

# 注塑技术创新与先进制造

## 智能制造与模塑成型 从3D打印到3D复印

---



杨卫民

2017.4.6 东莞

# 高分子材料加工成型与先进制造

北京化工大学交叉学科创新团队



英蓝团队





# 报告人简介

## 杨卫民

世界塑料工程师学会注塑专委会主席  
全国优秀教师 “长江学者” 特聘教授

杨卫民，博士，教授，1965年11月生，湖南会同人，1983-1990年于北京化工学院机械系本科、硕士研究生毕业并留校任教，1994-1998年在职攻读取得工学博士学位，1999年破格晋升教授，2000-2002年国家公派到日本东京大学留学并按期回国工作，先后入选1999年北京市“新星计划”，2005年教育部“新世纪优秀人才支持计划”，2007年山东省“泰山学者奖励计划”，2011年教育部“长江学者奖励计划”，主要研究“高分子材料加工成型原理与先进制造技术”，是国家科学技术奖评审专家，现任北京化工大学机电工程学院院长，兼任《中国塑料》、《塑料》、《工程塑料应用》、《塑料机械》、《橡胶工业》、《橡塑技术与装备》、《计算机辅助工程》等杂志编委和多个国际期刊的评审专家，以及中国塑料加工协会专家委员会副主任、中国机械工程学会自动化分会委员，中国化工学会橡胶分会委员，中国塑料机械工业协会专家、中国橡胶机械工业协会专家、亚洲聚合物加工学会理事，世界塑料工程师学会注塑专委会主席等学术职务，近年主持国家自然科学基金和国家重点研发计划项目等40余项并取得多项创新成果，包括：突破塑料注射模塑成型精度控制的核心原理，研制成功塑料精密注射成型机和巨型轮胎超宽幅胶胚挤出成型设备，独创性地提出聚合物加工成型的微积分思想，开辟了高分子材料加工成型与先进制造的新途径，并据此发明了聚合物熔体微分静电纺丝、熔体微积分纳米层叠高性能材料制备、微积分场协同对流强化传热新方法和新装备等，申请发明专利400余项（截至2017年3月公开380项，已获授权220项，PCT国际专利9项），获国家科技进步二等奖2项，省部级科技奖10项，发表论文500余篇，出版著作11部（如：1. 科学出版社《塑料精密注射成型原理及设备》，2. 英国剑桥伍德海德出版社《Advances in Polymer Processing》），在国内外重要学术会议作特邀报告50余次，被授予“侯德榜化工科技创新奖”、“全国化工优秀科技工作者”、“北京市优秀教师”、“全国优秀教师”等称号。

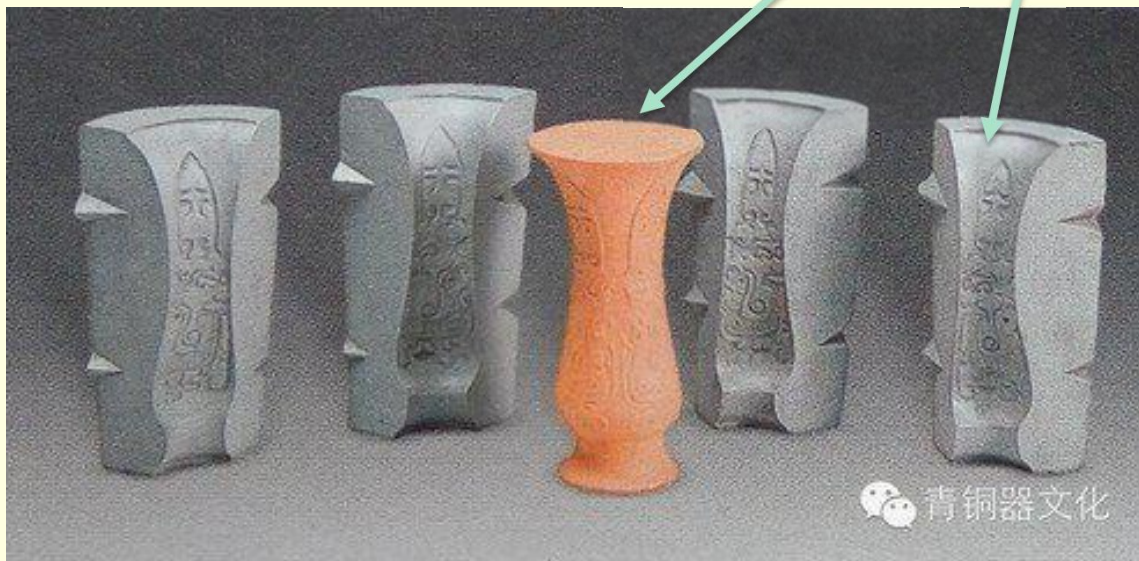
# 报告提纲

---

- 1. 研究背景      工作基础
- 2. 面对挑战      创新进展
- 3. 先进制造 **G2.0注塑机**

2800年前

中国周朝青铜器铸造的**模范**



# 研究背景

# 中国制造的今天

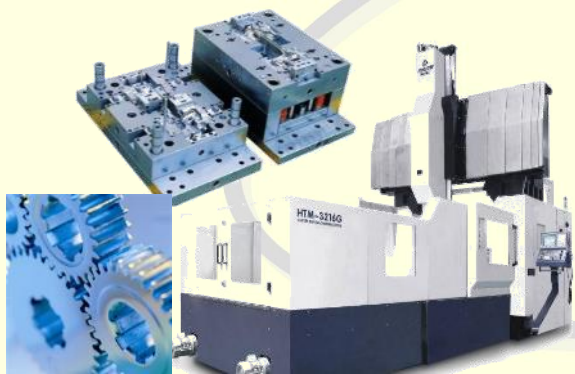
## 材料成形 & 先进制造



无机非金属材料加工成形



有机高分子材料加工成型



金属材料加工成形



复合材料加工成型

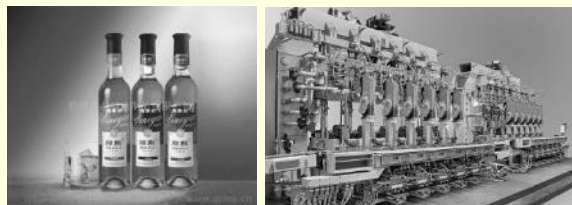


# 研究背景

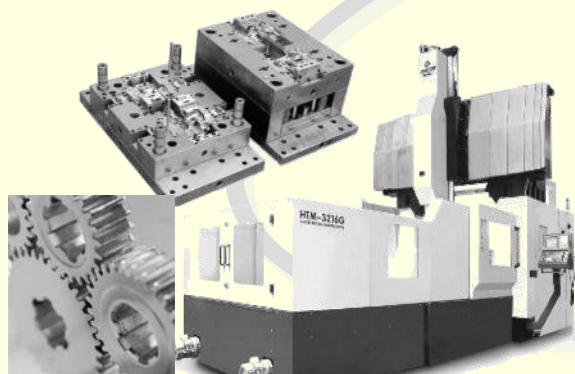
# 中国制造的今天

## 成形 & 成型

## 现代制造业的**模塑成型**



无机非金属材料加工成形



金属材料加工成形



有机高分子材料加工成型



高分子基复合材料加工成型

# 研究背景 中国制造的今天

## 模塑成型的核心问题



切削成形靠卡尺

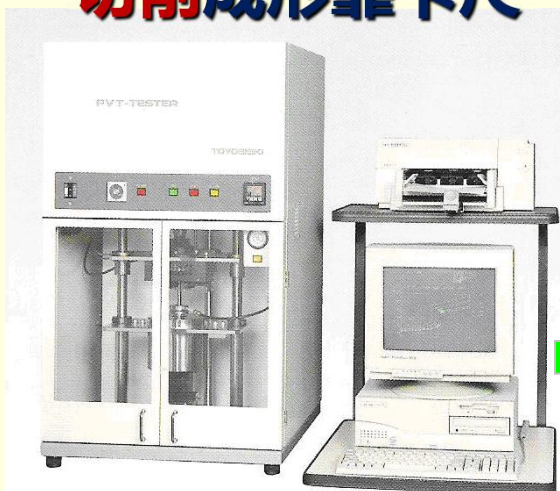
精度如何控制?



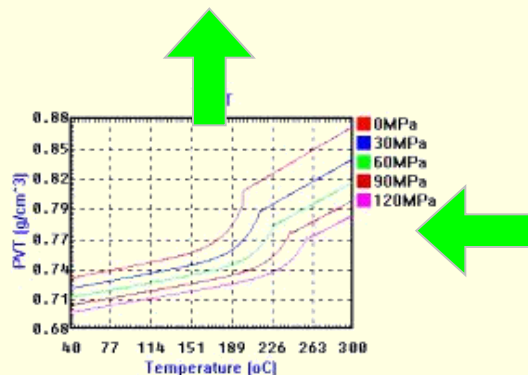
PVT



模塑成型靠PVT



$$V(T, P) = V_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left[ 1 + \frac{P}{B(T)} \right] \right\} + V_1(T, P)$$





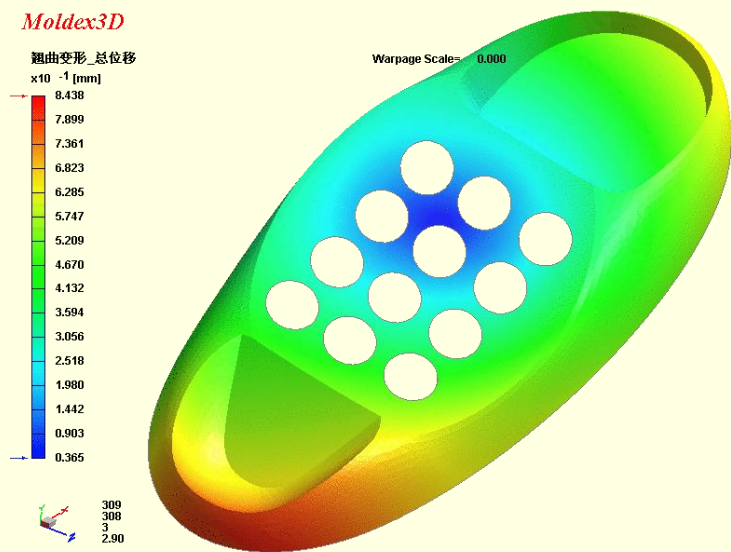
# 工作基础

## 1.发明高分子PVT测控方法及装备

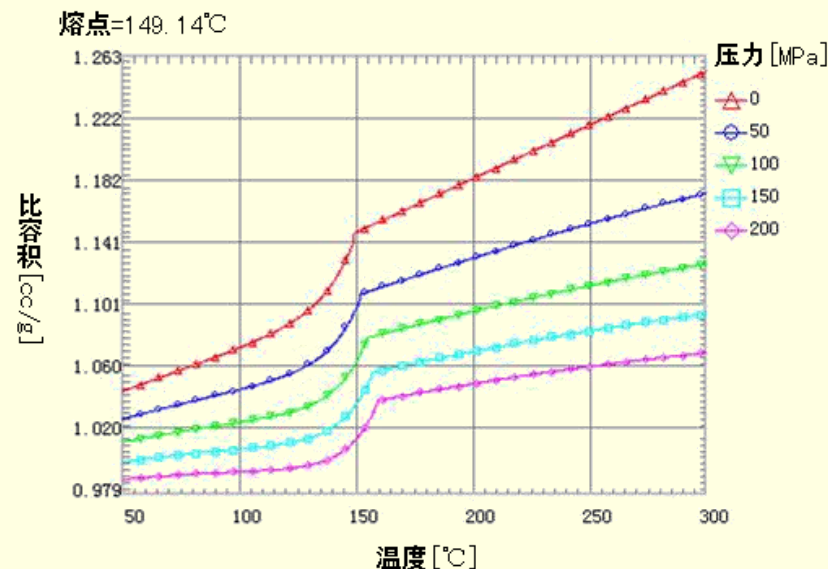
### 核心问题（精度控制）的解决办法

#### 基于PVT特性的测试和控制

$$V(T, P) = V_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left[ 1 + \frac{P}{B(T)} \right] \right\} + V_1(T, P)$$



塑料成型过程体积变化动态示意图



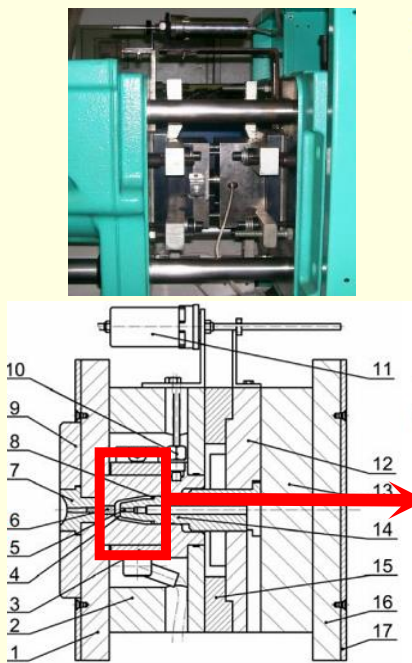
塑料PVT关系曲线

# 工作基础

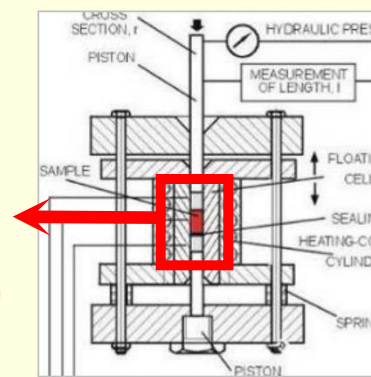
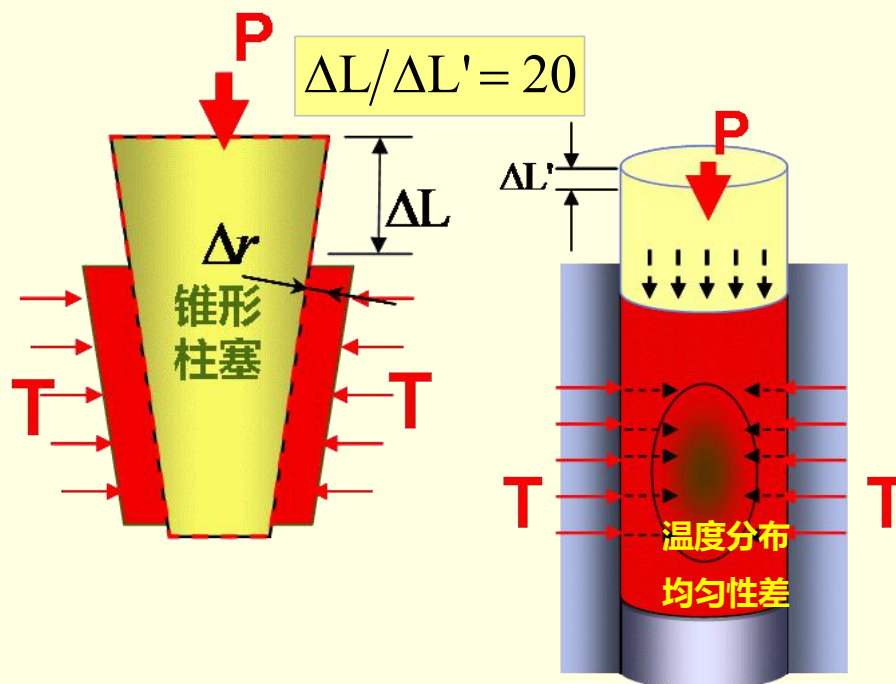
## 1.发明高分子PVT测控方法及装备

