

车门内板拉延开裂分析与讨论

吕 浩, 刘 涛, 王秋雨, 张赛娟

(河钢股份有限公司唐山分公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 以某车型前车门内板为研究对象, 为解决零件在拉延工序出现的开裂和暗裂缺陷, 首先对模具及零件生产现状进行分析, 针对成形缺陷提出添加刺破刀的改善方案; 然后, 利用有限元仿真模拟对刺破刀形状和刺破高度进行多组合对比, 得到了最优的刺破刀方案: 压边力为 1200 kN、刺破刀形状为 D 形、刺破高度为 15 mm; 最后, 通过冲压实验验证了添加刺破刀的效果。冲压实验方案的破口宽度与仿真计算结果存在一定误差, 这是因为冲压实验存在二次成形过程, 材料在二次成形过程中的回复和软化对冲压实验结果有较大影响。这种冲压方法可以作为破口宽度趋势性分析的依据, 但无法精确量化分析。

关键词: 车门内板; 拉延成形; 刺破刀; 冲压实验; 暗裂

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.013

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0088-06

Analysis and discussion on cracking in drawing for automobile door inner panel

Lyu Hao, Liu Tao, Wang Qiuyu, Zhang Saijuan

(HBIS Company Limited Tangshan Branch, Tangshan 063000, China)

Abstract: For the front door inner panel of a certain type of automobile, in order to solve the crack and dark crack defects of parts in the drawing process, firstly, the production status of die and parts was briefly analyzed, and according to the forming defects, the improvement plan of adding piecing knife was put forward. Then, the shape of piecing knife and the piecing height were compared in multiple combinations by finite element simulation, and the optimal piecing knife scheme was obtained as the blank holder force of 1200 kN, the piecing knife shape of D-type and the piecing height of 15 mm. Finally, the effect of adding piecing knife was verified by stamping test. And there was a certain error of the break width results between the stamping test scheme and the simulation calculation. It is because that there is secondary forming process in stamping test, the recovery and softening of the material in the secondary forming process have a great impact on the stamping test results. This stamping method could be used as the basis for the trend analysis of break width, but it could not be accurately quantitative analysis.

Key words: automobile door inner panel; drawing forming; piecing knife; stamping test; dark crack

在车身零件制造工程中, 车门内板是成形难度较大的零件之一, 车门内板零件具有型面特征复杂、拉延深度大、立体曲面多、结构尺寸大以及较其他内板薄等特点^[1-2]。因此, 车门内板零件在冲压生产时经常出现开裂、暗裂和起皱等质量缺陷。国内外众多学者对车门内板开裂问题进行了相关研究, 吴磊^[3]针对背门内板窗框易开裂的问题, 进行了不同工艺切口的有限元模拟对比分析, 优化了拉深成形工艺。叶鹏飞等^[4]研究了辅助工艺切口对切口附近的应力、应变场的影响, 发现开设工艺切口能有效降低切口附近区域的径向应力, 改善局部材料流动。

在零件设计与冲压生产稳定性的分析中, 数值模拟技术被广泛应用, 研究表明: 数值模拟和实际实验结果比较接近, 可以对实际生产起到指导作用^[5-9], 本文也以数值模拟为主要手段, 结合现场实验对成形工艺进行优化。

本文针对某车型的前门内板开裂问题, 通过仿真计算提出添加刺破刀的最佳方案, 并设计了冲压实验验证了刺破方案的效果, 最终解决了零件拉延颈缩(下文称“暗裂”)和开裂的问题, 同时也对验证工艺切口效果的一种冲压实验方法进行了探索与讨论。

1 零件开裂问题及成形仿真

1.1 零件缺陷及基本情况

某国产车型的前车门内板在生产时出现暗裂

收稿日期: 2020-11-11; 修订日期: 2021-02-10

作者简介: 吕 浩 (1986-), 男, 学士, 工程师

E-mail: popeye911@163.com

和开裂缺陷，这些缺陷主要发生在锁孔处的传力区，如图 1 所示。该模具已使用较长时间，冲压生产时经常出现不规律开裂的现象。为应对无规律出现的开裂问题，现场只能通过降低整体压边

