

陶瓷注射成型工艺

刘敏

中科大材料科学与工程系

Email: liumin1106@ustc.edu.cn

Tel: 0551-63607330

<http://mp.weixin.qq.com/s/kgjECOm4zcHTFz0rBh0vs>

g

陶瓷注射成型历史

1878 年，注射成型（Injection Molding）首先被用于塑料的成型和金属模的浇注。陶瓷注射成型技术便是在该技术的基础上移植过来的，其首次报导见于 1937 年火花塞绝缘子的制造。德国在 1939 年、美国在 1948 年先后将其用于陶瓷制品的成型，日本也于 1960 年采用这种工艺成型氧化铝陶瓷，在上个世纪 70 年代末，由于石油能源危机的出现，伴随着陶瓷发动机的制造，陶瓷的成型工艺成为重要的研究课题。注射成型工艺由于其可成型复杂形状的制品、尺寸精度高、

生物陶瓷（ ZrO_2 牙齿）、
透明陶瓷（2000 后）、
手机陶瓷盖板（2010 后）

一、陶瓷注射成型定义

陶瓷的注射成型 (Ceramic Injection Molding, 简称CIM) 是在比较成熟的聚合物注射成型技术的基础上发展而来的。即利用塑性材料在压力下的注射成型原理的一种成型原理。在成型过程中需要将热塑性材料混合在一起。

多学科工艺技术的集成和创新：

聚合物化学、陶瓷粉体与工艺学、
机械模具制造、塑料注射成型。

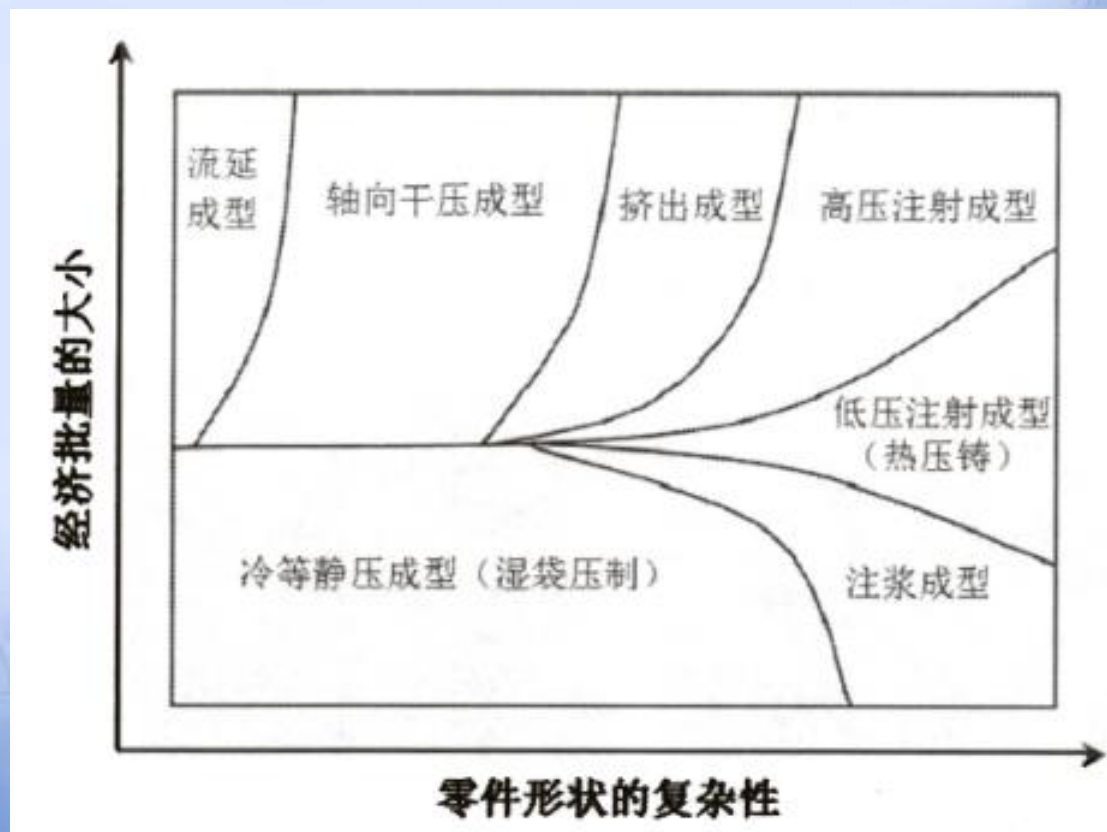
二、陶瓷注射成型特点——优点

- **生坯密度均匀**-----流动充模
- **尺寸精确可控**：由于高压注射，使得混料中粉末含量大幅提高，减少烧结产品的收缩，使，公差可达 $\pm 0.1\% \sim 0.2\%$ ；
- **成本相对较低**：无须机械加工或只需微量加工；
- 可自动化批量生产
- 可成型复杂形状的，带有横孔、斜孔、凹凸面、螺纹、薄壁、难以切削加工的陶瓷异形件。

陶瓷注射成型特点——缺点

- **因需要缓慢的排胶脱蜡过程，生产周期较长**

二、陶瓷注射成型优点



不同陶瓷成型工艺对应的零件复杂性和经济批量范围

三、应用

美国, 欧洲和日本的PIM产业发展比较成熟, 而韩国、新加坡、中国、中国台湾地区、印度等地正蓄势待发。

- 瑞士三分之一的**手表表壳**采用CIM技术生产, 材料是称永不磨损的**氧化锆陶瓷材料**。
- 日本已将内孔直径为0.015mm的**氧化锆光纤接头**实现产业化, 每年垄断了全球数亿美元的市场
- 美国已实现**氧化锆理发推剪**的生产和发动机中**氮化硅零部件**的应用
- 中南工业大学粉末冶金国家重点实验室开发出精密双螺旋混练机陶瓷内衬和具有双螺纹的陶瓷喷嘴等;
- 华中科技大学材料学院应用CIM技术成功开发出**氧化锆氧传感器**。

CIM商业化的陶瓷材料

结构陶瓷：
 ZrO_2 , Al_2O_3 , SiC
 Si_3N_4 , AlN 等



各种压电陶瓷



CIM

生物陶瓷：
 ZrO_2 , Al_2O_3 等



透明陶瓷



医疗器械用氧化锆陶瓷CIM



陶瓷钻头



陶瓷手术刀

1350 HV硬度

1200MPa弯曲强度

注射成型氧化锆陶瓷钻头是极其锋利，甚至使用数百次后的切削刃不会变钝，而传统的钢钻头使用20次后就开始变钝。



牙科陶瓷种植体

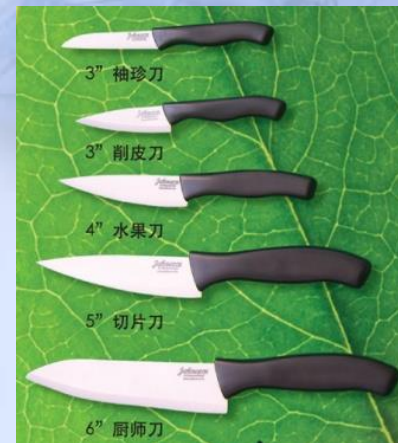
三、应用



斜口钳



推剪



刀片



阀门



阀门

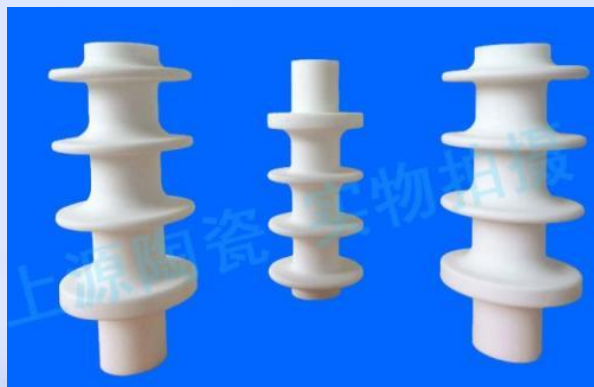
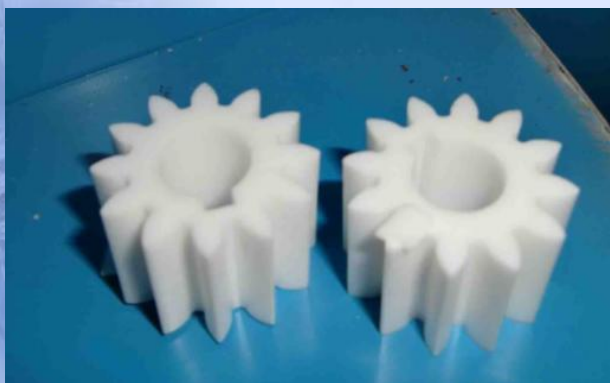


