

## 基于 Autoform 的后背门外板冲压开裂分析

魏绍东<sup>1,2</sup>, 韩龙帅<sup>1,2</sup>, 桑 贺<sup>1,2</sup>, 李晓林<sup>1,2</sup>, 陈炜煊<sup>1,2</sup>, 陈洪生<sup>3</sup>

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043; 2. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室, 北京 100043;  
3. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司 制造部, 河北 唐山 063200)

**摘要:** 基于冲压成形仿真软件 Autoform 对某车型后背门外板冲压过程进行模拟仿真, 分析了压边力、润滑、料厚及模具间隙等因素对拉延筋圆角减薄率的影响, 并基于分析结果解决了拉延筋圆角冲压开裂的问题。结果显示, 零件减薄率随着压边力的增加而增加, 但拉延筋圆角处减薄率随着压边力的增加而减小, 压边力在 1400~2000 kN 之间时, 拉延筋圆角处减薄率可保持在 19.1% 之内; 拉延筋圆角处减薄率随着摩擦因数的减小而增加, 当摩擦因数为 0.11 时减薄率达到 19.6%; 料厚由 0.63 mm 增加至 0.67 mm 时, 拉延筋圆角处减薄率由 16.0% 减小至 13.4%; 模具间隙对拉延筋圆角开裂的影响最为显著, 当模具间隙为 0.02 mm 时, 减薄率达到 25.5%。故适当提升压边力和摩擦因数、增加料厚、减小模具间隙均可降低拉延筋圆角处减薄率。

**关键词:** 冲压; 后背门外板; 圆角开裂; 减薄率; 拉延筋

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.014

**中图分类号:** TG386.3<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0099-06

## Stamping crack analysis on rear door outer panel based on Autoform

Wei Shaodong<sup>1,2</sup>, Han Longshuai<sup>1,2</sup>, Sang He<sup>1,2</sup>, Li Xiaolin<sup>1,2</sup>, Chen Weixuan<sup>1,2</sup>, Chen Hongsheng<sup>3</sup>

(1. Technical Research Institute of Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China;

2. Beijing Key Laboratory of Green and Recyclable Steel Process, Beijing 100043, China;

3. Manufacturing Department of Shougang Jingtang Iron and Steel United Co., Ltd., Tangshan 063200, China)

**Abstract:** Based on the stamping simulation software Autoform, the stamping process of rear door outer panel for a certain vehicle was simulated, and the influences of blank holder force, lubrication, material thickness and die clearance on the thinning rate of drawbead fillet were analyzed. Then, the problem of stamping crack for drawbead fillet was solved based on the analysis results. The results show that the thinning rate of part increases with the increasing of blank holder force, but the thinning rate at the drawbead fillet decreases with the increasing of blank holder force. When the blank holder force is between 1400 and 2000 kN, the thinning rate at the drawbead fillet can remain within 19.1%, and the thinning rate at the drawbead fillet increases with the decreasing of friction factor. When the friction factor is 0.11, the thinning rate reaches 19.6%, and when the material thickness increases from 0.63 mm to 0.67 mm, the thinning rate at the drawbead fillet decreases from 16.0% to 13.4%. The influence of die clearance on the drawbead fillet cracking is the most significant. When the die clearance is 0.02 mm, the thinning rate reaches 25.5%. Therefore, appropriately increasing the blank holder force, friction factor and material thickness and reducing the die clearance can all reduce the thinning rate of drawbead fillet.

**Key words:** stamping; rear door outer panel; fillet cracking; thinning rate; drawbead

钢铁材料一直是汽车的主要材料之一, 随着轻量化、节能减排和降本的需求不断提高, 高强钢在车身上的应用越来越广泛<sup>[1-3]</sup>, 但对于门背板这类成形复杂的零件, 冲压过程中易出现开裂和起皱情况。解决冲压开裂和起皱一般根据技术人员的经验进行修模和试模, 通常需进行多次试验才能解决问题, 这严重影响了冲压效率。随着有限元仿真技术

