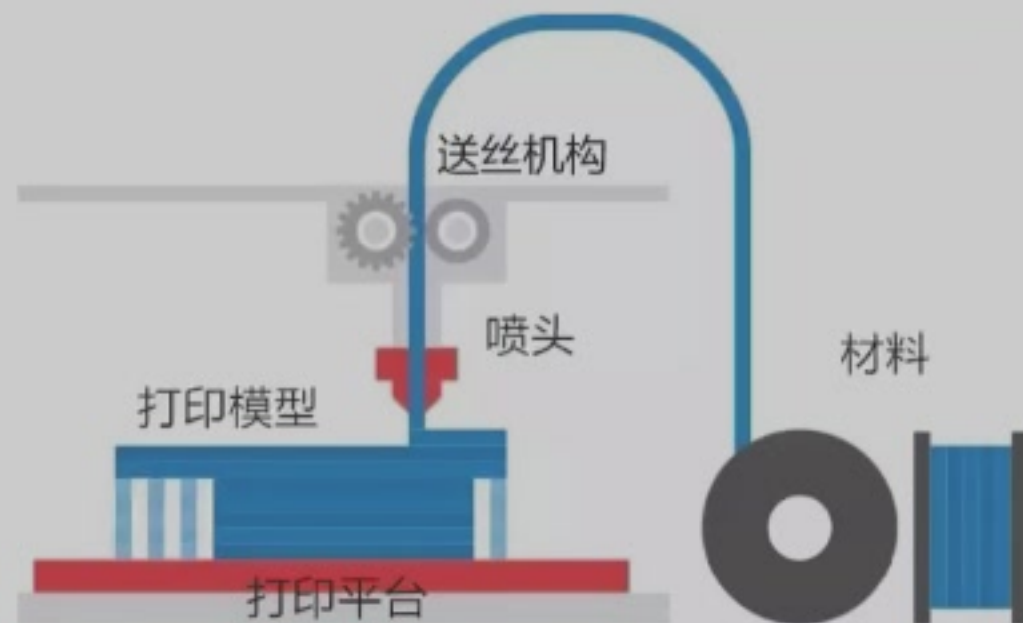


聚合物3D打印技术

(熔融沉积工艺)

熔融沉积成形 (Fused Deposition Modeling, FDM)

- 零件模型由切片软件离散成若干平面层，再将层内生成的打印路径代码发送给打印机，打印机将材料熔化后挤出，逐层叠加形成三维实体
- 该技术可以制造出传统方法难以加工的任意形状的复杂结构，适合单件和小批量复杂结构件无模、快速响应制造



FDM打印机结构



Baymax.stl

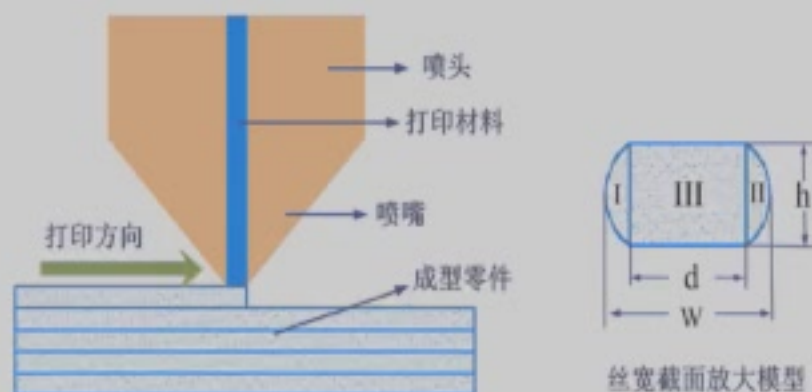


Baymax.gcode



Baymax实物

3D打印丝宽模型



丝宽截面放大模型

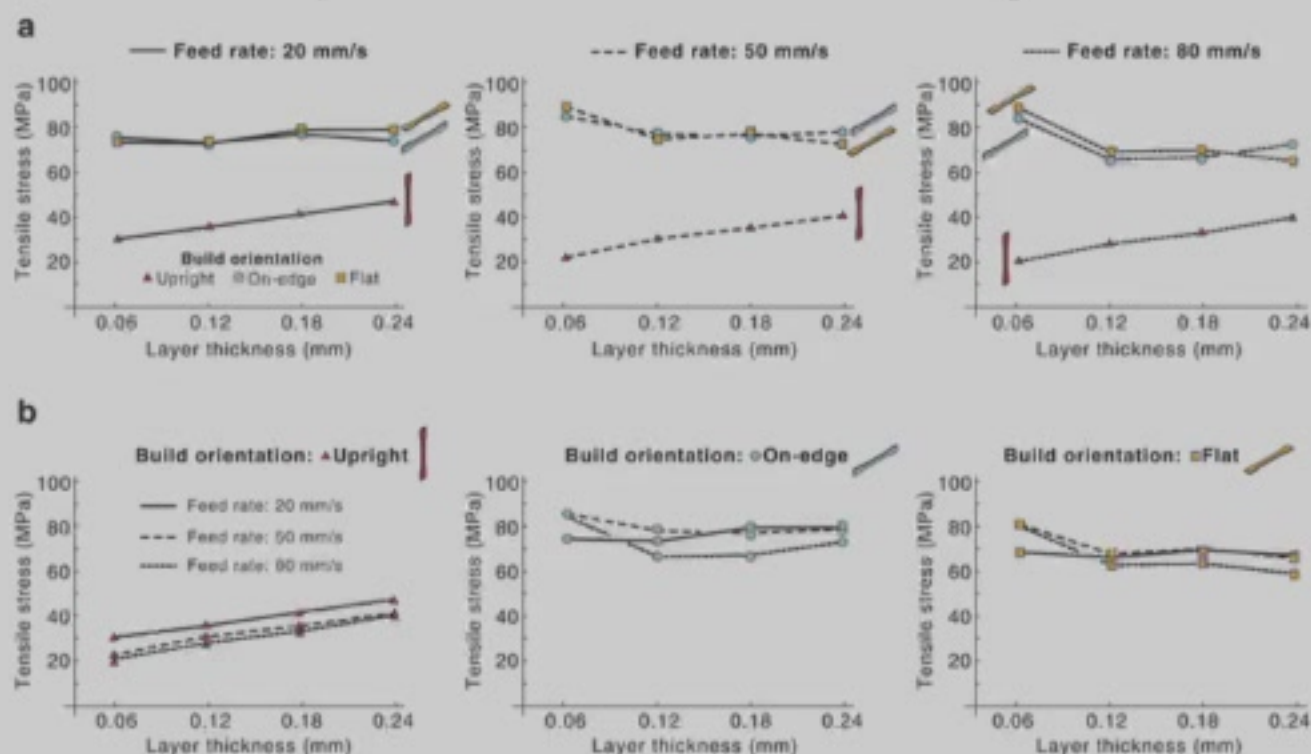
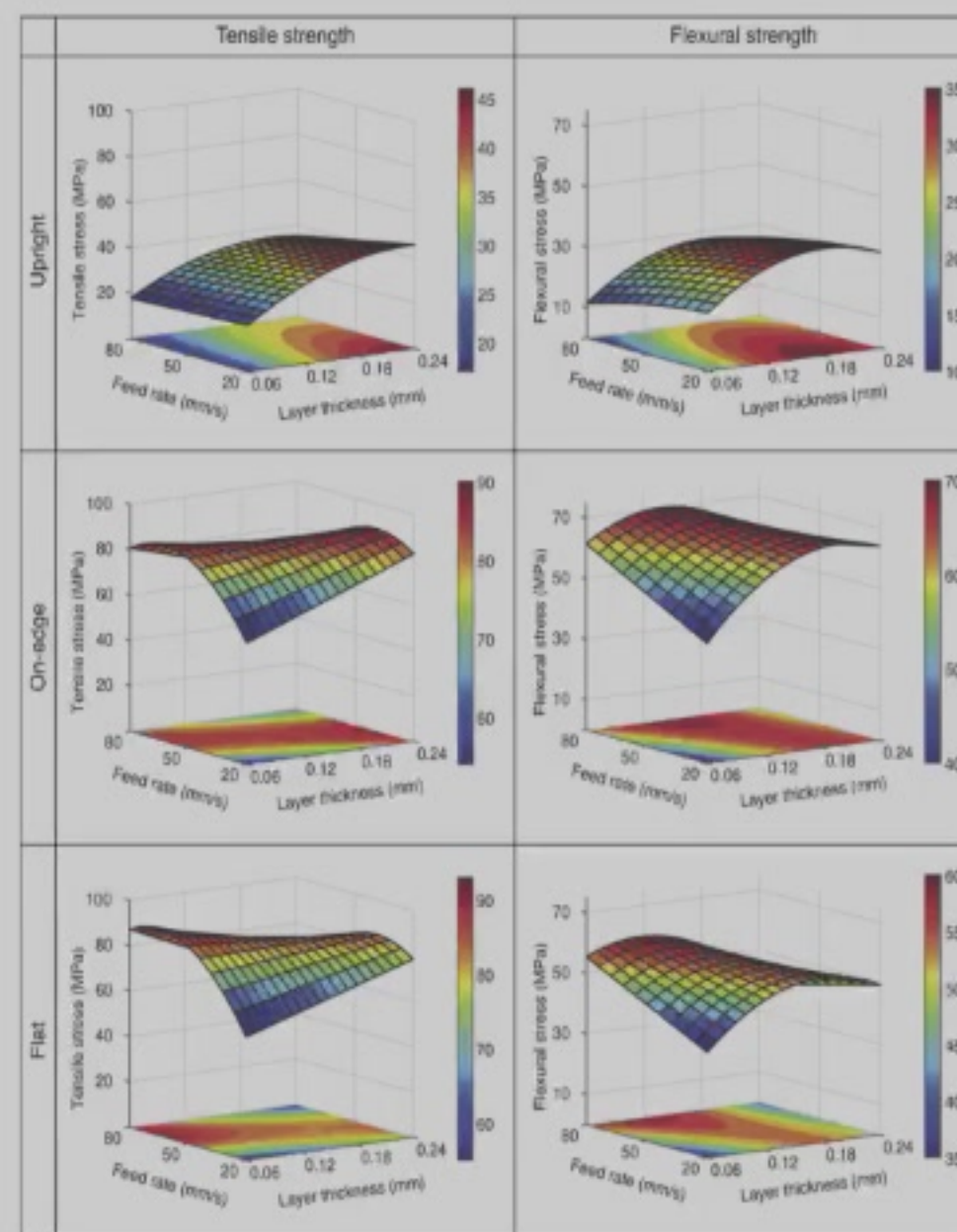
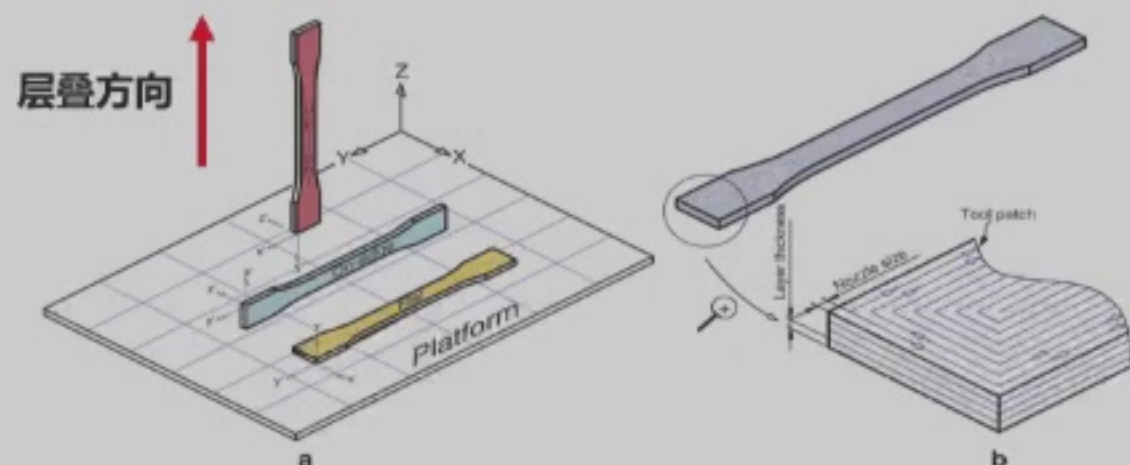


FDM基本工艺参数

FDM的基础工艺参数包括:

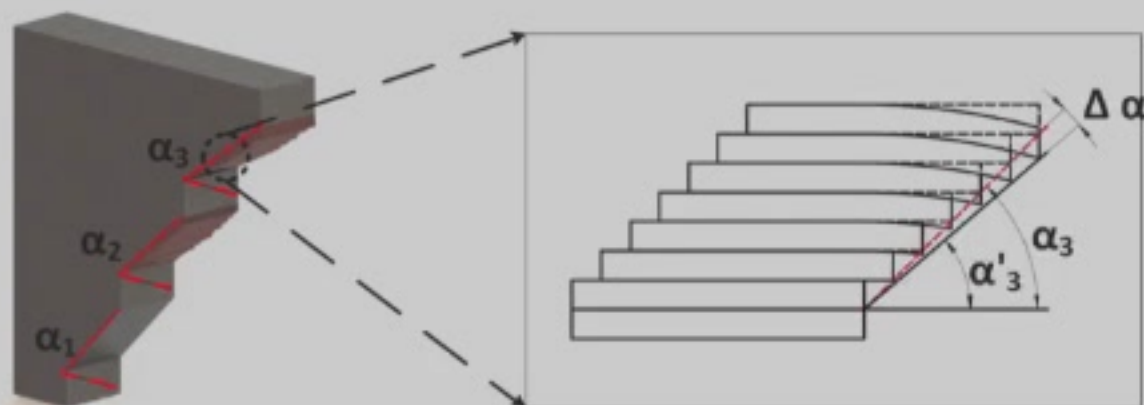
- **层高:** 切片时每相邻两层之间的高度，是决定成形零件侧面质量和打印效率的重要参数。
- **填充率:** 反映模型内部填充部分的填充密度，表示为相邻填充路径（平行线）之间的间距。填充率越高，模型强度越高所需打印时间也就越长。
- **打印速度:** 打印时喷头的移动速度。过低影响打印效率，过高则会导致模型质量下降、振动等问题。

□ 打印参数及摆放对打印件的影响



Source: Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Mater Des 2017;124:143–57.

