

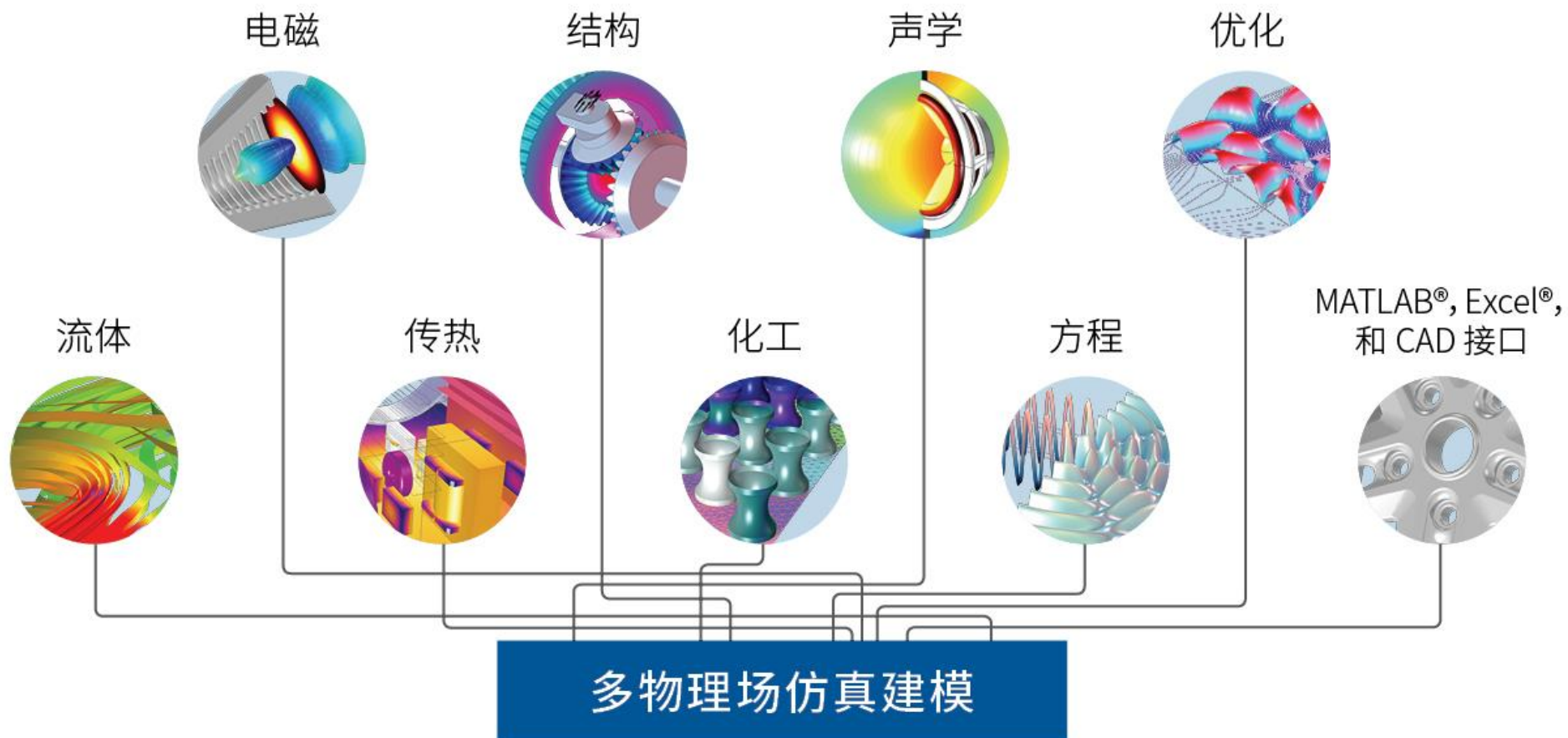
激光焊接中的多物理场仿真

COMSOL 公司简介

- 总部位于瑞典斯德哥尔摩，全球有 22 个分支机构
- 1998 年发布 COMSOL Multiphysics® 的首个版本
- 专注于多物理场仿真分析工具的开发
- 每年发布 1-2 个新的版本



COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真平台



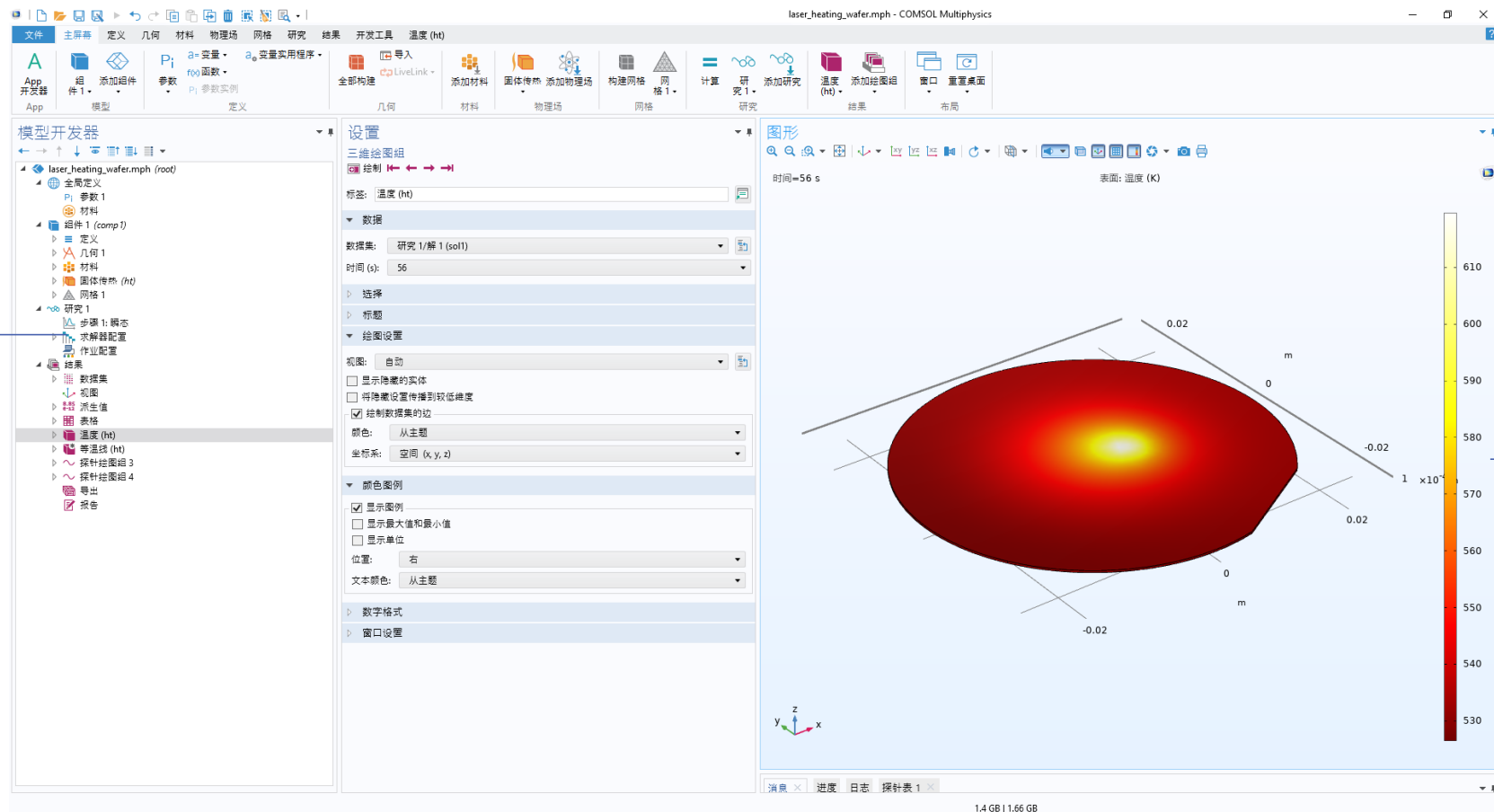
全面集成的建模环境

COMSOL Desktop™

- 简洁明了，直观地浏览和控制整个建模过程
- 全中文操作界面

模型开发器

- CAD/几何
- 材料
- 物理场
- 网格
- 求解
- 结果



图形化显示
超快的图形显示，
炫目的图形化，
以及多图控制

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

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
- 聚合物流动模块
- 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
- 电池模块
- 燃料电池和电解槽模块
- 电镀模块
- 腐蚀模块
- 电化学模块

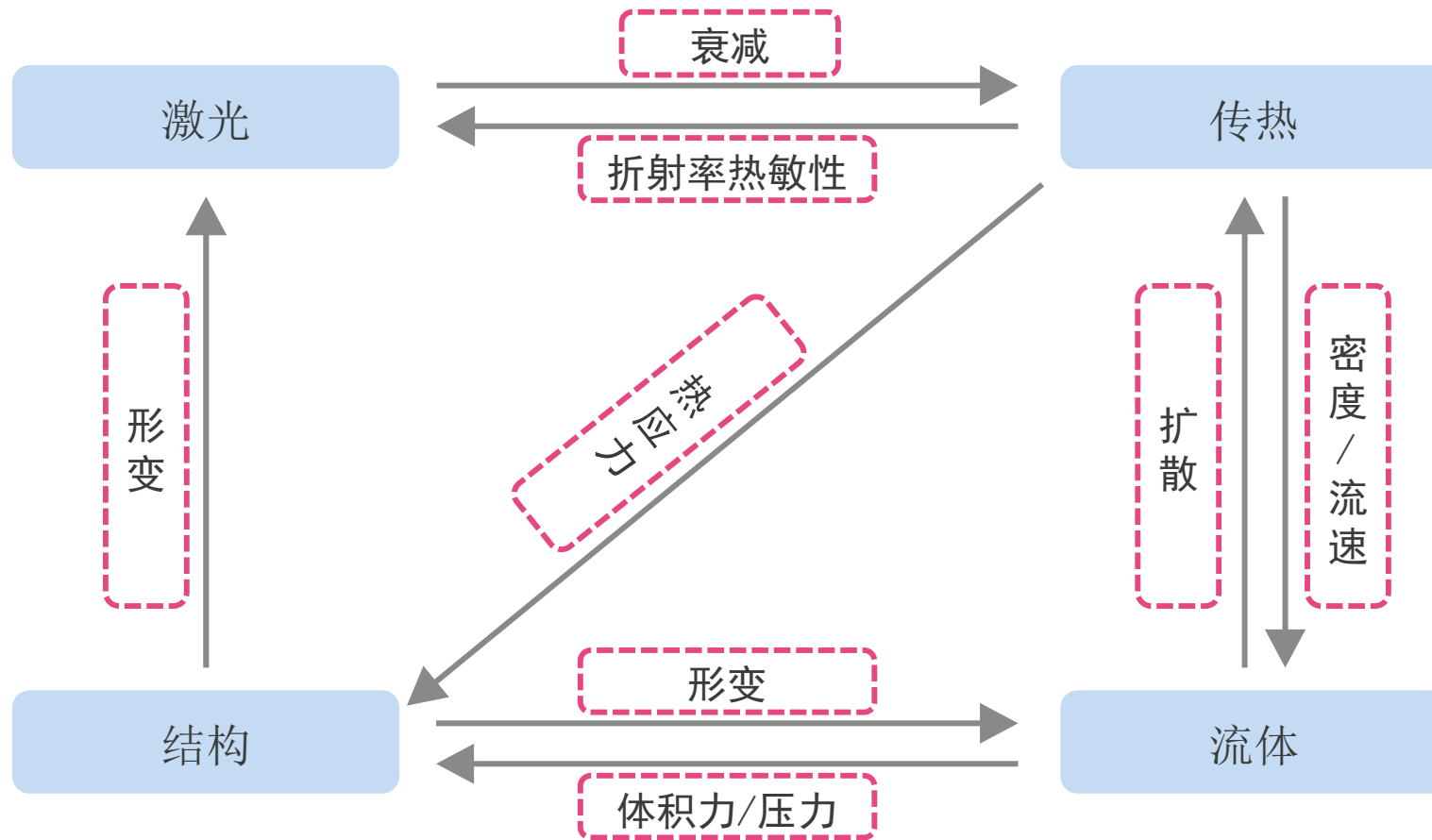
多功能

- 优化模块
- 材料库
- 粒子追踪模块
- 气液属性模块

接口

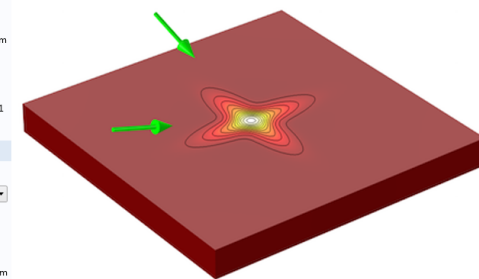
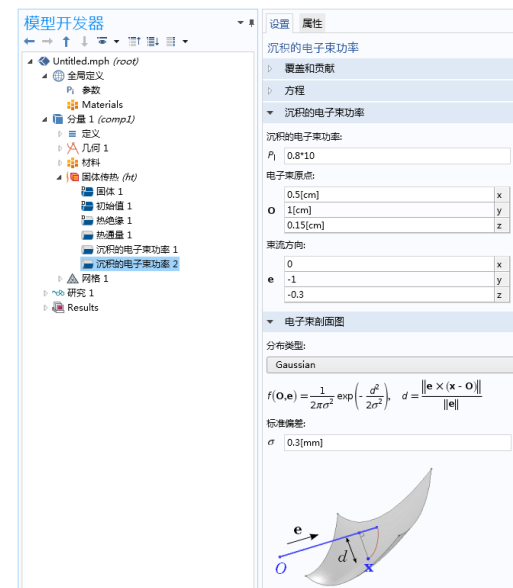
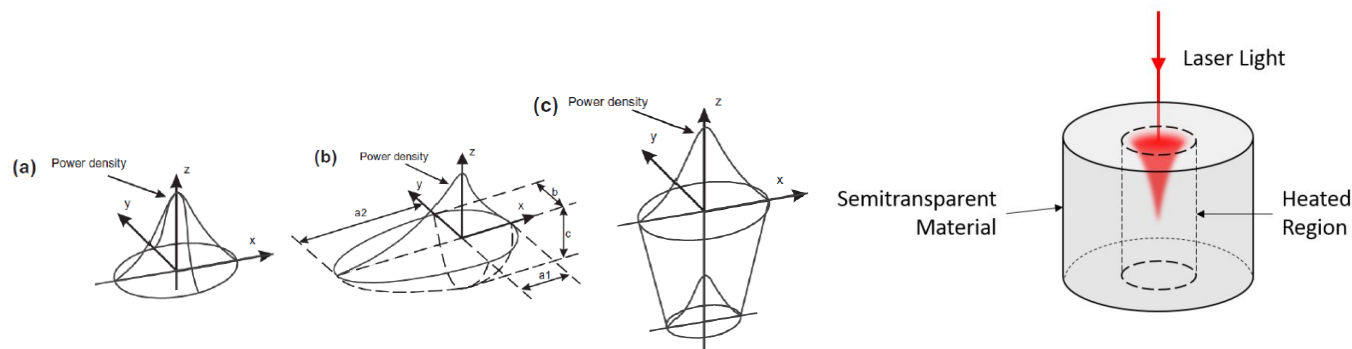
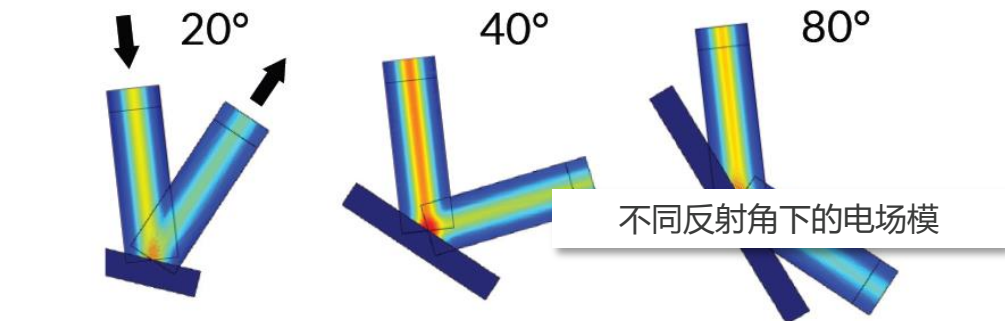
- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Simulink®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD 导入模块
- 设计模块
- ECAD 导入模块
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid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