的发展, 通过仿真方法解决冲压开裂、起皱等问题已得到了大量的应用。张新颖等<sup>[4]</sup> 利用 Dynaform 软件建立了侧围外板冲压仿真模型, 并针对增加拉延筋、压边力调整等方面开展仿真分析, 最终确定最优的拉延筋高度和压边力大小, 改善了零件起皱和开裂的问题。许晶等<sup>[5]</sup> 采用 Autoform 软件对汽车某后背门外板冲压成形的材料利用率进行了分析, 为后期新车型在产品设计和生产制造中提供宝贵的应用经验。蒋磊等<sup>[6]</sup> 基于有限元和正交试验的方法, 分析了翼子板在冲压过程中压边力、塑性应变比、强度等参数对零件减薄率的影

收稿日期: 2022-04-12; 修订日期: 2022-07-15

作者简介: 魏绍东 (1994-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: weisd4991@163.com

响,得出最优的工艺及材料参数。本文针对某车型后背门外板冲压过程中拉延筋圆角处的开裂问题,基于 Autoform 有限元仿真分析软件研究不同压边力、润滑、料厚、模具间隙等对后背门外板拉延筋圆角开裂的影响。

1 冲压开裂情况

以某汽车后背门外板零件的材料(0.65 mm 规格的 HC180BD-Z 钢)为研究对象,该零件的冲压成形分为 4 个工序,即落料→拉延→切边、冲孔→整形→切边→翻边。零件在拉延过程中出现了冲压开裂情况,开裂区位于拉延筋圆角处,如图 1 所示。由于后背门外板结构及变形情况复杂,需进行合理的优化分析才能对结构及工艺进行改进,以减小开裂风险。

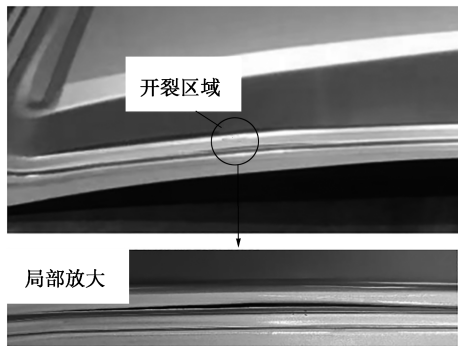


图 1 冲压开裂零件  
Fig. 1 Cracked part by stamping

2 有限元仿真分析

根据汽车后背门外板模具情况,基于有限元分析软件 Autoform 建立拉延工序的仿真模型,如图 2 所示。

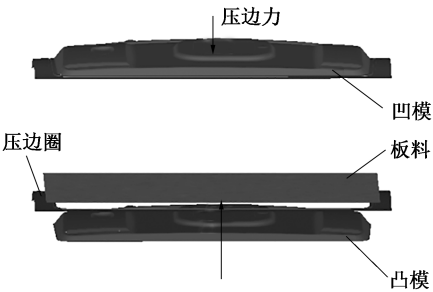


图 2 零件拉延工序成形工具模型  
Fig. 2 Forming tool model for drawing process of part

HC180BD-Z 钢的力学性能见表 1,成形极限曲线如图 3 所示。

表 1 HC180BD-Z 钢的主要参数  
Table 1 Main parameters of HC180BD-Z steel

参数	数值
厚度/mm	0.65
屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	212
抗拉强度 $R_m$ /MPa	319
断后伸长率 $A$ /%	21.1
应变硬化指数 $n$	0.198
轧向塑性应变比 $r_0$	1.69
45°塑性应变比 $r_{45}$	1.43
90°塑性应变比 $r_{90}$	1.96

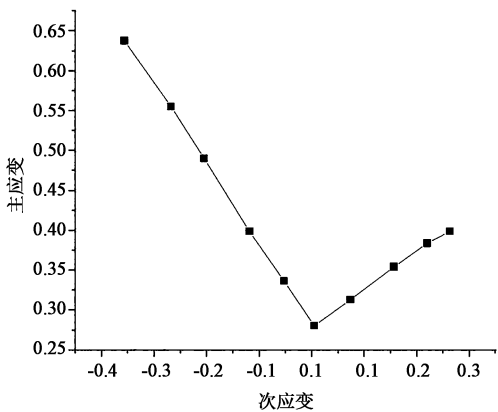


图 3 HC180BD-Z 钢的成形极限曲线  
Fig. 3 Forming limit curve of HC180BD-Z steel

根据实际模具状态,将压边力设置为 1800 kN,摩擦因数设置为 0.15。对汽车后背门外板冲压成形进行仿真分析,结果如图 4 所示,可以看出拉延筋附近管理面处并未出现开裂风险,说明模具设计合理,开裂原因需进一步分析。

