

# 多孔介质流模块

简介

# 多孔介质流模块简介

© 1998–2019 COMSOL 版权所有

受列于 [cn.comsol.com/patents](http://cn.comsol.com/patents) 的美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673、9,454,625 和 10,019,544 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](http://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](http://cn.comsol.com/trademarks)。

版本：COMSOL 5.5

## 联系信息

请访问“联系我们”页面 [cn.comsol.com/contact](http://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](http://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](http://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](http://cn.comsol.com/support)
- 产品下载：[cn.comsol.com/product-download](http://cn.comsol.com/product-download)
- 产品更新：[cn.comsol.com/support/updates](http://cn.comsol.com/support/updates)
- COMSOL 博客：[cn.comsol.com/blogs](http://cn.comsol.com/blogs)
- 用户论坛：[cn.comsol.com/community](http://cn.comsol.com/community)
- 活动：[cn.comsol.com/events](http://cn.comsol.com/events)
- COMSOL 视频中心：[cn.comsol.com/video](http://cn.comsol.com/video)
- 技术支持知识库：[cn.comsol.com/support/knowledgebase](http://cn.comsol.com/support/knowledgebase)

文档编号：CM024802

# 目录

---

- 简介..... 5
- 多孔介质流模块接口..... 6
  - 化学反应和质量传递 ..... 7
  - 流体流动 ..... 8
  - 多孔介质流动 ..... 8
  - 传热 ..... 9
  - 结构力学 ..... 10
  - 基于空间维度和研究类型的物理场接口指南 ..... 11
- 教学案例 - 填充床潜热存储..... 15



## 简介

---

多孔介质存在于许多自然和人造系统中。对高级多孔介质建模的需求涉及许多行业和应用领域，例如燃料电池工艺、纸浆和纸张的干燥、食品生产、过滤工艺等。

“多孔介质流模块”将 COMSOL Multiphysics 建模环境扩展到多孔介质中质量、动量和能量传输的定量研究，它是为研究人员、工程技术人员、教师和学生设计的，适用于单物理场和多物理场建模。

“多孔介质流模块”的内容是一组基本的构建块，涵盖了广泛的物理场问题，其中提供的物理场接口可以独立工作，也可以相互链接。这些接口还可以耦合到已内置在 COMSOL Multiphysics 中的物理场接口，或者耦合到您创建的新方程。

该模块中的物理场接口、选项和功能是针对多孔介质中的过程定制的。例如，“传热”接口包含用于自动计算多组分系统有效热属性的选项。流体流动方程代表了广泛的可能性，包含了理查兹方程，用于描述可变饱和多孔介质中的非线性流动。饱和多孔介质的选项包括达西慢流定律和剪切不可忽略的 Brinkman 方程。“层流”和“蠕动流”接口涵盖了不同雷诺数下的自由流动。该模块还可用于分析化学物质传递。“稀物质传递”接口用于分析自由流动、饱和及部分饱和多孔介质中的物质传递。有许多示例将这些物理场接口链接在一起使用。

您可以将“多孔介质流模块”与 COMSOL Multiphysics 产品套件中的任何其他产品结合使用。该模块是一个通用接口，可用于计算工程问题的最优解，例如，改进设计，从而使能耗最小化或使输出最大化。

## 多孔介质流模块接口

---

“多孔介质流模块”包含许多物理场接口，预定义了适合多孔介质中质量、动量和能量传递的方程或方程组。您可以使用这些物理场接口中的方程及其变量，然后做出修改，将它们链接在一起，还可以将它们耦合到 COMSOL Multiphysics 中的其他物理场接口。

物理场接口基于多孔介质中质量、动量和能量守恒的定律。流动模型包含适用于场物理现象的守恒定律的不同组合及公式。这些物理定律转换为偏微分方程，并结合指定的初始条件和边界条件进行求解。

物理场接口定义了许多特征，用于指定流体属性、初始条件、边界条件以及可施加的约束。每个特征都表示一种运算，用来描述守恒方程中的一个项或条件。这类项或条件可以在组件的几何实体中定义，如域、边界、边（三维组件）或点。

这些物理场接口中的另一个有用工具是通过输入表达式来描述材料属性（例如密度和黏度）的功能，这些表达式将材料属性描述为其他参数（如物质浓度、压力或温度）的函数。材料库中的许多材料都使用温度相关属性和压力相关属性。

图 1 显示除了 COMSOL Multiphysics 基本许可证之外，还提供了一组物理场接口。使用这些接口可以对化学物质传递、流体流动、传热和固体力学进行建

模，从而简化建模过程，下面将对此进行简要讨论。另请参见[基于空间维度和研究类型的物理场接口指南](#)。



图1：“多孔介质流模块”的物理场接口，如三维 App 的“模型向导”中所示。


该模块可用于分析一维几何结构、二维几何结构及包含一维、二维轴对称的三维几何结构的瞬态和稳态问题。预定义的物理场接口涵盖四个主要类别：化学物质传递 (🧪)、流体流动 (🌊)、传热 (🔥) 和结构力学 (🏗️)，如下页所述。


## 化学反应和质量传递


“稀物质传递”接口 (🧪) 模拟化学物质通过对流（与流体流动耦合时）、扩散和反应的传递情况，适用于其中一种成分（溶剂）过量的混合物。


“多孔介质稀物质传递”接口 (🧪) 适合模拟饱和及部分饱和多孔介质中的溶质运移。该物理场接口描述了包含流体、固体和气体的系统中一种或多种相互作用的化学物质的速率和传递。这些方程提供了预定义选项，以描述通过对流、


吸附、分散、扩散、挥发和反应进行的质量传递。您可以从包含的任一物理场接口中定义对流速度，或将其设置为预定义的速度曲线。


“反应流”分支下的“层流，稀物质”接口()结合了“单相流”与“稀物质传递”接口中的功能。该多物理场接口主要用于为低到中等雷诺数的流动进行建模，其中必须耦合质量传递和流场。

“多孔介质反应流”分支下的“稀物质传递”接口()结合了 Brinkman 方程和“多孔介质稀物质传递”接口的功能。该多物理场接口主要用于模拟稀释的反应混合物在多孔介质中的传递。

“裂隙中的稀物质传递”接口()用于模拟溶质沿薄多孔裂隙的运移，同时分析扩散、分散、对流和化学反应。裂隙由二维和三维中的边界定义，溶质在溶剂中稀释。沿裂隙求解的质量传递方程是对流扩散反应方程的切向微分形式。该接口提供多种有效扩散率模型。


