



中国核动力研究设计院

中核集团

先进核能制造的 机遇与挑战

核能行业协会先进核能制造经验交流会

何戈宁

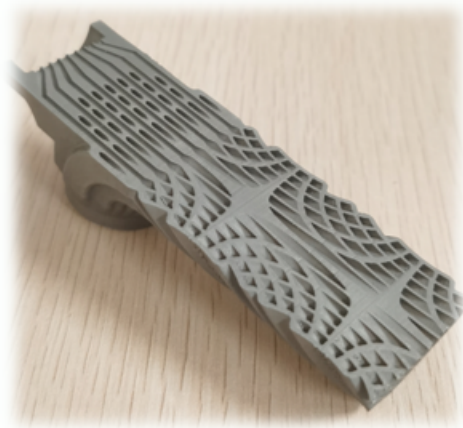
2022.8.23 武威



1

先进制造

ADVANCED MANUFACTURING
TECHNOLOGY





先进制造技术 (Advanced Manufacturing Technology, 简称为 AMT) , 目前尚没有一个明确的、一致公认的定义。

先进制造技术是指微电子技术、自动化技术、信息技术等先进技术给传统制造技术带来的种种变化与新型系统。具体地说,就是指集机械工程技术、电子技术、自动化技术、信息技术等多种技术为一体所产生的技术、设备和系统的总称。主要包括:计算机辅助设计、计算机辅助制造、集成制造系统等。——百度百科

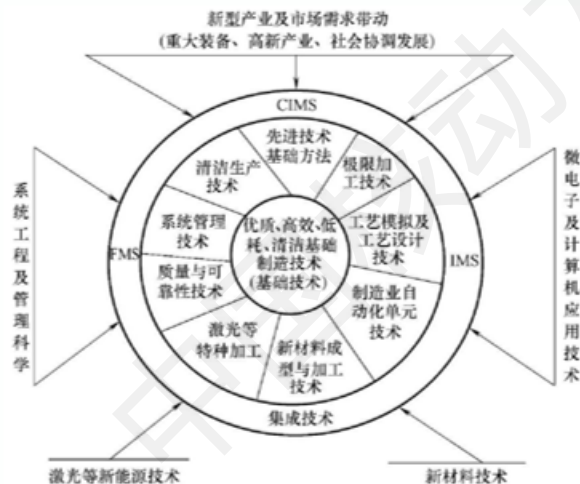
先进制造技术是在吸收机械、电子、信息、自动化、能源、材料以及管理等众多技术成果之后发展起来的,涉及制造业中产品设计、加工装配、检测、经营管理、市场营销等产品生命周期全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,提高对动态多变市场的适应能力和竞争能力的技术群的总称。——《先进制造技术》石文天,刘玉德编著,机械工业出版社

先进制造技术是指在制造过程和制造系统中,融合电子、信息和管理技术,以及新工艺、新材料等现代科学技术,并将其综合应用于产品设计、加工、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁和灵活生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。——《先进制造技术》陈中中,王一工编著,化学工业出版社

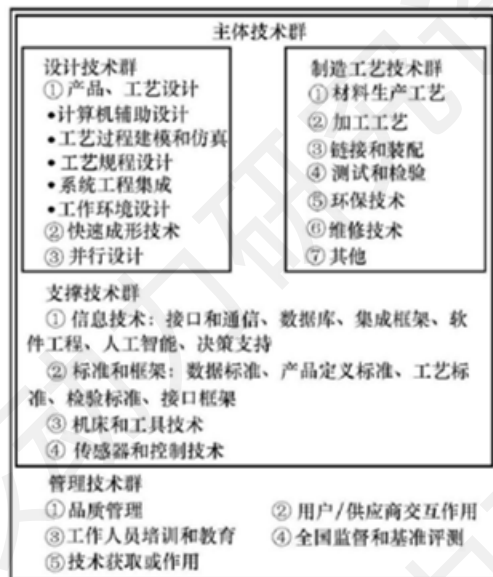




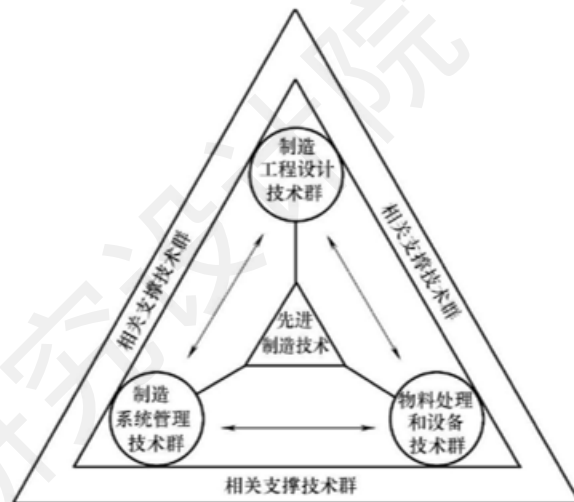
先进制造技术群构架



美国机械科学研究院(AMST)体系图



美国联邦科学、工程和技术协调委员会(FCCSET)

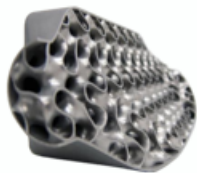


国内学者提出

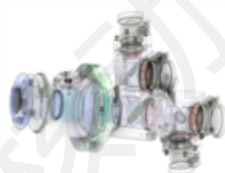


先进制造技术

奥巴马发起成立的“先进制造业合作委员会”，Advanced Manufacturing Partnership，重点规划11个技术领域，认为这些领域将对制造业竞争力的决定起到关键作用。



增材制造



先进传感、测量
和过程控制



先进材料设计、
合成与加工



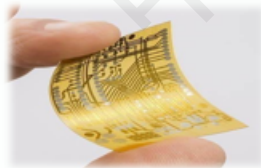
可视化，信息科
学与数字制造



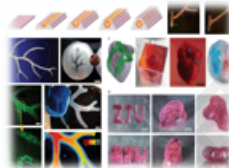
绿色制造



微纳制造



柔性电子制造



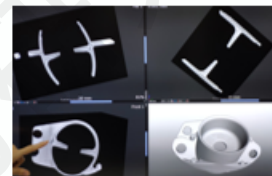
生物制造与生物
信息学



工业机器人



先进成型与连接
技术



先进生产和检测
装备

先进制造技术

特征关键词

先进设计技术、先进制造工艺技术、先进制造模式、现代生产管理技术、先进自动化技术、集成化、网络化、信息化、数字化、智能化、柔性化、虚拟化、极端制造、精密化、绿色制造。

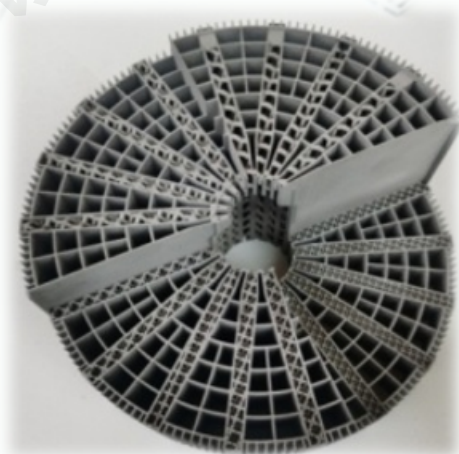
优势关键词

优质、高效、低耗、清洁、灵活生产、柔性敏捷、提高竞争能力。



增材制造

ADDITIVE
MANUFACTURING





增材制造工艺-七种主要工艺 (ISO/ASTM 52900:2015)

Additive Manufacturing Technologies

- ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies defined **7 AM technologies**:

Category	Description
<i>Binder Jetting</i>	Liquid bonding agent selectively deposited to join powder
<i>Material jetting</i>	Droplets of build materials selectively deposited
<i>Powder Bed Fusion</i>	Thermal energy selectively fuses regions of powder bed
<i>Directed Energy Deposition</i>	Focused thermal energy melts material as deposited
<i>Sheet Lamination</i>	Sheet of material bonded together
<i>Vat Photopolymerization</i>	Liquid photopolymer selectively cured by light activation
<i>Material Extrusion</i>	Material selectively dispensed through nozzle or orifice

粘结剂喷射 (3DP)

材料喷射

粉末床熔融 (SLM/EBM)

定向能量沉积 (LENS、WAAM)

