

车门密封条消耗能量计算

高云凯, 高大威, 徐瑞尧, 余海燕

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 根据密封条在关门过程中的工作原理, 通过质量守恒定律和动量定理, 建立车门密封条及其排气孔的数学计算模型. 基于 Excel 平台, 利用 VBA 语言, 使用数值积分与循环迭代方法, 设计人机交互操作界面, 计算密封条的消耗能量. 通过对排气孔消耗能量的研究, 可以得到排气孔阻尼力消耗能量占密封条消耗总能量的 20%, 所以, 排气孔消耗能量是密封条消耗总能量中不可忽视的重要影响因素. 比较不同车型的计算结果与试验数据, 误差均不超过 12%, 证明计算是有效的.

关键词: 车门; 密封条; 消耗能量; 排气孔

中图分类号: U 463.83

文献标识码: A

Automotive Door Seal Consumption Energy Calculation

GAO Yunkai, GAO Dawei, XU Ruiyao, YU Haiyan

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The working principle of seal was analyzed and mathematical models of seal and its venting holes were set up by the application of mass and momentum balance equations. Seal consumption energy was calculated and man-machine interface was designed based on software Excel, VBA language, numerical and iterative methods. Through studying consumption energy of seal venting holes, consumption energy of seal venting holes damping force is 20% of seal total consumption energy. So consumption energy of seal venting holes is important influencing factors of seal total consumption energy. The calculation results are compared with the test data in different models that error less than 12% proves the calculation effectiveness.

Key words: automotive door; seal; consumption energy; venting holes

车门密封条在确定车门关闭力、防止车厢进水和降低车内风噪声等方面起着主要作用^[1-3]. 福特公司的一份测试报告表明, 密封条阻力构成了车门关闭能量的 30%~50%. 在车门关闭过程中, 当密封条遇到门框时受到挤压发生变形, 变形过程中产生压缩力导致能量消耗, 成为阻碍车门关闭的主要因素. 而研究密封条在车门关闭过程中的消耗能量, 不仅有助于研究车门关门能量、改善车门性能, 而且在提高密封条使用寿命等方面也具有一定的指导意义. 文献[4-6]主要使用有限元分析方法, 对车门密封条能量进行分析研究. 但这些研究不仅需要物理模型的支持, 而且要在已有装配车门上建立有限元模型, 然后通过大型动力学分析软件, 对其在关门过程中消耗的能量进行仿真分析, 之后对物理模型进行修改, 再分析、再修改. 这就是所谓的“试错法”. 而这样做需要消耗大量的人力、物力, 设计周期长, 最重要的是设计人员在设计初期不能及时有效地得到指导数据. 所以, 迫切需要设计一种方便快捷且通用性强的计算软件, 这种软件不依赖于车门的物理模型, 而且操作简单, 对设计人员的要求不高, 并且计算结果值得信赖.

笔者通过对车门密封条的工作原理进行理论分析, 建立数学模型. 通过数值分析与循环迭代的方法, 使用 VBA 语言对车门密封条消耗能量进行计算, 并研究密封条排气孔阻尼力消耗能量对密封条消耗总能量的影响. 计算结果与实验数据对比表明, 该模型的计算结果具有较高的准确性.

1 工作原理分析

1.1 密封条受力变形分析

关门能量在很大程度上取决于密封条的受压变形特性 (compression load deflection, CLD). 在车

密封条, 是堵塞遮盖件周围间隙的橡胶件. 轿车

收稿日期: 2009-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705067)

作者简介: 高云凯(1963—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为车身结构设计与工艺. E-mail: gaoyunkai@tongji.edu.cn

门关闭过程中,密封条的受力变形可以认为是一种非线性弹簧系统,其刚度的变化依赖于密封条的变形值.图1为国内某款轿车的密封条CLD曲线,横坐标为密封条在一定负荷下的压缩量(mm),纵坐标为密封条所受的载荷(N).在对密封条装配合格的某款轿车的观察、测试中,可以发现,密封条在关闭过程中受力方式有三种,具体可见图2的密封条受力变形分析:①在车门大多数位置,密封条的受力方式为法向力 F_1 ;②在车门后侧,密封条的受力方式为挤压,即 F_3 ,对密封条产生弯矩;③在车门上的横梁处,由于车门关闭过程中,车门绕车身立柱上的销轴旋转,在挤压密封条的过程中,除受到法向力 F_1 ,还受到剪切力 F_2 的作用.在这两种受力情况下,密封条变形产生“搓”的效果.由于密封条在轿车车门关闭中主要在法向上受力变形,因此在密封条对车门关门能量影响的研究中,主要针对密封条法向受力变形进行研究.