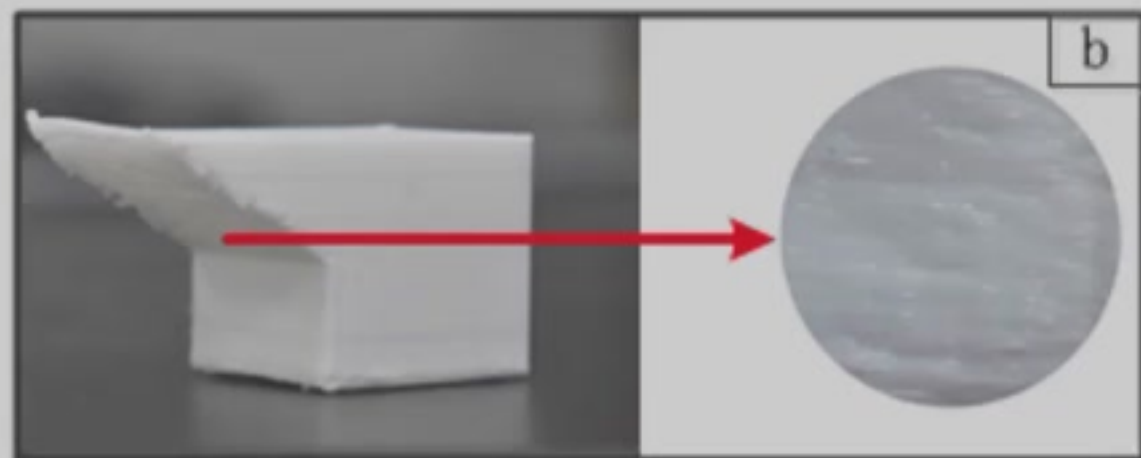
□ 工艺特点



材料挂流现象



打印过程添加支撑



挂流表面质量



成品件支撑去除

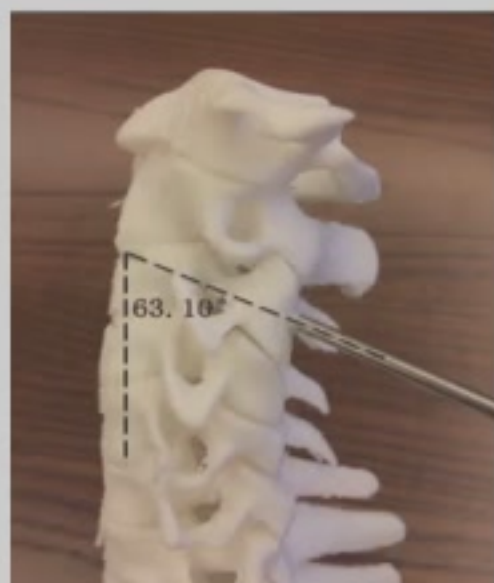
□ FDM 3D打印应用示例



工艺品



设计方案打样

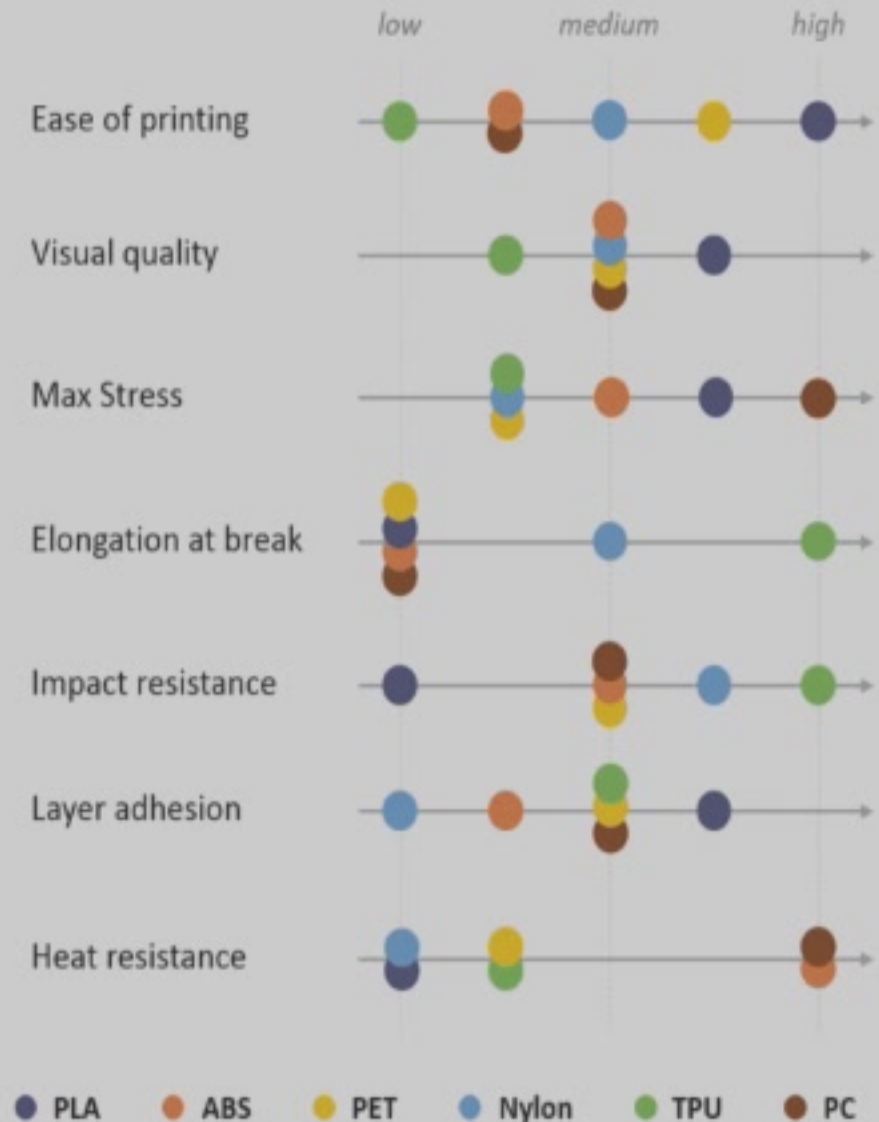
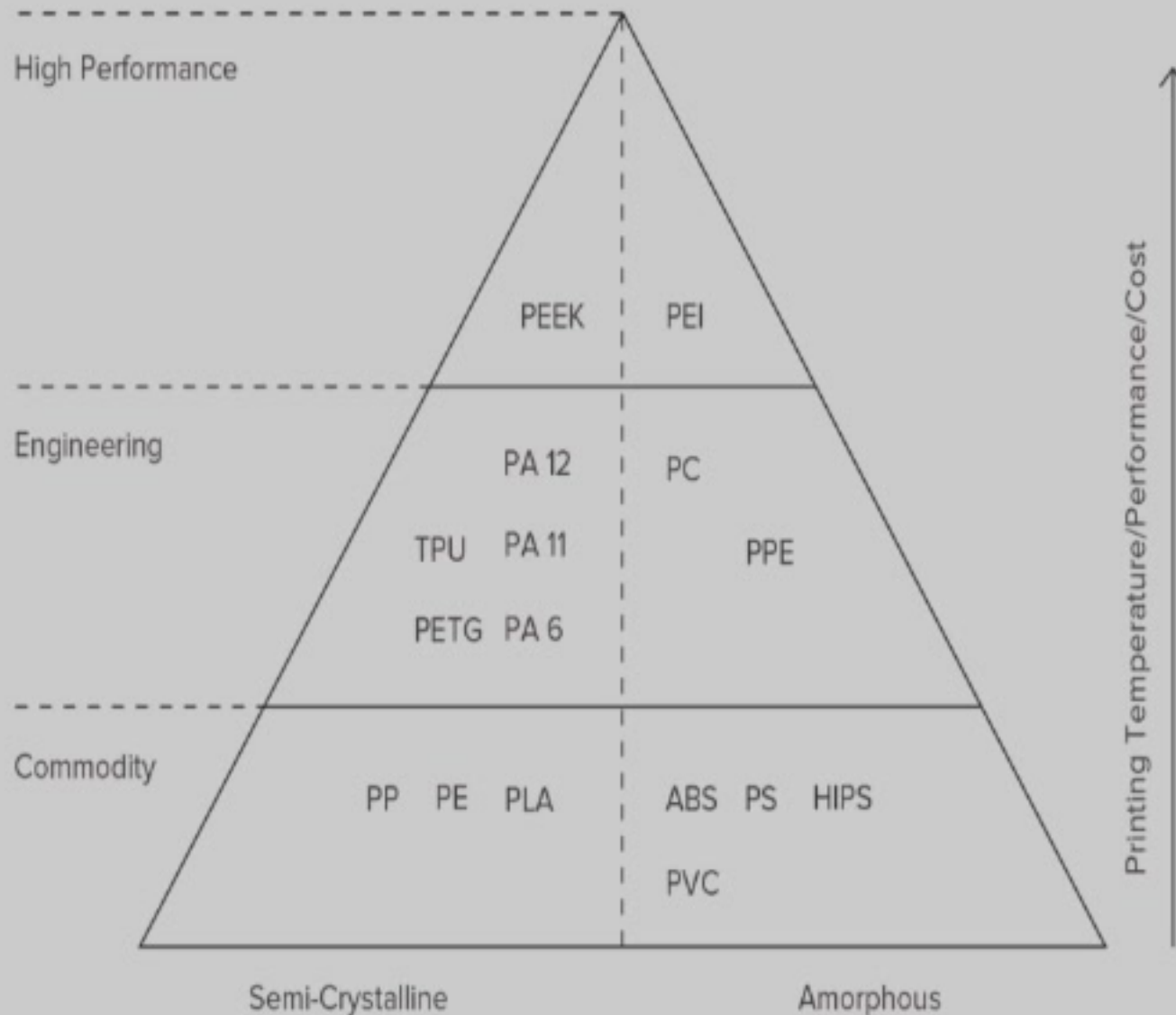


示教模型



机械结构件

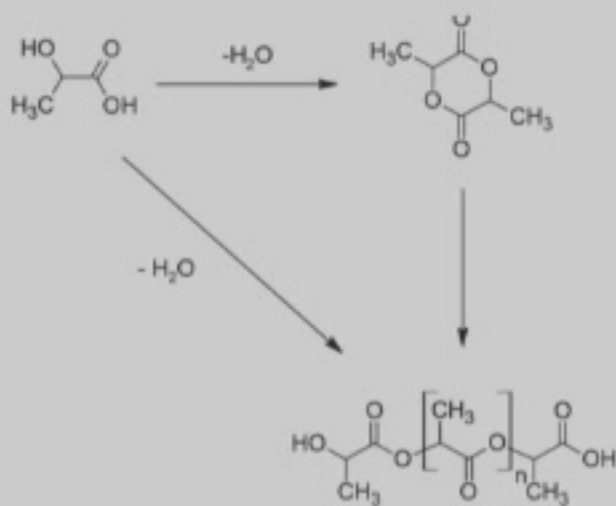
■ FDM工艺常见材料及特点



■ 聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)