力来解决，但这会增加零件角部起皱风险，严重时起皱甚至会出现现在修边线以内而无法消除；也可以通过垫片及其他方法调整，但又会降低生产效率。

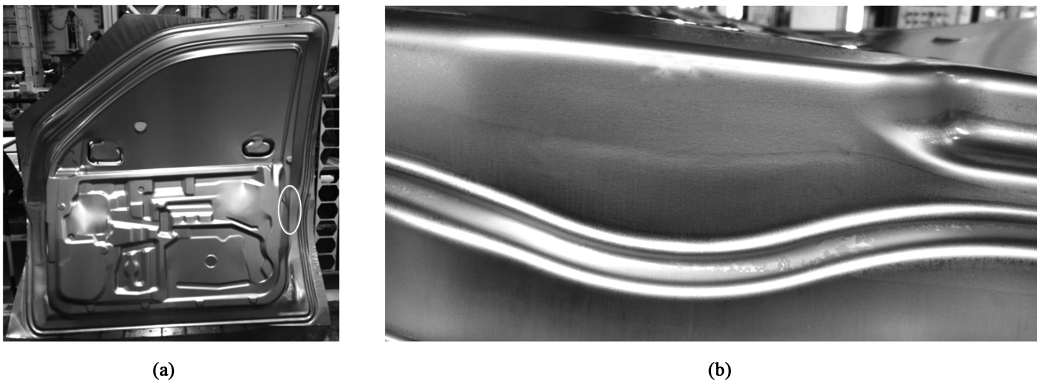


图 1 车门内板零件暗裂位置 (a) 及局部形貌 (b)

Fig. 1 Location (a) and local morphology (b) of dark crack for automobile door inner panel part

该零件使用材料为厚度为 0.7 mm 的 DC04 钢板，板料尺寸为 0.7 mm×1410 mm×1440 mm。且通过长达半年的调查发现，其性能范围为：屈服强度为 115~135 MPa、抗拉强度为 280~300 MPa、伸长率≥45%。根据该材料的原料产线特点及其成本和成品率，材料修改的空间较小。该材料的典型力学性能如表 1 所示。

零件采用单动倒装的成形工艺生产。以凹模为基准，偏置出凸模及压边圈，其中，拉延筋阻力是根据模具数模的拉延筋深度、宽度和 R 角等参数计算的抬举力、阻力系数等参数设置的。使用表 1 中所示的材料性能，采用 Ludwik 硬化模型和 Hill 屈服准则，成形极限曲线 FLD 通过实验检测获得。成形仿真的主要参数见表 2，仿真结果如图 2 所示。

表 1 零件使用材料的典型力学性能

Table 1 Typical mechanical properties of materials for part

材料	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	硬化指数 <i>n</i> 值	厚向异性 系数 <i>r</i> 值
DC04 钢	122	297	44	0. 25	2. 65