“建筑材料中的水分输送”接口()用于计算建筑材料中的相对湿度场，通过分析蓄水量、毛细管吸力引起的液体输送来模拟水分输送。


“空气中的水分输送”接口()用于计算空气中的相对湿度分布，模拟湿空气中由于蒸汽对流和扩散引起的水分输送，以及壁面蒸发或冷凝。

“水分流动”文件夹下的“层流”接口()将“空气中的水分输送”与“单相流”接口中的所有特征相结合，系统会自动添加“水分流动”多物理场耦合，流体属性可能与蒸汽浓度相关。该物理场接口支持低马赫数（通常小于 0.3）流动。与“共轭传热”耦合类似，“水分输送”接口可以通过“CFD 模块”与自由流动的其他湍流模型相耦合。

## 流体流动


多孔介质流动通常在低雷诺数下发生。雷诺数 (Re) 是流体黏性与作用在流体上的惯性力之比的量度，由下式给出： $Re = \rho UL / \mu$ ，其中  $\rho$  是流体密度， $U$  是特征速度， $L$  是特征长度尺度， $\mu$  是动力黏度。

“蠕动流”接口()可近似雷诺数明显小于 1 情况下的纳维 - 斯托克斯方程。这通常称为斯托克斯流，适用于黏滞流动占主导的情况。

“层流”接口()描述了不存在湍流且雷诺数小于约 1000 时的流体运动。该物理场接口求解马赫数 (Ma) 小于 0.3 的不可压缩流动、弱可压缩流动或可压缩流动的纳维 - 斯托克斯方程。


“多相流”分支下的“相传递”接口()用于模拟自由流动中多个不混溶相的传递。该接口可求解各相的平均体积分数。


## 多孔介质流动


“达西定律”接口()描述了流体通过多孔介质空隙的运动。该物理场接口可用于对低速流动进行建模，在低速流动中，压力梯度是主要驱动力，流动主要受孔隙内摩擦阻力的影响。该接口主要用于非常低速的流动，或渗透率和孔隙率非常小的介质。您还可以设置多个达西定律接口，对涉及多个流动相的多相





流进行建模。还可以在“达西定律”接口中添加非达西效应，例如 Ergun 或 Forchheimer 阻力项，这些项对于雷诺数大于 100 的情况非常重要。


“裂隙流”接口 () 是达西定律的一种变体，定义了沿内部边界的流动，该内部边界代表多孔（或固体）介质中的裂隙。

“理查兹方程”接口 () 可分析可变饱和和多孔介质中的流动。在变饱和和流动的情况下，渗透率会随着流体在介质中的流动而变化，从而填充某些孔隙，并从其他一些孔隙排出。理查兹方程看起来类似于达西定律中提出的饱和流动方程，但由于材料属性从非饱和状态变化到饱和状态，它是非线性的。变饱和和流动建模经常采用 van Genuchten 和 Brooks-Corey 的解析公式。

“Brinkman 方程”接口 () 用于对马赫数 (Ma) 小于 0.3 的不可压缩流动、弱可压缩流动或可压缩流动进行建模。当雷诺数明显小于 1 时，您可以选择 Stokes-Brinkman 流动特征来减少方程对惯性效应的依赖。“Brinkman 方程”接口扩展了达西定律，描述了黏滞剪切对动能的耗散，类似于纳维 - 斯托克斯方程。您还可以在“Brinkman 方程”接口中添加 Ergun 或 Forchheimer 阻力项，这些项是与速度的平方成正比的黏性阻力。这些非达西效应对于雷诺数大于 100 的情况非常重要。

“自由和多孔介质流动”接口 () 用于模拟自由流动与多孔介质相结合的问题，例如固定床反应器和催化转化器。“自由和多孔介质流动”接口用于至少两个不同的域，即自由通道和多孔介质。该物理场接口增加了允许根据相关域的流动属性对方程进行优化的功能。例如，您可以选择 Stokes-Brinkman 流动特征来减少方程对多孔域中惯性效应的依赖，或者仅选择斯托克斯流动特征来减少方程对自由通道中惯性效应的依赖。


“多孔介质相传递”接口 () 用于模拟多个不混溶相通过多孔介质的传递。该接口求解各相的平均体积分数（饱和度），虽然微观界面效应在微观方程中通过毛细压力函数进行分析，但该接口不追踪不同相之间的界面。


“多孔介质多相流”接口 () 结合了达西定律和“多孔介质相传递”接口的功能。该多物理场接口旨在模拟多孔介质中多个不混溶相的流动和传递。

像之前一样，通过该物理场接口，您可以直接使用常数或表达式来定义描述多孔介质流动的材料属性，包括密度、动力黏度、渗透率和孔隙率。




## 传热


“传热”接口适用于由固体、流体和流固混合物组成的系统，并且能够计算由多种流体、气体和固体成分组成的多孔介质（例如具有不同矿物比例的岩层）的有效属性。



默认情况下，“固体传热”接口 () 描述传导传热。该物理场接口还可用于分析固体平移产生的热通量，以及固体变形（包括体积或表面变化）。对于不可逆的热诱导转变，还可以分析焓和材料属性的变化。




“流体传热”接口 () 分析的默认传热机制是气体和液体中的传导和对流。与对流项中的流场耦合时，您可以手动输入，也可以从耦合了传热与现有流体流




动接口的列表中选择。“流体传热”接口可以与“层流”接口同时求解，在流场计算完成后求解传热问题时，可以使用“流体传热”接口，该接口尤其适用于强制对流仿真。


默认情况下，“固体和流体传热”接口 () 包含固体域和流体域，主要针对使用“固体传热”接口 () 和“流体传热”接口 () 功能的模型简化其设置过程，尤其适用于共轭传热应用。


“共轭传热”分支 () 将“传热”与“单相流”接口中的特征相结合，来描述固体和流体传热，以及流体中的非等温流动。传热过程通过预定义的多物理场耦合设置与流体流动问题紧密耦合。使用“CFD 模块”可以获得自由流动的其他湍流模型。

“薄结构”分支 () 下的“裂隙传热”接口 () 描述了裂隙和薄多孔介质中的传热。该接口提供了在边界级别定义的有效模型，这些模型表示薄的三维域。最简单的模型假设沿裂隙厚度的温度变化可以忽略不计，而通用模型则计算整个裂隙中的温度变化。

“建筑材料”接口 () 将“建筑材料传热”接口 () 与“建筑材料中的水分输送”接口 () 相结合，可用于为建筑组件中不同的湿度变化现象建模，例如，初始建筑水分的干燥、水分从外向内迁移引起的冷凝，或因扩散导致的分子内缩合引起的水分积聚。


“湿空气”接口 () 将“湿空气传热”接口 () 与“空气中的水分输送”接口 () 相结合，用于模拟空气中的传热与蒸汽输送之间的耦合，以及壁面蒸发与冷凝之间的耦合。

