

某轿车SUEA导轨有限元模拟分析及优化

宋佳¹, 朱宁远^{1*}, 王菊维², 潘玉明²

¹江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州

²双林股份有限公司研发中心, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年4月2日; 录用日期: 2026年5月5日; 发布日期: 2026年5月13日

摘要

针对某轿车SUEA导轨翻边开裂的问题, 基于Autoform软件开展有限元模拟, 系统分析该导轨的开裂成形机理, 揭示了导致开裂缺陷的主要原因。研究表明: 开裂处位于内凹外缘翻边区域, 该处材料变形剧烈, 在切向拉应力的主导作用下发生显著的切向伸长变形, 当切向拉应力超出板料的成形极限时, 材料发生过度减薄导致开裂。通过合理优化工序, 并对摩擦系数、压边力和拉延筋系数等工艺参数进行优化, 优化后零件大部分区域处于成形极限曲线下方的安全范围内, 且减薄率、起皱区域和开裂区域得到明显改善, 显著提升了零件整体成形质量。

关键词

翻边成形, 导轨, 开裂, 有限元分析

Finite Element Simulation and Optimization of the SUEA Rail for a Certain Automobile

Jia Song¹, Ningyuan Zhu^{1*}, Juwei Wang², Yuming Pan²

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

²Research and Development Center, Shuanglin Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: April 2, 2026; accepted: May 5, 2026; published: May 13, 2026

Abstract

Addressing the issue of flanging cracking in a certain automobile SUEA rail, finite element simulations were conducted using Autoform software to systematically analyze the fracture forming mechanism of the rail and reveal the primary causes of the cracking defect. The results indicate that the fracture occurs in the concave outer edge flanging area, where the material undergoes severe

*通讯作者。

文章引用: 宋佳, 朱宁远, 王菊维, 潘玉明. 某轿车 SUEA 导轨有限元模拟分析及优化[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(3): 416-424. DOI: 10.12677/jsta.2026.143042

deformation, characterized by significant tangential elongation under the dominant effect of tangential tensile stress. When the tangential tensile stress exceeds the forming limit of the sheet metal, excessive thinning occurs, leading to fracture. Through the rational optimization of the process sequence and the key process parameters including friction coefficient, blank holder force, and draw-bead restraining force, the majority of the part falls within the safe zone below the forming limit curve. Consequently, the thinning rate, wrinkling tendency, and cracking risk are significantly improved, thereby markedly enhancing the overall forming quality of the component.

Keywords

Flanging Forming, Rail, Fracture, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车在日常生活中已经成为不可或缺的出行工具，其关键零部件的制造质量对整车安全性具有重要影响。零部件中存在的微小缺陷，如裂纹，不仅可能导致产品性能下降，还可能对行车安全构成潜在威胁。例如某国产轿车 SUEA 导轨，该零件在翻边整形工序中出现了局部开裂现象，导致其无法满足使用要求。该缺陷不仅影响零件本身的质量稳定性，也可能降低整体生产效率。因此有必要针对该零件在翻边成形时产生的开裂问题进行系统分析，制定相应的工艺优化方案，从而提高零件成形质量，满足工程应用标准。

何秋福等[1]基于塑性成形原理对翻边区域进行应力应变状态分析，结果表明，边部开裂主要由切向伸长变形超出材料极限所致。传统上，冲压成形中的开裂与起皱问题主要依赖经验的试错法进行解决。该方法不仅导致高昂的试模成本，且难以应对复杂的成形缺陷。随着计算机数值模拟技术与现代测试手段的发展，祁建[2]针对翻边成形过程中的开裂缺陷进行深入研究，在 KMAS 软件开发平台——COMX 下，开发出能预示板材冲压成形边部开裂缺陷的 CAE 软件模块，并结合实验情况验证此软件模块的准确性。韩龙帅等[3]基于 Autoform 软件，针对车门内板零件的冲压开裂与起皱问题，从材料性能、成形工艺及局部工艺补充设计等方面进行分析及优化，从而使得零件在降低开裂风险的同时抑制法兰区起皱问题。魏绍东等[4]通过仿真软件 Autoform 对某车型后背门外板冲压过程进行数值模拟，研究压边力、润滑、料厚及模具间隙等因素对拉伸筋圆角减薄率的影响，为改善拉伸筋小圆角处的开裂问题提供了理论依据。诸多研究者将正交试验设计与有限元仿真相结合，系统研究了冲压工艺参数对局部开裂缺陷的影响规律及机理[5]-[8]。