□ PLA是一种常见的3D打印材料，玻璃化转变温度为60℃，打印温度在180~210℃之间，这种材料具有以下特点：

- 由可再生的植物资源制成，无毒；
- 生物降解塑料；
- 制件强度一般，韧性差；
- 由于PLA融化后易附着和延展，易发生堵头现象。



聚乳酸的合成



PLA丝材

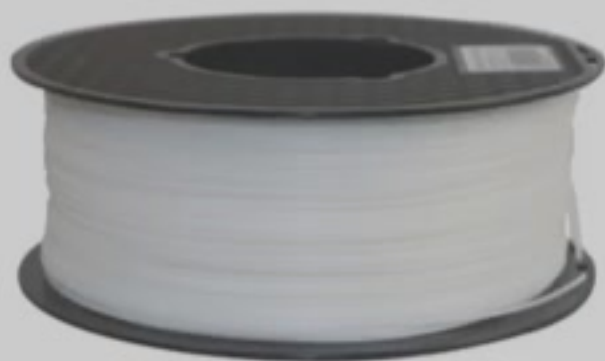


堵头现象

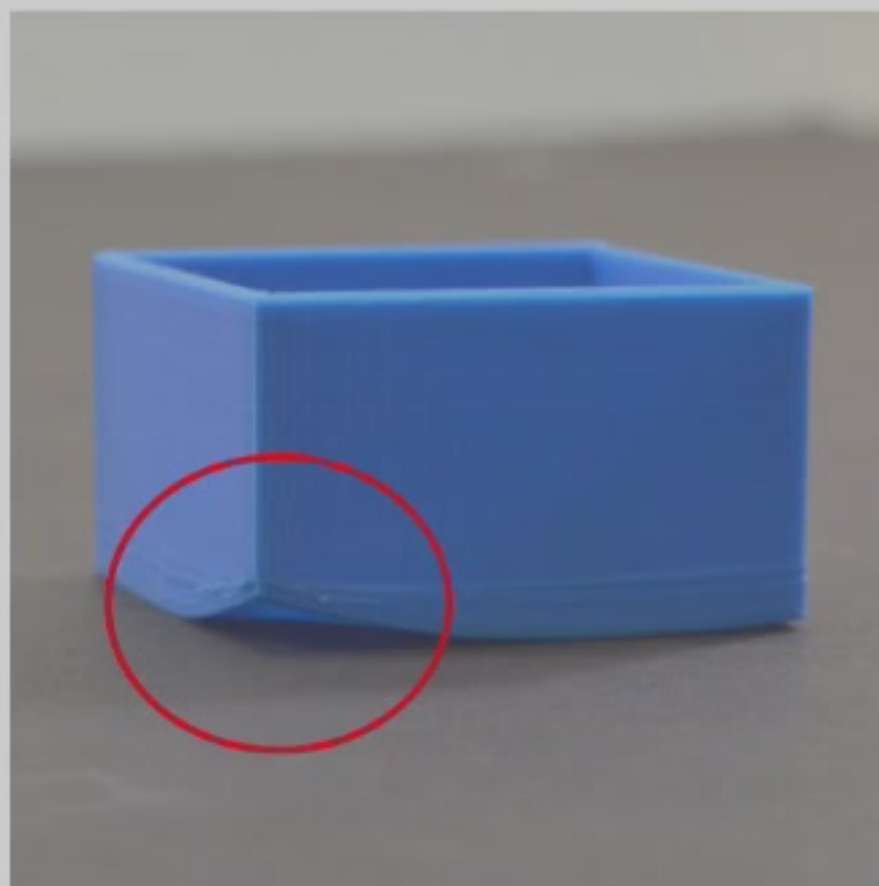
■ 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(Acrylonitrile Butadiene Styrene Copolymers, ABS)

□ ABS同样也是一种常见的3D打印材料，相比PLA材料，ABS的打印温度更高（210~240℃），这种材料具有以下特点：

- 综合性能好，冲击强度、耐磨性优良；
- 稳定性好，耐低温、耐腐蚀；
- 电绝缘性较好；
- 打印过程遇冷收缩，极易翘曲；



ABS丝材



翘曲现象

■ 聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)

- PVA 是一种具有水溶性的聚合物材料，PVA作为3D打印材料使用时，常在多喷头打印时将其作为支撑材料使用，利用PVA独特的水溶性的特点，轻松实现支撑的完全去除。



■ 聚醚醚酮(Polyetheretherketone, PEEK)

□ PEEK作为一种特种工程塑料，是一种半结晶高性能聚合物材料。具有耐高温、自润滑、易加工和高机械强度等特点。打印温度在390~430℃左右，对3D打印设备具有较高要求。材料具有以下特点：

- 耐200℃以上高温；
- 力学性能优异；
- 耐腐蚀、抗老化，化学惰性好；
- 密度与弹性模量与骨相近，生物相容性好，是美国食品药品监督管理局(FDA)批准的骨植入材料；
- 打印温度高，为避免打印件遇冷翘曲，对打印环境温度有较高要求。



■ 聚苯硫醚(Polyphenylene Sulphide, PPS)

□ PPS是一种新型高性能热塑性树脂，也是一种半结晶的高分子聚合物。打印温度在 $280^{\circ}\text{C}\sim 320^{\circ}\text{C}$ 左右，适合制造多种高温、高湿、强腐蚀等恶劣工况下的部件，应用广泛。这种材料具有以下特点：

- $200^{\circ}\text{C}\sim 220^{\circ}\text{C}$ 长期耐高温，耐腐蚀，阻燃性好；
- 强度一般，刚性好，尺寸精度高；
- 抗辐射性能好；
- 熔体黏度低，流动性良好；
- 结晶度受工艺过程热影响较大。



不同结晶度下的外观



PPS丝材

■ 聚醚醚酮(Polyetheretherketone, PEEK)

□ PEEK作为一种特种工程塑料，是一种半结晶高性能聚合物材料。具有耐高温、自润滑、易加工和高机械强度等特点。打印温度在390~430℃左右，对3D打印设备具有较高要求。材料具有以下特点：

- 耐200℃以上高温；
- 力学性能优异；
- 耐腐蚀、抗老化，化学惰性好；
- 密度与弹性模量与骨相近，生物相容性好，是美国食品药品监督管理局(FDA)批准的骨植入材料；
- 打印温度高，为避免打印件遇冷翘曲，对打印环境温度有较高要求。





用于潜艇/隐形战机耐辐射零件



代替铝合金用于汽车轻量化



作为耐腐蚀涂料用于钢管表面喷涂



耐高温耐腐蚀的PPS过滤袋

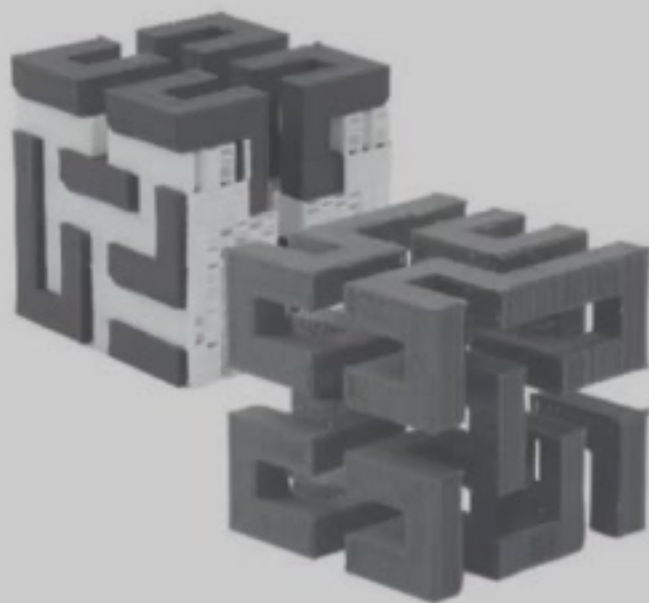
■ 多材料打印的意义

- 多材料3D打印可以将不同性能的材料以一定的形式构建于同一零件上，以获得特定的零件性能；
- 通过多材料打印，可简化传统制造流程，甚至可以解决梯度材料的制造问题；
- 可以分为混合成形（复合材料）、分时成形（材料连接）等形式。

■ 多材料3D打印案例



碳纤维增强扳手



水溶性支撑

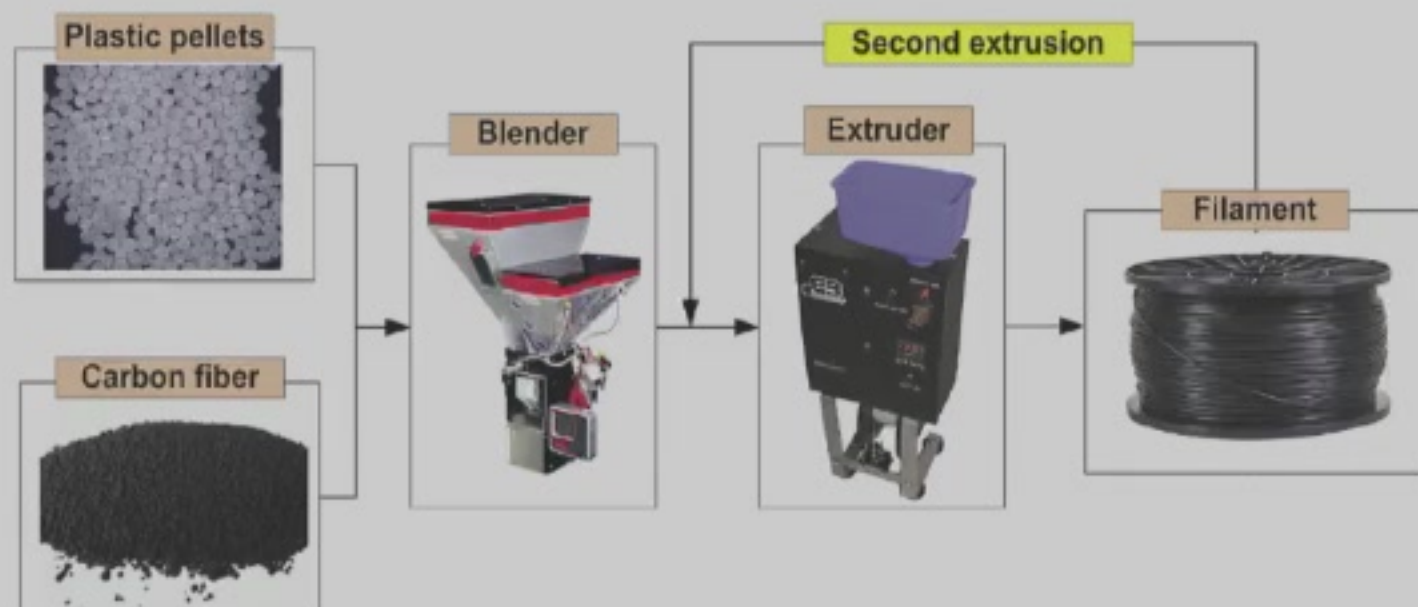


PLA/ABS复合构件

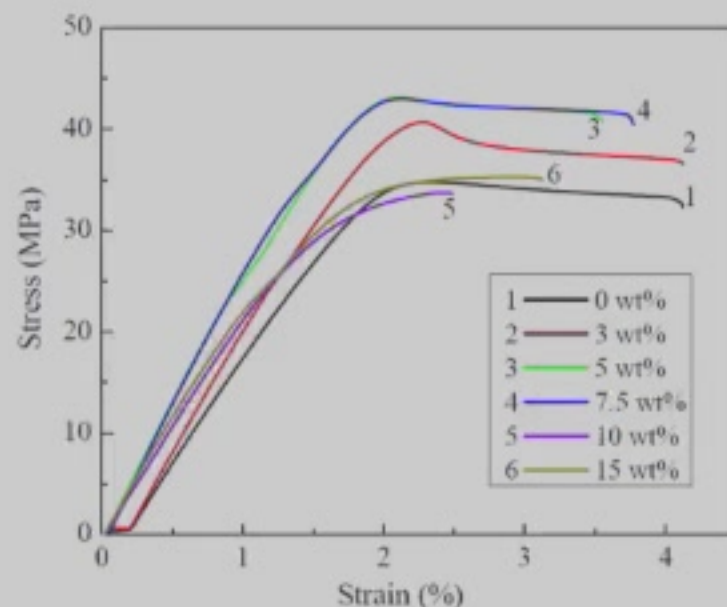
■ 复合材料丝材 (纤维增强丝材)

□ 短纤维增强聚合物

- 通过在聚合物丝材加工过程中掺入短纤维来起到提高丝材强度的作用
- 对拉伸强度有一定增强作用,但同时提高了打印的孔隙率造成应力集中。



碳纤维增强塑料丝材的加工流程



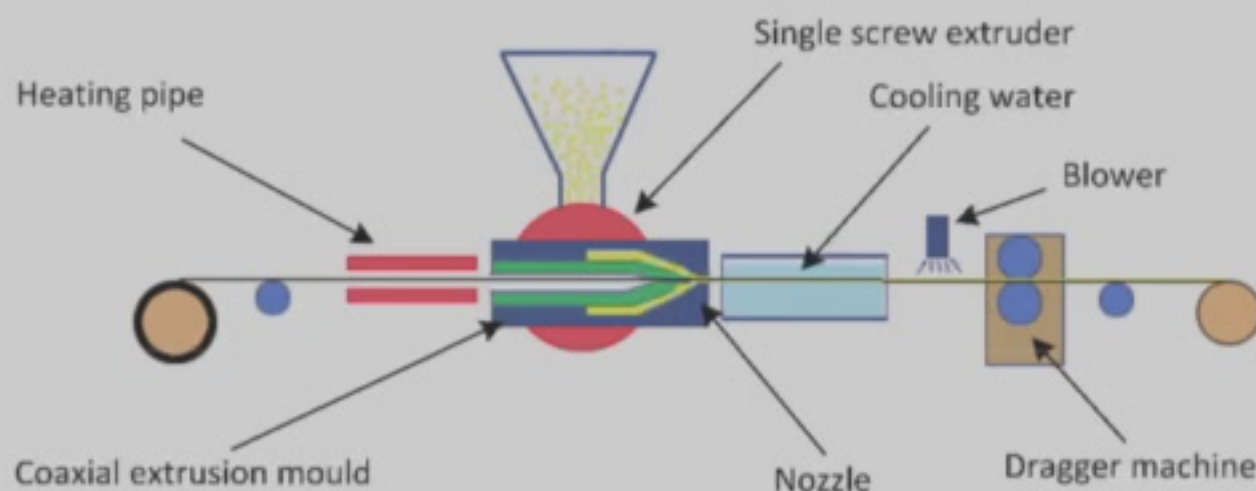
不同纤维含量对强度的影响

Source: Ning F, Cong W, Qiu J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 80:369-378.

