

# PVC/PE 给水管模具耐磨性能优化

邱 林

青龙管业集团股份有限公司 宁夏 银川 750000

宁夏青龙塑料管材有限公司 宁夏 银川 750000

**摘要：**PVC/PE给水管模具在高温高压及熔体摩擦下易磨损。本研究从材料改性、表面处理、模具结构设计和工艺参数协同优化四方面提出耐磨性能提升方案。通过实验验证，TiAlN涂层方案耐磨性能最优，较未优化方案磨损率降低62%。经仿真模拟与长期性能监测，优化方案工业化适配性好，可有效延长模具寿命，降低生产成本，为行业技术提升提供参考。

**关键词：**PVC/PE；给水管模具；耐磨性能优化

引言：PVC/PE给水管生产中，模具作为成型核心部件，其耐磨性能直接影响产品质量与生产效率。在高温高压及聚合物熔体持续摩擦作用下，模具易出现磨损、失效等问题，导致生产周期缩短、成本增加。当前，行业对模具耐磨性能的提升需求迫切，但缺乏系统性优化方案。本文聚焦材料、表面处理、结构及工艺参数等多维度，探讨PVC/PE给水管模具耐磨性能优化策略，以期为行业提供技术参考。

## 1 PVC/PE给水管模具磨损机理分析

### 1.1 模具工作条件与磨损类型

(1) 高温高压成型环境：PVC/PE给水管成型时，模具型腔需承受160~220℃高温，使聚合物熔化成熔体，同时承受10~30MPa高压以保证熔体充满型腔。高温会降低模具材料硬度与耐磨性，高压则加剧熔体对模具表面的挤压摩擦，为磨损提供了恶劣前提条件<sup>[1]</sup>。(2) 聚合物熔体与模具的摩擦学特性：熔体在模具型腔中流动时，与型腔壁产生黏着摩擦和滑动摩擦。PVC/PE熔体的黏附性较强，易在模具表面形成黏附层，后续熔体流动会撕裂黏附层，带动模具表面材料脱落；同时，熔体流动速度梯度会产生剪切力，进一步加剧模具表面磨损。

### 1.2 磨损机制实验研究

(1) 磨损形貌观察：通过扫描电子显微镜（SEM）观察磨损后模具表面，可见犁沟、黏着剥落坑及微裂纹等形貌；能谱分析（EDS）可检测到模具表面存在聚合物元素残留，证实黏着磨损的存在。(2) 磨损量定量测试：失重法通过测量实验前后模具质量差量化磨损程度；轮廓仪可精准检测模具表面粗糙度变化和磨损深度，为磨损程度评估提供量化数据。(3) 磨损机制模型建立：基于Archard磨损公式，结合实验数据，建立包含温度、压力、滑动速度等参数的磨损模型，可预测不同工况下模

具的磨损寿命。

### 1.3 关键影响因素分析

(1) 材料因素：模具钢硬度越高，耐磨性越强；碳化物分布均匀且含量适宜时，能提升模具表面硬度和抗磨损能力，反之则易产生应力集中加速磨损。(2) 工艺因素：温度过高会过度软化模具材料，压力过大加剧挤压摩擦，冷却速率不均则导致模具内部产生热应力，均会加速磨损。(3) 聚合物因素：聚合物中的爽滑剂可降低熔体黏附性，减少磨损；分子量分布不均会导致熔体流动不稳定，局部摩擦加剧，增加模具磨损风险。

## 2 PVC/PE给水管模具耐磨性能优化方法

### 2.1 材料改性优化

(1) 高性能模具钢选型：挤出模具材质行业内普遍选用40Cr锻件、42CrMo，二者综合力学性能适配常规挤出工况。此外，H13热作模具钢高温强度与韧性优良，在160~220℃PVC/PE成型温度下稳定性突出，仅硬度（HRC48~52）和耐磨性稍弱；DC53冷作模具钢硬度达HRC60~62、耐磨性更优，但高温下韧性易降、开裂风险高。选型需结合工艺，连续高温工况优先H13，间歇生产或型腔关键耐磨部位可选DC53。(2) 金属基复合材料制备：以WC颗粒作为增强相，通过粉末冶金或铸造工艺制备钢基复合材料，WC的高硬度（HV1800~2400）和高耐磨性可显著提升模具材料的抗磨损能力。需严格控制WC颗粒粒径（优选5~20μm）和体积分数（15%~25%为宜），颗粒过大易导致界面结合不良，过小则无法充分发挥增强作用，合理配比可使复合材料耐磨性较传统模具钢提升3~5倍<sup>[2]</sup>。(3) 热处理工艺优化：传统淬火工艺易使模具钢内部残留拉应力，加速磨损过程中的裂纹扩展。采用“淬火+深冷处理”复合工艺，淬火后将模具置于-80~-196℃低温环境中保温2~4h，可促使残余奥氏体