本论文以某轿车 SUEA 导轨为研究对象，可以观测到零件在翻边成形时边缘处存在严重的减薄和开裂，开裂的主要原因为：切向拉应力超过板料材料成形极限值，导致翻边边缘处发生失稳从而导致开裂。通过 Autoform 有限元软件有效地预测零件开裂、起皱等缺陷，进而针对缺陷处进行分析。在此基础上，通过增加工序流程和优化摩擦系数、压边力和拉伸筋系数等工艺参数，可有效降低零件应力集中，降低缺陷处减薄率，提高零件成形质量合格率。

2. 零件分析

本文以某国产轿车 H 车型导轨为研究对象，该导轨采用 5182 铝合金制作，材料性能参数如表 1 所

示, 板料厚度为 2 mm。为了节约成本, 提高生产效率, 节约原材料, 该零件采用一模两件方式进行生产, 材料利用率提高至 59.76%。导轨整体采用 11 道冲压成形工序, 即冲裁 - 冲裁 - 冲裁 - 成形 - 成形 - 整形 + 墩薄 - 切断 + 冲孔 - 斜冲孔 - 冲孔 + 预折弯 - 冲孔 + 折弯 + 整形 - 侧冲孔。其中涉及到缺陷位置的工序有 2 个工序, 分别为冲裁、成形。零件的开裂缺陷位置在左边侧面的电缆固定器位置上, 如图 1(a)所示。由于该处缺陷经过冲裁和成形两个工序, 对该导轨进行观测, 在翻边成形时零件边缘侧面产生了明显的减薄和开裂, 裂纹长达 3 mm, 如图 1(b)、图 1(c)所示。

Table 1. Mechanical property parameters of 5182 aluminum alloy

表 1. 5182 铝合金材料性能参数

材料名称	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	硬化指数 n	各向异性系数 r
5182 铝合金	120	280	20	2.73	0.93



Figure 1. Defect locations of the part: (a) Overall morphology; (b) Local morphology of the back side; (c) Local morphology of the side face

图 1. 零件缺陷位置 (a) 整体形貌 (b) 背面局部形貌 (c) 侧面局部形貌

3. 有限元模拟过程及分析

3.1. 有限元模拟过程

为深入分析 5182 铝合金导轨在翻边成形过程中产生的开裂缺陷, 基于 Autoform 软件建立其成形过程的有限元模型。模拟分析的具体设置如下: 首先设置冲压方向, 冲压方向如图 3 所示, 即箭头所指方向(向下)。其次, 考虑到该零件成形涉及多道工序, 需在 Autoform 中准确构建工序流程, 依次定义冲压、拉伸、整形、冲孔和翻边等工序, 如图 2 所示。在各工序设置过程中, 根据实际工艺需求补充相应的工艺孔, 并完成板料(料片)的几何填充。填充后的料片模型如图 3 所示。在材料与工艺参数设置方面, 依据现场实际生产条件, 将摩擦系数设为 0.16, 以模拟润滑条件下的接触行为; 压边力设定为 600 kN 以及拉伸筋系数设置为 0.3, 用于控制成形过程中材料的流动阻力。