“多孔介质传热”接口 () 结合了固体 - 流体系统中的热传导和对流。该物理场接口提供了用于计算有效传热属性的混合规则，以及用于多孔介质热分散的表达式。这种热分散是由液体在多孔介质中的曲折路径引起的，如果仅考虑平均对流项，该分散则不会被描述。该物理场接口可用于各种多孔材料，从多孔结构到土壤和岩石传热仿真，还可以对裂隙传热进行建模。

“局部热非平衡”(LTNE) 多物理场接口 () 专用于模拟多孔介质传热，其中多孔基体和流体中的温度不平衡。快速瞬态变化可能造成热失衡，但这种情况也可以在稳态情况下观察到。典型的应用是使用热（或冷）流体快速加热（或冷却）多孔介质，或在其中一个相中产生内部热量。这种效应可以在核装置、电子系统和燃料电池中观察到。

这些特征可以无缝交互，并且可以在单个 App 中组合使用。表面对表面辐射也可以包含在能量方程中，但需要具有“传热模块”的许可证。

## 结构力学

“多孔弹性”多物理场接口 () 将达西定律的瞬态公式与“固体力学”接口中包含的线弹性材料相结合。多孔弹性耦合意味着孔隙流体影响多孔介质的可压缩性，并且体积应变的变化影响孔隙率和流体流动。

## 基于空间维度和研究类型的物理场接口指南

下表列出了 COMSOL 基本许可证提供的物理场接口以及特定于此模块的物理场接口。

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
 化学物质传递				
稀物质传递		tds	所有维度	稳态；瞬态
多孔介质稀物质传递		tds	所有维度	稳态；瞬态
裂隙中的稀物质传递		dsf	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 水分输送				
建筑材料中的水分输送		mt	所有维度	稳态；瞬态
空气中的水分输送		mt	所有维度	稳态；瞬态
 水分流动				
层流		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 反应流				
层流，稀物质		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 多孔介质反应流				
稀物质传递		rfds	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
 流体流动				
 单相流				
蠕动流		spf	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
层流		spf	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 相传递				
相传递		phtr	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 多孔介质和地下水流				
Brinkman 方程		br	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
达西定律		dl	所有维度	稳态；瞬态
裂隙流		esff	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
理查兹方程		dl	所有维度	稳态；瞬态
多孔介质多相流		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
自由和多孔介质流动		fp	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
多孔介质相传递		phtr	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
 <b>传热</b>				
固体传热		ht	所有维度	稳态；瞬态
流体传热		ht	所有维度	稳态；瞬态
固体和流体传热		ht	所有维度	稳态；瞬态
 <b>薄结构</b>				
裂隙传热		htlsh	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态；热扰动，频域
 <b>热湿传递</b>				
建筑材料		—	所有维度	稳态；瞬态；热扰动，频域
湿空气		—	所有维度	稳态；瞬态；热扰动，频域
 <b>热湿流动</b>				
层流		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
多孔介质传热		ht	所有维度	稳态；瞬态
局部热非平衡		—	所有维度	稳态；瞬态；热扰动，频域
 <b>结构力学</b>				
多孔弹性		poro	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
<sup>1</sup> 此物理场接口随核心 COMSOL 软件包一起提供，并添加了针对此模块的功能。				
<sup>1</sup> 还需要“传热模块”和“CFD 模块”。				
<sup>2</sup> 还需要“CFD 模块”。				

## 教学案例 - 填充床潜热存储

热能储存 (TES) 装置用于收集来自太阳能、地热或废热源的热能。最简单的 TES 装置是由水箱建造的，太阳能以显热的形式存储在水箱中。这些系统称为显热存储 (SHS) 装置。通过包含潜热，可以进一步增加这些储罐的热容量，从而产生潜热存储 (LHS) 装置。通常，LHS 储罐包含球形胶囊，其中填充有石蜡作为相变材料。石蜡是合适的相变材料，这是因为它相对便宜、可靠且无毒，并且可以买到多种熔化温度的石蜡。

此示例受到[参考文献 1](#)中实验研究的启发。它对流经填充床储罐的流动进行建模，还分析了 LHS 装置受热时相变传热和局部热非平衡 (LTNE) 的影响。

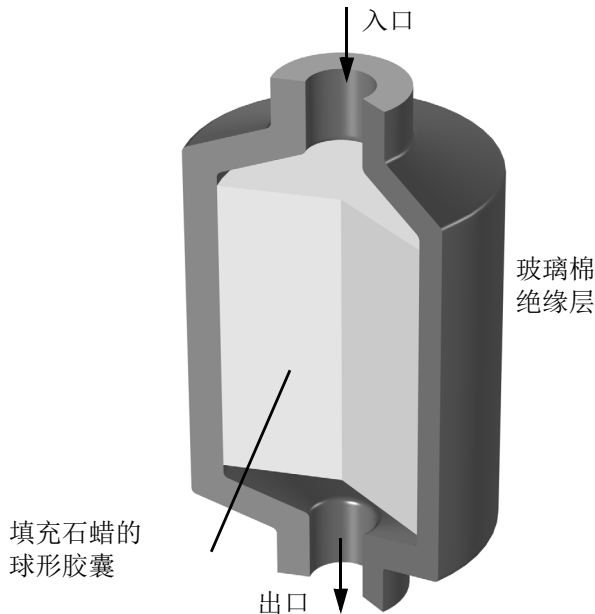


图2：潜热存储装置。

### 模型定义

直径为  $d_p = 55 \text{ mm}$  的填充石蜡的球形胶囊存储在直径为  $36 \text{ cm}$ 、高度为  $47 \text{ cm}$  的罐中。该填充床的孔隙率为  $\epsilon_p = 0.49$ 。模型几何结构如[图 2](#)所示。

下表列出了石蜡的材料属性。

材料属性	石蜡，固体	石蜡，液体
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	861	778
热容 $C_p$ (J/(kg·K))	1850	2384
导热系数 $k$ (W/(m·K))	0.4	0.15
熔化温度 $T_m$ (°C)	60	
熔化潜热 $L$ (J/kg)	213	

几何结构、材料属性和操作条件取自参考文献 1。

储罐中的初始温度设置为 32 °C。温水以最小速度  $m_{in} = 2$  l/min 的流率流过水箱。在加热过程中，水被太阳能集热器持续加热，太阳能集热器的功率为  $Q_u = 375$  W。储罐入口与出口的温差由下式给出

$$\frac{Q_u}{m_{in}} = \rho C_p (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

这里， $T_{in}$  和  $T_{out}$  分别是入口和出口温度， $\rho$  和  $C_p$  分别是水的密度和热容。Ergun 方程描述流过填充床的非达西流，将压降估算为速度场  $\mathbf{u}$  的函数

