逐级吸能薄壁结构的耐撞性优化研究

魏启永 曹立波 崔崇桢 陆勇 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082

摘 要:本文针对微型客车前部吸能结构短、吸能空间有限的特点,提出了逐级吸能的方案,即通过在 普通方形吸能薄壁结构内不同位置增设加强板,逐级参与吸能,从而控制整车的吸能过程和加速度波形。 根据该方案,以某微型客车前纵梁为基础设计了一个简单的逐级吸能薄壁结构,建立了该结构的有限元 模型,并通过台车实验验证了建模方法的正确性。利用该模型分析了各结构参数对吸能效果的灵敏度, 选择部分灵敏度较高的参数进行了仿真优化研究。通过优化壁厚、点焊间距、加强板距离前端的距离等 参数有效地提高了该薄壁结构的耐撞性。研究表明,该结构与普通吸能梁相比,能够在较短的变形长度 内达到均匀吸能的目的,从而能得到更好的吸能效果。

关键词:逐级吸能,加强板,耐撞性,优化

1 引言

通过对汽车结构碰撞过程和乘员损伤的研究发现,在前碰撞过程中,如果吸能结构能够较平稳的吸能,使得规定点加速度曲线能够在碰撞过程中维持在一个稳定的适当水平,避免速度的剧烈变化,将有利于对司乘人员的保护。但是在整车尤其是微型客车的碰撞过程中其 B 柱下方的加速度会在初始阶段出现一个较高的峰值,而后由于结构的屈服,紧接着将出现一个波谷(如图1中曲线b所示)。这样的加速度波形变化剧烈,极易造成乘员的伤害,因此如果能够对整个前碰撞吸能结构的变形吸能过程进行很好的控制,使加速度的变化能够与图1中曲线a 保持一致的趋势,将有利于对乘员的保护。



图 1 加速度曲线图

图 2 结构的尺寸参数

汽车的前纵梁是前碰撞过程中主要的吸能部件,提高前纵梁的耐撞性对整车的前碰撞安全 性有重要意义^[1]。前纵梁的结构和失效状态与薄壁直梁件极其相似,可选用能代表前纵梁的薄 壁直梁件来研究材料特性和结构变形之间的关系,其结果可以用于纵梁的设计。

本文根据某微型客车的前纵梁尺寸设计了一个逐级吸能薄壁结构,该结构的尺寸为100×70×350mm3,具体的尺寸绘于图2。

2 吸能梁的有限元建模方法与实验验证

2.1 吸能梁的有限元建模

根据图 2 的尺寸,我们建立了逐级吸能薄壁结构的有限元模型,为了降低初始的加速度峰值,在吸能梁的碰撞前端加了 V 型的诱导槽(如图 3 所示)。模型由四节点的 Belytschko-Tsay 壳单元组成,根据方形梁的折叠半径经验公式^[3],取梁的单元大小为 5mm。材料定义为分段线性弹塑性材料,为了给整个薄壁构件提供足够的能量在其后端均匀附加约 430kg 质量,整个吸能梁以 9.6m/s 的速度撞击刚性墙。

2.2 实验验证

为了对所建立的模型进行验证,作者所在的 实验室开展了台车实验来验证建模方法的正确 性和模型的有效性。按照图2的尺寸试制了两个 相同尺寸的逐级吸能薄壁构件,梁的外形是一个 闭口帽形结构,梁内不同位置设置了加强板。将 两个吸能梁安装在台车的碰撞前端(如图4所 示),台车的质量为860kg,台车以35km/h的初 始速度撞向刚性墙。图5为吸能筒模型和台车B 柱加速度曲线变化的对比图,通过仿真和实验加



速度的变化和变形的对比我们认为这种建模方法比较符合实际情况,能够用来进行后续的研究 和分析工作。



图 4 台车实验图



25 30 35 40

---- Simulation

3 逐级吸能梁有限元模型的建立

运用同样的材料和建模方法,我们建立了该吸能梁在48.5km/h的初始撞击速度下的有限元 模型,用来对逐级吸能梁的吸能特性进行研究。考虑到诱导槽在碰撞过程中的主要作用是用来 降低初始加速度峰值,对整个吸能过程贡献不大,因此在以上的吸能筒模型中去掉了诱导槽结 构。通过仿真计算,我们发现该模型被压缩到220mm时共吸收能量26kJ,平均碰撞力约为118kN。

4 筛选因子的 L12 正交实验设计

在轴向动态载荷的作用下,帽形薄壁吸能梁的吸能特性主要与截面形状和板厚等因素有关,本文所设计的吸能梁是在原纵梁结构上的改进,因此初选板厚、加强板距离碰撞前端面的距离、 点焊间距等共11个可能对吸能效果有较大影响的因素,并确定因素的两个水平。如图2所示, D1、D2分别是上下加强板距离吸能简前端的距离,P1、P2分别代表上下加强板距离U形板底 部的距离,S1、S2和S3则指的是盖板处和上下加强板处的焊点间距,T1、T2、T3以及T 4分别代表U形板和上盖板以及上下加强板的厚度。表2列出了各个因素的两个水平和实验设 计表格。在对实验结果进行时候将P1和S3两个影响极小的因素作为误差项进行了处理,方差 分析的结果列于图 6。通过这些分析可以初步评价各个因素的重要程度,从中选出显著性水平 较高的因素进行进一步的优化研究,从而节约计算成本。从P值大小可以看出,T1、T4的P值 均小于 0.01,即这两个因素对平均碰撞力的影响达到高度显著水平,T2、D2、S1的值均小于 0.05,即其影响达到显著水平,各因素影响的显著性对比如图6所示。



