

B柱加强板成形的有限元模拟

王圣波¹,葛红剑¹,刘钢²,周森²

(1. 海南职业技术学院 工业与信息学院,海南 海口 570216; 2. 一汽海马汽车有限公司,海南 海口 570216)

摘要:利用世界主流专用软件 Dynaform 对某汽车的 B 柱加强板进行几何模型的检查 and 修补、冲压方向确定、压料面设计、工艺补充面设计、坯料展开尺寸确定、拉深筋设置及拉深成形过程的数值模拟。根据模拟结果调整工艺参数,消除零件成形中的质量缺陷,提高了成形工艺可靠性,对 B 柱加强板拉深成形的工艺确定和模具设计提供了依据,并通过了实际生产的验证。

关键词:B 柱加强板;模具设计;数值模拟;工艺调整

中图分类号:TG386.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0113-04

Finite Element Simulation of Forming of B-pillar Structural Reinforcement Panel

WANG Shengbo¹, GE Hongjian¹, LIU Gang², ZHOU Sen²

(1. The Department of Industry and Information Engineering, Hainan Vocational Technology College, Haikou 570216, China; 2. Faw HaiMa Automobile Co., Ltd., Haikou 570216, China)

Abstract: The inspection and repair of the geometric model, the determination of the drawing direction, the design of pressing surface and technological supplementing surface, the determination of the blank expansion size, the layout of the drawbeads, and the numerical simulation of the drawing process are made with the special software Dynaform. The processing parameters are adjusted and optimized according to the simulation results. The factors having influence on the product quality are removed, the stability of forming process is improved, and then the basis is provided for the determination of the forming process of B-pillar structural reinforcement panel and its die design. And it is verified in the actual production.

Keywords: B-pillar structural reinforcement panel; die design; numerical simulation; adjusting process

0 引言

汽车覆盖件成形的力学过程及成形影响因素非常复杂,是涉及几何非线性、材料非线性、接触非线性于一体的强非线性问题,传统的解析方法难以求解判定^[1]。传统的金属板料冲压成形工艺及模具设计主要依赖于设计者的经验,需要多次修改模具和反复调试才能获得可行方案,造成大量人力、物力和时间的浪费。随着制件设计的复杂化和加工精度要求的日趋提高,传统基于人工的操作无法保证产品的质量,而成本上又没有优势,故难以适应现代工业的发展要求,势必被新的技术取代^[2-3]。经过 100 多年的发展,塑性成形理论已相当成熟。随着有限元分析方法的深入发展以及计算机应用技术的普及,应用有限元方法进行板料塑性成形过程数值模拟,已成为一项有效解决该问题的高新技术,并且推动了冲压成形工艺和模具设计技术的革新^[1,4-5]。

为了加快板料冲压模具设计,需要有机地集成 CAD 设计和 CAE 分析,让其优势互补。板料成形非线性有限元仿真软件 Dynaform 包含模具设计、仿真分析等模块,融

合 CAD 和 CAE 于一体,方便冲压零件的模具创建,较好地解决零件冲压成形过程的仿真、结果预测及工艺优化,在冲压成形及模具设计方面应用越来越广泛。现代轿车覆盖件制造以板料冲压成形为主,覆盖件零件通常外形尺寸大、形状复杂且不规则,对表面的质量要求较高,其成形难度较大,模具结构及变形情况复杂,变形规律难以掌握^[4-5],因此出现的问题也较多,尤其是在实际冲压过程中零件变形大区域出现破裂、翻边处往往产生严重的起皱缺陷、局部塑性变形不足、成形零件刚度不足等问题。本文以某车身覆盖件 B 柱加强板为例,将通用 CAD 软件中设计出的产品几何模型,在 Dynaform 软件中进行拉深模具设计及成形过程的有限元模拟,针对存在的问题提出优化设计方案,获得合理的工艺参数,并指导实际生产。

