冲压模具设计中的工艺布局优化策略探析

王 飞 王嘉伟 冯凯轩 赵睿卿
陕西黄河工模具有限公司 陕西 西安 710043

摘 要：冲压模具是制造业中应用最为广泛的工艺装备之一，其设计水平直接决定零件质量、生产效率及制造成本。工艺布局作为模具设计的核心环节，涉及冲裁、弯曲、拉深、成形等工序的空间排布与顺序安排，对材料利用率、模具结构复杂度、冲压精度及模具寿命均有深远影响。本文从工艺布局的基本概念与评估维度出发，系统分析工序顺序安排、工位间距确定、冲压力中心计算及导向结构配置等关键要素，揭示当前布局设计中存在的工序冗余、力能失衡、废料排布不合理等典型问题。在此基础上，从工序合并与分解策略、条料排样优化、多工位级进模布局规划、弯曲与拉深工序的特殊处理，以及基于特征的模块化布局设计等角度，提出系统化的工艺布局优化策略。研究旨在为冲压模具设计人员提供理论性、系统性的布局方法参考。

关键词：冲压模具；工艺布局；条料排样；工序安排；级进模；优化设计

引言

冲压加工因高效、高精度及高材料利用率，在汽车、电子等领域地位关键。汽车车身超70%金属零件由冲压制成，其品质高度依赖模具，而工艺布局作为模具设计的核心环节，直接决定开发周期、成本及故障率。然而，实际设计中常将工艺布局简化为工序罗列，依赖经验试错，缺乏系统性优化与定量比较，忽视工序耦合关系，导致方案非最优。面对零件复杂化、精密化趋势，传统方法已难以满足现代生产需求。本文立足系统优化视角，深入剖析工艺布局的多维度影响因素，提出涵盖排样、工序安排、力能平衡及结构协调的优化策略体系，旨在解决现有设计缺陷，为模具设计实践提供科学的方法指引，以提升生产效率与产品质量。

1 冲压模具工艺布局的基本内涵与评估维度

1.1 工艺布局的概念界定

冲压模具工艺布局，是指在模具设计阶段，根据冲压件的几何形状、尺寸精度、材料性能及生产批量，确定各冲压工序（冲裁、弯曲、拉深、翻边、整形等）的先后顺序、空间位置、工位间距及相互配合关系的总体安排。它既是工艺方案的几何映射，又是模具结构的拓扑基础。在单工序模中，工艺布局主要表现为模芯在模具平面上的位置分配和进料方向的确定；在复合模和级进模中，工艺布局则涉及多个工位的有序排布和工序间送进路径的规划。

1.2 工艺布局的核心评估维度

评价一个工艺布局方案的优劣，应从以下维度进行综合考量：材料利用率—— 条料或带料在排样中的实际利用比例，是衡量经济性的首要指标，直接决定单件材料成本；模具结构复杂度—— 布局直接影响凸模、凹模、卸料板、导料机构的结构形式和加工难度，复杂度越高，制造和装配成本越大，故障点也越多；冲压精度—— 工序顺序和工位定位精度影响零件的尺寸公差和形位公差，尤其是在多工位级进模中，累积定位误差需严格控制；模具寿命—— 不均匀的冲裁力分布会导致偏载和局部磨损加剧，减少模具大修周期；操作安全性—— 废料排出顺畅性、自动送料可行性和人工操作便利性均与布局密切相关。一个优秀的布局方案应在这些维度间取得最优平衡，而非片面追求某一单项指标。

2 工艺布局设计的关键要素及其约束条件

2.1 工序顺序的逻辑确定

工序顺序是工艺布局的首要决策变量。一般遵循“先冲裁后成形、先粗加工后精修整、先拉深后切边”的原则。具体而言，平面坯料的外形和内孔冲裁应在弯曲或拉深之前完成，以免成形后定位困难；弯曲工序应考虑回弹补偿和纤维方向对弯裂的影响，通常将弯曲线与材料轧制方向成一定角度；拉深工序需根据拉深系数确定是否采用多次拉深，并在各次拉深之间安排必要的退火或中间整形工序；翻边、压筋、压印等局部成形应安排在主要成形工序之后[1]。更为复杂的情况是工序之间存在“干涉效应”—— 例如先弯曲后冲孔可能导致孔位变形，而先冲孔后弯曲可能使孔发生拉伸畸变，需要在顺序决策中进行权衡取舍。

2.2 工位间距与步距的确定

在级进模中，工位间距（即送进步距）是工艺布局的基本几何参数。步距的确定受三方面约束：一是相邻工位间必须留有足够的凹模壁厚，确保凸凹模结构强

度；二是条料在工位间移动时需要有可靠的导正销或导正孔进行精确定位；三是废料连接桥（即搭边）的宽度必须满足强度和刚度要求，保证条料在连续送进中不撕裂。步距过大则会降低材料利用率并增大模具外形尺寸，步距过小则削弱模具强度。最优步距应在“最小允许壁厚”与“最大允许搭边”之间求取，同时兼顾凸模固定方式和卸料板导向孔布置的便利性。