激光焊接中的多物理场耦合



多种形式的激光热源

- 加工材料的光学性质分析
- 将激光能量作为热源条件
- 通过内置热源或自定义函数描述
 - 表面热源
 - 体热源
 - Beer-Lambert 定律

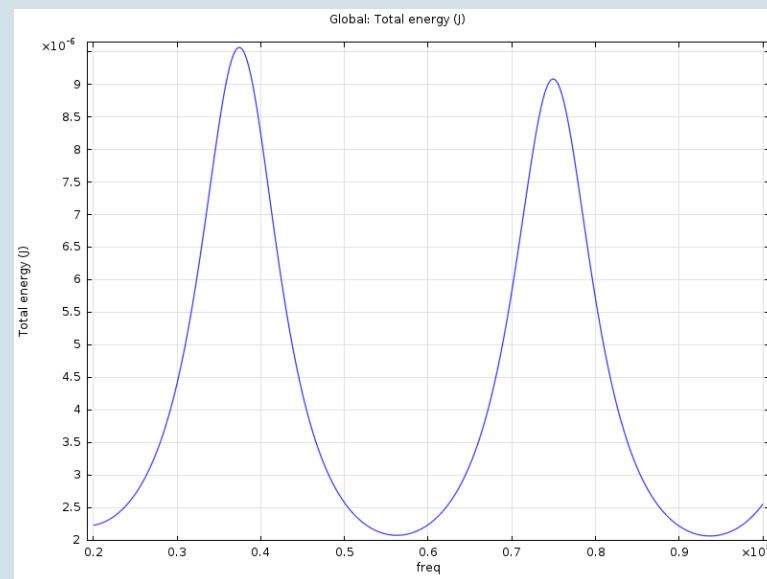
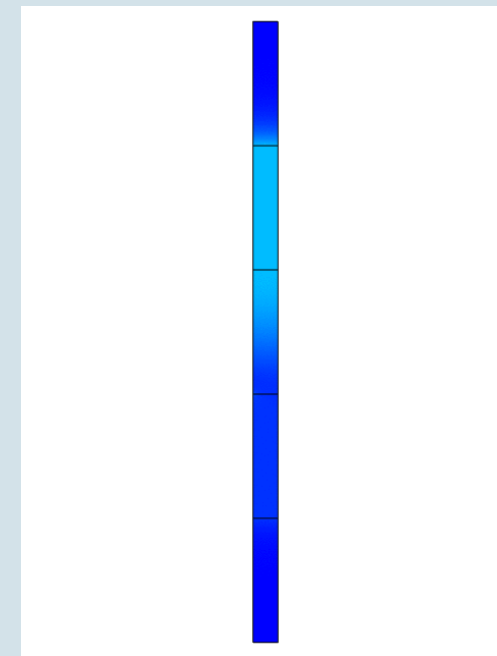
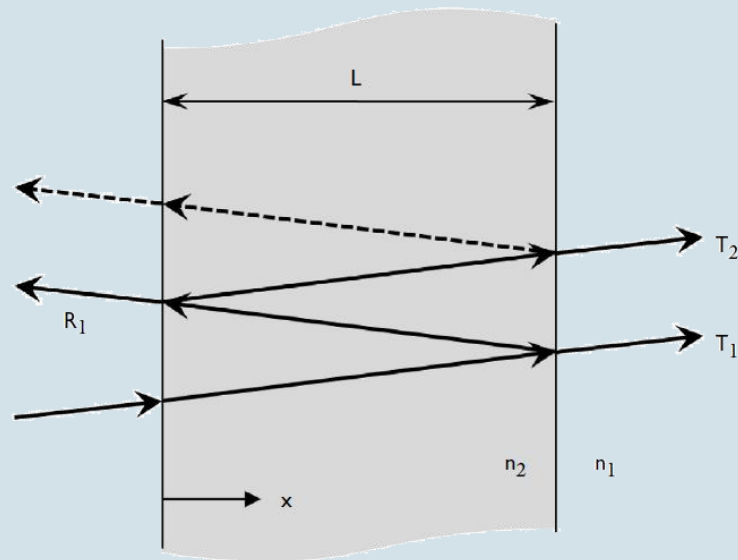


F-P谐振腔

- 最简单的光学谐振器
- 目标是找到谐振频率和品质因子
- 两种Q值计算方法

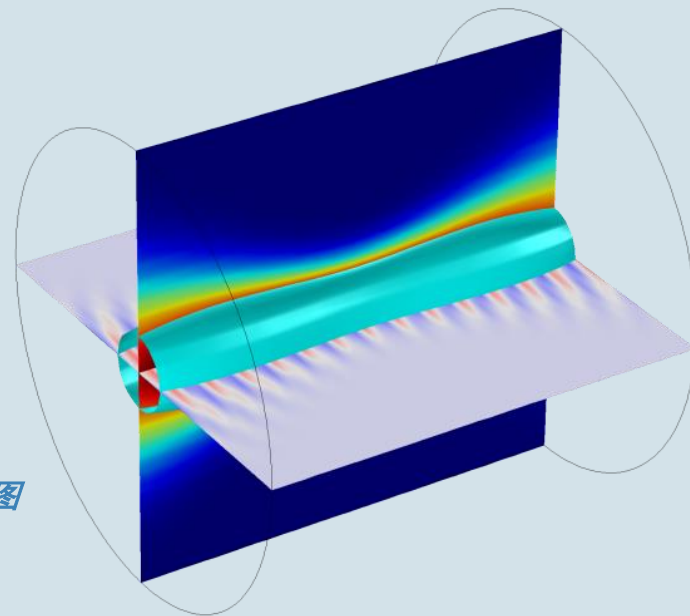
- 频域
- 特征值

$$Q_{factor} = \frac{\omega}{2|\delta|}$$

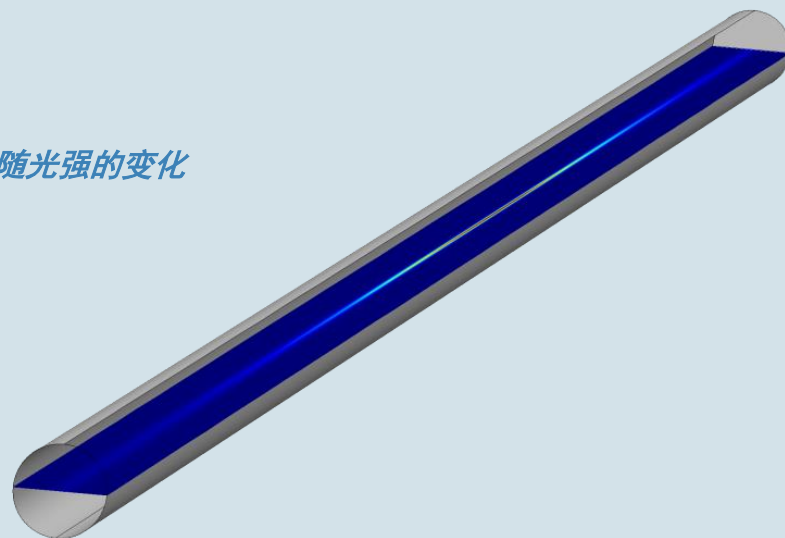


频域非线性—— 自聚焦

- 高斯光束入射至 BK-7 光学玻璃
- 依赖于强度的折射率
- 自聚焦在高功率激光器系统的设计中很重要



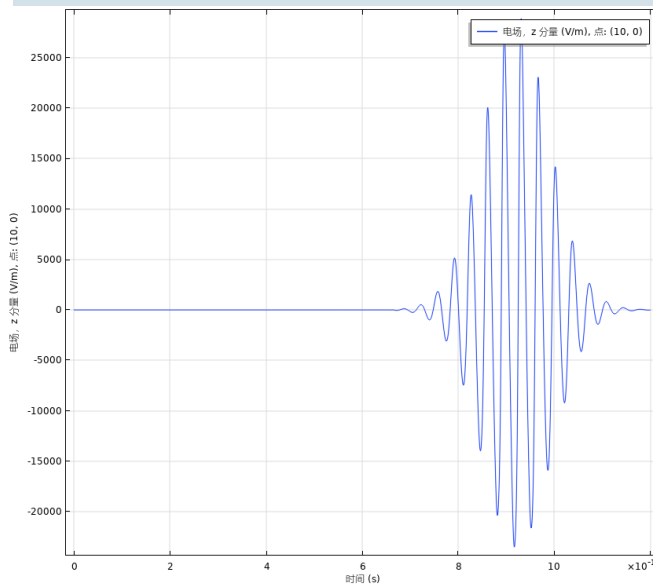
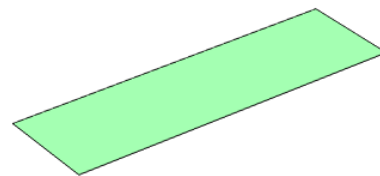
波传播的压缩视图



