

基于 CAD/CAE 的 A 柱内板成形工艺优化及模具设计

万志远

(山东华宇工学院 机械工程学院, 山东 德州 253034)

摘要: 为解决轿车 A 柱内板冲压成形开裂、起皱和变形不对称等问题, 分析了轿车 A 柱内板的结构特点, 采用“一模两件”的工艺设计方案解决单个零件变形不对称问题, 设计了拉延成形、修边-冲孔、翻边-修边-侧冲孔和侧冲孔-切断的全工序冲压方案。并采用数值模拟方法, 从材料厚度最大减薄率和最大增厚率两个方面探究了压边力、冲压速度和模具间隙对零件成形质量的影响规律, 得到了压边力为 350~400 kN、冲压速度在 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内、模具间隙为 1.61~1.54 mm 时成形效果较好。运用正交试验方法, 计算出各因素各水平的材料厚度最大减薄率平均值, 得到了压边力因素的极差为 0.776、冲压速度因素的极差为 1.259、模具间隙因素的极差为 0.247, 确定了压边力为 350 kN、冲压速度为 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.54 mm 的最优工艺参数组合。最后, 基于工艺设计设计了成形模具, 并采用最优工艺参数进行了试模生产, 零件未产生开裂、起皱等缺陷, 验证了模拟计算的可靠性。

关键词: A 柱内板; 冲压成形; 最大减薄率; 最大增厚率; 压边力; 冲压速度; 模具间隙

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.011

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0096-07

Forming process optimization and die design of A-pillar inner panel based on CAD/CAE

Wan Zhiyuan

(The Academy of Mechanical Engineering, Shandong Huayu University of Technology, Dezhou 253034, China)

Abstract: In order to solve the problems of cracking, wrinkling and asymmetry deformation in the stamping of A-pillar inner panel for car, firstly, the structure characteristics of the A-pillar inner panel for car was analyzed, the problem of asymmetry deformation for a single part was solved by the process design scheme of “one die and two pieces”, and the whole process scheme of stamping including drawing, trimming-punching, flanging-trimming-side punching and side punching-cutting was designed. Secondly, from two aspects of the maximum thinning rate and the maximum thickening rate of material thickness, the influence laws of blank holder force, stamping speed and die clearance on the forming quality of parts were explored by numerical simulation method, the results show that the forming effect is better when the blank holder force is 350~400 kN, the stamping speed is within $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the die clearance is 1.61~1.54 mm. Furthermore, the average values of the maximum thinning rate for material thickness of each factor and each level were calculated by the orthogonal test method, and the ranges of the blank holder force factor, stamping speed factor and die clearance factor were obtained as 0.776, 1.259 and 0.247, respectively. The optimal process parameters combination were determined with the blank holder force of 350 kN, the stamping speed of $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the die clearance of 1.54 mm. Finally, the forming die was designed based on the process design, and the trial production was conducted using the optimum process parameters. The results show that there are no defects such as cracking and wrinkling, and the reliability of the simulation calculation is verified.

Key words: A-pillar inner panel; stamping; maximum thinning rate; maximum thickening rate; blank holder force; stamping speed; die clearance

轿车 A 柱内板是侧围总成的重要零件之一, 通过点焊固定于 A 柱内侧, 起到加强作用^[1]。零件形状复杂、冲孔较多、材料较厚, 变形控制较困难,

工艺设计难度大^[2]。

针对轿车 A 柱内板冲压成形复杂、不对称及变形开裂、起皱等问题, 本文采用数值模拟和试验验证的方法进行分析。首先, 分析轿车 A 柱内板的结构特征, 根据其结构特点, 采用“一模两件”的工艺设计方案来解决单个零件成形不对称问题, 详细设计了零件全工序冲压方案; 从材料厚度最大减薄率和最大增厚率两个方面探究了压边力、冲压速度

收稿日期: 2024-03-08; 修订日期: 2024-06-01

基金项目: 山东华宇工学院校级协同创新中心“智能装备技术研发协同创新中心”资助项目

作者简介: 万志远 (1988-), 男, 硕士, 副教授, 工程师

E-mail: 815223128@qq.com

和模具间隙对零件成形质量的影响规律; 其次, 采用正交试验方法, 以零件材料厚度最大减薄率为切入点, 得到不同工艺参数下材料厚度最大减薄率的极差, 确定影响轿车 A 柱内板拉伸成形的关键冲压工艺参数之间的主次关系, 确定最优工艺参数组合并进行生产试验验证。

