



ANSYS

CONVERGENCE
CONFERENCES

2018年7月11-13日 上海

2018 ANSYS技术大会

增材先进设计与制造一体化解决方案

寇晓东

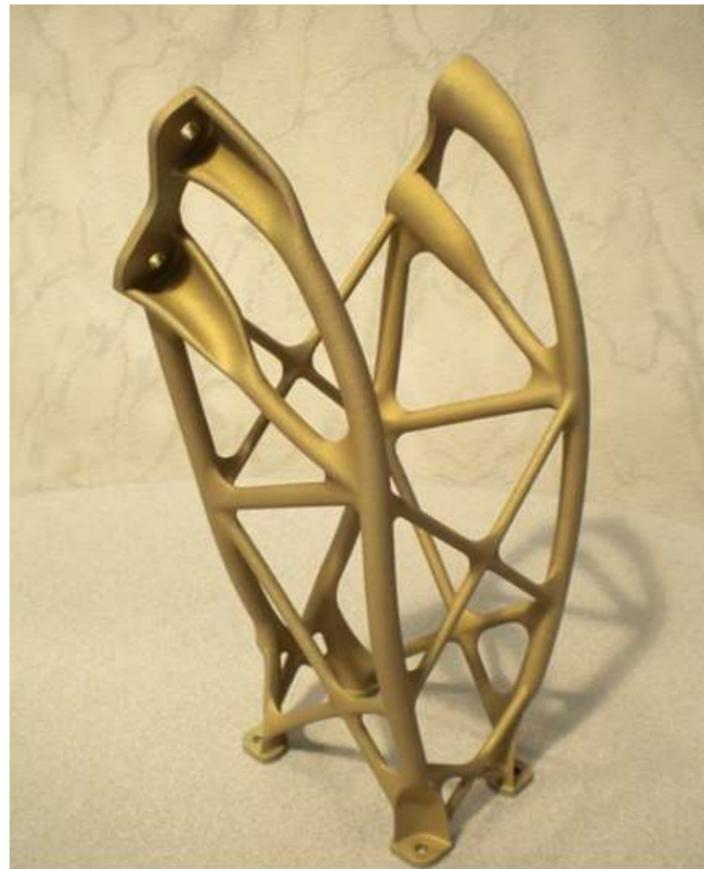
安世中德（北京）咨询有限公司

内 容

- **增材先进设计与制造概述**
- **仿真驱动的增材先进设计技术**
 - ✓ 拓扑优化
 - ✓ 后拓扑结构设计
 - ✓ 设计评估
- **增材工艺仿真解决方案**
 - ✓ 产品设计者: Workbench Additive
 - ✓ 工艺工程师: ANSYS Additive Print
 - ✓ 工艺与材料专家: ANSYS Additive Science

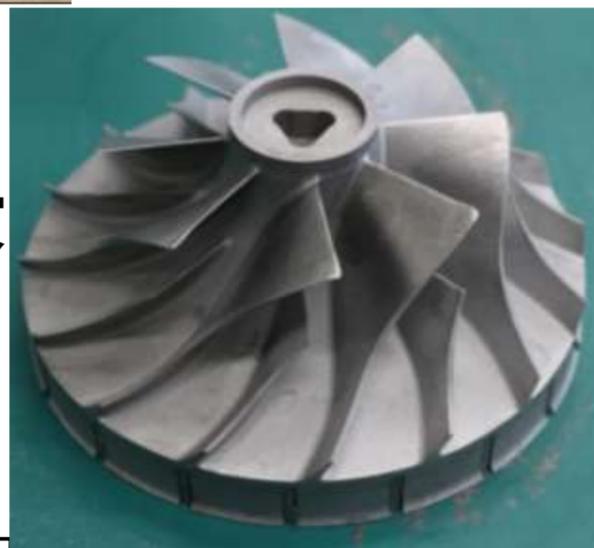
增材制造带来设计的革命

- 制造传统工艺所不能
- 轻量化
- 多件融合
- 个性化
- 按需生产，旧件替换
- 分布式生产
- 全新材料

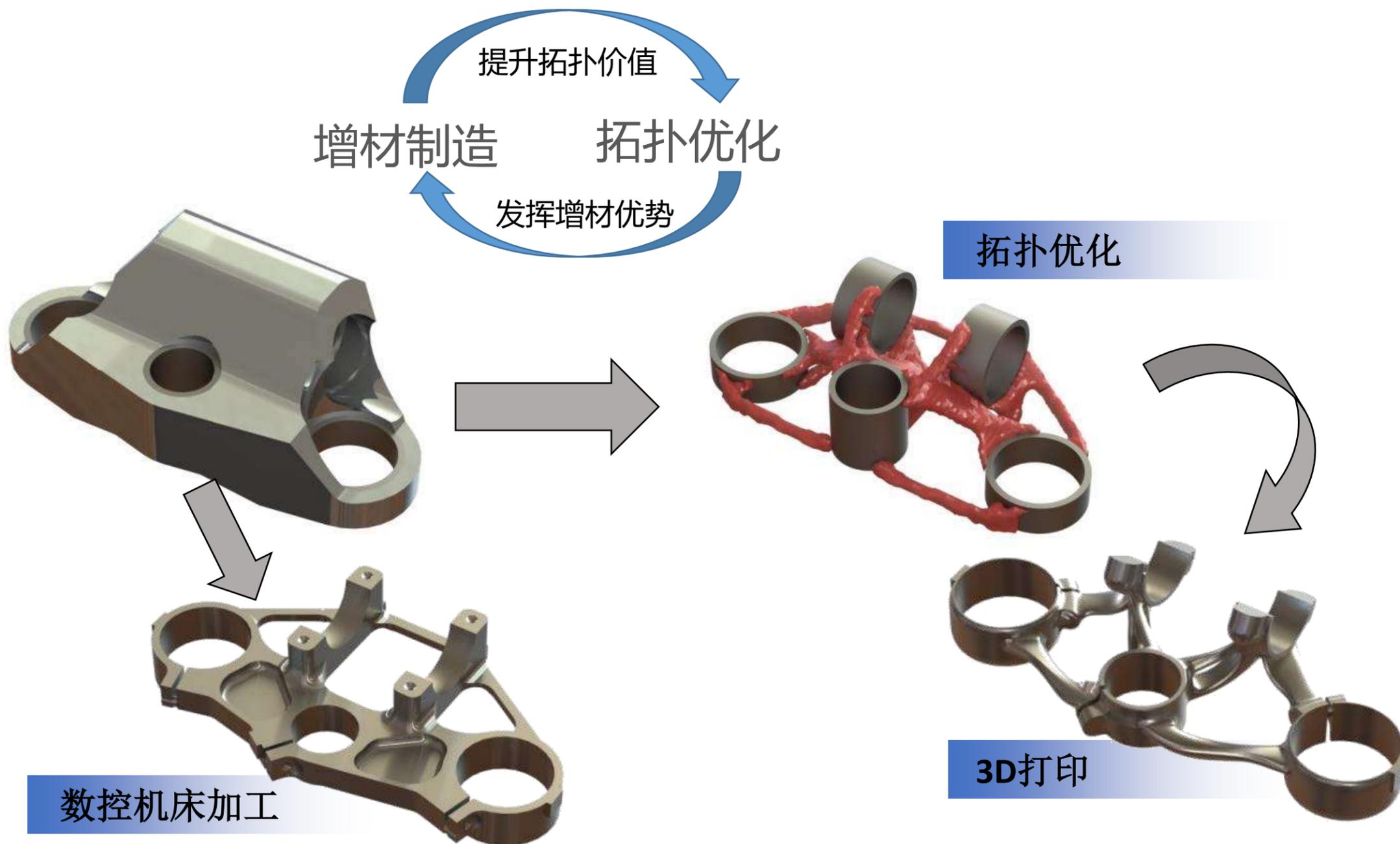


- 增材制造为自由设计/创新设计提供了更大的可能性

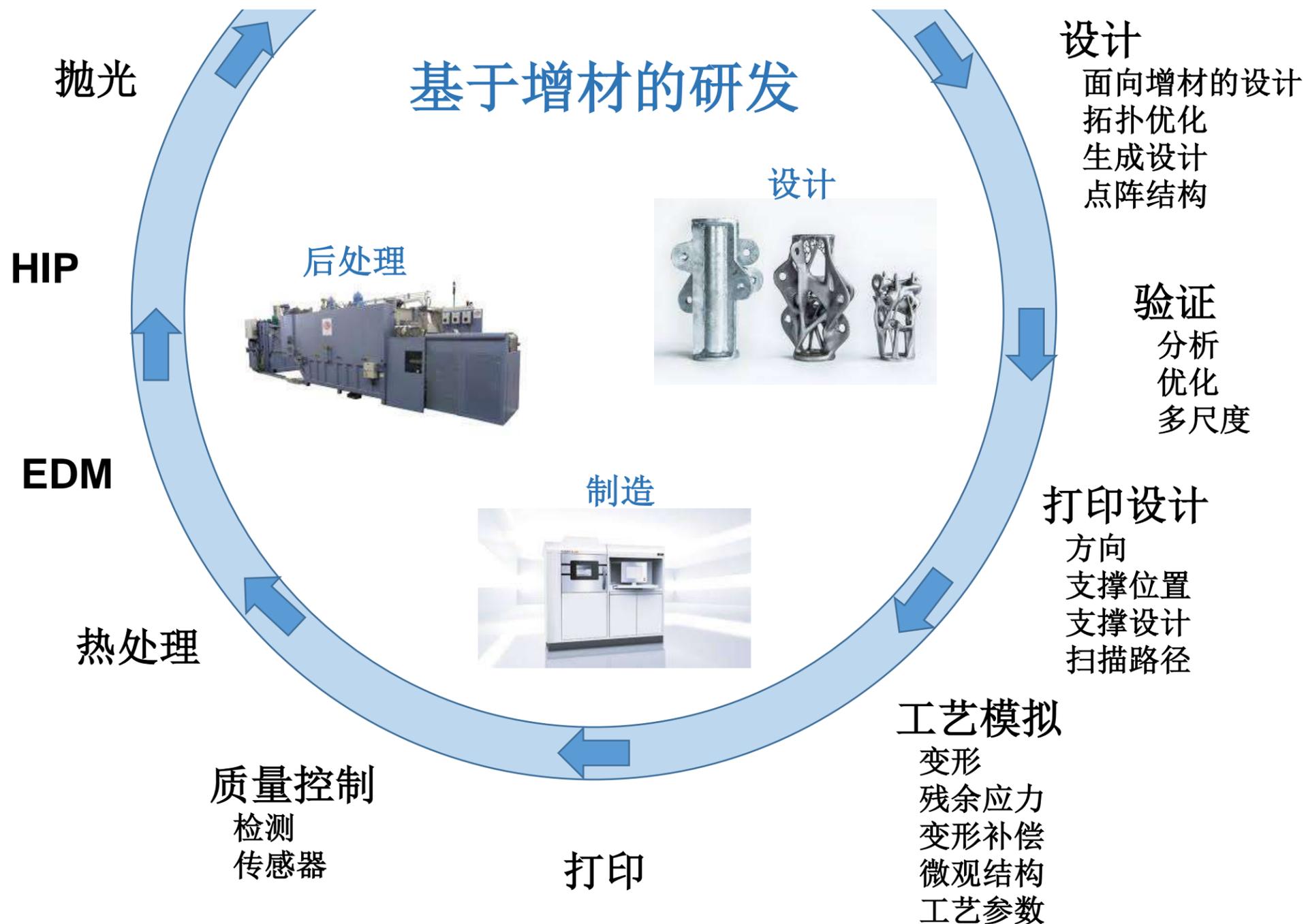
- 增材制造不仅仅是制造手段，它是将设计想法转化为产品的途径
- 从工艺约束的设计转变为基于性能的设计
- 改变设计理念成为必然，面向增材的设计（DfAM）是先进设计的方向



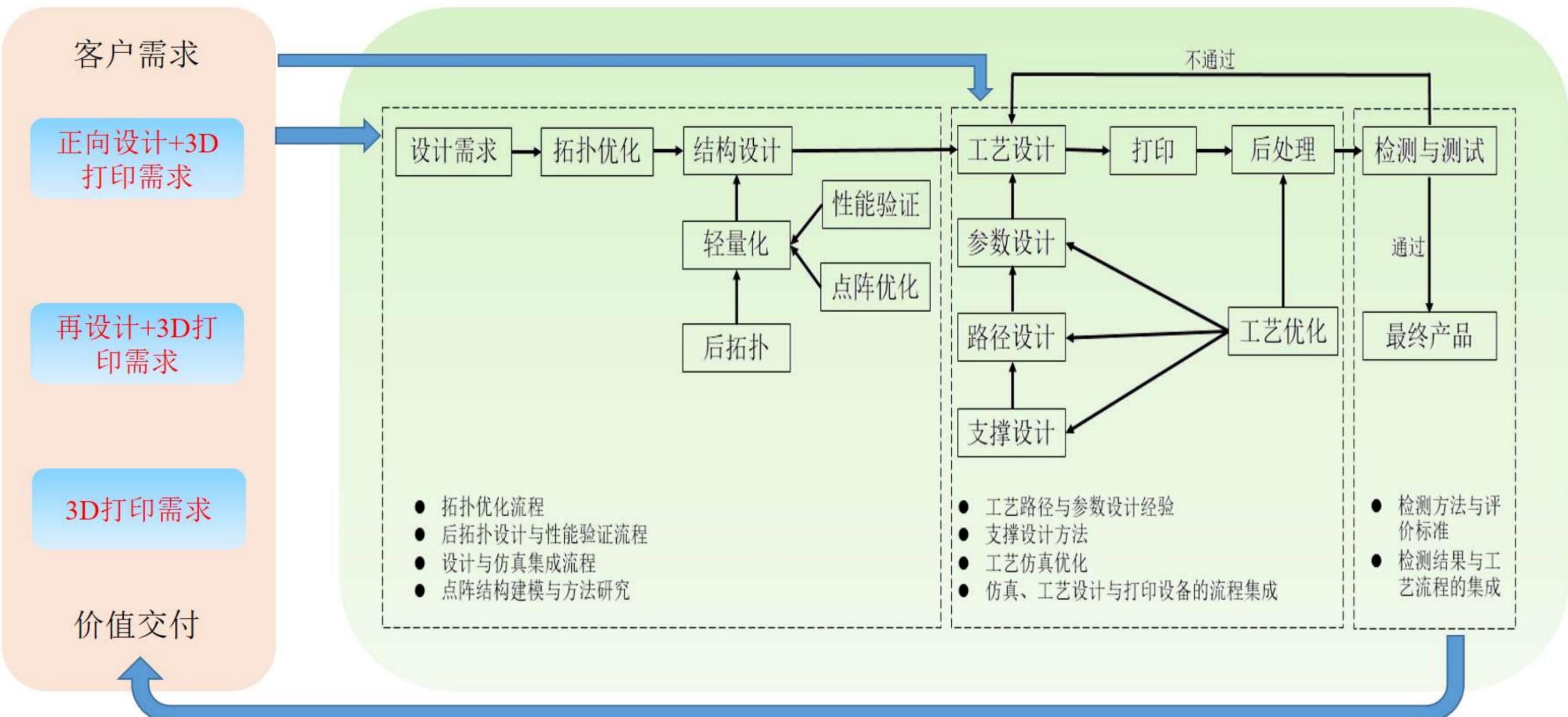
增材与拓扑优化



增材制造生态系统



增材先进设计与制造一体化解决方案



增材先进设计与制造关键技术

仿真驱动的增材先进设计与制造关键技术

增材先进设计

结构拓扑优化

后拓扑设计与模型处理

设计评估

性能仿真

点阵仿真

修复

光顺

点阵结构与优化

增材工艺设计

面向产品设计人员的工艺仿真

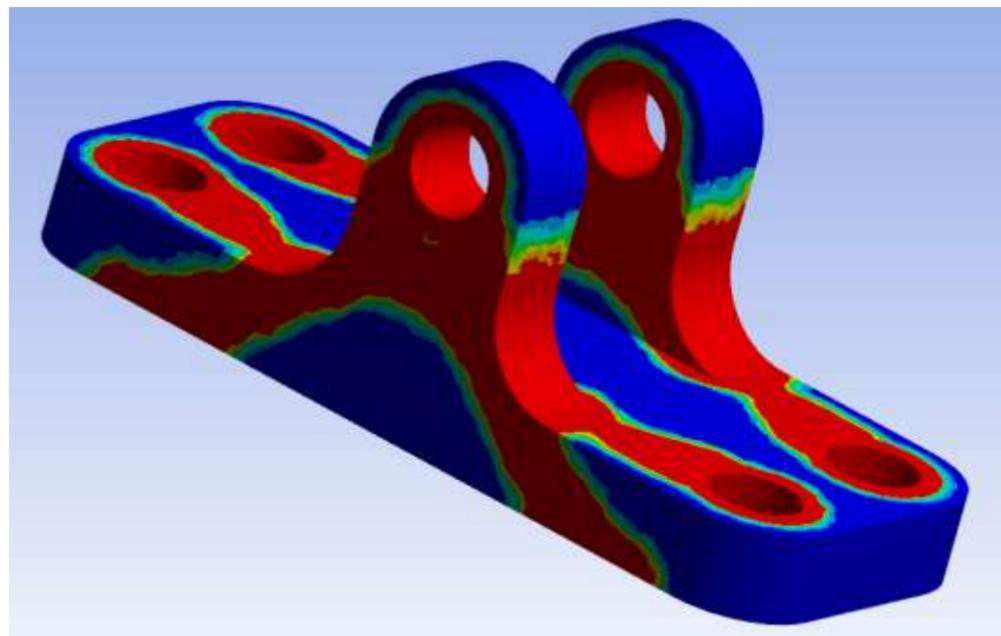
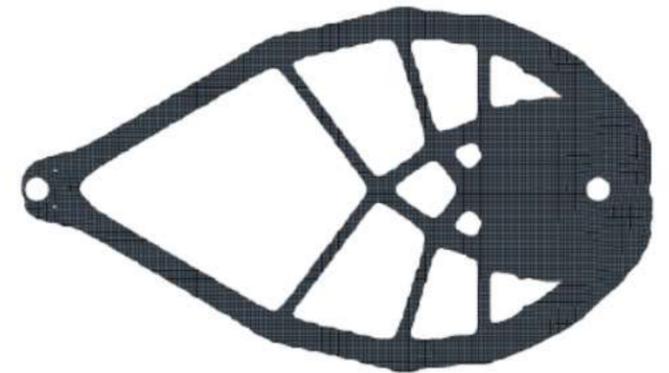
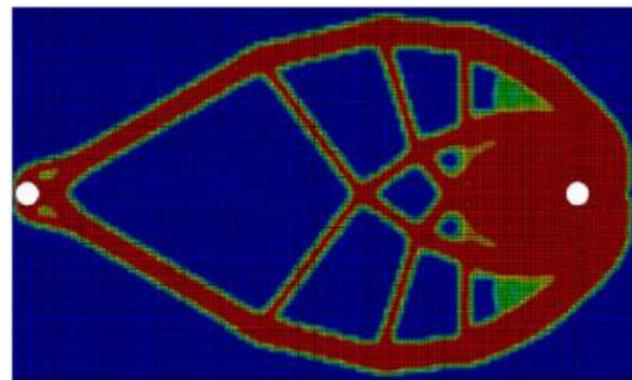
面向工艺工程师的工艺仿真

面向工艺专家和材料专家的工艺仿真

仿真驱动的增材先进设计技术

拓扑优化

- 基于有限元网格（而非几何）
- 确定可以移除的不承载或者承载量小的材料（单元）
- 设计变量是单元密度：
 - 单元密度=0 去除
 - 单元密度=1 保留
 - 单元密度=0~1: 用户选择



