

# 笔记本电脑脚垫参数优化设计

宋彦琦<sup>1</sup>, 沙 宁<sup>2</sup>, 程 鹏<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**针对不同橡胶制成的笔记本电脑缓冲脚垫进行单轴试验, 获取各种橡胶的强度参数。建立笔记本简易有限元模型, 研究橡胶材料缓冲脚垫在不同形状、大小、厚度及位置分布的情况下, 笔记本电脑在正面跌落条件下对硬盘的加速度响应。建立整机有限元模型, 进行整机的跌落试验测试分析, 验证简易模型的结论, 并得出优化的结果。

**关键词:**笔记本; 橡胶; 跌落; 优化设计; 缓冲脚垫

中图分类号: TB324

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)01-0089-05

## Optimal Design for Parameters of Buffer Footh on Laptop

SONG Yanqi<sup>1</sup>, SHA Ning<sup>2</sup>, CHENG Peng<sup>2</sup>

(1. School of Science, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The uniaxial compression test of the buffer fooths on laptop made by different rubbers was carried out so as to obtain their strength parameters. A simple finite element model for laptop was established to study the acceleration response of hard disk in drop of laptop when the rubbers differed in shape, size, thickness and distribution of locations. And then, a whole finite element model was established to do the drop test analysis, verify the results of the simple model and get the optimal results.

**Key words:** laptop; rubber; drop; optimal design; buffer foot

脚垫的材质、形状、大小及分布影响着笔记本电脑在受到诸如冲击、载荷、震动、跌落等情况下对硬盘损害的响应<sup>[1-2]</sup>。国内外学者对橡胶材料的研究已有很长的时间, 李晓芳、朱艳峰等<sup>[3-4]</sup>对超弹性材料的统计热力学模型和连续介质力学模型作了概括总结。邹雨等<sup>[5]</sup>对超弹性材料过盈配合的轴对称平面应力解答进行了研究, 推导了对于橡胶材料在平面应力过盈配合条件下的大变形解析解。Marckmann 和 Treloar 等<sup>[6-7]</sup>应用高斯统计理论描述了高分子网状结构橡胶材料的宏观力学行为, 进而得出一个关于橡胶大变形的统计理论。Rivlin<sup>[8]</sup>也得到了本质上与 Treloar 研究结果相同的结论。

本研究的目的是对笔记本电脑缓冲脚垫进行优化设计, 采用有限元仿真的手段, 选用合适的超弹性模型<sup>[9-11]</sup>并利用单轴拉伸实验确定模型参数, 对脚垫进行有限元分析, 得到针对几款不同笔记本电脑缓冲脚垫的最理想设计, 为笔记本电脑脚垫的设计提供理论指导和参考。

## 1 橡胶材料超弹性力学特性

超弹性是指试样在外力作用下产生远大于起弹性极限应变量的应变、在卸载时应变可自动恢复的现象。橡胶是由长的链状高分子组成的, 具有不同的任意结构, 这些分子由于热运动产生连续的布朗运动<sup>[12]</sup>。当

收稿日期: 2011-08-25

作者简介: 宋彦琦(1969—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士后, 主要从事固体力学理论及应用研究。

E-mail: yanqi\_song@sina.com

橡胶分子受到拉力伸张,然后又释放时,它们就会在自身热运动允许的范围内回缩到自由状态,这是橡胶能够承受较大的弹性形变并可恢复形变的主要原因<sup>[13]</sup>。为了用一个统一的物理量来表征橡胶的性质,人们提出应变能函数,它是应变或变形张量的标量函数,应变能函数对应变分量的偏导数就是相应的应力分量<sup>[14]</sup>。

$$[S] = \frac{\partial W}{\partial [E]} \quad (1)$$

其中:[S]—第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量;W—单位体积的应变能密度;[E]—为 Lagrangian 应变张量。

通过 Abaqus/CAE 软件对材料的初评估,本研究数值模拟选用二阶的多项式应变能模式,其 Polynomial 方程:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (2)$$

其中:N 是材料参数, $C_{ij}$  和  $D_i$  是同温度有关的材料参数。 $\bar{I}_1$ 、 $\bar{I}_2$  分别是第一、第二偏应变不变量。初始剪切模量  $\mu_0 = 2C_{01} + C_{10}$ ,  $J_{el}$  为弹性应变。