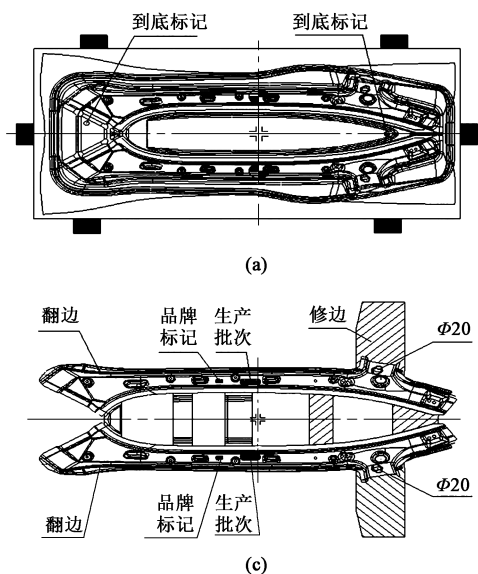
1 轿车 A 柱内板工艺设计

如图 1 所示, 某轿车 A 柱内板零件尺寸约为 $1100\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 140\text{ mm}$, 厚度为 1.4 mm , 材料为 SPCE, 一种用于深冲拉深的冷轧碳素钢板^[3], 其屈服强度约为 190 MPa , 抗拉强度不低于 280 MPa , 净重约为 1.31 kg 。零件结构不对称, 曲面形状复杂, 冲压成形规律不易掌握, 修边线长且多处需要侧修边, 零件共有 15 个孔, 其中圆孔 12 个, 最大直径为 $\Phi 27\text{ mm}$, 最小直径为 $\Phi 5\text{ mm}$ 。

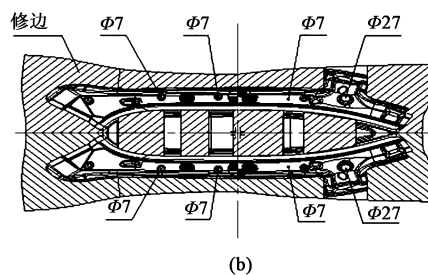


图 1 轿车 A 柱内板零件

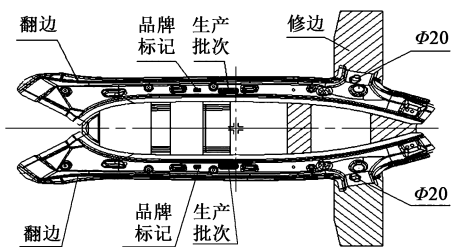
Fig. 1 A-pillar inner panel part for car



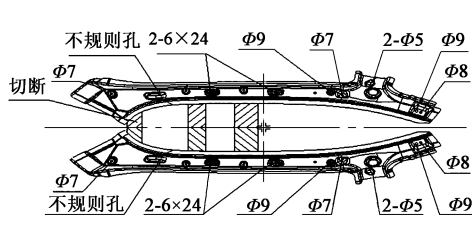
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3 A 柱内板零件冲压全工序图

(a) 拉伸成形 (b) 修边-冲孔 (c) 翻边-修边-侧冲孔 (d) 侧冲孔-切断

Fig. 3 Whole process diagrams of stamping for A-pillar inner panel part

(a) Drawing (b) Trimming-punching (c) Flanging-trimming-side punching (d) Side punching-cutting

如图 3a 所示, 第 1 工序直接采用方形板料进行拉伸成形, 减少了落料工序, 简化了零件开发周期, 采用“一模两件”成形, 解决了单个零件成形不对

称的问题。轿车 A 柱内板属于 A 柱总成的一部分, 每车共有左右两件, 分别对称分布于轿车两侧, 单个 A 柱内板零件的冲压成形复杂, 零件的材料利用率低且由于零件具有非对称结构, 冲压成形力不对称分布, 工艺设计难度大^[4]。因此, 根据轿车 A 柱内板左右两件完全对称的特性, 工艺设计采用“一模两件”, 可解决成形不对称的问题。毛坯采用 $1200\text{ mm} \times 645\text{ mm}$ 的方形板料, 单件 A 柱内板冲压定额消耗约为 4.25 kg , 材料利用率约为 30.82% , 工艺补充后的设计模型如图 2 所示。

