基于有限元分析的开闭件滚边工艺优化研究

徐建蓉 张玉成 郑耀凯 叶小军 王博 赖春地

（赛力斯汽车有限公司，重庆 400038）

摘要：为提升车身开闭件滚边工艺可靠性、避免外观缺陷，在工艺设计阶段，基于AutoForm软件与CAE数值仿真技术，对发动机罩、前门、后门三大总成的滚边工艺进行分析，先后完成2轮滚边仿真分析及1轮仿真验证，结果如下：首轮仿真明确三大总成起皱区域的位置、范围及严重程度；第2轮仿真针对起皱缺陷，调整滚轮参数、法兰边长度等，使三大总成间隙与面差仿真合格率均达到100%，后门间隙合格率提升27.78百分点。仿真验证显示，实测结果与第2轮仿真结果对应性良好：发动机罩间隙控制合格率为86.21%，前、后门总成间隙控制合格率为100%，整体实测结果与仿真结果符合率高于95%；发动机罩、前门、后门面差合格率分别为67.24%、67.86%、97.22%，且发动机罩、前门实测结果与仿真结果符合率低于81%，原因是未采用链式分析，理想数模仿真无法反映冲压应力与成形公差。

关键词：滚边工艺 有限元仿真 工艺优化 仿真验证

中图分类号：TG386.32；TP391.7 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250166

Study on Optimization of Hemming Process for Automotive Closures Based on FE Analysis

Xu Jianrong, Zhang Yucheng, Zheng Yaokai, Ye Xiaojun, Wang Bo, Lai Chundi

(Seres Automobile Company Limted, Chongqing 400038)

Abstract: To improve the reliability of hemming processes for automotive closure panels and prevent appearance defects, the hemming processes of the hood, front door, and rear door assemblies are analyzed during the process design phase using AutoForm software and CAE numerical simulation technology. 2 rounds of hemming simulation and 1 round of simulation validation are conducted, yielding the following results: The first simulation identifies the location, extent, and severity of wrinkling in the 3 assemblies. The second simulation addresses the wrinkling defects by adjusting roller parameters and flange lengths, achieving a 100% qualification rate for both gap and flushness simulations across all 3 assemblies, with the rear door gap qualification rate increasing by 27.78 percentage points. Validation results show strong correspondence between the measured data and the first simulation: the hood gap control qualification rate is 86.21%, while the front and rear door assemblies achieved 100% gap control qualification. The overall consistency between measured and simulation results exceed 95%. The flushness qualification rates for the hood, front door, and rear door are 67.24%, 67.86%, and 97.22%, respectively. However, the consistency between measured and simulation results for the hood and front door is below 81%, primarily due to the absence of chain analysis and the inability of ideal numerical simulations to account for stamping stress and forming tolerances.

Key words: Hemming process, FE simulation, Process optimization, Simulation validation

1 前言

随着汽车产品精致化与轻量化要求越来越高，车身滚边的美观度、内外板的连接强度以及滚边方式成为主机厂关注的焦点。滚边工艺直接关系到汽车外观的精致感，还影响车辆的耐用性和安全性[1-3]。

作者简介：徐建蓉（1997—），女，硕士学位，研究方向为白车身同步工程。

通信作者：张玉成（1982—），男，正高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车车身设计及材料成型。

参考文献引用格式：

徐建蓉，张玉成，郑耀凯，等. 基于有限元分析的开闭件滚边工艺优化研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(2): 50-57.

XU J R, ZHANG Y C, ZHENG Y K, et al. Study on Optimization of Hemming Process for Automotive Closures Based on FE Analysis[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 50-57.

滚边工艺是将内外板进行扣合,通过外板边缘的塑性变形将内板总成一部分边缘包住的工艺过程[4-6]。滚边工艺要保证高精度与高一致性,确保汽车部件的稳固连接与外观精致度[7]。常见的滚边方式有模具滚边[8]、滚边机滚边[9]和机器人滚边[10]。机器人滚边技术具有研发制造周期短、占地面积小、可实现柔性生产等优势,成为现代汽车制造中不可或缺的一环[11-13]。机器人滚边技术大幅提高了生产效率,降低人力成本,带来更高的生产柔性和更强的市场竞争力[14-15]。机器人滚边技术在实际生产过程中仍常面临诸多限制[4],需要进行早期排查与整改。调试环节[16-17]可通过有限元仿真分析验证工艺的可行性,提前发现并规避潜在问题,从而有效减少实际生产中的损失[17-18]。

