

# 多工位级进模在汽车零部件冲压中的应用与精度控制

张玲玲 程阿苗 王毅

陕西黄河工模具有限公司 陕西 西安 710043

**摘要:** 随着全球汽车产业向轻量化、高安全性及低成本方向快速发展,对汽车零部件制造工艺提出了更高要求。多工位级进模作为现代冲压成形技术中的核心装备,因其高效率、高自动化程度和优异的产品一致性,在汽车零部件生产中得到广泛应用。本文系统阐述了多工位级进模的基本结构、工作原理及其在汽车关键零部件(如支架、端子、安全带扣、电机铁芯等)冲压中的典型应用;深入分析了影响级进模冲压精度的关键因素,包括模具结构设计、材料特性、导向系统、送料精度、磨损与维护等;在此基础上,提出了一套涵盖设计优化、制造工艺提升、过程监控与智能维护的综合精度控制策略。研究表明,通过集成高精度导向机构、采用CAE仿真辅助设计、实施闭环反馈控制系统以及引入数字孪生技术,可显著提升多工位级进模的成形精度与稳定性,满足现代汽车工业对高质量、大批量零部件的严苛需求。

**关键词:** 多工位级进模;汽车零部件;冲压成形;精度控制;模具设计

## 引言

汽车工业是国民经济的重要支柱产业,其发展水平直接反映一个国家的制造业综合实力。近年来,新能源汽车与智能网联汽车的兴起,进一步推动了汽车零部件向小型化、复杂化、高精度化方向演进。在众多制造工艺中,冲压成形因其材料利用率高、生产效率快、尺寸稳定性好等优势,成为汽车金属结构件和功能件的主要加工方式。传统单工序模或复合模虽能满足部分零件的生产需求,但在面对大批量、高节拍、多工序集成的复杂零件时,存在换模频繁、人工干预多、一致性差等问题。多工位级进模(Progressive Die)应运而生,它将落料、冲孔、弯曲、拉深、整形等多种冲压工序集成于一副模具中,配合自动送料装置,实现“一次送料、多步成形、连续输出”的高效生产模式。尤其在汽车电子、安全系统、动力总成等关键子系统中,大量微型、精密金属件依赖级进模完成制造。然而,级进模的高集成度也带来了更高的精度控制挑战。微米级的累积误差、材料回弹、模具磨损等因素极易导致产品尺寸超差甚至失效。因此,深入研究多工位级进模在汽车零部件冲压中的应用特点,并构建系统化的精度控制体系,具有重要的工程价值与理论意义。

## 1 多工位级进模的基本原理与结构

### 1.1 工作原理

多工位级进模的核心在于“步距”(Pitch)控制。模具沿送料方向被划分为若干工位(通常为5~30个),每个工位完成一道或几道特定工序。条料(卷料)通过伺服送料机构以精确的步距送入模具,每完成一次冲压循环,条

料前进一个步距,各工位同步动作,最终在最后一个工位将成品件从载体上分离。该过程高度依赖于模具内部的定位系统(如导正销)、送料系统的同步性以及压力机的行程稳定性。整个流程可实现全自动化,节拍可达每分钟数百次,适用于年产量百万件以上的零部件生产。

### 1.2 主要结构组成

典型的多工位级进模由多个功能模块协同构成。上模座与下模座作为整体骨架,不仅承载全部功能组件,还需具备极高的刚性和抗变形能力,以抵抗高速冲压过程中产生的动态载荷。导向系统通常采用滚珠导柱导套或高精度滚动直线导轨,确保上下模在闭合过程中保持严格的同轴度与平行度,这是保障成形一致性的物理基础。送料与定位机构则通过浮动送料块、导正销及挡料销等元件,实现对条料位置的精确定位,其中导正销插入前一工位预冲的定位孔中,有效消除送料累积误差<sup>[1]</sup>。功能冲头与凹模执行具体的成形任务,常采用镶拼结构以便于局部更换与维修。卸料板在冲压过程中压紧材料防止起皱,并在滑块回程时协助脱料,其背后配置的弹簧或氮气缸系统需提供稳定且可调的压入力。

## 2 多工位级进模在汽车零部件冲压中的典型应用

### 2.1 安全系统零部件

在汽车被动安全系统中,安全带扣、预紧器外壳及安全气囊支架等部件对结构强度与尺寸精度要求极为严苛。以安全带舌片为例,其几何形状包含多个异形孔、锐角折弯及高光洁面,传统分步冲压难以保证各特征间的相对位置精度。采用12工位级进模后,可依次完成落料、多孔冲裁、三次精密弯曲、最终整形及去毛刺等工

序, 全程无需人工干预。得益于模具内导正销的精确定位与卸料板的均匀压料, 成品关键尺寸公差可稳定控制在 $\pm 0.05$  mm以内, 完全满足ISO/TS 16949质量管理体系对安全件的追溯性与一致性要求。