### 我们的发明与同类比较

- 1) 反映比容变化的位移量被放大20倍；
- 2) 温度和压力变化响应快、分布均匀。



本发明在线测试

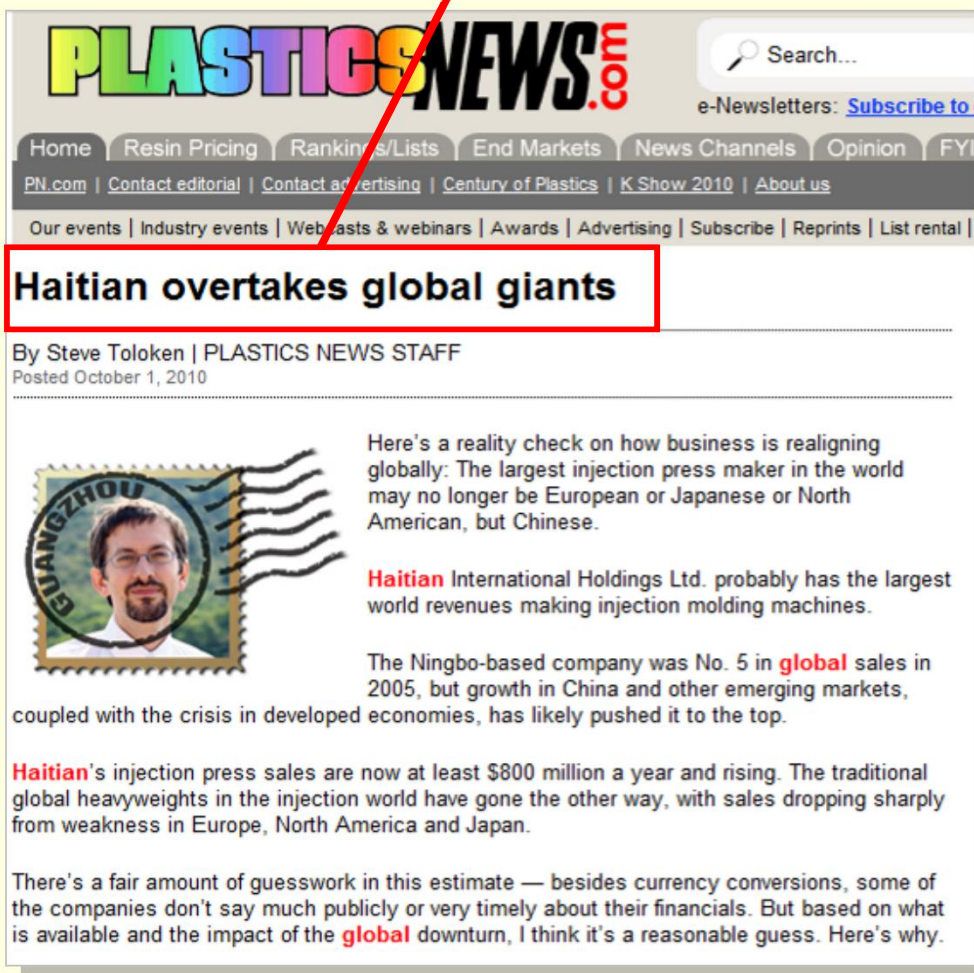


国外离线测试

# 工作基础

## 2. 研制出精密注塑机

“海天超越全球列强”



**PLASTICS NEWS.COM**


Home Resin Pricing Rankings/Lists End Markets News Channels Opinion FYI

PN.com | Contact editorial | Contact advertising | Century of Plastics | K Show 2010 | About us

Our events | Industry events | Webcasts & webinars | Awards | Advertising | Subscribe | Reprints | List rental

### Haitian overtakes global giants

By Steve Toloken | PLASTICS NEWS STAFF  
Posted October 1, 2010



Here's a reality check on how business is realigning globally: The largest injection press maker in the world may no longer be European or Japanese or North American, but Chinese.

**Haitian** International Holdings Ltd. probably has the largest world revenues making injection molding machines.

The Ningbo-based company was No. 5 in **global** sales in 2005, but growth in China and other emerging markets, coupled with the crisis in developed economies, has likely pushed it to the top.

**Haitian's** injection press sales are now at least \$800 million a year and rising. The traditional global heavyweights in the injection world have gone the other way, with sales dropping sharply from weakness in Europe, North America and Japan.

There's a fair amount of guesswork in this estimate — besides currency conversions, some of the companies don't say much publicly or very timely about their financials. But based on what is available and the impact of the **global** downturn, I think it's a reasonable guess. Here's why.



小型精密注射机



手机零配件



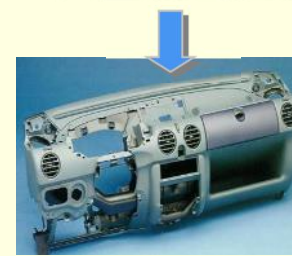
中型精密注射机



显示器导光板



大型精密注射机



汽车仪表盘

# 工作基础

## 2. 研制出精密注塑机

在全液压精密注塑机获奖成果基础上，创新发明了一种**全电动超高速**注塑机。在满足精度要求的同时，速度提高3倍以上。受到国内外客商高度关注。

### 2013 K-SHOW（参展盛况）

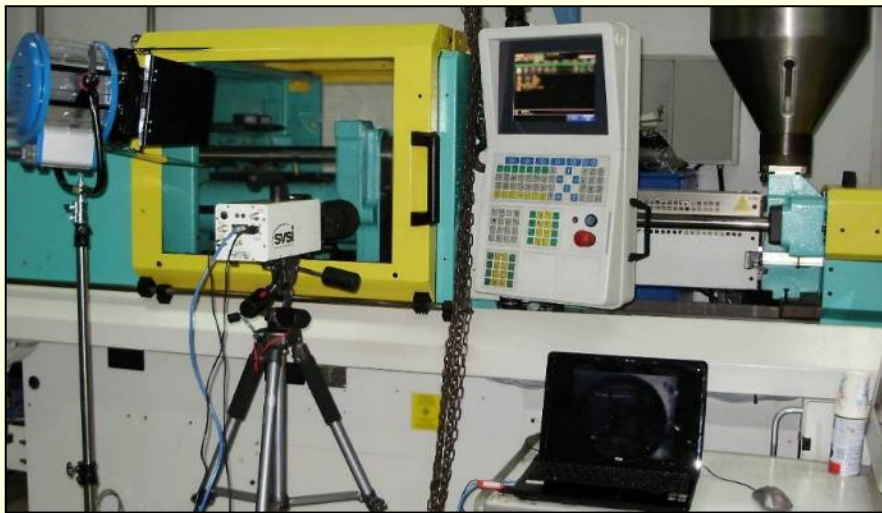


发明专利：201210028271.9

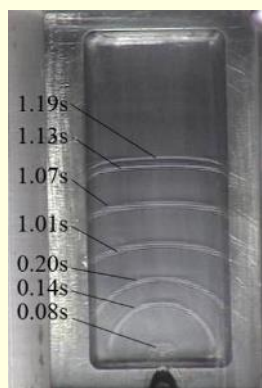
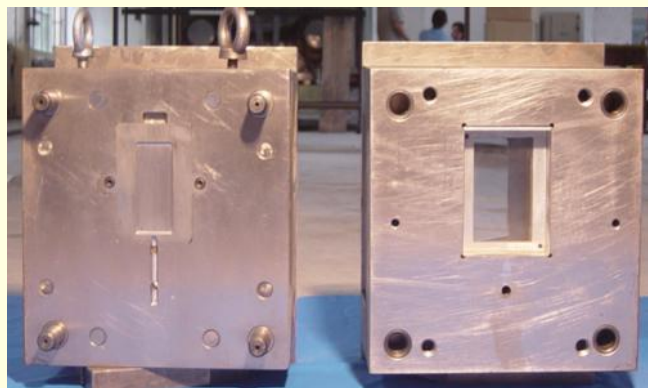
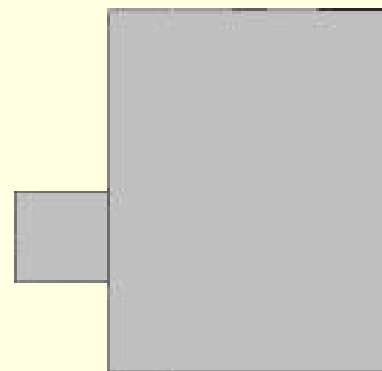
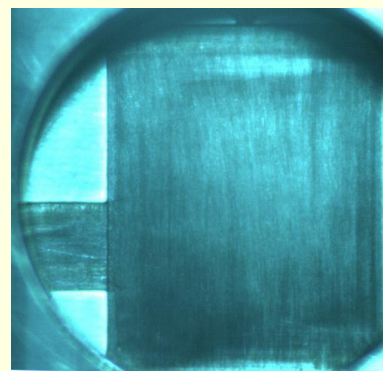


# 工作基础

## 3.创建注射成型可视化研究平台

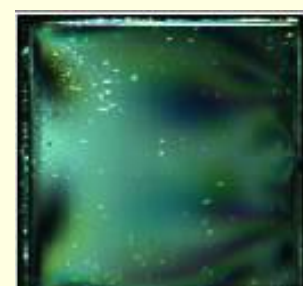


研究仿真分析的可靠性



高速摄像机

(17045 帧/秒)



偏光应力分析

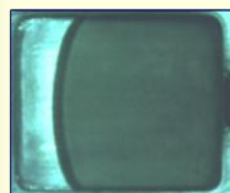
# 工作基础

## 3.创建注射成型可视化研究平台



### 注射成型可视化技术的应用

型腔内熔体充填行为解析



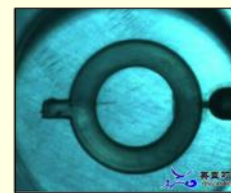
矩形型腔



圆环流道



壁厚不均匀型腔

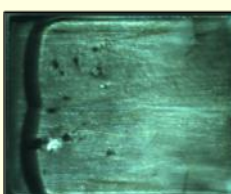


圆环形型腔

注射成型缺陷产生机理



喷射



气泡



流纹



熔接痕



# 中国制造的明天



# 面临挑战

---

## 高分子材料加工成型

**瓶颈问题**



**高端装备的原理创新**



**材料及制品高性能化**



# 应对挑战

# 创新思路

高分子及复合材料

熔体微积分

微尺度分割 (微分)

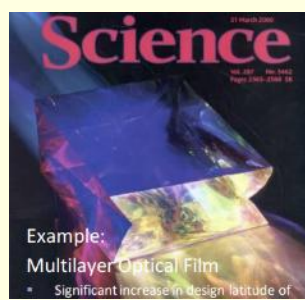
微单元叠加 (积分)

目标：材料及制品高性能化  
(微纳结构、精密高效、节能环保)

纳米纤维制备



超材料制备



3D打印成形



3D复印成型



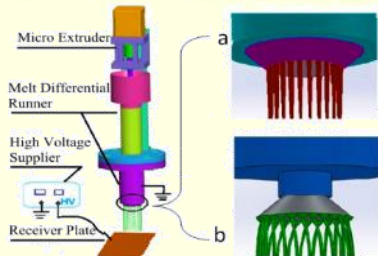
# 研究进展

## 1) 熔体微分静电纺丝

加工成型：新原理、新方法、新装备

熔体微分  
静电纺丝

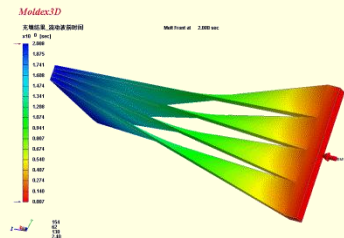
原理创新与仿真分析：



样机验证与性能优化：



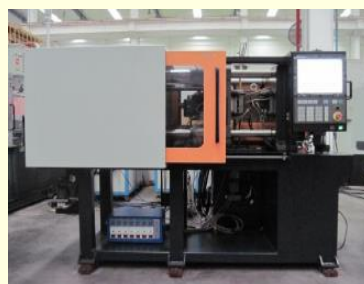
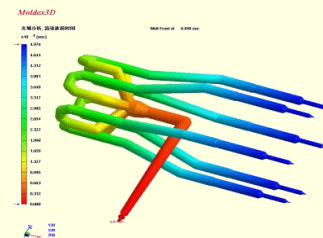
熔体微积分  
叠层挤出成型



