

基于有限元分析研究CLD值 对车门关闭力的影响

张建波, 季良, 张宝东, 刘英杰, 王子晗, 赵洪生

北京奔驰汽车有限公司 北京 100176

摘要: 使用ABAQUS软件对奔驰某车型使用不同CLD值 (Compression Load Deflection) 密封条的情况进行了有限元分析, 并通过模拟计算出不同情况下的密封反力, 从而确定了CLD值对关门力的影响方式, 对指导实际生产, 提高产品质量和客户满意度有着重大意义。

关键词: 车门关闭力, CAE, CLD, 有限元分析

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.05.005

汽车工业经过快速发展, 目前已经在各国经济中逐渐扮演起了支柱产业的角色。各个主机厂都在持续致力于优化自身产品的质量, 而车门关闭力又是客户最为关注的质量问题之一。近年来, 车门关闭力的研究也逐渐受到学术界和业界的广泛关注。影响车门关闭力的因素有很多, 包括密封条、内间隙、铰链、门锁、限位器以及空气压阻等。其中密封系统和空气压阻的相关研究占了很大比重, 但由于空气压阻的优化实现较难且可能造成其他负面影响, 所以优化密封系统中密封条的参数或形状成为了目前研究的重点方向, 如Wagner D A等^[1]、Hyung-il Moon等^[2]均通过构建密封条几何模型和仿真, 对密封条参数进行了有效优化。

CAE (Computer Aided Engineering) 技术又称计算机辅助工程技术, 是由研究学者为解决工程中的许多问题而建立起来的一种研究问题的方法, 其中的有限元分析技术历经几十年的研究摸索, 已经逐步成为解决工程问题最有效的方法之一。在众多有限元分析软件中, Abaqus因其多样的功能和广泛的应用领域而备受青睐。如吴文涛等^[3]使用Abaqus对密封条进行了有限

元模型建立, 对密封条的应力场分布进行了分析。为了更好地优化车身质量, 以满足客户需求, 本文使用Abaqus软件对奔驰某车型进行了有限元分析, 来研究密封条CLD值与车门关闭力之间的关系。

几何模型的建立

本文针对密封条变形时的非线性特性选择合适的本构模型, 利用 Abaqus 软件建立奔驰某车型车门旋转关闭过程中密封条的压缩工况二维平面仿真模型。

1. 密封条几何模型建立

车头道密封条由三部分构成: 海绵橡胶、密实橡胶以及骨架。其中海绵橡胶 (泡管) 主要用来承受由于车门关闭产生的压缩载荷, 同时消除车门与侧围间的断差间隙, 通过与钣金或者装饰件配合, 利用受压后产生的力达到密封作用; 钢带骨架用于保持密封条的形状和卡紧在其他连接体上, 比如侧围门框。

使用Abaqus软件导入密封条各部分的几何模型, 并依照实际工况中的装配关系进行密封条装配平面仿

真模型的建立，结果如图1所示。

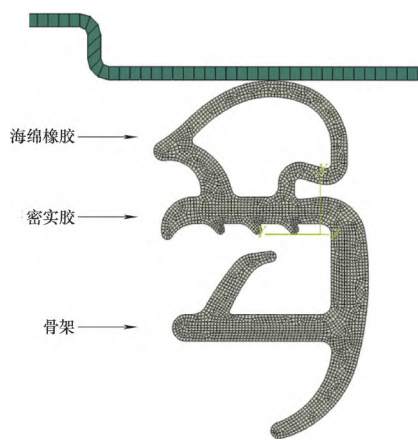


图1 奔驰某车型密封条平面仿真模型

2. 密封条装配几何模型建立

在车辆关门特性研究当中，汽车左前门的关门特性是具有代表性的。因此，本文采用1/4白车身和左前门车门总成，进行有限元模型的搭建。

网格单元的尺寸会直接影响分析过程的耗时和整个模型的准确性，本文中车门和车身侧围部分网格大小均为8mm，选取所有需要划分网格的板件统一进行划分，网格划分完成后检查网格的质量并对质量差的网格进行优化。划分好的1/4白车身、左前门总成模型如图2所示。



