

热塑性弹性体注塑成型模具设计及工艺的研究

贾榜军

广州市世达密封实业有限公司 广东 广州 510000

摘要：热塑性弹性体因其独特的性能组合在多个领域得到广泛应用。本研究聚焦于热塑性弹性体模具设计原则、流道与排气系统优化以及成型工艺参数调控。通过数值模拟与实验验证，探讨了模具温度、注射压力、冷却时间等关键参数对制品质量的影响。结果表明，优化模具设计与成型工艺可显著提高制品精度与表面质量，为热塑性弹性体制品的高效生产提供技术支持。

关键词：热塑性弹性体注塑模具；设计；成型工艺

引言：热塑性弹性体作为一种兼具橡胶弹性与塑料加工性的高性能材料，近年来在汽车、家电、工程机械、医疗、消费电子等领域展现出广泛应用潜力。然而，其复杂的加工特性和高要求的制品质量对模具设计及工艺提出了挑战。本研究旨在深入探讨热塑性弹性体模具设计的关键要素与成型工艺的优化策略，以期为实现高效、高质量的热塑性弹性体制品生产提供理论依据和技术支持。

1 热塑性弹性体材料性能分析

1.1 热塑性弹性体的基本特性

(1) 力学性能上，兼具橡胶高弹性与塑料高强度，这一特性使其在多种受力场景中表现出色。弹性恢复率超80%，即便经过反复形变，也能快速回弹，例如在日常使用的密封件中，可长期保持良好的密封效果而不易变形；拉伸强度多为10-30MPa（部分偏低），通过增强改性的型号能突破40MPa，可满足不同强度需求的产品制造，像小型结构件对强度要求较低，而承重部件则可选用增强型号；硬度覆盖邵氏A30-95度，能根据产品触感需求灵活选择，从柔软的日用品手柄到较硬的工业配件均适用；耐磨性优异，体积磨耗量常低于 $0.1\text{cm}^3/1.61\text{km}$ ，在高频摩擦场景如传送带、鞋底等应用中，能大幅延长产品使用寿命^[1]。(2) 环境适应性上，耐热温度范围较广，一般可在-40°C至120°C保持稳定性能，在寒冷的北方户外或高温的设备内部环境中，仍能正常发挥功能；特殊配方产品能短期承受150°C高温，可应对短暂高温工况，如汽车发动机周边部分部件；耐化学腐蚀能力突出，对酸、碱、油脂等常见介质表现出良好耐受性，在化工管道密封、食品加工设备部件等场景中适用性强；在溶剂环境中溶胀率低于5%，能减少因溶剂影响导致的产品尺寸变化和性能下降。(3) 加工性能优异，可采用注塑、挤出等传统塑料加工工艺，无需像

传统橡胶那样进行复杂的硫化过程，成型周期较传统橡胶缩短30%-50%，显著提高生产效率；且具有良好可回收性，再生料性能保留率达80%以上，在当前环保理念日益增强的背景下，符合可持续发展要求，降低了材料浪费和环境污染。

1.2 热塑性弹性体的分类与应用

(1) 按化学成分与结构，热塑性弹性体可分为苯乙烯类（SBC）、聚烯烃类（TPO）、聚氨酯类（TPU）等。其中，SBC由苯乙烯与丁二烯嵌段共聚而成，具有良好的柔韧性和加工流动性，且成本相对较低；TPO以聚烯烃为基材与橡胶共混，兼具聚烯烃的刚性和橡胶的弹性，耐候性较好；TPU含氨基甲酸酯重复单元，具有出色的耐磨性和耐油性，机械强度也较高。(2) 在众多行业中，热塑性弹性体应用广泛。汽车行业，TPO凭借良好的耐候性和加工性，在汽车密封条领域占比超60%，同时还用于制造保险杠、仪表板等部件，能提升汽车外观和使用安全性；SBC质地柔软，用于汽车内饰包覆，如方向盘、门板等处，有效提升触感，增强驾乘舒适度。家电行业，TPU密封性和耐老化性佳，用于洗衣机门密封圈，确保长期使用过程中不漏水；SBC防滑且手感好，用于家电手柄，让用户握持时更舒适、不易打滑。工程机械行业，TPU因优异的耐油性，常用于制造防尘罩、液压管等与油类接触的部件，防止油品腐蚀；TPO抗冲击性和耐候性强，用于工程车辆挡泥板，能有效抵御石子撞击和恶劣环境侵蚀，防护性能佳^[2]。

1.3 热塑性弹性体的成型加工要求

(1) 模具设计需注重排气，由于热塑性弹性体材料熔融黏度较高，在成型过程中易包裹空气产生气泡，若排气不畅，会导致制品出现气孔、缺料等缺陷，因此模具需合理设置排气槽，确保气体顺利排出；流道截面宜采用圆形，相比其他形状，圆形流道能减少熔体流动过