3 冲压开裂的影响因素

影响冲压开裂的因素众多,主要包括零件的形状和尺寸、成形工艺<sup>[7-9]</sup>、材料性能<sup>[10-13]</sup>、模具状况以及润滑条件等。本文主要分析压边力、润滑情况、料厚、模具间隙等几个关键因素对冲压过程的影响,并结合现场实际情况分析开裂原因。

3.1 压边力的影响

压边力是拉延过程中重要的工艺参数之一,在一定的冲压条件下,压边力有一个最优的范围,压边力低于该范围,零件易出现起皱情况,压边力高于该范围,零件易出现开裂情况,故对压边力的影

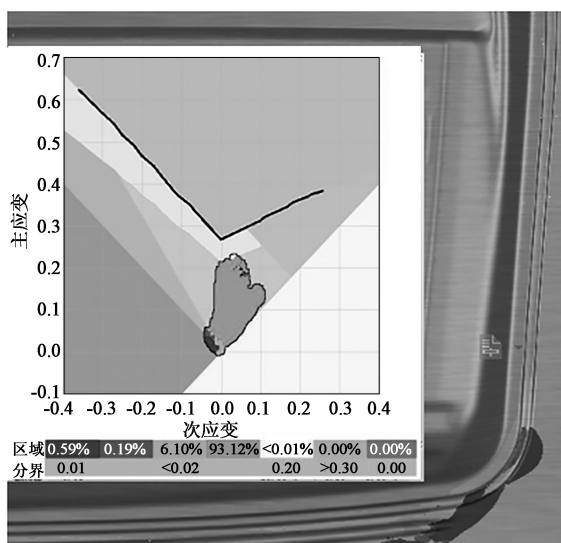


图4 后背门外板成形结果

Fig. 4 Forming result of rear door outer panel

响进行分析尤为重要<sup>[14]</sup>。分别设置压边力为 1400 和 2000 kN 进行仿真分析, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以得出: 随着压边力的增加, 后背门外板的减薄率呈现增加的趋势, 当压边力由 1400 kN 增加至 2000 kN 时, 零件减薄率由 11.6% 增加至 18.9%; 但拉伸筋圆角附近的减薄率则随着压边力的增加而减小, 由 19.1% 减小至 11.1%。当压边力大于 2000 kN 或小于 1400 kN 时, 均会进一步增加零件的开裂风险。分析其原因, 如图 6 和图 7 所示, 当压边圈和凹模闭合时, 随着凸模向上移动, 板料逐渐流入凹模中, 拉伸筋附近管理面区域的受力随着压边力的减小而减小, 由于拉伸筋圆角半径  $R$  很小 ( $R=1.5\text{ mm}$ ), 材料流入会导致拉伸筋圆角处受力增加, 进而导致此处减薄率有所增加。

