

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.12.002

汽车悬架减振器缓冲块结构优化方法

万里翔¹, 余云龙¹, 陈守义², 李利平³, 上官文斌³

(1.西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031; 2.柳州日高汽车减振技术有限责任公司, 湖南 柳州 545000;
3.华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要:缓冲块是悬架系统中的重要零件, 对其结构进行合理的设计能够有效地提高汽车的平顺性。将缓冲块结构参数作为设计变量, 利用有限元计算模型计算出不同参数组合下缓冲块的性能, 进而建立缓冲块性能计算的响应面代理模型。以缓冲块的尺寸要求为设计变量, 缓冲块的性能指标最优为目标函数, 利用遗传算法对代理模型进行寻优处理。结果表明, 通过有限元模型计算得出的缓冲块性能数据与实体试验的数据基本吻合, 优化后的缓冲块性能更优。

关键词:缓冲块; 有限元仿真; 响应面模型; 遗传算法

中图分类号: U463

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)12-013-10

Optimization of the jounce bumper for suspension shock absorbers

WAN Lixiang¹, YU Yunlong¹, CHEN Shouyi², LI Liping³, SHANGGUAN Wenbin³

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;
2. Liuzhou Rigo Automotive Vibration Reduction Technology Co. Ltd., Liuzhou,
Hunan 545000, P. R. China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: The jounce bumper is an important part in the suspension system. Reasonable design of its structure can effectively improve the NVH(noise, vibration and harshness) of the car. With the structure parameters of the jounce bumper as design variables, the finite element calculation model was used to calculate the performance of the jounce bumper under different parameter combinations, and then a response surface proxy model for the jounce bumper performance calculation was established. The size requirement of the jounce bumper was taken as the design variable and the optimal performance index of the jounce bumper as the objective function to optimize the proxy model by the genetic algorithm. The results show that the performance data of the jounce bumper calculated by the finite element model is basically consistent with that of the physical test, and the jounce bumper optimized by the proposed method has better performance.

Keywords: jounce bumper; finite element simulation; response surface model; genetic algorithm

收稿日期: 2020-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11472107); 广东省高等教育教学改革项目(201737)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(11472107), and Higher Education Reform Program of Guangdong Province(2019A1515011612).

作者简介: 万里翔(1965—), 男, 副教授, 主要从事汽车设计、车辆振动与噪声研究, (E-mail) wanlx@home.swjtu.edu.cn。

通讯作者: 上官文斌, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车动力学, (E-mail)sgwb@scut.edu.cn。

悬架缓冲块位于汽车悬架系统中,与螺旋弹簧并联形成非线性的弹性元件,其力学性能直接影响整车的平顺性和操稳性^[1]。合理地设计缓冲块结构能够有效地提升汽车行驶的舒适性。

Dickson 等^[2]对缓冲块工作阶段橡胶的挤压特性进行了分析,总结出了缓冲块形状设计的一般原则和方法。Schudt 等^[3]以缓冲块的吸能特性为提升目标,设计了 3 种不同结构的缓冲块来改善其性能,但是这一改进依赖工程师的经验和时间,报道中没有提出优化缓冲块结构的方法。Sidhu 等^[4]研究了缓冲块在不同压缩条件下的疲劳特性,但并没有对缓冲块的结构进行优化。Caliskan 等^[5]、黄敏等^[6]和 Geisler 等^[7]计算了缓冲块的力-位移性能,研究了不同材料的本构模型对计算的影响,但没有对缓冲块的性能做出优化。黄舟等^[8]对由天然橡胶、丁基橡胶和发泡橡胶等典型工程橡胶制造的缓冲块进行了研究,探究了不同橡胶材料的压缩变形行为,使用缓冲吸能水平、缓冲系数和吸能效率来评价缓冲块的吸能特性,但仅考虑了材料的影响,并没有从结构方面进行优化,具有局限性。张志飞等^[9]以缓冲块的刚度曲线为目标,利用结构优化方法对汽车前保险杠缓冲块进行了结构优化设计。

综上所述,部分文章虽然分析了缓冲块的结构对其性能的影响,并根据工程经验提出了结构改进策略,但并未提出一种系统的优化方法来对缓冲块结构进行优化设计。笔者以悬架设计要求为基础,得出缓冲块性能的评价指标,使用结构优化方法对缓冲块的结构进行优化设计。以缓冲块的截面形状参数为设计变量,通过有限元仿真计算出不同结构缓冲块的性能参数,通过响应面法建立设计变量和性能参数的近似数学模型,以性能参数最优为目标,最后使用遗传算法解出最优的结构参数组合。所提出的方法对缓冲块的设计具有指导意义。