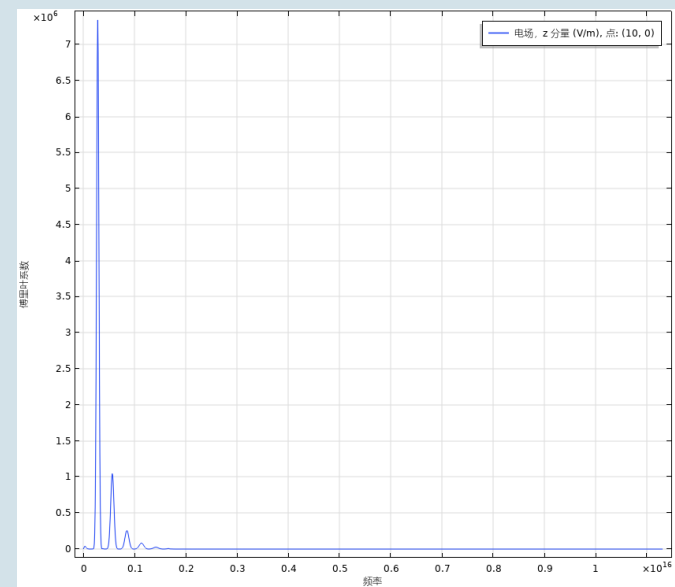
折射率随光强的变化

时域非线性—— 二次谐波的产生

- 高斯波通过光学非线性介质
- 极化强度依赖于电场大小
- 时域信号直接转换为频谱
- 观察到了倍频

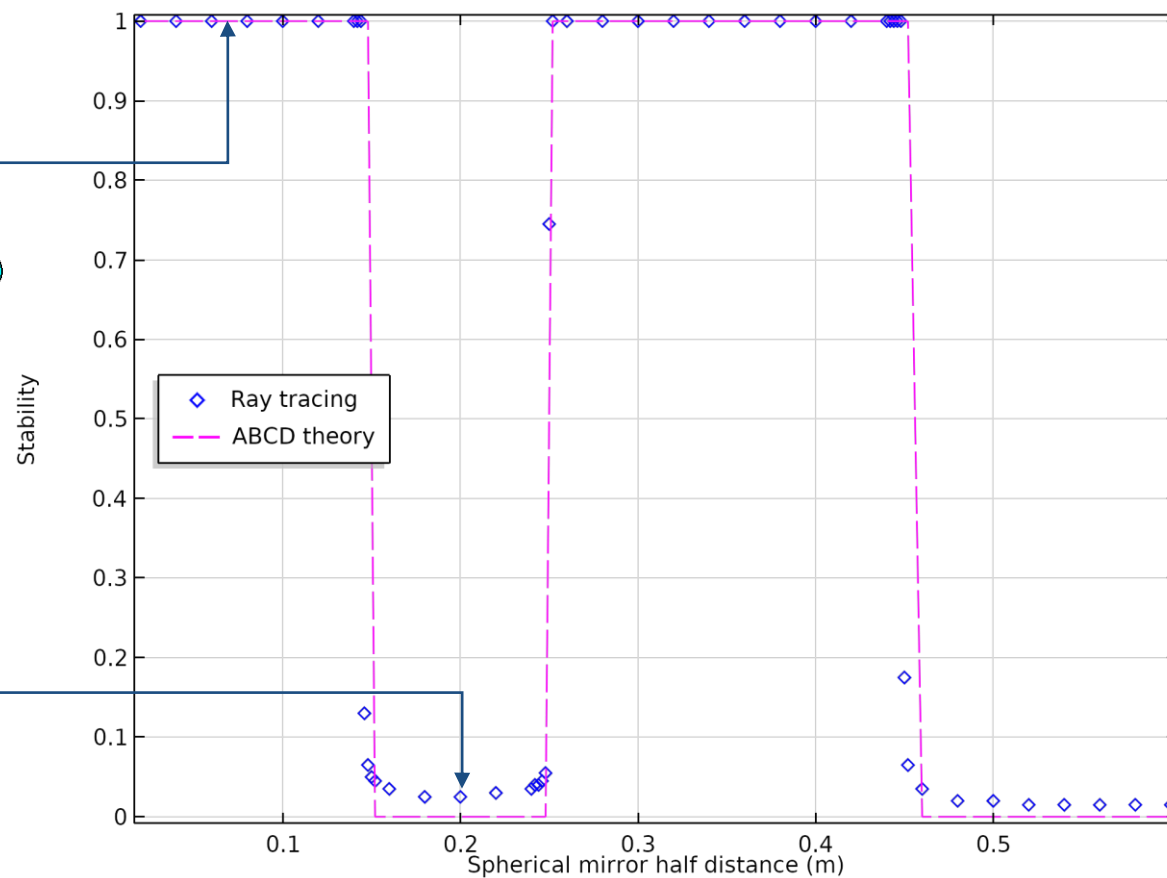
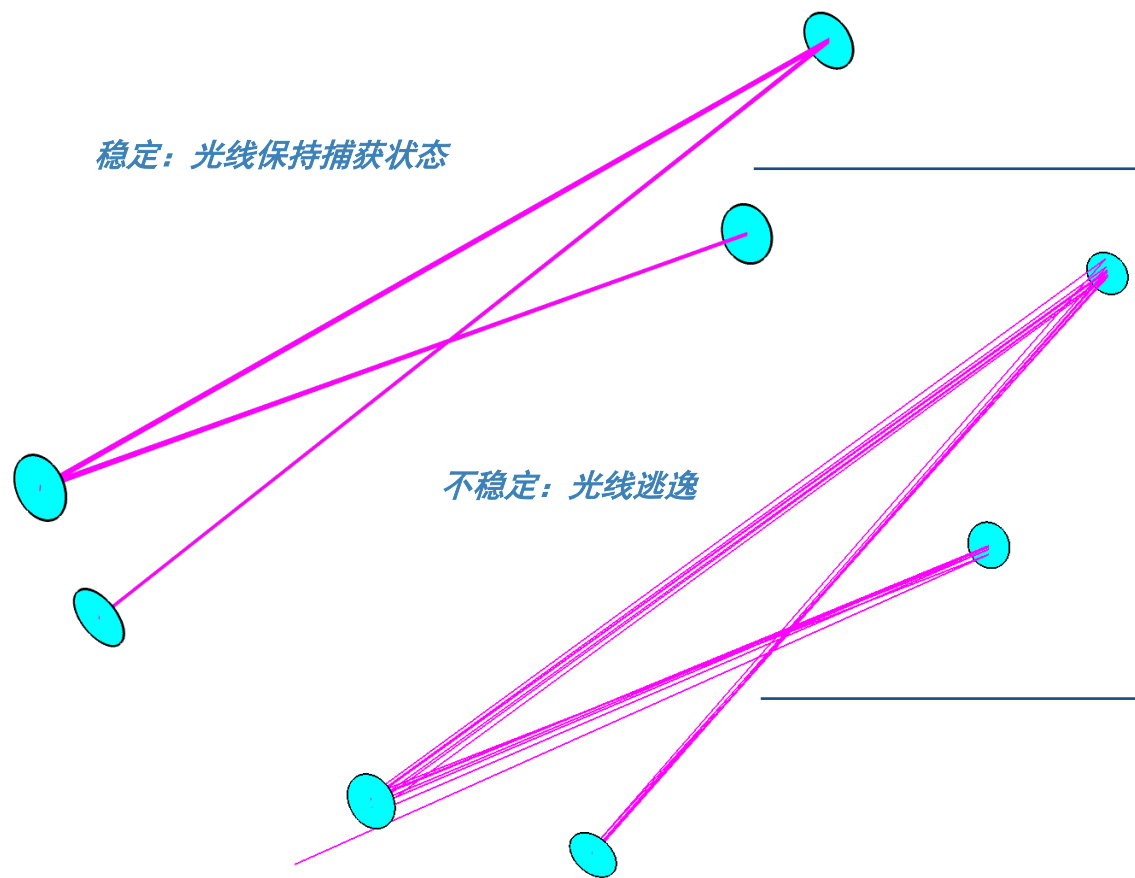


时域信号



频域信号

激光腔体稳定性分析



色散材料模型

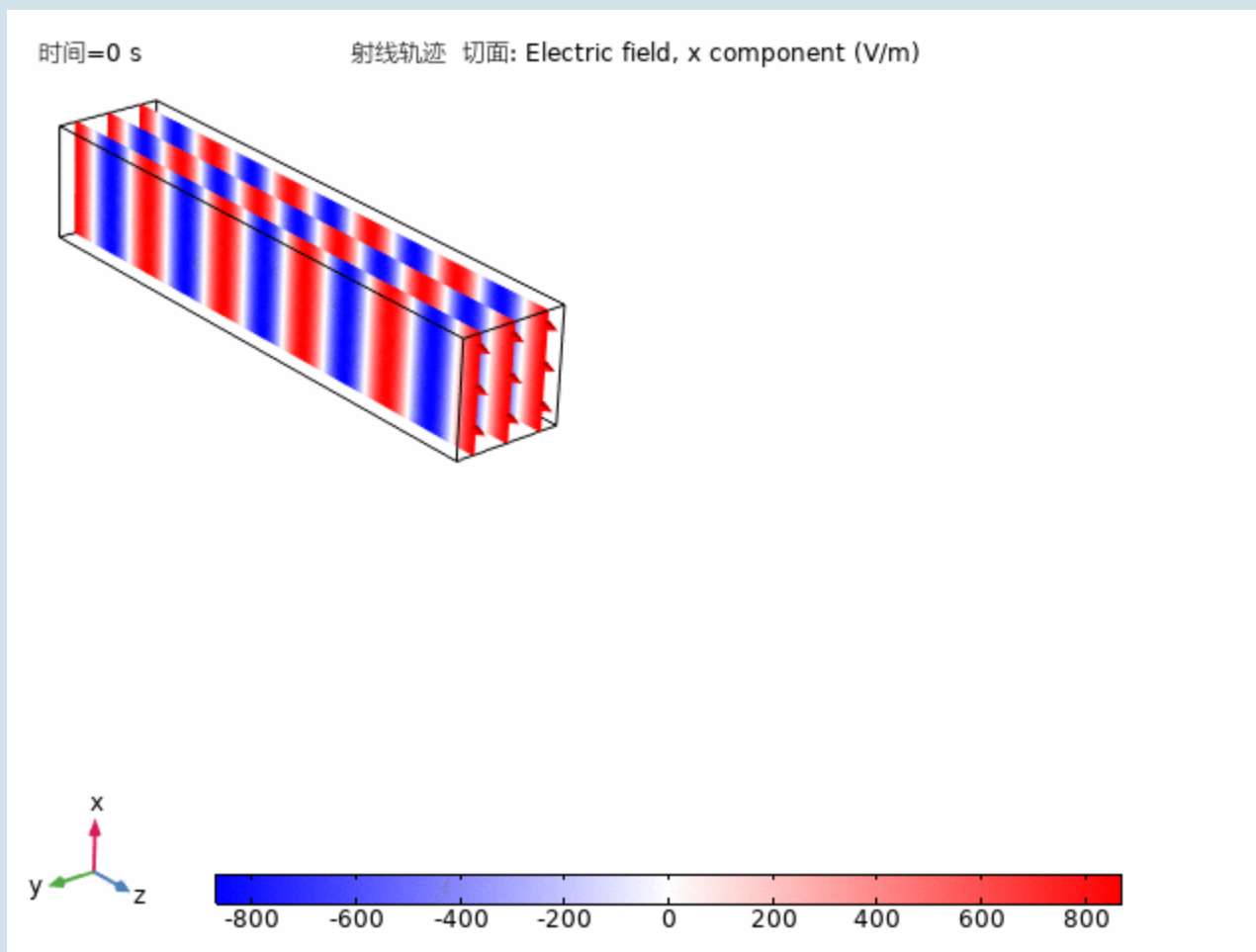
- COMSOL 提供三种重要的色散介质材料模型作为频域分析的预置选项：

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0$$

Drude-Lorentz	$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_{j=1}^M \frac{f_j \omega_p^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\Gamma_j \omega}$
Debye	$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_{j=1}^M \frac{\Delta \epsilon_j}{1 + i\omega \tau_j}$
Sellmeier	$n(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - C_j}$

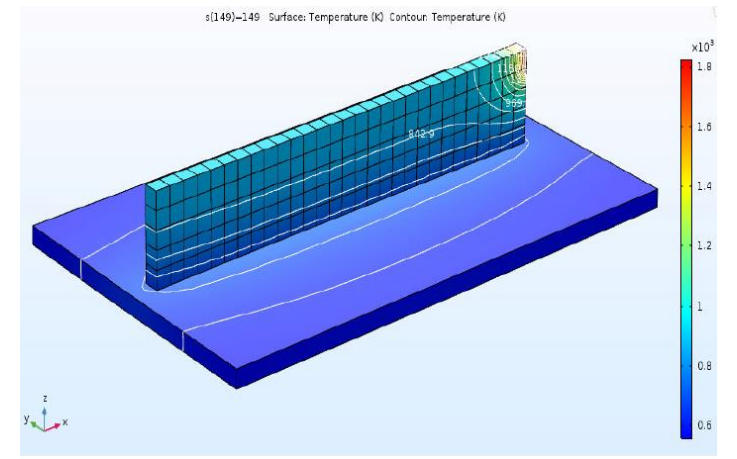
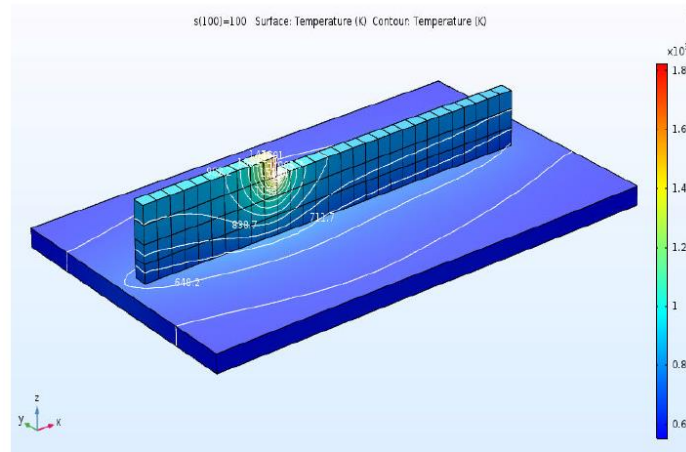
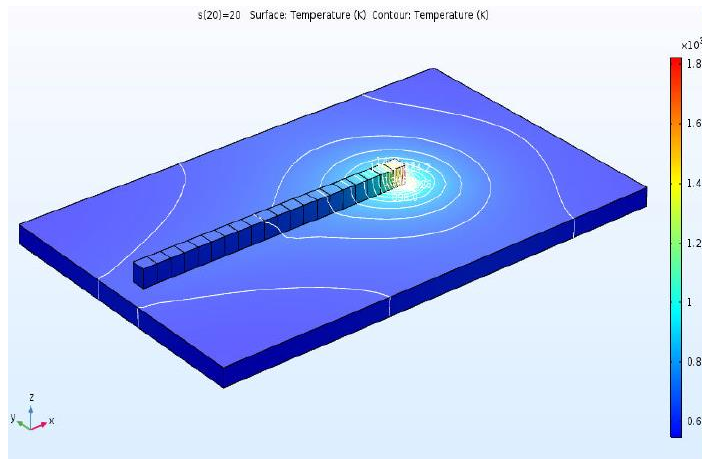
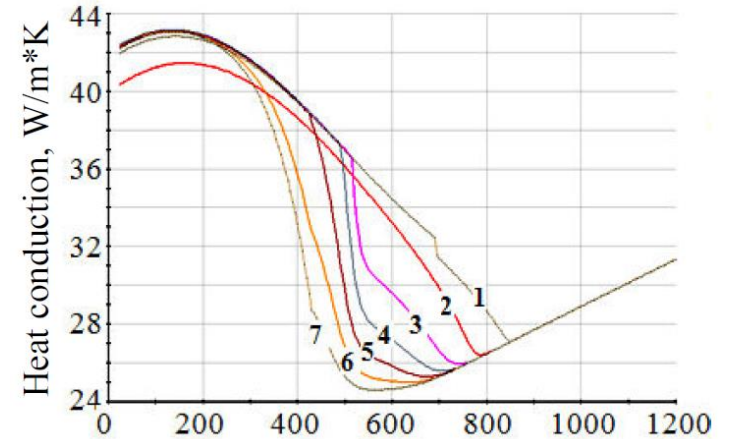
基于平面电磁波的射线释放

- 模拟激光的产生和发射
- 使用计算得到的电场（近场或者远场）来发射射线



热传导

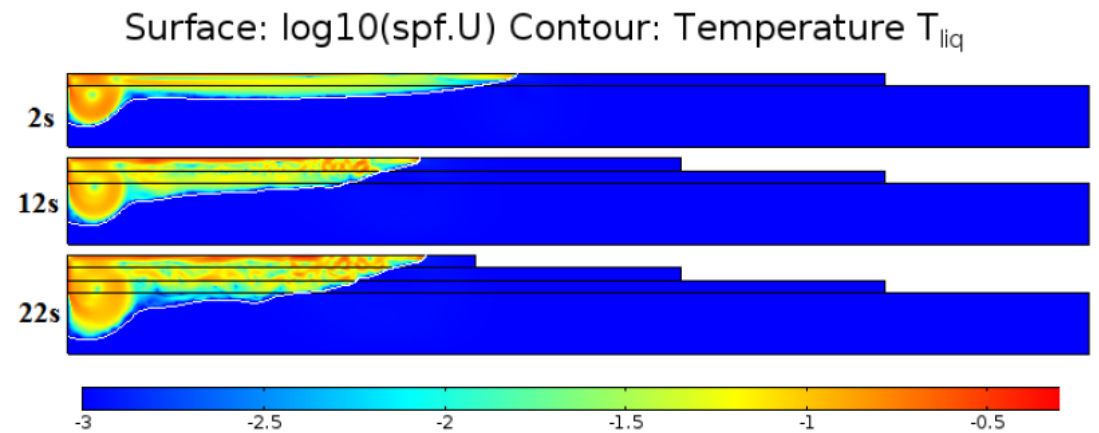
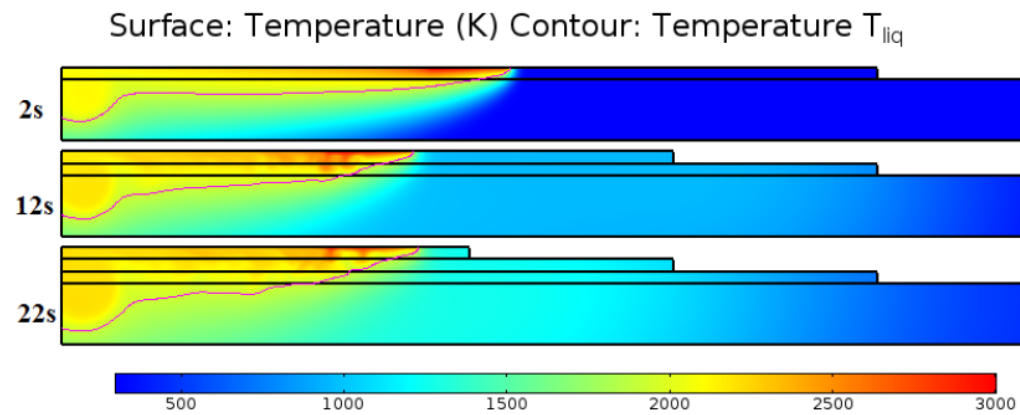
- 考虑材料参数随温度的变化
- 假设液滴的形状为立方体（1x3x1 mm），在滴入工件时的温度均匀