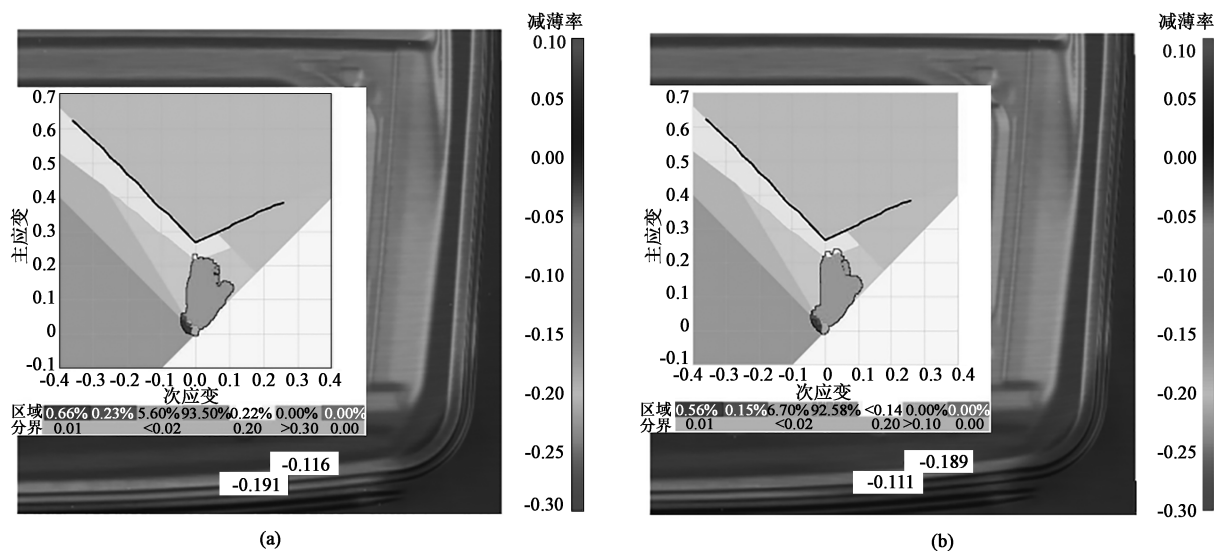


图5 不同压边力下后背门外板的减薄率

(a) 1400 kN (b) 2000 kN

Fig. 5 Thinning rates of rear door outer panel under different blank holder forces

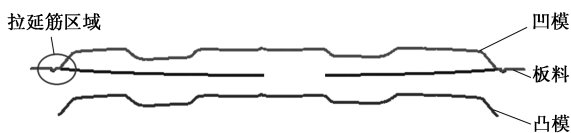


图6 压边圈闭合状态

Fig. 6 Closed state of blank holder



图7 拉伸筋区域局部放大图

Fig. 7 Partial enlarged view of drawbead area

### 3.2 润滑的影响

润滑对拉伸工序产品的质量有很大的影响: 润滑量越高, 冲压过程中流料阻力越小, 易发生起皱现象; 润滑量越低, 冲压过程中流料阻力越大, 易发生开裂现象。考虑生产过程中模具及材料表面涂油量的波动, 分别设置摩擦因数  $\mu=0.11$  和  $0.13$  两

种情况, 分析润滑对冲压过程的影响, 仿真结果如图 8 所示。

由图 8 得出, 当  $\mu=0.13$  时, 拉伸筋管理面附近无开裂风险, 而当  $\mu=0.11$  时, 拉伸筋圆角附近存在开裂风险, 减薄率达到 19.6%。这是由于摩擦因数减

