

Optimization of Energy-absorption Structure of the Vehicle Front Rail

Bai Zhonghao¹ Chen Tianzhi¹ Wang Qianxiong² Cao Libo¹

(1 Hunan University, State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Changsha, 410082 baizhonghao@163.com, 2 Detachment of Highway Management, Hunan Traffic Police Division)

Abstract: To improve the safety performance of a vehicle, the average acceleration of the energy-absorption structure, which was mounted to the front of the frame within a limited space, should be achieved an ideal level. As a result of that, the deformation of vehicle frame and body can be small and the injury risk of passenger will be decreased. Based on the reverse design theory, a step by step energy-absorption structure, which had a octagonal cross-section and trigger grooves, was proposed in the paper. Then, the FE model of a sled car and the designed structure was developed. To validate the availability and accuracy of this model, the quasi-static axial crush tests and the sled crash tests were conducted. The multivariate orthogonal experimental method was used to optimize the parameters related to the thickness of the plates, the structures of the spotwelds and the materials of the front rail, and the sensitivity of these parameters related to the effect of energy-absorption were also analyzed. The listing technique method was used to optimize the parameters related to the material and thickness of plates. and the simulations with these parameters were conducted. The results of optimization were validated by the results from sled test. The results of optimization show that this structure is a more reasonable structure for the vehicle design.

Key Words: crash simulation and experiment; the structure of energy-absorption beam; optimization ; safety improvement

汽车前纵梁吸能结构优化设计

白中浩¹ 陈天志¹ 王千雄² 曹立波¹

(1 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 410082, baizhonghao@163.com 2 湖南省交警总队高速公路管理支队)

摘要: 为了改进某车型碰撞安全性, 车架前纵梁前端有限空间内的吸能梁在碰撞压溃过程中需要达到理想的平均加速度区间, 才能保证车架和车身变形较小, 并降低乘员的伤害值。本文采用反推设计方法开发了一种带诱导槽的八边形结构的逐级吸能梁, 建立了台车碰撞模型, 进行了台车碰撞试验和准静态压溃试验验证了模型的有效性和准确性。采用正交设计的多因素优化试验方法对吸能梁的板厚、焊点结构和材料各参数进行了优化设计, 分析了各个参数对吸能效果的灵敏度, 并应用列举法对加强板材料、板厚进行参数优化、仿真, 并通过台车碰撞试验验证了优化结果, 为整车开发设计出了较理想的前纵梁吸能结构。

关键字: 碰撞仿真与试验; 吸能梁结构; 优化设计; 安全性改进

1 引言

汽车前纵梁是前碰撞过程中主要的吸能部件, 提高前纵梁的吸能特性对整车的前碰撞安全性有重要意义。正面碰撞中, 应有效控制前纵梁的变形量及变形模式, 从而使前纵梁吸收较多的碰撞能量, 同时减少纵梁其他部位的变形, 确保乘员安全。研究表明: 汽车前纵梁的结构及失效形式与薄壁梁相似, 故可以选择能够代表纵梁的薄壁直梁来研究其材料特性和变形结构之间的关系, 且其结果可以用于纵梁设计^[1]。为了改进某车的碰撞安全性, 需要增加纵梁前端碰撞变形所吸收的能量, 使得在一定的长度内, 吸能梁在碰撞过程中的平均加速度在理想的范围内, 从而使整车碰撞变形更加合理和有效。Abramowicz和Wierzbicki通过研究发现, 在相同的条件下, 吸能梁所吸收的能量主要由相邻薄板之间的夹角和多边形的边数决定的, 增加多边形吸能梁的边数可以有效的提高其吸能特性^[2]。有研究表明: 材料相同、截面具有相同周长的吸能直梁, 八边形截面比正方形截面的平均碰撞力增加 17%^[3]。汽车纵梁是汽车碰撞的主要吸能部件, 纵梁的截面形状、板厚、材料特性等将影响其变形模式和吸能能力。焊点的质量、焊点分布也会影响车身纵梁各部件间的动力学关系, 进而对纵梁变形模式、加速度变化产生影响^[4]。

