

Design and research of vehicle critical energy absorbing parts based on crash-worthiness

JB Zhang, ZB Lei, XY,Chen

School of Vehicle and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China

Email: 839221539@qq.com

Abstract: In order to improve the energy absorption performance of the front rail, and the crash-worthiness of the automobile structure. The paper first discussed the energy absorption performance of the front rail for the four different cross-sectional shapes. The study found the quality and length of the front rail maintain invariant, with the increase of the section edge number of the front rail, the energy absorption effect is better. The absorption energy of the ten side shape is 27.97% higher than that of the quadrilateral front rail, while the compression deformation model of the hexagon front rail is the best. Therefore, in order to further optimize the energy absorption performance of the front rail, combined with the hexagonal good fold mode, and the good energy absorption properties of ten edge shaped and pre deformation technology. A new polygonal polygonal front rail is proposed and analyzed by LS-DYNA software. The results show that the energy absorption performance of the polygonal front rail with respect to the quadrilateral front rail is raised by 31.24%, and its fold deformation mode is better than that of the ten side shaped front rail.

Keywords: front rail; crash-worthiness; deformation mode; pre deformation

基于耐撞性的汽车关键吸能部件的设计研究

张家波, 雷正保, 陈小勇

长沙理工大学汽车与机械工程学院, 湖南长沙, 中国, 410114

Email: 839221539@qq.com

摘要: 为了提高前纵梁的吸能性能, 增强汽车结构的耐撞性, 本文首先讨论了四种不同截面形状的前纵梁对其吸能性能的影响, 研究发现在保持前纵梁质量以及长度不变的情况下, 随着前纵梁截面边数的增加, 吸能效果越好, 十边形相对于四边形前纵梁的比吸能提升了 27.97%, 而六边形前纵梁压缩褶皱变形模式最好。因此, 为了进一步优化前纵梁的吸能性能, 结合六边形良好的褶皱模式、十边形前纵梁较好的吸能性能以及预变形技术, 提出了一种新型截面的多边形前纵梁, 并通过 LS-DYNA 软件进行了仿真分析。研究结果表明: 新型截面的多边形前纵梁相对四边形前纵梁的比吸能提升了 31.24%, 其褶皱变形模式优于十边形前纵梁。

关键词: 前纵梁; 耐撞性; 变形模式; 预变形

1 引言

汽车在发生正面碰撞过程中, 主要通过车头的压溃区域的塑性变形来吸收汽车碰撞的绝大部分动能。相关研究表明, 安装在车头部分的前纵梁吸收的能量约占整个车头吸能量的 50%~70%, 是汽车车身的关键吸能部件^[1]。因此, 改善前纵梁的吸能性能, 对于提高汽车结构的耐撞性具有重要的意义。

国内外学者为了提升前纵梁的吸能效果做了大量的相关研究,研究表明可通过优化前纵梁的截面形状、尺寸、薄壁厚度、焊点的间距和材料的属性等因素来提高前纵梁的吸能效果^[2-5]。吴广发等^[6]研究了汽车前纵梁的截面形状、焊点间距以及焊点大小,优化后显著提高了前纵梁的耐撞性。郑玉卿等^[7]基于方管理想折叠单元模型的能量分解法以及方管的能量平衡修正方程,并导出了棱边强化的理论表达式,棱边强化后的普通延展性钢材的前纵梁有望实现等效替代较高强度钢的前纵梁。葛平政等^[8]提出了一种新型波纹型的薄壁结构,讨论了不同截面形状的波纹结构对于薄壁梁吸能性能的影响。Liang ying 等^[9]采用热冲压工艺制备的淬火硼钢薄壁结构,它相对于传统的低碳钢以及铝材等薄壁结构具有更高的耐撞性和更高的碰撞力峰值,并通过梯度强度软化方法提高了其整体结构的耐撞性能。针对汽车前纵梁等薄壁结构的轴向吸能性能,也有些学者通过内部填充^[10-11]、轴向诱导变形^[12]以及结构内部的多胞优化^[13]等方式来提高薄壁结构的耐撞性。

本文通过分析不同截面形状前纵梁的吸能效果以及发生褶皱变式模式优劣,并基于预变形设计技术,提出一种新型截面的多边形前纵梁,并对其进行轴向碰撞仿真分析和试验研究。

2 材料模型

2.1 几何模型

对于汽车前纵梁的薄壁结构吸能部件,不同的截面形状将会影响其碰撞吸能效果。本文将建立四种不同的截面形状,并且使得不同截面形状的前纵梁长度、质量保持一致,其截面形状分别为:(a)四边形、(b)六边形、(c)八边形和(d)十边形,如图 1 所示。前纵梁一端固定,另一端遭受到质量为 300kg 的刚性墙轴向撞击,碰撞速度 $v = 50 \text{ km/h}$ 。