涡轮/叶轮

三、应用



轴类/轴承类/轴承套



齿轮

三、应用



手表配件

表盘/手表配件



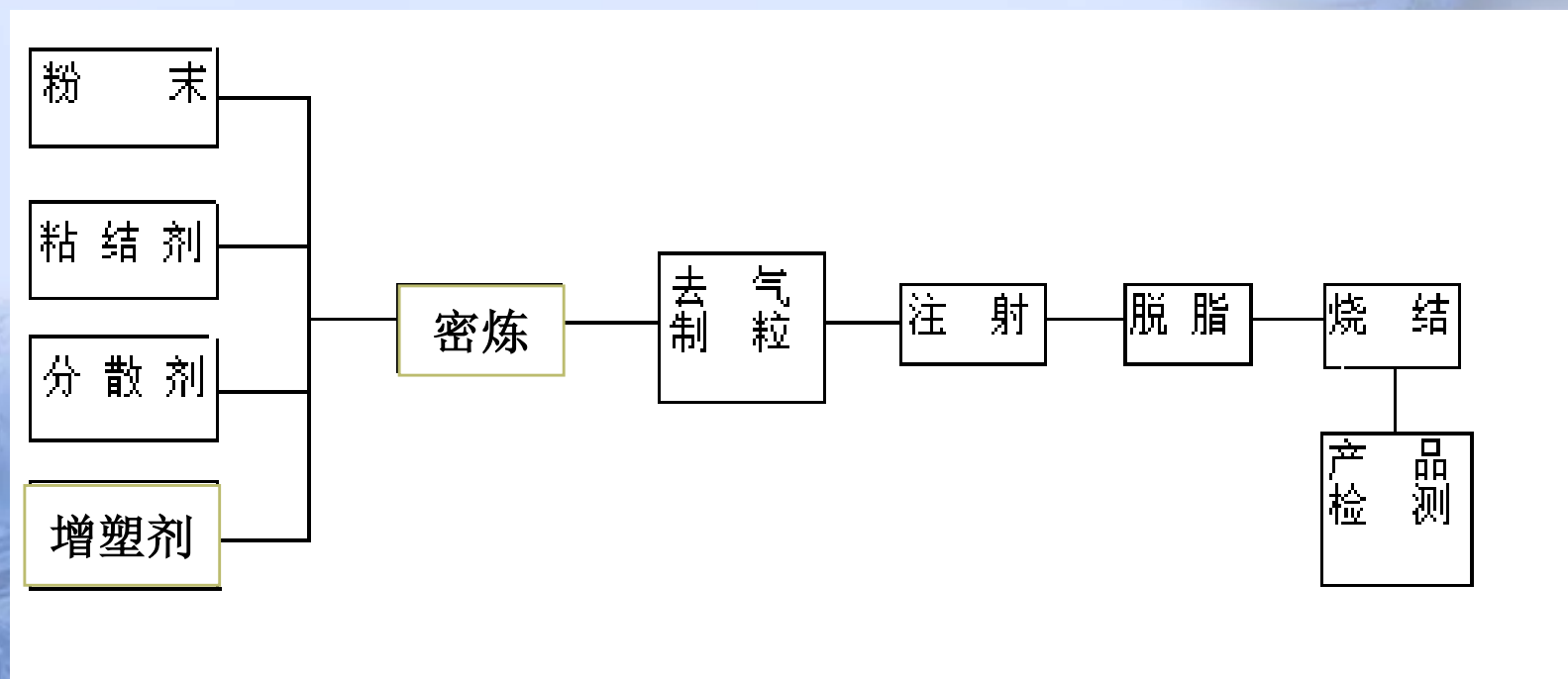
线嘴/喷嘴



纺织配件

强大的生命力，如光纤通讯上光纤连接器用的陶瓷插针（外径 1.25 mm，内孔仅 125 μm ，长 10 mm），目前只有采用注射成型技术才能制造。另外，应用愈来愈多的生物陶瓷产品，如陶瓷牙齿、种植牙陶瓷螺杆和牙齿正畸用陶瓷托槽等，这些产品尺寸小、形状复杂，要求精度高，也只能采用注射成型技术才能满足要求。

四、陶瓷粉末注射成型基本工艺流程图



五、陶瓷注射成型的几个关键技术

1. 有机粘结剂体系选择与密炼技术

- 1、粉末与粘结剂的相容性及剪切分散性好（消除团聚）
- 2、喂料良好流动性（充模完整）
- 3、坯体强度高，尺寸稳定性好（维形性好）

2. 模具制造与注射充模成型过程的控制

- 1、模具的合理设计与加工（浇口、流道、精度、材质等）
- 2、注射参数的设定与优化（温度、压力、模温）
- 3、充模过程排气与坯体应力

3. 高效安全的脱脂技术

- 1、热脱脂（直接加热）
- 2、溶剂脱脂（有机溶剂、油、水萃取脱脂）
- 3、催化脱脂（硝酸、草酸）

4. 避免污染

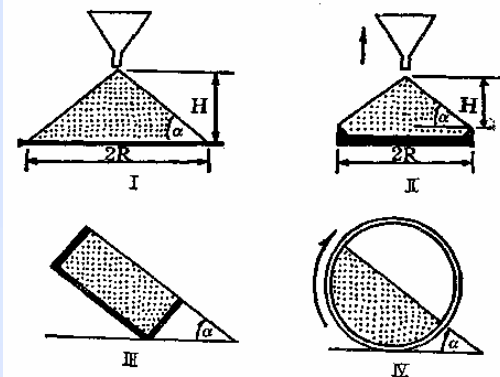
密炼、注射、脱脂过程中铁质或其他杂质的引入

1. 陶瓷注射成型对粉体要求

- **颗粒为球形**-----流动性和高松装密度；
- **粒径较小，一般小于 $1\mu\text{m}$** -----小颗粒烧结活性高，降低烧结温度，利于制备更小产品；但是制备难度增加，喂料粘度增加，装载量降低，易团聚；用平均粒径为 $0.4\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 粉体制得了最小结构尺寸仅为 $5\mu\text{m}$ 的微零件
- **不结块团聚**；
- **颗粒大小适当级配**，见下图；
- **颗粒间适度的摩擦力，一般安息角大于 55°** -----摩擦力太大，对流动性和松装密度不利；太小脱脂过程中坯体容易坍塌，形状难以维持。

表 2.1 球形粉末不同分布对最大堆垛百分数的影响

颗粒尺寸	比例 (wt%)	最大堆垛百分数 $\Phi/\%$
d	100	64
d, d/7	85,15	86
d, d/7, d/49	75,14,11	95
d, d/7, d/49, d/343	75,14,10,1	98



测定休止角的四种基本方法

2. 粘结剂需具备条件

粘结剂是粉末注射成型技术中的核心和关键

粘结剂是陶瓷注射成型技术的核心，它使粉末均匀装填成所需要形状并且使这种形状一直保持到烧结开始。粘结剂不决定最终的化学成分，但是它会直接影响工艺能否成功。粘结剂的类型、组成直接影响到喂料的流动性、模腔充填性、粉末装载量的高低、注射坯的强度、注射坯的质量、粘结剂脱除效率等。因此，对粘结剂的选择就显得十分重要。人们围绕改善喂料流变性能、减少脱脂变形和缩短脱脂时间等方面对粘结剂进行了较为深入的研究。目前，常见的粘结剂有蜡基、聚乙二醇基和聚甲醛基粘结剂体系。

2、粘结剂需具备条件

粘结剂是粉末注射成型技术中的核心和关键

- **适中的流动特性（粘度）**。a)太高，粉料不能在粘结剂中有效分散，不仅混练困难，而且很难得到混合均匀的坯料，容易产生成型缺陷；b)太低，粉体和粘结剂分层；c)另外粘度不能随温度的波动太大，否则会产生缺陷。
- **能够赋予生坯足够的强度**，使产品在烧结前和脱脂期间起到维持坯体形状的作用。
- **有较高的导热性和较低的热膨胀系数**。避免因热应力而产生缺陷，且可以减少坯体所受热冲击，减少缺陷。
- **无毒害，无污染，不挥发，不吸潮，循环加热性能不变化**。
- **能很好地润湿粉体**，并对粉体有效好的粘附作用。通常为了改善粘结剂的润湿性能，要加入一些表面活性物质，减少混合物的粘度，增加其流动性。--减少团聚和缩孔。
- **多组份**：实践证明，多组份比单一组成粘结剂的脱脂速度要快得多缺陷少得多。**多组份粘结剂的有机聚合物之间是相容的（？）**。
- **脱脂相对容易**。
- **不与粉体发生化学反应**。

