

注塑模具设计中的创新技术与优化策略

方贤能

(宁海县第一注塑模具有限公司, 浙江 宁波 315600)

摘要 注塑模具设计在塑料制品成型过程中承担结构确定与质量控制的核心任务, 传统设计路径多依赖经验判断与试模修正, 在复杂结构与多腔布局条件下易出现充模不均与周期延长问题。本文围绕上述情形, 结合数字化设计、模流分析与参数寻优方法, 对模具结构与工艺参数之间的匹配关系进行系统梳理, 并在浇注系统配置、冷却路径布置及仿真结果校核等环节展开技术整合, 以期向模具设计向精细化与工程化方向发展提供参考。结果表明, 通过流动路径计算与参数约束调整, 浇口位置、流道尺寸与冷却参数在设计阶段即可完成协同匹配, 试模修正频次明显下降, 成型稳定性与生产节拍得到同步强化。

关键词 注塑模具设计; 模流分析; 参数寻优; 冷却系统; 结构优化

中图分类号: TQ320.66

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.035

0 引言

复杂塑料制品在尺寸精度与外观一致性方面提出更高要求, 模具结构与成型行为之间的耦合关系随之凸显, 流动路径受限或温度分布不均时, 熔体前沿推进失稳与局部收缩差异容易叠加, 制品缺陷在成型阶段逐渐放大。传统设计依赖经验匹配结构尺寸与浇注方式, 在多腔或长流程条件下难以准确对应压力传递与热量扩散过程, 结构调整往往滞后于实际成型表现, 设计与生产之间存在偏差。设计活动逐步引入流动计算与参数约束后, 浇口布置、流道尺寸及冷却路径开始围绕材料特性与几何条件进行协同设定, 模具结构在构型阶段即具备一定的可校核性, 复杂条件下的成型稳定性由此获得更可靠的支撑。

1 传统注塑模具设计的局限性分析

1.1 经验主导下的结构设计偏差

传统注塑模具设计多依赖工程经验展开, 结构尺寸与分型方式多在既有案例基础上进行类比推断, 制品几何形态趋于复杂或壁厚分布出现明显不均时, 经验路径难以准确对应熔体在型腔内的实际流动状态, 设计初期即可能埋下充模不均与局部过压隐患^[1]。流道截面、浇口位置及排气结构如果没有结合压力场与温度场协同分析进行匹配, 熔接痕、气穴及短射现象在后续成型阶段逐步显现, 制品表面质量与尺寸精度同步受限, 结构调整呈现滞后特征。进一步来看, 多腔模具在分流道平衡控制不足时易出现充模不同步问

题, 各型腔压力差异逐渐放大, 成型收缩率难以统一, 进而影响批量生产的一致性与稳定性。

1.2 试模依赖下的周期与成本约束

在传统设计中, 模具结构合理性多依托试模结果反向修正, 初次开模后需根据充模状态与制品缺陷逐轮调整浇口尺寸、流道布局及冷却参数, 修模过程呈现多次迭代特征, 开发周期随之被持续拉长。反复试模过程中, 材料消耗、设备占用及人工投入不断累积, 当涉及大型模具或高精度零件时, 加工与调试成本同步上升, 同时生产节拍难以提前锁定, 模具投产节点存在不确定性。进一步分析可见, 试模阶段参数调整多依赖现场经验判断, 温度场与压力分布缺乏系统反馈支撑, 修模方向易出现反复修正路径, 致使资源投入与时间消耗呈递增趋势。

2 注塑模具设计中的创新技术

2.1 数字化设计与模流分析技术

数字化设计与模流分析直接嵌入模具结构确定过程, 围绕熔体在流道与型腔内的流动路径及压力分布展开计算, 在三维模型建立完成后即可对浇口位置与流道截面进行校核, 当流动距离与壁厚比值偏离合理区间时, 进料方式随之调整以保证充模连续性。熔体流动状态常以剪切速率进行刻画, 计算公式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

式(1)中, $\dot{\gamma}$ 表示剪切速率, Q 为体积流量, R 为流道半径, 该关系揭示流道尺寸与流量变化会直接影响

作者简介: 方贤能 (1974-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 模具设计开发。

熔体黏度与压力传递过程。结合计算结果对充模时间、型腔压力及熔体温度进行控制,充模时间多控制在0.5~3.0 s区间,最大注射压力宜限定在80~120 MPa范围,熔体温度维持在200~260 ℃区间,从而在设计阶段完成流动状态与结构参数的匹配。

流动状态完成量化后,结构调整转入浇注系统与排气路径的协同修正,型腔内压力峰值若集中于浇口区域,可通过扩大浇口截面或改变进料位置对压力分布进行重排,以降低局部过压风险,流动末端出现充填不足迹象时,需缩短流道长度或布置辅助进料点以增强熔体推进能力^[2]。排气结构在复杂型腔中承担关键作用,排气槽深度一般控制在0.02~0.04 mm区间,以保证气体顺利排出且不引发飞边,流道截面尺寸与剪切速率之间存在直接关联,局部截面过小容易引发黏度上升与流动阻力增加,因而需结合流量分布对截面尺寸进行匹配调整,结构参数在计算结果与成型需求之间形成对应关系。