表 2 成形仿真的主要参数

Table 2 Main parameters in forming simulation

参数	摩擦因数	顶出高度/ mm	冲压速度/ (mm · s ⁻¹)	压边力/kN
数值	0. 15	135	230	1200

1. 2 添加刺破刀的成形仿真分析

本文的仿真计算是利用模具的设计数模进行的，

在原模具基础上增加刺破工艺，刺破刀的关键指标为：刺破刀形状、刺破刀的位置和刺破高

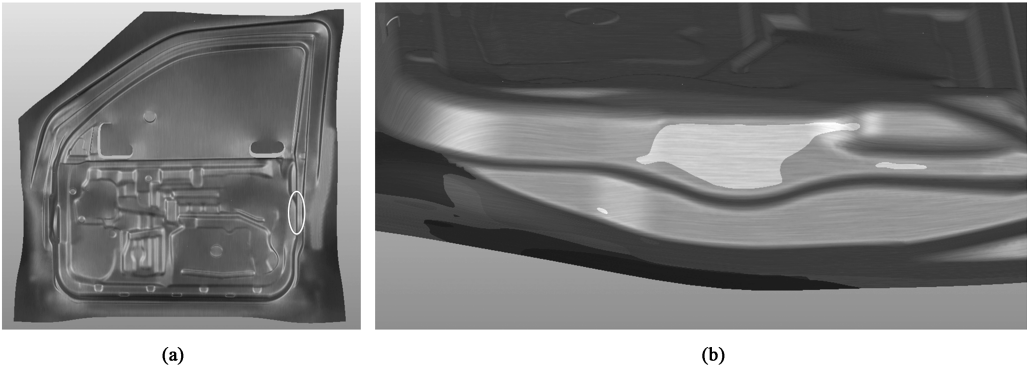


图 2 仿真计算的暗裂位置 (a) 及局部形貌 (b)

Fig. 2 Location (a) and local morphology (b) of dark crack for simulation calculation

度^[10-12]。对比分析不同刺破刀形状和位置时切口处材料流动和缺陷处减薄率的变化，选择刺破高

度均为距离底部 15 mm，结果如图 3、图 4 及表 3 所示。

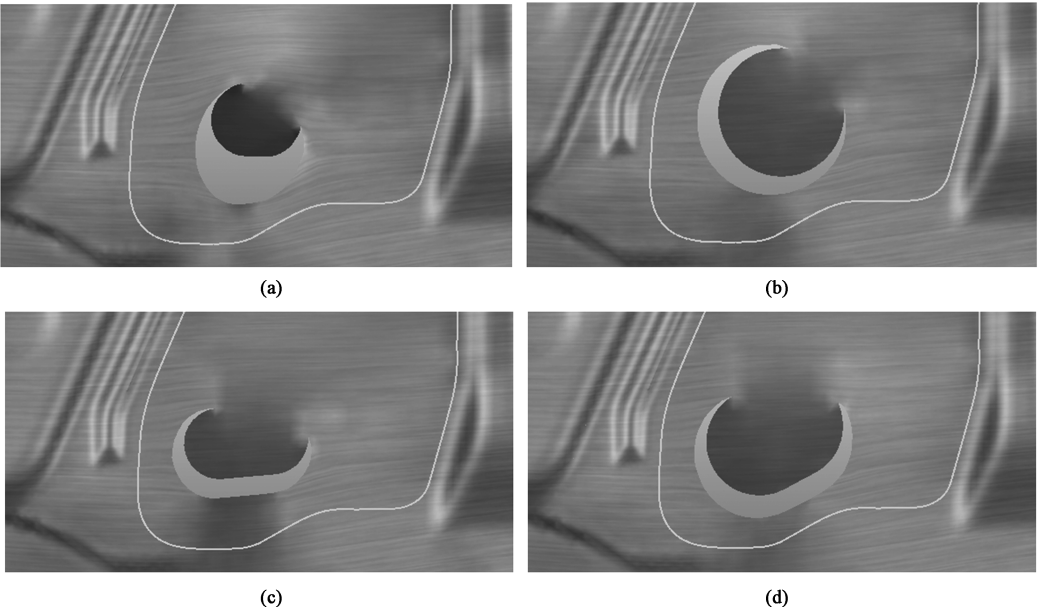


图 3 不同刺破刀形状时破口处材料流动情况

(a) A 形刺破刀形状 (b) B 形刺破刀形状 (c) C 形刺破刀形状 (d) D 形刺破刀形状

Fig. 3 Meterial flow conditions at cut positions with different shapes of piercing knife

(a) A-type of piercing knife shape (b) B-type of piercing knife shape (c) C-type of piercing knife shape
(d) D-type of piercing knife shape