## 2.2 电机与电控系统零件

新能源汽车驱动电机的核心部件——定子与转子铁芯, 由数百片硅钢片叠压而成, 其叠装精度直接影响电机效率与电磁性能。传统单片冲压再手工叠装的方式效率低下且一致性差, 而高速多工位级进模则实现了“冲片—叠装—铆接”一体化制造。例如, 某8极永磁同步电机转子铁芯采用24工位级进模, 在高速( $> 600$  SPM)条件下完成冲槽、记号孔、铆点成形及自动叠片等操作<sup>[2]</sup>。模具通过精密导正与闭环反馈控制, 使叠片累积误差控制在 $\pm 0.02$  mm以内, 显著提升了电机的功率密度与NVH(噪声、振动与声振粗糙度)表现。

## 2.3 车身与底盘结构件

尽管大型车身覆盖件多采用传递模或大型单动压力机生产, 但数量庞大的小型支架、卡扣、线束固定夹等结构件仍广泛依赖级进模制造。以电动汽车电池包内的汇流排支架为例, 该零件需兼顾良好的导电性与机械支撑功能, 通常采用铜合金带材加工。通过10工位级进模, 可高效完成外形轮廓冲裁、安装孔冲制、折弯成形及表面去应力处理, 关键安装孔的位置度稳定在 $\pm 0.03$  mm, 确保电池模组装配的可靠性与电气连接的低阻抗特性。

## 2.4 连接器与端子

汽车线束系统中的端子是典型的微型精密冲压件, 其截面复杂、镀层均匀性要求高, 且需满足严格的插拔力与接触电阻标准。多工位级进模在此类零件制造中展现出不可替代的优势。以某高压连接器端子为例, 材料为C194铜合金, 经16工位级进模依次完成冲裁、多级弯曲、镦压成形、倒角修整及在线感应退火等工序。模具内部集成的微调机构与高响应卸料系统有效抑制了材料回弹, 使成品插拔力波动小于5%, 接触电阻稳定在0.5 m $\Omega$ 以下, 完全满足车规级电气性能要求。

## 3 影响多工位级进模冲压精度的关键因素分析

### 3.1 模具结构设计误差

模具的初始设计质量直接决定了其精度上限。若步距计算未充分考虑材料在冲裁与弯曲过程中的延伸率变化, 或导正销与定位孔之间的配合间隙过大(超过0.02 mm), 将导致条料在后续工位中发生累积偏移, 进而引发孔位错位或成形干涉。此外, 卸料板若在制造或装配过程中存在平行度偏差, 会在冲压时对材料施加不均匀的压紧力, 造成局部起皱或弯曲角度不一致。对于细长

型冲头, 若刚性设计不足, 在高频率冲击载荷下易发生弹性弯曲变形, 使得冲孔位置偏离理论坐标, 尤其在深孔或微孔加工中影响更为显著。

### 3.2 材料特性与状态

冲压材料本身的物理与力学性能波动是精度控制的内在变量。即使同一牌号的带材, 其厚度公差若达到 $\pm 0.01$  mm, 在弯曲成形中也可能引起角度偏差 $1^\circ$ 至 $2^\circ$ 。材料的轧制方向导致的各向异性现象, 会使不同方向上的屈服强度与延伸率存在差异, 从而在多向弯曲或拉深过程中产生不对称回弹<sup>[3]</sup>。此外, 材料表面的润滑状态亦不容忽视——油膜厚度不均会改变模具与材料间的摩擦系数, 进而影响材料流动路径与最终成形形状, 尤其在深拉深或复杂曲面成形中表现突出。

### 3.3 导向与定位系统精度

导向系统是级进模精度的“骨骼”。普通滑动导柱导套因存在0.02~0.05 mm的配合间隙, 在高速往复运动中易产生微幅晃动, 难以支撑微米级定位需求。相比之下, 采用高精度滚动导向(如THK或Schaeffler品牌的直线导轨)可将导向间隙控制在0.005 mm以内, 显著提升动态刚性与重复定位精度。与此同时, 导正销作为条料精确定位的关键元件, 其直径磨损仅0.01 mm即可导致定位中心偏移, 进而影响后续所有工位的成形准确性。因此, 导向与定位系统的选型、制造精度及耐磨性, 共同构成了级进模高精度运行的基础保障。

### 3.4 送料系统同步性

伺服送料机的性能直接关系到级进模的节拍稳定性与成形一致性。其重复定位精度需优于 $\pm 0.01$  mm, 且必须与压力机滑块的运动严格同步。若两者存在相位误差(如超过 $1^\circ$ ), 在高速运行中极易出现“拖料”(条料未及时到位)或“叠片”(条料重复进入同一工位)现象, 轻则导致产品尺寸超差, 重则引发冲头崩刃或模具卡死。因此, 现代高端级进模生产线普遍采用基于编码器反馈的闭环同步控制系统, 实时校正送料时机, 确保每一次冲压循环的起始位置高度一致。

