

中国核能行业协会先进核能制造经验交流会

增材制造技术在核能中的应用

张琦 教授



西安交通大学 机械学院



CONTENTS

- 1 增材制造技术简介
- 2 增材制造面向反应堆组件的应用
- 3 增材制造面向反应堆燃料的应用
- 4 增材制造技术在核能应用展望

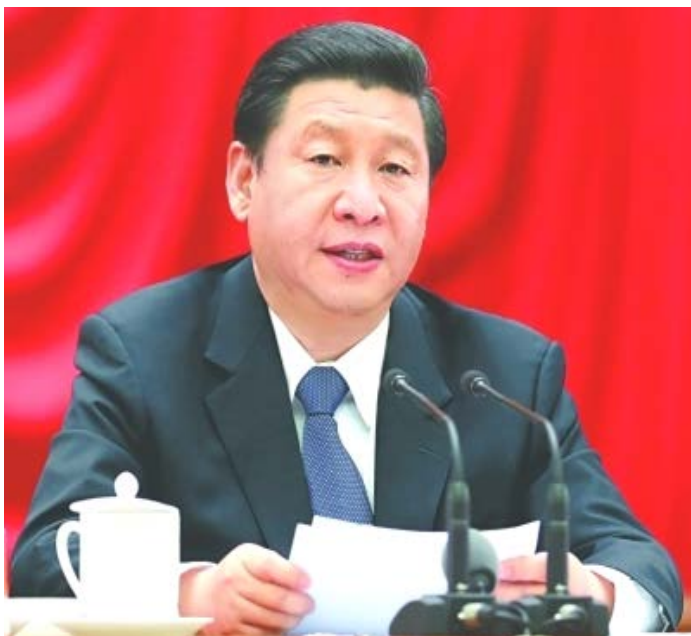


Part 01

增材制造 技术简介

1 增材制造技术简介

增材制造—制造工艺的革命



新一轮科技和产业革命正在创造历史性机遇，催生互联网+、分享经济、3D打印、智能制造等新理念、新业态，其中蕴含着巨大商机，正在创造巨大的市场需求。

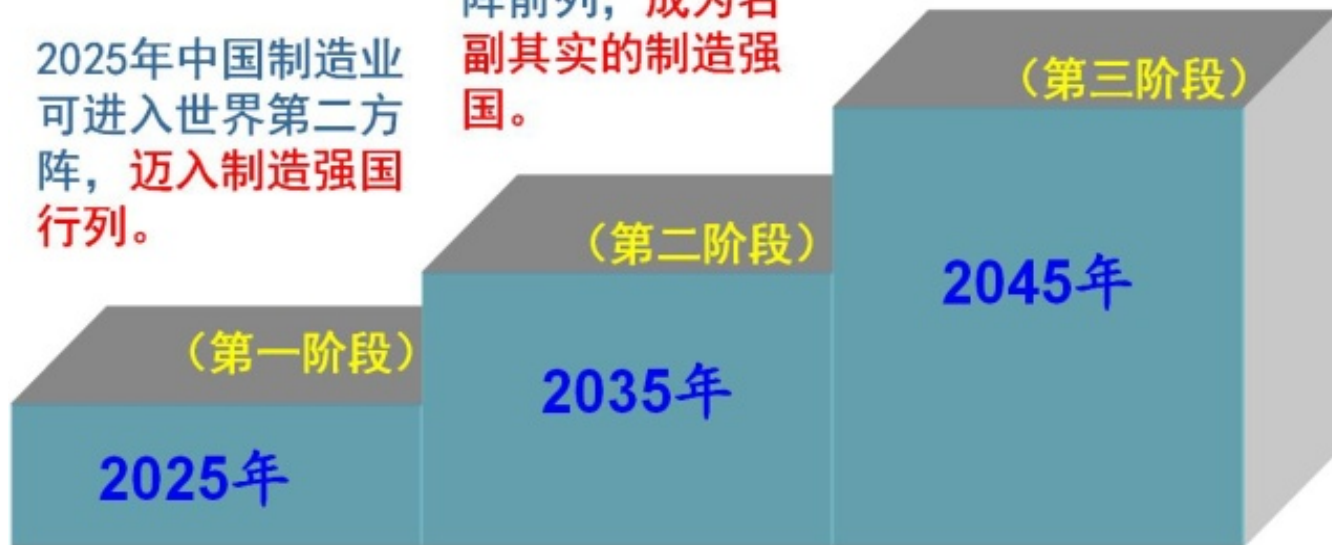
□ 中国制造2025路线图

■ 两个百年三步走

2025年中国制造业可进入世界第二方阵，迈入制造强国行列。

2035年中国制造业将位居第二方阵前列，成为名副其实的制造强国。

2045年中国制造业可望进入第一方阵，成为具有全球引领影响力的制造强国。



1 增材制造技术简介

增材制造—制造工艺的革命

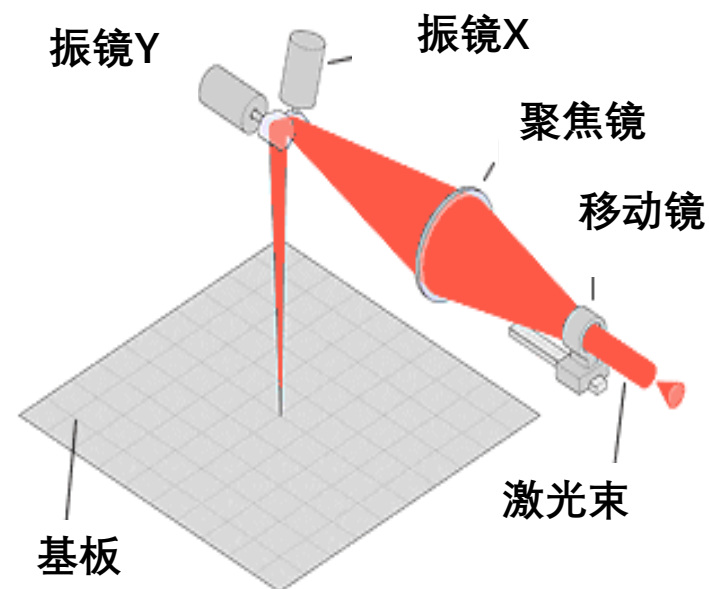
➤ 工艺方法的大变革

1. $\Delta M = 0$ (等量) 材料成形 (铸、锻、焊) , 几千年
2. $\Delta M < 0$ (减量) 材料去除 (车、铣、磨) , 几百年
3. $\Delta M > 0$ (增量) 材料累加 (SLA、DED、SLM等)

➤ 信息化制造的代表

1. 全数字化制造
2. 全柔性制造, 任意形状、任意材料、任意结构、控形控性
3. 高度自动化、智能化、网络化

连续5年, 麦肯锡报告列举12大颠覆技术中, 3D打印名列第九, 排新材料和页岩气之前。预测2030年将达到0.6-1.2万亿美元。



1 增材制造技术简介

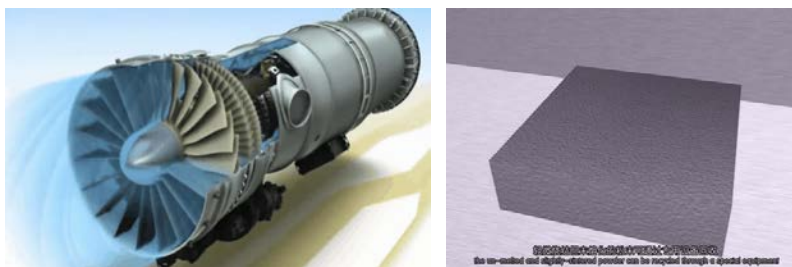
增材制造技术对于重点应用领域的重大意义

增材优势

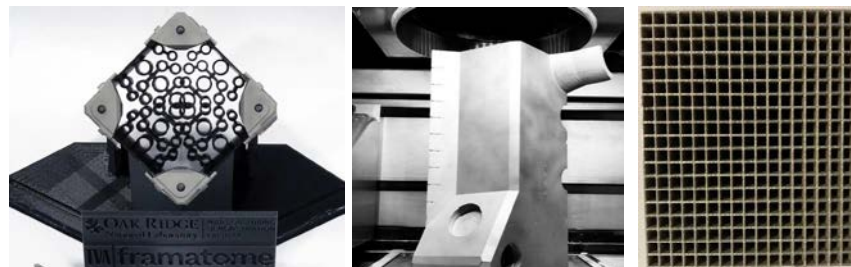
- 容易一体成型复杂构件，原型加工
- 释放创新设计空间，开展新结构设计
- 材料利用率高，响应绿色制造

增材挑战

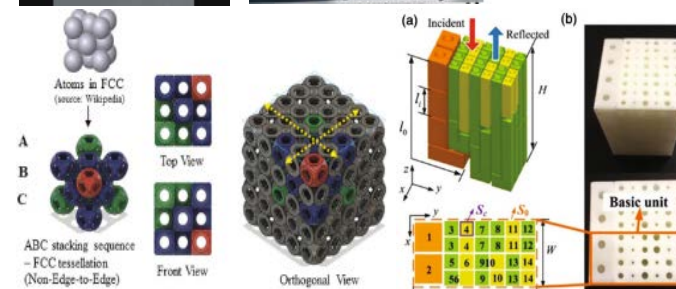
- 综合性能与工艺参数关系密切
- 需要全流程的工艺设计、过程监控
- 对内流道、悬空结构的处理待提升