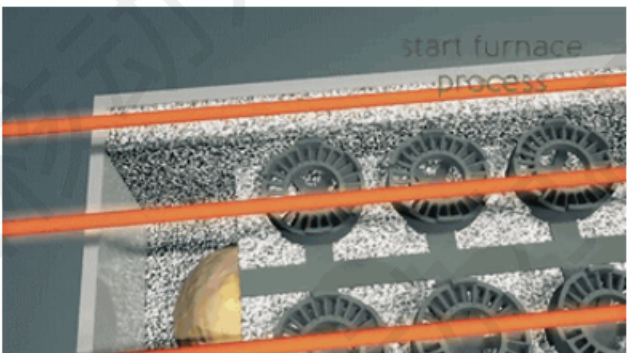
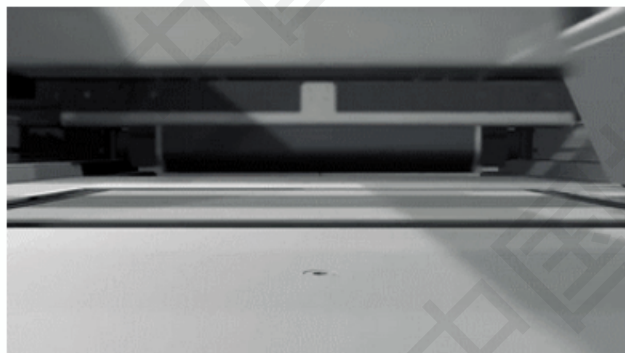
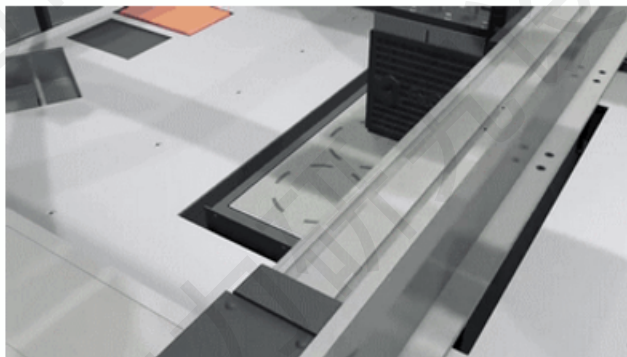
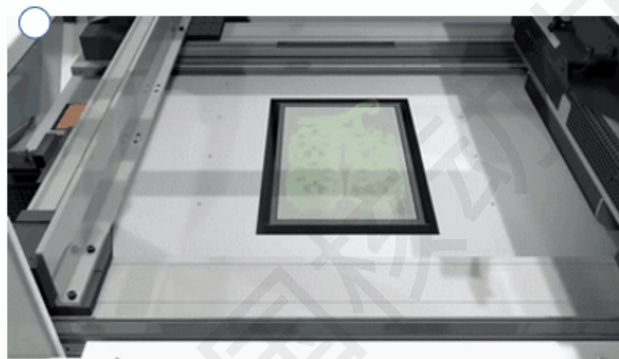
薄材叠层

立体光固化 (SLA)

材料挤压 (FDM)



粘结剂喷射 (3DP)



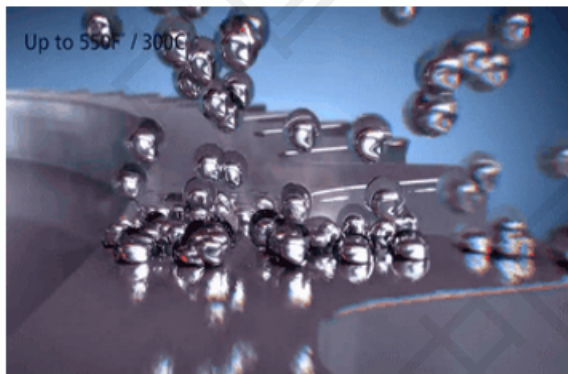
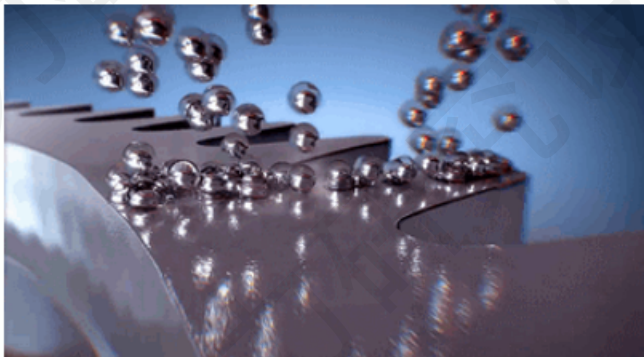
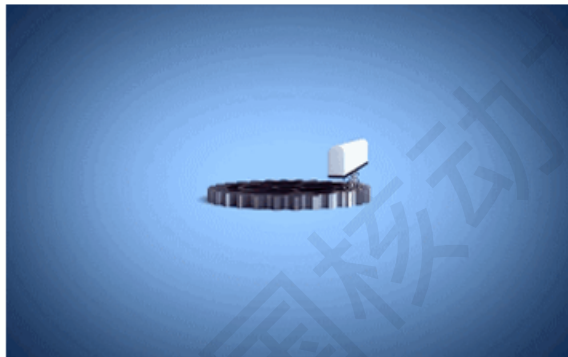
从喷头喷出粘结剂，
将平台上的粉末粘结
成型。**后续另行烧结。**

优点：速度快、无支撑
缺点：精度不高、质量
有限

应用场合：砂模铸造、
陶瓷3D打印、桌面金
属等。



材料喷射



将材料以微滴的形式
按需喷射沉积的增材
制造工艺。

应用场合：有利用材
料喷射技术开展电路
打印的报道。

2022.7，首次部署在美海军
黄蜂级两栖攻击舰2号舰。
(施乐)



粉末床熔融 (PBF)

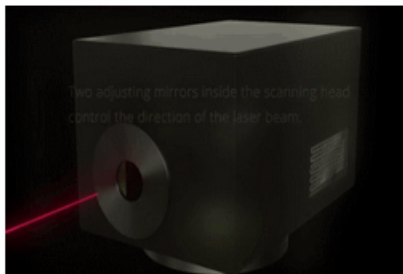
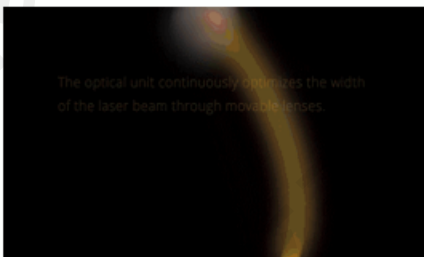
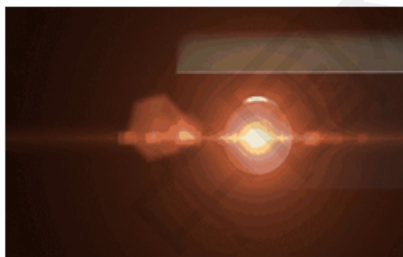
采用精细聚焦能量束快速熔化金属粉末，直接获得任意形状以及具有完全冶金结合的零件。

优点：精度高、质量高、复杂结构直接成型

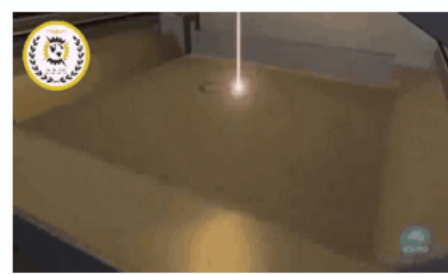
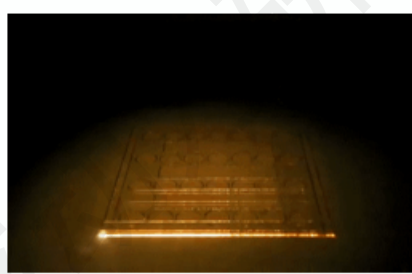
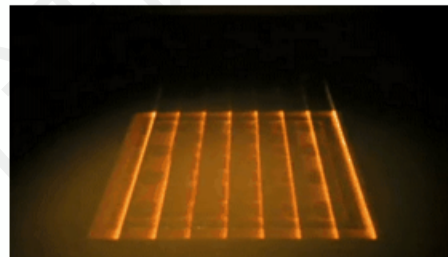
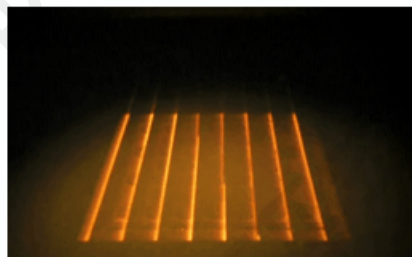
缺点：速度有限、尺寸有限

应用场合：复杂结构件。

激光选区熔化 (SLM)



电子束选区熔化 (EBM)



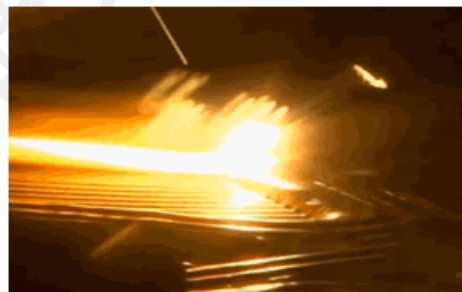
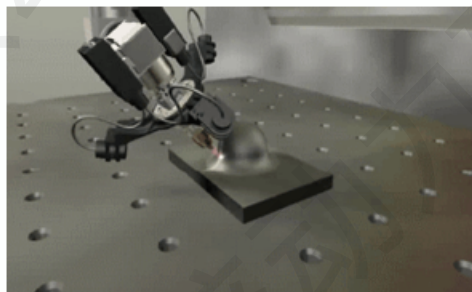
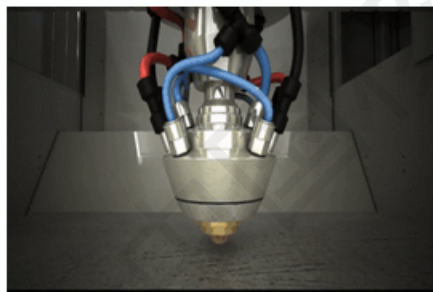


定向能量沉积 (DED)