### 3.5 模具磨损与热变形

在连续高速冲压过程中, 模具不可避免地经历磨损与温升。冲头与凹模刃口在反复剪切作用下产生摩擦热, 局部温度可升至 $100^\circ\text{C}$ 以上, 引发热膨胀, 导致配合间隙瞬时变化。同时, 长期微动接触造成的微动磨损(Fretting Wear)会使导正销、定位块等关键元件尺寸缓慢减小, 造成系统性漂移。统计数据显示, 一副级进模在完成50万次冲压后, 关键特征尺寸可能漂移0.03~0.08 mm, 若无有效监测与补偿机制, 将直接导致批量不良。因此, 磨

损管理与热控策略已成为高寿命级进模设计中不可或缺的一环。

#### 4 多工位级进模精度控制策略

##### 4.1 设计阶段：CAE仿真与容差分配

在模具开发初期，借助CAE技术进行虚拟验证已成为提升精度的有效手段。通过AutoForm或Dynaform等专业软件，可对材料流动、应力分布、回弹趋势及起皱风险进行全面模拟，从而优化弯曲半径、压边力、凸凹模间隙等关键参数。针对回弹问题，工程师可根据仿真结果对模具型面实施反向补偿设计，例如将目标弯曲角设定为 $92^\circ$ 以抵消预计 $2^\circ$ 的弹性回复。此外，采用几何尺寸与公差（GD&T）方法对步距、导正孔位置、冲头坐标等关键特征进行系统性公差链分析，合理分配各环节允许误差，确保最终累积误差处于产品公差带之内，从源头上规避精度失控风险。

##### 4.2 制造阶段：高精度加工与装配

模具制造精度是设计意图能否落地的关键。对于导正销、定位块、卸料镶件等核心元件，普遍采用慢走丝线切割（WEDM-HS）工艺加工，表面粗糙度可达 $Ra \leq 0.4 \mu m$ ，尺寸公差控制在IT5级以内。在装配过程中，贯彻“基准统一”原则至关重要——即所有功能模块均以同一工艺基准面进行加工与定位，最大限度减少装配累积误差<sup>[4]</sup>。此外，为消除导向间隙带来的动态晃动，可在滚动导柱系统中施加预紧力，形成预加载状态，显著提升模具在高速冲击下的结构刚性与运动稳定性。

##### 4.3 生产阶段：过程监控与闭环控制

进入量产阶段后，精度控制重心转向实时监控与动态调节。在关键工位部署工业相机或激光测距仪，可对孔位、外形轮廓、铆点高度等特征进行在线视觉检测，检测数据实时反馈至PLC或MES系统，触发自动补偿或报警停机。同时，在冲头上集成微型压力传感器，可连续监测冲裁力波形，一旦发现异常波动（如刃口钝化或材料硬度突变），系统立即介入处理。更进一步，部分先进产线已实现自适应送料控制——根据前一周期的成形结果，动态微调下一周期的送料步距，调节精度可达

$\pm 0.005mm$ ，从而形成“感知—决策—执行”的闭环控制回路。

##### 4.4 维护阶段：预测性维护与数字孪生

传统定期维护模式难以应对磨损的非线性发展规律。现代精度管理强调预测性维护理念：通过定期测量关键尺寸（如冲头直径、导正销长度）建立磨损数据库，拟合磨损曲线，科学预测更换周期。在此基础上，构建模具的数字孪生模型，将物理模具的运行状态（温度、载荷、位移等）实时映射至虚拟空间，不仅可模拟不同维护策略对精度的影响，还能在虚拟环境中预演新零件试模过程，大幅缩短调试周期。此外，智能润滑系统可根据冲次自动喷注微量高性能润滑油，既减少摩擦热生成，又延缓磨损进程，实现“精准润滑、按需供给”。

#### 5 结语

多工位级进模作为汽车精密冲压的核心装备，其应用已从传统结构件扩展至新能源、智能化关键部件。精度控制不再局限于单一环节，而是贯穿于模具全生命周期的系统工程。未来发展趋势包括：深度融合人工智能算法，构建具备自学习与自优化能力的智能模具控制系统；开发干式冲压与无油润滑技术，推动绿色制造；通过快换模块化设计提升柔性，适应多品种小批量生产需求；以及将激光焊接、在线检测等非冲压工艺集成于级进模平台，打造“一站式”智能制造单元。唯有持续推动材料科学、精密制造、过程控制与信息技术的交叉融合，方能支撑中国汽车零部件产业在全球价值链中迈向高端，为智能电动时代的高质量发展提供坚实工艺基础。

#### 参考文献

- [1]李天宇,李贵,谭志杰,等.多工位级进模冲裁凸凹模自适应设计方法[J/OL].锻压技术,1-8[2025-12-22].
- [2]付关文,高永生,潘铁军,等.汽车门槛饰板支架多工位级进模设计[J].锻压技术,2024,49(08):184-189.
- [3]陈运胜,孙令真,张创基.连接扣多工位级进模具结构设计[J].锻压技术,2024,49(08):190-194.
- [4]苏达权,黄珍媛,伍宇安,等.汽车吸能盒零件多工位级进模设计[J].锻压技术,2024,49(01):196-201.