

增量制造技术的发展

李涤尘

西安交通大学

机械制造系统工程国家重点实验室

快速制造国家工程研究中心

目 录

- 一、发展现状
- 二、应用研究
- 三、研究发展
- 四、结语



莫比乌斯带

一、发展现状

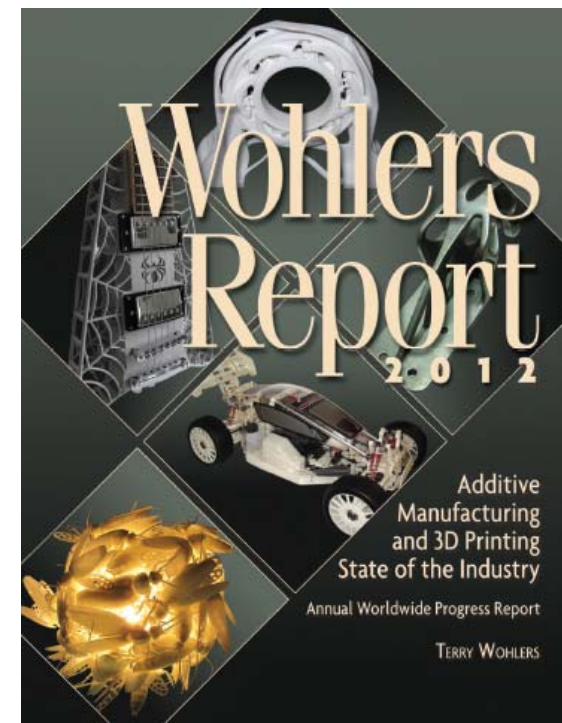
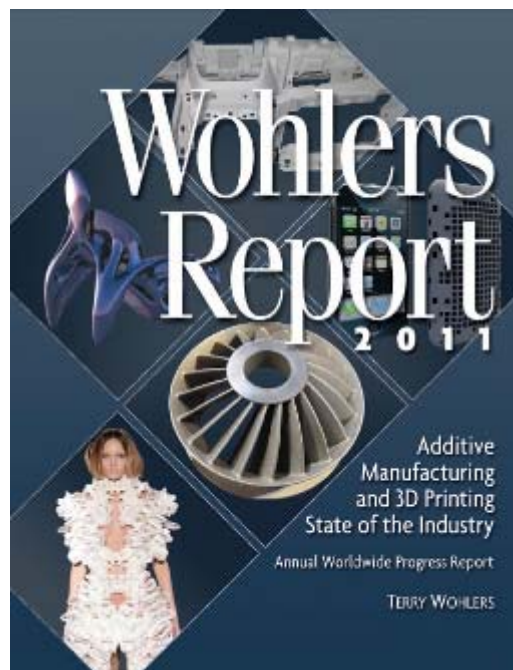
一、发展现状

●增量制造技术—Additive Manufacturing (AM)

- 原理：“自下而上”（bottom-up）制造方法
- 快速原型制造—Rapid Prototyping
- 实体自由制造—Solid Free-form Fabrication

●行业发展报告

- Wohlers Report
- State of the Industry
- 13.25亿美元
- 2010年增长率24.1%
 - 服务25.3%
 - 6.51亿美元

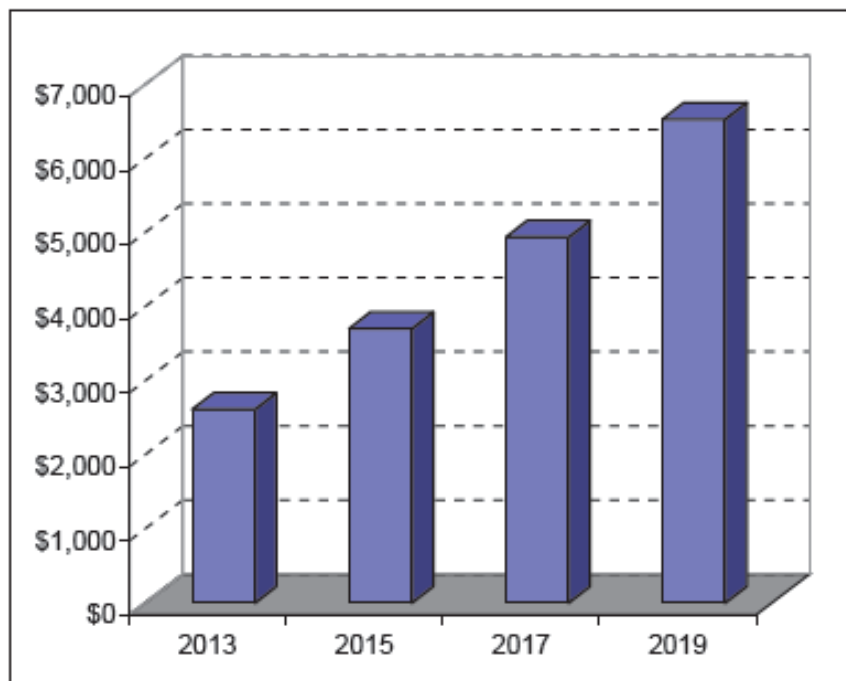


一、发展现状

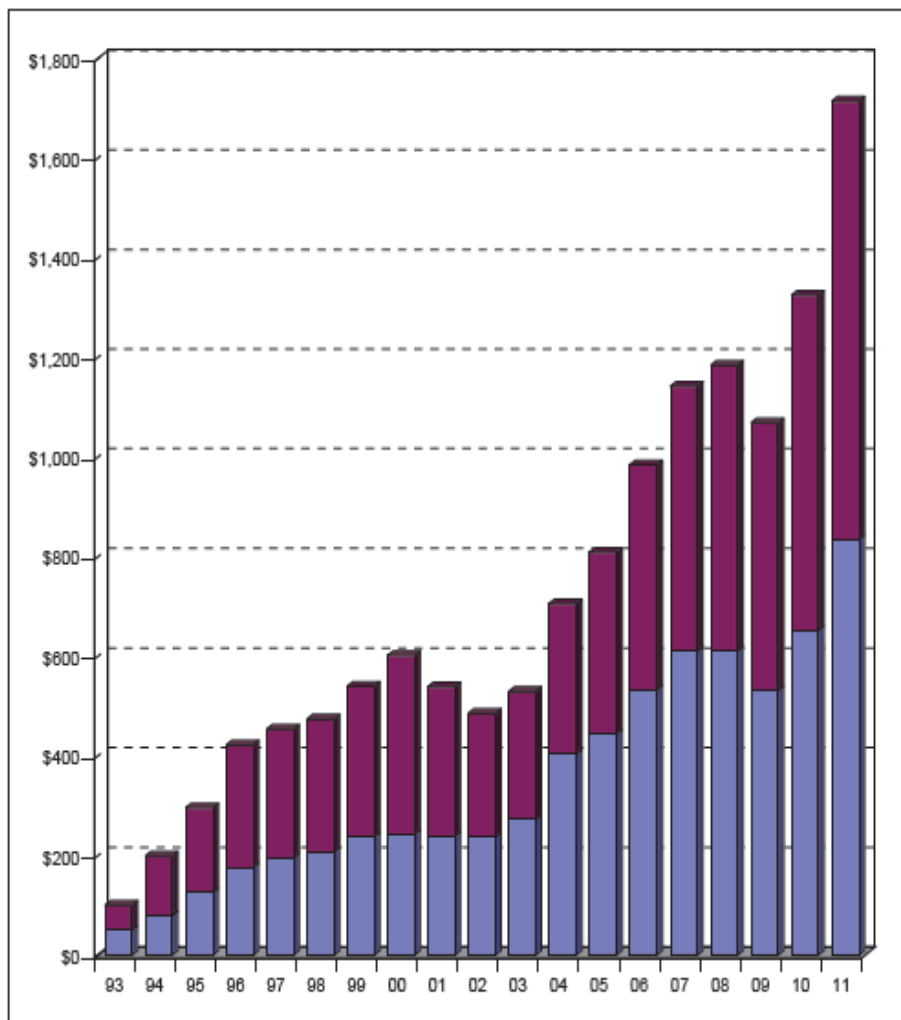
● 国际发展

- 历年发展
- 发展预测

十亿USD (Billion)



Source: Wohlers Associates, Inc.



Source: Wohlers Associates, Inc.

服务

设备

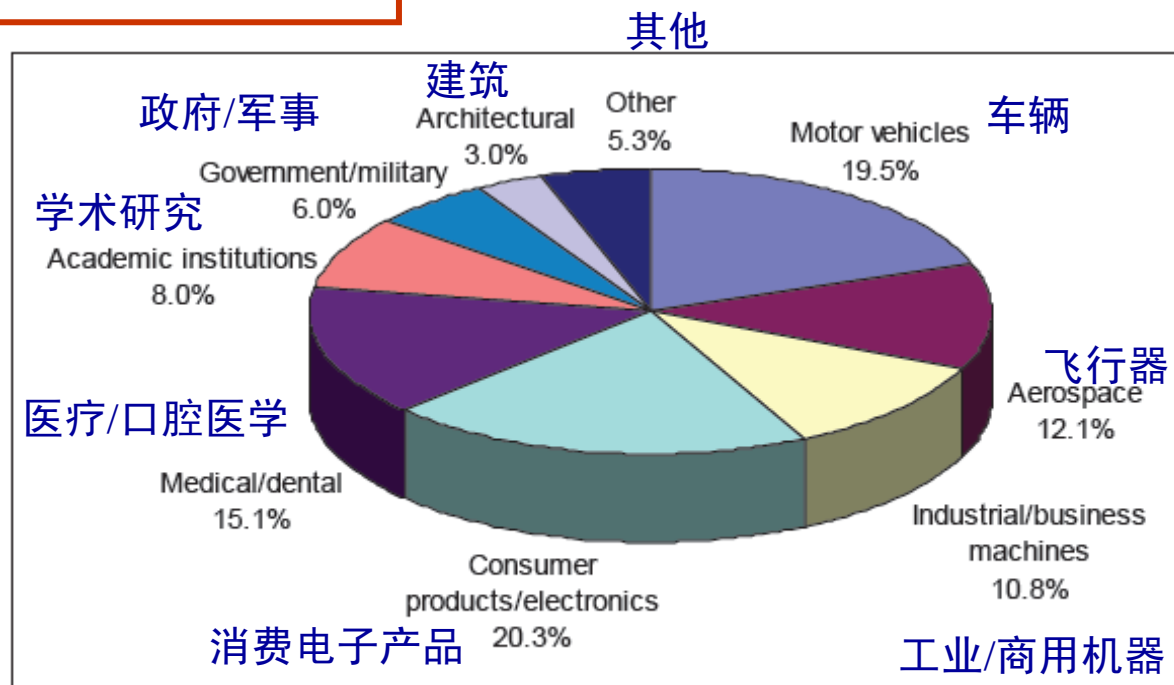
一、发展现状

●技术应用领域---2012年报告

■消费商品和电子: 23.7% → 20.3%

■航空器: 9.9% → 12.1%

■医学和牙科: 13.6% → 15.9%

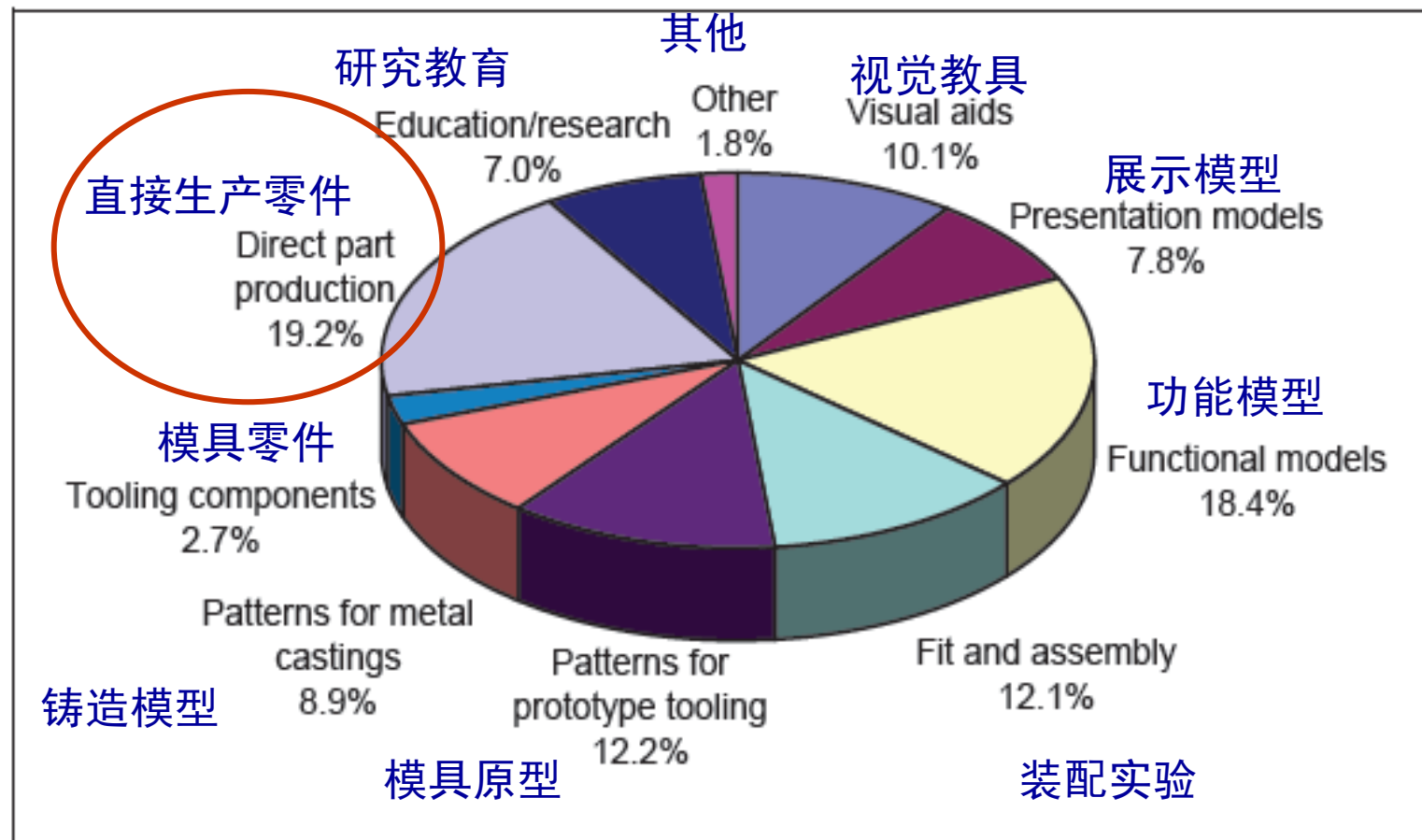


Source: Wohlers Associates, Inc.

一、发展现状

● 应用功能

■ 直接生产零件: 14.9% → 19.2%



Source: Wohlers Associates, Inc.

一、发展现状

●增材制造设备的数量比例

■一定程度上表现了国家的经济活力与创新能力

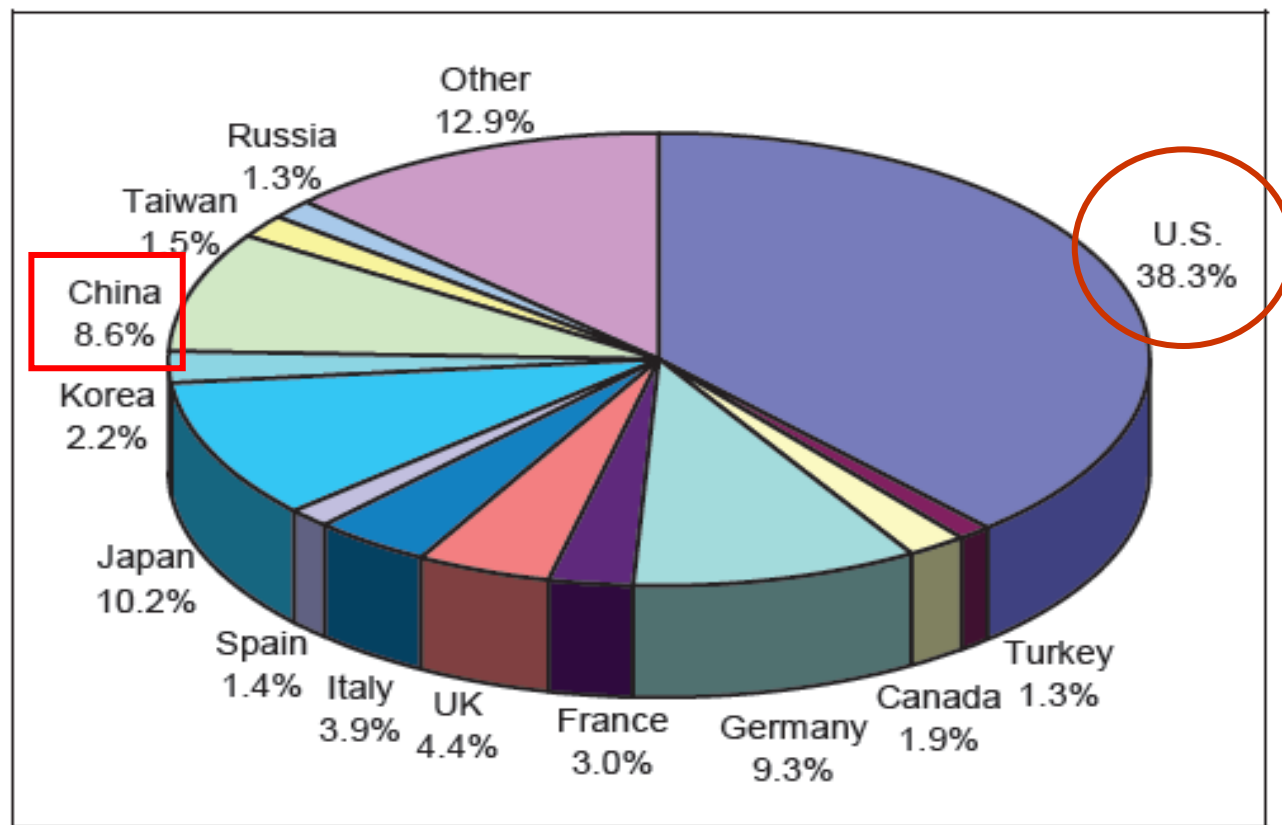
■中国

6.5% → 8.6%

■美国

41.1% → 38.3%

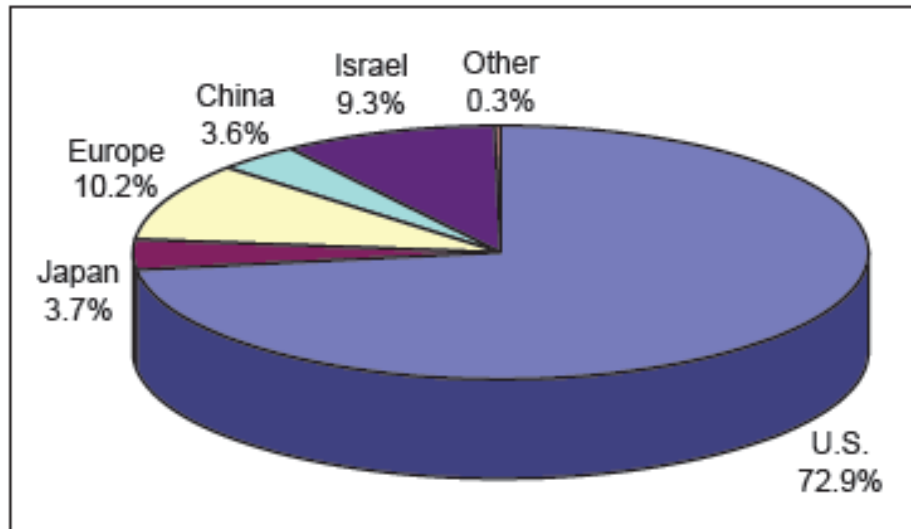
1988—2011
主要国家与地区
的AM设备量



Source: Wohlers Associates, Inc.

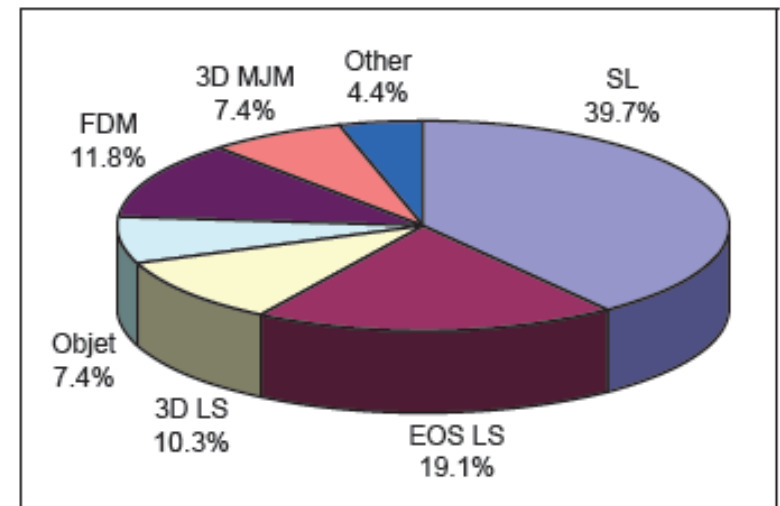
一、发展现状

●设备生产商与技术类型



Source: Wohlers Report 2012

设备制造商



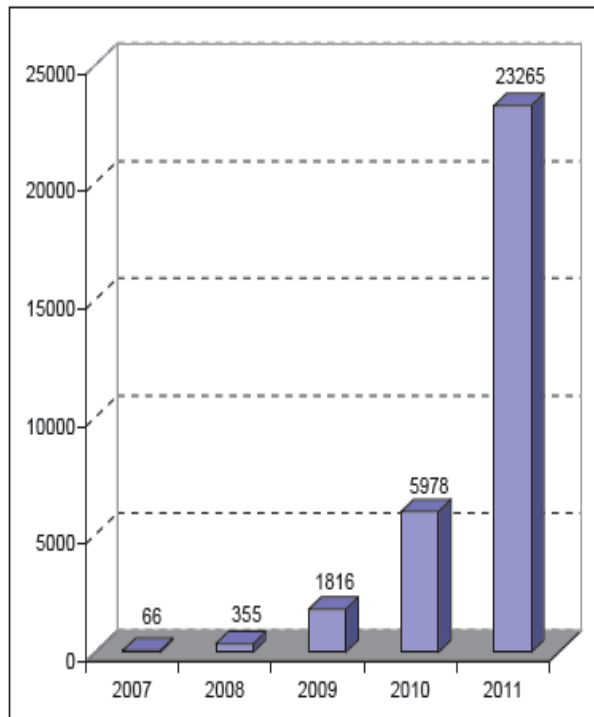
Source: Wohlers Associates, Inc.

技术类型分布

一、发展现状

●最新发展

- 个人三维打印机
- 2011年增长290%



Source: Wohlers Associates, Inc.