利用聚焦热能将材料同步熔化沉积的增材制造工艺，通常采用：激光、电子束、等离子束或电弧等作为聚焦热能。

优点：制造效率高、制品性能可靠、制造成本相对较低、尺寸基本不受限制。

缺点：复杂结构无法处理、通常需要后续加工。



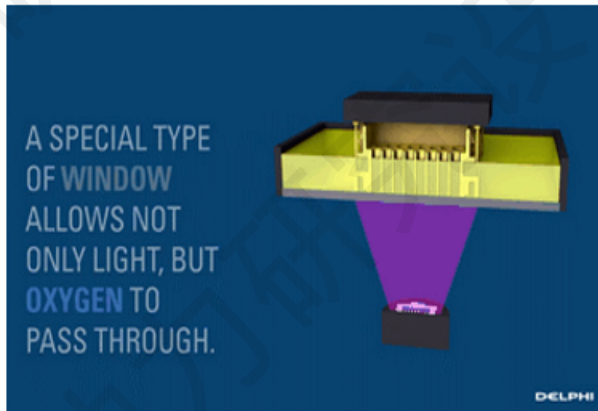
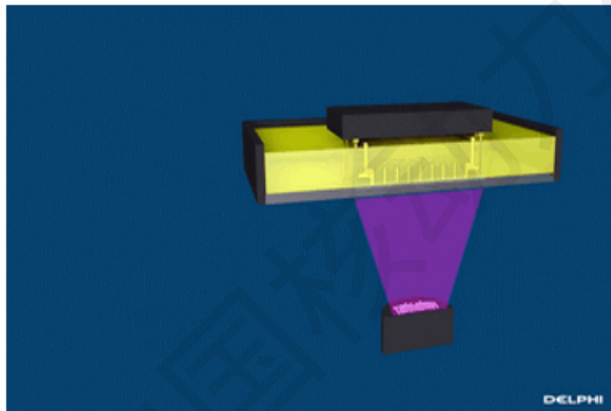
激光/电子束/等离子束 送粉

电弧/激光/电子束/等离子束 熔丝

应用场合：难加工大件制造、增材修复、表面工程。



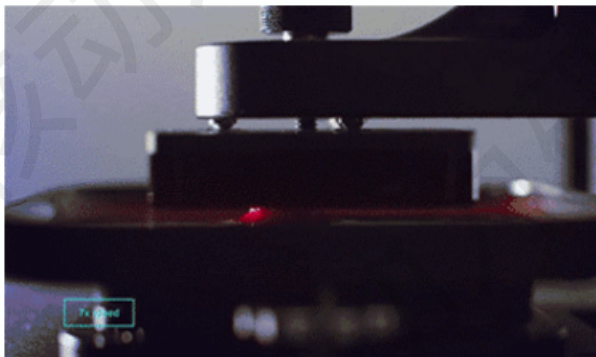
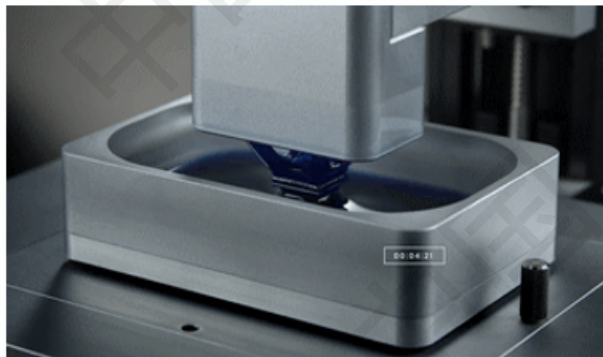
立体光固化 (SLA)



过光致聚合作用选择性
地固化液态光敏聚合物的
增材制造工艺。

优点：速度快、复杂结构

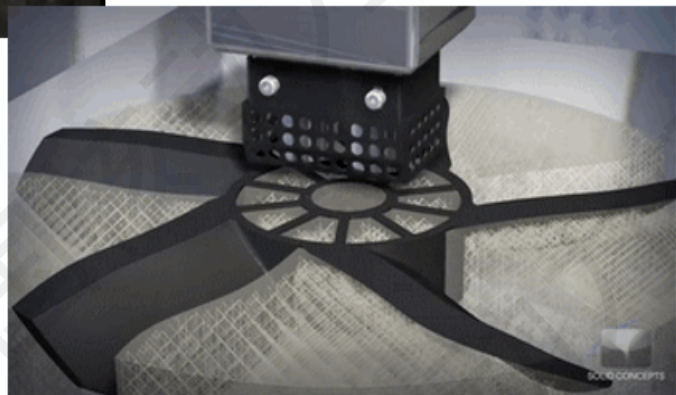
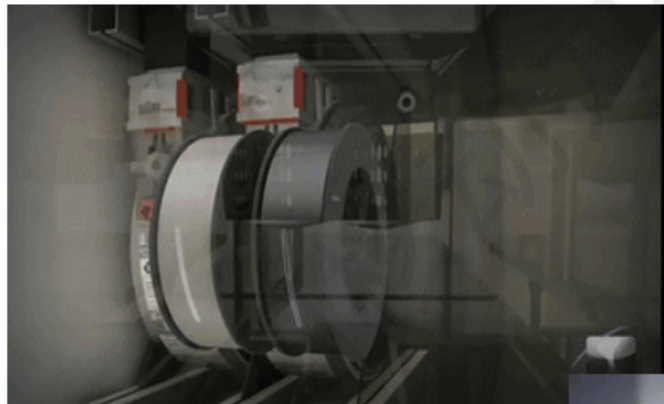
缺点：材料受限



应用场合：非金属材料、陶瓷3D打印。



材料挤压 (FDM)

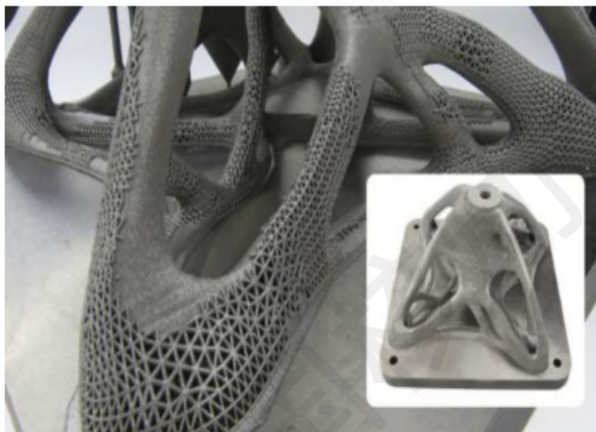


利用高温将材料熔化，
通过打印头挤出成细丝，
在构件平台堆积成型。

优点：技术简单、通用、
桌面化、多材料（水溶
支撑）

应用场合：塑料、
PEEK、复合材料（碳
纤维）、桌面金属

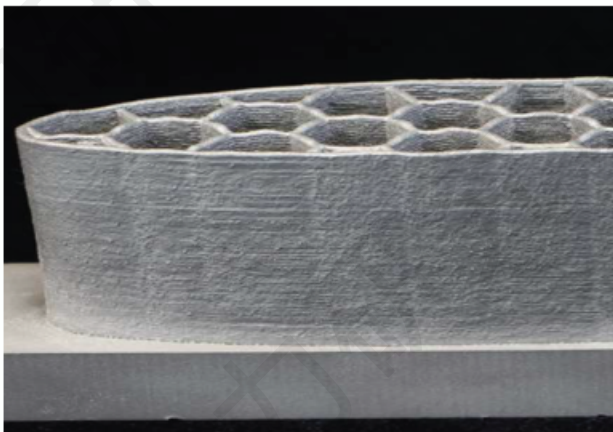
技术成熟度高、可以实现工业实际应用的金属增材制造技术：



激光选区熔化

- 尺寸限制：0.6m*0.6m*1.5m
- 尺寸精度： $\pm 0.1\text{mm}$
- 制造速度：0.1-0.2kg/h
- 表面粗糙度：Ra6.3（上、侧面）
Ra12.5（下面）

