

汽车防撞横梁冲压工艺研究及模具设计探讨

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: 随着全球汽车工业对安全性、轻量化和成本效益的持续追求,作为车身被动安全核心部件之一的汽车防撞横梁(Bumper Beam),其制造技术面临着前所未有的挑战与机遇。本文以高强度钢板(HSS)和先进高强钢(AHSS)为主要研究对象,系统地探讨了汽车防撞横梁的冲压成形工艺。首先,深入剖析了防撞横梁的结构特点、功能需求及其材料选择;其次,针对高强度材料在冲压过程中易出现的回弹、开裂、起皱等典型缺陷,详细阐述了工艺参数优化、成形路径规划及回弹补偿策略;在此基础上,重点论述了冲压模具的设计原则、关键结构(如拉延模、修边冲孔模)的创新方案,并引入了CAE仿真技术在模具设计与验证中的核心作用。本研究旨在为提升防撞横梁的制造质量、缩短开发周期、降低生产成本提供一套系统化的理论与实践参考。

关键词: 防撞横梁; 冲压工艺; 模具设计; 高强度钢; 回弹控制; CAE仿真

引言

现代汽车设计理念正朝着“更安全、更轻、更省”的方向发展。为了保证甚至提升安全性能的同时实现轻量化目标,汽车制造商越来越多地采用屈服强度在500MPa以上的高强度钢板(HSS)乃至屈服强度超过1000MPa的先进高强钢(AHSS),如DP(双相钢)、TRIP(相变诱导塑性钢)和QP(淬火配分钢)等。然而,这些材料在带来优异力学性能的同时,也给传统的冲压成形工艺带来了严峻挑战。高强度意味着材料的塑性变形能力下降,成形窗口变窄,极易在冲压过程中产生开裂、回弹过大、表面质量不良等问题。冲压工艺作为汽车覆盖件和结构件最主要的成形方式,其成熟度直接决定了产品的最终质量和生产效率。而冲压模具作为该工艺的物理载体,其设计的合理性、精度和寿命是确保稳定、高效、高质量生产的关键。因此,针对高强度材料防撞横梁的冲压工艺进行深入研究,并在此基础上开展科学、精准的模具设计,具有重要的工程实践价值和广阔的市场应用前景。

1 防撞横梁的结构特点与材料选择

1.1 结构与功能分析

典型的汽车防撞横梁多为闭口或半闭口的帽形截面结构(Hat-section)。这种结构设计巧妙地利用了几何形状来最大化截面惯性矩,从而在有限的重量下获得极高的抗弯和抗扭刚度。其主要功能体现在多个方面:在碰撞初期,防撞横梁通过自身的弹性及塑性变形有效吸收冲击动能;随后,它将碰撞载荷有序地传递至车身两侧的吸能盒和纵梁,避免局部应力集中导致车身主结构失效;此外,它还还为保险杠蒙皮、毫米波雷达、摄像

头等外饰及智能驾驶感知元件提供稳固的安装基座。横梁的长度、截面轮廓、壁厚分布以及两端法兰的几何形态,均需根据具体车型的碰撞法规要求(如ECE R42、FMVSS 581等)和整车布置空间进行精细化匹配与优化,以实现结构效能的最大化。

1.2 材料发展趋势

早期的防撞横梁普遍采用普通低碳钢(如DC04),但其强度较低,难以兼顾轻量化与高安全性的双重目标。当前主流材料选择已发生显著转变,呈现出向高强度、高比强度方向演进的趋势。高强度钢(HSS)凭借其210~550MPa的屈服强度范围,在成本可控与成形性之间取得了良好平衡,成为目前市场应用最广泛的材料类别,典型牌号包括H340LAD、H420LAD等。进一步地,先进高强钢(AHSS)因其卓越的强度-延展性协同效应而被广泛采纳,尤其是双相钢(DP系列,如DP600、DP780、DP980),其微观组织由铁素体与马氏体两相构成,既具备高抗拉强度,又保留了一定的塑性变形能力,非常适合用于对碰撞吸能有严苛要求的结构件^[1]。对于高端或高性能车型,热成形钢(如22MnB5)的应用也逐渐增多,其经热冲压后抗拉强度可突破1500MPa,虽成本较高且工艺复杂,但在极端安全场景下具有不可替代的优势。相比之下,铝合金虽密度更低,但受限于连接工艺复杂性和成本因素,在防撞横梁领域的普及程度仍不及高强度钢。材料的选择不仅决定了零件的力学性能上限,更深刻影响着后续冲压工艺路线的制定与模具结构的设计难度。