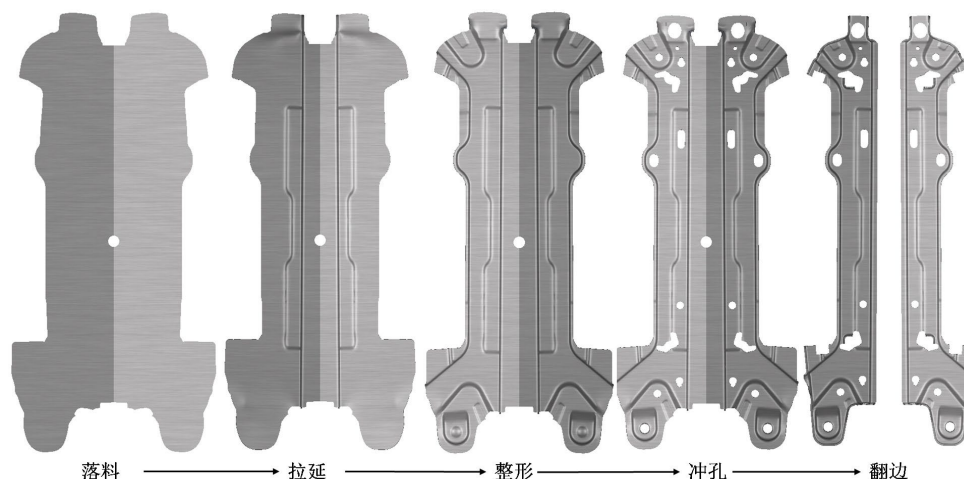


Figure 2. Simulation process of the workpiece operations
图 2. 工件工序模拟过程

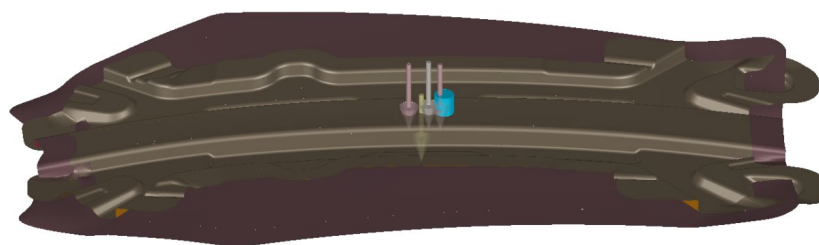


Figure 3. Blank and stamping direction
图 3. 料片及冲压方向

3.2. 有限元模拟结果分析

在板料冲压成形过程中，成形极限图是评估材料成形性能及预测局部破坏风险的核心工具，不仅能直观地反映了零件冲压后材料的变形与减薄情况，还能够很好地预测材料的开裂风险[9]。为进一步探究零件在多工序冲压中的成形质量，本文基于有限元模拟，获取了零件在各关键工序下的成形极限图，如图 4 所示，依次对应落料、拉延、整形、冲孔、及翻边工序的成形极限状态。其中图 4(a)为落料成形极限图，在初始阶段，零件整体处于成形极限曲线的安全区，主应变远低于成形极限曲线，表明材料流动均匀，无明显的开裂或减薄缺陷，初始成形状态良好。随着工序的递进，零件几何特征逐渐复杂，材料累积变形程度加剧。图 4(b)~(e)为后续工序的成形极限图，零件经过(拉延、冲孔、翻边)越来越复杂工艺之后，零件大部分处于成形极限曲线的安全区，局部区域因过度减薄而进入或接近开裂风险区，并且其主应变值均已超材料的临界成形极限阈值。尤其是翻边工序中，零件外侧材料受拉应力，内侧材料受压应力，当局部应力的超过了板料成形极限时，边缘区域极易萌生宏观裂纹。

主应变分布云图能够清晰地表征材料在各个主方向上的伸长或压缩行为：正值表示材料受拉伸作用而发生伸长变形，负值则表示材料受挤压作用而产生压缩变形，数值越大表示该区域材料变形越显著。如图 5 所示，零件出现多处局部主应变过高区域，尤其是翻边开裂区域，最大主应变值在 0.456~0.703 范围内，远高于周边区域的应变水平，说明该区域承受了显著的拉伸作用。在零件冲压成形过程中，高应变区域会因材料过度变形导致材料变薄甚至开裂。因此，对于这些区域需要特别关注，需要调整模具设计或工艺参数来减少应变集中。