已知

设计空间

载荷工况, 频率限制
, 或者其它工程要求

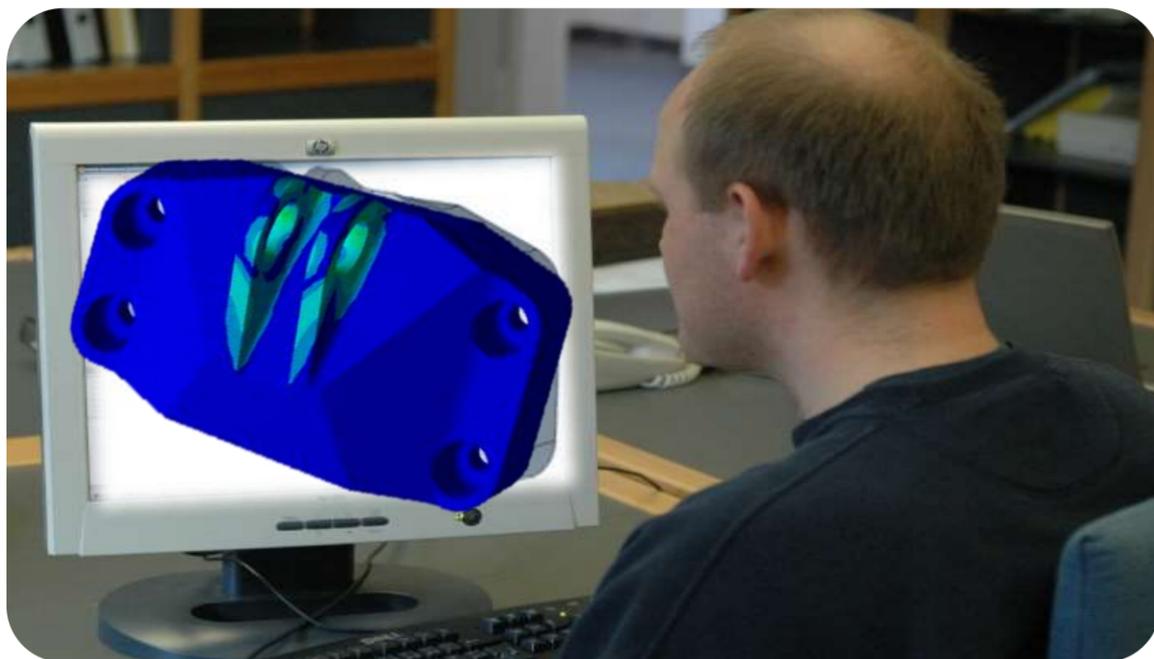
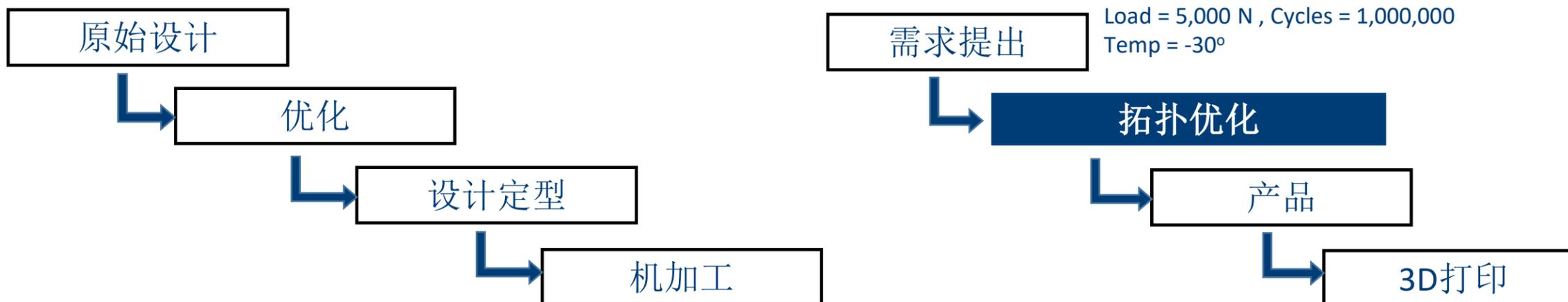
目标

刚度最大、质量最小的几何形状

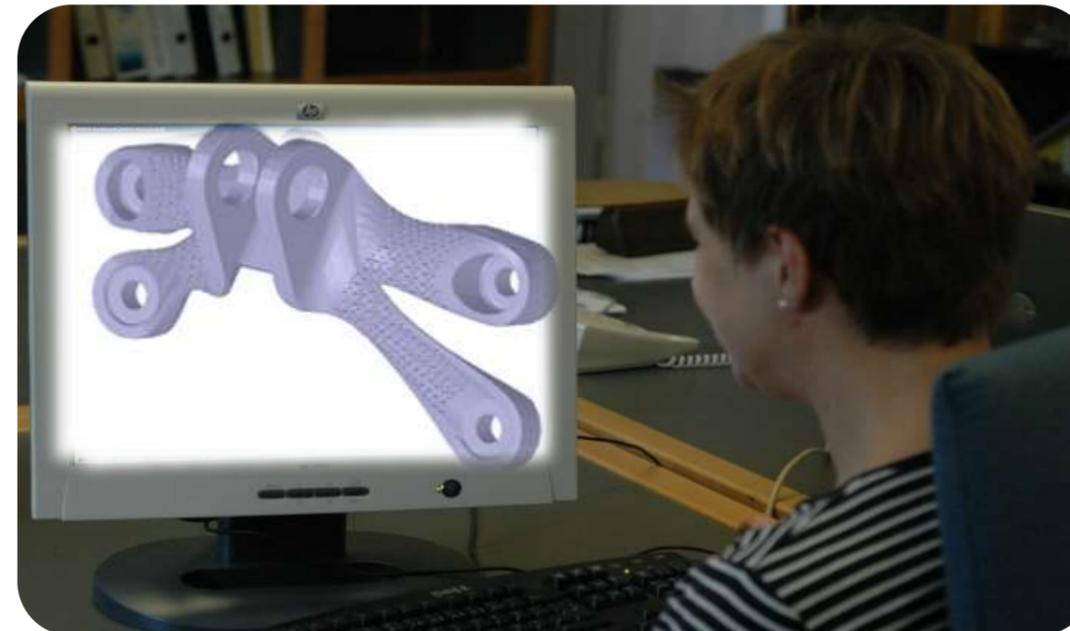
条件

应力、位移约束

拓扑优化价值



这是我的设计，请告诉我性能如何



这是我的性能要求，请告诉我如何设计

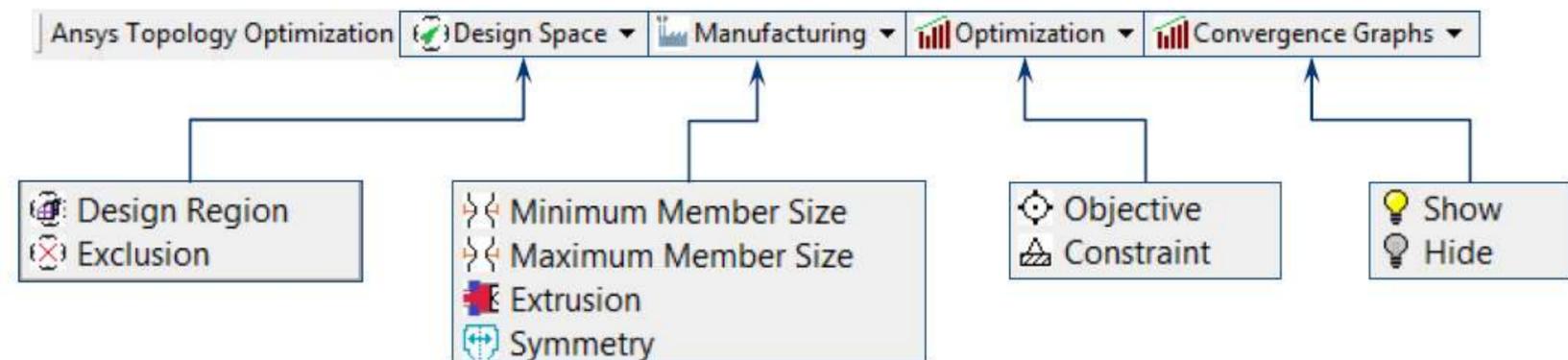
ANSYS Topology-拓朴优化

力学行为

- 结构线性静力
- 静态载荷、惯性载荷、热载荷
- 模态
- 绑定接触
- 单载荷工况和多载荷工况

约束条件

- 质量、体积
- 全局和局部应力
- 位移
- 反力
- 固有频率



优化目标

- 柔度最小(刚度最大)
- 固有频率最大
- 单一频率和多个频率
- 质量最小
- 体积最小

制造约束

- 最小构件尺寸
- 最大构件尺寸
- 拔出方向
- 挤出方向
- 对称
- 循环

Details von "Objective"	
Definition	
Response Type	Single Compliance
Goal	Single Compliance
	Multiple Compliance
	Local Degree of Freedom
	Local Displacement
	Reaction Force
	Volume
	Mass

Details von "Constraint"	
Definition	
Response Type	Volume
Operator	Local Degree of Freedom
Percentage	Reaction Force
	Volume
	Mass
	Local Stress
	Global Stress

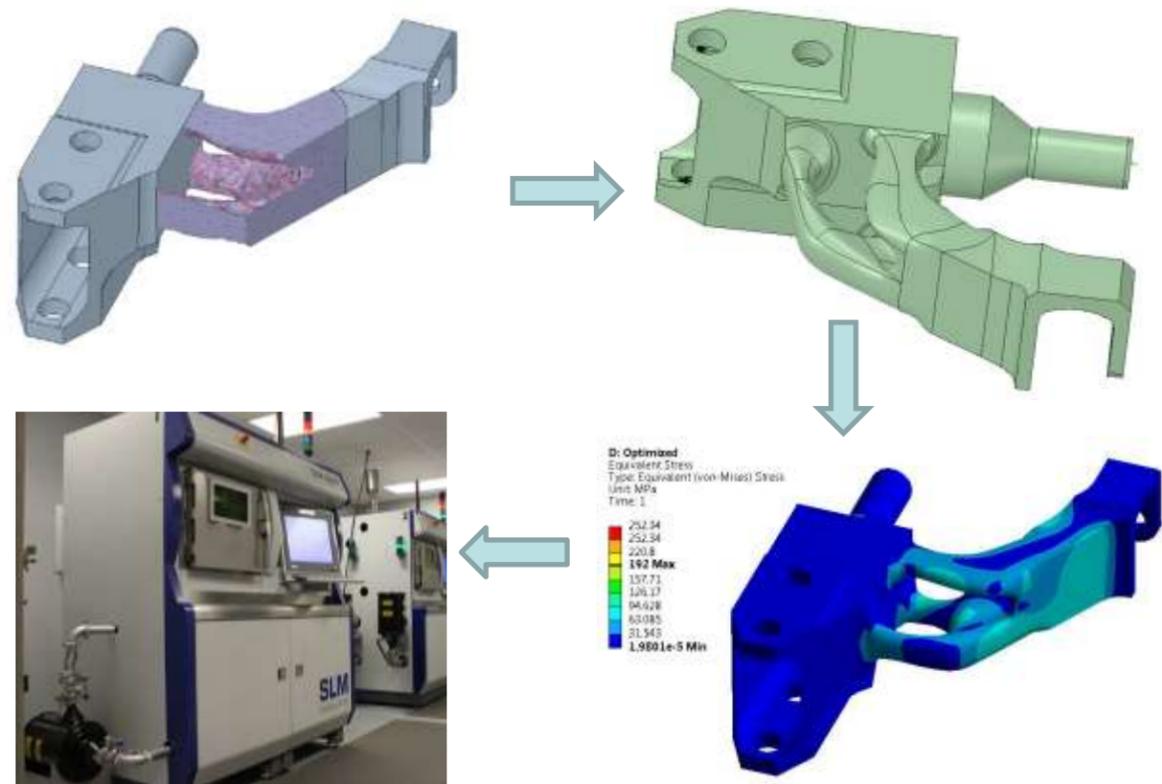
拓扑优化必须解决的问题

• 三个挑战

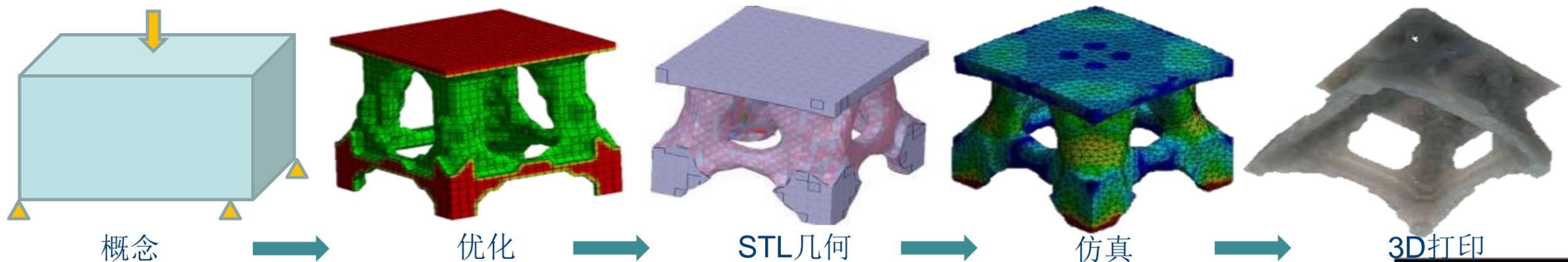
- 拓扑优化转换到CAD模型
- 拓扑优化与仿真流程的结合
- 拓扑优化设计的制造

• 解决方案

- ANSYS SpaceClaim
- ANSYS Workbench
- 3D打印



以下流程在ANSYS Workbench中无缝实现

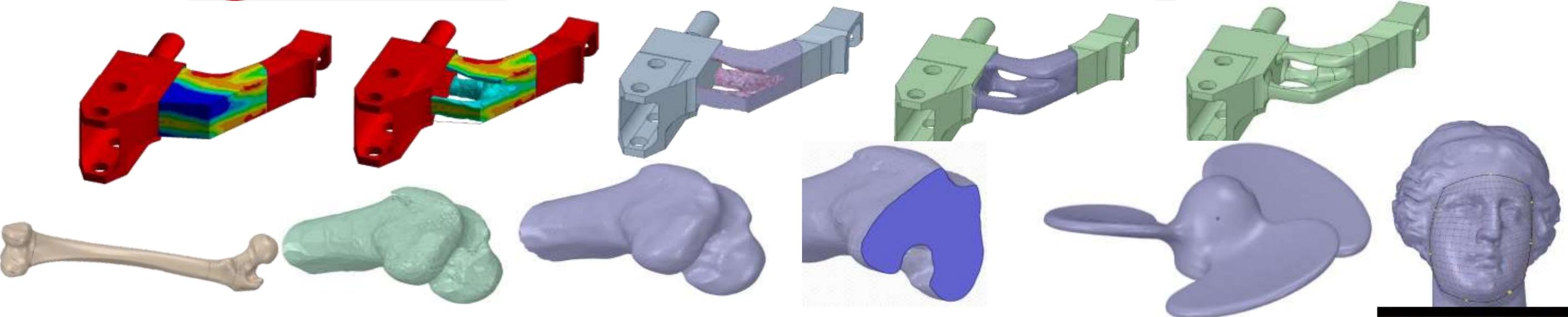
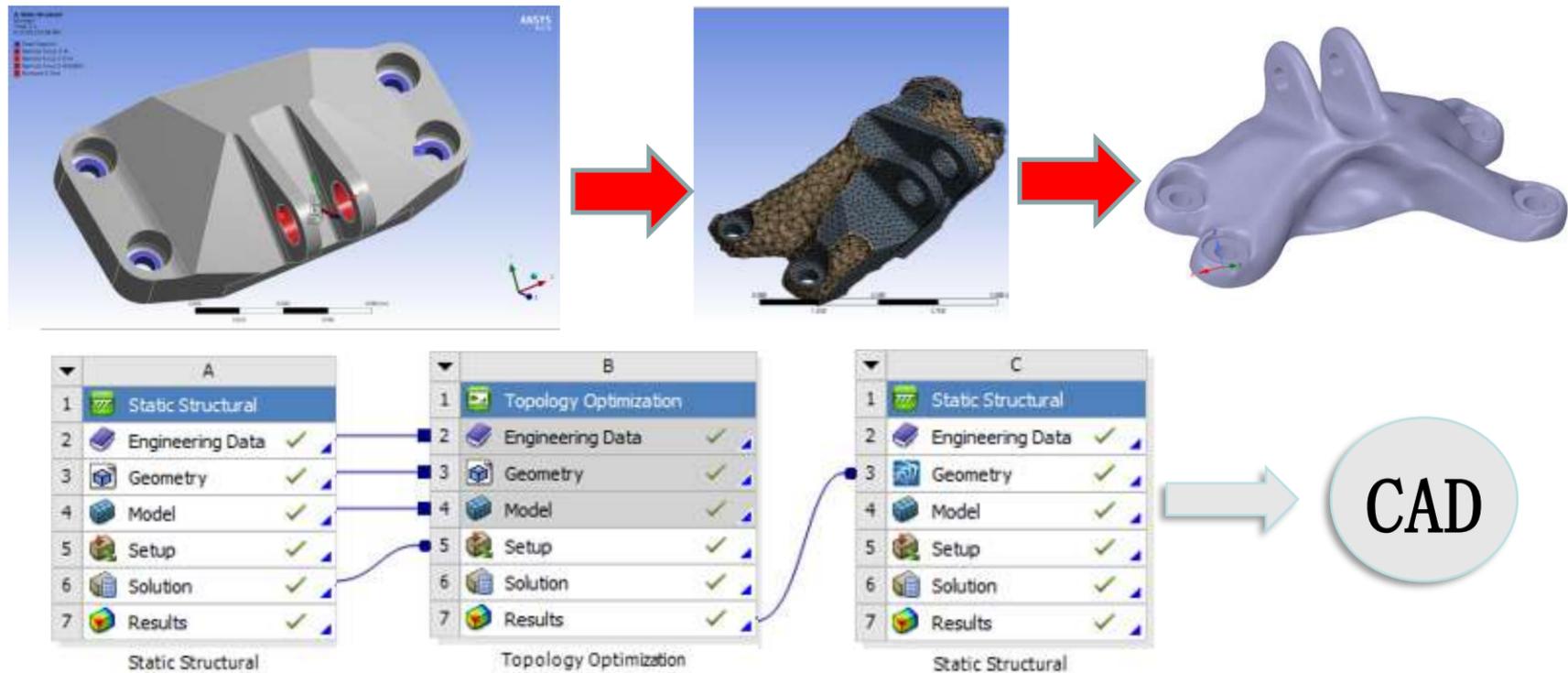


拓扑优化到CAD

• 后拓扑模型处理技术

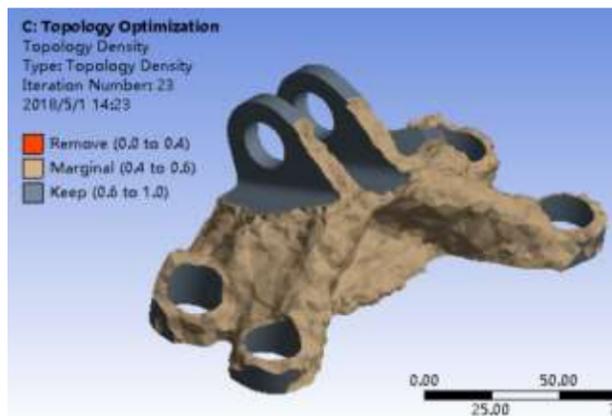
- 拓扑优化结果（保留材料区域）输出STL格式
- 片体模型处理(清理、修复、光顺、零件过渡、...)
- STL模型到CAD实体几何转换
- 实体模型直接建模操作
- 参数化（用于参数优化）

