

DOI: 10.7652/xjtuxb201710013

汽车保险杠系统吸能盒结构参数 对低速碰撞下吸能特性的影响

李超超, 向建华, 王慧敏
(北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 针对吸能盒在汽车低速碰撞下无法更加有效地吸收碰撞能以保护车身和减轻乘员伤害的问题,提出利用铝合金吸能盒结构有限元模型优化其吸能特性的方法。该方法基于碰撞理论和变量参数法,采用吸能量、变形量和碰撞力峰值作为评价指标,研究吸能盒壁厚、截面形状对吸能特性的影响。进一步探讨了 V 型诱导槽对吸能盒吸能特性的影响;得到了对吸能特性影响更为突出的结构。实验结果表明,适当地增加吸能盒壁厚,可提高吸能盒的吸能特性和吸能潜力;与圆形截面相比,六边形和八边形截面吸能盒的吸能量分别提高了 6.2%和 19.3%,正方形截面吸能盒的吸能量下降了 5.44%;与普通吸能盒相比,分别添加 1V、2V、3V 型诱导槽的吸能盒可提高吸能量约 16%,而诱导槽数的变化对吸能盒吸能特性的改善并不明显。与壁厚和诱导槽数对吸能特性的影响相比,吸能盒的截面形状和有无 V 型诱导槽对吸能特性的影响更为突出,与原吸能盒相比,带有 V 型诱导槽的八边形吸能盒的吸能特性有了显著提升。

关键词: 吸能盒;低速碰撞;吸能特性

中图分类号: TB31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0077-05

The Influences of Structural Parameters of Energy-Absorbing Box for Automobile Bumper on the Energy Absorption Characteristics During Low Speed Collision

LI Chaochao, XIANG Jianhua, WANG Huimin
(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A finite element model of the aluminum alloy energy-absorbing box is proposed to improve the problem that the energy-absorbing box cannot effectively absorb energy and reduce damages to pedestrians during vehicle's low-speed collisions. The energy absorption characteristics of the proposed energy-absorbing box with different thickness and different cross-section shapes are analyzed and compared. Moreover, the influence of V-shaped slot on the energy absorption characteristics of the box is further discussed. The results show that the energy absorption characteristics and potential energy absorption of the box are improved by increasing its wall thickness. The energy absorption characteristics of the box with octagon section is the best, while the energy absorption characteristics of the box with square section is the worst among the circular, square, hexagonal and octagon cross sections. Moreover, the energy absorption characteristics are improved by adding 1V、2V、3V-shaped groove on the

energy-absorbing box. However, the number of the V-shaped grooves has no clear influence on changing the energy absorption characteristics of the box.

Keywords: energy-absorbing box; low speed collision; energy absorption characteristics

汽车前保险杠系统是汽车碰撞或追尾事故中最先碰到的部件,主要由防撞梁、塑料蒙皮,吸能盒和支架组成^[1]。防撞梁将碰撞能均匀地传递给吸能盒,同时防止车身前部内侵量过大对发动机造成损害;吸能盒在低速碰撞时能及时有效地通过自身压溃变形吸收碰撞能,降低对车体及行人的伤害^[2]。

吸能盒吸能特性的改善有利于提高汽车前部保险杠系统的整体耐撞性,对汽车的被动安全有着重要的意义。影响吸能盒吸能特性的因素有很多,例如吸能盒的尺寸、形状、表面结构^[3-5]等,以往的研究大多关注于新材料的应用^[6-7],而本文侧重通过吸能盒本身结构优化来提高吸能特性。

本文基于某铝合金吸能盒结构建立模型并分析低速碰撞下的吸能特性,深入研究了吸能盒壁厚、截面形状及 V 型诱导槽在低速碰撞下对吸能盒吸能特性的影响,为吸能盒的改进设计提供理论依据。

1 碰撞的动力学数学模型

汽车碰撞过程中,吸能盒发生压溃变形来吸收和耗散碰撞冲击力和能量。这种大位移、大变形的非线性问题通常采用显式动力计算理论和中心差分法进行求解^[8],其动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1)$$

对加速度、速度的导数采用中心差分代替,整理得到

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{U}_{t+\Delta t} &= \mathbf{R}_t \\ \mathbf{M} &= \frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{F}_t - (\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2})\mathbf{U}_t - (\frac{1}{\Delta t^2} - \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C})\mathbf{U}_{t-\Delta t}$$

