

汽车梁类件冲压工艺及模具设计技术研究

程阿苗 王毅 张玲玲

陕西黄河工模具有限公司 陕西 西安 710043

摘要: 随着汽车工业向轻量化、高安全性与高效率方向的持续发展,作为车身骨架核心承载部件的梁类件(如前纵梁、后纵梁、门槛梁、A/B柱加强板等)在整车结构中的作用愈发关键。这类零件通常具有结构复杂、尺寸大、强度要求高、成形精度严苛等特点,其制造质量直接关系到整车的碰撞安全性能和装配精度。冲压成形作为梁类件最主要的制造方式,面临着回弹控制难、起皱开裂风险高、尺寸稳定性差等一系列严峻挑战。本文以典型汽车前纵梁为研究对象,系统分析了其冲压成形过程中的核心工艺难点,并针对性地提出了一系列基于CAE仿真与生产实践相结合的优化策略。重点探讨了拉延成形、修边冲孔、翻边整形及侧整形等关键工序的工艺参数设定、模具结构设计要点以及回弹补偿技术。研究表明,通过构建“仿真-试模-数据反馈-再优化”的闭环开发体系,能够有效提升梁类件的成形质量与尺寸精度,为高强度及先进高强度在汽车梁类件上的应用提供可靠的技术支撑。

关键词: 汽车梁类件; 冲压工艺; 模具设计; 回弹控制; CAE仿真; 高强度

引言

在全球节能减排法规日益严格的背景下,汽车轻量化已成为不可逆转的趋势。高强度钢板(HSS)和先进高强度钢板(AHSS),如DP(双相钢)、TRIP(相变诱导塑性钢)、QP(淬火配分钢)等,因其优异的比强度(强度/密度)被广泛应用于车身结构件,尤其是承担主要载荷的梁类件上。然而,材料强度的提升往往伴随着成形性的下降和回弹量的显著增大,这给传统的冲压工艺和模具设计带来了前所未有的挑战。汽车梁类件是典型的三维空间曲面结构,通常包含多个封闭或半封闭的腔体、复杂的翻边特征以及大量的安装孔。其功能决定了它必须具备极高的几何精度和尺寸稳定性,以确保在白车身(BIW)焊接过程中能与其他部件精准匹配,并在车辆发生碰撞时按预定路径有效吸能。任何微小的成形缺陷,如局部起皱、开裂或超出公差的回弹变形,都可能导致整车性能的严重劣化。因此,深入研究汽车梁类件的冲压成形机理,掌握其不同材料、不同工艺条件下的变形规律,并在此基础上进行科学、稳健的模具设计,是当前汽车制造领域亟待解决的核心课题。本文旨在结合工程实践经验,对梁类件冲压全流程中的关键技术进行系统梳理与分析,为相关领域的工程师提供有价值的参考。

1 汽车梁类件的结构特点与成形难点

1.1 典型结构特征分析

以某车型前纵梁为例,其典型结构特征包括:长度通常在1米以上,拉延深度可达150mm甚至更深,属于典型的深拉延件;零件表面并非简单的规则几何体,而是

由多个不同曲率半径的曲面平滑过渡而成,存在反向弯曲区域;为了满足碰撞吸能需求,纵梁内部常设计有加强筋或形成封闭/半封闭的腔体,这增加了材料流动的复杂性;沿零件轮廓分布着大量用于与前围板、轮罩、防撞梁等部件焊接的翻边,这些翻边的角度、高度和平面度要求极为严格(通常平面度公差要求 $\leq 0.5\text{mm}$);此外,用于线束、管路通过及安装支架的孔位众多,且位置精度要求高^[1]。上述结构特征共同构成了梁类件在冲压成形中面临的多重约束条件。

1.2 主要成形难点

基于上述结构特征,在冲压成形过程中会遇到一系列相互关联的工艺难题。其中最突出的是回弹问题,尤其在采用高强度材料时表现得尤为严重。回弹是指卸载后由于材料内部弹性应变恢复而导致的零件形状和尺寸变化。高强度因屈服强度高而弹性模量相对较低,使得其回弹量远大于普通低碳钢,不仅影响零件最终外形,更会导致关键安装面的平面度超差和孔位偏移,严重影响后续焊接总成的尺寸精度。与此同时,深拉延过程中法兰区域受切向压应力作用极易产生起皱,而底部转角区域则因承受双向拉应力而容易发生减薄甚至开裂。高强度较低的n值(应变硬化指数)和r值(塑性应变比)进一步压缩了成形窗口,使起皱与开裂的风险并存。此外,材料性能的批次波动、模具磨损及润滑条件的变化等因素也会导致批量生产中零件尺寸的一致性难以保证。而复杂的翻边特征若不能合理分解工序,亦可能引发翻边开裂或扭曲,进而影响整体装配精度。这些难点共同构成了梁类件冲压成形的技术瓶颈。