图2 奔驰某车型1/4白车身及左前门总成模型示意

进行有限元模拟时，为了最大程度对现实中的工作条件进行还原，需要在划分网格后进行属性和材料参数的赋予，在本文的分析中，需要对车门和车身、玻璃、焊点和胶进行材料属性的赋予，材料参数见表1。

表1 奔驰某车型密封条材料参数表

材料	密度/ (kg/mm ³)	弹性模量 / MPa	泊松比
钢	7.85×10^{-2}	2.1×10^5	0.3
玻璃	2.7×10^{-6}	7.2×10^4	0.25
焊点		2×10^5	0.3
结构胶	1.12×10^{-6}	1.5×10^3	0.38
玻璃粘胶	1.12×10^{-6}	20	0.41

模型搭建完成后，需要对模型进行边界条件的设置。关门过程的输入条件即为关门初速度，旋转轴选取上下铰链中两个中心点所构成的旋转轴，方向为负方向，关门初速度设定为 -1.26rad/s ，车门开度设置为 5° 。然后进行分析步的设置，将分析类型选为显式动力学分析，分析时长1s，最大增量步0.001，并建立Z轴负方向的重力加速度模拟真实实验状态。

结果分析

在研究胶皮条CLD值对车门关闭力的影响时，考虑到密封条影响关门力是通过改变其在受压状态下的密封反力来实现的，而且密封反力也是研究静态关门力时的主要考察对象，所以此部分中使用密封反力来代表关门力进行分析。

考虑到变截面密封条的分段原则，且长度较大的密封条三维模拟仿真时难度较大，本文采用区间叠加的拟合方法来进行头道密封条的车门密封反力模拟，如图3所示，车门密封系统基于曲率特性被分成了八个部分。采用此种分段方法可以减少网格数量从而提高仿真的计算效率，且有利于计算精准性的提升。在计算最终的密封反力时，将此八个部分的密封反力相加即可得到最终结果。

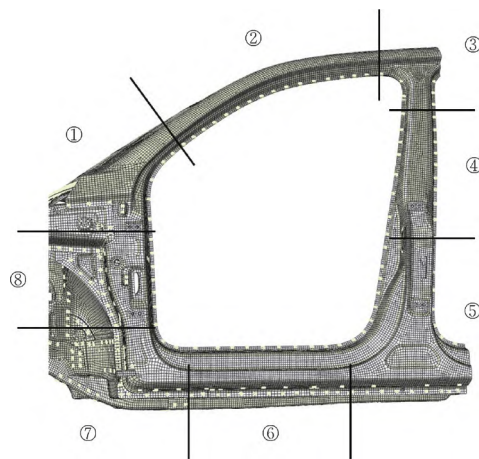


图3 车门密封系统分段示意

实际生产时，一般使用的胶皮条CLD值范围是 $(5.1 \pm 2) \text{ N}$ ，根据此范围选用了十个不同的CLD值建立模型进行分析，这里选取了其中的四组数据进行展示。对使用不同CLD值密封条的车门及侧围建立分析模型并进行计算后，得到头道密封条的应力仿真结果。四个不同CLD值的应力云图如图4所示。分段密封

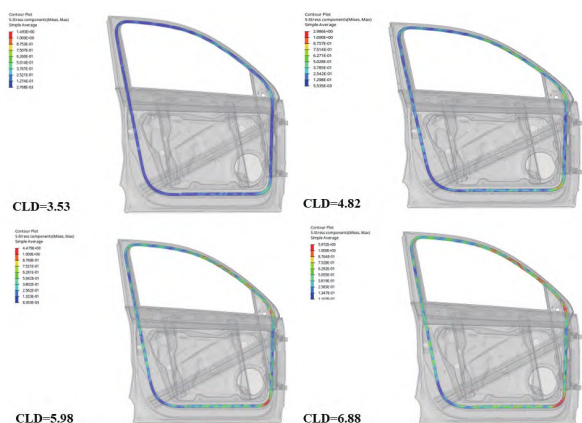


图4 奔驰某车型不同CLD值头道密封条应力仿真云图

反力模拟结果和总计结果见表2。可以看出，随着密封条CLD值的增加，车门各个分段以及总密封反力都呈现上升的趋势。平直段（②、④、⑥、⑧）和大曲率段（①、③、⑤、⑦）的密封反力存在差异，这是由于近似平直段在车门关闭过程中，钣金压缩方向恒定，最终压缩量偏差不大，而如A柱、B柱拐角段的大曲率安装轮廓不仅会导致密封胶条产生装配变形与应力，而且会改变钣金压合方向，进而产生差异。