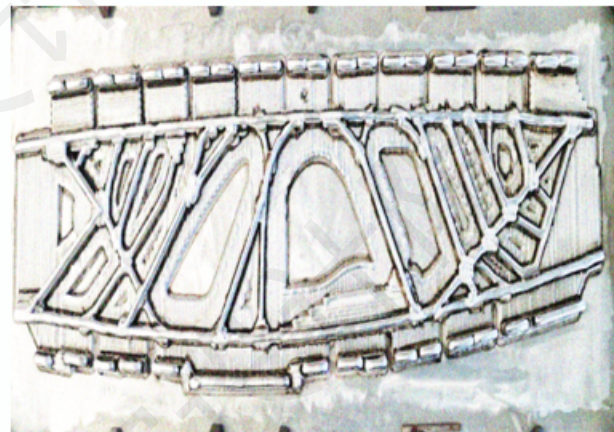
表面粗糙度还可通过后处理提高。



激光同轴送粉

通常需机加工后使用

- 机加工余量：1-3mm
- 制造速度：0.7-1.5kg/h



电弧熔丝

需机加工后使用

- 机加工余量：3-5mm
- 制造速度：1.5-5kg/h

常用材料同牌号制品性能可以稳定达到锻件验收指标要求



增材制造



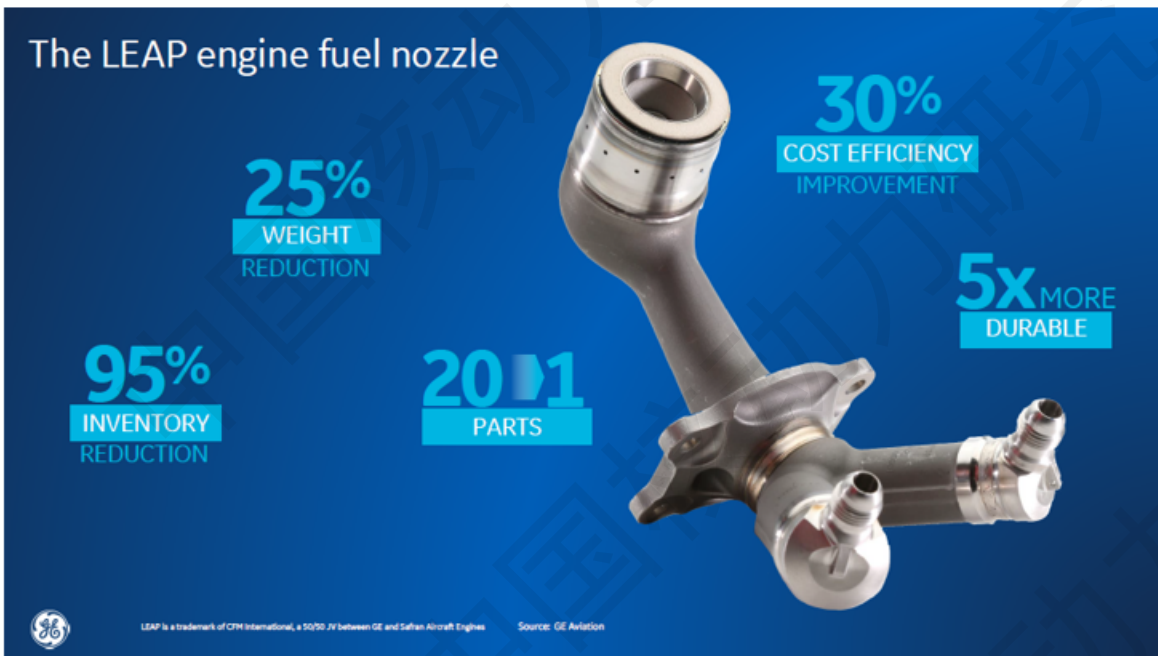
中国核动力研究设计院

中核集团

GE-

从基于增材全新设计的喷油嘴开始，发掘增材制造应用价值，逐步建立起了增材制造的庞大产业链。

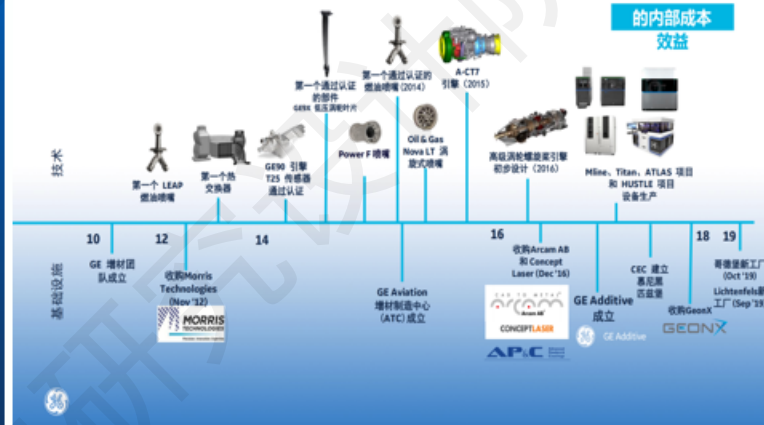
2021年，已完成100000个燃油喷嘴制造及应用。



GE 的增材制造之旅 ...

50 多亿美元

的内部成本
效益



通过并购重组，GE实现了产业链完全控制

*以上资料来源：GE



GE-

最先新研发的发动机上，批量应用了3D打印技术，每一处应用都凸显价值。



GE9X发动机，含304个3D打印零件
2020.9获得FAA适航认证



T25传感器壳体

10个零件合1，提高
10%检测精度



导流器

13个零件合1，
提高2倍使用
寿命



涡轮叶片

重量减少20%，推力提高
10%



燃油喷嘴

20个零件合1，
重量减少25%，
成本减少30%，
量产100000个



燃烧室混合器

重量减少6%，提高3
倍使用寿命



热交换器

163个零件合1，重量减轻
40%，成本减少25%，提
高使用寿命

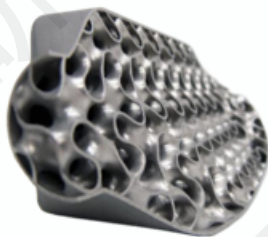
□ 换热设备



Conflux



nTop



意大利Aidro



GE、马里兰大学、橡树岭国家实验室



UTC、America Makes、Stratronics、3DSIM、3rd Dimension、普惠航空



AddUp、Sogecclair、TEMISTh



TEMISTh

增材制造可以便捷的实现异形、结构一体化、薄型翅片、微通道、点阵结构等创新设计，满足了换热设备趋向紧凑型、高效性、模块化的发展趋势。

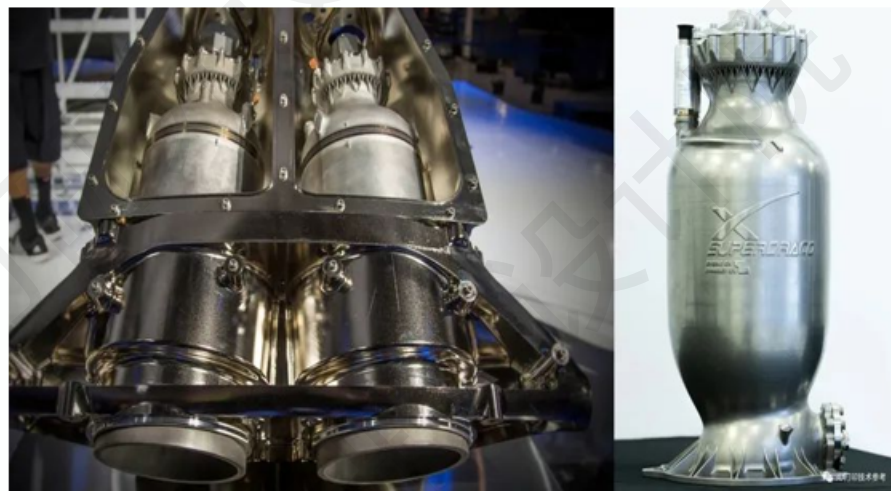
基于增材的换热设备成为国外机构争相研究的热门领域，目前国内研究较少。

航天

结构部件的**拓扑优化**，助力航天增材制造产品重量大幅减低，批量应用。



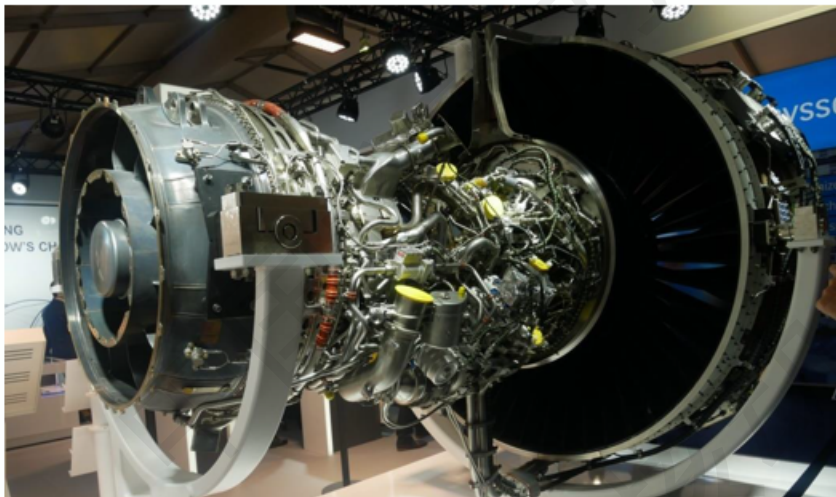
例：天问一号变推力发动机等部件大量采用3D打印零件。实现重量降低、体积减小。



例：SpaceX龙飞船火箭上含有大量的3D打印零件。实现了重量的减轻。

航空

大型构件高效快速制造，结构部件的拓扑优化，助力增材制造在航空领域大量应用。



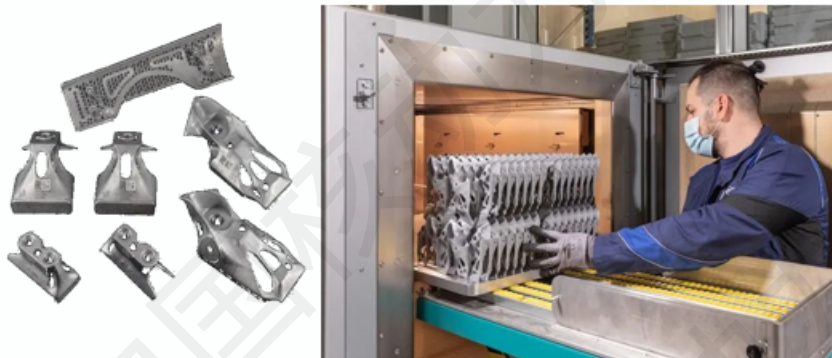
除GE外，波音、空客、普惠、赛峰等国外航空巨头均开展了增材制造技术研究，实现了增材制品的大量应用。