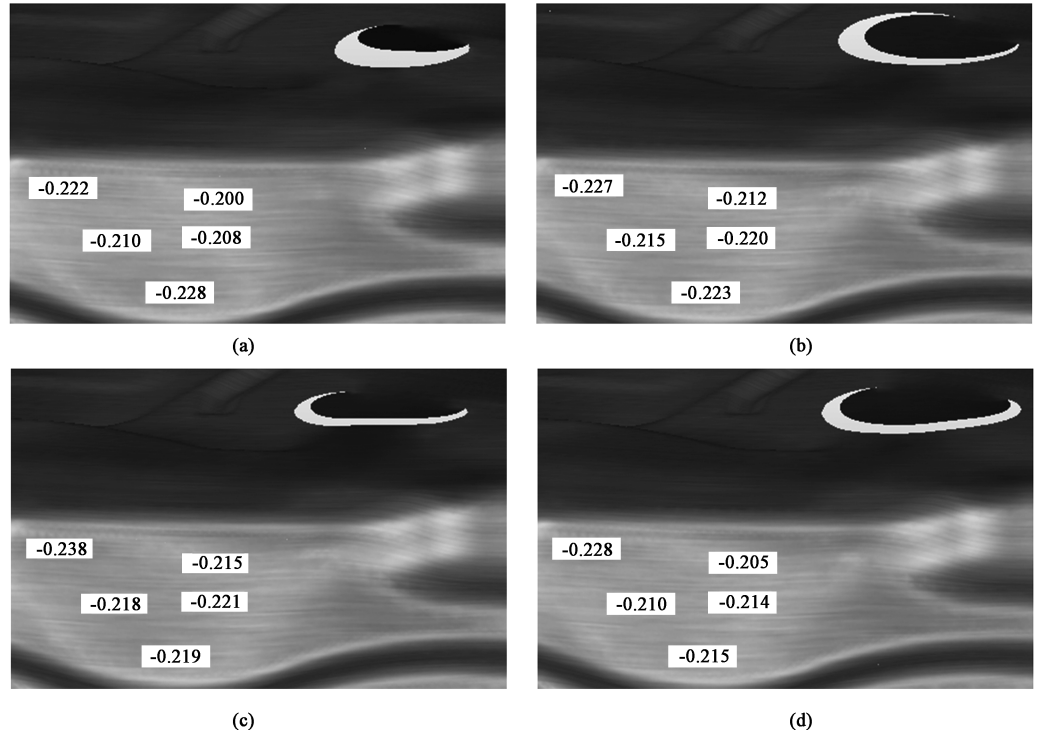


图 4 不同刺破刀形状时缺陷处的减薄率情况

(a) A 形刺破刀形状 (b) B 形刺破刀形状 (c) C 形刺破刀形状 (d) D 形刺破刀形状

Fig. 4 Thinning rates conditions at defect positions with different shapes of piercing knife

(a) A-type of piercing knife shape (b) B-type of piercing knife shape (c) C-type of piercing knife shape
(d) D-type of piercing knife shape

表 3 4 种刺破刀形状的最大破口宽度

Table 3 Maximum break widths for four kinds of piercing knife shapes

刺破刀形状	最大破口宽度/mm
A 形	26.8
B 形	12.6
C 形	12.8
D 形	14.1

由于刺破刀位置在修边后有 6 mm 的翻边，还有刺破后下凹的区域，所以，要保证破口边缘离修边线至少 16 mm 以上。图 3、图 4 中的 A 形刺破刀形状是在料片上开的预制孔，虽然其流料多、减薄率低，但由于其材料流入修边线内，因此，A 形刺破刀形状即料片开预制孔的方案是不可行的。在 B 形、C 形和 D 形 3 种刺破刀形状中，D 形刺破刀形状的材料流入和减薄率均比 B 形刺破刀形状和 C 形刺破刀形状的要好。因此，设计初步实验计划中使

用 D 形刺破刀形状来进行冲压实验。

上述仿真比较了不同刺破刀形状时材料流入和减薄率情况，图 3 中的线条为修边线，修边线内的纵向宽度只有 150 mm，因此，废料区的面积限制了 4 种刺破刀形状均不可能太大；同时，由于修边后存在 6 mm 的翻边，所以，刺破位置应尽可能地靠近修边线。上述仿真已经将刺破位置调整为靠近修边线位置，因此，刺破位置没有较大的调整空间，也没有详细验证的必要性。