## 2 笔记本电脑缓冲橡胶参数优化分析及正交试验测试

### 2.1 笔记本电脑缓冲橡胶参数优化分析

实验设计以数值模拟的形式给出,从笔记本脚垫橡胶的材质硬度、厚度、尺寸、位置分布等几个方面分析其在笔记本跌落时对硬盘的影响。数值模拟的主要过程如图 1 所示。简化模型由四大部分组成,包括笔记本电脑硬盘、笔记本电脑底板、笔记本电脑脚垫和桌面(图 2)。

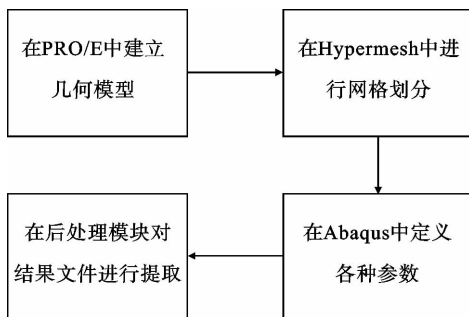


图 1 数值模拟的主要过程

Fig. 1 The sketch of the process for the simulation

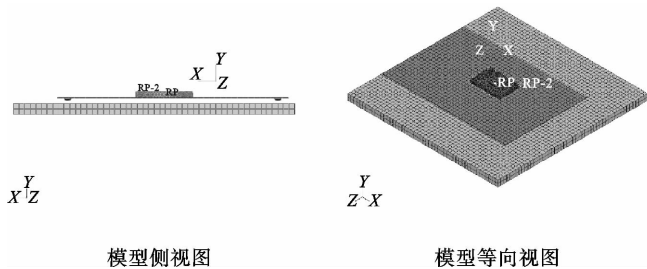


图 2 笔记本简易有限元模型

Fig. 2 The simple finite element model of laptop

表 1 单轴实验的条件参数表

Tab. 1 The parameters table of uniaxial compression test

硬度 / (°)	拉伸强度 / MPa	拉伸伸长 率 / %	摩擦 系数
63	8.5	296	0.5
70	8.2	259	0.3
81	7.2	135	0.2

表 2 简易模型参数表

Tab. 2 The parameters table of the simple model

零件名称	尺寸 / mm	密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	材料	属性	边界条件
硬盘	9.5 × 100 × 70	1.50 × 10 <sup>3</sup>	铝合金	刚体	粘在底板上
底板	410 × 270 × 1.8	1.29 × 10 <sup>3</sup>	镁铝合金	变形体	自由下落
脚垫	待定	1.08 × 10 <sup>3</sup>	橡胶	变形体	粘在底板上
桌面	500 × 500 × 20	7.00 × 10 <sup>2</sup>	木材	变形体	底边固定

橡胶材料参数由单轴拉伸实验得出(表 1)。在将要讨论的几个方面中,为了方便硬盘加速度的输出,将硬盘作为刚体约束住,并且定义一个参考点,输出参考点的 Y 方向的加速度。考虑了重力的影响,取重力加速度为 Y 方向 -9 800 mm/s<sup>2</sup>。考虑到笔记本电脑上部的质量,定义一个 2 kg 的质量点,耦合于底板的四周。分析开始时,除桌面以外的三部分均赋予落向桌面的初速度 1 000 mm/s,分析时间控制在 4 ms(达到最大加速度峰值)。简易模型参数如表 2 所示。

### 2.1.1 笔记本电脑脚垫的橡胶材质硬度分析

实验样本高度统一选取 2 mm 厚的正方形脚垫,对称分布于距离四个角 25 mm 的位置进行实验。实验用材的材质硬度分别为 60,70 和 80 度。模型单元参数如表 3 所示。

图 3 是笔记本电脑加速度与橡胶脚垫硬度的关系。(图中纵坐标,用 100g 作单位, $g = -9\ 800\text{ mm/s}^2$ ,下同。)由图 3 可以看出,橡胶脚垫的硬度为 60,70 和 80 度,提取的硬盘加速度分别对应  $7.481 \times 10^6$ ,  $6.868 \times 10^6$  和  $7.252 \times 10^6\text{ mm/s}^2$ ,同硬度为 60 度或 80 度的橡胶脚垫相比、使用硬度为 70 度的橡胶脚垫,硬盘加速度可以降低 8.2% 左右,说明橡胶脚垫偏软和偏硬都不利于缓解对硬盘的损坏。

### 2.1.2 笔记本电脑脚垫不同厚度的分析

将脚垫材料固定为统一用硬度为 80 度的橡胶,位置依然为距底板四个角 25 mm 距离对称分布。模型中单元尺寸大体不变,唯一不同的是随着脚垫高度的增加,脚垫的单元个数会有所增加。脚垫的形状依然采用正方形,平面尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。实验中,为了避免网格的过度变形导致的不收敛,为四个脚垫分别定义自接触。