2.3 冲压力中心与模具几何中心的协调

冲压力中心（即所有冲压工序合力的作用点）应尽可能接近模具的几何中心，并与压力机的滑块中心轴线重合。若冲压力中心严重偏离模具中心，将产生偏载力矩，导致导向件偏磨、凸模承受附加弯曲应力、凹模刃口一侧过度磨损，严重时造成模具损坏或冲压件精度一致性下降[2]。在工艺布局中，通过调整对称工位的布置、将大冲裁力工序置于中心区域、或增设空工位来平衡力系，使压力中心的偏移量控制在允许范围（通常不超过模具外形尺寸的5%~8%）。

2.4 送料方向与废料排出方向

送料方向的选择决定了条料的纤维方向与零件受力方向的关系，并影响自动送料装置的布置便利性。废料排出的顺畅性对连续冲压至关重要—— 冲孔废料应能自由下落或通过废料切刀分段切断后排出，外形冲裁废料则应设计为从侧面滑出或利用重力自然脱落。工艺布局时必须为每条废料路径预留足够的空间，避免废料堆积堵塞。

3 当前工艺布局设计中的典型问题剖析

3.1 排样效率低下与材料浪费

条料排样是工艺布局的先导工作，但实践中常出现排样方案粗放的问题。主要表现为：搭边值选取偏大（超出最小工艺要求）、零件在条料上的转角未做优化（未选择最优排样角度）、单排与多排方案未经比选、对合排或交错排等高效排样方式应用不足。这些问题的累积效应是材料利用率偏低—— 不少企业的冲压件材料利用率仅达60%~70%，而经过精细排样的同类件可达80%以上，材料成本差异显著。

3.2 工序耦合不足导致的干涉与返工

工序之间并非孤立存在，而是存在复杂的力-热-变形耦合关系。例如，局部压印或刻字产生的残余应力可能诱发后续工序中工件的翘曲变形；过早冲制的定位孔在后续拉深过程中可能被拉变形而失去定位精度；相邻工位的冲裁振动相互叠加可能引发条料跳动。如果布局设计时未充分识别这些耦合效应，往往在模具试冲阶段才发现干涉问题，不得不修改布局，造成周期延误和费用增加。

3.3 复杂零件多工位级进模的布局失当

对于形状复杂、精度要求高的冲压件，多工位级进模的工位数可多达十几个甚至二十余个。工位数过多时，若布局不合理，将导致模具过长，超出压力机工作台面尺寸；同时定位误差随工位数累积，末端工位的精度难以保证。部分设计盲目增加空工位以“预留调整余量”，却忽视了空工位带来的精度损失和模具刚度下降。此外，复杂弯曲件的展开毛坯形状与弯曲工序的先后次序若布局不当，易造成弯曲干涉或回弹无法补偿。

3.4 调试困难与维护不便

部分布局方案理论上可行，但忽视了实际制造和调试的可行性。例如，内部工位的凸模更换需要拆卸多层板件；凹模镶块被其他结构件遮挡，刃磨时需整体拆模；刃口磨损后无法单独更换，必须重制整个模块。这些“后知后觉”的设计缺陷，根源在于布局阶段未充分考虑模具的可装配性和可维护性，将布局问题与结构问题割裂对待。

4 工艺布局的系统化优化策略

4.1 排样方案的精细化优化

排样优化应从零件展开图形的几何特征入手。首先计算零件的最小包围矩形和最佳排样角度—— 对于非旋转对称零件，通过旋转一定角度可显著减少搭边面积；其次，比较单排、双排、对合排和交错排等多种方案的料宽和步距组合，以材料利用率为首要筛选指标，同时兼顾模具宽度对压力机吨位的适应性；再次，在搭边设计中，采用“最小搭边+局部加强”策略—— 仅在必要时增加搭边连接强度，其他区域取最小工艺值[3]。对于大批量生产，可考虑采用斜排或混合排样，将不同形状的零件共线排布，最大化利用条料面积。建议在CAD环境中建立排样数据库，积累各类典型零件的排样参数，减少重复计算。

4.2 工序合并与分解的合理决策

工序合并（将多个成形动作集成于同一工位）与工序分解（将一个复杂成形分解为多个简单工步）是布局优化的核心策略。合并的优势在于缩短模具长度、减少工位数量、提高定位一致性，但代价是凸模结构复杂化、局部强度下降。分解的优势在于各工步受力单纯、模具零件制造简单，但工位增多导致累积误差和模具成本上升。决策原则是：对于小批量、多品种生产，偏向合并以简化模具结构；对于大批量高速冲压，偏向分解以提高模具寿命和维修便利性。具体到弯曲件，若弯曲角度大、材料回弹显著，应采用“预弯—校正弯曲”的