本文采用 AutoForm 软件 Assembly 模块,对汽车发动机罩、前门及后门三大总成进行全量滚边工艺仿真分析。设计 2 轮仿真流程及 1 轮实物验证流程:首轮仿真精准定位缺陷并输出优化建议,据此修正零件后进行第 2 轮仿真验证,再对每组总成测量 3 组实物数据,发现缺陷改善区域与间隙面差提升区域高度一致。通过对比间隙、面差的实测-仿真合格率,验证了仿真优化工艺的有效性。相较于其他仿真[19-20],本文的仿真优化显著了改善滚边缺陷,大幅提升了发动机罩、前门、后门的间隙与面差精度,因此,在产品工程开发阶段引入滚边成形有限元仿真分析,能够有效识别潜在缺陷,并提出有效措施改善缺陷,从而大幅减少试生产阶段的模具修改次数、缩短调试周期。

2　有限元仿真模型设置

图 1 所示为仿真分析的全流程,涵盖从滚边装配工序设置到最终结果判定,具体流程如下:

a. 零件准备:导入零件,设置滚边展开面,根据材料属性导入材料卡,设置网格划分精度。

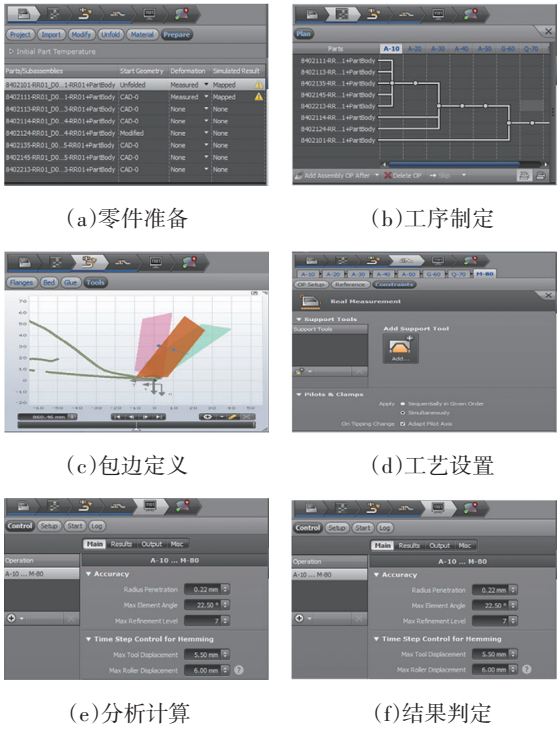
b. 工序制定:规划滚边工序,明确零件上件、滚边操作以及测量工序。

c. 包边定义:导入分组的滚边展开面,设置胎膜与折边胶。以包边圆角过渡线为基准,用 60°、30°、0°三序滚轮完成平面包边。

d. 工艺设置:在零件不干涉的情况下,设置零件定位、胎膜,导入焊点,裸板钢、镀锌板、铝板摩擦因数分别设定为 0.15、0.135、0.12。

e. 分析计算:精度及压边控制时长等设置默认值,选择除热分析外所有结果选项后计算。

f. 结果判定:依计算结果判断零件开裂、起皱、包边断面、面轮廓度。



(a)零件准备　(b)工序制定　(c)包边定义　(d)工艺设置　(e)分析计算　(f)结果判定

图 1　门盖滚边工艺分析及仿真工作流程

按照上述流程对铝发动机罩、镀锌板前门、镀锌板后门三大总成进行 2 轮仿真分析,并测量每个总成(每个总成测量 3 组)现场滚边后的间隙面差值,分析缺陷改善后对外观成形质量的提升情况,从而确定改善方案的可行性。

3　滚边成形仿真分析结果

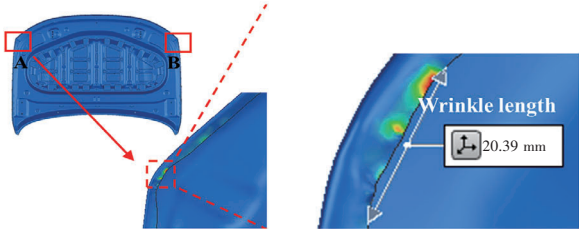
3.1　滚边缺陷分析及优化

3.1.1　发动机罩滚边缺陷分析及优化

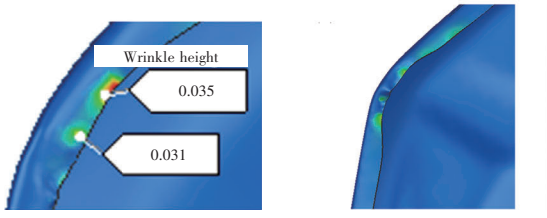
发动机罩总成滚边成形质量直接影响车身外观的感知品质。外板为汽车外覆盖件常用的 EN-AW-6016-T4 铝合金,弹性杨氏模量为 70 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2.7 g/cm^3。