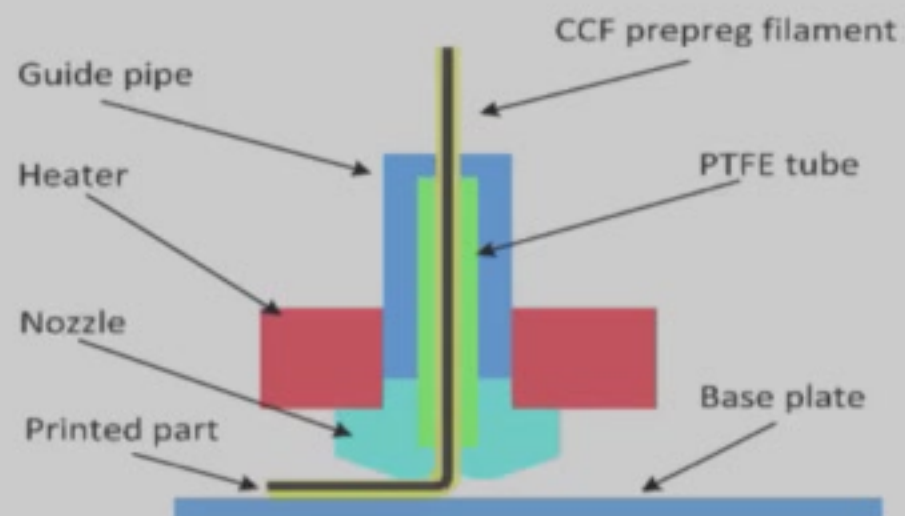
■ 复合材料丝材（纤维增强丝材）

□ 连续纤维增强聚合物——预浸料丝材

- 在连续纤维外部包裹聚合物塑料制成打印丝材；
- 由于采用连续纤维，对强度提升明显；
- 打印难度较高，打印复杂形状需要剪切装置来剪断纤维；



连续纤维预浸料丝材的加工流程



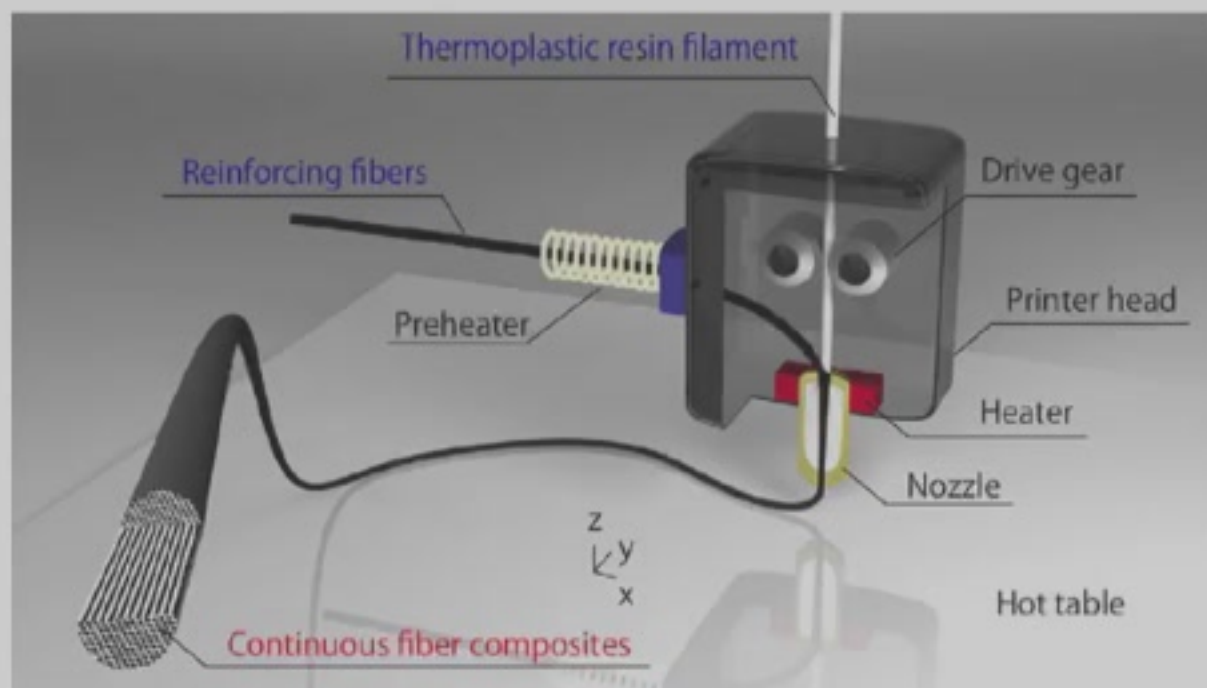
打印喷头

Source: Hu Q, Duan Y, Zhang H, et al. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(3):1887-1898.

■ 复合材料丝材（纤维增强丝材）

□ 连续纤维增强聚合物——同步送丝工艺

- 打印喷头有两个入口：连续纤维入口和塑料丝材入口
- 通过同步送丝，实现连续增强纤维和聚合物塑料在喷嘴内浸渍混合



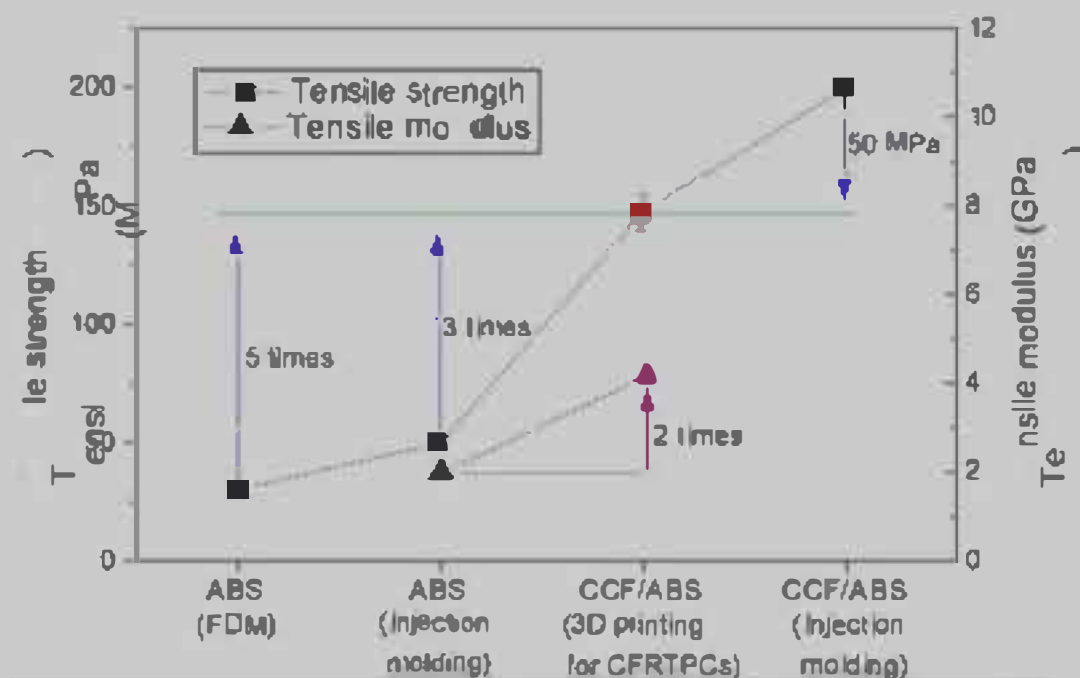
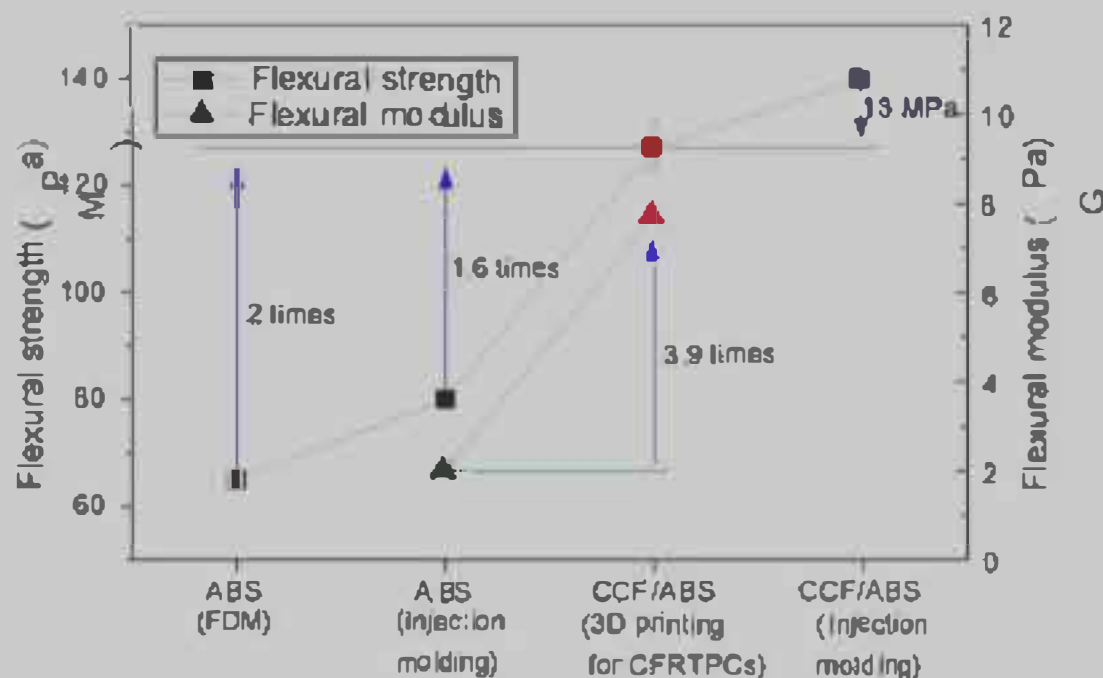
连续纤维增强塑料同步送丝工艺

Source: Matsuzaki R, Ueda M, Namiki M, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation[J]. Scientific Reports, 2016, 6:23058.



■ 复合材料丝材 (纤维增强丝材)

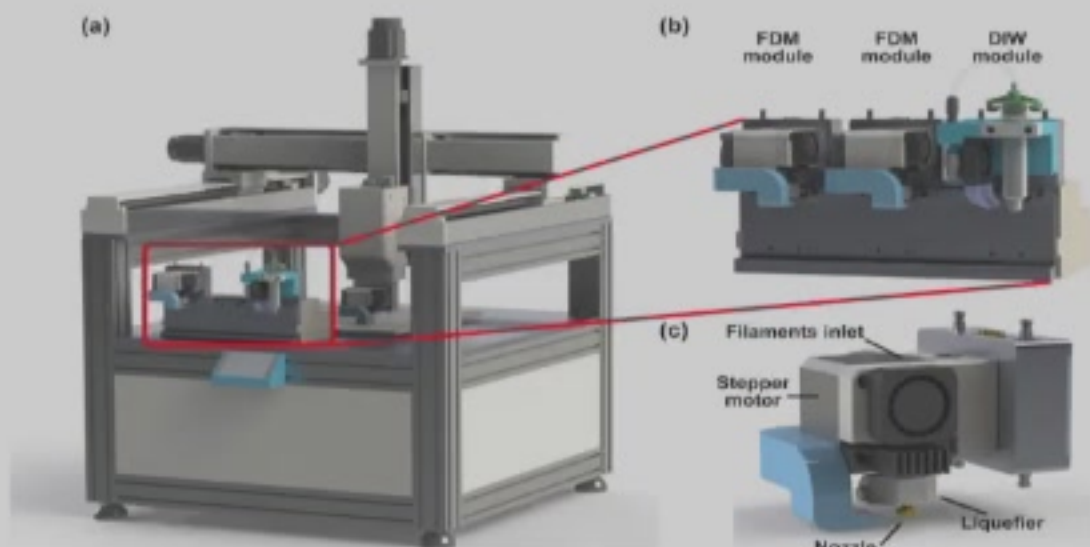
□ 连续纤维增强聚合物



3D打印连续纤维增强塑料的强度对比。其中3D打印连续纤维增强与注射成型短纤维增强ABS的碳纤维含量均为10%wt

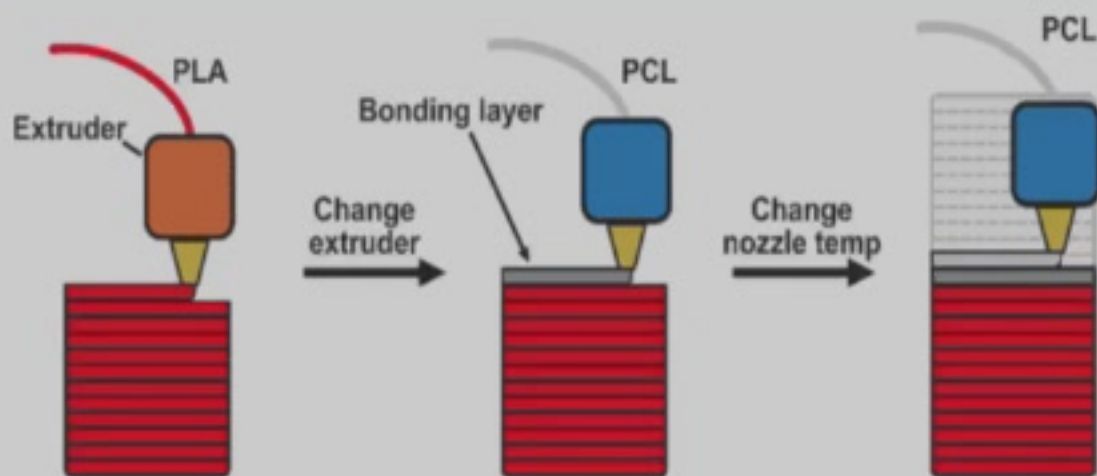
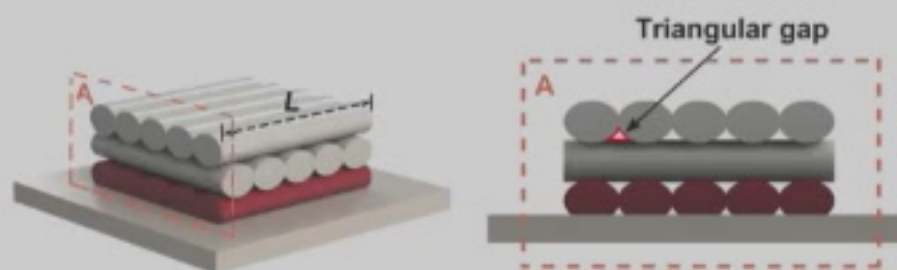
Source: Yang C, Tian X, Liu T, et al. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(1):209-215.:

不同熔点材料打印工艺对结合强度的影响

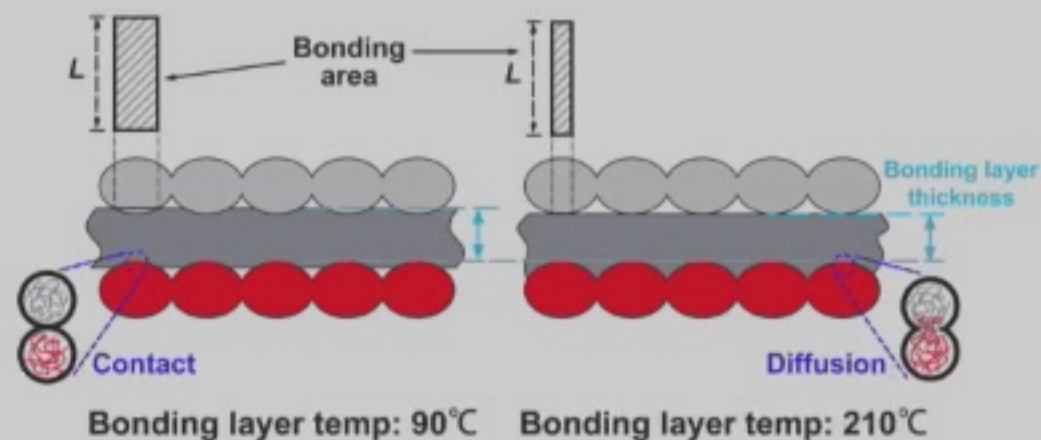


✓ PLA成形温度: 180~210°C

✓ PCL成形温度: 70~90°C

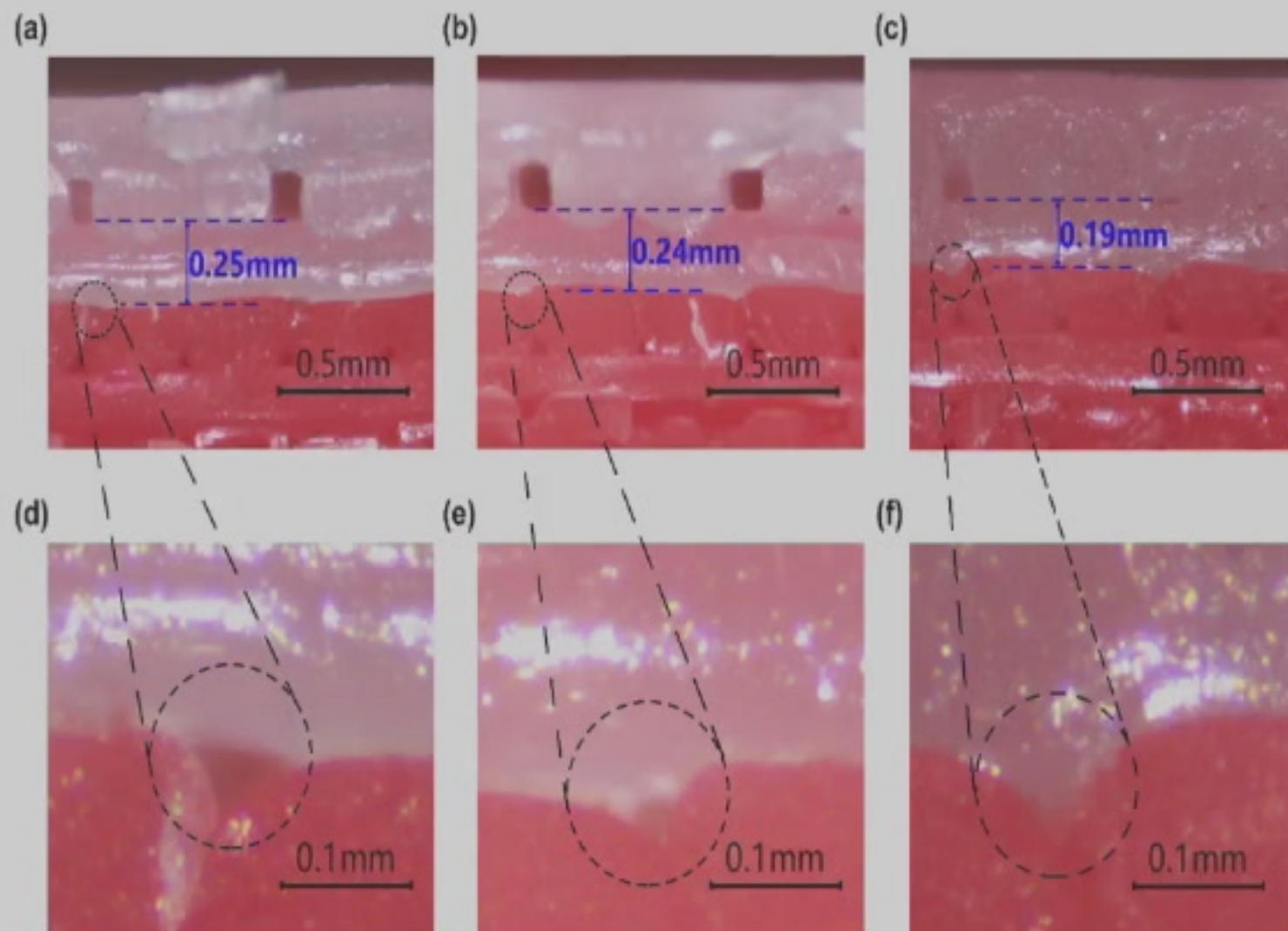


PLA/PCL打印单层调温打印工艺



不同调温温度下PLA/PCL样件的断裂机理

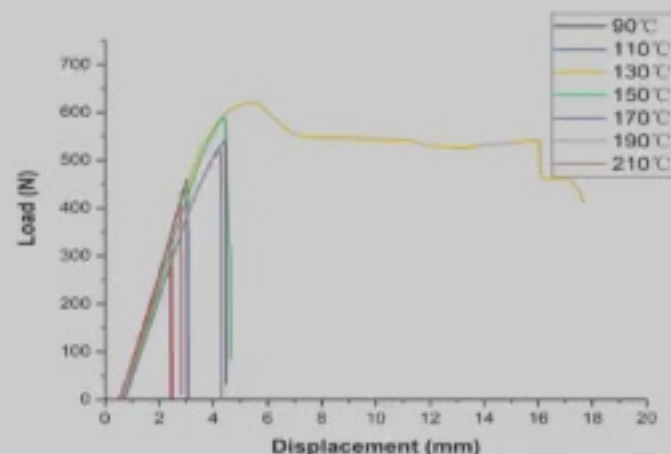
不同熔点材料打印工艺对结合强度的影响



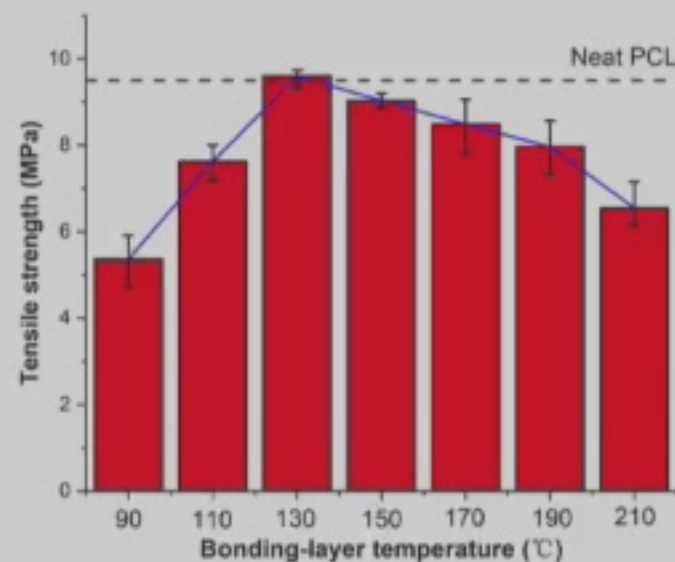
调温层: 90°C

调温层: 130°C

调温层: 210°C



不同单层调温下拉伸强度



通过单层调温打印工艺, 使
PLA/PCL结合强度提高**30%**

Source: Lin W, Shen H, Xu G, Zhang L, Fu J, Deng X. Single-layer temperature-adjusting transition method to improve the bond strength of 3D-printed PCL/PLA parts. Compos Part A Appl Sci Manuf 2018;115:22–30.