1 零件特点及工艺分析

B 柱加强板是现代汽车上重要的承力结构件,起到加强和支撑 B 柱及车身的作用,影响汽车侧面碰撞结果和乘员的生存空间,为大型骨架类冲压制件,属于典型的汽车结构件。为了提高车身的承载能力和碰撞安全星级的

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目资助(2013BAG07B00);2017 年度海南省高等学校教育教学改革研究重点项目(Hnjg2017ZD-23);海南职业技术学院“智能信息技术研究与应用”科研团队成果

第一作者简介:王圣波(1984—),男,高级工程师,工学硕士,研究方向为汽车被动安全仿真分析、塑性成形工艺及模具 CAD/CAE、新能源汽车技术。

得分,B 柱加强板要求具备较高的强度和刚度,应用高强度钢来成形已成为一种趋势。该零件在实际冲压成形过程中,通常需要经过落料、拉深、冲孔、翻边和修边等多道复合工序才能完成加工,其中拉深成形工序是该件制造的关键,它直接影响到零件的加工质量、制造成本及材料利用率。因此本文对该件的拉深过程进行有限元分析,保证 B 柱加强板的一次冲压成形。

图 1 所示为 B 柱加强板的设计几何外形。该件的长、宽、高分别为 1 145 mm、330 mm 和 164 mm,厚度为 1.8 mm。该零件的结构特点为:截面形状变化复杂,底部高度存在较大起伏,有凹槽、凸台、加强筋、开孔、过渡圆角小等多种特征,成形过程中容易出现开裂和起皱等缺陷,且高强钢的应用又加剧了这些缺陷的产生,给模具设计及成形工艺确定增加了困难。若毛坯的初始形状设计合理,工艺参数控制得当,B 柱加强板可以一次成形^[6]。因此,本文对该件的一次拉深成形过程进行模具设计和有限元仿真分析。

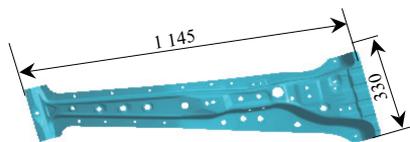


图 1 B 柱加强板的几何模型

2 模具设计

将通用 CAD 三维造型软件如 Catia、Pro/E、SolidWorks 等设计出的零件几何模型以 IGES 的格式保存,导入 Dynaform 软件中,在 Dynaform 的前处理模块进行模具设计,应用于拉深成形仿真的有限元模型,通过以下步骤进行搭建。

2.1 几何模型的检查 and 修补

利用通用 CAD 软件设计的产品几何模型,往往存在一些缺陷,例如型面有缝隙、重叠或者包含过于细长的曲面片等,难以满足模具设计工程师的有限元分析要求。此外,为了减少不必要的计算工作量,应该删去原始设计中包含的一些细小特征,以免在这些区域产生过多细小的单元,造成计算不收敛。因此,有必要进行型面检查和修补,消除这些缺陷。

2.2 冲压方向的确定

对于 B 柱加强板这种复杂形状零件的成形,一个重要的问题就是确定拉深方向。冲压方向的选择不仅要保证成形质量,还要考虑送料和导料的方便性。拉深方向确定的合理性应能满足以下要求^[1]:

- 1) 拉深凸模能够顺利进入凹模;
- 2) 拉深深度适当,并且尽量拉深均匀;
- 3) 凸模相对于坯料两侧的拉入角尽量相等;
- 4) 凹模与坯料接触平稳,接触面积较大,多处接触时最好保证同时接触。

本文利用 Dynaform 中 DEF 模块,以 Preparation 命令中的 Tipping 进行冲压方向调整,并采用自动调整 (auto tipping) 与手动调整 (manual tipping) 相结合的方法。图 2 所示为最终确定的冲压方向,该冲压方向使拉深深度最小,利于坯料拉深成形。