如图 2a、图 2c 所示,在第 1 轮仿真结果中发动机罩对称的 A、B 区域均出现起皱缺陷。A、B 区域的起皱高度均高于判定标准(起皱高度的判定标准为起皱高度不高于 0.03,起皱高度为皱纹最高

点和皱纹最低点的高度差与起皱宽度的比值），起皱长度分别为 20 mm、40 mm。

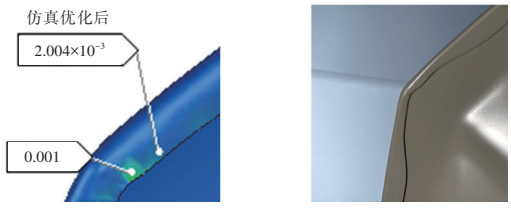


总成滚边成形状态　　起皱长度



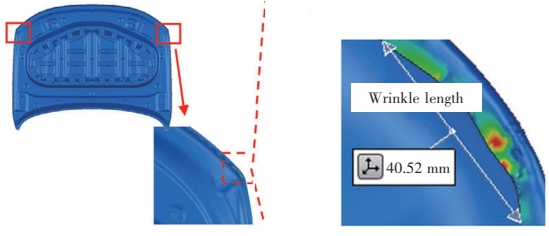
起皱高度　　一序滚轮滚边后状态

（a）A 区域第 1 轮仿真

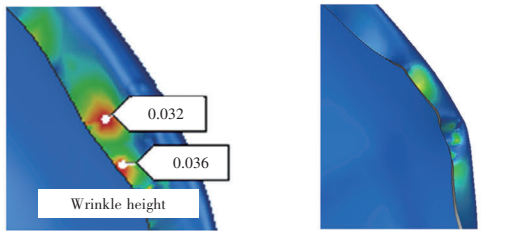


起皱高度　　实物包边状态

（b）A 区域第 2 轮仿真

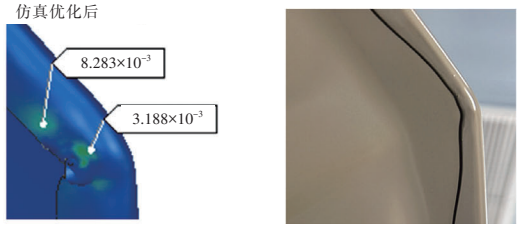


总成滚边成形状态　　起皱长度



起皱高度　　一序滚轮滚边后状态

（c）B 区域第 1 轮仿真



起皱高度　　实物包边状态

（d）B 区域第 2 轮仿真

图 2　发动机罩区域仿真变形结果

起皱的形成主要源于 3 个方面：

a. 由于各轨迹点的滚边压力与角度持续变化，极易在板材表面诱发波浪起皱、翘曲及缩进/涨出等缺陷，严重影响成形质量[21]。

b. 在发动机罩前端存在 2 处拐角，拐角半径较小，造成翻边内推。

c. 关键工艺参数影响：滚边角度、滚轮直径、翻边高度以及 TCP-RTP 值（滚轮母线距胎模边线的垂直距离 l，如图 3 所示）是影响起皱的典型因素[22]。

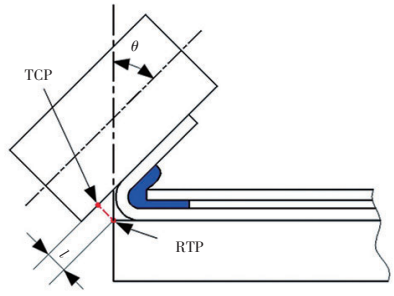


图 3　滚轮与胎膜相对位置关系[22]

在第 2 轮仿真分析中，滚边角度及滚轮直径固定，只能修改翻边高度（法兰边长度）和 TCP-RTP 值，TCP-RTP 值通过修改滚轮给进量修改。

在一序滚轮滚边后，如图 2a、图 2c 所示，A 区域、B 区域均形成了较为严重的波浪起皱，分析原因为法兰边长度过高，滚边后堆料，导致包边起皱，在二序、三序滚轮滚边后，会形成更为严重的滚边缺陷[23]。

为减少堆料，将法兰边的长度缩短 1 mm。改善后，如图 2b、图 2d 所示：第 1 轮仿真起皱高度分别从 0.035、0.031 降低到 0.002、0.011，分别降低了 94.3%、64.5%；第 2 轮仿真起皱高度分别从 0.032、0.036 降低到 0.008、0.003，分别降低了 75%、91.7%。起皱现象得到明显的减弱，滚边状态良好。