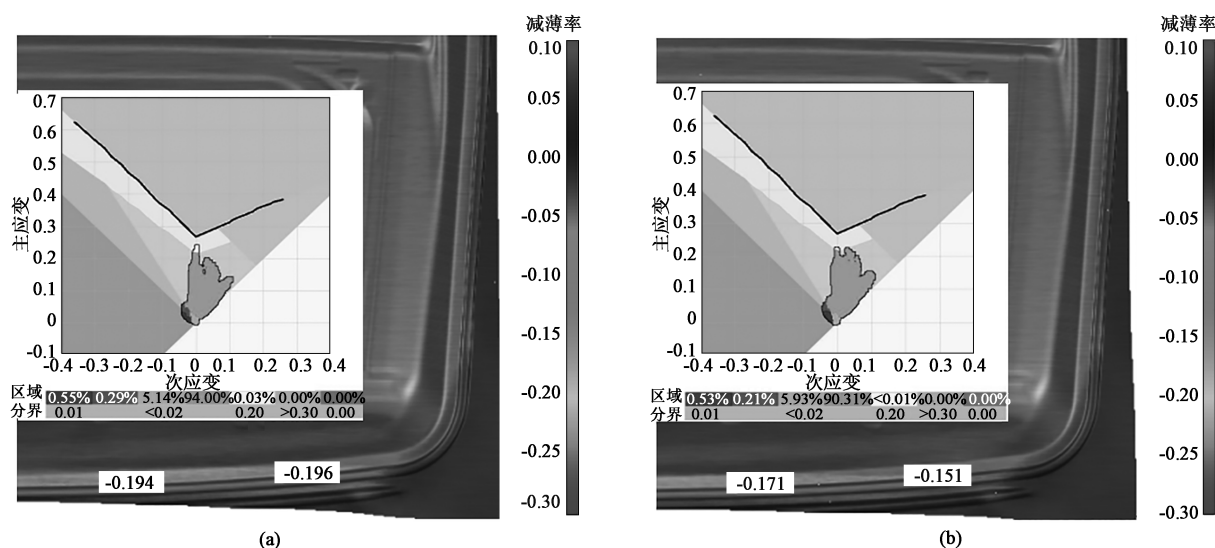


图 8 不同润滑条件下的后背门外板的减薄率

(a)  $\mu=0.11$  (b)  $\mu=0.13$ 

Fig. 8 Thinning rates of rear door outer panel under different lubrication conditions

小导致管理面受力减小,材料流入过程中,拉延筋圆角尺寸小,受力增加明显,故开裂风险增加。

### 3.3 料厚的影响

板料的厚度公差对冲压开裂有较大的影响。当板料厚度超过上偏差时,局部间隙小的区域在送料时被卡住,难以压紧变形,材料不易突破凹模。当金属板的厚度超过下偏差时,材料变薄,单位横截面积的压应力增加,或者因为材料变薄,阻力减小,

太多的板料流入凹模,形成褶皱。此时材料不易流动,板材被撕裂。故分析板料厚度  $t$  对冲压开裂的影响十分重要。

由于钢板轧制工艺的影响,不同批次的板材会存在一定的厚度偏差。钢厂会根据客户需求选择下偏差或上偏差交货。根据板料实际厚度公差情况,分别设置下偏差和上偏差料厚情况,即 0.63 和 0.67 mm,分析料厚对冲压过程的影响,仿真结果如图 9 所示。

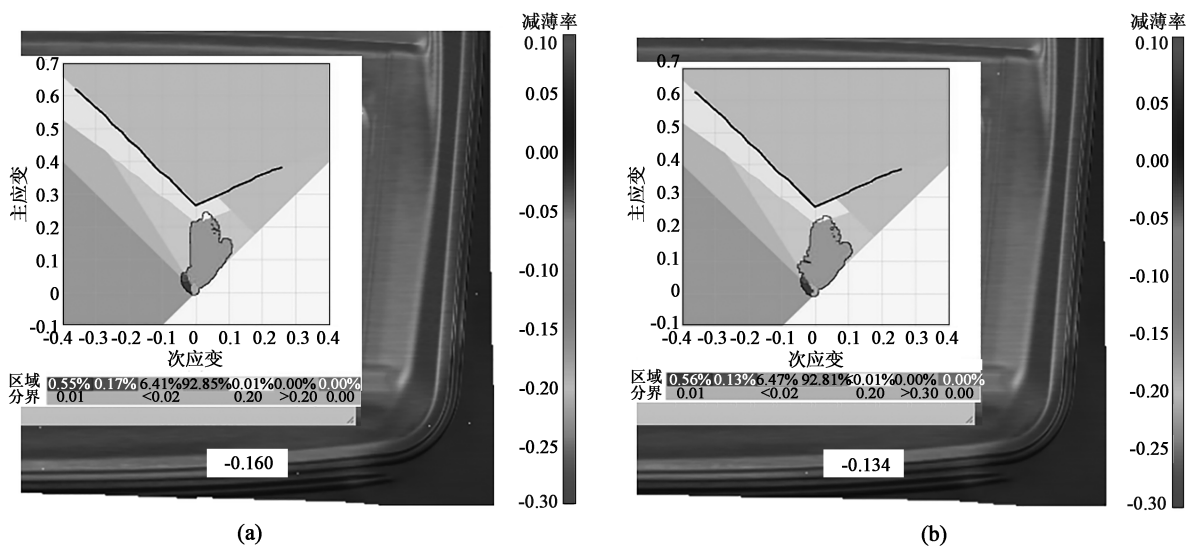


图 9 不同料厚下后背门外板的减薄率

(a)  $t=0.63$  mm (b)  $t=0.67$  mm

Fig. 9 Thinning rates of rear door outer panel under different material thicknesses