3D printer concept for children, courtesy of Origo



3DTouch with three extruder heads, courtesy of Bits from Bytes

一、发展现状

● 日常生活

- 与日常生活结合
- 创新更加简单
 - 人人可以做到



Glove made by LS, courtesy of FOC



Couture dress created by laser sintering, courtesy of Iris van Herpen, Daniel Wildrig, and the .MGX division of Materialise



Dental models (left) and jewelry and other patterns (right), courtesy of DWS

一、发展现状

● 日常生活

■ 新技术融入日常生活



Raw mask (right) and finished mask (left), courtesy of Pfaff



Necklace (left) made on the Perfactory system from Envisiontec, and metal bracelet (right), courtesy of Doug Bucci



Working guitar, courtesy of RedEye



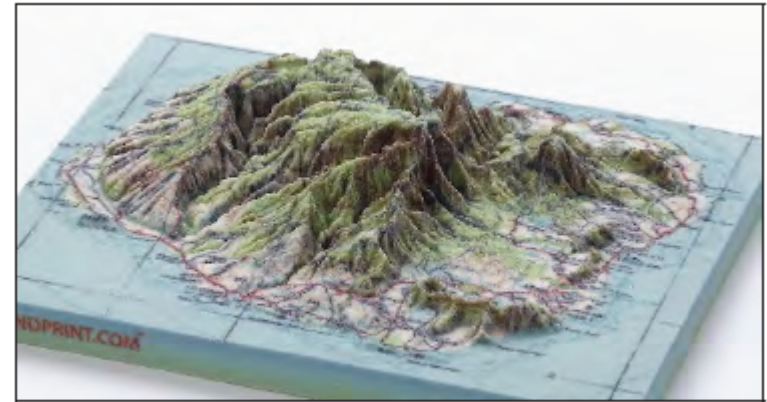
Upper portion of a replica statue of Thomas Jefferson, courtesy of RedEye and the Smithsonian Institution

一、发展现状

● 日常生活



Architectural concept model, courtesy of LGM



3D map, courtesy of Landprint.com

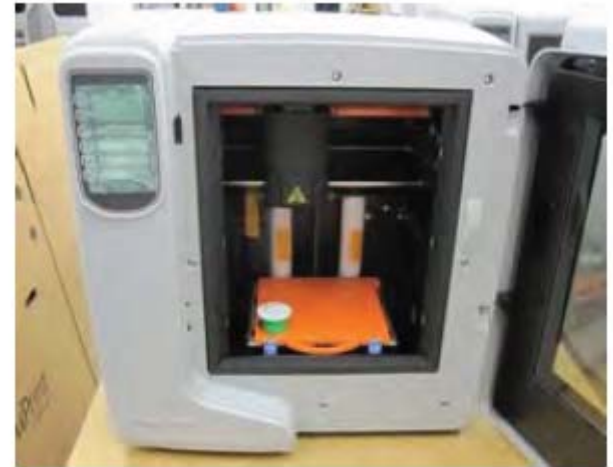


Melonia Shoe made by laser sintering, courtesy of Naim Josefi and Souzan Youssouf

一、发展现状

●设备小型化

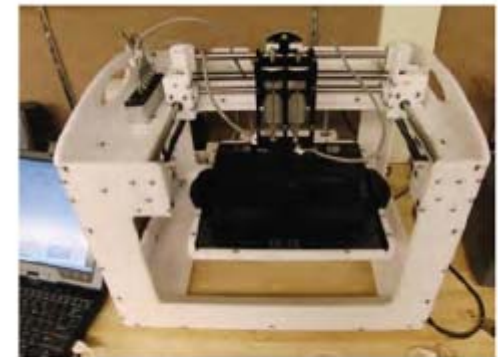
- 低成本
- 工业品向消费品发展



Designjet 3D Printer in final assembly at Stratasys, courtesy of HP and Stratasys



UPI 3D Printer, courtesy of Delta Micro Factory Corp.



Model 2 Fab@Home system, courtesy of Cornell University

一、发展现状

● 产品创新



Diesel engine emission filter, courtesy of Parker Hannifi



Robotic vacuum gripper made by FDM, courtesy of Digital Mechanics AB



Double Mesh iPhone case, courtesy of Freedom of Creation and Freshfiber

一、发展现状

● 产品创新



Hand drill-powered vehicle made by FDM, courtesy of HAWK-University of Applied Sciences and Arts



Wax pattern (left) made on a machine from Solidscape and final product (right), courtesy of Caitlin Skelcey



Student transportation design project, courtesy of Art Center College of Design

一、发展现状

●医疗领域



Medical models produced by AM, courtesy of Medical Modeling Inc.



Titanium medical part produced by LaserCUSING, courtesy of Concept Laser

一、发展现状

●金属零件



Tooling inserts made with direct metal laser sintering from EOS, courtesy of Morris Technologies



NickelAlloy IN625 part, courtesy EOS and Warwick University



Largest part ever built on the M3 linear machine, at 300 mm (11.8 inches) in diameter, courtesy of Materials Solutions



Internal tubes and lattice structure design, courtesy of Within Technologies

一、发展现状

● 科发与服务基地

■ 快速成形应用服务中心 - 2000年

- 西安交通大学 - 西北生产力促进中心
- 华中科技大学 - 武汉生产力促进中心

■ 全国个省市服务中心

- 宁波
- 温州
- 河南
- 新疆
- 深圳
- 贵州



一、发展现状

● 问题

■ 企业应用

- 应用面窄
- 大型企业：低
 - 汽车企业，航空企业
- 中小企业：应用程度高
- 南方企业：活跃

■ 技术发展

- 新技术与新产品不足
 - 3D Printer
 - 2005年：增长35%
- 高性能制件与材料
- 金属直接成型
 - 精度与材质



一、发展现状

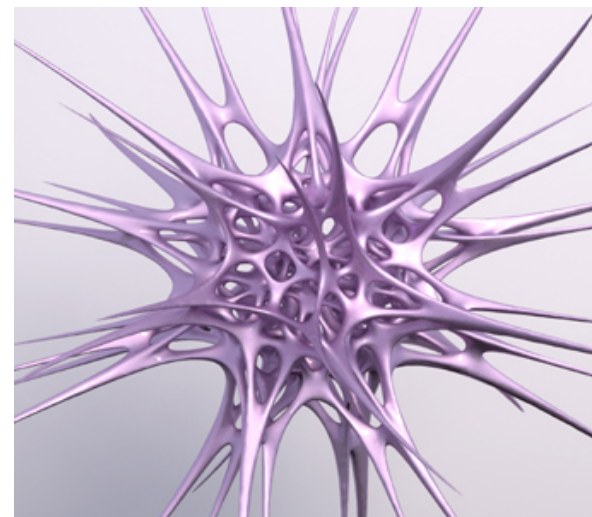
● 问题

■ 支撑服务

- 技术的配套与服务支撑不够
- 企业灵活应用能力低：落后国外3-5年
- 扩大应用面
 - 快速成型与艺术结合
 - 建筑模型
 - 航空航天器风洞模型

■ 咨询机构

- 美国Wohlers报告
- 产业发展方向分析



一、发展现状

● 研发基地

■ 华中科技大学

- 材料成形与模具技术国家重点实验室

■ 清华大学

- 先进成形制造教育部重点实验室

■ 北京隆源公司

■ 西安交通大学

- 制造系统工程国家重点实验室
- 快速制造国家工程研究中心

■ 北京航空航天大学 - 金属直接制造

■ 西北工业大学 - 金属直接制造



一、发展现状

● 我们工作

■ 应用发展 – 高附加值应用

- 复杂零件制造 – 发动机空冷叶片
- 生物医疗
- 航空领域 – 飞机风洞模型

■ 研究发展 – 新技术

- 低成本 – LED
- 金属直接成形
- 陶瓷材料成形
- 复合材料成形



应用



研究

二、应用研究

快速铸造

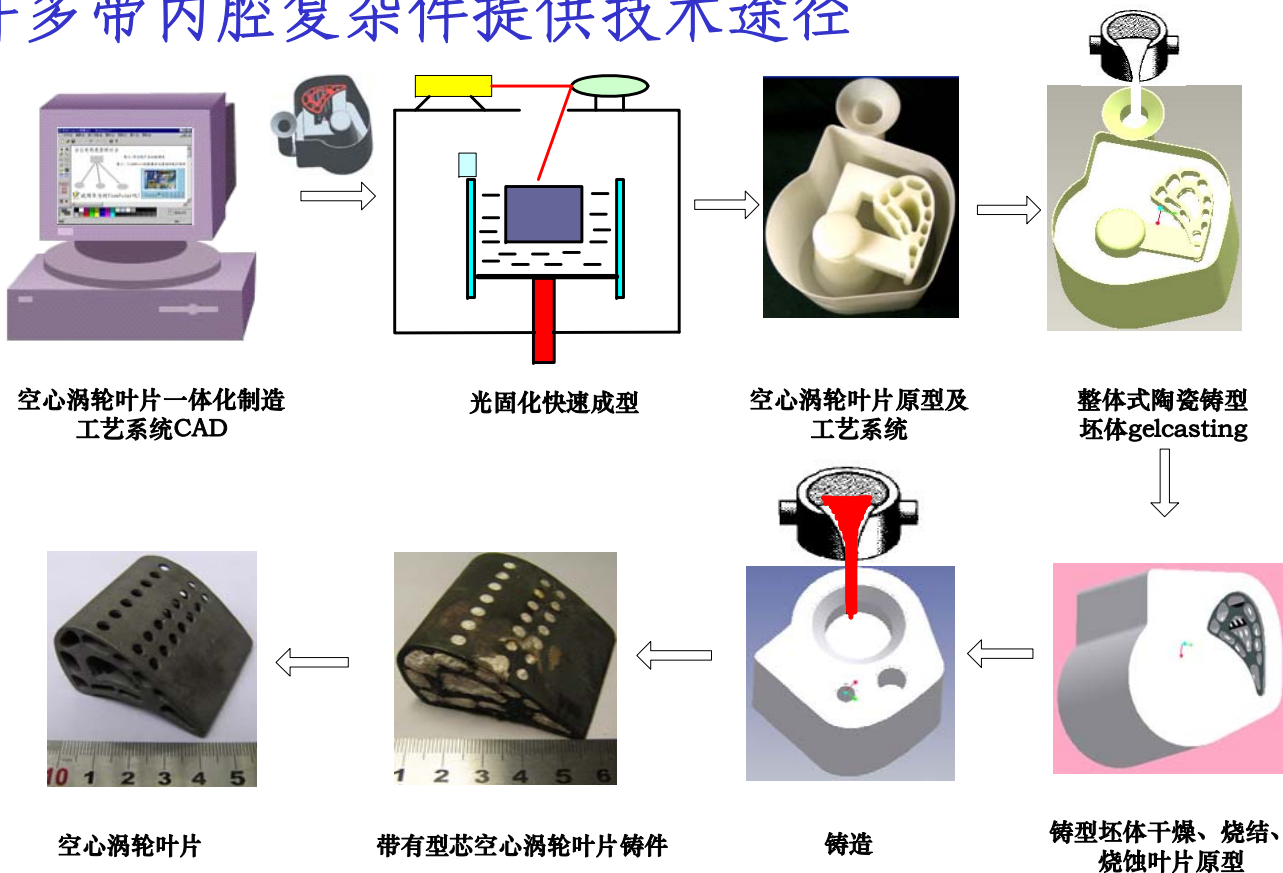
生物医疗

风洞模型

二、应用研究—快速铸造技术

●陶瓷型铸造

- 铸型外壳、内芯和浆料包裹层一体化设计
- 为许多带内腔复杂件提供技术途径

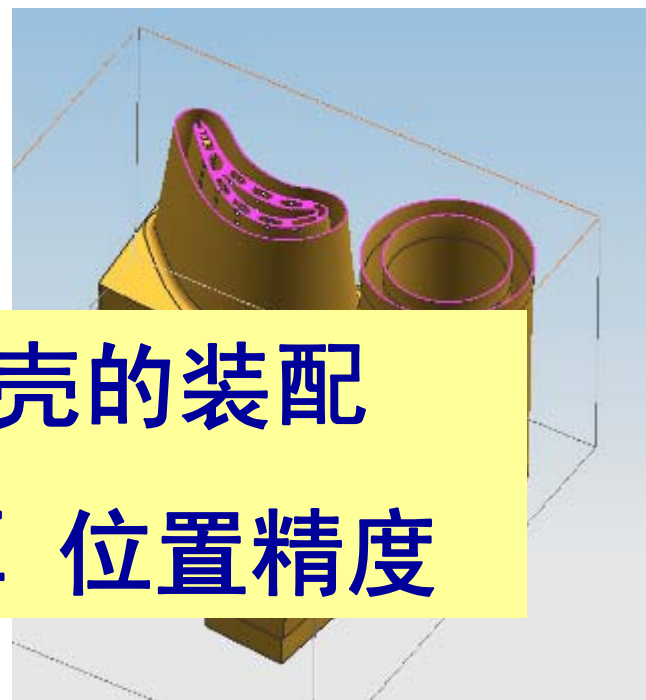
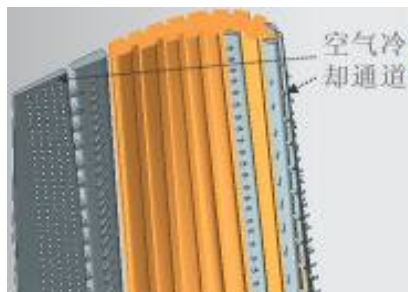
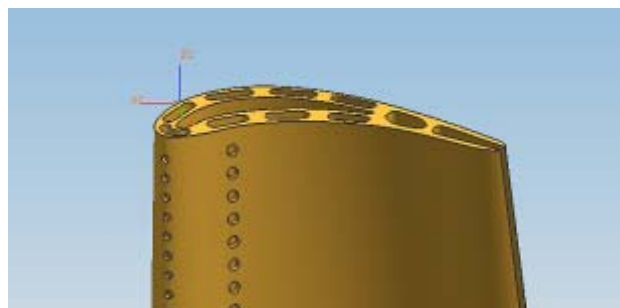


二、应用研究—快速铸造技术

●陶瓷型铸造

■空心涡轮叶片—东方气轮机厂

- 日本三菱进口，价格极高（一个叶片=一个奥迪车）
- 一级叶轮：90多个



无需铸型型芯和型壳的装配
保证相对精度：壁厚 位置精度

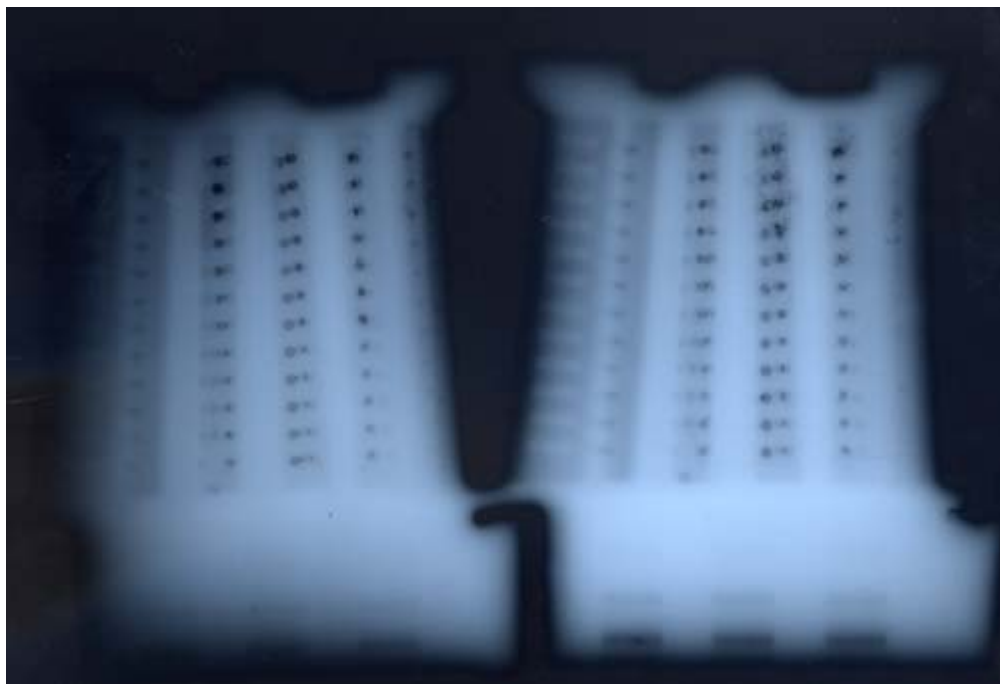


二、应用研究—快速铸造技术

●陶瓷型铸造

■空心涡轮叶片—东方气轮机厂

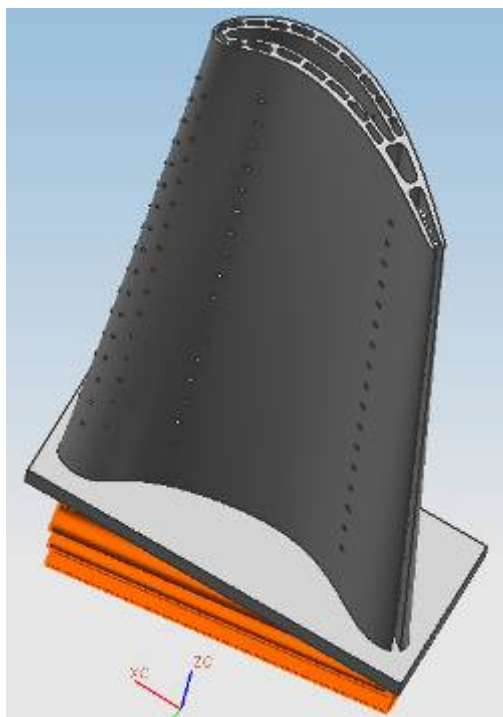
- 铸造：西安航空发动机公司



二、应用研究—快速铸造技术

●陶瓷型铸造

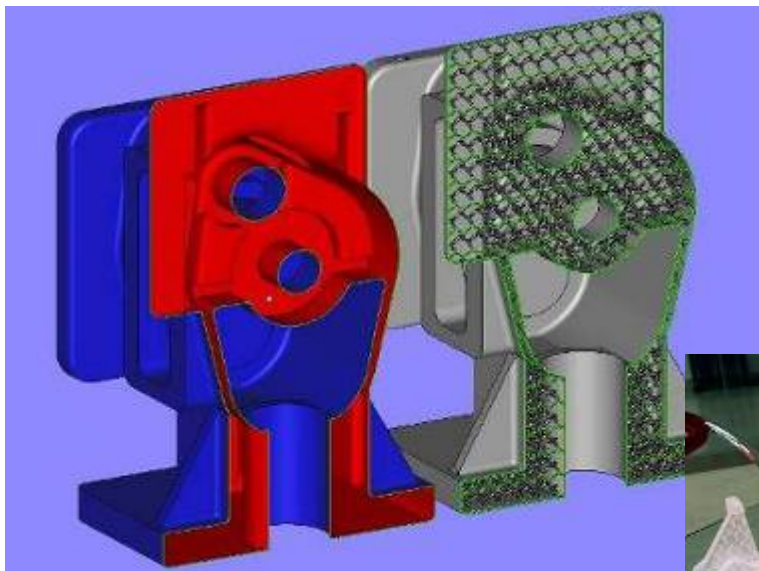
■空心涡轮叶片—东方气轮机厂



二、应用研究—快速铸造技术

●快速精铸技术

■光固化原型精铸



二、应用研究—快速铸造技术

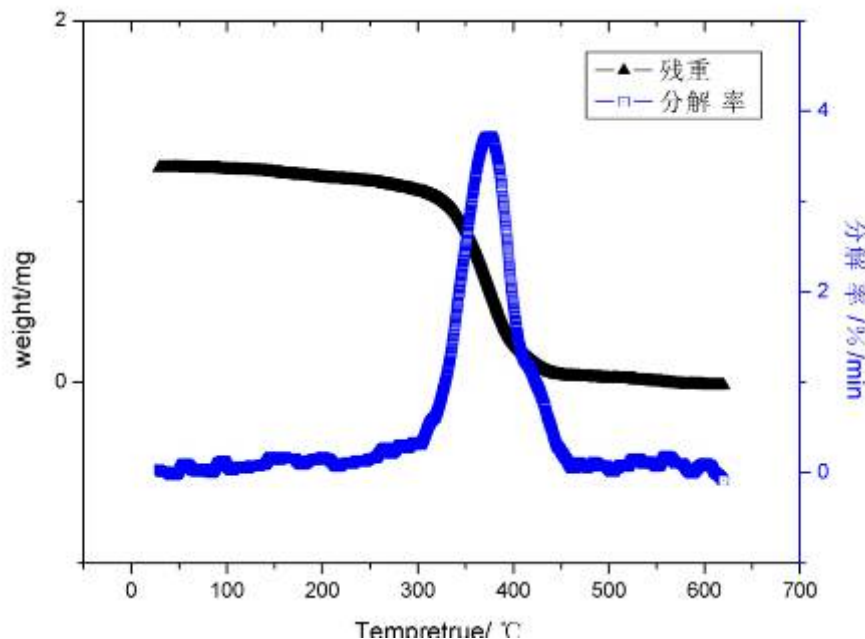
●快速精铸技术

■光固化原型精铸

●烧蚀工艺—TGA曲线—确定铸型烧蚀工艺参数

—热解速度在375.71℃时达到峰值

—在553.94℃时，残留物仅为0.2066 %



二、应用研究—快速铸造技术

●快速精铸技术

■嘉陵集团:摩托车发动机缸头研制

- 数量: 2件
- 材料: ZL101A
- 时间周期: 10天



传统: 铸型多次组合

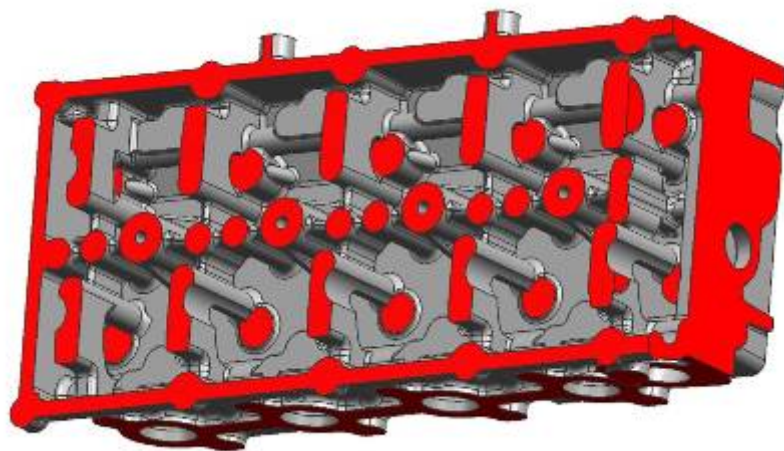
新技术: 一次完成

二、应用研究—快速铸造技术

●快速铸造技术

■光固化原型与砂型结合铸造技术

- 绵阳新晨动力机械有限公司 — 新型四缸柴油发动机缸盖



CAD数据



原型

二、应用研究—快速铸造技术

●快速铸造技术

■光固化原型与砂型结合铸造技术

- 绵阳新晨动力机械有限公司 — 新型四缸柴油发动机缸盖



制芯



缸体

二、应用研究—快速铸造技术

●压蜡模具快速制造

■小批量精铸技术—快速成形原型直接制造蜡型模具

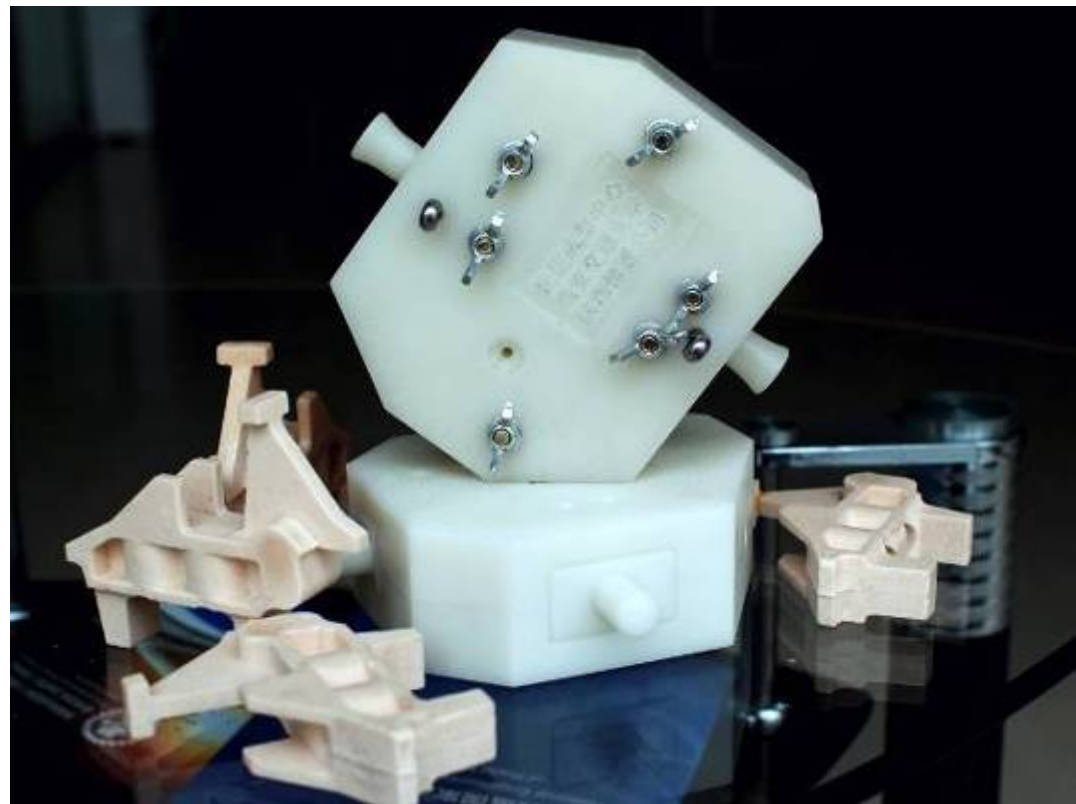
- 传统金属模具

 - 3万元，1—2个月

- 快速成形模具

 - 0.8万元，2天

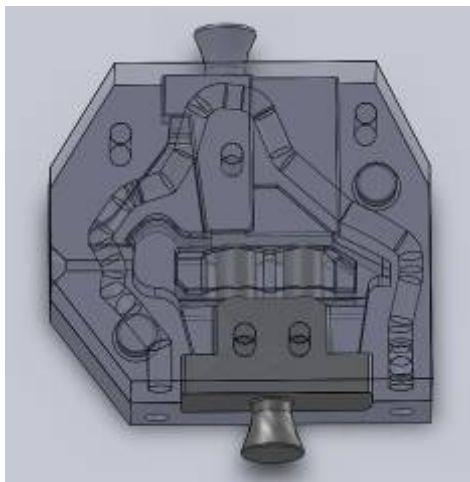
 - 寿命：30件无损伤



二、应用研究—快速铸造技术

●压蜡模具快速制造

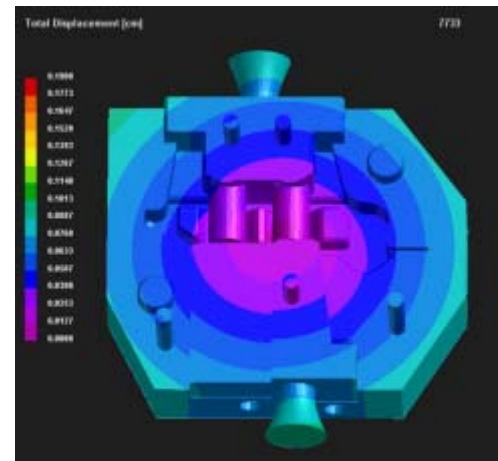
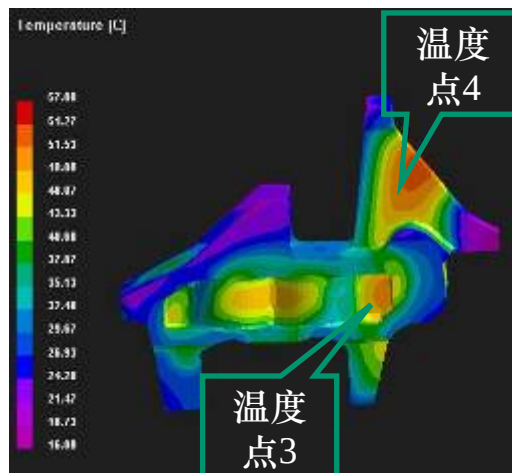
■研究了水冷流道的设计规范