熔体微积分  
3D 打印



熔体微分  
3D 复印

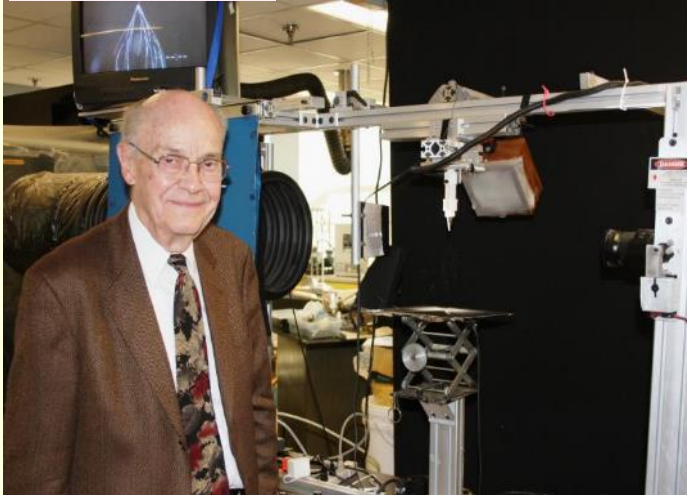


# 研究进展

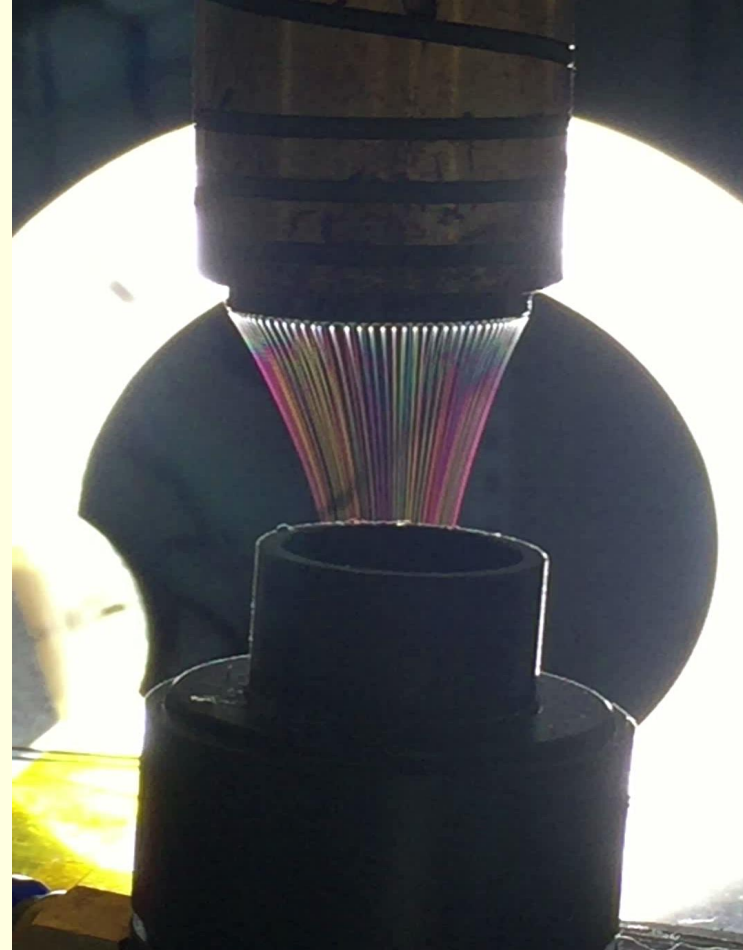
## 1) 熔体微分静电纺丝



### 溶液电纺 (毛细管法)

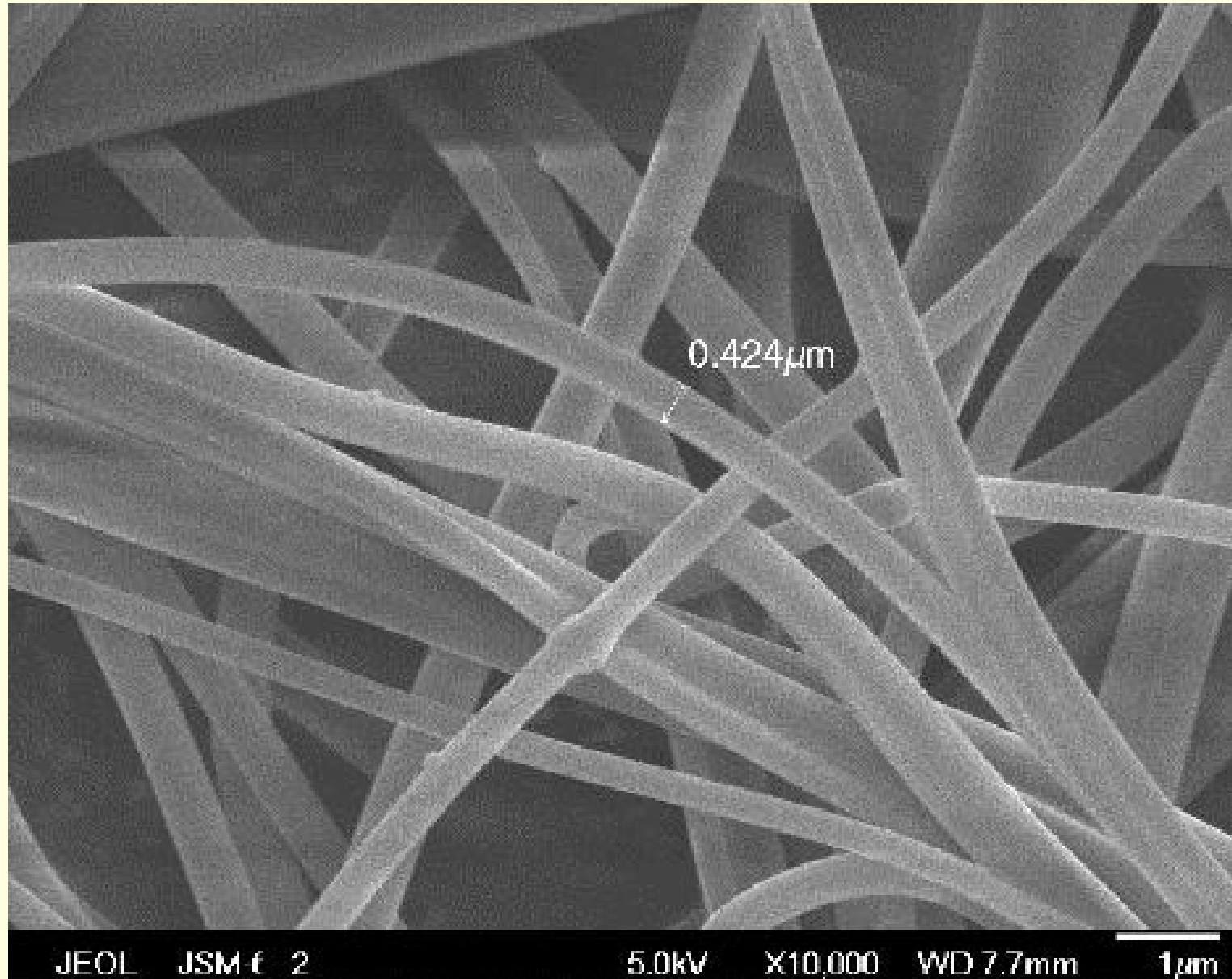


### 熔融电纺 (熔体微分)



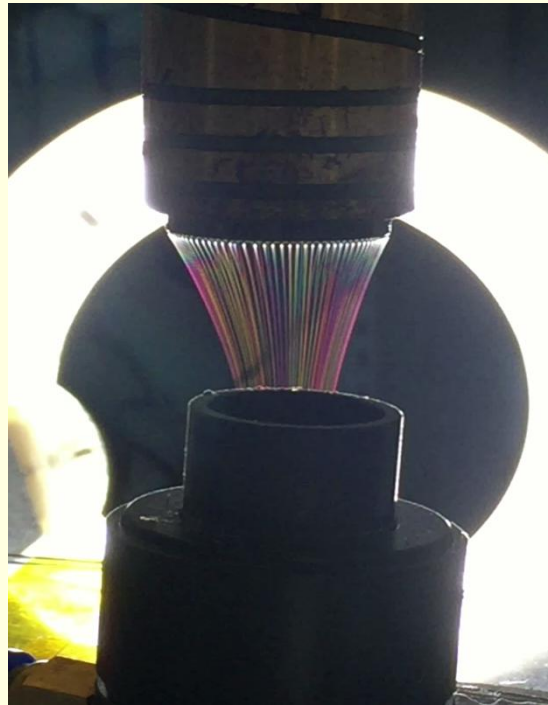
# 研究进展

## 1) 熔体微分静电纺丝



# 研究进展

## 1) 熔体微分静电纺丝

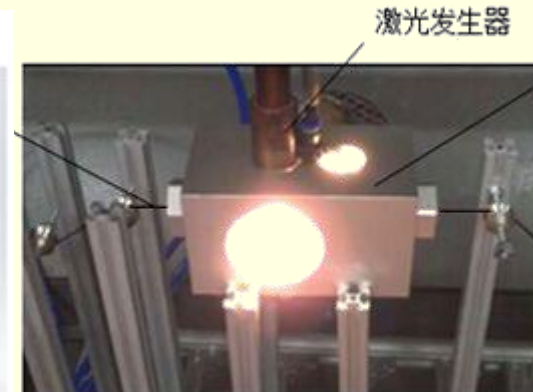
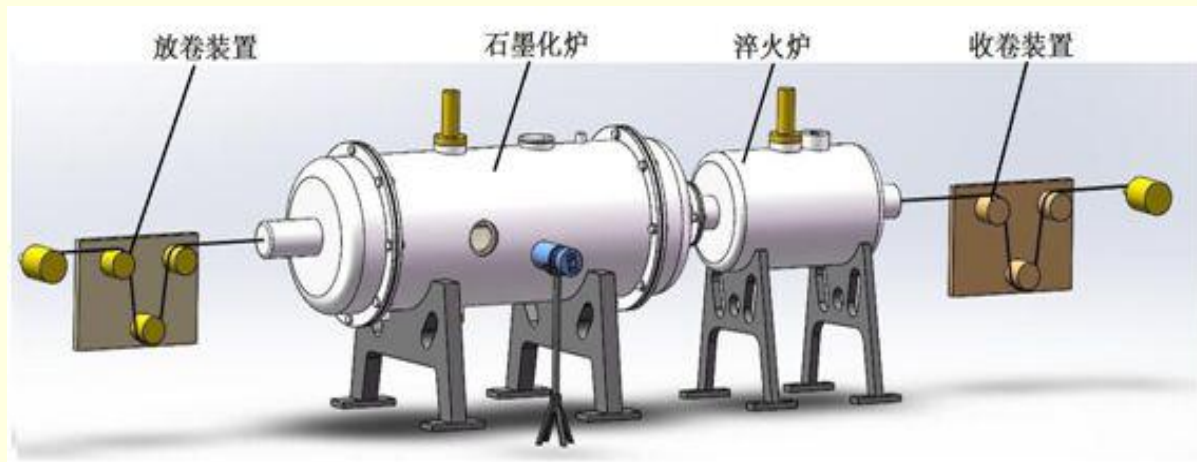


# 研究进展

## 1+) 碳纤维制备与模塑成型

**创新点：提出隧道轴芯聚焦直接加热新方法，解决高温石墨化难题**

- ❑ 激光照射能量绝大部分被碳纤维吸收，少数能量以光能辐射，能量利用率高，加热速度快，纤维石墨化程度高
- ❑ 设备结构和设备材料要求低，使用寿命长
- ❑ 激光束轴芯聚焦实现碳纤维瞬间轴向均匀加热



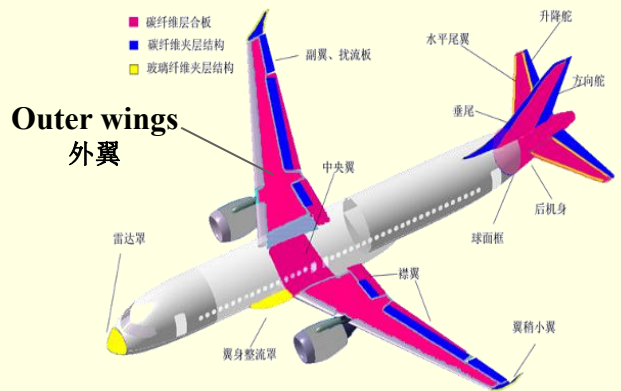
**碳纤维激光加热实现碳纤维石墨化**

发明专利：2014105451017、2014105433841、2015101728985

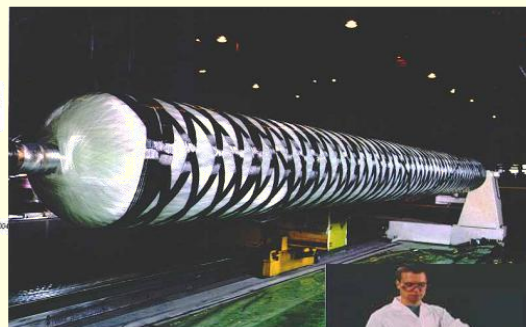
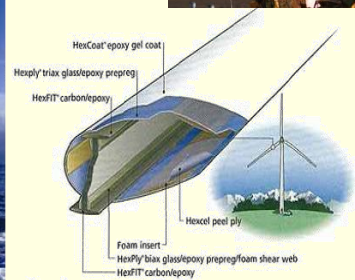
# 研究进展

## 1+) 碳纤维制备与模塑成型

### 碳纤维应用领域



Ford Thunderbird  
2002采用GRP制造的  
汽车外壳减重60%



·CNG公共汽车



复合材料风电叶片



碳纤维气瓶



·呼吸器官的氧容器

# 研究进展

## 2) 熔体微积分叠层复合

加工成型：新原理、新方法、新装备

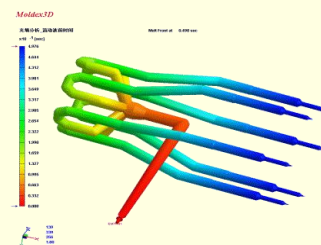
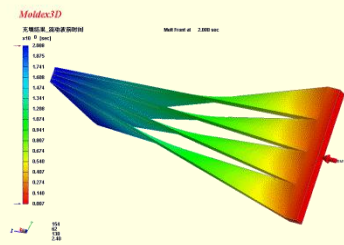
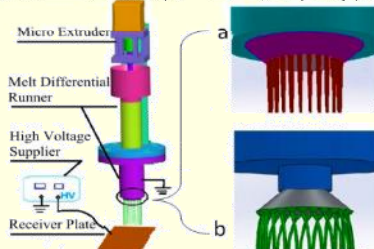
熔体微分  
静电纺丝

熔体微积分  
叠层挤出成型

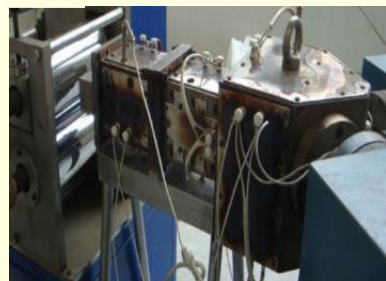
熔体微积分  
3D 打印

熔体微分  
3D 复印

原理创新与仿真分析：



样机验证与性能优化：





# 研究进展

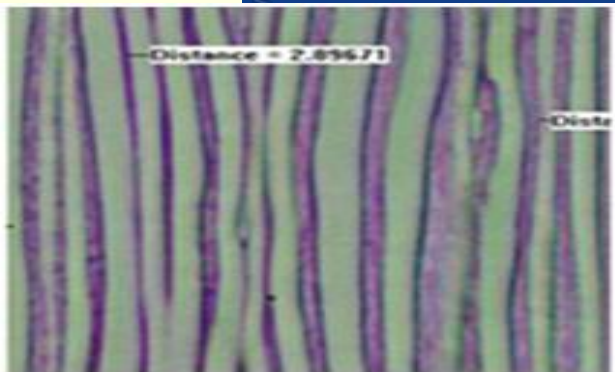
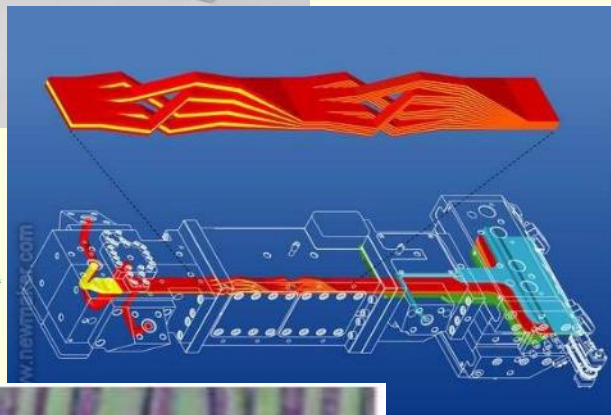
## 2) 熔体微积分叠层复合



### 立交层叠



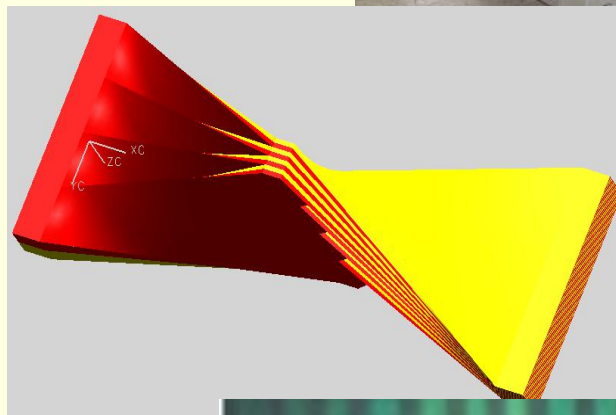
美国专利：  
3557265



### 扭转层叠



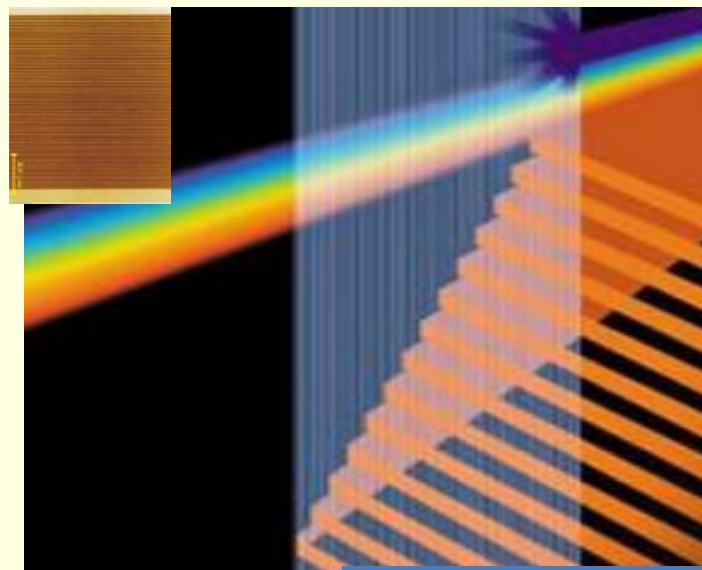
我们的专利：  
200910237622.5



# 研究进展

## 2) 熔体微积分叠层复合

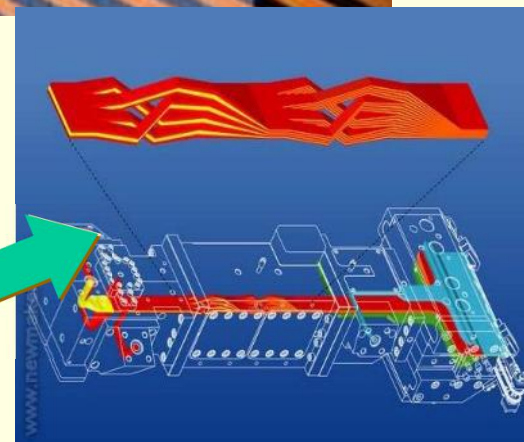
### 高端叠层复合材料 (3M公司技术垄断)



贵如黄金的塑料薄膜——汽车玻璃贴膜

相关技术：微纳层叠技术

关键设备：“层叠器”



# 研究进展

## 2) 熔体微积分叠层复合

单层膜



叠层膜



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

加工成型：新原理、新方法、新装备

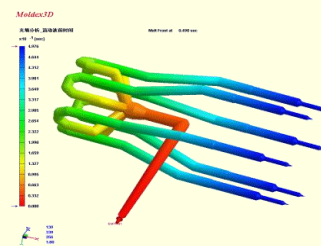
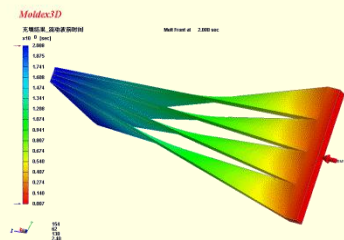
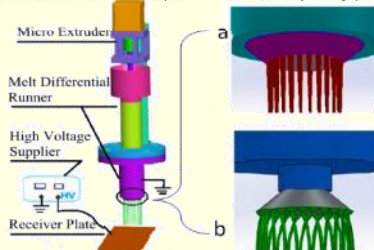
熔体微分  
静电纺丝