由图 9 可知,板料厚度增加有利于降低开裂风险,料厚由 0.63 mm 增加至 0.67 mm 时,拉延筋圆

角处的减薄率由 16.0% 减小至 13.4%。分析其原因,如图 10 所示,模具端面为典型的圆弧形,

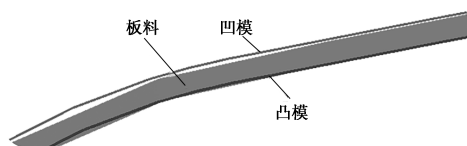


图 10 模具端面结构

Fig. 10 Structure of die end face

在修模时很难保证模具间的高精度配合，易出现

模具间隙的问题。尤其是当板料厚度公差为下偏差时，模具间隙更为明显，在此情况下冲压过程中管理面受力减小，板料流入时圆角受力增加，故开裂风险增加。

### 3.4 模具间隙的影响

在实际生产中，料厚的减薄也会导致模具之间产生间隙，将间隙  $e$  设置为 0.01 和 0.02 mm，分析其对冲压过程的影响，仿真结果如图 11 所示。

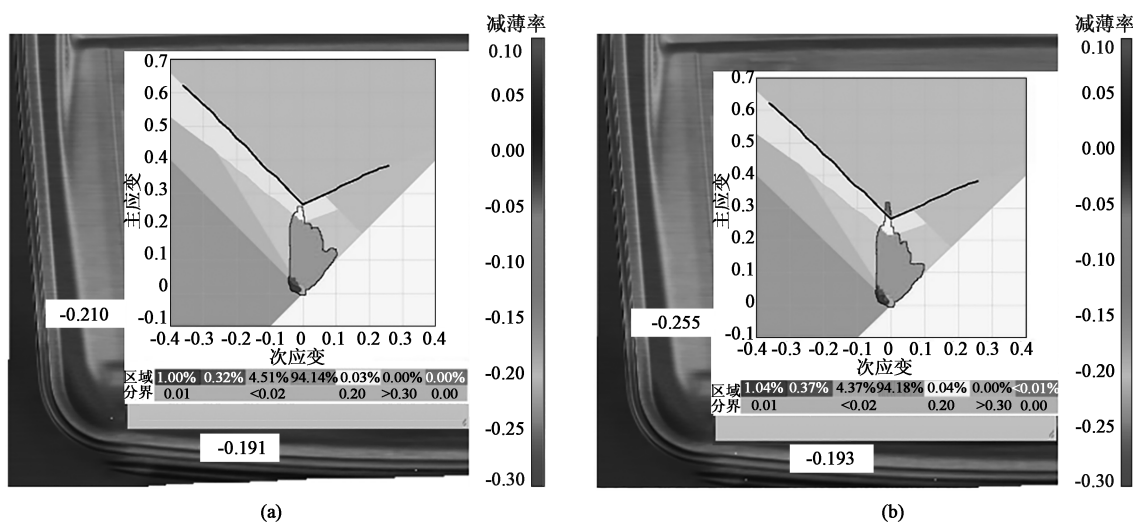


图 11 不同模具间隙下后背门外板的减薄率

(a)  $e = 0.01$  mm (b)  $e = 0.02$  mm

Fig. 11 Thinning rates of rear door outer panel under different die clearances

由图 11 得出，模具间隙较大时，冲压开裂的风险增加，且随着模具间隙的增加，减薄率进一步呈现增加的趋势。当模具间隙为 0.02 mm 时，拉伸筋圆角处的减薄率达到 25.5%，有较大的开裂风险。材料减薄后在不改变模具状态的情况下，压边圈与凹模之间的间隙相对增大，如图 12 所示。此时若不对应调整模具间隙，当拉伸筋凹槽圆角较小时，在圆角处板料冲压开裂的风险将明显增加，且模具间

