理场

- 流动耦合: 流动耦合 1 (fc1)
- 温度耦合: 温度耦合 1 (tc1)

Navier Stokes 方程:

$$\rho(T)(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu(T)\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

流体方程中的材料属性与温度有关

传热方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

温度耦合

- 考虑温度对材料属性的影响
- 原则上, 不作为唯一的耦合节点使用

非等温流

- 层流: 层流 2 (spf2)
 - 流体属性: 流体属性 1
 - 初始值: 初始值 1
 - 轴对称: 轴对称 1
 - 壁: 壁 1
 - 入口: 入口 1
 - 出口: 出口 1
- 固体传热: Heat Transfer in Solids (ht)
 - 固体传热: Heat Transfer in Solids 1
 - 初始值: Initial Values 1
 - 轴对称: Axial Symmetry 1
 - 热绝缘: Thermal Insulation 1
 - 等温域接口: Isothermal Domain Interface
 - 等温域: Isothermal Domain 1
 - 初始值: Initial Values 2
 - 薄层: Thin Layer 1
 - 热通量: Heat Flux 1
 - 热通量: Heat Flux 2
- 多物理场
 - 非等温流: 非等温流 2 (nitf2)

Navier Stokes 方程:

$$\rho(T)(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu(T)\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

流体方程中的材料属性与温度有关

传热方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

速度场用于传热方程中

非等温流

- 将上述两个耦合节点联合起来
- 对于自然对流很有必要



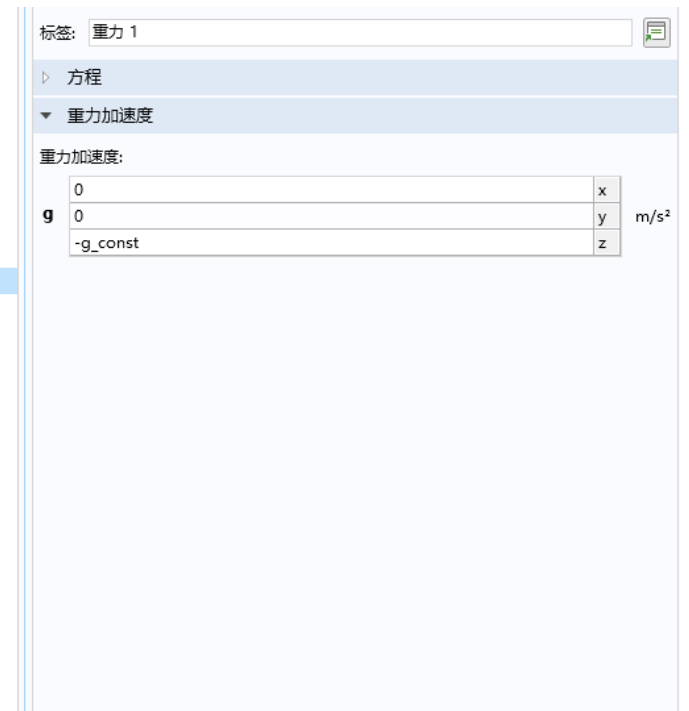
一些重要的准数

Name	Symbol	Expression	Significance
雷诺数	Re	$\frac{\rho v L}{\mu}$	惯性力和粘性力的比值 Re > 2000 为湍流（强制对流）
普朗特数	Pr	$\frac{C_p \mu}{k}$	粘性与热扩散的比值 低 – 传热以扩散（传导）为主 高 – 传热以对流为主
格拉晓夫数	Gr	$\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$	浮力与粘性力的比值 Gr > 10 ^{8~9} 为湍流（自然对流）
瑞利数	Ra	$Gr \cdot Pr$	低 – 传导为主 高 – 对流为主 超高 (>10 ⁹) – 湍流对流

自然对流

- 自然对流
- 由于密度差引起的流动 $\rho = \rho(T)$
- 浮力: $\mathbf{F} = \rho(T)\mathbf{g}$
- 无量纲数

$$- Ra = \frac{\rho^2 g \beta C_p \Delta T L^3}{\mu k} = \frac{\text{浮力}}{\text{粘滞力}}$$



检查瑞利数

$$Ra = \frac{g\beta C_p (T_{\max} - T_{\infty}) L^3}{\nu\alpha}$$

L : 特征长度

g : 重力加速度

ν : 动力粘度, $\nu_{air}(300K) \sim 16e-6 \text{ m}^2/\text{s}$

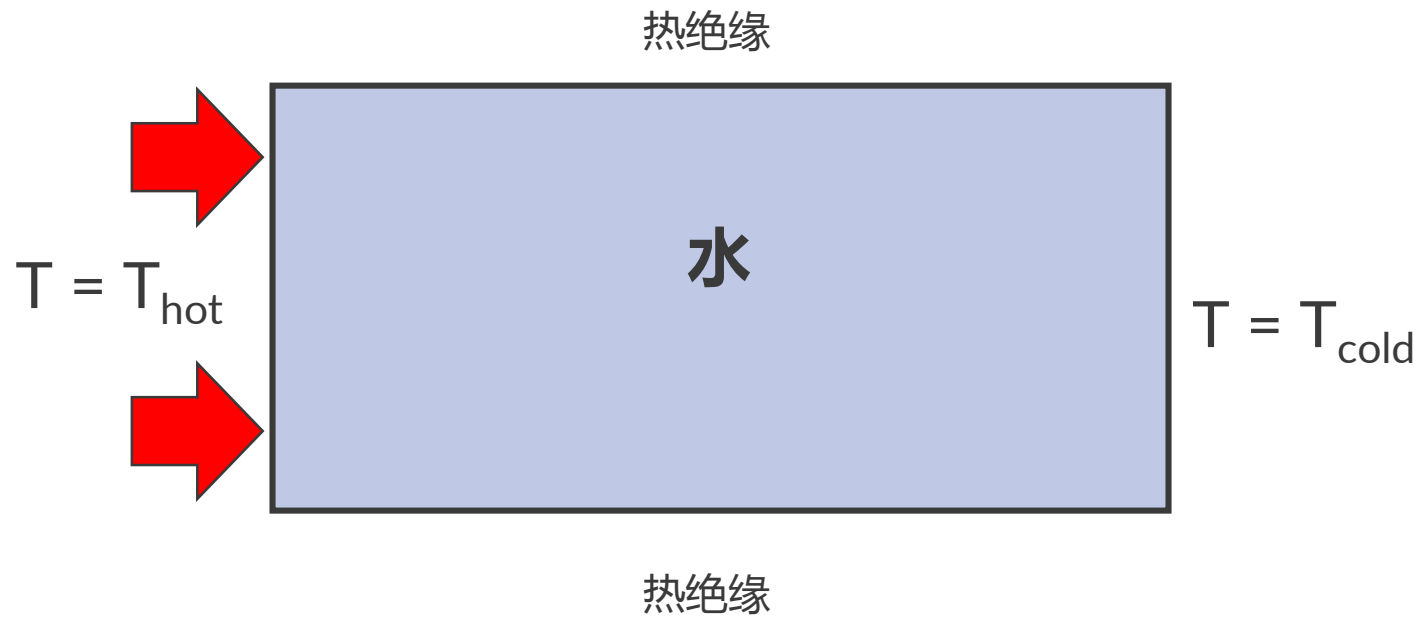
α : 热扩散系数, $\alpha_{air}(300K) \sim 20e-6 \text{ m}^2/\text{s}$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_p \quad \text{体积热膨胀系数} \quad \beta_{\text{ideal gas}} = \frac{1}{T}$$