熔体微积分  
叠层挤出成型

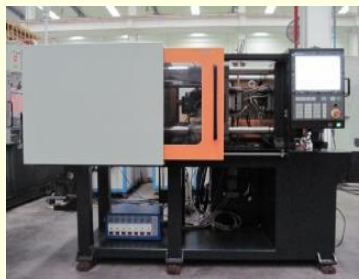
熔体微积分  
3D 打印

熔体微分  
3D 复印

原理创新与仿真分析：



样机验证与性能优化：



# 研究进展

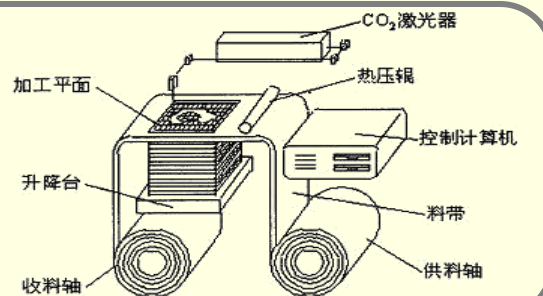
## 3) 熔体微积分3D打印

3D 打印技术  
发展现状

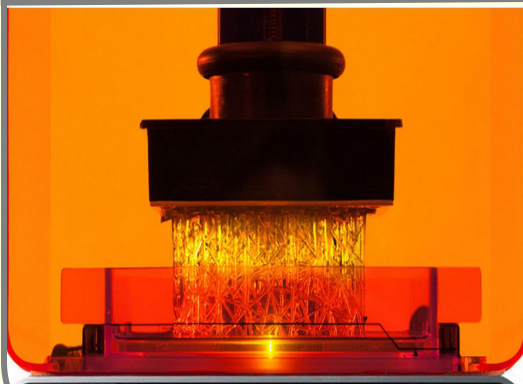
### 3D打印的主要方式

分层实  
体制造

LOM

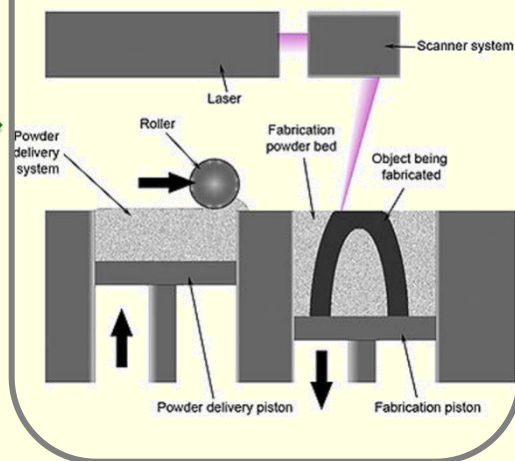


光固化立体成型技术  
SLA/DLP



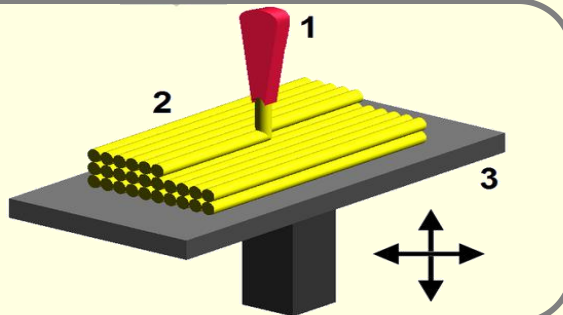
3D Printing  
Technology

选择性激光烧结/融  
化技术 SLS/SLM



熔融沉  
积技术

FDM



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

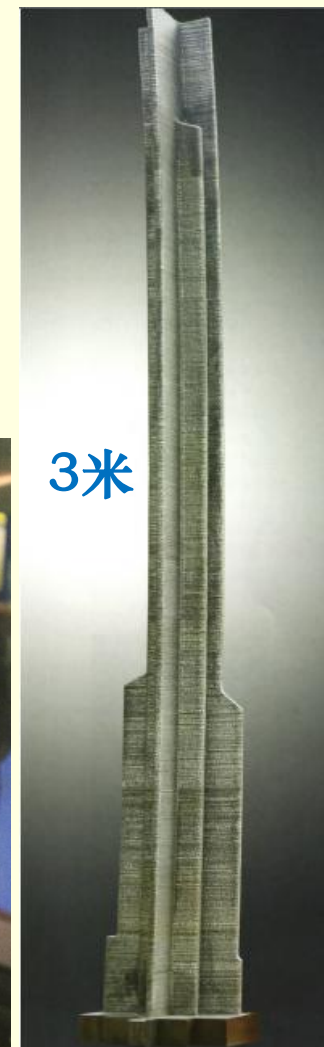
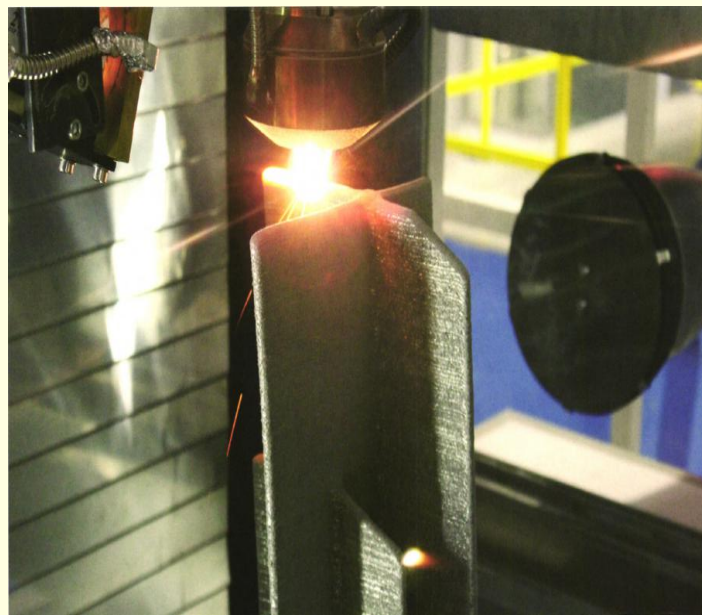
**熔融沉积技术 FDM** (材料种类最多、应用最广泛)

### ■ 金属熔融沉积成型

华中科大张海鸥教授及其团队历经10多年努力，研发出世界领先技术-金属智能**微铸锻技术**。



西工大黄卫东教授率领的团队通过金属熔融沉积方式成功研制出**3米高的C919飞机中央翼缘条**。



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

熔融沉积技术 FDM (材料种类最多、应用最广泛)

### ■ 无机非金属材料堆叠沉积成型



陶土制品3D打印成型

# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

**熔融沉积技术 FDM** (材料种类最多、应用最广泛)

■ 高分子复合材料熔融沉积成型

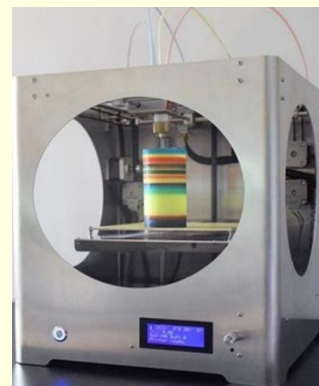
**通用设备：**



单喷头单色3D打印机



双喷头加支撑3D打印机



多彩3D打印机

**适用材料：**PLA , ABS , TPU

**应用领域：**装饰品 , 承载较小的功能性零部件

**优点：**灵活便捷 , 精度较高

**缺点：**耗材种类较少 , 打印速度较慢

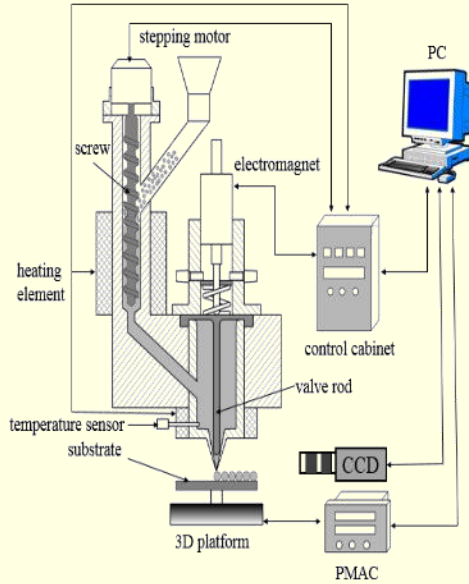
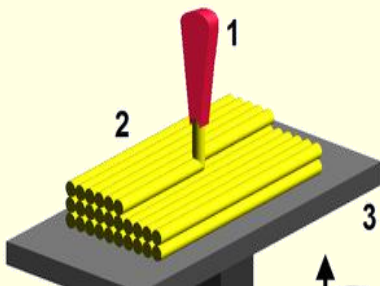
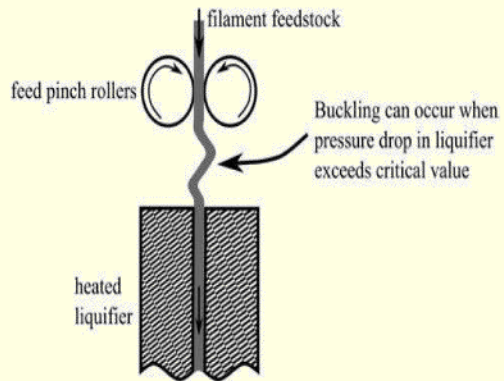




# 研究进展

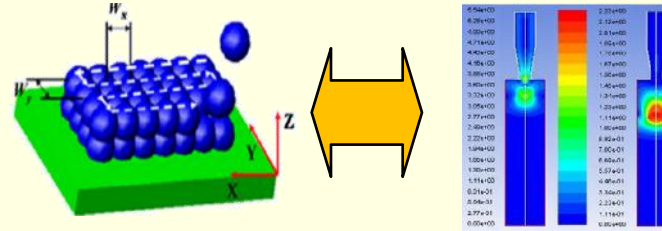
## 3) 熔体微积分3D打印

针对FDM-3D打印机丝材种类少，无法打印弹性体等问题。



提出“吃粒料”+能打印弹性体的目标！

### 熔体微积分3D打印原理



(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 103692653 A  
(43) 申请公布日 2014.04.02

(21) 申请号 201310719206.5

(22) 申请日 2013.12.24

(71) 申请人 北京化工大学  
地址 100029 北京市朝阳区北三环东路15号

(72) 发明人 杨卫民 迟百宏 丁玉梅

(51) Int. Cl.  
B29C 67/00 (2006.01)

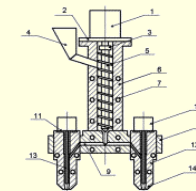
权利要求书1页 说明书3页 附图3页

(54) 发明名称

熔体微分三维打印机

(57) 摘要

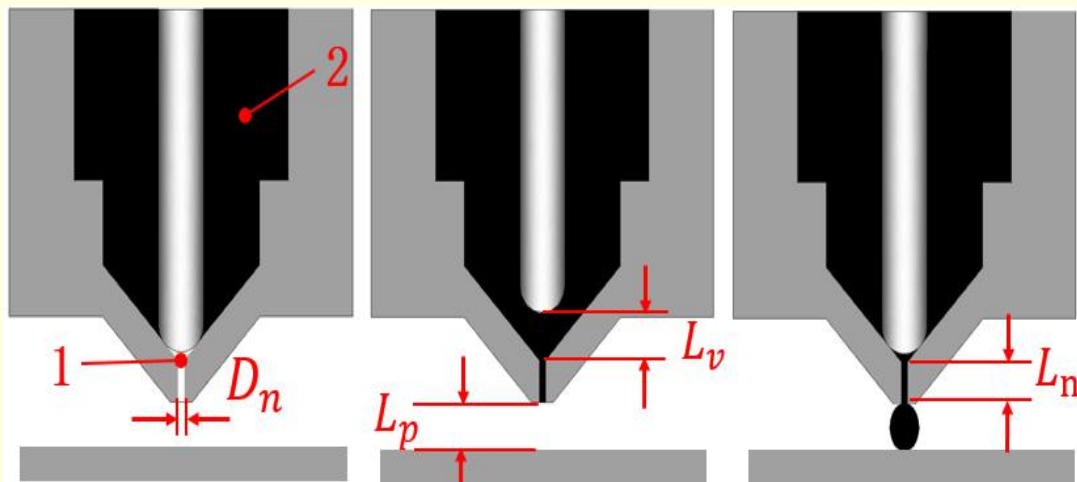
本发明公开了一种熔体微分三维打印机，主要由物料熔融单元、微滴喷射单元、圆柱坐标系成型单元和机架构成；在物料熔融单元中，伺服电机驱动螺杆旋转，机筒内固定的加热器通过温度调控保证粒料完全塑化，熔融物料被螺杆输送到微滴喷射单元；在微滴喷射单元中，熔融物料沿流道板中的热流道输送到阀体中，直线伺服电机驱动阀针在阀体中往复运动，将熔融物料定量、间歇地挤出喷嘴，形成熔体微滴；在圆柱坐标系成型单元中，熔体微滴喷射到承载台上冷却沉积成型，左右、垂直方向伺服电机分别与相对应螺杆啮合旋转来驱动物料熔融单元及微滴喷射单元沿左右、垂直方向移动，周向伺服电机通过蜗杆驱动装配有蜗轮的承载台旋转，实现圆柱坐标系下的三维运动。



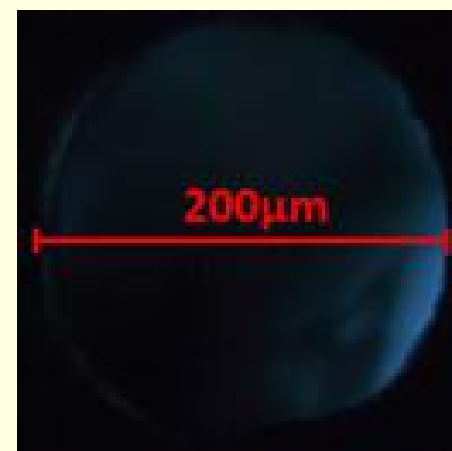
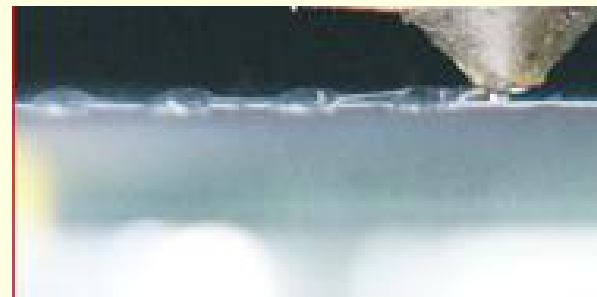
# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

### ◆ 微滴堆叠成型



微滴成滴系统的工作原理



优势：微滴成型制品热应力较小，热收缩小，制品尺寸精度相对较高

相关研究成果已在《Rapid Prototyping Journal》发表

# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

■ 技术优势—材料适应性广

橡胶颗粒

PLA

TPU

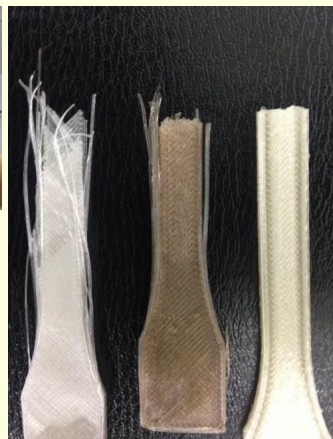
CF复合材料



...