2 关键冲压工艺及解决方案

2.1 基于CAE仿真的工艺规划与优化

现代冲压工艺开发已高度依赖CAE仿真技术，其核心价值在于能够在物理模具制造前对整个成形过程进行虚拟验证与优化。对于高强钢梁类件，材料模型的选择至关重要。传统各向同性硬化模型难以准确描述高强钢在复杂加载路径下的力学行为，必须采用能够反映其各向异性、包辛格效应及随动强化特性的高级本构模型，如Yoshida-Uemori模型，才能获得可靠的回弹预测结果。在工艺方案设计阶段，工程师可通过仿真快速评估不同的压料面形态、拉延筋布局以及工艺路线（如单件生产或一模两件），从而在抑制法兰区起皱与保障底部材料充分流入之间找到最佳平衡点^[2]。成形极限图（FLD）分析则可直观揭示零件各区域的安全裕度，针对接近危险区的部位，可动态调整压边力、优化产品R角或局部修改拉延补充面，以改善厚度分布并降低破裂风险。这种“先仿真、后制造”的模式显著缩短了开发周期，降低了试错成本。

2.2 回弹控制与补偿技术

回弹控制是高强钢梁类件模具设计成败的关键所在。目前主流的应对策略是在模具型面设计阶段引入过拉延或反向预弯的补偿思想。具体而言，即根据CAE仿真预测的回弹量，对模具工作部分的几何形状进行反向修正——例如，若仿真显示某区域将向上回弹2mm，则在模具对应位置预先向下多压2mm。对于复杂的三维空间回弹，需进行全型面的迭代补偿，这一过程往往需要多轮仿真与实测数据的交互校准。除物理补偿外，工艺参数的精细调控同样重要。压边力的大小直接影响材料流动阻力，过大易导致底部开裂，过小则无法抑制起皱，因此常采用分级压边或伺服压力机动态调节技术实现最优控制。拉延筋作为调节局部进料量的有效手段，其高度、截面形状及空间布局需根据材料流动模拟结果精心设计，以均衡各区域变形程度，间接改善回弹行为。对于超高强度级别（如1500MPa）的零件，热成形技术成为必要选择，其通过高温奥氏体化后快速淬火的方式几乎完全消除回弹，但受限于成本与节拍，应用范围相对有限。更为先进的是建立“仿真—试模—三坐标测量—模型修正—再补偿”的闭环反馈机制，利用实际零件的测量数据不断校正材料模型与补偿策略，最终实现尺寸精度的稳定达标。

2.3 起皱与开裂的预防措施

起皱与开裂作为冲压成形中的一对矛盾现象，在梁类件深拉延过程中尤为突出。其根本原因在于材料在不

同区域所受应力状态的差异。为有效防控此类缺陷，首先需从拉延补充面与压料面的设计入手。合理的补充面应引导材料在成形初期均匀、顺畅地流入凹模型腔，避免局部堆积或拉伸过度；压料面则应尽量平缓，减少材料在滑动过程中的摩擦阻力突变。其次，针对局部成形性极差的区域，可考虑采用激光局部加热技术，通过瞬时提升材料温度来增强其塑性，降低成形抗力，从而避免开裂^[3]。反之，对易起皱区域实施局部冷却可增加其刚性，抑制失稳。对于大角度、长直线的翻边特征，一次性成形极易导致边缘开裂，此时应采用渐进式翻边策略，将总翻边角度分解为两步甚至三步完成，每步控制在20°以内，并在中间工序设置预整形工步以释放累积的残余应力，从而显著提升翻边质量与一致性。这些措施的综合应用，能够在不牺牲零件功能的前提下，有效拓宽高强钢的成形工艺窗口。