水流道模型

截面圆：
半径4.5mm

四流道



温度场对比 35

二、应用研究—快速铸造技术

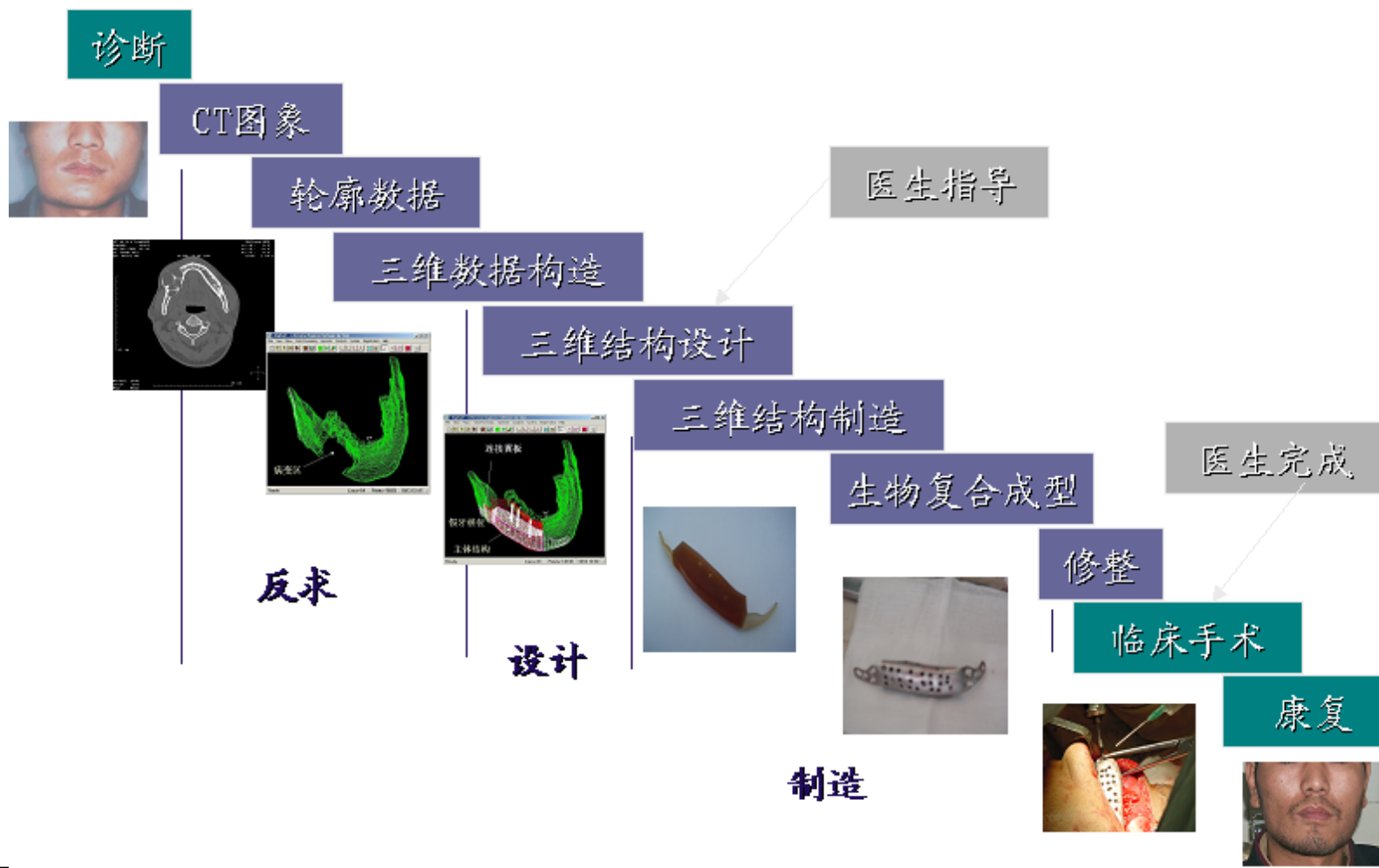
●压蜡模具快速制造

■建立了实验系统



二、应用研究—生物医疗

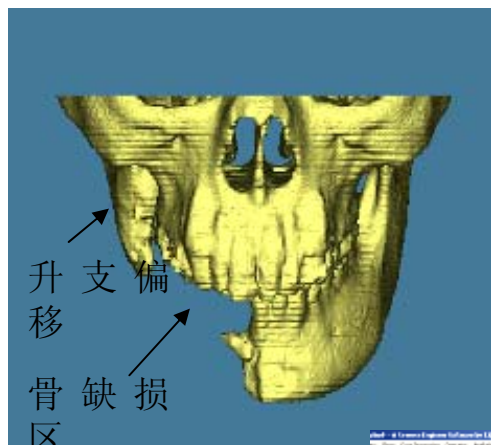
●骨替代物制造—颌面修复



二、应用研究—生物医疗

●骨替代物制造

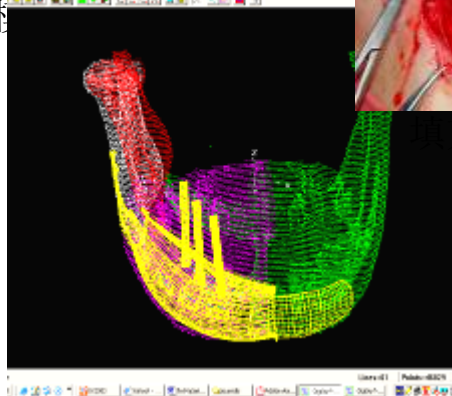
- 患者男性：右侧局部下颌骨缺损，关节突及下颌升支完好，下颌升支位置发生偏移，手术后患者恢复良好。



患者原始下颌骨



充松质骨、手术植入



个性化原位设计



术前、术后正面对照

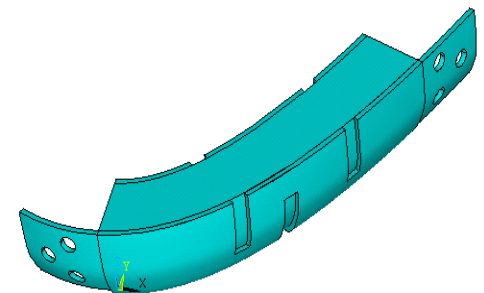
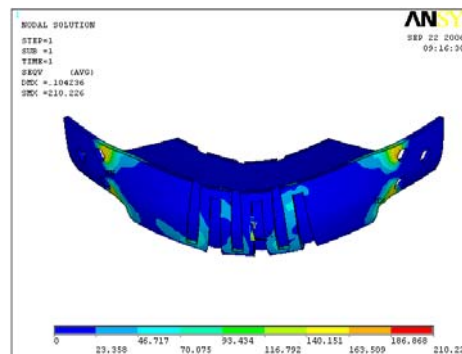
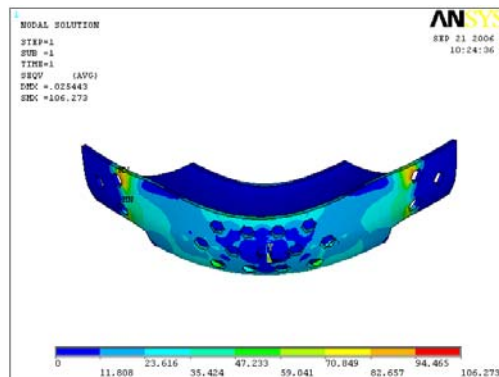
二、应用研究—生物医疗

●骨替代物制造—优化设计

■应力屏蔽—影响骨生长

- 0.001—0.0015处于骨平衡状态
- 0.0015—0.005之间促进骨增加
- 0.005以上骨损伤，生成编织骨
- 0.03则引起骨断裂*

■弹性结构



* Duncan RL Turner C H Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain Calcif Tissue Int 1995 57 344~358

二、应用研究—生物医疗

●骨替代物制造—上颌骨修复

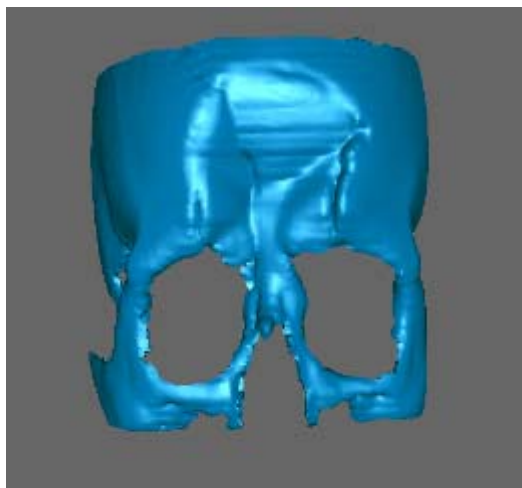
- 患者女性：2年前诊断为右侧上颌窦鳞癌，行上颌骨扩大切除术。术后伤口愈合良好，无肿瘤复发迹象，但面中1/3畸形及复视明显，要求进行畸形校正修复



二、应用研究—生物医疗

●骨替代物制造

■患者：额鼻骨外伤后塌陷畸形



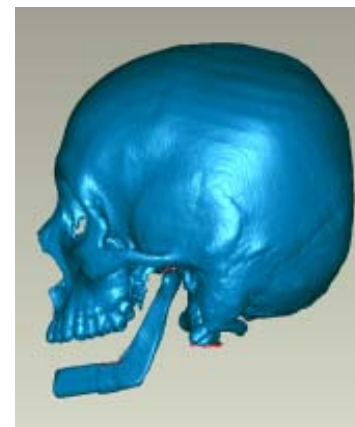
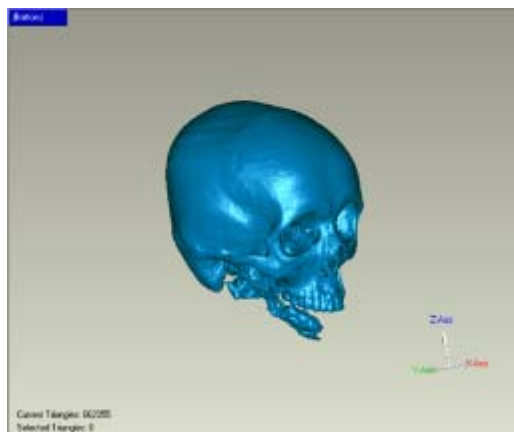
缺损部位填充体上、下模及浇注成形的骨水泥填充物



二、应用研究—生物医疗

●骨替代物制造—中国首例“下颌骨溶解修复”

- 患者男性：19岁，下颌骨吸收
- 设计下颌骨关节



二、应用研究—生物医疗

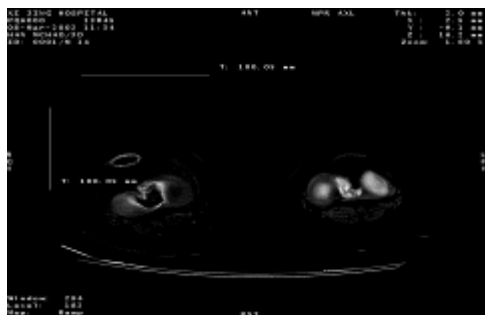
●骨替代物制造—半关节置换

■定制化钛合金半膝关节假体复合大段骨移植

■患者，男性，14岁，再诊单位：第四军医大学西京医院骨科。



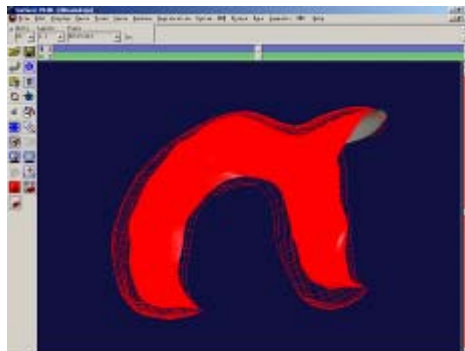
术后12月



患者股骨CT数据



膝关节整体装配

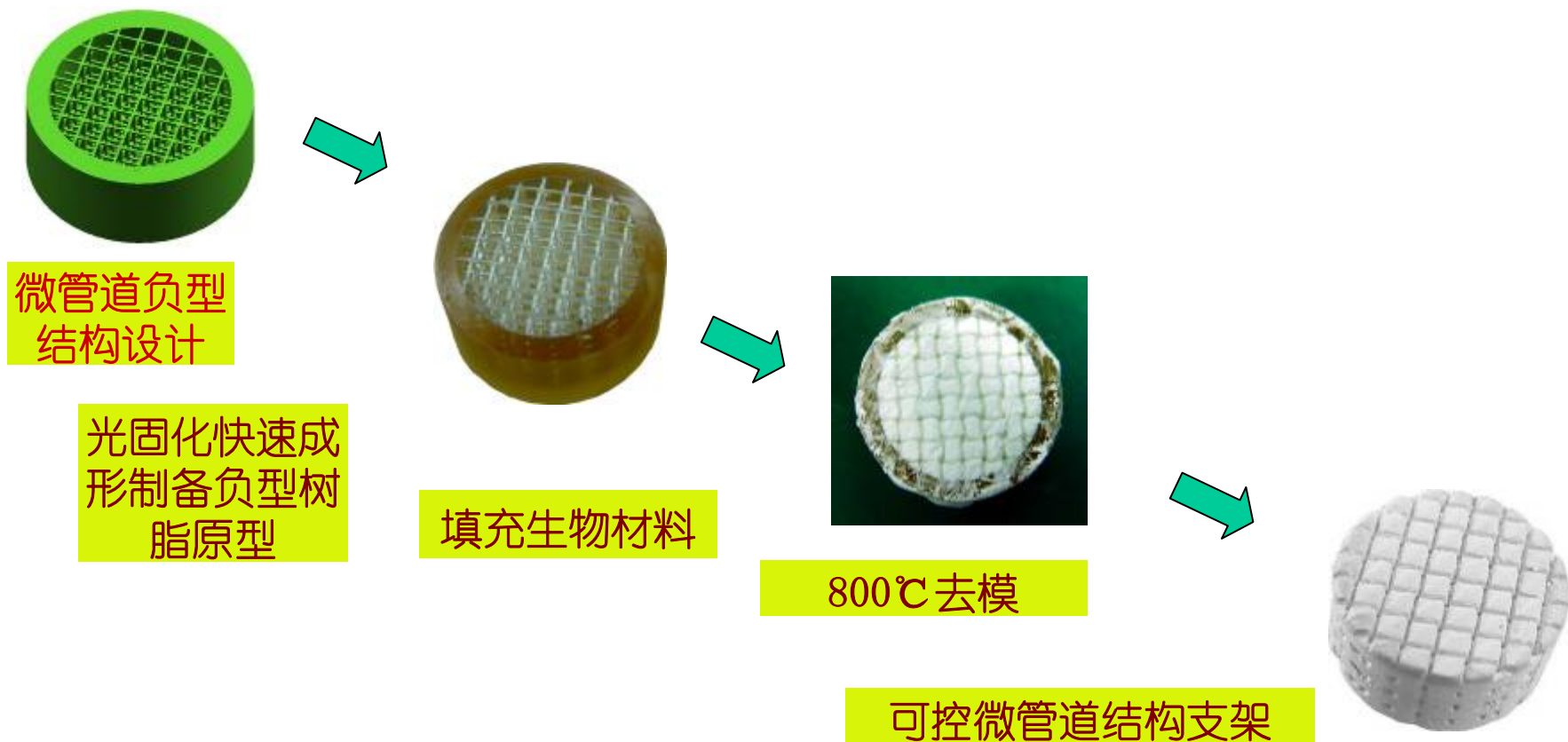


图术后一周X光片

二、应用研究—生物医疗

●人工骨支架制造

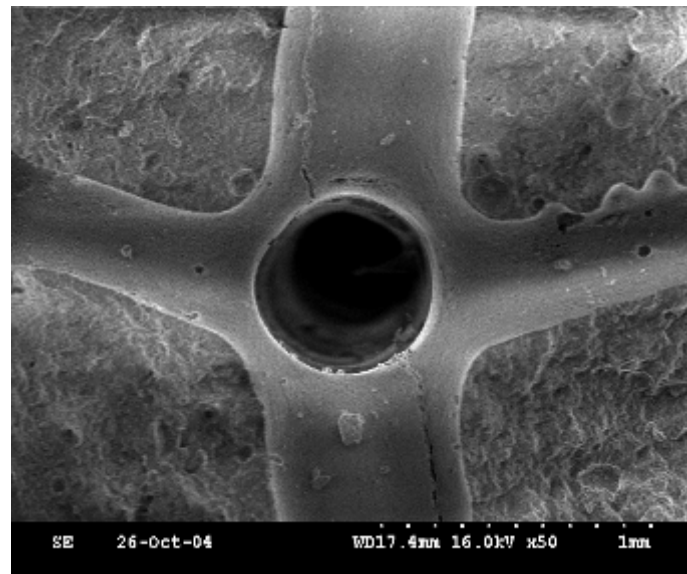
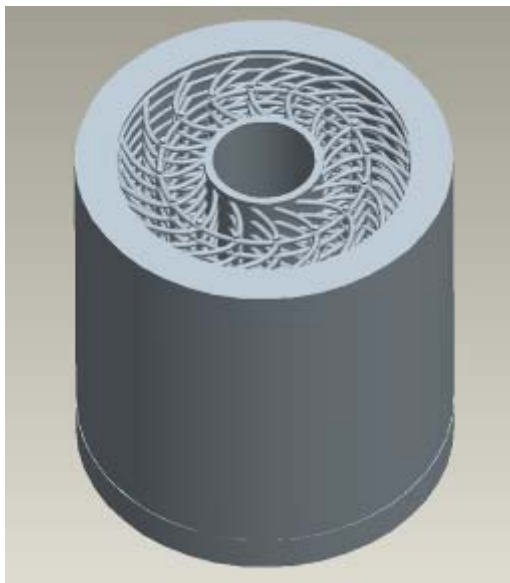
■基于光固化原型的支架制作-TCP材料



二、应用研究—生物医疗

●人工骨支架制造

- 轮廓算术平均偏差 $Ra = 2.16$
- 轮廓最大高度 $Ry = 18.47$
- Ra 值在 $0.30 \sim 6.66$ 范围内有利



二、应用研究—生物医疗

●人工骨支架制造

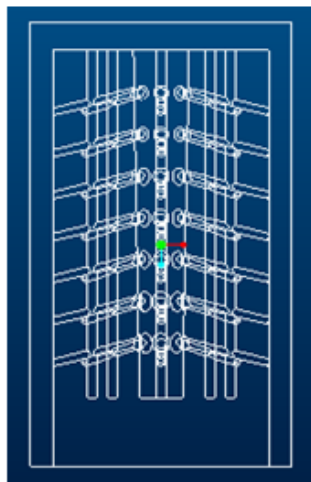
- 快速原型主管 + 造孔球
- TCP烧结



支架负型树脂模型



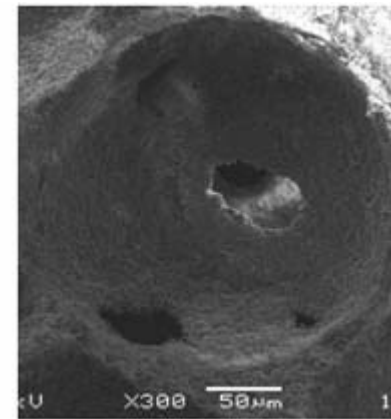
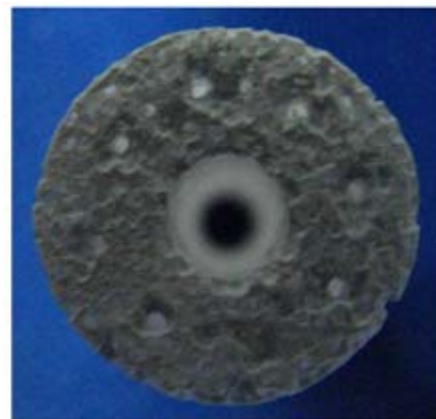
制备的人工股骨头