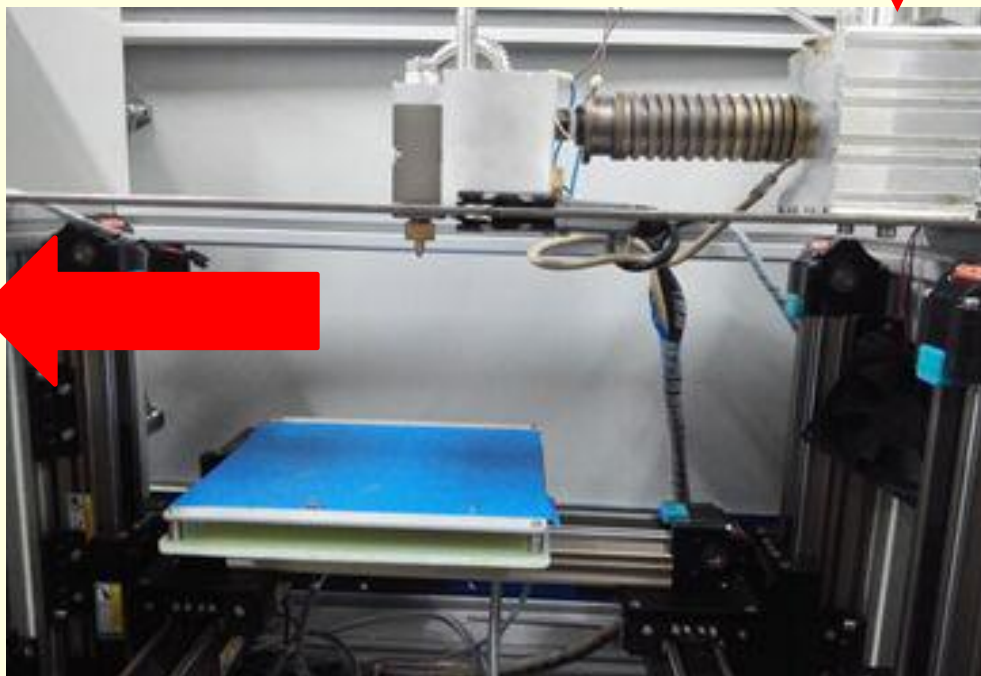
弹性体制品

CA及PLA试样



CF/PLA拉伸、冲击、  
弯曲、压缩试件

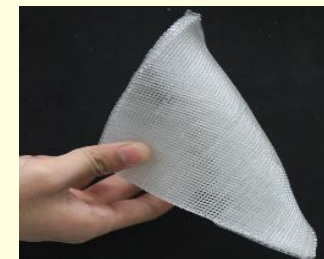
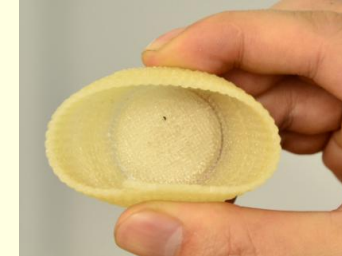
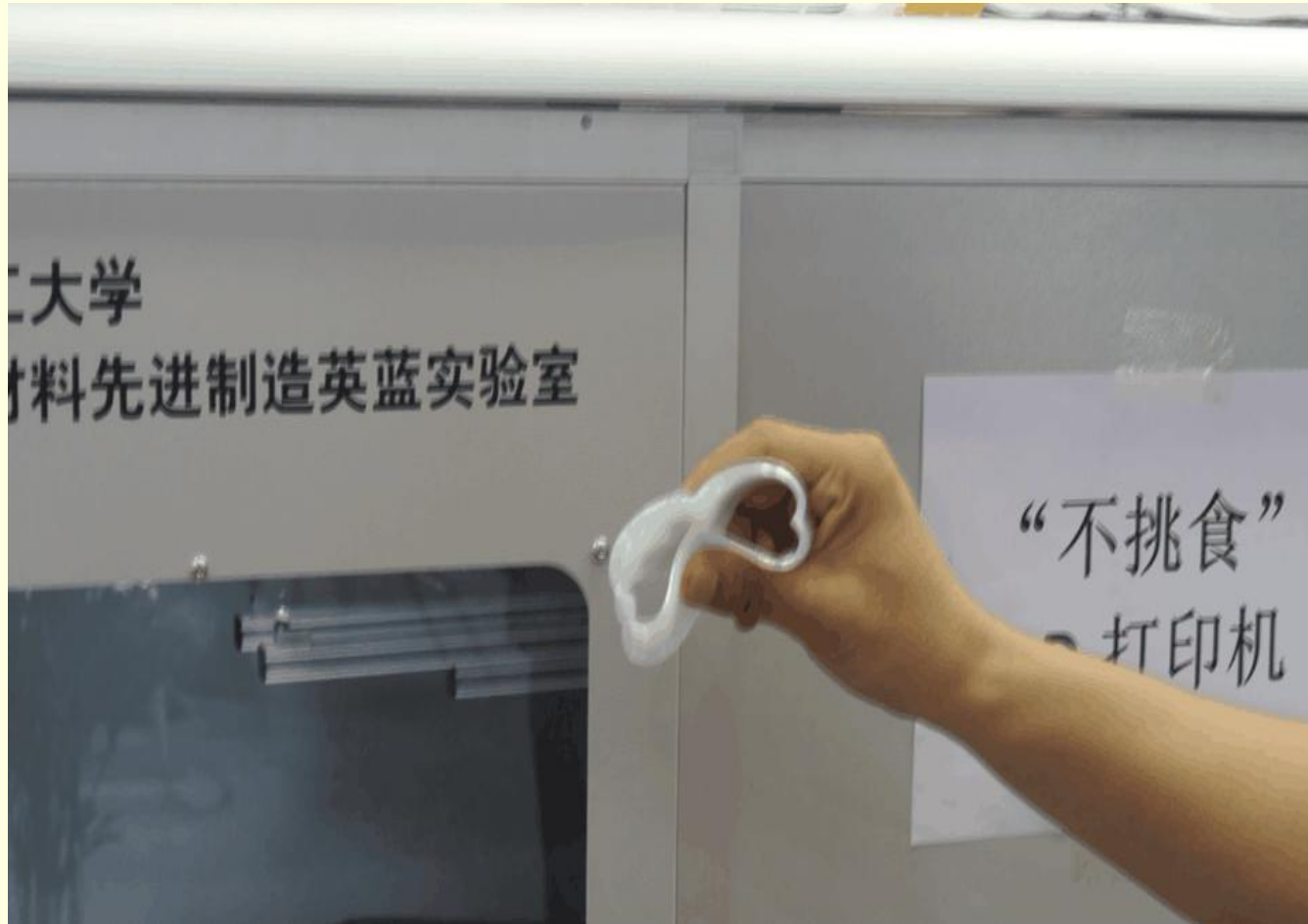
橡胶类  
制品



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

### ◆ 弹性体材料 ( TPU、TPE、橡胶 )



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

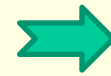
### ◆ 碳纳米管导电材料



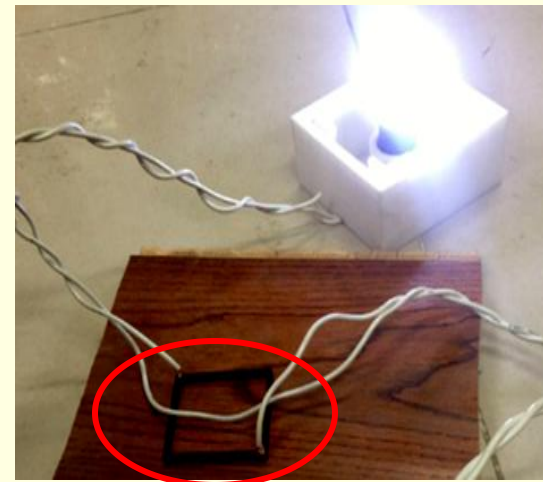
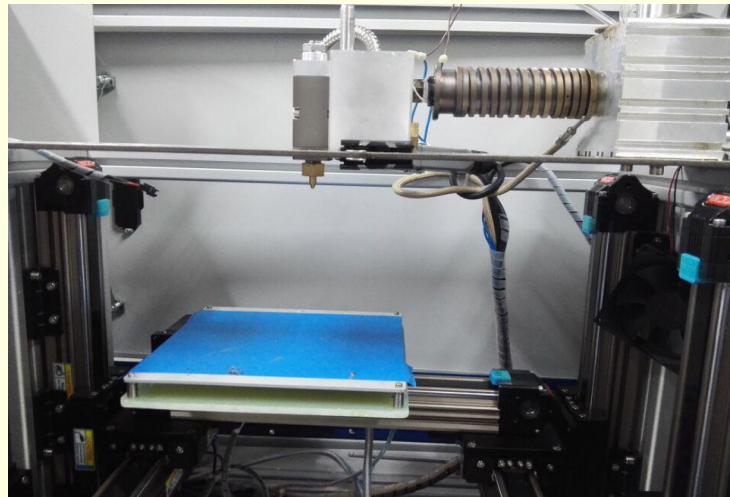
MWMWCNTs



PLA



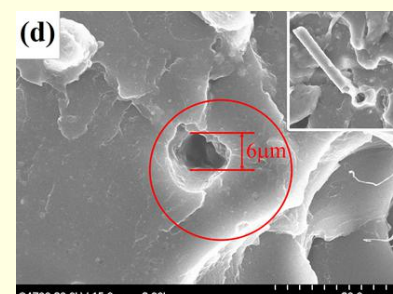
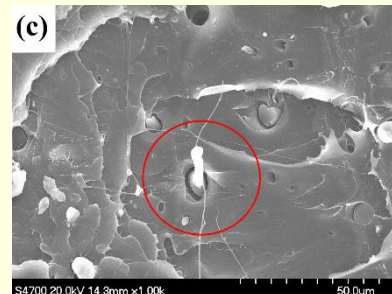
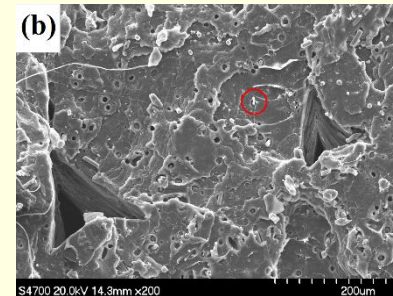
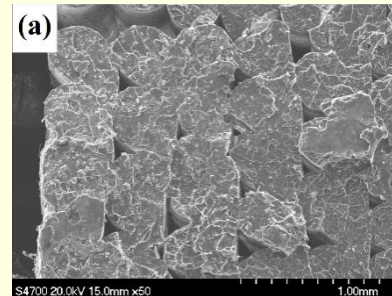
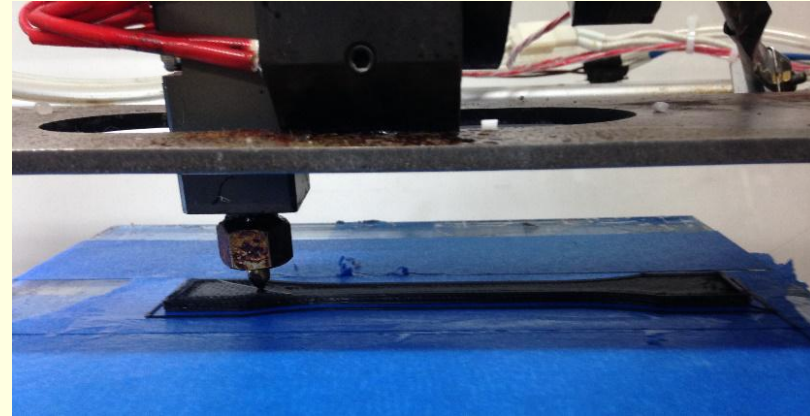
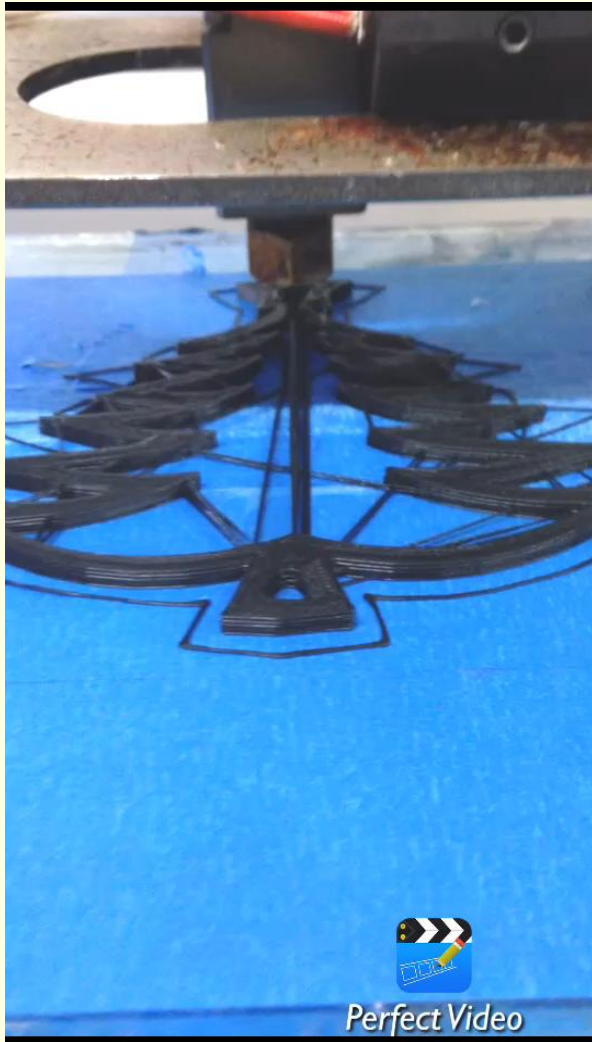
Mixer