为了提高某车型的碰撞安全性,本文采用反推设计的方法开发了带诱导槽的八边形逐级吸能梁结构,并在吸能梁内增设加强板。为使单位长度的吸能能力达到理想值,建立了汽车前纵梁有限元模型,并通过准静态压溃试验和台车试验相结合的方法,验证该模型的有效性;并以八边形吸能梁的板厚、材料和焊点间距为优化设计的参数,采用正交设计的多因素优化试验方法,分析了各个参数对吸能效果的灵敏度,再应用列举法对加强板材料、板厚进行参数优化、仿真,并通过台车碰撞试验验证了所设计的八边形吸能梁结构。

2 结构设计

汽车前碰撞过程中,主要通过吸能梁的剧烈变形来吸收碰撞能量,增加吸能梁的边数可以有效的增强其能量吸收特性^[5]。因此,在满足吸能、变形特性的基础上,尽量选择相对简单的加工成形截面,本文根据需要选择了八边形截面结构。由于该车型纵梁前端可利用的空间较短,故将八边形逐级吸能梁长度控制在一定的范围内。为有效控制其折叠变形模式并降低碰撞接触初始加速度峰值,在吸能梁上、下表面分别设计U型诱导槽。同时,为使吸能梁在碰撞过程中的加速度不出现剧烈波动,采用逐级吸能理论,在八边形吸能梁内加一U型板,使其与八边形外板逐级参与吸能,以避免加速度曲线产生较大的波动。为控制加强板的变形模式,在加强板前端棱边位置处开设两个诱导槽。

3 建模与试验验证

3.1 FE 模型建立

根据图 1 所设计的结构,建立八边形逐级吸能梁结构的有限元模型,如图 1 所示。该模型采用四节点 BT 壳体单元,取单元大小为 5mm,选用 24 号分段线性弹塑性材料。为了降低沙漏现象的影响,单元在厚度方向上取 3 个积分点。在该模型后面增加一个刚性板,在此刚性板周边均匀附加 1020kg 的质量模拟碰撞试验台车。在薄壁梁前端位置设置一个刚性墙平面来模拟刚性壁障。

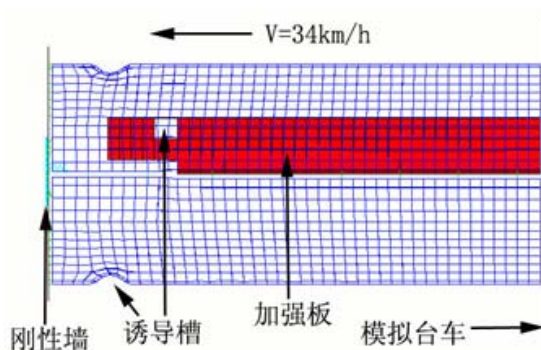


图 1 八边形逐级吸能梁有限元模型

通过材料静态拉伸试验得到仿真用各种材料的应力—应变曲线。对于低碳钢材料的前纵梁碰撞仿真计算,其在高速碰撞下会产生较大的变形,由于其变形抗力受应变率影响较大,故在选用分段线性弹塑性材料时应该考虑应变率的影响^[6]。本文使用Cowper-Symonds对模型施加应变率效应,其中 $C=8000$, $P=9$ 。材料参数如表 1 所示。焊点单元选用beam单元,选择可变形焊点梁单元公式,采用 2×2 高斯积分,焊点外径为 8mm,不考虑焊点失效。模型中加速度信号的采样频率为 10000 Hz。

表 1 八边形逐级吸能梁材料参数

名称	材料	弹性模量 (GPa)	密度 kg/mm ³	泊松比	屈服极限 GPa	板厚 mm
外板	高强度钢	210	7.85E-6	0.3	0.34	2.0
加强板	SPCC	210	7.85E-6	0.3	0.16	1.5
焊点	Beam	210	7.83 E-6	0.3	0.25	4 (半径)

