

热塑性塑料与热固性塑料的加工工艺比较

胡梁

1 金达科技股份有限公司, 河北省沧州市, 061001;

2 河北省塑料包装材料工程技术创新中心, 河北省沧州市, 061001;

摘要: 本文系统比较了热塑性塑料与热固性塑料的分子结构、加工机理、工艺方法、工艺参数及质量控制要点, 重点分析了二者在成型周期、设备投资、能耗、回收利用率等方面的差异, 并探讨了性能、经济性及可持续发展的综合优势。研究表明, 热塑性塑料具有加工灵活、可回收性强、适合大规模连续化生产的特点, 而热固性塑料则以高强度、耐热性和尺寸稳定性见长, 更适合高性能结构件。研究结论可为材料选型、工艺优化和绿色制造提供参考。

关键词: 热塑性塑料; 热固性塑料; 加工工艺; 性能比较; 可持续制造

DOI: 10.69979/3029-2727.25.12.073

1 热塑性塑料概述

1.1 分子结构与性能特点

热塑性塑料的分子结构主要是线性或者有少量支化。分子链之间主要靠范德华力或者氢键连着, 没有化学交联点。所以受热的时候, 分子链能自由运动, 材料就有明显的可熔融性和可塑性。这种结构让热塑性塑料有可逆的加工特性。就是加热的时候, 它会从玻璃态或者高弹态变成黏流态, 冷却后又变回固态。而且它能多次加热-冷却循环, 不会有明显降解。在性能方面, 热塑性塑料一般密度比较低, 电绝缘性、耐化学腐蚀性和成型加工性都不错, 还有一定的韧性和延展性, 适合做形状复杂的制品。不过, 因为它没有交联结构, 所以耐热性和尺寸稳定性比较差, 热变形温度和耐蠕变能力都不如热固性塑料。要是用在高温环境里, 就得对它进行改性或者选高性能工程塑料。

1.2 常见类型及应用

热塑性塑料有很多种, 按照结晶性可以分成无定形塑料和结晶型塑料。无定形塑料有聚苯乙烯 PS、聚碳酸酯 PC、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 ABS 这些。结晶型塑料有聚乙烯 PE、聚丙烯 PP、聚甲醛 POM、尼龙 PA 这些。无定形热塑性塑料一般透明度高, 尺寸精度好, 成型收缩率小, 适合用来制造光学元件、透明外壳还有精密结构件^[1]。结晶型热塑性塑料有比较高的耐磨性、耐疲劳性和化学稳定性, 在承力结构件和耐腐蚀管道方面用得很多。在应用领域上, 热塑性塑料用在日用消费品、汽车零部件、电子电器外壳、管道、薄膜、医疗器械等很多行业。特别是在注塑、挤出、吹塑等能连续化、

大规模生产的场合。

2 热固性塑料概述

2.1 分子结构与性能特点

热固性塑料的分子结构主要是高度交联的三维网状结构。在加工的时候, 它会经历不可逆的化学反应, 像缩聚、加成或者交联, 从低分子量的预聚物变成空间交联的固体材料。一旦固化好了, 分子链就被化学键牢牢固定住, 受热也不会重新熔化, 只能在高温下分解或者炭化, 有很好的热稳定性和尺寸稳定性。交联结构让热固性塑料刚性高、强度大、耐热性和耐溶剂性都不错, 能在比较高的温度下保持力学性能不怎么下降, 还有良好的电绝缘性和耐化学腐蚀性, 不过这种不可逆交联也有缺点, 即脆性大、冲击韧性差, 无法再加工回收。加工的时候必须在规定的温度和时间条件下完成固化, 不然制品性能就不好或者直接报废了。

2.2 常见类型及应用

常见的热固性塑料有酚醛树脂 (PF)、环氧树脂 (EP)、不饱和聚酯树脂 (UP)、氨基树脂 (UF、MF) 还有有机硅树脂等。酚醛树脂耐热、耐腐蚀, 经常用在制动片、耐热电器部件和模塑粉上。环氧树脂黏结性和机械强度都很好, 在电子元器件灌封、结构胶黏剂、复合材料基体方面用得很广。不饱和聚酯树脂固化收缩小, 适合做玻璃钢制品、汽车船舶部件。氨基树脂表面硬度高、耐刮擦, 用在装饰板材、涂料上。有机硅树脂耐高温、耐候性特别好, 用在航空航天和高温电气绝缘方面。热固性塑料大多用在需要高强度、耐热性和长期尺寸稳