增材制造在航空航天领域



增材制造在核电换热领域



增材制造新结构设计

增材制造技术在重要领域的关键零部件制造上体现出独特优势

1 增材制造技术简介

增材制造技术对于重点应用领域的重大意义

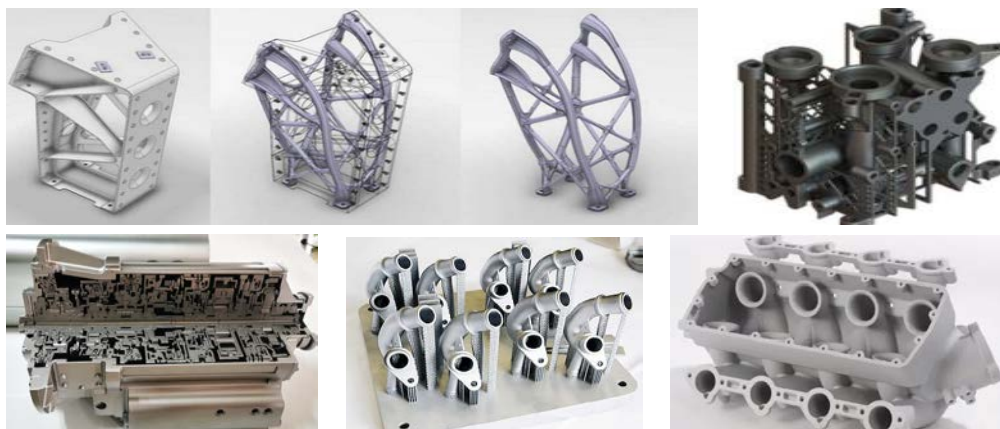
结构

轻量化

复合材料

减振结构

变形隔离



- 增材制造为零部件性能个性化定制开拓全新思路
- 增材制造创新了复合材料、功能梯度结构的研制

热

热交换器

阻火器

隔热

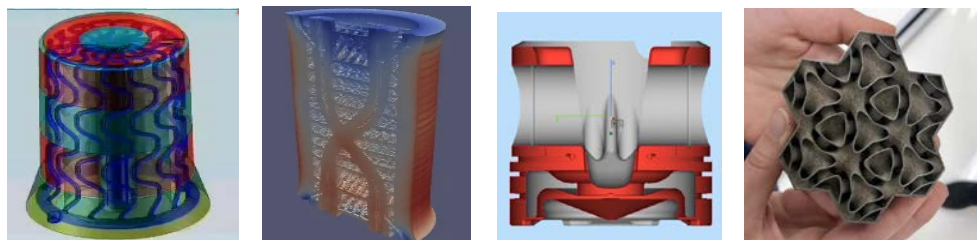


- 增材制造加快了原型方案的制造-验证-迭代

流体

随形流道

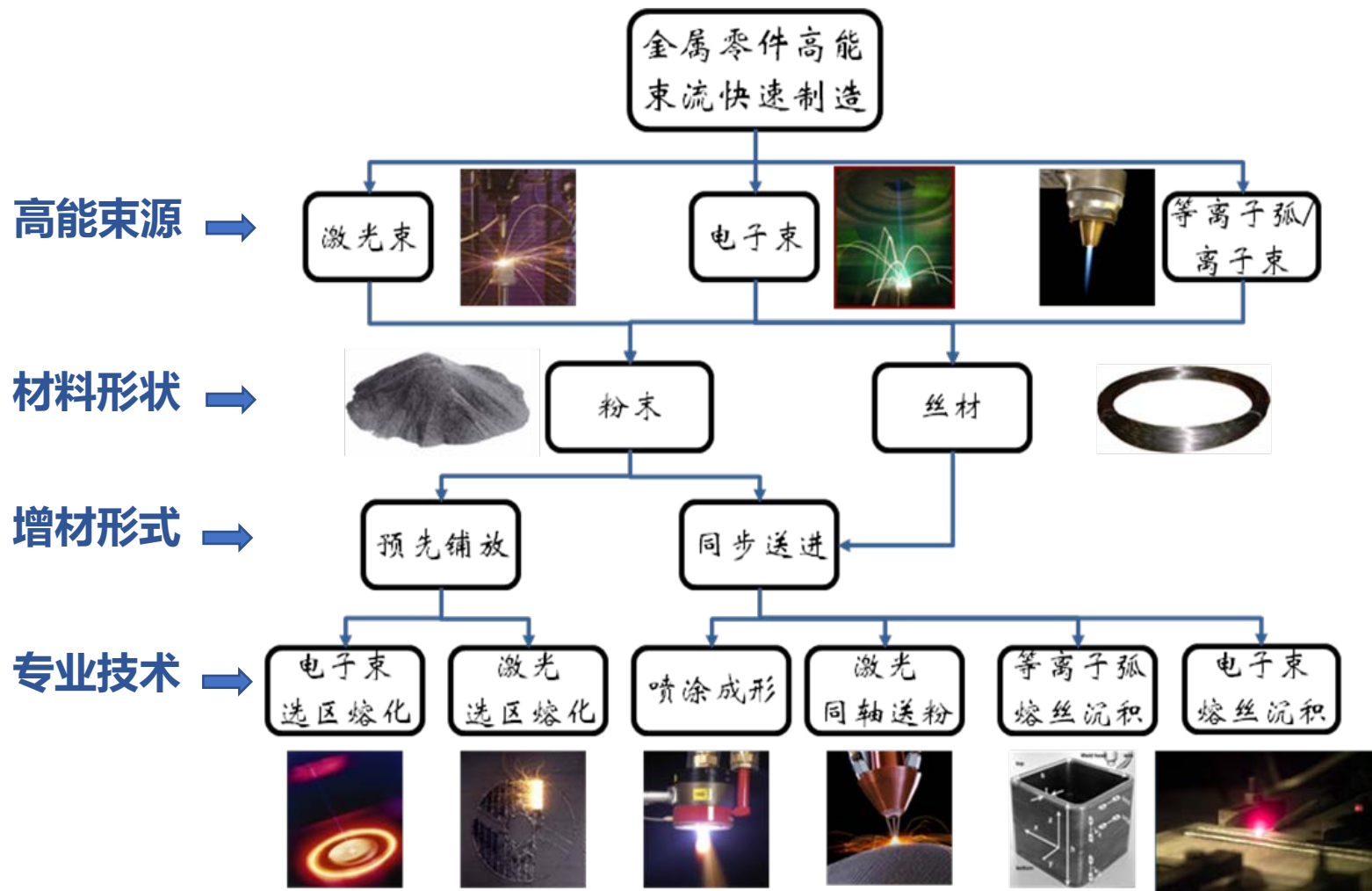
仿生结构



- 增材制造为模型的创新设计打破了限制

1 增材制造技术简介

金属增材制造工艺



增材制造涉及领域技术

材料科学：原料必须多样化、功能化、可加工化。

精密机械：设备具备高精度、高稳定性。

信息技术：要有先进的设计软件及数字化工具。

大数据技术：以大数据平台为基础的增材分布式制造模式。

1 增材制造技术简介

非金属材料制造工艺



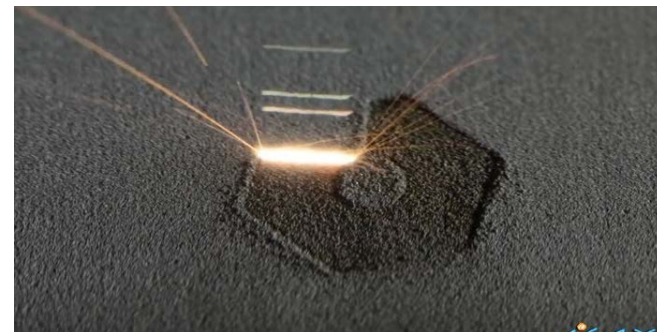
光固化成型 (SLA)

用特定波长与强度的激光聚焦到光固化材料表面,使之凝固成一个三维实体



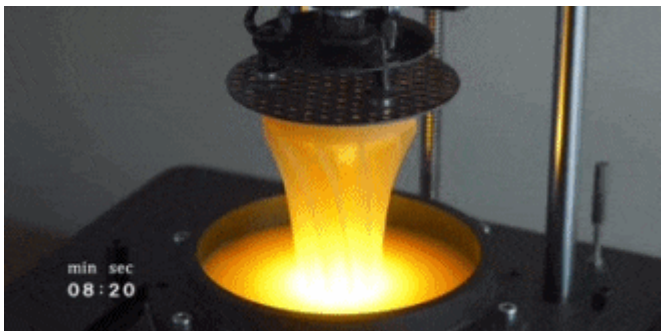
熔融沉积成型 (FDM)

将各种热熔性的丝状材料加热融化成形。



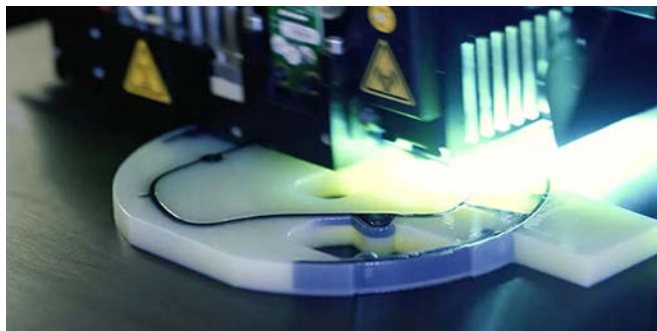
激光选区烧结成型 (SLS)

利用红外激光器作为能源,逐层对粉末进行有选择地烧结最终成型。



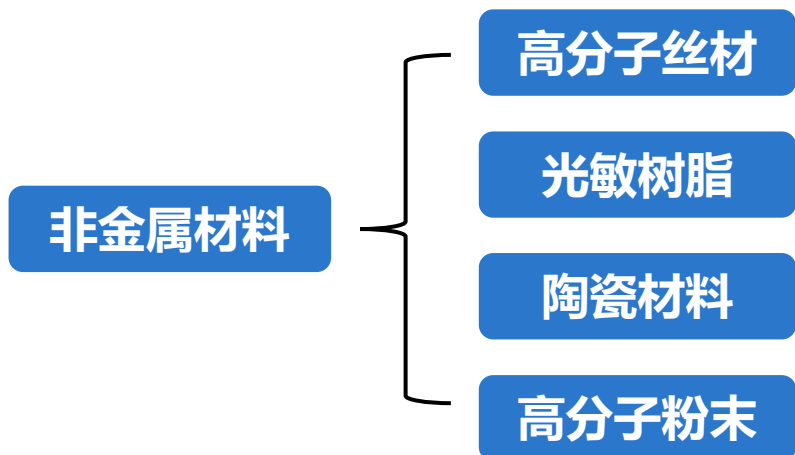
数字光处理成型 (DLP)

使用数字光处理器投影仪固化液态光聚合物,使之成型。



聚合物喷射成型 (Poly Jet)

将光敏聚合材料喷射到工作台上,UV紫外光灯对材料进行固化成型。



1 增材制造技术简介

增材制造为产品的设计提供了更优的制造方式，可以实现系统性能最优设计、部件性能最优设计及零件性能最优设计。

增材制造是颠覆性技术，其颠覆性主要体现在与设计相结合的创新，要缩短与国外技术差距、需要建立基于增材制造的“设计-材料-制造-测试”能力。

Part 02

增材制造面向 反应堆组件应用

2 增材制造面向反应堆组件的应用

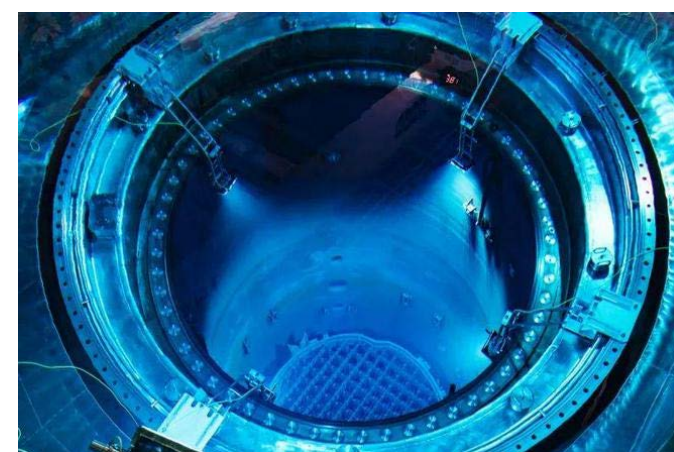
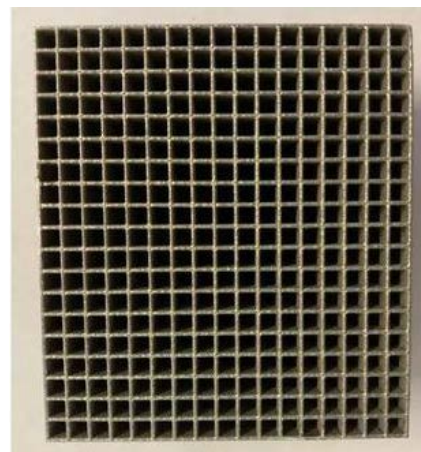
国内外面向反应堆组件增材制造案例