- 当瑞利数超过 10^9 流体转变为湍流, 尽管流速可能仍旧很小
- 数值上流体将变得非常不稳定以及难以求解
- 流体区域推荐使用 Low-Reynold's k- ϵ 湍流模型

封闭空腔中的自然对流

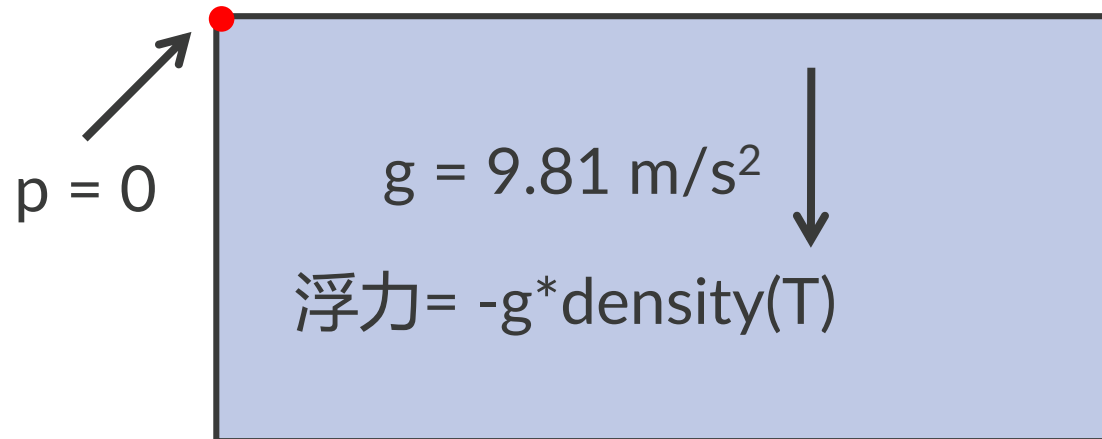
- 温度场设定:



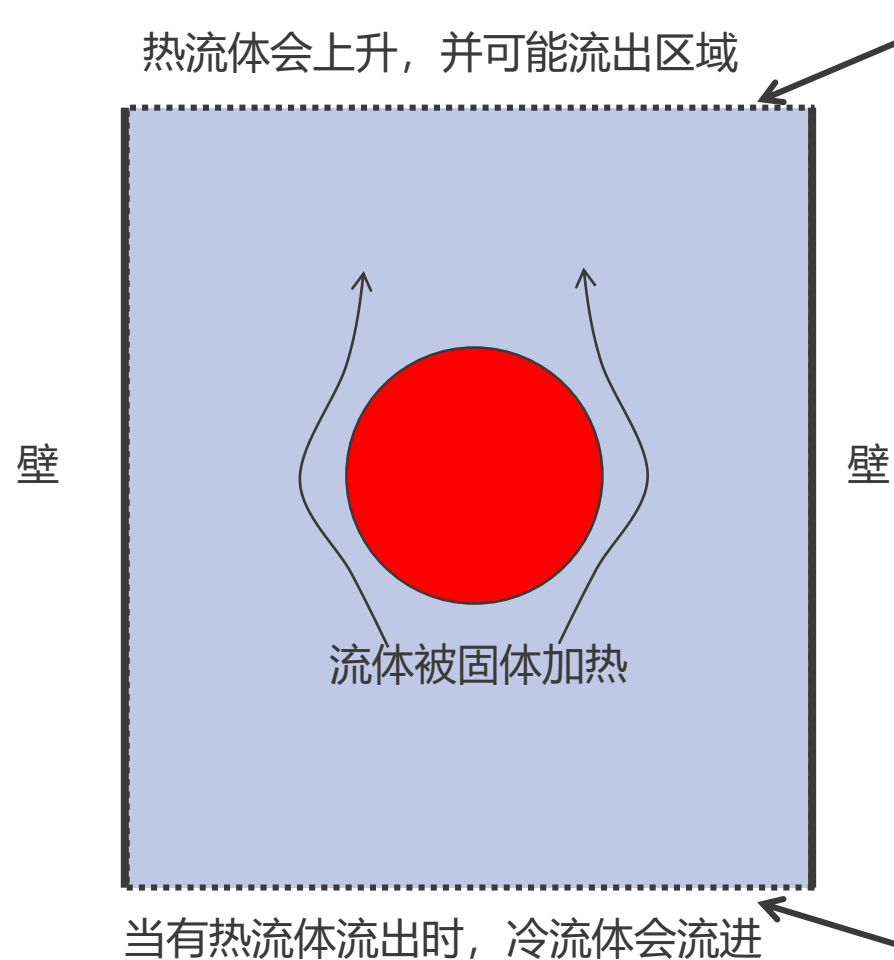
封闭空腔当中的自然对流

■ 流场设定

- 所有的壁都为无滑移边界
 - 流速 = 0
- 需要加上压力约束点
 - Navier-Stokes求解压力梯度...我们需要指定某一个地方的压力
- 主节点上勾选重力选项



开放通道中的自然对流



- 开边界

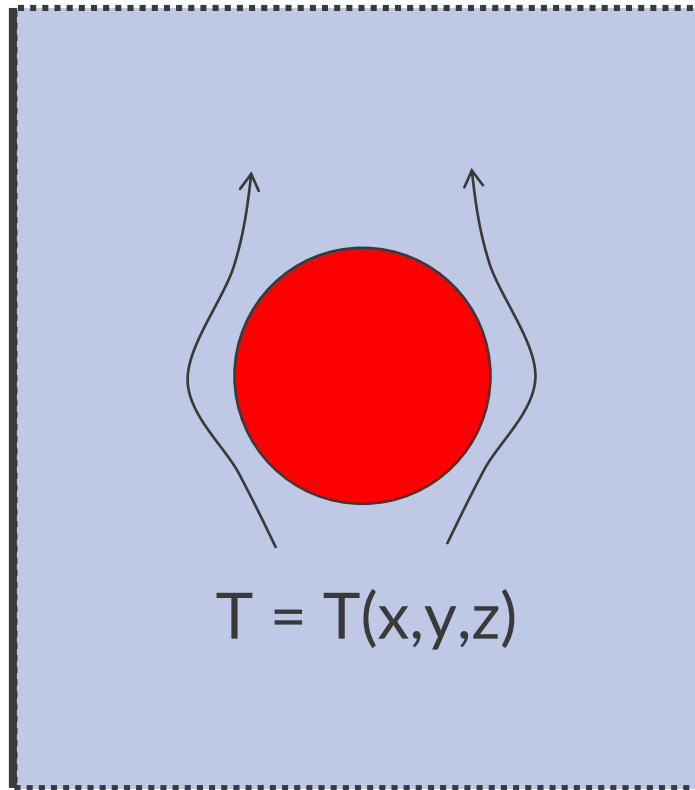
- 流体

- 粘性应力 + 压力 = 0

- 热:

- 如果流体向内流则 $T = T_0$
 - 如果流体向外流则传导热通量为0

开放通道中的自然对流



$$T = T_0$$

$$\text{浮力} = -g^*(\text{density}(T) - \text{density}(T_0))$$

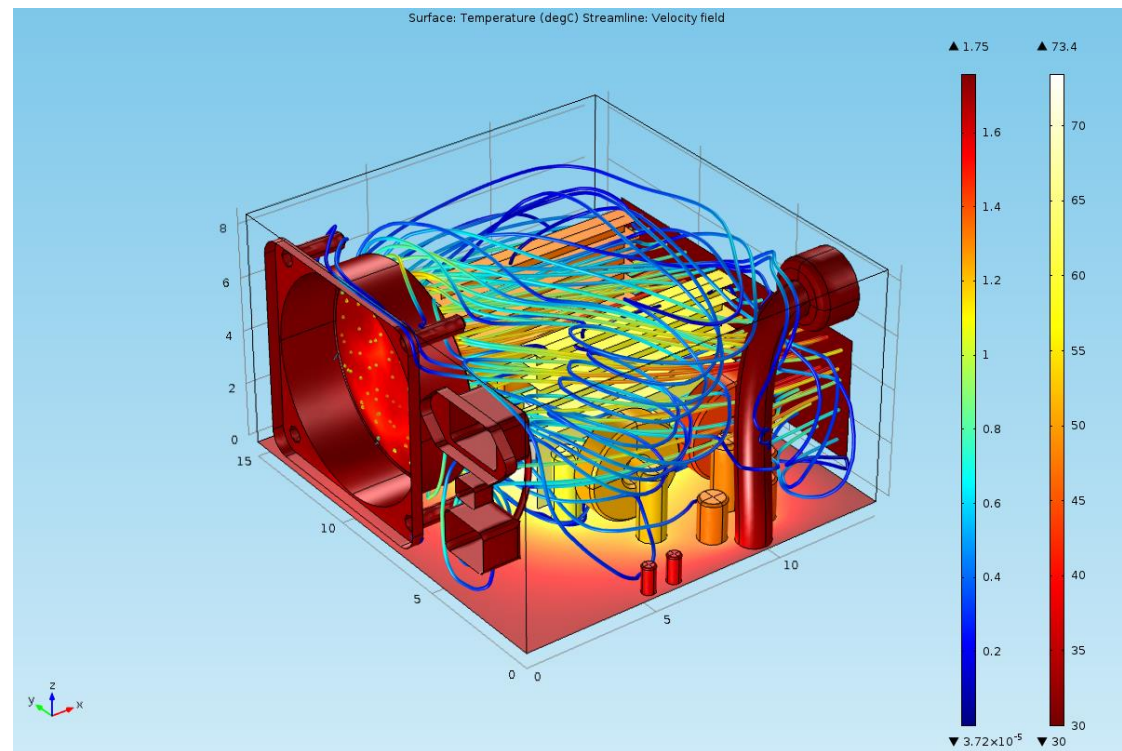
我们需要知道该值

强制对流

- 流体的运动是由“外部”驱动的
- 比如: 电子器件的冷却, 热交换器
- 无量纲数

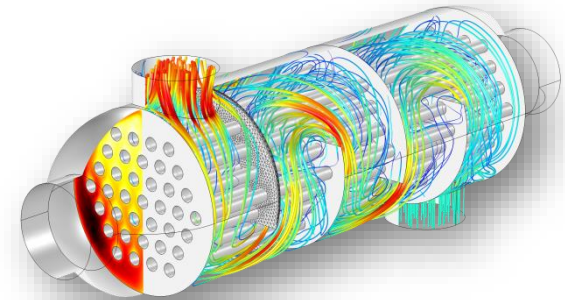
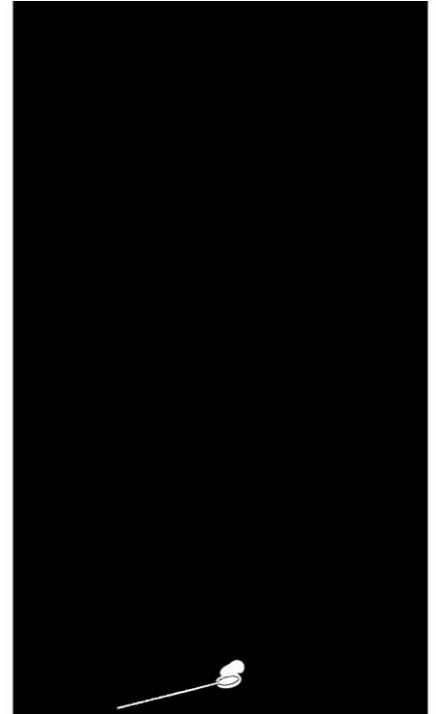
$$- Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘滞力}}$$