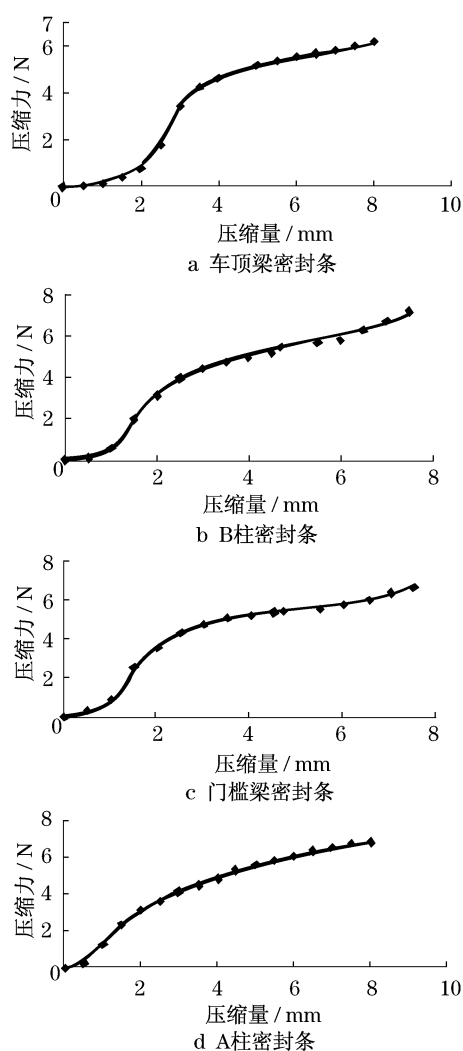


图1 主密封条 CLD 曲线

Fig.1 The CLD curve of the primary seal

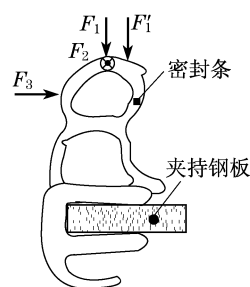


图2 密封条受力变形分析

Fig.2 Seal deformation analysis

1.2 密封条上的排气孔

车门主密封条一般采用的中空型会产生气垫现象而使反作用力变大,所以密封条上设计有排气孔,且排气孔的设计间隔很有规律,沿密封条呈线形分布,在车门关闭时以加快腔内空气流动.但在密封条压缩时,腔内气体溢出产生非线性阻尼力.研究表明,排气时经过排气孔的空气流动类似于阻尼机构,消耗的能量对密封条消耗总能量影响很大.图3为密封条气泡内空气随着密封条被压缩的体积变化图,由图可见,当密封条受到挤压时,密封条内气体的排气速度越来越快.

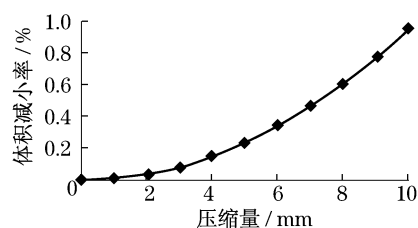


图3 密封条气泡内空气体积变化率

Fig.3 Air volume change rate in the seal bulb

2 数学模型的建立

建立密封条及其排气孔的数学模型,不仅可以计算消耗的能量,也可以为密封条的前期设计与布置提供参考依据.

2.1 密封条压缩力及转矩

把密封条分割成 N 小段,每段长度一定,通过叠加每一小段密封条消耗的能量,得到整段密封条的能量消耗.

$$E_s = \sum_{i=1}^N \int F_s d_i$$

式中: d_i 为密封条的压缩量; F_s 为密封条受到的相应压缩力. d_i 的计算见图4,计算式为

$$d_i = 2R\sin(\theta/2)$$

式中: R 为车门的旋转半径; θ 为车门转过的角度. 根据密封条的 CLD 曲线, 用插值法可得到 F_s .