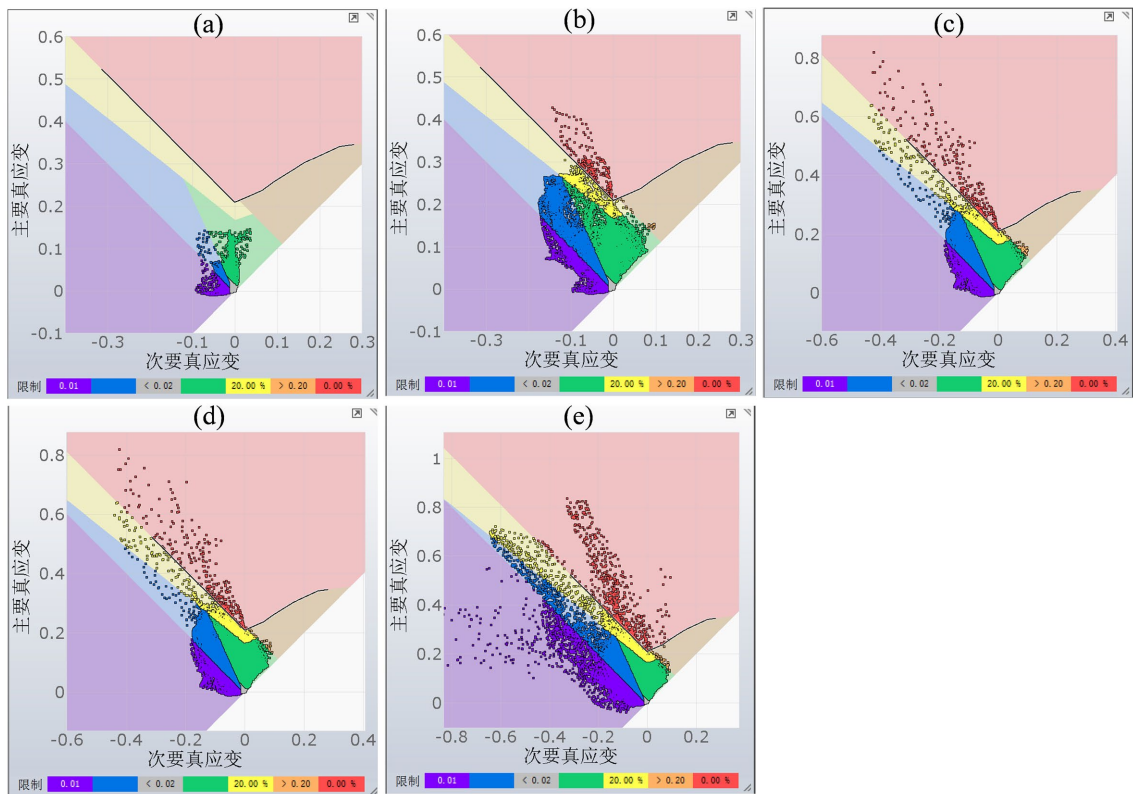


Figure 4. Forming limit diagrams for different processes: (a) Blanking process; (b) Drawing process; (c) Restriking process; (d) Piercing process; (e) Flanging process.