程中的压力损失,保证熔体均匀填充模具型腔;模具温度通常控制在40-60°C,这一温度范围既能保证制品充分冷却定型,又能避免因温度过低导致制品脱模困难或产生内应力,保证制品顺利脱模且尺寸稳定^[3]。(2)成型工艺参数敏感性强,温度波动±5°C就可能引起制品表面出现斑纹、气泡等外观缺陷,影响产品美观和质量;注射压力偏差10%会改变熔体填充速度和压力分布,进而影响制品尺寸精度,可能导致制品尺寸超差,无法满足装配要求,因此在生产过程中,需借助精准的温控系统和压力控制系统,严格控制工艺参数稳定性,确保每一批次产品质量一致。

2 热塑性弹性体模具设计

2.1 模具设计原则与方法

(1)模具设计需遵循实用性、经济性、可靠性三大原则。实用性要求模具稳定生产符合图纸的制品,关键尺寸公差±0.02mm内,适配自动化生产;经济性需平衡成本与寿命,单套模具分摊到每件制品的成本低于总制造成本15%;可靠性要求10万次循环使用故障率低于2%,核心部件无结构性损坏。(2)TPE材料特性设计策略需突破三难点:应对高黏度,采用渐扩式流道(入口3mm扩至8mm)降阻力;解决冷却收缩不均,型腔拐角设0.5°-1°脱模斜度,配合局部增厚0.3mm补偿;适应黏模,型腔表面抛光至Ra0.04μm,必要时喷特氟龙^[4]。(3)借助CAD技术实现模具设计全流程数字化,提升设计精度与效率。首先使用AutoCAD绘制二维工程图,标注精度达0.01mm,清晰呈现模具各部件的尺寸与装配关系;随后通过Pro/E软件构建三维实体模型,模型中嵌入TPE材料数据库,可根据材料特性自动计算并生成符合1.8%-2.5%收缩率的型腔尺寸,无需人工反复修正;最后利用Moldflow软件进行模流分析,模拟熔体填充、保压、冷却过程,优化注射参数与模具结构,使试模通过率提升至90%以上,减少试模次数与成本。

2.2 模具结构分析

(1)型腔结构设计需根据制品复杂度选择:简单制品采用整体式型腔,减少拼接缝;复杂制品采用组合式型腔,由3-5个镶件拼合而成,单个镶件重量不超过20kg,便于加工与更换。型腔深度与宽度比需控制在1:3以内,防止熔体填充不满;对于带螺纹的制品,需设计旋转抽芯结构,螺纹精度达6H级^[5]。(2)模具材料选择需匹配生产批量:中小批量(≤5万件)选用P20预硬钢,经280°C回火后硬度达28-32HRC;大批量(≥30万件)选用H13热作模具钢,经1050°C淬火+520°C回火后硬度达42-46HRC,耐磨性提升40%。热处理后需进行时效

处理,消除内应力,保证模具变形量≤0.05mm/m。

(3)冷却系统采用分区温控设计,动模与定模分别设置独立水路,进水温度差控制在±5°C;水道直径8-12mm,与型腔表面距离保持15-25mm,采用螺旋式水流结构提升换热效率,使制品冷却时间缩短至30-60秒。排气系统除分型面设置0.02mm深,5-10mm宽排气槽外,在熔接痕易产生区域增设直径1mm的排气针,确保排气量≥80mL/s。

2.3 模具制造的精度与质量控制

(1)制造流程涵盖:锻件退火(消除网状碳化物)→选用预硬钢→数控铣粗加工(留3-5mm余量)→热处理→精密磨削(平面度≤0.005mm/m)→电火花成型(表面粗糙度Ra0.8μm)→装配调试。关键工艺包括慢走丝切割,电极丝直径0.15mm,切割精度达±0.001mm;镜面抛光采用金刚石研磨膏,从W10逐步换至W1,最终达到Ra0.02μm。(2)精度控制采用三级检测体系:工序间检测(如铣削后检测尺寸公差)、半成品检测(如热处理后检测硬度与变形)、成品检测(三坐标测量机全域扫描)。技术标准执行GB/T4678.1-2003,导柱与导套配合间隙0.005-0.01mm,分型面贴合率≥95%。(3)质量检测包括:外观检测(无砂眼、裂纹,型腔表面无划痕)、性能测试(连续冲压500次,模具升温≤20°C)、制品抽检(尺寸合格率100%,外观缺陷率≤0.5%)。验收需提供全尺寸检测报告、试模300件样品及模具维护说明书,最终通过客户工艺验证方可交付^[6]。