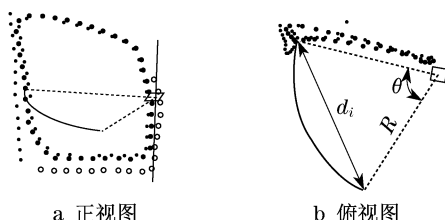


图4 密封条压缩量计算示意图

Fig.4 Seal compression calculation diagram

密封条对车门铰链轴线的转矩 T_s 由下式计算:

$$T_s = F_s h$$

式中, h 代表密封条上的点到铰链轴的距离.

2.2 排气孔阻尼力

密封条压缩时, 腔内气体流动加速, 并通过排气孔流出, 同时产生阻尼力 F_d . 以含有排气孔的一定长度密封条内的气体为研究对象 (如图 5 所示), 应用质量守恒定律和动量定理, 可以得到

$$\begin{cases} \frac{d(\rho V)}{dt} = -\rho v_e A_e \\ Ft = mv_e \end{cases}$$

整理可得下式:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt}AL + L \frac{dA}{dt}\rho = -\rho v_e \frac{D^2\pi}{4} \\ Ft = \rho AL v_e \end{cases}$$

且 $\frac{dA}{dt} = \frac{dW}{dt}h + \frac{dh}{dt}W$, $\frac{dW}{dt} = \frac{dh}{dt}\left(\frac{dA}{dh} - \frac{A}{h}\right)/h$. 代入上式中消去 v_e , 得到下式:

$$F_d = \frac{F}{L} = \frac{\rho WL^2}{24} \left[\left(\frac{192h^2}{\pi^2} \cdot \frac{W^2}{D^4} - 1 \right) \cdot \left(\left(\frac{dW}{dt} \right)^2 / W^2 + \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 / h^2 \right) + \left(\frac{384h^2}{\pi^2} \cdot \frac{W^2}{D^4} - 1 \right) \left(\frac{dW}{dt} \cdot \frac{dh}{dt} \right) / Wh \right]$$

式中: F_d 代表长为 L 的密封条产生的阻尼力; F 代表整根密封条产生的阻尼力; ρ 为空气密度; A , h 与 $w (= A/h)$ 分别表示密封条的横截面面积、平均高度与宽度; D 与 A_e 分别表示排气孔直径与面积; v_e 代表密封条气泡内气体流出速度.

综上可知, 密封条消耗能量不仅与密封条的压缩量有关, 而且排气孔的位置及孔径大小的影响也不容忽视.

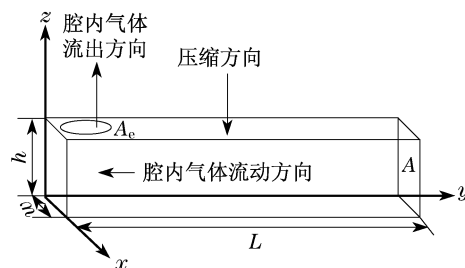


图5 排气孔阻尼力计算模型

Fig.5 Venting holes damping force calculation model

3 密封条消耗能量分析

决定密封条对关门能量的影响因素包括: ①密封条的位置; ②密封条的 CLD 曲线.

同一密封条在车门四周的受力方式和压缩量都可能不同. 为了能够更精确计算出关门过程中密封条消耗的能量, 以受力方式和压缩量为依据, 将密封条分为若干个区域: 主密封条、次密封条及辅助密封条. 如图 6a 所示, 分别采用不同的 CLD 曲线, 将每个区域分成长度一定的小段, 并假设关门时各小段的压缩量相同, 这样密封条消耗的总能量就是这些小段的叠加. 典型车门的主密封条一般又分为 4 个区域: 车顶梁密封条, B 柱密封条, 门槛梁密封条及 A 柱密封条. 位置如图 6b 所示, 其 CLD 曲线如图 1 所示.

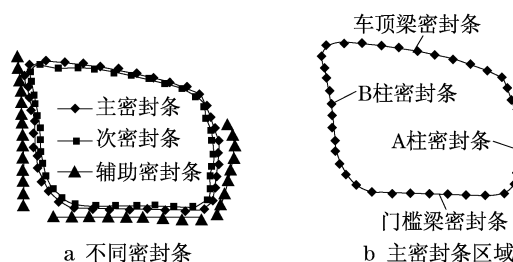


图6 密封条区域示意图

Fig.6 Seal region schematic diagram

在 Excel 中输入初始数据, 包括 CLD 曲线以及密封条上点的坐标, 利用 Excel 中自带的 VBA 语言编写计算机程序, 计算得到密封条在关门过程中消耗的能量^[2-8]. 结果如图 7 及表 1 所示.