2、粘结剂需具备条件

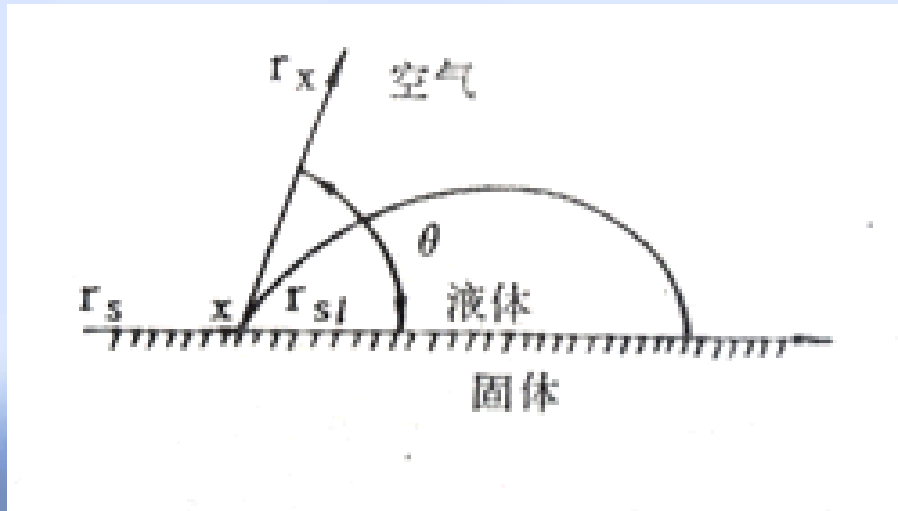
粘结剂体系由石蜡（PW）、高密度聚乙烯（HDPE）、邻苯

二甲酸二丁酯（DBP）、硬脂酸（SA）四种有机物构成。

石蜡的分子量小，软化温度点低，流动性好，与粉末有着良好的润湿性，因此，选择其作为粘结剂体系的基本组分。硬脂酸是一种受到国内外学者广泛关注的分散剂，分子的一端是带有羧基的极性端，另一端为油溶性的烃基，是陶瓷粉体良好的分散剂，其不仅可以在粘结剂和粉末颗粒之间起桥接作用，以防止两相分离，保证混料均匀，而且可以在粉末颗粒之间、粉末颗粒与模壁之间起到润滑作用，通常在工艺中表现出很好的成型性能。邻苯二甲酸二丁酯是一种良好的增塑剂，其稳定性、耐挠曲性、黏结性和防水性均优于其他增塑剂。高密度聚乙烯

脱脂时，保持坯体强度

何为很好地润湿粉体？



液滴在固体表面上的铺展是由固-气(r_s),固-液(r_{sl}),液-气(r_x)三个界面张力所决定的,其平衡关系如下:

$$r_s = r_{sl} + r_x \cos \theta$$

$$F = r_x \cos \theta = r_s - r_{sl}$$

式中, θ 是润湿角; F 是润湿张力

当 $\theta=0^\circ$ 时, 润湿张力 F 最大, 可以完全润湿, 即液体在固体表面上自由铺展;
当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 润湿效果随角度增加而变差;
当 $\theta \geq 90^\circ$ 时, 则因润湿张力小而基本不润湿;
当 $\theta=180^\circ$ 时表示完全不润湿。

多组分相容性——相容性定义？

些组分间应是互溶的。有机聚合物之间的相容性可用溶度参数值 $\Delta\delta$ 来衡量，一般认为有机物之间是的 $\Delta\delta$ 越小，相容性越好；谢志鹏研究认为 $\Delta\delta < 0.7$ 相容性好， $\Delta\delta > 1$ 不相容^[3]。

之间的高分子组元混合的过程实际上就是分子链之间相互扩散的过程。常用溶度参数 δ 来表征分子链间作用的大小，两组元的溶度参数差 $\Delta\delta$ 值越小，表明两相相容性越好^[15]。这四种有机物间的 $\Delta\delta$ 计算数值如表 2.2:

表 2.2 有机载体间溶度参数差值 $\Delta\delta$

Table 2.2 Differences of solubility parameters between organic vehicle

	PW	SA	DBP
SA	0.07		
DBP	0.23	0.16	
HDPE	0.19	0.12	0.04

四种有机物
相容性好

谢志鹏，杨金龙，黄勇，陶瓷注射成型有机载体的选择及相容性研究，硅酸盐通报，1998, 3:8-12.

2、粘结剂

各种粘结剂体系的优缺点比较

体系	主要组元	优点	缺点
热塑性体系	石蜡、聚乙烯、聚丙烯	适用性和流动性好、易于成型、粉末装载量高、注射过程易控制	脱脂时间长、工艺较复杂
热固性体系	环氧树脂、苯酚树脂	注射坯的强度高、脱脂速度快	过程不易控制适用性差、缺陷多
凝胶体系	甲基纤维素、水、甘油、硼酸	有机物少、脱脂速度快	生坯强度低、脱脂困难
水溶性体系	纤维素醚、琼脂	脱脂速度快	粉末装载量小

2、粘结剂

热塑性体系

□ **热塑性体系**：在粘结剂中引入了热塑性聚合物，加热时热塑性聚合物在链长方向上以单一基团重复排列而不交叉。粘度可通过聚合物分子量大小，分布以及成型温度来调节。常见的有：

石蜡（PW）、聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、无规聚丙烯（APP）、聚苯乙烯（PS）、聚甲基丙烯酸酯（PMMA）、乙烯醋酸乙烯酯共聚物（EVA）、乙烯丙烯酸乙酯共聚物（EEA）。

□ 为提高固相装载量，一般引入**增塑剂，润湿剂和表面活性剂等**，如邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二辛酯、硬脂酸、辛酸、微晶石蜡、钛酸酯、硅烷。

热塑性体系流动性较好，并能通过选择其分子量大小和分布来调节脱脂阶段的热降解性，故得到广泛应用。

2、粘结剂

常见的粘结剂组成

粉末	粘结剂组成	体系
Si_3N_4	PW+EVA+PP+PE+SA PW+PP+SA	热塑性
ZrO_2	PW+EVA+SA	热塑性
Al_2O_3	PW+PP+SA	热塑性
$\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$	PW+SA	热塑性

3. 混料练泥过程影响因素

- **练泥温度**: a)温度过低, 喂料不均匀混合, 还可能导致在喂料中夹入气体, 带入注射成型生坯中产生孔隙; b)温度过高, 会出现冒烟现象, 而且喂料表面易出现褶皱和小裂纹, 因为温度太高会引起粘结剂中低分子量成分的挥发, 恶化粘结剂性能并导致粉末同粘结剂的分离。
- **练泥机转速**: a)练泥时因螺杆转速太快而引起高的剪切力会导致喂料中练泥机磨损而引入杂质, b)转速太慢则不能产生适当的剪切力而造成粘结剂粘度太低, 使得混炼均匀变得很困难, 从而引发后续的缺陷。---转速同喂料匹配, 使喂料在粘度适当的条件下进行混炼。
- **练泥时间**: 时间过短或长, 练泥混合效率都不好。

起主要作用的是**混合速率、温度和时间**。但如果混合速度和温度太低, 无论多长时间混料也无法均匀, 因混料将在不均匀的水平上达到平衡, 即存在一临界剪切状态【16】-江苏工业大学。

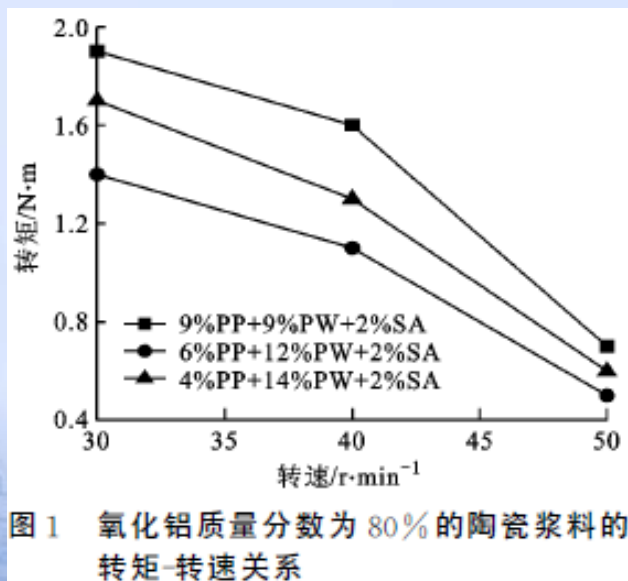
3. 混料练泥

- CIM的流变学问题主要就是混料粘度的评价表征问题。PIM工艺涉及到的物料体系和状态，可能是纯粘性的，也可能是粘弹性、粘塑性的，故变形的流动过程很复杂，可能既有瞬时变形，也有对时间依存关系的变形（蠕变）。

3. 混料

1、喂料的流变特性

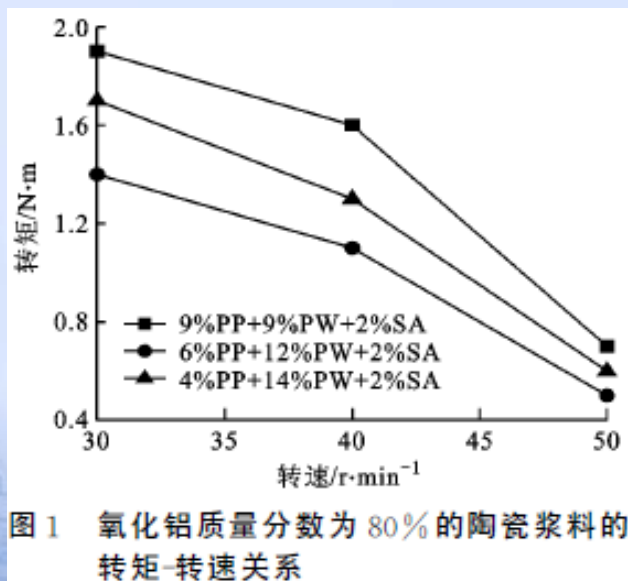
在注射成型工艺中，黏结剂的作用是使成型浆料具备一定的热塑性和流变特性。一般注射浆料为假塑性流体，随着剪切力的增大黏度减小，具有剪切稀化的特点，可通过调整剪切速率来改善浆料的流动性，从而满足注射成型的要求。