2 高强度钢防撞横梁冲压工艺难点与对策

高强度钢在冲压成形过程中,主要面临三大技术难题:回弹、开裂和起皱。这些问题相互关联,共同制约

着零件的尺寸精度、表面质量和成形良率。

2.1 回弹问题及其控制

回弹是高强度钢冲压中最棘手的问题。由于材料屈服强度高,卸载后弹性恢复量大,导致零件尺寸和形状严重偏离设计要求,直接影响后续装配精度与整车碰撞性能的一致性。为有效控制回弹,工程实践中常采用多种策略协同作用。过弯曲是一种经典方法,即在模具设计阶段有意识地使零件在成形过程中产生比目标角度更大的弯曲,以抵消卸载后的弹性恢复。然而,该方法的成功实施高度依赖于对回弹量的精确预测。工艺补充面的优化同样至关重要,通过合理设计拉延筋布局和压料面曲率,可以增加材料在成形过程中的塑性变形比例,从而相对减少弹性变形所占份额,从根本上削弱回弹驱动力。对于几何复杂的横梁,多步成形工艺被广泛采用,即将整体成形过程分解为预弯、整形、校正等多个工序,每一步都进行针对性的回弹补偿,通过累积控制逐步逼近最终目标形貌^[2]。此外,针对超高强度钢,热辅助成形技术展现出独特优势,通过对局部区域进行瞬时加热,暂时降低材料屈服强度,待成形完成后再快速冷却,可显著抑制回弹效应,尽管该方法增加了工艺复杂性,但在特定高要求场景下具有不可替代的价值。

2.2 开裂与起皱的预防

高强度钢的延伸率相对较低,使得其在局部高应变区域极易因拉应力集中而发生开裂;与此同时,在受压区域,若材料流动受阻或压边约束不足,则容易诱发起皱缺陷。这两类缺陷看似对立,实则源于材料流动不均这一共同根源。预防此类问题的关键在于对材料流动行为的精细调控。首先,精确的毛坯展开计算是基础,既要确保毛坯提供足够的材料以满足成形所需,又要避免因尺寸过大而增加多余材料堆积带来的起皱风险。其次,压边力的动态控制至关重要,现代伺服压力机或配备可编程氮气缸的压力设备能够根据成形阶段实时调整压边力大小,在成形初期施加足够压力防止起皱,在材料流入困难区域适当减小阻力以避免开裂。拉延筋作为调节材料流动的核心元件,其高度、截面形状及空间布局需经过反复优化,借助CAE仿真工具可以直观评估不同方案对材料流动路径和应力分布的影响,从而确定最优配置。此外,高性能冲压润滑油的使用也不容忽视,它能有效降低板料与模具工作面之间的摩擦系数,促进材料均匀、顺畅地流入型腔,减少局部应力峰值,对同步抑制开裂与起皱具有积极作用。

3 冲压模具设计关键技术

模具是冲压工艺的“灵魂”。针对高强度钢防撞横梁

的特点,其模具设计需遵循“高刚性、高精度、长寿命”的原则,确保在高载荷、高频率工况下仍能稳定输出合格产品。

3.1 模具结构总体设计

防撞横梁的冲压生产通常采用多工位级进模或由多副单机模组成的自动化生产线。一套完整的模具线一般包含四个核心工序:首先是落料模,负责从卷料上精确剪切出符合展开图要求的平板毛坯;其次是拉延模,作为整个工艺链的核心环节,它将平板毛坯初步成形为具有帽形截面的三维结构,鉴于高强度钢成形阻力大,此工序常需在双动压力机上完成,以便独立控制压边力;第三是修边冲孔模,用于切除拉延过程中形成的工艺补充部分,并同步冲制出用于安装传感器、支架或减重的各类孔洞;最后是翻边整形模,该工序不仅对零件两端的法兰边进行精确翻折以满足装配接口要求,更重要的是对帽形主体进行最终的强力校正,通过局部过压或反向加载等方式,有效消除残余应力和回弹,确保零件关键尺寸落在公差带内。

3.2 关键部件设计要点

在具体结构设计中,凸模与凹模的工作表面必须经过超精加工处理,达到镜面级光洁度,以减少摩擦并防止划伤板料。材料选择上,优先采用高耐磨、高韧性的优质模具钢,如Cr12MoV、DC53,对于大批量生产的AHSS零件,甚至需选用成本更高的粉末冶金钢以抵抗剧烈磨损。模具间隙的设定尤为关键,针对高强度钢,其间隙值通常略大于普通低碳钢,以平衡成形力与磨损速率^[3]。压料板作为控制材料流动的第一道屏障,必须具备极高的结构刚性和导向精度,其运动轨迹需与压力机滑块严格同步,避免因偏载导致零件扭曲。整套模具的导向系统亦不可轻视,高精度导柱导套是基本配置,而在高速生产线中,滚珠导柱因其更低的摩擦阻力和更高的重复定位精度而成为优选。此外,可靠的顶出与卸料系统是保障生产连续性的必要条件,无论是采用气垫、弹簧还是机械顶杆,都必须确保成形后的零件能平稳、无损地脱离模具,避免因卡滞或强行脱模造成二次变形或表面损伤。