分步策略；若弯曲半径小、弯裂风险高，则需增加“切口—弯曲—整形”的多步工艺。

4.3 多工位级进模的均衡布局策略

多工位级进模布局应遵循“对称、均衡、短链”原则。首先在宏观上，将冲裁工位（产生较大冲裁力）布置在模具中心区域的两侧对称位置，使合力中心与模具中心尽量重合；拉深和成形工位安排在模具中后部，利用前序冲裁产生的废料孔进行导正；对于精度要求最高的工序（如最终外形切边），应尽量靠近模具末端，以减少后续工序对已成形精度的干扰。其次，合理设置空工位—— 只在确实需要安装导正销、设置侧刃或进行废料切断的位置安排空工位，避免随意增加。再次，在模具总长度受限时，优先保证关键成形工位的间距和壁厚，可适度压缩辅助工位间距或采用重叠布局（同一区域内上下行程完成不同工序）。

4.4 弯曲与拉深工序布局的特殊处理

弯曲工序的布局需重点考虑回弹方向和纤维方向。将弯曲凸模的圆角中心与材料轧制方向成45°布置，可降低弯裂风险；对于U形和V形弯曲，应使弯曲后的回弹方向具有对称性，便于后续校正。拉深工序的布局则应关注压边圈的作用范围—— 矩形盒形件的转角区域需要较大压边力，应布置较强的弹簧或氮气弹簧，且压边力作用点应均匀分布在拉深筋外侧[4]。多次拉深时，各次拉深的凸模轮廓应依次递减，且每次拉深后的半成品应有足够的搭边用于定位，布局中需为中间定位留出空间。此外，弯曲和拉深工位附近应避免布置大冲裁力工序，以免振动干扰成形质量。

4.5 基于特征的模块化布局方法

对于具有相似特征族的冲压件（如带凸缘的圆筒件、带孔的法兰件），可采用模块化布局策略。将常见的成形特征（冲孔、翻边、压筋、切角）封装为标准工艺模块，每种模块具有固定的力能参数和空间需求。布局时根据零件的特征组成，选用对应模块并按优先级排序，快速生成初始布局方案。模块化布局不仅能提高设计效率，还可促进工艺经验的知识沉淀和复用。同时，模块间的标准化接口（如定位方式、卸料结构、固定形式）使后期修改和局部优化更为灵活。

5 工艺布局优化的实施要点与评价方法

优化策略要落地，需要配套的实施流程和评价方法。建议将工艺布局设计划分为“概念布局—详细布局—校核验证”三个阶段。概念阶段完成排样方案和工序顺序的初步确定，进行2~3个候选方案的材料利用率和力能平衡估算；详细阶段完成工位间距尺寸、凸模固定方式和卸料结构设计，绘制详细的工位排布图；校核阶段采用有限元法或工程算法进行冲压力、弯曲回弹及模具变形验算，确认压力中心偏移量和模具刚度。在评价层面，引入综合评分法，将材料利用率、模具制造成本、预计寿命、维护便利性及冲压效率五项指标按权重赋分，对候选布局方案进行定量比较，以数据支撑决策，而非仅凭经验判断。

结束语

冲压模具工艺布局是多目标、多约束的复杂决策问题，涉及材料、力能、工序及结构等多维权衡。本文系统分析了工序顺序、工位间距等关键要素，揭示了排样低效、工序干涉等典型问题，并提出了涵盖排样精细优化、工序合并分解决策、多工位均衡布局及模块化设计等的优化策略体系，构建了从微观到宏观的方法论框架。需强调的是，布局优化应贯穿模具全生命周期，而非一次性任务。随着数值模拟、AI算法及三维平台的发展，工艺布局正由“经验驱动”向“数据驱动”转变。然而，无论技术如何进步，对冲压工艺本质的深刻理解及对多目标权衡的系统把握，始终是优秀布局设计不可替代的核心能力，旨在实现效率与质量的持续提升。

参考文献

[1]张正修,李新,王勇.冲压模具工艺排样优化设计的现状与发展趋势[J].锻压技术,2022,47(8):1-8.

[2]陈文刚,刘宇,赵亮.基于遗传算法的多工位级进模工位布局优化[J].模具工业,2023,49(3):15-21.

[3]杨振,王华,李明.冲压工艺布局中力心平衡计算与优化方法研究[J].中国机械工程,2024,35(6):1052-1059.

[4]赵海涛,孙伟,周丽.基于特征的冲压模具模块化设计方法[J].机械设计与制造,2023(11):275-279.