数值试验分别针对厚度为 1.5,2.0,2.1,2.2,2.3,2.4,2.5 和 3.0 mm 的脚垫进行了跌落研究(图 4)。由图 4 可见,脚垫的厚度对笔记本电脑在跌落时硬盘的加速度影响很大,从厚度为 1 mm 时的  $1.44 \times 10^7\text{ mm/s}^2$  到厚度为 3 mm 时的  $2.5 \times 10^6\text{ mm/s}^2$ ,加速度降低了 82.6%。当脚垫厚度达到 2.4 mm 时,加速度已经不再有明显的变化,说明脚垫厚度为 2.4 mm 的笔记本跌落的时候,笔记本的底板已经不会触及到地面,此时的硬盘加速度峰值会大大地降低,这就保证了硬盘不会被破坏。

### 2.1.3 不同尺寸笔记本电脑脚垫的分析

实验采用截面为正方形的脚垫,正方形的边长在各个跌落过程中由 7 mm 逐渐以 1 mm 的单元长度递增至 18 mm,脚垫的厚度采用 2 mm(此时底板触地,便于更加清楚分析优化幅度),从而提取硬盘跌落时的加速度。数值试验结果如图 5 所示。

表 3 简易模型单元参数表

Tab.3 The parameters table of the simple finite element model

部件名称	单元特征尺寸 /mm	单元个数	单元类型
硬盘	4.0	14 787	C3D4
底板	0.9	30 000	C3D8R
正方形脚垫	0.5	1 824(单个)	C3D8R
桌面	10.0	5 000	C3D8R

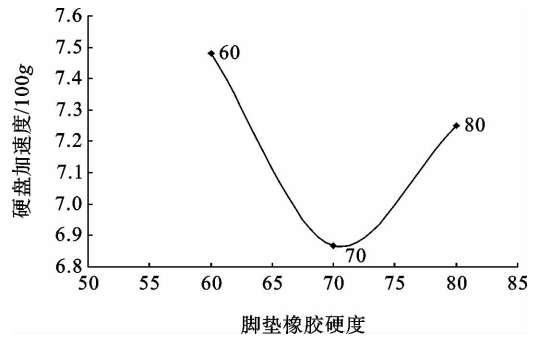


图 3 笔记本电脑加速度与橡胶脚垫硬度的关系

Fig.3 The relationship between acceleration and the hardness of foot

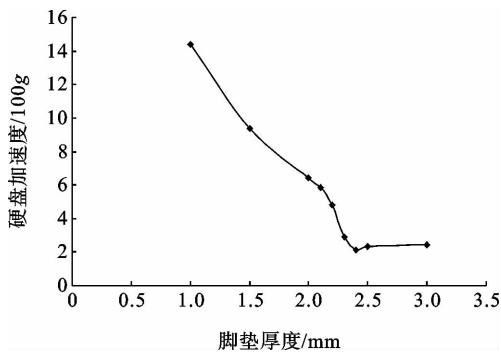


图 4 笔记本电脑加速度随脚垫厚度变化曲线图

Fig.4 The acceleration change with the thickness of foot

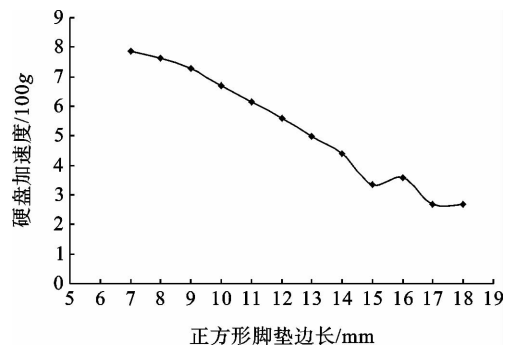


图 5 硬盘加速度随脚垫大小的变化曲线图

Fig.5 The acceleration change with the size of foot

由图 5 可见,随着脚垫大小的变化,硬盘在跌落时的加速度变化也很大。从最大  $7.858 \times 10^6 \text{ mm/s}^2$  到最小  $2.675 \times 10^6 \text{ mm/s}^2$ ,加速度降低了 66%,可见脚垫大小是影响硬盘跌落时加速度曲线的一个重要因素。由图 5 可以看出:即使脚垫的厚度达不到之前所讨论的 2.4 mm,也可以通过加大脚垫尺寸的方法,达到减小硬盘加速度的效果,使笔记本在跌落过程中底板不会触及桌面。

