基于成形非均匀壁厚的铝合金车门结构CAE分析

刘云刚[1] 李英东[1] 周保成[1] 李利[1] 李学云[2] 徐志强[1]

（1.中铝材料应用研究院有限公司，北京 102209；2.中铝瑞闽股份有限公司，福州 350015）

摘要：传统车门结构CAE建模采用等壁厚属性，未考虑板料成形后的壁厚变化，故建立车门内外板成形非均匀壁厚的结构CAE模型具有现实意义。研究了铝合金车门内外板成形非均匀壁厚的结构CAE模型构建方法，将结构CAE模型内外板壁厚属性赋予成形性CAE分析的非均匀壁厚数值，开展铝合金车门内外板等壁厚、非均匀壁厚CAE模型计算刚度与试验刚度的对比分析。基于成形非均匀壁厚的铝合金车门结构CAE分析模型与等壁厚CAE分析模型相比，车门刚度CAE计算结果精度明显提升，车门上角点、下角点扭转刚度计算结果精度分别提升10.6%、6.3%，车门外腰线、内腰线刚度计算结果精度分别提升5.2%、5.5%，车门玻璃升降器上安装点、下安装点刚度计算结果精度分别提升7.7%、7.5%。

关键词：铝合金车门 成形 非均匀壁厚 CAE模型 刚度

中图分类号：U462.3 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250304

Aluminum Alloy Door Structural CAE Analysis Based on Forming Uneven Sheet Thickness

Liu Yungang[1], Li Yingdong[1], Zhou Baocheng[1], Li Li[1], Li Xueyun[2], Xu Zhiqiang[1]

(1. Chinalco Material Application Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209; 2. Chinalco Ruimin Co., Ltd., Fuzhou 350015)

Abstract: Traditional CAE modeling of door structures typically employs uniform wall thickness properties, failing to account for thickness variations after sheet metal forming. Therefore, it is of practical significance to develop a structural CAE model that incorporates the non-uniform wall thickness resulting from the forming process of door inner and outer panels. This paper investigates a method for constructing a structural CAE model of aluminum alloy door panels with non-uniform thickness based on forming analysis. In this model, the wall thickness properties of the inner and outer panels are assigned the non-uniform thickness values obtained from formability CAE analysis. A comparative analysis is conducted between the calculated stiffness and experimental stiffness of the aluminum alloy door panels using both uniform and non-uniform wall thickness CAE models. The results show that, compared to the uniform thickness CAE model, the structural CAE model based on forming-induced non-uniform thickness significantly improves the accuracy of door stiffness predictions. Specifically, the accuracy of torsional stiffness calculations at the upper corner point increases by 10.6%, at the lower corner point by 6.3%, at the outer waistline by 5.2%, at the inner waistline by 5.5%, at the upper mounting point of the window regulator by 7.7%, and at the lower mounting point of the window regulator by 7.5%.

Key words: Aluminum alloy door, Forming, Uneven sheet thickness, CAE model, Stiffness

1 前言

汽车车门采用铝合金能有效提升轻量化效果，采用计算机辅助工程（Computer Aided Engineering，CAE）仿真技术可在产品设计阶段分析结构性能，规避设计风险[1]。构建铝合金车门

作者简介：刘云刚（1989—），男，高级工程师，硕士学位，研究方向为车身轻量化设计及仿真优化。

基金项目：新材料重大专项项目（2025ZD0619700）。

参考文献引用格式：

刘云刚，李英东，周保成，等. 基于成形非均匀壁厚的铝合金车门结构CAE分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(3)：18-24.

LIU Y G, LI Y D, ZHOU B C, et al. Aluminum Alloy Door Structural CAE Analysis Based on Forming Uneven Sheet Thickness[J]. Automobile Technology & Material, 2026(3): 18-24.