• ANSYS SpaceClaim

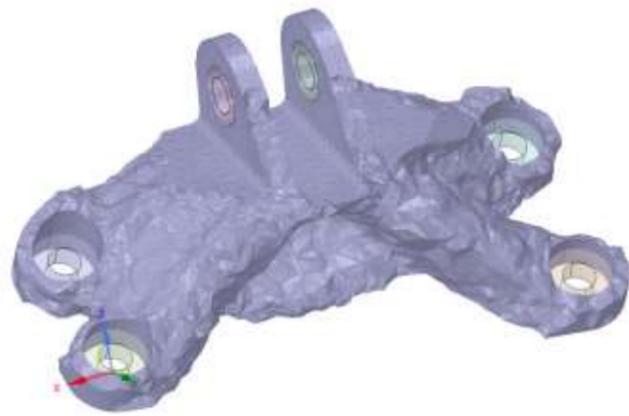


拓扑优化到CAD

• 后拓扑模型处理流程示例



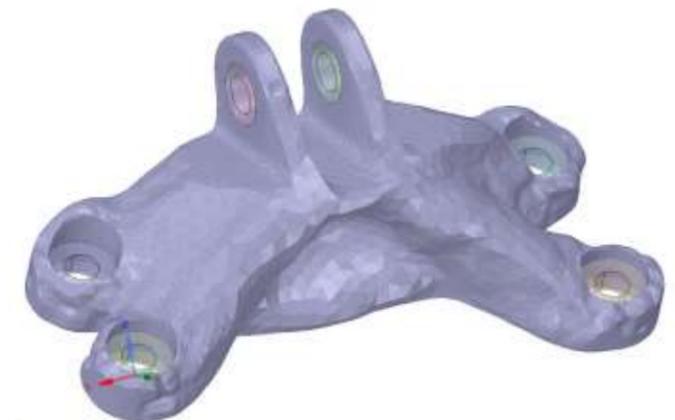
1. 拓扑优化结果



2. 进入模型处理环境



3. 表面蒙皮



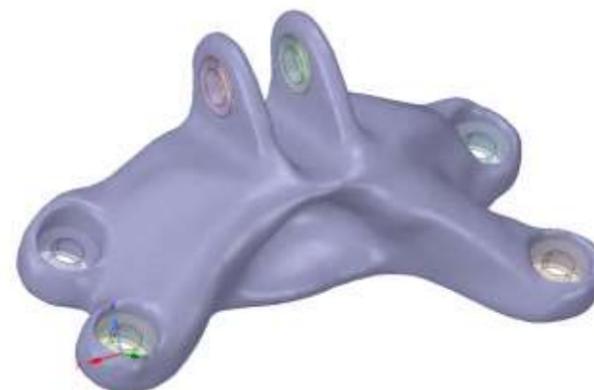
4. 尖锐角修复



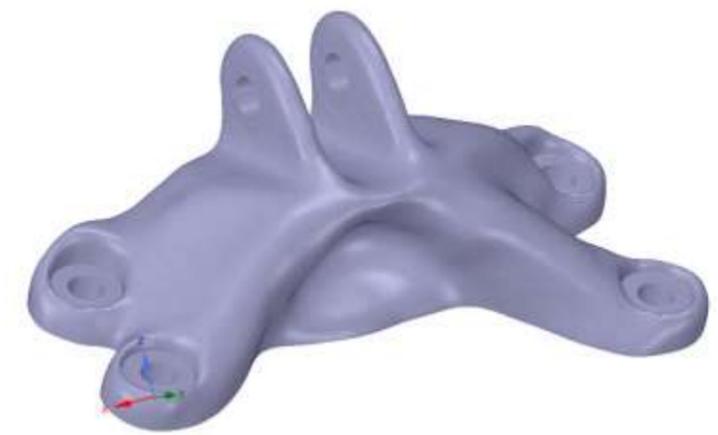
5. 规则化网格



6. 局部表面光顺



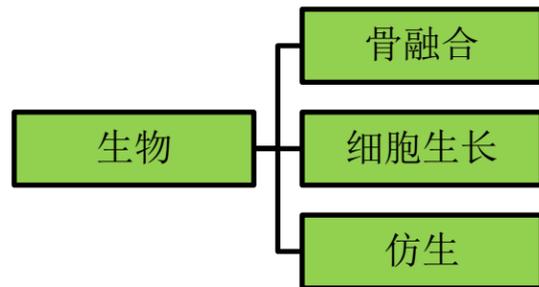
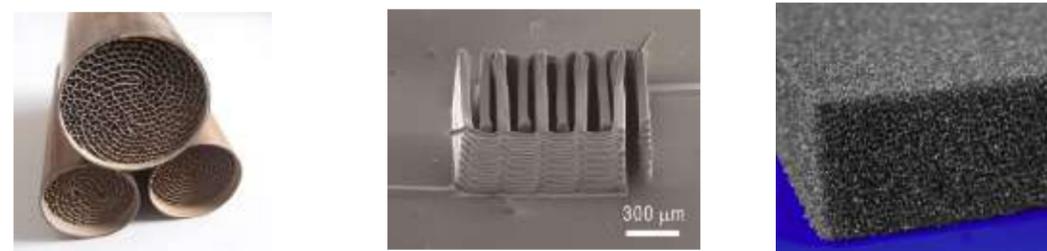
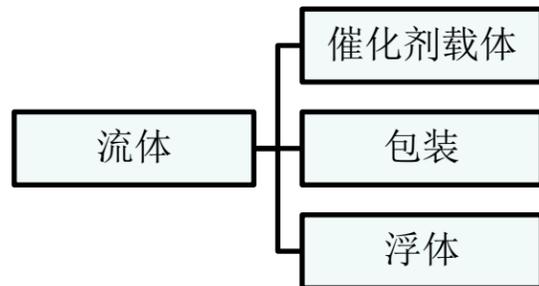
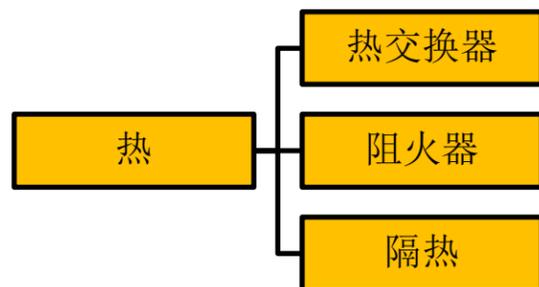
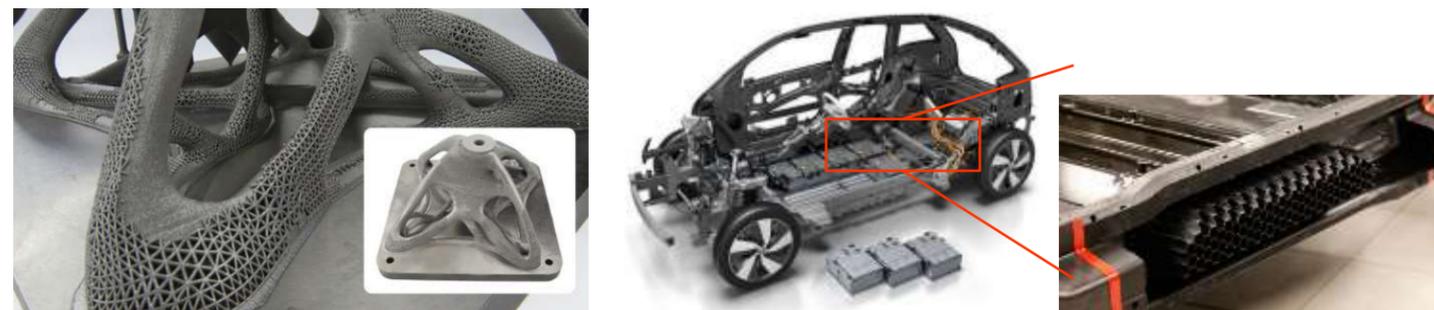
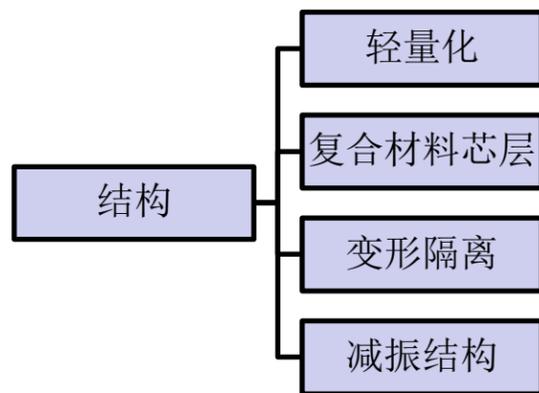
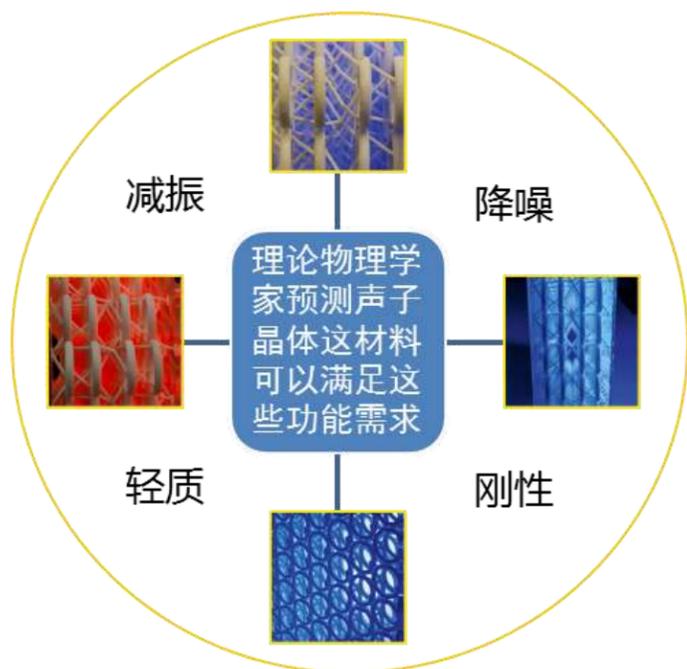
7. 表面细化光顺



8. 模型合并

拓扑优化与点阵结构设计

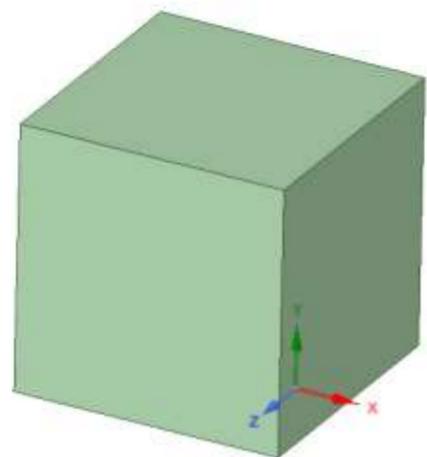
- 增材制造技术使得复杂点阵结构的大量应用成为可能。



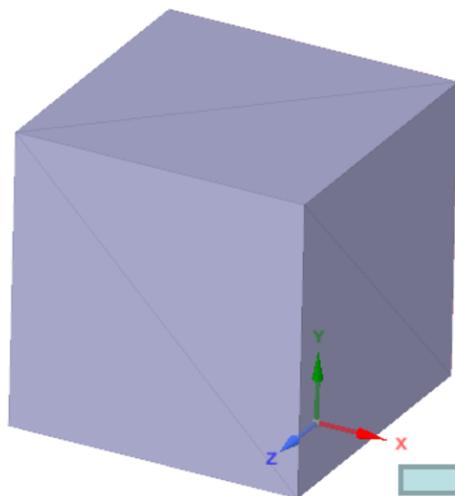
点阵结构建模-Spaceclaim

- SpaceClaim 内置多种点阵结构

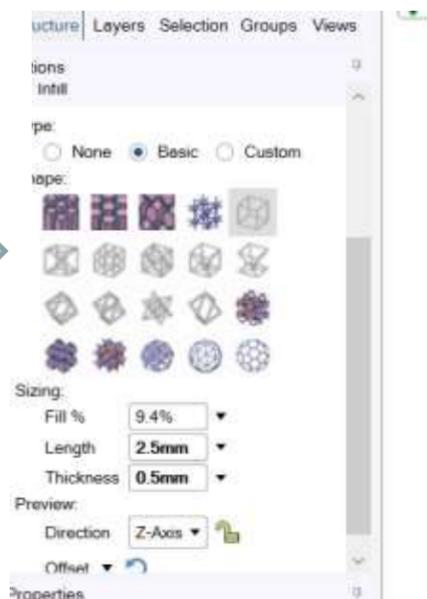
Select and drag a face to offset it. Select and drag an edge to round it.



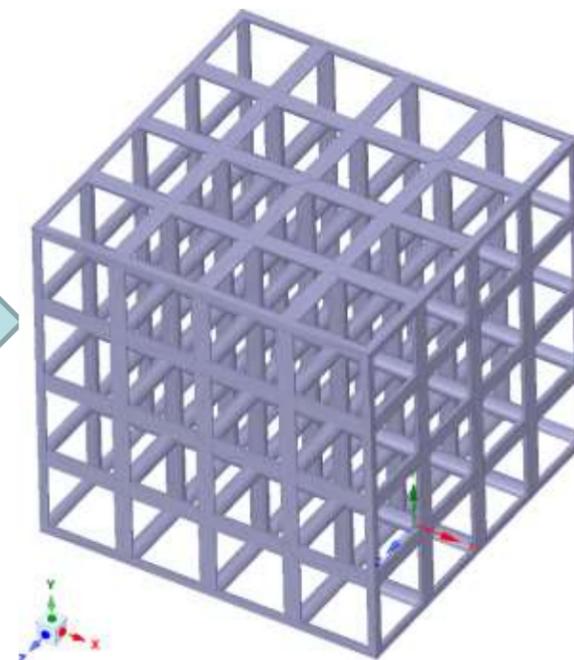
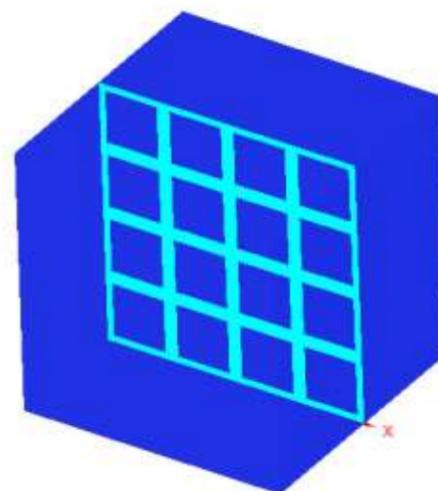
1. 点阵空间



2. 面片

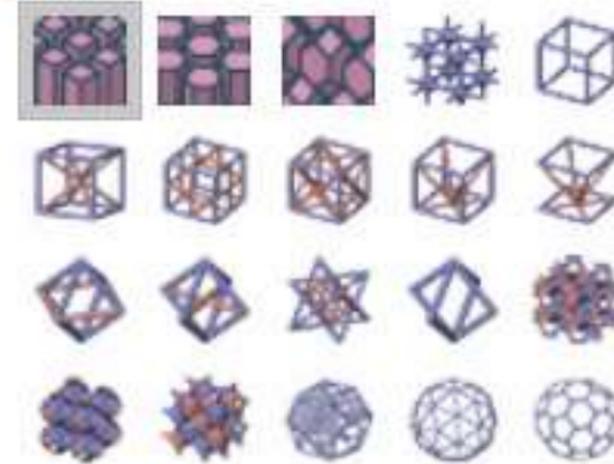


3. 点阵参数



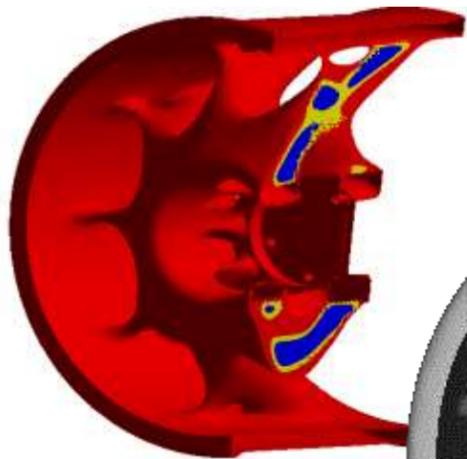
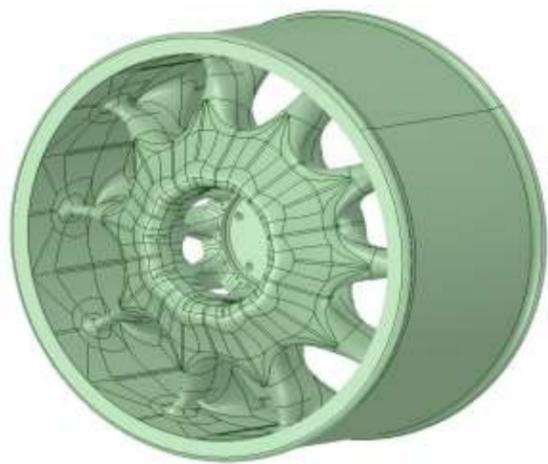
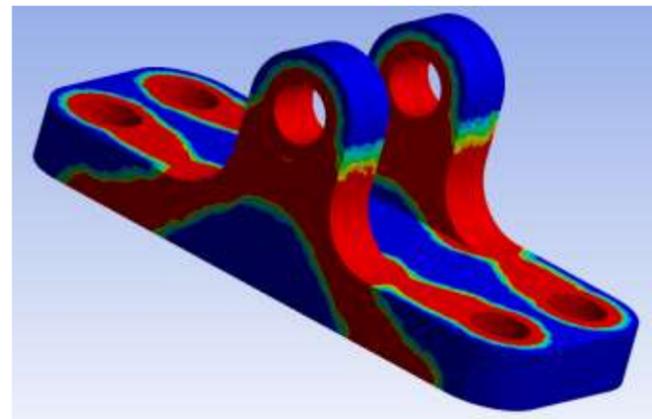
4. 点阵结构

Shape:



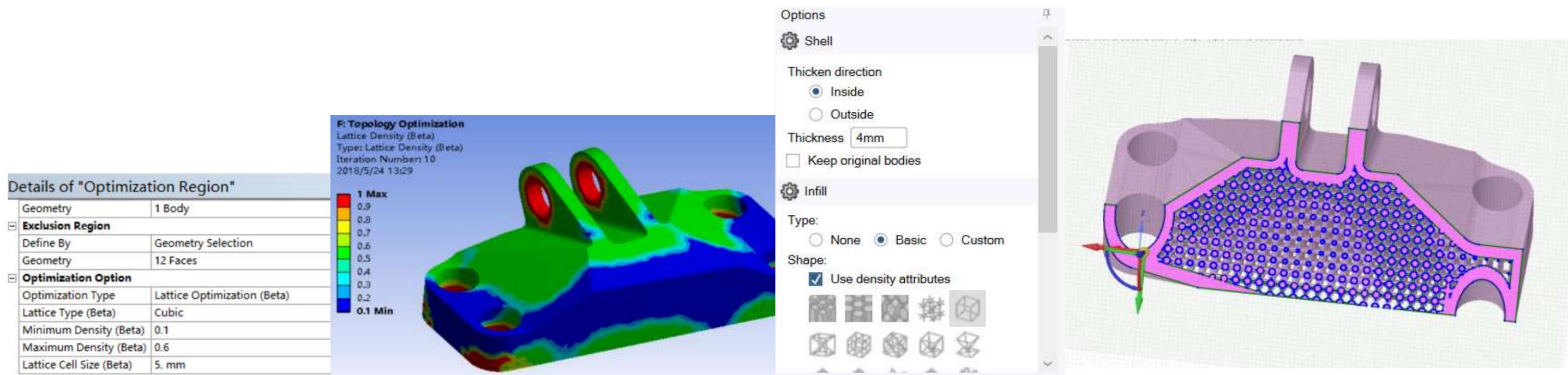
拓扑优化到点阵结构设计

- 轻量化设计-选取合适区域填充点阵结构
- 例如：质量密度0.4~0.6



拓扑优化到点阵结构设计

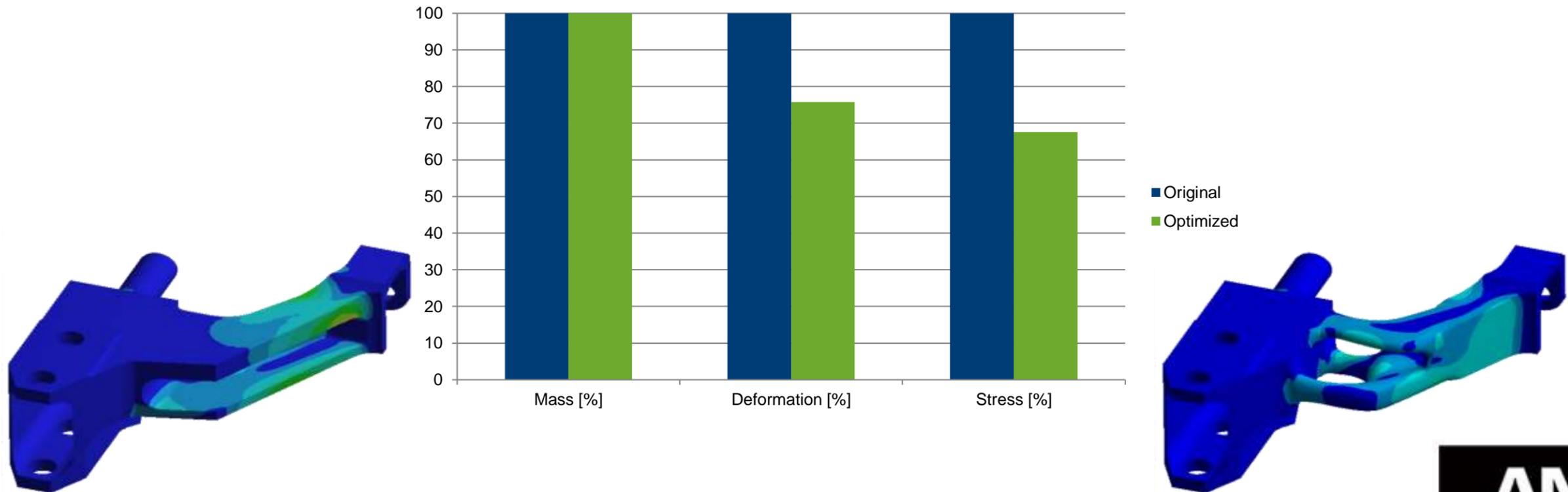
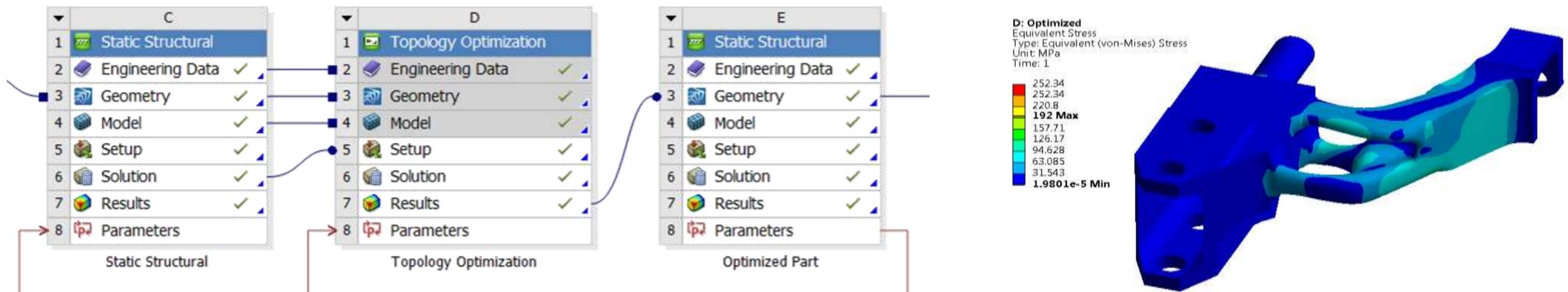
- ANSYS Topology 提供点阵结构优化