电子器件的强制对流冷却



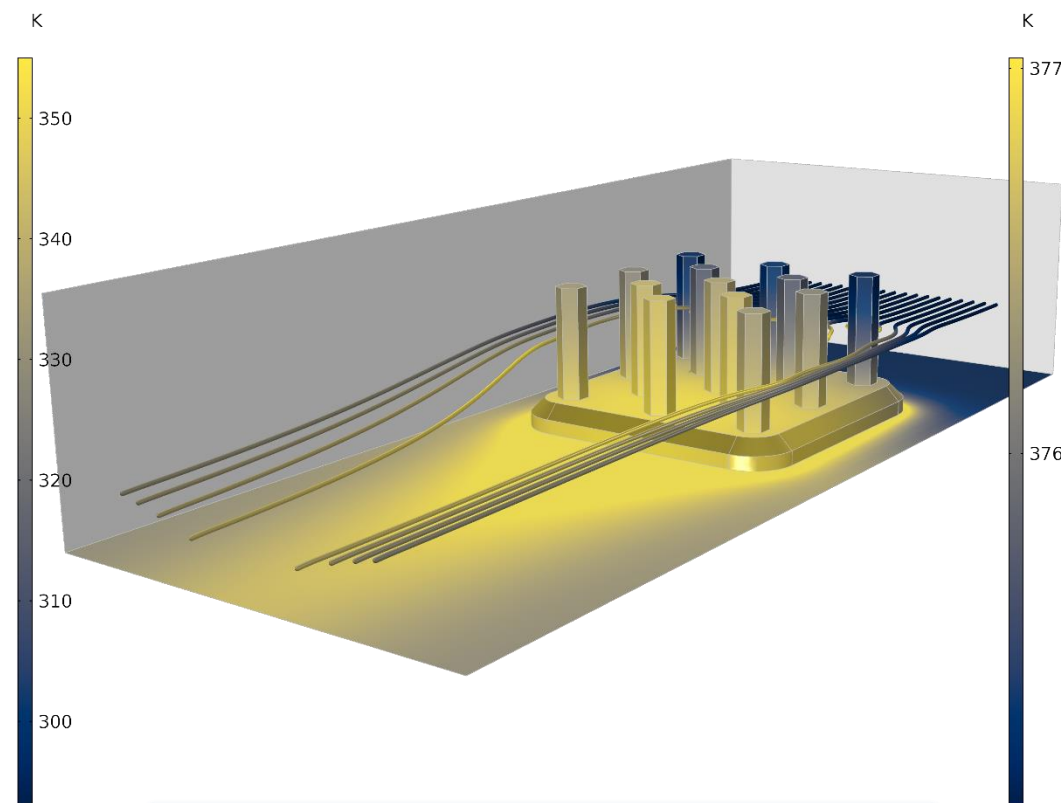
检查雷诺数

- 理论上可以使用“非常”密的网格
 - 利用层流接口来模拟湍流 - DNS
- 一个更好的选项 - 选择一个RANS湍流，模型
 - $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST 或者 Spalart-Allmaras
- 还需要一个湍流热传递模型
 - 缺省的Kays-Crawford 使用于大多数情形
 - 如果流体为液态金属则切换到：扩展 Kays-Crawford
- 案例库模型
 - Heat Transfer Module > Heat Exchangers > shell and tube heat exchanger



代数湍流模型

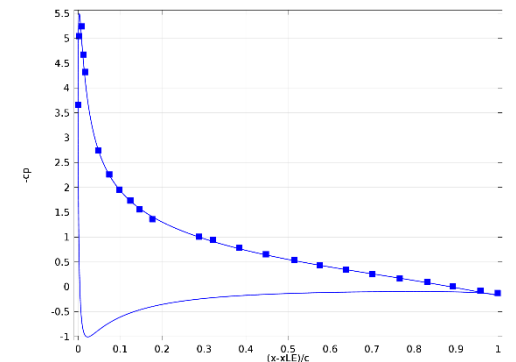
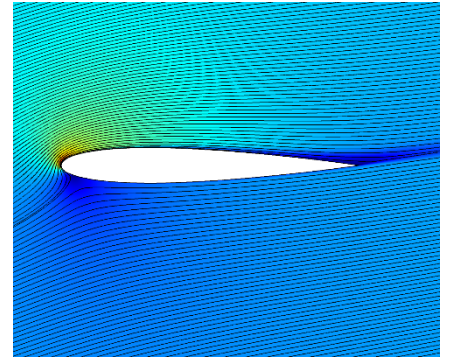
- 雷诺数基于当地速度和壁面距离
 - 代数 yPlus
 - L-VEL
- 优势
 - 鲁棒性强
 - 计算成本低
- 劣势
 - 精度稍差



电子器件冷却标准模型中的表面温度和流线

输运方程模型

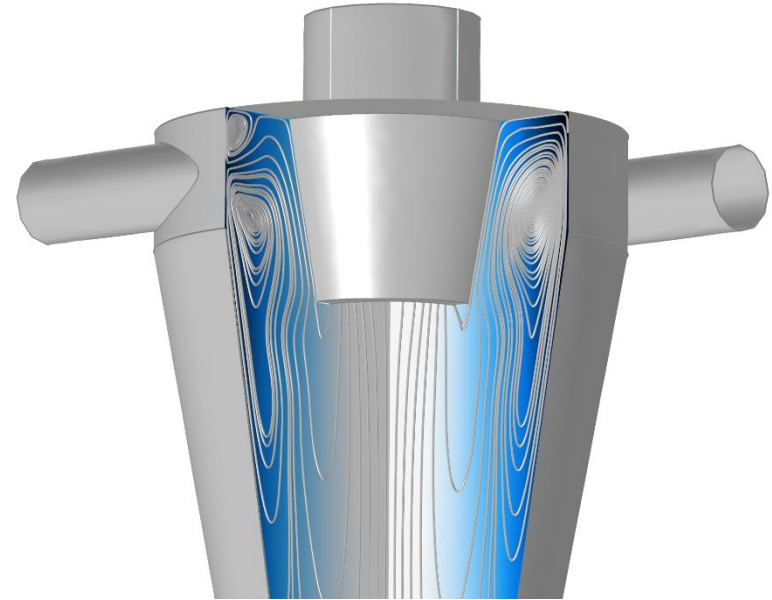
- 两方程模型
- k - ε 模型
 - 具有可实现性限制的标准 k - ε 模型
- k - ω 模型
 - 具有可实现性限制的由 Wilcox 修正的 k - ω 模型 (1998)
- SST 模型
 - 自由流区使用 k - ε 模型、近壁区域使用 k - ω 模型
- 低雷诺数 k - ε 模型
 - AKN k - ε 模型使近壁流动求解计算成为可能



使用 SST 湍流模型的 NACA0012 翼型标准模型

输运方程模型

- 附加的输运方程模型
- Spalart-Allmaras
 - 具有旋转修正的一方程模型，面向空气动力学应用而开发的模型
- v^2 -f model
 - 基于 k - ϵ 模型的扩展，通过求解流线法向的湍流速度脉动来考虑湍流的各项异性



水力离心分离器中的流动，在这个典型的案例中， v^2 -f 模型比两方程模型，例如 k - ϵ 或 SST 模型，可以给出更好的结果。

壁处理

■ 壁函数

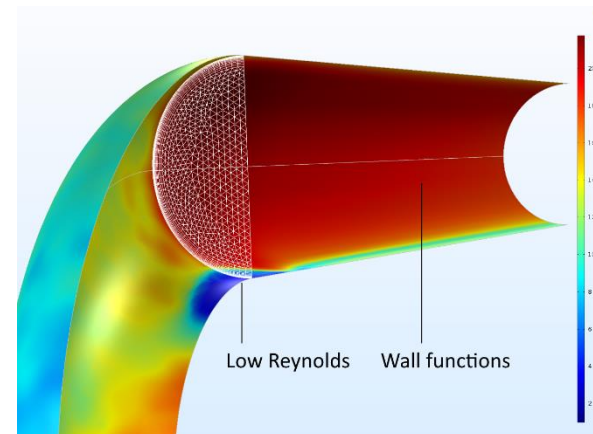
- 鲁棒性—应用于粗糙网格—限制准确性
- 光滑和粗糙壁
- 支持 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型