(a) CAD 模型



(b) 树脂模具



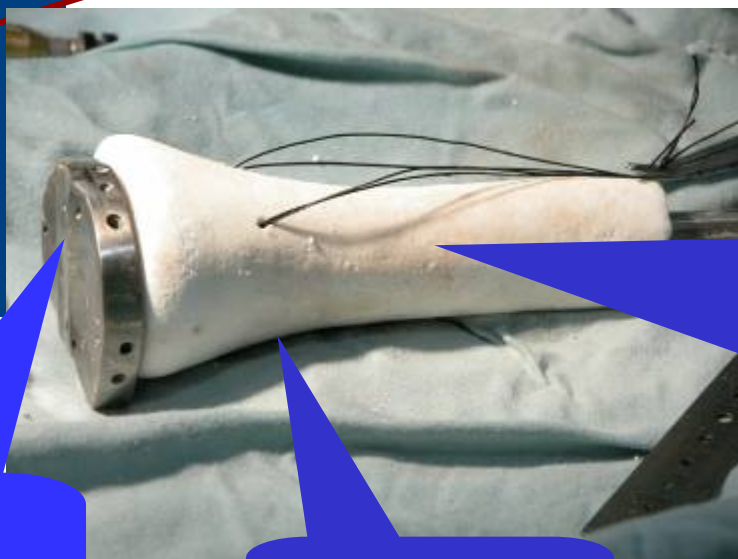
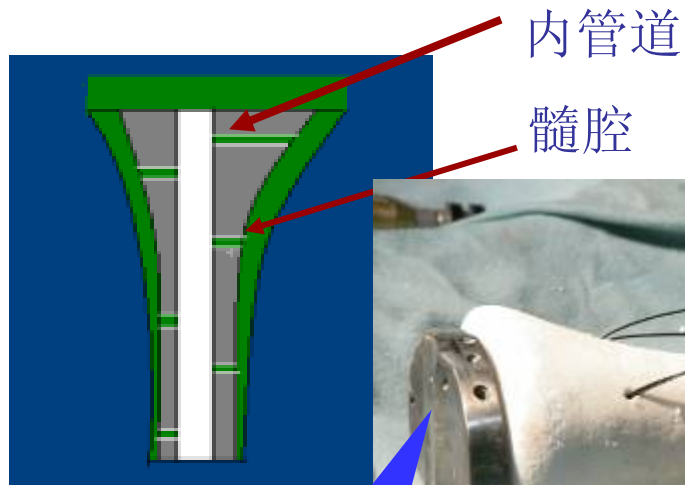
制备的支架结构

二、应用研究—生物医疗

●人工骨支架制造—临床应用研究

■定制化人工胫骨半关节大段骨重建术

- 患者：女性，14岁，左胫骨上端骨肉瘤



钛合金
定制化设计制作

复合结构

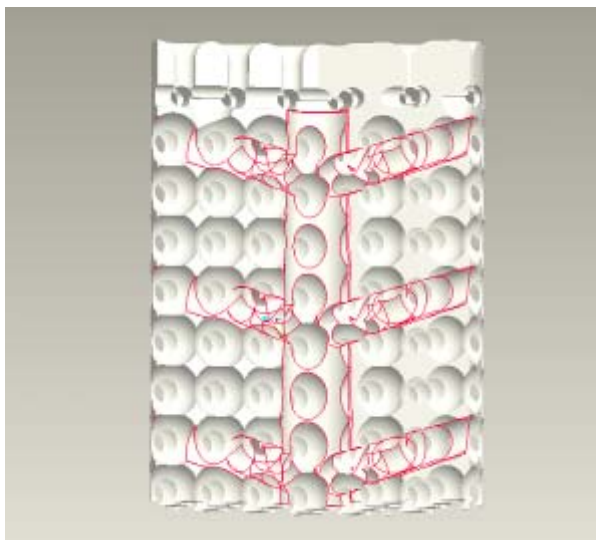
TCP: 微结构



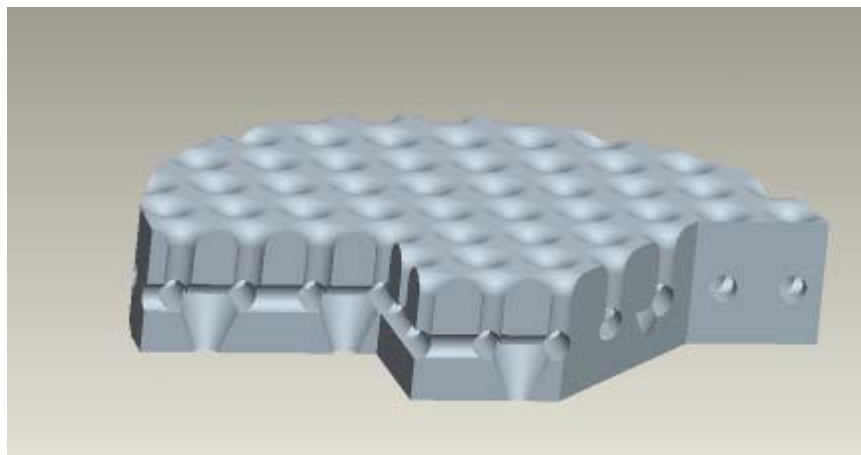
二、应用研究—生物医疗

●骨-软骨支架制造

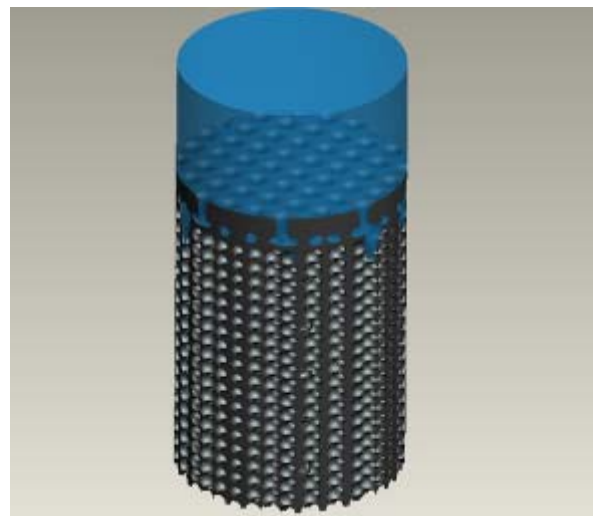
■骨-软骨支架设计



多孔复合流道骨支架设计



界面设计

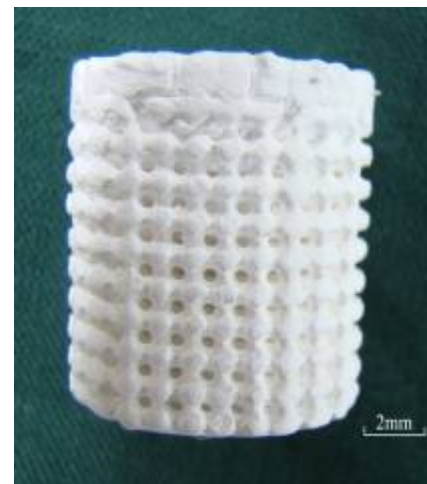


软骨/骨梯度组织工程支架

二、应用研究—生物医疗

●骨-软骨支架制造

■ 陶瓷直接快速成形



SPS450B



激光光固化 β -TCP 生物陶瓷坯体

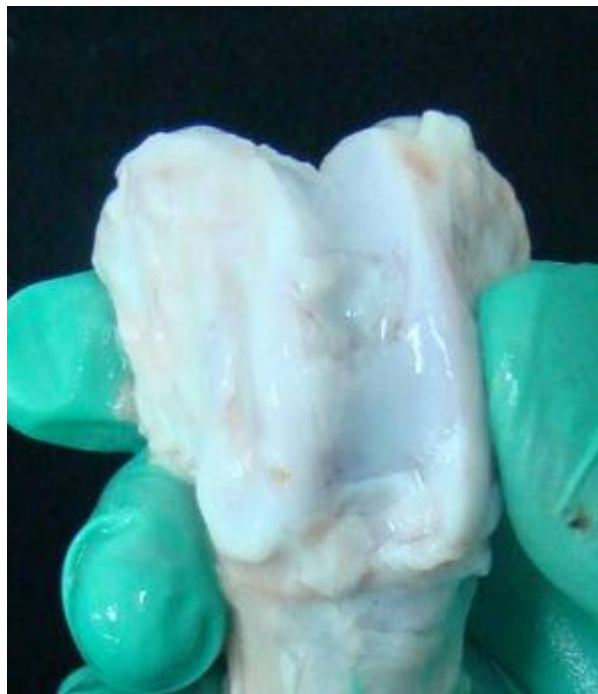
多孔+界面



陶瓷激光光固化

二、应用研究—生物医疗

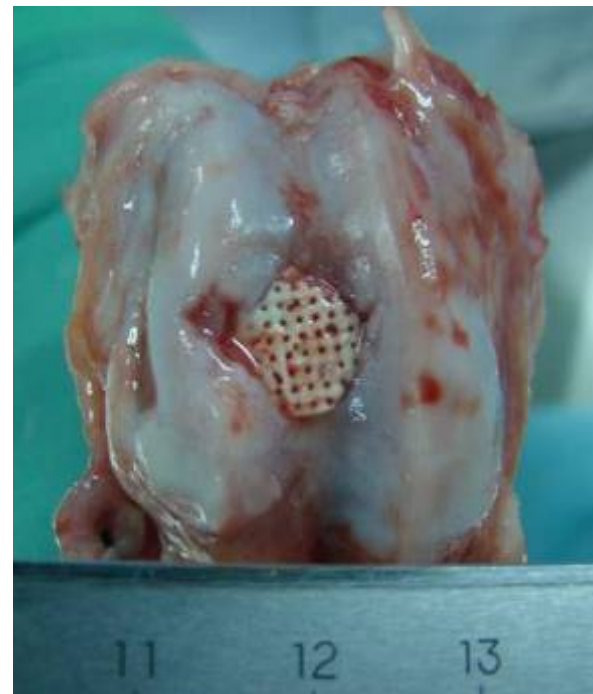
●骨-软骨支架制造-动物实验



(a)



(b)



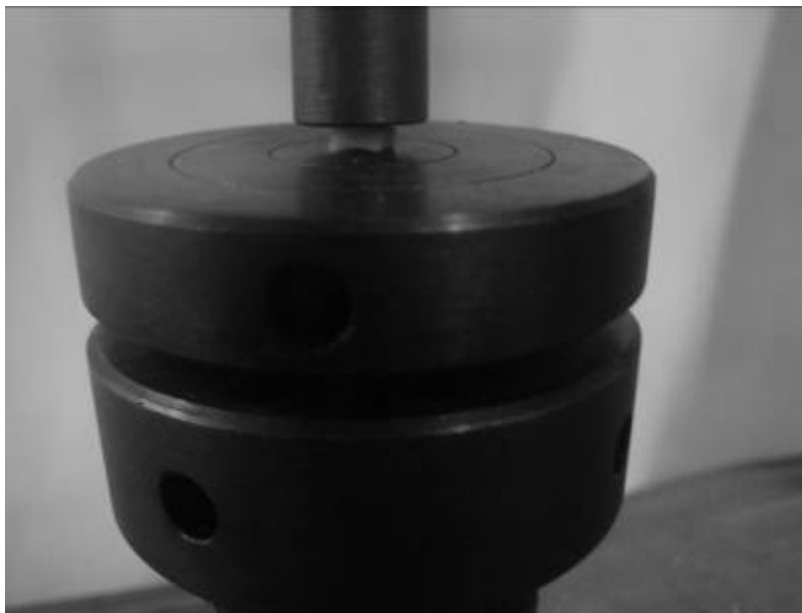
(c)

实验动物6月取材大体标本

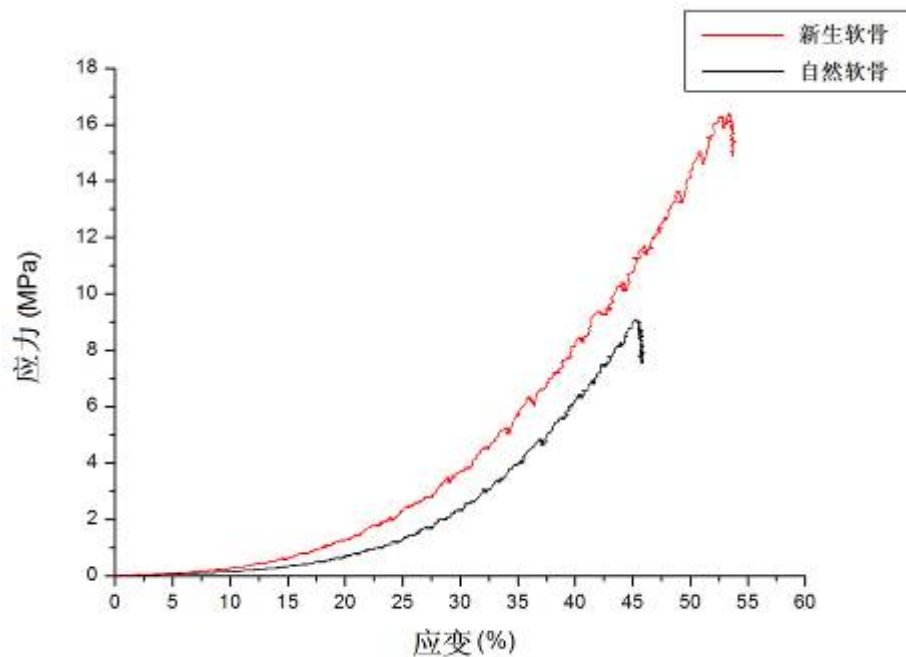
(a) 复合支架组, (b) I 型胶原支架组, (c) β -TCP 支架组

二、应用研究—生物医疗

●骨-软骨支架制造-弹性模量



新生软骨弹性模量检测试验装置



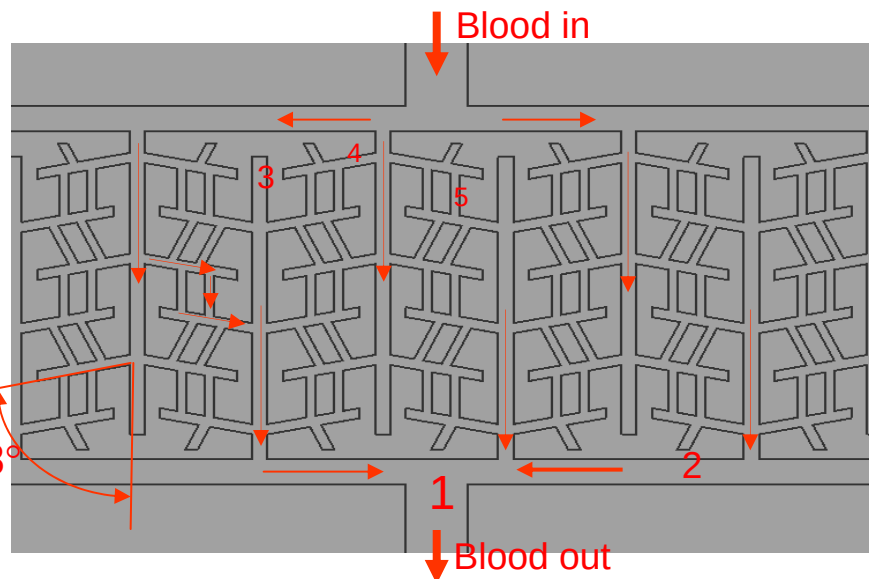
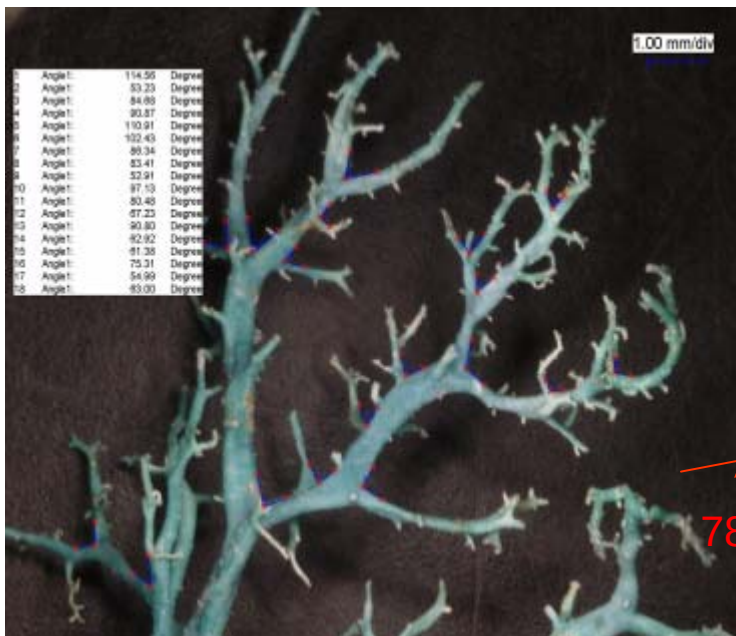
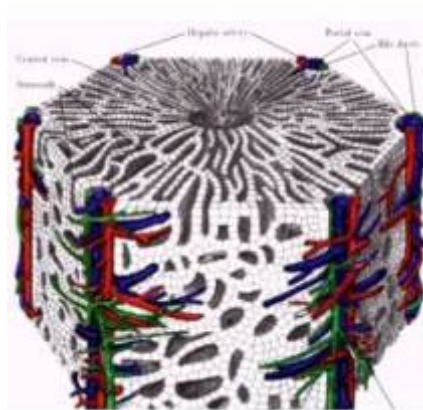
软骨应力-应变曲线

取曲线接近于直线的应变10%处为研究对象，计算软骨弹性模量。
结果显示，新生软骨的弹性模量为2.43MPa，自然软骨的弹性模量为1.33MPa。

二、应用研究—生物医疗

●肝组织支架制造

■微结构 - 血管分布的规律



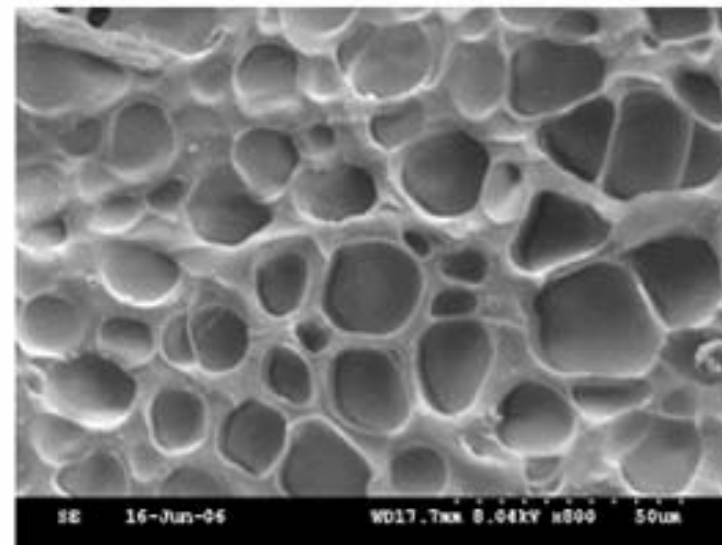
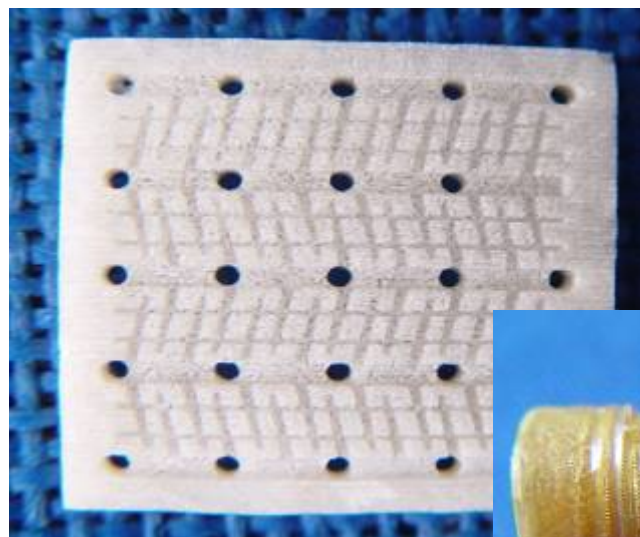
肝脏内血管间的夹角呈正态分布，平均夹角约为78°

二、应用研究—生物医疗

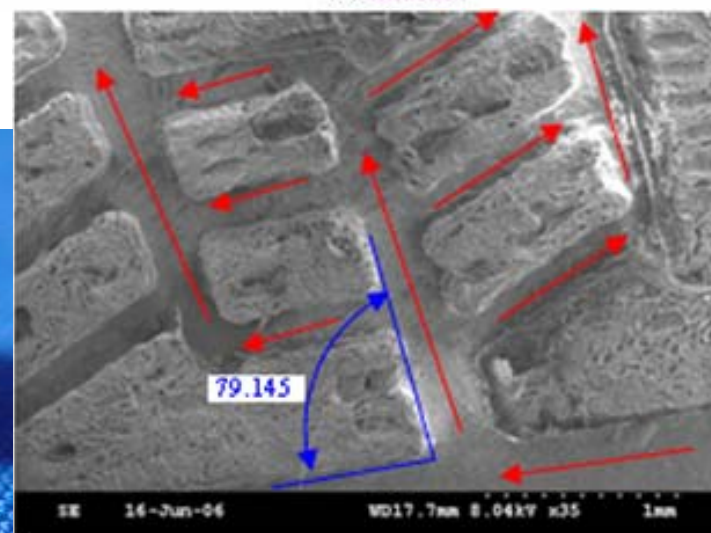
●肝组织支架制造

■双结构系统制造

- 压印—主管道
- 冷冻干燥—制造渗透孔



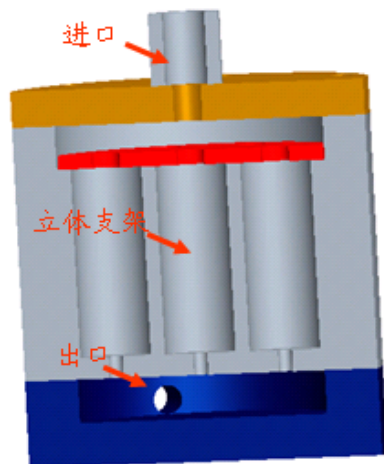
(d) -180°C



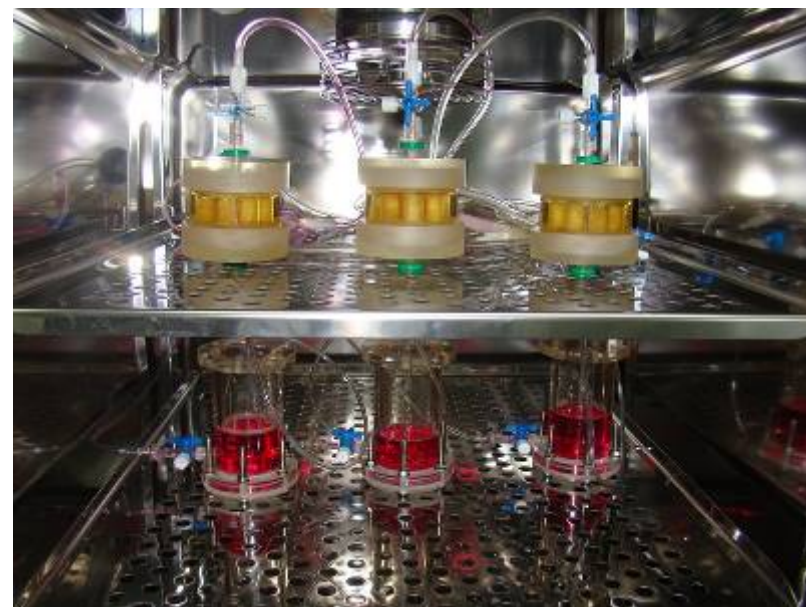
二、应用研究—生物医疗

●肝组织支架制造

- 体外培养与生物反应器
- 养分的供给



生物反应器

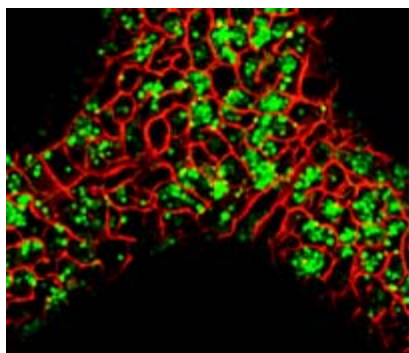
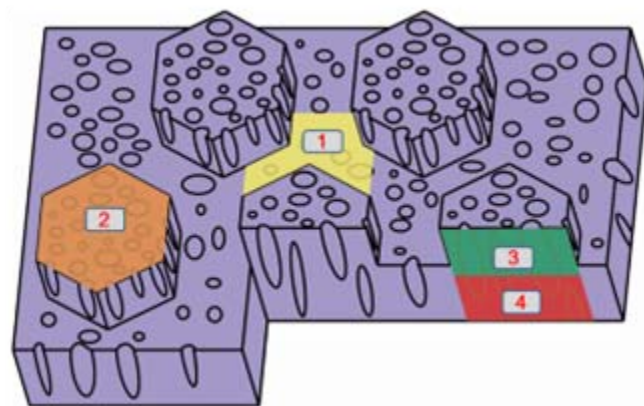
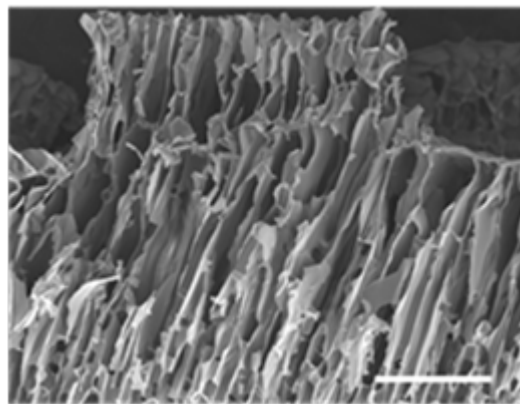
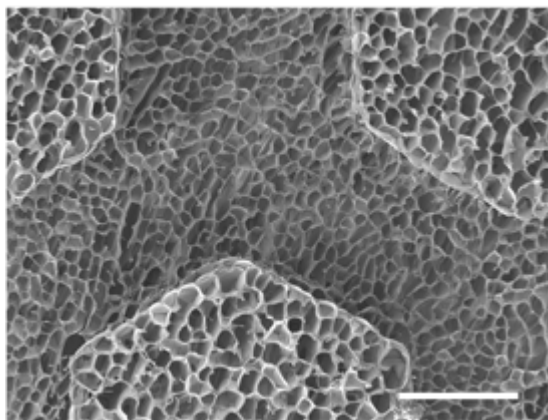