### 2.1.4 脚垫在笔记本电脑底板位置分布的分析

取 7 组正方形脚垫对称分布的情况,2 组正方形脚垫和长方形脚垫组合分布的情况进行分析。定义脚垫中心距笔记本底板边缘的垂直距离分别为  $a$  和  $b$ ,则对于脚垫对称分布的情况有  $a = b$ 。脚垫分布情况如表 4 所示。数值模拟中采用的脚垫厚度均为 2.2 mm,在此厚度进行跌落试验时,笔记本的底板会触及桌面,试验结果见图 6。

从图 6 中可以清楚地看到,笔记本电脑脚垫在底板位置分布的不同对笔记本电脑在跌落过程中的影响较大,是一个重要的因素。从脚垫距底板边缘 20 mm 时的硬盘加速度为  $5.201 \times 10^6 \text{ mm/s}^2$ ,到脚垫距底板边缘 40 mm 时硬盘加速度为  $1.425 \times 10^6 \text{ mm/s}^2$ ,加速度值减小了 72%,脚垫位置的调整对笔记本硬盘保护起到了很好的优化作用。

表 4 脚垫位置分布表

Tab. 4 The foot distributions of laptop

脚垫形状	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	脚垫尺寸 /mm
正方形	10	10	10 × 10
正方形	15	15	10 × 10
正方形	20	20	10 × 10
正方形	25	25	10 × 10
正方形	30	30	10 × 10
正方形	35	35	10 × 10
正方形	40	40	10 × 10
正方形 + 长方形	30	30	10 × 10
	2.5, 30	30	20 × 5
正方形 + 长方形	30	30	10 × 10
	30	2.5, 30	20 × 5

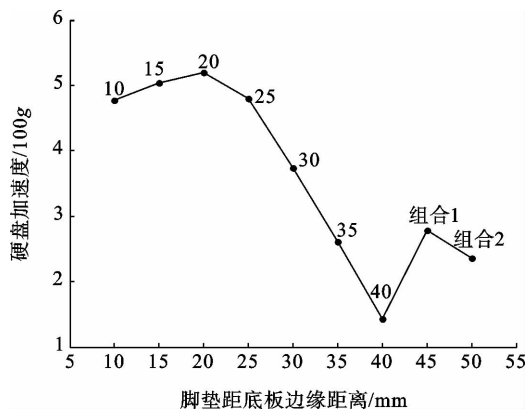


图 6 硬盘加速度随脚垫位置分布变化曲线图

Fig. 6 The acceleration change with the distribution of foot

## 2.2 笔记本电脑正交试验数值分析

整体模型的数值模拟实验选取 17 英寸的 G770 机型(图 7)。模型从高度为 30 cm 的地方自由下落,实验过程中采用正交试验设计法,以减小实验模拟的规模。实验中所涉及的影响因素如表 5 所示。如图 8 所示,脚垫在底板  $X$  方向和  $Z$  方向的位置分布用  $D_x/L_x$  和  $D_z/L_z$  表示,其中  $D_x$  为  $X$  方向上两脚垫的距离; $L_x$  是底壳  $X$  方向的长度; $D_z$  是  $Z$  方向上两脚垫的距离; $L_z$  是底壳在  $Z$  方向上的长度。

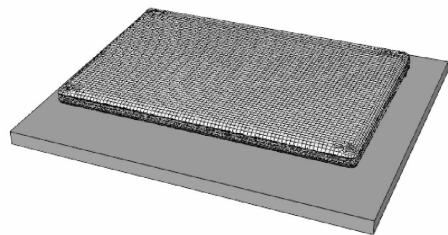


图 7 笔记本电脑整机有限元模型图

Fig. 7 The whole finite element model of laptop

表 5 影响因素表

Tab. 5 Influential factor table of foot

水平	因素	硬度 / (°)	厚度 /mm	尺寸 / (mm × mm)	$X$ 方向位置分布	$Z$ 方向位置分布
1		60	1	10 × 10	0.6	0.6
2		70	2	12 × 12	0.7	0.7
3		80	3	15 × 15	0.8	0.8

如图 9、图 10 所示,脚垫在底壳 X 方向的位置分布对笔记本电脑跌落过程影响最大,当脚垫在底壳 X 方向上分布越向内,硬盘加速度越小。脚垫的厚度对笔记本硬盘加速度的影响相对次之,脚垫越厚,硬盘加速度越小。脚垫的材质硬度也是个重要因素,当橡胶的硬度为 70 度的时候,硬盘可达到加速度最小。而脚垫在底壳 Z 方向上的分布和脚垫大小对笔记本硬盘加速度影响较小。