■ 低雷诺数处理

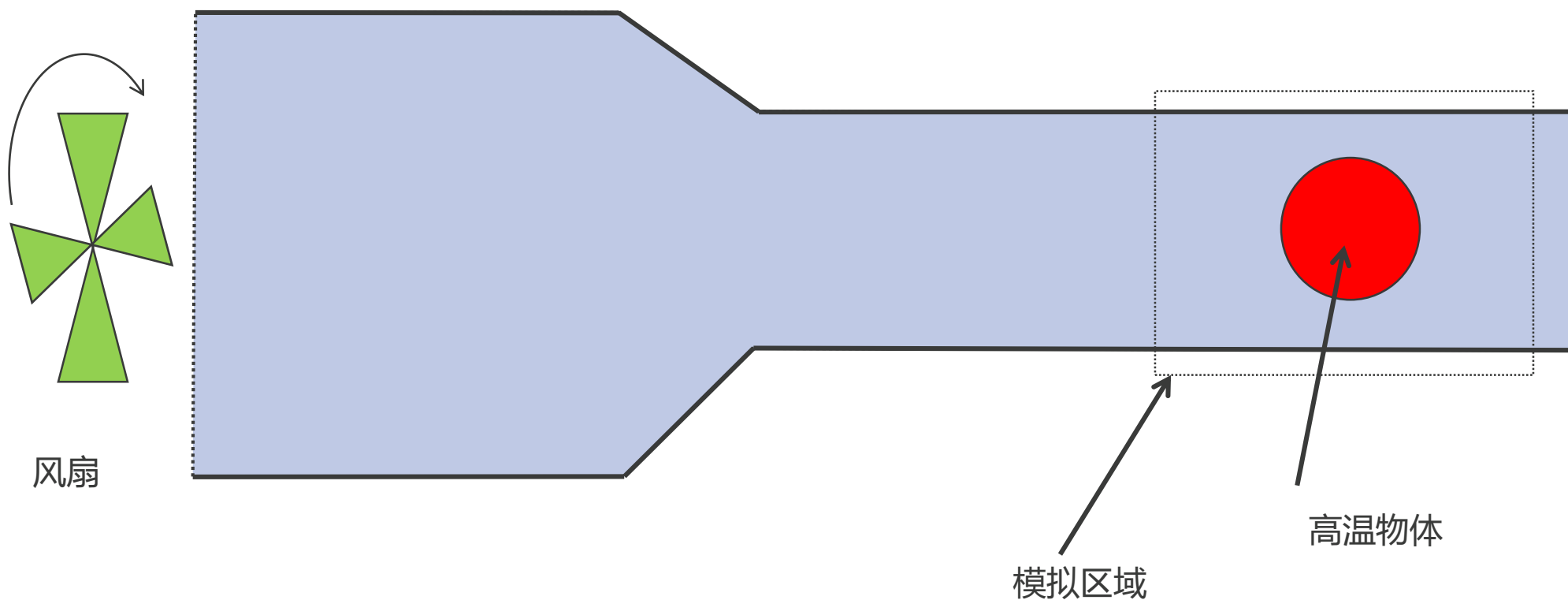
- 将湍流模型的求解推进到壁面—准确性高
- 需要精细网格
- 除去 $k-\varepsilon$ 模型外所有湍流模型均支持