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\kappa} \mathbf{u} - \frac{1.75(1 - \varepsilon_p)}{d_p \varepsilon_p^3} \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u} \quad (2)$$

这里， $\mu$  (Pa·s) 和  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) 分别是水的黏度和密度， $d_p$  (m) 是球体的直径， $\varepsilon_p$  是床孔隙率。填充床的渗透率  $\kappa$  (m<sup>2</sup>) 由下式给出

$$\kappa = \frac{d_p^2 \varepsilon_p^3}{150(1 - \varepsilon_p)^2} \quad (3)$$

填充床中的雷诺数可通过下式估算

$$Re = \frac{d_p v \rho}{(1 - \varepsilon_p) \mu} \quad (4)$$

储罐中的最大速度  $v$  大约是 6 mm/s，这意味着雷诺数约为 600。对于此雷诺数，假定流场与温度分布无关，因此可以在运行热仿真之前计算出稳态场。这是合理的简化，可以减少计算量。

与储罐尺寸相比，胶囊的直径相对较大，这表明胶囊内的石蜡与胶囊周围水流之间存在显著的温差，因此在该示例中采用了局部热非平衡 (LTNE) 方法。

“局部热非平衡”多物理场接口用于将“固体传热”与“流体传热”接口相耦合。从填充石蜡的胶囊传递到水中的热量通过热源进行建模。



$$Q_f = \frac{q_{sf}}{\varepsilon_p}(T_s - T_f) \quad (5)$$

这里， $T_s$  和  $T_f$  分别是石蜡温度和水温， $q_{sf}$  (W/(m<sup>3</sup>·K)) 是间隙对流传热系数，对于球形胶囊，其计算公式为

$$q_{sf} = \frac{6(1 - \varepsilon_p)}{d_p} h_{sf} \quad (6)$$

间隙传热系数  $h_{sf}$  遵循努塞尔数相关性，请参阅文档中的“局部热非平衡接口理论”部分了解更多信息。胶囊内部的对流忽略不计，因此石蜡被视为固体或不可流动的液体。

## 结果

大约 13 小时后，储罐温度达到 70 °C。最终的速度和温度分布如图 3 所示

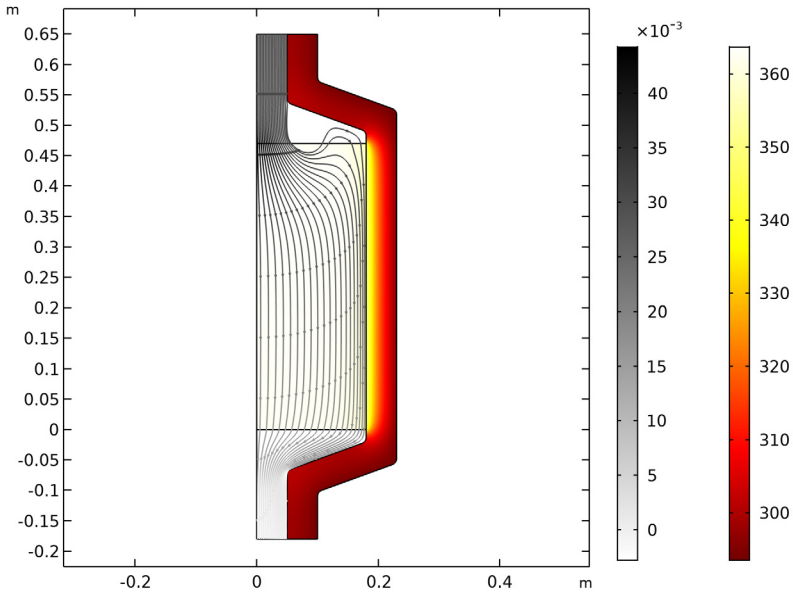


图3：灰色的速度场（流线）表示加热 12 小时后的压力和温度场（彩色）。

图 4 显示了位于罐中心轴上三个不同点的石蜡温度、水温和加权平均（多孔介质）温度的变化。在相变过程中，胶囊内填充的石蜡与胶囊周围的水处于热非平衡状态。仅测量入口或出口的水温无法给出有关胶囊内部温度和石蜡所处相的准确信息。

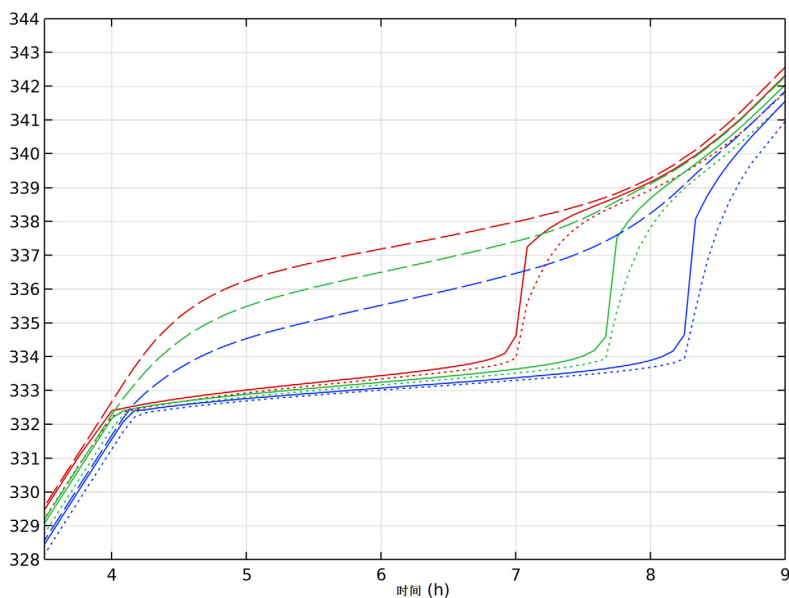


图4：相变过程中顶部（红色）、中心（绿色）和下部（蓝色）位置的水（虚线）、石蜡（点虚线）和平均多孔介质温度（固体）的演变。

随着石蜡的升温，相分布的演变也发生了变化。大约4小时后，当水将石蜡加热至其熔化温度  $60^{\circ}\text{C}$  时，出现液态石蜡。约10小时后，石蜡完全熔化。储罐内各处达到  $70^{\circ}\text{C}$  后，潜热储罐即被视为加热完成状态，这种状态大约出现在13个小时后。

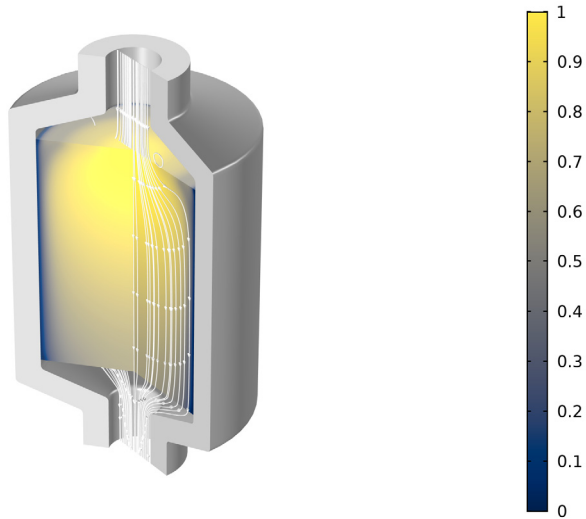


图5：对LHS装置加热7小时后，石蜡固相（蓝色）和液相（黄色）。



图5显示了7小时后石蜡相的分布。在壁附近，流速可以忽略不计，相变尚未开始，石蜡仍是固体，但它在罐的中心熔化。

## 参考文献

1. N. Nallusamy et al., “Study on performance of a packed bed latent heat thermal energy storage unit integrated with solar water heating system,” *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 7, pp. 1422–1430, 2006.