上文所设计的八边形逐级吸能梁，其外板是由两块高强度钢板冲压而成，加强板是由一块钢板冲压而成，在两侧折边位置进行焊接，其结构如图 2 所示。

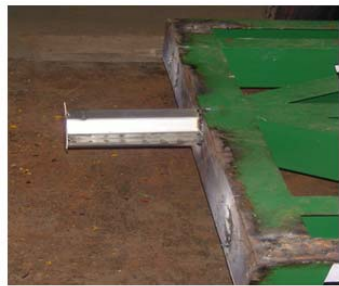


图 2 吸能梁结构图

3.2 台车试验验证

本文通过台车试验与准静态试验来验证建模方法的正确性和模型的有效性。在台车试验中，将吸能梁焊接在台车前面，以 34km/h 的初速度与刚性壁障碰撞。台车 B 柱位置碰撞试验与所建立模型碰撞仿真加速度曲线对比如图 4 所示。从图 4 可以看出，仿真曲线与台车试验曲线初始加速度峰值基本一致，只是仿真曲线的峰值有所提前，这是因为在台车碰撞试验中刚性壁障前面设置的一层 20mm 厚的胶合板，而仿真模型中没有设置该胶合板，故在前 1.2ms 内台车碰撞试验加速度曲线比仿真曲线更为平缓。在碰撞过程中，仿真曲线与台车碰撞试验曲线基本吻合，从而验证了所建立台车碰撞模型的有效性。

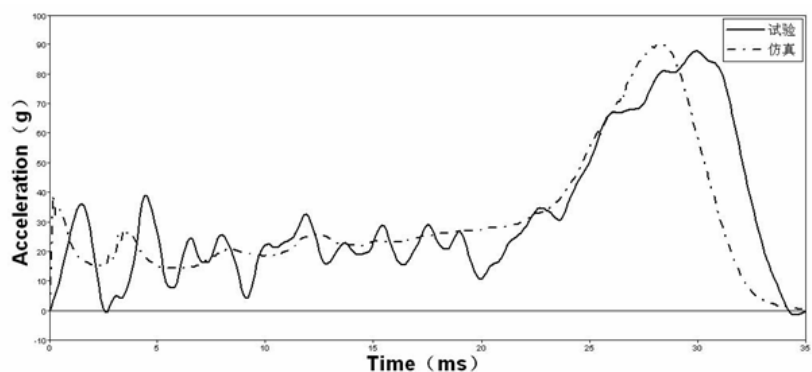


图 4 试验与仿真加速度曲线对比

3.3 准静态压溃试验验证

准确了解吸能梁的吸能特性对于预测整车模型中纵梁的变形很有必要^[5]，为验证建立模型在准静态压溃状态下的吸能特性和变形变形，进行了吸能梁准静态压溃试验，如图 5 所示。准静态压溃试验力一位移输出与仿真模型基本吻合，只是压力的大小有所不同，这是由于准静态压溃试验中，样件压溃速度很缓慢，与动态仿真模型之间的区别为是否采用Cowper-Symonds对模型施加应变率效应。



图 5 准静态压溃试验

准静态压溃试验、台车碰撞试验与碰撞仿真变形结果对比如图 6 所示，八边形逐级吸能梁顶部均有两个明显的褶皱，褶皱位置较一致，且靠近诱导槽部位的褶皱均由折边位置向中间位置挤压，接近质量块部位处有一个明显的波谷，波谷样式基本吻合。此外，两个褶皱之间有一个小的褶皱变形。吸能梁变形稳定，压溃模式基本一致。因此，该有限元模型仿真结果与台车试验、准静态试验压溃模式基本一致，从而验证了所建立模型的有效性。