CAE模型是车门性能分析,包括模态、刚强度、抗凹性分析及轻量化的基础[2]。目前,国内外大部分汽车主机厂及研究机构构建的车身CAE模型通常对车身零件赋予等壁厚属性[3],实际板料在冲压成形后,零件的壁厚不均匀,存在材料减薄的情况[4-5]。车门内外板冲压成形后壁厚减薄导致零件刚性减弱,内外板等壁厚CAE模型的计算结果存在偏差,可能造成前期结构CAE计算结果满足要求,但实际冲压零件刚性不足[6]。为消除材料冲压成形后壁厚变化对结构CAE分析结果的影响,需研究车门内外板成形中非均匀壁厚对结构CAE分析结果的影响,包括基于冲压成形非均匀壁厚的结构CAE模型构建方法、车门内外板等壁厚与非均匀壁厚对铝合金车门刚度CAE计算精度的影响,最终获取内外板等壁厚与非均匀壁厚铝合金车门刚度CAE分析精度的差异,以提高设计阶段结构CAE分析精度,有效规避前期设计风险。

2　铝合金车门非均匀壁厚CAE模型的构建

本文选取某铝合金车门为研究对象,如图1所示。车门内板材料选用5182铝合金,外板材料选用6014铝合金。



图1　铝合金车门样件

2.1　铝合金车门CAE模型中内外板非均匀壁厚属性

传统车门结构,CAE模型中料厚数值通过属性(Property)赋予,部件通过单独的属性赋予相同的壁厚数值[7-8],传统壁厚属性定义方式为部件-单元-节点的方式,由部件壁厚属性定义单元壁厚,由单元壁厚定义节点壁厚,部件壁厚的单一性导致单元和节点的壁厚属性也是单一的。将铝合金车门结构CAE模型中的内外板等壁厚属性转化为非均匀壁厚属性,每个单元、节点坐标处的壁厚均不一致。本文采用有限元节点壁厚(Nodal Thickness)表征方式,通过不同节点处的壁厚数值表征单元的壁厚属性,由单元的不同壁厚属性组合为部件-车门内外板的属性,如图2所示。

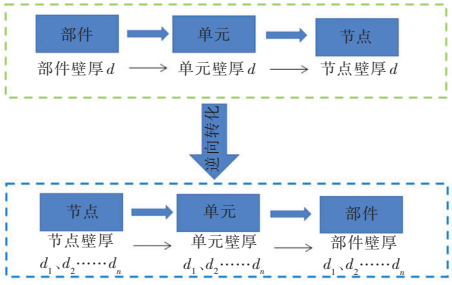


图2　铝合金车门CAE模型非均匀壁厚属性表征

结构CAE模型四边形壳单元节点壁厚属性如图3所示,可采用其4个节点的壁厚T_1、T_2、T_3、T_4表征,同理,三角形壳单元属性可采用其3个节点的壁厚T_1、T_2、T_3表征。

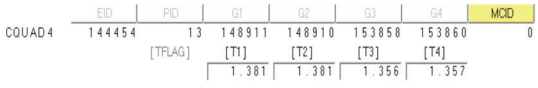
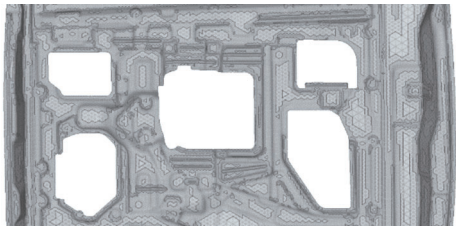


图3　CAE模型四边形壳单元节点壁厚属性

2.2　结构CAE模型不同节点坐标处的壁厚数值获取

采用节点-单元-部件的属性定义方式,需获取结构CAE模型不同节点坐标处的壁厚数值。以铝合金车门外板CAE模型为例,包含66 289个节点、65 562个单元,节点数量庞大且无法定位,但成形CAE模型的节点坐标范围与结构CAE模型的节点坐标范围一致,通过零件冲压成形CAE分析可批量获取每个节点处的壁厚数值,从而获取结构CAE模型不同节点处的壁厚数值。