1 缓冲块性能评价指标

根据悬架设计的要求,悬架的力-位移曲线应为非线性弹性特性曲线,如图 1 所示。曲线中, D 点处的刚度较小,并且其附近的刚度变化也较小,以使汽车在良好道路行驶时具有较好的行驶平顺性。而当悬架变形比较大时,刚度急剧增大,这样悬架系统能够吸收更多的能量。螺旋弹簧和缓冲块并联,其中螺旋弹簧的刚度为线性,缓冲块的刚度曲线为非线性,如图 2 所示。

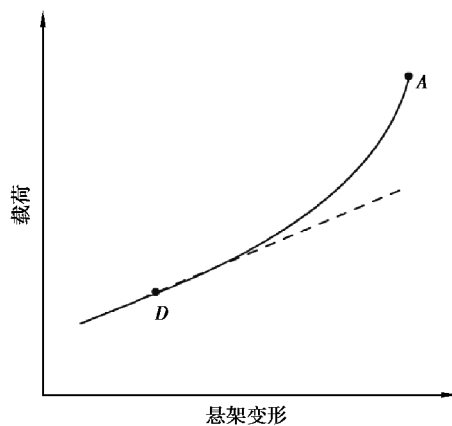


图 1 悬架弹性特性曲线

Fig. 1 Suspension elasticity curve

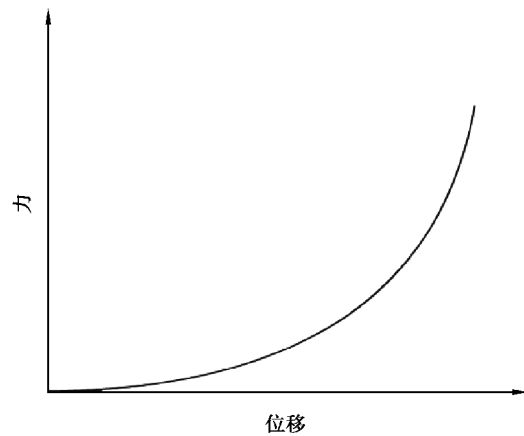


图 2 缓冲块刚度曲线

Fig. 2 Stiffness curve of jounce bumper

从缓冲块刚度曲线可以看出,主要的特性分为两个部分:①接触时低刚度——接触特性;②极限压缩后高刚度——吸能特性。本研究中使用这 2 个特性作为缓冲块性能的评价指标。

为了便于直观地衡量接触特性,定义悬架极限压缩量达到 50%时的力值大小作为评价接触特性的指标,力值越小,接触特性越好。

吸能特性可由压缩力-压缩量曲线下所包含的面积计算得出,即:

$$W = \int_0^{x_{\max}} F dx. \quad (1)$$

式中: F 为极限力值; W 为吸收的能量; x 为压缩量; x_{\max} 为极限压缩量。

在已报道的文献中还提出了其他几种评价吸能特性的指标^[10], 如缓冲系数 C 和吸能效率 E 。

缓冲系数 C 定义为给定的峰值力 F_{peak} 与在此峰值力下缓冲块可以吸收的能量 W 的比值, 即:

$$C = \frac{F_{\text{peak}}}{W} = \frac{F_{\text{peak}}}{\int_0^{x_{\max}} F dx} \quad (2)$$

缓冲材料的吸能效率 E 为缓冲结构所吸收的能量 W 与对应力值 F_{peak} 之比, 即:

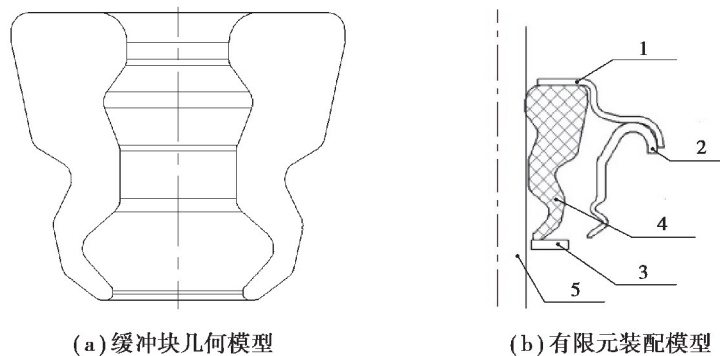
$$E = \frac{W}{F_{\text{peak}}} = \frac{\int_0^{x_{\max}} F dx}{F_{\text{peak}}} \quad (3)$$