生物反应器系统在培养箱内运行

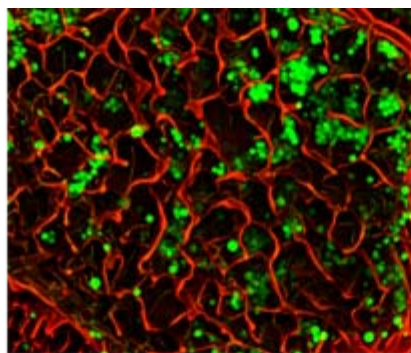
二、应用研究—生物医疗

●肝组织支架制造

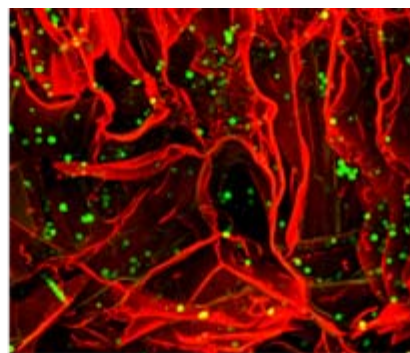
- 仿生流道+定向多孔结构促进肝细胞向支架内生长



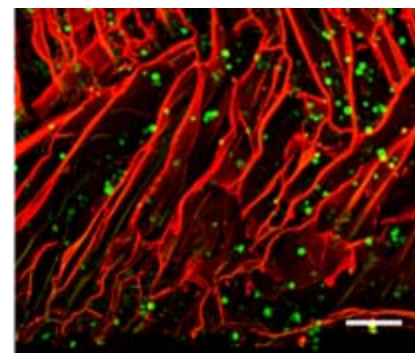
区域1



区域2



区域3



区域4

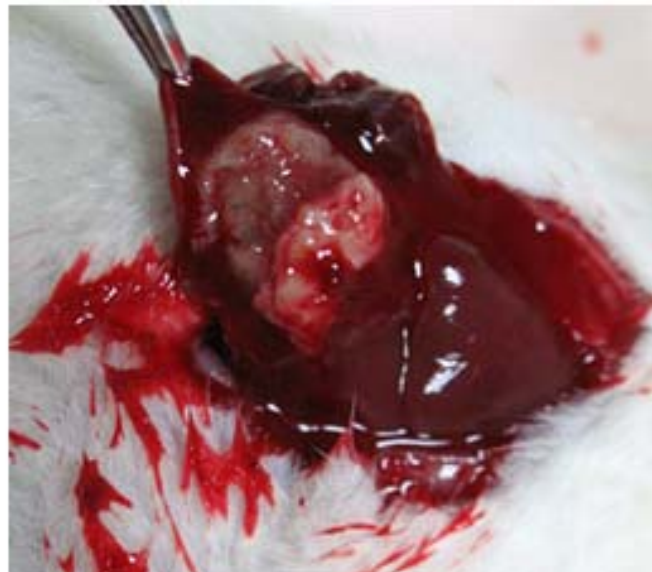
二、应用研究—生物医疗

●肝组织支架制造

- 工程化肝脏的体内构建
- 支架/细胞复合体在体内
- 细胞种植密度、体外培养时间对体内工程化肝脏影响
- 研究支架/细胞复合体用于修复肝缺损的有效性



大鼠肝脏

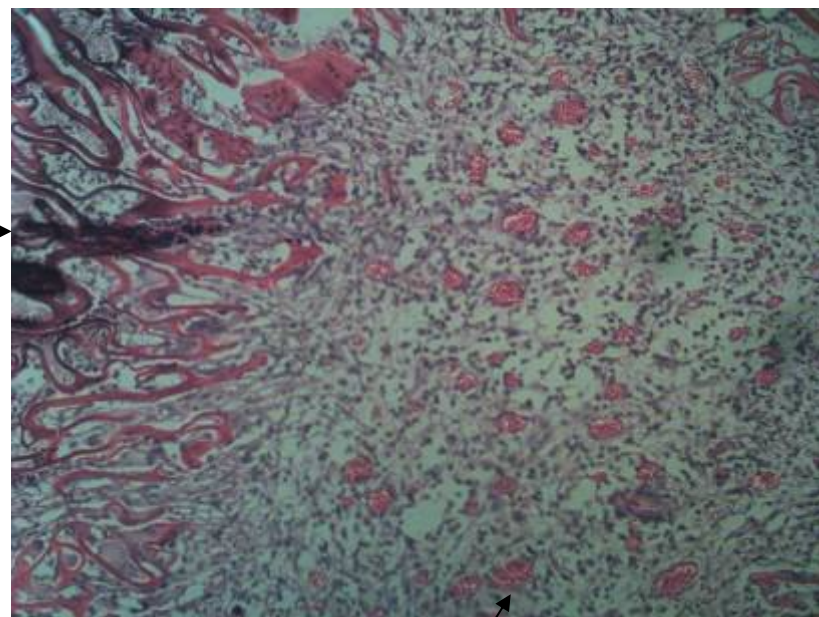
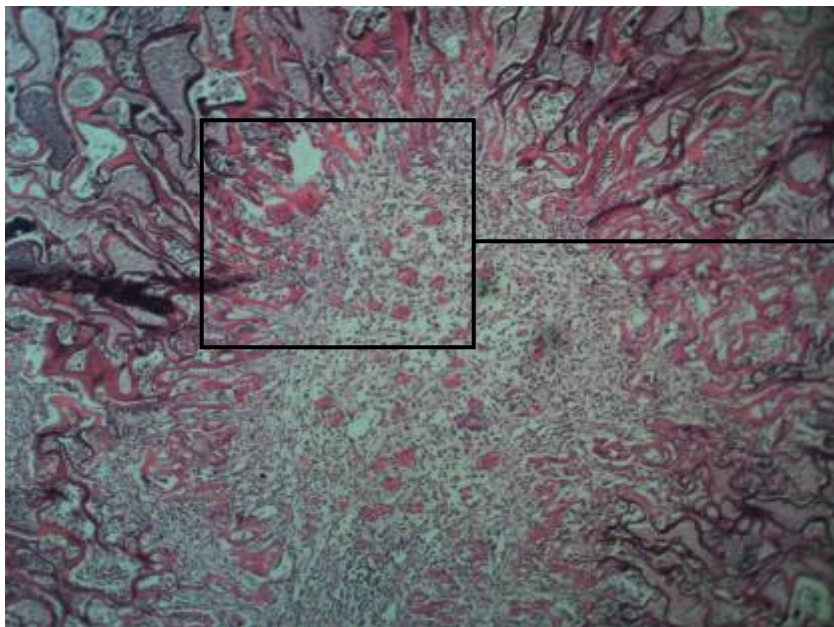


支架细胞复合体体内植入

二、应用研究—生物医疗

●肝组织支架制造

- 工程化肝脏的体内构建
- 血管的形成



血管

二、应用研究—飞机风洞模型

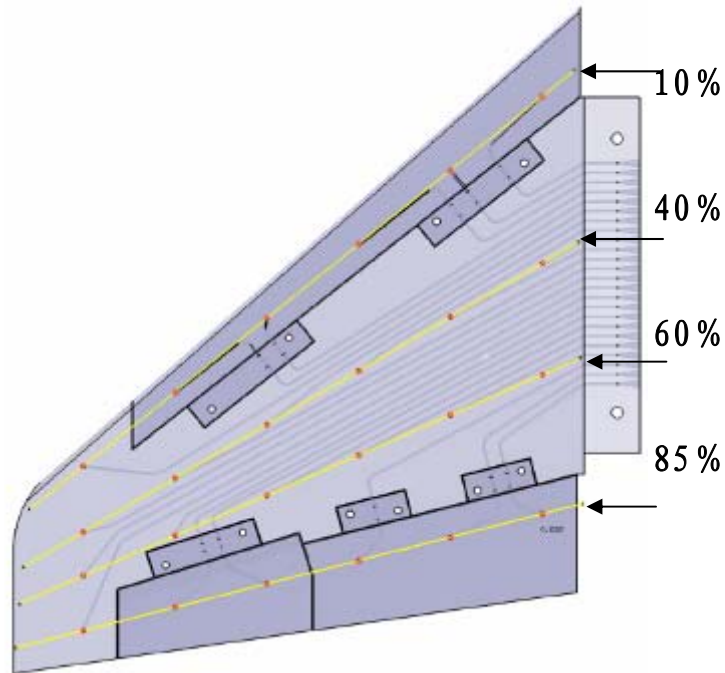
● 形状复杂

- 外形曲面，薄壁
- 内部测压孔

● 制造速度快

● 难点

- 材料强度
 - 光固化原型 + 镀镍
 - 强度提高3倍
- 复合结构



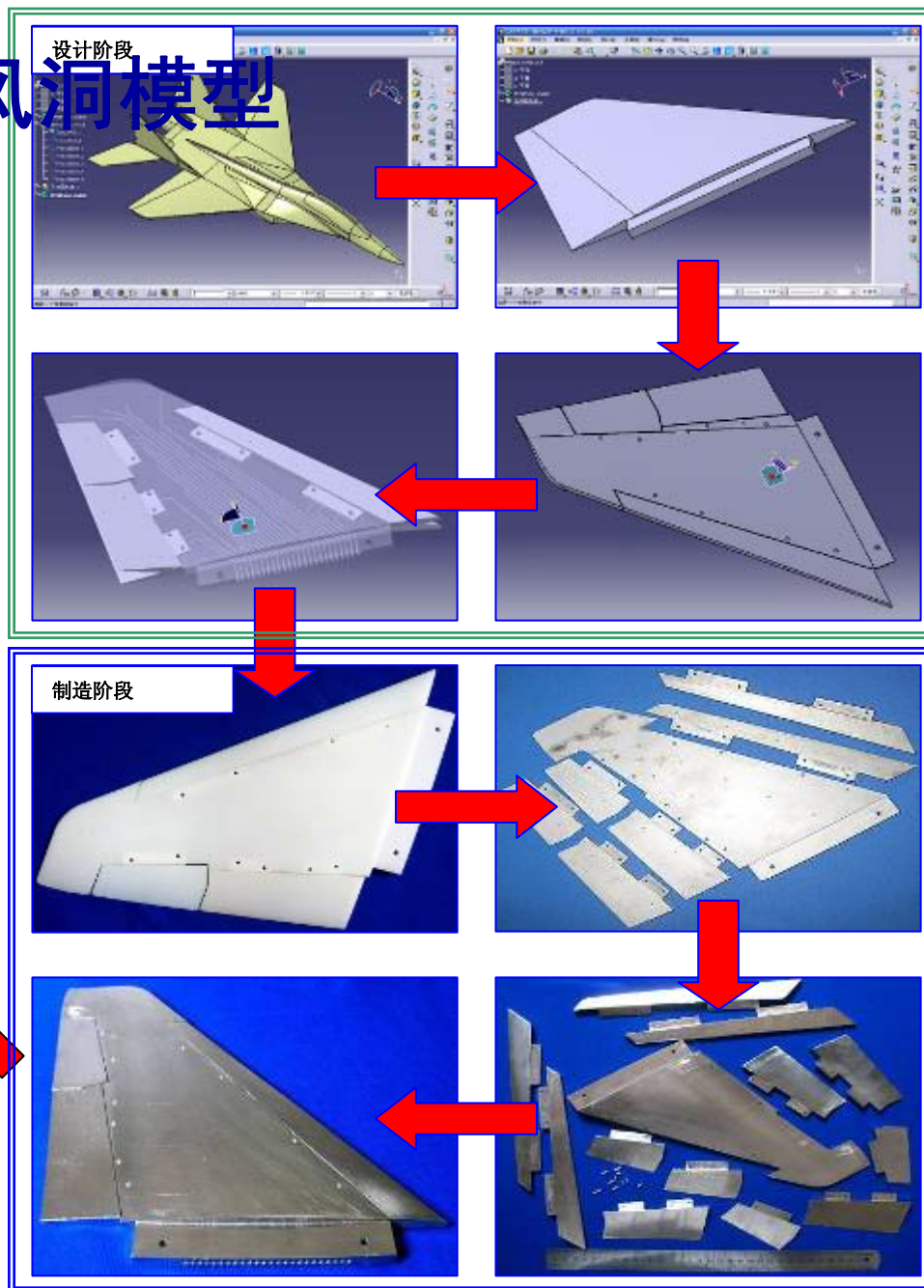
二、应用研究—飞机风洞模型

镀镍复合工艺

- ◆附着力强化研究
- ◆镀镍工艺研究



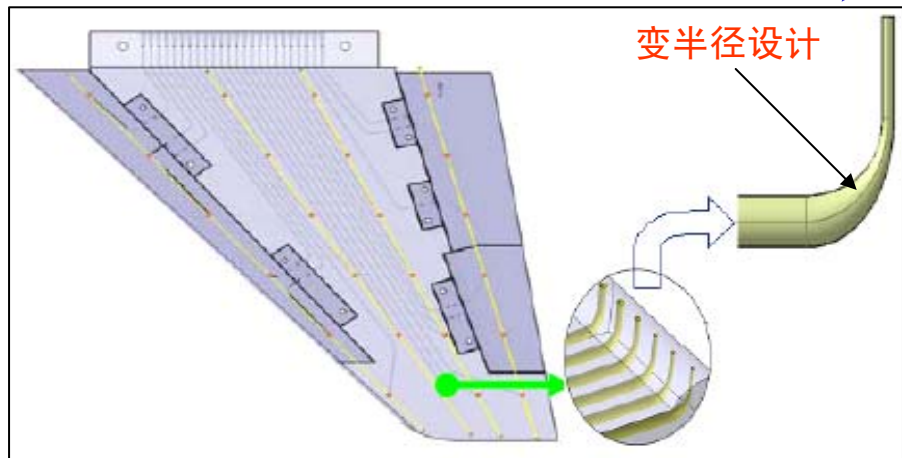
一体化镀镍树脂模型
工艺流程图



二、应用研究—飞机风洞模型

孔道类型	流道长度L/mm	推荐最小设计半径/mm
等半径设计	$L = 0$	0.20-0.40
	$0 < L \leq 50$	0.40
	$50 < L \leq 150$	0.45
	$L > 150$	0.50
变半径设计	流道半径 ≥ 0.50	0.30

最佳成型孔道尺寸



变半径孔道设计

一体化测压模型制造工艺

◆成型性研究

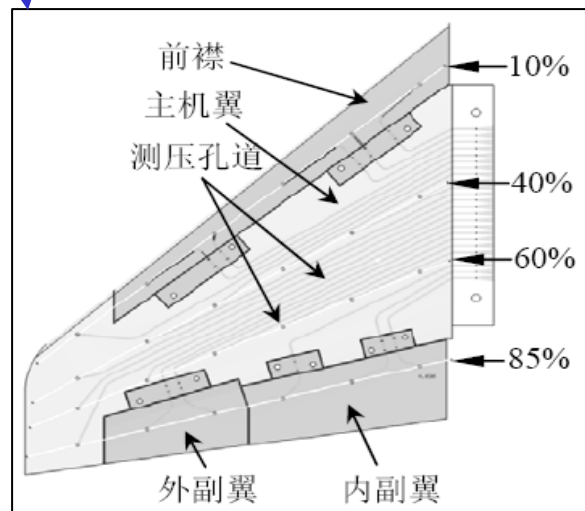
- 最佳成型孔道尺寸

◆孔道设计

- 变半径设计

◆布局设计

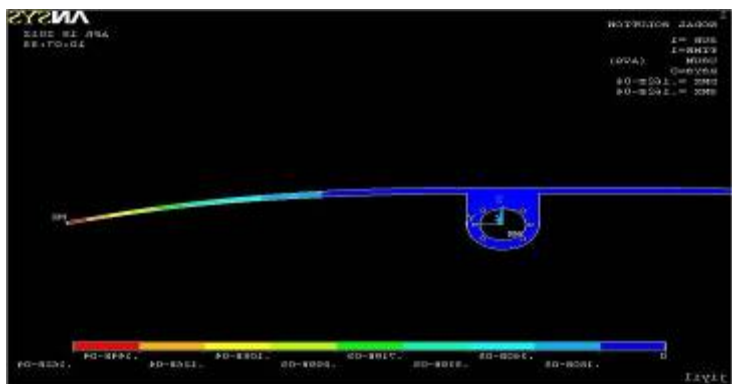
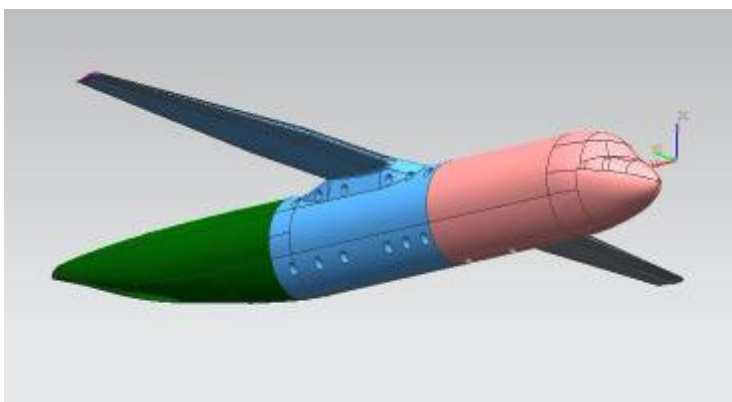
- 多层布局
- 共用流道



测压孔道布局

●气动弹性风洞试验模型

- 美俄碳纤维制造 - 难度大 - 国内无法制造
- 我们的方法 - 快速成形



二、应用研究—飞机风洞模型

●优势

实践表明:

- 测力—时间缩短30—50%，成本降低10—30%
- 测压—时间缩短60—70%，成本降低40—50%

- 时间优势
- 成本优势
- 复杂结构成型优势

模型越复杂，快速成型的优势越明显

二、应用研究—创意产品开发

● 创意产品

■ 新产业的发展点

● 艺术 + 技术



三、研究发展

低成本设备

金属直接成形

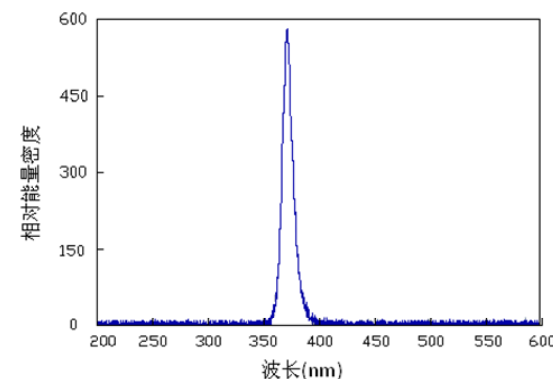
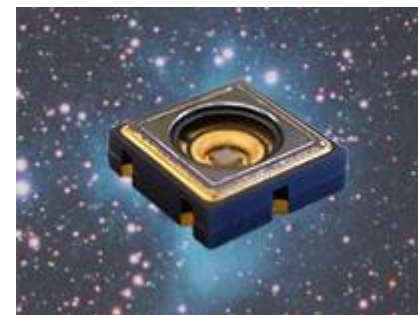
陶瓷直接制造

复合材料制造

三、研究发展—LED紫外成形系统

●UV-LED光源的优点—绿色光源

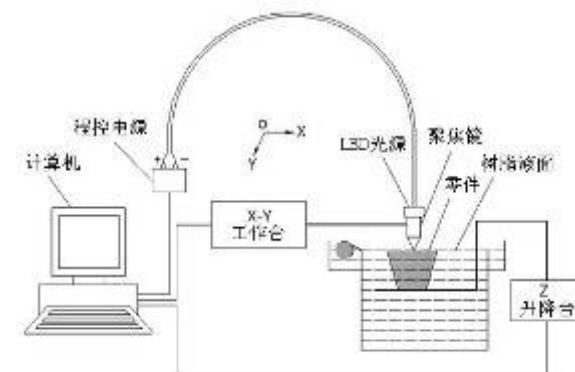
- 能源利用率高、耗电量低、体积小、成本低
- 可瞬时开关，寿命长
- 单色性好，与CPS树脂匹配
 - 光谱主要集中在365nm;
 - CPS树脂感光波段：325nm与365nm;



a) LED波长范围

表： 激光器、紫外汞灯与LED的性价比对比

	激光器	紫外汞灯	LED
耗电功率 (W)	5000	300	2
光功率 (mW)	500	300	250
光斑功率 (mW)	350	3.8	8
能源利用率	0.1%	0.1%	12.5%
寿命 (h)	20000	3000	40000~100000
价格 (美元)	30000	3000	150