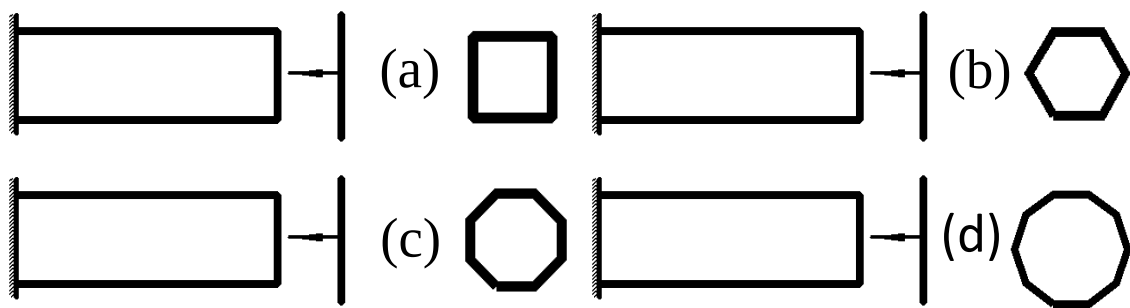


Figure 1. sketch of front rail of different section shape

图 1. 不同截面形状前纵梁示意图

2.2 有限元模型

在 proe/E 软件中建立好的前纵梁几何模型,通过 iges 文件导入 Hyper-mesh 软件中进行网格划分,前纵梁和刚性墙的网格划分大小划分为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,网格单元类型选择为 shell163 壳单元。前纵梁与刚性墙碰撞发生变形,为了防止各部件之间相互穿透,采用“Automatic single surface”接触定义前纵梁和刚性墙,前纵梁与刚性墙之间采用“Automatic surface to surface”接触定义,并设定动静摩擦系数分别为 0.3 和 0.2。在汽车轻量化设计中,常用的材料有铝合金、高强度钢、镁合金等,但是高强度钢加工工艺简单、成本价格相对低廉。因此,本文中的前纵梁选用 DP350/600 的高强度钢材料,有限元模型的基本材料参数为:弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.3$ 、 $\rho = 7.89 \text{ kg/m}^3$,屈服强度为 $\sigma_s = 350 \text{ Mpa}$ 。并采用具有应变硬化的分段线性弹塑性材料模型,该材料模型能较好的模拟高强度钢的机械性能。其中,材料的应变率可通过 Copwer-Symonds 模型本构关

系确定[14]。

$$1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (1)$$

式中 $\dot{\varepsilon}$ 为材料的应变率。

2.3 材料模型验证

为了验证材料参数和前纵梁有限元模型的正确性，在台车前端安装前纵梁，其基本参数与仿真分析建立的前纵梁的模型参数完全一样，并给台车 50km/h 的速度撞击刚性墙，真实的碰撞实验由文献[15]实施执行，对比分析前纵梁的实验结果与仿真结果,从图 2 可以发现，有限元分析与台车碰撞实验的前纵梁两者的变形模型基本保持一致，有限元建模方法足够准确，其材料参数和建模方法可用于后续前纵梁的相关研究。



Figure 2.The quadrilateral front rail that experiment and simulation for deformation

图 2 四边形前纵梁的实验与仿真变形对比图

3 不同截面形状前纵梁仿真结果与分析

3.1 薄壁结构吸能特性的评价标准

众所周知，评价薄壁结构性能的优劣常用的指标有总吸能量(EA)、平均撞击力(F_{mean})、撞击力峰值(PCF)以及比吸能(EA)等。这些指标可以直接从力-位移的变形曲线中计算得到。