■ 自动壁处理

- 在低雷诺数处理与壁函数之间切换—当地网格分辨率影响准确性
- 继承了壁函数的鲁棒性
- 除去 $k-\varepsilon$ 模型外所有湍流模型的默认设置

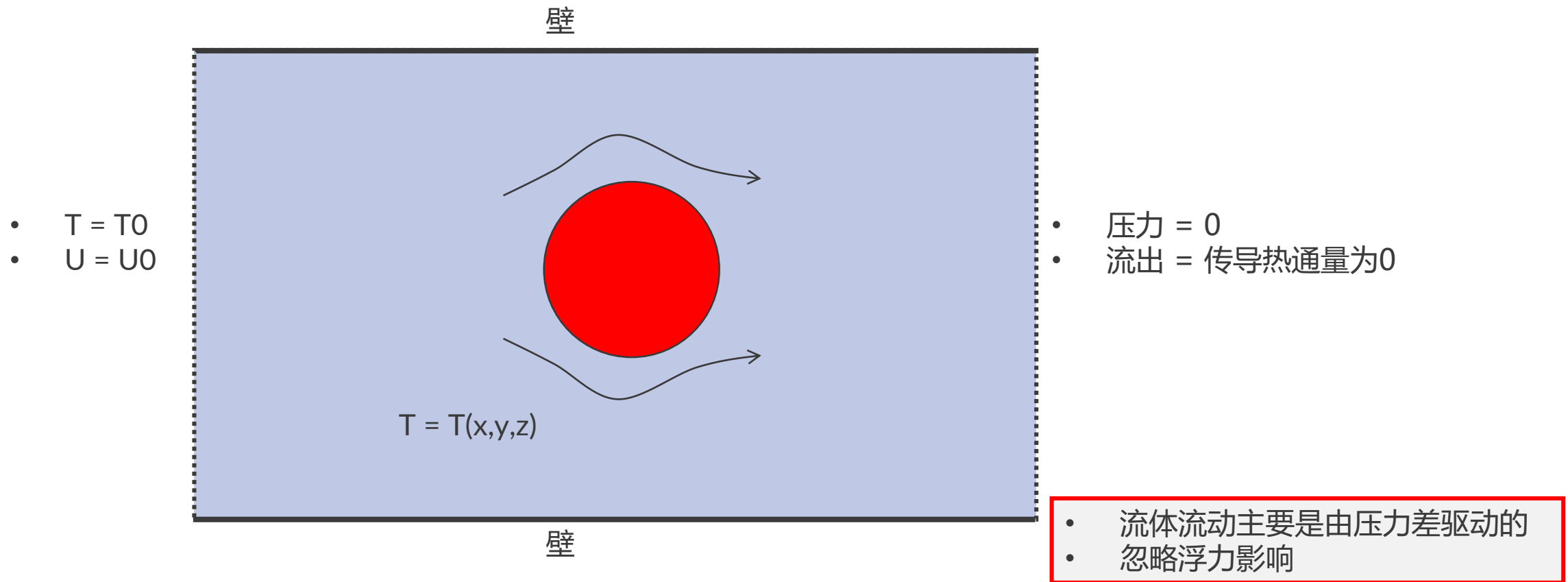


强制对流



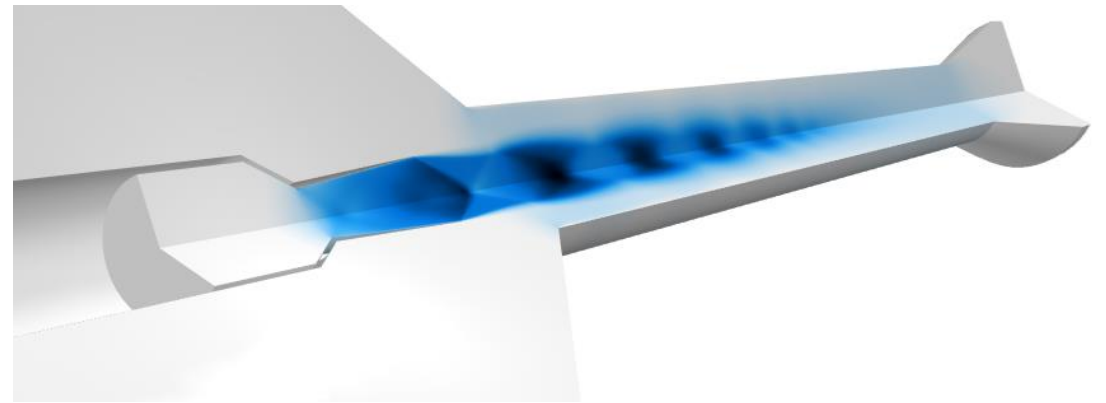
模拟的区域需要选择合适，从而使进口和出口效应不会包含进去

强制对流



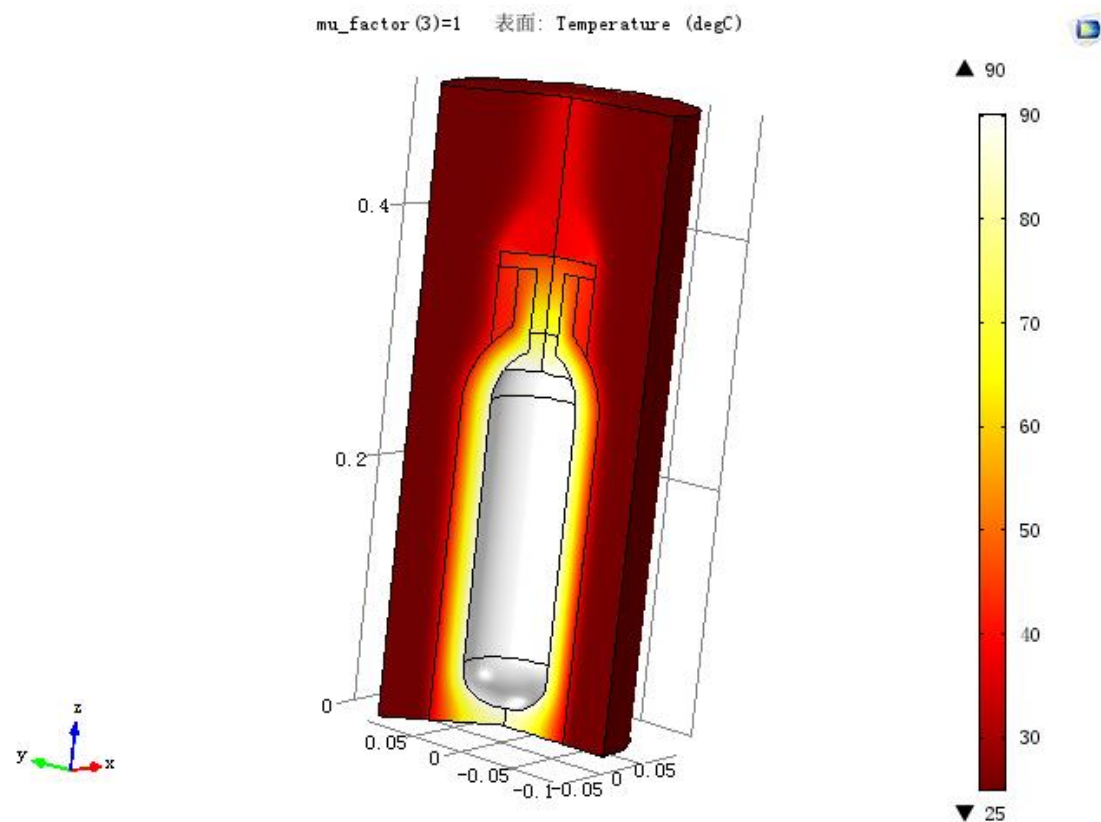
高马赫数流

- 传热方程与流动方程的强耦合
- 层流或湍流
- $k-\varepsilon$ 湍流模型
- Spalart-Allmaras 模型
- 对所有马赫数的可压缩流动
- Sutherland 定律描述粘度和热导率大小



超音速射流中湍流流场的激波串

Hands on: Advanced Vacuum flask



- ▲ 传热: Heat Transfer 2 (*ht2*) (*ht2*)
 - ▶ 固体传热: Heat Transfer in Solids 1 (*solid1*)
 - ▶ 流体传热: Heat Transfer in Fluids 1 (*fluid1*)
 - ▶ 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*)
 - ▶ 开边界: Open Boundary 1 (*open1*)
 - ▶ 方程视图: Equation View (*info*)
- ▲ 层流: Laminar Flow (*spf*) (*spf*)
 - ▶ 流体属性: Fluid Properties 1 (*fp1*)
 - ▶ 轴对称: Axial Symmetry 1 (*axi1*)
 - ▶ 壁: Wall 1 (*wall1*)
 - ▶ 初始值: Initial Values 1 (*init1*)
 - ▶ 体积力: Volume Force 1 (*vf1*)
 - ▶ 开边界: Open Boundary 1 (*open1*)