图 6 准静态压溃试验、台车试验与仿真碰撞结果对比

4 参数优化设计

目前用于提高多边形吸能构件的吸能性能所普遍采用的两种方法是：1) 使用先进的高强度特性的材料，2) 对板厚、截面尺寸等参数进行优化来获取最优的吸能特性^[7]。研究表明，对于同样程度的变形，变形所吸收的能量与板厚之间呈指数增长关系^[3]。焊点质量、焊点分布方式也会影响车身纵梁薄壁梁的变形模式及吸能能力^[4]。因此，本文以材料、板厚及焊点间距为优化参数，由于整车结构要求，吸能梁截面尺寸为固定值。

4.1 筛选因子的 L5 正交试验设计

本文采用正交设计的多因素优化试验方法，即从全面仿真试验的样本点中抽取部分具有代表性的样本点做试验，这些代表点具有正交性^[8]。在试验中，选择吸能梁外板材料及板厚、加强板材料及板厚、焊点分布等五个因素，A 指吸能梁材料，B 指加强板材料，C 指吸能梁板厚，D 指加强板板厚，E 指焊点间距，各因素的水平为 4。材料的 4 个水平为：1-SPCC、2-Q235、3-SAPH、4-H300LAD。板厚的 4 个水平为：1-1.5mm、2-1.8mm、3-2.0mm、4-2.2mm。焊点间距的 4 个水平为：1-15mm、2-20mm、3-25mm、4-30mm。其正交表如表 2 所示。

表 2 正交试验设计表

序号	A	B	C	D	E	平均加速度 (g)
1	1	1	1	1	1	8.38
2	1	2	2	2	2	12.28
3	1	3	3	3	3	13.91
4	1	4	4	4	4	17.71
5	2	1	2	3	4	12.81
6	2	2	1	4	3	12.58
7	2	3	4	1	2	17.24
8	2	4	3	2	1	16.86
9	3	1	3	4	2	20.11
10	3	2	4	3	1	22.38
11	3	3	1	2	4	14.45
12	3	4	2	1	3	16.69
13	4	1	4	2	3	24.54
14	4	2	3	1	4	20.63
15	4	3	2	4	1	24.57
16	4	4	1	3	2	22.69

通过离差平方和分解，生成方差分析表，对因素效应和交互效应的显著性做检验。其方差分析如表 3 所示。

表 3 正交设计方差分析表

项目	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	显著性概率 P
因素 A	234.8908	3	78.29692	0.002395
因素 B	9.07416875	3	3.024722917	0.1938095
因素 C	74.23307	3	24.74436	0.012844
因素 D	20.01707	3	6.672356	0.076683
因素 E	8.389919	3	2.79664	0.210395
总和	346.605	15	23.107	

SS A 表示因素 A 的离差平方和, DF 表示自由度, MS 为均方。显著性 P 值 <0.05 时认为该因素对试验结果有显著影响。

从表 2 和表 3 中可以得出以下结论: (1) 吸能梁外板材料和板厚的显著性 P 值远远小于 0.05, 即这两个因素对平均加速度的影响达到了高度显著水平; (2) 加强板的材料以及板厚的 P 值大于 0.05, 对平均加速度值影响较小, 为非显著水平; (3) 焊点间距 P 值远大于 0.05, 即在不考虑焊点失效的情况下, 小范围内改变焊点间距取值, 其结果对平均加速度影响极小, 因此以方便生产为目的可以将焊点间距设置为固定值。(4) 随着外板材料屈服极限的增加及板厚的增加, 平均加速度值随之而增加, 且逐渐接近设计要求。而吸能梁外板材料过软或者板厚过小, 则能量吸收不充分, 吸能梁外板材料的显著性概率 P 值小于外板板厚的显著性概率 P 值, 即与外板板厚相比, 吸能梁外板材料对平均加速度的影响更大。