T=20s, 100s和140s时的工件温度分布

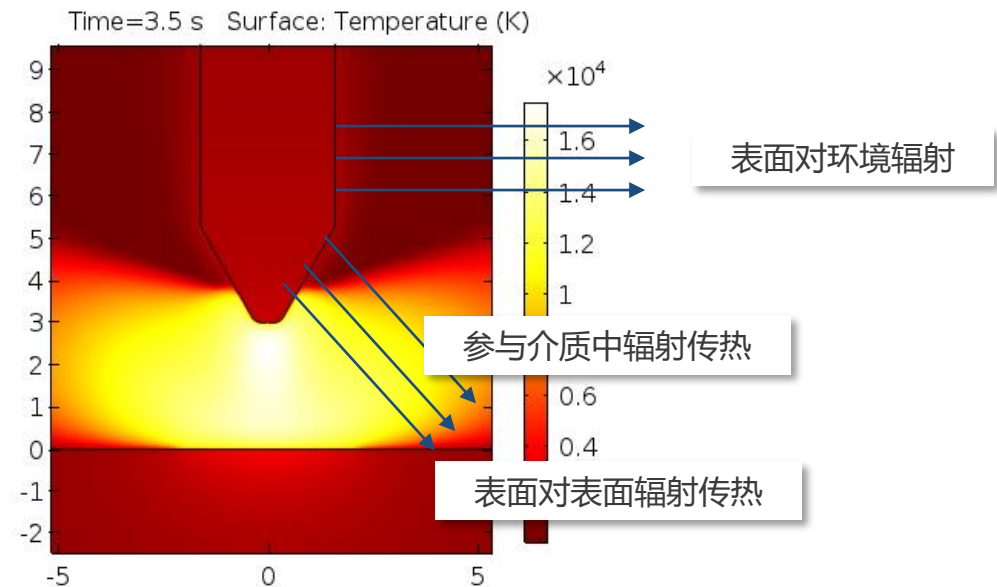
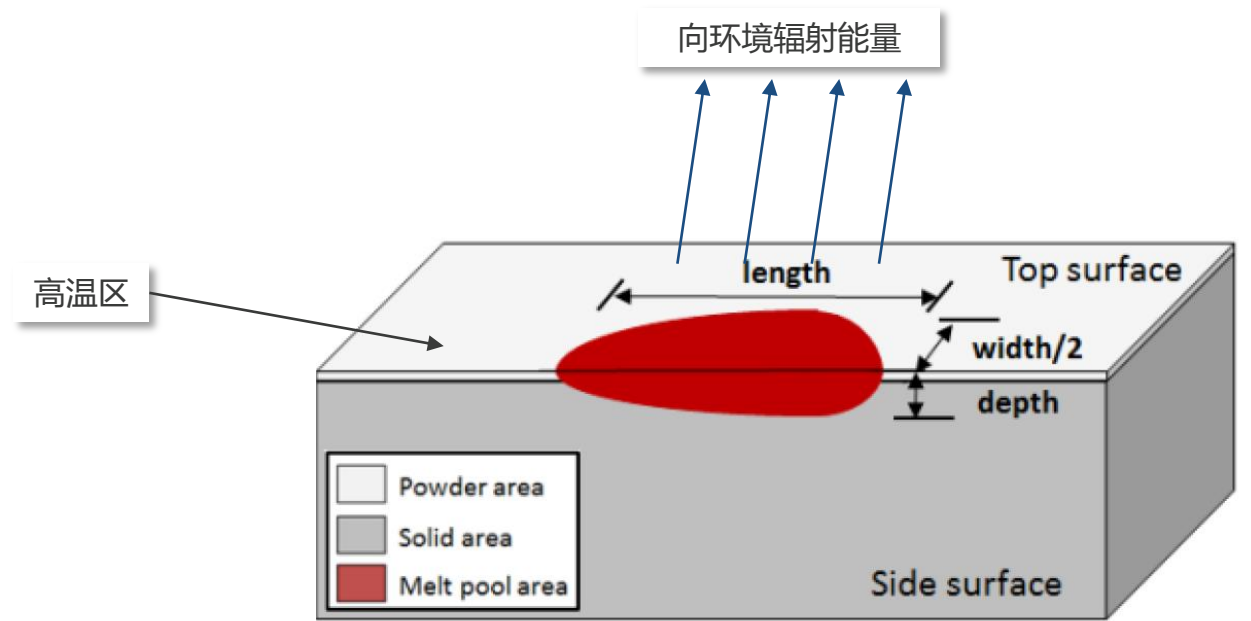
热对流

- 考虑相变引起的热对流作用



热辐射

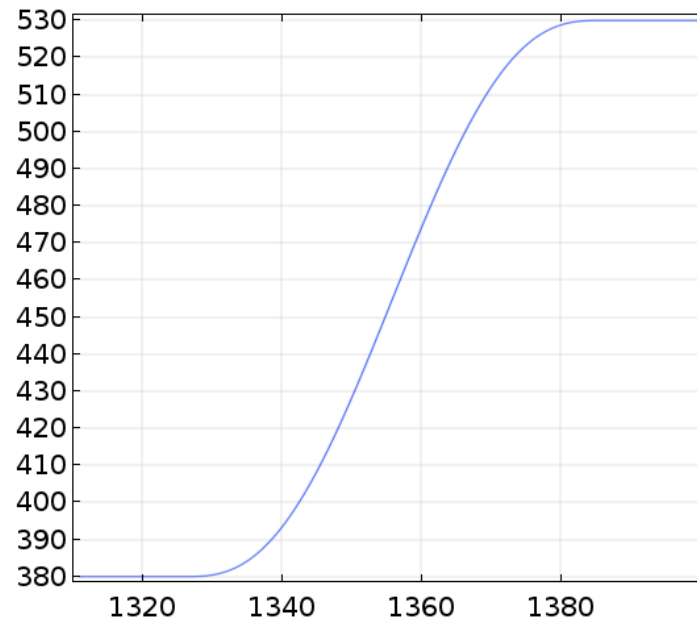
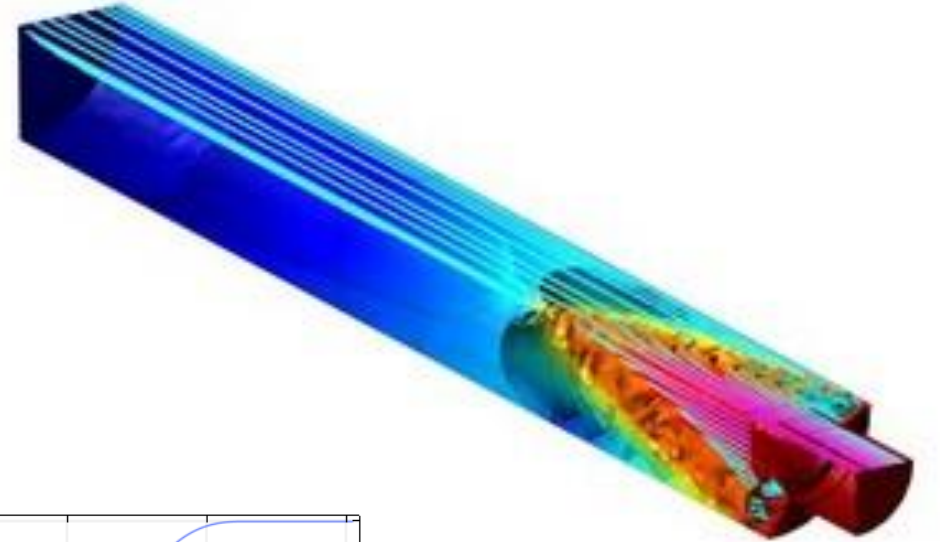
- 表面对环境的辐射
 - 考虑发射率及环境温度的影响
- 表面对表面的辐射传热
 - 建立波长依赖的辐射传热模型
- 参与介质中辐射传热
 - 考虑极性分子对光的吸收作用



相变

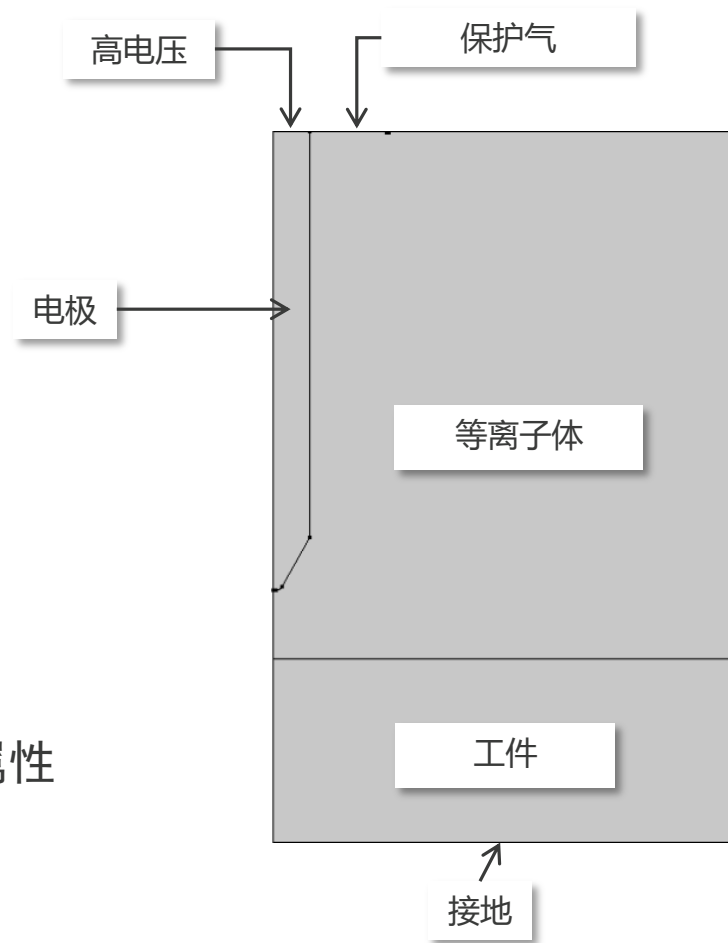
- 金属熔融与凝固涉及固液相变
- 固液相变可以使用“相变材料”模型仿真
 - 材料属性随温度的变化
 - 使用热容法计算相变潜热

$$c_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{\text{phase1}} c_{p,\text{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}} c_{p,\text{phase2}}) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}$$



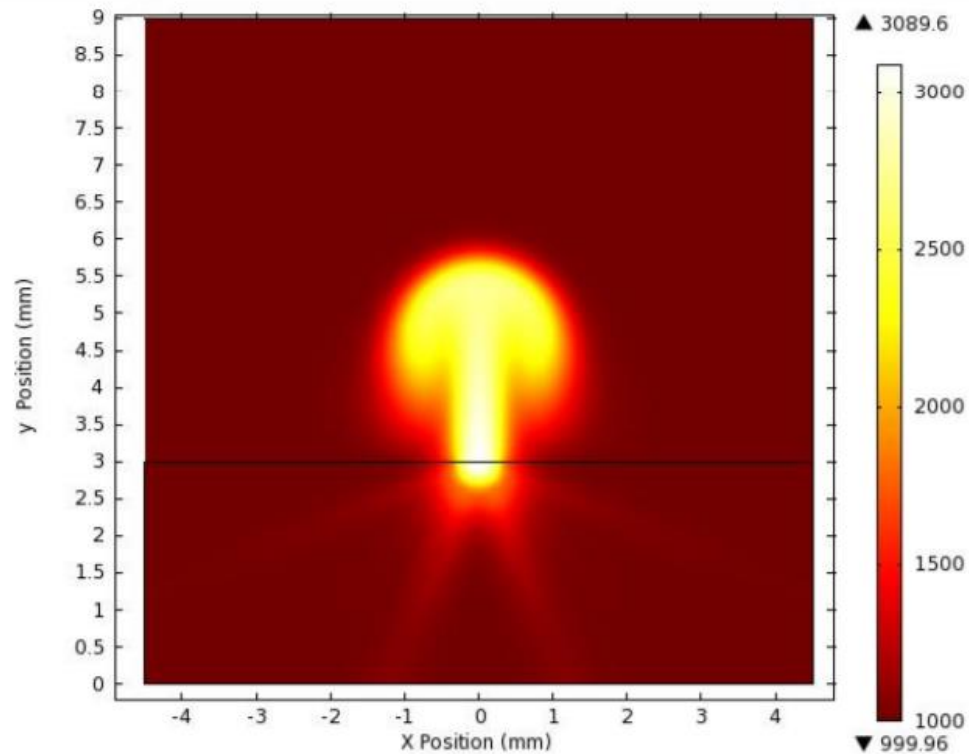
电弧热源-热力学平衡等离子体

- 在高温等离子体中
 - 解离反应处于热力学平衡状态
 - 辐射满足黑体辐射假设
 - 可以通过压力、温度和组分数密度描述
- 在COMSOL中使用磁流体（MHD）描述
 - 假设等离子晕为导体，导电属性与解离程度有关
 - 电场和磁场计算电磁热
 - 流场计算压力，考虑洛伦兹力
 - 传热计算温度分布，同时温度影响电场、磁场和流体属性