这 3 个指标 W 、 C 和 E 都能反映出不同结构缓冲块的吸能特性。取其中 E 作为吸能特性的指标, E 越大, 吸能特性越好。

2 缓冲块性能计算与试验

2.1 缓冲块性能计算的有限元模型建立

由于缓冲块的模型是轴对称模型^[11], 采用 2D 轴对称模型进行计算。一悬架减振器缓冲块几何模型和有限元装配模型如图 3 所示。网格单元选择 CAX4R, 即轴对称线性缩减积分单元。线性缩减积分单元在数值上存在沙漏问题, 需要验证求解过程中系统伪应变能 (ALLAE) 与系统弹性应变能 (ALLSE) 的比值是否在 5% 以内^[12]。网格划分采用 1 mm × 1 mm 四边形网格, 共 737 个单元。相比于缓冲块的大变形, 上杯罩、防尘罩、压头、活塞杆的变形可以忽略不计, 故将其视为刚体。定义上杯罩、防尘罩、压头和活塞杆与缓冲块的接触均为面接触, 选择刚体为主面, 缓冲块为从面, 并选择有限滑移, 刚体与缓冲块的摩擦系数设为 0.2。随着压缩进行, 缓冲块产生自接触, 因此需要定义缓冲块的自接触, 设置自接触摩擦系数为 0.2。



1. 上杯罩; 2. 防尘罩; 3. 压头; 4. 缓冲块; 5. 活塞杆

图 3 缓冲块的几何模型和有限元装配模型

Fig. 3 Geometric model of jounce bumper and assembly model of finite element model

缓冲块常用的材料是天然橡胶。天然橡胶属于超弹性材料, 假设其不可压缩, 采用 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型, 通过单轴拉伸和压缩试验, 利用最小二乘法拟合得到其模型材料常数^[13-14], 如表 1 所示。

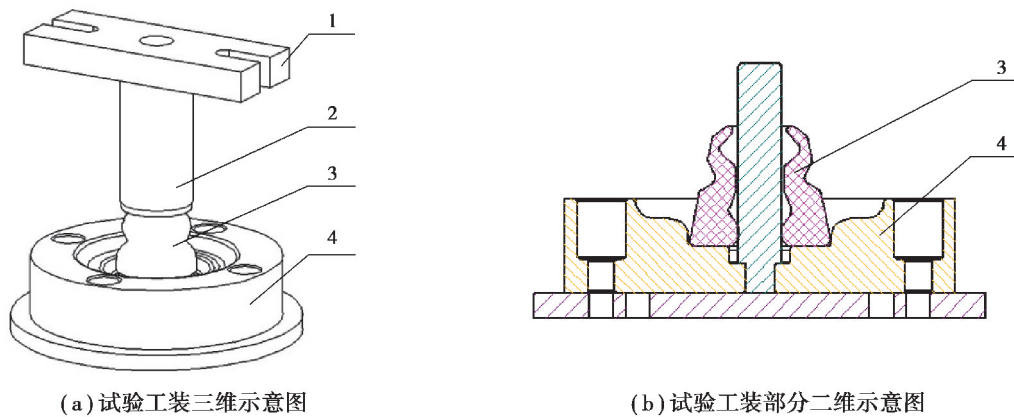
表 1 Mooney-Rivlin 模型材料常数
Table 1 Mooney-Rivlin material constants

材料常数	C_{10}	C_{01}	D_0
数值	0.538	0.135	0.000

2.2 缓冲块性能的测试方法

如图 4 所示为缓冲块刚度性能测试工装示意图。金属压头按照减振器导向座上端面的尺寸设计, 金属

底座按照上杯罩进行设计,其外轮廓尺寸相同。测试时,固定金属底座,将缓冲块样件装配在金属底座的导向杆上,金属压头装配在金属连接板上,金属连接板固定在机台上端,机台上端施加向下的位移载荷对缓冲块进行挤压。设备的力传感器安装在机台上端,记录压缩过程中压缩力和压缩量的数据。



1.金属连接板;2.金属压头;3.缓冲块样件;4.金属底座

图 4 测试缓冲块刚度性能的工装示意图

Fig. 4 Tooling diagram for testing the stiffness performance of the jounce bumper