燃料组件固定

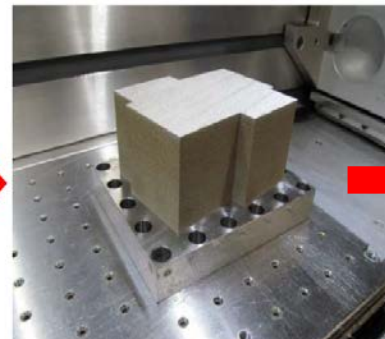
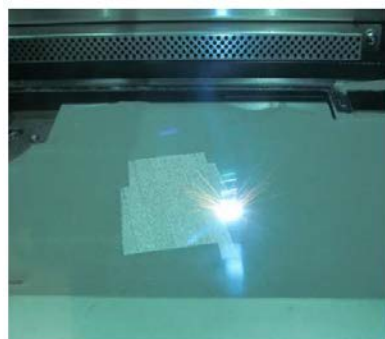


橡树岭国家实验室打印TVA 核反应堆的格架
核反应堆阻力塞

燃料碎片过滤器



西屋公司增材制造核燃料碎片过滤器

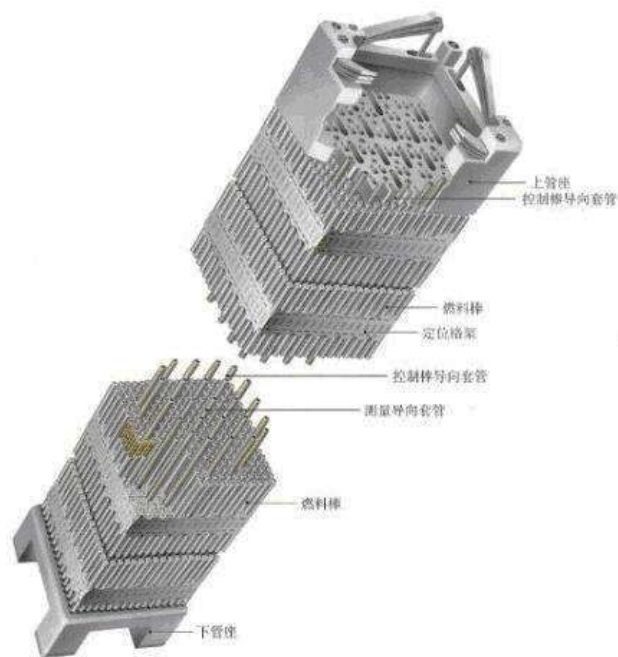


西屋打印核反应堆阻力塞

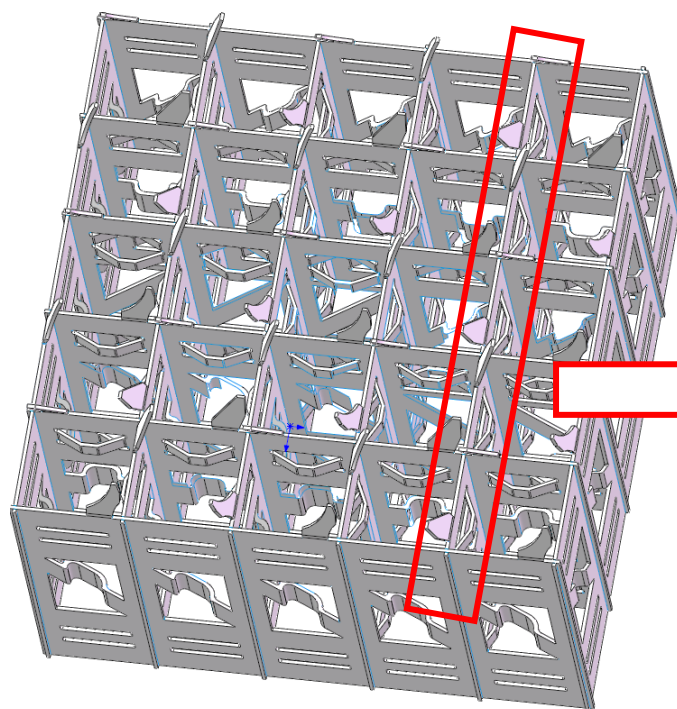
2 增材制造面向反应堆组件的应用

应用案例：增材制造面向核燃料棒体固定格架的改进

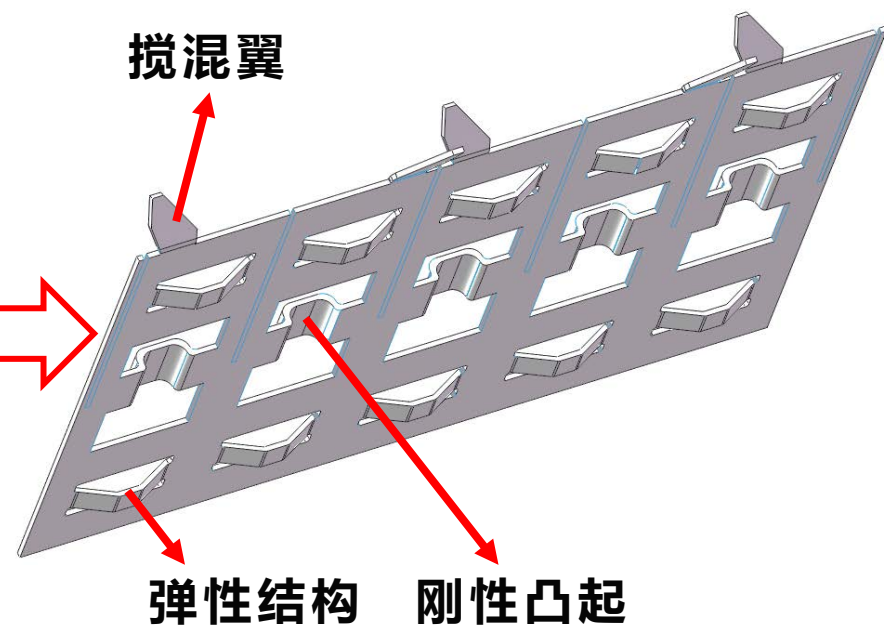
现有的定位格架设计中，定位格架基本都是条带结构组成，条带主体上设置斜弹簧或刚凸结构，边缘设置有搅混翼，各种条带通过合理的布置以改变水力场。这样的设计使得条带结构较为复杂，而现有的制造方案生产的工艺成本过高，一旦要修改格架的特点，还需要重新生产大部分的模具。



核燃料棒体定位方式



传统的条带式定位格架



单片格架结构

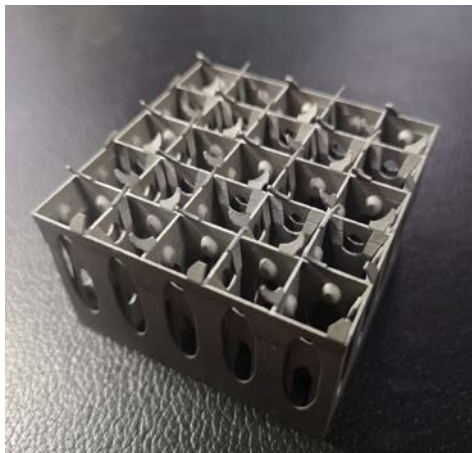
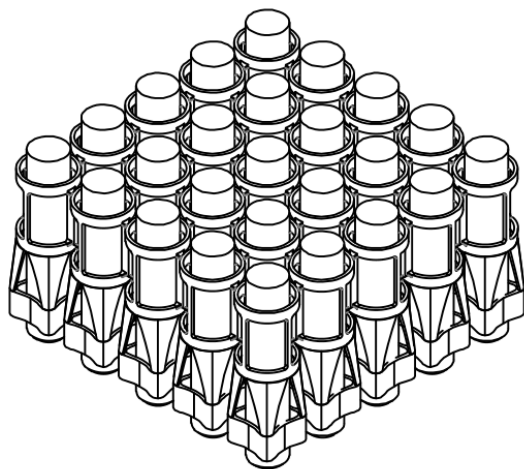
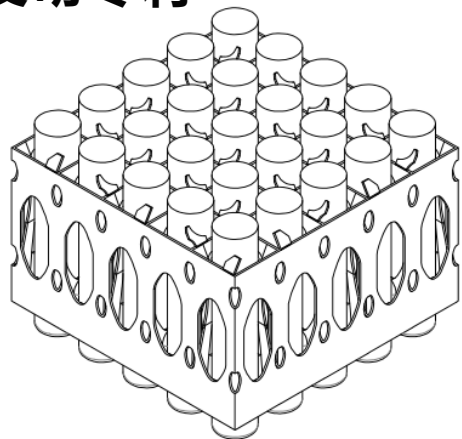
2 增材制造面向反应堆组件的应用