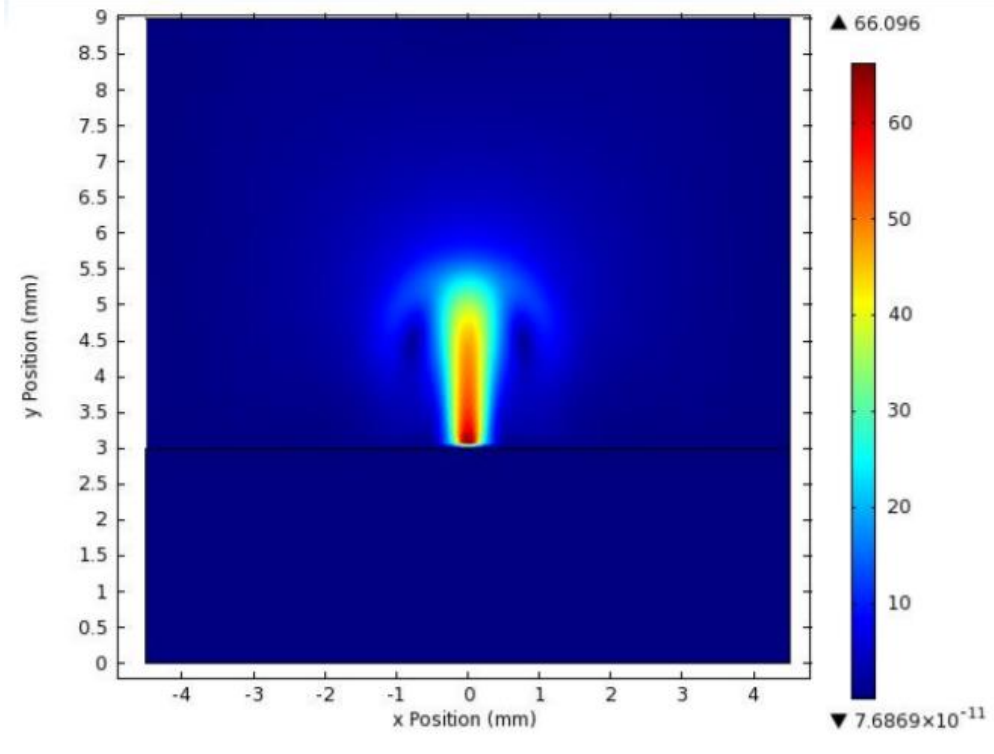


激光束产生的等离子体

- 热、流体、等离子体反应等多物理场耦合建模



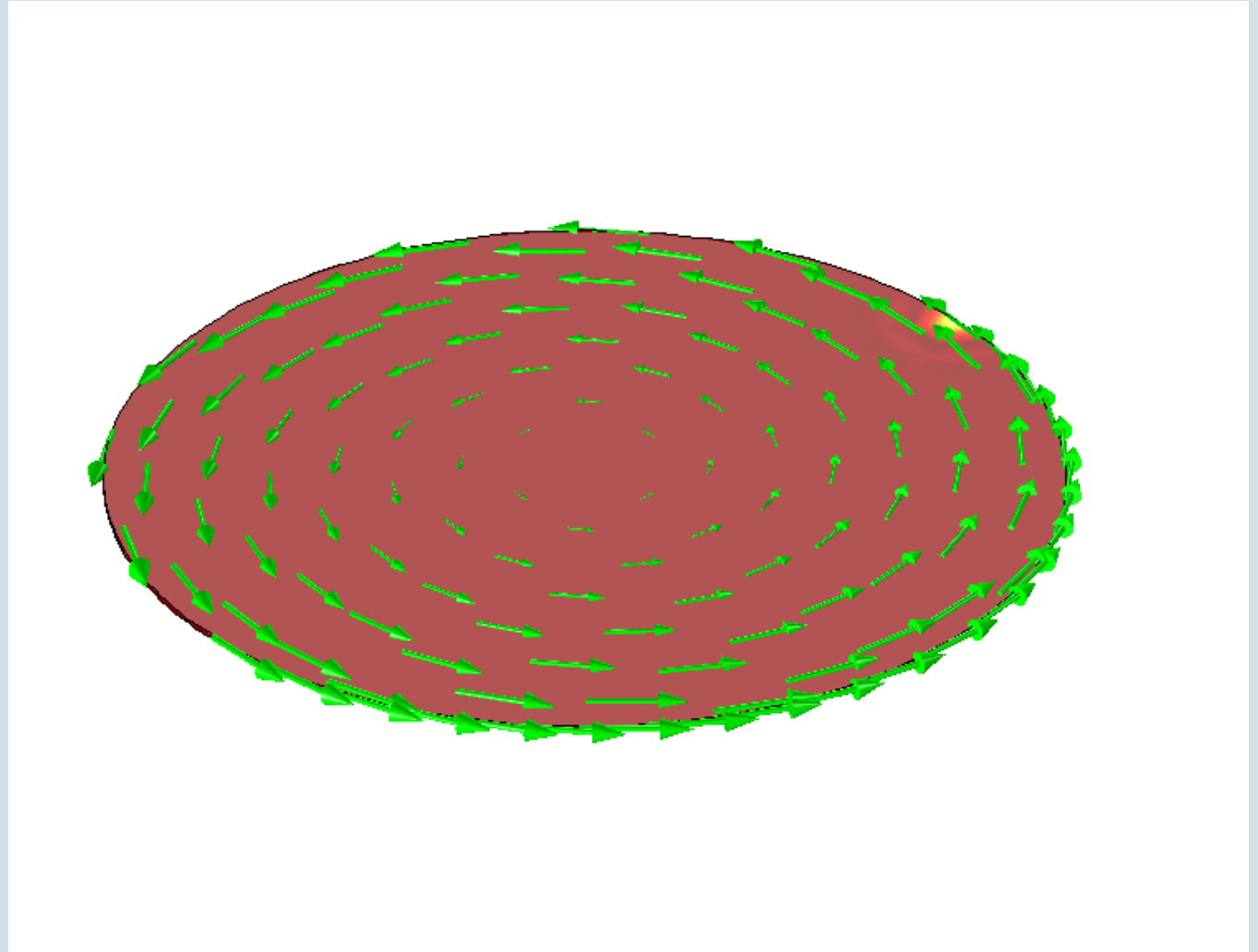
3.2ms 时温度分布



3.2ms 时速度分布

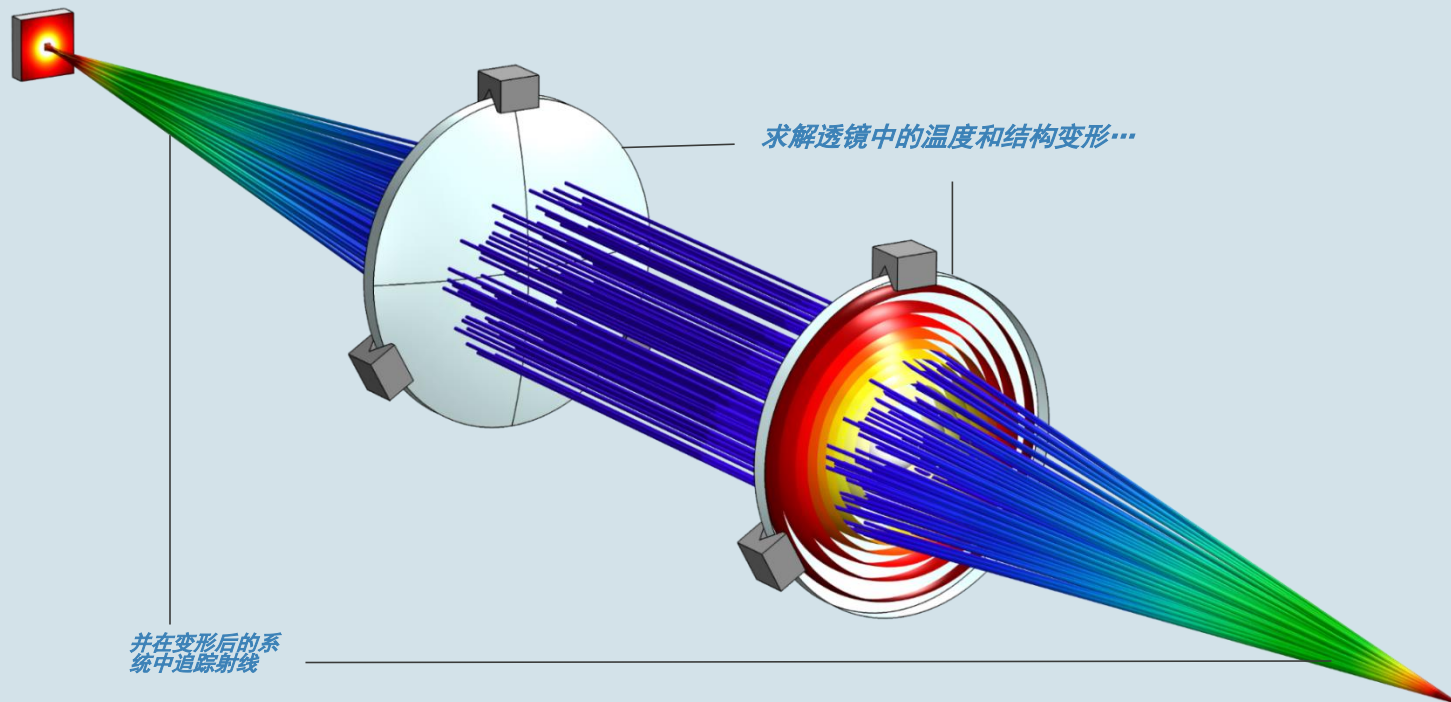
硅晶片激光加热

- 指定激光初始位置和功率
- 无需绘出实际模型



热致焦点飘移

- 光与材料相互作用产生热效应
- 热效应导致材料折射率发生变化
- 热效应导致材料几何结构发生变化



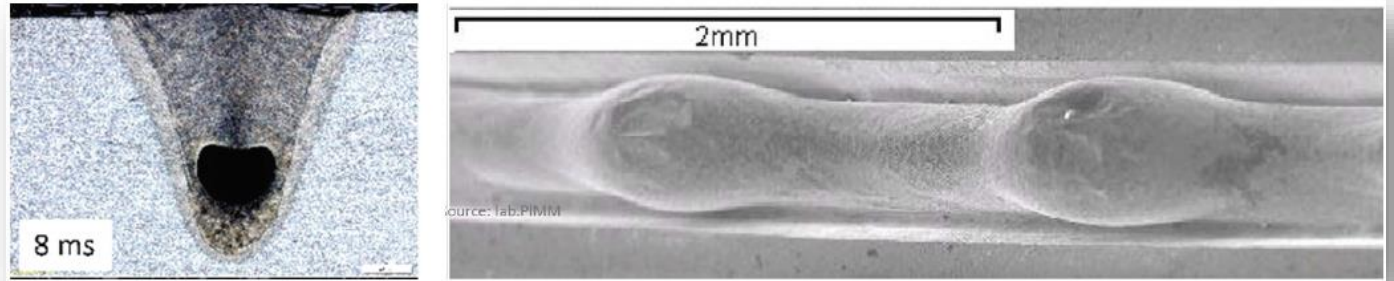
激光焊接

■ 难点

- 较高的温度梯度
- 冶金材料存在相变
- 材料的非均匀膨胀或收缩

■ 仿真预测

- 熔化区域尺寸
- 残余应力
- 残余变形

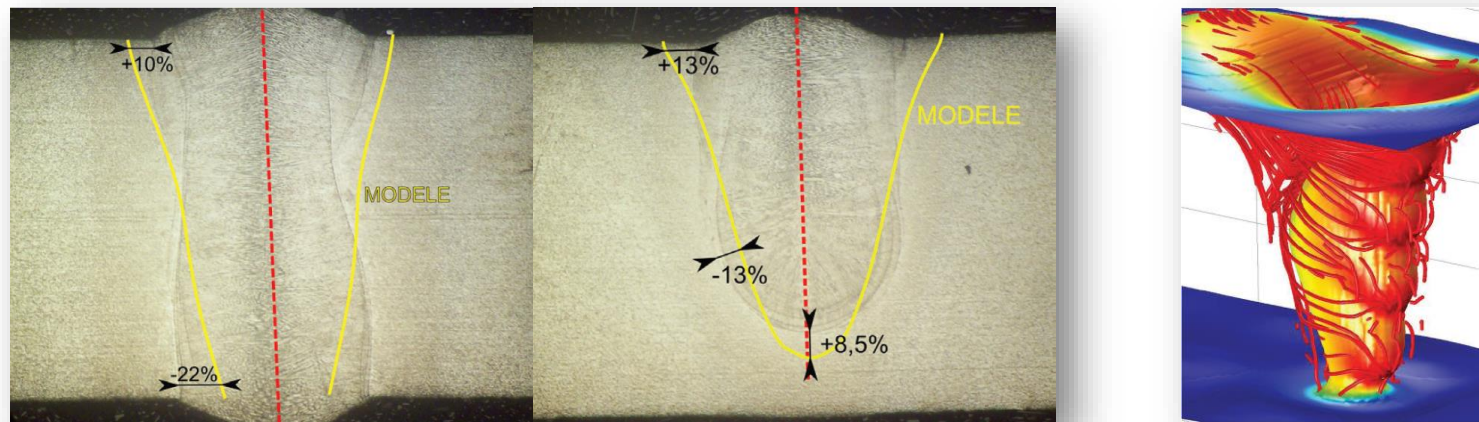


左：熔融金属未正确下陷形成的孔；

右：复杂的流体力学特性在焊接点中造成的气泡

激光焊接

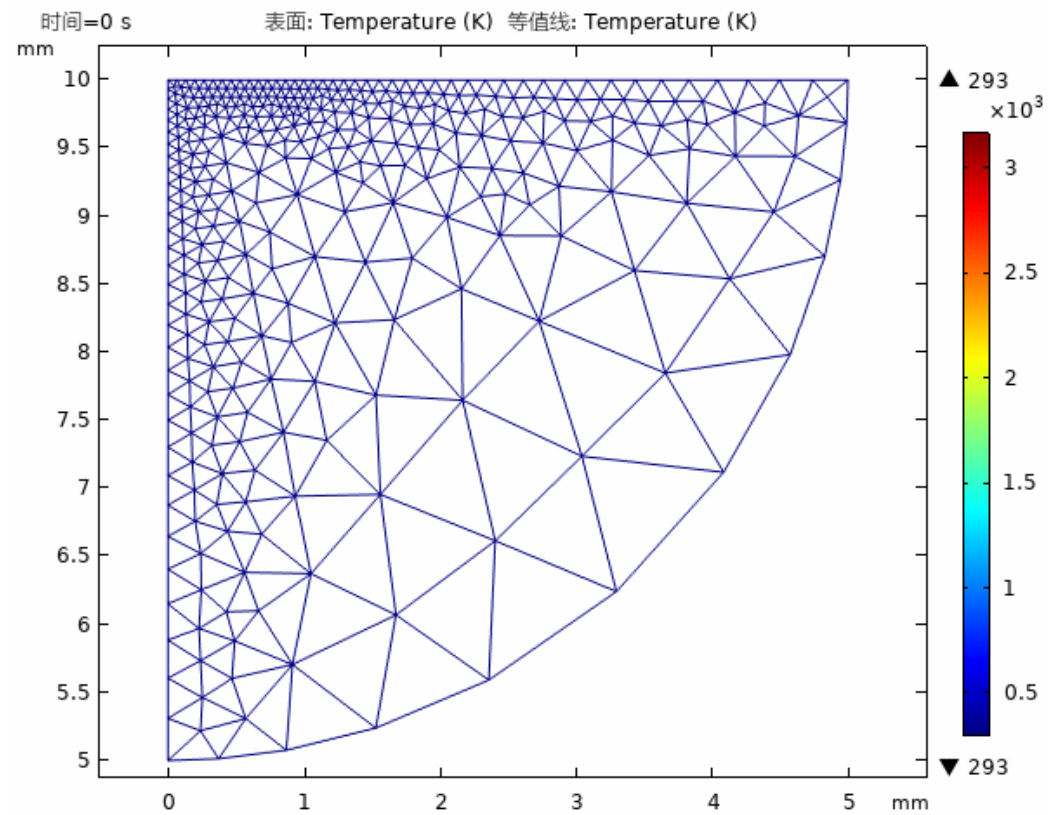
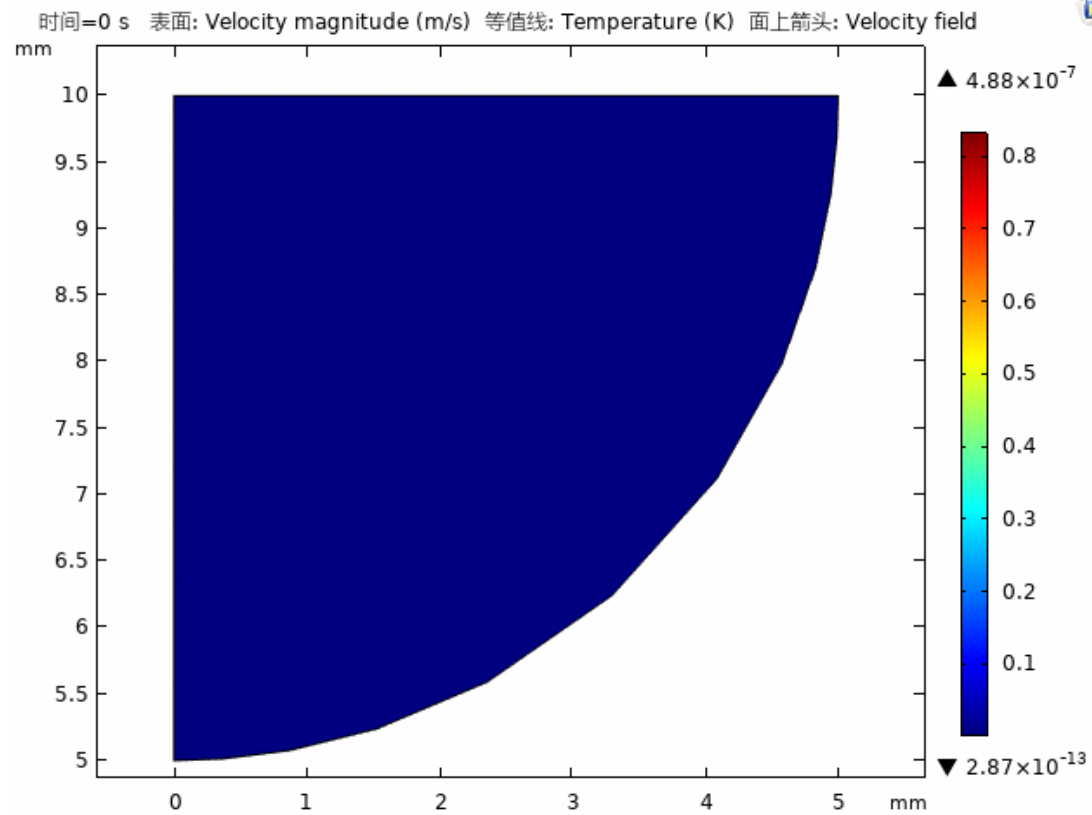
- 利用激光拼焊板 (laser welded blank) 可以有效控制或减少车辆各部件（如车架和车身）的材料用量。
- 多物理场仿真了解工作条件如何影响焊接质量，测试工作条件对缺陷发生概率的影响，预测流体动力学、热力学行为和焊接点的最终形态。