成形性CAE分析与结构CAE分析模型网格的区别[9-11]如图4所示。一是节点不一致,成形性CAE分析结果网格与结构CAE分析模型网格节点不一一对应;二是连接不一致,成形性CAE分析中使用的模面数据与结构CAE分析数据中的包边单元不连接;三是位置不一致,成形CAE分析结果模型网格位置为模面(即零件外表面),结构CAE分析模型网格位置为板料中面;四是单元类型不一致,成形性CAE分析与结构CAE分析使用的软件类型不同、单元类型不同。基于以上原因,成形性CAE分析模型网格无法直接应用于结构CAE分析模型中,本文采用节点映射法将零件成形性CAE模型的壁厚数值映射到结构CAE模型中。



(a)车门内板成形性CAE分析网格



(b)车门内板结构CAE分析网格

图4 车门内板成形性及结构CAE分析网格

2.3 结构CAE模型不同节点坐标处的壁厚数值映射

将成形CAE分析结果的壁厚数值映射到结构CAE模型中,映射过程中采用节点平均法计算每个网格节点的壁厚。图5为壁厚数值映射示意,蓝色网格为成形性CAE分析结果网格,红色网格为结构CAE分析模型网格,与结构CAE分析网格节点N距离最近的3个成形性网格节点为P_1、P_2、P_3,结构CAE模型节点N映射后的壁厚D为成形CAE模型节点P_1、P_2、P_3壁厚的平均值:

$$D=(d_1+d_2+d_3)/3 \quad (1)$$

式中:D为结构CAE模型第N个节点映射后的壁厚,d_1、d_2、d_3分别为距离结构CAE模型节点最近的3个成形性CAE网格节点的壁厚。

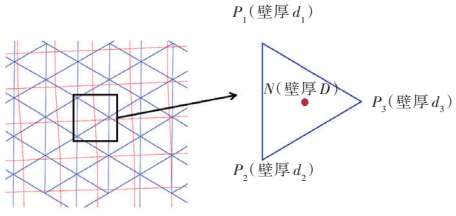


图5 壁厚数值映射示意

车门内板成形性壁厚云图如图6所示。以铝合金车门内板壁厚数值映射为例,映射过程为:导入结构CAE分析模型,模型为无壁厚属性的有限元文件;导入成形性CAE分析结果模型,模型为含壁厚属性的成形性结果文件;移动内板成形性CAE模型位置,使其与内板结构CAE模型基本重合,选取部件的壁厚属性进行映射,映射成功后导出内板非均匀壁厚的结构CAE分析模型。

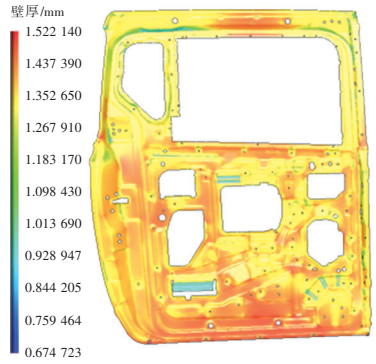


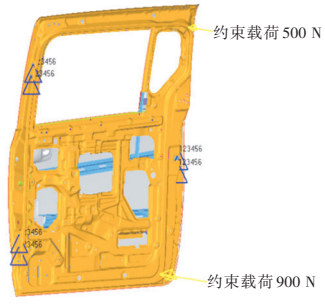
图6 车门内板成形性壁厚云图

3 铝合金车门刚度CAE与试验对标分析

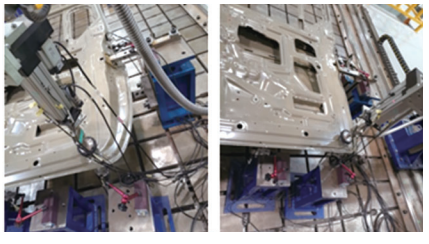
构建车门内外板等壁厚、外板非均匀壁厚、内板非均匀壁厚及内外板非均匀壁厚4种结构CAE分析模型,计算4种结构CAE分析模型的扭转刚度、腰线刚度及玻璃升降器安装点刚度,并与试验刚度结果进行对比分析。