2.2 智能优化与参数寻优技术

智能优化与参数寻优技术嵌入模具设计决策过程,围绕浇口位置、流道尺寸及冷却参数构建多变量协同分析路径,在模型参数初步设定后,借助遗传算法或粒子群算法对设计变量进行迭代筛选,当适应度函数以充模均匀性与压力波动为约束条件时,最优参数组合逐渐趋于稳定区间。参数寻优过程中,浇口截面尺寸与流动阻力呈反向关系,冷却水道间距通常控制在20~40 mm范围以保证温度场分布均衡,冷却时间多限定在8~20 s区间以压缩成型周期并避免内应力集中。伴随迭代过程推进,型腔内压力峰值与温度梯度同步得到校正,设计变量由离散调整转入连续优化状态,参数组合在多轮筛选后趋于收敛,从而在设计阶段形成相对稳定的结构参数方案。

2.3 模具结构创新与冷却技术

模具结构创新与冷却技术围绕热量传递路径与熔体输送过程同步调整,传统直线水道在复杂型腔中易形成局部热积聚,因而随形冷却结构逐步引入,冷却通道沿型腔曲面分布以缩短热扩散距离并稳定温度场^[3]。对于壁厚差异明显的制品,冷却回路常采用分区布置方式,局部强化冷却强度以削弱温度梯度波动,参数设定中,冷却水道直径一般控制在6~12 mm范围,水道间距多取15~25 mm,冷却介质流速维持在0.5~1.5 m/s区间以保证换热过程连续,同时热流道结构逐步替代传统冷流道,熔体在输送过程中保持熔融状态,温降幅度得到控制,流动前沿稳定性随之增强,压力

损失与充模均匀性在设计阶段可被预判与评估,结构与冷却路径在协同调整中逐渐形成稳定匹配关系。

冷却结构进一步细化过程中,冷却回路形式对温度场分布具有直接影响,并联式回路有利于维持各区域冷却强度一致,适用于多腔或对称结构布置,串联式回路易形成沿程温差,在局部强化冷却需求较高区域可作为辅助配置。随形冷却通道与型腔表面距离通常控制在8~12 mm区间,以保证热量能够在较短路径内导出,同时避免对模具结构强度产生削弱,针对局部高温积聚区域,可借助嵌入高导热铜合金镶件形成快速导热通道,热量沿镶件路径向冷却回路传递,从而降低局部温度峰值。热流道系统中喷嘴类型选择同样影响熔体温度稳定性,针阀式结构有利于控制进料节奏并减少拉丝现象,点浇口形式更适用于小型制品的快速充填,冷却结构与流道形式在组合配置过程中形成对应关系。

2.4 绿色制造导向的模具设计技术

绿色制造导向下的模具设计围绕材料利用率与能耗控制同步展开,在结构设计阶段就对流道形式与冷却路径进行约束,传统冷流道体系在成型过程中会形成浇口凝料,材料需经过二次回收处理方可再利用,工序链条随之拉长,热流道结构引入后,熔体在输送过程中保持熔融状态,凝料不再产生,材料利用率得到提高,同时修边与回收环节明显减少^[4]。冷却系统作为能耗集中环节,参数设定直接影响设备负荷,冷却水温差通常控制在5~10 ℃区间以维持稳定传热条件,循环水流速多取0.8~1.5 m/s以增强对流换热能力,成型周期中冷却时间占比宜控制在60%以内以压缩能源消耗。针对局部热积聚区域,常结合高导热模具钢或镶件结构进行强化处理,热量在关键区域快速导出,型腔温度分布逐步趋于均衡,制品收缩差异得到控制。

3 注塑模具设计的优化策略

3.1 匹配材料特性,优化初始结构

初始结构设计围绕材料流动性与收缩行为展开匹配,选用PP、ABS等热塑性材料时,收缩率通常分布在0.5%~2.5%区间,型腔尺寸需依此预留补偿量,以避免冷却后尺寸偏差累积^[5]。针对壁厚变化明显的制品,流动距离与壁厚比值需控制在合理范围内,过高比值易导致充模末端压力衰减,由此需在结构布置中调整浇口位置或增设辅助进料点以维持熔体前沿推进稳定。分型面与型芯布局也需结合材料冷却收缩路径进行协同设定,避免局部收缩受限引发内应力集中,