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

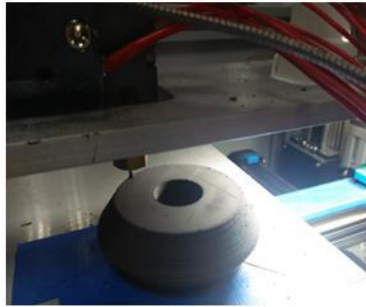
### ◆ 碳纤维增强复合材料



# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

### ◆ 金属粉末复合材料

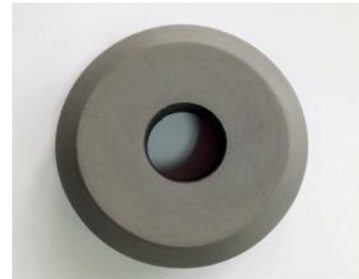


金属毛坯打印成型



粗磨

精磨



金属毛坯产品



脱脂-烧结



金属成品件

# 研究进展

## 3) 熔体微积分3D打印

### 数字化医学手术规划



### 医学影像获取

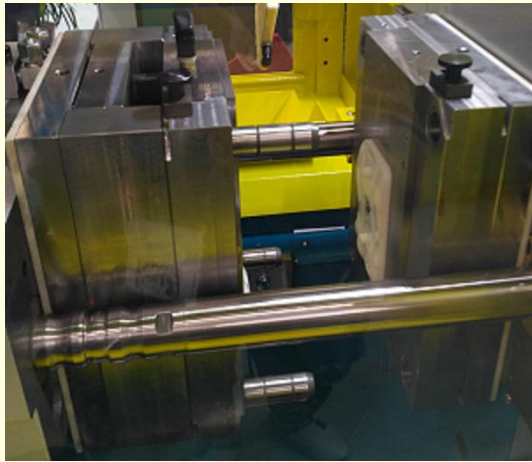




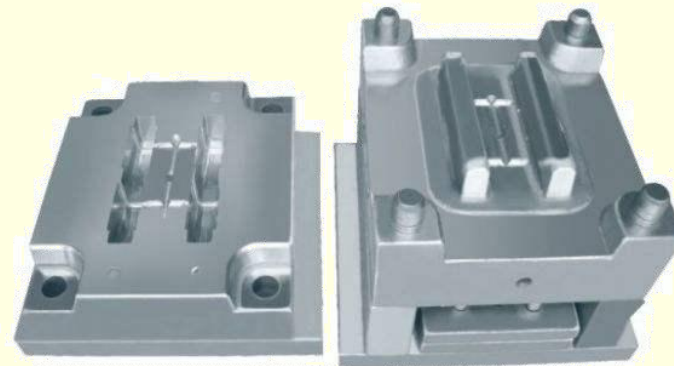
# 研究进展

## 3+) 熔体微积分3D打印

**3D打印模具快速制造，为3D复印奠定了坚实的基础**



3D打印塑料模具

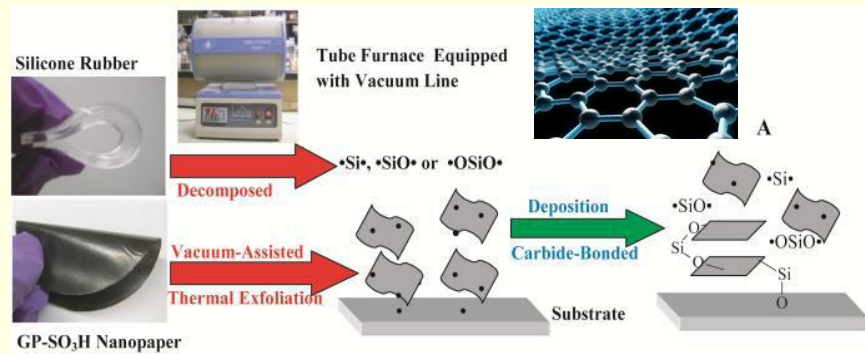


3D打印金属模具

# 研究进展

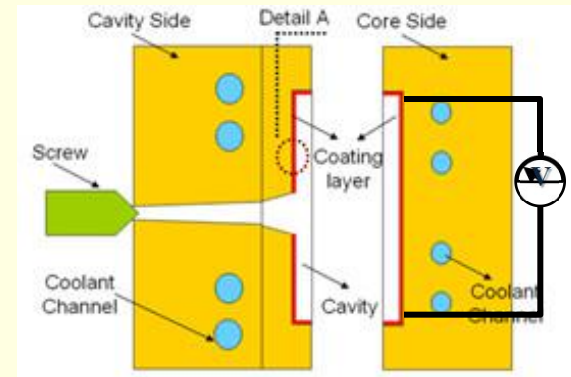
## 3+) 熔体微积分3D打印

### 创新研发：石墨烯镀层辅助快速热循环注射成型方法

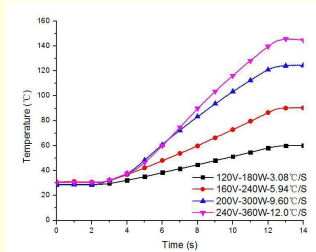
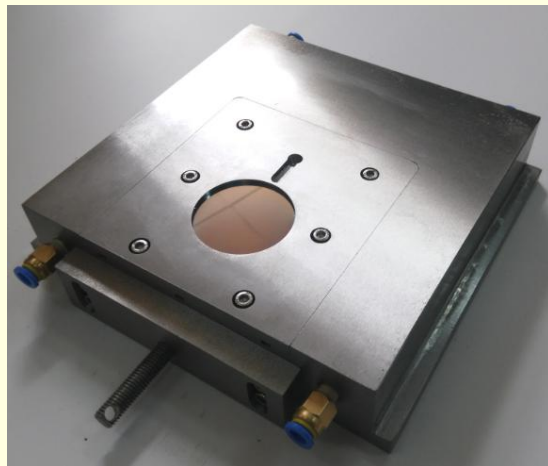


石墨烯纳米镀层CVD制备方法

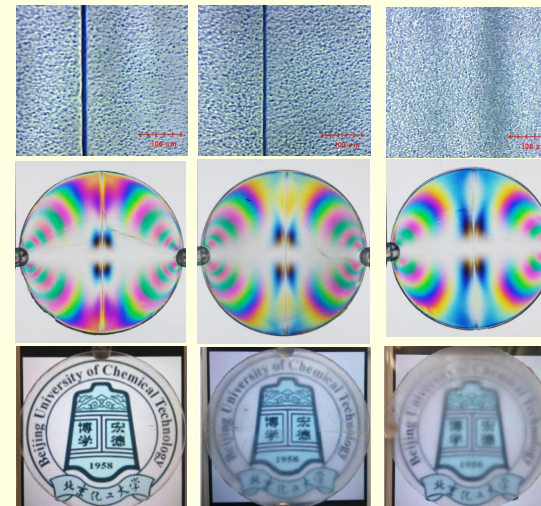
超导电!  
超导热!  
超光滑!



可随形快变模温的型腔表面石墨烯纳米镀层



石墨烯镀层辅助快变模温模具及温度响应特性(600°C/min)



制品外观熔接痕缺陷

制品内应力缺陷

制品表面微结构特征复写性

T<sub>M</sub> = 40°C

T<sub>M</sub> = 80°C

T<sub>M</sub> = 120°C

# 研究进展

## 4) 熔体微分注射成型

加工成型：新原理、新方法、新装备

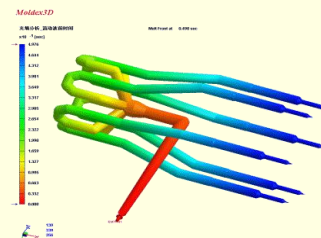
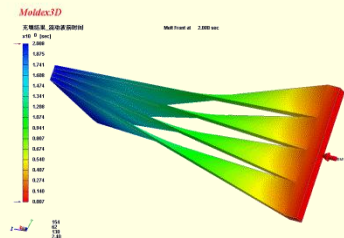
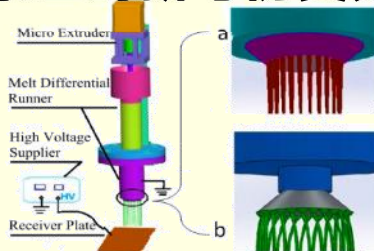
熔体微分  
静电纺丝

熔体微积分  
叠层挤出成型

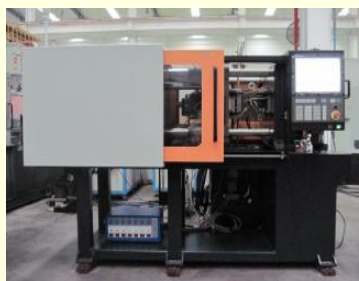
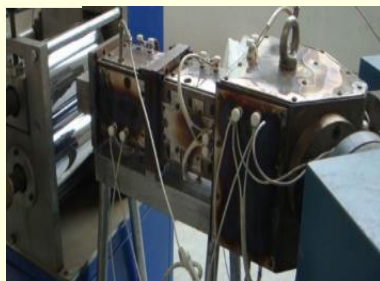
熔体微积分  
3D 打印

熔体微分  
3D 复印

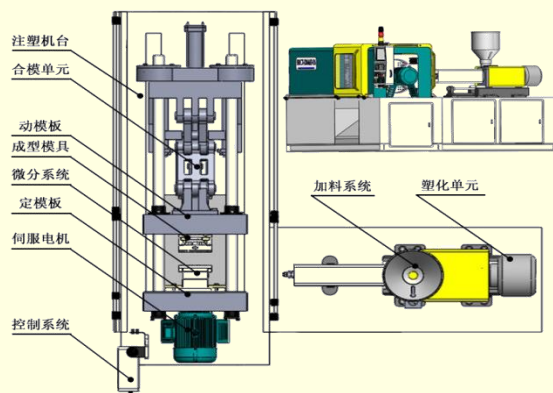
原理创新与仿真分析：



样机验证与性能优化：



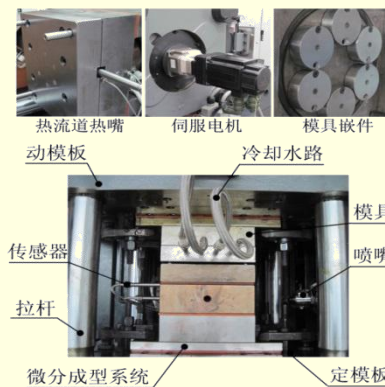
### 发明熔体微分3D复印制造方法及装备



熔体微分3D复印原理

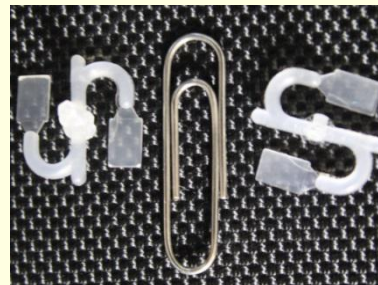
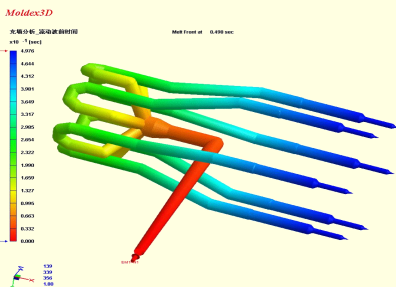


全自动熔体微分3D复印机



微分成型系统

(世界首台)



3D 复印的核心设备  
新一代高性能注塑机

# G2.0注塑机

# G2.0注塑机：三板式注塑机升级换代

## - 塑化系统升级换代

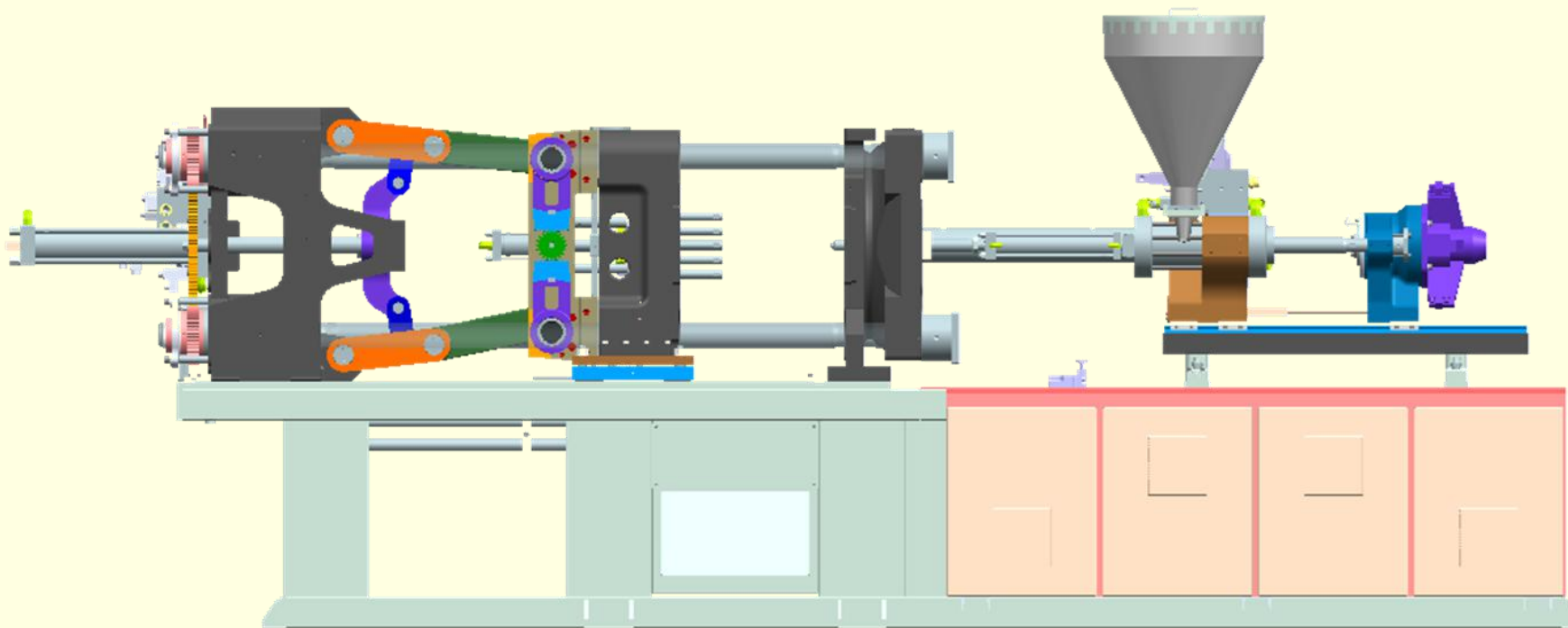
强化传热传质节能增效  
混炼效率高  
塑化质量好

## - 锁模系统升级换代

开合模精度高  
自适应“零”间隙合模  
解决平行度调节拉杆偏载

## - 控制系统升级换代

从数字化到智能化

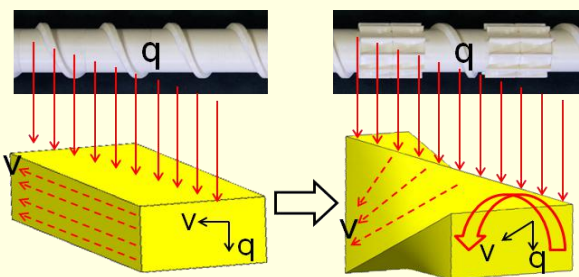
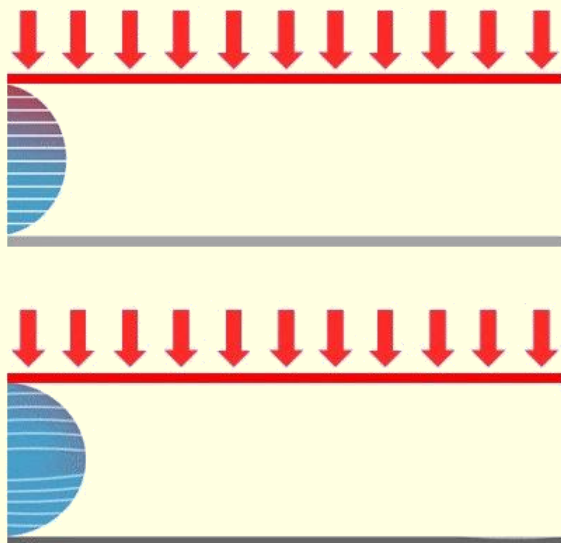


# G2.0 注塑机

## 1) 塑化系统的升级换代

基本原理：场协同原理

核心部件：场协同螺杆



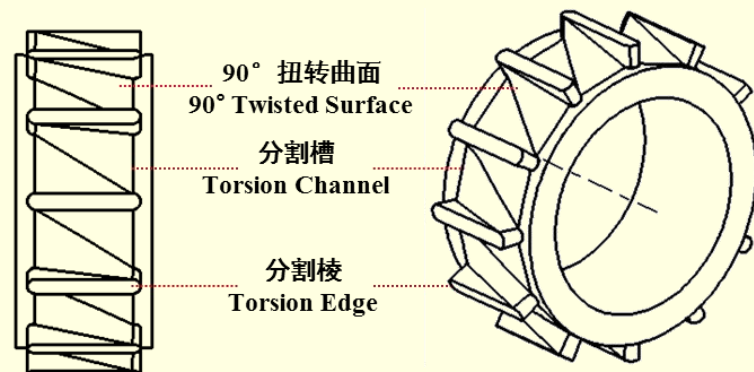
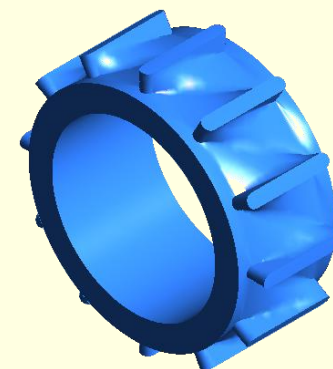
Material flow of screw element    Material flow of synergy element