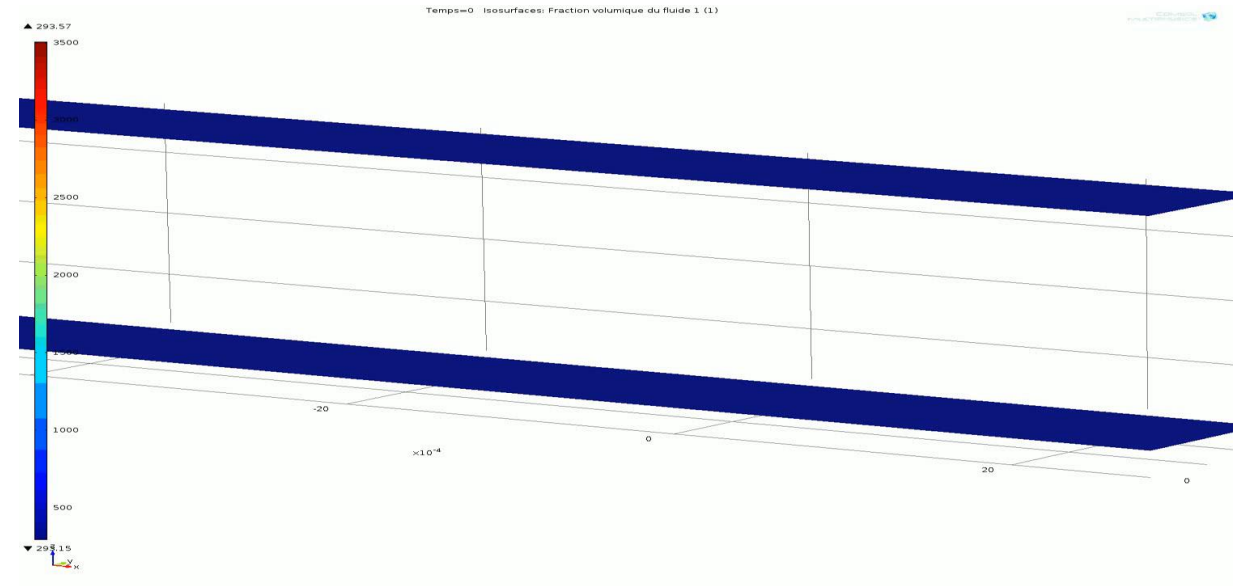
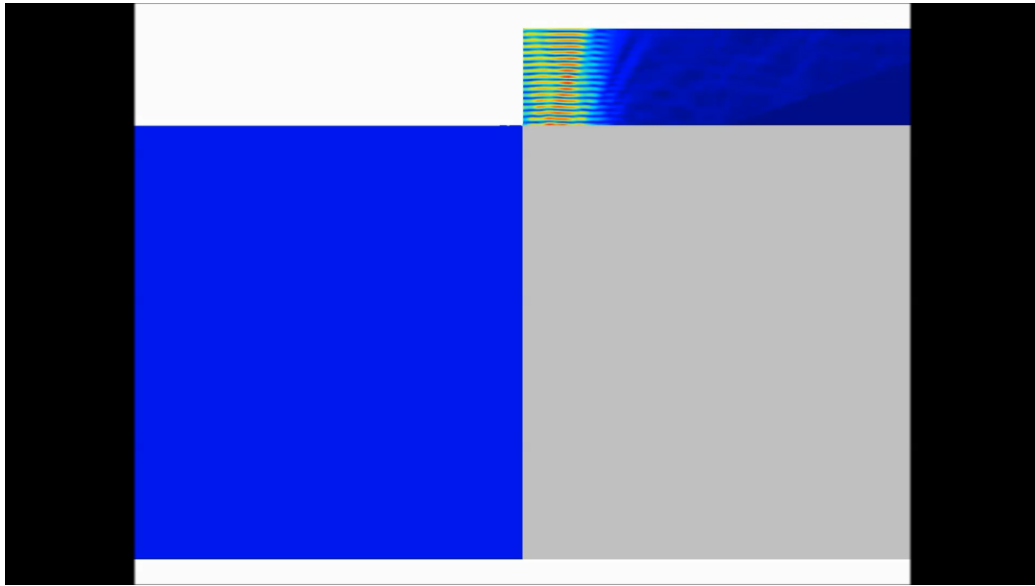
左：焊接熔深和焊接缺陷形态的 COMSOL 分析结果（黄色曲线）与实验结果的对比图。
右：匙孔形成过程中，其周围的流体流动三维视图。

图片由 ArcelorMittal 公司提供

激光焊接



激光焊接



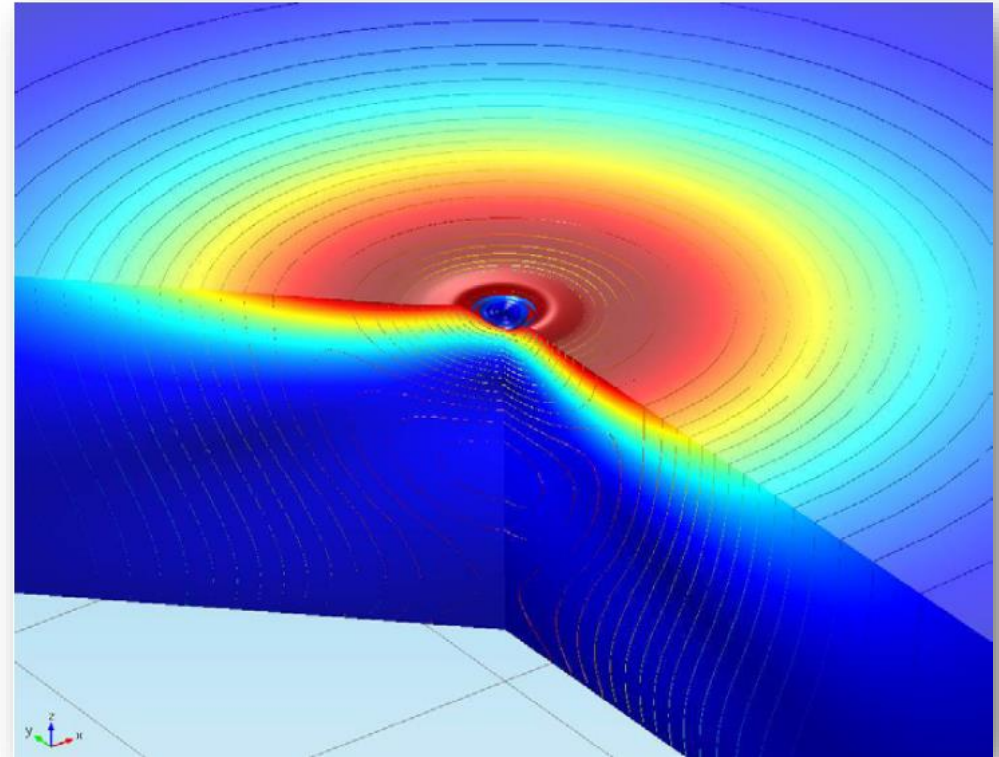
1000W功率激光焊接2维与3维

利用激光修复光学元件

- 模拟激光与玻璃的相互作用
- 慢速退火
- 红外(IR)脉冲激光微成形
- 激光化学气相沉积(L-CVD)

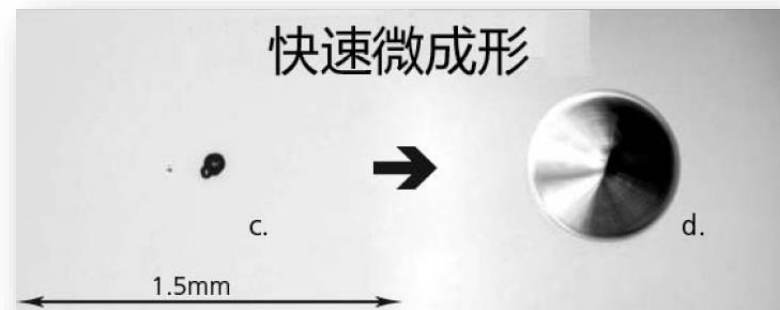


慢速退火工艺修复(a)处损伤, (b)为修复点



利用激光修复光学元件（续）

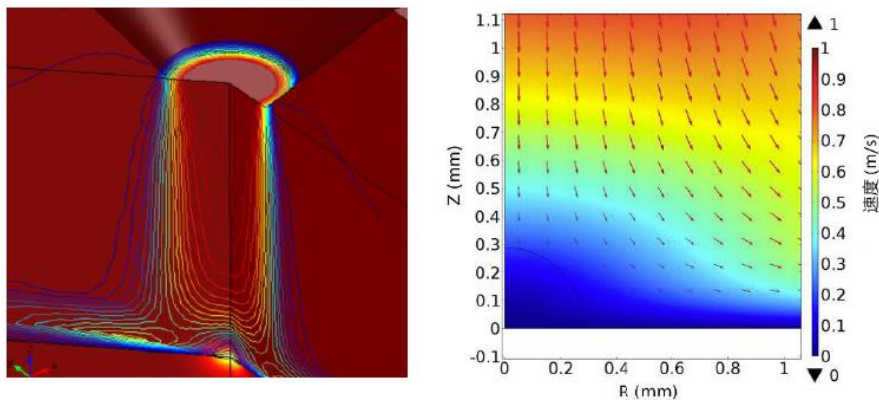
- 使用短脉冲激光修复，消除慢速退火产生的效应，形成光滑，无裂隙的表面，最终形成光滑的圆锥形坑，不会影响之后的光调制。
- 除了用于修复高功率脉冲激光系统中的损伤，还可以用于几乎所有需要激光抛光，退火，以及石英表面微成形的系统。
- 通过 COMSOL 软件仿真实理解激光加热的能量耦合热流，优化工艺



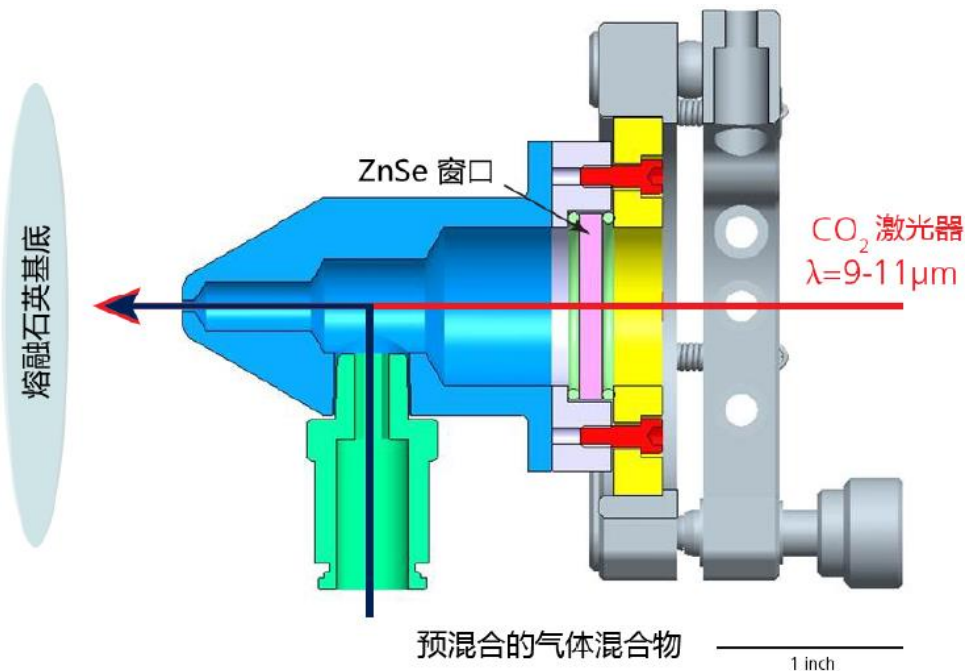
快速微成形技术修复(c)处损伤，(d)为修复点

利用激光修复光学元件（续）

- 模拟激光与玻璃的相互作用
- 慢速退火
- 红外(IR)脉冲激光微成形
- 激光化学气相沉积(L-CVD)