1. 点阵优化 → 2. 点阵密度（填充率） → 3. 基于点阵密度的 Spaceclaim 点阵生成 → 4. 变密度点阵

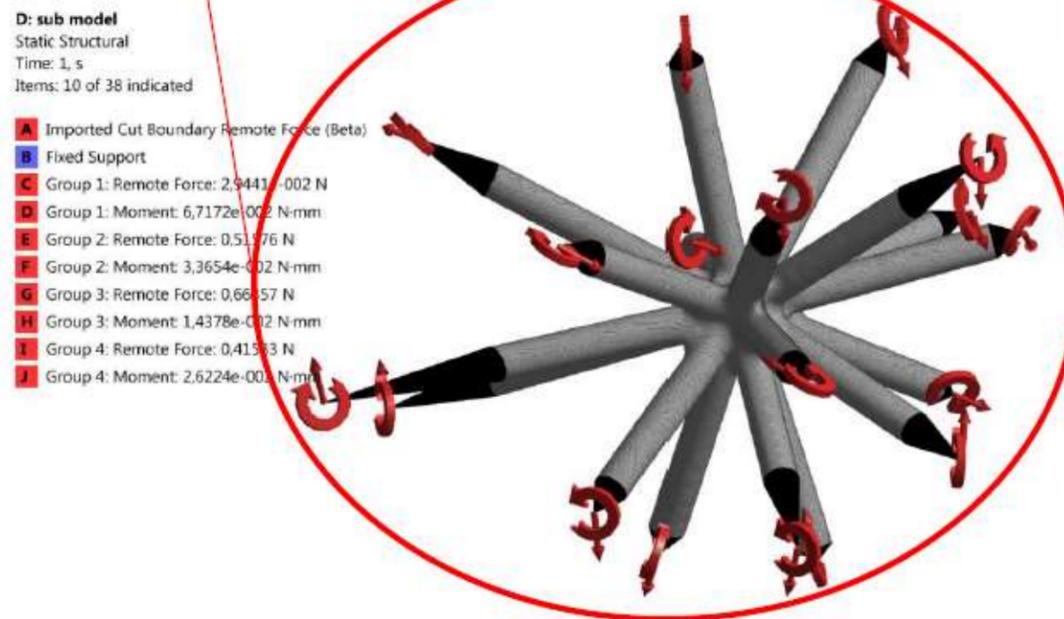
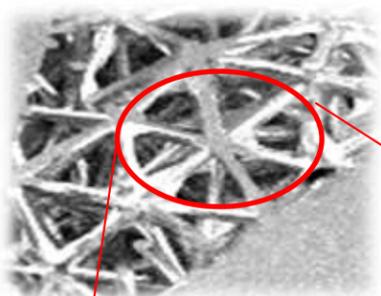
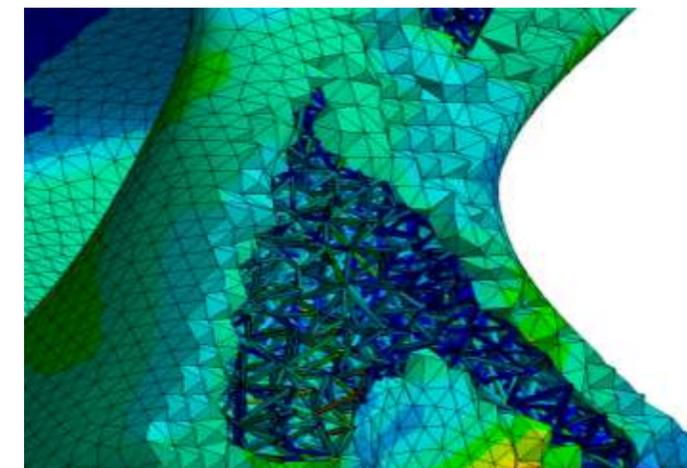
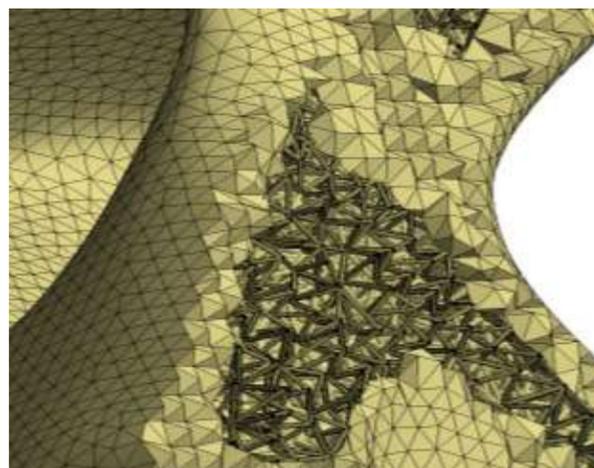
设计验证

• ANSYS Topology与仿真验证流程无缝集成



点阵结构分析

- 点阵结构仿真解决方案：
 - 宏细观结合多尺度算法



多尺度分析的用途

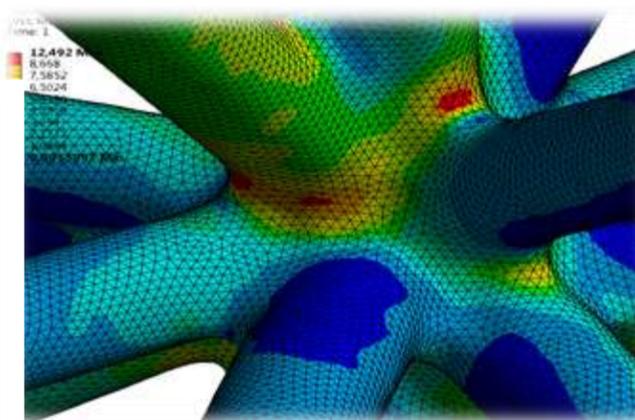


A	
1	Static Structural
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Solution ✓
7	Results ✓

wheel rim with lattice

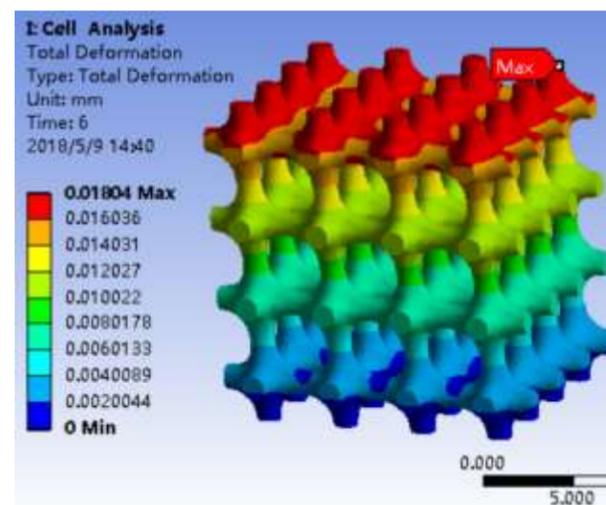
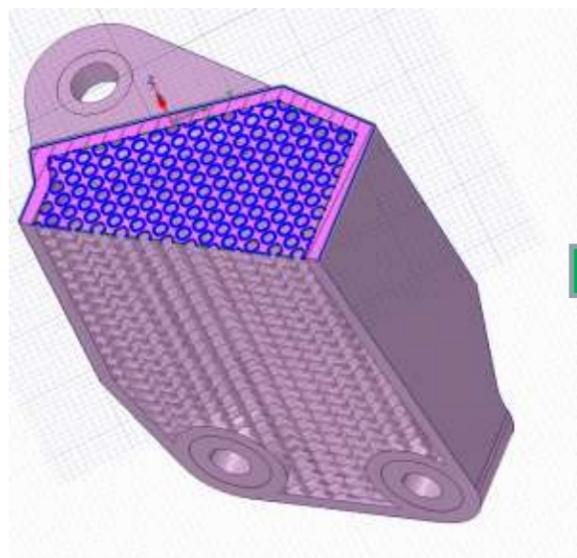
B	
1	Static Structural
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Solution ✓
7	Results ✓

submodel of lattice detail

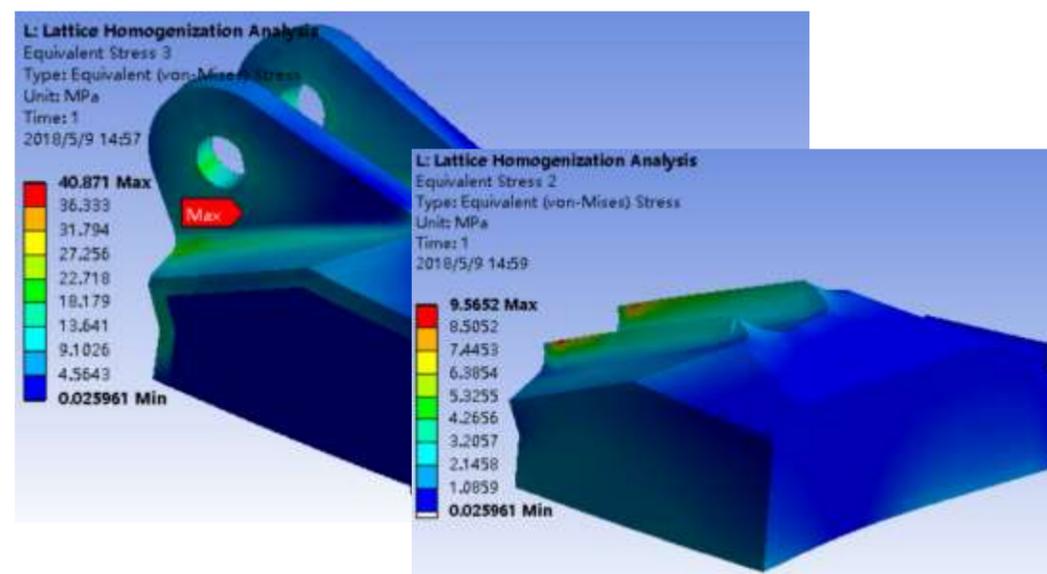


点阵结构多尺度分析

点阵结构设计

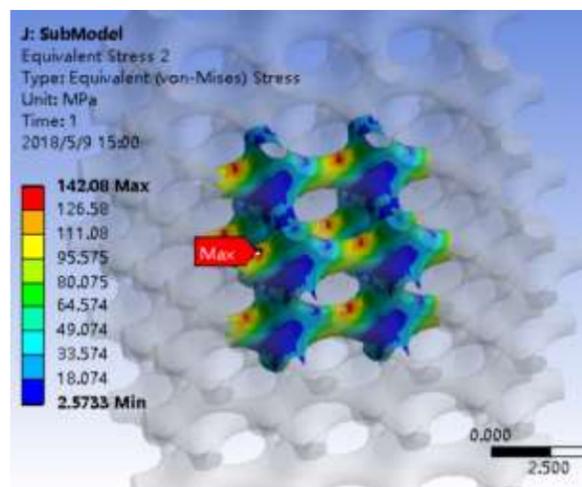


子胞数值试验

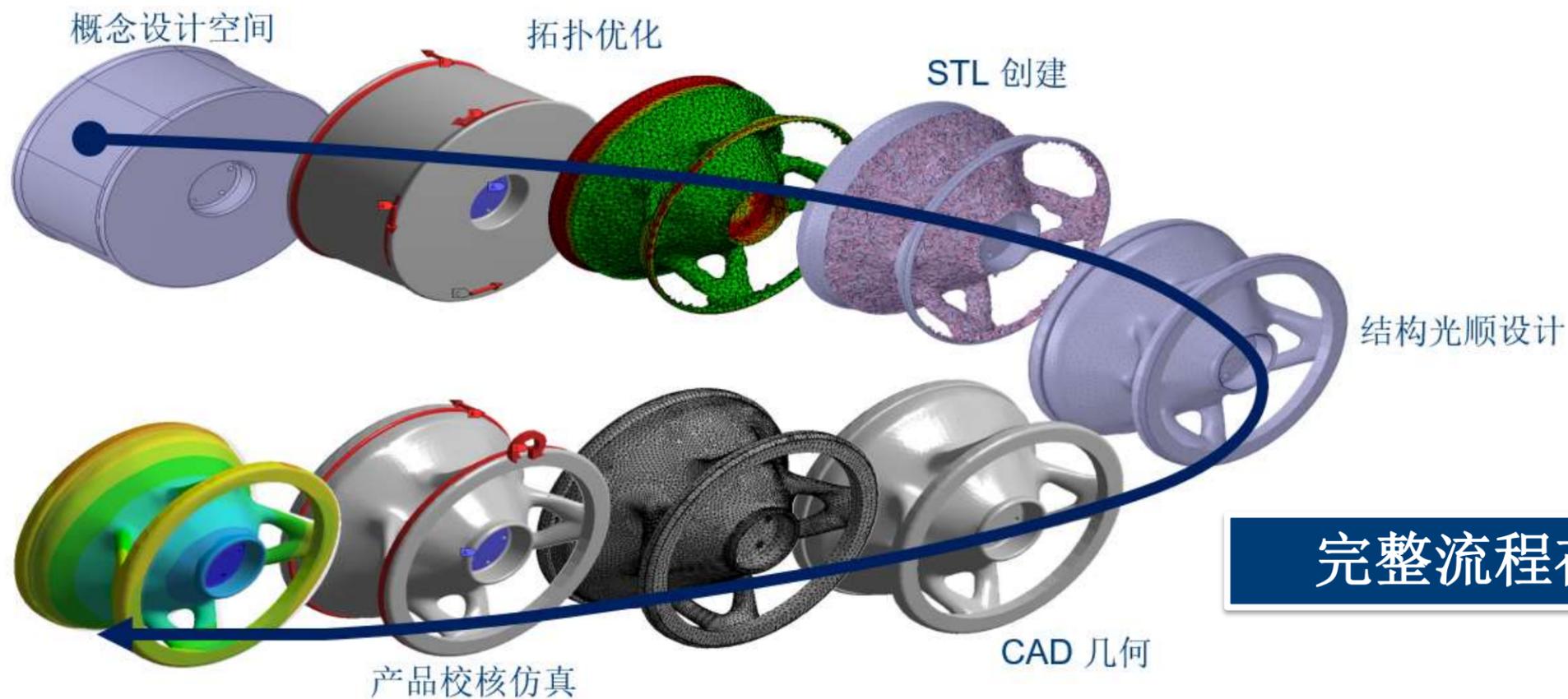


等效均质化分析

子胞局部分析



ANSYS 拓扑优化与设计 workflow

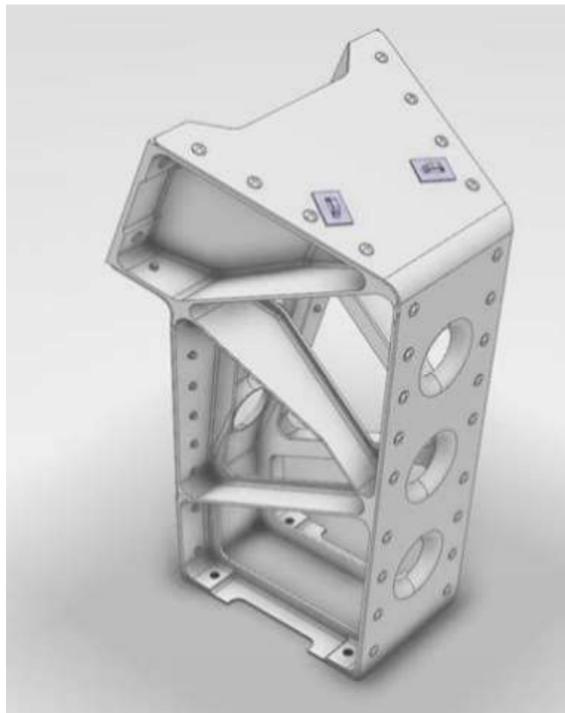


完整流程在 2 小时内完成

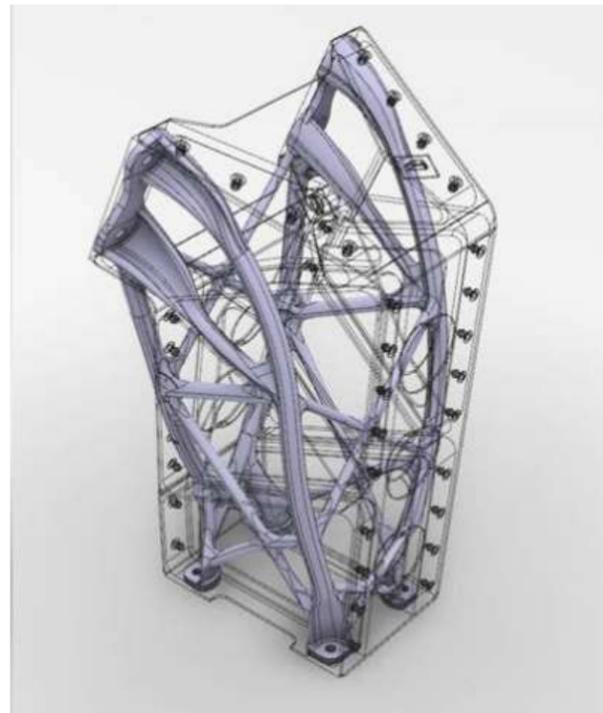
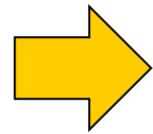


拓扑优化应用：卫星支架

- Eurostar E3000 通讯卫星上的支架结构经过拓扑优化的再设计，去掉了44个铆钉成为一体化结构，重量减轻了35%，而刚性却提高了40%



原支架结构



再设计的支架结构



这是用3D打印的铝合金支架，这种结构用传统工艺是无法制造的

增材先进设计理念-正向设计流程

- 仿真成为设计的前端技术
- 从设计的最早期发现并解决设计缺陷
- 增材制造为正向设计提供了工艺基础



增材工艺仿真解决方案

金属增材制造工艺参数

- 工艺参数控制

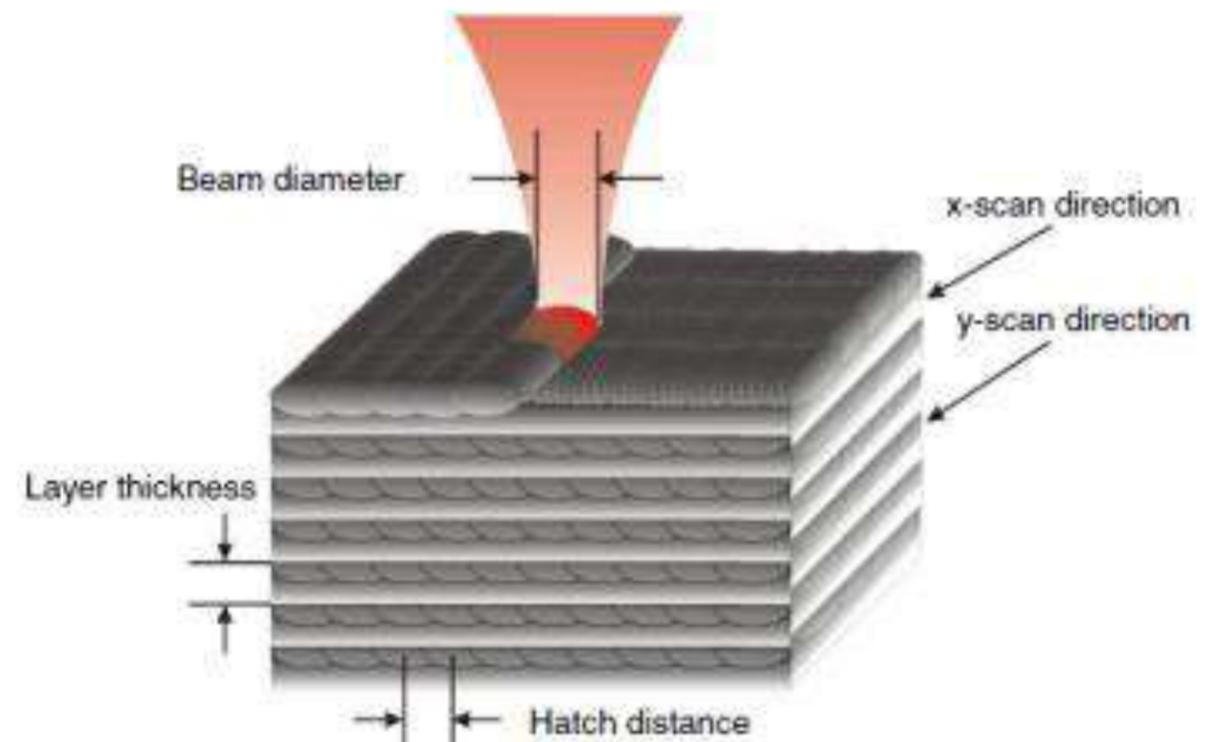
- 变形/应力
- 是否完全融化
- 孔隙率
- 微观结构

- 主要参数

- 激光功率
- 扫描速度

- 其它参数

- 激光光斑大小
- 扫描间距
- 层厚
- 扫描模式



Stripes		UpDown		Skip layer	
Distance:	0.10	mm	Stripe width:	10.00	mm
Speed:	950.0	mm/s	Stripes overlap:	0.05	mm
Power:	280.0	W	<input checked="" type="checkbox"/> Skywriting		
Beam offset:	-0.055	mm	<input checked="" type="checkbox"/> Offset		
Hatching:	<input checked="" type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> Y	<input checked="" type="checkbox"/> Alternating		
			<input checked="" type="checkbox"/> Rotated		