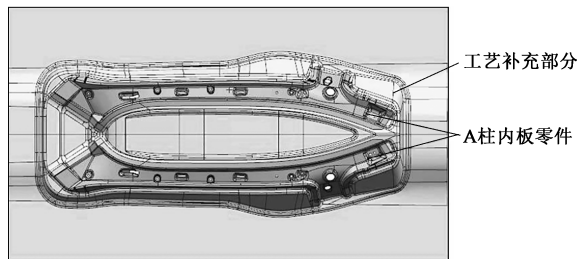


图 2 工艺补充模型

Fig. 2 Model of process supplement

轿车 A 柱内板零件冲压的成形全工序方案确定为: 拉伸成形、修边-冲孔、翻边-修边-侧冲孔和侧冲孔-切断共 4 道冲压工序, 如图 3 所示。

称的问题, 在提高零件成形精度的同时提升了冲压效率。采用定位块定位, 零件两侧各设置一处到底标记, 确定零件成形是否到位, 成形后边界显示材

料流动对称,中间和右侧进料较多。

如图 3b 所示,第 2 工序采用前序成形形状定位,进行修边和冲孔,8 个对称孔的轴线方向及周围修边线法向与冲压方向一致,可直接冲裁,周围修边废料增设切断刀具,将完整的周边废料切断为多个,在降低冲裁力的同时减小了修边刀具的磨损,最大程度地降低了崩刃的可能性。

如图 3c 所示,第 3 工序仍采用形状定位来进行翻边、修边和侧冲孔,2 个对称的直径为 $\Phi 20$ mm 的孔轴线与冲压方向不一致,增加两处斜楔完成侧向冲孔,外侧 2 处修边和内部 2 处修边均可直接冲裁,左侧尾部翻边成形同时进行,零件的生产批次、时间等信息均在本工序压制成形。

如图 3d 所示,本工序是零件最后一道工序,采用形状定位完成侧冲孔和切断。对称分布的 20 个孔需要增加斜楔完成侧向冲孔,冲孔数量较多,采用阶段式冲头,间断冲裁,较小受力集中,避免了崩刃,最后中间部分的切断实现了“一模两件”。

2 轿车 A 柱内板成形模拟计算

采用 Dynaform 模拟计算零件拉延成形过程,分析零件在不同压边力、不同冲压速度和不同模具间隙下的成形规律^[5-6]。设置压边力分别为 450、400、350 和 300 kN,冲压速度分别为 3000、2500、2000 和 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,模具间隙分别为 1.61、1.54、

1.47 和 1.4 mm,材料为 SPCE 钢,摩擦因数采用默认 0.125,网格类型采用软件默认类型^[7]。

图 4 为零件初步模拟成形极限图。可以看出,零件开裂危险处位于中间部位小圆角区域,起皱区在毛坯最外侧,其中最右侧区域的材料流入量最大,产生的起皱最明显。不论开裂还是起皱从成形极限图分析初步得到零件主体部位基本均在安全范围内,为进一步优化工艺参数,下文将重点从压边力、冲压速度和模具间隙进行研究。

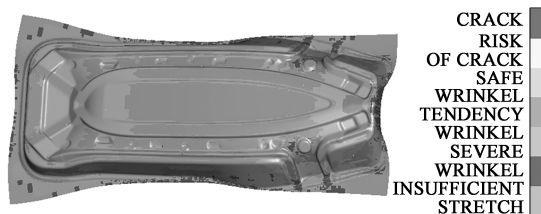


图 4 零件成形极限图

Fig. 4 Forming limit diagram of part

图 5 为冲压速度为 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.54 mm 时,不同压边力下零件材料厚度减薄率分布云图。由图 5 可以看出,随着压边力由 450 kN 降低至 300 kN,零件厚度最大减薄率由 27.721% 减小至 26.885%,材料最大增厚率由 23.615% 增加至 25.430%,增长趋势先快后慢,在压边力降低至 400~350 kN 时,材料厚度最大减薄率的减小趋势趋于平缓,最大增厚率的增大趋势也趋于平缓。