2 零件刺破方案的实验验证

2.1 冲压实验步骤

本文的验证实验是在真实零件的生产中进行的，其过程尽可能模拟真实刺破过程，步骤如下。

(1) 根据预先制定的刺破高度制作半拉延件，如在上滑块距离底部 15 mm 时使压机上滑块停止运

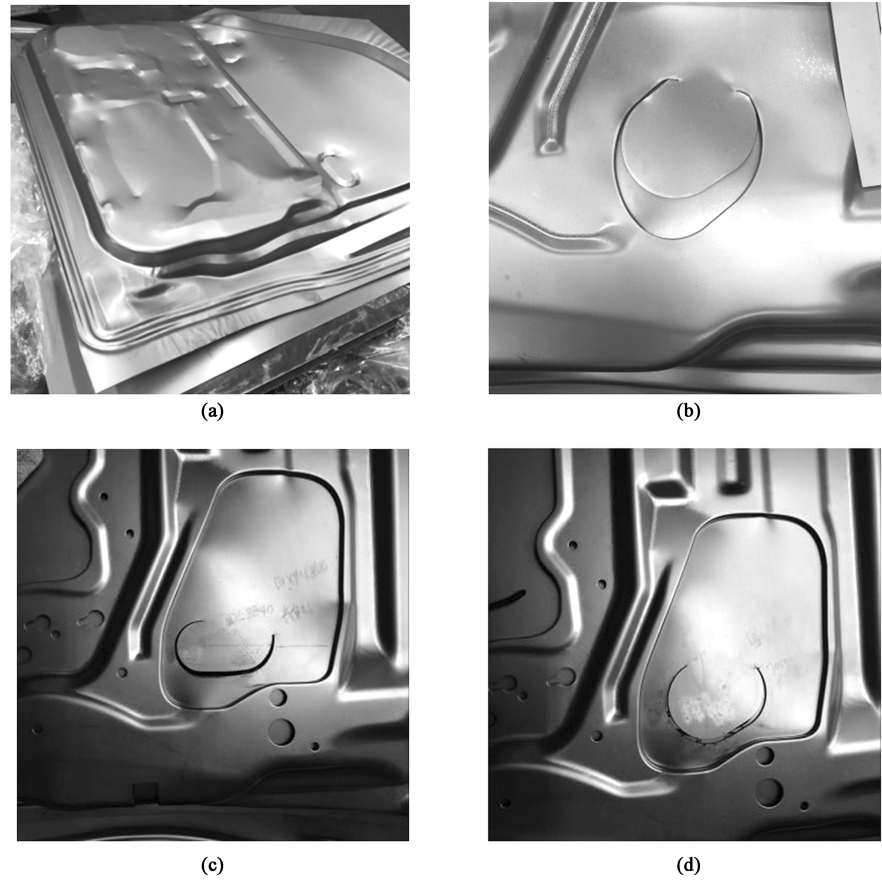


图 5 不同刺破刀形状的冲压实验的零件

(a) 距离底部 15 mm 的半拉延件 (b) A 形刺破刀形状 (c) C 形刺破刀形状 (d) D 形刺破刀形状

Fig. 5 Parts of stamping tests with different piercing knife shaps

(a) Unfinished drawing part when 15 mm from die bottom (b) A-type of piercing knife shape (c) C-type of piercing knife shape

(d) D-type of piercing knife shape

动，打开模具取出半拉延件，如图 5a 所示。

(2) 根据刺破刀形状和位置，使用激光切割方式加工出刺破方案要求的切口，如图 5b、图 5c 和图 5d 所示。

(3) 将切割好的半拉延件置于拉延模具上，由于前续制件过程中的材料流动，此时板料边缘已经远离拉延定位销，可以依据已经形成的拉延筋进行零件对中，完成剩余高度的拉延，本文展示的高度为 15 mm。