4.2 列举法优化离散变量

排除焊点分布的影响因素, 本文以吸能梁外板材料和板厚作为优化参数, 通过列举法进行优化, 来保证前纵梁前端有限的空间内的吸能梁达到 25g~30g 的平均加速度。外板为 2.2mm 厚高强度钢板时, 各种因素搭配时所得平均加速度如表 4 所示, 其中 B 指加强板材料, D 指加强板板厚, 材料有 3 种: 1-SPCC、2-Q235、3-SAPH, 板厚为: 1-1.5mm、2-1.8mm、3-2.0mm。

表 4 2.2mm 厚高强度钢板优化设计

外板板厚 (mm)	试验号	B	D	平均加速度 (g)
2.2	1	1	1	23.58
2.2	2	1	2	26.62
2.2	3	1	3	27.04
2.2	4	2	1	24.04
2.2	5	2	2	27.10
2.2	6	2	3	27.83
2.2	7	3	1	24.30
2.2	8	3	2	27.67
2.2	9	3	3	27.79

由表 3 可知, 当外板材料 2.2mm 厚高强度钢板时, 若加强板材料采用 SPCC、Q235 或 SAPH, 板厚为 1.5mm 时, 平均加速度值不能达到 25g~30g, 不满足设计要求; 板厚在 1.8mm、2.0mm 之中任意匹配, 平均加速度值均能达到 25g~30g 之间, 满足试验设计目的。

该设计方案通过台车碰撞试验, 得到了理想的加速度曲线和变形模式, 证明该方法的有效性, 对试验的起到了指导作用。

5 结论

针对某车前碰撞过程中, 吸能长度短、吸能空间有限的特点, 对实车前纵梁段进行了改进, 设计了八边形逐级吸能梁结构, 建立了有限元模型。通过台车试验和准静态试验验证了该模型的有效性, 并且通过正交试验设计方法, 得出了吸能梁外板材料及板厚、加强板材料及板厚、焊点间距五个因素的显著性概率, 其中吸能梁外板材料及板厚对平均加速度影响最大, 小范围变动的焊点间距对平均加速度影响最小, 然后固定最为接近设计要求且对平均加速度影响最为显著的因素, 通过列举法对对影响不显著的因素进行列举法优化仿真, 得出吸能梁外板取 2.2mm 厚高强度钢板, 加强板的材料选用 SPCC、Q235 或 SAPH, 板厚在 1.8mm、2.0mm 之中任意匹配, 在碰撞压溃过程中平均加速度值均能达到理想的范围内, 满足试验设计目的,

并通过台车碰撞试验验证了该结论，为整车开发设计了理想的前纵梁吸能结构。

参考文献

- [1] 魏启永, 曹立波, 崔崇楨, 陆勇. 逐级吸能薄壁结构的耐撞性优化研究. INFATS PROCEEDINGS, The 5th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2007.
- [2] Abramowicz W, Wierzbicki T., 1989, "Axial crushing of multicorner sheet metal columns," Journal of Applied Mechanics 1989; 56:113-20
- [3] 钟志华, 张维刚, 曹立波, 等. 汽车碰撞安全技术. 北京: 机械工业出版社, 2003年.
- [4] 解跃青, 方瑞华, 雷雨成. 基于碰撞数值模拟的汽车纵梁焊点布置方法. 焊点学报, 2003, 2 (24): 73~76.
- [5] Meagan Gonzalez, Karthik Chitoor, Heung-Soo Kim, TauTyan. Testing and Modeling of Metallic Multicorner Columns In Axial Crush. SAE paper No. 2005-01-0353.
- [6] 张维刚, 钟志华. 汽车正碰吸能部件改进的计算机仿真. 汽车工程. 2002, 1 (24): 6~10
- [7] Yucheng Liu. Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns. Thin Walled Struct(2008), doi:10.1016/j.tws.2008.04.003
- [8] 杨德. 试验设计与分析. 北京: 中国农业出版社, 2002年