3D-Printing Model



翻烙饼

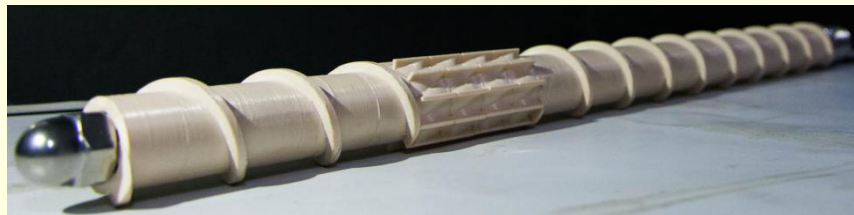


# G2.0 注塑机

## 1) 塑化系统的升级换代

基本原理：场协同原理

核心部件：场协同螺杆



3D-Printing Model

### - 优势

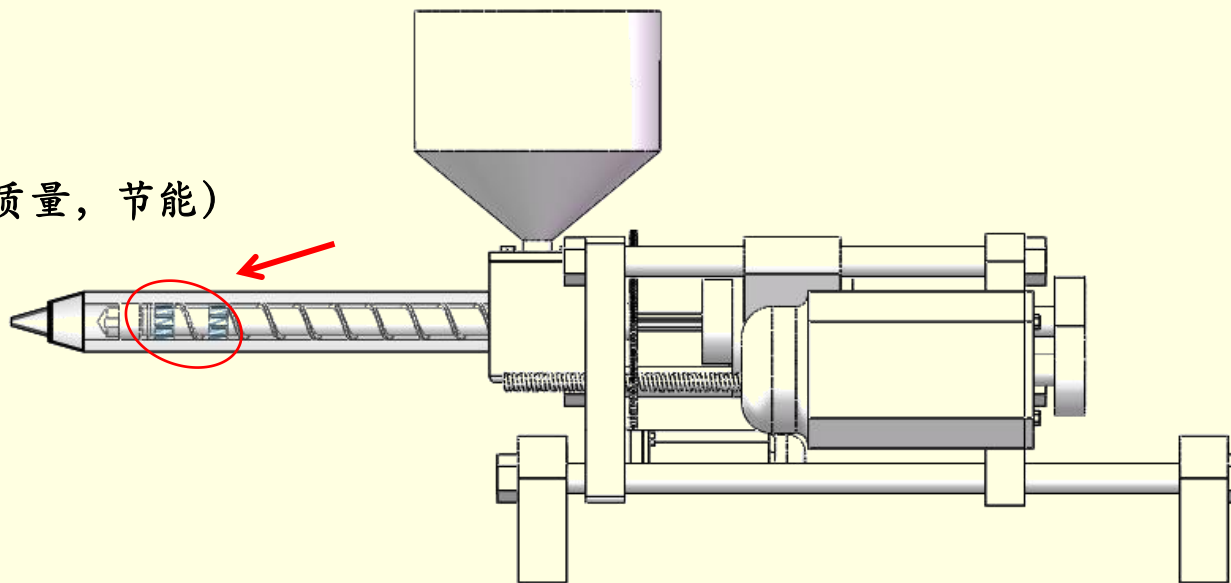
强化传质

强化传热

高效混炼

高效塑化

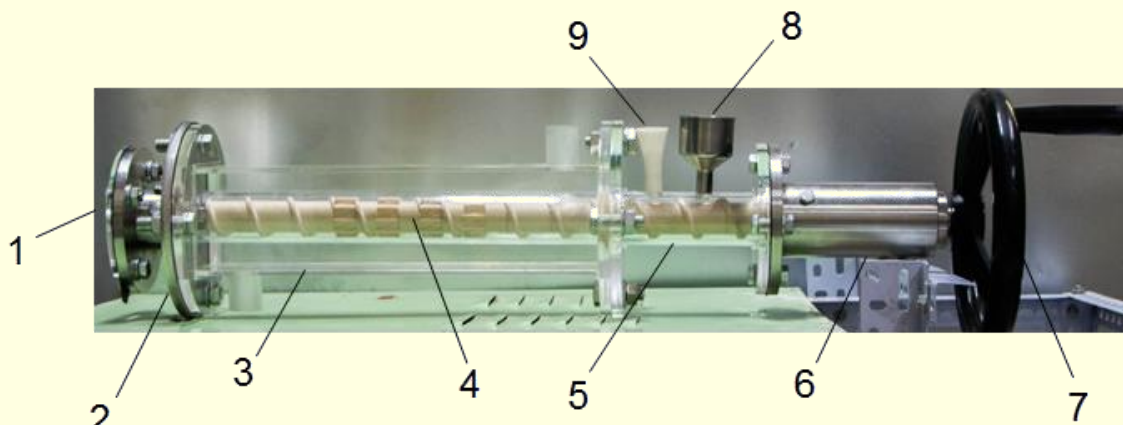
(提高升温速率、塑化质量, 节能)





# G2.0 注塑机

# 1) 塑化系统的升级换代



1-机头 2-端盖 3-有机玻璃外筒 4-3D打印螺杆 5-有机玻璃内筒 6-机架 7-手轮 8-硅油加料斗 9-示踪粒子加料斗

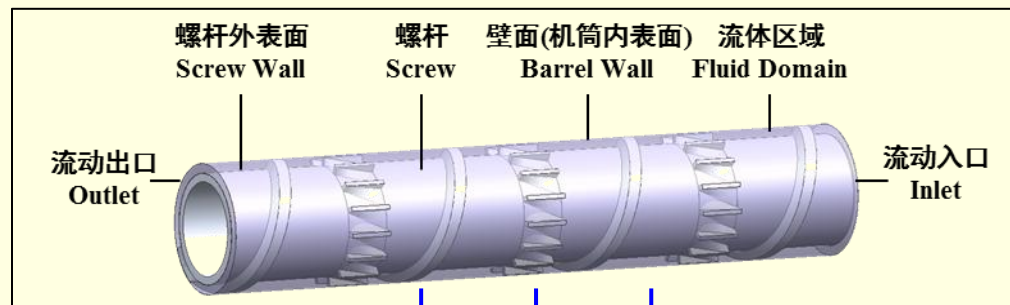
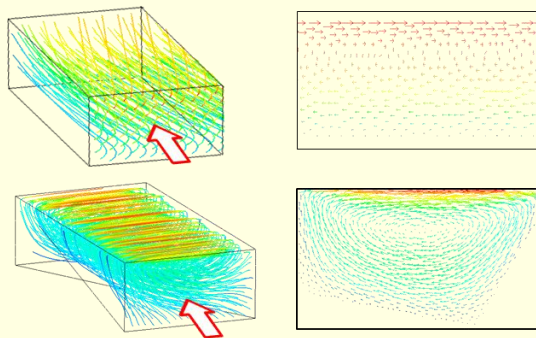
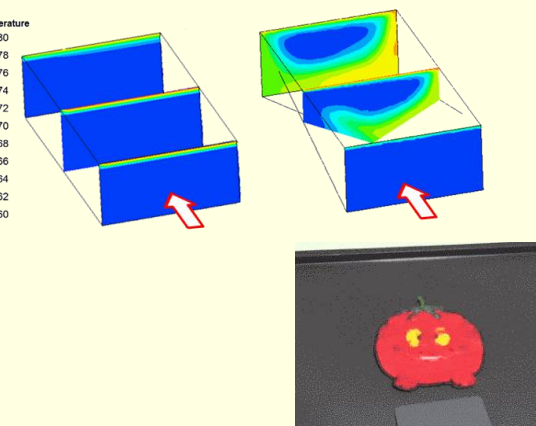
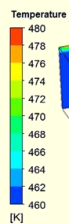
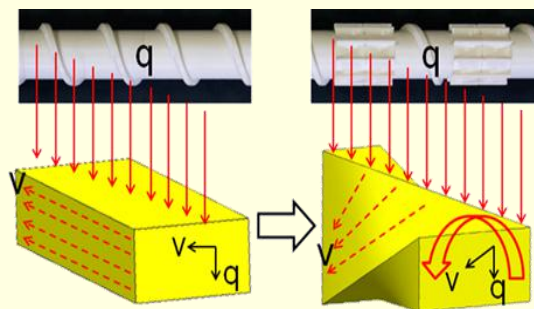


气泡扭转撕裂

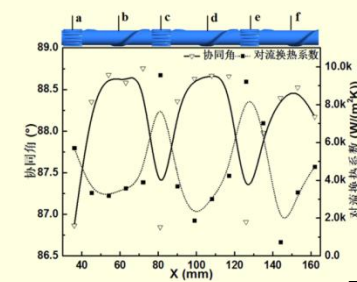
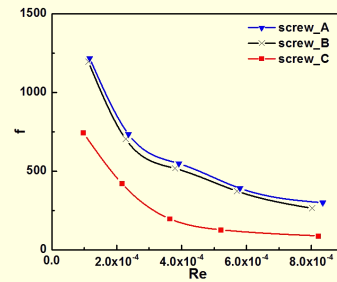
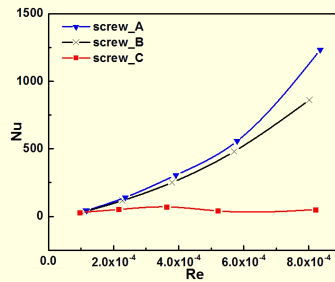
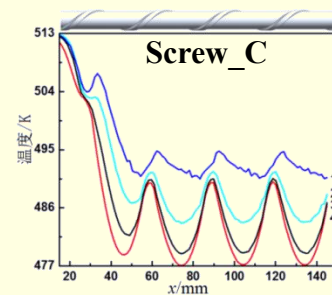
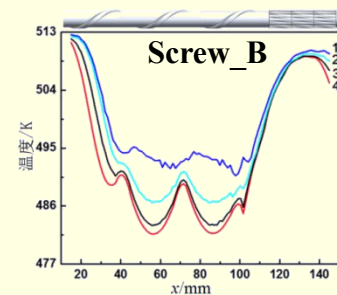
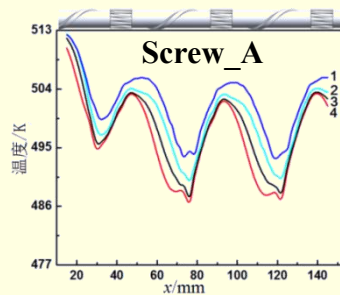
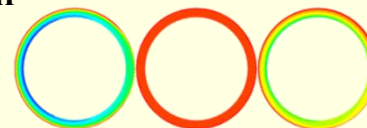


# G2.0 注塑机

# 1) 塑化系统的升级换代



Temperature Contour



### - 缺陷

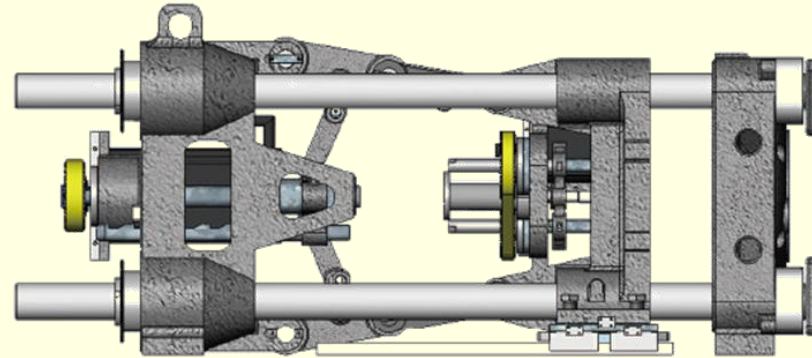
开合模精度低

销轴等易磨损

模板受力不均

调模结构复杂、拉杆及模板断裂等

(模板平行度调节困难、无法成型精密制品)



### - 无法满足日益增长的需要

注塑制品性能要求提高

注塑制品精度要求提高

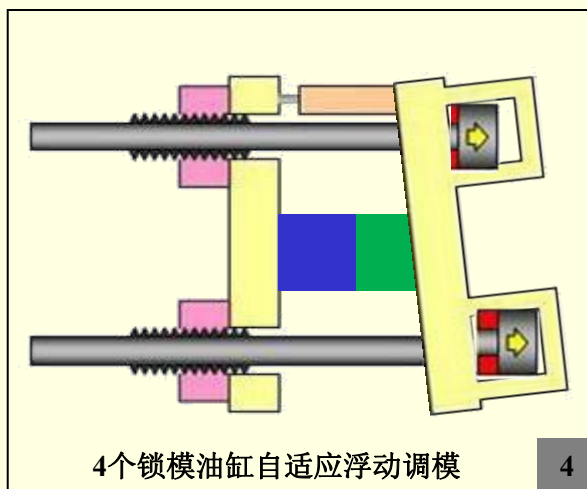
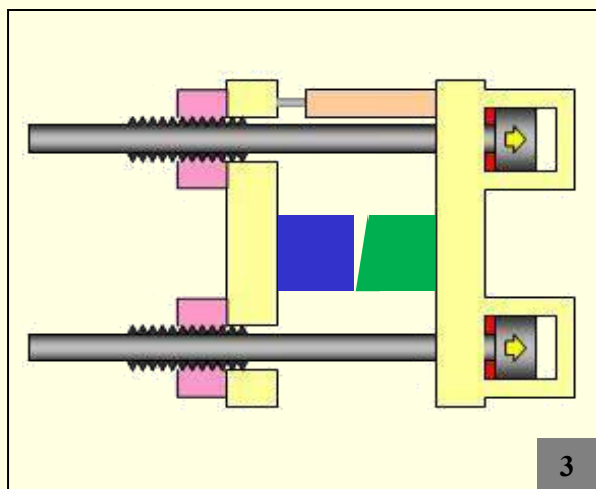
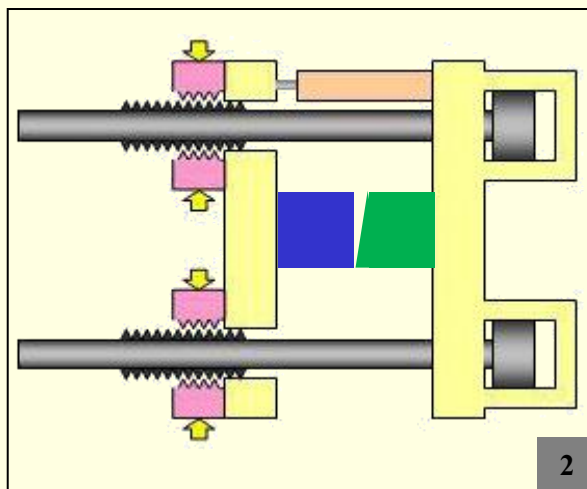
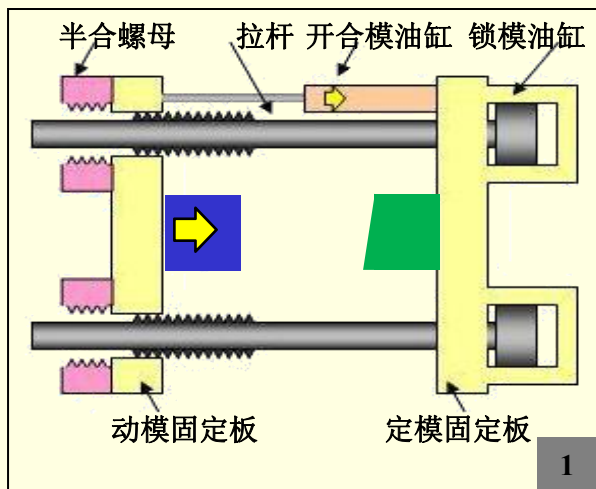
节能、精密、高效的发展要求

(壁厚日益变薄、形状日益复杂、精度日益提高、模具日益复杂、产量日益增加等)

# G2.0 注塑机

## 2) 锁模系统的升级换代

### 二板机



#### 优势

- 结构紧凑、整机重量减轻
- 开合模精度高、成型精度高
- 开合模周期短、成型效率高
- 无需调模、磨损少、受力均衡

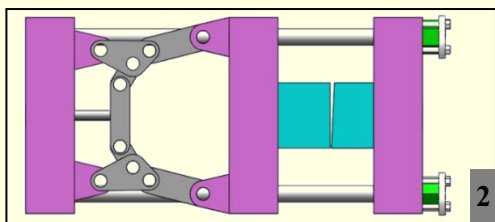
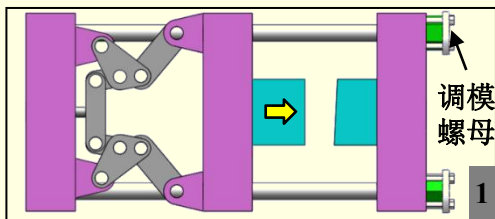
#### 二板机在小型机中应用较少

- 性价比低
- 速度慢、能耗高、成本高
- 液压系统复杂
- 维修保养困难

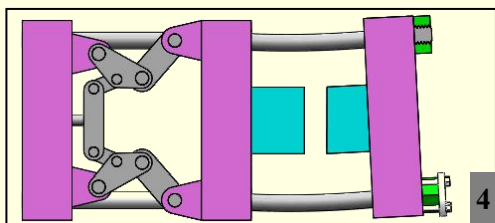
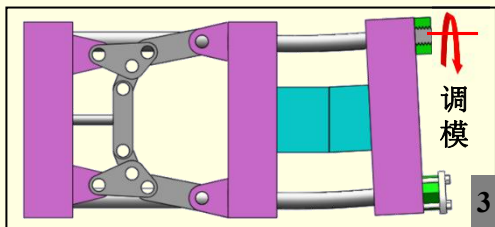
# G2.0 注塑机