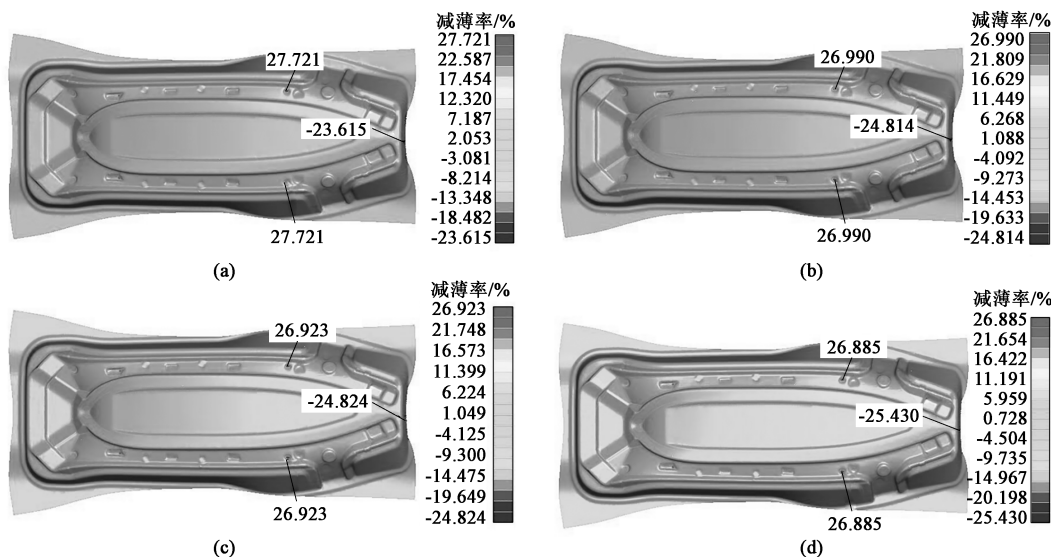


图 5 不同压边力下零件材料厚度减薄率分布云图

(a) 450 kN (b) 400 kN (c) 350 kN (d) 300 kN

Fig. 5 Distribution nephograms of thinning rate of part material thickness under different blank holder forces

图 6 为压边力为 400 kN、模具间隙为 1.54 mm 时,不同冲压速度下零件材料厚度减薄率分布云图。

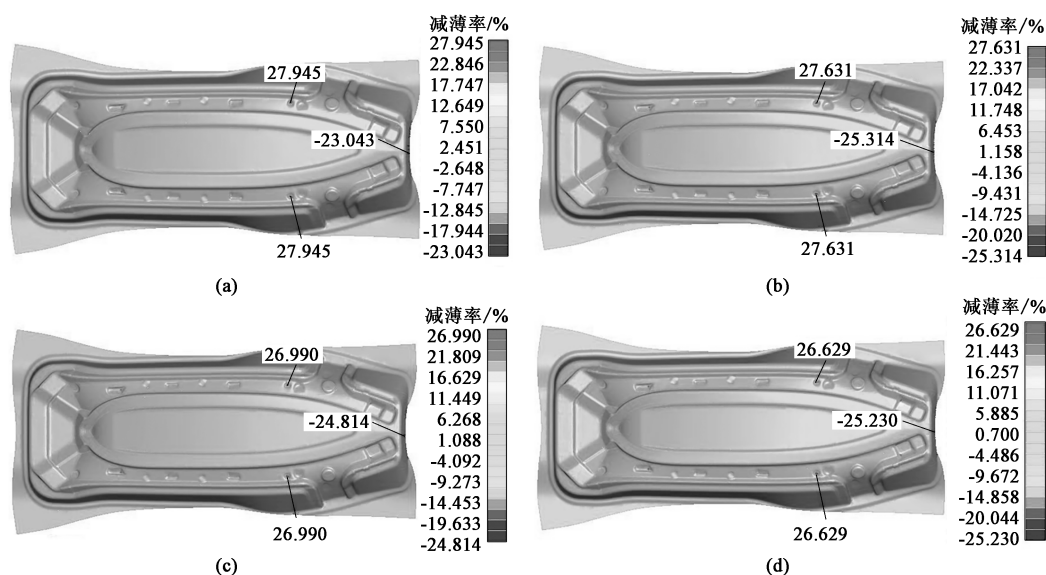


图6 不同冲压速度下零件材料厚度减薄率分布云图

(a) $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $2500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6 Distribution nephograms of thickness thinning rate of part material under different stamping speeds