我国新一代军机已普遍使用3D打印技术。
国产大飞机C919也已实现了增材制造制品应用。

机型	说明
歼-15	大量运用钛合金和M100钢3D打印，制造起落架等主承力部件
歼-16	已采用3D打印技术
歼-20	全面应用3D打印技术
歼-31	运用大量3D打印部件，包括钛翼梁，4个激光钛合金主承力构件加强框
运-20	6种机身/主起落架接头大型主承力构件采用3D打印制造

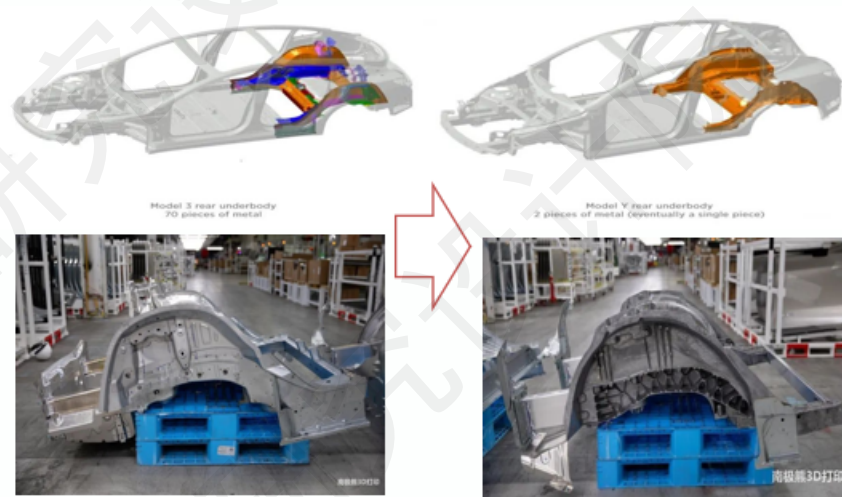
汽车

增材制造技术，在汽车研发、制造中应用前景广泛。



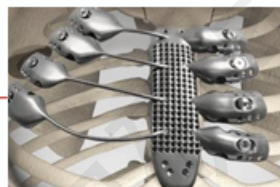
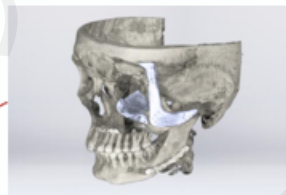
宝马2020年建立增材制造中心。中心囊括了当今市场范围内几乎所有最为先进的3D打印装备和最广泛的技术门类。

图为宝马采用3D打印工艺为劳斯莱斯开发零件。



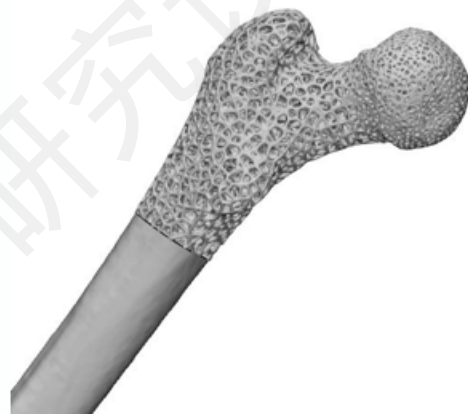
图为特斯拉Model Y车型后部底盘，应用增材制造技术将从70个零件合并为1个。应用3D打印技术拓扑优化创成式设计，提高了质量和性能。

□ 医疗



3D打印技术已经走入每个人身边。

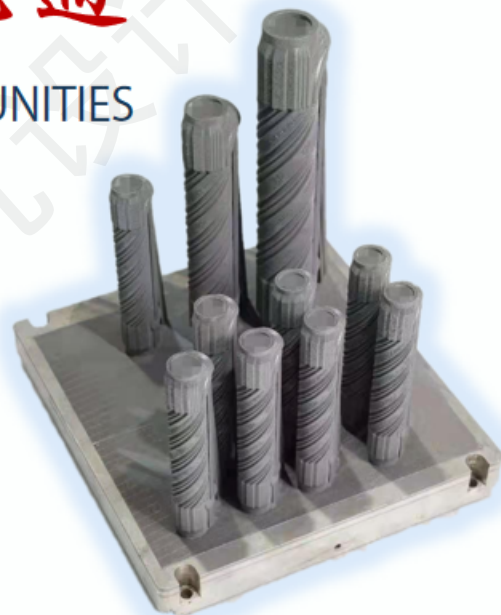
广泛应用于医疗领域。
国内标准体系（团体标准）已逐渐成型。





价值与机遇

VALUE AND OPPORTUNITIES



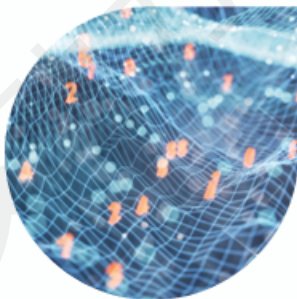


增材制造具备5大优势



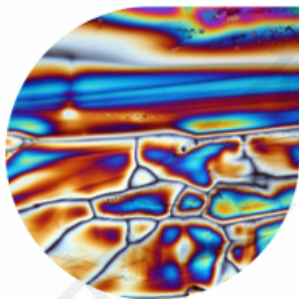
设计

研发出性能达到跨越式提升的新产品



数字化

AI、DT、BD等下一代数字化技术赋能，带来巨大提升



材料

增材制造是全新的制造成型方式，为新材料研发应用带来无穷可能



快速高效

梳理发掘增材制造技术本身的应用价值



链条重塑

研发流程、应用维护流程、产业链、价值链格局重塑。

✓ 设计优势

基于增材制造思维的设计-DfAM (Design for Additive Manufacture)

3D打印技术最大的价值在于**极大的降低了制造对设计的限制**，释放设计自由度，使原来无法在传统工业中实现的创新设计成为可能，从而**研发出性能达到跨越式提升的新产品**。



3D打印的价值台阶



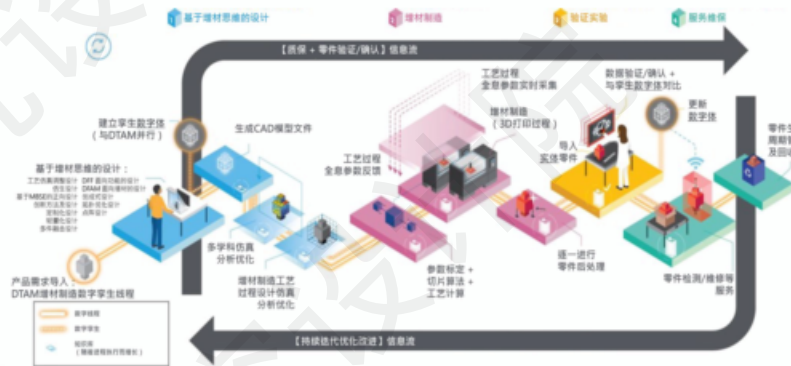
DfAM不是在原设计上修改，而是颠覆性的创新设计。增材制造技术改变了产品的设计理念，有望实现从“制造约束设计”向“功能引领设计”的转变。