该方法进行的刺破过程符合刺破刀运动的作用过程。

2.2 冲压实验及结果

实验时，将压边力调整至缺陷位置刚刚发生暗裂（颈缩）的状态，在此基础上制作破口零件，其目的是使冲压实验更接近零件缩颈时的状态，以验证刺破刀能否缓解暗裂缺陷，结果如图 5 和表 4 所示。

表 4 中的刺破高度即上滑块距离底部的高度，从实验结果可以看出：4 种刺破刀形状中 A 形刺破刀形状为预制孔，由于修边线和后续翻边高度的限制被排除；B 形刺破刀形状与 C 形刺破刀形状相对比，在相同刺破高度（15 mm）时，破口宽度大致

表 4 仿真与实验的零件破口宽度对比（mm）

Table 4 Comparison on break widths of parts between simulation and test (mm)

刺破刀形状	刺破刀高度	破口最大宽度 (仿真)	破口最大宽度 (实验)
A 形	140 (料片)	26.8	23.5
B 形	15	12.6	6.5
C 形	8	7.8	3.5
C 形	15	12.8	6.5
D 形	8	8.8	4.5
D 形	15	14.1	7.5

相当，即刺破后材料流入量大致相当，但 B 形刺破刀形状的流料最大处没有对应缺陷位置，因此，B 形刺破刀形状被排除；C 形刺破刀形状与 D 形刺破刀形状相对比，D 形刺破刀形状的流料大于 C 形刺破刀形状，D 形刺破刀形状的破口宽度达到 7~8 mm，效果较好。因此，以 D 形刺破刀的位置和形状以及刺破高度 15 mm 为最终刺破方案。

通过刺破刀的添加，零件在 1200 kN 的压边力下暗裂缺陷得到缓解，如图 6 所示。

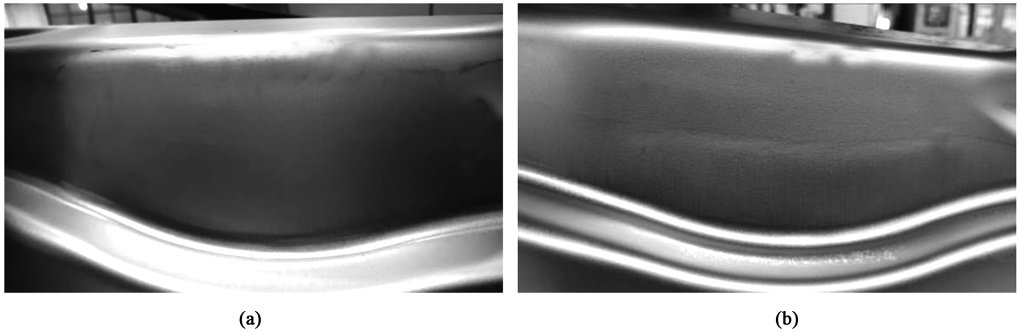


图 6 1200 kN 压边力下增加刺破前后对比

(a) D 形刺破刀形状添加后暗裂消失 (b) 刺破工艺添加前的暗裂形貌

Fig. 6 Comparison before and after piercing with blank holder force of 1200 kN

(a) Dark crack disappearing after adding D-type of piercing knife shape (b) Morphology of dark crack before adding piercing process

3 冲压实验与冲压仿真的对比分析

从文中结果来看，仿真计算的破口宽度与冲压实验的破口宽度有一定差距，仿真结果较大，冲压实验结果较小。对于 B 形刺破刀形状、C 形刺破刀形状和 D 形刺破刀形状而言，实验宽度是仿真计算宽度的 44.9%~53.2%，平均值为 50.3%，即实验破口宽度是仿真计算宽度的 1/2。

本文的冲压实验为二次成形，即拉延一半后停止，切割后再进行第 2 次拉延，完成零件成形。分析认为，二次成形中材料会存在回复和软化过程，而成形仿真软件没有进行回复软化的模拟计算，这是造成仿真计算的破口宽度与实际破口宽度相差较大的原因。