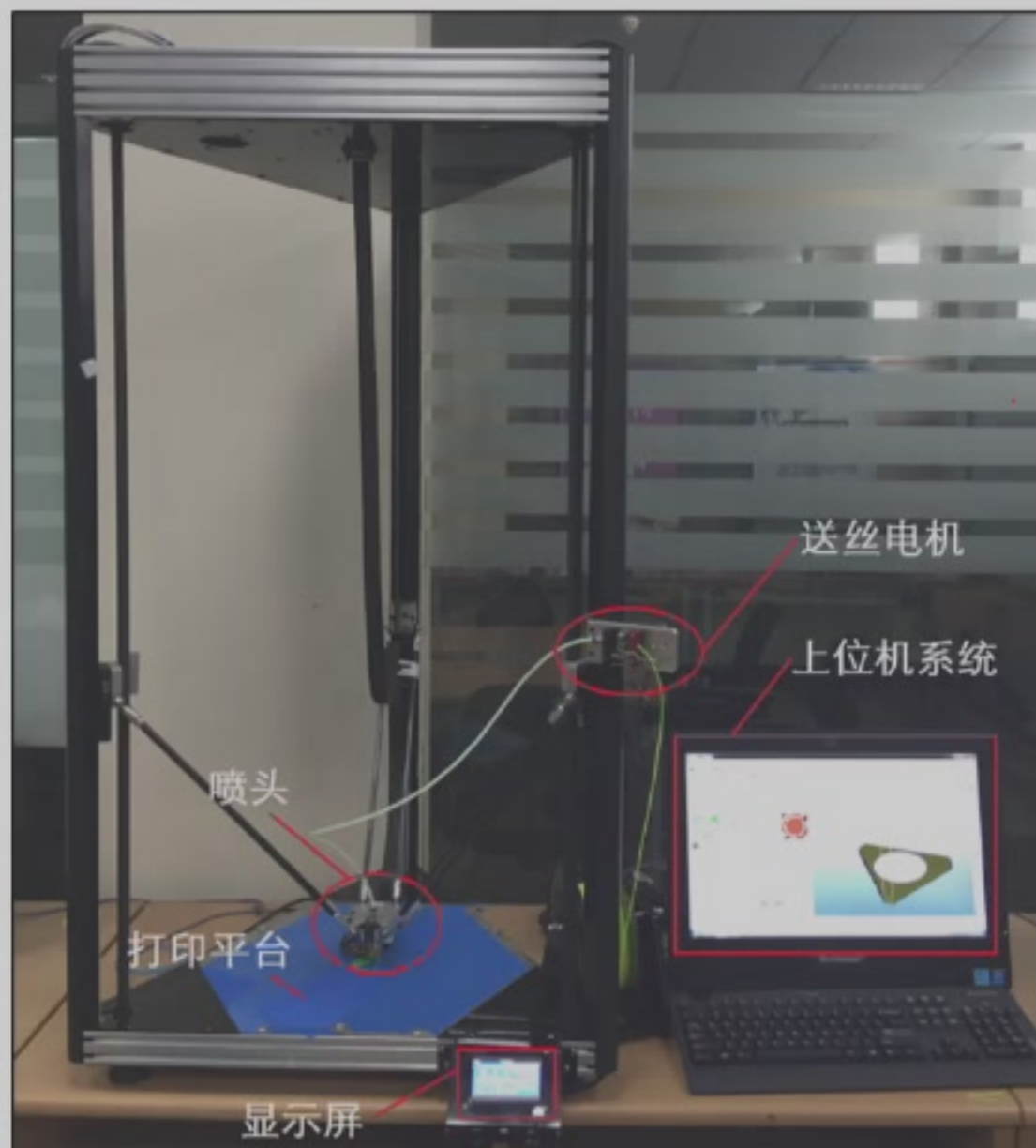
一、熔融沉积工艺原理

二、熔融沉积工艺材料

三、打印装备及路径生成

四、后处理与缺陷监控

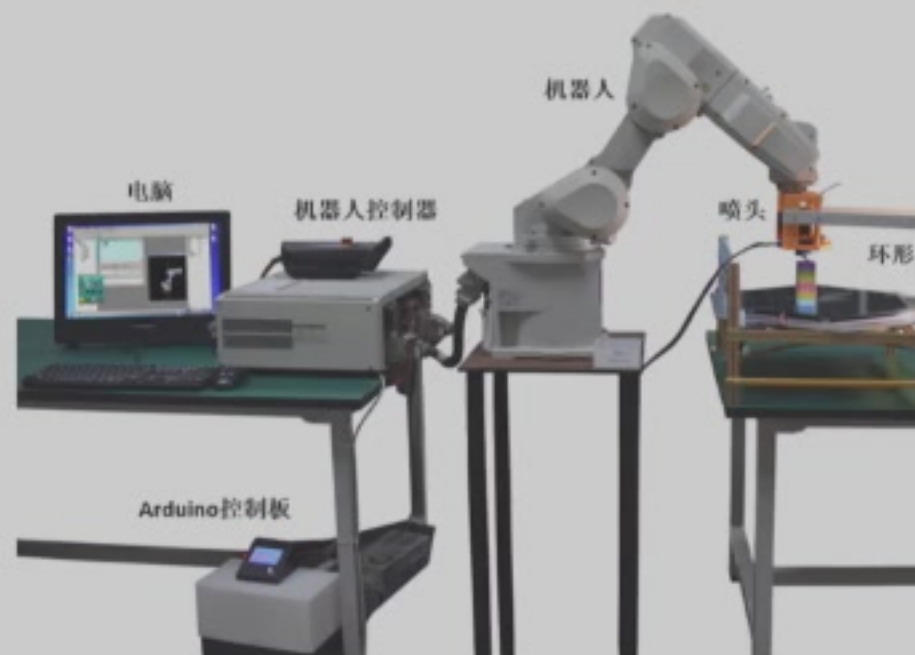
■ 按照运动形式分类



Delta型3D打印机



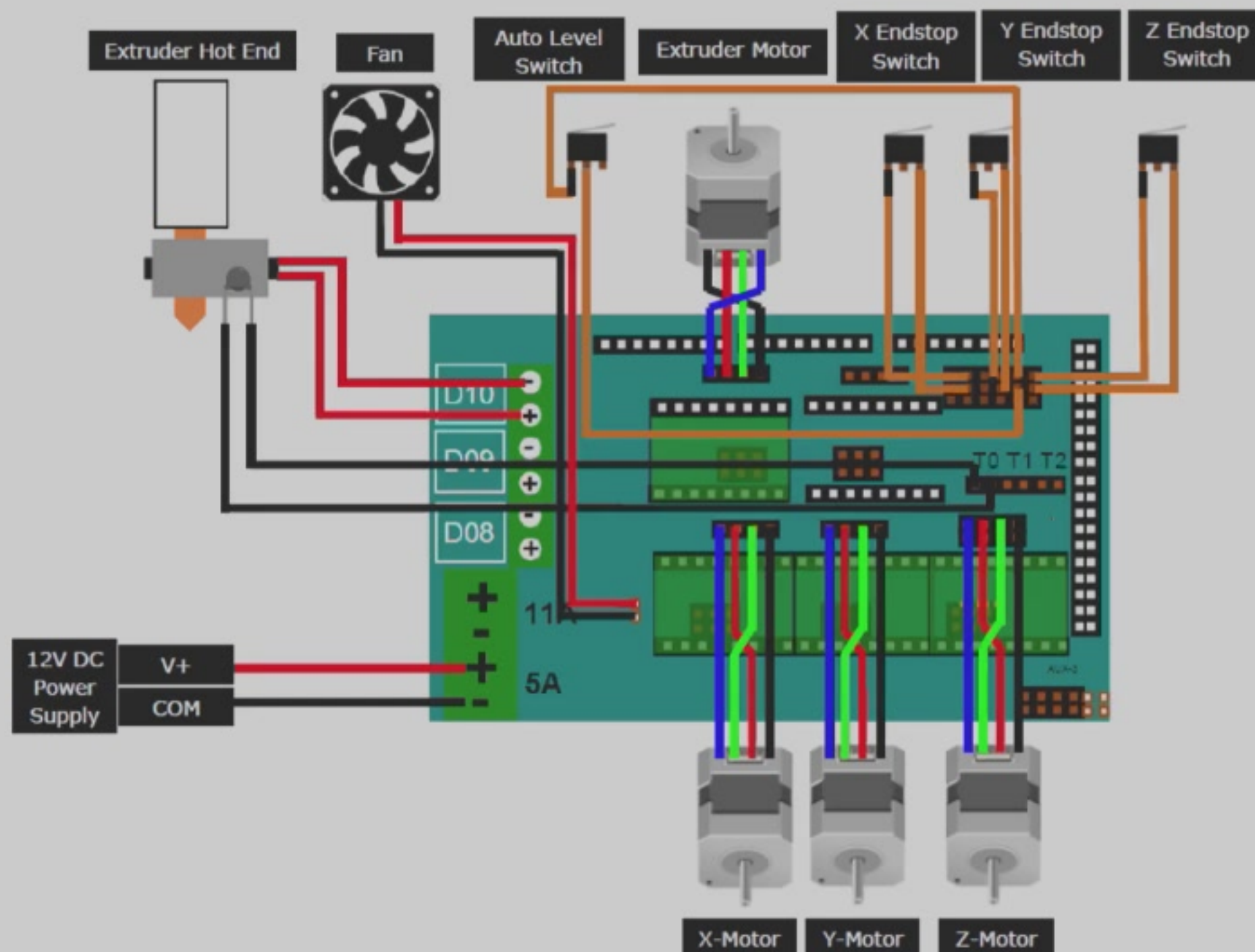
直角坐标3D打印机



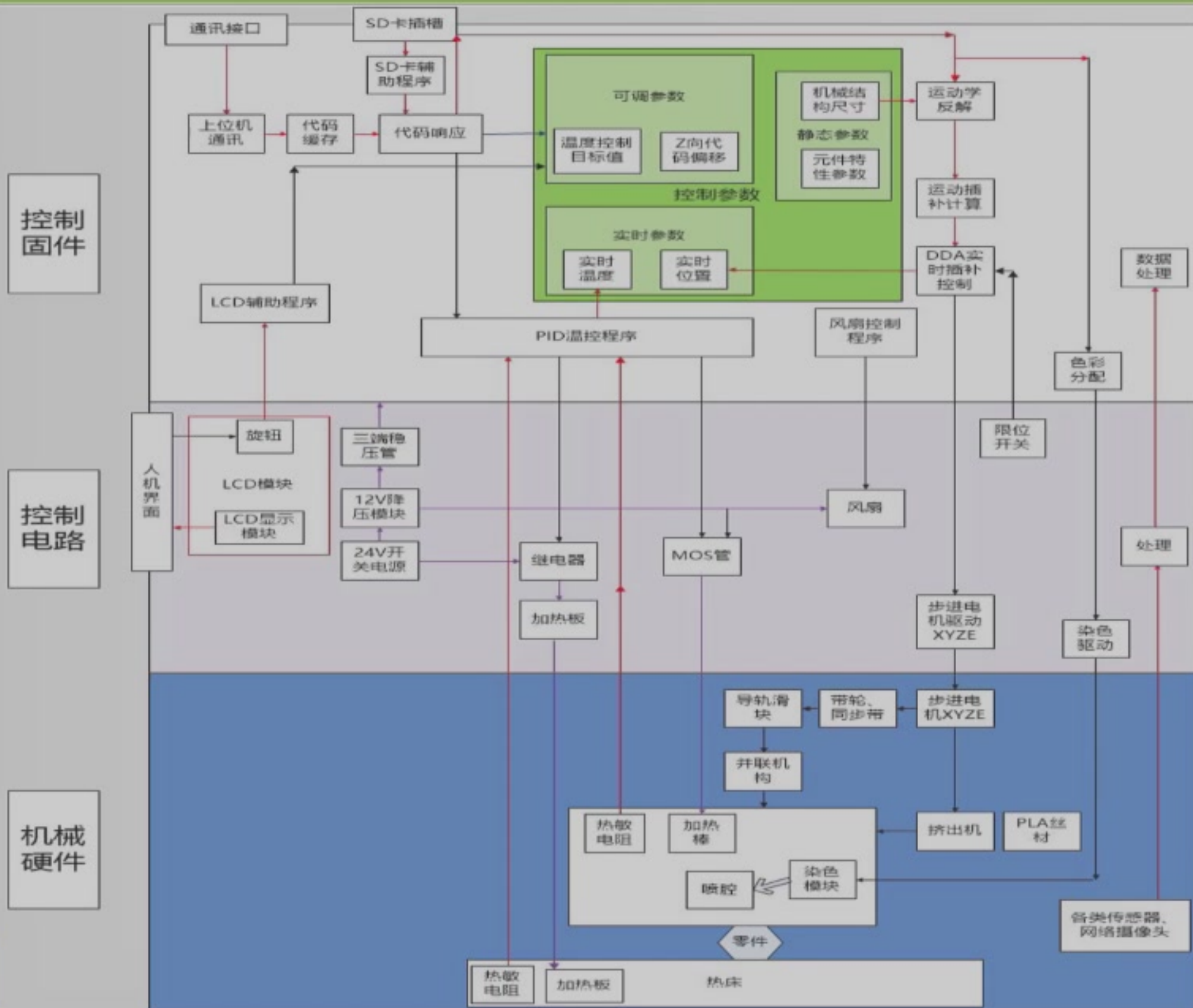
关节臂3D打印机



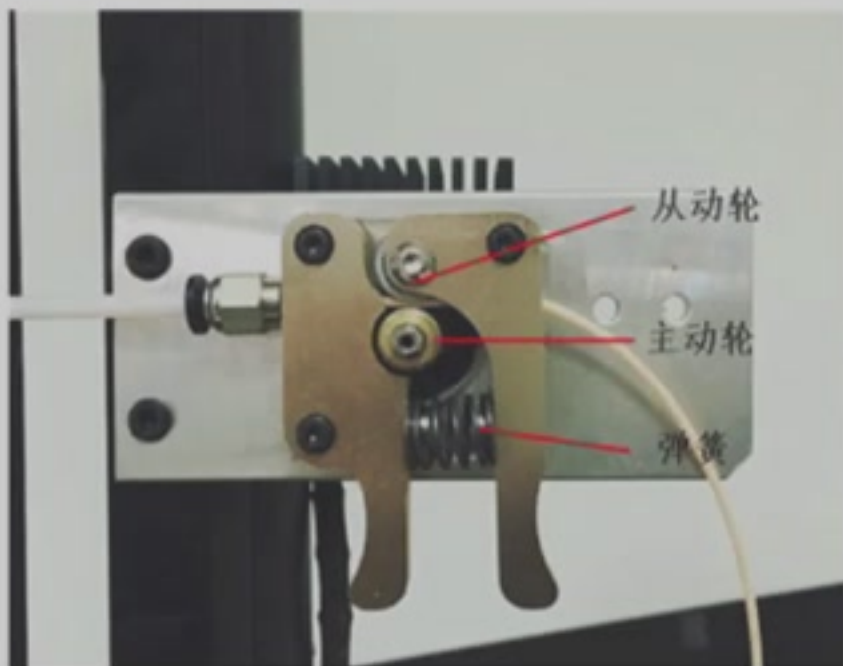
控制 系统 硬件 架构



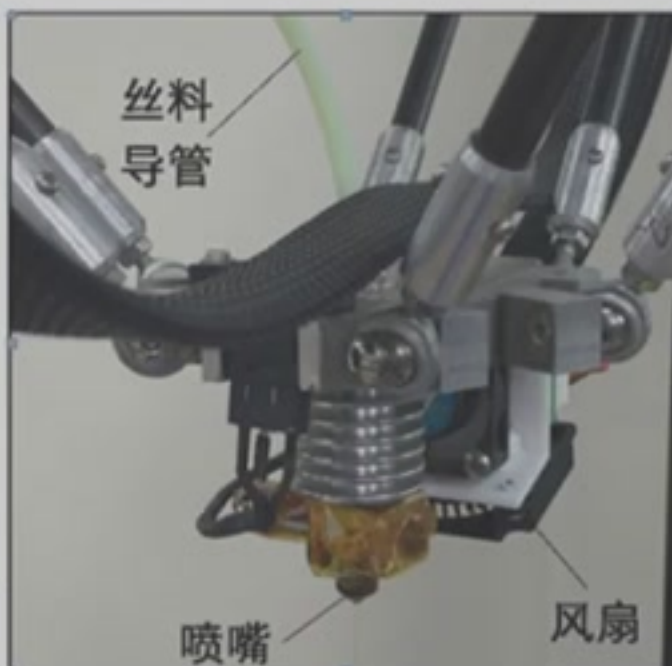
控制系统 硬件架构



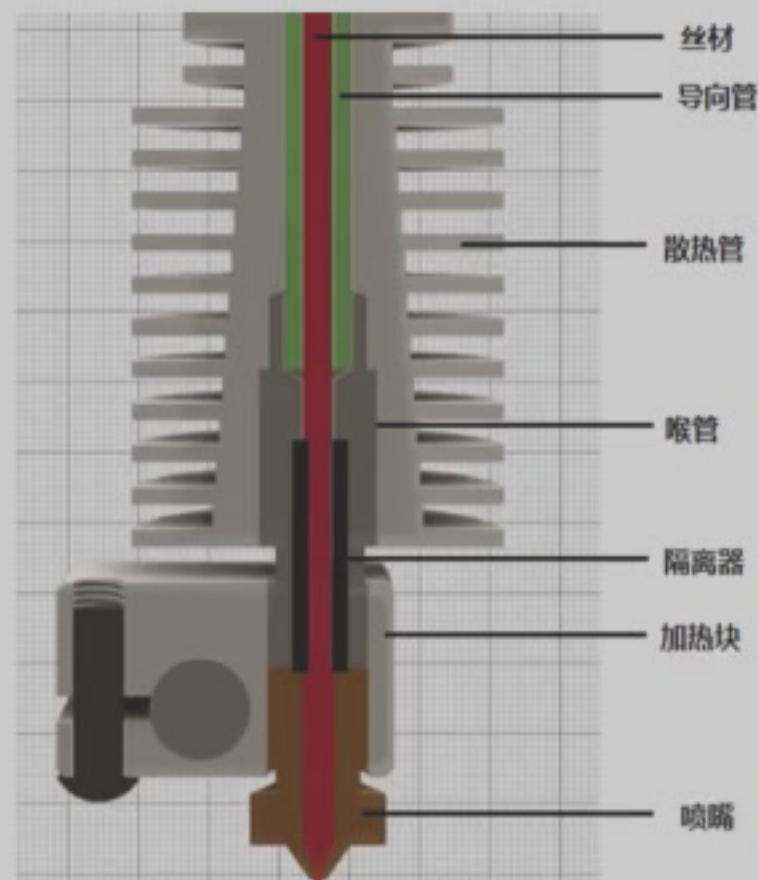
■ 挤出喷头结构



送丝机构



挤出喷头组成

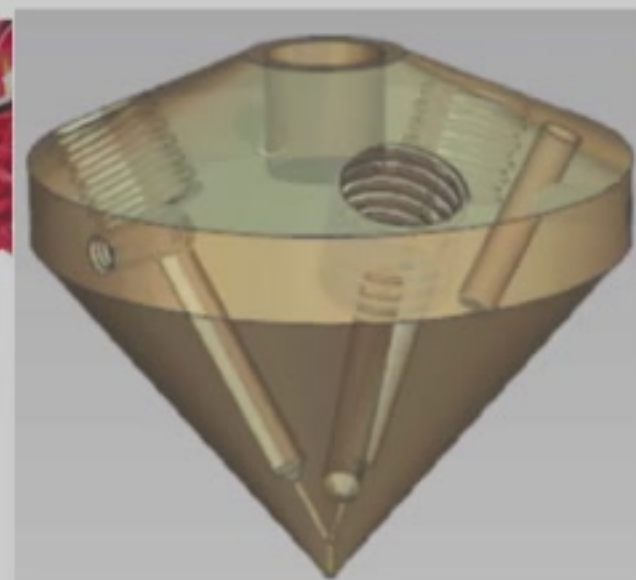
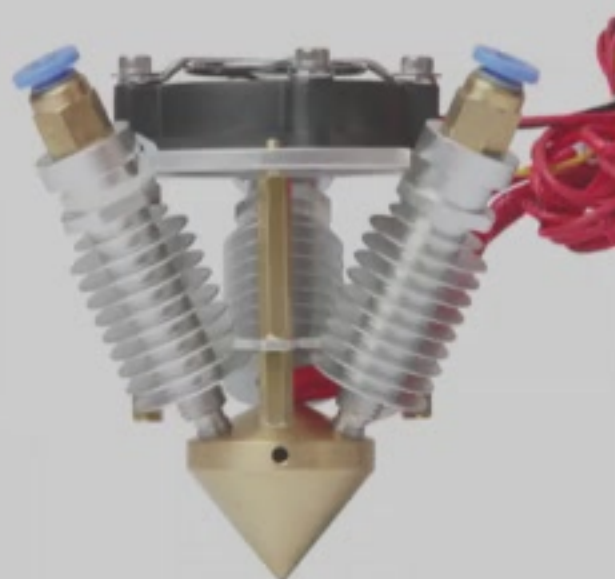


挤出喷头组成剖视图

■ 创新式FDM打印装备平台——混色3D打印机



多色3D打印机



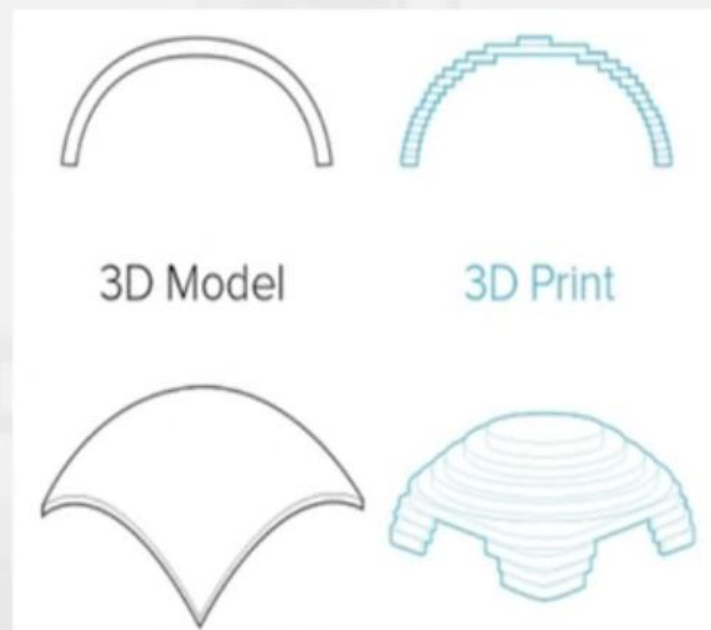
