

基于数值模拟的注塑模具浇口优化设计及成型缺陷控制研究

刘聪慧

漯河技师学院，河南 漯河 462300

DOI:10.61369/ME.2025100029

摘要：注塑模具浇口设计是决定塑件成型质量与生产效率的核心环节，也是中职模具设计与制造专业的核心教学内容。本文以中职模具设计与制造专业教学需求为导向，以理论体系构建为核心，系统梳理注塑模具浇口设计的基础理论，阐释数值模拟技术在注塑成型中的应用原理，构建基于数值模拟的浇口优化设计理论框架，提出基于浇口优化的控制策略。

关键词：注塑模具；浇口优化；数值模拟；成型缺陷控制

Research on Optimization Design of Injection Mould Gate and Control of Forming Defects Based on Numerical Simulation

Liu Conghui

Luohe Technician College, Luohe, Henan 462300

Abstract : Injection mold gate design is the core link to determine the molding quality and production efficiency of plastic parts, and it is also the core teaching content of mold design and manufacturing specialty in secondary vocational schools. Guided by the teaching needs of mold design and manufacturing specialty in secondary vocational schools, this paper systematically combs the basic theory of injection mold gate design, explains the application principle of numerical simulation technology in injection molding, constructs the theoretical framework of gate optimization design based on numerical simulation, and puts forward the control strategy based on gate optimization.

Keywords : injection mold; gate optimization; numerical simulation; forming defect control

引言

注塑模具作为注塑成型的关键装备，其设计水平直接决定塑件的尺寸精度、力学性能与表面质量。浇口作为模具中熔体进入型腔的唯一通道，其设计参数直接主导熔体在型腔内的流动状态、压力传递、温度分布与冷却收缩过程，进而对塑件质量产生决定性影响。构建基于数值模拟的浇口优化设计与缺陷控制理论体系，不仅能完善中职模具专业理论教学内容，更能培养学生的科学思维与创新能力，契合中职教育“夯实基础、强化能力”的人才培养理念，对提升教学质量与学生职业竞争力具有重要意义。

一、注塑模具浇口设计基础理论体系

（一）浇口的结构类型与设计原则

浇口作为熔体填充型腔的关键功能部件，其结构类型的划分依据主要包括进料方式、开设位置、结构形态及加工工艺特性。工业领域常用的核心类别包括直浇口直接与主流道连接，具有流程短、压力损失小、进料效率高的优势；侧浇口开设于模具分型面，结构简单、加工便捷、凝料易切除，应用最为广泛；点浇口以细小圆形截面进料，隐蔽性强，能保障塑件外观完整性；潜伏式浇口开设于模具运动部件，可实现凝料自动脱落，适配自动化生产；此外还有扇形、薄膜、环形等特殊类型浇口，用于解决特殊结构塑件的填充难题。各类浇口的结构特征决定其适用场景与

技术优势，是设计选型的基础理论依据^[1]。

浇口设计需遵循“质量优先、兼顾效率、结构适配、生产可行”的核心原则，填充均匀性原则要求熔体快速均匀填充型腔，避免流动死角与填充不平衡；压力传递有效性原则确保注射压力有效传递至型腔各部位，减少压力损失；应力最小化原则通过合理设计降低熔体流动产生的剪切应力与残余应力，减少塑件变形风险；凝料处理便捷性原则保证凝料易于切除且不影响塑件质量；结构适配性原则要求浇口设计与塑件、模具结构及成型工艺参数协同适配，保障模具整体合理性与生产稳定性。这些原则相互关联制约，共同构成浇口设计的理论基础。

（二）浇口设计核心参数与影响因素

浇口设计的核心参数包括位置、尺寸、数量三大关键要素，

各参数设定均需基于熔体流动规律、材料特性与成型质量要求，浇口位置需避开薄壁、应力集中与外观关键区域，优先选择厚壁或型腔几何中心区域，以实现压力传递效率最大化与填充均匀性最优化；浇口尺寸基于流体力学原理设定，需确保熔体快速填充且避免剪切速率过高导致的熔体降解，尺寸参数与熔体粘度、流动阻力、压力损失呈非线性相关；浇口数量根据型腔复杂度与塑件尺寸确定，单腔模具以单浇口为主，复杂型腔或大型塑件可采用多浇口设计，需满足熔体同步填充、压力均衡传递要求，避免多股熔体汇合冲击与熔接缺陷^[2]。

浇口设计需综合考虑多方面影响因素，其中塑件材料特性是核心，流动性差的材料需采用短流程、大尺寸浇口，结晶性材料需考虑结晶收缩要求；成型工艺参数与浇口设计参数相互适配，注射压力、熔体温度、模具温度等需与浇口尺寸、位置协同，保障成型稳定性；模具结构特征中，型腔布局决定浇口整体布局，冷却系统分布影响熔体冷却收缩规律，排气结构设计需与浇口位置协同，确保型腔气体顺利排出。