向马氏体转变,同时细化晶粒、均匀组织,显著降低残余拉应力,提升模具硬度和尺寸稳定性,使模具使用寿命延长20%-40%。

## 2.2 表面处理技术

(1) 物理气相沉积(PVD)涂层:CrN涂层具备良好的耐磨性和耐腐蚀性,摩擦系数低至0.3-0.4,适用于中低温成型工况;TiAlN涂层则兼具高温稳定性和高硬度(HV2500-3000),在220°C以上高温环境下仍能保持良好性能,但其制备成本高于CrN涂层。针对PVC/PE成型温度范围,型腔表面可优先选用TiAlN涂层,非关键部位选用CrN涂层平衡性能与成本。(2) 化学镀镍磷合金工艺参数优化:化学镀镍磷合金涂层的耐磨性与镀液温度、pH值、沉积时间密切相关。优化后参数为:镀液温度85-90°C、pH值4.5-5.0、沉积时间2-3h,可获得磷质量分数10%-12%的非晶态涂层,涂层硬度可达HV500-600,经400°C热处理后硬度可提升至HV800-1000,能有效降低熔体与模具表面的黏附摩擦<sup>[3]</sup>。(3) 激光熔覆技术制备耐磨层:Fe基金熔覆层硬度高、耐磨性好,成本较低,但韧性稍差;Ni基金熔覆层具备良好的韧性和耐腐蚀性,与基体结合强度高,适用于模具型腔等易受冲

击和摩擦的部位。采用激光功率1500-2000W、扫描速度3-5mm/s的参数制备熔覆层,可实现与模具基体的冶金结合,耐磨层厚度控制在0.5-2mm,显著提升模具表面耐磨性能。

## 2.3 模具结构设计优化

(1) 仿生结构应用:借鉴鲨鱼皮表面的微米级沟槽结构,通过激光刻蚀技术在模具型腔表面加工出间距50-100 $\mu\text{m}$ 、深度5-10 $\mu\text{m}$ 的平行沟槽。该结构可减少熔体与型腔表面的接触面积,降低黏附摩擦,同时引导熔体有序流动,减少流动阻力,使模具磨损量降低30%以上。(2) 流道结构优化:采用流线型流道设计,避免直角、尖角等突变结构,将流道过渡圆角半径增大至3-5mm;同时优化浇口位置和尺寸,使熔体在流道内均匀流动,避免因局部流速过低形成滞留区。滞留区的消除可减少聚合物熔体的长期高温黏附与侵蚀,降低模具局部磨损。(3) 冷却系统改进:挤出模具常规采用模温机冷却,模具内部设冷却铜管;优化为随形水道设计,使水道与型腔表面距8-12mm,确保冷却均匀。均匀冷却可避免温差产生热应力、减少裂纹,同时降低高温对模具耐磨性的削弱<sup>[4]</sup>。如图1。



图1模具装配体结构图

## 2.4 工艺参数协同优化

(1) 挤出工艺参数与磨损的响应面分析:以熔体温度(160-220°C)、挤出速度(50-150mm/s)为自变量,模具磨损量为响应值,通过响应面法建立二次回归模型。分析可知,熔体温度过高会加剧模具材料软化,挤出速度过快会增大熔体对型腔的剪切摩擦,两者存在协同作用,最优参数组合为熔体温度180-200°C、挤出速度80-100mm/s,可在保证成型质量的前提下最小化模具磨损。(2) 基于DOE的实验设计方法:采用正交实验设计(DOE)方法,选取熔体温度、挤出压力、冷却时间、保压压力为关键影响因素,每个因素设置3个水平,通过16组实验探究各因素对模具磨损的影响显著性。实验结果表明,熔体温度和挤出压力对磨损影响最为显著,基于

实验数据可确定最优工艺参数区间,为实际生产提供科学依据,实现工艺参数与模具耐磨性能的协同优化。

## 3 PVC/PE给水管模具耐磨优化方案验证与结果分析

### 3.1 实验设计

(1) 样品制备:选取未优化传统模具、材料改性优化模具(WC颗粒增强钢基复合材料)、表面处理优化模具(TiAlN涂层)、结构优化模具(仿生流道)4类方案,制备尺寸统一(100mm×50mm×10mm)的模具试样,确保试样表面粗糙度一致( $R_a = 0.8\mu\text{m}$ ),消除基础差异对实验结果的影响。(2) 磨损测试平台搭建:搭建高温高压磨损测试平台,模拟PVC/PE成型时180-200°C温度、15-25MPa压力工况,采用聚合物熔体循环冲刷试样表面的测试方式,设定冲刷速度80mm/s、测试时长20h,贴合