三、研究发展—LED紫外成形系统

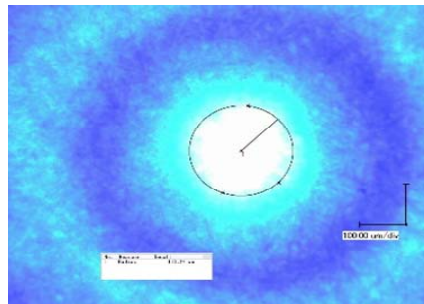
● 聚焦镜的设计

■ 聚焦镜的设计

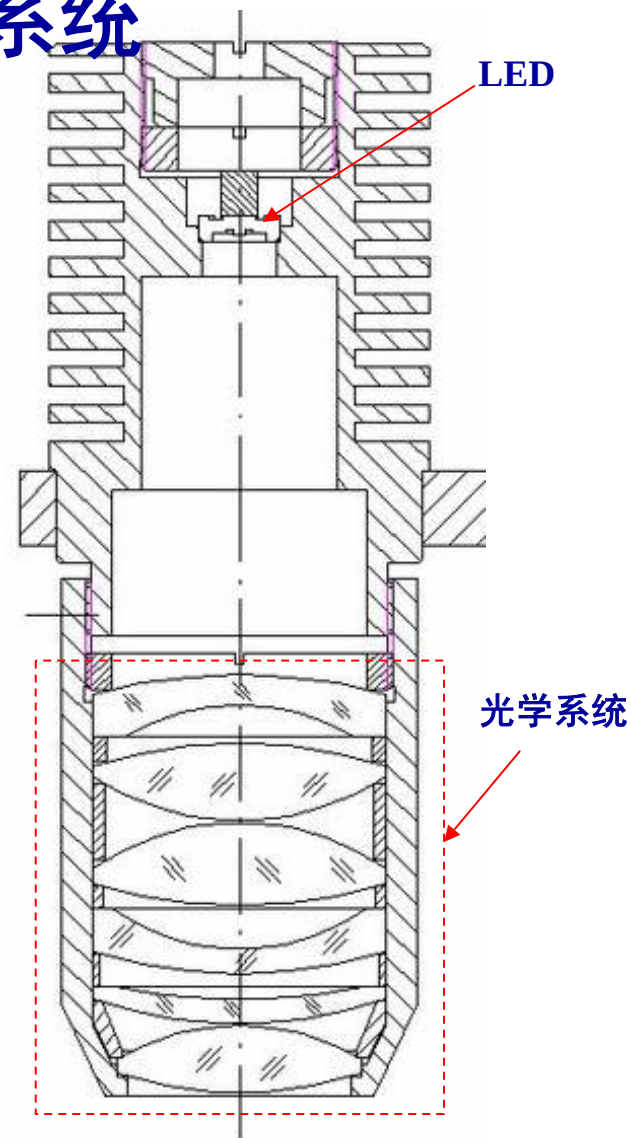
- 尺寸86mm × Ø31mm
- 6块球面透镜组成的透镜组

■ 聚焦镜的聚焦效果

- 光斑大0.44mm
- 光晕分布范围大且强——主要问题



光斑与晕环



聚焦镜结构

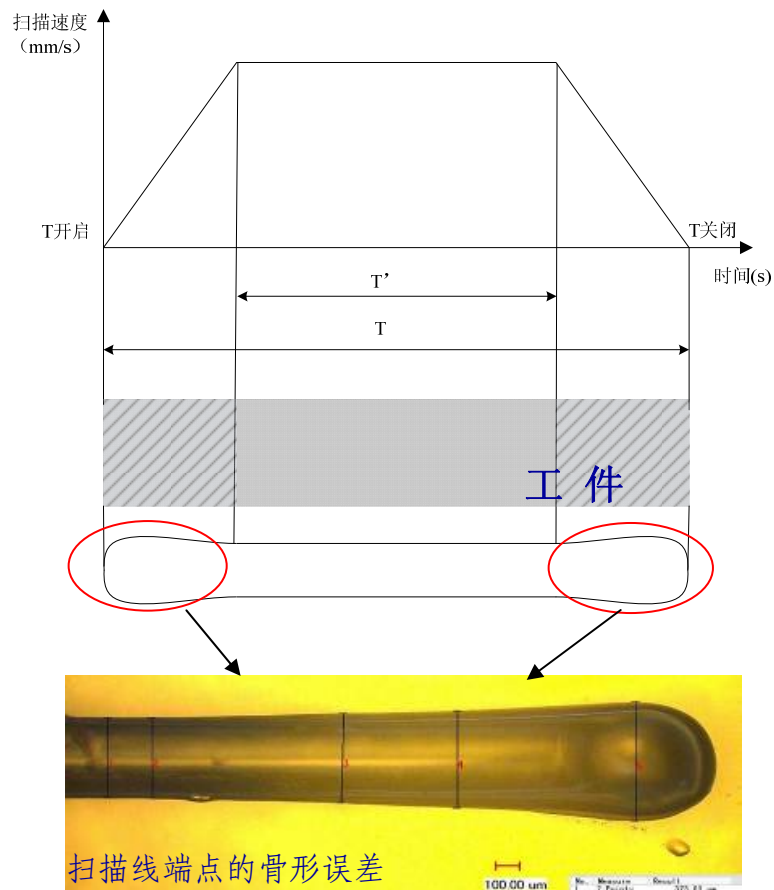
三、研究发展—LED紫外成形系统

●能量跟随扫描工艺

- 扫描路径起始端有加减速过程
- 扫描路径上的曝光量不均
- 骨形误差

●解决办法

- 光斑的功率随扫描速度的变化
- 保证扫描液面曝光量相同

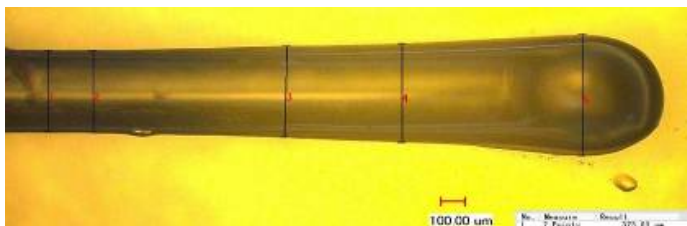


端部骨形误差形成示意图

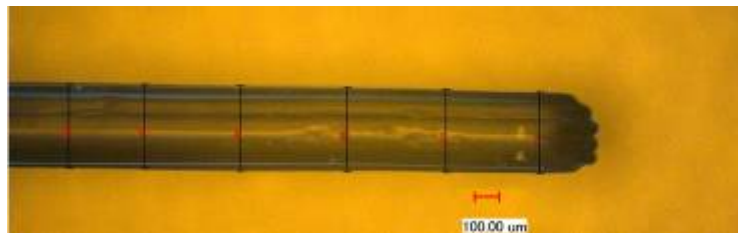
三、研究发展—LED紫外成形系统

●能量跟随的效果

■单线宽度均匀

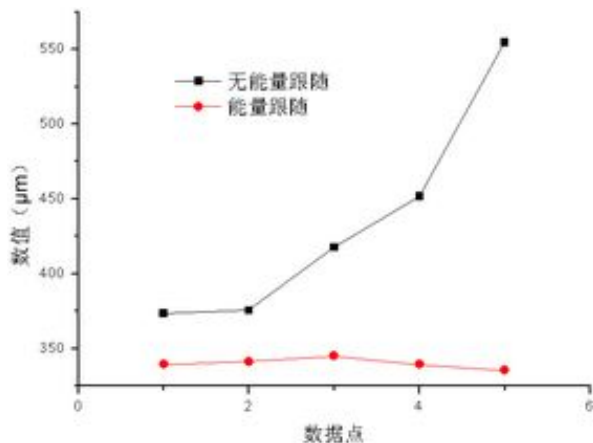


未采用能量跟随扫描的单条固化线

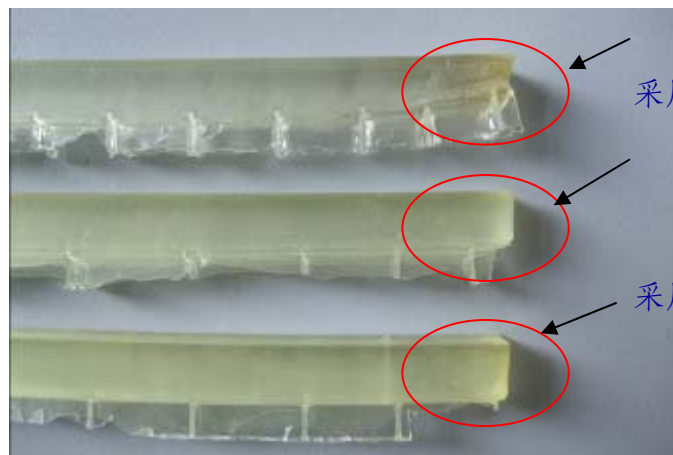


采用能量跟随后的单条固化线

未采用能量跟随



数据稳定性



采用能量跟随与未采用能量跟随制件对比

三、研究发展—LED紫外成形系统



阀体



叶轮



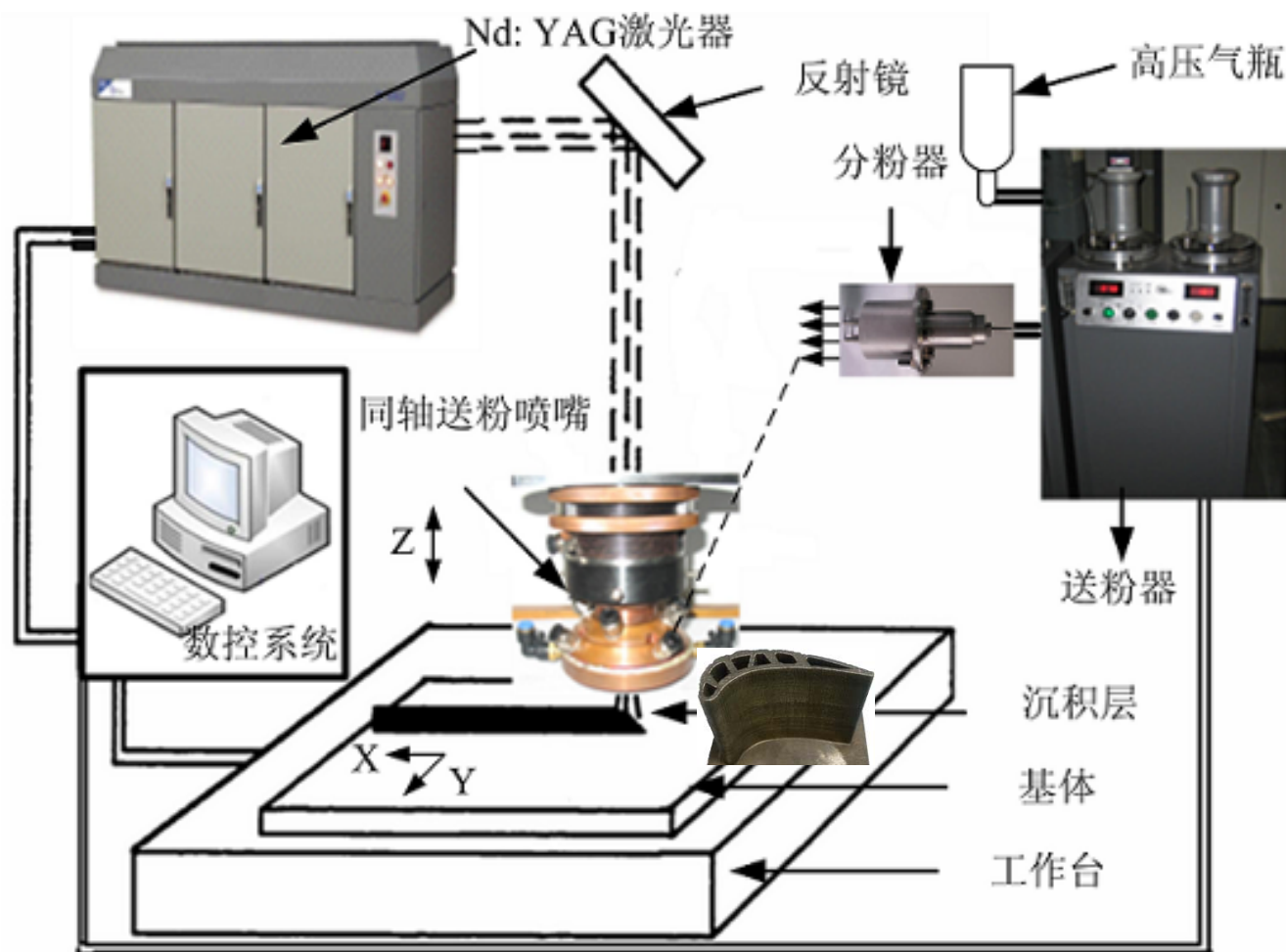
大雁塔



海豚

三、研究发展—金属直接制造

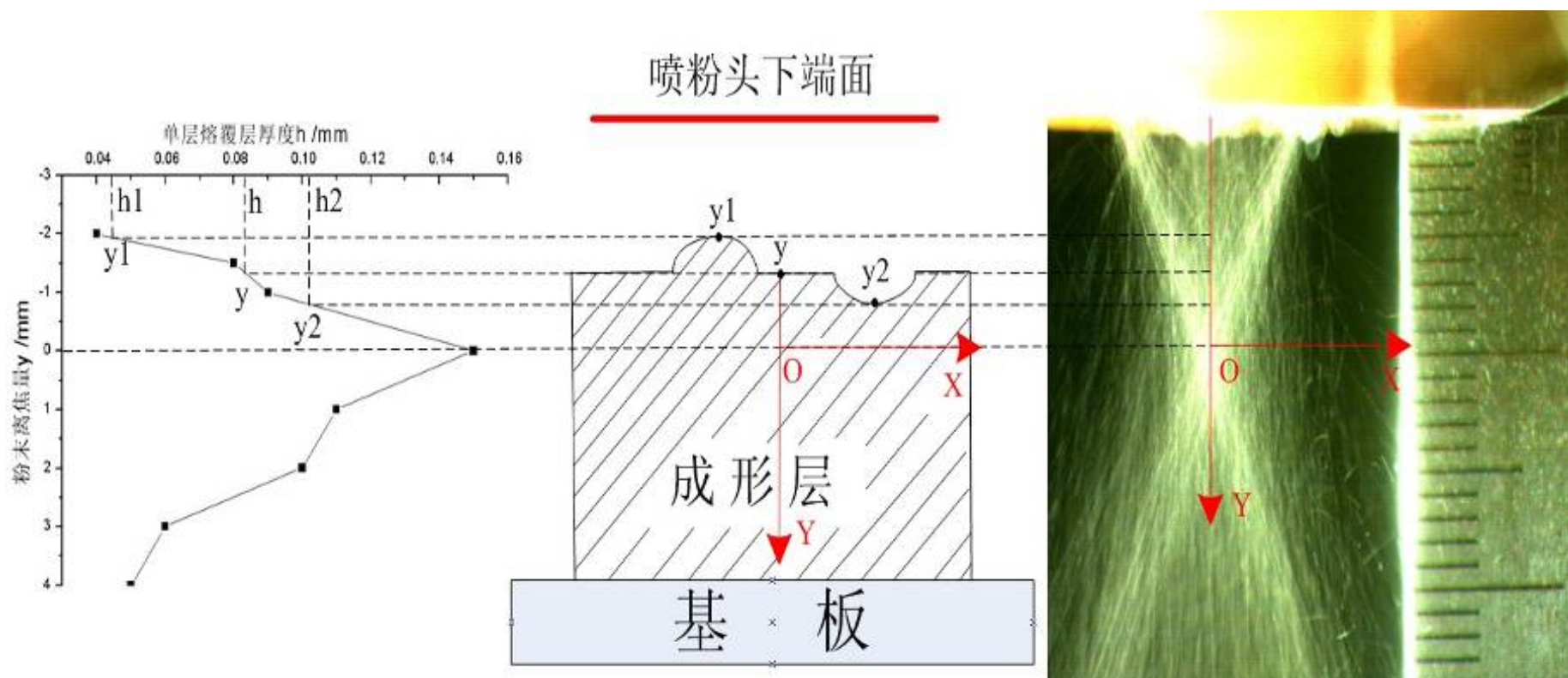
●建立了制造系统



三、研究发展—金属直接制造

●建立多层激光直接成形的自稳定机制

■认识：金属直接成形自愈合原理

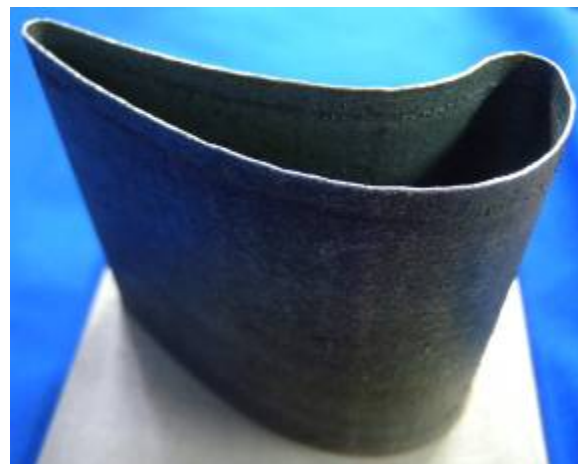
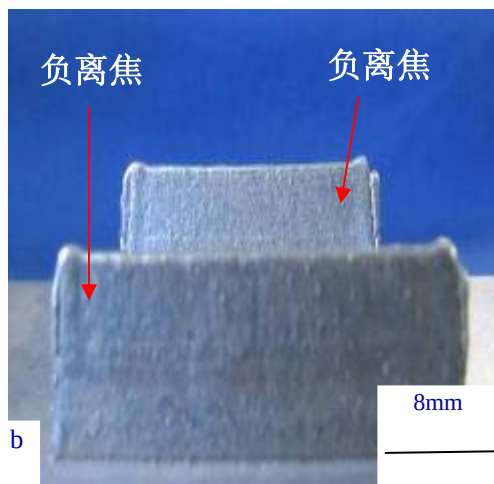


LMD粉末负离焦自愈合（自修复）原理示意图

三、研究发展—金属直接制造

●建立多层激光直接成形的自稳定机制

- 利用粉末负离焦制造的薄壁
- 侧面平均粗糙度约 $Ra=10.04 \mu m$



叶片高度:70mm;壁厚:0.80mm;总层数:840

扫描速度(mm/s)	送粉量(g/min)	激光功率(W)	粉末负离焦(mm)	ΔZ	载气量(l/min)
6-10	8.8	250-200	-2	0.08-0.1	8

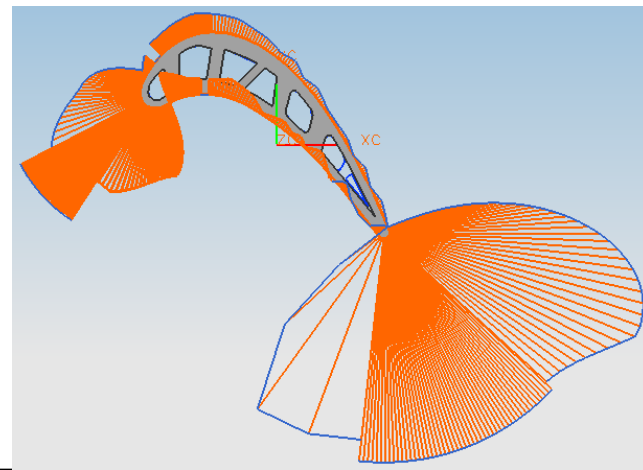
三、研究发展—金属直接制造

●叶片制造中的曲率效应

■实验发现曲率大处熔化严重



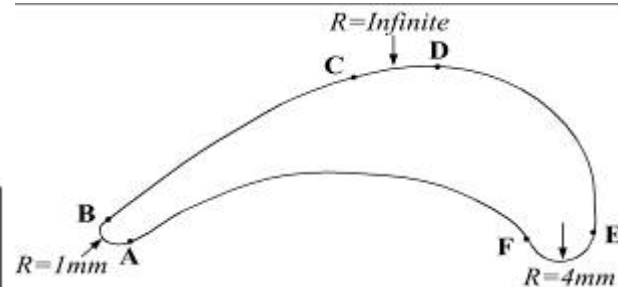
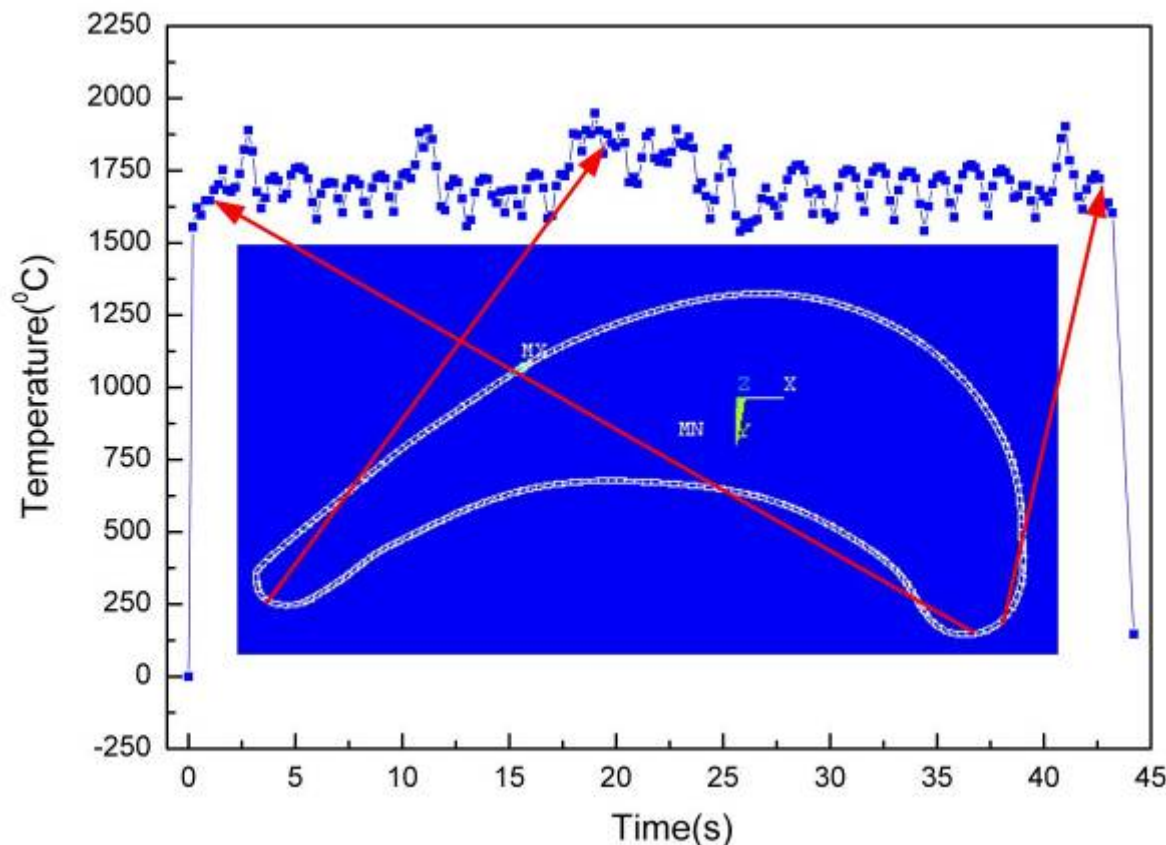
两侧拐角处出现严重的坍塌，造成成形件的成形质量较差



三、研究发展—金属直接制造

●叶片制造中的曲率效应

■熔池温度随累加时间的变化曲线趋势



拐角处(AB段)平均温度:

1867.8°C

曲率小(CD段)部位温度:

1568.3°C

温度差:

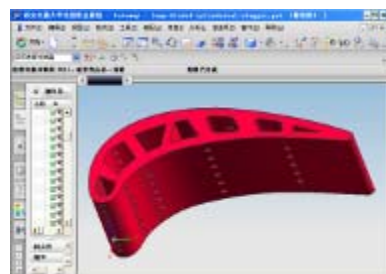
T=1867.8-1568.3
=299.5°C

结论: 曲率的变化, 熔池温度变化, 能量分布不平衡, 调节功率

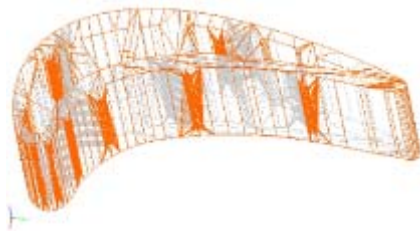
三、研究发展—金属直接制造

●空心叶片扫描路径的设计与实验

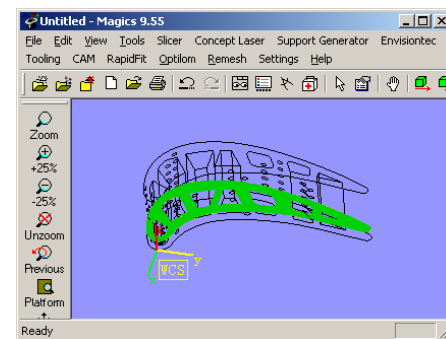
■扫描路径的规划



CAD模型



STL数据

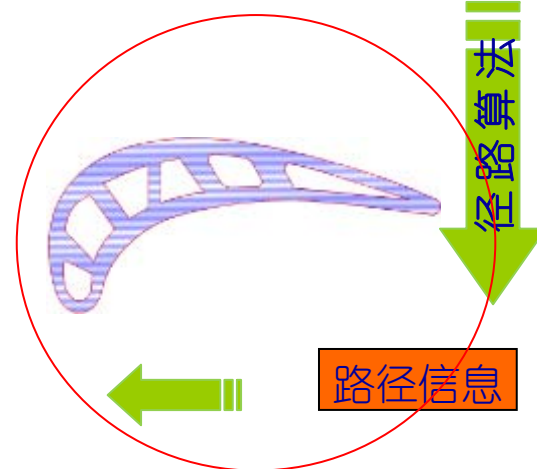


切片轮廓 PMR/SLC

激光金属直接成形数据流程



激光金属成形设备



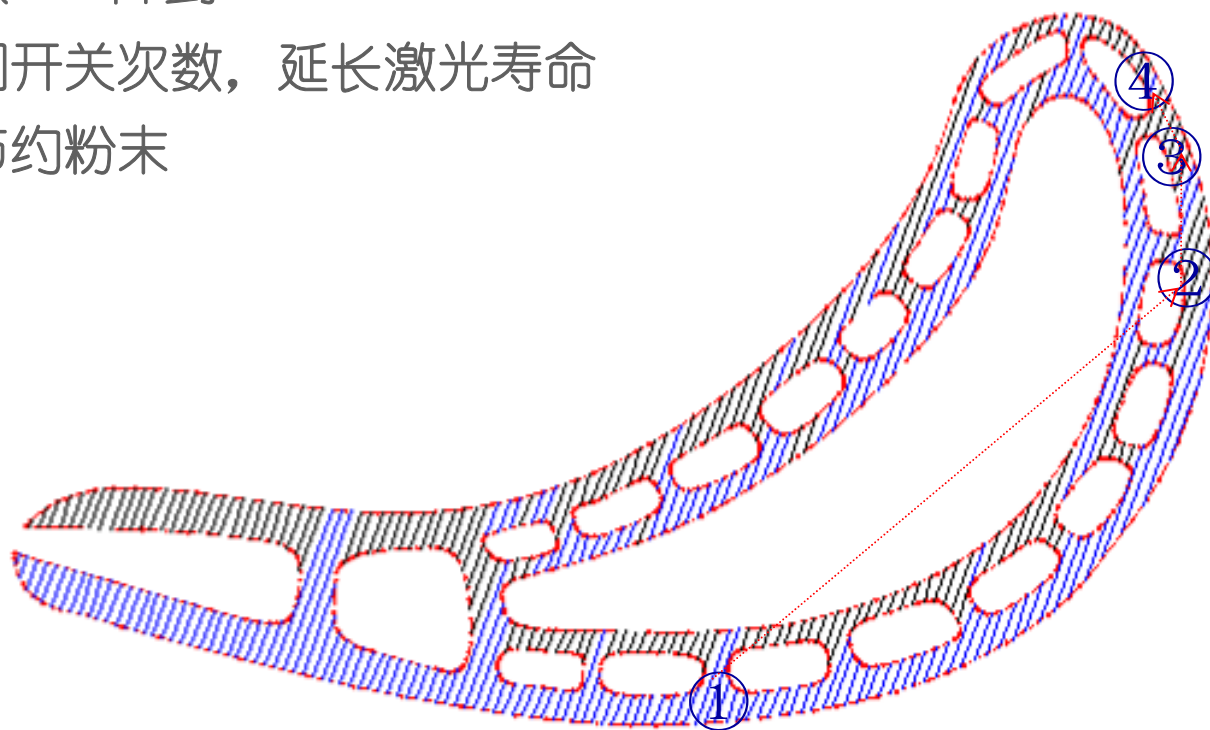
路径算法

路径信息

三、研究发展—金属直接制造

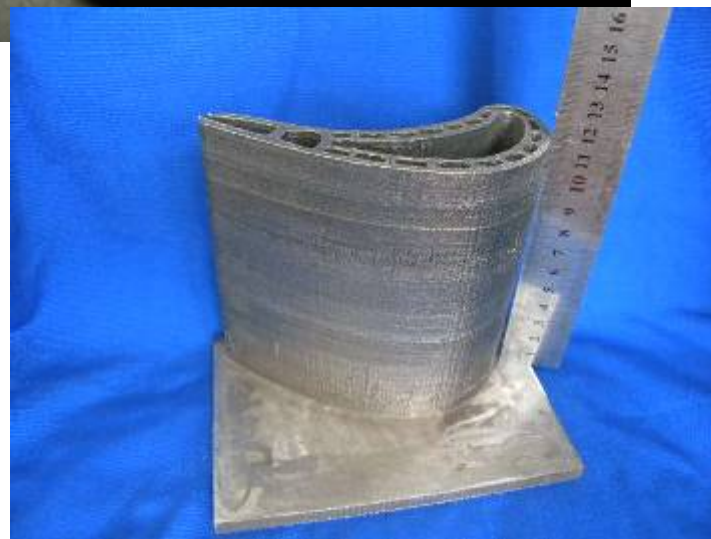
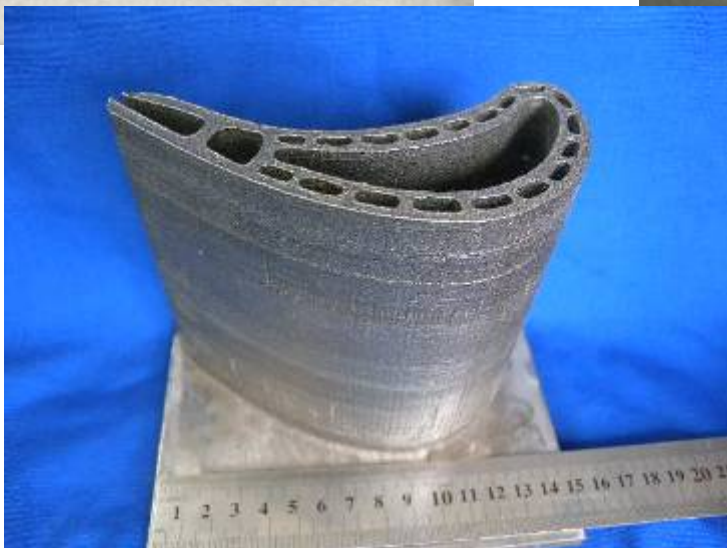
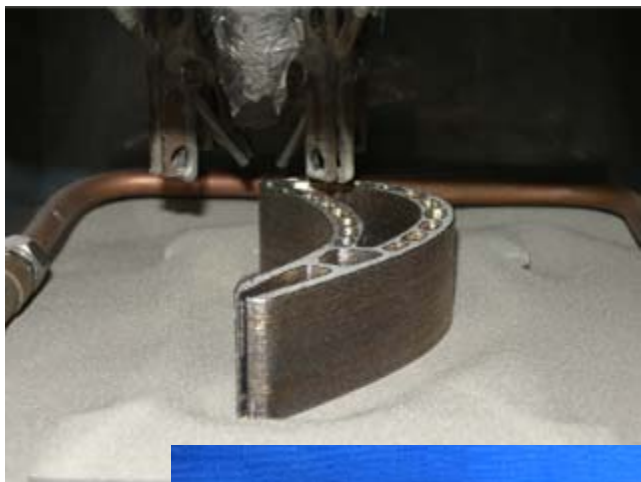
●空心叶片扫描路径设计与实验研究

- 轮廓+光栅(方向优化)+分区→扫描复杂空心叶片
- 分区的优点：
 - 每层扫描时间从930s降到650-850s
 - 减少激光器光闸开关次数，延长激光寿命
 - 空行程减少，节约粉末



三、研究发展—金属直接制造

● 高温合金叶片制作

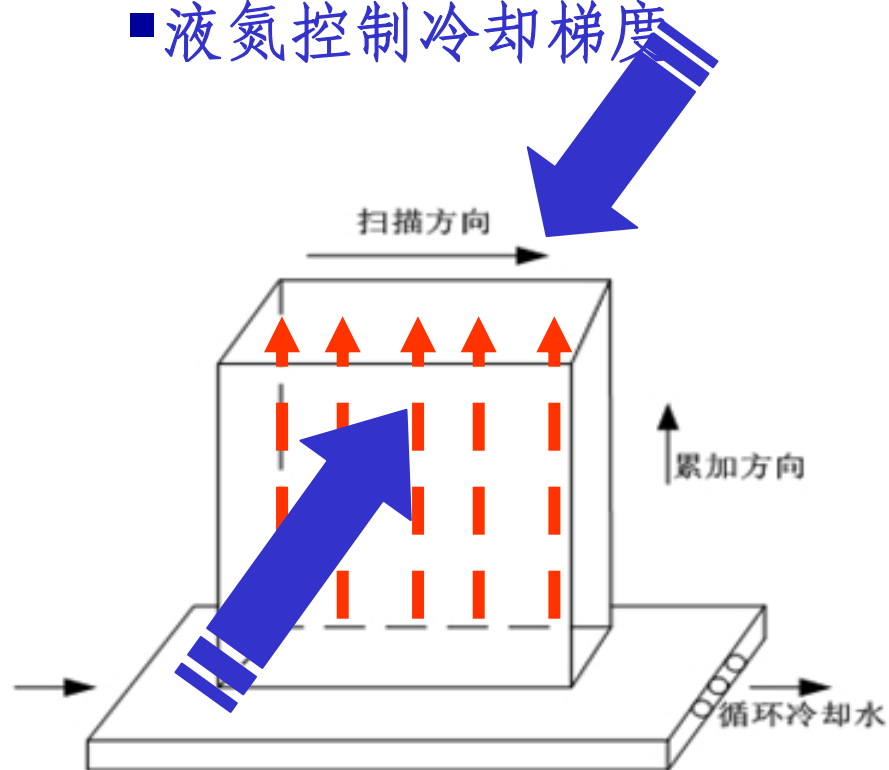


140mm(L)×120 (H)

三、研究发展—金属直接制造

●空心叶片定向晶组织控制

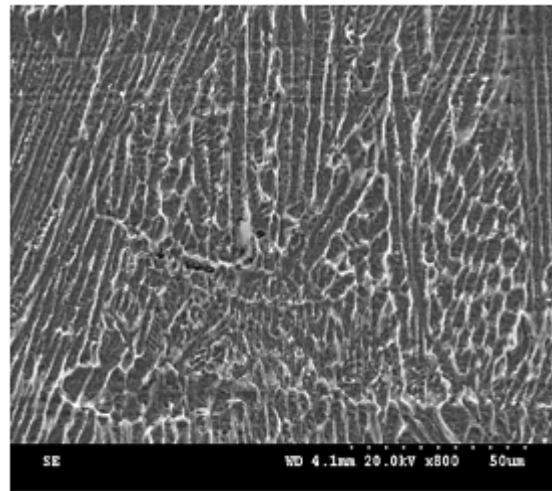
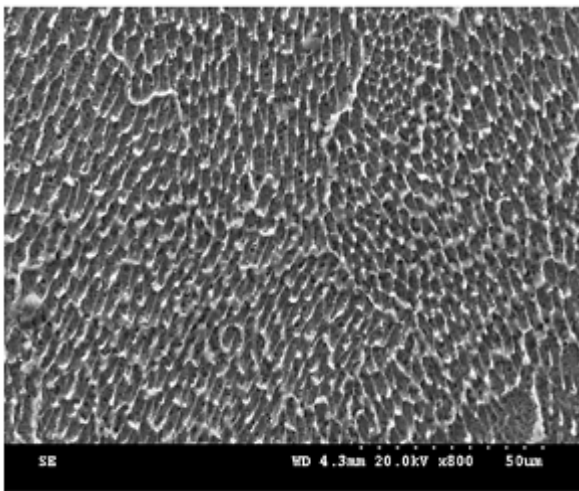
■液氮控制冷却梯度



液氮冷却实验台

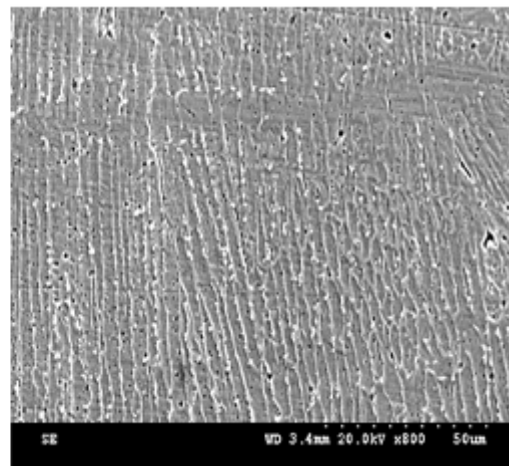
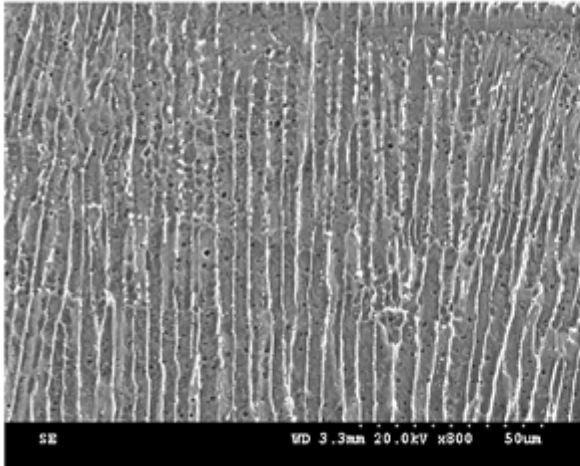


液氮冷却喷嘴



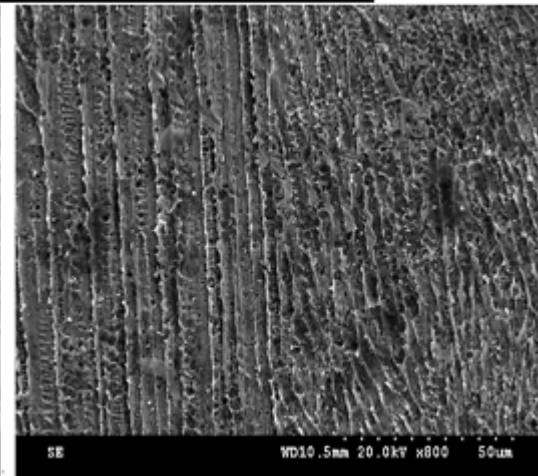
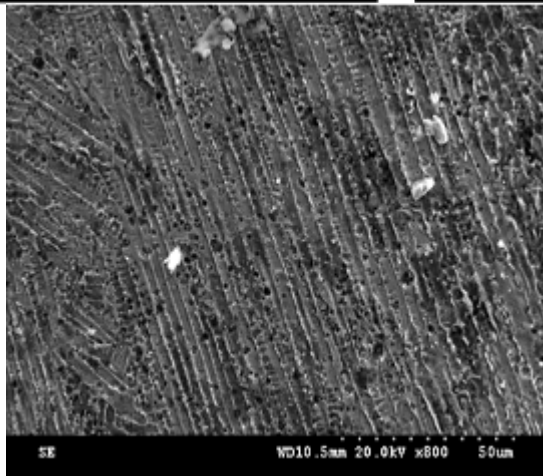
正常冷却组织

A面 B面



水冷却组织

A面 B面



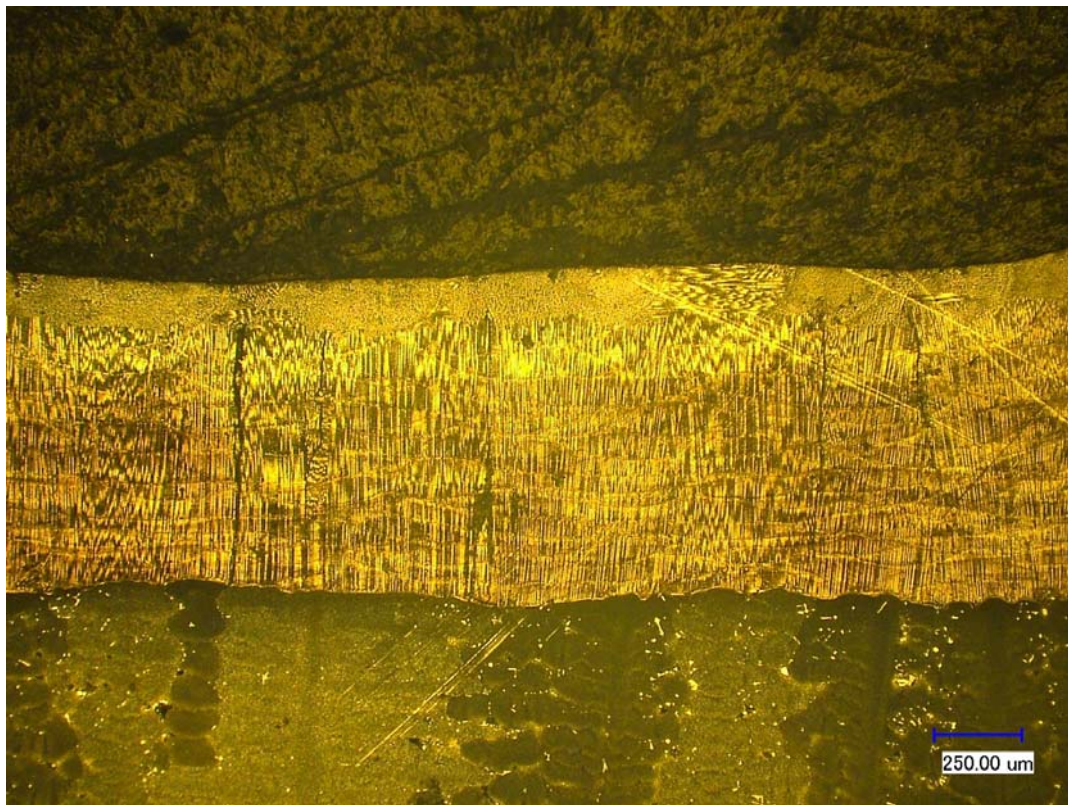
液氮冷却组织

A面 B面

三、研究发展—金属直接制造

●定向晶组织控制

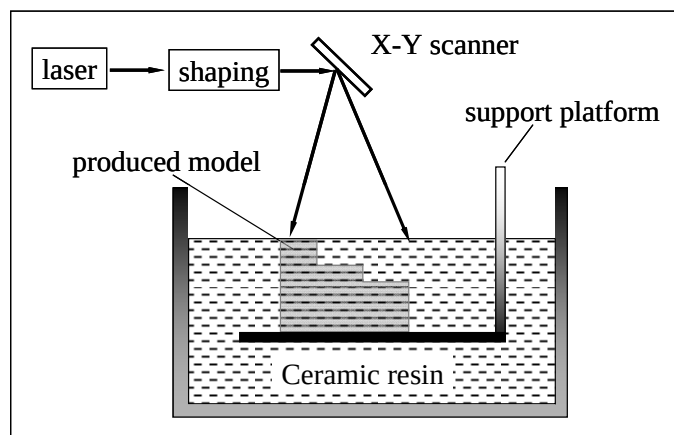
■大段定向晶组织控制



三、研究发展—陶瓷零件制造

●成形原理及设备

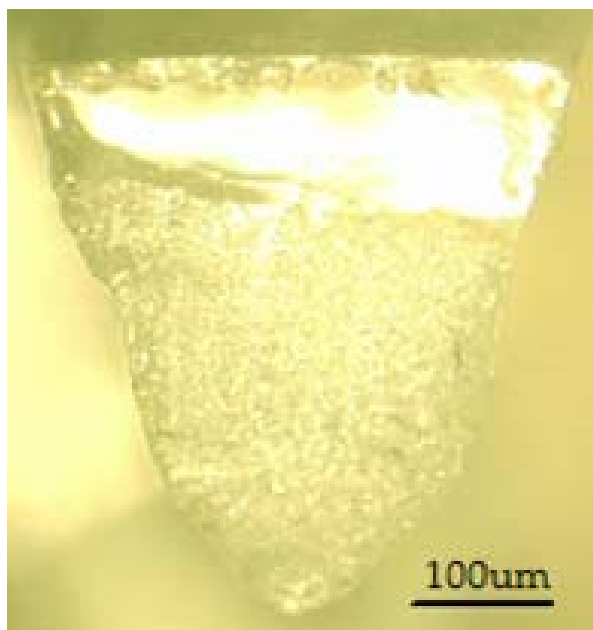
- 成形原理示意图（下图）
- 光固化成型机（右上）
- 陶瓷树脂铺层装置（右下）
- 磁力搅拌
- 再涂层刮刀：聚四氟乙烯



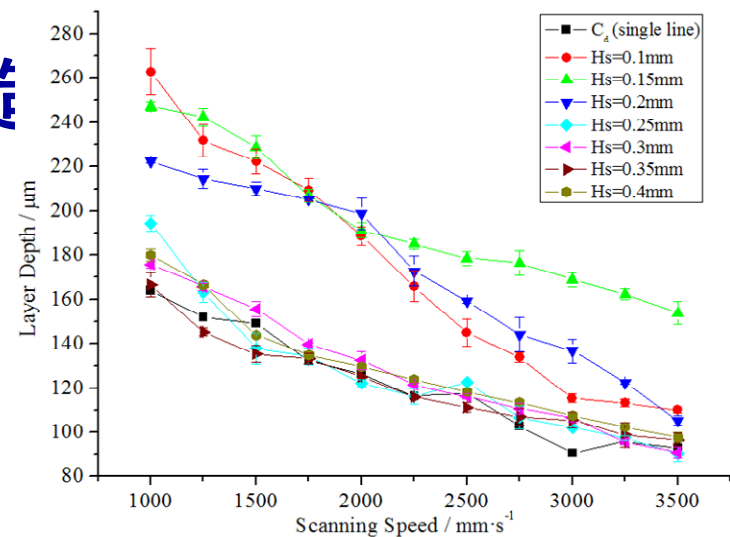
三、研究发展—陶瓷零件制造

●陶瓷固化特性研究

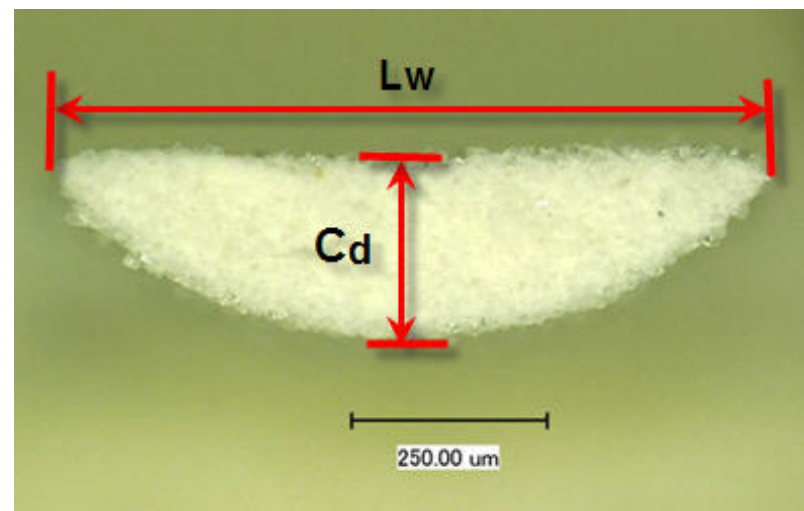
- 单线固化厚度及宽度
- 固化层厚



光敏树脂单线固化断面形态



固化厚度随工艺参数的变化规律



陶瓷树脂单线固化断面形态

三、研究发展—陶瓷零件制造

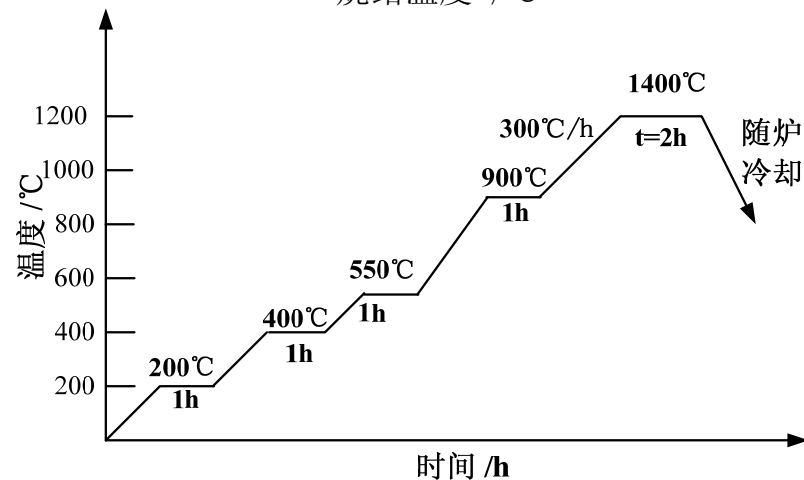
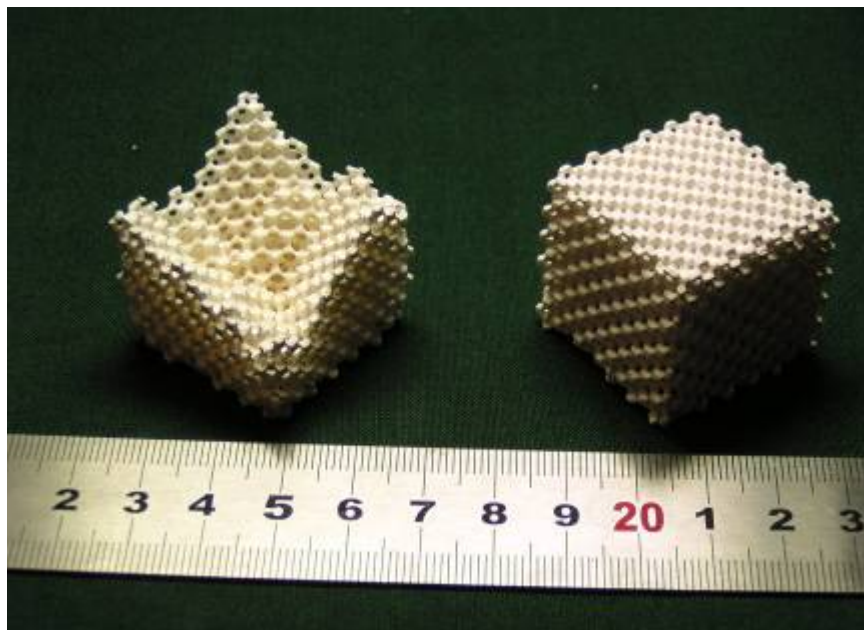
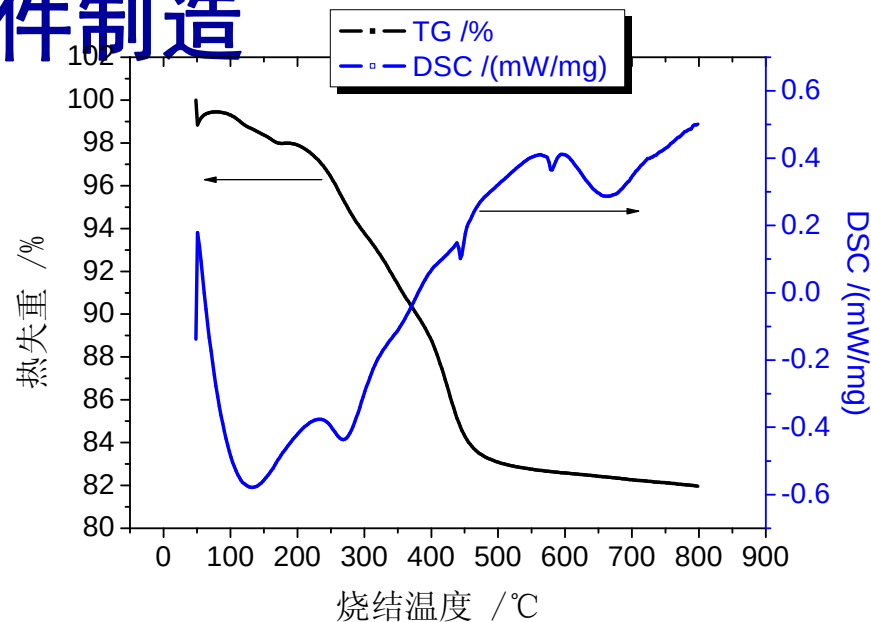
●光固化直接制造陶瓷铸型