3.1 铝合金车门扭转刚度CAE与试验对比分析

车门扭转刚度不足会导致车辆经过扭曲路面时车门变形过大,引发异响,甚至出现疲劳破坏[12-13]。扭转刚度工况约束条件为约束车门前缓冲块及后锁安装点6个自由度(Degrees of Freedom,DOF)DOF1~DOF6;载荷条件为上、下加载点分别施加Y向载荷500 N、900 N。扭转刚度CAE分析与试验如图7所示。



(a)扭转刚度CAE分析模型



(b)扭转刚度试验

图7 铝合金车门扭转刚度CAE分析模型及扭转刚度试验

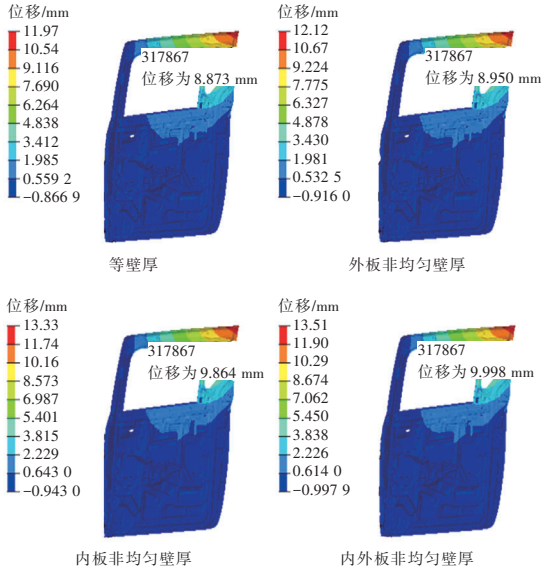
开展车门内外板等壁厚、外板非均匀壁厚、内

板非均匀壁厚及内外板非均匀壁厚的扭转刚度CAE计算,铝合金车门扭转刚度CAE分析与试验检测结果如表1所示。

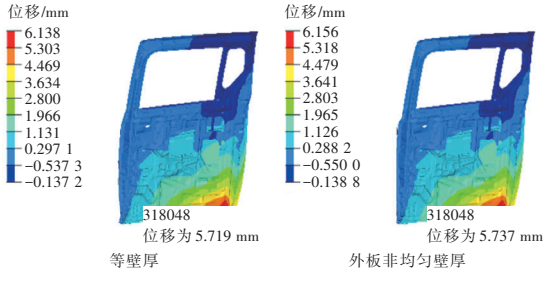
表1　扭转刚度CAE分析与试验检测结果　　mm

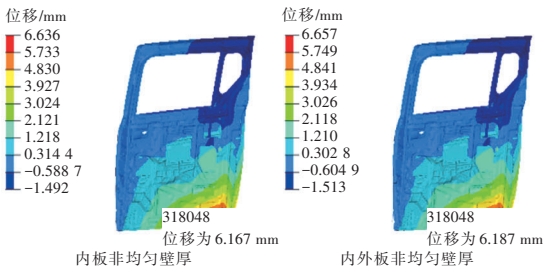
工况	CAE分析结果				试验结果
	等壁厚	外板非均匀壁厚	内板非均匀壁厚	内外板非均匀壁厚	
上角点位移	8.84	8.95	9.86	10.00	10.89
下角点位移	5.72	5.74	6.17	6.19	7.45

扭转刚度仿真结果与试验结果对比分析可知,相较于等壁厚CAE模型计算结果,上角点扭转刚度外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升1%,内板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升9.3%,内外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升10.6%,下角点扭转刚度外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升0.2%,内板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升6%,内外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升6.3%。铝合金车门扭转刚度CAE分析结果位移云图如图8所示。