3.3 CAE仿真驱动的模具设计

计算机辅助工程(CAE)技术,特别是基于LS-DYNA、AutoForm、Dynaform等专业软件的板料成形仿真,已成为现代模具设计不可或缺的核心工具。其价值贯穿于产品开发的全生命周期。在模具设计启动之前,工程师即可利用CAE对产品进行虚拟试冲,提前识别潜在的开裂、起皱或过度变薄区域,从而推动产品设计团

队进行面向制造的设计(DFM)优化,例如增大危险区域的过渡圆角或调整法兰走向。在回弹控制方面,借助先进的材料本构模型(如Yoshida-Uemori随动硬化模型)和精细化网格划分,CAE能够较为准确地预测零件卸载后的回弹量与回弹模式。设计师据此对模具型面进行全曲面或局部区域的反向修正,即所谓的“回弹补偿”,这一过程极大减少了对昂贵且耗时的物理试模的依赖。此外,CAE平台还支持对压边力、摩擦系数、拉延筋参数等关键工艺变量进行快速迭代与优化,帮助工程师在虚拟环境中探索最佳工艺窗口,显著提升了模具开发的成功率与效率。可以说,CAE仿真是连接产品数字模型与物理模具之间的智能桥梁,是实现“一次做对”(Right First Time)开发理念的关键支撑。

4 新兴成形工艺展望

尽管冷冲压凭借其高效率、低成本和成熟度仍是当前防撞横梁制造的主流工艺,但面对未来更高强度、更复杂集成化结构的需求,一些新兴成形技术正展现出广阔的应用前景。热冲压成形(Hot Stamping)技术通过将硼钢毛坯加热至奥氏体化状态后在带冷却通道的模具中快速冲压并淬火,可直接获得抗拉强度高达1500MPa以上的零件,且几乎无回弹,目前已在A/B柱、门槛梁等超高强度安全部件上广泛应用,未来有望在对碰撞防护要求极为严苛的高端车型防撞横梁上实现突破。液压成形(Hydroforming)则利用高压液体作为柔性凸模,特别适合制造具有复杂变截面的空心管状结构,虽然设备投资较大,但其一体化成形能力可显著减少焊缝数量,提升结构整体刚度与疲劳寿命,为特定构型的防撞横梁提供了新的设计自由度^[4]。此外,辊压成形(Roll Forming)凭借其连续、高效、节能的特点,在等截面或缓变截面长条形零件的大批量生产中具有显著成本优势,随着高强度钢辊压技术的成熟,其在经济型车型防撞横梁制造中的渗透率有望进一步提升。这些工艺并非相互替代,而是与

传统冷冲压形成互补,共同构建面向未来的多元化、智能化汽车安全结构件制造体系。

5 结语

汽车防撞横梁作为关乎行车安全的关键部件,其制造技术正随着材料科学的进步而不断演进。本文系统地探讨了以高强度钢和先进高强钢为材料的防撞横梁冲压工艺。研究表明,要成功应对高强度材料带来的回弹、开裂等挑战,必须采取系统化的解决方案:首先,材料、产品、工艺、模具四位一体的协同设计理念至关重要。产品设计阶段就必须充分考虑制造可行性(DFM),避免将难以成形的几何特征直接传递至制造端。其次,CAE仿真技术已成为现代冲压模具开发的核心驱动力。它不仅能够有效预测和规避成形缺陷,更能精准指导模具的回弹补偿设计,大幅缩短开发周期,降低试错成本。再次,模具本身的高精度、高刚性和长寿命设计是保证稳定量产的基础。从材料选择、热处理到表面处理,每一个细节都决定了模具的最终表现。最后,面对未来更高强度、更复杂结构的需求,热冲压、液压成形等新兴工艺将与传统冷冲压形成互补,共同构成汽车安全结构件的多元化制造解决方案。

参考文献

- [1]涂江.某汽车上横梁下板多工位冲压工艺及模具设计[C]//四川省汽车工程学会,成都市汽车工程学会.四川省第十七届汽车行业学术年会论文集.四川省汽车工程学会,2023:135-140.
- [2]杨大伟.汽车前围横梁冲压工艺开发及模具设计[D].东北电力大学,2020.
- [3]刘玉三,孙光辉,麻健梅.铝合金防撞梁设计及生产工艺研究[J].企业科技与发展,2024,(09):102-107.
- [4]甘国强,李萍,薛克敏.汽车件高强铝合金板件热冲压工艺研究进展[J].稀有金属,2024,48(04):564-574.