随着冲压速度由 $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低至 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 零件厚度最大减薄率由 27.945% 减小至 26.629%, 减小趋势先快后慢, 在冲压速度为 $2500 \sim 1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 最大减薄率变化比较明显; 材料最大增厚率变化较为复杂, 规律不明显, 呈现先增加再减小再增加的趋势, 最大时为 25.314%, 最小时为 23.043%。综合考虑两者因素, 冲压速度建议控制在 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内比较合理。

图 7 为压边力为 400 kN、冲压速度为 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

时, 不同模具间隙下零件材料厚度减薄率分布云图。随着模具间隙由 1.61 mm 降低至 1.40 mm, 零件厚度最大减薄率变化不明显, 变化趋势无明显规律, 基本在 27% 左右小范围变化, 最大为 27.225%, 最小为 26.990%; 材料最大增厚率的变化幅度较大, 呈现先减小后急剧增加的趋势, 最大时为 28.782%, 最小时为 24.814%。综合考虑两者因素, 模具间隙为 1.61 ~ 1.54 mm 时成形效果较为理想。

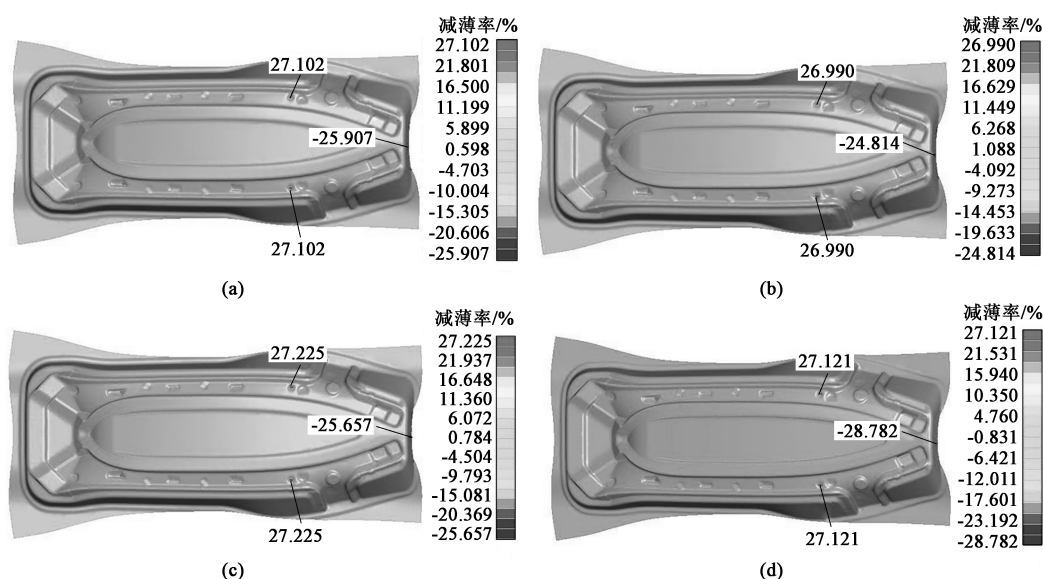


图7 不同模具间隙下零件材料厚度减薄率分布云图

(a) 1.61 mm (b) 1.54 mm (c) 1.47 mm (d) 1.40 mm

Fig. 7 Distribution nephograms of thinning rate of part material thickness under different die clearances

3 轿车 A 柱内板成形正交试验分析

轿车 A 柱内板采用“一模两件”成形,工艺参数变化对其质量有较大影响,可采用基于正交表的多因素多水平试验方法进行分析,在多组试验方案中选出零件成形工艺参数的最优组合,可以初步确定影响零件成形质量的工艺参数的主次关系^[8-9]。拉延成形为零件成形的第 1 道工序,在冲压生产中,代表起皱的最大增厚率在修边线以外,因此,在拉延成形阶段,其最大增厚率仅起参考作用,正交试验以材料厚度最大减薄率作为评价指标^[10-11]。采用正交试验方法,设计压边力 a 、冲压速度 b 和模具间隙 c 作为主要影响因素,正交试验因素水平表如表 1 所示,计算结果如表 2 所示。