## 模型向导

**注：**这些操作说明基于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 Mac 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”来新建 COMSOL 模型，也可以使用“空模型” 手动进行创建。对于本教学案例，单击“模型向导” 按钮。

如果 COMSOL 已打开，要启动“模型向导”，可以从“文件”菜单中选择“新建”，然后单击“模型向导”.

“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”.
- 3 在“选择物理场”树中，展开“流体流动”文件夹，然后在“多孔介质和地下水流动”文件夹下，双击“自由和多孔介质流动”，将其添加到“添加的物理场接口”列表中。您也可以单击“添加”，或右键单击该图标并选择“添加物理场”.
- 4 在“选择物理场”树中的“传热”文件夹下，双击“局部热非平衡” 将其添加到“添加的物理场接口”列表中。您也可以单击“添加”，或右键单击并选择“添加物理场”.
- 5 单击“完成”.


## 几何结构


---

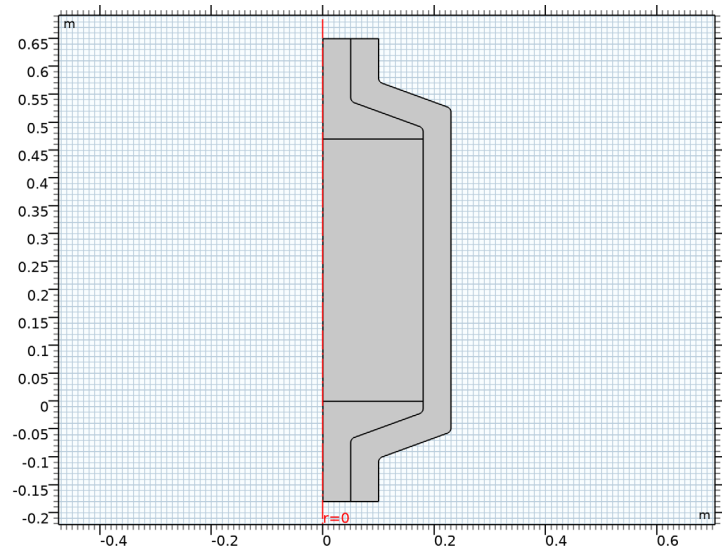
您可以基于几何体素来构建几何结构。这里，为了方便起见，也可以直接使用现有包含几何特征序列的文件。

本练习中所用文件的位置根据安装目录的不同而有所变化。例如，如果安装在硬盘上，文件路径应类似于 C:\Program

Files\COMSOL\COMSOL55\Multiphysics\applications\。

- 1 在“几何”工具栏中选择“导入”.
- 2 在“导入”的“设置”窗口中，定位到“导入”栏，然后浏览到模型的“案例库”文件夹。双击文件 packed\_bed\_latent\_heat\_storage.mphbin。
- 3 在“导入”的“设置”窗口中单击“导入”。


4 单击“构建所有对象” 以显示几何结构。



## 全局定义 - 参数

添加此示例中所需的参数。

### 参数


- 1 在“模型开发器”窗口的“全局定义” 下单击“参数” $P_1$ 。
- 2 在“参数”的“设置”窗口中，输入以下数据

**设置**  
**参数**

标签:

**参数**





名称	表达式	值	描述
dp	55[mm]	0.055 m	Capsule diameter
por	0.49	0.49	Bed porosity
m_in	2[l/min]	3.3333E-5 m...	Flow rate
T0	32[degC]	305.15 K	Initial temperature
Qu	375[W]	375 W	Solar heating power

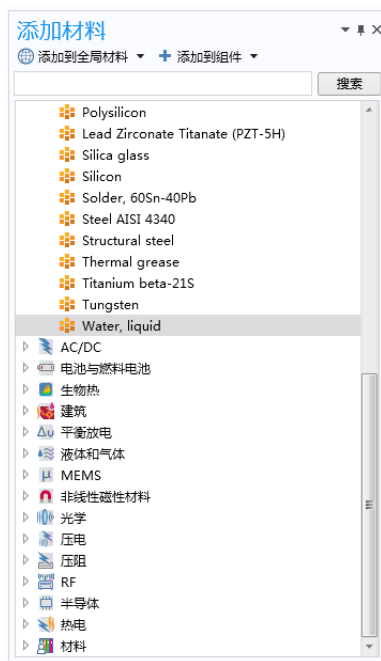


## 材料




定义水、石蜡和绝缘玻璃的材料节点。

### 水，液体

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“添加材料”。
- 2 转至“添加材料”窗口，展开“内置材料”文件夹，然后选择 Water, liquid。单击窗口工具栏中的“添加到组件” 将其添加到“材料”列表中。您也可以双击它或右键单击并选择“添加到‘组件 1 (comp 1)’”。
- 3 在“主屏幕”工具栏中，再次单击“添加材料” 以关闭该窗口。



### 石蜡，固体

- 4 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp 1)” 下，右键单击“材料” 并选择“空材料”。
- 5 在“材料”“设置”窗口下的“标签”文本框中，键入“石蜡，固体”。



重复相同的步骤，再创建两个材料节点，

分别称为 Paraffin, liquid 和 Glass\_wool。设置物理场接口后，您可以在这些节点中填写所需的材料属性。

## 定义


### 平均值 1 (aveop1)

创建一个平均算子来计算入口温度。

- 1 在“定义”工具栏中单击“非局部耦合” 并选择“平均值”。
- 2 在“平均值”的“设置”窗口中，定位到“源选择”栏，然后从“几何实体层”列表中选择“边界”。
- 3 仅选择“边界” 2。