（三）中职浇口设计教学的理论教学现状与痛点

当前中职模具专业浇口设计教学存在显著问题，即教学内容碎片化，缺乏系统性理论体系支撑，以传统经验公式与典型结构介绍为主，对设计原理、参数关联与影响因素作用机制阐释不足，且与现代数值模拟技术、智能化设计方法脱节，理论知识与企业实际需求存在差距；理论教学与实践训练协同性不足，二者内容缺乏系统性衔接，实操训练以简单模具装配调试为主，缺乏理论验证与应用环节，教学评价体系侧重理论考试与实操技能考核，忽视对学生理论应用能力与科学思维的培养，导致学生重记忆轻理解、重操作轻思考。

二、数值模拟技术在注塑成型中的应用原理与教学适配

（一）数值模拟技术的核心原理与数学模型

数值模拟技术基于计算流体力学、传热学、弹塑性力学等多学科理论，通过计算机仿真实现注塑成型全过程虚拟再现。其核心原理是将熔体流动、传热、冷却、收缩、翘曲等复杂物理现象转化为可求解的数学模型，通过离散化方法求解，获取流动速度、压力分布、温度场、应力场等关键物理参数，实现成型过程可视化预测与优化设计。该技术突破传统试错法局限，能在模具制造与试模前验证优化设计方案，提升设计科学性与精准性，降低开发成本与周期。

数值模拟的关键数学模型包括流动模型基于质量守恒、动量守恒与能量守恒定律，采用 Hele—Shaw 流动模型描述熔体粘性流动行为，通过求解 Navier—Stokes 方程获取流动相关参数；传热模型基于傅里叶定律，建立熔体与模具间热传导、对流换热模型，描述温度场变化规律，为冷却优化与收缩变形预测提供依据^[3]；收缩与翘曲模型结合材料热收缩、结晶收缩特性与力学性能参数，通过求解应力平衡方程，预测塑件变形趋势与尺寸误差；粘度模型采用 Cross、Power—Law 等非线性模型，描述熔

体粘度随剪切速率、温度、压力的变化规律，为流动模型求解提供关键材料参数。这些模型相互耦合，构成数值模拟技术的理论基础。

（二）数值模拟技术在浇口设计中的应用逻辑

数值模拟技术在浇口设计中的核心应用逻辑包括浇口设计方案的模拟验证，通过流动模拟分析填充均匀性与流动前沿稳定性，压力模拟分析压力分布与损失情况，温度场模拟分析温度分布均匀性，应力场模拟分析残余应力分布，通过量化数据判断初始设计方案可行性，识别潜在缺陷；浇口设计参数的优化迭代，基于“参数调整—模拟分析—结果评价—迭代优化”的闭环流程，针对初始设计问题明确优化目标，调整浇口核心参数形成多组方案，通过全流程模拟获取指标数据，建立量化评价体系进行综合评价，筛选最优方案；成型缺陷的预测与诊断，基于模拟输出的关键物理参数，建立缺陷与参数的关联模型，通过分析参数异常区域预判缺陷类型与位置，追溯缺陷根本成因，提出针对性优化方向，实现“预测—诊断—优化”的闭环控制。

（三）数值模拟技术与中职教学的适配性理论

数值模拟技术与中职模具专业教学目标高度契合。中职教育以培养技能型、应用型人才为核心，数值模拟技术学习能帮助学生掌握现代模具设计核心工具，提升职业技能前沿性与实用性；能培养学生科学思维、数据分析能力与问题解决能力，契合“夯实基础、强化能力”的人才培养理念。

数值模拟技术与中职教学内容具有良好适配性，其基础原理与浇口设计、成型工艺、缺陷控制等核心教学内容高度关联，能为理论教学提供可视化、量化支撑，降低抽象理论理解难度；应用流程与企业实际设计流程一致，可将企业设计标准、流程规范融入教学，提升教学实用性与针对性；可根据中职学生认知水平，对教学内容进行模块化拆分，重点讲解基础原理、操作流程与结果分析，简化复杂理论推导与数学建模过程，确保教学内容可接受性。

数值模拟技术为中职教学方法创新提供有效路径，通过软件可视化功能，将抽象物理过程转化为具象图形、动画，可采用“演示—讲解—实操”教学方法，提升学生学习兴趣与理解效果；基于该技术可构建“理论学习—模拟练习—问题分析—优化设计”的项目式教学模式，以设计任务为载体培养学生综合应用能力；支持多方案对比分析，可采用“分组讨论—方案设计—模拟验证—成果展示”的互动式教学方法，激发学生主动性与创造性。

三、基于数值模拟的浇口优化设计框架与成型缺陷控制策略

（一）基于数值模拟的浇口优化设计理论框架

基于数值模拟的浇口优化设计目标体系以成型质量最优、生产效率最高、成本最低为核向导，构建多维度量化目标体系：成型质量目标包括填充均匀性、压力传递有效性、温度分布合理性、残余应力最小化、成型缺陷发生率为零等，各指标设定明确

量化标准；生产效率目标包括填充时间最短、冷却时间最优、生产周期最短等，满足批量生产效率要求；成本控制目标包括模具制造成本最低、试模成本最低、材料消耗最少等，在保证质量与效率的前提下实现成本最优化。各目标相互关联制约，需通过多目标优化算法实现综合平衡。