图 4. 不同工序成形极限图 (a) 落料工序 (b) 拉延工序 (c) 整形工序 (d) 冲孔工序 (e) 翻边工序

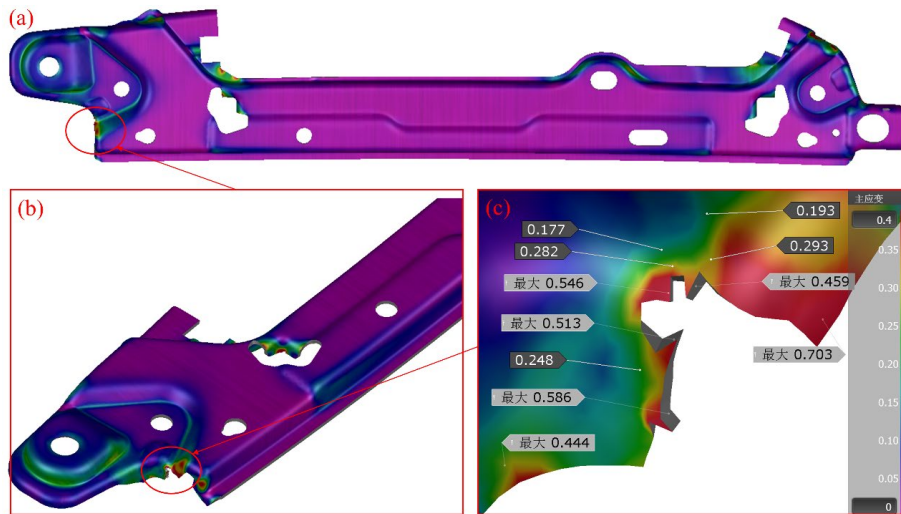


Figure 5. Principal strain distribution contour

图 5. 主应变分布云图

图 6 为零件减薄分布图，由图可知，开裂先出现于材料变形较大的翻边侧壁处，该区域材料同时承受弯曲与拉伸复合作用，流动阻力较大，导致局部变形集中、厚度急剧减薄。在翻边成形过程中，侧壁区域的减薄率持续上升，模拟结果显示该区域的最大减薄率高达 22%。根据工程经验，侧壁减薄率超过

25%时即存在开裂风险。当前 22%的减薄率虽未达到临界阈值，但已接近危险区间，表明该区域材料厚度损失较为显著，存在潜在的破裂隐患。

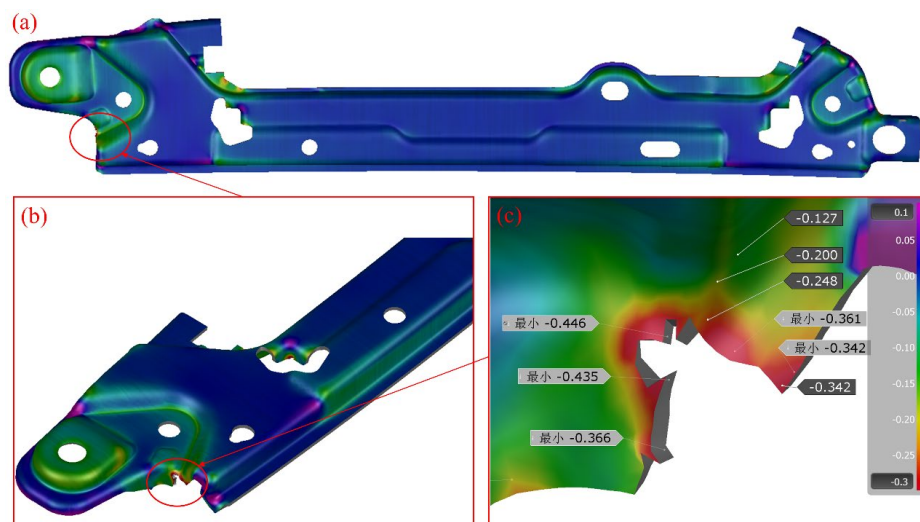


Figure 6. Thinning distribution contour
图 6. 减薄分布云图

在冲压成形有限元模拟中，最大失效准则是评估材料是否接近开裂临界状态的重要判据。零件成形后最大失效分析云图如图 7 所示，从图中可以观察到，零件的绝大部分区域最大失效值均未超过临界阈值 0.8，表明这些区域在成形过程中处于相对安全的变形状态。然而，在零件的局部区域(如翻边区域)，最大失效值显著超出该临界值。这一现象说明，在这些区域材料的应变状态已经逼近甚至突破了成形极限曲线，材料基本丧失了继续变形的能力，极有可能发生宏观开裂。