金属增材制造需要解决的问题



过度变形



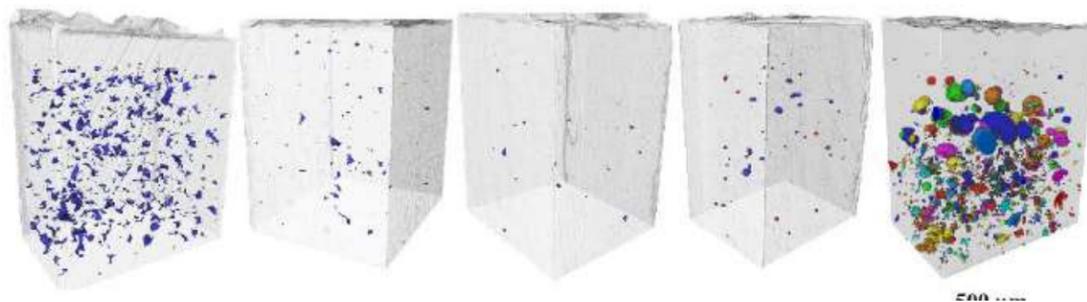
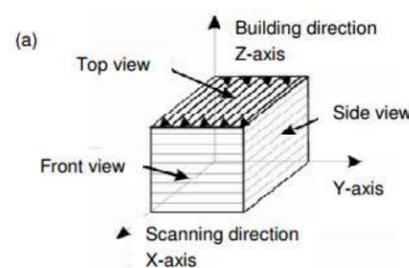
刮板碰撞



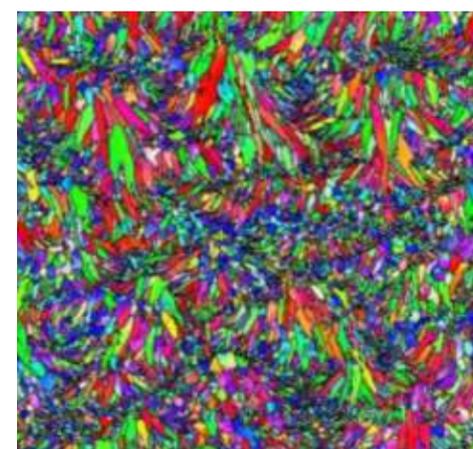
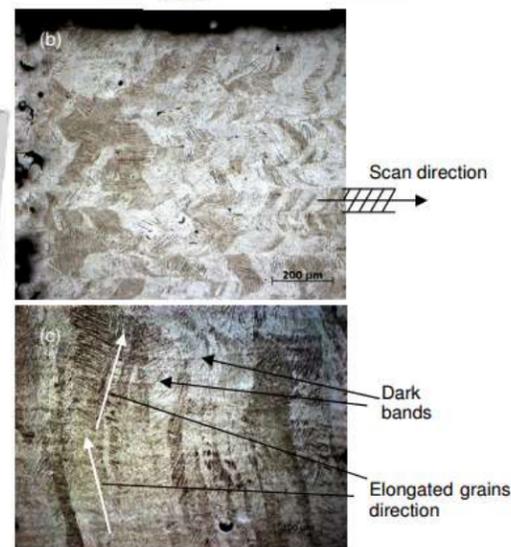
支撑断裂



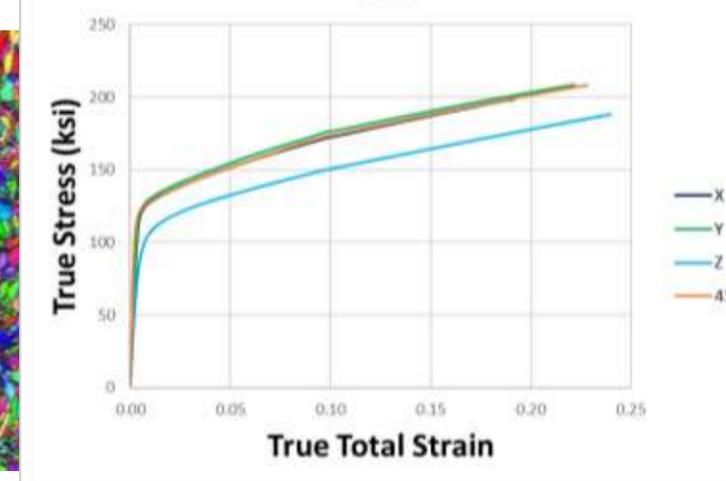
部件开裂



孔隙率: 图示显示了孔隙率形成机理, 从不完全融化, 到气孔, 到随着熔池尺寸和重叠深度增加而出现的匙孔。



微观组织结构



如何解决问题

传统增材制造流程

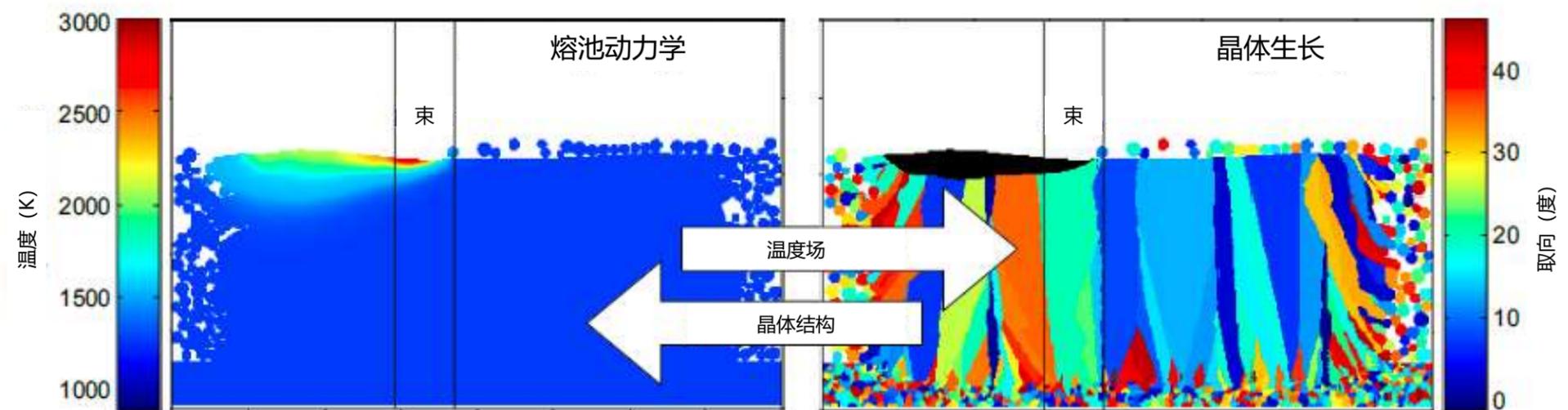


仿真优化增材制造流程

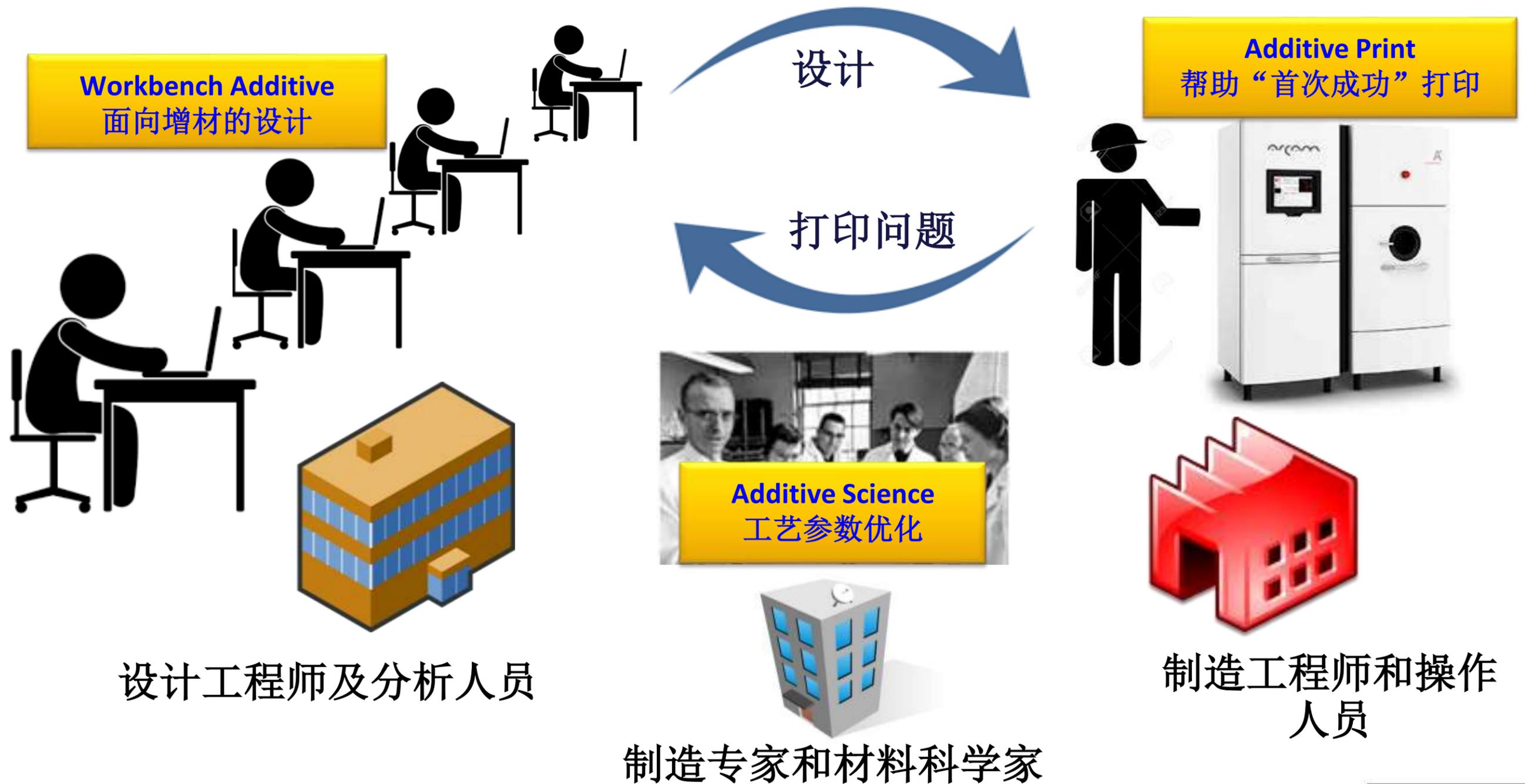


增材工艺仿真的困难

- 空间离散规模庞大、时间离散步数庞大，计算时间如何去满足工程需求。
- 宏观与微观，多尺度问题
- 物理过程机理复杂
- 涉及环节较多
- 不确定性和误差来源较多



工艺仿真解决方案-ANSYS Additive Suite



Workbench Additive 工艺仿真

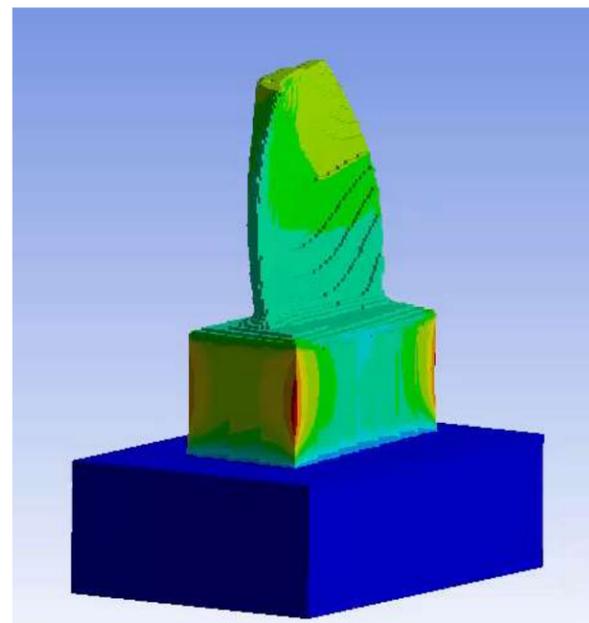
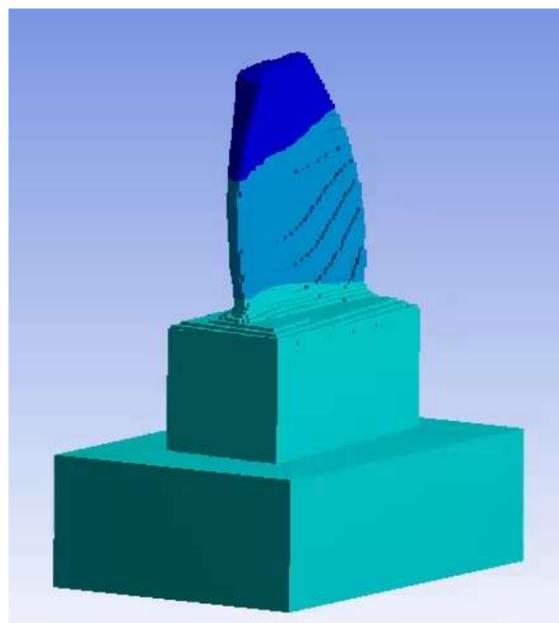
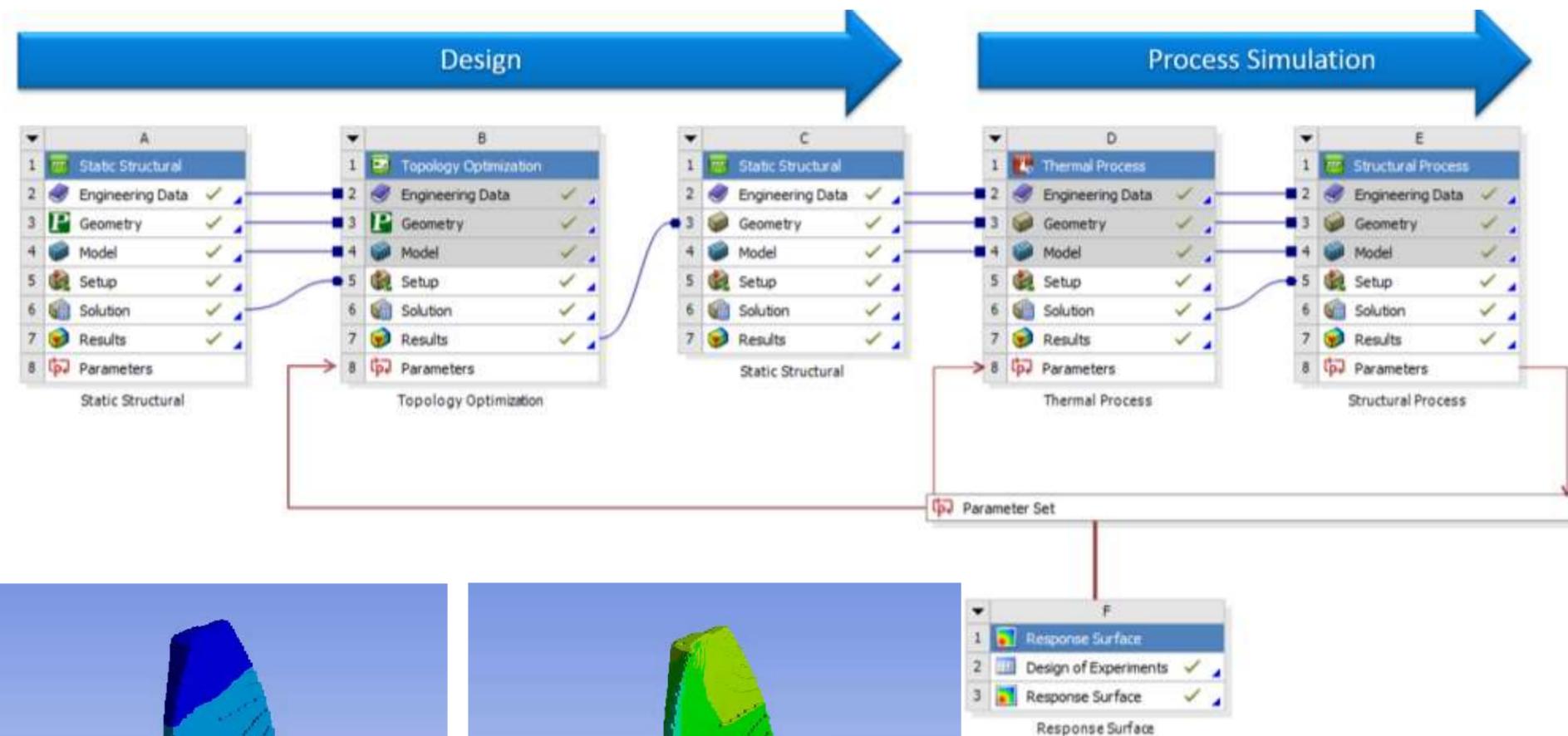
• 面向设计工程师和分析人员

- 尽量少的要求工艺参数
- 设计是否可打印
- 温度场如何
- 热变形、热应力如何
- 最佳打印方向是什么
- 支撑如何设计

• 工艺仿真

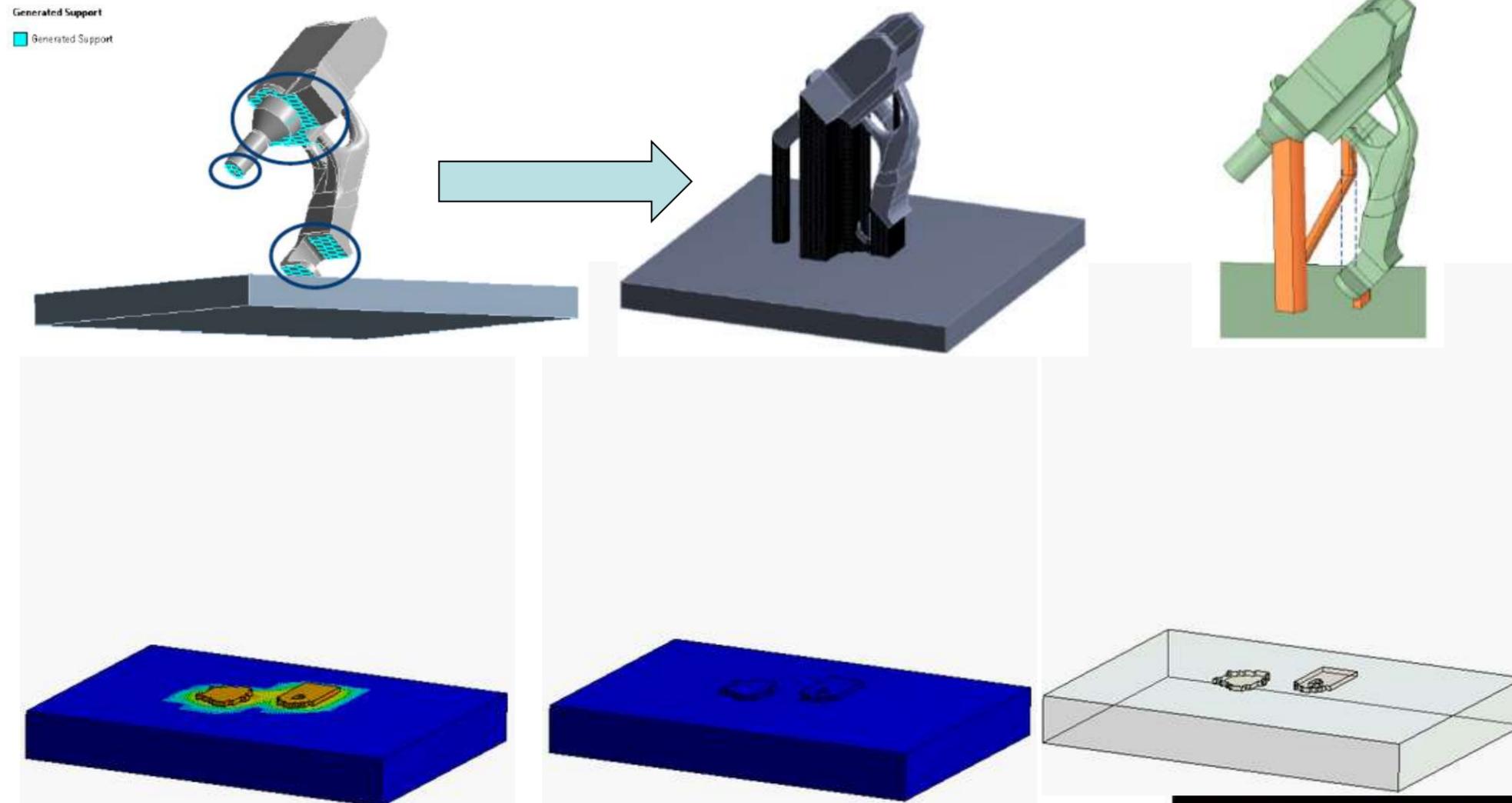
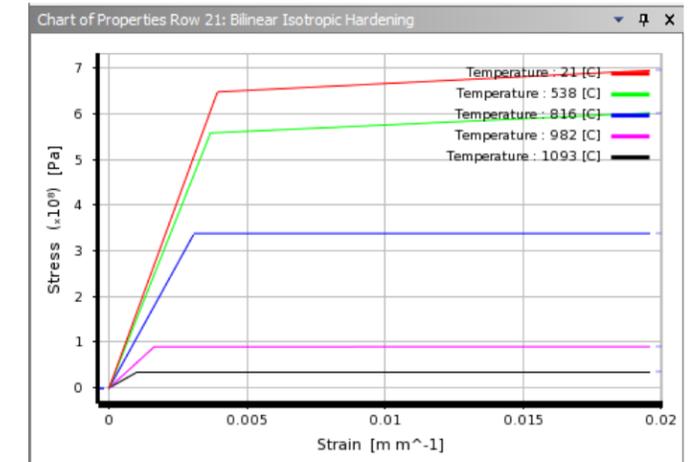
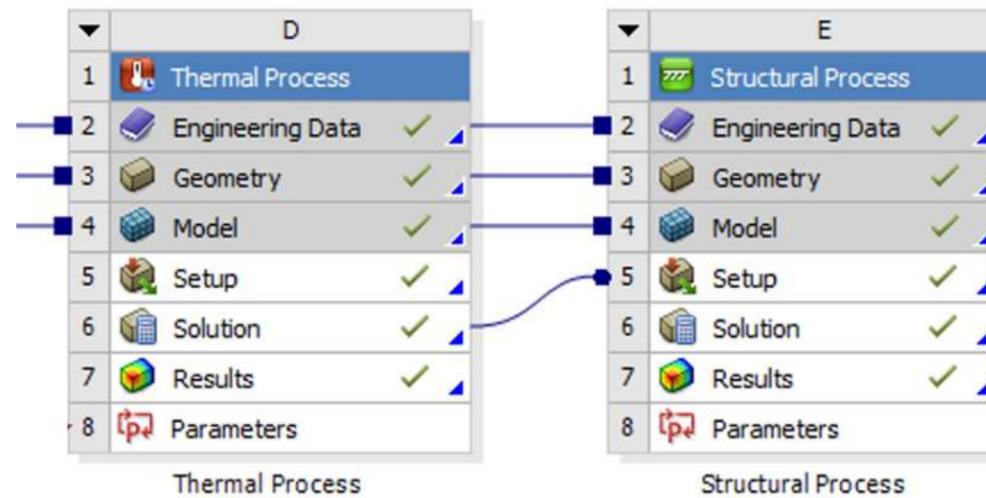
- 预热
- 制造
- 冷却
- 去除基板与支撑