三、研究发展—陶瓷零件制造

●光子晶体制造工艺研究

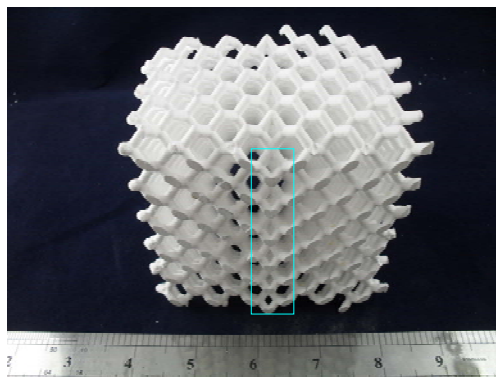
- 热重与差热分析 (右上)
- 陶瓷零件后处理升温工艺 (右下)
- 烧结所得光子晶体零件 (下图)



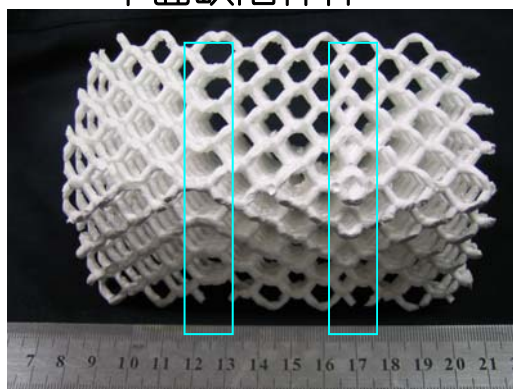
三、研究发展—陶瓷零件制造

●缺陷光子晶体制造

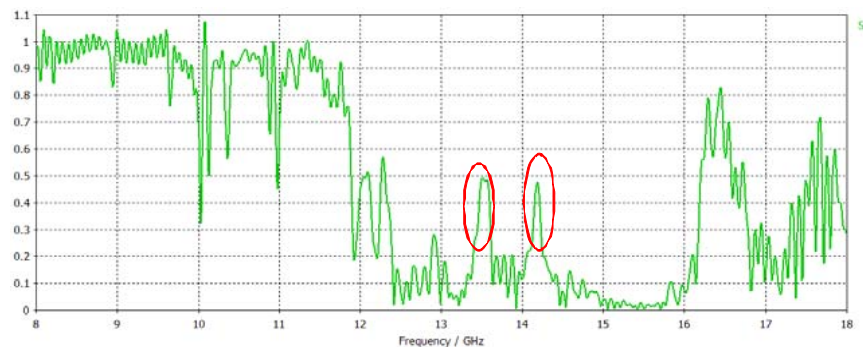
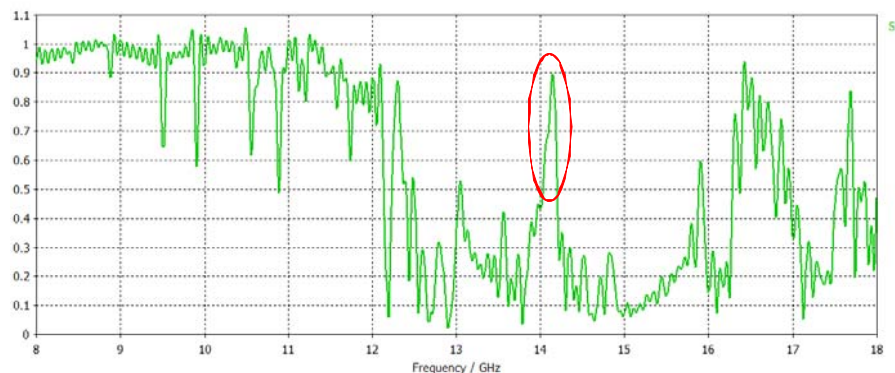
■面缺陷光子晶体及其传输性能分析



单面缺陷样件



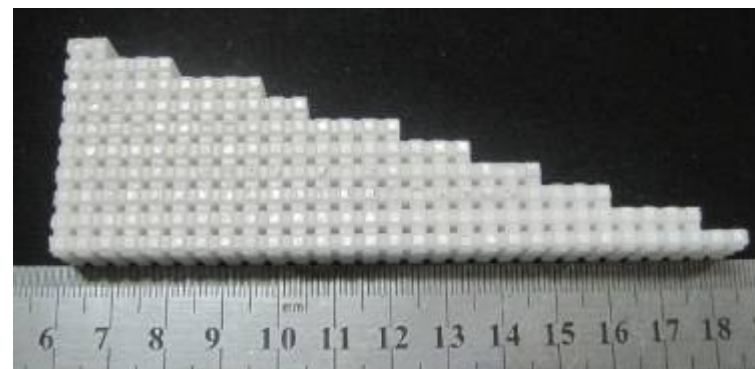
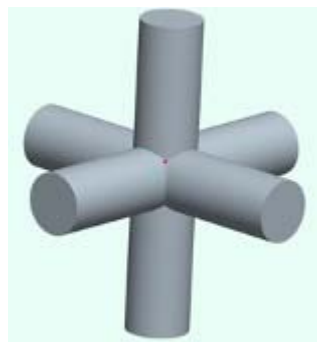
双缺陷样件



三、研究发展—陶瓷零件制造

●负折射三维全介质超材料

- 全介质可有效避免金属材料在高频段的色散和损耗
- 三维结构复杂，传统工艺难以制造；
- 实验使用材料及试样结构
 - $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$, $\varepsilon = 750$ ；模板结构为14120树脂, $\varepsilon = 3.5$
 - 谐振单元（下左），三维超材料（下右）



三、研究发展—陶瓷零件制造

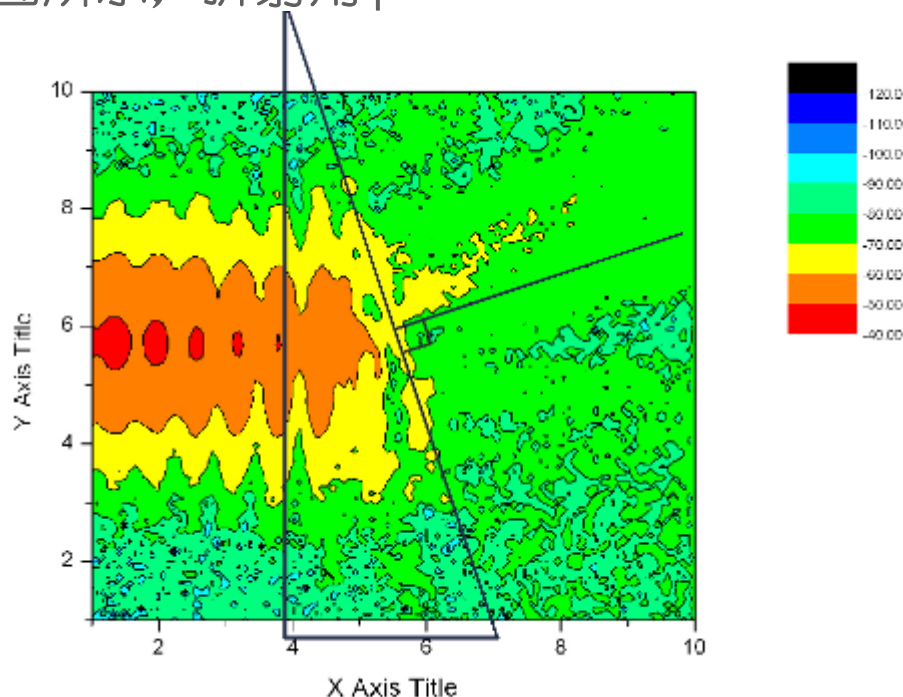
●负折射三维全介质超材料

■三维圆柱交叉超材料的能量分布测试结果

- 在10.6到10.625之间观察到了负折射现象
- 在10.6G处的能量分布如下图所示，折射角 $\varphi = 13.3^\circ$

根据Snell定律： $n \sin \theta = n_0 \sin \varphi$
 n ， θ 分别为超材料结构的折射率和入射角， n_0 ， φ 分别为在空气中的折射率和折射角。

得出：折射率 $n = -0.73$

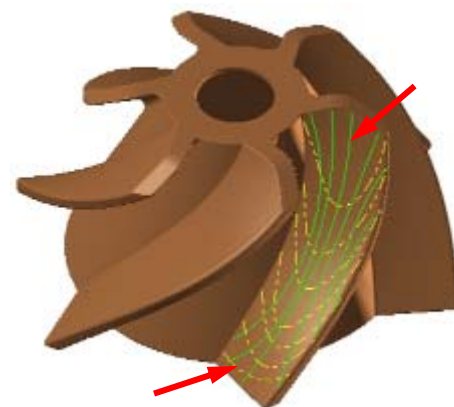
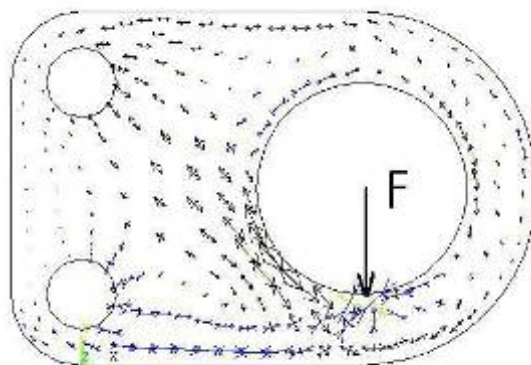
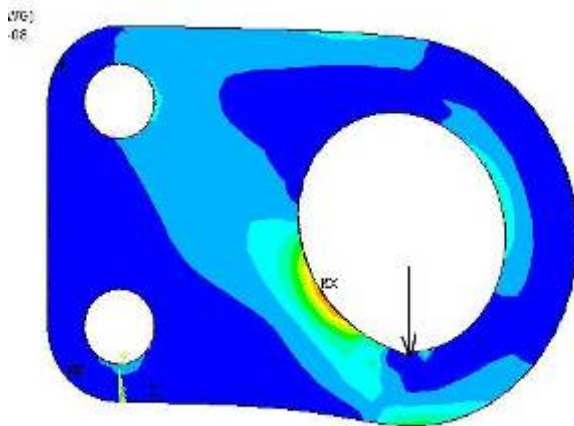
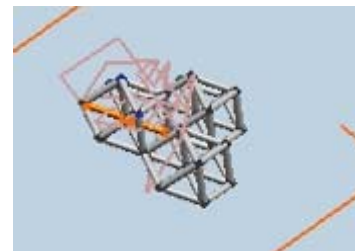
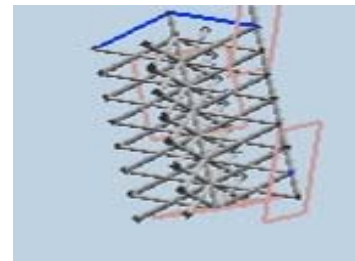


三、研究发展—复合材料制造

● 碳化硅复合材料

■ 基于载荷的组织设计

- 实现手段—支撑结构中组织的变化
- 根据承载设计组织
- 载荷—组织匹配
 - 克服均质材料的不足

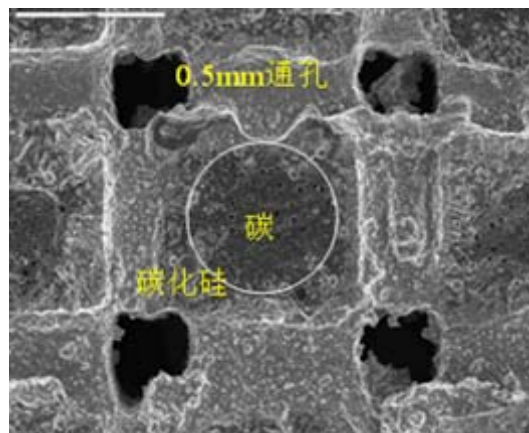


三、研究发展—复合材料制造

● 碳化硅复合材料

■ 光固化原型 → 制作碳化硅复合材料零件

- 传统思想—先制材料—后成型
 - 陶瓷材料难以加工
- 我们的设想—先成型—宏观结构与微观组织—转化材料
- 光固化原型—碳支架—碳硅反应—碳化硅复合构件
 - 控制微结构
 - SiC/C比例
 - 控制强韧性



三、研究发展—复合材料制造

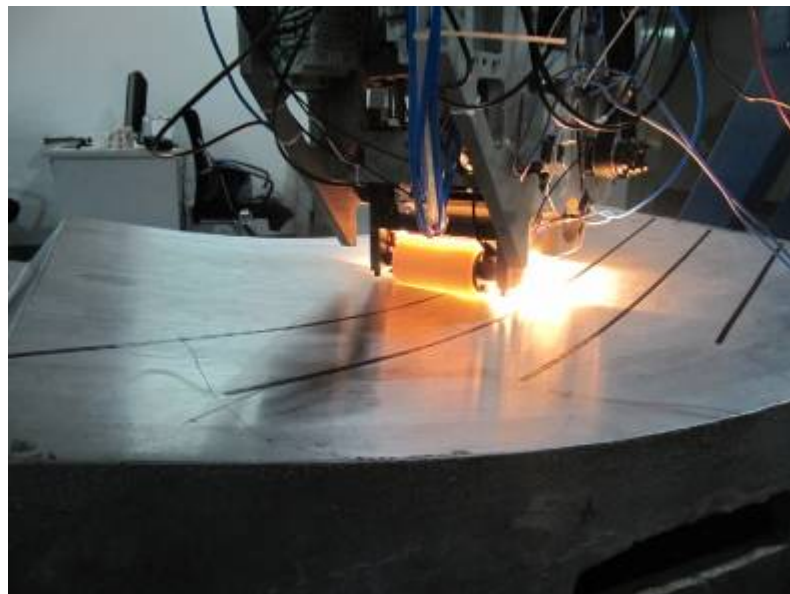
●纤维增强复合材料铺放设备—航空航天需要

■逐层铺放

- 曲面铺放
- 电子束与紫外光固化



研制的纤维自动铺放机



实际纤维铺放过程

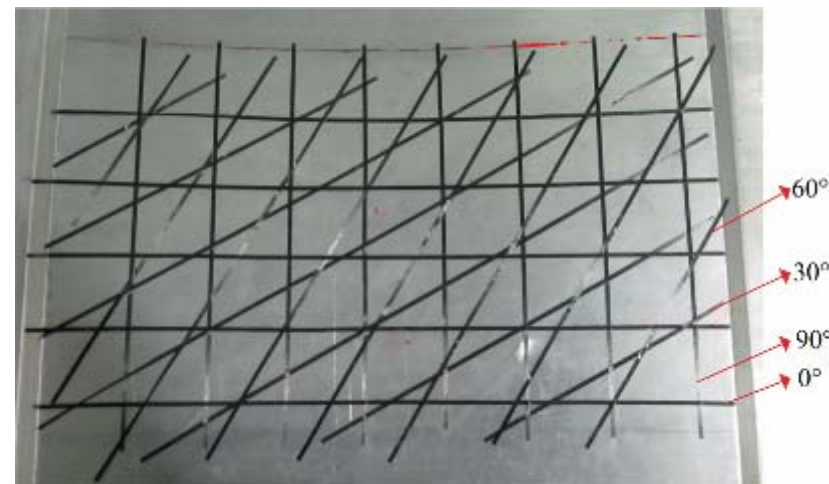
三、研究发展—复合材料制造

●纤维增强复合材料铺放设备

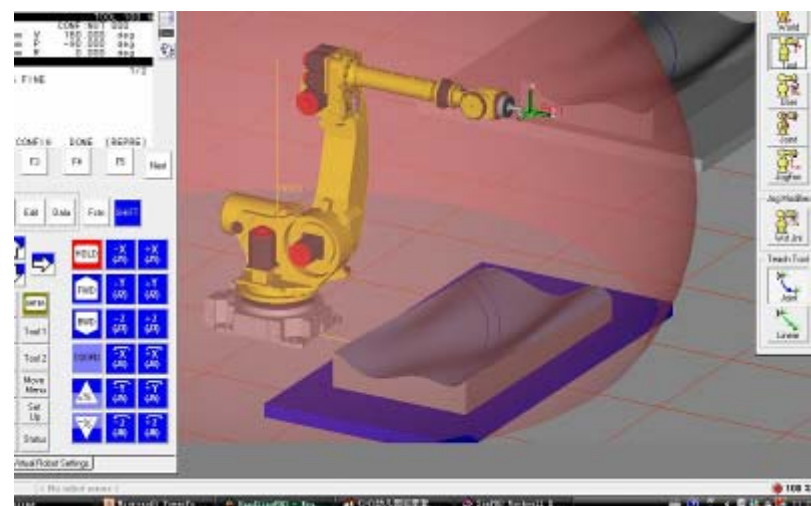
■研制设备与工艺



电子束固化壁板



不同铺放角度的可行性验证



四、结语

● 产业：如何走向前端

- 三维打印机 - 量大面广
- 金属直接成型 - 直接使用

● 研究：如何有新的创新

- 新观点 - 支撑技术未来发展 - 宏结构 - 制造
- 结合点 - 新技术快速转移 - 带动

● 应用：如何更加普及

- 企业的应用
- 技术的配套
- 日常的创新



新的挑战

四、结语

●中国制造业未来—创新的工具

美国奇点大学教授发文—2012年1月华盛顿邮报

为何该轮到中国为制造业担忧

引起中央领导关注

美国制造业竞争力的三大利器

人工智能

机器人

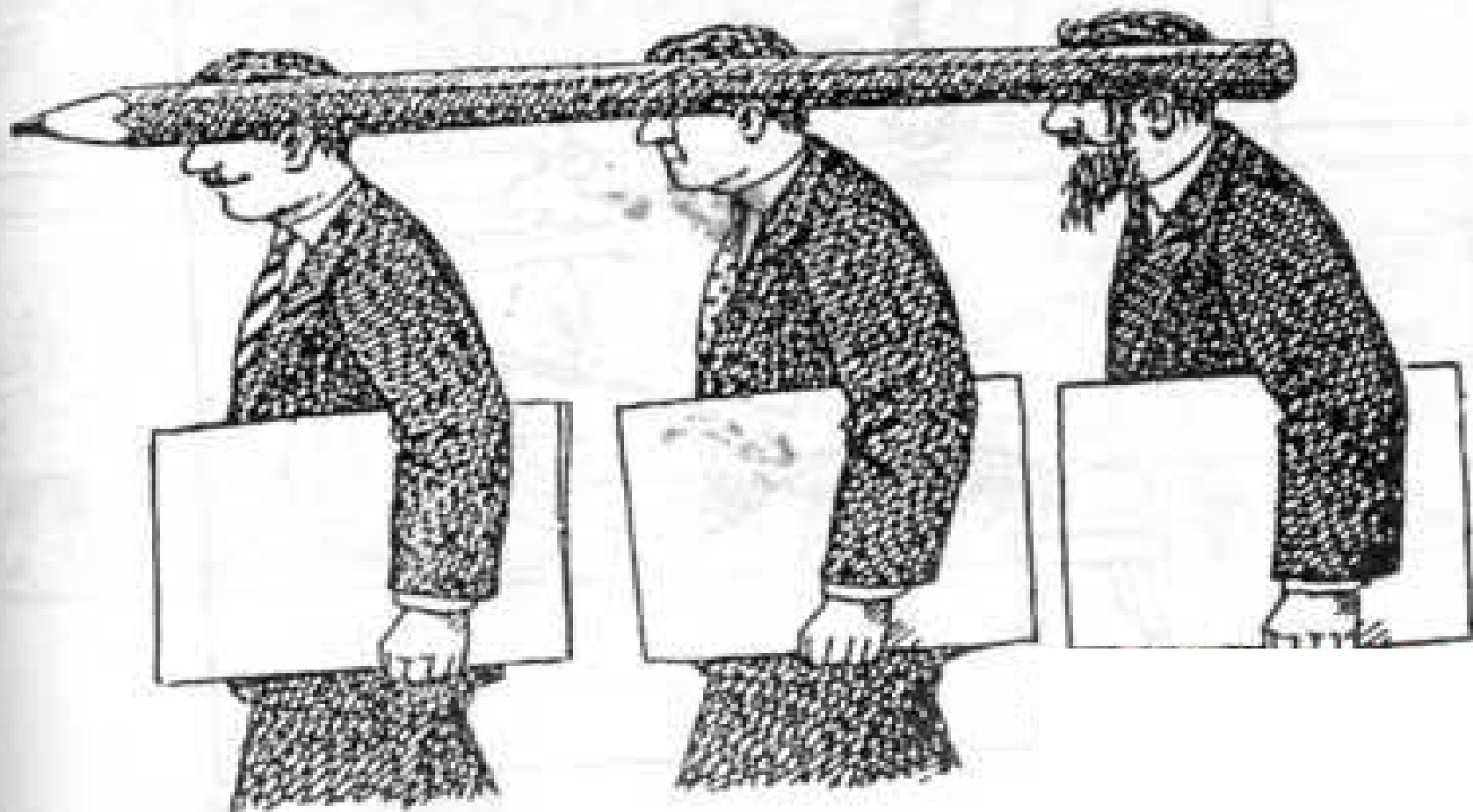
数字3D制造

美国发展高端制造的优势

中国如何竞争？

Why it's China's turn to worry about
manufacturing





需要团结努力
谢谢！