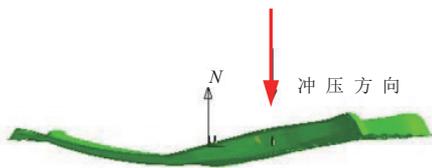


图 2 冲压方向的确定

2.3 压料面的设计

压料面是指位于凹模上表面和凸模之间将坯料压紧以防止其起皱的部分表面,用于保证坯料在拉深成形过程中不被破坏和顺利成形,起着重要的作用。针对 B 柱加强板外形呈弧度且纵向形状尺寸变化较大的特点,为了使坯料成形过程中各部分的受力状况均衡,本文设计模具的压面料为曲面,如图 3 所示。

2.4 工艺补充面的设计

工艺补充面的设计是复杂曲面形状零件成形工艺设计的重要内容,工艺补充面设计是否合理,直接影响到坯料拉深成形的变形条件及成形结果,尤其影响成形零件表面质量、起皱、破裂等质量问题的控制。工艺补充设计应遵守内孔封闭原则、简化拉深件结构形状原则以及对后续工序有利的原则。在保证成形质量的前提下,工艺补充部分应尽量减少以提高材料的利用率。B 柱加强板的各部分变形分布不均匀,变形情况相差较大。工艺补充面的设计应有利于平衡零件各部分的变形量,有助于提高零件的成形质量。基于以上原则,本文设计的工艺补充面如图 3 所示。

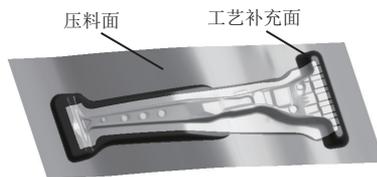


图 3 工艺补充面和压面料的设计

2.5 坯料展开尺寸的确定

坯料形状尺寸的确定是板料成形工艺设计中的重要一环,合理的坯料形状不仅可以减少板料消耗,而且能改善成形过程中材料的应变分布,减少缺陷的产生,提高加工零件的质量。

本文通过有限元逆算法来获得坯料的几何性状和尺寸,即采用 Dynaform 提供的 BSE 功能对设计工艺补充面后的 B 柱加强板进行逆算,得到坯料的初始形状,然后再对其进行修正,最终得到坯料的形状及尺寸如图 4 所示。

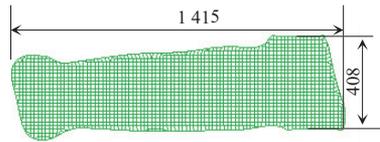


图4 展开的坯料形状及尺寸

2.6 拉深筋的设置

汽车大型冲压件在实际生产中,通常由于零件几何型面的不对称,使得坯料在成形过程中经过凹模口部的各处材料流动速度不均衡,导致拉深后的零件有些部位出现起皱、波纹、变形不足或者回弹,而局部拉深量过大导致减薄严重产生颈缩甚至破裂等缺陷。为了解决这些问题,通常是在凹模口部的周边位置设置拉深筋对坯料成形流动进行调整,即在流动速度大的区域设置大阻力的拉深筋,而在流动速度小的区域设置小阻力的拉深筋或者不设拉深筋,从而平衡材料沿凹模口部的流动速度差异,防止起皱,提高零件成形刚性。

本文根据凹模口部的形状,利用 Dynaform 中的 Preprocess 模块内的 Boundary Line 功能进行凹模口部边界轮廓线的创建,生成一条轮廓线,然后把生成的曲线朝外偏置 30 mm,得到一条偏置线,沿着偏置线创建拉深筋,初始生成高度为 8 mm、宽度为 10 mm 的半圆筋。为了便于根据不同的部位及不同的进料情况来调整阻力参数,将拉深筋分 6 段来设置,如图 5 所示。

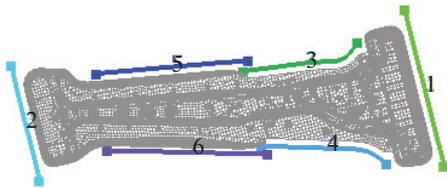


图5 拉深筋的设置

经过对冲压方向的确定、工艺补充面的设计、压料面的设计以及拉深筋的设置,创建了 B 柱加强板的拉深凹模。凹模设计完毕后,通过曲面偏移分别生成凸模及压边圈,获得 B 柱加强板的拉深模具模型,如图 6 所示。