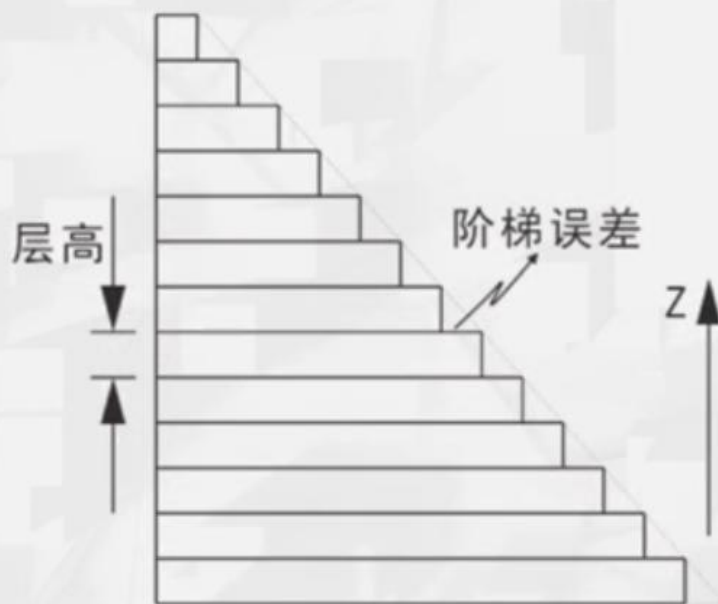
混色打印喷头



混色（多色）打印案例

·FDM工艺的台阶效应

- 模型分层是3D打印作为增材制造的核心技术，即沿Z轴方向将模型切片成一系列的二维轮廓，由于是用**一系列层片逼近模型**，打印的实体和理论模型之间总有一定的误差，选用的层高越大则带来的阶梯误差越大。减小层高可以缓解台阶效应，但会大大增加打印需要时间。
- 台阶效应也影响了零件表面的光洁度，是打印件表面粗糙度的主要来源之一。



·FDM工艺的后处理方法

·打磨抛光法

- 先用粗砂纸打磨打印件表面，将纹路打磨均匀；
- 80°C水浴加热（PLA制品）五分钟；
- 用细水砂纸继续打磨至表面平滑；
- 喷涂抛光剂然后用布来回打磨，直到表面光泽。



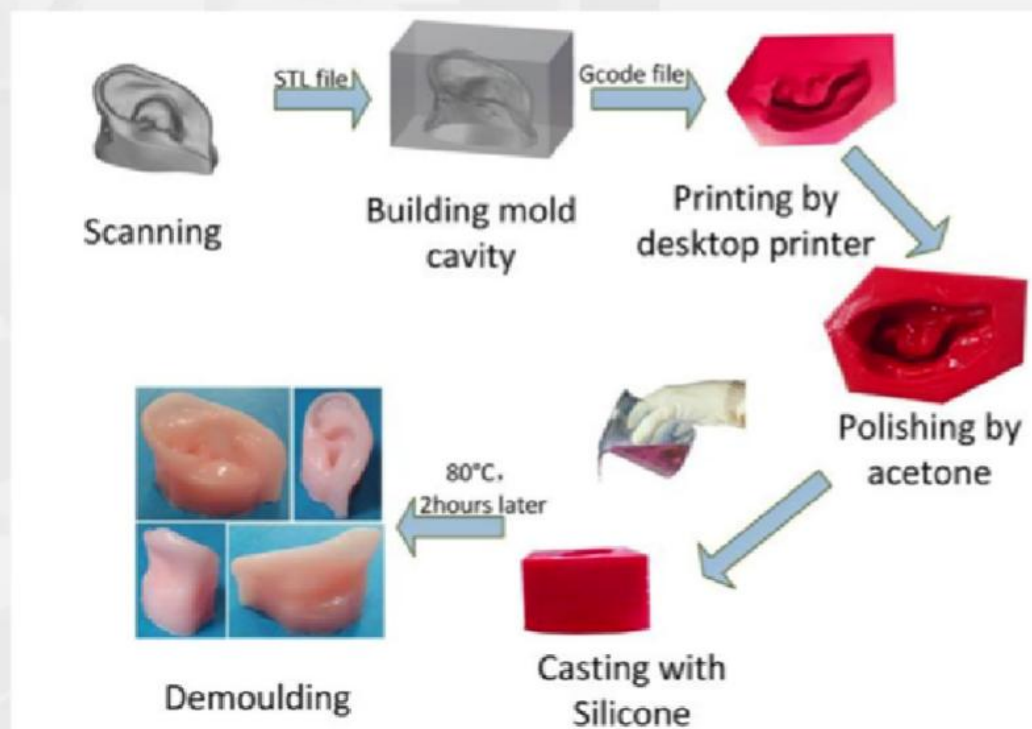
PLA后处理对比：

左为处理前，右为经过打磨抛光处理

·FDM工艺的后处理方法

·丙酮熏蒸法

➤ 利用ABS材料溶于丙酮的特性，通过丙酮蒸汽熏蒸ABS打印模型来实现抛光



丙酮熏蒸装置

Source: He Y , Xue G H , Fu J Z . Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer[J]. Scientific Reports, 2014, 4(6973):1-7.