2.3 有限元和试验结果对比

由于选择的线性缩减积分单元在数值上存在沙漏问题,提取计算过程中系统伪应变能(ALLAE)与系统弹性应变能(ALLSE)的值,绘制 ALLAE 与 ALLSE 的比值曲线,结果如图 5 所示。从图 5 可见,在整个分析过程中 ALLAE 与 ALLSE 的比值始终低于 5%,表明求解过程中沙漏问题并不严重。

有限元法计算的结果和试验结果见图 6。从图中可以看出,计算和试验结果吻合,说明有限元模型是正确的。

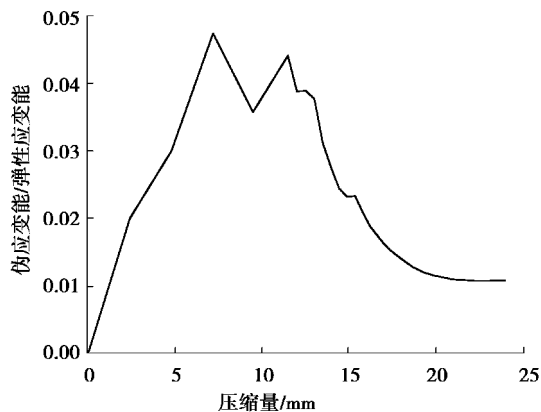


图 5 伪应变能与弹性应变能的比值

Fig. 5 Ratio of ALLAE to ALLSE

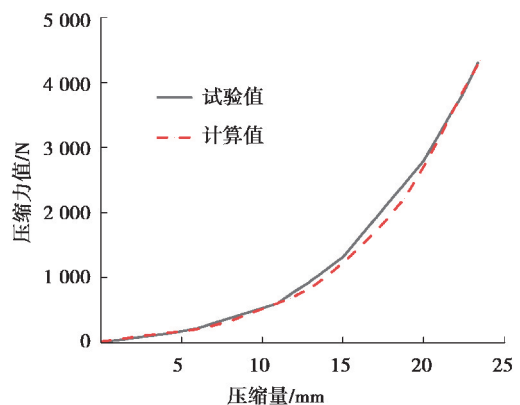


图 6 缓冲块刚度曲线的计算值与试验值

Fig. 6 Calculated and test results of stiffness

3 缓冲块性能影响因素分析

本研究中使用的分析方法是正交试验法^[15]。通过缓冲块外形结构参数的不同组合计算出不同的性能指标,借助正交试验法来筛选出权重最高的结构参数。

本研究的对象是某轻型轿车前悬架缓冲块。根据主机厂要求,缓冲块所受极限力值为 5 400 N,缓冲块高度为 49.4 mm。根据 Schudt 等^[3]的报道,高度在 40~60 mm 的缓冲块外部宜采用一个凹槽的设计,如图 7 所示。取其中 5 个尺寸作为正交设计的变量,各尺寸的变化范围如表 2 所示。

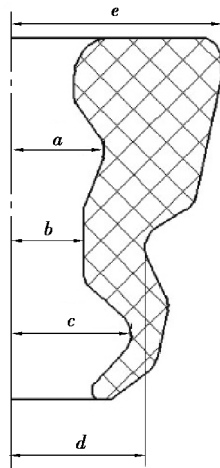


图 7 缓冲块结构参数示意图

Fig. 7 Structural parameter diagram of the jounce bumper

利用 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排正交试验^[15],各因素的水平如表 3 所示。

表 3 各因素的水平列表

Table 3 Values of the factors

水平数	a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	e/mm
1	12.00	13.50	10.50	16.50	27.50
2	12.50	13.88	10.88	17.00	27.88
3	13.00	14.25	11.25	17.50	28.25
4	14.00	15.00	12.00	18.50	29.00

表 4 为 5 因素 4 水平正交试验分配及结果。试验结果统计分析通常采用两种方法:直观分析法(极差分析法)和方差分析法。由于考虑的因素数较少,所以选用直观分析法对正交表计算结果进行分析^[15]。

表 4 结构参数正交试验分配及有限元计算结果

Table 4 Value assignment of structural parameter orthogonal test and results by the finite element calculation