• 与拓扑优化与后拓扑设计形成无缝流程

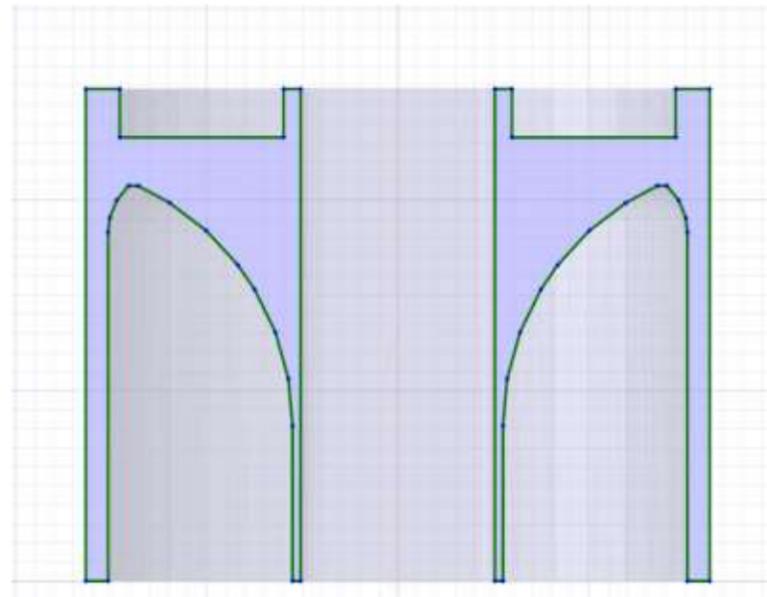
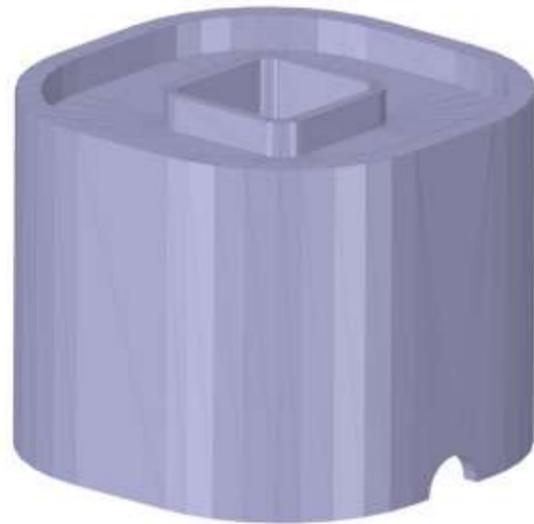


Workbench Additive 工艺仿真特点

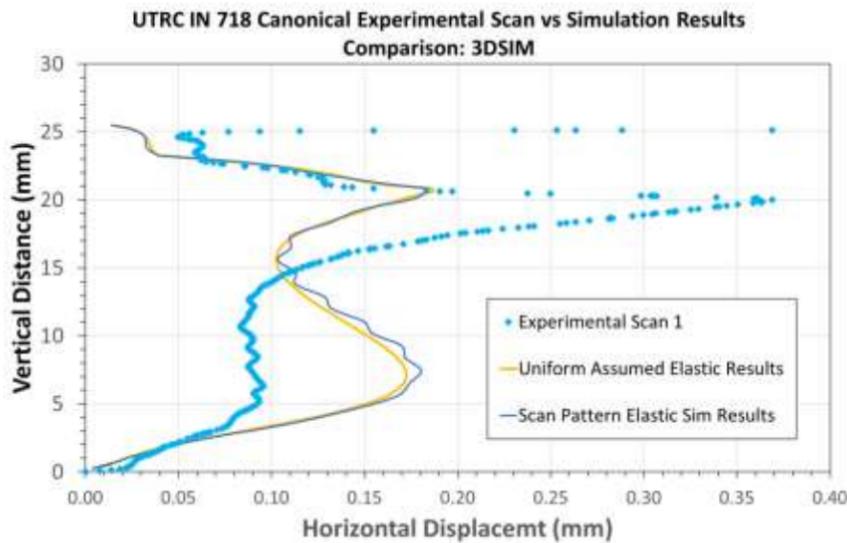
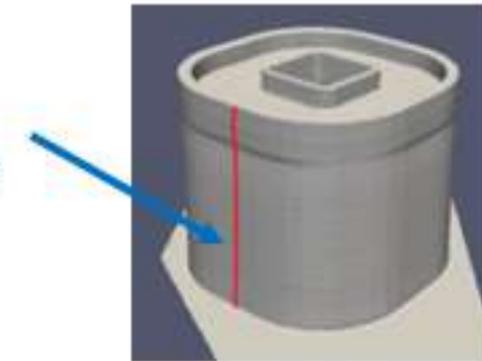
- ANSYS Mechanical 环境内置
- 温度相关非线性材料库
- 热应力耦合计算
- 逐层材料堆积
- 超层模拟：一个计算层厚包含多个打印层
- 热源作为熔点温度施加
- 合理时间步长
- 支撑与粉末材料性能等效模拟
- 自动支撑与预定义支撑
- 变形/应力，逐层查看



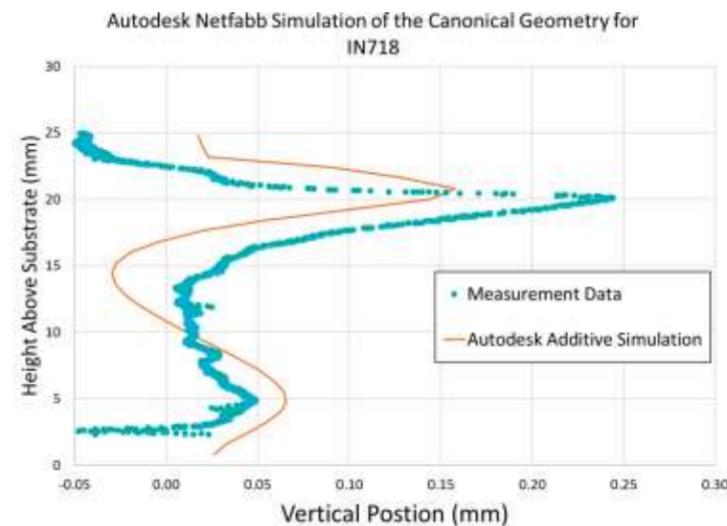
Workbench Additive 验证案例



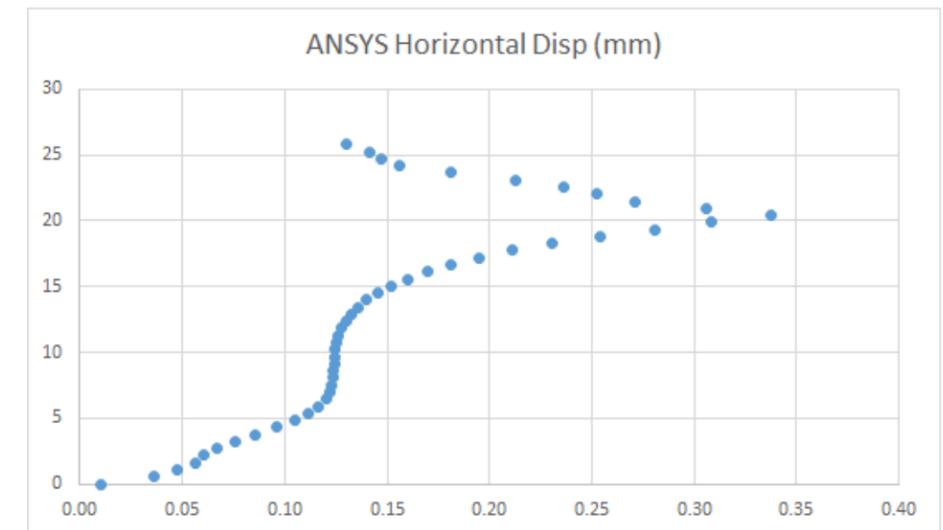
Evaluation Slice Location



Code 1



Code 2



ANSYS

ANSYS Additive Print

- 面向设备操作者和制造工程师

- 目的

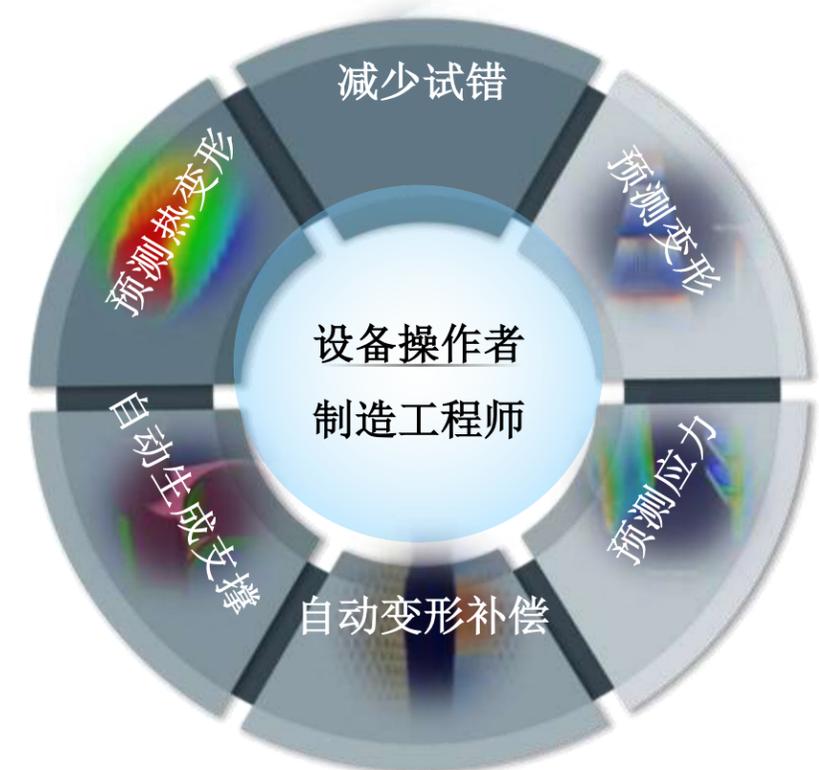
- 打印设计者和操作者的实用工具
- 给定机器、材料和几何，如何选择方向、设计支撑以及打印参数以保证打印精度，避免打印失败。

- 输入

- 材料
- 部件几何 (STL)
- 体素尺寸
- 粉末层厚
- 扫描模式/ 打印文件
- 扫描速度
- 扫描间距
- 基板温度
- 支撑悬置角度
- 输出请求
- 预测变形

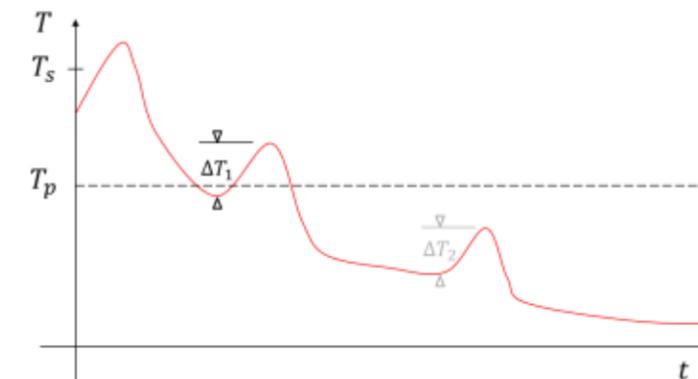
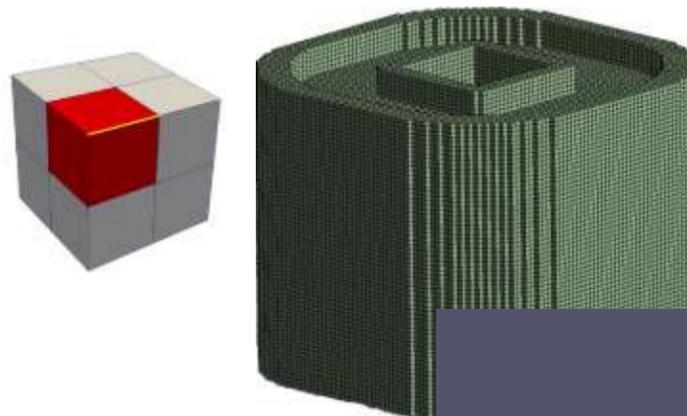
- 输出

- 部件和支撑变形和残余应力（去除支撑前/去除支撑后）
- 逐层应力和变形
- 刮板碰撞检测
- 高应变区域
- 变形补偿STL文件
- 基于应力优化支撑的STL文件

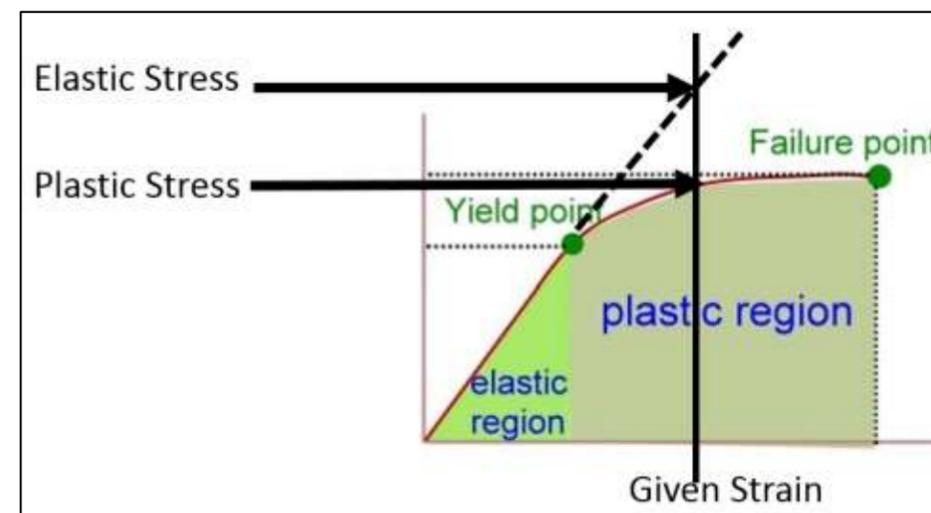


ANSYS Additive Print算法

- 计算域分割为均匀分布的立方体体素，以体素代表粉末、固体或支撑
 - 支撑位置基于几何和悬置角
- 固有应变算法：逐层施加应变到层内每个固体体素
- 四种应变算法，试验参数标定
 - 假定均匀应变：各向同性内应变， $\text{Strain} = \text{SSF} * \text{YS} / \text{E}$ ，SSF为应变比例因子。
 - 扫描模式应变：基于扫描方向施加各向异性应变， $\epsilon_i = \alpha_i * \text{SSF} * \text{YS} / \text{E}$ ， α_i 为扫描方向、垂直扫描方向以及打印方向各向异性应变系数。
 - 热应变：基于扫描矢量，考虑材料热棘轮效应，根据打印过程体素循环温度变化计算应变
 - 非线性应变：J2塑性模型



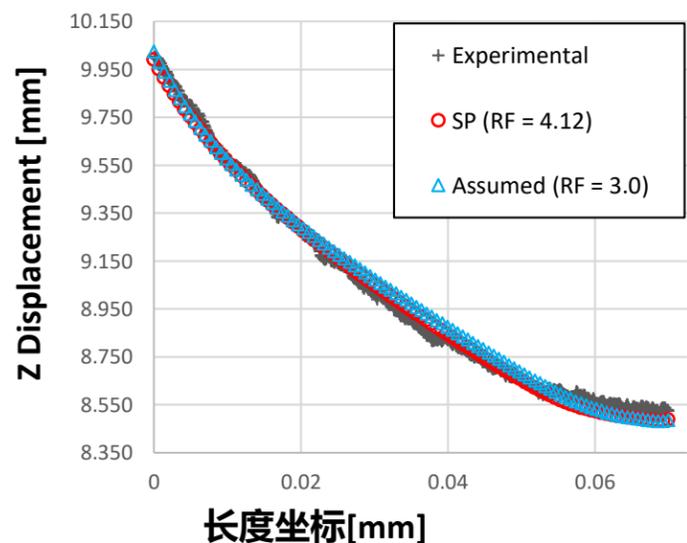
热棘轮效应



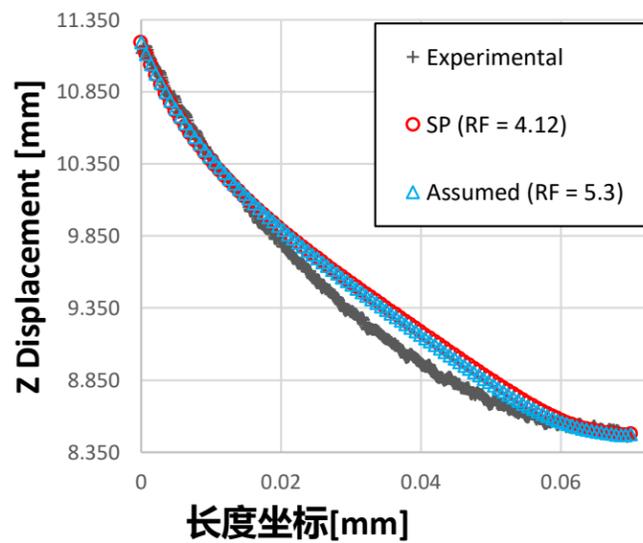
J2塑性模型

精度验证：悬臂结构

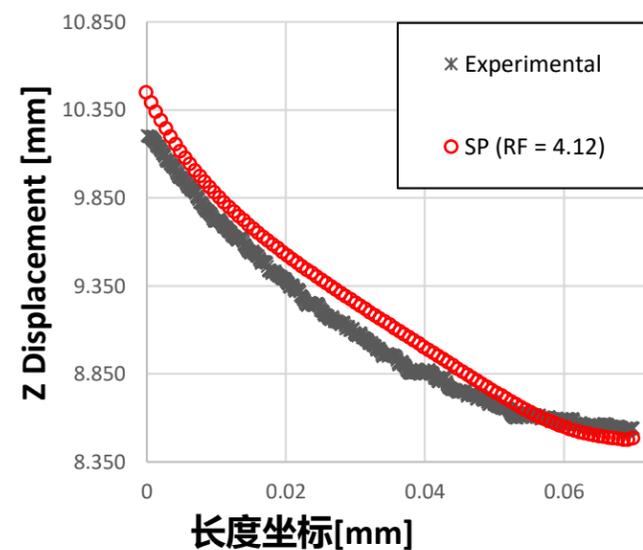
横向扫描



纵向扫描



67度旋转扫描
(Rotating)



ANSYS Additive Print 价值

- 预测部件和支撑变形
- 变形补偿 (**STL**输出)
- 预测残余应力, 开裂危险区域
- 基于应力优化支撑 (**STL**输出)
- 摆放方案优化
- 逐层应力和变形
- 刮板碰撞检测