应用案例：增材制造面向核燃料棒体固定格架的改进

◆ 相关设计方案已发表发明专利



条带式定位格架



基于增材制造创新设计的格架



实验室实验验证

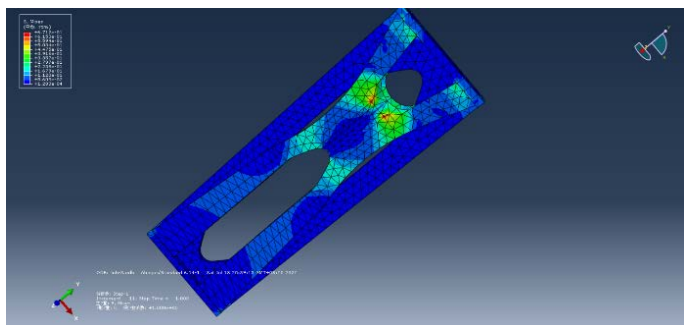
基于增材制造的创新设计

- 代替传统格架结构。
- 用较少支撑实现增材制造。
- 新型的搅混翼设计，提高定位格架水流搅混效果

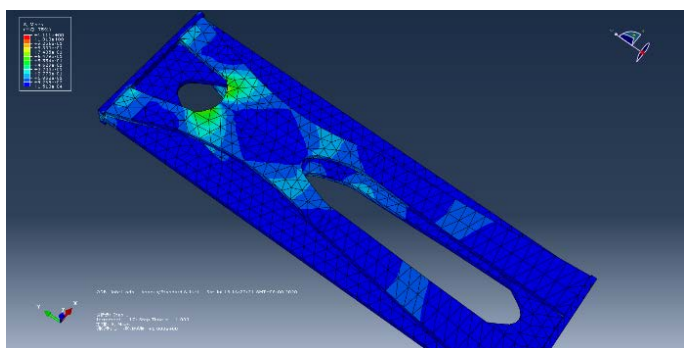
2 增材制造面向反应堆组件的应用

应用案例：增材制造面向核燃料棒体固定格架的改进

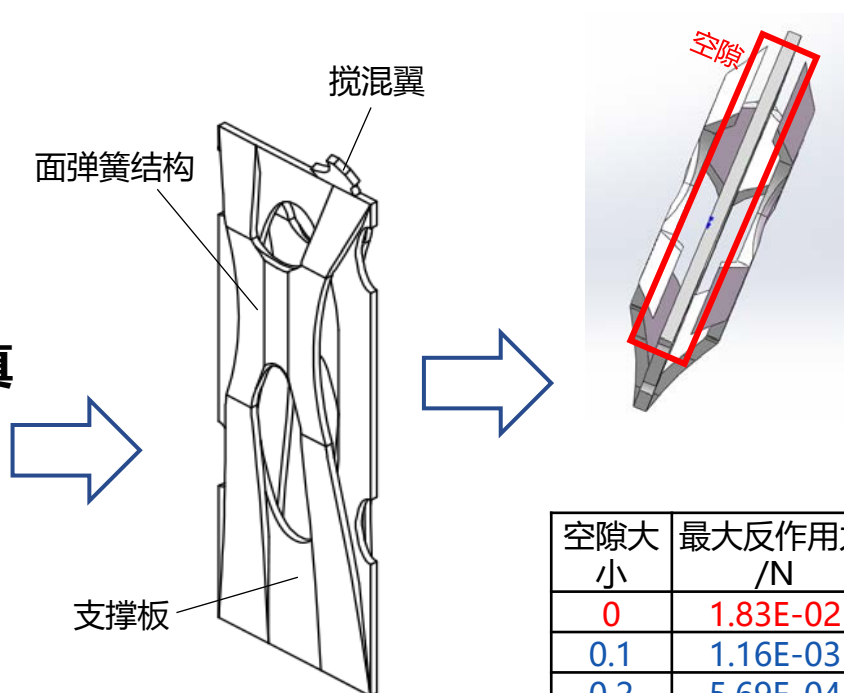
研究适于增材制造的条带弹性夹持结构，同时避免弹性模量过大



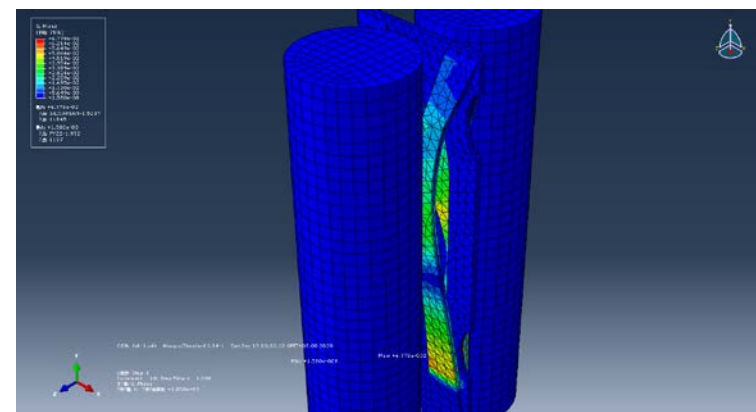
3D打印弹簧结构的设计与仿真



弹簧结构的优化-减少应力集中



初步设计的
弹簧条带



继续展开的相关优化

空隙大小	最大反作用力 /N	压下距离 /m	弹性模量	备注
0	1.83E-02	0.0001	1.83E+02	K值过大, 需要优化
0.1	1.16E-03	0.0001	1.16E+01	间距部分碰到底板
0.2	5.69E-04	0.0001	5.69E+00	间距部分碰到底板
0.3	4.64E-04	0.0001	4.64E+00	间距部分没碰到底板
0.4	4.65E-04	0.0001	4.65E+00	间距部分没碰到底板
0.5	5.20E-04	0.0001	5.20E+00	间距部分没碰到底板