定性的地方，像电子电气、汽车发动机舱、化工设备内衬、航空航天结构件等，是高性能复合材料重要的基体树脂。

3 加工工艺比较

3.1 成型原理比较

热塑性塑料的成型原理主要靠物理相变。它的分子结构是线性或者轻度支化的，受热的时候会进入黏流态，冷却之后又会恢复到玻璃态或者半结晶态。所以，热塑性塑料的成型过程就是一个“熔融—充模—冷却—脱模”的物理过程，不会涉及化学反应。这个特点让材料可以多次循环加热和成型，回收再利用率很高，适合大规模连续化生产。成型时的关键工艺参数主要有熔体温度、模具温度、注射或者挤出压力、保压时间、冷却时间等，要综合考虑流动性、收缩率和残余应力，这样才能保证制品的尺寸精度和力学性能。

热固性塑料是依靠化学交联反应来实现成型的，属于“化学反应固化”过程。在模腔里，预聚物通过加热或者催化剂的作用，开始缩聚或者交联，逐渐形成不可逆的三维网络结构，然后完成固化。成型过程中必须严格控制升温速率、保温时间和固化压力，不然会出现交联不完全、有气泡夹杂或者内应力过大的问题。和热塑性塑料不一样，热固性塑料一旦固化就没办法再次熔融了，所以对一次成型的精度和工艺控制要求更高，加工窗口比较窄，对操作规范和设备精度的要求也更严格。

3.2 工艺方法比较

热塑性塑料常用的成型方法有注塑、挤出、吹塑、真空成型、热压成型等，其中注塑和挤出是最常见的工艺。注塑成型的优点是生产效率高、自动化程度高、制品精度好，适合做复杂形状的制品；挤出成型适合连续生产管材、型材、薄膜等制品，效率非常高。因为材料可以重复加热，生产过程中的废料可以回收再利用，降低了综合成本。工艺方法比较灵活，这让热塑性塑料能在汽车、家电、电子等行业大规模应用。

热固性塑料大多采用模压、传递模塑、反应注射成型（RIM）、层压成型和浇注成型等方法。其中模压工艺是通过加热模具和施加高压，让材料在模腔里固化成型，适合生产耐热、高强度的制品；反应注射成型可以把低黏度预聚物高速混合后注入模腔原位反应，成型周期短、制品性能均匀，在汽车保险杠、复合材料外壳等方面应用很广泛。热固性塑料的工艺普遍成型周期比较长，而且不能回收再加工，不过它的制品耐热性、尺寸稳定性比热塑性制品好，更适合做高端结构件^[2]。

3.3 工艺参数与设备差异

热塑性塑料的加工设备大多是注塑机、挤出机、吹塑机等，重点在于螺杆塑化能力、模具温控和锁模力。关键工艺参数有熔体温度、螺杆转速、注射压力、模温以及冷却速率，控制好了可以减少收缩变形、内应力和翘曲。生产线可以实现高度自动化，适合大批量生产。设备投资成本相对比较高，但是因为生产节拍短、能耗低、材料可以回收利用，综合生产成本比较低。

热固性塑料成型设备有模压机、RIM 设备、热压釜等。这些设备得有比较精确的温控系统和压力控制系统，这样才能保证化学反应完全固化。固化过程一般会伴随放热反应，所以要精确控制温升速率和模腔温度，不然会出现局部过热或者固化不均匀的情况。热固性塑料成型设备比热塑性塑料成型设备更复杂，能耗也更高，而且模具得耐高温、耐腐蚀，模具制造成本挺高的。成型周期长也让单件生产成本增加了，所以热固性塑料一般用在高附加值制品或者性能要求很高的场合。

3.4 缺陷及质量控制

热塑性塑料成型常见的缺陷有气泡、缩孔、流痕、翘曲和应力开裂。要控制质量，主要是优化浇口和流道设计，合理设置注射速度和保压压力，控制模温和冷却速率，还可以通过退火工艺消除残余应力。另外，在线监控熔体压力和温度，能让制品质量更稳定，提高成品率。

热固性塑料的缺陷大多是固化不完全、有气泡夹杂、有内应力裂纹或者表面焦化。控制热固性塑料质量的关键是精确控制固化工艺参数，保证反应充分又均匀，避免因为局部过热导致降解或者脆化。真空辅助脱泡、分段升温固化和模具排气设计对提高制品质量很重要。和热塑性塑料比起来，热固性塑料的质量控制更依靠工艺工程师的经验和固化曲线优化，生产过程得建立严格的工艺规范和监控体系。

3.5 工艺适应性与自动化水平比较

从工艺适应性来说，热塑性塑料的加工窗口比较宽，二次加工性能也不错，能适应多种成型方式和不同规模的生产线。因为热塑性塑料可以重复加热软化，所以制品能通过焊接、热弯、二次注塑等工艺进行装配和修复，这大大提高了设计灵活性和材料利用率。在自动化方面，热塑性塑料成型设备已经高度模块化了，可以和机器人、传感器和 MES 系统集成，实现在线监控和闭环控制，让生产稳定性和良品率大幅提升。相比之下，热固性塑料的成型工艺窗口比较窄，对温度、压力和固化时间的偏