ANSYS Additive Science

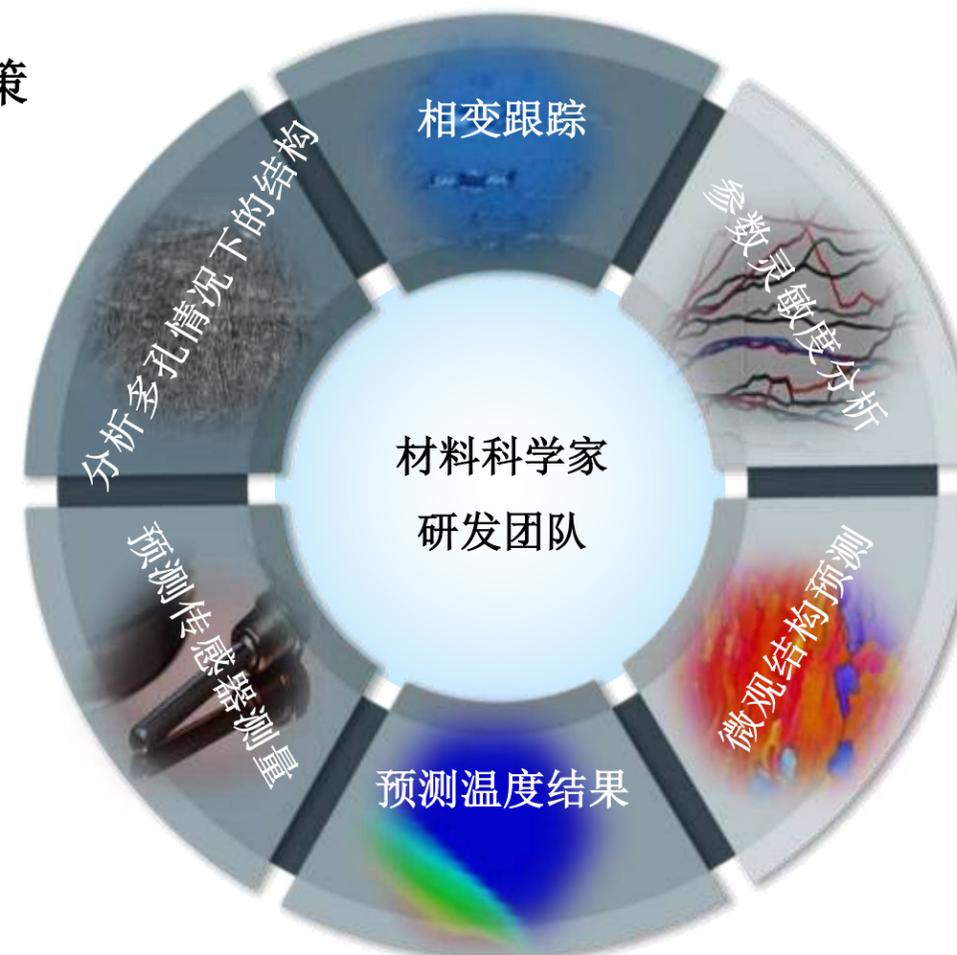
- 面向材料科学家和研发团队

- 目的

- 深入研究增材制造过程微观机理。
- 探索机器、材料、几何和工艺参数如何影响温度历史、残余应力应变、内部缺陷、熔池特性、金相结构等。
- 帮助设计更好的设备，研究新材料，开发优化的扫描策略。

- 功能

- 熔池尺度现象的模拟
- 温度历史
- 材料相态输出
- 微观结构预测
- 熔池尺寸
- 孔隙预测
- 不完全融化
- 球化预测
- 工艺参数开发

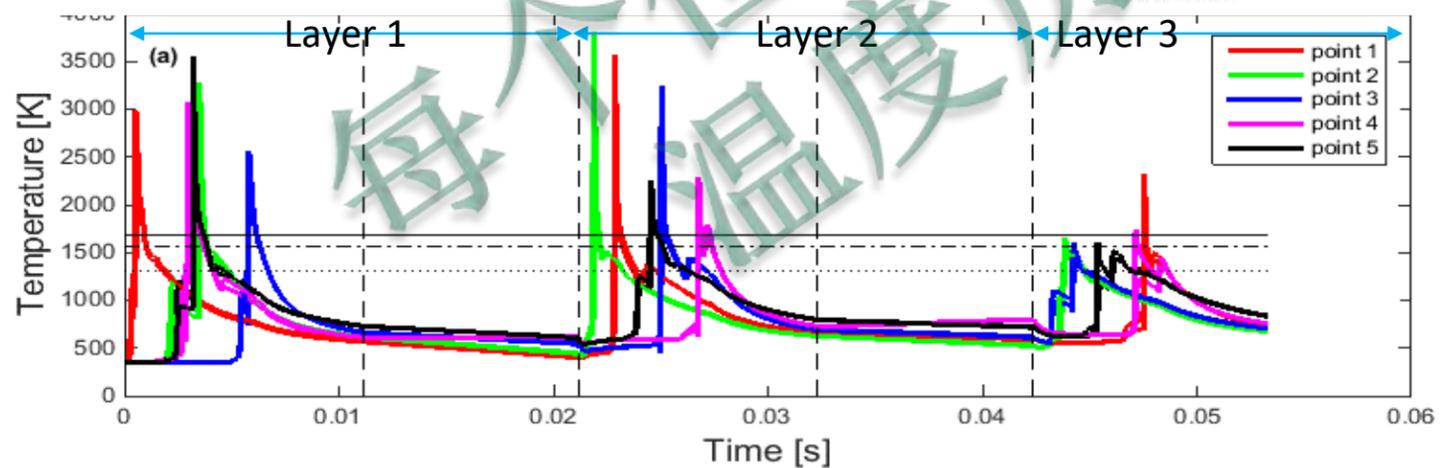
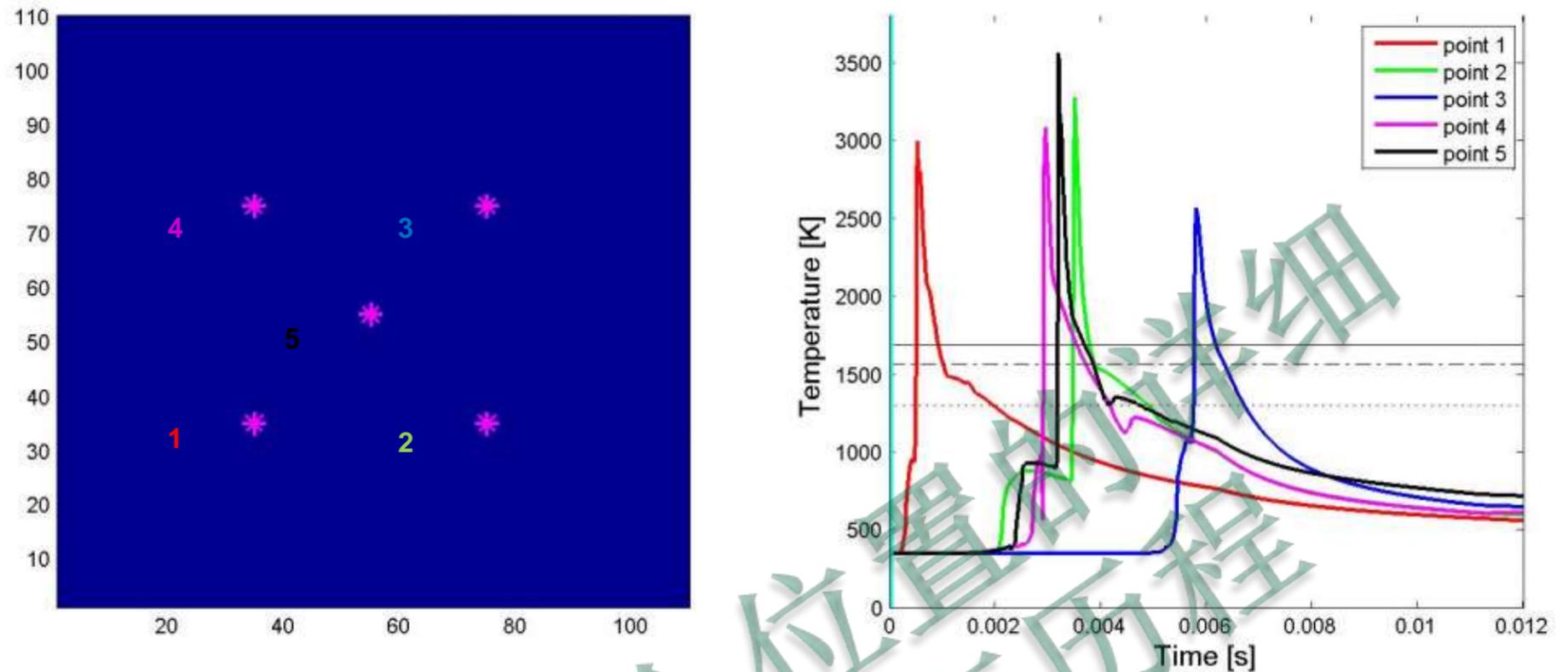


ANSYS Additive Science 温度场求解

• 温度场状态 动态图

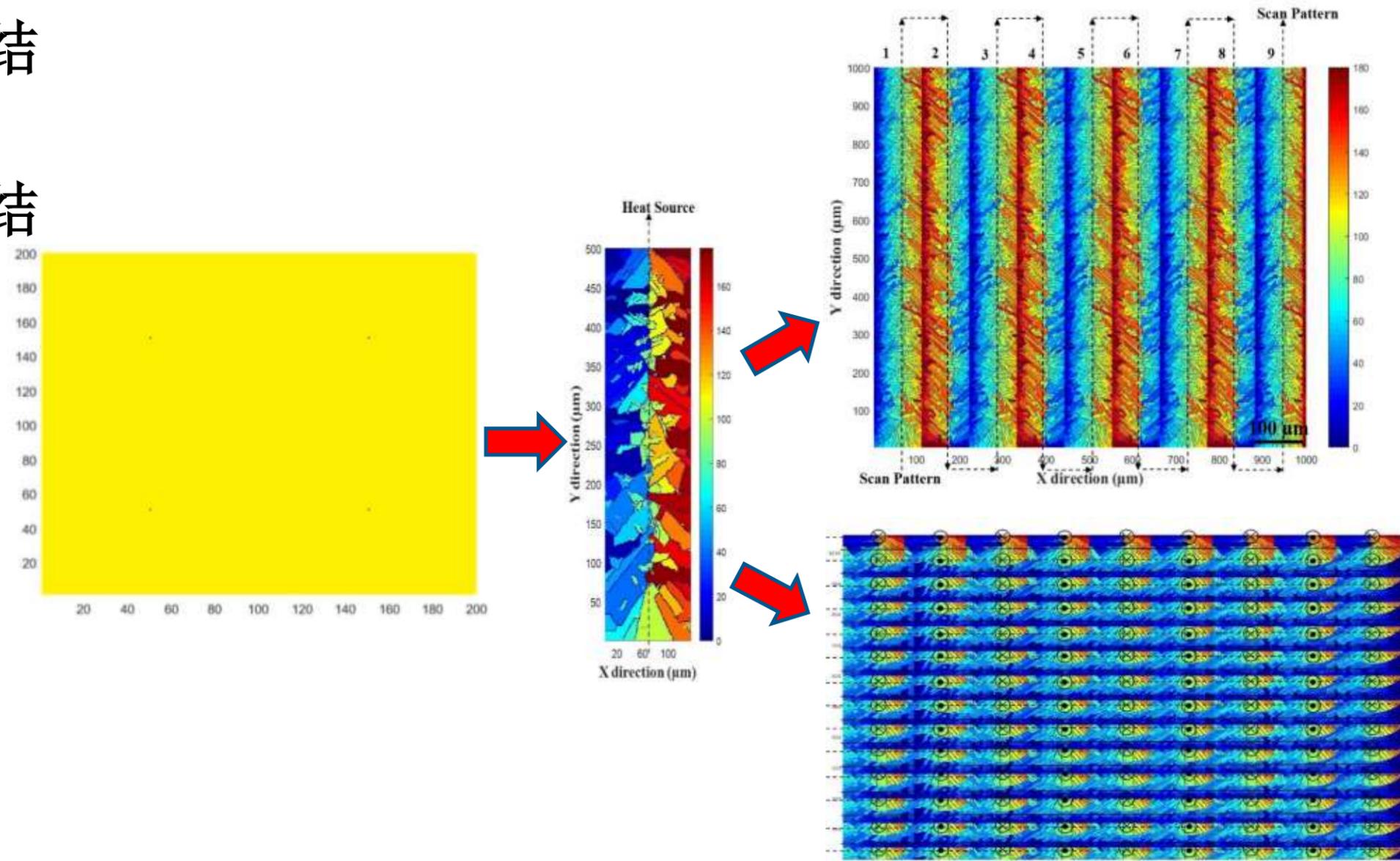
- 蓝色 = 粉末态
- 绿色 = 固态
- 红色 = 液态

* 点表示温度历史监测点



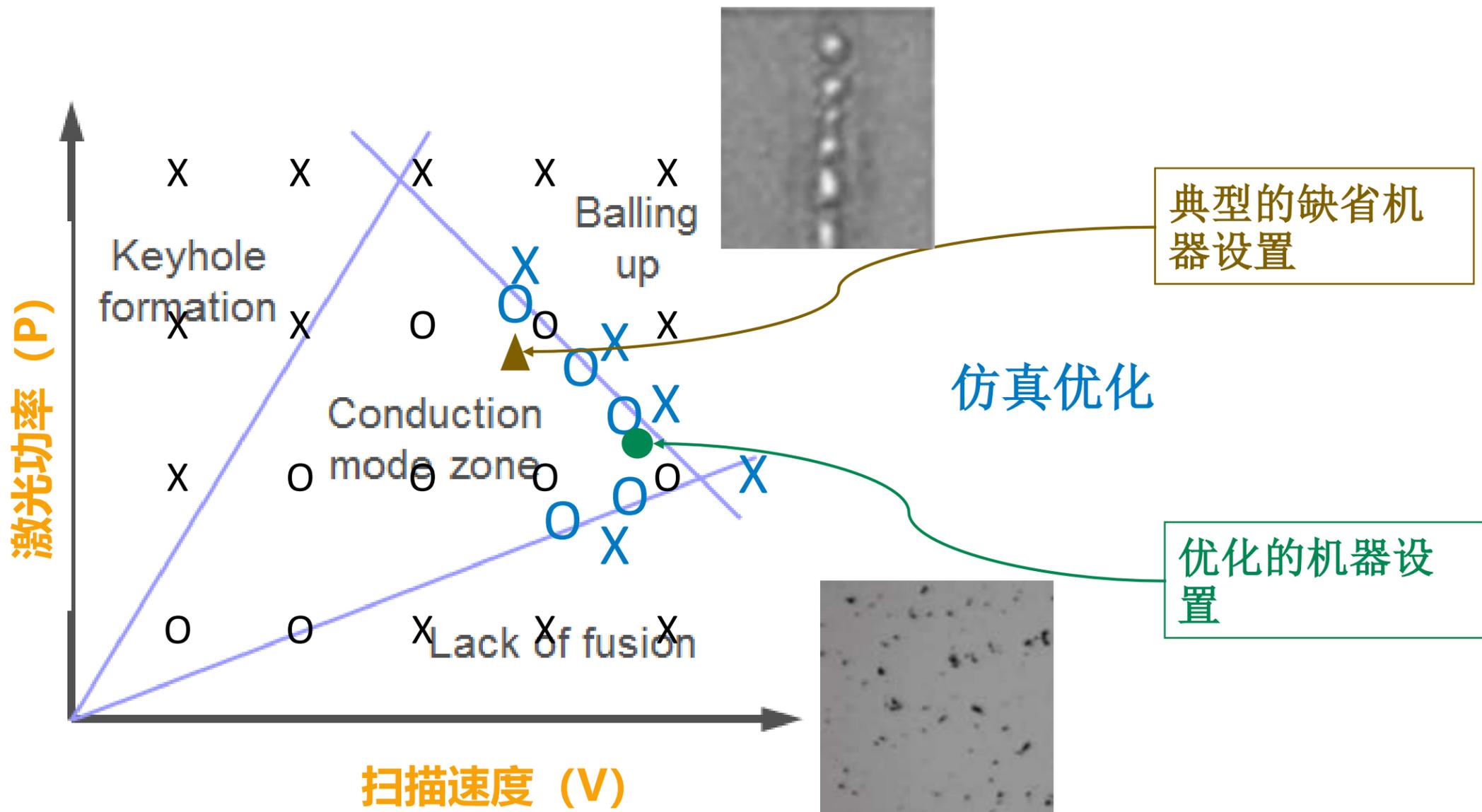
ANSYS Additive Science 微观结构求解

- 预测具体位置的微观结构细节
- 基于如下参数的微观结构数据库:
 - 温度梯度
 - 凝固速率
 - 熔池尺寸和形状
 - 熔池速度
- 包括:
 - 颗粒尺寸
 - 方向
 - 一次和二次枝晶结构
 - 初始位错密度