式中: $\mathbf{M}$ 是结构的质量矩阵; $\mathbf{C}$ 是结构的阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 是结构的刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 是结构的位移矢量; $\mathbf{F}$ 是外界作用力矢量; $\mathbf{R}_t$ 为载荷向量。在其他实验条件相同时,位移矢量正是影响结构吸能量的关键参数。

根据连续介质力学原理和虚功原理,可得结构的能量平衡方程式

$$\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V \rho f_i \delta x_i dV - \int_S p_i \delta x_i dS = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为质量密度; x_i 为质点位移; V 为结构体积; f_i 为单位质量体积力; σ_{ij} 为柯西应力; p_i 为表面力;

S 为结构表面积。式(3)中的各个积分项分别表示单位时间内系统的惯性力、内力、体积力和表面力所做的功。

利用中心差分法对方程组迭代求解,通过式(1)、式(2)可以得到吸能盒碰撞的位移、速度等,进而通过能量平衡方程(3)计算出吸能盒吸能量的变化来研究其吸能特性。

2 吸能盒碰撞仿真分析

2.1 有限元建模

本文是将吸能盒置于整个保险杠系统中进行吸能特性的研究,在 CATIA 软件中建立的保险杠结构系统主要由防撞梁、左右吸能盒和代表车身的后方形体组成,保险杠系统的抗冲击能力相对于车体来说很小,故将车身整体简化为刚体。左右吸能盒初始结构参数相同,吸能盒长度均为 150 mm,截面周长均为 240 mm,初始壁厚均为 2 mm。

利用 Hypermesh 软件进行有限元处理。保险杠系统中各部分均是薄壁元件,选用壳单元网格,网格大小为 5 mm。吸能盒材料选用 6106 铝合金,防撞梁结构采用合金钢,主要参数见表 1。后方形体代表的是车身,在低速碰撞中基本不发生变形,选用刚性体材料模型。吸能盒与防撞梁之间建立点焊连接关系;刚性板上共有 2 836 个节点,在每个节点上添加 0.5 kg 质量,将 1 418 kg 的整车质量添加到车体上。保险杠系统接触为面接触方式,赋予系统模型 16 km/h 的初始速度进行刚性墙正面碰撞仿真^[10]。图 1 给出了保险杠系统有限元碰撞模型。

表 1 保险杠系统材料的主要参数

保险杠部件	材料	密度/ kg · mm ⁻³	弹性模 量/GPa	泊松比
吸能盒	铝合金	2.7×10^{-6}	69	0.33
横梁	合金钢	7.8×10^{-6}	210	0.3

2.2 吸能盒的碰撞仿真分析

本文在分析吸能盒的吸能特性时,选用碰撞力峰值、吸能盒吸能量和压溃变形量作为 3 种评价指标^[10]。通常期望获得小的碰撞力峰值、大的吸能量和小的变形量以得到更好的吸能特性。

图 2 给出了保险杠系统中整体和各个部件能量

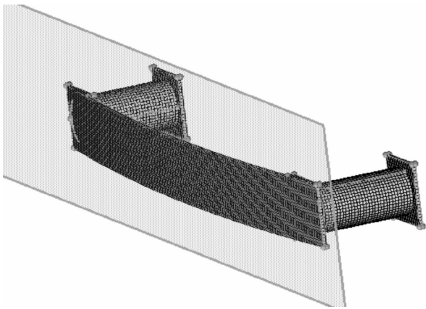


图 1 保险杠系统有限元模型

的变化。由图 2 可以看出,在碰撞过程中,系统的动能从 10 ms 开始逐渐减小,而防撞梁和吸能盒的吸能量增大,在 25 ms 时吸能盒的变形量达到最大,吸能盒吸能过程结束,系统的动能也已经转化为内能,其中吸能盒吸收的能量约占碰撞总能量的 40%。