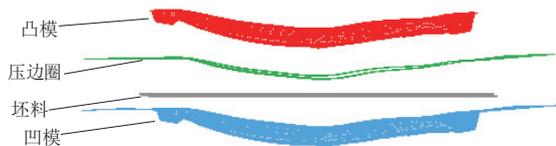


图6 拉深模具模型

3 有限元建模

采用有限元模拟分析可预测零件拉深成形模具设计的合理性,然后经过调整压边力及拉深筋布置等工艺参数,可保证冲压成形的可靠性,有效提高模具设计效率。

3.1 仿真参数选取

本文选用冷轧钢板 TRIP600 进行仿真分析研究,材料性能参数如表 1 所示。仿真中应用幂指数硬化材料模型 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 和 3 参数 Barlat 材料屈服模型,坯料厚度为 1.8 mm,单元采用四边形 Belytschko-Tsay 壳单元模型。

表1 TRIP600 钢板的材料参数

屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	泊松比 μ	硬化 指数 n	各向异性系数		
					r_{00}	r_{45}	r_{90}
472	658	37.1	0.3	0.232	1.02	0.845	1.395

坯料拉深成形的主要工艺参数有:拉深筋阻力、摩擦系数、冲压速度、压边力和模具间隙等。表 2 所示为仿真分析中对各参数的取值。需要特别说明的是:模具实际生产时冲压速度较低,在仿真模拟中为了提高计算效率,将模拟中的冲压速度设为实际速度的若干倍,对结果影响不大。

表2 模拟中使用的工艺参数

拉深筋单位长度 阻力/(N/mm)	摩擦 系数	冲压速度/ (mm/s)	压边力/ kN	模具间隙/ mm
0	0.125	5 000	2 400	1.98

采用逆算法展开得到的坯料(图 4),设备类型选用双向反拉深冲压的方式,定义“合模—压边—拉深”的模拟工序过程,采用固定压边,初始压边力根据经验公式计算得到,合模间隙为 1.1 倍坯料厚度,即压边时压边圈与凹模的距离为 1.98 mm,设定摩擦系数为 0.125,使用自适应网格重划分,即在变形剧烈的部位和过渡圆角半径较小的区域,网格密度较大。

3.2 初次模拟

根据选取的材料参数和工艺参数,在 Dynaform 的 AutoSetup 模块进行初次模拟计算提交,模拟后获得的结果如图 7 所示。由此结果可以看出,按初步设置的拉深工艺方案,成形结果存在缺陷。图 7 中结合成形极限曲线图和应变分布图,可以看到零件发生了较大的塑性变形,变形量比较充分;零件大部分区域都分布在应变安全区范围内,除了法兰边缘外没有产生起皱现象,但是出现了破裂危险现象,主要分布在缺陷 A、缺陷 B 和缺陷 C 三处区域,这种缺陷在板料冲压中不容许存在,为质量问题件和不合格产品。另外,缺陷 D 为变形不足区域,变形不足可能导致零件刚度不足及成形后回弹等问题,回弹过大将导致零件尺寸难以保证及装配不良。

汽车上复杂零件的冲压成形发生破裂问题,一般是由于变形过大、板料强度不足、过渡圆角小或者拉深筋布置不合理等引起的,可通过降低拉深深度、优化工艺补充面、加大过渡圆角、改善拉深筋形状和高度、修改坯料形状等方式,提高成形过程中坯料的流动性,避免破裂缺陷^[6]。