✓ 数字化优势

增材制造是典型的智能制造技术。
可以实现产品研发**全周期完全数字化**。

产品本身数字化

从产品结构、制造工艺，到产品质量的所有信息均可实现完全数字化表述：
产品变为拷贝到打印机即可制造的文件。
实现真正的数字化供货



研发全周期流程数字化

从产品研发流程，制造、检验流程，甚至运行维保流程，均可通过数据链路联通。

AI、大数据等下一代数字化技术赋能，带来巨大提升

✓ 材料优势



新材料

增材制造全新的材料成型方式，为新材料研发带来了全新的思路

- 适合3D打印的新材料
- 复合材料
- 弥散（强化）材料
- 高熵合金



基因组

3D打印基因组，指每一组工艺的组合，都对应着相应的制品性能，可实现材料智能研发

- 性能预测与调控
- 智能工艺优化
- 数字化技术赋能



表面工程

基于增材基础的激光熔覆等技术，表面工程处理解决耐蚀、耐磨难题

- 超高速激光熔覆
- 耐磨涂层
- 轴承合金熔覆

✓ 快速、高效优势

增材制造“净成型/近净成型”特点，大幅提升材料利用率，带来**快速、高效**的优势，有望实现**制造成本大幅降低**。

表面看，制造成本不占优势，选择合适的零部件可以充分发挥优势。

供应链紧凑
制造快速



材料利用率高
加工量小
分布式制造

“买飞比BTF” (Buy-to-Fly ratio)。这个术语源于航空航天，BTF是原材料的重量除以最终成品的重量，描述了制造过程中浪费了多少材料。

增材制造供应链短小易控、制造速度快、制造工艺完全数字化可重复性高、基本摆脱对人员技术的依赖、材料利用率高。利用综合优势实现制造成本降低。



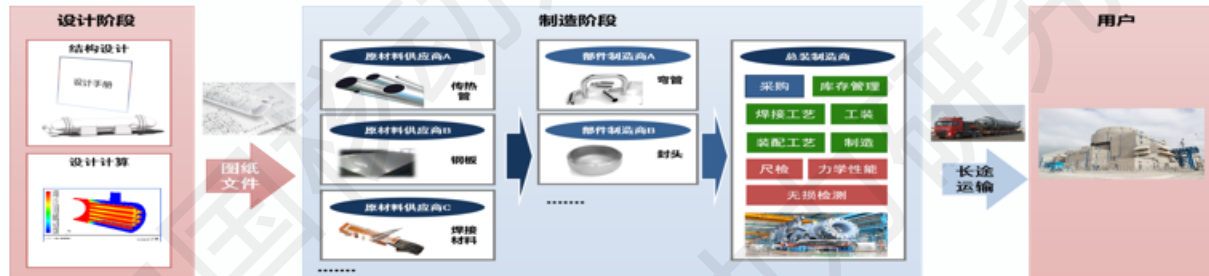


✓ 链条重塑优势

增材制造将带来研发流程、制造流程的变革，产业链、价值链格局的改变。

全新的数字化分布式敏捷柔性制造的格局，将支撑起全新的战略应用场景，凸显链条重塑优势。

传统产业链



增材产业链



制造产业链重塑

- 制造技术数字化，易于复制转移，保障供应链安全；
- 全数字化供货，分布式制造；
- 敏捷数字维修、数字仓储，提升保障能力。

4

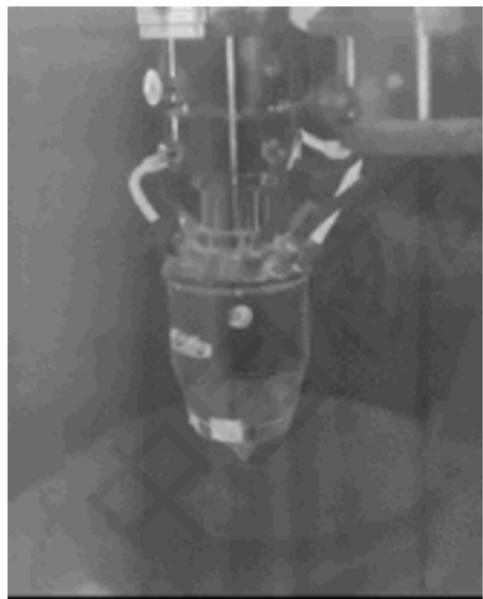
研究现状

RESEARCH STATUS





美国橡树岭国家实验室



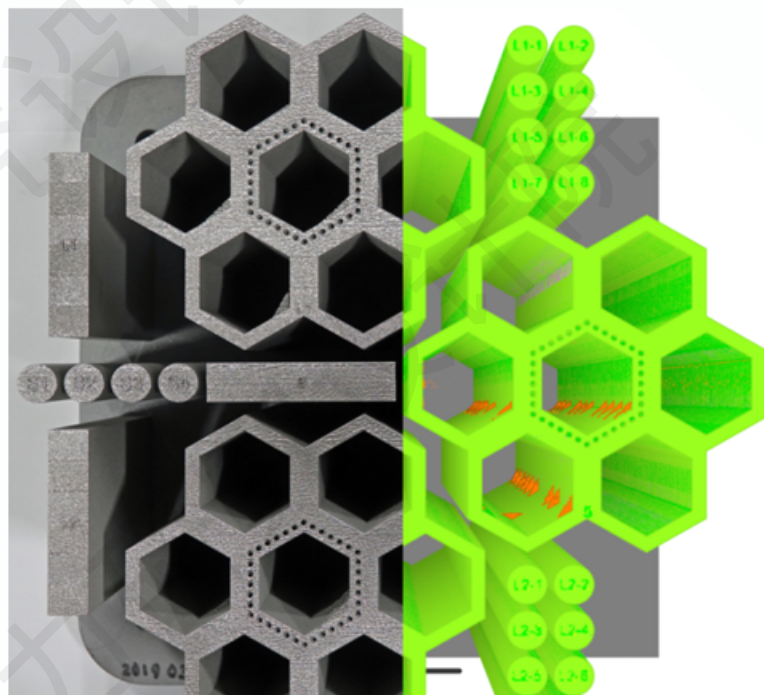
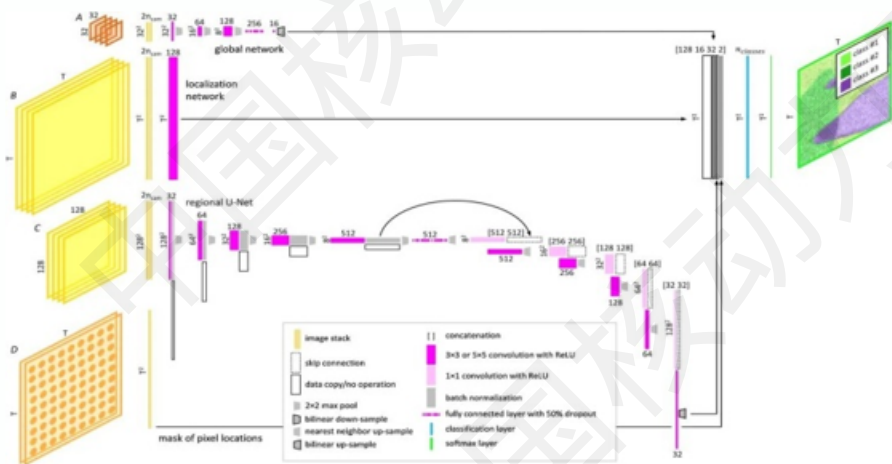
美国橡树岭国家实验室“转型挑战反应堆（TCR）示范计划”

最终目标是在2023年之前制造一个先进的、全尺寸的3D打印反应堆，并集成传感器和控制装置。

“整个TCR的概念之所以能够实现，是因为快速成型制造工艺技术的重大进步。通过使用3D打印技术，我们可以使用过去几十年来核工业界无法利用的技术和材料。这包括用于近乎自主控制的传感器和数据库，以及一种新的加速鉴定方法，这将使整个核工业界受益。”



美国橡树岭国家实验室在TCR项目中。采用卷积神经网络结构（CNN）的像素定位技术（**AI技术**）来获得每层堆积时的粉末床的影像数据进行3D打印时的质量监控手段，以**确保反应堆关键部件的核级质量**。





美国西屋电气

2014年已开始布局开展3D打印技术研究。

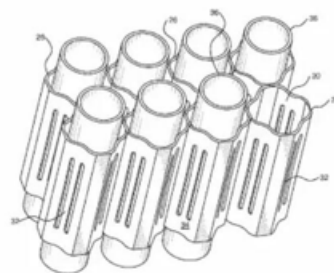
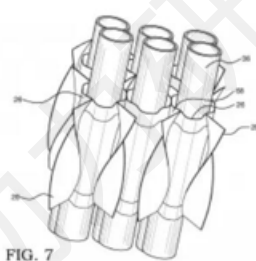
西屋在2020年拜伦1号核电机组春季大修期间，已将3D打印部件安装到Exelon的拜伦1号反应堆内。



基于DfAM，开发了3D打印的核燃料组件格架，并申请了专利。

优势：

- 1) 高度精细且完全集成的结构，；
- 2) 增强热工水力性能，降低流动阻力；
- 3) 提高格架支承性能。





法国法马通

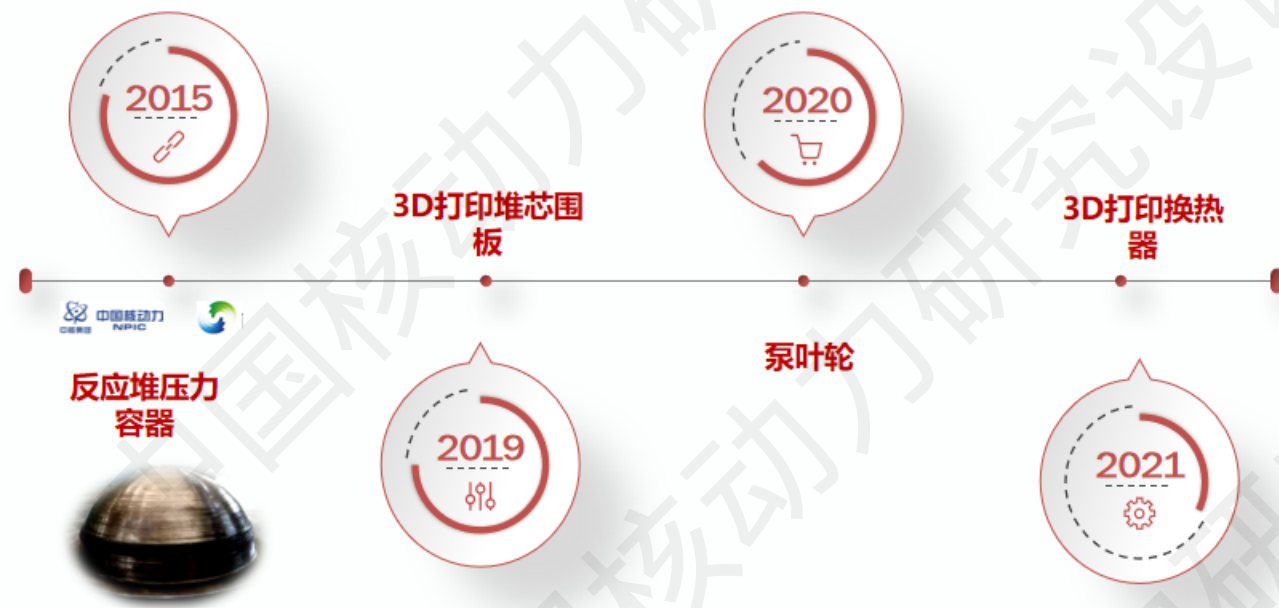
2015年，法马通在德国埃尔兰根实验室启动增材制造项目，项目重点在于使用增材制造技术制造不锈钢和镍基合金燃料组件。