试验 编号	缓冲块尺寸参数					吸能特性	接触特性
	a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	e/mm	$E/(\text{mJ} \cdot \text{N}^{-1})$	F/N
1	12.00	9.88	14.88	17.00	27.88	5.22	795.68
2	14.00	9.50	15.25	17.00	29.00	5.16	715.18
3	12.50	9.88	15.25	18.50	27.50	5.64	1 091.62
4	13.00	10.25	16.00	17.00	27.50	5.17	565.04
5	12.50	9.50	16.00	17.50	27.88	5.07	688.15
6	12.00	9.50	14.50	16.50	27.50	5.68	788.08
7	13.00	11.00	15.25	16.50	27.88	5.06	591.70
8	14.00	10.25	14.50	18.50	27.88	6.23	1 194.79
9	13.00	9.88	14.50	17.50	29.00	5.42	1 072.10

表 2 缓冲块的尺寸及其变化范围

Table 2 The sizes of the jounce bumper and their variation ranges

尺寸编号	定义	变化范围/mm
a	凹槽 1 半径	12.0~14.0
b	缓冲块内径	13.5~15.0
c	凹槽 2 半径	10.5~12.0
d	凹槽 3 半径	16.5~18.5
e	缓冲块外径	27.5~29.0

续表 4

试验 编号	缓冲块尺寸参数					吸能特性	接触特性
	a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	e/mm	$E/(\text{mJ} \cdot \text{N}^{-1})$	F/N
10	12.50	11.00	14.50	17.00	28.25	5.41	850.25
11	14.00	9.88	16.00	16.50	28.25	4.96	466.14
12	12.00	10.25	15.25	17.50	28.25	5.21	851.67
13	12.50	10.25	14.88	16.50	29.00	5.26	685.92
14	13.00	9.50	14.79	18.50	28.25	5.56	1 239.06
15	14.00	11.00	14.79	17.50	27.50	5.90	808.22
16	12.00	11.00	16.00	18.50	29.00	4.96	942.34

依据表 4 有限元计算的性能指标计算值,计算得到吸能效率 E 和力值 F 的直观分析表,如表 5、表 6 所示,分析得到评价指标吸能特性 E 和力值 F 对各结构参数的极差如图 8 所示。

表 5 吸能效率直观分析表

Table 5 Intuitive analysis table of energy absorption efficiency (mJ · N⁻¹)

性能指标计算值	a	b	c	d	e
K_{1j}	21.07	22.75	20.96	22.40	21.47
K_{2j}	21.38	21.94	20.97	21.58	21.24
K_{3j}	21.21	21.07	21.60	21.15	21.87
K_{4j}	22.26	20.17	22.40	20.80	21.33
ω_{1j}	5.27	5.69	5.20	5.60	5.37
ω_{2j}	5.35	5.49	5.24	5.39	5.31
ω_{3j}	5.30	5.27	5.40	5.29	5.47
ω_{4j}	5.57	5.04	5.60	5.20	5.33
R_j	0.30	0.65	0.36	0.40	0.06

表 6 压缩力值直观分析表

Table 6 Intuitive analysis table of compressive force value N

性能指标计算值	a	b	c	d	e
K_{1j}	3 377.76	3 905.25	2 531.84	3 252.96	3 430.47
K_{2j}	3 315.94	3 528.87	2 926.15	3 270.32	3 425.57
K_{3j}	3 467.93	3 250.18	3 420.17	3 407.12	3 297.42
K_{4j}	3 184.34	2 661.66	4 467.81	3 415.57	3 192.52
ω_{1j}	844.44	976.31	632.96	813.24	857.62
ω_{2j}	828.99	882.22	731.54	817.58	856.39
ω_{3j}	866.98	812.54	855.04	851.78	824.35
ω_{4j}	796.09	665.42	1 116.95	853.89	798.13
R_j	70.90	310.92	484.99	40.65	59.49

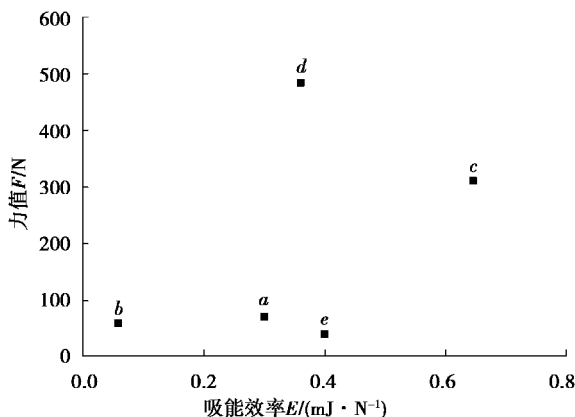


图 8 吸能特性与力值的极差分析结果

Fig. 8 Extreme results of energy absorption characteristics and force values

在表 5~6 中, K_{ij} 表示第 $j(j = a, b, c, d, e)$ 列因素第 $i(i = 1, 2, 3, 4)$ 水平的性能指标计算值之和; ω_{ij} 表示第 $j(j = a, b, c, d, e)$ 列因素第 $i(i = 1, 2, 3, 4)$ 水平的效应, 即性能指标计算值之和的平均值; 极差 R_j 为 ω_{ij} 最大值与最小值之差, R_j 值越大, 表明该因素对性能指标的影响越大。