## 2) 锁模系统的升级换代

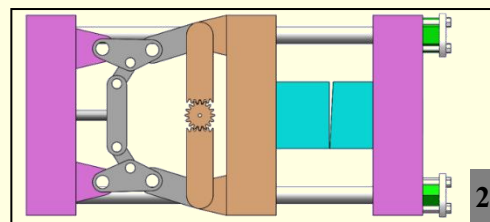
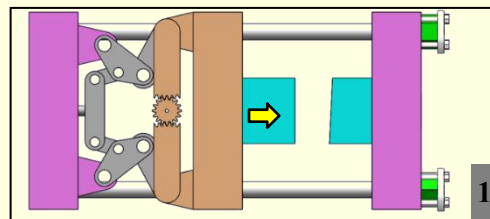
### G1.0 锁模系统



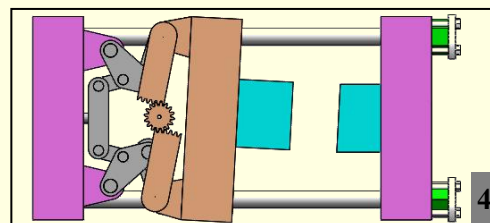
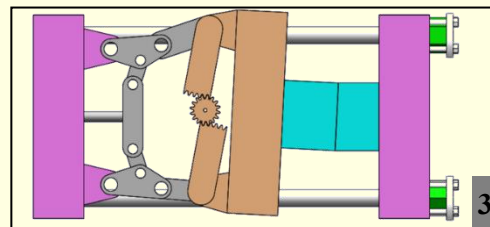
### 拉杆变形



### G2.0 锁模系统



### 自适应调模



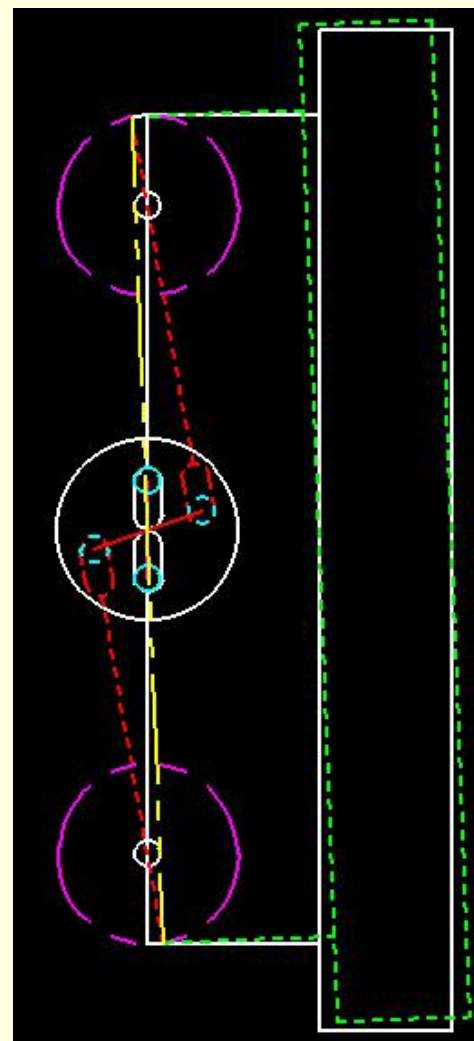
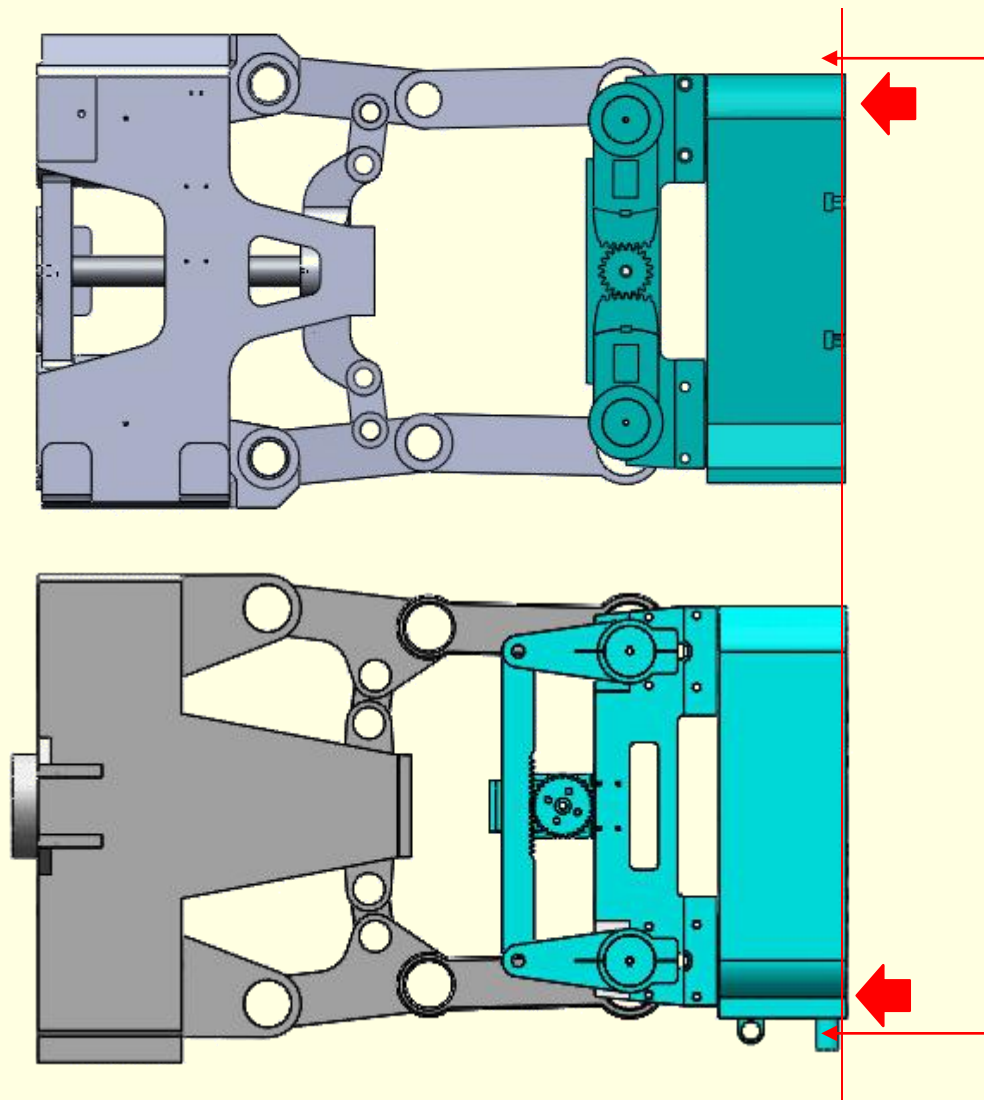
### 优势

- 自适应“零”间隙合模
- 拉杆、模具等的寿命提高
- 受力均衡、开合模精度高
- 避免模板平行度调节困难

# G2.0 注塑机

## 2) 锁模系统的升级换代

自适应锁模系统工作原理



# G2.0 注塑机

## 3) 控制系统的升级换代

### 工业4.0：智能化

- **自动化程度**
  - 自动换模
  - 自动供料
  - 自动取件
  - 自动修边等
- **集中控制和集中管理**
  - 中央集中供料
  - 集中供水供电
  - 多台设备共用换模车
  - 无人注塑车间等
- **大数据及信息化平台**
  - 注塑机群、厂商及客户间信息交流
  - 自动诊断与控制
  - 远程诊断与控制
  - 产品信息追溯系统等



物联网



注塑工厂

# G2.0 注塑机

## 3 ) 控制系统的升级换代

工业4.0：智能化

- 成型即装配
- 即成型即用
- 在线检测与调控
- 加工信息记录跟踪
- 数据共享与远程维护

折叠板凳成型自组装过程



手表成型自组装过程





# G2.0 注塑机

## 3) 控制系统的升级换代

工业4.0: 智能化



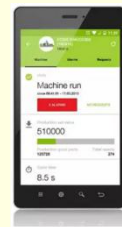
— 记录所有与质量有关的加工数据

比如加热曲线、注塑压力、模腔压力曲线等

— 二维码制作

比如3D打印、激光雕刻等

— 客户则可通过手机、平板电脑或台式机，在全球范围内查询、跟踪每个部件的加工数据。

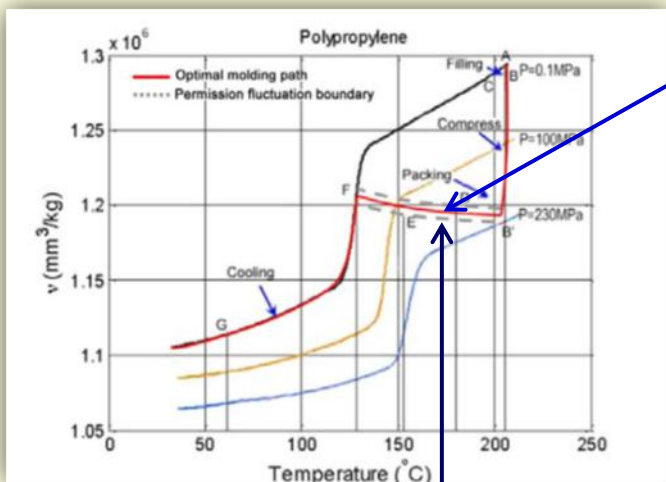


# G2.0 注塑机

## 3) 控制系统的升级换代

### 注塑缺陷在线诊断及自愈调控(智能化装备)

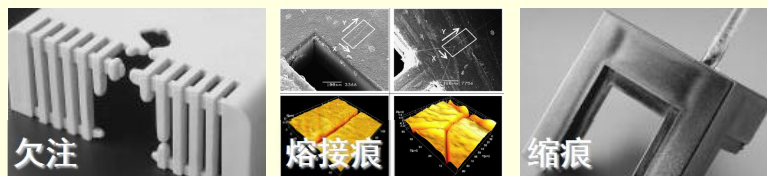
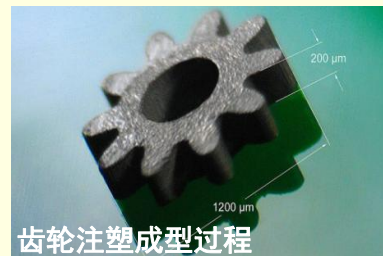
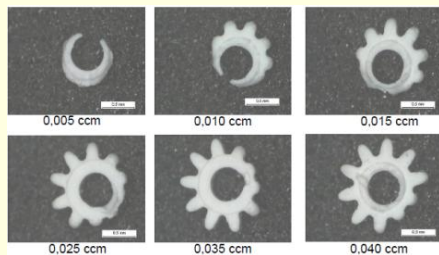
PVT曲线图上定义制品质量标准工艺路径，实现缺陷在线诊断及自愈调控



偏离标准成型工艺路径

“标准成型工艺路径”

制品质量身份ID



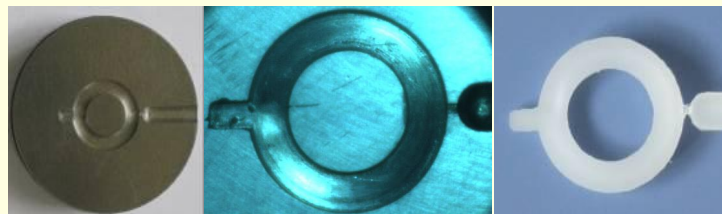
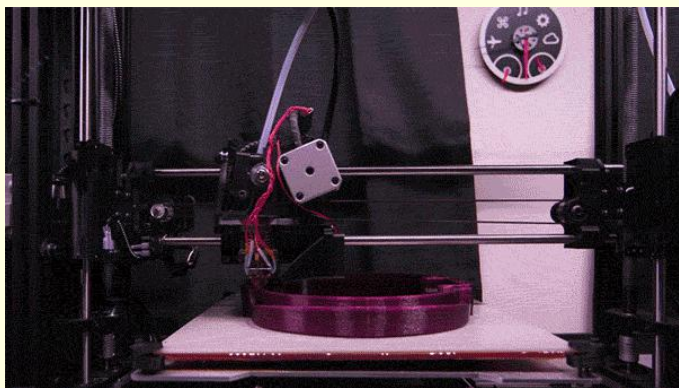
自动识别因环境条件变化或粘性变化引发的工艺波动，并自行采取应对措施

提高制品的重复率，降低废品率

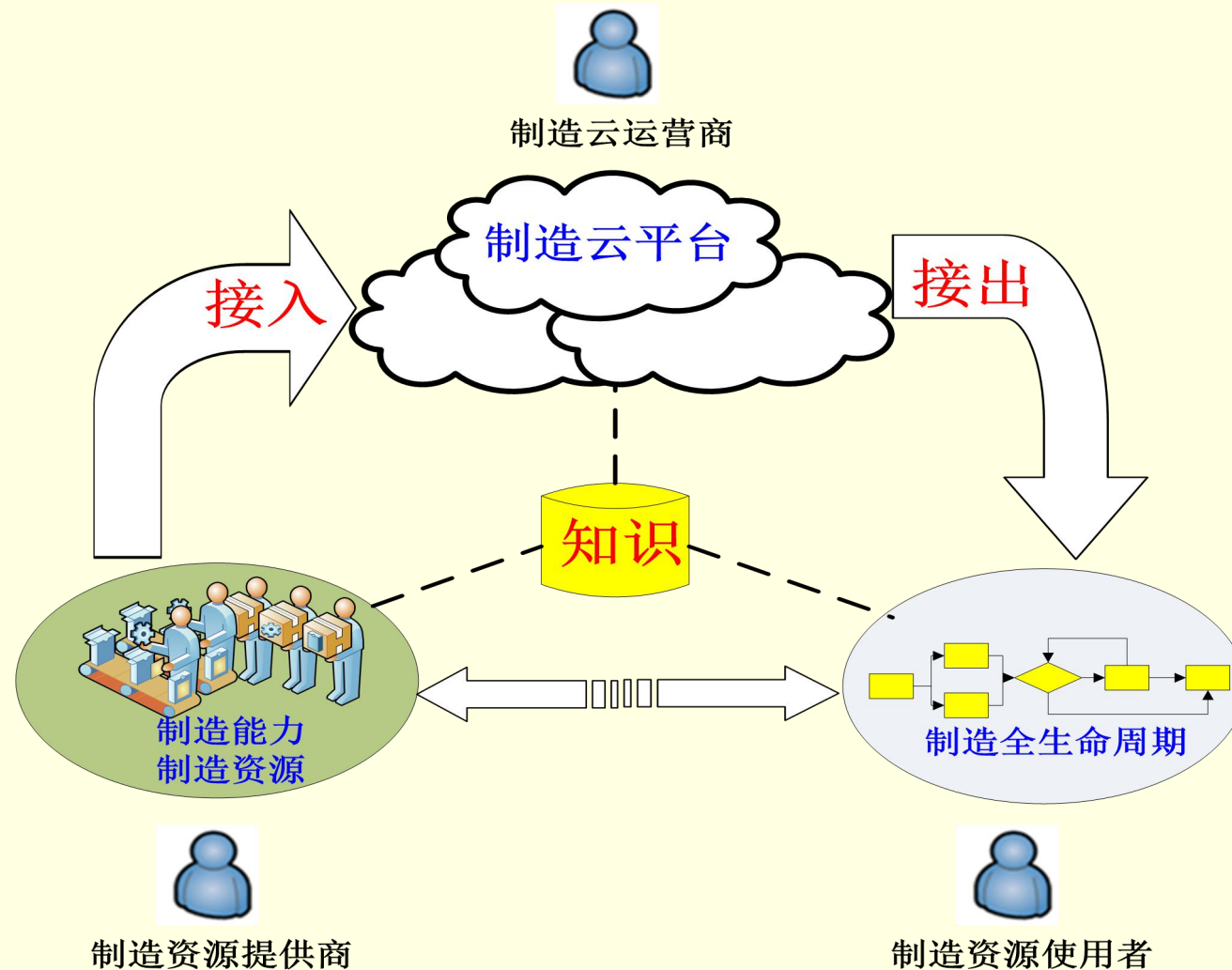
# 面向未来 从3D打印到3D复印

**三维打印** = 增材制造  
3D printing  
= 近净成形  
= 快速成型

**模塑成型** = 三维复印  
Injection Molding  
= 近净成形  
= 等材制造



## 3D打印/复印-大数据-云平台-智能制造





# 感谢您的聆听！

欢迎加入 SPE  
获得更多专业资讯



中国分会联系人  
鉴冉冉 博士生