总吸能量是指薄壁结构在碰撞过程中发生塑性变形所吸能的总能量，通过力-位移计算得出，可以表示为：

$$EA = \int_0^L F(x) dx \quad (2)$$

式中 $F(x)$ 表示为薄壁结构受到的撞击力， L 为薄壁结构轴向发生塑性变形的长度。显然，当总吸能量越大，其吸能效果越强。

平均撞击力可以表达为：

$$F_{mean} = \frac{EA}{L} \quad (3)$$

其中的比吸能量是由薄壁结构的总吸能量与其质量 m 的比值确定，可表示为：

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (4)$$

从式(4)中可以明显看出，比吸能(SEA)越大，其薄壁结构的吸能效果越好。

3.2 不同截面形状的前纵梁对碰撞吸能性能的影响

通过对前纵梁的碰撞仿真分析，得到了不同截面形状的前纵梁的吸能量—时间曲线，压缩量—吸能曲线，如图3、如图4所示。从图3可以看出，在相同时间内四边形的压缩变形量最大，最大变形量为148.1mm，十边形前纵梁的压缩变形量最小，最小变形量为131.1mm，随着前纵梁边数的增加，其压缩变形量逐渐减小。

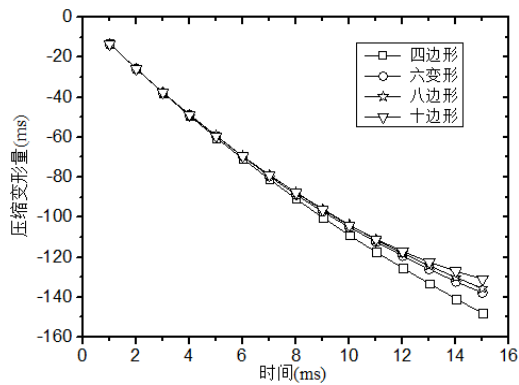


Figure 3. Variation curves of compression time of front rail with different section shapes

图3 不同截面形状的前纵梁压缩量随时间的变化曲线

从图4可以看出，在相同时间内十边形前纵梁的吸能量最大，而四边形的吸能量最小，随着前纵梁截面边数的增加，吸能量也有一定的增加。

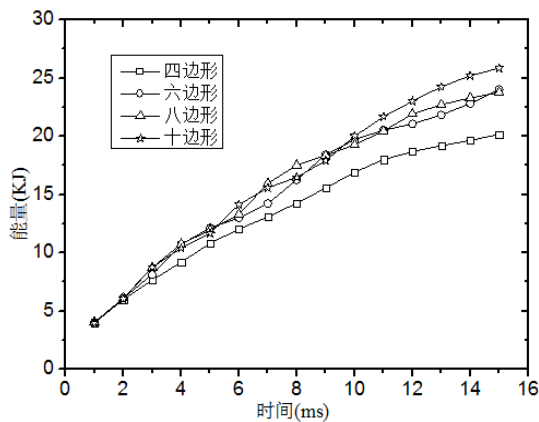


Figure 4. Variation curves of energy absorption of front rail with different section shapes

图4 不同截面形状的前纵梁吸能量随时间的变化曲线

图 5 为不同截面形状的前纵梁在 16ms 内的压缩变形进程图,从图中可以看出,四种截面的前纵梁在压缩变形过程中发生了明显的塑形变形。但是四边形的前纵梁产生较大的“塑形铰”变形,不利于碰撞能量的吸收。六边形的前纵梁压缩变形模式较好,呈现渐进叠缩的变形,并结合图 4 可知,在相同时间内,六边形前纵梁的吸能能力与八形相当,说明前纵梁的变形模式也会影响其吸收效果。八边形和十边形的前纵梁,边数的增加,角边增加了整个结构的刚度,导致变形先发生在两端部。前纵梁其它的耐撞性评价指标,如表 1 所示。

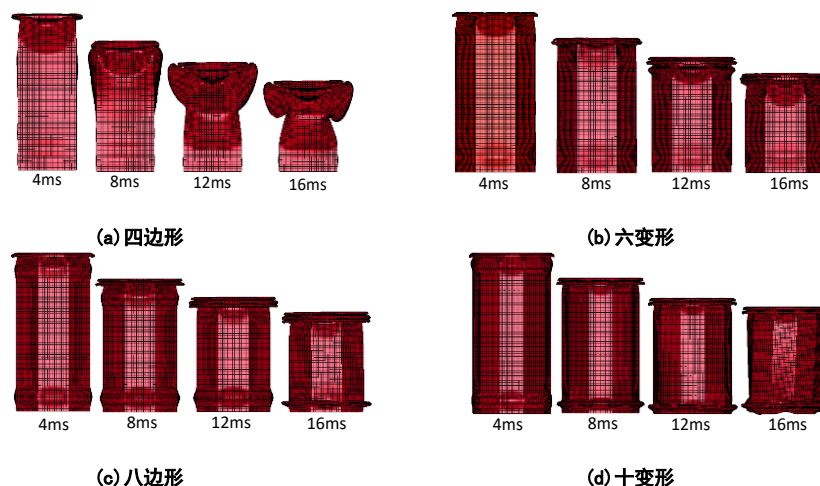


Figure 5.Compression deformation process of the front rail with different cross section