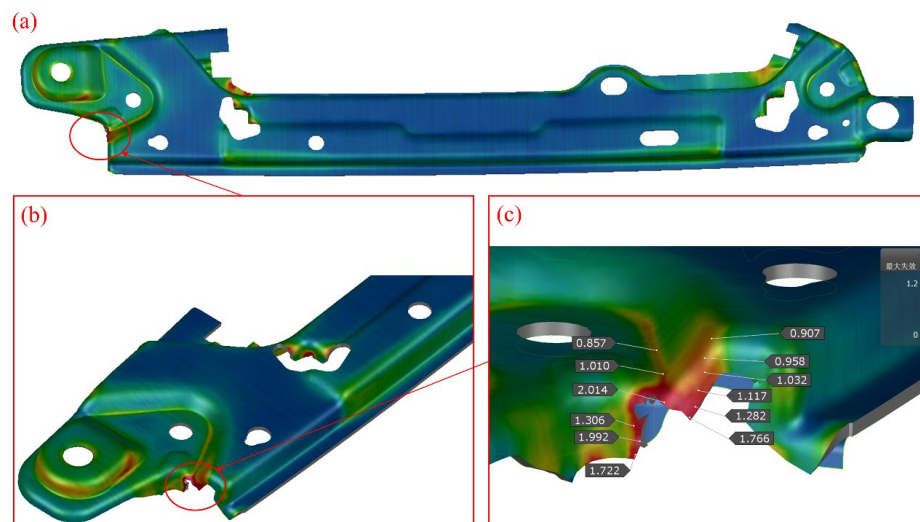


Figure 7. Maximum failure analysis contour
图 7. 最大失效分析云图

针对某轿车 SUEA 导轨开裂的问题，对该零件进行有限元分析，模拟结果与实验基本吻合。结合上述对零件成形极限图、减薄分布云图、主应变云图以及最大失效分析云图可知，零件大部分区域均处于

安全范围内。但局部区域(翻边区域)由于位于翻边外缘处,在切向拉应力的主导作用下发生剧烈的切向伸长变形,最大主应变值达 0.456~0.703,远超周边区域,表明切向伸长变形极为剧烈,导致材料过度减薄并超出其成形极限,最终引发宏观开裂。因此需对该零件进行优化设计,降低开裂风险。

4. 零件工艺优化及优化结果

4.1. 零件工艺优化

根据上述对零件的有限元开裂分析,为减少开裂区域的发生,从工序安排与工艺参数两方面对成形过程进行工艺优化。在工序优化方面,在 Autoform 软件中调整工序设置,将原本集中的冲孔工序拆分为多个独立的冲孔工序,分步完成孔特征的加工。通过分散冲孔过程中的局部应力集中,避免因一次性冲孔产生过大的瞬时应力峰值,从而降低孔边缘区域的开裂风险。

在工艺参数优化方面,针对翻边区域的变形特征,根据前期仿真分析结果及工程经验[9]-[12],选取与翻边区域材料流动密切相关的三个工艺参数作为设计变量,分别为:摩擦系数、压边力以及拉延筋系数,如表 2 所示。以成形极限图、减薄分布云图、成形性云图作为成形质量的评价指标,进而找到最优工艺参数组合,以降低零件的开裂风险、提升成形质量与工艺稳定性。通过上述工序与工艺参数的协同优化,可有效分散冲孔应力集中、改善翻边区域的应变状态,使主应变值与减薄率均控制在成形极限曲线的安全范围内,从而显著降低零件的开裂倾向,提升整体成形质量。

Table 2. Design variables

表 2. 设计变量

设计变量	初始值	最小值	最大值
摩擦系数	0.16	0.1	0.2
压边力 F/kN	600	400	1000
拉延筋系数	0.3	0	0.6

4.2. 优化结果分析

采用 Autoform 有限元软件对该导轨进行工艺参数优化,得到了最优工艺参数组合:摩擦系数为 0.15、压边力为 788 kN、拉延筋系数为 0。优化后的成形极限图,如图 8 所示。优化后的零件应变状态得到明显改善,90%以上区域处于成形极限曲线下方的安全范围内,并且危险区域和开裂区域明显减少,表明零件整体成形性能良好。

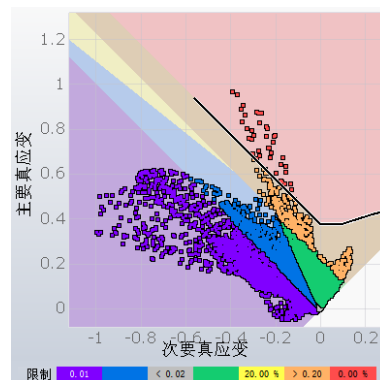


Figure 8. Forming limit diagram

图 8. 成形极限图

图 9 为优化前后零件的减薄分布图，由图可知，优化前零件最大减薄位于冲孔后翻边区域，该区域最大减薄率为 22%。优化后，该区域的最大减薄率降低至 21%，较优化前有所下降。此外，整体零件中减薄严重区域的面积明显减少，仅在翻边边缘处存在局部减薄。上述结果表明，优化后的工艺参数能够有效控制局部过度减薄，提高零件的成形安全性。