图 6 各因素的显著性对比



图 7 均匀拉丁方实验设计



| 表 1 L12 正交实验设计 | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|---------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| | D1 | D2 | P1 | P2 | S1 | S2 | S3 | T1 | T2 | Т3 | T4 | F _{me} |
| Lev el 1 | 15 0 | 15 0 | 60 | 0 | 20 | 20 | 20 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | |
| Lev el 2 | 10 0 | 50 | 80 | 20 | 40 | 40 | 40 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 107 |
| 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 141 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 124 |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 122 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 135 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 108 |
| 7 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 155 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 127 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 106 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 121 |
| 11 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 112 |
| 12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 111 |

5 均匀拉丁方实验设计

拉丁方实验设计,被人称为一种"充满空间的设计",它是将每个因素的设计空间都均匀地 划分开(所有因素都要有同样数目的分区),然后,这些水平随机地组合在一起,来指定用来定 义设计矩阵的 n 个点。而均匀拉丁方实验设计则是在拉丁方实验设计的基础上外加了一个均匀 性判据,使均匀性判据达最大值的拉丁方实验设计即为均匀拉丁方实验设计,因此其生成的 n 个设计点将更加均匀的分散在设计空间中,如图 7 所示。通过均匀拉丁方实验设计不但能减少 实验次数而且构造的代理模型模型精度较高。

6 响应表面模型与优化流程

6.1 响应表面模型

响应表面模型是结构优化中常用的一种代理模型,利用响应表面法构造代理模型时,首先 要确定近似函数形式,然后运用统计的试验设计方法在设计空间选择足够多的设计点,最后运 用最小二乘原理得到近似模型来拟合选定设计点上的分析结果。多项式响应表面的是响应表面 模型中常用的一种,其表达式为:

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m} \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j \ge i}^{m} \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \cdots$$
(1)

式中 x_i 是 m 维的自变量 X 的第 i 个分量, β_0 , β_i , β_{ij} 是未知参数,将他们按照一定的次 序排列可以构成列向量 β ,将按照实验设计理论采得的样本点处的自变量和响应值代入(1)式, 并写成向量乘积的形式可得如下方程组:

$$f(x^{i}) = X^{i} \beta i = 1,n$$
 (2)

其中 X^i 是由样本点 x^i 的各个分量,按照 β 中各对应分量次序排列而成的行向量,n为样本点的个数。由于(1)式要满足 $f(x^i) = y^i$,从而有:

$$X \cdot \beta = Y \tag{3}$$

其中向量矩阵 $X = [x_1, \dots, x_n]^T$, $Y = [y_1, \dots, y_n]^T$ 解得:

$$\boldsymbol{\beta} = \left[\boldsymbol{X}^{T}\boldsymbol{X}\right]^{-1}\boldsymbol{X}^{T}\boldsymbol{Y} \tag{4}$$

将(4)式回代入(1)式即可得到多项式响应表面模型。构造好模型后,可以采用决定系数 *R*²和调整的决定系数 *R*²编 等检验指标对模型的精度进行检验,它们的表达式如下:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_{i} - \overline{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2}}$$

$$\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2} (n - 1)$$
(5)

$$R_{adj}^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2} (n-1)}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2} (n-k-1)}$$
(6)

式中, n 是设计点的个数, k 是自由度, 其值为调整参数的个数减 1, y_i 、 \hat{y}_i 、 \overline{y}_i 分别是响

应量的实测值、响应量的预测值、以及响应量实测值的平均值。当 R² 和 R²_{adj} 越接近于 1 时,说 明近似模型的精确性越好。

当有效的响应表面构造成功后,应用传统的优化方法对该响应表面进行优化,然后对比响 应表面的优化值和实际响应值、如果达到收敛标准,则计算终止,得出优化解;否则,返回到 初始,更改设计空间,重新构造响应表面[4]-[7]。

6.2 优化流程

本文所要优化的五个参数中涉及到焊点间距这样的离散变量,因而选择采用两步优化的方法,即列举离散变量的可能取值,然后将连续变量进行与各个离散值进行组合,再对连续变量进行优化,具体的流程图如图8所示。