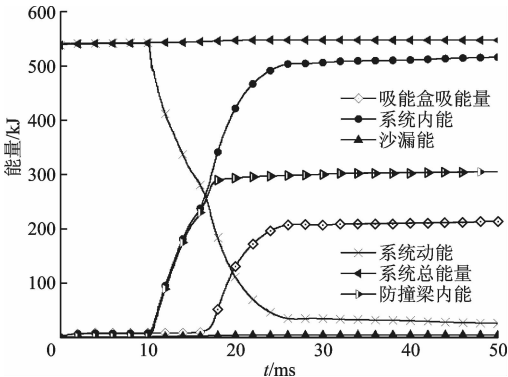


图 2 保险杠系统碰撞能量随时间的变化

3 结构参数对碰撞性能的规律研究

吸能盒是汽车碰撞过程中重要的吸能部件,本节通过对吸能盒壁厚、截面形状、诱导槽形状及数目的研究确定其最佳吸能特性时的结构,进而提高整车的碰撞吸能特性。

3.1 吸能盒的壁厚对吸能特性的影响

在某车型实际圆形截面吸能盒基础上,设置了 1.8、2.0、2.2 mm 3 种壁厚,研究吸能盒在碰撞过程中的吸能特性。刚性墙和保险杠系统的受力互为作用力和反作用力,所以用刚性墙所受的作用力表示整个系统的受力状况,用刚体在速度方向上的位移表示吸能盒的变形量。壁厚为 1.8、2.0、2.2 mm 的吸能盒的碰撞力峰值分别为 104.1、112.2、119.4 kN,图 3、图 4 给出不同壁厚吸能盒的吸能量、位移随时间的变化曲线。

由图 3 可以看出,壁厚在 1.8~2.0 mm 范围内时,吸能盒吸能量增加率为 8%,碰撞力峰值增加率为 6%,碰撞力峰值增加率小于吸能量增加率,吸能

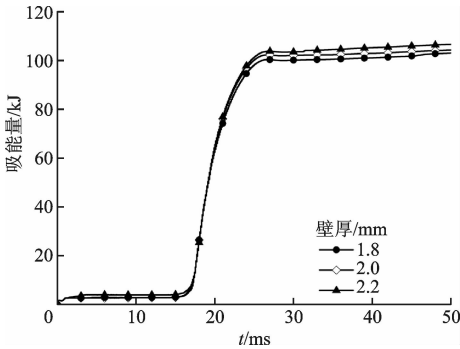


图 3 不同壁厚吸能盒吸能量随时间的变化

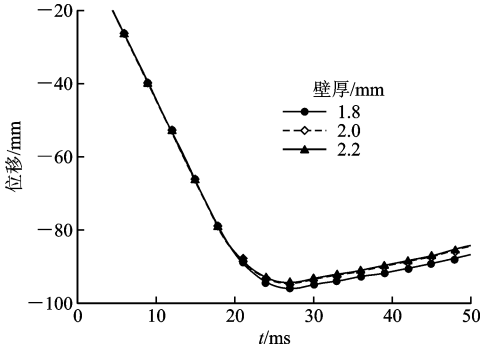


图 4 不同壁厚吸能盒位移随时间的变化

特性提高;而壁厚在 2.0~2.2 mm 范围内时,吸能盒吸能量增加率为 3%,碰撞力峰值增加率为 7%,说明碰撞力峰值的增加率会在此壁厚区间超过吸能量增加率。由图 4 可以看出,吸能盒壁厚变化对变形量基本没有影响。实验结果表明:随着吸能盒壁厚的增加,吸能量和碰撞力峰值均会增加,但并不是吸能盒壁厚越大,吸能特性就越好,适当地增加壁厚,会提高吸能盒的吸能特性。本文吸能盒壁厚在 2.0~2.2 mm 范围内时,其吸能特性最优。

3.2 吸能盒的截面形状对吸能特性的影响

将正方形、圆形、六边形和八边形 4 种不同截面形状的吸能盒在碰撞过程中的吸能量、变形量进行比较,吸能盒结构参数见表 2,4 种不同截面形状吸能盒吸能量、位移随时间的变化如图 5、图 6 所示。由图 5 可知,与圆形截面相比,六边形和八边形截面吸能盒的吸能量分别提高了 6.2%和 19.3%,正方形截面吸能盒的吸能量下降了 5.44%。4 种截面的

表 2 不同截面形状吸能盒的结构尺寸

截面形状	边长/mm	长度/mm	壁厚/mm
正方形	60	150	2
六边形	40	150	2
八边形	30	150	2
圆形	38.2	150	2

碰撞力峰值均在 110 kN 左右,即截面形状的变化对系统碰撞力没有显著影响。由图 6 可以看出,4 种截面形状吸能盒的变形量相差不多,即吸能盒截面形状的改变对吸能盒变形影响不大。