表2 奔驰某车型不同CLD值对应分段车门密封反力
(单位: N)

位置	①	③	⑤	⑦	合计
CLD=3.53	13.54	12.11	14.36	10.14	50.15
CLD=4.82	14.26	13.24	13.95	15.69	57.14
CLD=5.98	14.42	12.98	15.85	14.33	57.58
CLD=6.88	16.65	13.35	11.22	20.59	61.81

位置	②	④	⑥	⑧	合计
CLD=3.53	91.22	16.11	9.54	11.14	128.01
CLD=4.82	93.66	19.69	10.74	14.02	138.11
CLD=5.98	95.23	16.85	13.26	17.47	142.81
CLD=6.88	99.54	17.74	15.21	19.95	152.44

CLD	3.53	4.82	5.98	6.88
总密封反力	178.16	195.25	200.39	214.35

将十个不同CLD值的密封条计算出的总密封力绘制成曲线，如图5所示。

从上述模拟结果可以看出，随着密封胶条的CLD值逐渐升高，车门关闭力也会呈现总体上升的趋势，且在CLD处于约3.1~4.8N和5.9~7.1N时，车门关闭力随着CLD值增长较快，而在4.8~5.9N时，车门关闭力趋于平稳。所以选择CLD值为4.8~5.9N的胶皮条为最优选择。

实际生产中使用BeDa设备进行关门力测量，其测量单位为设备的伸长长度，单位为mm。使用此设备对模拟得出的结论进行验证，结果表明，该车型在使用

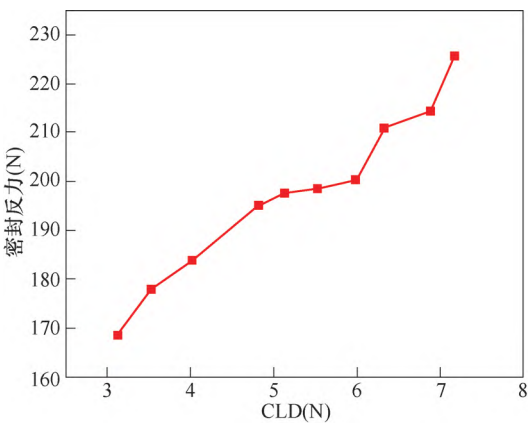


图5 某车型不同CLD值密封条对应总密封反力曲线

模拟得出的最佳CLD值范围4.8~5.9N时，其车门关闭力符合北京奔驰质量部制定的某车型关门力标准（30~110mm），且关门力处于合格范围内的最佳稳定中值状态（60~80mm）。故在实际生产该车型时，为保证客户车门关门力的稳定性，胶皮条的CLD值选择在4.7~5.8N范围内为最佳。该拟合结果可用于指导该车型生产，且对其他车型具有重要借鉴意义。

结语

本文以奔驰某车型为例，通过有限元分析方法精确模拟出了车门在关闭过程中的应力分布，得到了车门关闭力随着密封条CLD值变化的趋势。根据CLD-车门关闭力曲线确定了该车型最佳的胶皮条CLD值范围4.8~5.9N，并结合北京奔驰某车型实际生产中的质量考核标准进行了验证，结果表明在此范围内，该车型车门关闭力处于最稳定的中值状态。

参考文献:

[1] Wagner D A, Morman K N, Gur Y, et al. Nonlinear analysis of automotive door weatherstrip seals[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 1997, 28 (1) : 33-50

[2] Moon H, Kim H, Kim D H, et al. Predicted minimum door-closing velocity based on a three-dimensional door-closing simulation[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2011, 47 (3) : 296-306.

[3] 吴文涛, 叶子波, 黄兴. 有限元分析法在工程密封件设计上的应用[J]. 润滑与密封, 2007 (11) : 177-180. **AUTO1950**