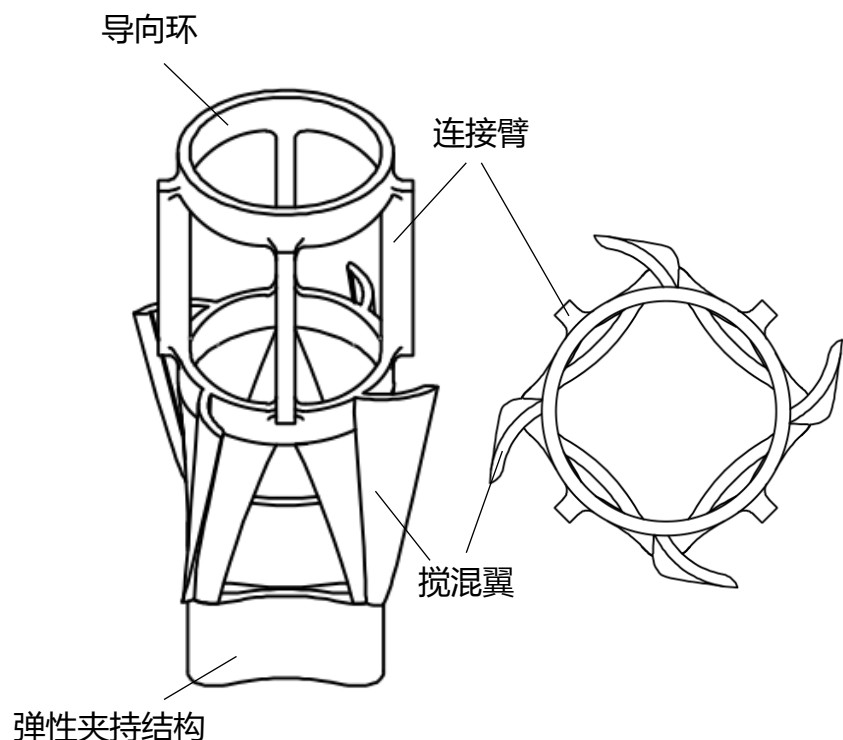
◆ 专利号：202010867830X

保证强度，减少52%的条带面积，增加水流量

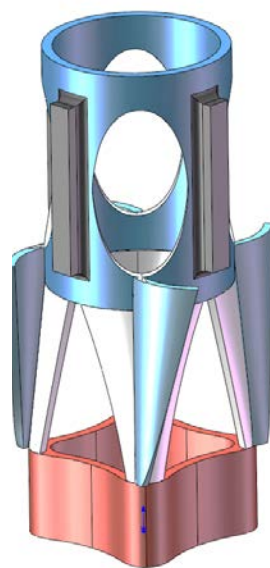
2 增材制造面向反应堆组件的应用

应用案例：增材制造面向核燃料棒体固定格架的改进

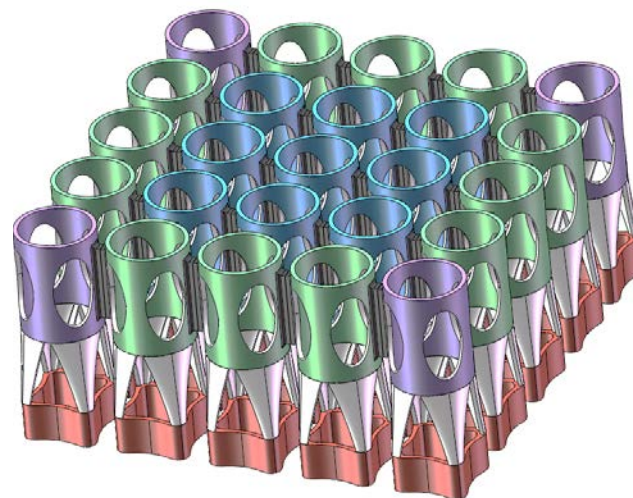
改变条带式定位格架方案，基于增材制造的优势，设计新型的**异形格架**



单个格架单元的设计



单个格架单元及整体的优化



弹性夹持结构设计

内凹量: $D - 2\Delta$

外凸量: $D + 3\Delta$

增量 Δ : $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} D$

搅混翼倾角: $5^\circ \sim 10^\circ$

◆ 专利号：2020108675405

- 允许更多的空隙
- 搅混翼能产生更大的搅混范围，提高搅混效果

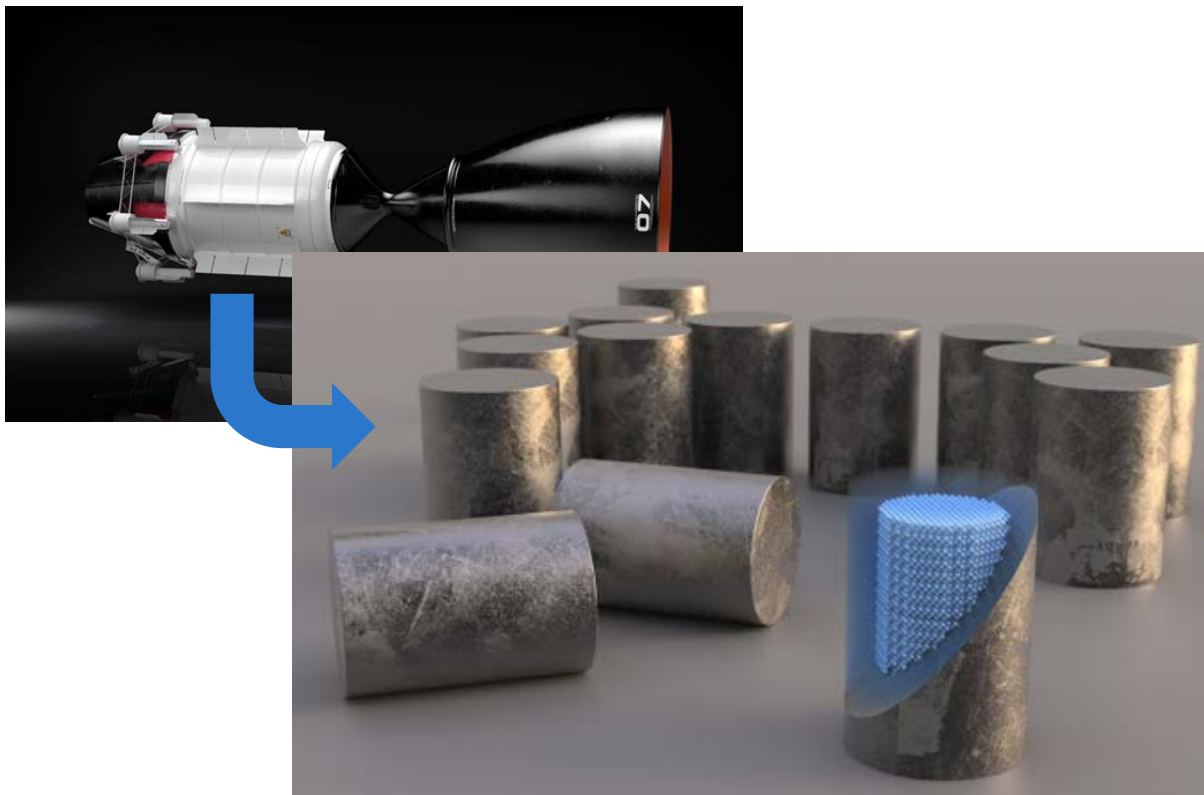
Part 03

增材制造面向 反应堆燃料应用

3 增材制造面向反应堆燃料的应用

国内外面向燃料生产增材制造案例

NASA核热推进(NTP)设计概念



美国超安全核能公司粘结剂喷射打印机制造的碳化硅全陶瓷微封装 (FCM) 燃料



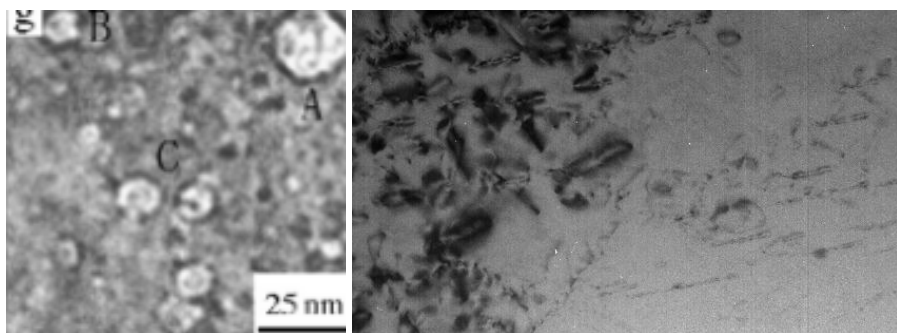
美国超安全核能公司粘结剂喷射打印机制造碳化硅陶瓷增强燃料棒体过程

3 增材制造面向反应堆燃料的应用

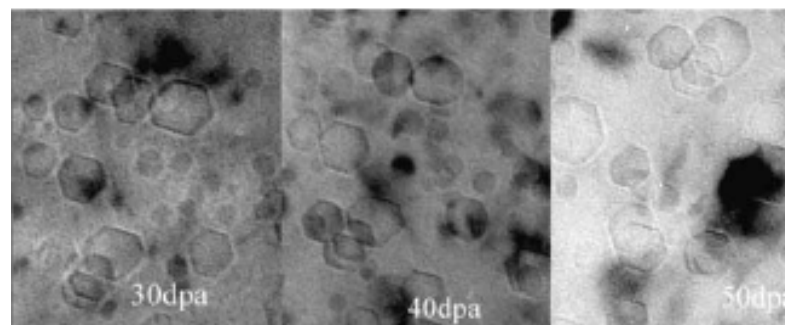
应用案例：面向弥散增强的新型核燃料研制

在反应堆燃料的使用过程中，核反应的辐照现象会导致的燃料膨胀并释放出挥发性裂变产物，导致材料内部形成局部应力，燃料护套破裂产生燃料裂变，使燃料耐久性下降。

➤ 常见的辐照损伤：肿胀、硬化/脆化、氦脆/氦硬化

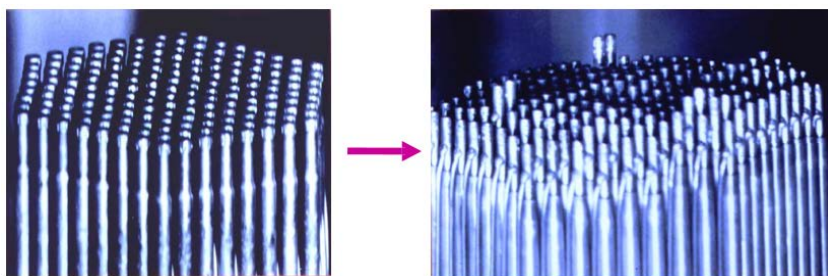


辐照使材料微观组织产生空洞和位错环

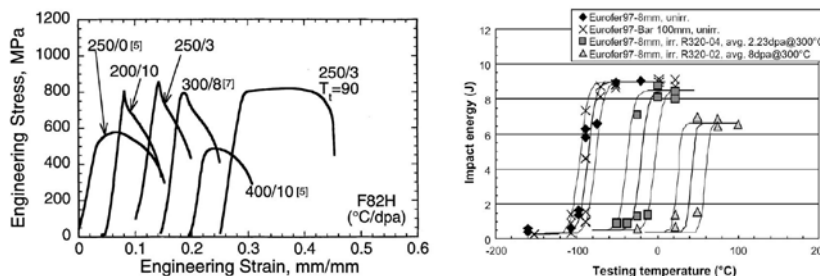


辐照使材料微观组织产生空洞和位错环

➤ 方法一：对棒体护套提出新要求，但**无法从根源解决辐照产生的问题**



HT9材料在辐照下出现肿胀



辐照产生材料的硬化/脆化现象

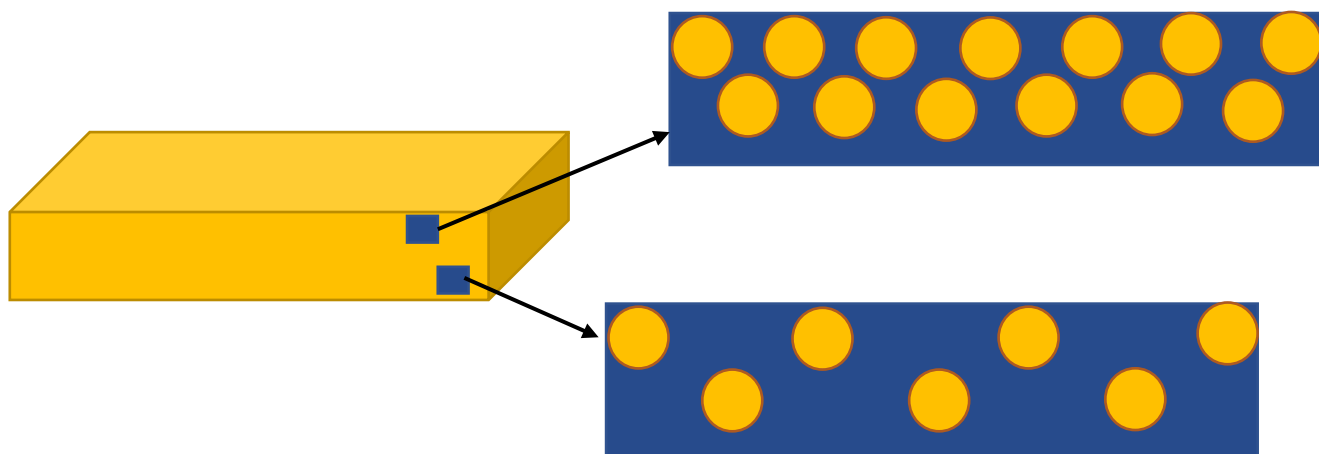
➤ 方法二：制造核燃料复合材料，从**材料上有效抑制核辐照带来的影响**。

3 增材制造面向反应堆燃料的应用

应用案例：面向弥散增强的新型反应堆燃料研制

反应堆燃料复合材料（弥散型燃料）的提出

- **材料定义：**由燃料相和增强相构成，把含有可裂变核素的燃料颗粒均匀地弥散分布在性能优良的非裂变基体相中即为弥散型燃料
- **材料优势：**既可显著提高合金强度和特殊性能，又可使材料塑性和韧性下降不大，并且颗粒越细小，越呈弥散均匀分布，强化效果越好



基体相（强化相）材料能梯度均匀分布在原材料中

➤ 弥散型燃料的制备需要围绕**材料**
料体制备和**材料混合方式**展开

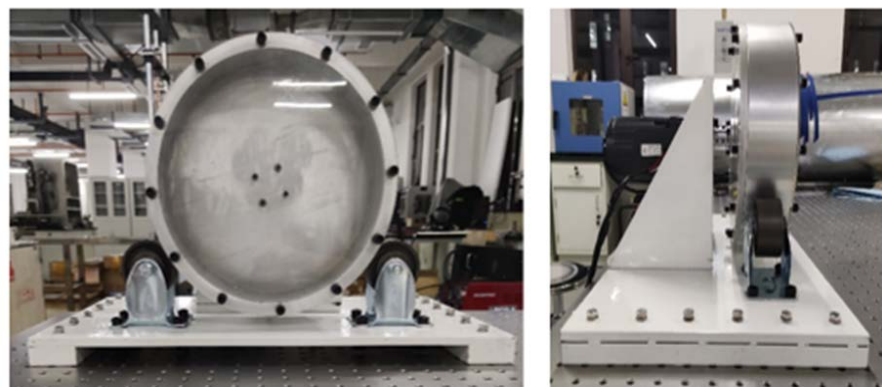
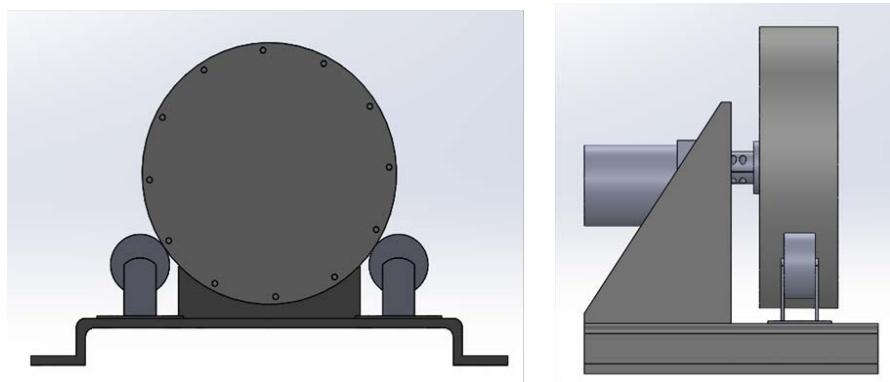
➤ 弥散燃料内核素分布至关重要，
需要开展燃料微粒分布均匀性的
研究、开发工艺和设备