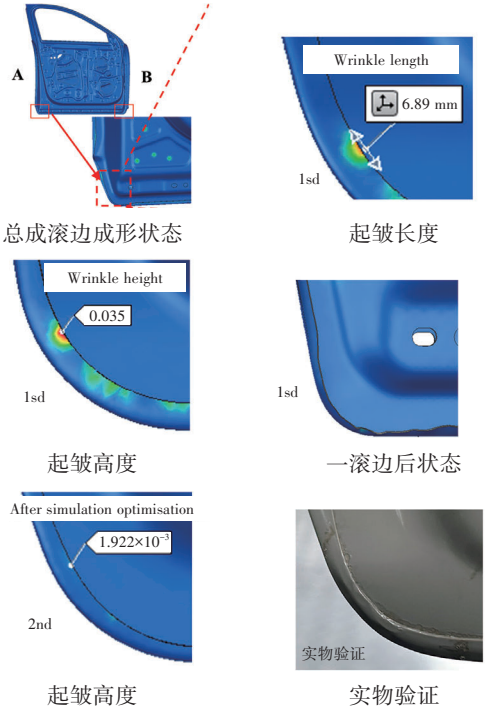
结合仿真结果，对实物验证中工艺参数进行调整。实物验证结果如图 2b、图 2d 所示，起皱现象减弱，实物状态表现良好。

3.1.2　前门滚边缺陷分析及优化

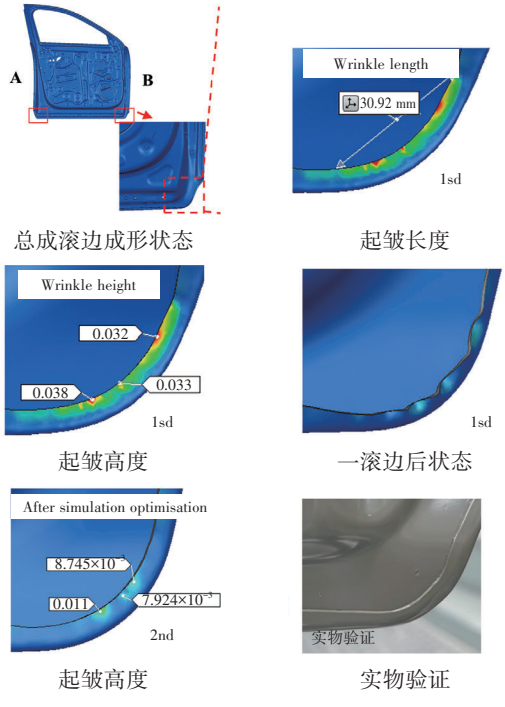
前门外板采用 HC 180BD+Z 镀锌板，其弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，密度为 7.8 g/cm^3。

针对前门滚边转角起皱问题，如图 4 所示，在第 1 轮仿真后，A 区域、B 区域的拐角出现起皱缺陷。在一序滚轮滚边后存在波浪起皱，但起皱程度轻于发动机罩。分析原因为滚轮下压压力过

大,造成转角处出现波浪起皱。通过优化滚轮压力和轨迹参数,在相应位置滚轮给进量减小0.5 mm,有效改善了滚边的质量。A区域滚边起皱高度从0.035 0降低到0.001 9,降低了94.6%(图4a)。B区域的3处起皱高度分别由0.032、0.033、0.038降低到0.008 7、0.007 9、0.011,分别降低了72.8%、76.1%、71.1%(图4b)。



(a)前门A区域滚边状态



(b)前门B区域滚边状态

图4　前门区域仿真变形结果

由图4中实物验证结果可知,滚边质量得到显著提升。

3.1.3　后门滚边缺陷分析及优化

该车型后门采用HC 180BD+Z镀锌板,除A区域外,B区域、C区域起皱缺陷的原因与前门类似。

如图5a~图5c所示,A区域的起皱高度达到0.106 mm,起皱缺陷较为严重,起皱长度为5 mm。分析认为,此处转角角度过小,材料堆积造成的翻边内推较多,在一序滚轮滚边后,材料出现了严重的波浪起皱,起皱高度接近临界值(图5d)。