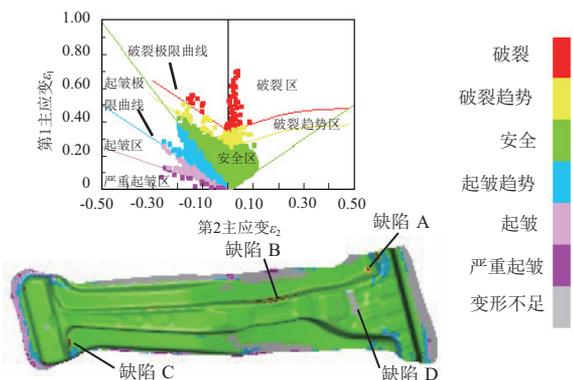


图7 初次模拟结果

3.3 工艺参数优化及分析结果

初次模拟,拉深成形过程中零件拐角区(图7中缺陷A和缺陷C)的破裂是由于凹模进料口过渡圆角过小而产生,为此修改了初始毛坯性状和工艺补充面,增大缺陷区域拐角区的圆角半径,提高材料成形中的均匀流动性,消除破裂产生的条件。零件直边区(图7缺陷B)的破裂是由于拉深筋阻力过高而造成的,为此将拉深筋3的高度降低为5mm。由于成形结果出现过多的破裂现象,表明压边力过大,为此将压边力下调为 2.0×10^6 N。另外,为了有效控制起皱和变形不足,确保成形后的零件具有足够的刚性和减小回弹,调整零件两端头拉深筋1和拉深筋2的高度,设置为12mm。

图8所示为部分工艺参数优化后的模拟结果。从图8中可知,初次模拟(图7)的破裂缺陷得到了很好的改善,破裂危险区域已完全改善,变形比较充分,变形不足区域基本消除,零件的成形质量得到了很好的保证。表明优化方案提出的工艺参数调整可靠。

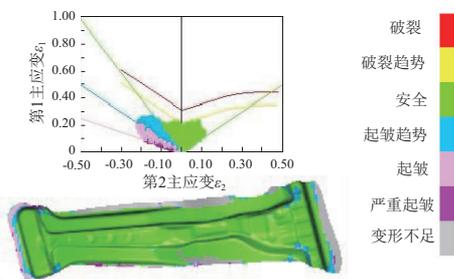


图8 调整工艺参数后的模拟结果

4 实验验证

生产实践中,根据最终模拟分析得到的模具造型和工艺参数,用于指导B柱加强板的拉深模具设计和制造。图9所示为凸模结构实物图。采用上述调整优化后的工

艺进行冲压试生产。结果表明,B柱加强板成形效果良好,无破裂、起皱等现象,变形充分,回弹小,产品质量符合设计要求,试生产结果与模拟结果基本吻合。覆盖件拉深模具的设计合理与否,除了零件冲压方向、工艺补充面、压面料的合理设计,还要根据具体材料的力学性能,对拉深筋和压面料进行必要的优化,才可拉深出合格的零件,有效提高模具设计的效率,减少了开发成本。



图9 凸模结构

5 结语

本文以某汽车车身B柱加强板为例,基于有限元模拟进行模具设计,根据零件的形状特点和工艺分析,通过几何模型的检查 and 修补、冲压方向的确定、压面料的设计、工艺补充面的设计、坯料尺寸展开、拉深筋的设置等模具设计过程,生成零件拉深的有限元模型。经过初次仿真分析,定性预测了零件成形过程中出现的破裂质量缺陷,进行问题分析和工艺参数优化,最后根据调整后的模拟结果进行实际生产,最终试生产出的零件合格,降低了模具设计成本,提高了工艺设计质量,缩短了开发周期,提升了生产效率。

参考文献:

- [1] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 李硕本. 冲压工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [3] 马治军,陈伟业,唐鼎,等. 汽车B柱零件热冲压软区模具模面优化设计[J]. 锻压技术,2019(4):138-144.
- [4] 赵仕宇,詹艳然. 基于数值模拟的TRIP钢板汽车覆盖件成形研究[J]. 中国工程机械学报,2011,9(3):19-24.
- [5] 刘丽娟,武朋飞. 汽车门外板B柱冲压表面缺陷控制方法[J]. 塑性工程学报,2019,26(1):52-57.
- [6] 陈文亮. 板料成形CAE分析教程[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

收稿日期:2020-06-16