2020年11月，法马通通过3D打印技术生产的燃料组件已在瑞士戈斯根(Gösgen)核电厂完成首个辐照检测周期。这批实验性不锈钢和镍基合金部件于2019年载入戈斯根核电厂反应堆。

法马通计划使用增材制造技术为压水堆、沸水堆和VVER机组生产燃料组件。



NPIC是国内核领域最早开始并系统性持续开展增材制造研究的单位。



- ◆ 工信部3D打印应用示范单位
- ◆ 国家增材制造创新技术中心委员会理事单位
- ◆ 中国增材制造产业联盟理事单位

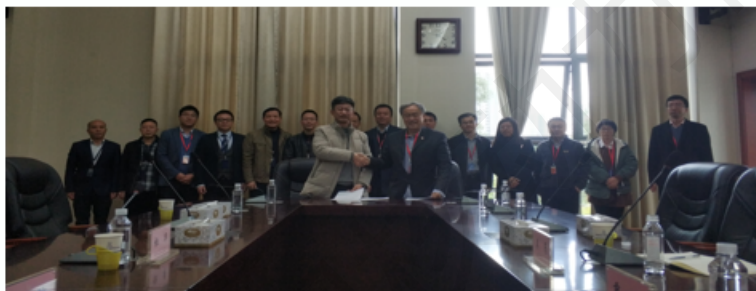


研究现状-核动力院研究情况

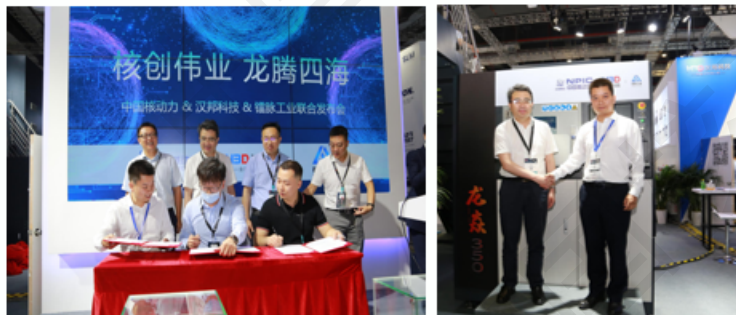


中国核动力研究设计院

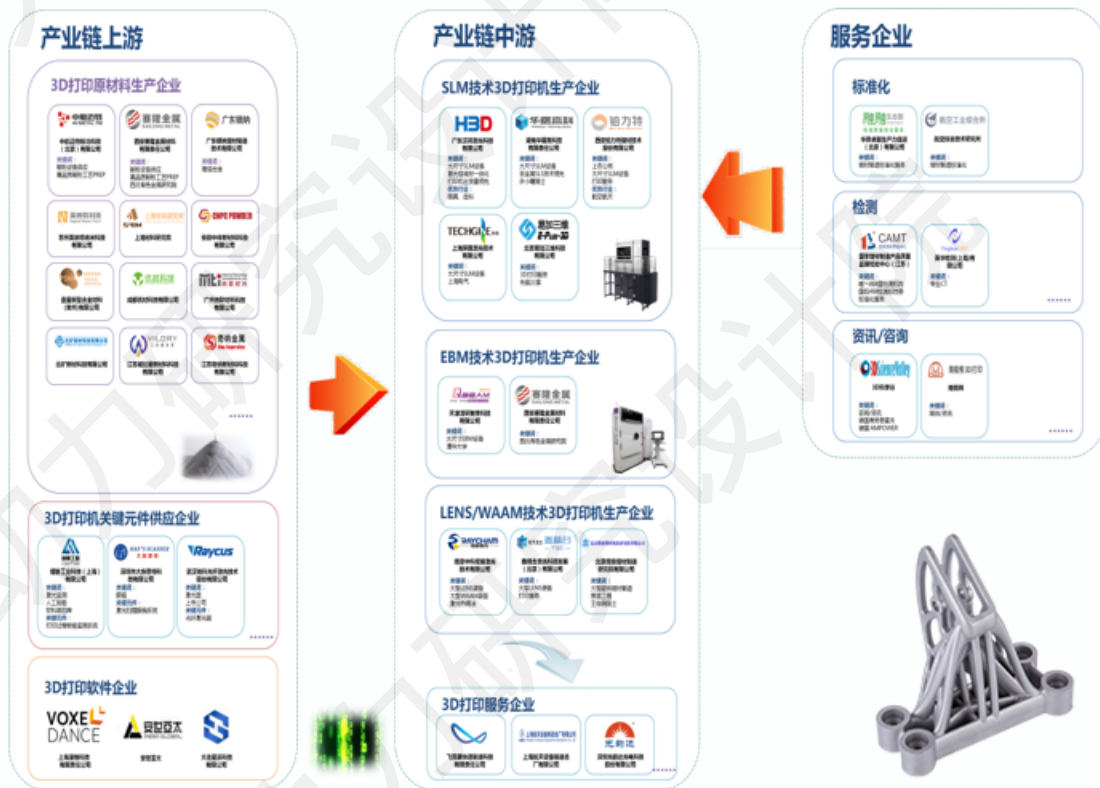
依托工信部“3D打印一条龙平台”开展了广泛的产、学、研、用合作交流。



国家增材制造创新中心签订战略合作



亚洲3D打印展与合作企业联合发布会



增材制造产业合作地图



➤ 利用增材技术缩短研发周期

增材制造可显著缩短研发周期，降低研发成本，实现设计、试验的快速迭代和优化。

示例：泵水力部件优化



非金属3D打印叶轮（ABS）

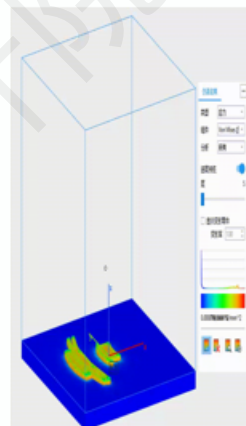
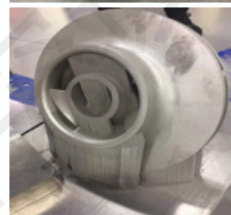
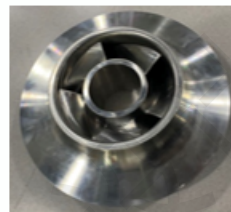
第一阶段

3D打印非金属叶轮快速原型迭代，大幅减少了水力验证试验项次，节约了80%的研发迭代周期。

第二阶段

定型水力验证试验用金属叶轮，传统为压铸，需开模。时间大于4个月，成本大于12万元。

3D打印时间小于1个月，成本小于4万元。



从部件级向设备级、系统级应用推进。

增材制造对新型号快速研发迭代带来的效果将愈发明显。



➤ 利用增材技术解决材料问题方面

增材制造全新的材料成型方式，为新材料研发带来了全新的思路。

能量源小范围集中供给到指定区域、微区冶金形成材料性能。这种模式更易于实现材料的性能控制，为材料性能提高、新材料研发、材料表面工程处理带来更多可能，**满足未来新型核能对高性能材料的需求。**



示例：硼不锈钢

硼在钢中的固溶度很低，钢中硼含量达到一定指标后，铸锭偏析、锻造成型性能差、可加工性差等问题凸显，难以进一步提高硼含量指标。

目前，我院正在基于增材制造技术开展先进硼不锈钢的材料研究，**已经初步获得了良好的解决方案。**





➤ 利用增材技术提升设备性能

颠覆换热设备性能，重量、体积降低80%以上。

功能验证结果

某换热器

现有设计：

质量：119kg
轮廓尺寸：
925mm × 425mm × 637.1mm
零件数：65
制造周期：4个月
制造成本：10万元
换热功率：4kW
流动阻力：6kPa

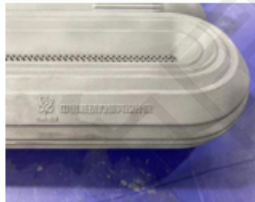
3D打印替换换热器 材料：SS316L



1号换热器（比例1.0）
质量：3.5 kg ↓97%
实测热功率：7kW
实测流阻：< 1kPa

2号换热器（比例0.8）
质量：1.8 kg ↓98%
实测热功率：7kW
实测流阻：5kPa

3号换热器（比例0.6）
质量：0.76 kg ↓99%
实测热功率：10kW
实测流阻：20kPa



某换热器

现有设计：

质量：248kg
轮廓尺寸：1660mm × 410mm × 380mm
零件数：~500
制造周期：12个月
制造成本：80万元
换热功率：60kW
流动阻力：40kPa