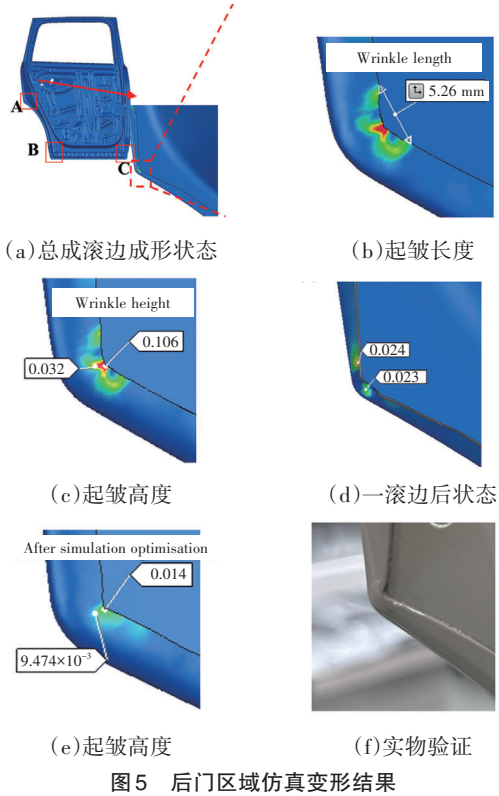


图5　后门区域仿真变形结果

根据以上分析,决定将法兰边的长度缩短1 mm。改善后,第2轮仿真结果如图5e所示,起皱高度分别从0.106、0.032降低到0.014、0.095,分别降低了86.79%、70.3%,起皱得到明显改善,滚边状态呈现良好。结合仿真结果,在实物验证中进行相应调整。改善后的起皱现象同样得到减弱,实物状态表现良好(图5f)。

3.1.4　小结

按照铝发动机罩、镀锌板前门、镀锌板后门滚边缺陷的仿真结果实施改善措施后,实物验证结果表明,三大总成的缺陷均得到大幅改善。

3.2 间隙分析

对发动机罩、前门、后门总成滚边后的两轮仿真间隙、面差值进行测量、分析(间隙指零部件间装配后形成的间隙大小,面差指零部件间装配后在基准平面的高低差[24])。仿真 1、仿真 2 分别代表两轮仿真值。

为验证实物验证结果与仿真结果的符合性,对成形后的总成进行实物测量,每个总成测量 3 组数据。试验 1、试验 2、试验 3 分别代表实测值。

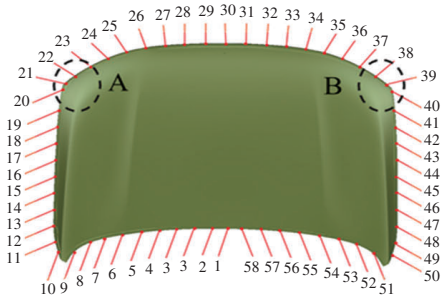
在对比过程中,设定 2 个核心指标来衡量结果:一是合格率,当间隙/面差值在公差范围内时,该测量点视为合格,合格点的数量与总测量点数量的比值即为合格率;二是实测-仿真符合率,对于同一测量点,当仿真值和实测值的差值处于公差范围内时,该点被视为实测与仿真符合,符合点的数量与总测量点数量的比值为符合率。

3.2.1 仿真分析

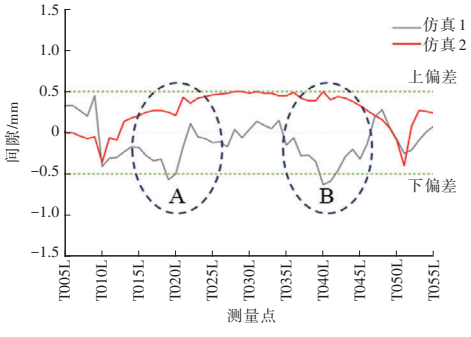
发动机罩总成共测量 58 个点。经过仿真工艺优化后,表 1 中发动机罩总成的仿真间隙合格率由 94.83% 提升至 100%,提升了 5.17 百分点。图 6b 中 A 区域、B 区域对应机罩缺陷改善的区域。

表 1 两轮仿真间隙合格率 %

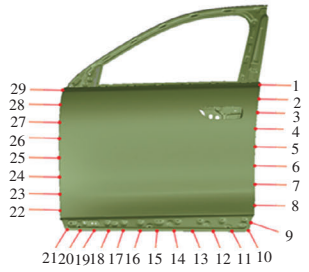
仿真轮次	发动机罩	前门	后门
仿真 1	94.83	100.00	72.22
仿真 2	100.00	100.00	100.00