### 最小值 1 (minop1)

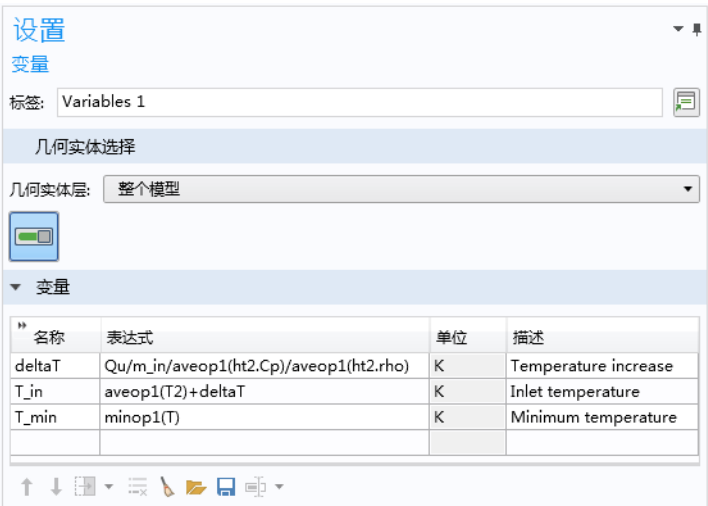
创建一个最小算子来计算填充床的最低温度。

- 4 在“定义”工具栏中单击“非局部耦合” 并选择“最小值” MIN。
- 5 仅选择“域” 2。

### 变量 1

当水被泵送通过一个闭合环路时，其温度在加热过程中会随着时间的推移而升高。使用方程 1 将变量 `deltaT` 和 `T_in` 定义为出口温度的函数。另外，通过最小算子 `minop1` 来定义填充床的最低温度，该算子稍后在求解器设置中用作停止条件。


- 6 在“定义”工具栏中单击“局部变量” 。
- 7 在“变量”的“设置”窗口中，定位到“变量”栏，并输入以下设置。



变量 `ht2.Cp` 和 `ht2.rho` 分别是由“流体传热”接口定义的水的热容和密度。

### 显式 1

为储罐外部边界创建一个选择，以应用热通量条件。

- 8 在“定义”工具栏中单击“显式”。
- 9 在“显式”的“设置”窗口中，定位到“输入实体”栏，然后从“几何实体层”列表中选择“边界”。
- 10 选中“按连续相切分组”复选框。

- 11 选择“边界”14–17、21–23、26、27、30和31。在“标签”文本框中键入“热通量边界”。

## 自由和多孔介质流动

---

### 流体和基体属性 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件1(comp1)”下，单击“自由和多孔介质流动(fp)”并选择“域”1-3。这些域是自由流动和填充床域。
- 2 在“物理场”工具栏中，单击“域”并选择“流体和基体属性”。仅选择“域”2。
- 3 在“流体和基体属性”的“设置”窗口中，定位到“流体属性”栏。从“流体材料”列表中选择Water, liquid (mat1)。
- 4 定位到“多孔基体属性”栏。从 $\epsilon_p$ 列表中选择“用户定义”并键入por。
- 5 从“渗透率模型”列表中选择“非达西”，然后从“非达西流模型”中选择Ergun。在“颗粒直径”下的 $d_p$ 框中键入dp。

接下来，对流动应用边界条件。

### 入口 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“入口”。仅选择“边界”7。
- 2 在“入口”的“设置”窗口中，定位到“边界条件”栏，从列表中选择“充分发展的流动”。单击“流率”按钮，然后在“流率”下的 $V_0$ 框中键入m\_in。

### 出口 1


- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“出口”。仅选择“边界”2。默认出口条件指定相对压力为零，并抑制回流效应。

## 固体传热



---

### 固体 1

继续设置绝缘玻璃棉的传热属性。





- 1 在“模型开发器”窗口的“组件1(comp1)”下，单击“固体传热(ht)”，然后仅选择“域”2和4。



- 2 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 固体传热 (ht)”下单击“固体 1”.
- 3 在“固体”的“设置”窗口中，定位到“固体材料”栏，然后从列表中选择 Glass wool (mat4)。

### 固体 2

继续设置石蜡属性。



- 4 在“物理场”工具栏中单击“域”并选择“固体”。仅选择“域”2。
- 5 在“物理场”工具栏中单击“属性”并选择“相变材料”.
- 6 在“相变材料”的“设置”窗口中，定位到“密度”栏。
- 7 从  $\rho$  列表中选择“用户定义”。在关联的文本框中键入  $820[\text{kg/m}^3]$ ，这是液体和固体石蜡的平均密度。假设石蜡密度保持恒定，这是一个合理的假设。
- 8 定位到“相变”栏。在  $T_{\text{pc}, 1 \rightarrow 2}$  框中键入  $60[\text{degC}]$ 。在  $\Delta T_{1 \rightarrow 2}$  框中键入  $2[\text{K}]$ ，在  $L_{1 \rightarrow 2}$  框中键入  $213[\text{kJ/kg}]$ 。
- 9 定位到“相 1”栏。从“材料，相 1”列表中选择 Paraffin, solid (mat2)。
- 10 定位到“相 2”栏。从“材料，相 2”列表中选择 Paraffin, liquid (mat3)。

### 初始值 1

- 11 在“模型开发器”窗口中，单击“初始值 1”。在“设置”窗口中，定位到“初始值”栏，然后在 T 文本框中键入  $T_0$ 。

### 热通量 1



对填充床中的传热应用边界条件。

- 12 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“热通量”.
- 13 在“热通量”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏，从“选择”列表中选择“热通量边界”。
- 14 定位到“热通量”栏，单击“对流热通量”按钮。在“传热系数”下的  $h$  框中键入  $5[\text{W/m}^2/\text{K}]$ 。



## 流体传热 2 (ht2)

---



继续设置水流的传热属性。

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”下，单击“流体传热 2 (ht2)”，然后仅选择“域”1-3。

### 流体 1


- 2 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 流体传热 2 (ht2)”下单击“流体 1”。
- 3 在“流体”的“设置”窗口中，定位到“流体材料”栏，然后从列表中选择 Water, liquid (mat1)。

### 初始值 1



- 4 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 流体传热 2 (ht2)”下单击“初始值 1”。
- 5 在“初始值”的“设置”窗口中，定位到“初始值”栏。
- 6 在 T2 文本框中键入  $T_0$ 。

接下来，对水中的传热应用边界条件。


### 流出 1

- 7 在“物理场”工具栏中单击“边界”并选择“流出”。仅选择“边界”2。

### 温度 1


- 8 在“物理场”工具栏中单击“边界”并选择“温度”。仅选择对应于进水口的“边界”7。
- 9 在“温度”的“设置”窗口中，定位到“温度”栏，在  $T_0$  框中键入  $T_{in}$ 。现在，填写剩余的材料属性。由于您设置了物理场，因此软件会自动检测仿真所需的属性。