优化设计流程体系遵循“前期准备—模型建立—模拟分析—优化迭代—方案确定”的逻辑流程，前期准备阶段明确设计要求、收集材料参数、确定工艺范围；模型建立阶段构建塑件、型腔与浇注系统模型，进行网格划分与质量检查；模拟分析阶段设置初始浇口方案与工艺参数，进行填充、冷却、翘曲等全流程模拟，获取关键性能指标数据；优化迭代阶段基于模拟结果识别设计问题，调整浇口参数并进行多轮模拟迭代与方案对比；方案确定阶段基于量化评价体系筛选最优方案，输出最终设计与工艺参数^[4]。

优化设计评价体系采用量化与定性评价相结合的方式，构建科学全面的指标体系，量化指标包括填充时间、压力损失、温度梯度、残余应力值、翘曲变形量等，设定明确评价标准与权重；定性指标包括浇口加工可行性、凝料处理便捷性、模具结构复杂性等，采用专家打分法评价；采用加权综合评价法计算各方案综合得分，实现科学排序与最优选择，确保评价结果客观合理。

（二）注塑成型常见缺陷的成因理论分析

填充类缺陷的核心成因包括浇口设计参数不合理，位置不当导致流动路径过长，尺寸过小导致流动阻力过大，数量不足导致填充不平衡；熔体流动性不足，受材料特性、熔体温度、模具温度影响，粘度过高增加流动阻力；注射压力与速度不足，无法为熔体流动提供足够动力，导致熔体凝固过快；型腔排气不畅，填充过程中气体形成背压阻碍熔体流动。

表面与内部质量缺陷的成因主要有压力传递不足，浇口设计不合理或注射压力不足导致型腔末端压力过低，熔体冷却收缩无法充分补缩；温度分布不均，浇口位置不当或冷却系统设计不合理导致温度梯度过大；熔体降解，浇口尺寸过小或注射速度过快导致剪切速率过高；多浇口填充时熔体汇合温度过低，导致熔接痕强度不足、外观明显。

尺寸精度与变形缺陷的核心成因包括残余应力分布不均，浇口设计不合理导致剪切应力分布不均，冷却过程形成不均匀残余应力；冷却收缩不均匀，浇口参数影响熔体填充与冷却顺序，导致各部位收缩速率差异过大；材料结晶不均匀，浇口设计影响温度场与压力场，进而影响结晶度与结晶形态均匀性；模具结构影响，浇口设计与型腔精度、冷却系统、顶出系统等参数不匹配。

（三）基于浇口优化的成型缺陷控制策略

针对填充类缺陷，控制策略核心是通过数值模拟调整浇口参数改善熔体流动状态，即优化浇口位置，选择流动路径最短、压力传递最有效的位置，避免流动死角；优化浇口尺寸，降低流动阻力，确保熔体充足流动速度与填充动力；优化浇口数量，复杂型腔采用多浇口设计平衡填充效果；协同优化注射压力、速度、熔体温度等工艺参数，为熔体流动提供充足动力。

针对表面与内部质量缺陷，控制策略重点通过浇口优化改善压力传递与温度分布，即优化浇口位置与尺寸，确保型腔压力均匀，为冷却收缩提供充分补缩；控制浇口处剪切速率，避免熔体降解；优化多浇口布局，确保熔体汇合时温度与压力均衡，提升熔接痕强度；协同调整冷却水道布局，平衡型腔温度分布。

针对尺寸精度与变形缺陷，控制策略核心是通过浇口优化减少残余应力与冷却收缩不均，即优化浇口位置与数量，调整熔体填充顺序，实现均匀填充与冷却，减少应力集中；优化浇口尺寸，控制流动速度与剪切应力，降低残余应力；通过浇口优化使各部位冷却收缩速率趋于一致；协同优化顶出位置与速度，避免脱模附加应力。

四、结论

本文立足中职模具设计与制造专业教学需求，构建了基于数值模拟的注塑模具浇口优化设计及成型缺陷控制理论体系。通过系统梳理浇口设计基础理论，阐释数值模拟技术的应用原理，建立浇口优化设计的理论框架与成型缺陷控制的系统策略，为中职院校相关专业理论教学提供了系统性参考。

参考文献

- [1] 郑跃刚, 黄寅. 汽车刹车泵体注塑模具优化设计 [J]. 现代塑料加工应用, 2024(03):35-39.
- [2] 贺晓辉, 丁永峰, 邓先峰. 基于正交试验的薄壁塑件注塑模拟及工艺优化 [J]. 塑料, 2023(06):164-167+178.
- [3] 刘青宜, 郭潭娜, 王宁. 基于 Moldflow 电机外壳注塑成型质量分析 [J]. 塑料科技, 2023(11):80-84.
- [4] 董伟勋, 王先保, 潘旭, 李征驰, 林权. 遥控器面壳注射成型模具设计及数值模拟 [J]. 河南科技, 2023(22):42-48.