3 增材制造面向反应堆燃料的应用

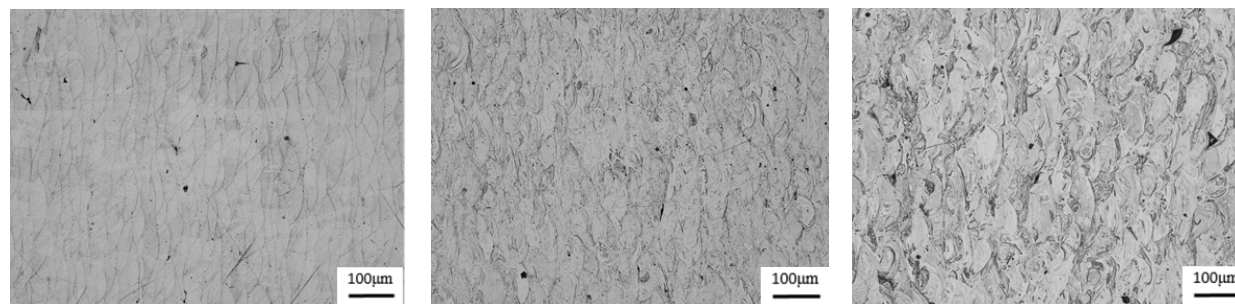
应用案例：面向弥散增强的新型材料研制

SLM打印弥散性材料样例

将316L粉末与WC（增强相）粉末混合打印，研究在不同的粉末混合比例和工艺参数下，打印件的微观组织。



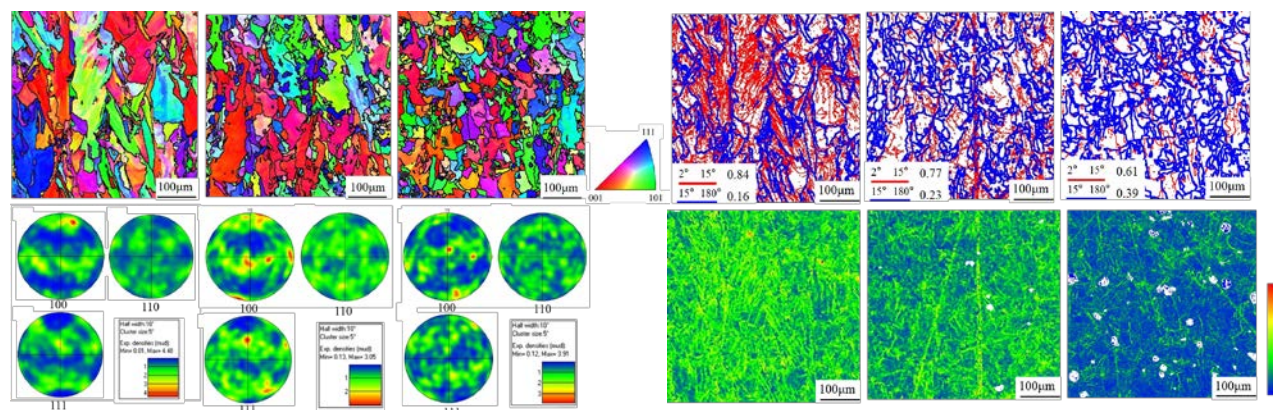
粉末材料混合装置



316L不锈钢

5%WC-316L不锈钢

10%WC-316L不锈钢



316L不锈钢

5%WC-316L

10%WC-316L

316L不锈钢

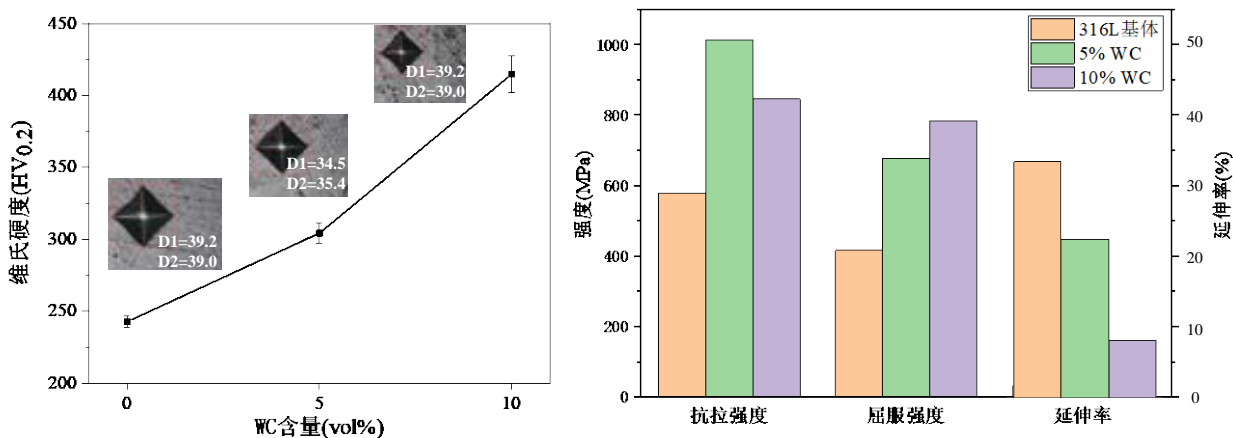
5%WC-316L

10%WC-316L

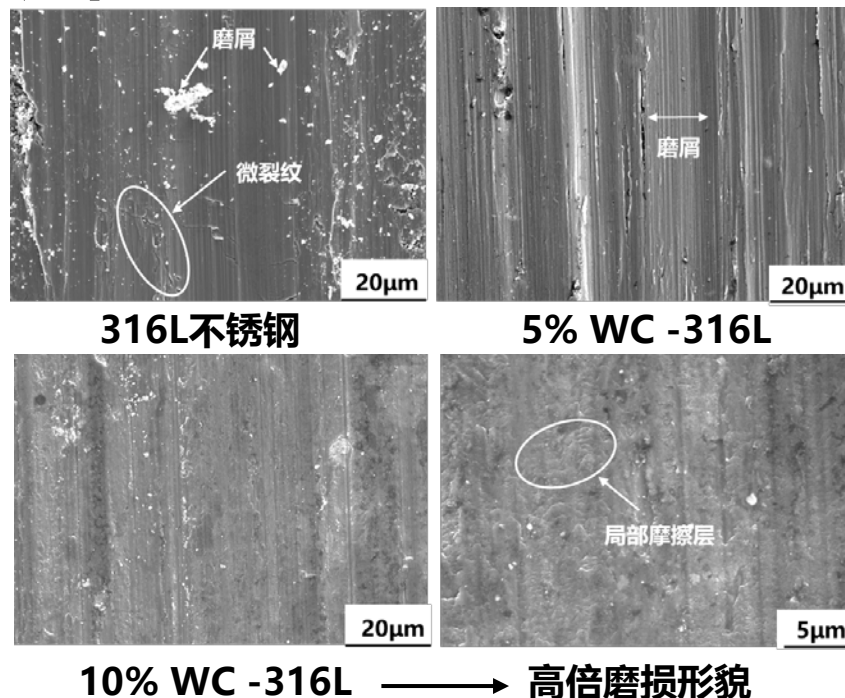
3 增材制造面向反应堆燃料的应用

应用案例：面向弥散增强的新型材料研制

增强相材料对基体材料的增强效果



材料	硬度HV	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
316L基体	242.8±4	578.7±6	416.4±5	32.8±1.2
316L+5%WC	384.3±7	1012.6±18	677.1±10	22.3±0.8
316L+10%WC	414.8±13	845.1±15	784.1±12	8.2±0.5
传统工艺	~200	~480	~177	~40



摩擦磨损实验结果

- a) 随着WC含量增加，摩擦系数降低；
- b) 单材料存在磨损碎片，复合材料只有颗粒状磨屑并未发现裂纹；
- c) 随着WC含量增加，磨损犁沟的深度明显变浅；
- d) WC颗粒与316L基体之间也未出现分离情况。

- 随着WC的加入，大角度晶界含量逐渐增加，大角度晶界能够引起位错在晶界处的塞积，材料强度因此而增高。
- 随着WC的加入，内核平均取向差降低，WC颗粒的加入显著降低了复合材料的残余应力。



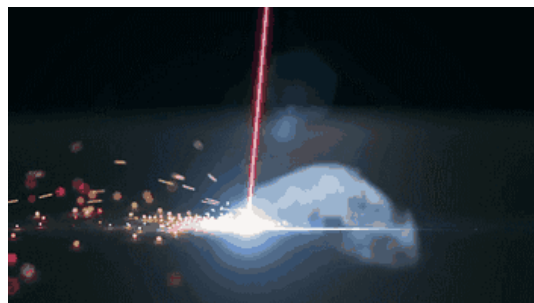
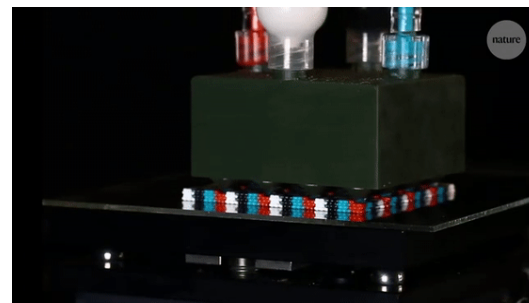
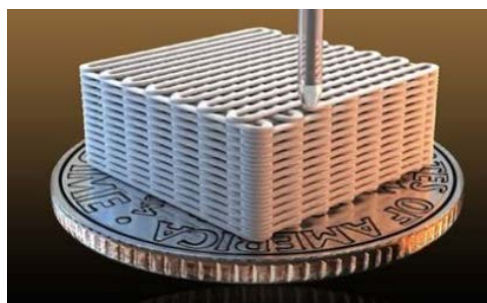
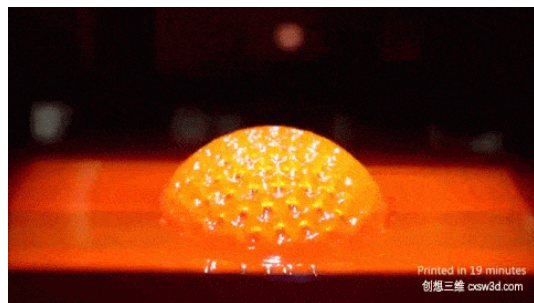
Part 04

增材制造在核能 应用的展望

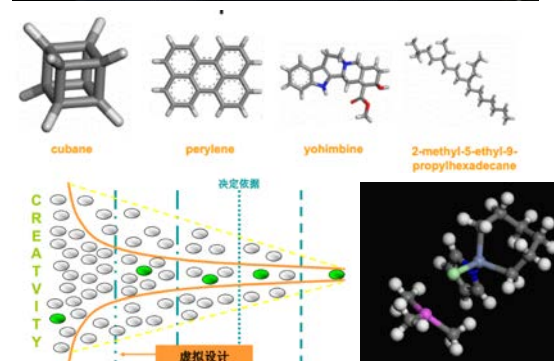
4 增材制造技术在核能应用的展望

面向高性能复杂构型的增材制造技术研究

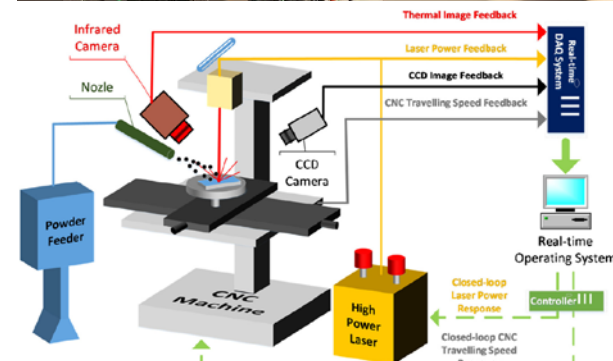
面向核能结构功能一体化复杂构件、复合梯度材料的制造，需开展对应的金属/非金属增材制造技术研发，重点探索增材制造复杂构型和梯度材料的新工艺方法，开展工艺参数和材料配方的优化，开展成形过程中的光、电、磁、热等信息在线监测，实现对复杂结构/成分构件的高性能制造。