(a)发动机罩间隙测量点



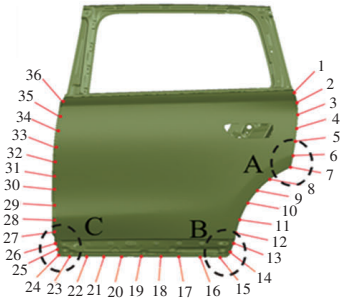
(b)发动机罩两轮仿真间隙值对比



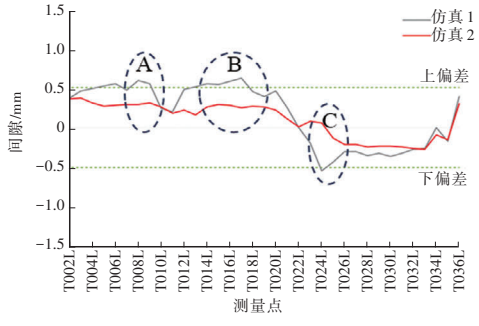
(c)前门间隙测量点



(d)前门两轮仿真间隙值对比



(e)后门间隙测量点



(f)后门两轮仿真间隙值对比

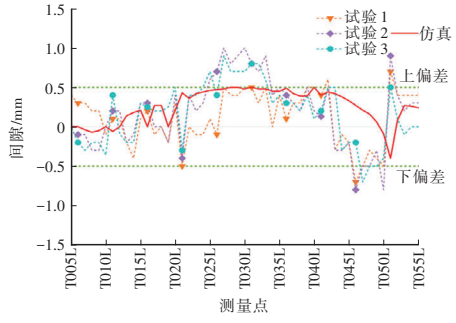
图 6 两轮仿真间隙结果对比

前门总成共测量 29 个点。表 1 中前门两轮仿真间隙值合格率相同,均为 100%。由第 2 节中缺陷分析可知,前门滚边过程中的缺陷较少。

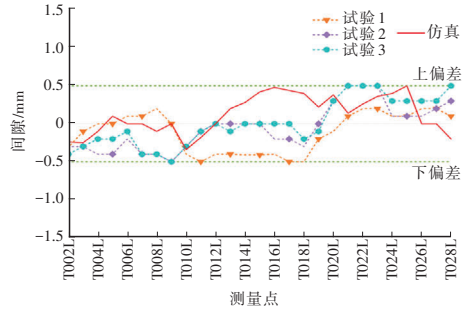
后门总成共测量 36 个点。经仿真工艺优化后,从表 1 看出后门的仿真间隙值合格率由 72.22% 提升至 100%,提升了 27.78 百分点。图 6f 中 A 区域、B 区域、C 区域对应后门缺陷改善区域。

3.2.2　实测分析

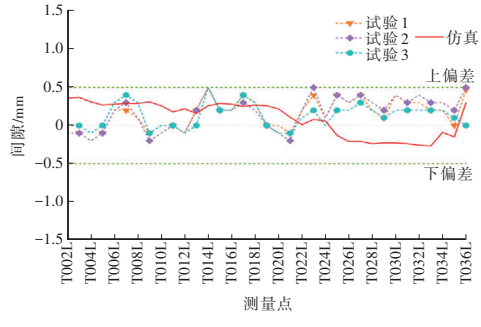
对三大总成的实测间隙值和仿真间隙值进行对比,结果如图7所示。经过仿真优化后,表2中发动机罩实测间隙合格率平均值达到86.21%,实测-仿真符合率平均值达95.40%,表明发动机罩实测间隙值趋势与仿真结果高度吻合。排除加工和测量误差的影响后,发动机罩总成滚边成形后的实测间隙值与仿真间隙值的合格率较高。在表3、表4中,前门、后门总成采取仿真优化的措施后,实物间隙值合格率均达到100%。



(a)发动机罩



(b)前门



(c)后门

图7　实测间隙值与仿真间隙值对比

表2　机罩实测间隙值合格率及实测-仿真符合率　%

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验1	94.83	96.55
试验2	79.31	91.38
试验3	84.48	98.28
平均值	86.21	95.40

表3　前门实测间隙值合格率及实测-仿真符合率　%

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验1	100.00	100.00
试验2	100.00	100.00
试验3	100.00	100.00
平均值	100.00	100.00

表4　后门实测间隙值合格率及实测-仿真符合率　%

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验1	100.00	100.00
试验2	100.00	100.00
试验3	100.00	100.00
平均值	100.00	100.00

3.3　面差分析

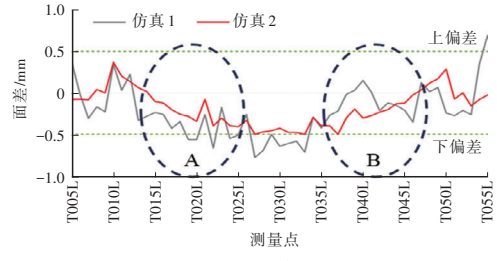
采用同样的方法对三大总成滚边成形后的面差值进行分析。

3.3.1　仿真分析

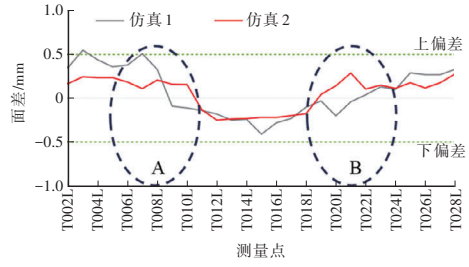
在面差仿真分析中,三大总成的仿真面差合格率均提升至100%,如表5所示。发动机罩面差合格率提升20.69百分点,图8a中A区域、B区域对应3.1.1节中机罩缺陷改善区域。前门面差合格率提升7.14百分点,图8b中区域A、区域B对应3.1.2节中前门缺陷改善区域。后门面差合格率提升8.33百分点,图8c中区域A、区域B、区域C对应3.1.3节中后门缺陷改善区域。