3D打印换热器

材料：SS316L

质量：20 kg ↓92%
轮廓尺寸：400mm × 360mm
× 60mm ↓97%
零件数：1 ↓99.8%
制造周期：0.5个月 ↓95%
制造成本：10万元 ↓87%

单台：

换热功率：82kW
流动阻力：120kPa

两台：

面积余量：108%
流动阻力：35kPa



引入模块化设计理念，
创新不同换热功能一揽子解决方案
国家工业强基工程重点产品
性能国际领先水平



➤ 利用增材技术进行快速高效制造

传统制造性能已达瓶颈，周期长，材料利用率低

增材制造技术天然具有更好的材料均匀性，微区冶金的原理使性能摆脱了部件厚度的限制，更好的材料性能控制手段可以有效提高合格率，“净成型/近净成型”特点大幅提升材料利用率，降低制造成本。

示例：主管道增材制造

传统工艺复杂，材料利用率低，成本周期居高不下。

完成了主管道增材制造方案编制，采用增材技术，简化工艺流程，预期可以大幅降低周期和成本：

制品性能与锻件相当或提升

制造周期大幅降低：↓ 50%

材料利用率：↑ 40%

制造成本降低：↓ 25%

其他收益：工艺数字化，使得供应链安全得到更好的保障



➤ 发掘智能制造数字化优势方面

示例：3D打印过程智能监测系统研发

产品数字化

产品设计、制造、工艺均可
实现完全数字化表述



已经初步实现了产品数字化

产品变为设计信息、打印工
艺信息、扫描路径信息的电
子文档。



制造过程数字化

可实现产品质量的数字化表达



痛点！

制造过程中发生了什么？不知道。
打印机运行是否稳定？不知道。
核心制造数据？无渠道获得。

制造过程无监测，
不能满足核级制品质量保证要求！

制造数据缺乏，
阻碍数字化制造技术进一步发展！



●为了解决增材制
造在核能领域应用
的痛点。

●同时为打通增材
制造与数字化技术
的桥梁链接。

开展了3D打印过程
智能监测技术研究。

➤ 发掘智能制造数字化优势方面

示例：3D打印过程智能监测系统研发

突破了关键技术：

- 高性能熔池质量监测传感技术
- 高频率信号采样存储技术
- 人工智能信号评价分析技术

完成了软硬件系统的设计、样机制造、并在国产3D打印机上完成了测试。

系统可以有效识别增材制造过程中的各类异常事件，目前国际领先。



开发满足核能应用要求的打印机



开发打印过程智能监测系统
睿眸智能监测系统

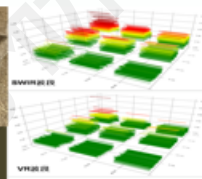
小核心大协作
需求牵引、产业联动
联合开发、打通瓶颈



中国核动力
NPIC



监测信号与物理现象高相关



监测结果逆构与实际比较
(准确识别局部过热)





展望与挑战

EXPECTATION





展望

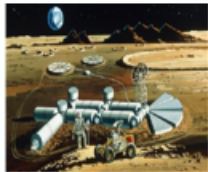


中国核动力研究设计院

中核集团



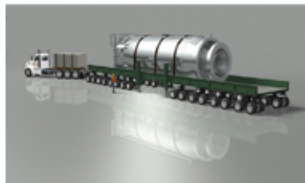
浮动核电站



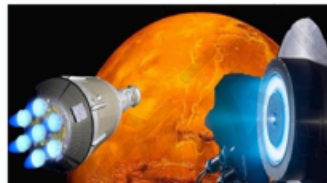
星球核电源



小型核电



车载核电源



核能空间推进

新时代，全空间多种应用场景
对核能的经济性、高效性、紧
凑性、小型化、智能化提出了
前所未有的挑战



增材制造预计将从设计、制
造、运维等方面对核领域产
生全面的影响

增材制造与核能技术的融合大有可为



增材制造可释放设计自
由度，实现降低重量、
减小体积、提高性能、
效率、安全性等目标。



增材技术在核行业应用痛点：缺乏标准

增材属于前沿创新技术，核行业增材制造标准化工作明显滞后于增材制造技术的发展。

目前，国内外核行业均缺少相关标准及监管政策指导增材制造制品的评估验证及应用。

因此，全球核能领域增材制造的核级制品基本停留在技术成熟度6级，**尚没有实现实际应用。**

国家标准化管理委员会
工业和信息化部
科学技术部
教育部
国家药品监督管理局
中国工程院

国标委联〔2020〕5号

关于印发《增材制造标准领航行动计划
(2020—2022年)》的通知

2020年，工信部等6部门联合印发《增材制造标准领航行动计划》

其中，指出需要**推进三个特色领域的应用标准研制**，核工业即为其其中之一。



挑战

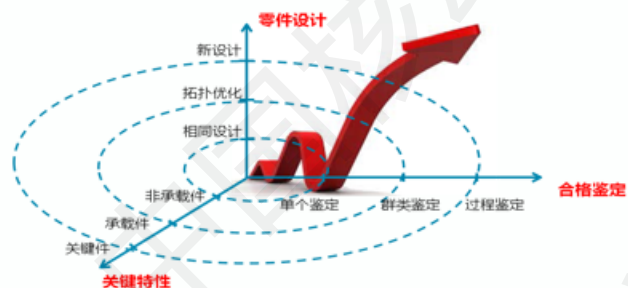


中国核动力研究设计院

中核集团

解决途径：结合行业实际，以我为主，突破核能增材制造标准化技术。

鉴定技术体系



推进核领域**初始应用**

设计数据构建技术



支撑**设计标准**

标准体系



推进核领域**系统应用**

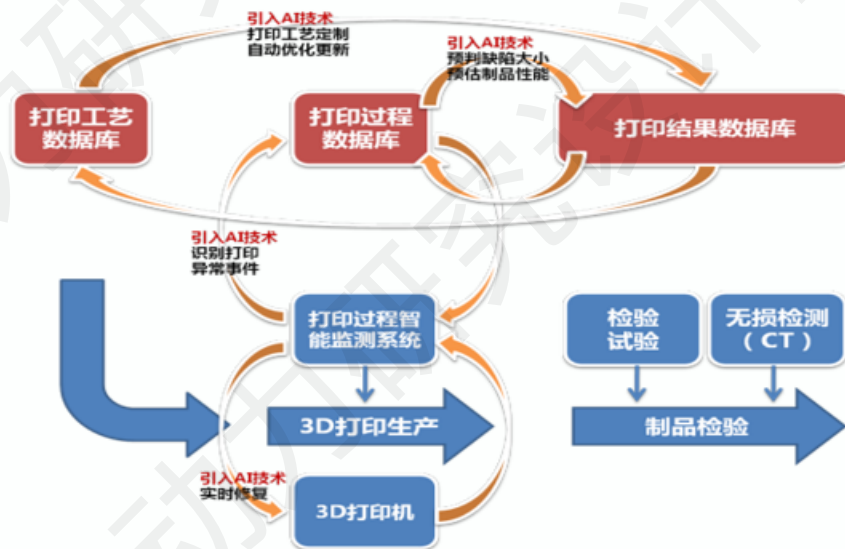
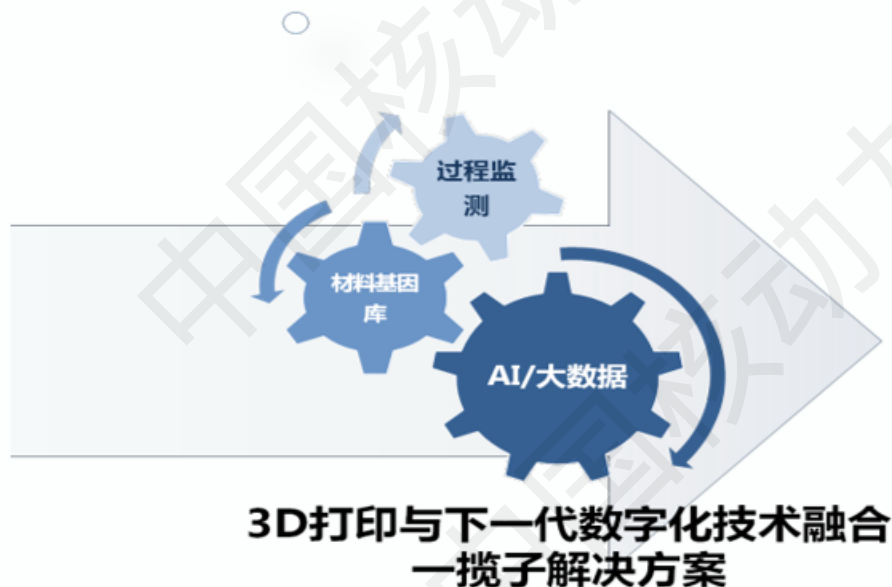
三步走，推进增材制造技术在核领域应用



数字化制造的价值尚未充分发挥

后续推进，AI、大数据、数字孪生、5G+等技术与增材的融合应用，充分交叉赋能。

预期可实现：缺陷智能评判/实时修复、工艺智能优化、材料智能研发、性能智能预估、无支撑打印。



谢谢