### Paraffin, solid (mat2)

- 10 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 材料”下，单击 Paraffin, solid (mat2)。
- 11 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏，并输入以下设置：

材料属性明细					
	属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/>	导热系数	k_iso...	0.4	W/(m...	基本
<input checked="" type="checkbox"/>	恒压热容	Cp	1850	J/(kg...	基本

### Paraffin, liquid (mat3)

- 12 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 材料”下，单击 Paraffin, liquid (mat3)。

- 13 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏，并输入以下设置：

▼ 材料属性明细

属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/> 导热系数	k_iso...	0.15	W/(m·K)	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 恒压热容	Cp	2384	J/(kg·K)	基本

*Glass wool (mat4)*

- 14 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 材料”下，单击 Glass wool (mat4)，然后仅选择“域” 4。
- 15 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏，并输入以下设置：

▼ 材料属性明细

属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/> 导热系数	k_iso...	0.025	W/(m...	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 密度	rho	1250	kg/m³	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 恒压热容	Cp	850	J/(kg·...	基本

## 添加多物理场

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“添加多物理场”以将“自由和多孔介质流动”与“流体传热”接口相耦合。

2 转到“添加多物理场”窗口，找到“选择要耦合的物理场接口”子栏。在表中输入以下设置：



- 3 在树中选择“流体流动 > 非等温流动 > 层流”。
- 4 单击 + “添加到组件”。在“物理场”工具栏中，再次单击“添加多物理场”以关闭该窗口。

局部热非平衡 1 (ltne1)

- 5 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 多物理场”下，单击“局部热非平衡 1 (ltne1)”。
- 6 在“局部热非平衡”的“设置”窗口中，定位到“局部热非平衡设置”栏，然后在  $\theta_p$  文本框中键入 1-por。

- 7 从“间隙对流传热系数”列表中选择“球形颗粒床”，然后在  $r_p$  文本框中键入  $dp/2$ 。



▼ 耦合接口

固体传热:  
Heat Transfer in Solids (ht)

流体传热:  
Heat Transfer in Fluids 2 (ht2)

▼ 局部热非平衡设置

固体体积分数:  
 $\theta_p$  1-por 1


间隙对流传热系数:  
球形颗粒床

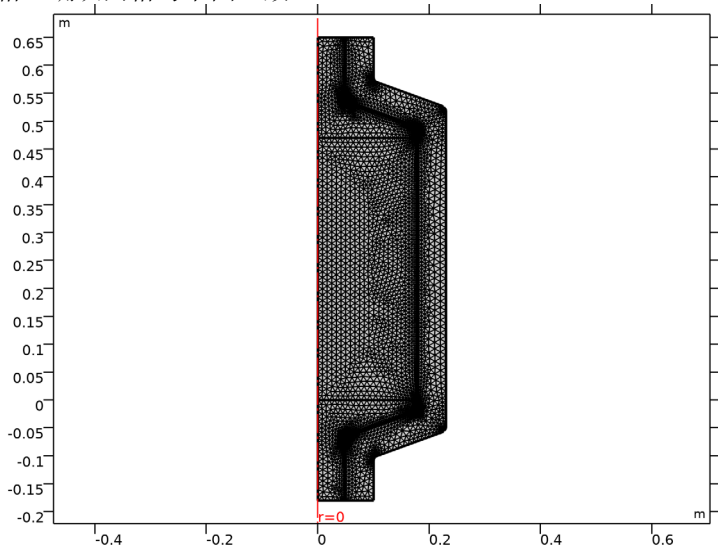
平均颗粒半径:  
 $r_p$  dp/2 m

动力黏度:  
 $\mu$  来自材料

## 网格 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”下，单击“网格 1”。
- 2 在“网格”的“设置”窗口中，定位到“物理场控制网格”栏，然后从“单元大小”列表中选择“细化”。
- 3 单击“全部构建”，以查看自动生成的网格。

下图显示了壁的边界层网格。使用“图形”工具栏  中的缩放功能来放大网格，确认网格与下图一致。






## 添加研究

---

### 稳态

添加稳态研究步骤以求解速度曲线。

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“添加研究”。在“添加研究”窗口中，找到“研究”子栏，展开“一般研究” 文件夹，然后选择“稳态”。

- 2 找到“研究中的物理场接口”和“研究中的多物理场耦合”子栏。在表中输入以下设置以求解稳态流场：

**添加研究** ▼ ■ ×

**+ 添加研究**

— 研究

— 一般研究


- 稳态
- 瞬态
- 空研究

— 研究中的物理场接口

物理场	求解
Free and Porous Media Flow (fp)	<input checked="" type="checkbox"/>
Heat Transfer in Solids (ht)	<input type="checkbox"/>
Heat Transfer in Fluids 2 (ht2)	<input type="checkbox"/>

— 研究中的多物理场耦合

多物理场耦合	求解
Local Thermal Nonequilibrium 1 (ltne1)	<input type="checkbox"/>
Nonisothermal Flow 1 (nitf1)	<input type="checkbox"/>



- 3 在窗口工具栏上单击 **+** “添加研究”。
- 4 要清除求解器生成的默认绘图，请在“模型开发器”窗口中单击“研究 1” 。
- 5 在“研究”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏，并取消选中“生成默认绘图”复选框。

**研究设置**

- ☐ 生成默认绘图
- ☒ 生成收敛图
- ☐ 存储所有中间研究步骤的解
- ☐ 绘制未定义值的位置

接下来，添加一个“瞬态”步骤以求解耦合传热问题。

### 瞬态

- 6 在“研究”工具栏中，单击“研究步骤” ，然后选择“瞬态” 。
- 7 在“瞬态”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏，然后从“时间单位”列表中选择 h。
- 8 在“时间步”文本框中键入 `range(0,0.25,3.75) range(4,5[ min ],8.75) range(9,0.25,24)`。软件将运行 24 小时的仿真。选择“时间步”，以便正确求解相变。

- 9 从“容差”列表中选择“用户控制”，然后在“相对容差”文本框中键入  $1e-4$ 。
- 10 定位到“物理场和变量选择”栏，然后在表中输入以下设置。

物理场和变量选择			
<input type="checkbox"/> 修改研究步骤的模型配置			
物理场接口		求解	离散化
Free and Porous Media Flow (fp)		<input type="checkbox"/>	物理场设置
Heat Transfer in Solids (ht)		<input checked="" type="checkbox"/>	物理场设置
Heat Transfer in Fluids 2 (ht2)		<input checked="" type="checkbox"/>	物理场设置
多物理场耦合			求解
Local Thermal Nonequilibrium 1 (ltne1)			<input checked="" type="checkbox"/>
Nonisothermal Flow 1 (nitf1)			<input checked="" type="checkbox"/>