3. 混料

1、喂料的流变特性

在注射成型工艺中，黏结剂的作用是使成型浆料具备一定的热塑性和流变特性。一般注射浆料为假塑性流体，随着剪切力的增大黏度减小，具有剪切稀化的特点，可通过调整剪切速率来改善浆料的流动性，从而满足注射成型的要求。



4. 注射成型

成型工艺参数一般包括

- a)注射温度;
- b)注射压力;
- c)注射速度;
- d)保压压力;
- e)保压冷却时间;
- f)模具温度等。

5.脱脂工艺

- 与配料、成型、烧结及陶瓷部件的后加工过程相比，脱脂是注射成型中最困难和最重要的因素。
- 脱脂过程不正确的工艺方式和参数使产品收缩不一致，导致变形、开裂、应力和夹杂。
- 脱脂对其后烧结也很重要，在脱脂过程中产生的裂纹和变形不能通过烧结来弥补。
- 粘结剂决定脱脂方式。

5.脱脂技术及应用情况

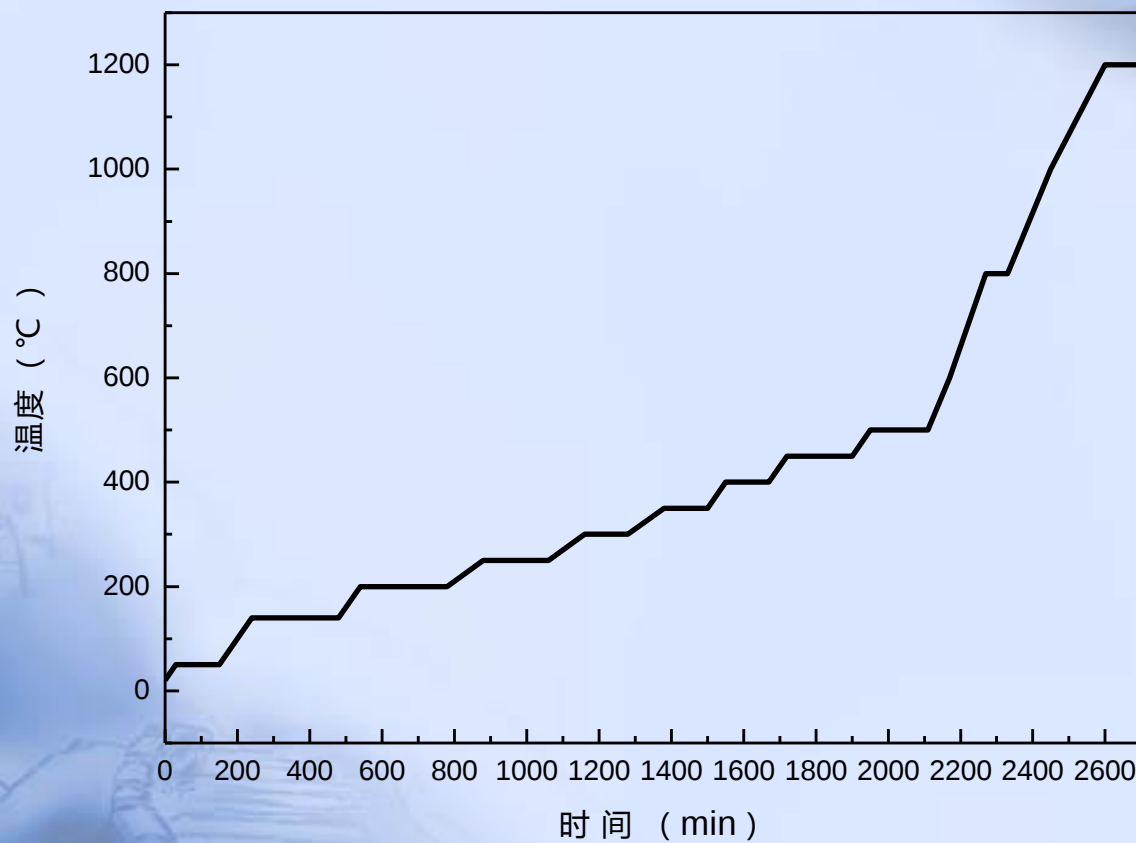
目前的脱脂工艺除了传统的热脱脂、溶剂脱脂外，还有最近几年发展起来的催化脱脂以及水基萃取脱脂。

脱脂技术应用分布来看：

- 1、日本、中国等亚洲国家主要以热脱脂和有机溶剂萃取脱脂工艺的应用为多。如日本京瓷、东芝陶瓷、国内大多数陶瓷粉末注射企业
- 2、德国、法国、英国、荷兰等欧洲国家以催化脱脂工艺的应用为多。主要采用德国巴斯夫喂料，如德国赛琅泰克、英国摩根、法国圣戈班、荷兰的公司
- 3、美国主要以有机溶剂脱脂与热脱脂工艺应用为多，例如知名陶瓷公司CoorsTec、Ceradyne

5.脱脂

热脱脂工艺曲线 - 效率较低



5.脱脂

溶剂脱脂

原理：溶剂脱脂首先是溶剂分子扩散进入CIM成型坯，然后粘结剂溶解于溶剂中形成粘结剂—溶剂溶体，粘结剂分子在成型坯内通过粘结剂—溶剂溶体扩散至成型坯表面，扩散到成型坯表面的粘结剂分子脱离成型坯进入溶剂溶液中。

优点：1) 效率高，脱脂时间短；2) 聚合物不溶解，脱脂时仍可保持坯体不变形；3) 化学萃取后，在坯体中形成连续通道，能适后续热脱脂过程缩短至数小时。

缺点：易产生溶胀现象，造成坯体开裂；某些有机溶剂有毒。

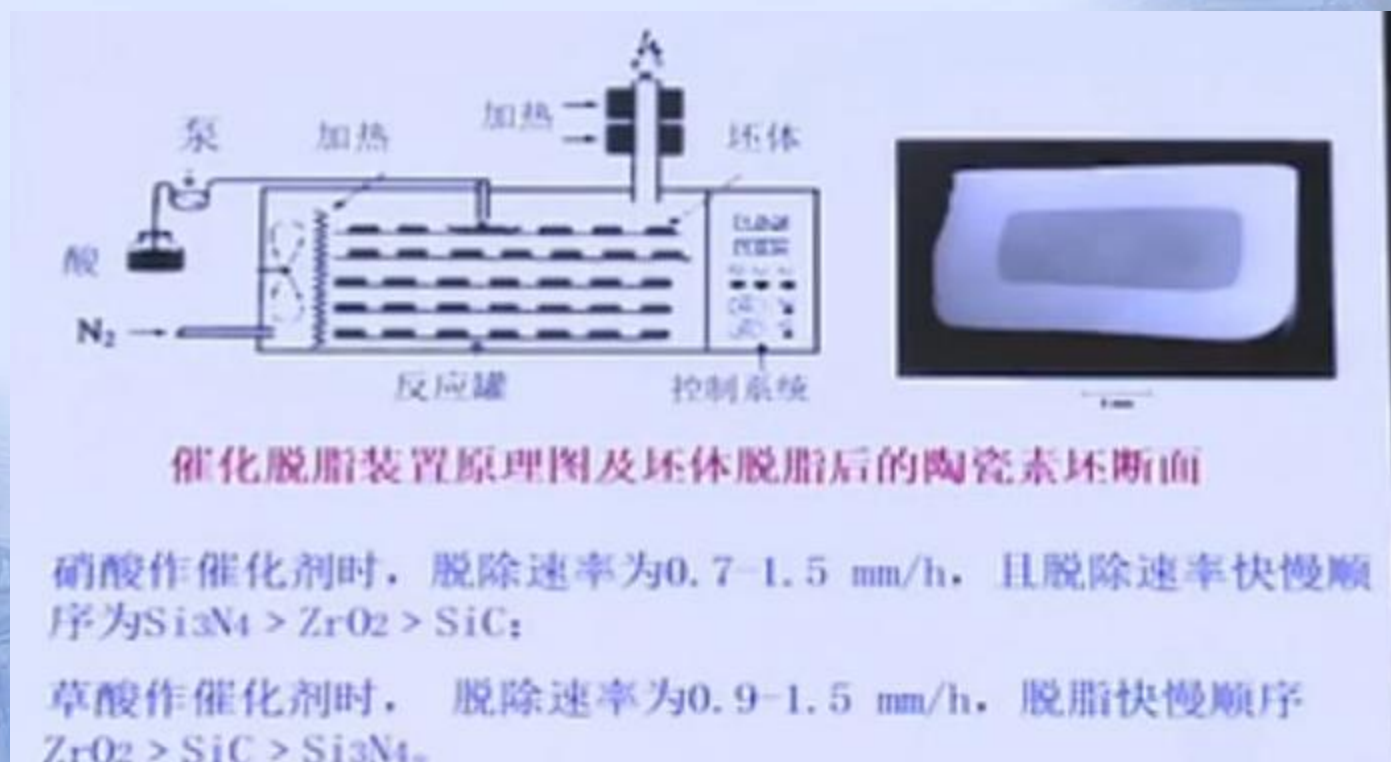
5.脱脂 催化脱脂（德国BASF公司开发）

- **粘结体系：**一般是由聚醛树脂和起稳定作用的添加剂组成
- **原理：**利用一种催化剂把有机载体分子分解为较小的可挥发的分子，这些分子比其他脱脂过程中的有机载体分子有较高的蒸汽压，能迅速地扩散出坯体。
- **特点：**直接气固反应，反应温度一般在110~150℃，低于聚甲醛树脂的熔点，防止液相生成。这样就避免了热脱脂过程中由于生成液相而导致生坯软化，或由于重力、内应力或粘性流动影响而产生的变形和缺陷。