表 1 正交试验各因素和水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	压边力 a/kN	冲压速度 $b/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	模具间隙 c/mm
1	450	3000	1.61
2	400	2500	1.54
3	350	2000	1.47
4	300	1500	1.40

表 2 正交试验数值模拟计算结果
Table 2 Numerical simulation calculation results of orthogonal test

序号	压边力 a/kN	冲压速度 $b/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	模具间隙 c/mm	最大减薄率/ %
1	450	3000	1.61	28.681
2	450	2500	1.54	28.347
3	450	2000	1.47	27.921
4	450	1500	1.40	27.582
5	400	3000	1.54	27.945
6	400	2500	1.47	27.728
7	400	2000	1.40	27.121
8	400	1500	1.61	26.709
9	350	3000	1.47	28.007
10	350	2500	1.40	27.683
11	350	2000	1.61	27.334
12	350	1500	1.54	26.405
13	300	3000	1.40	27.914
14	300	2500	1.61	27.848
15	300	2000	1.54	26.885
16	300	1500	1.47	26.816

如表 3 所示,以零件材料厚度最大减薄率为切入点,分别计算各因素各水平下的平均值,得到不

同工艺参数下材料厚度最大减薄率的极差,极差越大则表示该工艺参数对零件成形质量的影响越大,说明其在冲压生产中的越重要^[12]。根据表 3 可知,压边力因素的极差为 0.776,冲压速度因素的极差为 1.259,模具间隙因素的极差为 0.247,可知影响轿车 A 柱内板拉延成形的关键冲压工艺参数的主次关系为:模具间隙<压边力<冲压速度,同时,可以确定零件冲压成形最优工艺参数组合为 $a3b4c2$,即压边力为 350 kN、冲压速度为 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.54 mm。

表 3 极差分析结果 (%)
Table 3 Range analysis results (%)

水平	最大减薄率平均值		
	压边力 a	冲压速度 b	模具间隙 c
1	28.133	28.137	27.643
2	27.376	27.902	27.396
3	27.357	27.315	27.618
4	27.366	26.878	27.575
极差	0.776	1.259	0.247

4 成形模具设计与验证

A 柱内板第 1 工序拉延成形是零件所有工序中最关键、最重要的工序,拉延成形模具作为关键的工艺装备之一,其设计尤为重要。以工艺补充后的模面作为模具凸模、凹模和压边圈设计的基础,采用 UG 参数化建模方法,设计模具的上模、压边圈和下模。模具的整体结构如图 8 所示。

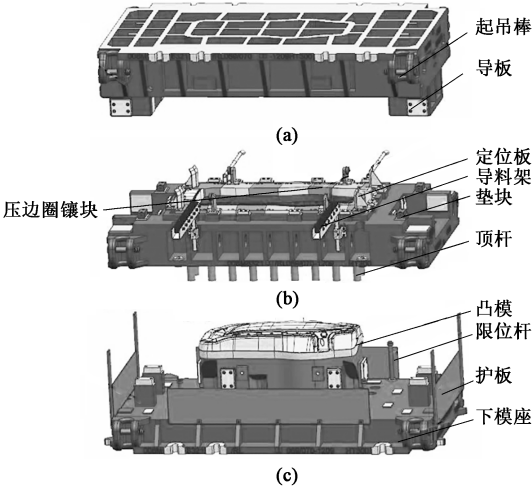


图 8 模具结构图

(a) 上模 (b) 压边圈 (c) 下模

Fig. 8 Structure diagrams of die

(a) Upper die (b) Blank holder (c) Lower die

(1) 上模设计。上模以模面为基础进行整体设计, 型腔外侧压料区域采用和压边圈完全对称的镶块设计, 镶块装配间隙控制在 0.02 mm 以内, 两侧导向柱安装导板, 实现与压边圈的装配。