该冲压实验的优势在于可以在刺破刀添加前进行多形状、多位置和多刺破高度的实验验证，可以降低刺破刀添加后的修改成本；其劣势在于此方法

是二次成形,仅可以作为破口宽度趋势性分析的依据,无法精确量化分析。

4 结论

(1) 通过研究不同刺破刀形状和刺破高度,确定了该车型前门内板在距离底部 15 mm 和 D 形刺破刀的形状为最佳方案。

(2) 对于该零件而言,料片毛坯冲孔方案会使修边后翻边高度不足,而添加刺破刀可以避免这一问题,同时也可以解决车门内板局部开裂、暗裂的问题。

(3) 文中提出了模拟刺破刀作用的冲压实验,从实验结果来看,实验中的二次成形过程中材料的回复软化对刺破实验结果有较大影响,此方法可以作为破口宽度趋势性分析的依据,但不能精确量化分析。

参考文献:

- [1] 罗江红,张艳彬. 某汽车车门内板拉延成形刺破工艺刀具结构参数优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (9): 95-99.
Luo J H, Zhang Y B. Optimization of tool structural parameters of lancing process in drawing forming of an automobile inner door[J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (9): 95-99.
- [2] 安治国,刘志禄,韦光珍. 基于数值模拟技术的轿车零件成形工艺优化设计[J]. 热加工工艺, 2008, 37 (23): 58-60.
An Z G, Liu Z L, Wei G Z. Optimization design of auto part forming process based on numerical simulation[J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (23): 58-60.
- [3] 吴磊. 背门内板窗框开裂与改善[J]. 模具工业, 2014, 40 (3): 63-66.
Wu L. Crack problem and improvement of automobile lift door inner panel window frame[J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (3): 63-66.
- [4] 叶鹏飞,王成勇,陈锦洪,等. 基于数值模拟分析异形工艺孔在汽车内板塑性成形过程中的应用研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 33-39.
Ye P F, Wang C Y, Chen J H, et al. Application research on irregular holes in plastic forming of door inner panel for car based on numerical simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 33-39.
- [5] 朱茂桃,朱彩帆,郭佳欢,等. 基于 6σ 稳健性的轧制差厚板车门优化设计[J]. 中国机械工程, 2017, 28 (8): 996-1001.
Zhu M T, Zhu C F, Guo J H, et al. Optimization design of TRB car doors based on 6σ robustness[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28 (8): 996-1001.
- [6] Bandyopadhyay K, Panda S K, Saha P, et al. Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 48-64.
- [7] 王辉,刘莉滋,王海宝. 差厚板汽车覆盖件的拉延成形工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 75-80.
Wang H, Liu L Z, Wang H B. Optimization on drawing process parameters for differential thickness blank of automobile cover parts[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 75-80.
- [8] 王成勇,项志伟,叶鹏飞,等. 预冲孔与中途刺破对抑制车门内板关键区域成形缺陷影响的对比研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 13-22.
Wang C Y, Xiang Z W, Ye P F, et al. Comparative study on effect of pre-punching and mid-course piercing on inhibiting forming defects in key areas of inner plate of car door[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 13-22.
- [9] 曹彪,代建文. 汽车顶盖表面凹陷问题的控制方法[J]. 模具工业, 2020, 46 (9): 66-69.
Cao B, Dai J W. Control measures for surface indentation issue on automobile roof panel[J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (9): 66-69.
- [10] 柳玉起. 计算机模拟在金属成形行业的应用和发展现状[J]. 锻造与冲压, 2005, (6): 16-22.
Liu Y Q. Application and situation of computer simulation in metal-forming industry[J]. Forging & Metalforming, 2005, (6): 16-22.
- [11] 谢邵辉,柳玉起,杜亭. 冲压成形模拟过程中的工艺切口算法及应用[J]. 中国机械工程, 2006, (6): 31-36.
Xie S H, Liu Y Q, Du T. Algorithm for open cutting and its applications in the numerical simulation of sheet metal stamping[J]. China Mechanical Engineering, 2006, (6): 31-36.
- [12] 李奇涵. 冲压成型工艺与模具设计[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2007.
Li Q H. Stamping Forming Technology and Die Design[M]. The 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2007.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部