从计算结果可以看出, 关门过程中密封条消耗的能量主要由主密封条、次密封条与排气孔阻尼力消耗能量构成, 分别占 45%, 24%, 20%. 说明在研究密封条消耗能量时, 排气孔阻尼力消耗的能量是重要的影响因素.

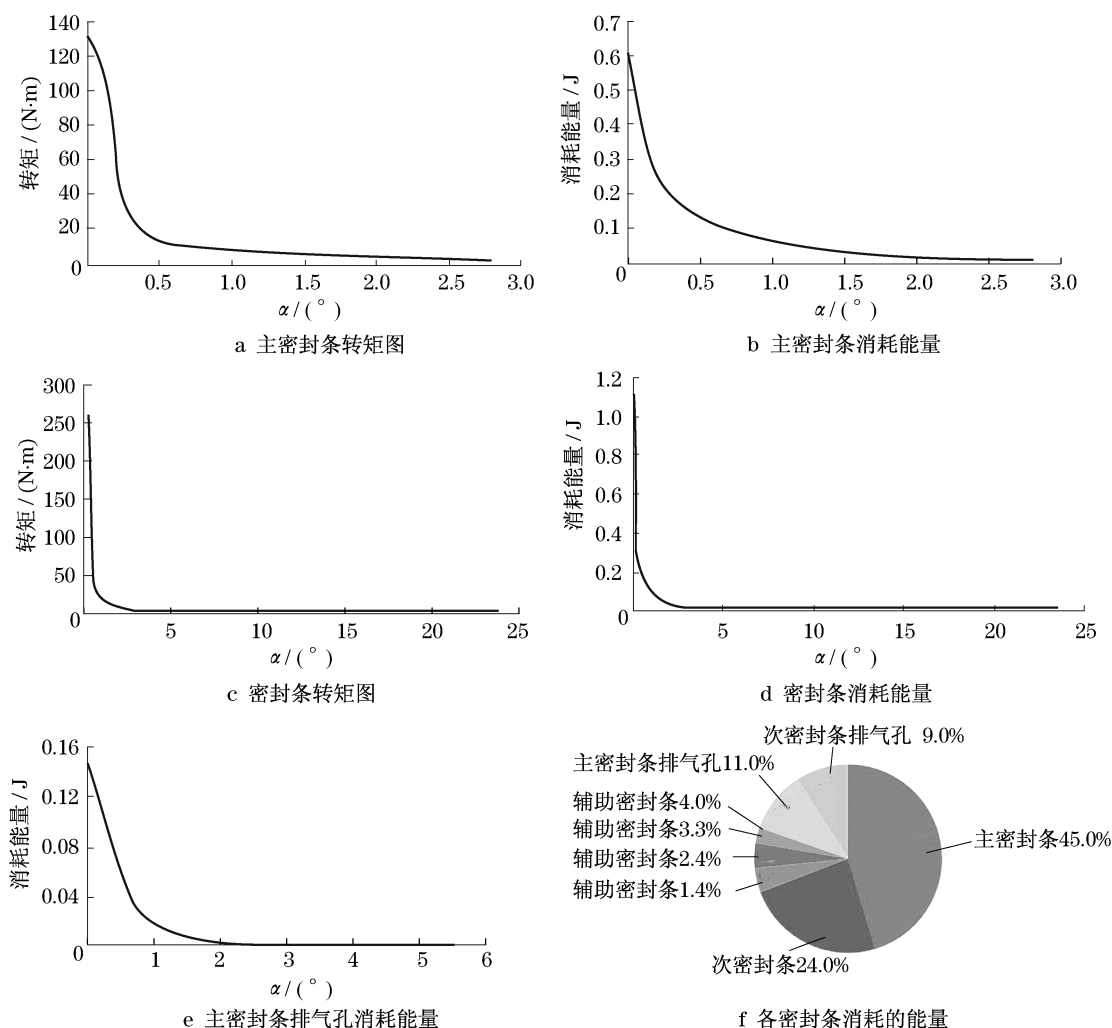


图7 计算结果分析

Fig.7 Calculation results analysis

表1 密封条消耗能量输出结果

Tab.1 Seal consumption energy output results

消耗能量部分	区域	气泡有效宽度/mm	最大压缩量/mm	排气孔直径/mm	排气孔间距/mm	能量/J	转矩/(N·m)
密封条压缩部分	主密封条					0.622	130.516
	次密封条					0.328	68.009
	辅助密封条					0.154	57.394
密封条排气孔部分	主密封条	11.90	6.00	3.00	150.00	0.145	
	次密封条	13.00	5.40	4.00	125.00	0.126	
密封条消耗总能量						1.375	