3 模具设计关键技术

3.1 成型模设计要点

成形工艺性分析：在模具设计前，需对梁类件的几何形状、材料性能（如高强度钢、DP钢等）、板厚及回弹特性进行详细分析。利用CAE（如AutoForm、Dynaform）进行成形仿真，预测起皱、开裂、回弹等缺陷，优化工艺方案。压料面设计：压料面分模线一般取侧壁与顶面的相交R处，根据零件CAE分析回弹结果确定是否墩R来决定分模位置，回弹大需要墩R则凹模带R，回弹小不需要墩R则分模线取侧壁和顶面的交线即可。凸模与凹模结构设计：凸模应具有足够的刚性和强度，尤其在高强钢成形时需考虑抗变形能力。凹模圆角半径需兼顾成形性和模具寿命，通常取3~5倍板厚，但需根据具体材料调整。考虑修边方向和后续工序，预留工艺补充面（Addendum）和切边余量。回弹补偿设计：梁类件多采用高强钢，回弹显著。需在模具型面中预置反向补偿量。可通过“迭代补偿法”或“基于CAE的回弹修正”实现精准控制。导向与定位系统：成型模需配置高精度导柱导套，确保上下模对中。设置合理的定位销、限位块及平衡块，防止偏载和模具损坏。排气与润滑设计：在凸模顶部及深腔区域设置排气孔，防止气垫效应导致零件贴模不良。^[4]模具表面应便于涂油或自动润滑，减少摩擦，延长寿命。模块化与标准化：推广标准模架、通用镶块，提高模具制造效率和维修便利性。对于系列化梁类件，可采用共用基体+快换工作镶块的设计思路。

3.2 修边冲孔模设计要点

修边冲孔模虽属后续工序，但其对零件最终精度的影响不容忽视。高强钢对模具刃口的冲击与磨损能力

极强，因此必须选用高韧性、高耐磨性的模具钢，如SKD11或Cr12Mo1V1，并辅以TD处理或PVD涂层等先进表面强化技术，以延长刃口寿命。边线调整是该类模具设计的另一重点，梁类件一般是先落料后成型，由于后序成型回弹变化，在第一序调整落料片边线尤为困难，我们可以采取先对后续回弹进行整改到位，零件稳定后在对落料边线进行调整，反复试模验证，最好是在设计前期进行CAE精算反算边线，减少边线误差。此外，密集孔系的冲裁需特别关注冲裁力的平衡性，避免因合力偏心导致模具受力不均而加速磨损。上下模的对中精度则依赖于高刚性的导柱导套系统，只有确保冲孔过程中模具运动轨迹的高度稳定，才能保证孔位的位置度满足焊接夹具的装配要求。

3.3 翻边整形模设计要点

翻边整形模的设计核心在于有效应对高强度梁类件因弹性回复（回弹）带来的尺寸不确定性，确保翻边角度、高度及轮廓的一致性。对于存在侧壁特征或空间受限、法向无法直接冲压的区域，必须引入侧整机构——通常采用斜楔传动系统，将压力机主滑块的垂直运动高效转化为水平方向的整形动作。该机构的设计需综合考虑运动行程匹配、受力传递路径优化、导向精度及间隙控制，以避免运行过程中的卡滞、偏载或冲击。在终整工序中，常设置专用精整镶块，对关键安装面、搭接面等高精度区域施加远高于材料屈服强度的局部高压，促使表层金属产生微量但稳定的塑性变形，从而“锁定”最终几何形状，显著抑制后续弹性恢复。这种“高压校平”技术不仅能将平面度、轮廓度等关键指标控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 甚至更严苛的公差范围内，更是保障梁类件在白车身焊接装配中实现高匹配精度和结构刚性的最后一道关键工艺防线。

4 结语

汽车梁类件的冲压成形是一项涉及材料科学、塑性力学、模具工程和精密测量的综合性系统工程。面对高强度带来的回弹、开裂等挑战，单一的技术手段已难以奏效。成功的开发模式必然是一个多学科交叉、多技术融合的闭环过程。首先，必须依托高精度的CAE仿真技术，在虚拟环境中对材料行为、工艺可行性和潜在缺陷进行充分评估和优化。其次，模具设计是将工艺思想落地的关键，需在结构上充分考虑高强度钢的特性，采用浮动、侧整、精整等先进技术来保障成形质量。最后，建立从仿真到试模再到数据反馈的快速迭代机制，是攻克回弹等顽疾的不二法门。未来，随着人工智能（AI）和大数据技术的发展，冲压工艺开发将进一步向智能化、自动化迈进。通过对海量历史项目数据的学习，AI有望实现更精准的回弹预测和更高效的模具补偿方案生成，从而大幅缩短梁类件的开发周期，降低开发成本，为汽车轻量化战略的深入推进提供更强有力的制造保障。

参考文献

- [1]王丽君.面向制造生产的汽车覆盖件冲压工艺模板化设计[J].模具制造,2025,25(12):240-242.
- [2]楠丁.汽车覆盖件高强度钢冲压成形工艺优化研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.奇瑞汽车股份有限公司鄂尔多斯分公司;,2025:1208-1212.
- [3]梁芳.汽车覆盖件冲压模具柔性化探索与实践[J].锻造与冲压,2025,(06):80-83.
- [4]黄凤辉.汽车覆盖件冲压成形新技术分析[J].中国机械,2023,(20):46-50.