表5　三大总成两轮仿真面差合格率　%

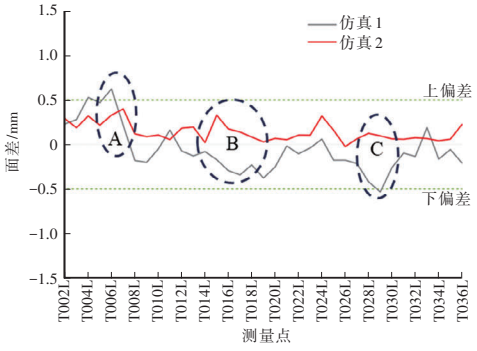
测量轮次	发动机罩	前门	后门
仿真1	79.31	92.86	91.67
仿真2	100.00	100.00	100.00



(a)机罩



(b)前门



(c)后门

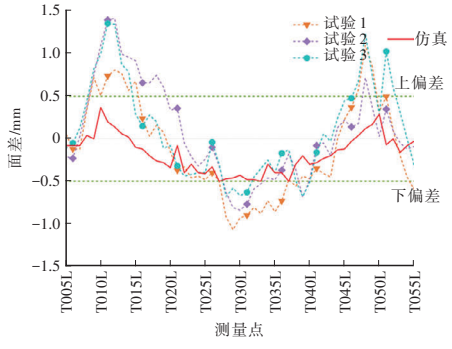
图 8 两轮仿真面差值对比

3.3.2 实测分析

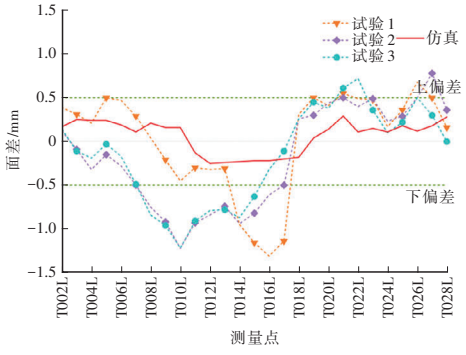
对三大总成的实测间隙值和仿真面差值进行对比，如图 9 所示。发动机罩、前门实测面差值与仿真结果之间偏差明显，表 6 中发动机罩的实测面差值合格率均值仅为 67.24%，实测-仿真符合率仅为 80.46%。表 7 中前门的实测面差值合格率均值仅为 67.86%，实测-仿真符合率仅为 73.81%。主要原因如下：

a. 理想数模仿真无法反映冲压应力与成形公差。

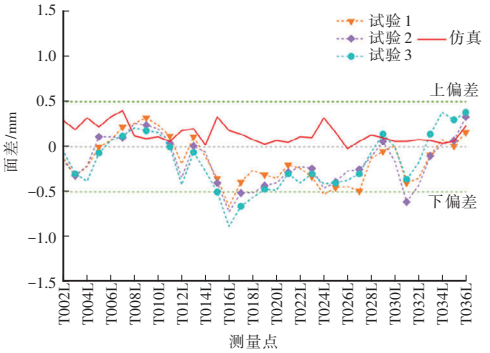
b. 分析方法未采用“链式分析”。在当前的仿真分析中，发动机罩内外板基于工程设计阶段数据进行成形分析，未导入经冲压成形分析后的带有应力分布及成形公差的零件数模，可能导致滚边后零件面差的预测不准确[19]。



(a)发动机罩



(b)前门



(c)后门

图 9 实测面差值与仿真面差值对比

表 6 发动机罩实测面差值合格率及实测-仿真符合率 %

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验 1	63.79	81.03
试验 2	67.24	79.31
试验 3	70.69	81.03
平均值	67.24	80.46

表 7 前门实测面差值合格率及实测-仿真符合率 %

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验 1	75.00	78.57
试验 2	64.29	71.43
试验 3	64.29	71.43
平均值	67.86	73.81

后门的面差合格率较好，实测面差值合格率均值为 97.22%，实测-仿真符合率为 97.22%（表 8），实测结果中大部分区域在允许的公差范围内。

表 8 后门实测面差值合格率及实测-仿真符合率 %

测量轮次	合格率	实测-仿真符合率
试验 1	94.44	94.44
试验 2	88.89	88.89
试验 3	91.67	91.67
平均值	97.22	97.22