优点：脱脂速度快，坯体变形和缺陷少，精度高、适合大尺寸产品

问题：特制的粘结剂，喂料制备难度大，国内CIM行业目前应用较少。

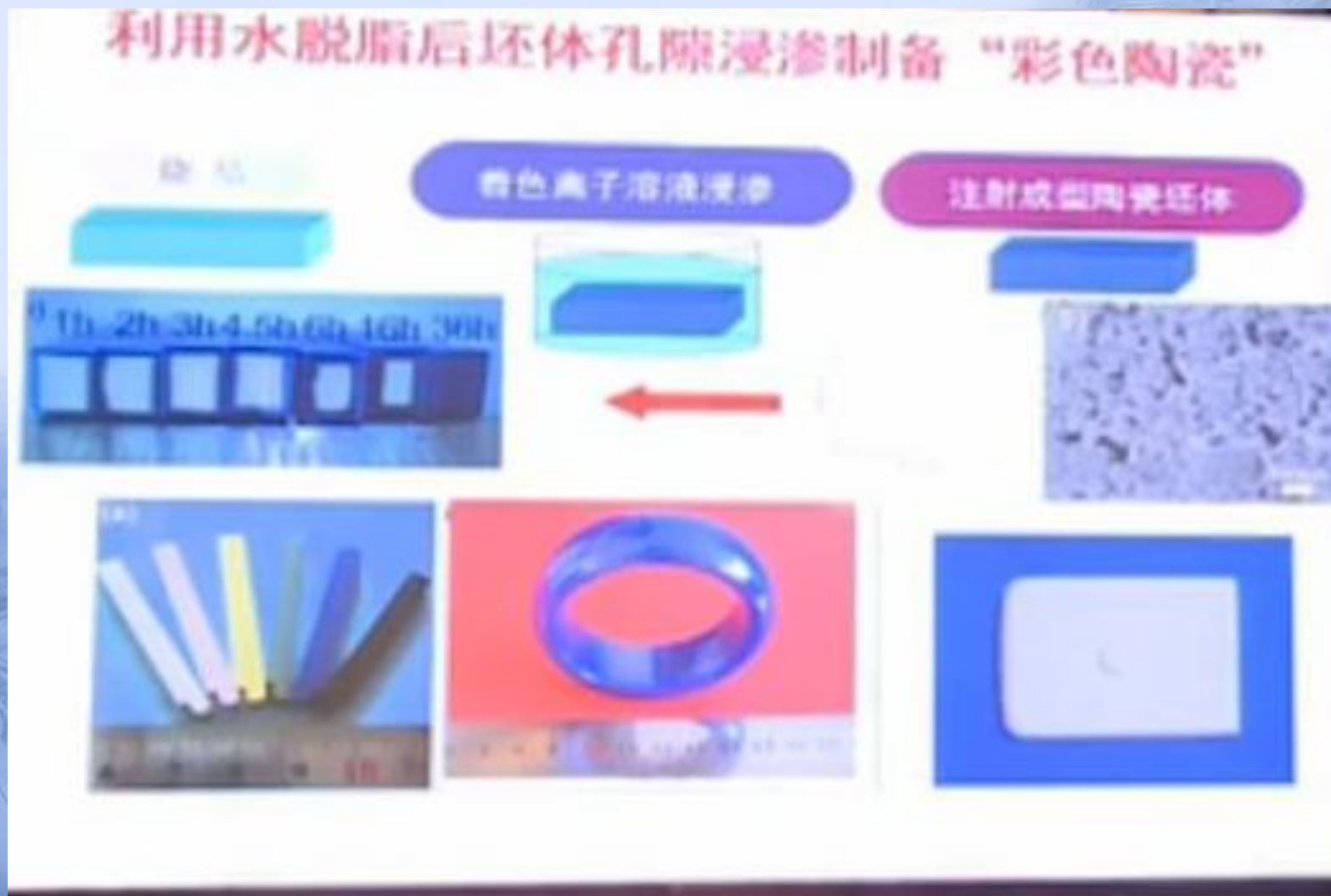
催化脱脂（德国BASF公司开发）



5.脱脂 水基萃取脱脂美国（TPT公司）

- 水基萃取脱脂是在萃取脱脂工艺的基础上，经过改进而发展起来的一种新型的脱脂方法。
- 粘结剂体系分为两部分：一部分是水溶性的，如聚乙二醇（PEG）、聚环氧乙烷（PEO）等；另一部分是不溶于水的，如聚乙烯醇缩丁醛（PVB）等。
- 脱脂也分为两个阶段进行：坯体浸于水，水溶性的粘结剂通过水的沥取（leaching）作用而被脱除，然后部分不溶于水的粘结剂可通过加热等方法进行脱除。这要求水溶性和不溶的两部分粘结剂在液态下能完全混溶，且混溶过程快，在不需要很多能量下30分钟内就可以完成，并形成均匀的异相溶液。坯体在40~60℃的水中脱脂，为控制沥取速度和水对坯体的影响，水要经过去离子处理或加入一些特殊的添加剂。一般在3小时之内就可把水溶性粘结剂脱完，
- 这时坯体内已形成连续的孔道，为不溶性粘结剂的脱脂提供便利的路径，一般热脱除时间为2小时左右。

5.脱脂 水基萃取脱脂美国（TPT公司）



5.脱脂

几种脱脂工艺的优缺点比较

脱脂工艺	优点	缺点
热脱脂	理论发展成熟、工艺简单、价格低、不需特殊设备	脱脂速率低、<1mm/h.仅适于小型器件、炉温控制困难、有缺陷
溶剂脱脂	效率高、脱脂时间短	工艺复杂、需特殊设备、且对环境和人体有害、有变形
催化脱脂	可将脱脂速率提高到1-2mm/h、适于壁厚器件、无变形	脱脂分解气体有毒、需特殊设备并进行酸化处理、投资高
水基萃取	安全可靠、操作工序简单并和环保要求相适应、脱脂速度快	粘结剂体系有限