从极差图中可以看出, 各因素对缓冲块性能影响大小的顺序是: 尺寸 $c >$ 尺寸 $d >$ 尺寸 $e >$ 尺寸 $a >$ 尺寸 b 。选取影响力最高的 3 个结构参数, 即尺寸 c 、尺寸 d 和尺寸 e , 进行下一步的响应面模型^[16]建立。

4 缓冲块性能优化方法

4.1 响应面模型的建立

为更好地建立响应面模型, 采用 Box-Behnken 设计^[17]对筛选出的结构参数重新进行分配试验。表 7 所示为分配方案及计算结果。

表 7 结构参数 Box-Behnken 试验分配及结果

Table 7 Value assignment of Box-Behnken test for structural parameters and calculated results of E and F

试验 编号	缓冲块尺寸参数			吸能特性	接触特性
	c/mm	d/mm	e/mm	$E/(mJ \cdot N^{-1})$	F/N
0	10.50	17.50	27.50	5.95	909.80
1	14.50	18.50	28.25	6.27	1 154.83
2	16.00	17.50	27.50	5.36	595.81
3	15.25	18.50	27.50	6.16	975.16
4	16.00	17.50	29.00	5.17	613.07
5	15.25	17.50	28.25	5.45	742.14
6	16.00	18.50	28.25	5.63	842.12
7	16.00	16.50	28.25	4.97	448.30
8	15.25	16.50	27.50	5.35	570.85
9	15.25	18.50	29.00	5.85	1 098.41
10	14.50	17.50	27.50	5.75	842.46
11	14.50	16.50	28.25	5.30	649.36
12	15.25	16.50	29.00	5.15	571.59
13	14.50	17.50	29.00	5.78	932.36

表中第 0 组为对照组,是初始设计结果。采用二阶多项式作为拟合响应面代理模型的函数形式,根据选择的 3 个主要结构参数,响应面代理模型可表示为:

$$E = a_0 + a_1c + a_2d + a_3e + a_4cd + a_5ce + a_6de + a_7c^2 + a_8d^2 + a_9e^2, \quad (4)$$

$$F = b_0 + b_1c + b_2d + b_3e + b_4cd + b_5ce + b_6de + b_7c^2 + b_8d^2 + b_9e^2. \quad (5)$$

通过 Design-Expert 软件拟合后的系数如表 8 所示。

表 8 响应面代理模型估计系数

Table 8 Estimation coefficient of response surface proxy model

估计系数	拟合数值 $E/(\text{mJ} \cdot \text{N}^{-1})$	估计系数	拟合数值 F/N
a_0	48.921	b_0	27 185.507
a_1	4.587	b_1	2 103.422
a_2	-0.607	b_2	-1 925.233
a_3	-5.131	b_3	-1 898.071
a_4	-0.102	b_4	-37.221
a_5	-0.096	b_5	-32.287
a_6	-0.036	b_6	40.838
a_7	-0.014	b_7	-23.604
a_8	0.102	b_8	44.800
a_9	0.126	b_9	30.342

上述构建的响应面代理模型,吸能效率的相关系数 r^2 值为 0.990 7,力值的相关系数 r^2 值为 0.999 1,这表示由响应面模型预测的吸能效率和力值与计算值差别较小。

为了验证代理模型的准确度,在设计区间内随机选择了 5 个测试样本点,由 ABAQUS 有限元软件计算获得其性能指标(FEA),与响应面模型式(4)~(5)计算值对比,结果如表 9 所示。

表 9 响应面模型测试样本点及相对误差

Table 9 Response surface model test sample points and relative errors

验证 编号	缓冲块尺寸参数			性能指标有限元计算值		响应面模型预测		相对误差/%	
	c/mm	d/mm	e/mm	$E/(\text{mJ} \cdot \text{N}^{-1})$	F/N	$E/(\text{mJ} \cdot \text{N}^{-1})$	F/N	吸能效率	力值
1	14.00	17.00	28.00	5.41	679.76	5.37	672.78	0.6	1.0
2	14.00	18.00	28.00	5.92	963.29	5.80	900.77	2.0	6.5
3	15.50	17.50	28.50	5.52	753.83	5.34	704.82	3.3	6.5
4	15.50	17.00	28.50	5.21	636.43	5.19	601.12	0.5	5.6
5	15.50	17.50	28.50	5.52	753.83	5.34	704.82	3.3	6.5