(a)上角点扭转刚度CAE分析位移



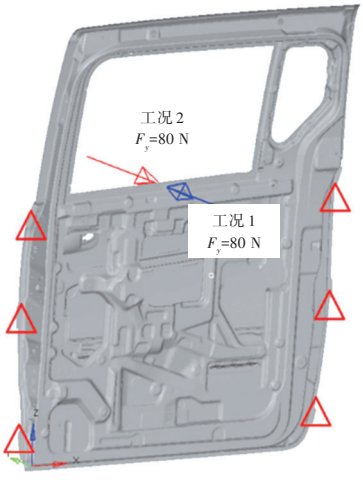


(b)下角点扭转刚度CAE分析位移

图8　铝合金车门扭转刚度CAE分析结果位移云图

3.2　铝合金车门腰线刚度CAE与试验对标分析

车门腰线刚度不足会导致玻璃升降卡滞,是车门结构的重要性能指标[14-15]。腰线刚度工况约束条件为约束车门前、后包边下侧的DOF1~DOF6;载荷条件为车门内外腰线中间位置沿*Y*/−*Y*向施加80 N的载荷。腰线刚度CAE分析与试验如图9所示。



(a)腰线刚度CAE分析模型



(b)腰线刚度试验

图9　铝合金车门腰线刚度CAE分析模型及刚度试验

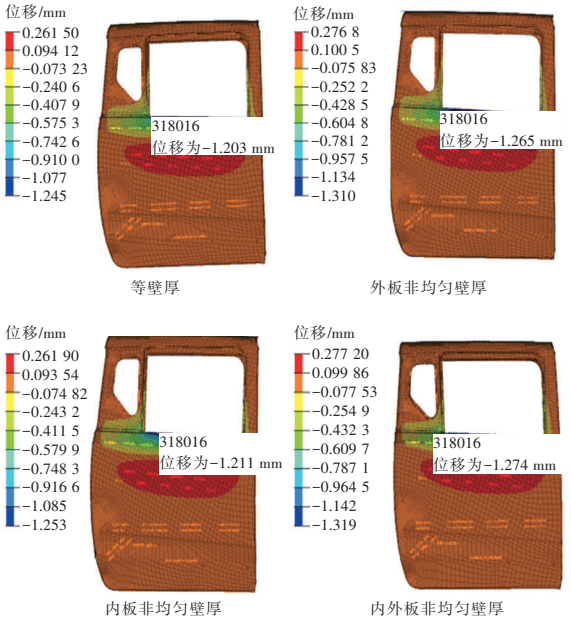
开展车门内外板等壁厚、外板非均匀壁厚、内板非均匀壁厚及内外板非均匀壁厚的腰线刚度CAE计算,铝合金车门腰线刚度CAE分析与试验

对标结果如表 2 所示。

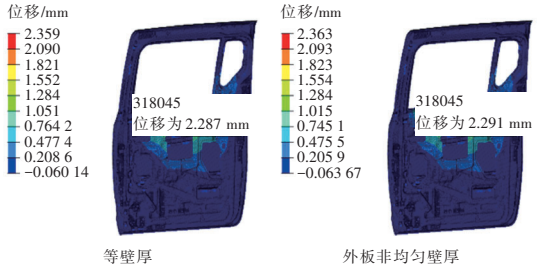
腰线刚度仿真结果与试验结果对比分析可知，相较于等壁厚 CAE 模型计算结果，外腰线刚度外板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 4.5%，内板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 0.6%，内外板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 5.2%，内腰线刚度外板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 0.2%，内板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 5.3%，内外板非均匀壁厚 CAE 模型计算结果精度提升 5.5%。铝合金车门腰线刚度 CAE 分析结果位移云图如图 10 所示。

表 2 腰线刚度 CAE 分析与试验检测结果 mm

工况	CAE 结果				试验结果
	等壁厚	外板非均匀壁厚	内板非均匀壁厚	内外板非均匀壁厚	
外腰线位移	1.203	1.265	1.211	1.274	1.39
内腰线位移	2.287	2.291	2.430	2.434	2.715