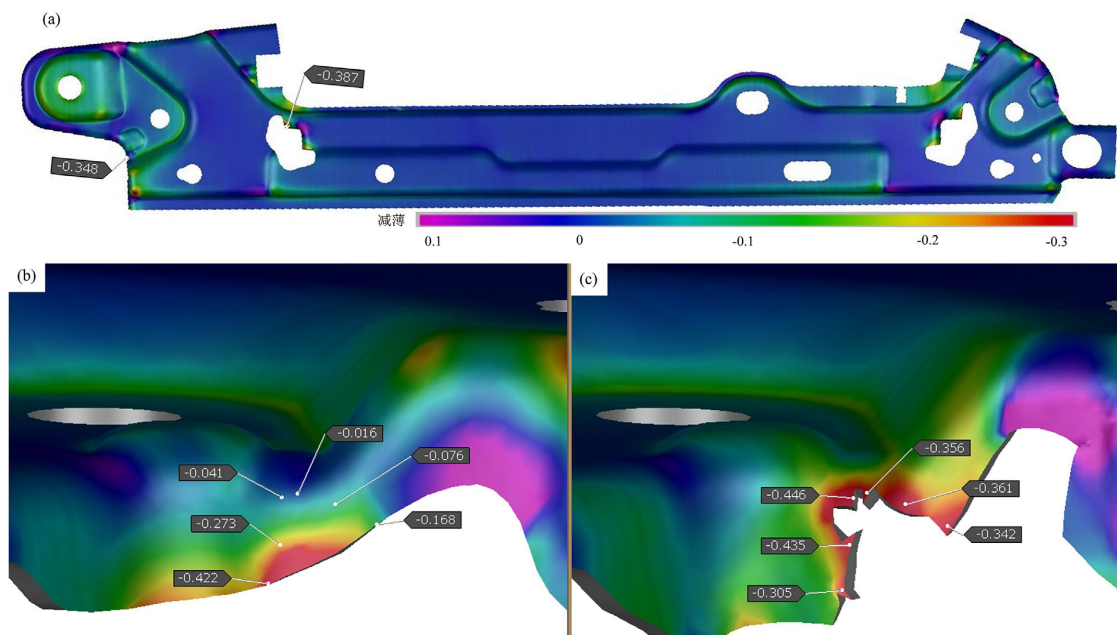


Figure 9. Thinning distribution before and after optimization: (a) After optimization; (b) Before optimization
图 9. 优化后减薄分布图 (a) 优化后整体减薄 (b) 优化后局部减薄 (c) 优化前局部减薄