复杂构件的增材制造方法



增材制造材料研究



增材制造过程监控

4 增材制造技术在核能应用的展望

面向核能小型化的增材制造探索

核能是一种极具优势的能源，如果要走出地球，核能小型化非常重要，增材制造技术将会是核能小型化的必备技术，通过创新设计与一体化成形，将会在极大程度上减少其制造难度。



外太空核动力及核能源



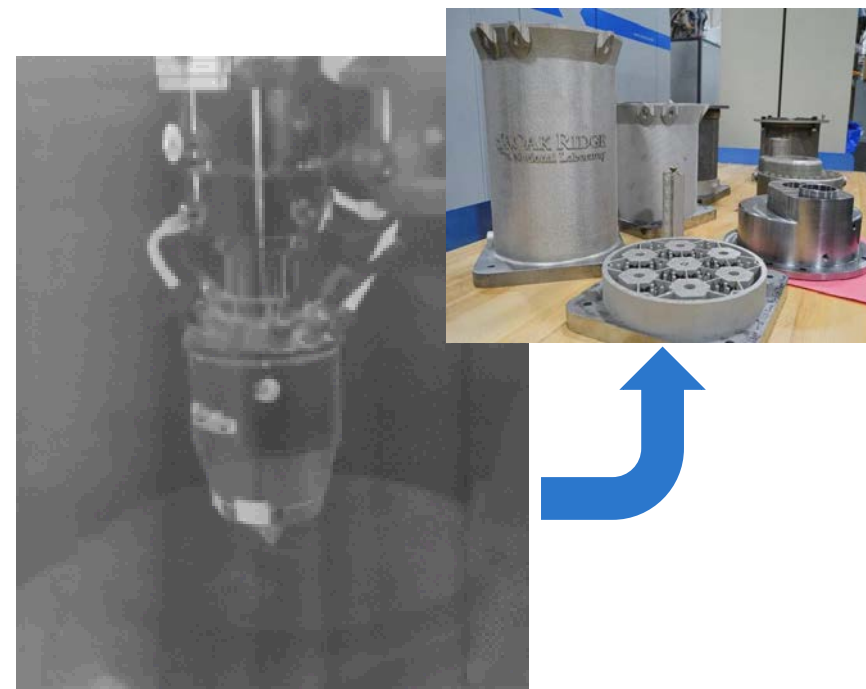
核动力航天器



核动力空间站



火星基地

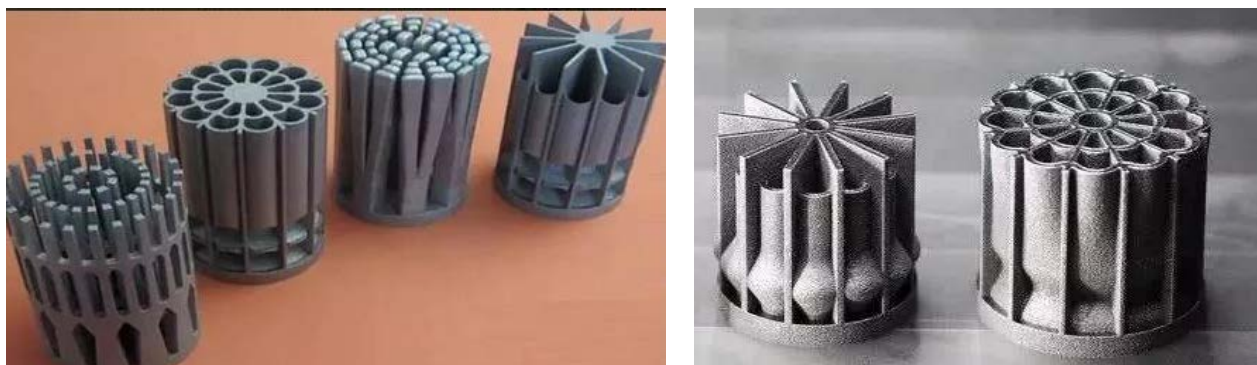
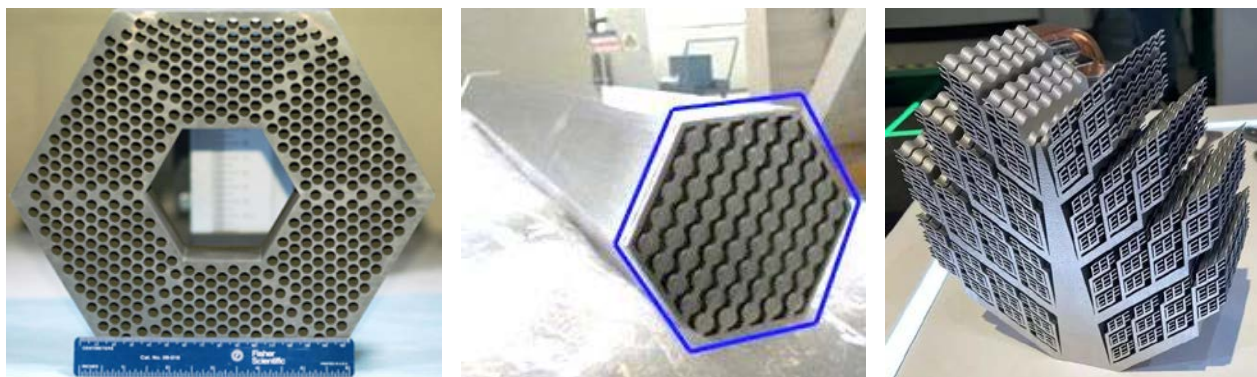


美国橡树岭国家实验室核反应堆堆芯原型打印

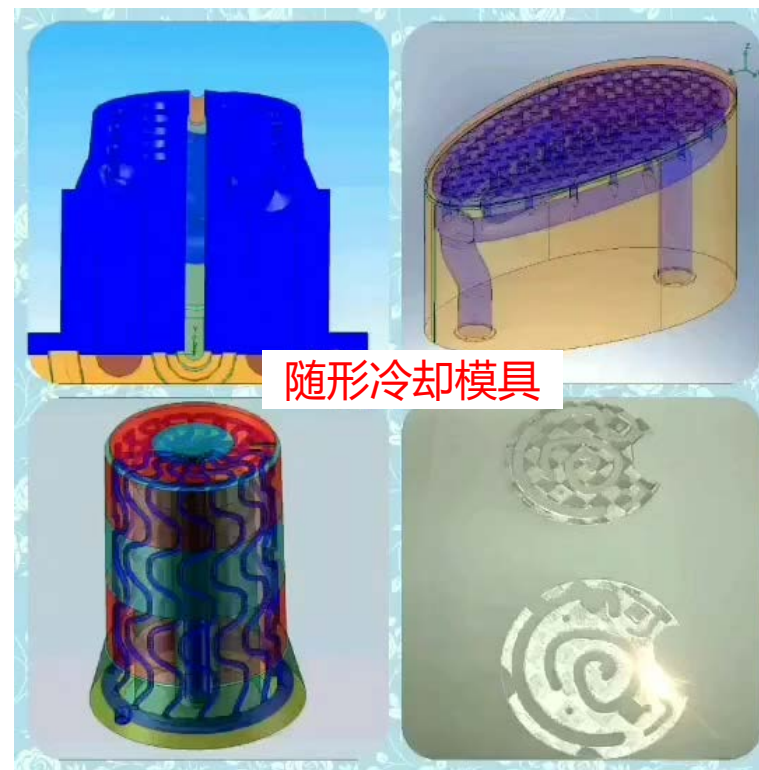
4 增材制造技术在核能应用的展望

基于增材制造的结构功能一体化优化设计方法

面向核能领域特殊环境及零件需求，重点开展功能部件多场耦合作用下多目标优化设计、栅格自动填充及优化、自支撑拓扑模型的建立及优化等方法的研究，满足核能领域高性能需求。



高效换热结构设计制造



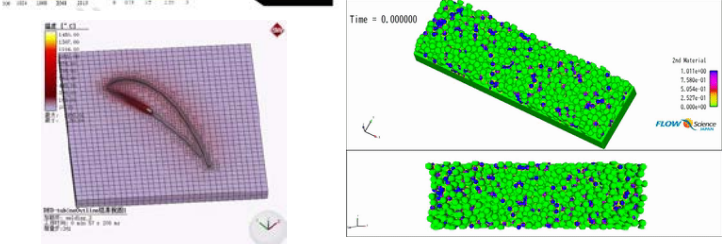
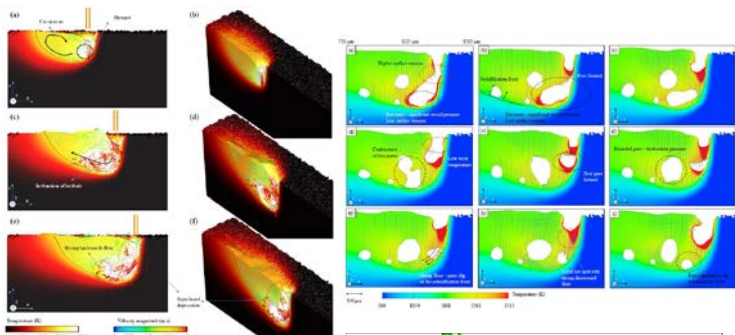
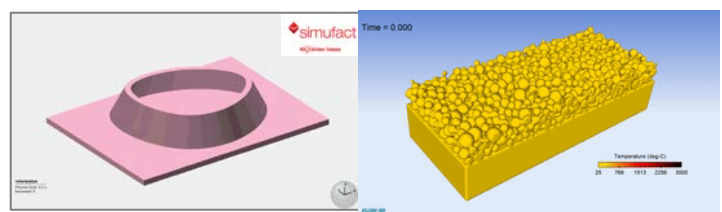
随形冷却模具

复杂流道结构制造

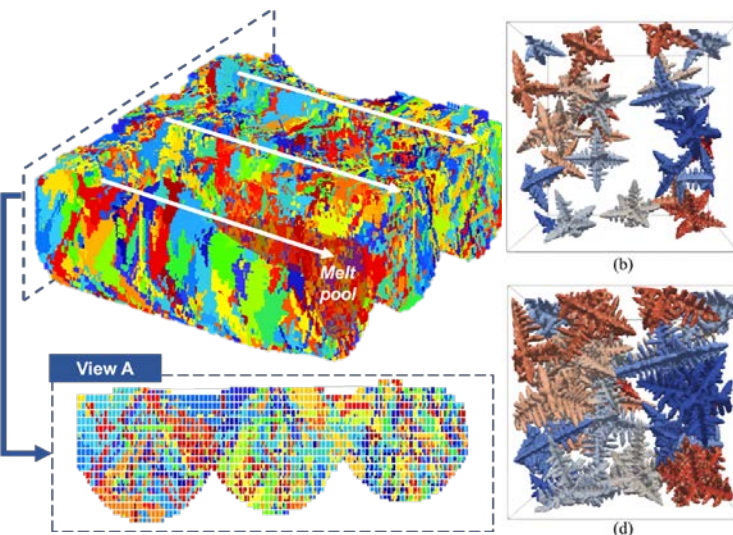
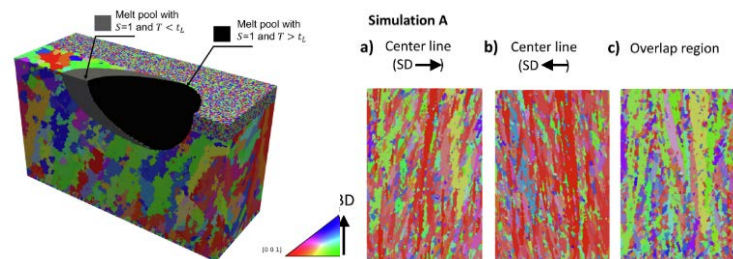
4 增材制造技术在核能应用的展望

基于仿真技术指导增材制造工艺过程

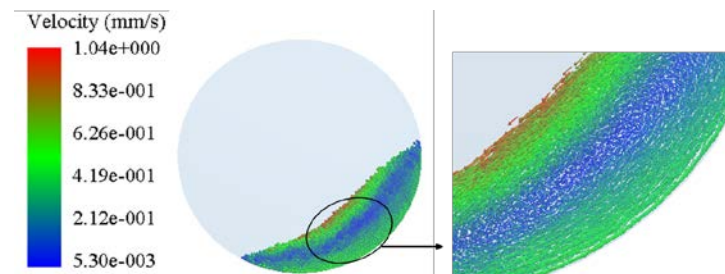
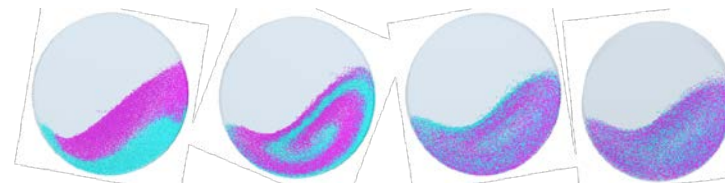
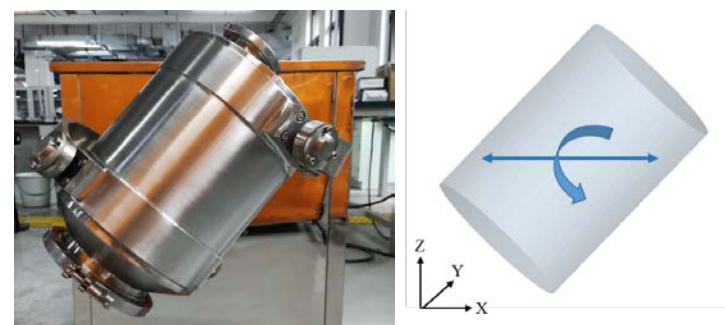
核能领域增材制造零部件、燃料性能与增材工艺过程的加工参数、环境条件等关系密切，对增材制造工艺过程开展仿真技术的研究和应用，能对增材制造质量的提升提供指导作用。