(a)外腰线刚度 CAE 分析位移



(b)内腰线刚度 CAE 分析位移

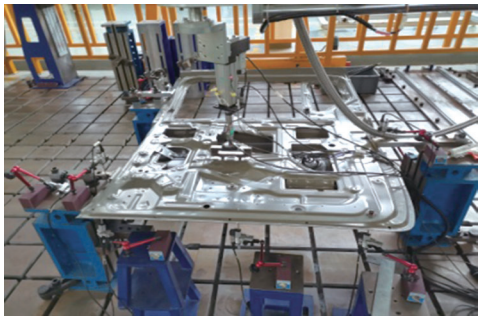
图 10 铝合金车门腰线刚度 CAE 分析结果位移云图

3.3 铝合金车门玻璃升降器安装点刚度 CAE 与试验对标分析

车门玻璃升降器安装点刚度对内板局部振动及疲劳性能有重要影响，刚度不足会导致门内板震颤、变形过大甚至出现破坏[16]。玻璃升降器安装点刚度工况约束条件为约束前缓冲块及后锁安装点的 DOF1~DOF6；载荷条件为车门玻璃升降器上、下安装点处沿内板法向施加 100 N 的载荷。玻璃升降器安装点刚度 CAE 分析与试验如图 11 所示。



(a)玻璃升降器安装点刚度 CAE 分析模型



(b)玻璃升降器安装点刚度试验

图 11 铝合金车门玻璃升降器安装点刚度 CAE 分析模型及刚度试验

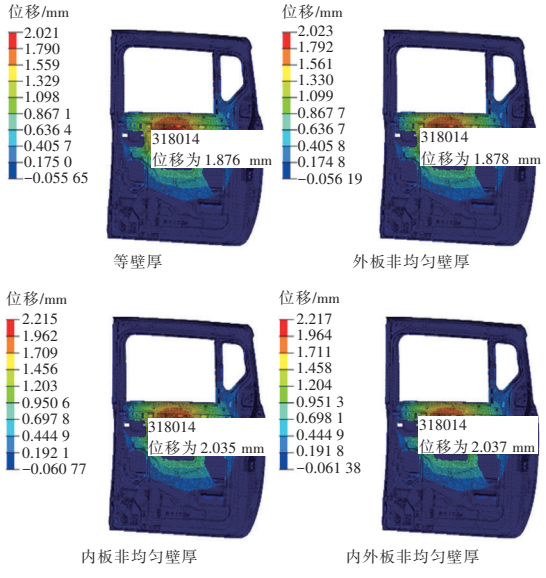
开展车门内外板等壁厚、外板非均匀壁厚、内板非均匀壁厚及内外板非均匀壁厚的玻璃升降器安装点刚度 CAE 计算，并与玻璃升降器安装点刚度试验结果对比分析，铝合金车门玻璃升降器

安装点刚度CAE分析与试验对标结果如表3所示。

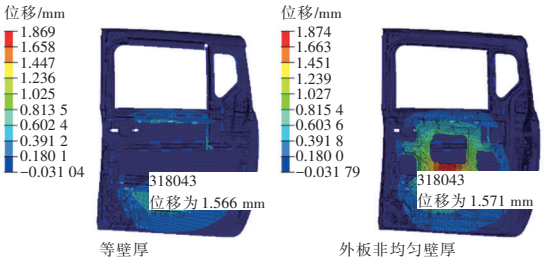
表3　玻璃升降器安装点刚度CAE分析与试验对标结果　mm

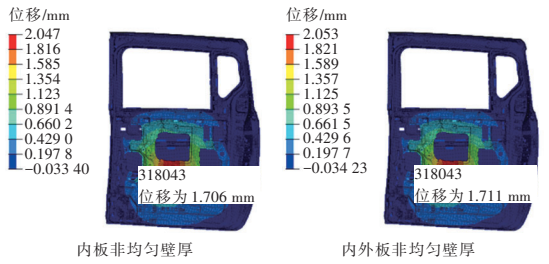
工况	CAE结果				试验结果
	等壁厚	外板非均匀壁厚	内板非均匀壁厚	内外板非均匀壁厚	
玻璃升降器上安装点位移	1.876	1.878	2.035	2.037	2.100
玻璃升降器上安装点位移	1.566	1.571	1.706	1.711	1.925