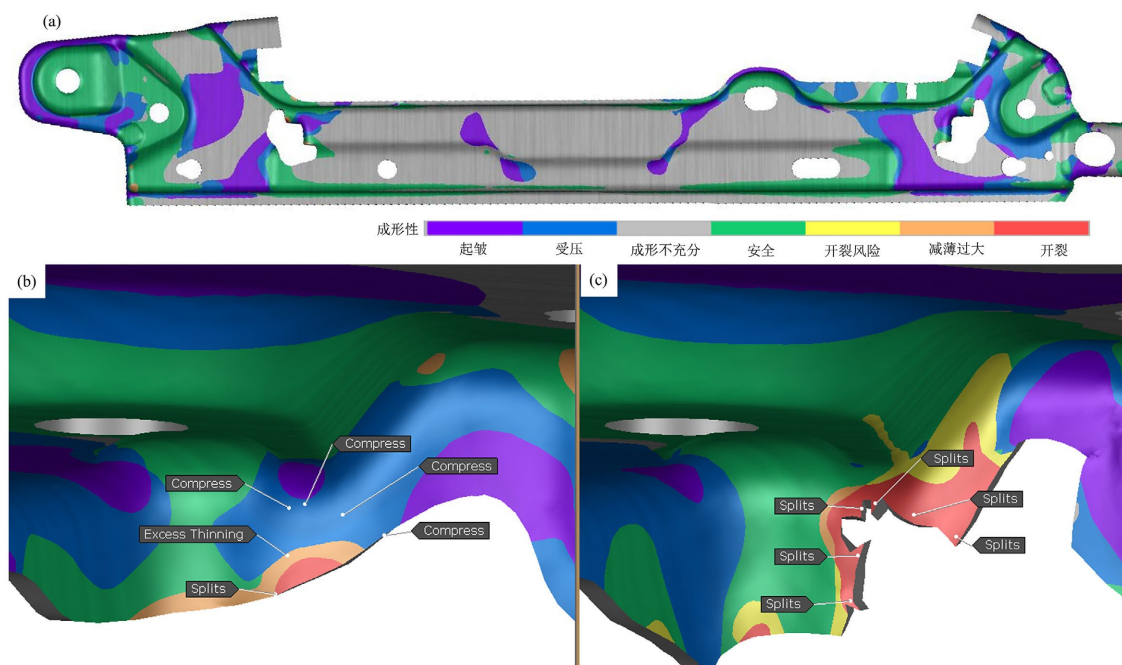


Figure 10. Formability contour plots after optimization (a) Global formability contour plot after optimization (b) Local formability contour plot after optimization (c) Local formability contour plot before optimization
图 10. 优化后成形性云图 (a) 优化后整体成形性云图 (b) 优化后局部成形性云图 (c) 优化前局部成形性云图

图 10 为优化前后零件的成形性云图, 由图可知, 优化后零件的成形性能得到显著改善, 整体区域内起皱与开裂区域明显减少。通过对该零件成形性云图进行定量分析表明: 起皱区域面积占比由优化前的 14.36% 下降至 13.09%, 开裂区域面积占比由 0.36% 显著降低至 0.02%。上述结果表明, 优化后的零件局部起皱缺陷得到有效降低, 同时开裂风险大幅降低, 零件的整体成形质量与工艺稳健性得到显著提升。

5. 结论

(1) 由于导轨翻边区域变形剧烈导致局部材料过度减薄, 这是导致开裂的直接原因, 其本质在于该处承受的拉应力过大, 导致材料局部变形量超过了其成形极限。

(2) 通过增设多个冲孔工序以优化工艺流程, 并同时调整摩擦系数、压边力和拉延筋系数等关键工艺参数进行优化, 得到最优工艺参数组合: 摩擦系数为 0.15、压边力为 788kN、拉延筋系数为 0。

(3) 优化后零件整体质量得到明显改善, 90% 以上区域处于成形极限曲线下方的安全范围内, 减薄率明显下降, 起皱区域由优化前的 14.36% 下降到 13.09%, 开裂区域面积占比由 0.36% 下降至 0.02%。

参考文献

- [1] 何秋福. 基于数值模拟仿真的内凹翻边模型时序翻边成形研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [2] 祁建. 车身冲压件边部开裂分析及 CAE 软件模块实现[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [3] 韩龙帅, 王刚, 郑学斌, 等. 基于 Autoform 的门内板冲压仿真分析[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(4): 82-88.
- [4] 魏绍东, 韩龙帅, 桑贺, 等. 基于 Autoform 的后背门外板冲压开裂分析[J]. 锻压技术, 2023, 48(3): 99-104
- [5] 李英, 焦洪宇, 牛曙光. 基于 Autoform-Sigma 的汽车顶盖后横梁冲压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2015, 40(9): 16-20.
- [6] 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.
- [7] 任维泽, 楼灏, 孙靖, 等. 汽车座椅靠背边板冲压成型数值仿真及优化[J]. 制造业自动化, 2021, 43(9): 7-11.
- [8] 周均, 王勇. 基于 Autoform 软件的冲压成形工艺参数优化[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(1): 73-76.
- [9] 代丽, 朱勇. 汽车侧围外板表面缺陷分析及冲压工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(6): 91-98.
- [10] 李春友. 基于 Autoform 的加强板冲压工艺仿真与优化设计[J]. 热加工工艺, 2013, 42(3): 90-93.
- [11] 向小汉. 基于 AutoForm 的顶盖冲压成形仿真分析[J]. 制造技术与机床, 2013(5): 124-128, 133.
- [12] 冉奥阳, 龚熙, 王大鹏, 等. 基于 Autoform 的机罩内板稳健性工艺优化与回弹补偿[J]. 锻压技术, 2023, 48(6): 61-68.