- 11 在“研究”工具栏中，单击“显示默认求解器”。
- 12 在“求解器配置”节点下，展开“解 1 (sol1)”节点，然后单击“瞬态求解器 1”节点。
- 13 在“瞬态求解器”的“设置”窗口中，单击以展开“时间步进”栏，然后从“求解器采用的步长”列表中选择“精确”。此选项强制瞬态求解器严格使用之前指定的时间步。

给储罐加热所需的时间是未知的。为了减少计算时间，在填充床内部的每个点温度达到  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  之后，采用瞬态求解器的停止条件停止仿真。

- 14 右键单击“瞬态求解器 1”节点，并选择“停止条件”。
- 15 在“停止条件”的“设置”窗口中，定位到“停止表达式”栏，然后单击“添加”。



16 在表中输入以下设置。



17 在“主屏幕”工具栏中单击“计算”。系统显示一条警告消息，指出在约 47000 秒（约 13 小时）后满足了停止条件。

## 结果

当我们从求解器设置中移除生成默认绘图选项后，请按照以下步骤生成图 3 和图 4。

### 二维绘图组 1

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组” 并选择“二维绘图组”。在“二维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入“温度和速度场”。
- 2 单击以展开“标题”栏，然后从“标题类型”列表中选择“无”。

#### 表面 1






- 3 右键单击“温度和速度场” 并选择“表面”。
- 4 在“表面”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏，然后在“表达式”文本框中键入 T。
- 5 定位到“着色和样式”栏。从“颜色表”列表中选择 ThermalLight。
- 6 右键单击“表面 1” 并选中“选择”。仅选择“域”4。软件将绘制容器中的温度场。

#### 表面 2

- 7 在“模型开发器”窗口中，右键单击“温度和速度场” 节点并选择“表面”。您也可以在“温度和速度场”工具栏中单击“表面”。

- 8 在“表面”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏，然后在“表达式”文本框中键入 `ltne1.T`。软件将绘制填充床的平均温度。
- 9 单击以展开“继承样式”栏，然后从“绘图”列表中选择“表面 1”。



### 流线 1

- 10 右键单击“温度和速度场” 节点，然后选择“流线”。您也可以单击“温度和速度场”工具栏中的“流线”。
- 11 在“流线”的“设置”窗口中，定位到“选择”栏，然后仅选择“边界”7。这是上边界的入口。
- 12 定位到“着色和样式”栏。找到“点样式”子栏，然后从“类型”列表中选择“箭头”。
- 13 右键单击“流线 1” 节点并选择“颜色表达式”。
- 14 在“颜色表达式”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏，然后在“表达式”文本框中键入 `p`。
- 15 定位到“着色和样式”栏，然后从“颜色表”列表中选择 `GrayScale`。选中“颜色表反序”复选框。

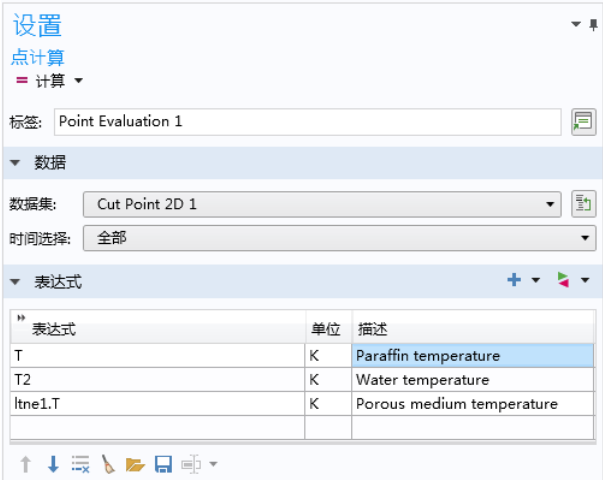
### 一维绘图组 2

添加一个新的数据集来创建图 4。然后借助表格来计算并绘制随时间变化的不同温度。

### 二维截点 1

- 1 在“结果”工具栏中，单击“二维截点”。
- 2 在“二维截点”的“设置”窗口中，定位到“点数据”栏。在 `r` 文本框中键入 `0`，然后在 `z` 文本框中键入 `0.05 0.235 0.42`。这些点将计算填充床沿对称轴的三个不同位置的温度。
- 3 在“结果”工具栏中，单击“点计算”。
- 4 在“点计算”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏，然后从“数据集”列表中选择“二维截点 1”。

5 定位到“表达式”栏。在表中输入以下设置：



6 单击“计算”。在窗口工具栏中创建一个表格，其中包含在所有时间步的截点计算的温度变量数据。

### 表图 1

7 转到“表格”窗口，然后在窗口工具栏中单击“表图”。软件将生成“一维绘图组 2”节点，其中包含一个“表图 1”节点。

8 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏，然后从“绘制列”列表中选择“手动”。

9 在“列”列表中选择 Paraffin temperature (K), Point: (0, 0.05)、Paraffin temperature (K), Point: (0, 0.235) 和 Paraffin temperature (K), Point: (0, 0.42)。

10 定位到“着色和样式”栏。找到“线样式”子栏，然后从“线”列表中选择“点虚线”。



### 表图 2

11 右键单击“表图 1”节点并选择“生成副本”。



12 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏，然后在“列”列表中选择 Water temperature (K), Point: (0, 0.05)、Water temperature (K), Point: (0, 0.235) 和 Water temperature (K), Point: (0, 0.42)。

13 定位到“着色和样式”栏。找到“线样式”子栏，然后从“线”列表中选择“虚线”。从“颜色”列表中选择“循环（重置）”。

表图 3

- 14 右键单击“表图 2” 节点并选择“生成副本”。
- 15 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏，然后在“列”列表中选择 Porous medium temperature (K), Point: (0, 0.05)、Porous medium temperature (K), Point: (0, 0.235) 和 Porous medium temperature (K), Point: (0, 0.42)。
- 16 定位到“着色和样式”栏。找到“线样式”子栏，然后从“线”列表中选择“实线”。

### 一维绘图组 2

- 17 在“模型开发器”的“结果”下，单击“一维绘图组 2”.
- 18 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入“温度演变”来重命名绘图。
- 19 定位到“轴”栏，然后选中“手动轴限制”复选框。在 x 最小值文本框中键入 3.5，在 x 最大值文本框中键入 9。这将放大 3.5 到 9 小时之间的时间范围。在 y 最小值文本框中键入 328，在 y 最大值文本框中键入 344，来调整温度范围。
- 20 单击“温度演变”工具栏中的“绘图” 将数据可视化。

您可以清楚地看到石蜡和水处于热非平衡状态，尤其是在石蜡的相变过程中更是如此。