玻璃升降器安装点刚度仿真结果与试验结果对比分析可知,相较于等壁厚CAE模型计算结果,玻璃升降器上安装点刚度外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升0.1%,内板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升7.6%,内外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升7.7%。玻璃升降器下安装点刚度外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升0.2%,内板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升7.2%,内外板非均匀壁厚CAE模型计算结果精度提升7.5%。铝合金车门玻璃升降器安装点刚度CAE分析位移云图如图12所示。



(a)玻璃升降器上安装点刚度CAE分析位移





(b)玻璃升降器下安装点刚度CAE分析位移

图12　铝合金车门玻璃升降器安装点刚度CAE结果位移云图

与车门内外板等壁厚CAE模型的计算刚度相比,采用内外板成形非均匀壁厚CAE模型的刚度计算结果更接近试验结果,说明基于成形非均匀壁厚的结构CAE模型分析精度比等壁厚CAE模型明显提升。

4　结束语

本文采用网格节点映射法研究了铝合金车门内外板成形非均匀壁厚CAE模型的构建,将非均匀壁厚的铝合金车门结构CAE分析模型与等壁厚CAE分析模型对比可知,车门上角点扭转刚度计算结果精度提升10.6%,下角点扭转刚度计算结果精度提升6.3%;车门外腰线刚度计算结果精度提升5.2%,内腰线刚度计算结果精度提升5.5%;车门玻璃升降器上安装点刚度计算结果精度提升7.7%,车门玻璃升降器下安装点刚度计算结果精度提升7.5%。本文研究实现了考虑冲压成形壁厚变化的结构CAE分析,提高了CAE性能分析精度,实现了结构性能分析与成形工艺分析的结合,可在前期设计阶段更准确地预测结构的性能,避免后期零件因刚性不足设计变更导致研发周期及成本增加。

参考文献:

[1] 成艾国, 沈阳, 姚佐平. 汽车车身先进设计方法与流程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[2] 王钰栋, 金磊, 洪清泉. HyperMesh&HyperView应用技巧与高级实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[3] 李志祥, 张三磊. 基于OptiStruct的板厚对车门刚度性能的影响研究[C]// Altair 2011 HyperWorks技术大会论文集, 2011.

[4] 张健, 闫巍, 王刚, 等. 铝合金车门外板冷冲压成形工艺及数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(5): 45-52.

[5] KUMAR D, LIU Z G, JIRATHEARANAT S, et al. Investi-

gation of Residual Stresses Induced by Incremental Sheet Forming and Stamping in Aluminum Alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 32(7): 2950-2962.

[6] 田国富, 张家兴. 某乘用车车门静态刚度与模态分析[J]. 制造业自动化, 2020, 42(4): 56-60.

[7] 陈德成, 魏震松, 曲广吉, 等. 有限元模型修正技术的工程应用[J]. 中国工程科学, 2001(10): 59-63.

[8] 谭继锦. 汽车有限元法[M]. 人民交通出版社, 2012.

[9] ASADI M, WALKER B, SHIRVANI H. Evaluation of New Finite Element Model for IIHS Side Impact Barrier[C]// Nagoya: Japan LS-DYNA Users Conference, 2007.

[10] 侯柏林, 叶颖, 孙建芳, 等. 铝合金薄板冲压成形过程中的侧壁起皱及有限元模拟[J]. 材料科学与工艺, 2024, 32(3): 87-95.

[11] 韦勇, 李佳, 成艾国. 基于有限元法的轿车后门刚度分析[J]. 机械工程师, 2010(8): 75-77.

[12] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

[13] 刘锋, 张瑞乾, 陈勇. 基于模态和刚度的车门轻量化研究[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 476-481.

[14] 易辉成. 基于刚度和模态的车门结构件料厚多目标优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

[15] 张帅. 某SUV车门异响CAE仿真研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.

[16] 张永利. 玻璃升降器安装点动刚度对玻璃升降声品质的影响[J]. 合肥师范学院学报, 2020, 38(6): 47-49+54.

AT&M