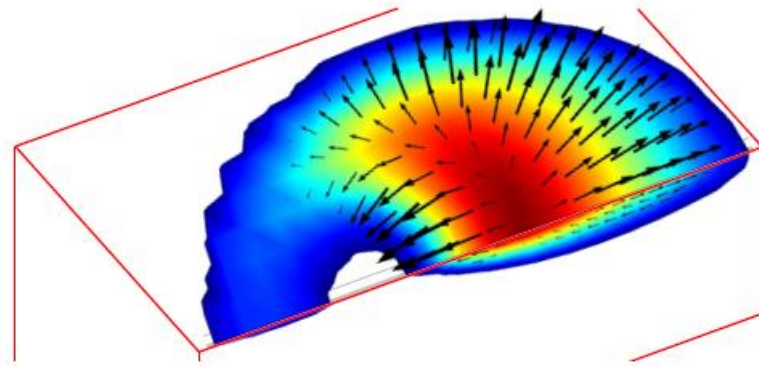
L-CVD的速度和温度场仿真，从直径 3 mm的喷嘴中流出的 L-CVD 前体流动速度等值线，以及由于空气玻璃界面处激光加热诱发的温度场。右：汽化石英的速度流线



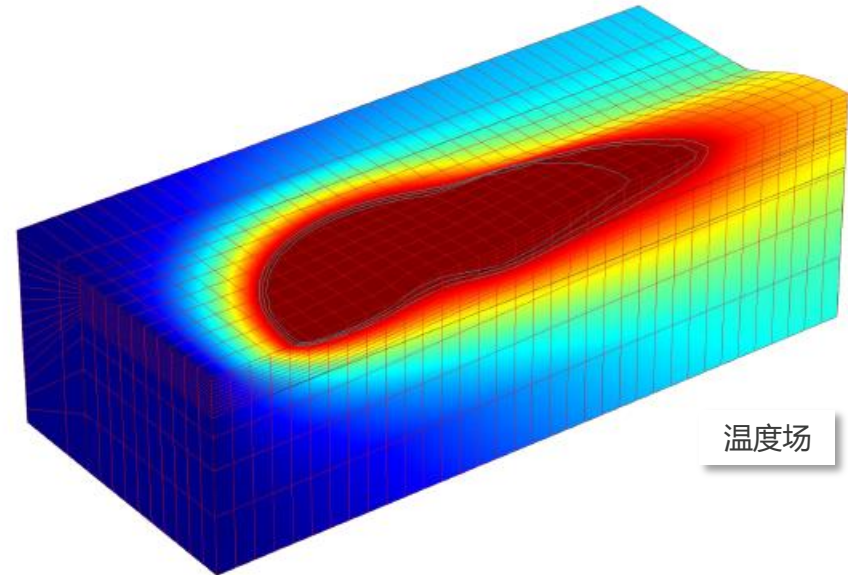
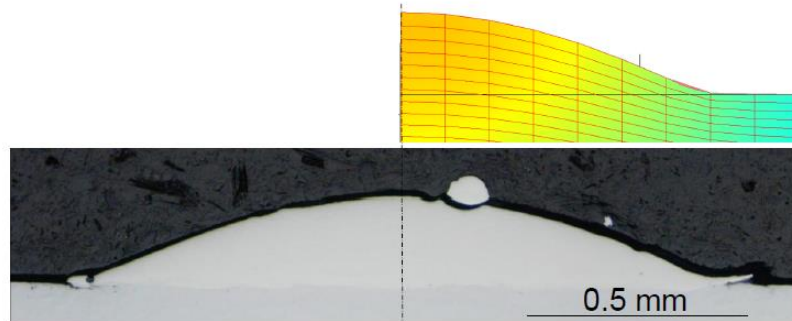
用于激光 CVD 工艺的光学耦合气体喷嘴示意图，气体通过侧向端口进入，红外激光通过 ZnSe 窗口沿轴向进入

移动网格方法预测工件厚度

- 在流-热耦合中使用移动网格方法考虑增材制造过程中工件的增长



速度场

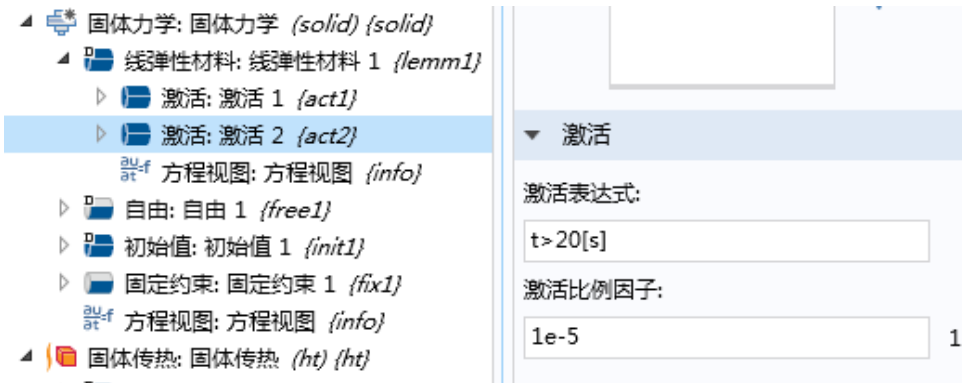


温度场

测量值与模拟值对比

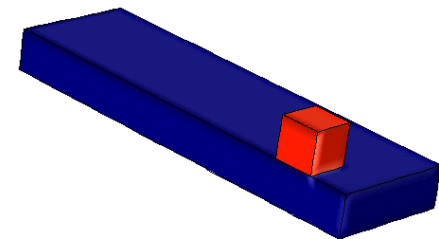
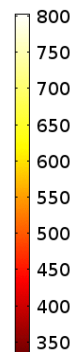
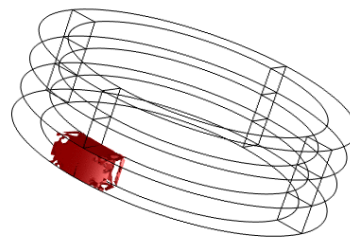
器件仿真

- 热应力问题
- 方法：材料激活或变形几何

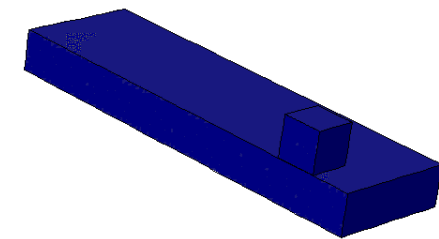
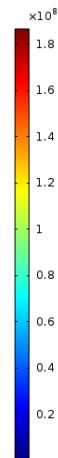
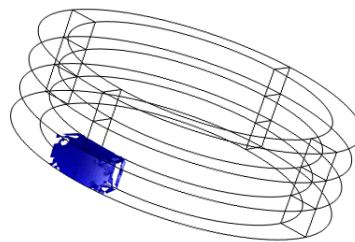


材料激活功能

时间=0 s 表面: Température (K)



时间=0 s 表面: Contraintes de Von Mises (N/m²)

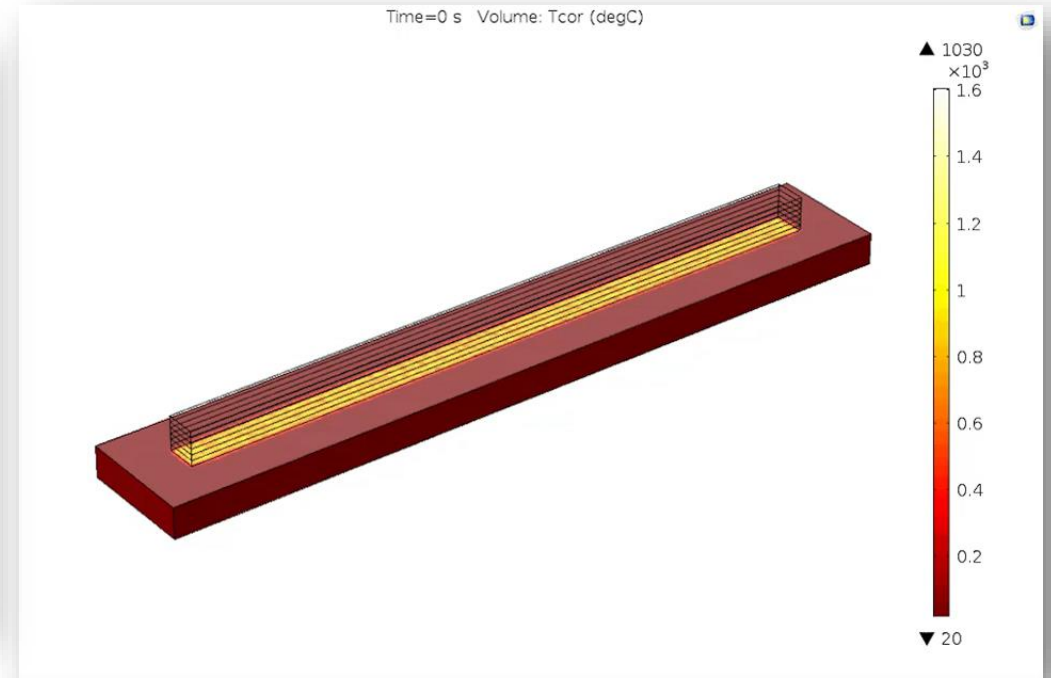


激光增材制造工艺

- 类似于焊接，逐渐在表面上沉积熔融金属。但熔融金属会发生热膨胀，将在冷却时造成包层变形。最终产品可能会偏离预期。



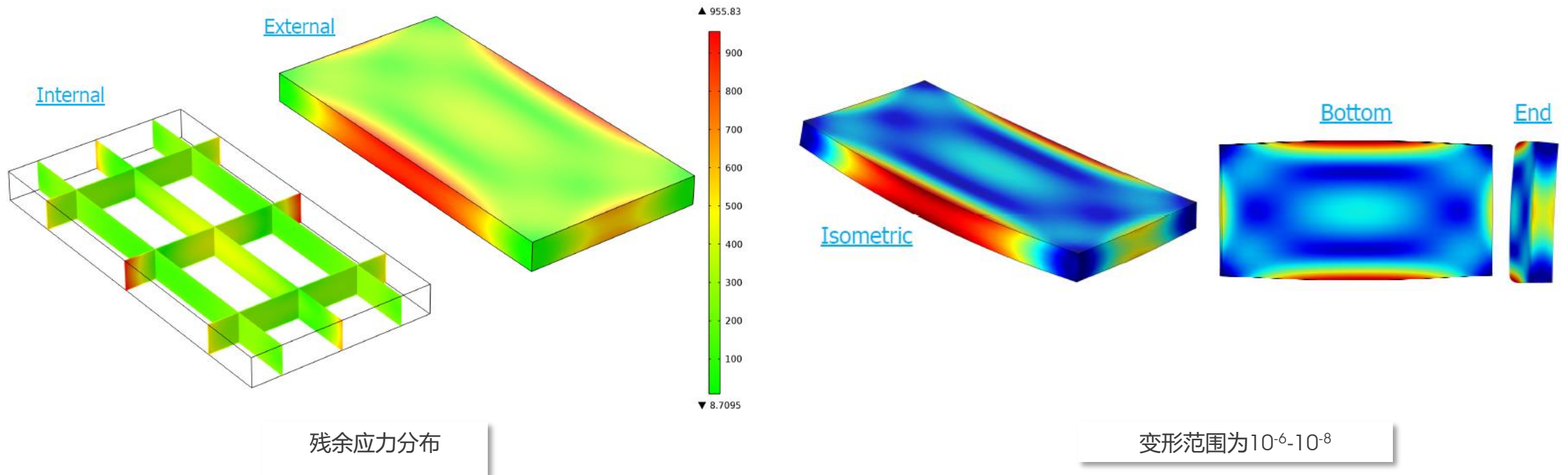
经过六层沉积后，制造零件中出现肉眼可见的变形



对制造零件中温度加热的仿真

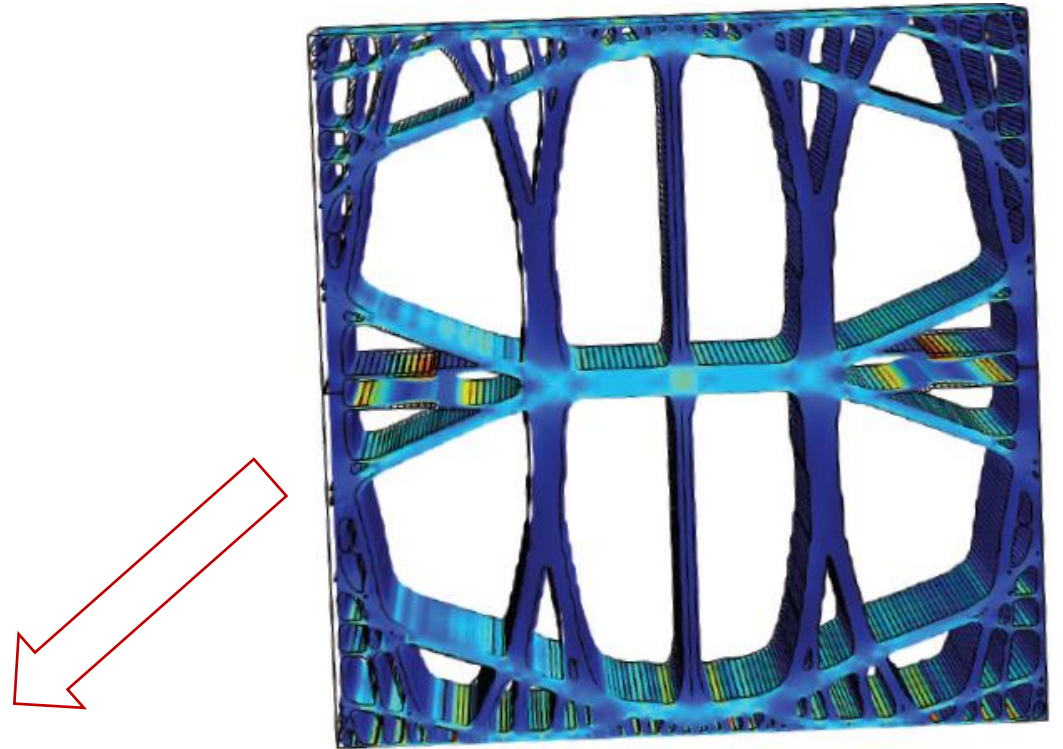
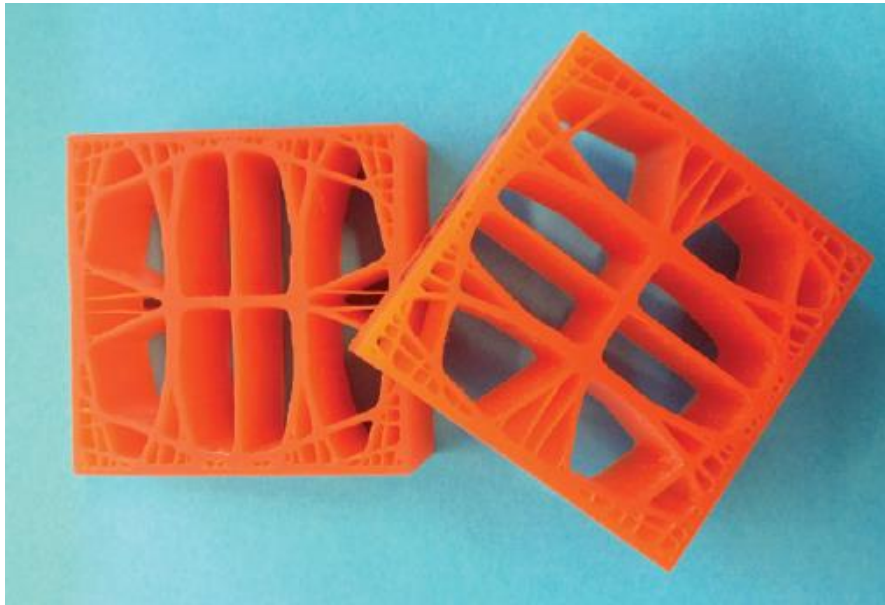
增材制造工件中的变形与残余应力