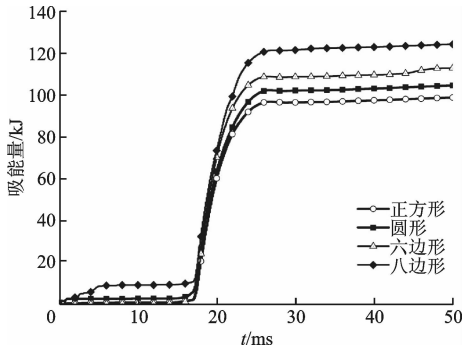


图 5 不同截面吸能盒的吸能量随时间的变化

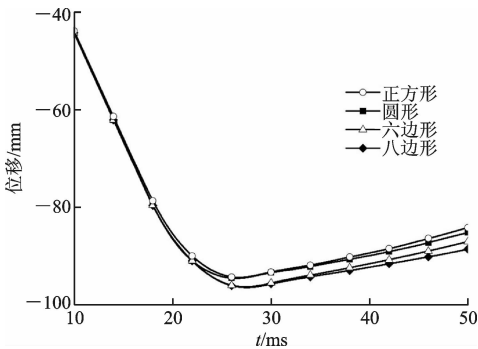


图 6 不同截面吸能盒位移随时间的变化

3.3 诱导槽结构对吸能特性的影响

将圆形无诱导槽的吸能盒分别与具有 1、2、3 个均布 V 型诱导槽的吸能盒进行碰撞仿真分析。图 7 给出了不同数目 V 型诱导槽吸能盒的有限元模型。图 8、图 9 给出了 4 种吸能盒吸能量、位移随时间的变化曲线。

由图 8 可以看出,有 V 型诱导槽的吸能盒的吸能量比无诱导槽的吸能盒的吸能量大概提高了 20%,但有 1V、2V、3V 型诱导槽的吸能盒的吸能量几乎相等,这说明在 16 km/h 低速碰撞下,诱导槽数对吸能盒吸能特性影响不大,且由图 9 可知诱导槽数的变化对吸能盒的变形没有显著影响。

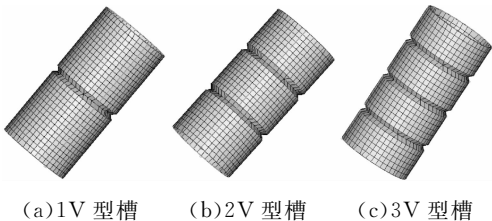


图 7 不同数目 V 型诱导槽吸能盒的有限元模型

为了进一步分析 V 型诱导槽对吸能盒吸能特性的影响,将系统碰撞速度提高到 24 km/h,研究在高速碰撞情况下吸能盒的吸能特性。图 10、图 11 分别为不同数目 V 型槽吸能盒的变形及吸能量随时间的变化。由图 10、图 11 可以看出,无论是低速碰撞还是高速碰撞,吸能盒上诱导槽数对吸能盒吸能特性的影响并不大。