·FDM工艺常见缺陷及解决方法

➤ 缺陷



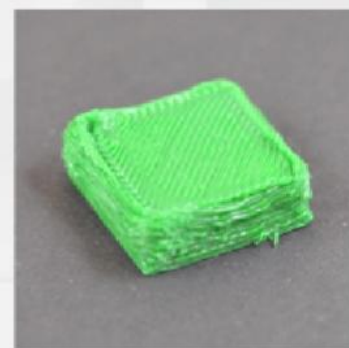
首层过低



不黏底板



填充空隙过大



材料外溢

➤ 诱因

由于首层过低导致喷头与底板太近，丝材难以被挤出。

第一层无法与底板粘结

挤出量不足导致路径之间不紧密

丝材挤出量过多导致边缘溢出

➤ 措施

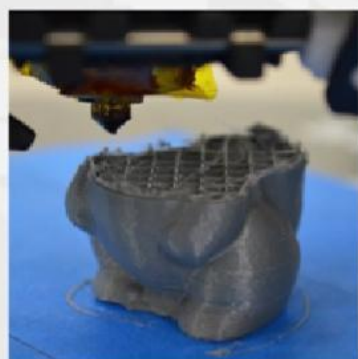
调整第一层打印高度（Z轴高度）

- 1、调低第一层高度
- 2、调整底板温度
- 3、底板涂抹固体胶

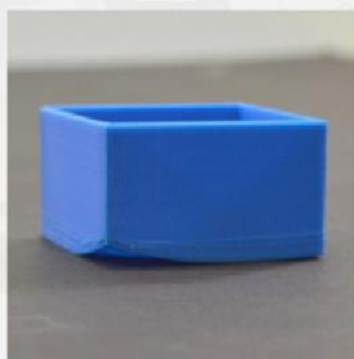
- 1、调挤出进给倍率
- 2、检查配置参数

- 1、调挤出进给倍率
- 2、检查参数

·FDM工艺常见缺陷及解决方法



丝材不挤出



翘曲



拉丝



坍塌

➤ 缺陷

➤ 诱因

可能是未送丝
或送丝受阻

挤出冷却后热应力
导致模型变形翘曲

喷嘴仍有残余熔融
材料，长距离运动
过程中产生拉丝

挤出材料未及时冷
却至固态，仍有流
动性，导致变形

➤ 措施

- 1、检查喷嘴
- 2、丝材是否耗尽
- 3、挤出机是否正常

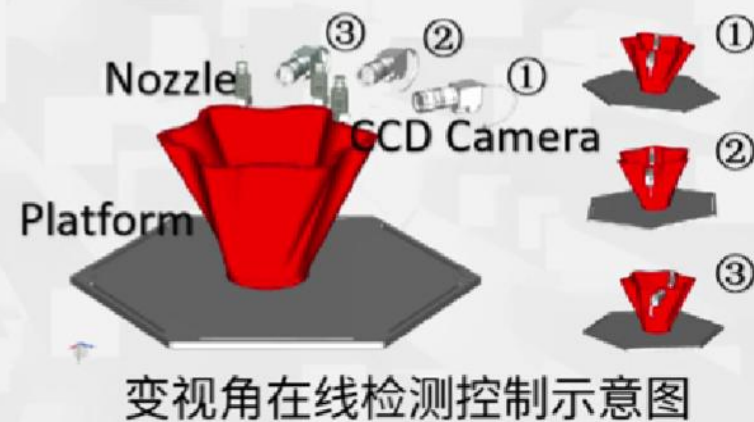
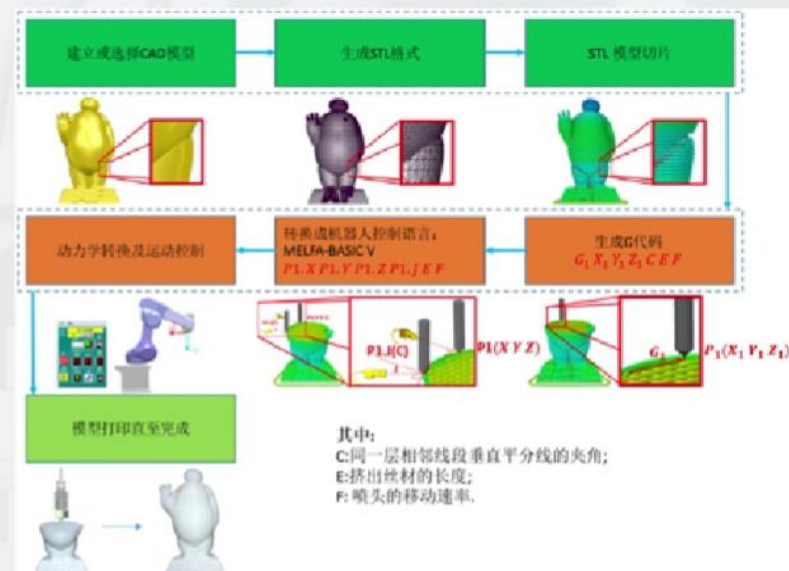
- 1、底板加温降低温差
- 2、底板涂抹固体胶
- 3、首层打印Brim
- 4、低层关闭风扇

- 1、调整丝材回抽参数
- 2、提高冷却风扇速率
- 3、降低打印温度

- 1、降低打印温度
- 2、提高冷却风速

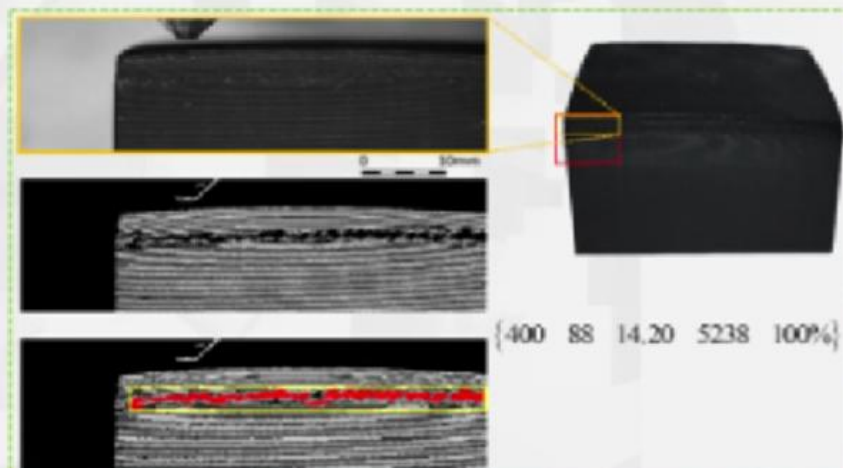
·打印过程中的缺陷检测方法——基于**机器视觉**的方法

·打印检测一体化硬件平台

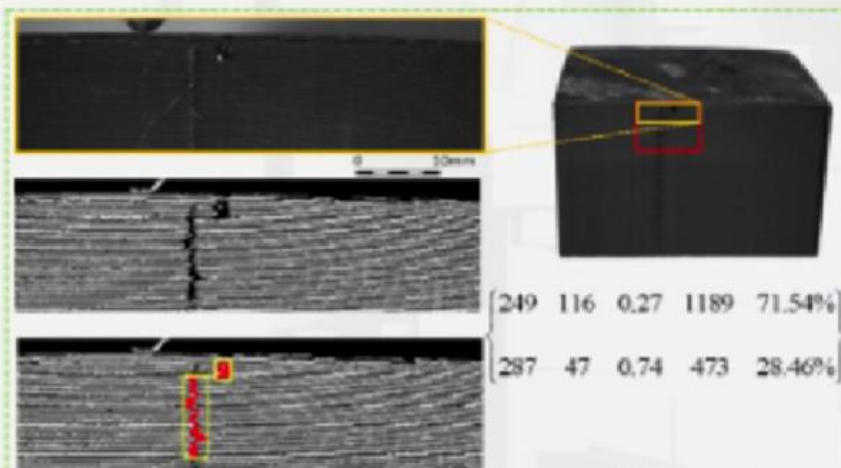


·打印过程中的缺陷检测方法——基于**机器视觉**的方法

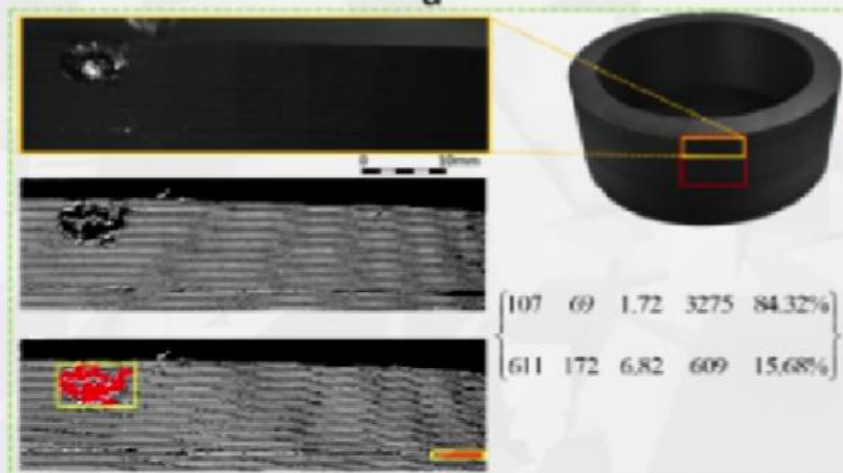
·表面质量检测实例



a



b

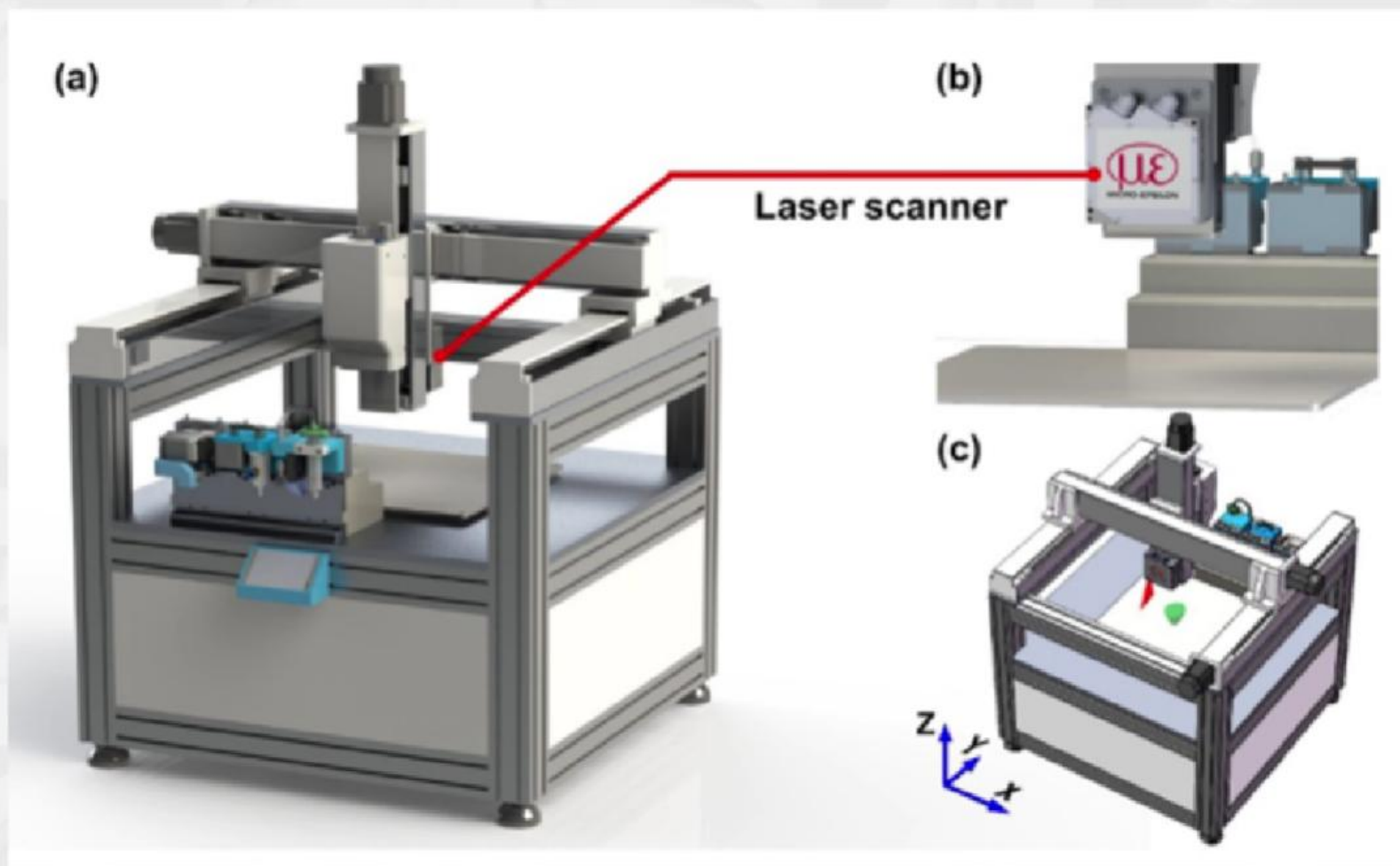


c

NO.	Process	Parameter	Numerical value
1	Slicing in CAM system	Thickness of layer	0.3mm
2	preprocessing	Rectangle mask size	Width:3%*L_max, Height:2*H_max
3	Defects identification	Rectangle kernel size	50 * 3
4		Square kernel size	5 * 5
5		Upper threshold value	25% of the maximum contour area
6	Analysis of defects contours	Lower threshold value	Rectangle 150(50*3) Square 75 (5*5*3)
7		Threshold value of relative position	X direction:5 Y direction:5

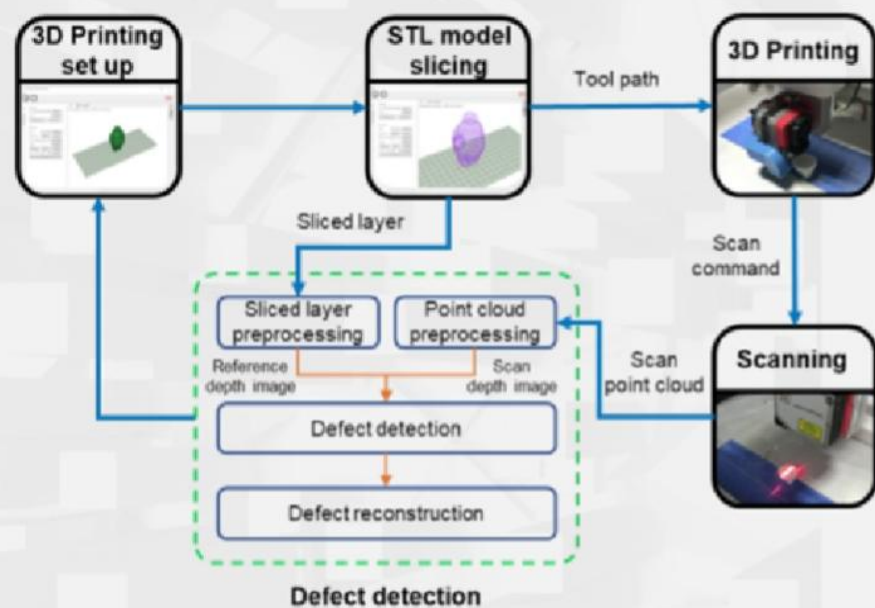
d

·打印过程中的缺陷检测方法——基于**激光扫描**的方法



3D打印在线检测平台

·打印过程中的缺陷检测方法——基于激光扫描的方法



▲ 缺陷检测流程

▼ 点云/模型比对