### 3 结论

基于市面上的笔记本电脑缓冲橡胶进行了研究,通过对笔记本简易和整机有限元模型进行分析,得出不同

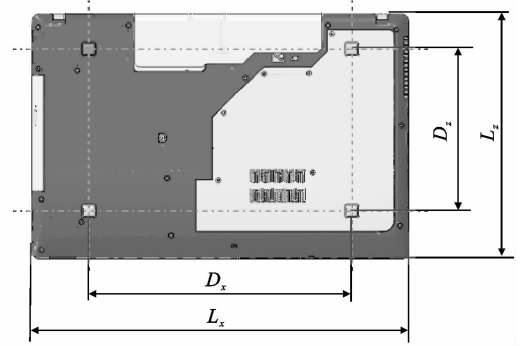


图 8 脚垫在底板位置分布示意图

Fig. 8 The sketch of foot distributions in the laptop

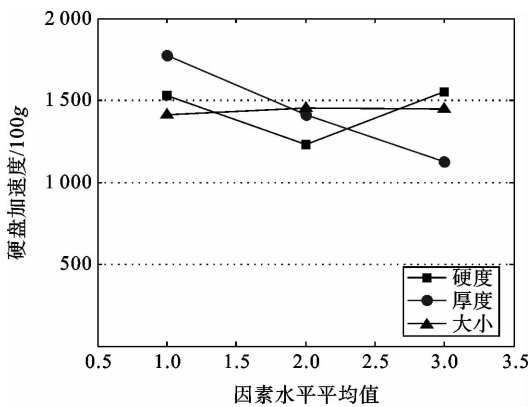


图 9 硬度、厚度、大小差值折线图

Fig. 9 The polyline of hardness, thickness, size

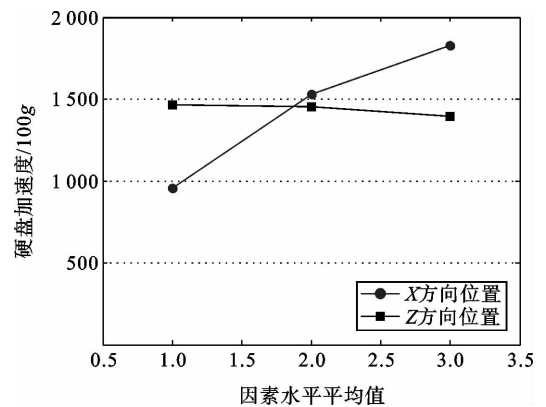


图 10 X 方向、Y 方向差值折线图

Fig. 10 The polyline of position in X, Y direction

条件下各种脚垫在笔记本跌落过程中对硬盘的保护程度。本文仅研究了笔记本电脑以正面四脚着地的方式跌落情况下的硬盘响应,在现实生活中,笔记本的跌落方式多种多样,这些情况对笔记本动态可靠性的研究同样至关重要,还有待进一步研究。

### 参考文献:

[1]于峰. 橡胶支座的性能与应用[J]. 建设科技,1997,6(4):32-34.  
YU Feng. Study on the steady of rubber and its application[J]. Journal of Construction Technology,1997,6(4):32-34.

[2]刘锦春,姜尚奇,陈忠海,等. 橡胶与金属粘接性能的影响因素[J]. 粘接研究报告与专论,2003,24(5):10-12.  
LIU Jinchun,JIANG Shangqi,CHEN Zhonghai,et al. Factors of influencing bonding properties of rubber and metal[J]. Research Report and Monograph of Bond,2003,24(5):10-12.

[3]李晓芳,杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体,2005,15(1):50-58.  
LI Xiaofang,YANG Xiaoxiang. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. China Elastomerics,2005,15(1):50-58.

[4]朱艳峰,刘锋,黄小清,等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业,2006,53(2):119-125.  
ZHU Yanfeng,LIU Feng,HUANG Xiaoqing,et al. Constitutive model of rubber material[J]. China Rubber Industry,2006,53(2):119-125.

[5]邹雨,庄茁,黄克智. 超弹性材料过盈配合的轴对称平面应力解答[J]. 工程力学,2004,21(6):72-83.  
ZOU Yu,ZHUANG Zhuo,HUANG Kezhi. The solutions of axisymmetric plane stress for a hyperelastic material interference problem[J]. Engineering Mechanics,2004,21(6):72-83.

[6]MARCKMANN G,VERRON E. A theory of network alteration for the Mullins effect[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2002,50:2011-2028.