仅限于小尺寸薄截面产品（通常在5mm以内）如陶瓷插芯和及小尺寸智能穿戴消费电子产品等；

仅限于小尺寸薄截面产品（通常在5mm以内）如陶瓷插芯和及小尺寸智能穿戴消费电子产品等；

适合大尺寸或厚截面陶瓷产品的制备：如陶瓷表面、陶瓷喷嘴、陶瓷轴承球、汽车装饰件等；但原料制备

面陶瓷产品制备，如陶瓷表面、齿轮、陶瓷杯等；手机及智能穿戴产品，其原料制备和脱脂成本较低，实用性较好；

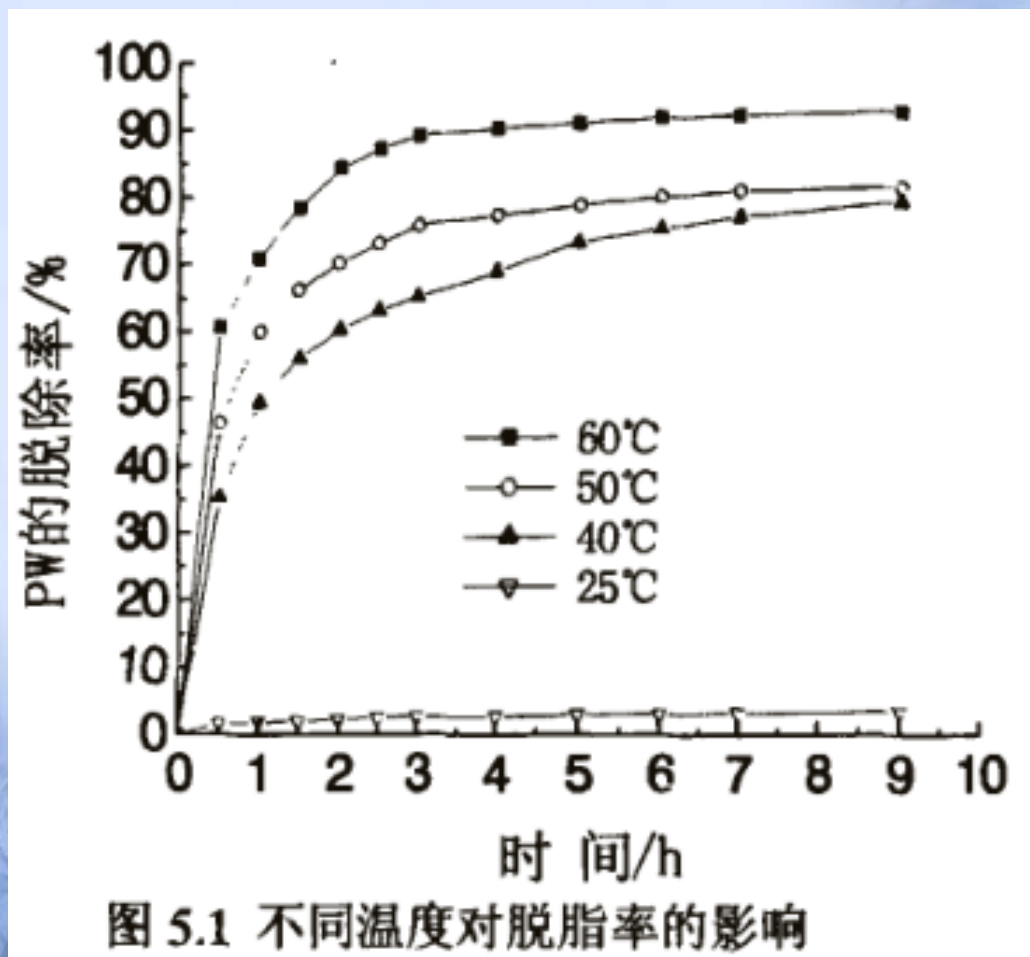
5. 脱脂过程影响因素分析

脱脂机理一般包括以下几个过程的组合^[30]：(1)低分子量聚合物的蒸发；(2)氧化分解；(3)高分子聚合物的热降解。由此可以看出，脱脂是与粘结剂联系在一起的。通常，粘结剂的性质决定了脱脂的方式。通常采用的脱脂方式一般基于加热、溶解和毛细提取的原理。目前的脱脂工艺除了传统的热脱脂、溶剂脱脂外，



化学脱脂+热脱脂

SiAlON 成型—温度对溶剂脱脂率的影响



SiAlON 成型—试样厚度对脱脂率的影响

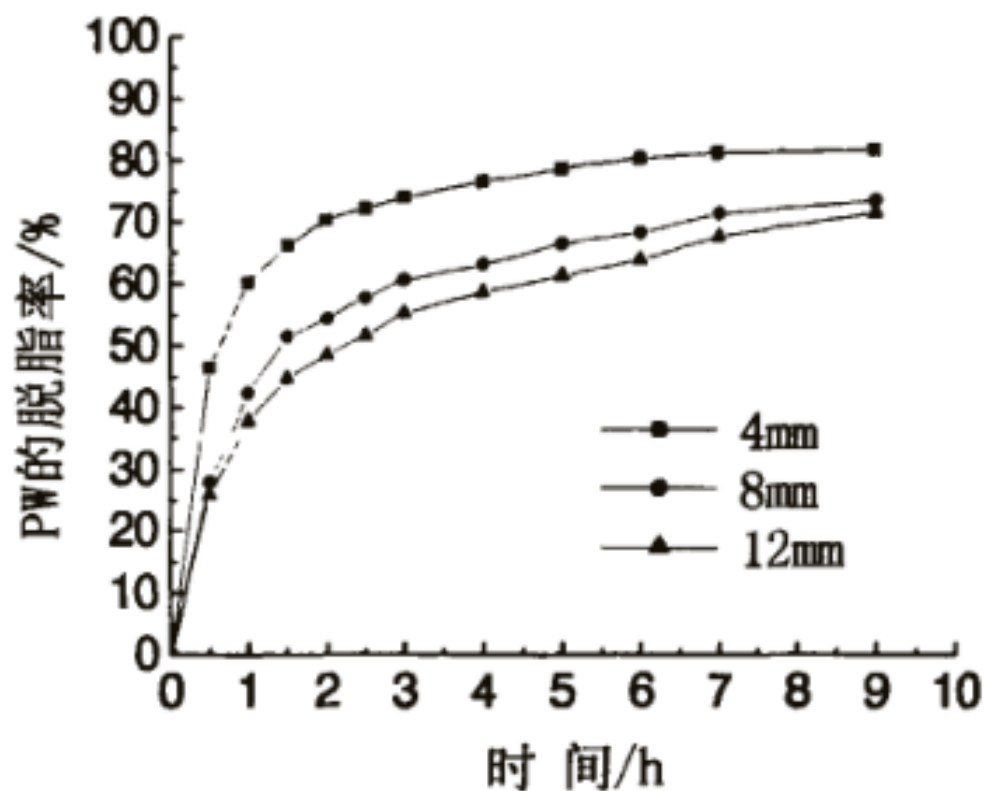


图 5.2 不同厚度对脱脂率的影响

SiAON 成型—溶剂加入方式对脱脂率的影响

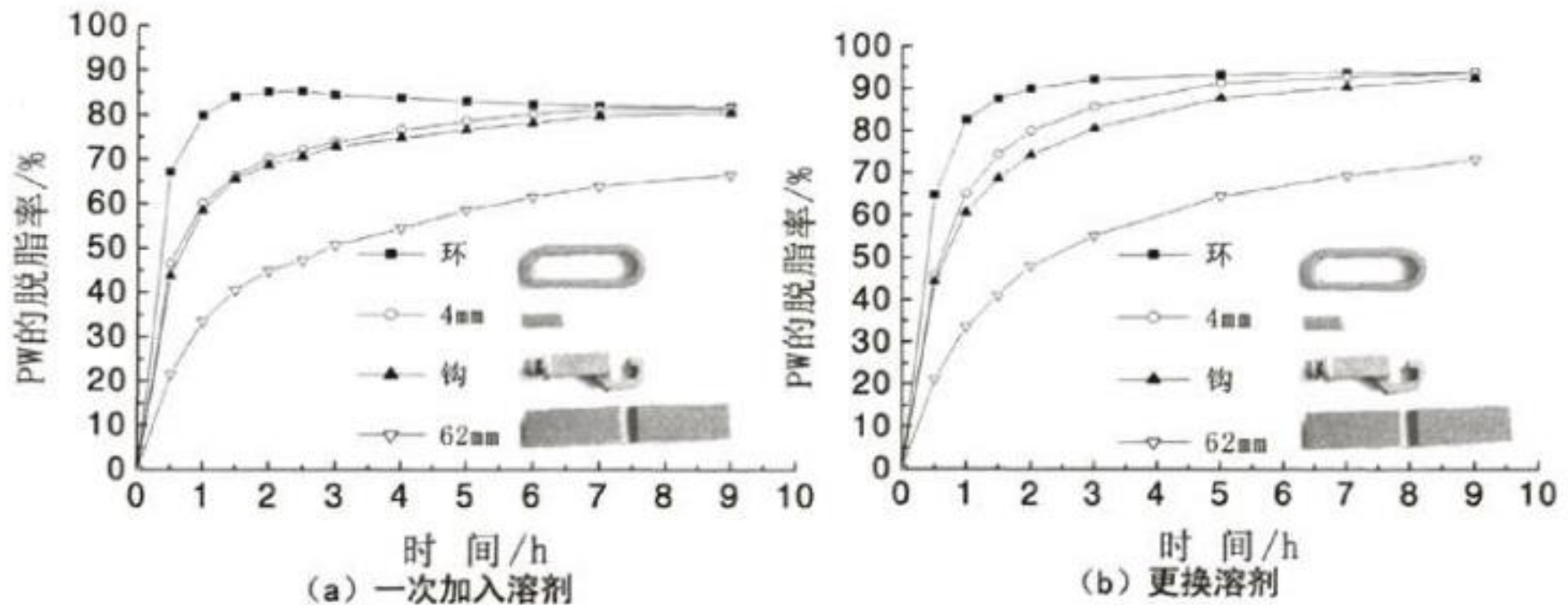
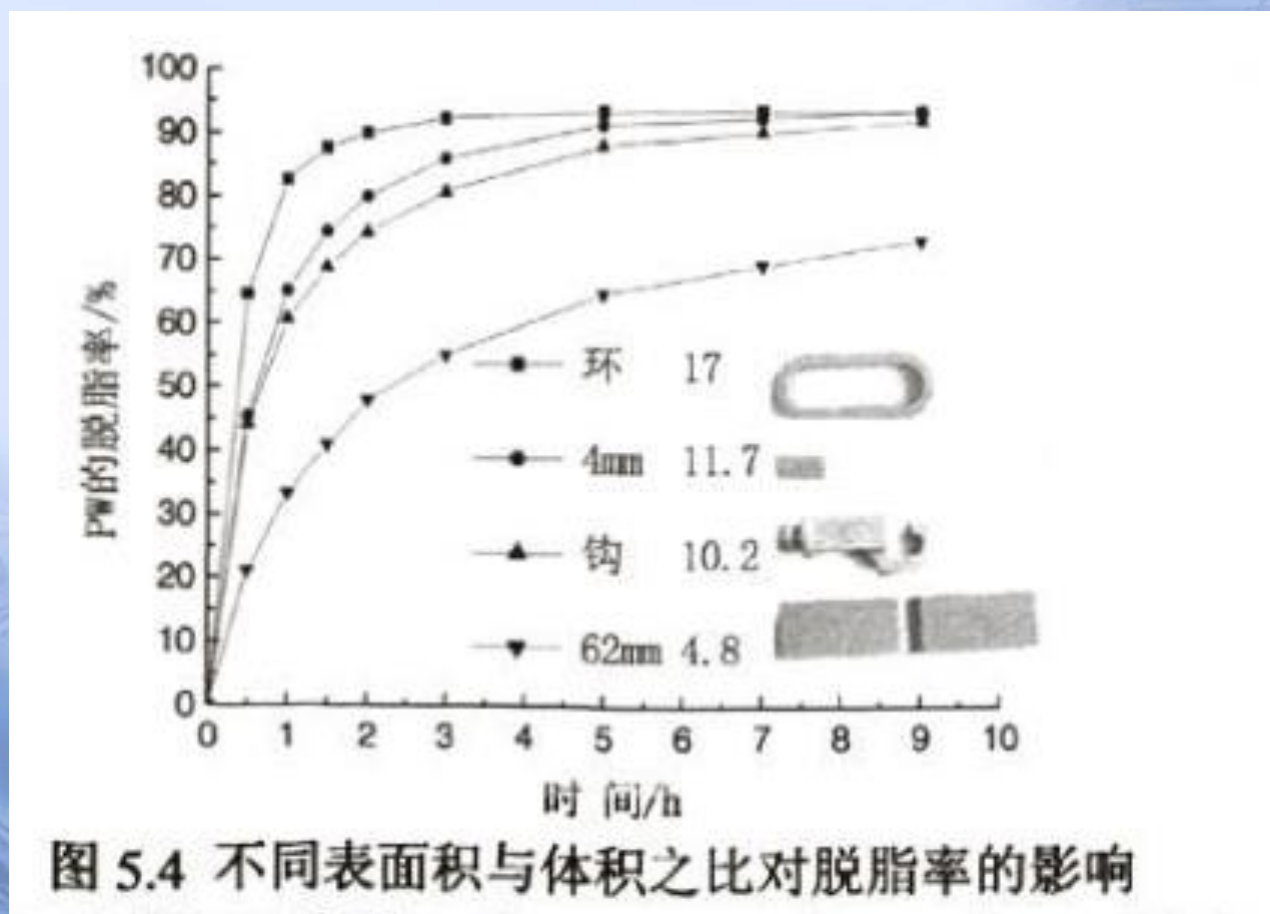