模具实际工作状态。(3)性能表征方法:采用维氏硬度计测试试样表面硬度;通过高温摩擦磨损试验机测定摩擦系数;采用失重法计算磨损率,结合扫描电子显微镜观察磨损表面微观形貌,全面表征耐磨性能。

### 3.2 结果对比分析

(1)不同优化方案的耐磨性能排序:实验结果显示,耐磨性能从优到劣排序为:TiAlN涂层表面处理方案>WC颗粒增强材料改性方案>仿生流道结构优化方案>未优化方案,其中TiAlN涂层试样磨损率较未优化试样降低62%。(2)磨损表面微观形貌与机制关联分析:未优化试样表面可见明显犁沟和黏附剥落坑,以黏着磨损和磨粒磨损为主;TiAlN涂层试样表面仅存在轻微划痕,涂层有效阻隔了熔体与基体的直接摩擦,显著抑制磨损机制的发生。(3)成本-效益综合评估:结构优化方案成本最低(较传统模具增加5%),但耐磨提升效果有限;TiAlN涂层方案成本增加20%,但耐磨寿命延长2.3倍,单位产品模具损耗成本最低,综合效益最优。

### 3.3 仿真模拟验证

(1)有限元分析(FEM)模拟磨损过程:基于ABAQUS软件建立磨损仿真模型,输入实验工况参数,模拟熔体冲刷下试样的应力分布和磨粒量演变,得到不同方案的磨损寿命预测曲线。(2)模拟结果与实验数据的误差分析:仿真预测的磨损率与实验测试值误差在5%~8%范围内,误差主要源于仿真中未完全考虑熔体黏附特性的动态变化。整体而言,仿真模型可准确反映不同优化方案的耐磨性能差异,为优化方案的有效性提供补充验证。

## 4 PVC/PE给水管模具耐磨优化方案落地工程应用实践与产业化建议

### 4.1 优化方案的工业化适配性

(1)模具制造工艺调整:针对表面涂层类优化方案,工业化生产中需调整前处理工艺,通过喷砂粗化(粗糙度Ra=1.5~2.0 $\mu$ m)提升基体与涂层结合力,同时严格控制PVD镀膜温度与时间,避免高温导致模具变形;对材料改性方案,需优化复合材料熔炼与锻造工艺,确保增强颗粒均匀分布,适配现有模具加工设备精度要求。(2)生产线兼容性分析:结构优化与工艺参数优化方案无需改动现有挤出成型设备,仅需模具更换和参数调试即可适配;改性及表面处理后的模具尺寸精度达标,可直接装机,兼容性良好,降低企业产业化改造门槛。

### 4.2 长期使用性能监测

(1)现场试验数据采集:在产业化试点生产线设置监测点,每生产5000件产品对模具关键部位进行磨粒量检测,记录不同生产周期下的磨损数据、成型产品尺寸精度变化,建立磨损数据库,为性能评估提供现场数据支撑。(2)维护周期预测模型建立:基于现场监测数据,结合前期实验与仿真结果,构建模具磨粒量与生产周期的关联模型,预测不同优化方案模具的维护周期。通过模型提前预警模具磨损极限,避免因模具过度磨损导致产品报废,降低生产风险。

### 4.3 标准化与推广建议

(1)耐磨性能测试标准制定:牵头制定PVC/PE给水管模具耐磨性能测试规范,明确测试工况(温度、压力、熔体参数)、性能指标(磨损率、摩擦系数、使用寿命)及检测方法,统一行业评价标准,为优化方案的性能认定提供依据。(2)行业技术规范提案:结合产业化试点经验,向行业协会提交模具耐磨优化技术规范提案,涵盖材料选型、表面处理工艺参数、结构设计要求等内容。通过技术培训、案例推广等方式,推动优化方案在行业内普及,提升全行业模具使用寿命与生产效益。

### 结束语

通过对PVC/PE给水管模具耐磨性能的深入研究和优化实践,我们成功提出了一系列有效的改进措施,显著提升了模具的耐磨性能和使用寿命。这些优化方案不仅降低了生产成本,提高了生产效率,还为管道质量的稳定提升提供了有力保障。未来,我们将继续探索新的耐磨材料和工艺技术,不断优化模具设计,以适应更高标准的生产需求。同时,我们也期待与行业同仁共同推动相关标准的制定和完善,促进整个行业的持续健康发展。

### 参考文献

- [1]代宗坤.论塑料管材在我国的发展前景[J].中国房地产业,2021,(17):221-223.
- [2]陈勇,李统一,宋科明,王拴紧.聚氯乙烯管道行业发展中关键共性难题探讨[J].现代化工,2020,40(04):10-11.
- [3]俞明海.高层住宅中PVC排水管的应用[J].塑料工业,2021,47(09):154-156.
- [4]邱海宇.燃气用PE管道施工质量控制分析[J].中国住宅设施,2021,(09):86-87.