7 优化问题的数学模型

耐撞性表示结构抗碰撞性能的好坏,衡量薄壁构件耐撞性的指标很多,可以用比吸能、平均碰撞力、吸能量等多项指标可以衡量。平均碰撞力是碰撞力曲线在压缩位移上的算术平均值,它反映了薄壁构件吸能的整体情况。文中的微型车正碰时候的总动能约为110kJ。前纵梁作为主要的吸能部件,本文设计前纵梁大约在220mm的变形范围内吸收50%左右的能量^[2],即单个吸能梁大约在220mm的变形范围内吸收27.5kJ的能量。整个优化问题可以表示为如下模型:

$$\begin{array}{rll} & \text{Max} & F_{mean} \\ & \text{s.t} & 27.5 \le \text{E} \\ 1.5 \le \text{T1}, \text{T2}, \text{T3} \le 2.2 \\ & 0 \le \text{D2} \le 100 \\ & \text{S1=20}, 30, 35, 40 \end{array}$$

(7)

8 优化结果分析

8.1 连续变量的优化

当盖板的点焊间距取 40 的时候,问题简化为四个连续参数的优化问题。根据均匀实验设计的理论在设计空间内采样,共采得 25 个设计样本点,利用通用的显式有限元分析软件 Ls_dyna 为求解器,对逐级吸能梁的碰撞吸能特性进行分析。当得到响应量的近似模型之后可以采取传统的优化方法对该近似模型进行优化。平均碰撞力 *F_{mean}* 和吸收的总内能 E 的二次响应表面近似函数表达式如下:

 $F_{mean} = 10.207 + 25.33T1 - 204.223T2 + 260.985T4 + 65.926D2 + 28.809T1^2 + 68.379T2^2 - 41.415T4^2 + 27.95D2^2 - 12.074T1T2 - 39.62T1T4 - 19.42T1D2 - 14.59T2T4 + 3.733T2D2 - 20.787T4D2 \eqref{eq:started} (8)$

根据式(5)、式(6)以及采样值,计算得平均碰撞力 *F_{mean}*的决定系数 *R*²达到了 99.4%,调整的决定系数达到了 96.8%,而内能 E 的决定系数和调整的决定系数都超过了 95.3%,通过对决定系数和调整的决定系数的检验,表明该近似模型有效。对该有效的近似模型进行优化,最后在 T1=2.2, T2=2.2, T4=2.02, D2=70 的时候得到最优,其平均碰撞力为 144.2kN,内能 E 为 31.13kJ。而在该 Ls_dyna 计算的平均碰撞力为 143.4N,内能为 30.95kJ,其相对误差分别为 0.55%和 0.57%,达到收敛条件。

8.2 列举法优化离散变量

采用同样的方法对 S1 取 20、30、35 的时候进行优化,将 T1、T2、T4、D2 与 S1 不同值的

组合的优化解列于表 3,通过表 3 我们可以看出焊点间距为 20,30,35 和 40mm 的时候,对应 的吸能筒变形分别为 212,202,217 和 214mm.都小于预先设定的 220mm,达到了优化设计的 目的。

| S1 | | T2 | T4 | D2 | 优化角 | 屛 | 仿真解 | | |
|----|-----|------|------|----|------------------------|--------|------------------------|---------|--|
| | T1 | | | | F _{mean} (kN) | E (kJ) | F _{mean} (kN) | E (kJ) | |
| 20 | 2.0 | 1.98 | 1.81 | 50 | 146.8 | 31.16 | 145.9 | 30.0912 | |
| 30 | 2.2 | 2.2 | 1.6 | 50 | 153 | 31.0 | 151.7 | 30.039 | |
| 35 | 2.2 | 2.2 | 1.93 | 61 | 147 | 31 | 146.8 | 30.68 | |
| 40 | 2.2 | 2.2 | 2.02 | 70 | 144.2 | 31.13 | 143.4 | 30.995 | |

表3离散变量不同取值的优化结果

9 结论

本文针对微型客车前碰撞过程中,吸能长度短,吸能空间有限的特点,从减少吸能长度, 增大平均碰撞力,控制吸能过程的的角度。以某微型客车的前纵梁为基础了,设计了逐级吸能 薄壁结构,并建立了对应的有限元模型。运用了基于代理模型的方法对该薄壁结构的吸能特性 进行了优化,使该薄壁结构在较短的吸能长度范围内极大的提高了吸能能力,该方法能够很好 的解决离散变量的优化问题,节约计算成本,并为轻量化设计提供参考,具有较强的工程实用 价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] McNay II Gene H. Numerical Modeling of Tube Crash with Experimental Comparision. SAE Paper No.880898
- [3] Weirzbicki T, Abramowicz W. Development and implementation of special element for crash analysis. SAE paper No.880895
- [4] 廖兴涛,张维刚,李青,钟志华.响应表面法在薄壁构件的耐撞性优化设计中的应用研究.工程设计 学报。2006; 13 (5):
- [5] 任露泉。试验优化设计与分析. 长春: 吉林科学基础出版社, 2001.
- [6] YAMAZAKI K, HAN J. Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells. Advances in Engineering Software, 2000, 31: 425–434.
- [7] AVAILE M, CHIANDUSSI G, BEI INGARDI. Design optimization by response surface methodology: application to crashworthiness design of vehicle structures. Structural and Multidisciplinary Optimization,2002,24: 325-332.