4 试验验证

计算密封条消耗能量的输入参数来源于国内某车型,由某汽车生产商提供.该车型密封条消耗能量的试验数据如表2所示,误差为11.9%.根据参考文献[4]提供的车型数据计算、与试验数据对比

表2 试验数据与计算数据对比

Tab.2 Test data and the calculation results J

数据	试验次数			平均值
	1	2	3	
试验数据 ¹⁾	1.21	1.23	1.24	1.227
计算数据				1.374
误差				11.9%

注:1)试验数据由生产商提供.

等资料情况如表3所示,误差为10.1%。通过分析可知,模型建立时的简化可能会带来一定的计算误差,但是与不同车型、不同试验的结果对比,误差仍不超过12%。可以认为,计算结果与试验结果相吻合,由此可以确定数学模型计算的有效性。

表3 试验数据与计算数据对比
Tab.3 Test data and the calculation results

数据	能量/J
试验数据 ¹⁾	2.88
计算数据	2.59
误差	10.1%

5 结论

(1) 根据关门过程中密封条受压变形原理进行理论分析,建立一种计算密封条及其排气孔消耗能量的数学模型。以实际车型为例计算,误差为11.9%;与相关文献的试验结果对比,误差为10.1%,均在工程允许范围内。证明此数学模型及计算的有效性。

(2) 密封条排气孔产生的阻尼力,在关门过程中消耗的能量,占密封条消耗总能量的20%,所以在计算中不能忽略。

(3) 当密封条受到挤压产生变形后,开始消耗能量,并且随着关门角度的减小,消耗能量逐渐增加,在车门关闭的瞬间达到最大值。

(4) 计算的初始输入参数仅为车门设计初期的设计值,不需要物理模型及车门有限元模型,可以缩短设计周期,节约人力物力。将理论与计算相结合,并设计一种人性化的输入输出界面,使密封条消耗

能量的计算模块化,具有一定的实用价值,可以为设计人员提供一定的理论依据,使设计更有针对性。

参考文献:

- [1] 高云凯,赵懿,彭和东.环面玻璃轿车车门设计方法研究[J].汽车工程,2005,27(4):483.
GAO Yunkai, ZHAO Yi, PENG Hedong. Design method for car door glass with torus surface[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4):483.
- [2] 高云凯,江峰,张荣荣.电动轿车车身结构静态特性综合评价方法研究[J].机械强度,2007,29:320.
GAO Yunkai, JIANG Feng, ZHANG Rongrong. Study on general appreciation method for static characteristics of electric car body structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29:320.
- [3] 黄天泽,黄金陵.汽车车身结构与设计[M].北京:机械工业出版社,1992.
HUANG Tianze, HUANG Jinling. Vehicle body structure and design[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [4] 杨蕾,张淑敏,李应军.面向最优关门能量的轿车车门设计[J].机械制造,2006(3):40.
YANG Lei, ZHANG Shumin, LI Yingjun. Optimum closing energy oriented design of auto door[J]. Machinery, 2006(3):40.
- [5] David A Wagner, Kenneth N Morman J, Yuksel G, et al. Nonlinear analysis of automotive door weatherstrip seals[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997(28):33.
- [6] Gur Yuksel, Monnan Kenneth N. Modeling the dissipative effect of seal air hole spacing and size on door closing effort[J]. Society of Automotive Engineers:971901, 1997(5):249.
- [7] 李松,曾浦华.利用VBA对Excel软件进行二次开发[J].韶关学院学报:自然科学版,2006(12):38.
LI Song, ZENG Puhua. Two times development of Excel by using VBA[J]. Journal of Shaoguan University: Natural Science, 2006(12):38.
- [8] 席相霖,许书珍. VBA for Project 2000 库函数大全[M].北京:希望电子出版社,2002.
XI Xianglin, XU Shuzhen. VBA for Project 2000 library function [M]. Beijing: Hope Electronic Press, 2002.