图 5.3 溶剂的加入方式对脱脂率的影响

SiAON 成型—试样比表面积对脱脂率的影响



SiAON 成型—脱脂前后SEM断面形貌

- (a) 未脱脂试样边缘断面SEM
- (b) 未脱脂试样中心断面SEM
- (c) PW脱除45%试样边缘断面SEM
- (d) PW脱除45%试样中心断面SEM
- (e) PW脱除75%试样边缘断面SEM
- (f) PW脱除75%试样中心断面SEM

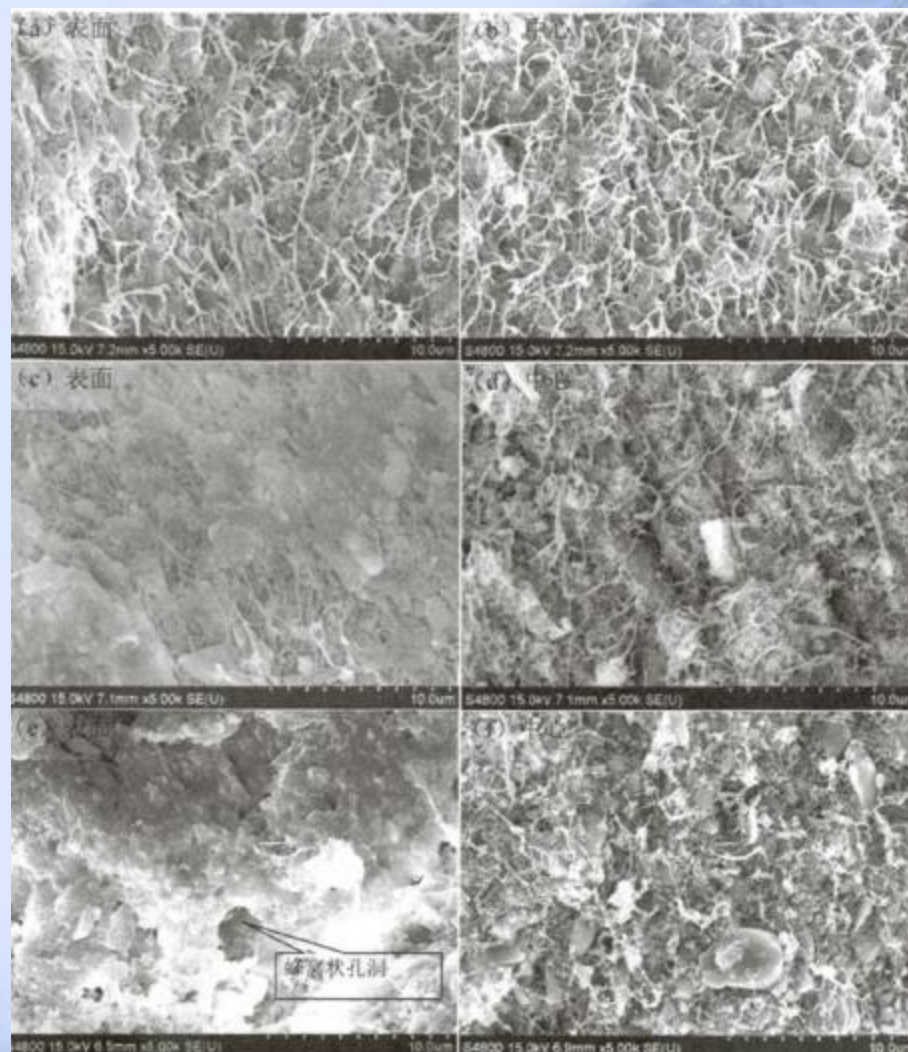


图 5.5 溶剂脱脂前后试样的 SEM 形貌

SiAlON 成型—溶剂脱脂+热脱脂

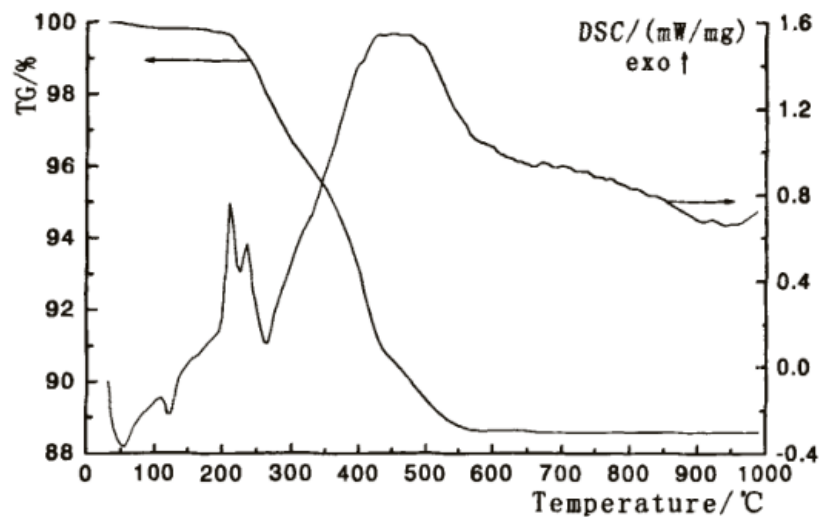


图 5.7 PW 脱除率 75% 坯体的热重分析

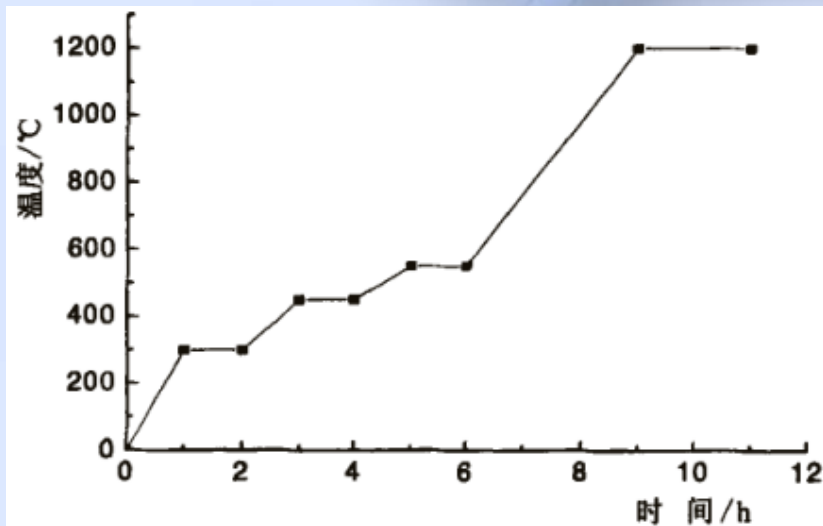


图 5.8 溶剂脱脂后的热脱脂工艺

热脱脂一步脱脂

配料

- ◆氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷粉末 (日本产, 纯度 (氧化铝质量分数) 为99.9%, 平均粒径为 $0.2\mu\text{m}$)
- ◆石蜡 (用PW 表示, 分析纯)
- ◆聚丙烯 (用PP表示, 化学纯)
- ◆硬脂酸 (用SA表示, 分析纯)