(2) 压边圈设计。压边圈以模面为基础进行分体设计, 压边圈本体为 HT200 灰铸铁, 压边镶块与上模镶块的材质为 Cr12MoV 钢, 间隙要求与上模一致, 四角设计 4 处垫块, 可用于调整压料的间隙, 下方分布顶杆, 顶杆直接与压机连接实现压料, 设计定位板、导料架等实现板料的定位和移动。

(3) 下模设计。下模主要的凸模和下模座设计为分体式, 通过螺钉安装, 凸模材质为 Cr12MoV 钢, 模座材质与上模相同。四角设置 4 个限位螺钉, 控制压边圈的行程。

采用优化后的工艺参数进行模拟和试验验证: 压边力为 350 kN、顶杆行程为 230 mm、闭合高度为 993 mm、冲压速度 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.5 mm, 模拟结果如图 9 所示, 零件厚度最大减薄率为 26.405%, 位置处于零件中间部位的小凹坑处, 未出现开裂缺陷, 最大增厚率为 25.601%, 位置处于零件最右侧边缘处, 最终产品零件位于修边线以内, 材料增厚率在 15% 以内, 满足设计要求。试制零件如图 10 所示, 未出现开裂, 起皱区域处于修边线以外, 与模拟结果吻合。



图 9 优化后零件材料厚度减薄率分布云图

Fig. 9 Distribution nephogram of thinning rate of part material thickness after optimization

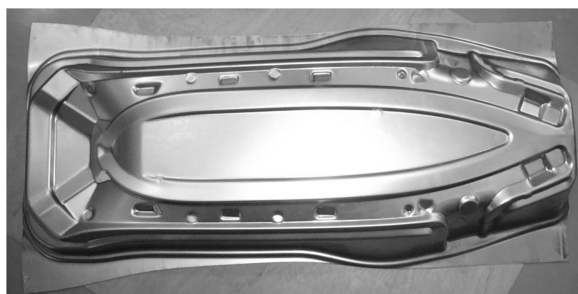


图 10 A 柱内板实物图

Fig. 10 Physical photo of A-pillar inner panel

5 结论

(1) 根据轿车 A 柱内板结构特点, 采用“一模两件”的工艺设计方案解决单个零件成形不对称问题, 详细设计了拉延成形、修边-冲孔、翻边-修边-侧冲和侧冲孔-切断的全工序冲压方案, 基于冲压方案设计了成形模具, 并进行了试模生产, 零件未产生开裂、起皱等缺陷, 验证了模拟计算的可靠性。

(2) 从材料厚度最大减薄率和最大增厚率两个方面, 运用数值模拟方法分析了轿车 A 柱内板在不同压边力、冲压速度和模具间隙下的拉延成形规律, 得到压边力为 350~400 kN、冲压速度在 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内、模具间隙为 1.61~1.54 mm 时成形效果较好。

(3) 运用正交试验方法, 得到了压边力因素极差为 0.776、冲压速度因素极差为 1.259、模具间隙因素极差为 0.247, 确定了压边力为 350 kN、冲压速度为 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 1.54 mm 的最优工艺参数组合。

参考文献:

- [1] 陈鹏, 段磊, 马舟, 等. 汽车左右侧边梁加强板冲压工艺优化及回弹控制研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (12): 72-80.
Chen P, Duan L, Ma Z, et al. Research on stamping process optimization and springback control for automobile left and right side beam reinforcement plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (12): 72-80.
- [2] 乐起, 王玮珉, 胡志力, 等. 某高强钢汽车控制臂冲压成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (12): 47-54.
Yue Q, Wang W M, Hu Z L, et al. Research on stamping process of a high strength steel automobile spring arm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (12): 47-54.
- [3] 万志远. 轿车翼子板成形工艺分析与模具设计 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 202-209.
Wan Z Y. Forming process analysis and die design on automobile fender [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 202-209.
- [4] 雷青哲, 王悉颖, 姜涛, 等. U 型框类零件双向拉深成形研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (1): 118-125.
Lei Q Z, Wang X Y, Jiang T, et al. Research on bidirectional deep drawing forming of U-shaped frame part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (1): 118-125.
- [5] 黄进, 古彬, 赵孝笑. 某汽车前隔板拉延成形工艺参数多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 23-31.

(下转第 238 页)