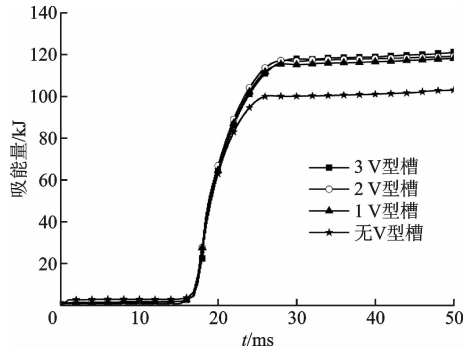


图 8 不同数目 V 型槽吸能盒吸能量随时间的变化

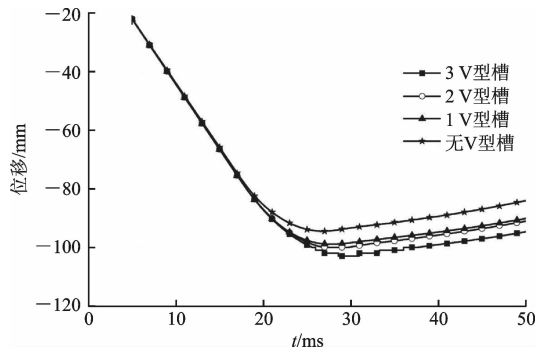


图 9 不同数目 V 型槽吸能盒位移随时间的变化



图 10 不同数目 V 型诱导槽吸能盒变形图

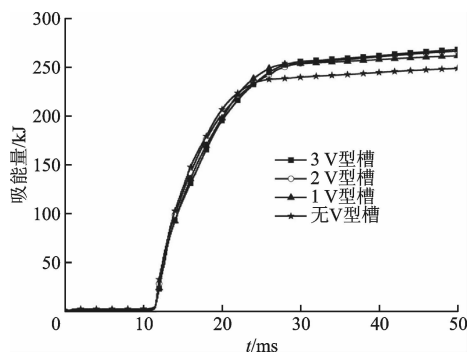


图 11 不同数目 V 型诱导槽吸能盒吸能量随时间的变化

4 结 论

(1)增大吸能盒的壁厚,其吸能量和碰撞力峰值均会增加,适当地增加壁厚,会提高吸能盒的吸能特性,但吸能盒壁厚过大会造成碰撞力峰值过大,损坏车体。本文吸能盒壁厚在 2.0~2.2 mm 范围内时,其吸能特性最优。

(2)在其他条件相同时,与圆形和六边形吸能盒相比,八边形吸能盒吸能特性更好,正方形更差。

(3)与无 V 型槽吸能盒相比,添加 V 型槽的吸能盒更易发生变形,提高了吸能特性,但 V 型诱导槽数的增加,无论是在低速还是在高速碰撞情况下,对汽车吸能盒吸能特性的提高并不显著。

(4)吸能盒截面形状和 V 型诱导槽对吸能特性的影响大于壁厚和诱导槽数对吸能特性的影响;与原吸能盒相比,采用带有 V 型诱导槽的八边形吸能盒的吸能特性有显著提升。

参考文献:

- [1] 程秀生,刘维海,郝玉敏,等. 某轿车保险杠横梁结构抗撞性优化 [J]. 汽车技术, 2011(10): 5-9.
CHENG Xiusheng, LIU Weihai, HAO Yumin, et al. Optimization of a passenger car's bumper beam for crashworthiness [J]. Automotive Technology, 2011 (10): 5-9.
- [2] 元昌,董方亮,杨姝,等. 锥形多胞薄壁管斜向冲击吸能特性仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 102-107.
QI Chang, DONG Fangliang, YANG Shu, et al. Energy-absorbing characteristics of a tapered multi-cell thin-walled tube under oblique impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 102-107.

- [3] 蒋致禹,顾敏童,赵永生. 一种薄壁吸能结构的设计优化 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 111-116.
JIANG Zhiyu, GU Mintong, ZHAO Yongsheng. Design and optimization of a thin-walled energy-absorbing structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 111-116.
- [4] 李邦国,陈潇凯,林逸. 车用吸能部件吸能特性的改进 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(1): 12-16.
LI Bangguo, CHEN Xiaokai, LIN Yi. Capacity enhancement of impact energy-absorbing member of vehicle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(1): 12-16.
- [5] ZHAO Liu, LU Jiahai, ZHU Ping. Lightweight design of automotive composite bumper system using modified particle swarm optimizer [J]. Composite Structures, 2016, 140: 630-643.
- [6] 刘海江,刘娜,肖丽芳. 面向轻量化的高强度 SMC 保险杠碰撞性能研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5): 813-817.
LIU Haijiang, LIU Na, XIAO Lifang. A study of the impact performance of a high-strength sheet molding compound (SMC) bumper for lightweight [J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(5): 813-817.
- [7] BI Jing, FANG Hongbing, WANG Qian. Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs [J]. Finite Element in Analysis and Design, 2010, 46(9): 698-709.
- [8] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 34-40.
- [9] LEE S J, LEE H A, YI S I. Design flow for the crash box in a vehicle to maximize energy absorption [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical: part D Journal of the Automobile Engineering, 2017, 227(2): 179-200.
- [10] 曹立波,丁海建,李克,等. 可伸缩式汽车碰撞缓冲吸能装置的试验与仿真研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(17): 2137-2141.
CAO Libo, DING Haijian, LI Ke, et al. Computational simulation and test study of an extendable and retractable automobile crash energy absorbing device [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(17): 2137-2141.

(编辑 武红江)