隙越大，开裂风险越高。

由上述分析可知，压边力、润滑、料厚和模具间隙均对拉伸筋圆角开裂有影响，其中模具间隙最为明显。根据分析可知，通过与供应商沟通采用上偏差供货，即厚度由 0.63 mm 提高至 0.65 mm 以上，改善了模具间隙，试冲压后汽车后背门外板圆角开裂情况得到有效解决，改善前后零件对比如图 13 所示。

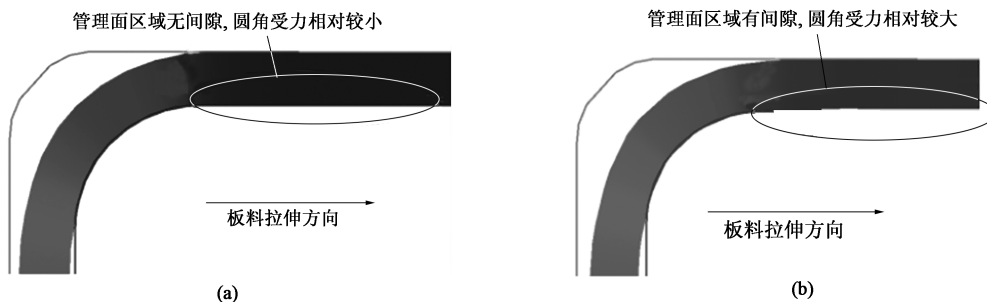


图 12 板料减薄 0.02 mm 前后的压边圈与板料间隙

(a) 正常间隙 (b) 增大 0.02 mm 间隙

Fig. 12 Clearances between blank holder and sheet metal before and after sheet thinning of 0.02 mm

(a) Normal clearance (b) Increasing clearance of 0.02 mm

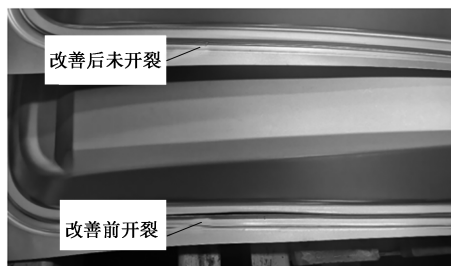


图 13 改善前后零件对比

Fig. 13 Comparison of parts before and after improvement

## 4 结论

(1) 当拉延筋凹槽圆角设计较小时, 应重点关注因模具间隙导致的拉延筋圆角区开裂问题。

(2) 针对本文拉延筋小圆角冲压开裂问题, 提高压边力和摩擦因数有利于降低开裂风险, 压边力在 1400~2000 kN 之间时开裂风险较低; 摩擦因数  $\mu$  应保持在 0.11 以上, 在生产中对于冷轧板不宜增加涂油量, 以避免摩擦因数的降低; 料厚和模具间隙是影响圆角冲压开裂的主要影响因素, 料厚减薄、模具间隙增加, 圆角处的开裂风险明显增加。