在此基础上对流道截面尺寸进行初步匹配,常将主流道直径控制在 4~8 mm 范围以平衡流动阻力与充模速度,结构参数在设计阶段即完成与材料性能的对应关系校正。

3.2 优化浇注系统,协同冷却设计

浇注系统调整需与冷却路径同步配置,结构初步匹配完成后,浇口位置与流道布局需优先校正以均衡充模过程,制品呈长流程或多腔分布时,进料位置宜向中心或对称区域转移,流道长度随之压缩以降低压力衰减。分流道截面尺寸通常控制在主流道的 0.6~0.8 倍范围,以维持流速连续并减少局部滞流区,同时结合冷却系统进行协同布置,冷却水道间距多取 15~25 mm 以覆盖主要热积聚区域,流速维持在 0.5~1.5 m/s 区间以保证换热过程稳定。

浇注路径与冷却回路之间需进一步进行匹配调整,流道截面尺寸变化会直接影响熔体流速分布,局部流速过高易引发剪切升温现象,从而改变冷却负荷分布,因此在分流道设计过程中需结合温度场分布对截面尺寸进行修正。多腔模具中,分流道长度与分支位置宜保持对称,以减小各型腔之间的充模时间差异,型腔间压力波动由此得到控制。壁厚变化明显区域往往成为热积聚集中位置,冷却回路可结合结构特征进行局部加密或调整走向,以削弱温度梯度引发的收缩差异,在此过程中浇注路径与冷却分布形成联动关系,熔体充填过程与热量释放路径在结构调整中逐渐形成匹配关系。

3.3 验证仿真结果,修正设计参数

仿真结果在结构优化完成后进入校核环节,围绕充模时间、型腔压力及温度分布进行对比分析,流动前沿推进不均或局部压力峰值偏高时,需针对性调整浇口尺寸与注射参数以削弱波动影响。充模时间通常控制在 0.5~3.0 s 区间,如果末端区域出现短射趋势,可适当提高注射速度或扩大浇口截面以增强流动能力,型腔内最大压力宜限定在 80~120 MPa 范围,压力集中于局部区域时,流道截面需重新匹配以分散负载。仿真判读过程中,压力峰值位置与流动路径之间的偏差可作为结构修正依据,进料方向与分流道布局需同步调整以保证压力传递连续性。

温度场分布作为冷却策略修正的重要依据,熔体温度多维持在 200~260 °C 区间,局部降温过快易引发收缩不均,冷却水道布局需进行局部强化或延长冷却时间以平衡温度梯度。温度梯度超过 10~15 °C 区间时,热积聚区域需重点修正,冷却路径与结构尺寸

在调整过程中形成联动关系,参数修正通常依托多轮仿真结果进行反复比对,结构尺寸与工艺参数在持续校核中逐渐形成稳定匹配状态,仿真分析与设计方案之间保持动态对应关系。

3.4 控制成本投入,提升生产效率

成本控制与生产效率需在结构与工艺参数匹配基础上同步展开,在前序设计已完成流道与冷却协同配置后,进一步压缩成型周期成为关键环节。当冷却时间占比过高时,可结合型腔温度分布调整冷却水道布局或提高循环水流速,通常将流速控制在 0.8~1.5 m/s 区间以增强换热效率^[6]。针对材料利用率问题,流道结构需进行精简处理,减少不必要的分流长度或采用热流道结构以削减凝料产生,从而降低原料消耗。在设备运行层面,注射压力与保压时间需进行匹配调整,最大注射压力宜控制在 80~120 MPa 范围,保压时间多限定在 3~8 s 区间以避免能耗累积。结构参数与工艺条件在调整过程中形成协同关系,生产节拍与资源投入在结构与参数匹配过程中形成稳定控制关系。

4 结束语

注塑模具设计由经验判断转入以参数约束为基础的结构匹配模式,流动行为与温度场分布在设计阶段即被纳入统一考量,浇注路径与冷却布局之间形成稳定对应关系,型腔内压力传递与热量释放保持连续状态。在复杂结构条件下,关键参数在建模阶段完成校核与调整,试模阶段的反复修正频次明显降低,资源投入与开发周期得到压缩。结构尺寸与工艺参数在多轮比对中形成稳定匹配,成型过程中的收缩差异与尺寸波动被控制在合理范围,模具运行节拍与产品质量保持一致,注塑模具设计在工程实践中呈现出更高的确定性与适配能力。

参考文献:

- [1] 郑贝贝,任建平.基于增材制造的随形冷却水路注塑模具技术研究进展[J].塑料工业,2025,53(12):7-14.
- [2] 杨磊.模具工业发展现状及注塑模具新工艺和新技术[J].南方农机,2021,52(14):135-137,143.
- [3] 叶真铭,唐臣升,王韬,等.基于模具技术的复合材料壁板制造工艺研究[J].工具技术,2023,57(04):123-127.
- [4] 王媛,杨晶,孙然.基于CAD/CAE技术的复杂面板注塑模具设计研究[J].科技资讯,2023,21(21):100-104.
- [5] 李祥伟.注塑模具数字化设计与智能制造技术研究[J].现代制造技术与装备,2022,58(07):176-179.
- [6] 李国辉,顾吉仁.基于CAD技术的注塑模具设计与仿真研究:评《模具设计基础》[J].铸造,2021,70(09):1138.