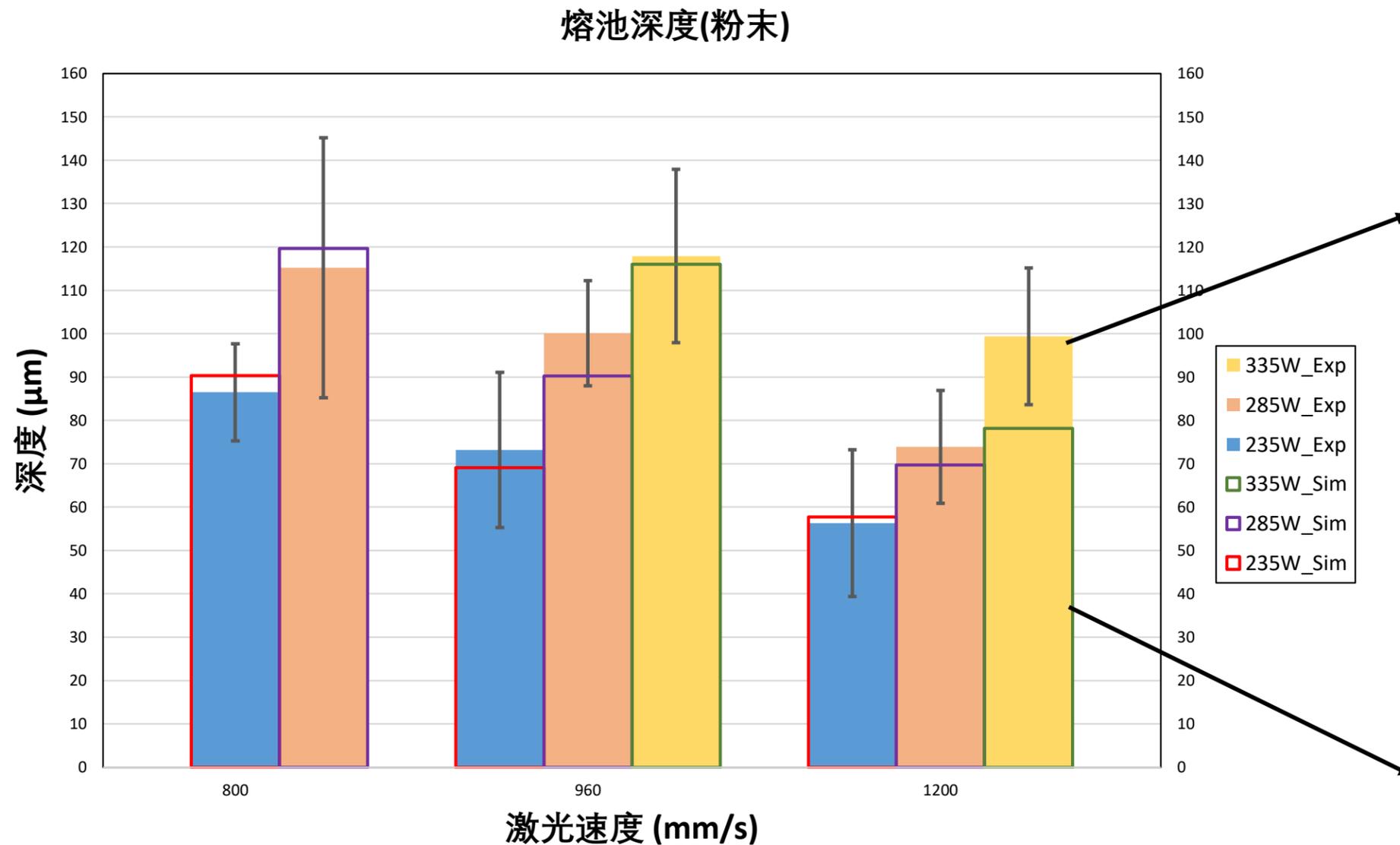
ANSYS Additive Science 工艺参数优化

- 影响打印质量的参数很多，最主要的两个参数：激光功率、扫描速度



ANSYS Additive Science 验证

- 粉末单道扫描（深度）：测量值与预测值对比



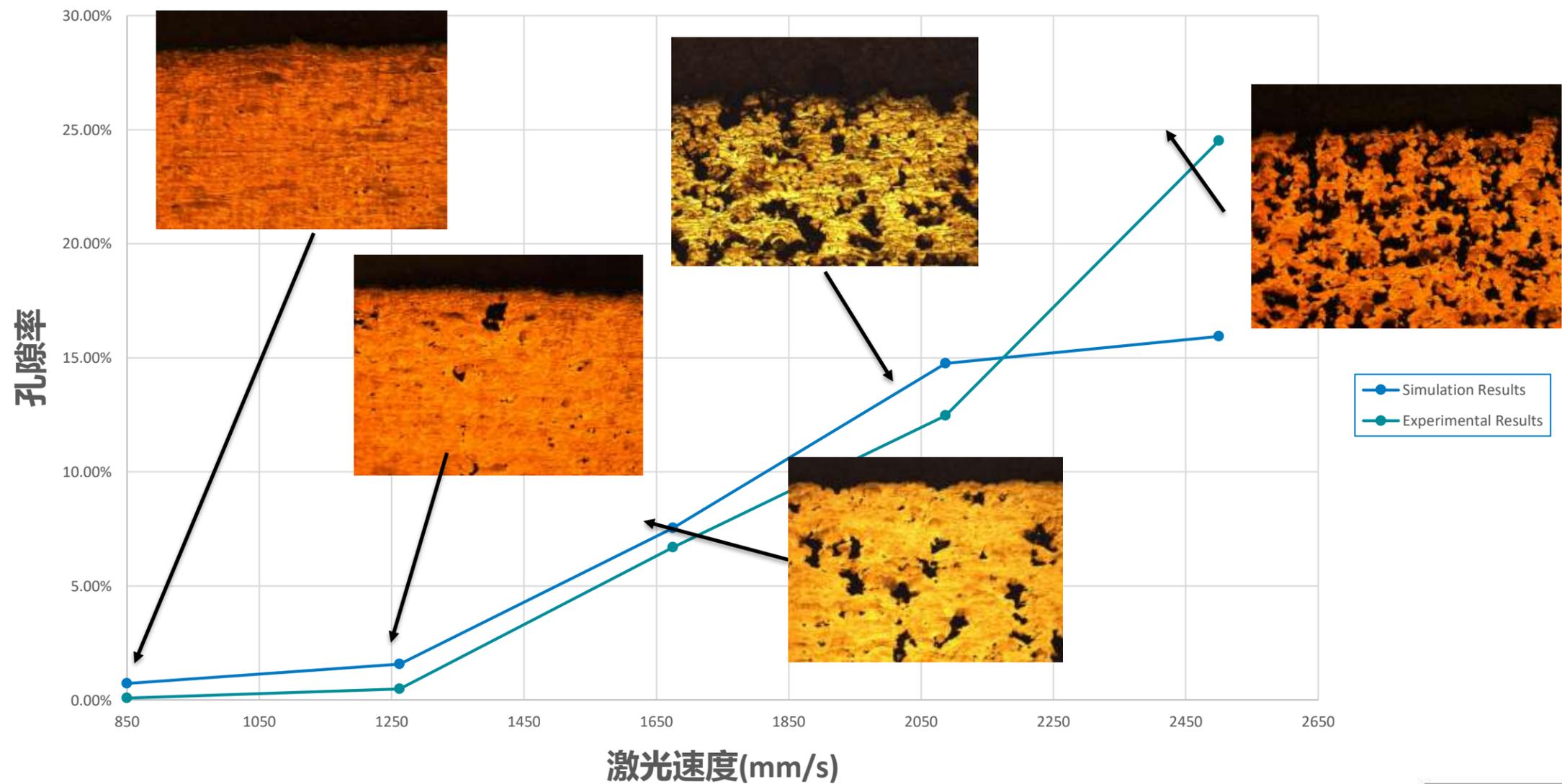
熔池边界模糊(尤其是深度方向)



ANSYS Additive Science 验证

孔隙缺陷预测(GE P&W 结果)

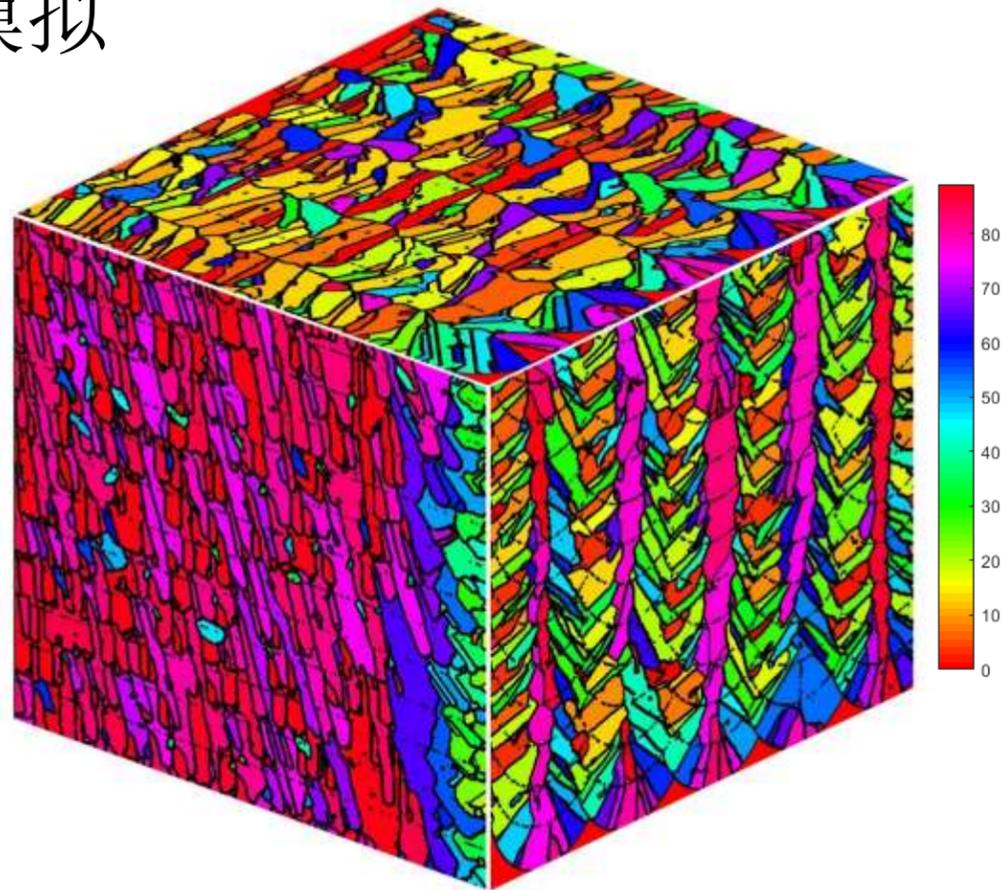
计算孔隙率(数量密度) vs 图像处理结果(385W)



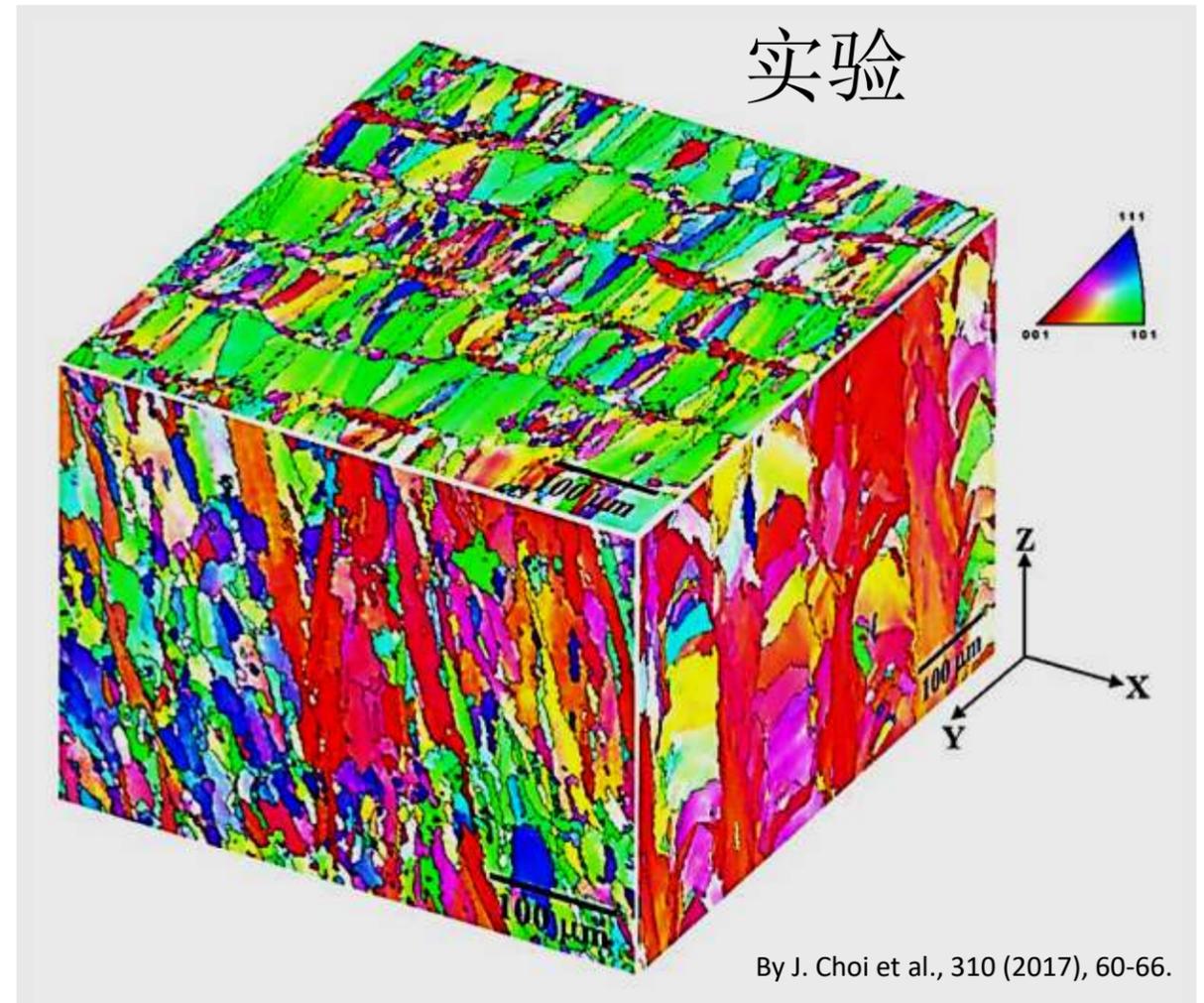
ANSYS Additive Science 验证

IN718微观结构预测(颗粒尺寸和组织)

模拟



实验



- 预测单向扫描模式下的颗粒尺寸、形态和组织
- 模拟结果与实验结果吻合良好
- 这些信息可以用于预测各向异性力学性能参数

ANSYS Additive Science 温度传感器模拟

将仿真结果与现场传感器读数关联

- 点探测

- 空间固定点的温度历程

- 固定区完全温度

- 固定方形视区 (FOV) 内的完全温度历史

- 同轴区完全温度

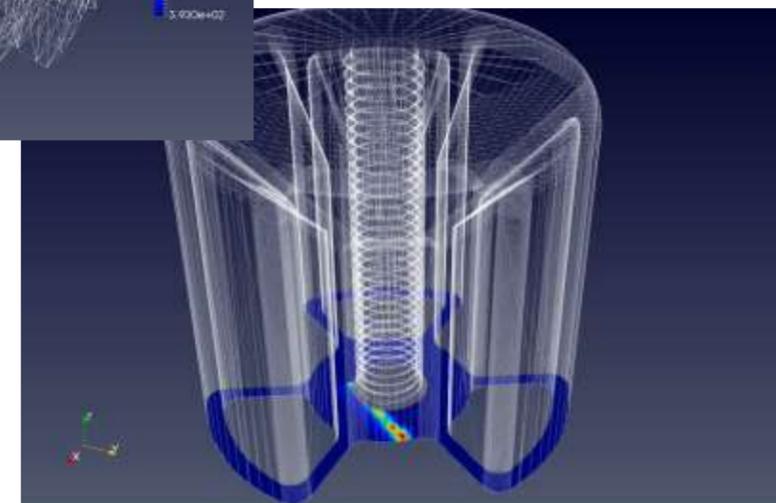
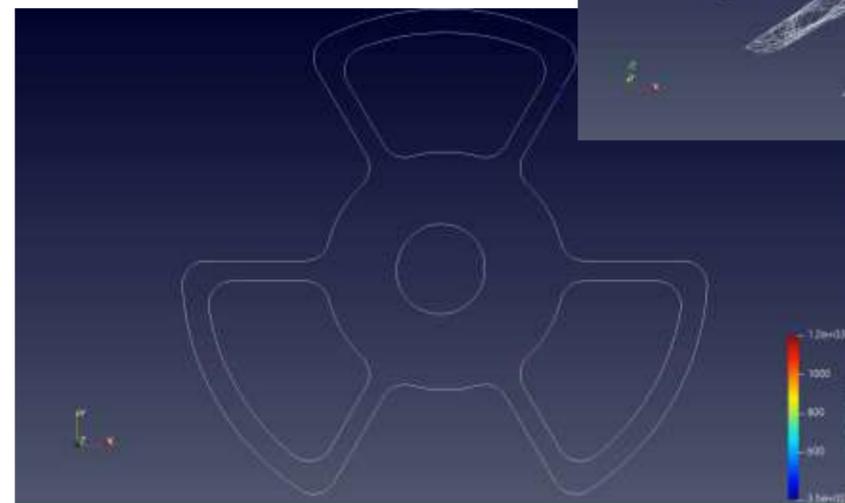
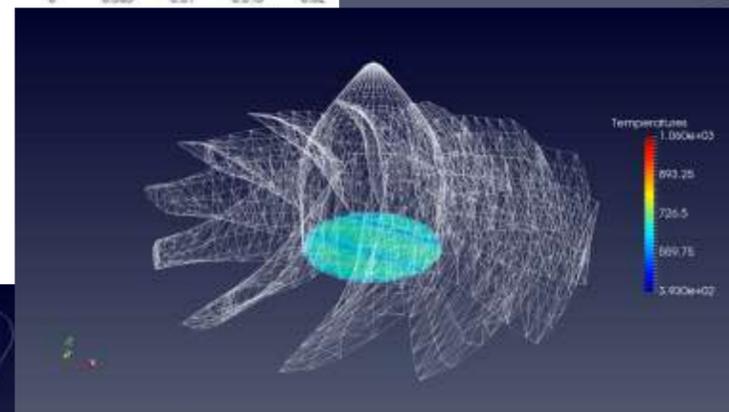
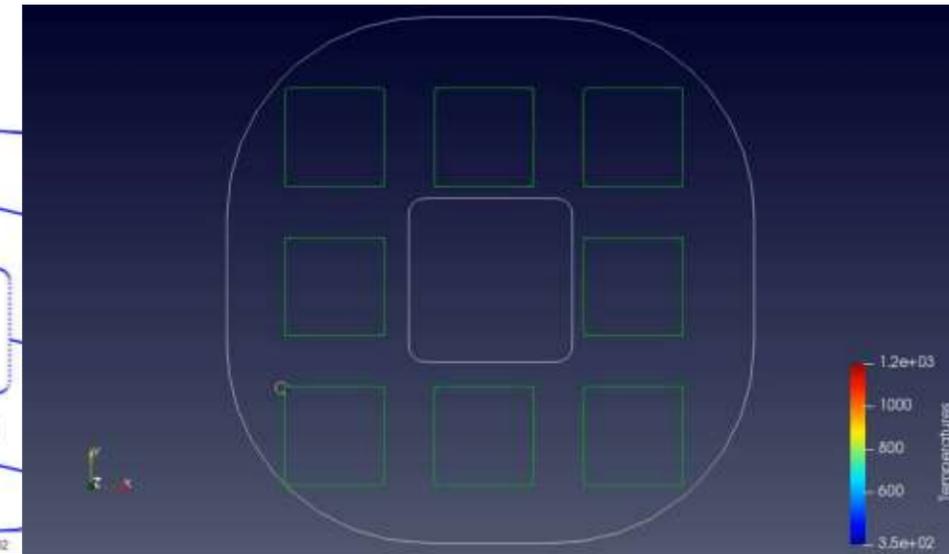
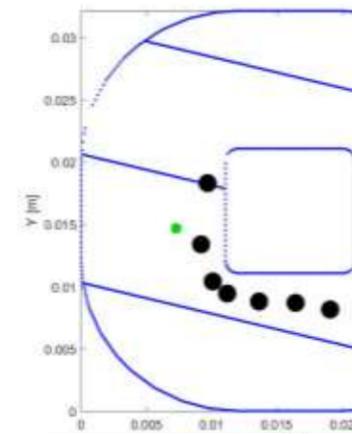
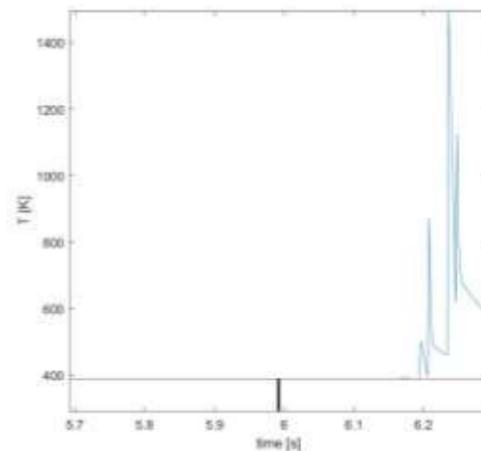
- 与激光同轴并同步移动的方形视区内的完全温度历史

- 同轴区平均传感器

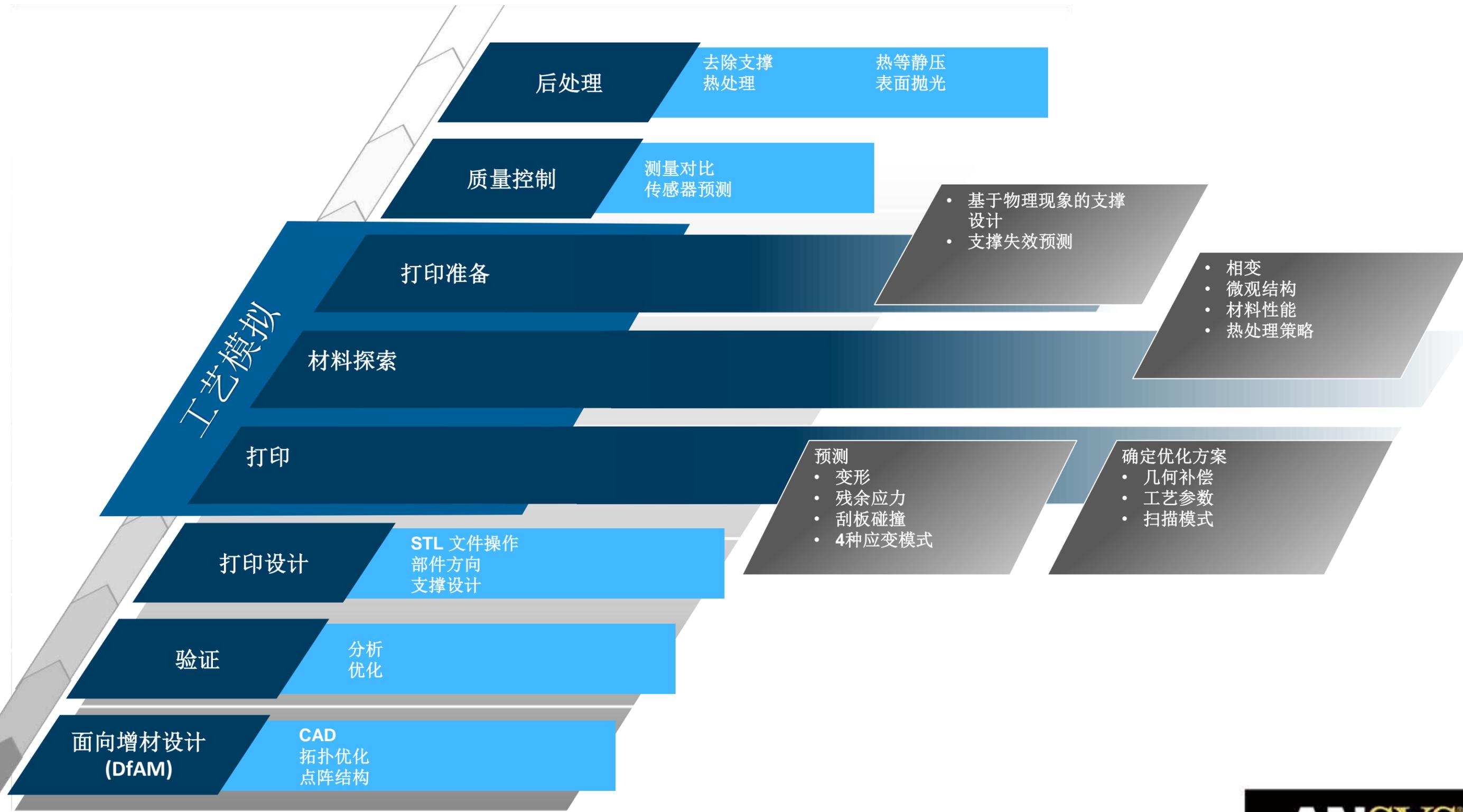
- 每个时间步与激光同轴并同步移动的圆形视区内的空间平均温度

- PrintRite3d[®] PCS

- 模拟Sigma Labs热传感器, 提供固定的圆形视区内的空间平均温度



安世亚太增材设计与制造工作流程





ANSYS

CONVERGENCE
CONFERENCES

2018年7月11-13日 上海

2018 ANSYS技术大会

感谢聆听