4 结束语

本文针对发动机罩、前门及后门三大总成进行滚边成形性仿真分析，共完成 2 轮滚边仿真分析及 1 轮实物验证，获得以下结论：

a. 采用 2 轮仿真对滚边缺陷进行优化。通过调整滚轮参数、法兰边长度等，大幅改善了三大总成的滚边缺陷。在第 2 轮仿真中，三大总成的间隙

合格率、面差值合格率均提升至100%,后门间隙合格率提升27.78百分点。

b. 经实物验证,仿真与实测对应性较好。三大总成的实测间隙合格率较高:发动机罩为86.21%,前、后门为100%。实测-仿真符合率均高于95%。实测面差合格率较低,发动机罩、前门、后门合格率分别为67.24%、67.86%、97.22%,发动机罩、前门实测-仿真符合率不足81%。主要原因是为未采用链式分析,理想数模仿真无法反映冲压应力与成形公差。后续将采用链式分析,提升实测-仿真符合率。

参考文献:

[1] LI M, ZHU W, WANG S, et al. Optimization Modeling and Application of Machine Vision-Based Robot Roller Hemming for Autobody Panels with Adhesive[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(3): 1851-1864.

[2] WANG S C, ZHU W F, ER S, et al. Modeling and Experiment for the Roller Hemming of Variable Curvature Aluminum Alloy Panel with Adhesive[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 129(11): 161-175.

[3] GÜRGEN S, PRUNCU C. A State-of-the-Art Review on Hemming: a Materials Processing Technology for Mechanical Joints[J]. Applied Mechanics Reviews, 2022: 74.

[4] 张宝红. 汽车车门常用包边工艺比较及技术难点分析[J]. 汽车实用技术, 2019(12): 162-163+182.

[5] GU Z, WANG G, YU G. Investigation on Fracture of a 6014-T4 Aluminum Alloy Sheet in the Flanging and Hemming Process Based on Numerical and Experimental Methods[J]. Metals, 2020, 10(1): 81.

[6] LIU C H, LIN W M. Numerical and Experimental Analysis of Roller Hemming on Door Panel's Curved and Straight-Edge of Flat Plane[J]. Applied Sciences, 2024, 14(21).

[7] 朱永辉, 张玉成, 王博, 等. 车门包边扣合分析及解决方案[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(5): 93-96.

[8] BAGHERI F, MADOLIAT R, SEDIGHI M, et al. Rubber-Assisted Pre-Hemming Process: A Parametric Study[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38(2): 328-337.

[9] CHENG X, ZHAO Y X, YU Z Q. Toolpath Strategy Study for Improving Geometric Accuracy of Large-Size Open-Edge Flanged Parts in Robot-Assisted Incremental Flanging[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 114:39-58.

[10] 王彪, 赵红建. 车身开闭件包边设计对质量影响浅析[J]. 时代汽车, 2023(16): 120-123.

[11] HU X, ZHAO Y X, HUANG S, et al. The Numerical Analysis of the Roller Hemming Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5/6/7/8): 543-550.

[12] 余魁, 赵顺旺, 柳玉起. 优化滚边工艺提升车门区域尺寸匹配精度的方法研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 122-126.

[13] ESQUIVEL E, CARBONE G, CECCARELLI M, et al. A Dynamic Compensation for Roll Hemming Process[J]. IEEE Access, 2018, 6: 18264-18275.

[14] 郑亚菲, 李奎江, 刘莹琦, 等. 汽车机器人滚边技术概述[J]. 时代汽车, 2024(5): 153-155.

[15] 乔福龙, 张云. 机器人滚边质量问题分析及解决措施[J]. 汽车工艺与材料, 2017(2): 19-24+27.

[16] 孟繁秋. 基于工业机器人控制的滚边压合技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[17] 游晓红, 管艳杰. 轿车行李箱盖外板成型工艺参数优化[J]. 汽车技术, 2014(2): 16-18+35.

[18] XIN Y P, CHEN Y W, LI W H, et al. Refined Simulation Method for Computer-Aided Process Planning Based on Digital Twin Technology[J]. Micromachines, 2022, 13(4): 620.

[19] 张强. 机器人滚边成型模拟仿真分析应用研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021(7): 25-32.

[20] 王有道, 陈世杰, 张平, 等. 基于有限元模拟的门盖机器人滚边工艺设计[J]. 汽车工艺与材料, 2020(9): 31-35.

[21] 李元辉, 李建军, 王顺超, 等. 铝合金薄板含胶滚压成形工艺建模及实验[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 532-542.

[22] 李默之, 朱文峰, 王顺超. 尺寸偏差下的车身含胶滚边滚轮的位姿补偿[J]. 中国机械工程, 2024, 35(2): 364-370.

[23] 朱谷波. 机器人滚边技术在车身覆盖件中的仿真与优化研究[J]. 汽车零部件, 2025(4): 48-52.

[24] 刘江东. 基于机器视觉的汽车覆盖件间隙面差测量方案研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2024.