(3) 在厚度公差范围内, 采用零公差或上公差有利于解决拉延筋小圆角的开裂问题。

### 参考文献:

- [1] 刘清梅, 赵素兰, 王铭君, 等. 国际钢铁企业高强度冷轧汽车板研发实践 [J]. 轧钢, 2014, 31 (6): 44-48.  
Liu Q M, Zhao S L, Wang M J, et al. Research and development practice of high-strength cold-rolled automotive sheet in international steel enterprises [J]. Steel Rolling, 2014, 31 (6): 44-48.
- [2] 刘清梅, 封娇洁. 汽车轻量化条件下先进高强钢的发展及现状 [J]. 轧钢, 2020, 37 (4): 65-70, 90.  
Liu Q M, Feng J J. Development and current situation of advanced high-strength steel under the condition of lightweight automobiles [J]. Rolling Steel, 2020, 37 (4): 65-70, 90.
- [3] 王存宇, 杨洁, 常颖, 等. 先进高强度汽车钢的发展趋势与挑战 [J]. 钢铁, 2019, 54 (2): 1-6.  
Wang C Y, Yang J, Chang Y, et al. Development trends and challenges of advanced high-strength automotive steel [J]. Iron and Steel, 2019, 54 (2): 1-6.
- [4] 张新颖, 余天明, 栗彬琦, 等. 侧围外板冲压成形仿真及影响因素分析 [J]. 汽车工艺与材料, 2021, 392 (8): 61-65.  
Zhang X Y, Yu T M, Li B Q, et al. Simulation and analysis of influencing factors of stamping forming of side peripheral outer plate [J]. Automobile Technology & Material, 2021, 392 (8): 61-65.
- [5] 许晶, 刘宁, 周亮. 基于 Autoform 软件对汽车后背门外板工艺分析及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 137-142.  
Xu J, Liu N, Zhou L. Process analysis and optimization of automobile back door outer panel based on Autoform software [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 137-142.
- [6] 蒋磊, 王龙, 吕中原, 等. 基于正交试验的汽车翼子板拉伸成形仿真研究 [J]. 模具制造, 2021, 21 (10): 1-6.  
Jiang L, Wang L, Lyu Z Y, et al. Simulation study on tensile forming of automotive fenders based on orthogonal test [J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21 (10): 1-6.
- [7] 孟超, 黄鹤辉, 尹辉俊. 基于 Autoform 的汽车顶盖外板有限元仿真及分析 [J]. 机械研究与应用, 2012, (6): 15-16, 19.  
Meng C, Huang H H, Yin H J. Finite element simulation and analysis of automobile roof outer panel based on Autoform [J]. Mechanical Research & Application, 2012, (6): 15-16, 19.
- [8] 田永生, 邓国朝, 李梦瑶, 等. 基于 Autoform-Sigma 的汽车 A 柱内板冲压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 101-104.  
Tian Y S, Deng G C, Li M Y, et al. Optimization of stamping process parameters for automobile A-pillar inner plate based on Autoform-Sigma [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 101-104.
- [9] 王风强, 王汝站, 刘素丽, 等. 冷轧高强 HC250IF 钢冲压分层原因分析及改进措施 [J]. 轧钢, 2021, 38 (6): 95-99.  
Wang F Q, Wang R Z, Liu S L, et al. Cause analysis and improvement measures for stamping delamination of cold-rolled high-strength HC250IF steel [J]. Steel Rolling, 2021, 38 (6): 95-99.
- [10] 梅忠, 杨志刚, 赵定国, 等. 冲压用钢中大型夹杂物的研究 [J]. 河北冶金, 2019, (7): 8-11.  
Mei Z, Yang Z G, Zhao D G, et al. Research on large inclusions in stamping steel [J]. Hebei Metallurgy, 2019, (7): 8-11.
- [11] 徐国军, 胡华东, 田川, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂在 DC06 钢中的分布及对深冲性能的影响 [J]. 中国冶金, 2021, 31 (5): 111-117.  
Xu G J, Hu H D, Tian C, et al. Distribution of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions in DC06 steel and its influence on deep drawing properties [J]. China Metallurgy, 2021, 31 (5): 111-117.
- [12] 刘品. Q345EL 热轧钢带冲压开裂的原因分析 [J]. 山东冶金, 2020, 42 (1): 11-12.  
Liu P. Analysis of the causes of stamping cracking of Q345EL hot-rolled steel strip [J]. Shandong Metallurgy, 2020, 42 (1): 11-12.
- [13] 梁文, 刘培灿, 何龙义, 等. 深冲用 SPHC 钢开裂原因分析及改进措施 [J]. 轧钢, 2020, 37 (2): 41-45.  
Liang W, Liu P C, He L Y, et al. Analysis of cracking causes and improvement measures of SPHC steel for deep drawing [J]. Steel Rolling, 2020, 37 (2): 41-45.
- [14] 陈文琳, 李志杰, 王少阳. 汽车前围板冲压数值模拟及工艺参数优化 [J]. 精密成形工程, 2011, 3 (3): 15-19.  
Chen W L, Li Z J, Wang S Y. Numerical simulation and optimization of process parameters of automobile front sheet stamping [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3 (3): 15-19.