从表 9 可以看出,响应面模型的最大相对误差小于 10%,预测精度较高,可以代替有限元模型进行优化计算。

4.2 单目标遗传算法优化方法

为了更好地评价缓冲块的总体性能,定义性能指标 P 如下:

$$P = \frac{E - E_0}{E_0} + \frac{F_0 - F}{F_0}. \quad (6)$$

式中: E_0 是对照组的吸能效率值, F_0 是对照组的压缩力值。 P 值表示相对于对照组,吸能效率的增加量与压缩力值的减少量的总和。 P 值最大,说明性能越好。

因此结构参数优化设计的目标,即优化设计问题可以描述为:

$$\begin{cases} \max P \\ \text{s.t. } 14.5 \leq c \leq 16, \\ 16.5 \leq d \leq 18.5, \\ 27.5 \leq e \leq 29. \end{cases} \quad (7)$$

使用 isight 软件中单目标遗传算法^[18]进行优化,得出一个最优组合参数,如表 10 所示。

表 10 优化后的结构参数组合

Table 10 Optimized combination of structural parameters

c/mm	d/mm	e/mm
16.00	16.50	28.42

将优化后的参数组合输入到 ABAQUS 软件中进行计算,得出刚度曲线和吸能特性曲线并与对照组进行比较,结果见图 9。在恒定峰值力 5 400 N 压缩下,对照组吸能效率为 5.95 mJ/N,力值为 909.80 N;优化后的结构吸能效率为 4.97 mJ/N,力值为 466.88 N。优化后的缓冲块牺牲了 14.3% 的吸能特性,提升了 47.9% 的接触特性,综合作用使得缓冲块性能提升了 34.6%。

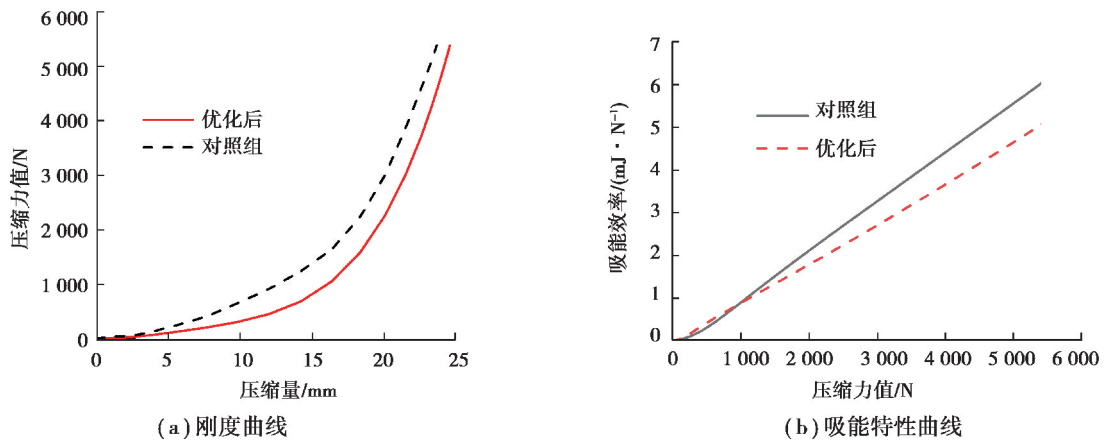


图 9 结构优化前后对比

Fig. 9 Performance before and after structural optimization

5 小 结

通过有限元仿真和试验,以及对缓冲块的性能进行研究,得出以下结论:

1)以天然橡胶作为缓冲块的材料时,其压缩力值随着压缩量增加而增加,当压缩量在总长度 40% 左右时压缩力值剧烈增加,力-位移曲线呈非线性。

2)改变缓冲块结构参数对其性能影响明显,凹槽的深度越浅,缓冲块的吸能特性越好,接触特性越差;外径越大,缓冲块吸能特性越好,接触特性越差。吸能特性和接触特性相互矛盾,取折中的参数组合效果最好。

参考文献:

- [1] Dickson D G. A primer on jounce bumper design using microcellular polyurethane, [J/OL]. SAE Technical Paper, 2004: 2004-01-1541 [2020-02-01]. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1541>.
- [2] Dickson D G, Schranz S, Wolff M. Microcellular polyurethane jounce bumper design and the effects on durability[J/OL]. SAE

- Technical Paper, 2005: 2005-01-1714 [2020-02-01]. <https://doi.org/10.4271/2005-01-1714>.
- [3] Schudt J A, Tsai M, Patil R, et al. Dual rate jounce bumper design[J/OL]. SAE Technical Paper, 2011: 2011-01-0791 [2020-02-01]. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0791>.
- [4] Sidhu R S, Ali A. Fatigue life of automotive rubber jounce bumper[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2010, 11: 012008.
- [5] Caliskan K, Konukseven I, Unlusoy Y S. Product-oriented material testing and FEA for hyperelastic suspension jounce bumper design[J]. International Journal of Design Engineering, 2010, 3(4): 374-391.
- [6] 黄敏,黄舟,贾东,等.基于压缩试验的两种橡胶材料本构模型分析[J].噪声与振动控制,2018,38(S2):483-486.
HUANG Min, HUANG Zhou, JIA Dong, et al. Analysis of constitutive models of two kinds of rubber materials based on compression test[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S2): 483-486. (in Chinese)
- [7] Geisler R L, Patil R, Schudt J, et al. Recent applications of Abaqus/explicit in GM Chassis CAE[Z/OL]. 2010[2020-02-01]. <https://pdfs.semanticscholar.org/4706/5bf24e94db9829d3142bc60b23023eb179ab.pdf>.
- [8] 黄舟,贾东,陈军红,等.工程橡胶压缩实验和缓冲特性分析[J].装备环境工程,2018,15(6):27-32.
HUANG Zhou, JIA Dong, CHEN Junhong, et al. Compression experiment and buffering characteristic analysis of engineering rubber products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(6): 27-32. (in Chinese)
- [9] 张志飞,李勋,徐中明,等.面向刚度曲线的汽车前保险杠缓冲块优化设计[J].重庆大学学报,2016,39(3):21-27.
ZHANG Zhifei, LI Xun, XU Zhongming, et al. The optimal design of the bumper absorber based on stiffness curve[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(3): 21-27. (in Chinese)
- [10] 计宏伟,王怀文.基于高速图像测量技术的缓冲材料缓冲性能的表征[J].振动与冲击,2011,30(9):216-220.
JI Hongwei, WANG Huaiwen. Characterization of cushioning properties of cushioning materials based on high-speed image measurement technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 216-220. (in Chinese)
- [11] 薛继明,吴晓庆,王焕功,等.有限元分析中轴对称问题研究与应用[J].机械工程师,2014(4):126-128.
XUE Jiming, WU Xiaoqing, WANG Huan Gong, et al. Research and application of axisymmetric problems in finite element analysis [J]. Mechanical Engineer, 2014 (4): 126-128. (in Chinese)
- [12] Dassault Systemes Simulia Corporation. Abaqus 6. 14 documentation [Z/OL]. 2014 [2020-02-01]. <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/index.html>.
- [13] Miller K. Testing elastomers for hyperelastic material models in finite element analysis [R/OL]. Ann Arbor, MI, USA: Axel Products Inc., 2000 [2020-02-01]. <http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf>.
- [14] 徐中明,袁泉,张志飞,等.基于超静定方程的橡胶材料本构模型参数识别[J].重庆大学学报,2017,40(2):1-9.
XU Zhongming, YUAN Quan, ZHANG Zhifei, et al. Parametric identification of constitutive model of rubber materials based on statically indeterminate equation [J]. Journal of Chongqing University, 2017,40(2): 1-9. (in Chinese)
- [15] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)
- [16] 刘文,王青松,林腾蛟,等.基于响应面试验设计的湿式离合器优化策略[J].重庆大学学报,2018,41(6):9-23.
LIU Wen, WANG Qingsong, LIN Tengjiao, et al. Optimization strategy of wet clutch based on response surface test design[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(6): 9-23. (in Chinese)
- [17] Ferreira S L C, Bruns R E, Ferreira H S, et al. Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 597(2): 179-186.
- [18] 吴立华,白洁,左亚军,等.基于 Matlab 的遗传算法在结构优化设计中的应用[J].机电工程技术,2017,46(10):44-47.
WU Lihua, BAI Jie, ZUO Yajun, et al. Application of genetic algorithm based on Matlab in structural optimization design[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(10): 44-47. (in Chinese)