增材制造过程的模拟



增材制造微观组织预测



多材料多种混合方式的模拟

4 增材制造技术在核能应用的展望

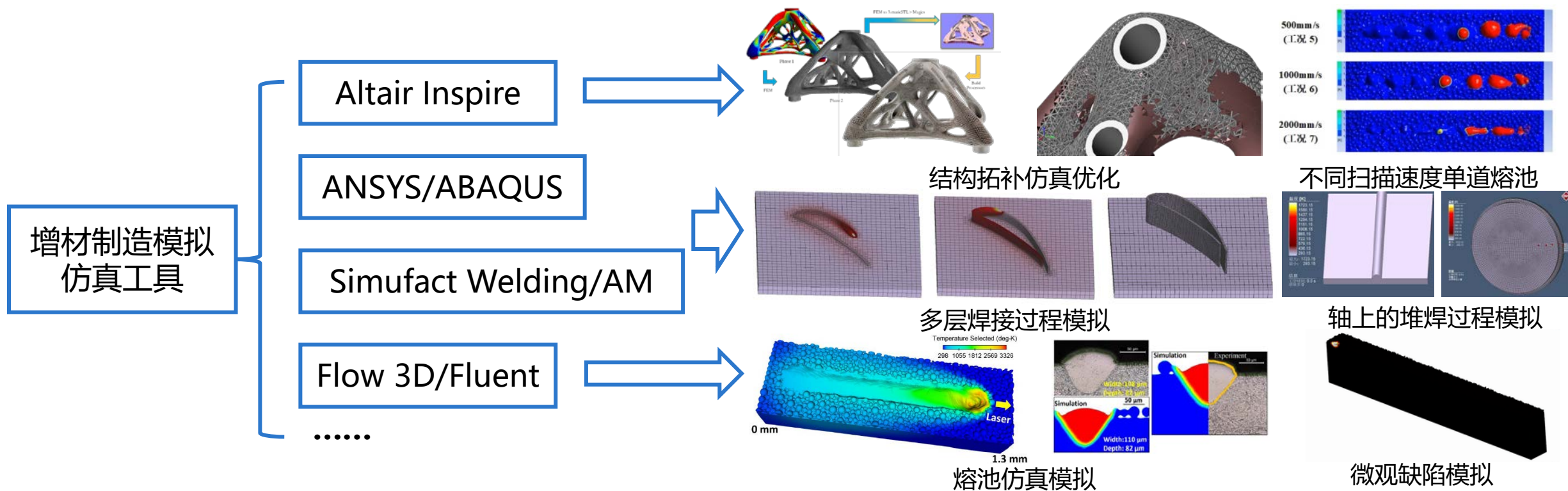
基于仿真技术指导增材制造工艺过程

➤ 对于结构设计:

增材制造+拓扑优化需要模拟仿真理论指导, 以实现系统/部件/零件层面的性能最优设计, 并分析能否生成结构。

➤ 对于工艺分析:

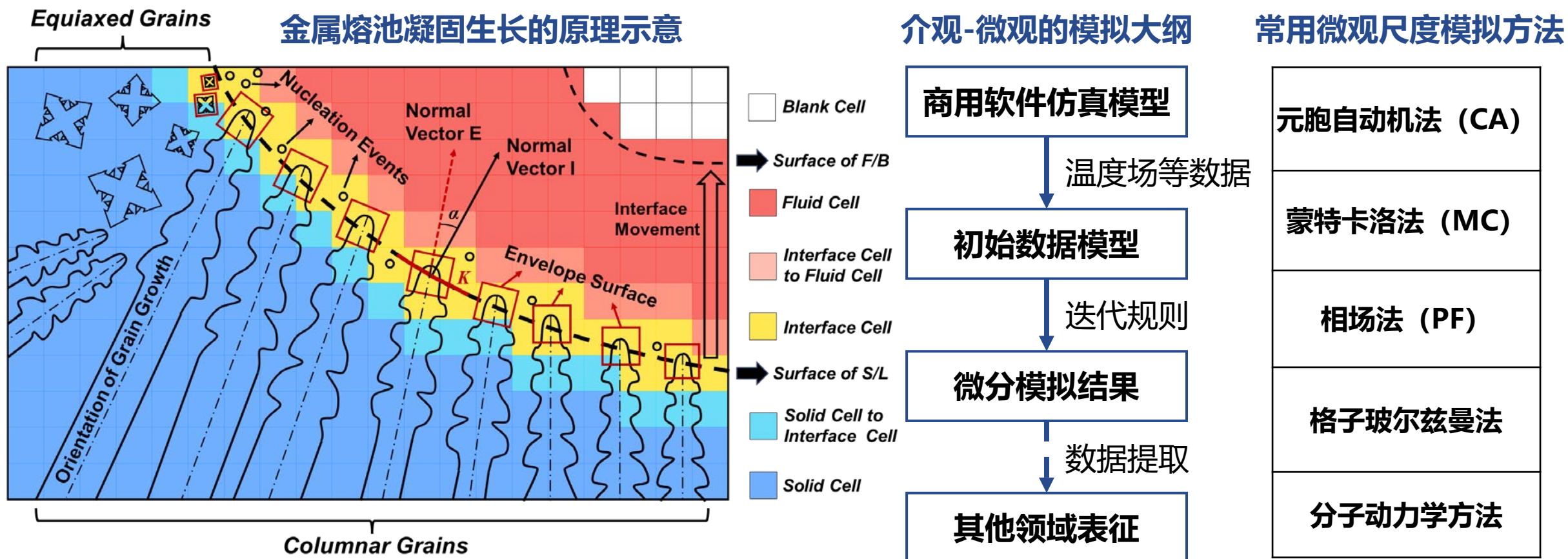
不同工艺参数对于增材过程中的温度场、内应力、微观缺陷等的影响复杂, 最终反馈到成型件性能, 需要仿真指导。



4 增材制造技术在核能应用的展望

增材制造微观组织预测

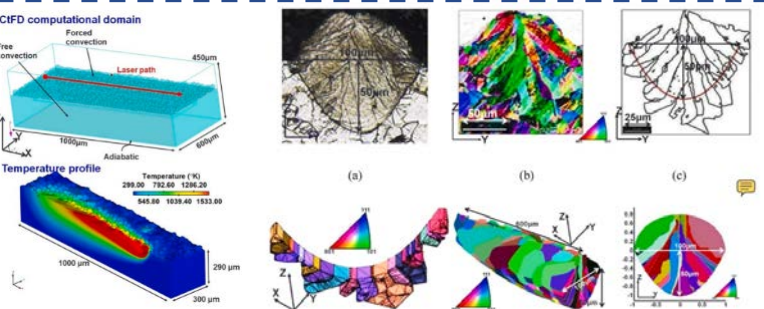
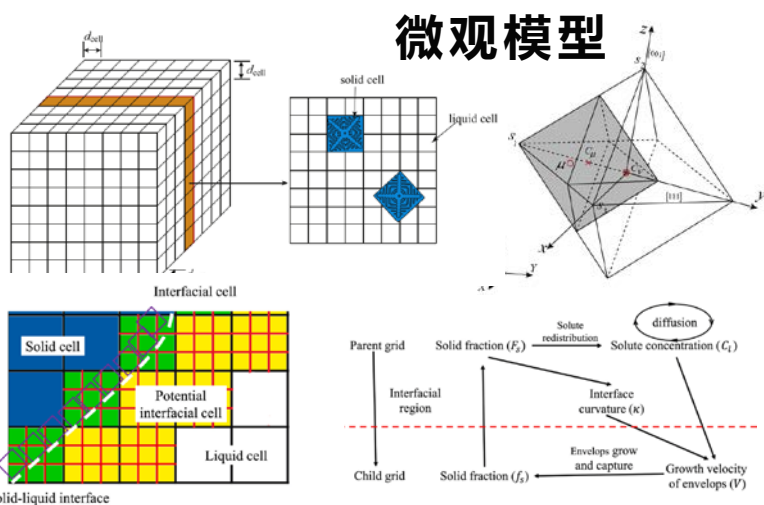
面向金属增材制造过程，不同工艺下金属熔池凝固产生的不同微观结构，最终会反映到样件性能的差距。通过模拟的方法了解和预测制造过程中金属微观组织的特征，将会有重要意义。



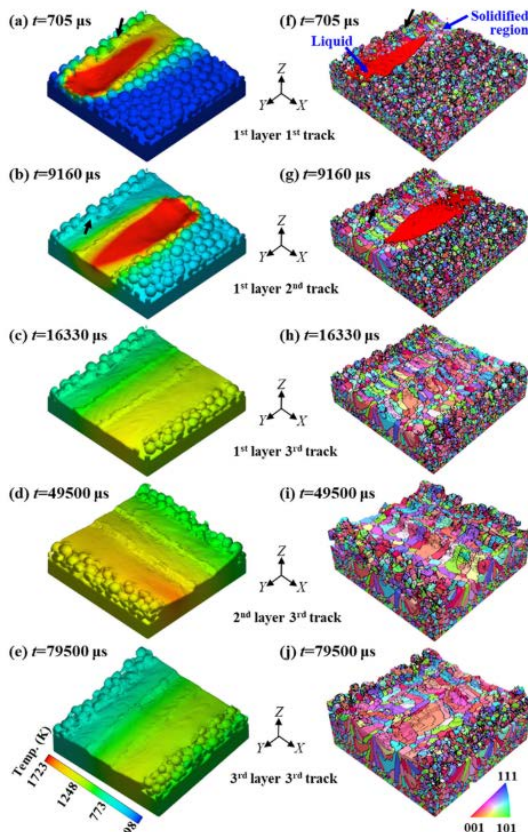
4 增材制造技术在核能应用的展望

增材制造微观组织预测

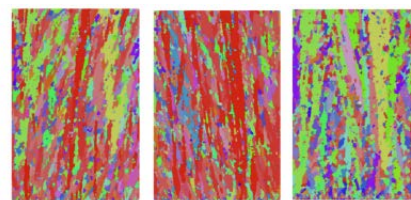
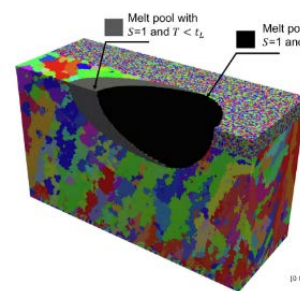
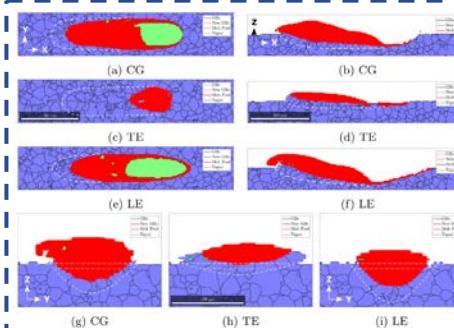
微观尺度仿真流程 (Melt pool->Grain Growth)



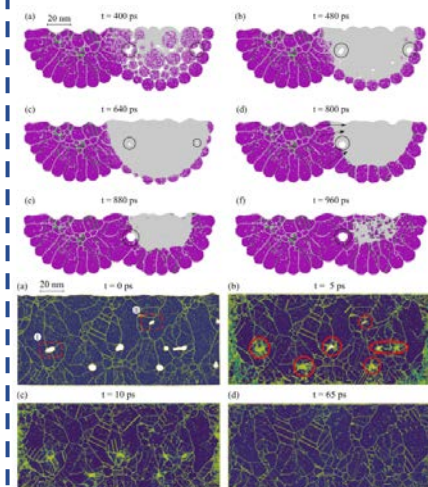
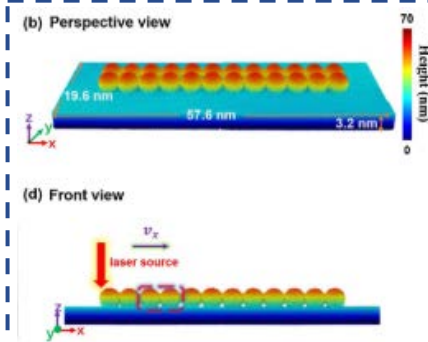
拉格朗日模型



相场法模型



元胞自动机模型



分子动力学模型

谢谢大家！

张琦 教授

18629087688



西安交通大学 机械学院