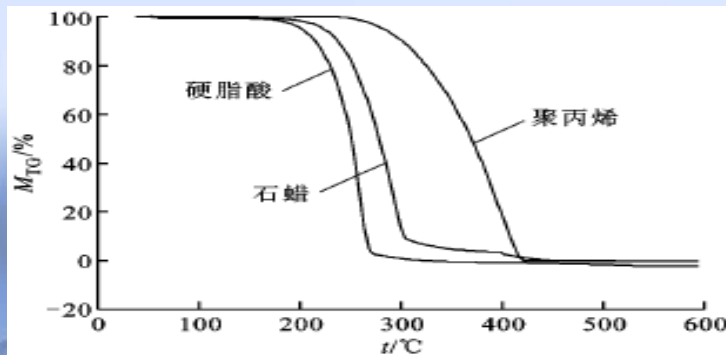


图3 聚丙烯、石蜡和硬脂酸的热重曲线

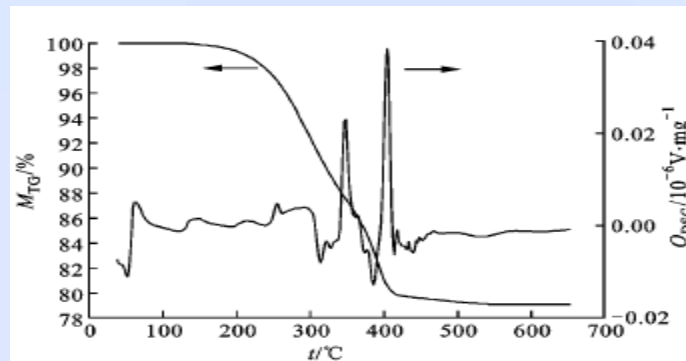
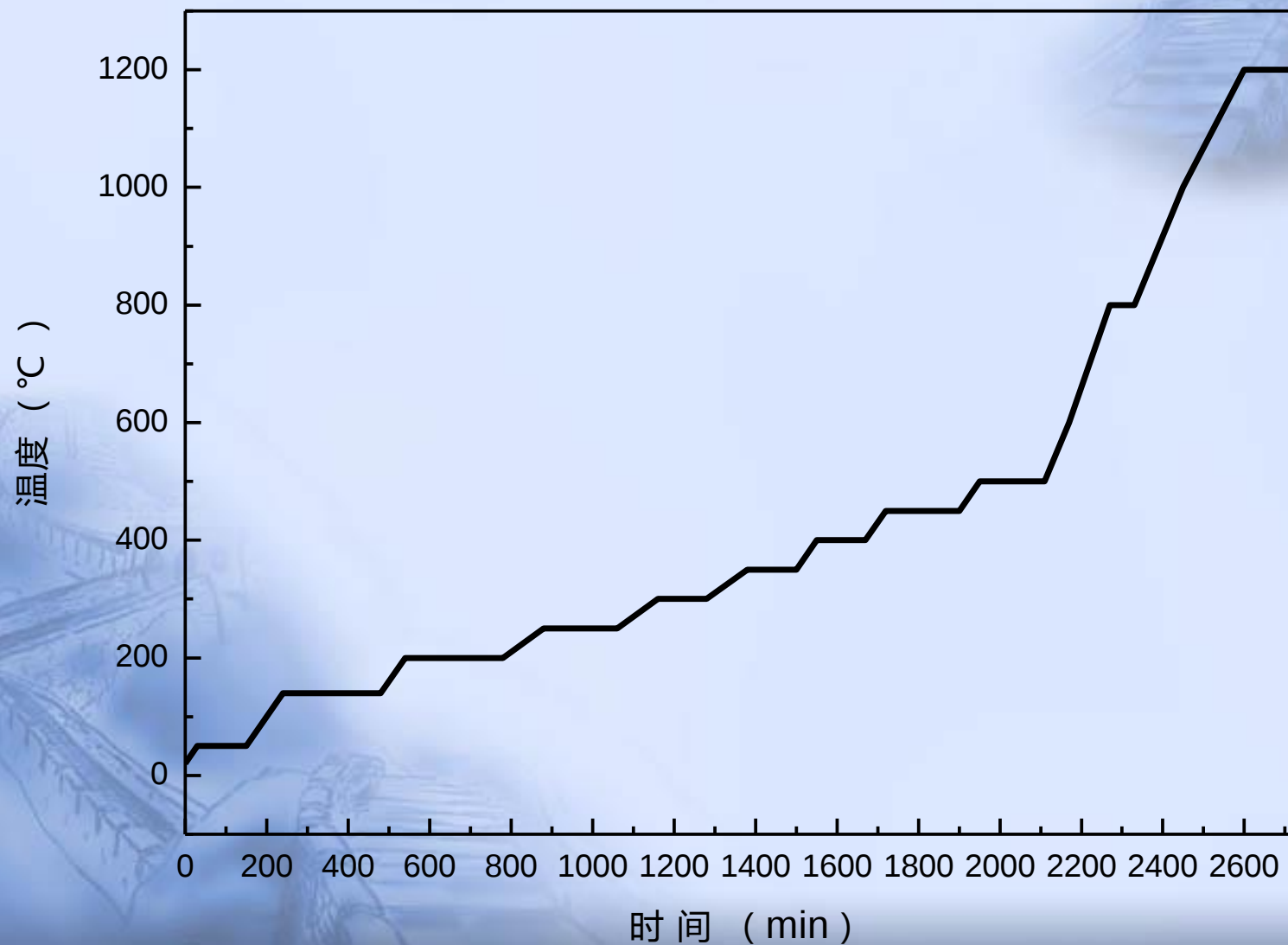


图4 注射成型生坯的 TG-DSC 曲线

，黏结剂的分解脱除主要分为3个阶段：室温到200°C的低温段，主要是相对分子质量较小的黏结剂组分石蜡、硬脂酸的熔化分解；200~400°C的中温段，主要是相对分子质量较大的聚丙烯的氧化分解脱除；400~600°C的高温段，为少量残留黏结剂的完全脱除。石蜡和硬脂酸的起始分解温度在180°C左右，聚丙烯的分解温度在200°C以上。

热脱脂一步脱脂



七、目前存在问题

国内陶瓷粉末注射成型面临的问题与挑战

- 1、陶瓷喂料所需优质有机粘结剂国内较缺乏
- 2、受捏合机（密炼机）陶瓷粉末及有机粘结剂制约，目前国内喂料的均匀性和稳定性有时不易保证；
- 3、陶瓷色斑问题：粉末密炼注射过程中可能因磨损而引入杂质污染，陶瓷表面易产生色斑等问题（尤其是对白色氧化锆等陶瓷基板），因此对密炼机和注射机提出更高要求；
- 4、大多陶瓷粉末注射成型产品内部缺陷的形成与控制仍具有一定不确定性，导致产品的可靠性下降
- 5、整体而言，我国在中低端陶瓷件注射制备有价格和竞争优势，但高端氧化锆陶瓷喂料和产品与国际上仍然有差距；

By 清华大学 谢志鹏教授

八、CIM 的应用前景举例——手机背板（第二届MIM/PIM会议）



高端手机的黑色ZrO₂陶瓷外壳
抛光后表面粗糙度控制在50nm左右



注射成型氧化锆陶瓷件用于
西门子早期高端68的手机
后盖和侧面按键



小米手机氧化锆陶瓷背板

成型方式选择

二、成型技术（决定产能和良率）

- (1) 注射成型技术：生产效率高，可实现连续化生产，但涉及喂料不均匀、排胶与烧成过程中可能带来的变形、裂纹、色斑等风险，从而会降低合格率！
- (2) 干粉模压成型技术：生产周期短生产效率高、易实现连续化和自动化、无需专门排胶，便于实现规模化大生产，但如何保证成型素坯均匀性烧结后不变形是一大挑战！
- (3) 干粉冷等静压成型：成型的陶瓷盖板素坯具有极高的密度、强度和均匀性，有利于保证烧结后产品的一致性和可靠性，但为间歇式生产，效率较低，成型产品尺寸精度较低，后加工量较大。

成型方式选择

(4) 凝胶注模成型技术：有利于复杂形状3D陶瓷盖板的成型，但缺乏高效率的生产设备，目前难以实现连续化生产，生产效率偏低，其次成型过程中可能会夹带气泡等缺陷！

(5) 3D打印成型技术：通过紫外光照射浆料选择性固化的3D打印成型可得到高精度高均匀度3维陶瓷素坯，但目前打印时间长，需要数小时才能完成一个坯件；因此效率很低，此外、这种精密的3D打印设备价格昂贵！

综上所述，前三种成型技术最有利于手机陶瓷盖板的制备，但彼此都具有各自优点和不足，何种技术在未来手机陶瓷盖板制备中将赢得优势，目前下结论还为时过早。

参考文献

1. J.K. Wright, M. G. Edirisinhe, J. G. Zhang and J. R. G. Evans, Particle packing in ceramic injection molding, J. Am. Ceram. Soc, 1990, 73(9): 2653-2658.
2. 谢志鹏, 杨金龙, 黄勇, 陶瓷注射成型有机载体的选择及相容性研究, 硅酸盐通报, 1998, 3:8-12.