- 通过考察激光功率、激光路径和移动速度等参数的影响，找到最优的工艺条件



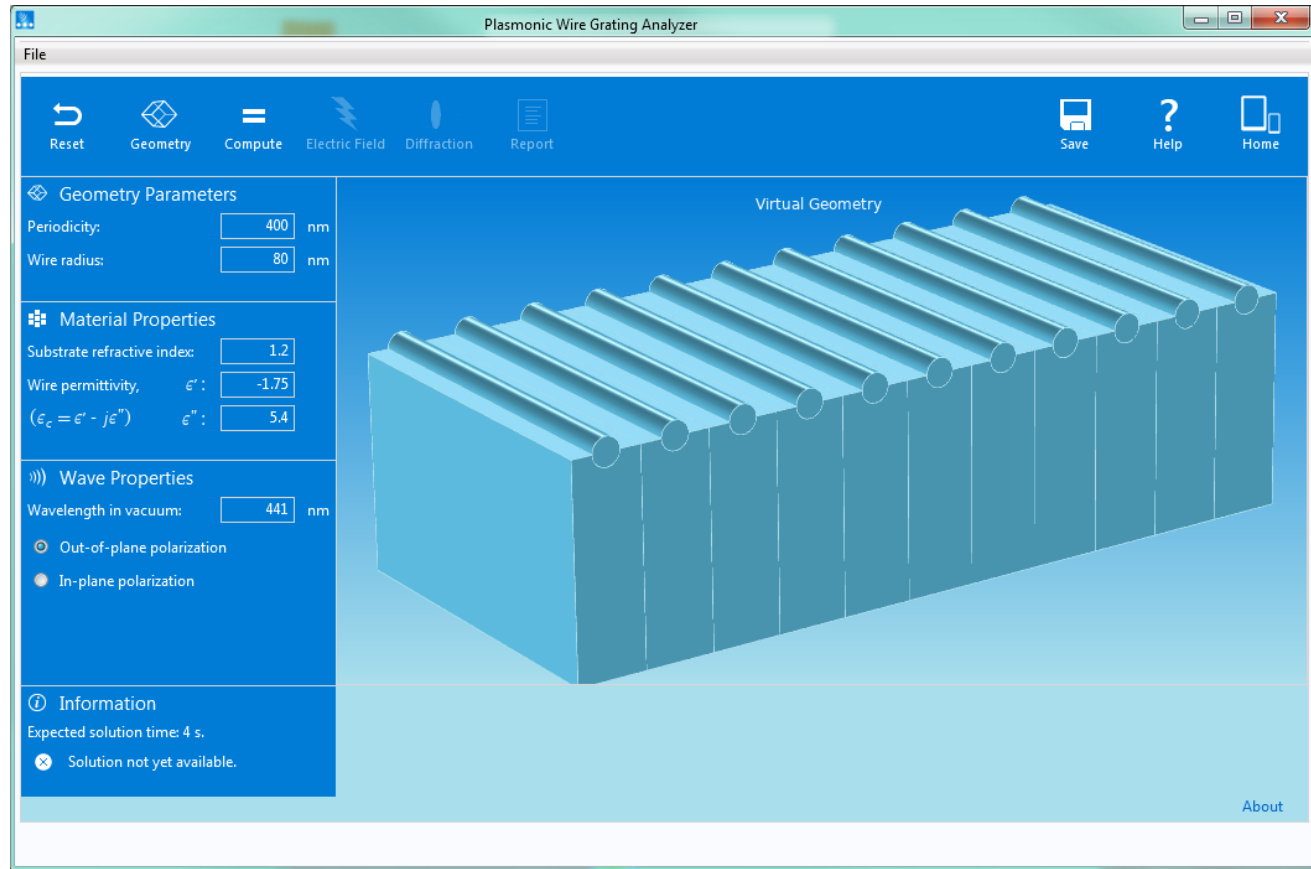
拓扑优化

- 3D打印通常使用周期重复的单元结构
- 通过结构刚性和应力优化最小单元的拓扑
- 将最终优化后的拓扑进行打印



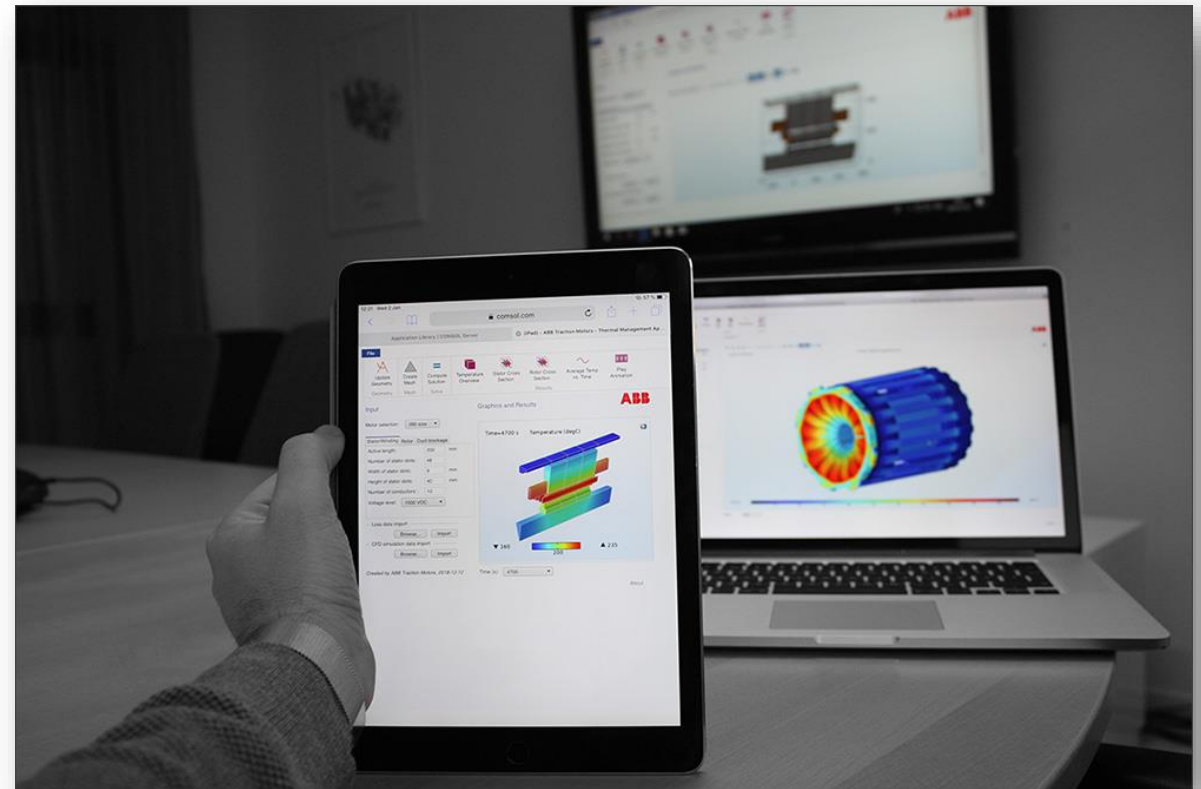
仿真 App

- 仿真 App = 仿真模型 + 用户界面
- 开发便捷
 - 模型开发与 App 开发工具同一件界面内一键切换，紧密集成
 - 图形化的 App 开发界面，易学易用



灵活部署

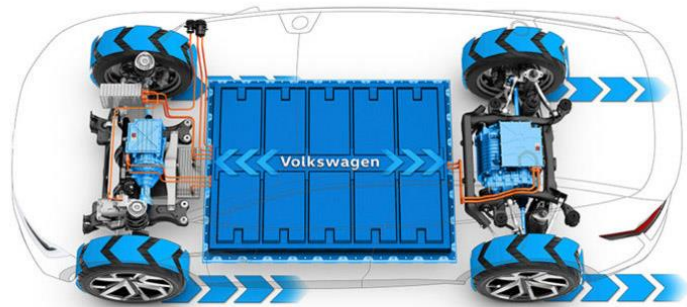
- 独立运行（EXE 文件）
 - 支持 Windows, Linux, MacOS
 - 无需安装 COMSOL Multiphysics
- 客户端 / 服务器方式运行
 - 无需本地安装，使用网络浏览器即可访问
 - 支持多种终端设备
 - 服务器端需安装 COMSOL Server 支持 App 的访问和运行



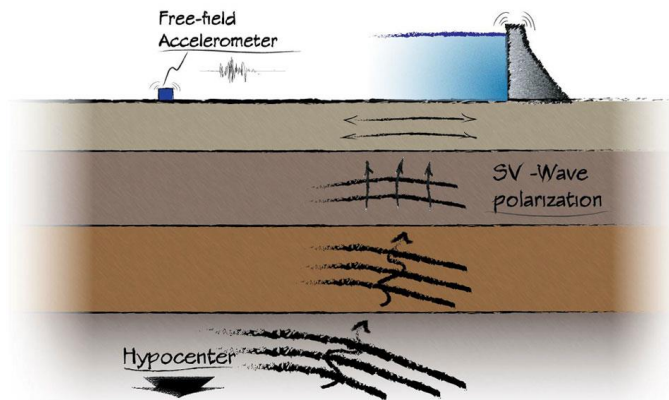
内容丰富的COMSOL博客和用户案例集锦

- 激光腔稳定性分析
- 焊缝疲劳分析
- 激光烧蚀
- 利用激光进行元件修复
-

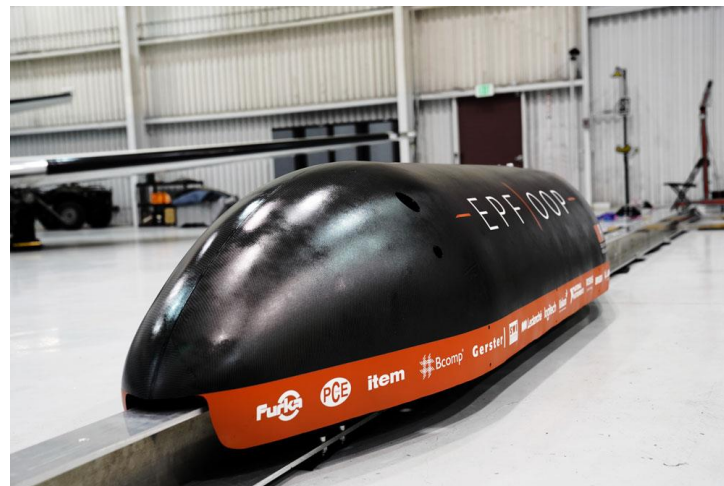
各行各业都获利于多物理场仿真



大众汽车驱动器设计



大坝安全评估

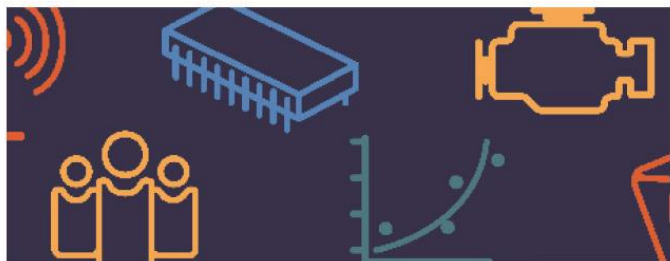


超级高铁设计

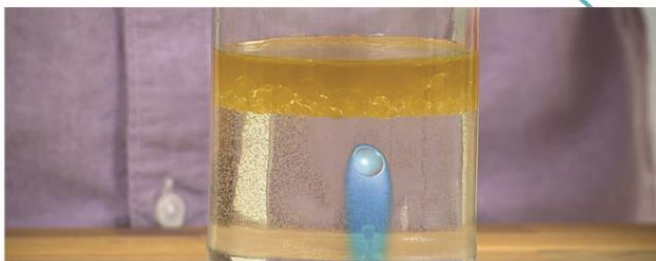
- 电力科技
- 火箭推进技术
- 产品安全性和品控
- 电气冷却
- 能源技术
- 环境工程
- 建筑物理学
- 软件质量保证
- 磁聚变能
- 科技创新
- 电子封装
- ...

更多资源

comsol.com



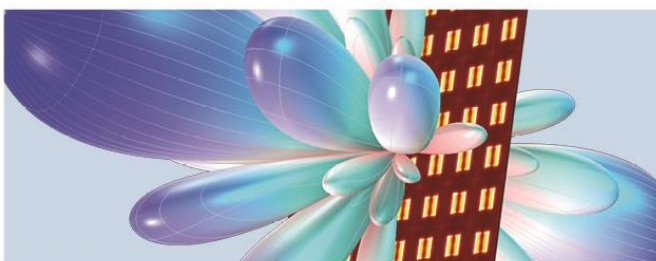
中文博客



视频中心



用户故事



案例下载

联系我们

电话

- 上海: 021 - 5077 6566
- 北京: 010 - 8208 8611

网站

- cn.comsol.com/contact



扫描二维码
关注 COMSOL
微信公众号