管道传热

管道流动

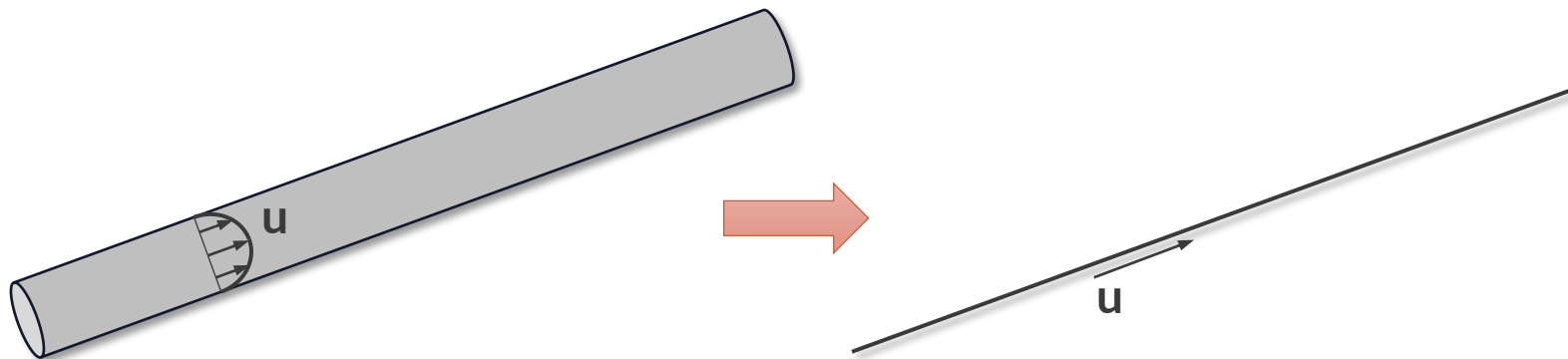
- 控制方程

- 动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p - \underbrace{f_D \frac{\rho}{2d_h} \mathbf{u} |\mathbf{u}|}_{\text{摩擦阻力项}} + \mathbf{F}$$

- 连续性方程

$$\frac{\partial A \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A \rho \mathbf{u}) = 0$$



管道传热

- 控制方程

- 传热方程

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k \nabla T + \underbrace{f_D \frac{\rho A}{2 d_h} |\mathbf{u}|^3}_{\text{摩擦生热}} + \underbrace{Q + Q_{\text{wall}} + Q_p}_{\text{穿过壁面的外部热源}}$$

- Darcy 摩擦因子 f_D 随 Reynolds 数、壁粗糙度以及管道形状和尺寸而变化，内建 f_D 经验数据（层流： $f_D = 64/\text{Re}$ ）
 - 自动计算传热系数，包括内部传热系数，壁层热阻和外部传热

摩擦系数

■ 管道参数设置

▼ 管形状

圆形

内径:
 d_i d_pipe

▼ 流阻

摩擦模型:
Churchill

表面粗糙度:
拉制管 (0.0015 mm)

圆形
未设置
圆形
正方形
矩形
用户定义

■ 内置经验公式

$$A = \frac{\pi}{4} d_i^2$$

$$Z = \pi d_i$$

$$d_h = d_i$$

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu}$$

$$c_A = \left[-2.457 \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \left(\frac{e}{d_h} \right) \right) \right]^{16}$$

$$c_B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

$$f_D = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (c_A + c_B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}}$$

$$e = 0.0015 \text{ mm}$$

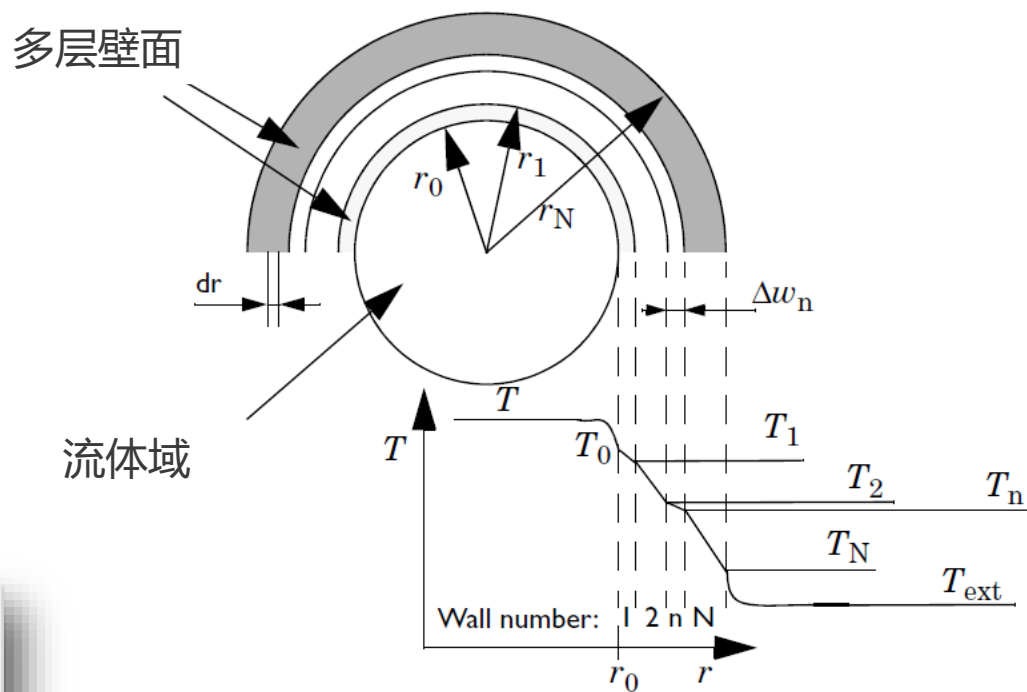
管道传热系数

■ 包含三部分热阻

- 内部膜阻
- 壁层热阻
- 外部膜阻

$$Q_{\text{wall}} = (hZ)_{\text{eff}}(T_{\text{ext}} - T) \text{ (W/m)}$$

- ▲ 壁传热: Wall Heat Transfer 1 {wht1}
- ▢ 内部膜阻: Internal Film Resistance 1 {intfilm1}
- ▢ 壁层: Wall Layer 1 {wall1}
- ▢ 外部膜阻: 外部膜阻 1 {extfilm1}



膜阻计算

■ 内部膜阻

▼ 方程

显示假设方程:

研究: Study 1 {std1}, 瞬态: Time Dependent {time}

$Nu_{lam} = 3.66$ for round pipes and user defined shapes

For rectangular cross sections $Nu_{lam} = \begin{cases} 2.98, \text{ for } w/h = 1 \\ 3.08, \text{ for } w/h = 1.43 \\ 3.39, \text{ for } w/h = 2 \\ 4.44, \text{ for } w/h = 4 \\ 5.60, \text{ for } w/h = 8 \\ 7.54, \text{ for } w/h = \infty \end{cases}$

$$Nu_{turb} = \frac{(f_D/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f_D/8}(Pr^{2/3} - 1)}$$
$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$
$$Nu = \max(Nu_{lam}, Nu_{turb})$$
$$h_{int} = Nu \frac{k}{d_h}$$

▼ 膜阻

内部膜传热模型:

自动

自动

用户定义

■ 外部膜阻

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

$$Re = \frac{\rho u_{ext} d_h}{\mu}$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \sqrt{Re} Pr^{1/3}}{(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}} (1 + (Re/282000)^{5/8})^{4/5}$$

$$h_{ext} = Nu \frac{k}{d_h}$$

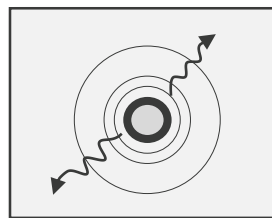
外部膜传热模型:

外部强制对流

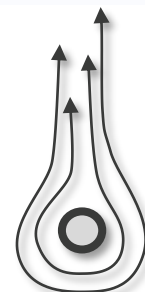
外部强制对流

外部自然对流

用户定义



固体热传导



自然对流



强制对流

多孔介质传热

多孔介质传热

■ 控制方程

- 固体部分（导热）

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = Q_s$$

- 流体部分（对流）

$$\rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} \mathbf{u}_f \cdot \nabla T_f + \nabla \cdot \mathbf{q}_f = Q_f$$

- 局部平衡： $T_s = T_f$
- 局部非平衡： $T_s \neq T_f$

局部非平衡判据

- Sparrow准数

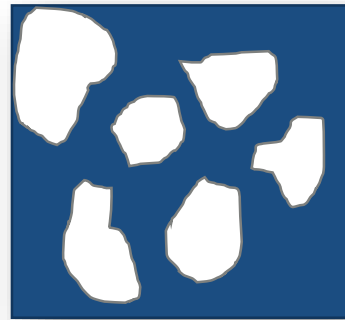
$$Sp = \frac{h_{sf} L^2}{k_{eff} r_h}$$

- Sp 小于100或500

- Darcy准数

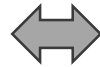
$$Da = \frac{\kappa}{d^2}$$

- Da 大于 10^{-7}

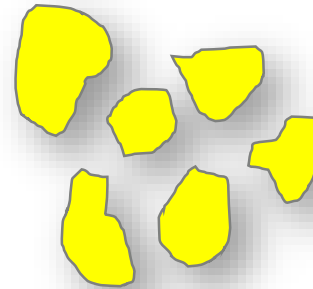


T_f

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



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



T_s

局部非平衡接口

- 两个物理场接口，两个温度变量

- 固体传热: 固体传热 (ht) {ht}
 - 固体: 固体 1 {solid1}
 - 初始值: 初始值 1 {init1}
 - 热绝缘: 热绝缘 1 {ins1}
- 流体传热: 流体传热 2 (ht2) {ht2}
 - 流体: 流体 1 {fluid1}
 - 初始值: 初始值 1 {init1}
 - 热绝缘: 热绝缘 1 {ins1}
- 多物理场
 - 局部热非平衡: 局部热非平衡 1 (ltne1) {ltne1}

方程

显示假设方程:

研究: 研究 1 {std1}, 稳态: 稳态 {stat}

$$Q_s = \frac{q_{sf}}{\theta_p} (T_f - T_s)$$

$$Q_f = \frac{q_{sf}}{1 - \theta_p} (T_s - T_f)$$

$$q_{sf} = \frac{6\theta_p}{2r_p} \cdot h_{sf}$$

局部热非平衡设置

固体体积分数:

θ_p 0.5 1

间隙对流传热系数:

球形颗粒床

平均颗粒半径:

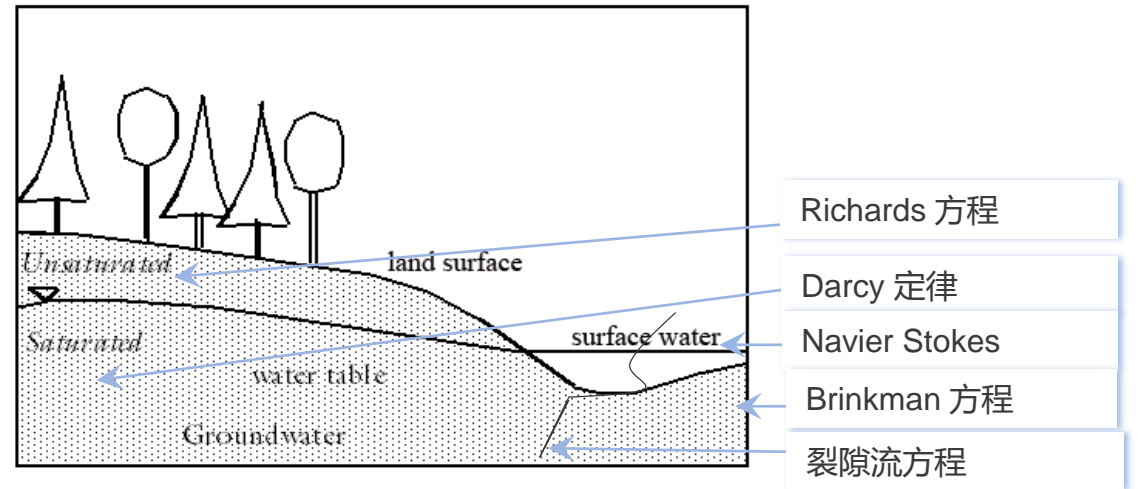
r_p 5e-4[m] m

动力粘度:

μ 来自材料

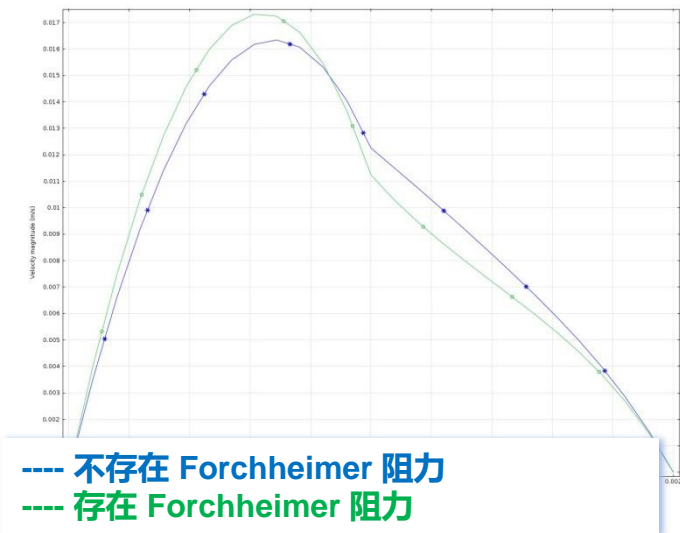
多孔介质流动

- Richards方程：变饱和多孔介质流动
- Darcy 定律：多孔介质缓慢流动
- Brinkman 方程：多孔介质快速流动
- Navier-Stokes 方程：自由流动
- 裂隙流方程：沿岩土裂隙流动



自由和多孔介质流动

- 层流与多孔介质流动耦合
 - Navier-Stokes 和 Brinkmann 方程
- 稳定性设置
- 多孔介质流中的对流项
- 多孔介质流中的 Forchheimer 阻力项



Hands on: 地热抽取系统