图 5 不同截面形状的前纵梁压缩变形进程

从表 1 可以看出,十边形前纵梁的撞击力峰值最小,在相同时间内的单位比吸能相对四变边前纵梁的单位比吸能增加了 27.97%。结合图 3、4 和图 5 以及表 1 可知,十边形的前纵梁变形量最小而吸能量最大,四边形的前纵梁变形量最大而吸能量最小。因此,在相同变形量的情况下,十边形前纵梁能吸收更多的能量,可增加车辆前纵梁的吸能效果。

Table 1. Evaluation index of crash-worthiness of front rail with different section shapes

表 1 不同截面形状的前纵梁耐撞性评价指标

前纵梁截面形状	质量/kg	撞击力峰值/KN	总吸能量/KJ	比吸能 (KJ/kg)
四边形	1.89	309	20.16	10.69
六边形	1.89	308.1	24.02	12.71
八边形	1.89	312.6	23.75	12.56
十边形	1.89	306.7	25.85	13.68

4. 一种新型多边形截面前纵梁的设计

4.1 预变形

前纵梁等薄壁结构在遭受轴向碰撞载荷作用下,其通常会发生褶皱变形。常见的褶皱变形模式包括:渐进叠缩变形、Euler 变形以及混合变形^[16]。渐进叠缩变形能保证结构的充分吸能,是一种理想的变形模式。预变形技术可对结构的某先部位进行弱化处理,诱导吸能结构发生渐进叠缩变形、避免其它变形模式的发生,提升结构的吸能效果。根据上述对不同截面形状前纵梁吸能性能的分析,在保持质量以及长度不变的条件下,设计一种新型截面的前纵梁。在原六边形前纵梁各边上开设凹槽,增加前纵梁截面的边数,并在碰撞前端凹槽内表面上开间距不等的方孔,进行预变形处理,见图 6 所示。



Figure 6.A new type of cross section of a front rail

图 6 一种新型截面形状的前纵梁

4.2 多边形前纵梁仿真结果与分析

多边形前纵梁遭受碰撞载荷作用的变形情况如图 7 所示，图中给出了前纵梁在 4ms、8ms、12ms 和 16ms 这四个时刻的变形结果。从图中可以看出，变形开始于局部弱化区域，随着轴向压缩进程不断推进，多边形前纵梁整体上呈现轴向渐进叠缩的变形模式，变形情况稳定。

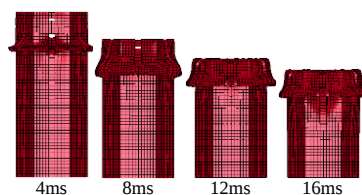


Figure 7.Compression process drawing of new section shape front rail

图 7 新型截面形状前纵梁压缩进程图

不同截面形状前纵梁的比吸能以及最大压缩量如图 8 所示，从图中可以看出，随边截面边数的增加，比吸能整体上呈现上升趋势，而最大压缩量呈现下降趋势。多边形前纵梁的比吸能最大，相对四边形增加了 31.24%，最大压缩量最小，相对四边形减少了 12.9%，说明在相同压缩长度的前纵梁，多边形前纵梁可以吸收更多的能量。

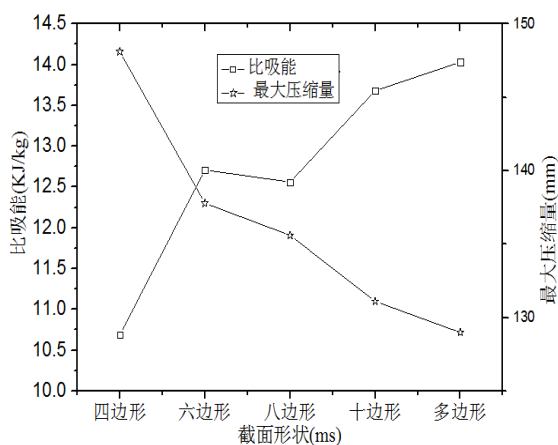


Figure 8.Energy absorption curve of front rail with different cross section

图 8 不同截面形状的前纵梁吸能性能曲线

5. 结论

(1)在保持前纵梁长度以及质量不变的条件下,分析了四种不同截面形状前纵梁的吸能性能,结果表明:截面边数越多越有利于前纵梁能量的吸收,十边形截面的前纵梁比四边形前纵梁的吸能效果提升了 27.97%。