差特别敏感，稍微有点不当就可能导致固化不完全或者性能下降，最后产品就报废了。热固性塑料的固化过程是不可逆的，二次加工或者返修很难，所以设计和生产的时候必须一次成型达标，对工艺管理水平要求更高。

3.6 环境影响与可持续性分析

在绿色制造和可持续发展的大环境下，热塑性塑料有很大的环保优势。它可以回收再利用，废料还能重新熔融使用，这样就能降低原材料的消耗，也能减轻废弃物处理的压力，很符合循环经济的要求。现在，部分高性能热塑性复合材料，像碳纤维增强 PA、PEEK，已经成了可回收航空航天复合材料的重要发展方向。

而热固性塑料就有所不同，固化之后，因为有三维交联结构，没办法再熔融。它的回收主要靠机械粉碎后填充利用，或者热解化学回收。不过这些工艺很复杂，能耗也高，回收率还低，这就成了制约它可持续发展的大问题。

3.7 工艺优化与智能化趋势

近年来，制造业朝着智能化和数字化转型，热塑性和热固性塑料的加工工艺也在不断优化升级。热塑性塑料的注塑、挤出等设备，已经逐步引入了闭环控制系统。通过实时监测熔体温度、压力、螺杆扭矩和模具温度，就能动态调整工艺参数，这样能大大减少制品的尺寸偏差和内应力。同时，计算机辅助工程（CAE）仿真软件也用得很广泛，它可以用分析熔体流动、预测翘曲和设计冷却系统，能帮助工程师在设计阶段优化浇口位置、流道布局和模具温控方案，缩短试模周期，降低废品率。

热固性塑料工艺的优化，更多是集中在固化动力学和固化曲线设计上。通过差示扫描量热（DSC）和流变学分析，能建立精确的固化动力学模型，实现模压或反应注射成型的精准温控与分段固化。真空辅助固化、微波加热、光固化等新技术的应用，让固化时间大大缩短，提高了树脂浸润性和制品内部质量。未来，随着工业互联网和 AI 技术的发展，热固性塑料的固化工艺能实现智能监测和预测控制，让制品的一致性和可靠性进一步提高。

4 性能与经济性比较

4.1 力学性能与热性能差异

热塑性塑料的分子结构主要是线性链或者少量支化链，分子链之间的作用力比较弱。所以这种材料的韧性、延展性和抗冲击性都很好，在低温环境下也能保持

一定的塑性和韧性。它适合用来制造需要吸收冲击能量或者承受动态载荷的制品，像汽车保险杠、运动器材壳体、管道这些。不过，热塑性塑料的耐热性和尺寸稳定性比较差。当使用温度接近它的玻璃化转变温度或者熔点时，它很容易软化变形，力学强度也会明显下降。长时间承载的话，还可能会发生蠕变。相比之下，热固性塑料有高度交联的三维网状结构，它的刚性大、硬度高、热变形温度高。在较高温度下，它能保持力学性能，不会有明显的衰减，尺寸稳定性很好，耐蠕变性能也很突出。所以它特别适合制造在高温环境下长期使用的结构件和绝缘部件。但是它的脆性比较大，缺口冲击韧性差，很容易发生脆性断裂。在受到强冲击或者振动的情况下，需要通过改性或者增强纤维复合来提高韧性。

4.2 加工成本与生产周期

热塑性塑料的加工主要是物理相变，成型周期短，生产效率高。而且废料和边角料可以回收再利用，材料利用率高，这样有利于降低综合成本。注塑、挤出、吹塑这些工艺可以实现连续化、自动化生产，单位时间的产出高，适合大批量生产，综合经济性比较好。虽然它的成型设备投资成本比较高，但是因为生产节拍快，能耗相对较低，算到单件产品成本的时候更有优势。

热固性塑料就不一样了，它的加工需要经历化学反应固化过程，成型周期长，能耗高。而且制品一旦固化就没办法重新加工，废品报废率对生产成本影响很大。模具制造成本也高，对温控和压力控制要求很严格，这就增加了设备维护和操作成本。所以，热固性塑料更适合生产批量中等、性能要求高的制品，不太适合超大规模、低成本的通用制品生产。

5 结语

通过对热塑性塑料与热固性塑料的加工工艺、性能和经济性的全面比较，可以看出二者各有优势和局限。热塑性塑料适合大批量、快速成型及可回收利用场景，而热固性塑料更适合高强度、耐高温和尺寸稳定性要求严苛的应用。

参考文献

- [1] 郑红伟, 张泽凯, 郭增贤, 等. 碳纤维增强热塑性工程塑料研究进展 [J]. 塑料科技, 2025, 53(1): 180-185.
- [2] 关明宇. 热固性塑料注射模具烧焦问题浅析 [J]. 机械工业标准化与质量, 2024(8): 41-43.