3 热塑性弹性体模具设计及工艺的应用实例

3.1 典型制品案例分析

3.1.1 选取三个代表性TPE制品

汽车加油口护套密封圈(苯乙烯类TPE)、液压密封用Y形密封圈(聚氨酯类TPE)、电动工具手柄保护套(聚烯烃类TPE),均采用海德堡HDB-160VB注塑机生产。这三类制品分别覆盖汽车、工程机械、家电领域,对尺寸精度、安全性、功能性、外观质感有不同侧重要求。

3.1.2 模具设计与工艺特点

(1)汽车加油口护套密封圈,材料选用牌号为101-73的TPV,模具采用整体式型腔结构,一模一腔,进胶口对面融合线处设置0.03mm宽8mm排气槽,冷却水路随密封圈轮廓布置,确保冷却均匀;产品每模用料量57.4g,温度参数参照材料指引,模温20-30°C,冷却时间30秒,一个循环55秒,成型工艺需控制注射压力50-70(设备参数),避免飞边影响密封性能,难点在于拐角处填充速度的平衡,将注射压力和模具温度保持平衡,以消除进胶口对面产生融合线,产品合格率达到98%。

(2)液压密封用Y形密封圈,产品用于液压油缸密

封。材料选用科思创公司的TPU，牌号为DP445，模具采用一个模架互换模芯的方式，冷却水路开在模芯边缘的模架上，根据产品大小，可以1模1腔或1模4腔成型，模腔抛光至 $Ra \leq 0.4\mu m$ ，直接采用产品边缘进胶，温度参数参照材料指引，模温30-40℃，冷却时间20-40秒，一个循环60-80秒，注射压力55-100（设备参数），产品密实度高，合格率达到98%。

（3）电动工具手柄保护套，用于手持电动工具，材料选用santoprene8211-65，该模具采用液压中子抽芯结构，在中子和前后模架开设冷却水路，1模1腔。产品用料181.5g，温度参数参照材料指引，冷却时间60-80秒，一个循环90-110秒，注射压力10-100（设备参数），模温30-40℃，由于该产品结构复杂，在脱模时，会导致产品变形，后采用定型工装定型后冷却600秒至常温，形状和尺寸达到设计要求，合格率达到99.5%。

3.1.3 性能匹配度评估

以上三种产品分别实装应用于汽车、液压油缸、和电动工具上面，由于模具结构设计在产品结构和材料特性匹配良好，充分展现了TPE材料的高弹性、抗变形特性、高耐磨耐压特性，现模具已生产5万余次，无明显变形磨损。

3.2 应用效果评估与改进建议

3.2.1 综合评估

热塑性弹性体材料的模具设计总体上与塑料模具的结构设计类似，由于其具有橡胶弹性变形的特性，同时具有注塑成形的特性，在复杂的产品模具设计上可以采用强脱设计，生产工艺上具有比橡胶产品更简单的工艺，生产效率较相同特性的橡胶制品更高，合格率更稳定，可以达到99%，产品制造成本更低。但模具制造成本较高，通常达到3-10万，是普通橡胶模具的2-3倍。

3.2.2 改进建议

对于同类型的不同大小的密封圈模具可采用模块化设计，通过更换模芯降低不同规格产品的模具制造成本；未来研究方向包括：开发自清洁排气槽模具，降低TPE黏模导致的清理频率；研究智能工艺参数控制系统，更加智能化地前置做好TPE材料模流分析（CAE），提前预测问题，优化设计，提升模具设计的一次成功率；优化冷却系统设计，降低注塑周期，提升生产效率；模具结构与设备、材料特性深度融合，实现智能化、绿色化、精密化和专业化生产。

结束语

综上所述，通过对热塑性弹性体模具设计及成型工艺的深入研究，我们成功揭示了模具结构、材料选择、工艺参数对制品质量的关键影响。本研究不仅为热塑性弹性体制品的高效、高质量生产提供了理论指导和实践经验，也为模具设计的创新发展开辟了新路径。未来，我们将继续探索智能化、自动化技术在热塑性弹性体成型中的应用，推动该领域技术的持续进步。

参考文献

- [1]郑悦,王权,徐超辉,等.基于Moldflow的异形开关哈夫滑块注塑模具优化设计[J].塑料科技,2022,(08):88-89.
- [2]范炜亮,王克俭.塑料制品成型缺陷的检测与控制[J].塑料包装,2020,(03):20-21.
- [3]赵慧凯.热塑性塑料制品成型设备的设计与优化[J].塑料工业,2020,(05):77-80.
- [4]游剑文.热塑性塑料制品结构的优化设计[J].产业创新研究,2020,(14):142-143.
- [5]黄贤页.注塑成型模具温度对PP制品结晶形态的影响[J].塑料科技,2021,(08):68-71.
- [6]张兰英.注塑成型模具设计的要点分析[J].山东工业技术,2021,(13):139-140.