(2)六边形前纵梁呈现渐进叠缩变形,压缩变形效果最理想。八边形前纵梁的吸能量略低于六边形前纵梁,说明薄壁结构在受到轴向碰撞发生的变形模式对结构能量的吸收效果存在一定的影响。

(3)基于薄壁结构变形模式、多边吸能效果好以及预变形技术设计的多边形前纵梁,相对四边形前纵梁的比吸能提升了 31.24%,使得前纵梁的耐撞性得到了进一步的提升。

6. 致谢

感谢国家自然科学基金资助项目(51675059)对本项目的资助。

参考文献 (References)

- [1] Zhang J Y, Chen G, Wu L N, et al. Lightweight method of car's front rails based on the theory of thin-walled beam crashworthiness[J]. Jilin Daxue Xuebao, 2013, 43(6):1441-1446.
张君媛, 陈光, 武栢楠, 等. 基于薄壁梁耐撞性理论的乘用车前纵梁轻量化设计[J]. 吉林大学学报(工), 2013, 43(6):1441-1446.
- [2] Chen J, Zhou X, Rao J, et al. A research on the impact energy absorption characteristics and optimization of thin-walled structure of vehicle front rail[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(06):486-492.
陈吉清, 周鑫美, 饶建强, 区权湛. 汽车前纵梁薄壁结构碰撞吸能特性及其优化的研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(06):486-492.
- [3] Luo X, Xu J, Zhu J, et al. A new method to investigate the energy absorption characteristics of thin-walled metal circular tube using finite element analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 95:24-30.
- [4] Y Zhang, XU Xiang, LI Qi, LU Minghao, S Liao. Crashworthiness Research on Novel Multi-cell Thin-walled Structure of Varying Cross-sections, 2017, 30(07):151-158.
- [5] 张勇, 徐翔, 李奇, 鲁明皓, 廖水容. 新颖变截面多胞薄壁结构的耐撞性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(07):151-158.
- [6] Liu S, Tong Z, Tang Z, et al. Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 88:70-81.
- [7] Guang-Fa W U. Optimum Design for Crash Energy Absorption ability of Car Front Side Member[J]. Machine Design & Research, 2011, 27(4):118-120.
- [8] 吴广发, 赵希禄. 汽车前纵梁碰撞吸能特性的优化设计[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(04):118-120.
- [9] YQ Zheng, XC Zhu, Q Hu, J Liu. Effect of ridgeline strengthening in thin-walled structure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(05):57-65.
- [10] 郑玉卿, 朱西产, 胡强, 刘颀. 薄壁结构棱边强化效果[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(05):57-65.
- [11] Pingzheng G E, Zhang Y. Crash-worthiness of Novel Thin-Walled Circular Tube With Novel Corrugated Cross Section[J]. Journal of Huaqiao University, 2016.
- [12] 葛平政, 张勇. 新颖波纹截面薄壁圆管的耐撞性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(05):531-535.
- [13] Ying L, Zhao X, Dai M, et al. Crash-worthiness design of quenched boron steel thin-walled structures with functionally graded strength[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 95:72-88.
- [14] Song X, Sun G, Li G, et al. Crash-worthiness optimization of foam-filled tapered thin-walled structure using multiple surrogate models[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2013, 47(2):221-231.
- [15] Li F, Sun G, Huang X, et al. Multiobjective robust optimization for crash-worthiness design of foam filled thin-walled structures with random and interval uncertainties[J]. Engineering Structures, 2015, 88(1):111-124.
- [16] Zhang X, Cheng G, You Z, et al. Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns[J]. Steel Construction, 2007, 45(9):737-746.
- [17] Yin H, Wen G, Liu Z, et al. Crash-worthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 75(75):8-17.
- [18] Peng Y, Deng W, Xu P, et al. Study on the impact performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94:663-672.
- [19] Sun G, Pang T, Xu C, et al. Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118:214-228.
- [20] Zou M, Yu Y J, Zhang R R, et al. Simulation analysis of energy-absorption properties of thin-wall tube based on horn structure[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(6).
- [21] 邹猛, 于用军, 张荣荣, 魏灿刚, 王会霞. 仿牛角结构薄壁管吸能特性仿真分析[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(06):1863-1868.